



## بررسی عددی و تجربی یکپارچگی سازه بدنه خودروی زرهی در بارگذاری انفجاری

سید هادی حسینی<sup>۱</sup>، محمد نجفی<sup>۲</sup> و جلال جودکی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۱۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۷/۰۱

### چکیده

یکی از تهدیدات مهم برای سازه بدنه خودروهای زرهی، بارگذاری انفجاری است. در این مقاله به مطالعه تغییر شکل بدنه خودروی زرهی تحت بارگذاری انفجاری با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود پرداخته خواهد شد و نتایج با کمک آزمایش‌های تجربی، مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در ابتدا، اثر موج انفجار حاصل از ۱۰ کیلوگرم تی‌ان‌تی در فاصله ۹۷ سانتی‌متری از کف خودروی زرهی به سازه اعمال گردید و عکس‌العمل سازه مورد بررسی قرار گرفت، سپس قسمتی از خودرو با میزان تنش‌های بیشینه به عنوان سازه منتخب برای بررسی اثرات اتصالات جوشکاری در استحکام سازه انتخاب گردید و فرآیند انفجار با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) مدل‌سازی شد. میزان ماده منفجره و فاصله آن برای سازه منتخب به گونه‌ای انتخاب شد که بار معادل با شرایط واقعی یکسان باشد. برای انجام آزمون تجربی، یک سیستم گیربندی مخصوص طراحی و ساخته شد و سازه مورد مطالعه در معرض بار انفجاری قرار گرفت. نتایج تحلیل نشان داد که تنش در اتصالات جوشکاری شده از استحکام تسلیم ماده فراتر رفته، قطعه دچار تغییر شکل پلاستیک خواهد شد، ولی هیچگونه شکستی در اتصالات مشاهده نشد؛ همچنین تصاویر ثبت شده از انفجار با دوربین سرعت بالا تطابق خوبی با نتایج مدل‌سازی را نشان داد.

**کلمات کلیدی:** شبیه‌سازی اجزای محدود؛ بارگذاری انفجاری؛ فولادهای کم‌آلیاژ فوق‌مستحکم؛ روش هیدرودینامیک ذرات هموار.

## Numerical and Experimental Investigation of Structural Integrity in Armored Vehicle Due to Explosive Loading

S.H. Hosseini<sup>1</sup>, M. Najafi<sup>2</sup>, J. Joudaki<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Student, Mech. Eng. Sch., Iran Univ. of Sci. & Tech., Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Dep. of Aero. and Mech. Eng., Science and Research Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran.

<sup>3</sup> Assis. Prof., Mech. Eng. Dep., Arak Univ. of Tech., Arak, Iran.

### Abstract

Armored vehicles almost experience explosive loading on the battlefield. In this article, the structural integrity of the armored vehicle under explosive loading will be studied experimentally and numerically. A finite element analysis has been developed to find the effect of explosion by 10 kg TNT at 97 cm distance from the bottom of an armored vehicle on the structure of the vehicle. Part of the vehicle, which has maximum stress, is selected for detail analysis. The selected part consists of welding joints. The selected structure is modeled in the FE software and an equivalent explosive loading was applied to the structure. Experimental tests had been implemented on the selected structure by the equivalent explosive loading. A particular fixture was designed and manufactured for experimental tests. The finite element results show that the stress magnitude in the welded structure exceeds from the yield strength of the used material, the structure experiences plastic deformation. But fracture did not happen in the structure. Similar conditions have been observed in the experimental results. The explosion steps which was recorded by a high-speed camera shows that the blast wave is similar to the results of smoothed particle hydrodynamics (SPH).

**Keywords:** Finite Element Analysis; Explosive Loading; High Strength Low Alloy Steel; Smoothed Particle Hydrodynamics; SPH.

## ۱- مقدمه

خودروهای زرهی از جمله ادوات نظامی راهبردی در میدان‌های نبرد می‌باشند که باید در برابر انواع تهدیدهای محتمل مقاوم باشند. از جمله تهدیدهای پیش روی یک خودرو زرهی، برخورد انواع پرتابه‌های با انرژی جنبشی بالا [۱] مانند، گلوله‌ها و ترکش‌ها در اندازه‌های مختلف و انفجار انواع مین‌ها [۲] و بمب‌ها [۳] در نزدیکی آن می‌باشند. با توجه به تهدیدهای پیش رو، حفاظت خودرو زرهی بالاخص محافظه سرنشینان در برابر این گونه حملات حائز اهمیت فراوان است [۴]. عموماً آسیب‌های وارده بر سرنشینان در اثر برخورد مستقیم پرتابه‌های با انرژی جنبشی بالا و یا اثر وضعی موج انفجار روی محافظه سرنشینان اتفاق می‌افتد [۲]. برای محافظت خودرو در برابر پرتابه‌های با انرژی جنبشی بالا، می‌توان از ورق‌های فوق مستحکم فولادی در ضخامت‌های مختلف استفاده کرد تا محافظه سرنشینان در برابر نفوذ پرتابه در امان باشد [۵-۷]. ورق‌های مذکور به دلیل شکل‌پذیری بسیار پایین قابلیت شکل‌دهی نداشته و فقط با استفاده از روش‌های جوشکاری می‌توان آنها را به یکدیگر متصل کرده و به شکل مطلوب درآورد. از این رو، بررسی مقاومت سازه بدنه خوروی زرهی در برابر بارگذاری انفجاری، از جمله ملزومات بسیار مهم در طراحی و ساخت یک خوروی زرهی است تا یکپارچگی سازه جوشکاری شده در برابر این گونه حملات مشخص شود. به عبارت دیگر، حتی اگر بدنه خوروی زرهی در برابر یک پرتابه با انرژی جنبشی بالا مقاومت نکرده و نفوذی اتفاق بیفتد، خللی در عملکرد کل خودرو حاصل نشود؛ اما در صورتی که یکپارچگی سازه در برابر بارگذاری انفجاری از بین برود، کارکرد خودرو با مشکل مواجه خواهد شد.

عموماً بدنه خودروهای زرهی از فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا ساخته می‌شود. این نوع فولادها به دلیل قابلیت جذب انرژی و استحکام قابل توجه مدت‌ها است که به عنوان مواد اولیه برای کاربردهای نظامی در برابر برخورد پرتابه‌های با انرژی جنبشی بالا کارایی سیستم‌های زرهی را به طور قابل ملاحظه‌ای ارتقاء داده‌اند [۶]. در این نوع فولادها علاوه بر استحکام تسلیم، مقادیر سختی و استحکام نهایی بالا نیز مطلوب است؛ همچنین قابلیت جذب انرژی نیز، باید در حد قابل قبولی بالا باشد. در این دسته از فولادها از هر دو

