بررسی عملکرد حفاظ‌های میانی و کناری در اثر برخورد کامیون تک محوره

محمد نوروزی شویر [1]، مسعود پلاسی[*2]

1- دانش آموخته راه و ترابری، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران

2- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشکدگان فنی، دانشگاه تهران، mpalas@ut.ac.ir

خلاصه

مقاله حاضر به بررسی نیاز به استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی به‌منظور بهبود عملکرد حوزه‌های حفاظ در اطراف جاده‌ها و ایجاد امنیت بیشتر در محیط‌های جاده‌ای می‌پردازد. این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار LS-DYNA، عملکرد سه نوع حفاظ متداول (بتنی، گاردریل و کابلی) را در برابر برخورد با یک کامیون تک محور با سرعت 80 کیلومتر در ساعت و زاویه برخورد 15 درجه مورد ارزیابی قرار می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که حفاظ کابلی در انتهای 0/5 ثانیه تحلیل، عملکرد ایمنی بهتری نسبت به دو حفاظ دیگر داشته و میزان دوران خودرو، شتاب منفی وارده به سرنشین و سرعت برخورد سرنشین به داخل کابین در برخورد با حفاظ کابلی، کمتر از حفاظ گاردریل و حفاظ بتنی بوده است. همچنین، در مطالعه مرحله‌ای بعدی، رفتار حفاظ‌ها مورد بررسی قرار گرفته و نتایج نشان می‌دهد که حفاظ کابلی بیشترین طول تخریب را داشته و انعطاف این حفاظ ممکن است در مناطقی با فضای کمتر برای انعطاف مشکل‌ساز شود. علاوه بر این، انعطاف یا جابجایی حفاظ بتنی بیشتر از حفاظ گاردریل بوده است. این تحقیق به نیازمندی به توجه به وضعیت و شرایط محلی و انتخاب مناسب حفاظ‌ها برای بهبود ایمنی و عملکرد در محیط‌های جاده‌ای اشاره می‌کند.

کلمات کلیدی: حفاظ میانی و کناری، گاردریل، حفاظ کابلی، نیوجرسی، مدلسازی برخورد، اجزاء محدود، شبیه‌سازی برخورد، LS-DYNA، کامیون تک محوره 8000 کیلوگرمی

1. مقدمه

بزرگراه‌ها به‌عنوان شریان‌های حیاتی در سیستم حمل‌ونقل جاده‌ای جهت افزایش کارایی و امنیت در جابه‌جایی وسایل نقلیه و حمل‌ونقل کالاها مطالعه می‌شوند. بااین‌وجود، احداث بزرگراه‌های ایده‌آل به علت محدودیت‌های جغرافیایی و اقتصادی ممکن نیست. در بسیاری از مناطق، توپوگرافی ناهموار و ویژگی‌های طبیعی غیر مساعد مانع ایجاد بزرگراه‌های کاملاً ایده‌آل می‌شوند. به همین دلیل، اقدامات جایگزینی نیاز است تا ایمنی جاده‌ها حفظ شود و رانندگان و مسافران در معرض خطراتی ناشی از موانع و حوادث جاده‌ای قرار نگیرند. یکی از راهکارهای مؤثر برای ایجاد ایمنی در بزرگراه‌ها، استفاده از حفاظ‌های جاده‌ای است. این حفاظ‌ها علاوه بر جلوگیری از تصادف با موانع ناگهانی مانند تخته‌سنگ و ساختمان‌ها، وظیفه حفظ وسایل نقلیه منحرف‌شده از مسیر اصلی و جلوگیری از سقوط وسیله نقلیه به دره‌ها و آب‌های عمیق را نیز دارند.

در این پژوهش، به بررسی نقش بسیار مهم حفاظ‌های جاده‌ای در حفظ ایمنی جاده‌ها و کاهش خطرات حادثه‌های جاده‌ای پرداخته می‌شود. همچنین، اهمیت اقتصادی استفاده از این سازه‌ها در مقایسه با آثار خسارت‌زا و هزینه‌های احتمالی

حوادث جاده‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. این پژوهش به دنبال ارائه رویکردهای نوین در طراحی و استفاده از حفاظ‌های جاده‌ای برای بهبود ایمنی جاده‌ها و شبکه حمل‌ونقل عمومی است. حفاظ میانی و کناری در جاده‌ها دو عامل مهم در ایمنی راه‌ها و حفاظت از رانندگان و سایر کاربران جاده دارند. این دو عامل اساسی، در طراحی و مدیریت جاده‌ها و شبکه حمل‌ونقل، نقش بسیار حیاتی ایفا می‌کنند. در این مقاله، به مقایسه حفاظ میانی و کناری در جاده‌ها پرداخته شده و اهمیت هرکدام مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.

حفاظ میانی به معنای ایجاد تقسیم‌بندی فیزیکی بین جهت‌های حرکت مختلف در جاده است. این حفاظ معمولاً با استفاده از باریکه‌ها، آستانه‌ها و فاصله‌گذاری میان جهت‌های مختلف جاده، مانند جداکننده‌های بتنی، تیرها و زیرسازی‌های خاکی ایجاد می‌شود. حفاظ میانی دارای مزایای زیر است:

- جداکردن جهت‌های حرکت: حفاظ میانی می‌تواند جهت‌های حرکت مختلف را از یکدیگر جدا کند که باعث کاهش تصادفات از نوع برخورد سر با سر می‌شود؛
- راهنمایی ترافیک: حفاظ میانی می‌تواند به رانندگان کمک کند تا جهت صحیح خود را در جاده انتخاب کنند و روند ترافیک را بهبود بخشند؛
- حفظ امنیت رانندگان: حفاظ میانی می‌تواند امنیت رانندگان را در برابر خطرات مانند اتومبیل‌های در حال عبور از جهت مخالف، حیوانات و اشیا غیرمنتظره تا حدی افزایش دهد.

حفاظ کناری به ایجاد ساختارها و تسهیلات در کنار جاده اشاره دارد تا از رانندگان و کاربران جاده در مقابل خطرات حفاظت شود. مثال‌هایی از حفاظ کناری شامل موارد زیر است:

- شانه: شانه معمولاً در کنار جاده قرار می‌گیرند و می‌توانند جداکننده‌های ترافیکی و محافظ جاده باشند. آن‌ها می‌توانند از ورود غیرمجاز به جاده جلوگیری کنند و در کنارها به رانندگان اجازه بدهند تا در صورت لزوم متوقف شوند؛
- پیاده‌روها و مسیر دوچرخه‌سواری: حفاظ کناری می‌تواند شامل ساخت پیاده‌روها و دوچرخه‌سواری‌ها در کنار جاده باشد. این ساختمان‌ها برای افزایش ایمنی رانندگان و عابران پیاده و دوچرخه‌سوار بکار می‌روند؛
- نشانه‌ها و راهنمایی‌ها: حفاظ کناری می‌تواند شامل نصب نشانه‌های راهنمایی، چراغ‌های راهنما و دستگاه‌های روشنایی باشد تا رانندگان را هدایت کند و از روند ترافیک آگاهی داشته باشند.

