هفتمین کنفرانس بین‌المللی
مهندسی قابلیت اطمینان و ایمنی

تحلیل ایمنی دو فولاد API 5CT Grade Q125 و Grade A283 C جهت استفاده در ساخت سازه محافظ در برابر واژگونی

سید مصطفی حسینی فرد[۱]، محمد رضا کارآموز راوری[۲] ، علیرضا احمدی[۳]، احسان شهسواری گوغری[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، m.hosseinifard@student.kgut.ac.ir
۲- دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، m.karamooz@kgut.ac.ir
۳-دانشیار مهندسی مکانیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، a.ahmadi@kgut.ac.ir
۴-مدرس گروه ایمنی، دانشگاه جامع علمی کاربردی، شهربابک ،ایران، ehsan_shahsavari2002@yahoo.com

چکیده

استفاده از ماشین‌آلات سنگین وزن، که نیاز به تردد در محیط‌های ناهموار و شیب‌دار دارند، صنایع کشاورزی، راه‌سازی و معدنی را به یکی از مخاطره‌آمیزترین صنایع جهان بدل کرده است. سالانه گزارش‌های متعددی از خسارات جانی و مالی به واسطه واژگونی ماشین‌آلات مورد استفاده در این صنایع به گوش می‌رسد. برای کاهش این خطرات، عمدتا از سازه‌ای تحت عنوان سازه محافظ در برابر واژگونی استفاده می‌شود. این سازه با جذب انرژی ناشی از برخورد با سطح زمین و تحمل بارهای وارده، محیطی نسبتا ایمن برای اپراتور ماشین فراهم می‌آورد. در این مقاله، دو فولاد موجود در کشور، جهت ساخت سازه محافظ در برابر واژگونی، بر اساس ملزومات ارائه شده در استانداردهای بین‌المللی و ملی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج این ارزیابی نشان می‌دهد که هرچند فولاد API 5CT Grade Q125 ملزومات مربوط به جذب انرژی را به خوبی برآورده می‌کند اما استحکام تسلیم بالای آن، می‌تواند منجر به انتقال موجی از بار ضربه‌ای به اپراتور گردد. این در حالیست که با وجود آنکه فولاد A283 Grade C درصد کربنی فراتر از مقدار توصیه شده در استاندارد را دارد، اما ملزومات مورد نیاز جهت طراحی را فراهم می‌آورد.

واژه‌های کلیدی: سازه محافظ در برابر واژگونی، محدوده حجمی مجاز، جذب انرژی، تست ضربه، تست کشش ساده

مقدمه

خودروهای سنگین که در صنعت کشاورزی و معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً در زمین‌های شیب‌دار و ناهموار کار می‌کنند که در معرض واژگونی قرار دارند، زیرا دارای مرکز ثقل بالایی هستند. یک قاب فولادی مقاوم با دو یا چهار پایه معمولاً برای محافظت در هنگام واژگونی در این وسایل نقلیه در بالای کابین اپراتور متصل می‌شود. این سازه محافظ در برابر واژگونی (ROPS)[۱] نامیده می‌شود. طراحی و تجزیه و تحلیل این نوع سازه ها پیچیده است و مستلزم آن است که اولا سازه به اندازه کافی انعطاف پذیر باشد تا انرژی جنبشی را به هنگام برخورد سازه با زمین جذب کند و ثانیا به اندازه کافی صلب باشد تا بتواند یک منطقه امن در اطراف اپراتور فراهم آورد [۱]. به منظور ارزیابی عملکرد سازه‌های محافظ در برابر واژگونی، استانداردهای متعددی توسط انجمن مهندسان اتومبیل (SAE)[۲] و انجمن مهندسان کشاورزی آمریکا (ASAE)[۳] توسعه داده شده است [۲]. این ارزیابی‌ها شامل آزمایش‌های مخربی در مقیاس واقعی و تحت بارهای استاتیکی در

[1] Agricultural engineering
[2] Society of Automotive Engineers
[3] Agricultural engineering