مکانیزم استحکام‌دهی فلزات، یعنی عملیات حرارتی و کاهش اندازه دانه به صورت همزمان استفاده شده است تا علاوه بر افزایش چشمگیر استحکام ماده، میزان چقرمگی نیز در سطح مناسبی باقی بماند [۸]. این نوع فولادها در طی یک عملیات گرمایی-مکانیکی، یعنی تغییر شکل در دمای بالا و عملیات حرارتی بلافاصله بعد از آن ساخته می‌شوند. با وجود کارایی بالای فولادهای کم آلیاژ با استحکام بالا، چالش‌هایی هنگام جوشکاری و بعد از آن برای ساخت بدنه خودرو زرهی وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به شرایط نسبتاً سخت در جوشکاری و نیاز به عملیات پیشگرم و تغییرات قابل توجه استحکام ماده در منطقه متأثر از حرارت اشاره کرد [۹]. یکی از معایب فلزات استحکام‌دهی شده با کاهش اندازه دانه و عمیات حرارتی این است که با افزایش دما هر دو مکانیزم اثر خود را از دست خواهند داد. از این رو مشاهده شده که در اطراف حوضچه جوش سختی فولادهای زرهی به شدت افت پیدا می‌کند [۱۰]. از طرفی با توجه به دستورالعمل‌های جوشکاری این نوع فولادها مبنی بر استفاده از الکترودهای خاص با استحکام پایین‌تر از ماده پایه، پیش بینی می‌شود، استحکام فلز جوشکاری شده در بهترین حالت بدون هیچ عیبی به مراتب کمتر از فلز پایه باشد. همین امر سبب می‌شود تا بررسی استحکام و یکپارچگی ورق‌های زرهی جوشکاری شده که در بدنه خودرو زرهی استفاده می‌شوند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد.

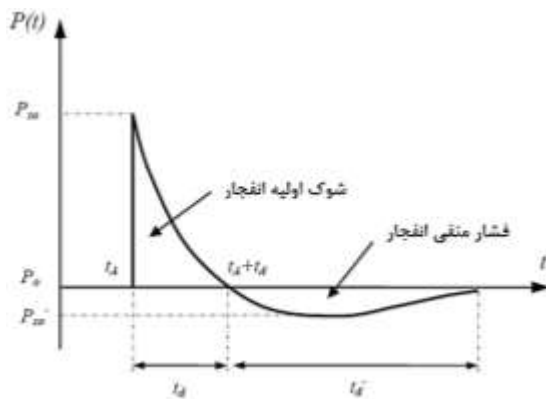
پدیده انفجار از جمله مسائلی در مکانیک محسوب می‌شوند که از دو جنبه ماهیت انفجار و اثر وضعی آن روی سازه یا محیط نزدیک به آن قابل بررسی است. برای مدل‌سازی انفجار یک ماده منفجره، می‌توان از شبیه‌سازی موج انفجار حاصله، بدون در نظر گرفتن جزئیات و یا مدل‌سازی خود ماده منفجره و مشاهده اثر وضعی آن پیرامون ماده منفجره استفاده کرد [۱۱]. برای مدل‌سازی موج انفجار، فشار معادل ماده منفجره با وزن مشخص به صورت تابعی از زمان به مانع پیرامون خود برخورد می‌کند و امواج پیرامون به صورت کروی منتشر خواهند شد [۱۲]. خلیل پور و همکاران [۱۳] به شبیه‌سازی انفجار حاصل از تی‌ان‌تی با کمک روش اویلری در نرم افزار آباکوس پرداخته و فرمولی برای توزیع بار انفجاری پیرامون اجسام سیلندری شکل ارائه داد. نتایج تحقیق نشان داد که در صورتی که آشفتگی در جریان هوا رخ

بررسی قرار داده است و انواع روش‌های مدل‌سازی مبتنی بر شبکه و بدون شبکه را مورد بررسی قرار داده است. یکی از ویژگی‌های روش هیدرودینامیک ذرات هموار، کوپل کردن تغییرات سرعت و تغییرات فشار و حل همزمان مساله است. این روش برای سیالات تراکم‌پذیر به سادگی قابل پیاده‌سازی است؛ اما برای سیالات تراکم‌ناپذیر نیاز تغییر فرمولاسیون و تبدیل مصنوعی سیال تراکم‌ناپذیر به سیال تراکم‌پذیر است [۱۷]. موسوی و زمانی [۱۸] به شبیه‌سازی انفجار در یک پوسته استوانه‌ای از جنس مس پرداخته و از روش هیدرودینامیک ذرات هموار برای شبیه‌سازی انفجار استفاده نموده‌اند و توانستند الگوی توزیع فضایی ترکش‌ها، تعداد تقریبی و اندازه آنها و سرعت ترکش‌ها را با دقت خوبی بدست آورند. از این رو بررسی و مدل‌سازی اثر انفجار روی سازه تحت بارگذاری با توجه به اثرات مذکور، امری ضروری است. از این رو در این مقاله ابتدا با توجه به شرایط تعیین شده در استاندارد ۴۵۶۹ ناتو سازه بدنه خودرو زرهی از جنس فولاد هارداکس ۵۰۰ تحت بارگذاری انفجاری با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود قرار گرفته و بدین ترتیب موج انفجار حاصل از انفجار یک مین ضد تانک شبیه‌سازی شده و تنش‌ها و تغییر شکل‌های حاصل از آن در زیر خودرو بدست خواهد آمد. سپس با معادل‌سازی بار وارد شده بر قسمتی از بدنه خودرو که بیشترین تنش و تغییر شکل در آنجا متمرکز شده، این قسمت به عنوان سازه منتخب تعیین شده و بار معادل برای مین ضد تانک با یک انفجار در فاصله کمتر و مقدار ماده منفجره معادل جایگزین انفجار مین شده است. سپس برای بررسی سازه جوشکاری شده به عنوان نماینده بدنه خودروی زرهی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار با در نظر گرفتن اتصالات جوشکاری تحلیل انجام خواهد شد و در انتها به مقایسه نتایج آزمایش‌های تجربی برای بررسی مقاومت سازه جوشکاری شده با شرایط شبیه-سازی‌های اجزای محدود روی سازه جوشکاری شده پرداخته می‌شود. مهمترین تفاوت این مقاله با سایر مقالات، توجه به الزامات استاندارد ۴۵۶۹ ناتو جهت بررسی یکپارچگی سازه جوشکاری شده در شرایط واقعی است. جنس بدنه مورد آزمایش، یکی از جدیدترین موادی است که در طراحی خودروهای زرهی مورد استفاده قرار می‌گیرد و اطلاعات کمی از نحوه رفتار آن در دسترس است. استفاده از روش