در کل، حفاظ میانی و کناری هر دو در جاده‌ها اهمیت بالایی دارند و باید با همکاری نقشه‌برداران، مهندسان و مقامات مربوطه طراحی و پیاده‌سازی شوند تا بهبود ایمنی جاده‌ها و کاهش تصادفات منجر شوند. همچنین، توجه به شرایط جاده‌ای محلی، ترافیک و نیازهای محیطی نیز برای انتخاب صحیح بین حفاظ میانی و کناری ضروری است.

در دهه 1960 میلادی معیارهایی جهت ارزیابی عملکرد حفاظ‌های جاده‌ای ارائه شد که به‌مرور پیشرفته‌تر شدند. پس از سال‌ها محققان در استانداردهایی همچون MASH و پیش از آن NCHRP350 راه‌های مختلفی را برای ارزیابی عملکرد حفاظ‌های جاده‌ای ارائه کردند. گزارش NCHRP350 که توسط موسسه ASHTO تدوین‌شده است، شامل آزمایش‌هایی جهت ارزیابی عملکرد حفاظ‌های جاده‌ای نظیر حفاظ بتنی، گاردریل و حفاظ‌های کابلی بوده است. این آزمایش‌ها از نوع آزمایش‌های میدانی هستند که در هر مرحله از آن‌ها رفتار وسیله نقلیه و حفاظ تحت شرایط آزمایش در ابعاد واقعی موردبررسی قرار می‌گیرد و سپس جهت بهبود عملکرد حفاظ تغییراتی پس از تحلیل عملکرد آن انجام می‌گیرد و مجدداً مورد آزمایش قرار می‌گیرد. این روند تا رسیدن به نتیجه مطلوب تکرار می‌شود [1].

آزمایش‌های میدانی برای ارزیابی عملکرد، نیازمند تکرار آزمایش تا رسیدن به نتیجه مطلوب است که کاری زمان‌بر و از نظر اقتصادی هزینه بر است. همچنین در طول آزمایش کنترلی بر روی شرایط حاکم بر آزمایش وجود ندارد و اندازه‌گیری پارامترهای تحلیل رفتار وسیله نقلیه و حفاظ‌ها به‌سختی به دست می‌آید. به همین دلیل است که محققان برای بررسی و ارزیابی عملکرد حفاظ‌های جاده‌ای و یافتن شرایط بهینه به روش‌های پیچیده عددی برای شبیه‌سازی تصادفات روی آوردند.

با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی عددی مشکلات ناشی از آزمایش‌های میدانی را می‌توان از میان برد. به‌عنوان مثال اگر در هر بار تغییر پارامترهای مربوط به حفاظ‌ها، مدل‌سازی تصادف دوباره انجام شود، تأثیر مثبت و منفی این تغییرات را می‌توان به دست آورد، در این شرایط بدون نیاز به تکرار آزمایش میدانی و با استفاده از نرم‌افزارهای شبیه‌سازی این نتایج را می‌توان با حداقل هزینه به دست آورد. بااین‌حال استفاده از آزمایش‌های میدانی را نمی‌توان به طور کل رد کرد؛ زیرا این آزمایش‌ها جهت ارزیابی و اعتبارسنجی نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری نیاز است. در این صورت شبیه‌سازی نرم‌افزاری تعداد آزمایش‌های میدانی موردنیاز را به حداقل می‌رساند.

2. مروری بر ادبیات موضوع

تحقیقات ایمنی کنار جاده‌ای در طول 50 سال گذشته پیشرفت فراوانی داشته است و گام‌های اساسی در بهبود وضعیت ایمنی راه‌ها و آزمایش‌های میدانی لازم برای ارزیابی حفاظ‌های 50 سال گذشته برداشته‌شده است. اگرچه آزمایش میدانی تمام مقایسه برجسته‌ترین و معتبرترین روش ارزیابی حفاظ‌های جاده‌ای است ولی استفاده از روش‌های تحلیلی برای طراحی و ارزیابی سخت‌افزارهای ایمنی نیز روش جدیدی به شمار نمی‌رود. یکی از موفق‌ترین روش‌ها در طراحی و بهبود عملکرد حفاظ‌های جاده‌ای استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود است که از قدیمی‌ترین روش‌ها و ابتدایی‌ترین روش‌های طراحی این تجهیزات است [2].

اوایل دهه 1960 میلادی محققان در آزمایشگاه هوانوردی کرنل مکانیک برخورد وسیله نقلیه و گاردریل را مورد بررسی قراردادند. آن‌ها ابتدا مدل‌های تحلیلی ساده‌ای را با استفاده از اجزا فنر و تیر ساختند تا مسائل دینامیکی وسیله نقلیه و مقاومت حفاظ موردبررسی قرار دهند. با توجه به نتایج این مطالعه بسیاری از مشکلاتی که هم‌اکنون نیز در ارتباط با بحث حفاظ‌ها مطرح است برای اولین بار مشاهده شد [2]. محققان سازمان کار و امور اجتماعی نیویورک با کمک آزمایشگاه هوانوردی کرنل بر روی کنترل وسیله نقلیه در شرایط مختلف تحقیقی را انجام می‌دادند. آن‌ها موفق به مدل‌سازی وسیله نقلیه شدند که به‌صورت گسترده در ایمنی کنار جاده‌ای مورداستفاده قرار گرفت [3].

در سال 1991 FHWA حمایت مالی سه پروژه به‌منظور افزایش قابلیت مدل‌سازی برخورد حفاظ‌های جاده‌ای را بر عهده گرفت که هر سه پروژه باهدف دستیابی به برنامه اجزاء محدود غیرخطی آغاز شدند. نتیجه این پروژه‌ها نرم‌افزار اجزاء محدود و سه‌بعدی LS-DYNA درزمینه تحلیل و بررسی عملکرد حفاظ‌ها بود [2]. در سال 1996 نیز محققان آزمایشگاه حمل و نقل مینسوتا نیز با استفاده از امکانات آزمایش میدانی توانستند نتایج برخورد سه تیپ خودرو پیکاپ 2000 کیلوگرمی، خودرو سواری 800 کیلوگرمی و کامیون تک محوره 8000 کیلوگرمی را در مواجهه با حفاظ بتنی طاحی شده توسط این مرکز بررسی نمایند [4]. در سال 2000 میلادی نیز تحقیقی در دانشگاه سینسیناتی ایالات‌متحده انجام گرفت که روندی برای شبیه‌سازی دقیق برخورد وانت پیکاپ به حفاظ دو موج با پایه‌های قوی بود که روش شبیه‌سازی آن را با جزئیات کامل ارائه کردند. این روش به حل سه مسئله اصلی در مدل‌سازی که شامل اتصال سپری به لقمه، اندرکنش دینامیکی بین پایه‌ها و خاک و مدل‌سازی شرایط مرزی حفاظ و استفاده از فنر در شبیه‌سازی این موارد، پرداخته است [5].