امتداد محورهای جانبی، عمودی و طولی ماشین مورد نظر است. نیاز به تجهیزات زیاد و هزینه‌های هنگفت این آزمایش‌ها سبب شده است که بسیاری از سازندگان اینگونه ماشین‌آلات سعی کنند که با افزایش استحکام و سختی سازه از انجام تست‌های بیشتر خودداری نمایند. با این وجود افزایش سختی سازه محافظ در برابر واژگونی جهت جلوگیری از فروپاشی زودهنگام سازه راه‌حل مناسبی برای حفظ جان اپراتور نیست چرا که سازه محافظ در برابر واژگونی یک تجهیز جاذب انرژی است و لازم است که تعادلی بین استحکام و سختی سازه برقرار گردد [۴]. کلارک و همکارانش دریافتند که استفاده از سازه‌های محافظ جان با سختی بالا با کاهش زمان برخورد و افزایش نیروهای وارده می‌تواند به شتاب‌های منفی بزرگی منجر شود که می‌توانند سلامت اپراتور را با خطرهای جدی مواجه نماید [۵]. این مشاهده توسط خرسندی و همکارانش نیز گزارش شده است [۶].

با توجه به آنچه که بیان گردید، باید تعادلی بین خاصیت جذب ضربه و استحکام فولاد مورد استفاده جهت ساخت سازه محافظ برقرار باشد. ملزومات مربوط به فولادهای قابل استفاده برای این منظور در استاندارد بین‌المللی ISO 3471: 2008 و استاندارد ملی ISIRI 8157 به خوبی تدوین شده است. در این پژوهش خواص مادی دو فولاد API 5CT Grade Q125 و A283 Grade C برای ساخت سازه محافظ در برابر واژگونی، مطابق با استانداردهای فوق‌الذکر، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

مواد و روش ها

مطابق استاندارد بین‌المللی ISO 3471: 2008 ، الزاماتی در خصوص خواص مکانیکی ماده مورد استفاده و دمای عملکردی مورد نیاز است تا اطمینان حاصل شود که سازه محافظ در برابر واژگونی مقاومت لازم در برابر شکست ترد را دارد. روش ترجیحی تامین این الزامات آن است که تمامی اجزای سازه محافظ از موادی ساخته شوند که الزامات مکانیکی ارائه شده در استاندارد ISO 3471:2008 را برآورده سازند، که در این صورت سازه محافظ می‌تواند در هر دمایی مورد استفاده قرار گیرد [۷]. مطابق با معیارهای ارائه شده در این استاندارد، هر عضو سازه‌ای ساخته شده از فولاد نازک با ضخامت کمتر از۲/۵ میلی متر و نیز فولاد با دانه بندی ریز با ضخامت ۴/۰–۲/۵ میلی متر با حداکثر کربن ۰/۲۰ درصد مورد قبول واقع خواهد شد [۷]. در مواردی که فولاد مورد استفاده معیار فوق‌الذکر را برآورده نمی‌کند، لازم است که عضوهای سازه محافظ از فولادهایی ساخته شوند که یکی از آزمون‌های استحکام ضربه Charpy با شکاف V شکل (CVN) را، مطابق جدول۱، برآورده نمایند.

جدول ۱: حداقل مقدار انرژی جذب شده در آزمون ضربه Charpy V-notch [۷]

اندازه آزمونه	الزامات انرژی	
	در ۳۰- درجه سلسیوس(J)	در ۲۰- درجه سلسیوس(J)
۱۰ × ۱۰[1]	۱۱	۲۷/۵
۱۰ × ۹	۱۰	۲۵
۱۰ × ۸	۹/۵	۲۴
۱۰ × ۷/۵[1]	۹/۵	۲۴
۱۰ × ۷	۹	۲۲/۵
۱۰ × ۶/۷	۸/۵	۲۱
۱۰ × ۶	۸	۲۰
۱۰ × ۵[1]	۷/۵	۱۹
۱۰ × ۴	۷	۱۷/۵
۱۰ × ۳/۳	۶	۱۵
۱۰ × ۳	۶	۱۵
۱۰ × ۲/۵[1]	۵/۵	۱۴