ندهد، استفاده از روش اویلری روشی مناسب برای شبیه‌سازی موج انفجار است. در صورتی که هدف مدل‌سازی بررسی اثر انفجار در نقاط نزدیک به ماده منفجره باشد یا محفظه ماده منفجره به گونه‌ای باشد که جریان ذرات مواد منفجره را بعد از انفجار را به سمت خاصی هدایت کند، مدل مذکور توانایی شبیه‌سازی این پدیده را نخواهد داشت. از این رو باید خود ماده منفجره مدل‌سازی شده و شرایط مرزی خاص مسئله در آن اجرا شود. برای مدل‌سازی ماده منفجره، باید معادله حالت ماده یعنی فشار ماده به صورت تابعی از چگالی وجود داشته باشد. به علاوه چالش‌های متعددی برای تحلیل اجزای محدود ماده منفجره وجود دارد که از جمله آنها می‌توان به از شکل افتادگی المان‌ها در منطقه تغییر شکل هنگام استفاده از مدل لاگرانژی یا زمان بسیار بالای محاسبات در مدل اویلری اشاره کرد که با مدل ترکیبی اویلر-لاگرانژی و مش تطبیقی تا حدودی می‌توان این مشکل را حل کرد [۶]. موسی بیکی ده آبادی و زمانی [۱۴] به مقایسه نتایج شبیه‌سازی عددی موج انفجار با روش لاگرانژی- اویلری و روش CONWEP پرداخته شده و نتایج تجربی حاصل از انفجار در ورق‌های مربعی شکل ایزوتروپ کاملاً گیردار تحت بارگذاری انفجاری پرداخته است و نتیجه گرفته است که روش ترکیبی (شامل ترکیب دو روش لاگرانژی- اویلری، دارای دقت بیشتری نسبت به هر یک از روش‌های انتخابی و CONWEP) از نقطه‌نظر دقت در حل مسائل انفجار است. یکی از روش‌های بسیار موثر برای تحلیل ماده منفجره، استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار است که اجازه حرکت ذرات را بدون محدودیت به ماده می‌دهد [۱۵]. در این روش المان‌های ماده مورد نظر با یک مجموعه از ذرات جایگزین شده و هر ذره بدون وابستگی به ذره مجاور توانایی جابجایی به مقدار دلخواه را داشته و اساس این تغییرات بر مبنای معادله حالت ماده مورد نظر صورت خواهد گرفت. با توجه به سرعت بسیار بالای فرایند انفجار و اثرات مخرب آن روی موانع پیش روی آن، امکان تغییر شکل پلاستیک و شکست همزمان در نرخ کرنش‌های بسیار بالا وجود دارد [۵]. جعفری [۱۶] در مقاله‌ای نحوه تکامل، مزایا، معایب، نحوه به کارگیری و کاربردهای صنعتی روش هیدرودینامیک ذرات هموار را مورد

<sup>1</sup> Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH)

داشته باشد. به طور کلی برای بیان خواص مکانیکی بسیاری از مواد مهندسی مانند خواص هیدرودینامیک مواد می‌توان از معادله حالت<sup>۱</sup> مواد استفاده کرد. در این مدل فشار ماده به صورت تابعی از چگالی و انرژی مخصوص ماده بر مبنای حجم ماده بیان می‌شود. در این مقاله برای مدل‌سازی مواد منفجره از مدل<sup>۲</sup> JWL استفاده می‌شود [۲۰]. این رابطه مدلی برای بیان فشار ایجاد شده در ماده با توجه به انرژی شیمیایی آزاد شده بیان می‌کند. حالت کلی معادله JWL، در رابطه ۱ نشان داده شده است [۱۱].



شکل ۱- منحنی فشار ایجاد شده در انفجار به صورت تابعی از زمان [۱۲]

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \exp \left( -R_1 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + B \left( 1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \exp \left( -R_2 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + \rho \omega E_m \quad (1)$$

که در رابطه ۱،  $P$ ، فشار،  $\rho$ ، چگالی ماده،  $E_m$  انرژی واحد جرم و  $A, B, \omega, R_1, R_2$  ثوابت ماده می‌باشند.

هنگام اعمال بارهای دینامیکی مانند آنچه که در انفجار اتفاق می‌افتد، رفتار مواد تحت بارگذاری دینامیکی به طور قابل توجهی با رفتار مواد در شرایط شبه‌استاتیکی متفاوت است. این تفاوت عمدتاً از اثرات اینرسی، نرخ کرنش و موج تنش ناشی می‌شود. برای در نظر گرفتن اثرات اینرسی باید مسئله در حالت دینامیکی مورد تحلیل قرار گیرد؛ همچنین برای بیان رفتار مواد با در نظر گرفتن نرخ کرنش باید رابطه

هیدرودینامیک ذرات هموار می‌تواند شرایط مدل‌سازی را به شرایط واقعی نزدیک‌تر نماید.

## ۲- معادلات حالت انفجار و رفتار مکانیکی مواد

همان طور که بیان شد، برای شبیه‌سازی پدیده انفجار می‌توان از دو رویکرد مختلف استفاده کرد. در روش اول بدون توجه به هندسه ماده منفجره با استفاده از معادلات موج انفجار و برخورد و بازگشت آن در برابر مانع پیش رو، پدیده انفجار شبیه‌سازی می‌شود. شکل ۱ منحنی فشار حاصل از انفجار را در یک فاصله مشخص به صورت تابعی از زمان نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، بعد از طی زمان شروع انفجار  $t_d$  فشار به صورت ناگهانی افزایش یافته و به مقدار بیشینه  $P_{so}$  می‌رسد.

پس از گذشتن مدت زمان فاز مثبت انفجار ( $t_d$ ) به دلیل کاهش سریع جریان موج مثبت انفجار، فشار در طول بازه زمانی فاز منفی انفجار ( $t_d$ ) افت پیدا کرده و به مقدار فشار  $P_{so}$  خواهد رسید که این مقدار کمتر از فشار اتمسفر  $P_0$  است [۱۲، ۱۹]. به طور کلی برای بیان پارامترهای انفجار به صورت تابعی از ویژگی‌های ماده منفجره در فواصل مختلف از فاصله مقیاس شده  $Z = d/W^{1/3}$  استفاده می‌شود که در آن  $d$  فاصله تا مرکز انفجار و  $W$  وزن معادل تی‌ان‌تی ماده منفجره مورد نظر است [۱۲]. به عبارت دیگر با توجه به قدرت ماده منفجره در قیاس با تی‌ان‌تی وزن ماده منفجره مورد نظر با ضریبی تقویت کننده یا ضعیف کننده همراه خواهد بود. برای شبیه‌سازی موج انفجار با استفاده از روش اجزای محدود، نرم افزار با توجه به فاصله مانع تا مرکز انفجار و داشتن مشخصه‌های ماده منفجره، موج کروی حاصل از انفجار را با توجه به روابط تجربی موجود برای پارامترهای انفجار بر حسب فاصله مقیاس شده به مانع پیش رو برخورد داده و با توجه به میزان سفتی مانع، فشار بازتاب یافته را محاسبه خواهد کرد [۱۱].

در برخی موارد شبیه‌سازی انفجار با روش مذکور صحیح نبوده و باید خود ماده منفجره شبیه‌سازی شود؛ به عنوان مثال زمانی که ماده منفجره در محیطی محبوس شده و امکان انتشار موج انفجار در یک جهت وجود دارد، در این صورت امکان استفاده از روش فوق وجود ندارد. برای شبیه‌سازی ماده منفجره باید معادله حالت ماده مورد نظر وجود

<sup>1</sup> Equation of State

<sup>2</sup> Jones-Wilkins-Lee

می‌باشد که توسط جانسون و کوک توسعه پیدا کرده است [۲۱]. در این مدل کرنش شکست به صورت تابعی از نسبت تنش اصلی به تنش هیدرواستاتیک، دما، نرخ کرنش و مسیر کرنش بیان می‌شود. در این مدل فرض می‌شود، زمانی که ماده تحت کرنش‌های پلاستیک واقع شود و پارامتر شکست به مقدار بحرانی برسد، شکست ماده سریعاً اتفاق خواهد افتاد. با فرض اینکه  $D$  متغیر شکست باشد، مقدار آن بین صفر (بدون شکست) و ۱ (شکست کامل) متغیر خواهد بود. معیار شکست بر این اساس استوار است که کرنش پلاستیک در نقاط انتگرال‌گیری المان به مقدار بحرانی ۱ برسد، در این صورت شکست اتفاق خواهد افتاد. یعنی مطابق رابطه ۴ خواهیم داشت [۱۱]:

$$D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{p,f}} \quad (۴)$$

در رابطه ۴،  $\Delta \varepsilon_{pl}$  کرنش اعمال شده در هر بازه زمانی و  $\varepsilon_{p,f}$  کرنش پلاستیک شکست است که مقدار  $\varepsilon_{p,f}$  از رابطه ۵ قابل محاسبه است [۱۱].