در سال 2004 نیز مدل المان محدود حفاظ دو موج اصلاح‌شده و وانت پیکاپ 2000 کیلوگرمی به‌منظور ارزیابی اثر انواع لقمه‌های چوبی (شیاردار و بدون شیار) بر عملکرد محافظ در هنگام برخورد موردمطالعه قرار داده‌شده است. مقایسه بین زاویه انحراف و میزان دوران خودرو در مدل و آزمایش میدانی تطابق بسیار خوبی را میان نتایج نشان داد. بر اساس نتایج این شبیه‌سازی، دستگاه‌های با لقمه چوبی شیاردار در مقایسه با نوع بدون شیار، احتمال واژگونی خودرو را کاهش می‌دهند و درنتیجه عملکرد مناسب‌تری خواهند داشت [6].

آتاهان و بونین نیز در سال 2006 در پژوهشی برخورد کامیون تک‌محوره 8000 کیلوگرمی را با گاردریل دو موج مورد بررسی قراردادند. آنها با استفاده از نرم‌افزار LS-Dyna شبیه‌سازی خود را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که گاردریل

دو موج برای مهار کامیون تک‌محوره مناسب نیست و با استفاده از اضافه نمودن عنصر اضافی به این نوع حفاظ جاده‌ای باعث بهبود عملکرد آن در مقایسه باحالت عادی شدند [7]. رید و فالر در سال 2007 به بررسی نتایج حاصل از برخورد کامیون تک‌محوره (S8000) با حفاظ بتنی نیوجرسی پرداختند. آنها به بررسی مشکل غلتیدن وسیله نقلیه از روی حفاظ بتنی پرداختند و راهکاری را برای طراحی ظاهری و کاربردی این نوع حفاظ ارائه دادند [8]. همچنین در سال 2007 پرادیپ و همکاران به جهت به روزرسانی و اعتبار سنجی مدل المان محدود کامیون تک محوره F800 را مورد بررسی قرار دادند و نتایج برخورد این وسیله نقلیه با حفاظ های بتنی قابل حمل را با استفاده از نتایج آزمایش FHWA مورد بررسی قرار دادند. در نهایت آنها مواردی مانند تقویت ریل قاب، دمپر تعلیق جلو و سیستم فرمان را جهت بهبود عملکرد این وسیله نقلیه در برخورد با حفاظ بتنی قابل حمل را پیشنهاد دادند [9].

در سال 2010 نیز در دانشگاه نبراسکا با همکاری سازمان حمل‌ونقل نبراسکا گزارشی را تحت عنوان توسعه مدل اجزای محدود مواد کابل حفاظ کابلی منتشر کرد. هدف این گزارش توسعه یک مدل بهبودیافته از مواد حفاظ کابلی برای استفاده در نرم‌افزار LS-DYNA بود و معیارهایی برای تحلیل در مورد پیشرفت اهداف این پژوهش مورداستفاده قرار گرفت. این معیارهای عبارت‌اند از: 1- کشش و رفتار خمشی کابل مدل‌سازی شده دارای حداکثر تفاوت 10٪ نسبت به آزمایش‌های میدانی باشد؛ 2- مدل پیشنهادی باید عملکرد بهتری نسبت به مدل موجود داشته باشد؛ 3- مدل باید به‌آسانی ساخته شود. درنهایت حفاظ کابلی مورد ارزیابی آزمایش‌های میدانی قرار گرفت و نتایج مدل‌سازی نرم‌افزار در پارامترهایی همچون تنش، انتشار موج خم کابل و سختی بافه‌های مطابقت بالایی با رفتار آزمایش‌های میدانی داشتند [10].

در سال 1393 آرش شهابی کیا حفاظ‌های مختلفی ازجمله حفاظ دو موج با لقمه‌های چوبی و فولاد، حفاظ سه موج با لقمه‌های چوبی و فولادی که به‌صورت گسترده در ایران استفاده می‌شوند را با استفاده از مدل‌سازی اجزاء محدود مدل‌سازی کرد و نحوه عملکرد این حفاظ‌ها را باهم مورد مقایسه قرارداد. نتایج نشان داد که تمامی حفاظ‌های سه موج و دو موج در ممانعت از عبور خودرو به محدوده پشت حفاظ‌ها موفق عمل کردند و هم‌چنین حفاظ‌های با لقمه چوبی پایه قوی بهترین عملکرد را داشتند [11].

زین و همکاران نیز در سال 2015 نیز در پژوهشی پایداری حفاظ های بتنی را در برخورد با پیکاپ 2000 کیلوگرمی بررسی کردند و در نهایت ابعاد بهینه ای برای حفاظ بتنی جهت عملکرد بهینه این حفاظ را به دست آوردند. . این مطالعه نشان می دهد که ارتفاع 813 میلی متر، عرض پایه 600 میلی متر و عرض بالای 240 میلی متر ابعاد بهینه برای یک مانع بتنی هستند [12]. آتاهان در سال 2016 در پژوهشی آزمایش سطح 4 گزارش NCHRP350 را برای کامیون تک محوره 8000 کیلوگرمی و سیستم حفاظ انتقالی پل با استفاده از شبیه سازی نرم افزار LS-Dyna انجام داد. نتایج مطالعه شبیه‌سازی نشان داد که ساختار انتقالی برای مهار و هدایت یک کامیون 8000 کیلوگرمی مناسب است. همچنین مشخص شد که مسیر پس از برخورد کامیون، مقادیر خطر برای سرنشین، انحرافات و شرایط خروج بسیار شبیه به آنچه که از ساختار انتقال مشابهی که قبلاً تحت شرایط سطح 4 تست تصادف آزمایش شده بود، مشابه است [13].

همپتون و گابلر در سال 2013 به بررسی گاردریل ها و حفاظ‌های فلزی اصلاح شده مطابق با آزمایش سطح سوم NCHRP350 برای خودروی پیکاپ 2000 کیلوگرمی انجام دادند. نتایج این آزمایشات نشان داد که با حذف پایه‌های گاردریل مقدار ایمنی در تصادف با این نوع حفاظ به شدت کاهش می یابد [14]. همچنین تنگ و همکاران نیز در سال 2016 به بررسی حفاظ گاردریل W شکل پرداختند که این حفاظ به عنوان پر کاربردترین حفاظ جاده‌ای در سراسر جهان شناخته می‌شد. آنها با استفاده از نرم افزار شبیه سازی LS-Dyna به بررسی و ارزیابی عملکرد این نوع حفاظ در هنگام برخورد وسایل نقلیه پرداختند. در این مطالعه چهار شبیه‌سازی تست تصادف برای ارزیابی قابلیت تصادف حفاظ گاردریل W شکل طبق استاندارد اروپایی EN 1317 انجام شد. نتایج نشان داده‌اند که خواص خاک بر شدت ضربه تأثیر نمی‌گذارد، اما بر عرض عملیاتی گاردریل تأثیر می‌گذارد [15].

در سال 2019 نیز براسکی و همکاران با استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی LS-DYNA پژوهشی باهدف دستیابی به قابلیت تصادف حفاظ کابلی در هنگام برخورد وسیله نقلیه باری سنگین وزن 38 تن انجام دادند. یک مدل عددی از دستگاه‌های ایمنی با یک تست تصادف در مقیاس کامل توسعه و تأیید شد. بر اساس این مدل محاسباتی، مجموعه‌ای از تست‌های تصادف مجازی انجام شد که در آن خودروی بار سنگین تحت شرایط مختلف ضربه با مانع برخورد می‌کند. برخی از موارد با نتیجه تصادف واقعی که در بزرگراهی در لهستان رخداده است مقایسه شد که نتایج مطابقت بالایی داشت [16].