هرچند که ملزومات ارائه شده در استانداردهای بین‌المللی و ملی محدودیتی در خصوص منحنی تنش– کرنش فولاد مورد استفاده وضع نکرده‌است، با این وجود، با توجه به آنکه سازه محافظ در برابر واژگونی یک سازه جاذب انرژی محسوب می‌شود، لازم است که مقادیر مشخصی از انرژی توسط سازه جذب شود. تکنیک‌های جذب انرژی که برای طراحی سازه‌های محافظ در برابر واژگونی مورد استفاده قرار می‌گیرند عمدتا بر پایه ایجاد یک ناحیه تسلیم محلی که آن را مفصل پلاستیک می‌نامیم استوار هستند، که به سازه اجازه می‌دهند بخشی از انرژی جنبشی حین واژگونی را جذب نماید. این نوع از جذب انرژی از طریق تغییرشکل‌های پلاستیک بسیار شدید، کمانش اجزای سازه، پارگی و شکست سازه محقق می‌گردد. فروپاشی سازه محافظ در برابر واژگونی عمدتا زمانی اتفاق می‌افتد که به تعداد کافی مفصل‌های پلاستیک در سازه ایجاد گردد. این نوع از جذب انرژی به طور قابل ملاحظه‌ای کارا بوده و می‌تواند شانس زنده ماندن اپراتور در واژگونی‌های احتمالی را افزایش دهد. هرچند که مودهای آسیب و فروپاشی یک سازه که منجر به ایجاد مفاصل پلاستیک می‌گردند به خوبی شناخته شده‌اند، دستورالعمل‌های اندکی برای طراحان سازه‌های محافظ در برابر واژگونی جهت تعیین ابعاد و ماده مورد نظر جهت دستیابی به ملزومات مطرح شده در استانداردهای مختلف موجود است [۴]. برای موادی که استحکام تسلیم کمی دارد جذب انرژی پیش از اعمال نیروهای بسیار زیاد به سازه اتفاق افتاده و سبب می‌شود که با افزایش جابجایی‌های اعمال شده به سازه بخش قابل توجهی از انرژی واژگونی جذب شود. این در حالی است که کاهش استحکام سازه توان تحمل بارهای وارده را تا حد زیادی کاهش می‌دهد. از این رو همواره لازم است که تعادلی بین میزان جذب انرژی و تاب‌آوری سازه در برابر بارهای اعمالی وجود داشته باشد.

در این بخش از مقاله حاضر، آزمایش‌های مورد نیاز جهت ارزیابی فولادهای مورد استفاده برای ساخت سازه محافظ، شامل آزمایش

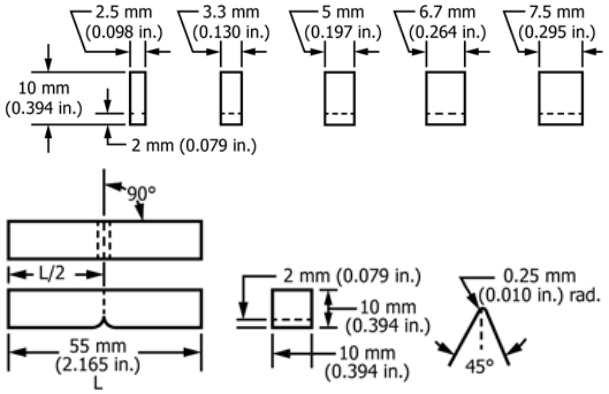
کوانتومتری، آزمون ضربه Charpy V-notch و آزمون تست کشش ساده ارائه گشته و جزئیات هر یک مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