$$\varepsilon_{p,f} = [d_1 + d_2 \exp(-d_3 \eta)] \left[ 1 + d_4 \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] \times (1 + d_5 \hat{\theta}) \quad (۵)$$

که در رابطه ۵،  $d_1$  تا  $d_5$  ثوابت ماده و  $\eta$  طبق رابطه ۶ تعریف می‌شود.

$$\eta = \frac{\sigma_m}{\sigma_{eq}} \quad (۶)$$

در رابطه ۶،  $\sigma_m$  تنش متوسط و  $\sigma_{eq}$  تنش معادل میز می‌باشد.

### ۳- شبیه سازی اجزای محدود و آزمون عملی

برای شبیه سازی انفجار بدنه از نرم افزار آباکوس بخش حلگر صریح<sup>۵</sup> استفاده شده است. بدین منظور برای شبیه سازی انفجار روی بدنه خوروی زرهی طبق استاندارد ناتو، باید مینی با جرم ۱۰ کیلوگرم با ماده منفجره تی‌ان‌تی در فاصله ۹۷ سانتی متری از زیر خودرو منفجر شود. به منظور شبیه سازی

بین نرخ کرنش، استحکام تسلیم، کرنش پلاستیک و دما را مشخص کرد. با توجه به پیچیدگی موجود در این رابطه، مدل‌های بسیاری در جهت برقراری ارتباط میان متغیرها ارائه شده اند.

مدل پلاستیسیته جانسون-کوک<sup>۱</sup> یکی از پرکاربردترین مدل‌ها برای بیان ارتباط میان کرنش، دما و نرخ کرنش با تنش سیلان ماده است. این رابطه یک مدل برای تخمین تنش سیلان برای مدل پلاستیسیته میززا است که برای بیان رفتار مکانیکی اغلب فلزات در فرایندهایی با نرخ کرنش بسیار بالا مانند ماشین‌کاری، مسائل برخورد و انفجار کاربرد دارد [۶]. این مدل قابلیت انطباق با مدل شکست جانسون-کوک<sup>۲</sup> و مدل شکست مرحله‌ای را دارد. رابطه ۲ مدل پلاستیسیته جانسون-کوک را نشان می‌دهد [۱۱].

$$\bar{\sigma} = [A + B(\bar{\varepsilon}^{pl})^n] \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\varepsilon}^{pl}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \right] (1 + \hat{\theta}^m) \quad (۲)$$

در رابطه ۲،  $\bar{\sigma}$  تنش سیلان ماده،  $\bar{\varepsilon}^{pl}$  کرنش پلاستیک معادل،  $\dot{\varepsilon}^{pl}$  نرخ کرنش پلاستیک معادل،  $\dot{\varepsilon}_0$  نرخ کرنش مرجع و  $A, B, C, n, m$  ثوابت ماده می‌باشند. به علاوه  $\hat{\theta}$  به شکل رابطه ۳ تعریف می‌شود.

$$\hat{\theta} = \begin{cases} 0 & \text{for } \theta < \theta_{transition} \\ \frac{\theta - \theta_{transition}}{\theta_{melt} - \theta_{transition}} & \text{for } \theta_{transition} < \theta < \theta_{melt} \\ 1 & \text{for } \theta_{melt} < \theta \end{cases} \quad (۳)$$

که در رابطه ۳،  $\theta$ ،  $\theta_{melt}$  و  $\theta_{transition}$  به ترتیب دما، دمای ذوب و دمای گذار یا دمایی است که پایین تر از آن اثر دما روی تنش تسلیم قابل نظر است.

با توجه به اینکه در شرایط انفجار امکان گسیختگی برای سازه مورد آزمایش وجود دارد باید از معیاری برای تعیین میزان گسیختگی در مواد استفاده کرد. به همین دلیل به منظور مدل‌سازی شکست نرم در نرخ کرنش‌های بالا مدل‌هایی ارائه شده‌اند که مدل شکست جانسون-کوک، یکی از آنها است. این مدل اصلاح شده مدل هانکوک و ماکنزی<sup>۴</sup>

<sup>5</sup> ABAQUS/Explicit

<sup>1</sup> Johnson-Cook Plasticity Model

<sup>2</sup> Mises

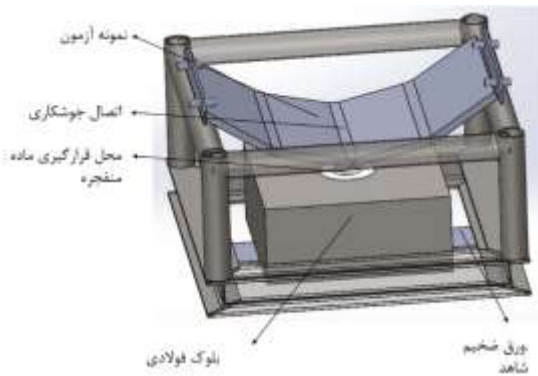
<sup>3</sup> Johnson-Cook Damage Model

<sup>4</sup> Hancock and Mackenzie



مرکز انفجار

شکل ۲- نمای بدنه خودروی زرهی و مرکز انفجار



شکل ۳- نمای مجموعه آزمایشی طراحی شده برای انجام آزمون عملی انفجار

جدول ۱- پارامترهای مدل پلاستیسیته و شکست جانسون -

کوک برای هارداکس ۵۰۰ [۶]

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۰/۱	d1	۱۲۰۰ MPa	A
۰/۴	d2	۱۵۸۰ MPa	B
۱/۳	d3	۲۱۰ GPa	E
۰/۰۵	d4	۰/۱۷۵	n
۰	d5	۰/۰۰۲۸	C
		۰/۰۰۰۱	$\epsilon_0$
		۳۰۰ K	$\theta_{transition}$
		۱۸۳۵ K	$\theta_{melt}$
		۱	m

جنس فولاد St37 استفاده شده که میزان تغییر شکل پلاستیک این ورق که در شکل ۳ نشان داده شده، معیار