براسکی در سال 2020 در پژوهشی در مورد خواص خمشی 3 × 7 طناب سیم 19 میلی‌متری که معمولاً در موانع کابل جاده استفاده می‌شود، ارائه می‌کند. درمجموع 19 آزمون آزمایشی انجام شد. علاوه بر این، دو مدل عددی سه‌بعدی غیرخطی از طناب سیم با استفاده از پرتو و عناصر محدود جامد توسعه داده شد. بر اساس این مدل‌ها، چهار شبیه‌سازی عددی انجام شد. نتایج عددی در مقابل نتایج تجربی تائید شد و توافق بسیار خوبی به دست آمد. نتیجه اصلی تحقیق تعیین رابطه لنگر-انحنا برای سیم در نظر گرفته‌شده است. تأثیر پیش کشش بر عملکرد طناب موردبحث قرارگرفته است. نتایج عددی در این مقاله به‌تفصیل مورد تجزیه‌وتحلیل قرارگرفته است، ازجمله رفتار طناب سیم تحت خمش و تجزیه‌وتحلیل تنش‌های مقطعی و تماسی. پیشنهادهایی در مورد نوع المان محدود برای مدل‌سازی سیم طناب نیز ارائه‌شده است. نتایج را می‌توان به‌عنوان‌مثال در شبیه‌سازی عددی تست موانع کابل استفاده کرد [17].

در سال 2023 نیز یومروتاش و همکاران نیز در مطالعه ی به بررسی عملکرد یک سیستم هیبریدی (RHB) تجدیدپذیر از نوع F شکل پرداختند. این حفاظ از ترکیب حفاظ گاردریل فولادی و حفاظ بتنی F شکل تشکیل شده بود. جهت بررسی و تعیین قابلیت انعطاف و ایمنی سیستم هیبریدی از مدل سازی سیستم آونگ در LS-Dyna استفاده شده است. اعتبار سنجی مدل نیز با استفاده از نتایج تست TB11 به دست آمده است. در نتیجه تجزیه و تحلیل، در حالی که راحتی یک حفاظ بتنی پس از ضربه را فراهم می کند، RHBها از نظر ایمنی نزدیک به مانع فولادی عمل می کنند [18].

مومن و همکاران در سال 2023 در مطالعه ای عوامل مؤثر بر شدت آسیب تصادفات شامل حفاظ‌های جاده‌ای میانی از جمله تأثیر ویژگی‌های حفاظ و ویژگی‌های هندسی آن‌ها در بزرگراه‌های بین ایالتی وایومینگ را بررسی کردند. با ترکیب داده‌های میدانی حفاظ‌های میانی موجود با داده‌های تصادف در بزرگراه‌های بین ایالتی وایومینگ، یک مدل لاجیت چند جمله‌ای (لاجیت مختلط) با پارامترهای تصادفی از شدت آسیب برآورد شد. این رویکرد روش‌شناختی امکان تغییر پارامترهای مدل برآورد شده را به‌طور تصادفی در مشاهدات تصادف برای محاسبه ناهمگونی با توجه به ویژگی‌های راننده، ویژگی‌های جاده و ویژگی‌های خودرو فراهم می‌کند. نتایج تخمین نشان داد که حفاظ بتنی نصب شده در شیب های جانبی جلو با تصادفات آسیب شدید همراه است [19]. براسکی و همکاران نیز در سال 2023 در پژوهشی به بررسی حفاظ کابلی پیش تنیده در برخورد خودرو به این حفاظ پرداختند. آنها دریافتند که انرژی جذب شده توسط خودرو و قطعات فرعی حفاظ کابلی مانع از عبور خودرو از این حفاظ می شود. در نهایت این مطالعه عنوان میدارد که حفاظ کابلی ایمن ترین نوع حفاظ است [20].

3. روش تحقیق

باتوجه‌به محدودیت‌های گسترده در سرعت و زوایا وسایل نقلیه در زمان برخورد با حفاظ‌های جاده‌ای و عدم امکان مدل‌سازی تمامی شرایط، ارزیابی عملکرد حفاظ‌ها باید با کاهش تعداد آزمایش‌ها و به شکل عملی و اقتصادی انجام شود. به‌منظور محدودکردن و عملی‌کردن این شرایط، گزارش NCHRP350 از شدیدترین و عملی‌ترین شرایط با انواع وسایل نقلیه و سایر ملزومات برای ارزیابی عملکرد حفاظ‌ها استفاده کرده است.

در نظر گرفته‌شده که در شرایط مختلف، انتظار از سطح عملکرد حفاظ‌های جاده‌ای متفاوت است، بنابراین گزارش NCHRP350 برای ارزیابی حفاظ‌ها شش سطح مختلف تعریف کرده است. سطح ششم شامل شدیدترین شرایط آزمایشی است. به‌عنوان‌مثال، حفاظی که برای جاده‌های با سرعت طراحی کم و حجم ترافیک کم تعبیه‌شده است، فقط نیاز به گذراندن سطوح یک یا دو آزمایش از گزارش NCHRP350 دارد. همچنین حفاظ‌های مخصوص استفاده در بزرگراه‌ها باید معیارهای سطوح سه آزمایش را با موفقیت پشت سر بگذارند [21].

به‌عنوان‌مثال، در جدول 1 نشان داده‌شده است که گزارش NCHRP350 شش سطح را برای ارزیابی حفاظ‌ها در نظر گرفته است. سطوح پایین‌تر برای ارزیابی تجهیزات نصب‌شده در جاده‌های بااهمیت کمتر و سرعت طراحی کمتر استفاده می‌شوند، درحالی‌که آزمایش‌های سطوح بالاتر برای ارزیابی حفاظ‌های نصب‌شده در جاده‌های با سرعت طراحی بالاتر به کار گرفته می‌شود. دلیل اصلی ارائه چندین سطح مختلف برای انجام آزمایش‌های میدانی، مطابقت سطح عملکرد مورد انتظار از حفاظ با ظرفیت تحمل حفاظ انتخابی است [21و22].

جدول 1- سطوح آزمایش NCHRP350

سطح آزمایش	شماره آزمایش	شرایط برخورد		
		وسیله نقلیه	اسمی سرعت برخورد (کیلومتر بر ساعت)	زاویه برخورد اسمی (درجه)
1	10-1	820C	50	20
	10-1 (اختیاری)	700C	50	20
	11-1	2000P	50	25
2	10-2	820C	70	20
	10-2 (اختیاری)	700C	70	20
	11-2	2000P	70	25
3	10-3	820C	100	20
	10-3 (اختیاری)	700C	100	20
	11-3	2000P	100	25
4	10-4	820C	100	20
	10-4 (اختیاری)	700C	100	20
	11-4	2000P	100	25
	12-4	8000S	80	15
5	10-5	820C	100	20
	10-5 (اختیاری)	700C	100	20
	11-5	2000P	100	25
	12-5	3600V	80	15
6	10-6	820C	100	20
	10-6 (اختیاری)	700C	100	20
	11-6	2000P	100	25
	12-6	36000T	80	15

در میان آزمایش‌های مورداستفاده، آزمایش‌های سطح سه به‌عنوان متداول‌ترین آزمایش‌ها برای ارزیابی حفاظ‌های جاده‌ای نصب‌شده در حاشیه بزرگراه‌ها و خیابان‌های با سرعت طراحی بالا محسوب می‌شوند؛ بنابراین، تمامی حفاظ‌های نصب‌شده در بزرگراه‌ها باید معیارها و ضوابط ارائه‌شده در این سطح آزمایش را رعایت کنند تا بتوان در مورد عملکرد ایمن آنها در هنگام برخورد وسایل نقلیه منحرف‌شده از سواره راه اطمینان حاصل کرد. منتظر هستیم که حفاظ‌هایی که معیارهای سطح سه از آزمایش‌های NCHRP350 را ارضا می‌کنند، در خیابان‌های اصلی (شریانی) گسترده‌ای و بزرگراه‌های با سرعت بالا نیز عملکرد قابل‌قبولی داشته باشند.