ارزیابی کوانتومتری

به منظور انجام آزمایش‌های کوانتومتری، لازم است که ابتدا نمونه‌ای با ابعاد مناسب مطابق با استاندارد ASTM E415-21 تهیه گردد. سطح این نمونه باید کاملا صاف و صیقلی و عاری از هرگونه آلودگی سطحی، نظیر چربی، اکسید، زنگ زدگی و غیره باشد. برای این منظور نمونه مورد نظر سنگ زنی، سنباده‌زنی و نهایتا پولیش می‌شود تا نمونه‌ای استاندارد برای دستگاه آنالیز ایجاد شود. در این آزمایش ابتدا توسط یک محرک، جرقه‌ای ایجاد شده (تحریک تحت ولتاژ بالا و به مدت ۳۰ ثانیه) و نمونه به واسطه تخلیه الکتریکی تبخیر شده و اجزای حاصل از تبخیر، شامل اتم‌ها و یون‌ها برانگیخته شده و طیفی از نور را تولید می‌کنند. با عبور دادن این نور از طریق فیبر نوری از یک طیف منبع نوری، با توجه به بازه طول موج نشر نور عناصر خط نشری مناسب برای تشخیص نوع عنصر و میزان حضور آن در نمونه انتخاب می شود. گاه می‌توان برانگیختگی عناصر را با محرک کمانی که تحت ولتاژ پایین‌تر و در زمان کمتر (در حدود۳ ثانیه) ایجاد کرد که خطای بیشتری نسبت به محرک جرقه‌ای خواهد داشت و اغلب مناسب آنالیز کیفی و نه کمی عناصر در زمان سریعتر است.در مطالعه حاضر، آنالیز کوانتومتری برای بدست آوردن میزان عناصر موجود در دو نوع فولاد API 5CT Grade Q125 و A283 Grade C با استفاده از دستگاه Foundry Master Pro انجام می‌گیرد.

آزمون ضربه Charpy V-notch

آزمون ضربه Charpy V-notch یک آزمون دینامیکی است که در آن یک نمونه شکاف‌دار با استفاده از یک تجهیز خاص در معرض ضربه قرار گرفته و شکسته می‌شود. داده‌های خروجی این آزمون می‌تواند شامل انرژی جذب شده، درصد شکست برشی، انبساط جانبی در خلاف جهت شکاف و یا ترکیبی از این‌ها باشد. دمای انجام آزمون اغلب بر اساس نیازمندی‌های از پیش تعیین شده و یا دستورالعملی خاص تعیین می‌گردد. این دما می‌تواند با دمای کاری نمونه کاملا متفاوت باشد .در این مقاله آزمون ضربه Charpy V-notch مطابق با استاندارد ASTM A370 انجام شده‌است. مطابق با این استاندارد، ماشین انجام آزمون به گونه‌ای طراحی شده‌است که یک نمونه دارای شیار در آن ثابت شده و توسط یک پاندول شکسته می‌شود. پاندول مورد نظر از یک ارتفاع مشخص رها شده و با نمونه مورد آزمون برخورد می‌کند. از آنجا که جرم و ارتفاع اولیه پاندول مشخص هستند، مقدار انرژی پتانسیل اولیه پاندوبل نیز از قبل مشخص خواهد بود. از این رو بسته به ارتفاع جدید پاندول پس از برخورد با نمونه، میتوان انرژی جذب شده توسط آن را تعیین نمود. تجهیز انجام آزمون به گونه ای طراحی شده‌است که می‌تواند نمونه مورد آزمون را به صورت یک تیر ساده در محل خود ثابت نگه دارد، به طوریکه سطح شکاف‌دار نمونه به صورت عمودی قرار می‌گیرد و پاندول پس از رها شدن به سطح مقابل سطح شکافدار برخورد میکند .شکل ۱ ابعاد نمونه مورد نیاز جهت انجام آزمون ضربه Charpy V-notch را، مطابق با استاندارد ASTM A370 ، نمایش می‌دهد. با توجه به نمونه‌های موجود از دو آلیاژ A283 Grade C و API 5CT Grade Q125 ، که به‌ترتیب به‌صورت ورق و لوله می‌باشند، نمونه‌هایی با ابعاد ۱۰*۱۰ از ورق و ۱۰*۷/۵ میلی‌متر از لوله تهیه و در سه دمای محیط، ۲۰ – و ۳۰ – درجه سانتی‌گراد مورد ارزیابی قرار می‌گیرند. نمونه ها باید در جهت طول بوده و از ورق، لوله یا بخش‌های سازه‌ای قبل از شکل‌دهی یا جوشکاری برای استفاده در سازه محافظ تهیه شود. نمونه‌های تهیه شده از لوله یا بخش سازه‌ای باید از وسط قسمتی با بزرگترین اندازه تهیه شده و مطابق استاندارد ISO 148 نباید از قسمت‌های جوشکاری شده باشد [۷]. شکل ۱ یکی از نمونه‌های تهیه شده جهت انجام آزمون را، که در دستگاه مورد نظر نصب شده‌است، به تصویر می‌کشد. پس از تهیه نمونه‌های مورد نیاز، آزمون ضربه توسط دستگاه Instron 300J انجام می‌پذیرد.