این انفجار در نرم افزار آباکوس از روش CONWEP استفاده شده و مشخصات فوق به عنوان ورودی به نرم افزار وارد شده است. بدین منظور مرکز انفجار در فاصله ۹۷ سانتی متری از زیر خودرو در نظر گرفته شده است (شکل ۲). بدنه خودروی زرهی در این تحلیل به صورت یکپارچه با ضخامت ۳۰ میلی متر در نظر گرفته شده است. جنس بدنه از فولاد هارداکس ۵۰۰ انتخاب شده و با توجه به اینکه وزن خودرو همراه با ادوات و ملحقات در حالت واقعی حدود سه برابر حالت شبیه سازی شده است، شتاب گرانش در نظر گرفته شده، ۳ برابر حالت عادی به عنوان نیروی جاذبه به بدنه وارد شده است. شرایط مرزی برای بدنه به گونه ای در نظر گرفته شده که بدنه بتواند آزادانه در جهت موج انفجار حرکت کند. ثابت های معادله پلاستیسیته و مدل شکست جانسون-کوک برای هارداکس ۵۰۰ در جدول ۱ نشان داده شده است. برای مش-بندی بدنه از ۲۳۱۷۵ المان هرمی شکل C3D10M با تابع شکل درجه دوم (ده گره در هر المان) استفاده شده است. به منظور افزایش دقت تحلیل در راستای ضخامت ۴ المان در نظر گرفته شده است. برای شبیه سازی اجزای محدود یکپارچگی سازه جوشکاری شده ابتدا با انتخاب بخشی از قسمت زیرین سازه که بیشترین تنش و جابجایی در آن اتفاق افتاده و نزدیک کردن فاصله مرکز انفجار تا بدنه خودرو همزمان با کاهش جرم ماده منفجره به ۵۰۰ گرم شبیه سازی ها در فواصل بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی متر روی بدنه اصلی انجام شد. بدین ترتیب در فاصله ۱۲/۵ سانتی متری با این مقدار ماده منفجره، تنش های یکسانی بر سازه منتخب اعمال خواهد شد. از این رو با این کار امکان بررسی سازه منتخب به صورت عددی و عملی فراهم شد. برای بررسی استحکام سازه منتخب، شبیه سازی ها روی این سازه با در نظر گرفتن اتصالات جوشکاری انجام شد. بدین ترتیب برای انجام این آزمون، یک سیستم موقعیت دهی مستحکم طراحی شده که در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، قسمتی از زیر بدنه خورو که با اتصالات جوشکاری به هم متصل شده در این سیستم، موقعیت دهی و گیره بندی شده و در مکان مناسب خود قرار گرفته اند. سپس ماده منفجره درون یک بلوک فولادی جاسازی شده و بعد از انفجار نمونه تحت بارگذاری مستقیم قرار می گیرد. به منظور بررسی میزان بار وارده در این انفجار از یک ورق ضخیم شاهد از

جدول ۲- پارامترهای مدل JWL برای ماده منفجره تی-ان- تی استفاده شده در تحلیل اجزای محدود [۲۰]

مقدار	متغیر
۱۶۳۰	چگالی اولیه $\rho_0(kg/m^3)$
۶۹۳۰	سرعت انفجار $D(m/s)$
۷	گرمای ویژه انفجار $E_0(GPa)$
۴/۱۵	$R_1$
۰/۹۵	$R_2$
۰/۳	$\omega$
۵۲۰/۶	$A(GPa)$
۵/۳	$B(GPa)$

برای انجام آزمون تجربی، ابتدا قسمت منتخب از سازه بدنه خودرو توسط روش جوشکاری ساخته شد و سپس نمونه‌های آزمون کشش جهت تعیین استحکام کششی جوش تهیه گردید. خواص بدست آمده به عنوان ورودی بخش رفتار مواد نرم افزار آباکوس برای قطعه جوشکاری شده در نظر گرفته شد. آزمایش روی سازه منتخب با انفجار ۵۰۰ گرم تی-ان تی انجام شد. برای ثبت پدیده انفجار و پاسخ سازه از دوربین فیلمبرداری با سرعت بالا استفاده شد.

#### ۴- نتایج و بحث

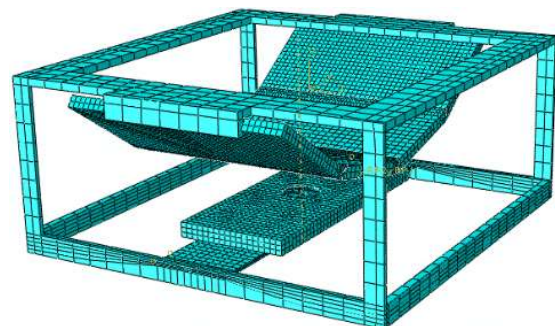
در این بخش ابتدا نتایج شبیه‌سازی المان محدود بیان خواهد شد، سپس نتایج آزمون تجربی ارائه می‌شود و در انتها نیز به بحث و بررسی درباره نتایج پرداخته خواهد شد.

##### ۴-۱- نتایج شبیه سازی اجزای محدود

شکل ۵ توزیع تنش و جابه جایی در کف بدنه خودروی زرهی را در لحظه‌ای نشان می‌دهد که بیشترین میزان تنش معادل برای بارگذاری با امواج انفجاری بوجود آمده است را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، مقدار تنش ایجاد شده ناشی از انفجار در حدود ۵۵۰ مگاپاسکال است که در مقایسه با تنش تسلیم ورق هاراکس ۵۰۰ استفاده شده در تحلیل بسیار کمتر است، ولی با توجه به خواص مکانیکی اتصالات جوشکاری، بررسی سازه به همراه اتصالات جوشکاری

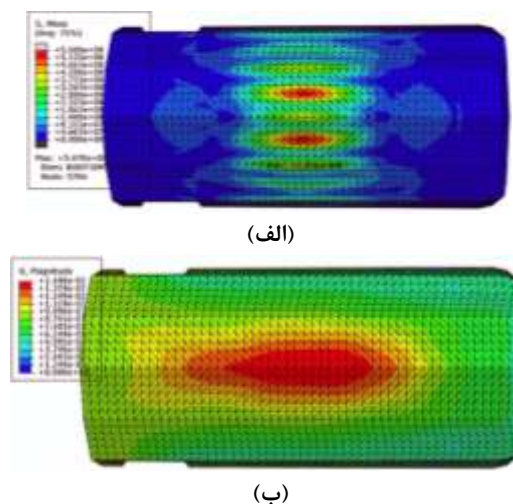
مناسبتی برای ارزیابی نتایج آزمون شبیه سازی اجزای محدود و آزمون تجربی باشد.

خواص جوش با توجه به آزمون‌های تجربی انجام شده روی قطعات جوشکاری شده از هارداکس ۵۰۰ تعیین شده است. استحکام تسلیم فلز جوش برابر ۵۰۰MPa و استحکام نهایی ۶۸۰MPa و کرنش شکست آن ۰/۳ در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی رفتار ماده منفجره در انفجار به دلیل عدم توانایی روش CONWEP، از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) استفاده شده است. در روش CONWEP تنها به اعمال موج انفجار توجه می‌شود؛ در حالی که رفتار ذرات ماده منفجره پس از انفجار مورد توجه قرار نمی‌گیرد، لذا به جای مدل سازی موج انفجار این بار خود ماده منفجره مدل شده و انفجار در قالب یک معادله حالت برای ماده منفجره تعریف شده است؛ یعنی پس از مدل سازی ماده منفجره به شکل استوانه‌ای به قطر ۱۰ و ارتفاع ۴ سانتی‌متر ماده مورد نظر با توجه به تعداد ۲۶۴۶ المان مکعبی درجه اول (هشت گرهی) C3D8R به همین تعداد ذره تبدیل می‌شود. برخورد این ذرات با تکانه مشخص سبب ایجاد موج انفجار به صورت دقیق تر خواهد شد. جدول ۲ پارامترهای مدل JWL را برای ماده منفجره تی-ان تی مورد استفاده در تحلیل اجزای محدود نشان می‌دهد. برای ساده‌سازی و کاهش محاسبات تحلیل، به غیر از نمونه، ماده منفجره و ورق ضخیم شاهد سایر اجزا صلب در نظر گرفته شده‌اند. به همین جهت در تحلیل اجزای محدود، اجزای ساده‌تری برای اجزای صلب در نظر گرفته شده است. شکل ۴ مجموعه مونتاژی المان بندی شده برای تحلیل اجزای محدود سازه جوشکاری شده در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد.