سیستم حفاظ مطلوب، سیستمی است که بیشترین حمایت را با کمترین هزینه برای منطقه موردنظر فراهم می‌آورد. این سیستم همچنین باید در برخورد با وسایل نقلیه سبک، انعطاف‌پذیری بالایی داشته باشد تا بتواند وسیله نقلیه را در برگیرد و بخشی از انرژی حاصل از برخورد را با تغییر شکل خود جذب کند. این اقدام می‌تواند میزان شتاب وارده به سرنشینان را کاهش دهد و درنتیجه ایمنی آنها را افزایش دهد. همچنین در برخورد با وسایل نقلیه سنگین، باید بدون گسیختگی وسیله نقلیه را به سطح جاده بازگرداند؛ بنابراین، حفاظ جاده‌ای نیاز به تعادل بین انعطاف‌پذیری و مقاومت دارد. در جدول زیر، معیارهای انتخاب حفاظ مناسب به‌صورت خلاصه آورده شده است.

جدول 2- معیارهای انتخاب حفاظ مناسب

معیار	شرح
قابلیت عملکرد حفاظ	قابلیت هدایت وسایل نقلیه منحرف‌شده به مسیر اولیه
تغییر شکل (تغییر مکان)	تغییر شکل مورد انتظار حفاظ نباید از حد مجاز و در دسترس بیشتر شود.
شرایط محل	وسعت منطقه هموار بدون مانع، شیب شیروانی، فاصله حفاظ از لبه سواره‌رو و...
مطابقت سازگاری	قابل اتصال بودن
هزینه چرخه عمر	حفاظ‌های استاندارد معمولاً قیمتی ثابت دارند؛ ولی حفاظ‌های با عملکرد خیلی خوب هزینه زیادی دارند.
هزینه نگهداری	منظم: تعداد کمی از سیستم‌ها نیازمند نگهداری به‌صورت منظم هستند
	بعد از برخورد: عموماً حفاظ‌های انعطاف‌پذیر و نیمه صلب نیازمند تعمیر بیشتری نسبت به دستگاه‌های صلب با عملکرد بالا هستند.
	ذخیره مواد: عدم استفاده از دستگاه‌های مختلف در یک ناحیه فضای کمتری را برای انبار مواد می‌طلبد.
	سادگی: طراحی ساده در کنار کم‌هزینه‌بودن می‌تواند به‌وسیله افراد غیرمتخصص نیز تعمیر شود.
زیبایی	در برخی موارد ظاهر حفاظ نیز از موارد موردتوجه است.
تجربه منطقه‌ای	سوابق عملکردی حفاظ‌ها در هر منطقه معیار خوبی برای انتخاب نوع حفاظ در آن منطقه است.

این پژوهش باهدف بررسی و ارزیابی عملکرد حفاظ‌های جاده‌ای در شرایط مختلف و انتخاب بهترین نوع حفاظ برای شرایط خاص مناطق ترافیکی و هندسی مشابه است. این تحقیق اهمیت زیادی دارد، زیرا تأمین ایمنی جاده‌ها و کاهش خطرات برخورد وسایل نقلیه با حفاظ‌ها از اهداف اصلی مسئولین راه‌وترابری است.

هدف اول تحقیق شناخت دقیق‌تر و بررسی سه نوع حفاظ متداول در کشور، یعنی حفاظ‌های بتنی (نیوجرسی)، گاردریل و حفاظ کابلی است. این شناخت به انجام آزمایش‌های میدانی دقیق‌تر کمک می‌کند و اطلاعات ارزشمندی در مورد عملکرد این حفاظ‌ها در شرایط واقعی جاده‌ها ارائه می‌دهد. هدف دوم انتخاب بهترین نوع حفاظ برای شرایط خاص مناطق ترافیکی و هندسی موردنظر است. این انتخاب می‌تواند بهبود ایمنی راه‌ها و کاهش خطرات برخورد را تضمین کند. هدف سوم ایجاد مرجعی برای مدل‌سازی اجزاء محدود حفاظ‌های جاده‌ای در مواجهه با وسایل نقلیه سنگین و مقایسه عملکرد حفاظ‌های متداول در این شرایط و با وسایل نقلیه مختلف است. این کار می‌تواند به توسعه و بهبود حفاظ‌ها و ایجاد حفاظ‌های با عملکرد بهتر در مواجهه با وسایل نقلیه سنگین کمک کند. به‌طورکلی، این تحقیق بهبود ایمنی جاده‌ها و افزایش اطلاعات ما در مورد عملکرد حفاظ‌های جاده‌ای را در شرایط واقعی ترافیکی و جاده‌ای هدف قرار می‌دهد و می‌تواند به تصمیم‌گیری‌های اساسی در زمینه ایمنی جاده‌ها کمک کند.

4. نتایج

4.1. پارامترهای رفتاری وسیله نقلیه

4.1.1. میزان چرخش خودرو

میزان چرخش خودرو حول محورهای سه‌گانه گذرنده از مرکز جرم آن، نشان‌دهنده نحوه تغییر جهت خودرو در هنگام برخورد با حفاظ است. این میزان چرخش به عوامل مختلفی مانند نوع حفاظ، سرعت خودرو و زاویه برخورد بستگی دارد.

4.1.2. انحراف (Yaw angle)

میزان انحراف خودرو (Yaw angle) یا زاویه خروج خودرو از حفاظ، نشان‌دهنده تغییر جهت خودرو در هنگام برخورد است. این زاویه با افزایش سرعت خودرو و زاویه برخورد افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در برخورد یک خودرو با سرعت 100 کیلومتر بر ساعت با حفاظ گاردریل، زاویه خروج خودرو در زاویه برخورد 30 درجه، حدود 20 درجه خواهد بود. این میزان چرخش می‌تواند باعث خروج خودرو از مسیر خود و برخورد با سایر وسایل نقلیه یا موانع دیگر شود.