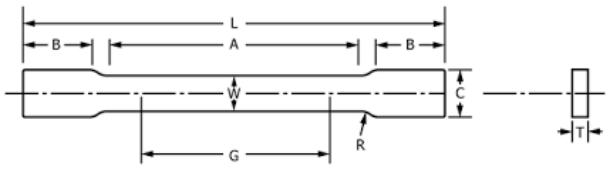
شکل ۱: ابعاد و جزئیات نمونه مورد نیاز جهت انجام آزمون ضربه Charpy V-notch مطابق با استاندارد ASTM A370

شکل ۲: انجام آزمون ضربه Charpy V-notch بر روی نمونه‌های به ابعاد ۱۰*۱۰ میلی‌متر در دمای ۲۰- درجه سانتیگراد

آزمون کشش ساده

به منظور ارزیابی توان جذب ضربه فولاد مورد استفاده لازم است که اطلاعات مربوط به رفتار مادی ماده مورد استفاده در اختیار باشد. از سوی دیگر الزامات مربوط به سازه‌های محافظ در برابر واژگونی استفاده از برخی از فولادهای موجود دربازار را با محدودیت‌هایی مواجه می‌سازد. به عنوان مثال استفاده از فولادهایی با استحکام تسلیم بالا، فولادهای ترد و فولادهایی با خاصیت جذب ضربه اندک توصیه نمی‌شود. یکی از آزمون‌هایی که به طور گسترده برای ارزیابی مواد مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد آزمون کشش ساده است. در این آزمون، یک نمونه، که به شکل و ابعاد خاصی تهیه می‌شود، بین دو فک از دستگاه تست کشش ثابت می‌شود. سپس مقدار نیروی مورد نیاز برای ایجاد یک مقدار کشیدگی مشخص در نمونه مورد نظر رصد شده و نمودارهای نیرو بر حسب جابجایی و تنش بر حسب کرنش گزارش می‌گردد. این منحنی‌ها می‌توانند داده‌های مناسبی را برای کاربردهای مهندسی فراهم آورند.

اندازه‌گیری جابجایی اعمال شده در نمونه مورد ارزیابی میتواند توسط تکنیک‌های متفاوتی، از جمله استفاده ازکرنش‌سنج،[4] کشش‌سنج[5] و اندازه‌گیری جابجایی فک‌های دستگاه، انجام پذیرد. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که استفاده از جابجایی اندازه‌گیری شده توسط فک‌های دستگاه، به دلیل جابجایی‌های ناخواسته قطعات دستگاه کشش مورد استفاده، می‌تواند با خطای بسیار زیادی مواجه باشد. این در حالیست که اندازه‌گیری کرنش با دو روش دیگر خطای بسیارکمتری داشته و نتایج خروجی این دو روش مطابقت مطلوبی با یکدیگر دارند [۸]. نمونه‌های مورد نیاز برای ارزیابی رفتار مکانیکی ورق و لوله مورد استفاده مطابق با استانداردهای ASTM E8 و ASTM A370 تهیه می‌شوند .شکل ۳ شماتیک نمونه‌های تهیه شده و جدول ۲ ابعاد بخش‌های مختلف هریک را به نمایش می‌گذارند.



شکل ۳: شماتیک نمونه های تهیه شده جهت انجام تست کشش

جدول ۲: ابعاد نمونه های تهیه شده جهت انجام آزمون کشش ساده

A	B	C	G	W	L	R	T
57	50	20	50.8	12.61	200	12.5	10.82
57	50	20	50.1	27.85	200	12.5	8.52

در مقاله حاضر تست کشش توسط دستگاه Gotech با ظرفیت ۱۰۰ تن انجام می‌پذیرد. برای انجام این آزمون نرخ کرنش به میزان $10^{-4}\frac{1}{s}$ در نظر گرفته شده و مقادیر نیرو و جابجایی به‌ترتیب ثبت می‌گردد.