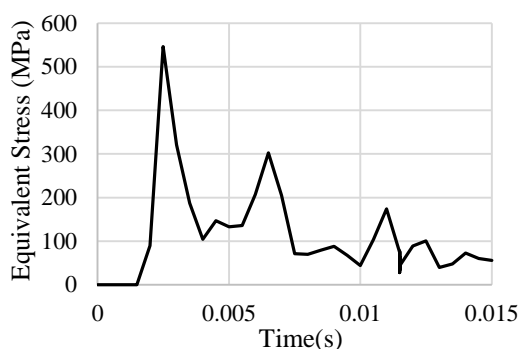


شکل ۴- مجموعه مونتاژی المان بندی شده برای تحلیل اجزای محدود سازه جوشکاری شده

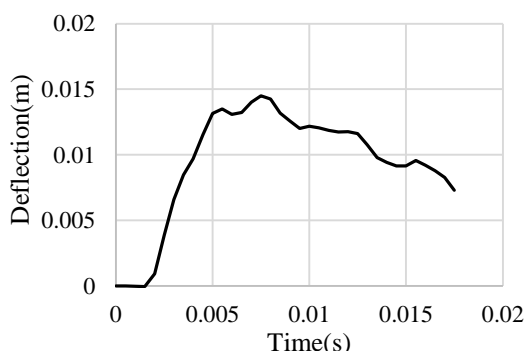
تغییر شکل به آن وارد می‌شود، برای انجام آزمون انتخاب گردید. آزمون انفجار روی سازه انتخاب شده و با کاستن از وزن ماده منفجره و کاهش فاصله محل انفجار انجام پذیرفت. وزن ماده منفجره و فاصله قرارگیری نسبت به سازه منتخب به گونه‌ای است که تنش‌های وارده بر سازه مفروض بدون در نظر گرفتن اتصالات جوشکاری تقریباً معادل حالت انفجار در زیر خودرو باشد. پس از بررسی‌های المان محدود مشخص گردید که ماده منفجره به وزن ۵۰۰ گرم در فاصله ۱۲/۵ سانتی متری تنشی معادل با شبیه سازی اولیه را ایجاد کند. سپس این شبیه سازی برای همان سازه با در نظر گرفتن اتصالات جوشکاری تکرار شده که نتایج حاصل از شبیه سازی مذکور در شکل ۸ نشان داده شده است. شکل ۸ به ترتیب لحظه شروع، ۱، ۱/۵ و ۳ هزارم ثانیه پس از انفجار را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن



شکل ۵- الف) توزیع تنش و ب) توزیع جابجایی در کف خودروی زرهی برای لحظه ای با مقادیر بیشینه



شکل ۶- تغییرات تنش موثر بر حسب زمان برای مکانی با بیشترین میزان تنش روی کف خودرو برای بارگذاری انفجاری



شکل ۷- تغییرات خیز عمودی بر حسب زمان برای مکانی با بیشترین میزان خیز در کف خودرو برای بارگذاری انفجاری

شده امری ضروری است. شکل ۶ تغییرات تنش برحسب زمان برای نقطه‌ای که بیشترین میزان تنش در آن نقطه به وقوع می‌پیوندد را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود، تنش‌ها در ابتدا با رسیدن به زمان شروع موج مثبت به شدت افزایش یافته و بیشترین میزان تنش به ۵۵۰ مگاپاسگال می‌رسد و سپس با گذر موج اولیه انفجار به سمت صفر میل می‌کند. با توجه به شکل ۵-ب که توزیع جابجایی در کف خودروی را نشان داده شده است، بیشترین مقدار جابجایی در کف خودرو مربوط به قسمت مرکزی کف خودرو می‌باشد که این جابجایی به صورت موج روی خط مرکزی حرکت می‌کند. شکل ۷ نمودار جابجایی عمودی برحسب زمان در نقطه‌ای که مقدار بیشینه اتفاق می‌افتد را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، بیشترین میزان خیز عمودی تقریباً ۱۴/۵ میلی‌متر است با توجه به اینکه سازه وارد منطقه پلاستیک نمی‌شود، با گذشت زمان مقدار این خیز به صفر خواهد رسید و ماده دچار تغییر شکل پلاستیک دائمی نخواهد شد. قابل ذکر است که توزیع تنش و کرنش در شکل ۵ مربوط به نقطه ماکزیمم در شکل ۶ و ۷ است.

به منظور انجام آزمون تجربی به صورت عملی، بخشی از بدنه خودرو جهت ساخت و انجام آزمون انفجار انتخاب گردید. برای انتخاب این بخش، به بررسی تنش‌های وارده بر بدنه خودرو در حالت واقعی با در نظر گرفتن اتصالات جوشکاری پرداخته شد و قسمتی از بدنه که بیشترین تنش و

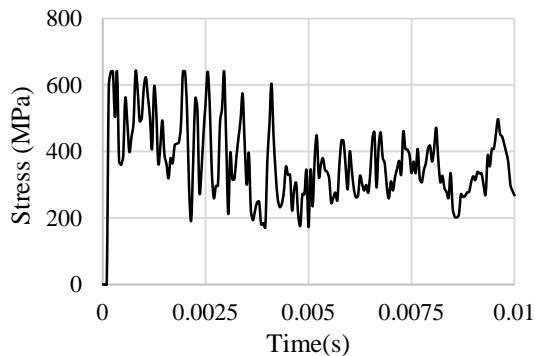


با بیشینه میزان تنش معادل بر حسب زمان نشان می‌دهد. براساس نتایج شکل ۹، مقدار تنش‌های وارده بر اتصال جوشکاری شده در یک نقطه به صورت موضعی از حد تنش تسلیم ماده فراتر رفته و به ۶۴۰ مگاپاسگال رسیده، ولی به استحکام نهایی فلز جوش، یعنی ۶۸۰ مگاپاسگال نرسیده است، به علاوه مشاهدات نشان می‌دهد که هیچ گونه گسیختگی و خرابی در این نقطه وجود ندارد.