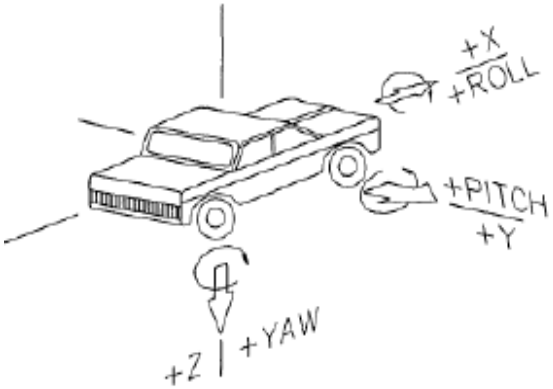
4.1.3. دوران (Roll angle)

میزان دوران خودرو (Roll angle) یا پتانسیل واژگونی خودرو، نشان‌دهنده احتمال واژگون شدن خودرو در هنگام برخورد است. این زاویه با افزایش ارتفاع مرکز جرم خودرو و افزایش سرعت خودرو افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در برخورد یک خودرو با ارتفاع مرکز جرم 1 متر با حفاظ گاردریل، زاویه دوران خودرو در زاویه برخورد 30 درجه، حدود 10 درجه خواهد بود. این میزان چرخش می‌تواند باعث واژگون شدن خودرو شود.

4.1.4. چرخش (Pitch angle)

میزان چرخش خودرو (Pitch angle) نشان‌دهنده تغییر ارتفاع خودرو در هنگام برخورد است. این زاویه با افزایش ارتفاع مرکز جرم خودرو و افزایش سرعت خودرو افزایش می‌یابد. به عنوان مثال، در برخورد یک خودرو با ارتفاع مرکز جرم 1 متر با حفاظ گاردریل، زاویه چرخش خودرو در زاویه برخورد 30 درجه، حدود 5 درجه خواهد بود. این میزان چرخش می‌تواند باعث تماس خودرو با زمین شود.

در مجموع، میزان چرخش خودرو در هنگام برخورد با حفاظ، تأثیر زیادی بر ایمنی خودرو و سرنشینان آن دارد. طراحی حفاظ‌های طولی باید به گونه‌ای باشد که میزان چرخش خودرو را در هنگام برخورد به حداقل برساند.



شکل 1- زوایای دوران وسیله نقلیه حول محورهای سه‌گانه گذرنده از مرکز جرم آن

4.1.5. میزان کاهش سرعت خودرو در اثر برخورد با حفاظ‌ها

به‌طورکلی هرچه میزان سرعت خودرو پس از برخورد با حفاظ‌ها کمتر باشد کنترل آن راحت‌تر است، در نتیجه موجب ایمنی بیشتر سرنشینان وسیله نقلیه می‌شود. در این بخش سرعت وسیله نقلیه در زمان تحلیل 0/5 ثانیه مورد بررسی قرار می‌گیرد و سرعت وسیله نقلیه در برخورد با هر سه حفاظ با یکدیگر مقایسه می‌شود.

4.1.6. میزان تغییرات شتاب طولی خودرو در اثر برخورد با حفاظ‌ها

تغییر ناگهانی شتاب خودرو عاملی بسیار مهم در ایمنی سرنشینان خودرو است و با استفاده از دو متغیر سرعت طولی برخورد سرنشینان (OIV) و مقدار شتاب کاهشی منفی (ORA) می‌توان میزان خطر برای سرنشینان خودرو را سنجید. این دو متغیر را می‌توان با استفاده از نمودار شتاب طولی خودرو محاسبه کرد که در این بخش آمده است. روند محاسبه هر دو متغیر در پیوست آورده شده است.

5. نتیجه گیری

به‌منظور بررسی صحت مدل‌سازی که در این مطالعه انجام‌گرفته است بهترین روش مقایسه نتایج مدل‌سازی با آزمایش‌های میدانی انجام شده بر روی حفاظ‌ها است. اگر نتایج مدل‌سازی برخورد وسیله نقلیه با حفاظ‌ها مطابق با گزارش NCHRP350 با آزمایش‌های میدانی همخوانی خوبی داشته باشد می‌توان گفته مدل‌سازی به‌صورت صحیح انجام شده است. در صورت صحت مدل‌سازی ارزیابی شده می‌توان با اعمال تغییراتی بدون انجام آزمایش‌های میدانی دیگر حفاظ‌ها را مورد ارزیابی قرارداد. در این مطالعه برای اعتبارسنجی نتایج مدل‌سازی‌های انجام شده تحت آزمایش 4-12 گزارش (NCHRP350 سرعت برخورد 80 km/h و زاویه برخورد 15 درجه)، با نتایج آزمایش‌های میدانی که در تحقیقات مرکز آنالیز تصادفات منتشر شده است مورد مقایسه قرار گرفته است. باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های میدانی و تحقیقات پیشین در زمینه ارزیابی حفاظ‌های جاده‌ای در این مطالعه زمان حل 0/5 ثانیه در نظر گرفته شده است. و حداقل طول 30 متر که در گزارش NCHRP350 توصیه شده است برای مدلسازی حفاظ‌ها در نظر گرفته شده است.

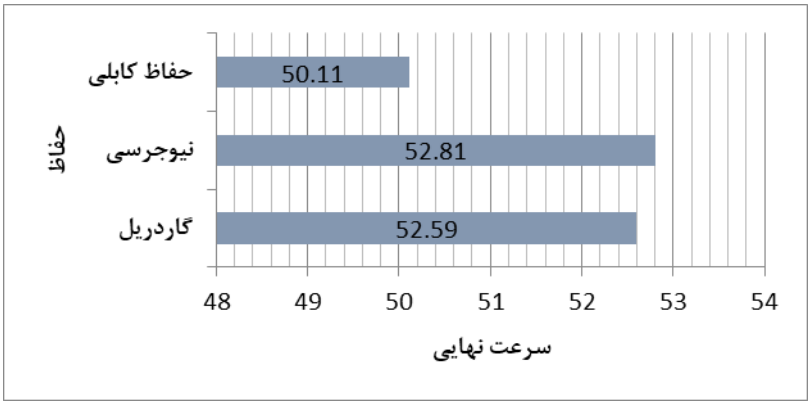
در مدل‌سازی اجزاء محدود به طور معمول هر چه به تعداد اجزاء افزوده شود، هندسه مدل دقیق‌تر و نتایج بهتری به دست خواهد آمد. اما در طرف دیگر با ریزتر کردن مش‌بندی، زمانه محاسبه برای انجام تحلیل توسط نرم‌افزار LS-DYNA تا حد زیادی افزایش خواهد یافت. به همین منظور برای دستیابی به نتایج قابل‌قبول و کاهش زمان تحلیل در این مطالعه، با استفاده از روش سعی و خطا و همچنین تحقیقات پیشین در این زمینه از مقدار المان بهینه استفاده شده است. در ادامه نتایج اعتبارسنجی در شکل‌های 2 و 3 برای هر سه حفاظ نشان داده شده است. همچنین لازم به ذکر است که این آزمایش تاکنون برای حفاظ‌های کابلی به صورت آزمایش میدانی صورت نگرفته است و داده‌ای برای مقایسه آن به‌صورت اعتبارسنجی وجود ندارد.