نتایج

در این بخش از مقاله حاضر، نتایج مربوط به ارزیابی‌های کوانتومتری، آزمون ضربه Charpy V-notch و آزمون کشش ساده ارائه می‌گردد.

نتایج ارزیابی کوانتومتری

نتیجه آنالیز کوانتومتری برای دو فولاد API 5CT Grade Q125 و A283 Grade C به‌ترتیب در جداول ۳ و ۴ و۵ و ۶ ارائه شده‌است. همانگونه که دیده می‌شود درصد کربن در فولاد API 5CT Grade Q125 به مقدار ۰/۲۶ درصد گزارش شده‌است که از مقدار مجاز ارائه شده در استاندارد ISO 3471: 2008، به میزان ۰/۲ درصد، بیشتر می‌باشد. بر این اساس لازم است که آزمون ضربه Charpy V-notch برای ارزیابی عملکرد این فولاد در سازه محافظ انجام پذیرد. به طور مشابه مقدار کربن در فولاد A283 Grade C به میزان ۰/۱۱۶ درصد گزارش شده‌است که کمتر از مقدار حداکثری مجاز می‌باشد. از این رو انجام آزمون ضربه چندان ضرورتی ندارد. با این وجود ارزیابی عملکرد این فولاد در آزمون ضربه نیز انجام خواهد پذیرفت تا بتوان از عملکرد صحیح این فولاد در کاربرد مورد نظر اطمینان حاصل کرد.

جدول ۳: درصد عناصر اندازه گیری شده در فولاد API 5CT Grade Q125 با استفاده از آنالیز کوانتومتری

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.26	0.28	0.77	0.015	0.003	1.40
Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb
0.71	0.05	0.032	0.01	0.07	<0.005
Ti	V	W	Sn	As	Fe
0.007	0.007	<0.02	0.007	0.006	Base

جدول ۴: حدود مجاز ترکیب شیمیای استاندارد API SPEC 5CT (2021) Grade Q125

	c	Mn	Mo	Cr	P	S
Min	*	*	*	*	*	*
Max	0.35	1.35	0.85	1.5	0.02	0.01

جدول ۵: درصد عناصر اندازه گیری شده نمونه فولاد A283 Grade C

Fe	C	Si	Mn	P	S	Cr
98.8	0.116	0.254	0.624	0.0088	0.0051	0.0136
Mo	Ni	Al	Co	Cu	Nb	Ti
0.0048	0.0292	0.0158	0.0067	0.0207	0.0045 <	0.0010

[4] Society of Automotive Engineers

[5] Society of Automotive Engineers

V	W	Pb	Sn	B	Zr	Ca
0.0017<	0.0010	<0.0010	0.0059	0.0007	0.0017	0.0007 <
Bi	Ta	Se	Zn			
0.0005<	0.0040	0.0029	0.0005			

جدول ۶: حدود مجاز ترکیب شیمیای استاندارد A283 Grade C

حدود پذیرش Grade C	C	Mn	P	S	Si
Min	*	*	*	*	*
Max	0.24	0.90	0.030	0.030	0.40

نتایج آزمون Charpy V-notch

آزمون Charpy V-notch مطابق با اســـتانداردهای ASTM E23 (2018) و ISO 148-1 برای ورق و لوله مورد استفاده در ساخت سازه محافظ انجام شده‌ا ست. مطابق با ملزومات ا ستاندارد ASTM A370 برای ارزیابی جذب ضربه توسط آزمون Charpy V-notch ، تست حداقل ۳ نمونه در هر دمای مورد نظر ضروری است. جداول ۷ و ۸ نتایج آزمون را به ترتیب برای لوله در۳ دمای ۲۳، ۲۰ – و ۳۰ – درجه ســـانتی‌گراد و ورق در دمای ۲۰ – درجه ســـانتی‌گراد نمایش می‌دهد. با توجه به نتایج به د ست آمده، فولادهای مورد ا ستفاده برای ساخت سازه محافظ در برابر واژگونی ملزومات مربوط به آزمون ضربه Charpy V-notch را برآورده می‌کنند.