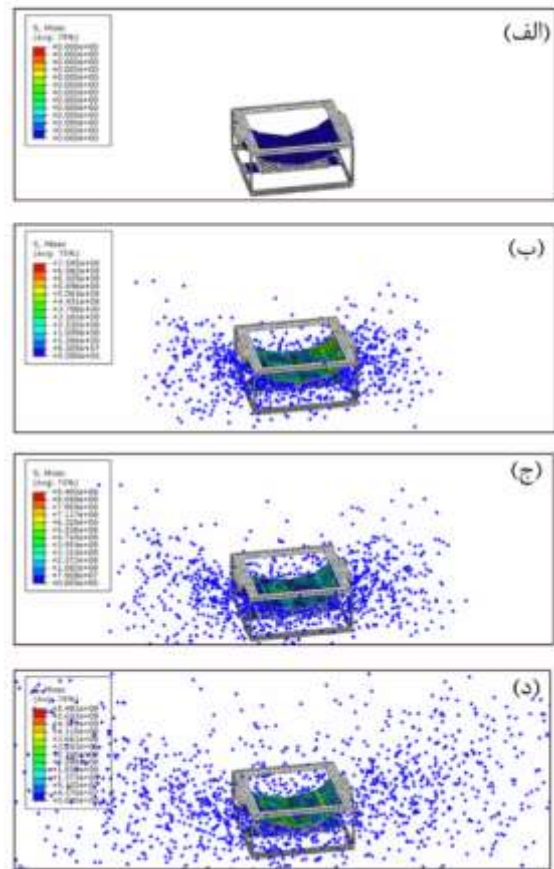
با گذشت زمان و گذر موج اصلی انفجار میزان تنش‌های وارده بر جوش کاهش یافته و به مقادیری پایین‌تر از استحکام تسلیم ماده می‌رسد. با توجه به وارد شدن فلز جوش به منطقه پلاستیک، مقداری تنش در فلز جوش بعد از این انفجار باقی مانده است. شکل ۱۰ تغییرات جابجایی عمودی قطعه مورد آزمایش را برای مکانی با مقادیر بیشینه تنش معادل روی جوش میانی نشان می‌دهد. جابجایی با شروع پدیده انفجار ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد به گونه‌ای که در زمان ۰/۰۰۴ ثانیه مقدار جابجایی به بیشترین حد خود یعنی با ۱/۲ سانتی متر می‌رسد و سپس در زمانی نزدیک به ۰/۰۱ مقدار این جابجایی به صفر می‌رسد.

#### ۴-۲- نتایج آزمایش تجربی

همان طور که بیان شد، برای بررسی سازه بدنه خودروی زرهی در عمل، باید سازه انتخاب شده را که با استفاده از روش جوشکاری ساخته شده مورد آزمون قرار داد. قبل از انجام آزمون انفجار آزمون‌های متعددی برای تایید صحت جوشکاری‌های انجام شده صورت پذیرفت تا تمامی اتصالات



شکل ۹- تنش معادل روی اتصال جوش میانی در نقطه ای با مقادیر بیشینه تنش معادل تحت بارگذاری انفجاری نشان داده شده در شکل ۸



شکل ۸- شبیه سازی انفجار با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) با ۵۰۰ گرم ماده منفجره در فاصله ۱۲/۵ سانتی متری از مرکز ورق جوشکاری شده (الف) لحظه شروع، (ب) یک هزارم ثانیه، (ج) ۱/۵ هزارم ثانیه و (د) سه هزارم ثانیه

اتصالات جوشکاری سطح تنش‌ها داخل ورق‌ها افزایش یافته، ولی هنوز به اندازه تنش تسلیم فلز پایه نرسیده است و تنش به صورت کاملاً موضعی و متمرکز بوده و بخش کوچکی از سازه را شامل می‌شود. بررسی تنش معادل در اتصالات جوشکاری نشان می‌دهد که بیشترین مقدار تنش در اتصال جوش میانی و روی سطح بیرونی به سمت ماده منفجره اتفاق می‌افتد. با توجه به میزان تنش‌های به وجود آمده در شکل-های ۸-الف تا ۸-د پس از انفجار ماده منفجره، موج مثبت انفجار به وجود آمده و سطح تنش‌ها افزایش می‌یابد، سپس مقدار تنش‌ها کاهش پیدا می‌کند. شکل ۹ تغییرات تنش معادل بر حسب زمان برای اتصال جوش میانی را در نقطه‌ای



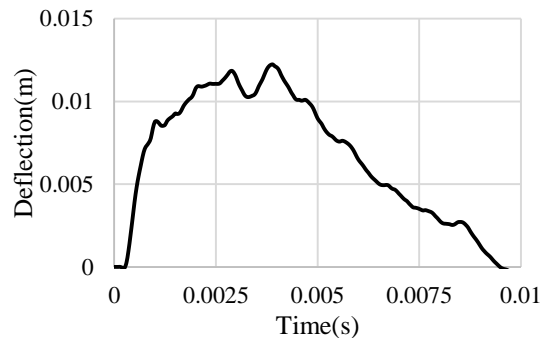
شکل ۱۱- آزمون عملی انفجار روی قسمتی از سازه بدنه خودروی زرهی ساخته شده با روش جوشکاری

شد، در صورتی که مقداری از انرژی ایجاد شده توسط موج انفجار به دلیل تغییر شکل پلاستیک جذب شده و مقدار خیز ورق شاهد را کاهش داده است.

#### ۵- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی یکپارچگی سازه بدنه خودروی زرهی تحت بارگذاری انفجاری با استفاده از مدل سازی المان محدود و آزمایش های تجربی پرداخته شده است. مهمترین نتایج حاصل شده به شرح ذیل است:

- مدل سازی المان محدود روی سازه بدنه خودرو با استفاده از روش موج انفجار برای ۱۰ کیلوگرم تی-ان تی در فاصله ۹۷ سانتی متری نشان داد که بیشینه میزان تنش در بدنه خودو بدون در نظر

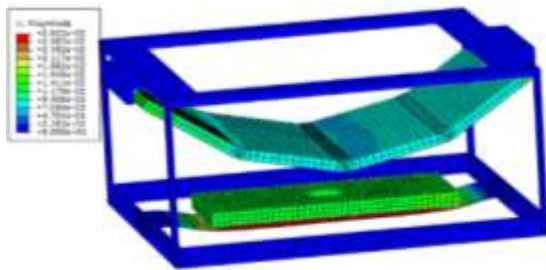


شکل ۱۰- جابجایی روی اتصال جوش میانی در نقطه ای با مقادیر بیشینه تنش معادل تحت بارگذاری انفجاری نشان داده شده در شکل ۸

جوشکاری شده منطبق با حداقل میزان عیوب باشند. شکل ۱۱ نتایج آزمون انفجار را برای شرایطی منطبق بر شبیه سازی اجزای محدود نشان داده شده در شکل ۸ نشان می دهد. گسترش موج انفجار در عمل مشابه با نتایج مدل سازی المان محدود می باشد. به علاوه بررسی های انجام شده بعد از انجام آزمون انفجار روی قطعه بارگذاری شده هیچ گسیختگی یا خرابی را در این قطعه نشان نداد.

با توجه به استاندارد ۴۵۶۹ ناتو برای بررسی سازه بدنه خودروی زرهی در برابر بارگذاری انفجاری، در وهله اول سازه باید یکپارچگی خود را در برابر این نوع بارگذاری ها به نمایش بگذارد [۲، ۳]. همچنین با توجه به حفظ یکپارچگی و عدم وجود هرگونه خرابی در سازه منتخب، سازه مورد نظر توانایی مقاومت در برابر بارگذاری انفجاری تحت شرایط مشخص شده را با در نظر گرفتن اتصالات جوشکاری دارا است [۲، ۳]. برای بررسی صحت نتایج مدل سازی المان محدود و مقایسه آن با نتایج تجربی می توان از تغییر شکل ورق ضخیم شاهد از جنس فولاد St37 استفاده نمود. همان طور که در شکل ۱۲ مشاهده می شود، تغییر شکل ورق ضخیم شاهد در هر دو حالت عددی و تجربی یکسان بوده و این نمایانگر دقت تحلیل اجزای محدود انجام شده می باشد.