اختلاف ناچیز بین مدل‌سازی و آزمایش میدانی در شکل‌های زیر به دلیل اختلاف ناچیز ما بین زمان گذشته از شروع برخورد و تفاوت اندک مقدار بعضی پارامترهای هندسی یا ساختاری در شبیه‌سازی و آزمایش میدانی است. همچنین در آزمایش میدانی شرایط دقیقاً منطبق با NCHRP350 نمی‌باشد برای مثال سرعت و زاویه برخورد وسیله نقلیه با حفاظ تحت شرایط آزمون 4-12 دقیقا 80km/h و 15 درجه نمی‌باشد. مشخصات اجزای محدود حفاظ‌های مورد مطالعه در این پژوهش در جدول 3 آورده شده است.

جدول 3- مشخصات مدل اجزای محدود حفاظ‌ها

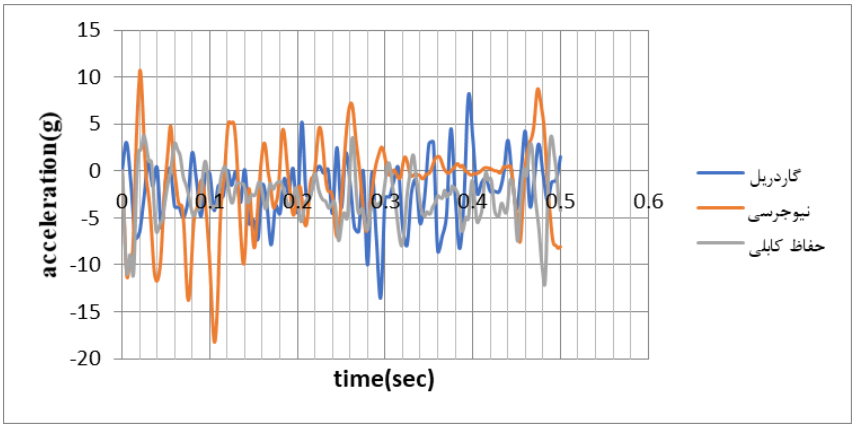
نوع حفاظ مدل‌سازی شده	طول حفاظ مدل‌سازی شده (m)	تعداد کل گره‌ها	تعداد کل المان‌ها
حفاظ بتنی (نیوجرسی)	50	24640	23341
گاردریل (دو موج لقمه چوبی)	38	108945	113526
حفاظ کابلی	130	230579	226567

با توجه به نتایج به دست آمده می توان یافت که میزان کاهش سرعت در برخورد با حفاظ کابلی بیش از بقیه حفاظ ها است که این میتواند به دلیل پیش تنیدگی حفاظ کابلی نسبت به سایر حفاظ ها باشد. همچنین نتایج به دست امده نشان می دهد که عملکرد حفاظ نیوجرسی و گاردریل در تغییرات سرعت وسیله نقلیه تقریبا مشابه با یکدیگر هست. در شکل 4-13 نیز سرعت نهایی وسیله نقلیه پس از برخورد با حفاظ ها نشان داده شده است.



شکل 2- مقادیر نهایی سرعت (km/h) وسیله نقلیه تحت شرایط آزمون 4-12.

همان‌طور که گفته شد، حفاظ کابلی بهترین عملکرد را در کاهش سرعت خودرو دارد. این امر در نمودار فوق نیز قابل‌مشاهده است. در ادامه، تغییرات شتاب طولی خودرو بر حسب زمان و پارامترهای OIV (سرعت برخورد سرنشین) و ORA (میزان شتاب منفی) برای هر سه حفاظ در شکل 3 و جدول 4 ارائه شده است.



شکل 3- تغییرات شتاب خودرو بر حسب زمان در آزمون4-12

جدول 4-مقادیر OIV و ORA در آزمون 4-12

ردیف	نوع حفاظ	ORA<20g	OIV<12m/s	عملکرد بر اساس استانداردهای NCHRP350
1	نیوجرسی	7/3	3/7	تأیید
2	گاردریل	6/5	3/1	تأیید
3	حفاظ کابلی	2	1/9	تأیید

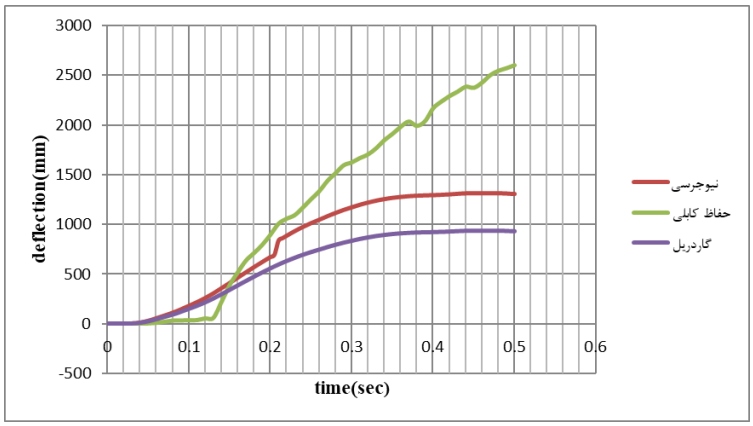
همان‌طور که در جدول فوق ارائه شده است هر سه حفاظ طبق استاندارد NCHRP دارای OIV و ORA قابل‌قبولی هستند. ارزیابی عملکرد حفاظ‌ها در آزمایش 4-12 مطابق با معیارهای گزارش NCHRP350 در جدول 5 آورده شده است.

جدول 5- معیارهای ارزیابی حفاظ‌ها طبق گزارش NCHRP350

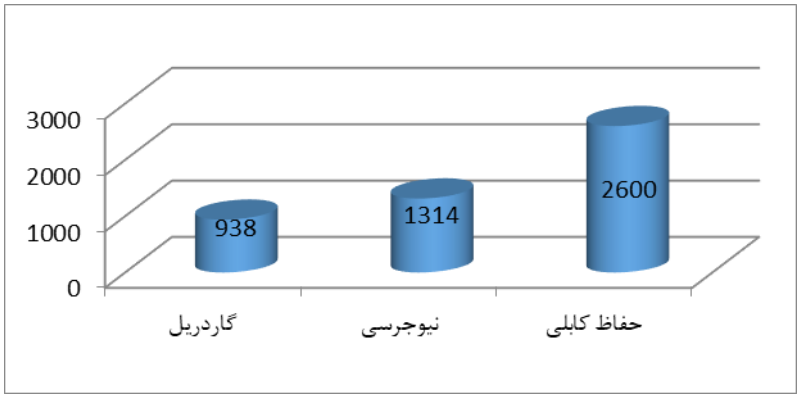
فاکتورهای ارزیابی	معیارهای ارزیابی	نتیجه آزمایش	ارزیابی
کفایت ساختاری	1) نفوذ به پشت حفاظ	نیوجرسی: خیر گاردریل: خیر کابلی: خیر	قبول
میزان خطر برای سرنشینان	2) جداشدن قطعات حفاظ	نیوجرسی: خیر گاردریل: خیر کابلی: خیر	قبول
	3) واژگونی	نیوجرسی: بله گاردریل: خیر کابلی: خیر	در حفاظ نیوجرسی غیرقابل‌قبول و در سایر حفاظ‌ها قبول
مسیر طی شده توسط وسیله نقلیه پس از برخورد	4) ایجاد اختلال در مسیر عبور و مرور وسایل نقلیه دیگر	نیوجرسی: خیر گاردریل: خیر کابلی: خیر	قبول
	5) زاویه خروج مناسب	نیوجرسی: خیر گاردریل: خیر کابلی: خیر	قبول

5.1. پارامترهای رفتاری حفاظ‌ها

بر اساس شکل 4 می‌توان نتیجه گرفت حفاظ کابلی با توجه به کمترین میزان جا به جایی برای مسیرهایی که از کناره پرتگاه‌ها می‌گذرد و همچنین به عنوان حفاظ میانی در راه‌های که مسیر رفت و برگشت در فاصله کمی از یکدیگر قرار دارند به دلیل جابجایی زیادی که در برخورد دارد، مناسب نیست. در ادامه در شکل 4 حداکثر میزان انعطاف دینامیکی حفاظ‌ها نشان داده شده است.