جدول ۷: نتایج آزمون ضربه Charpy V-notch برای لوله مورد استفاده در ساخت محافظ در برابر واژگونی

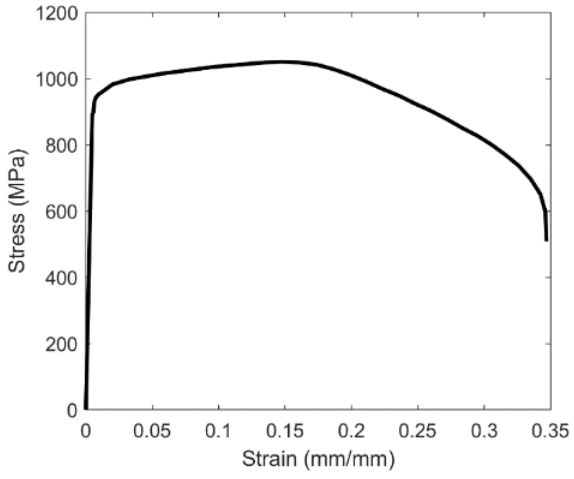
شماره نمونه	ابعاد (میلی‌متر)	محل شیار	نوع شیار	دمای آزمون (درجه سانتیگراد)	انرژی جذب شده (ژول)
۱	۵۵*۷/۵*۱۰	بدنه	A (V notch)	+۲۳	۱۲۱/۹
۲	۵۵*۷/۵*۱۰	بدنه	A (V notch)	+۲۳	۱۲۱/۸
۳	۵۵*۷/۵*۱۰	بدنه	A (V notch)	+۲۳	۱۲۵/۳
۱	۵۵*۷/۵*۱۰	بدنه	A (V notch)	-۲۰	۱۱۲/۰
۲	۵۵*۷/۵*۱۰	بدنه	A (V notch)	-۲۰	۱۱۲/۱
۳	۵۵*۷/۵*۱۰	بدنه	A (V notch)	-۲۰	۱۰۹/۴
۱	۵۵*۷/۵*۱۰	بدنه	A (V notch)	-۳۰	۱۰۹/۲
۲	۵۵*۷/۵*۱۰	بدنه	A (V notch)	-۳۰	۱۱۶/۴
۳	۵۵*۷/۵*۱۰	بدنه	A (V notch)	-۳۰	۱۱۴/۹

جدول ۸: نتایج آزمون ضربه Charpy V-notch برای ورق مورد استفاده در ساخت سازه محافظ در برابر واژگونی

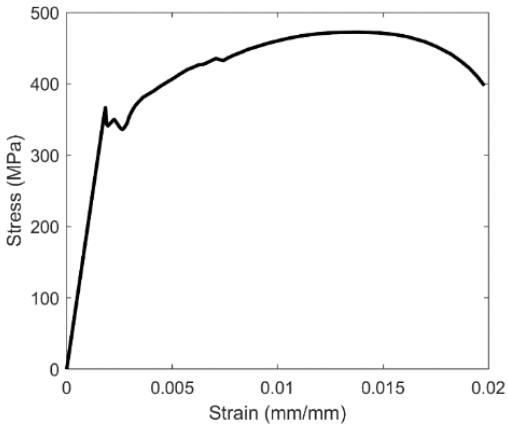
شماره نمونه	ابعاد (میلی متر)	محل شیار	نوع شیار	دماب آزمون(درجه سانتی گراد)	انرژی جذب شده (ژول)
۱	۵۵*۱۰*۱۰	بدنه	A(v notch)	-۲۰	۱۰۶/۱
۲	۵۵*۱۰*۱۰	بدنه	A(v notch)	-۲۰	۵۴/۶
۳	۵۵*۱۰*۱۰	بدنه	A(v notch)	-۲۰	۱۰۰/۶