مقدار خیز ورق شاهد در آزمایش تجربی برابر با ۲۳ میلی متر و در حل عددی نرم افزار المان محدود برابر با ۲۷ میلی متر است که ۱۷ درصد تفاوت با یکدیگر را نشان می دهد. علت این اختلاف این است که در شبیه سازی قاب مورد استفاده برای انجام آزمون انفجار صلب در نظر گرفته



(الف)



(ب)

شکل ۱۲- تغییر شکل دائمی ورق ضخیم شاهد الف) مدل- سازی المان محدود و ب) آزمایش تجربی

- [2] Verhoeven TA (2011) Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles Vol. 2: Mine Threat. 3rd edn. Allied Engineering Publication, Belgium.
- [3] Verhoeven TA (2008) Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles Vol. 3: IED Threat. 2nd edn. Allied Engineering Publication, Belgium.
- [4] Mackiewicz A, Sławiński G, Niezgodą T, Będziński R (2016) Numerical analysis of the risk of neck injuries caused by ied explosion under the vehicle in military environments. ACTA Mech et Auto 10(4): 258-264.
- [5] Kiliç N, Bedir S, Erdik A, Ekici B, Taşdemirci A, Güden M (2014) Ballistic behavior of high hardness perforated armor plates against 7.62mm armor piercing projectile. Mater Design 63: 427-438.
- [6] Kiliç N, Ekici B (2013) Ballistic resistance of high hardness armor steels against 7.62 mm armor piercing ammunition. Mater Design 44: 35-48.
- [7] Najafi M, Hosseini SH, Joudaki J (2018) Penetration of armored piercing projectile into ultra-high strength steel targets: numerical and experimental investigation. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 8(2): 81-92. (in Persian)

گرفتن اتصالات جوشکاری در حدود ۵۵۰ مگاپاسکال بوده و این مقدار کمتر از نصف استحکام تسلیم ورق هارداکس ۵۰۰ (۱۲۰۰ مگاپاسکال) است. به علاوه بیشینه مقدار جابجایی بوجود آمده در کف خودروی زرهی ۱۵ میلی‌متر محاسبه شد.

- با توجه به معادل‌سازی تنش‌های وارده بر بدنه خودروی زرهی، قسمتی از سازه برای بررسی استحکام اتصالات بدنه انتخاب شد و بارگذاری انفجاری اولیه با یک انفجار معادل در فاصله ۱۲/۵ سانتی متری جایگزین شد. نتایج حاصل از مدل‌سازی با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) نشان می‌دهد که تنش‌های اعمال شده با در نظر گرفتن اتصالات جوشکاری در ورق‌های اصلی به نسبت حالت یکپارچه افزایش می‌یابد. با این وجود ورق‌های مورد استفاده در بدنه با در نظر گرفتن اتصالات جوشکاری تغییر شکل پلاستیک نخواهند داد.
- بررسی تنش معادل در اتصالات جوشکاری نشان می‌دهد که بیشترین میزان تنش در اتصال میانی قطعه منتخب به وجود آمده و میزان این تنش بیشتر از استحکام تسلیم جوش است که باعث تغییر شکل دائمی در قطعه می‌شود، ولی هیچگونه خرابی در آن مشاهده نمی‌شود.
- آزمون تجربی در شرایطی کاملاً مشابه با شرایط مدل‌سازی عددی انجام پذیرفت و مطابقت خوبی با نتایج عددی نشان داد، به گونه‌ای که تغییر شکل صفحه شاهد در هر دو آزمون با هم مقدار خطای ۱۷ درصدی را نشان می‌دهد.
- با توجه به استاندارد ۴۵۶۹ ناتو، سازه مورد نظر یکپارچگی خود را در برابر بارگذاری انفجاری مورد نظر حفظ کرده و هیچ گونه گسیختگی و تخریبی در آن مشاهده نشده است.

## ۶- مراجع

- [1] Verhoeven TA (2011) Procedures for evaluating the protection level of armoured vehicles, Vol. 1: Kinetic Energy and Artillery Threat. 3rd edn. Allied Engineering Publication, Belgium.

- [15] Deniz T (2013) Ballistic penetration of hardened steel plates. MSc Thesis, Dep of Mech Eng Middle East Technical University.
- [16] Jafari Y (2017) Smoothed particle hydrodynamics (SPH) simulation and its applications in aerospace. *J Tech Aero Eng* 1(2): 1-15. (in Persian)
- [17] Rouzbahani F, Hejranfar K (2018) Numerical simulation of wave-floating bodies interaction using a truly incompressible SPH method with artificial compressibility approach. *Journal of Solid and Fluid Mechanics* 8(1): 241–252. (in Persian)
- [18] Mousavi MV, Zamani Ashani J (2016) Simulation of expansion and rupture of cylindrical shell under internal explosion by smoothed particle hydrodynamics *Sharif Mech* 32.3(1): 29-39. (in Persian)
- [19] Rajendran R, Lee JM (2009) Blast loaded plates. *Mar Struct* 22: 99-127.
- [20] Elek P, Jaramaz S (2013) Modeling of the metal cylinder acceleration under explosive loading. *Sci Tech Rev* 63: 39-46.
- [21] Banerjee A, Dhar S, Acharyya S, Datta D, Nayak N (2015) Determination of Johnson-Cook material and failure model constants and numerical modelling of charpy impact test of armour steel. *Mater Sci Eng A* 640: 200-209.
- [8] Abbaschian R, Abbaschian L, Reed-Hill RE (2009) *Physical Metallurgy Principles*. 4th edn. Cengage Learning, Stamford.
- [9] Murti VSR, Srinivas PD, Banadeki GHD, Raju KS (1993) Effect of heat input on the metallurgical properties of HSLA steel in multi-pass MIG welding. *J Mater Process Technol* 37: 723-729.
- [10] Mazur M, Ulewicz R, Bokůvka O (2014) The impact of welding wire on the mechanical properties of welded joints. *Mater Eng-Materiálové Inžinierstvo (Memi) J* 21: 122-128.
- [11] User CAE. Abaqus 6.14 Analysis User Guide. Dassault System, 2014.
- [12] Ngo TD, Mendis P, Gupta A, Ramsay J (2007) Blast loading and blast effects on structures - An overview. *Electron J Struct Eng* 7: 76-91.
- [13] Khalilpour SH, Aghakouchak AA, Dehghani G (2017) Determination of blast pressure distribution around cylindrical shape based on numerical simulation of explosion. *Modares Mechanical Engineering* 17(2): 19-28. (in Persian)
- [14] Moosabeiki Dehabadi V, Zamani Ashani J (2015) Study of various clamped isotropic square plates simulating methods and compare with experimental results under explosion loads. *Modares Mech Eng J* 14(13): 315-322. (in Persian)