شکل 4- جابجایی نقطه‌ای روی سپری با حداکثر انعطاف دینامیکی بر حسب زمان در آزمون 4-12



شکل 5- حداکثر انعطاف دینامیکی حفاظ‌ها در آزمون 3-11

شکل فوق حداکثر انعطاف دینامیکی حفاظ‌های نیوجرسی، کابلی و گاردریل را در 0.5 ثانیه نشان می‌دهد. انعطاف دینامیکی حفاظ‌های نیوجرسی و کابلی برابر با انعطاف ماندگار آنها است. اما انعطاف دینامیکی و ماندگار گاردریل متفاوت است. لازم به ذکر است که نقطه با بیشترین انعطاف دینامیکی در حفاظ کابلی، در 0.5 ثانیه نیز در تماس با وسیله نقلیه است. بنابراین، انعطاف دینامیکی و ماندگار این نقطه یکسان است.

5.2. جمع‌بندی نتایج آزمون 4–12

در جدول 6 نتایج ارزیابی هر سه حفاظ مورد بررسی تحت شرایط آزمون 4-12 به صورت خلاصه ارائه شده است.

جدول 6- جمع بندی نتایج آزمون 4-12

ردیف	نوع حفاظ	حداکثر Yaw	حداکثر Roll	حداکثر Pitch	زاویه خروج	سرعت بعد از 0.5 ثانیه	OIV	ORA	حداکثر انعطاف (میلیمتر)
1	نیوجرسی	26/92	1/86	1/53	11/916	52/81	3/7	7/3	1314
2	گاردریل	22/842	1/764	0/77	7/848	52/59	3/1	6/5	938
3	حفاظ کابلی	0/148	1/638	0/448	-	50/11	1/9	2	2600

در مجموع، حفاظ کابلی دارای مزایای زیر نسبت به دو حفاظ دیگر است:

- عملکرد بهتری در هدایت وسیله نقلیه
- احتمال آسیب‌دیدن کمتر سرنشینان

با این حال، معایب زیر را نیز دارد:

- نیاز به تعمیر و نگهداری بیشتر
- انتخاب نوع حفاظ جاده‌ای مناسب به عوامل مختلفی بستگی دارد. از جمله نوع جاده، سرعت مجاز، میزان ترافیک و بودجه

در نهایت به علت هزینه بالای نگهداری و تعمیر حفاظ‌های کابلی در مقایسه با سایر حفاظ‌های معرفی شده و همچنین نیاز به پیش تنیدگی آنها در هنگام نصب و سختی مراحل نصب این تنوع حفاظ‌ها کمتر از سایر حفاظ‌ها مورد توجه هستند.

6. مراجع

1. Safety TOTFfR. Roadside design guide: AASHTO; 2011.
2. Ray MH. The use of finite element analysis in roadside hardware design. International journal of crashworthiness. 1997;2(4):333-48.
3. McHenry RR, DeLeys NJ. DEVELOPMENT OF ANALYTICAL AIDS FOR MINIMIZATION OF SIGNLE VEHICLE ACCIDENTS. 1971.
4. Pfeifer BG, Holloway JC, Faller RK, Rosson BT. Test level 4 evaluation of the Minnesota combination bridge rail. 1996.
5. Tabiei A, Wu J. Roadmap for crashworthiness finite element simulation of roadside safety structures. Finite Elements in Analysis and Design. 2000;34(2):145-57.
6. Whitworth H, Bendidi R, Marzougui D, Reiss R. Finite element modeling of the crash performance of roadside barriers. International journal of crashworthiness. 2004;9(1):35-43.
7. Atahan AO, Bonin G. Numerical analysis of an H4a heavy containment level transition. International Journal of Heavy Vehicle Systems. 2006;13(4):351-65.
8. Reid JD, Faller RK, editors. Interaction between single unit trucks and concrete barriers in high speed impacts. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition; 2007.
9. Marzougui D, Mohan P, Kan CD, Opiela K. Performance evaluation of low-tension three-strand cable median barriers. Transportation Research Record. 2007;2025(1):34-44.
10. Reid JD, Lechtenberg KA, Stolle CS. Development of advanced finite element material models for cable barrier wire rope. 2010.
11. شهابی‌کیا آ. تحلیل رفتار گاردریل در برخورد با استفاده از شبیه سازی به روش اجزاء محدود. دانشکده فنی: دانشگاه تهران; 1393.
12. Zain MFBM, Mohammed HJ. Concrete road barriers subjected to impact loads: An overview. Latin American Journal of Solids and Structures. 2015;12:1824-58.
13. Atahan AO. Crashworthiness analysis of a bridge rail-to-guardrail transition. International journal of crashworthiness. 2016;21(5):423-34.
14. Hampton CE, Gabler HC. Development of a Missing Post Repair Guideline for Longitudinal Barrier Crash Safety. Journal of Transportation Engineering. 2013;139(6):549-55.
15. Teng T-L, Liang C-C, Hsu C-Y, Shih C-J, Tran T-T, editors. Effect of soil properties on safety performance of W-beam guardrail. 2016 International Conference on Advanced Materials Science and Environmental Engineering; 2016: Atlantis Press.
16. Wilde K, Bruski D, Burzyński S, Chróścielewski J, Pachocki Ł, Witkowski W, editors. LS-DYNA simulations of the impacts of a 38-ton Heavy Goods Vehicle into a road cable barrier. 12th European LS-DYNA conference; 2019.
17. Bruski D. Determination of the bending properties of wire rope used in cable barrier systems. Materials. 2020;13(17):3842.
18. Yumrutas HI, Ozcanan S, Apak MY, Anwer MJ. Experimental and numerical comparative crashworthiness analysis of innovative renewable hybrid barrier with conventional roadside barriers. International journal of crashworthiness. 2023;28(3):334-50.
19. Moomen M, Molan AM, Ksaibati K. A random parameters multinomial logit model analysis of median barrier crash injury severity on Wyoming interstates. Sustainability. 2023;15(14):10856.
20. Bruski D, Burzyński S ,Witkowski W. Analysis of passenger car crash with a cable barrier installed with anti-glare screens on a horizontal convex road curve with 400 m radius. International Journal of Impact Engineering. 2023;173:104486.
21. DECISION R. Federal highway administration. US Department of Transportation, Wash-593 ington DC. 2015;594.
22. Ross Jr H, Sicking D. RA Zimmer, and JD Michie.“. Recommended Procedures for the Safety Performance Evaluation of Highway Features. 1993.