نتایج آزمون کشش ساده

آزمون کشش ساده بر روی نمونه‌های تهیه شده از لوله و ورق فولادی مورد استفاده در ساخت سازه محافظ در برابر واژگونی انجام شده‌است. منحنی‌های تنش– کرنش به دست آمده برای لوله و ورق مورد نظر به ترتیب در شکل‌های ۵ و ۶ ارائه شده‌است. مطابق با داده‌های گزارش شده توسط آزمون، مدول الاستیک برای دو فولاد API 5CT Grade Q125 و A283 Grade C به ترتیب ۱۸۷/۳۴ و ۲۰۰ گیگاپاسکل، تنش تسلیم به‌ترتیب ۹۵۲ و ۳۴۷ مگاپاسکال، استحکام نهایی به‌ترتیب ۱۰۵۰ و ۴۷۳ مگاپاسکال و درصد افزایش طول به‌ترتیب ۲۲ و ۴۱/۹ درصد می‌باشد. با توجه به درصد افزایش طول گزارش شده، هر دو فولاد مورد مطالعه از نرمی کافی جهت استفاده در سازه محافظ برخوردار هستند. از سوی دیگر فولاد API 5CT Grade Q125 از استحکام تسلیم نسبتا بالایی برخوردار است که می‌تواند صلبیت لازم برای سازه محافظ را تامین نماید. با این وجود سطح تنش تسلیم بالای این فولاد، احتمال وارد شدن شوک‌های ناگهانی به اپراتور را بالا می‌برد. این در حالیست که تنش تسلیم فولاد A283 Grade C در محدوده مناسب برای جذب ضربه ناشی از برخورد ماشین با زمین است. بررسی نمونه‌های ساخته شده سازه‌های محافظ در برابر ضربه حاکی از آنست که عمدتا از فولادهایی با تنش تسلیم در محدوده ۵۰۰ مگاپاسکال برای ساخت سازه‌های محافظ استفاد می‌شود. در رهیافتی متفاوت، می‌توان از ترکیب دو فولاد برای تامین هر دو خصیصه مورد نیاز یعنی صلبیت کافی و توان جذب ضربه بالا استفاده نمود.



شکل ۵: منحنی تنش کرنش فولاد API 5CT Grade Q125 مورد استفاده در ساخت سازه محافظ در برابر واژگونی



شکل ۶: منحنی تنش کرنش فولاد A283 Grade C مورد استفاده در ساخت سازه محافظ در برابر واژگونی

نتیجه‌گیری

ارزیابی انجام شده بر روی دو فولاد API 5CT Grade Q125 و A283 Grade C با استفاده از تحلیل های کوانتومتری تست ضربه Charpy V-notch و آزمون کشش ساده حاکی از آن است که این دو فولاد معیار های مندرج در استاندارد بین المللی ISO 3471:2008 را ارضاع می‌کند و می‌تواند در ساخت سازه محافظ در برابر واژگونی مورد استفاده قرار گیرند با این وجود فولاد API 5CT Grade Q125 از استحکام بالایی برخوردار است که می‌تواند خطر انتقال شک های وارده به ماشین به اپراتور را افزایش دهد. جهت رفع این مشکل می‌تواند از جاذب های ضربه مناسب جهت استفاده در سازه محافظ در برابر واژگونی استفاده نمود.

[1] Clark, B.J., D.P. Thambiratnam, and N. Perera, Enhancing the impact energy absorption in roll over protective structures. International Journal of Crashworthiness, 2008. 13(2): p. 167-183.
[2] Harris, J., et al., Finite element modeling of ROPS in static testing and rear overturns. Journal of Agricultural Safety and Health, 2000. 6(3): p. 215.
[3] Zhao, Z. and C. Si. Nonlinear numerical simulation of roll-over protective structure of cabs in underground engineering services vehicles. in 2011 Second International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering. 2011. IEEE.
[4] Clark, B., *The behaviour of rollover protective structures subjected to static and dynamic loading conditions*. 2005, Queensland University of Technology.
[5] Thambiratnam, D.P., B.J. Clark, and N.J. Perera, *Dynamic response of a rollover protective structure.* Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2008. **23**(6): p. 448-464.
[6] Khorsandi, F., P.D. Ayers, and T.J. Truster, *Developing and evaluating a finite element model for predicting the two-posts rollover protective structure nonlinear behaviour using SAE J2194 static test.* Biosystems engineering, 2017. **156**: p. 96-107.
[7] ISO, *Earth-moving machinery Roll-over protective structures-Laboratory tests and performance requirements*. 2008, International Organization for Standardization Geneva, Switzerland.
[8]Motra, H.B., J. Hildebrand, and A. Dimmig-Osburg, *Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel.* Engineering Science and Technology, an International Journal, 2014. **17**(4): p. 260-269.