



Numerical Study of Redesign of Anti-Mine Safety Boots with the View of Further Reducing the Damage Caused by the Blast Wave

Saman Jafari¹, Mohammad Sheikh Ahmadi^{*}

1. Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Iranian National Standards Organization, Kurdistan Province, Sanandaj, Iran

Received: 2021/04/07

Accepted: 2021/08/23

Abstract:

Introduction: Designing and manufacturing anti-mine boots insoles is important in the military defense industry to reduce explosion damage.

Purpose and methodology: In this research, first, several types of anti-mine boots are examined and then, the proposed models are designed and analyzed by Autodein finite element software. The data presented by the reference research were used to validate the results of the numerical analysis.

Results: The simulation results of the present study with the reference research had acceptable accuracy. In the proposed models, the reliability coefficient for each model was calculated and compared to a base model.

Findings: The proposed models are designed with a combination of metals and composite materials with different thicknesses. Among the studied samples, a design with lateral surfaces of steel sheet with a thickness of 1 mm and two insoles of three layers of steel, Kevlar-epoxy fabric and glass-epoxy with thicknesses of 1, 1 and 2 mm were used, respectively, Can improve reliability by up to 60%. Also, the structure of this type of boot is proposed in such a way that the sole of the foot moves 15 cm away from the center of the explosion, which reduces the destructive effects by up to 5 times.

Keywords:

Shock wave, Defense equipment, Finite Element Method, Composite, Anti-mine boots

^{*} Corresponding Author mail: shaikh1381@gmail.com

بررسی عددی باز طراحی کفی پوتین‌های ایمنی ضدمین با دیدگاه کاهش بیشتر صدمات ناشی از موج انفجار

سامان جعفری^۱، محمد شیخ احمدی^{۲*}

^۱ دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ایران

^۲ کارشناس ارشد اداره استاندارد سنندج، استان کردستان، ایران

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۶/۰۱

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۱۸

چکیده

مقدمه: طراحی و ساخت کفی پوتین‌های ضدمین در صنایع دفاعی و نظامی به‌منظور کاهش صدمات ناشی از انفجار، اهمیت بالایی دارد. **هدف و متدولوژی:** در این پژوهش ابتدا به بررسی چند نوع کفی پوتین ضدمین پرداخته شده و سپس، مدل‌های پیشنهادی به‌وسیله نرم‌افزار اجزاء محدود اتوداین طراحی و تحلیل شده‌اند. برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از بررسی عددی از داده‌های آماری مربوط به پوتین ضدمین عنکبوتی که توسط پژوهش مرجعی ارائه شده، استفاده شد. **نتایج:** نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر با پژوهش مرجع از دقت قابل قبولی برخوردار بود. در مدل‌های پیشنهادی ضریب اطمینان برای هر مدل محاسبه و نسبت به یک مدل پایه مقایسه گردید.

یافته‌های پژوهشی: مدل‌های پیشنهادی با ترکیبی از فلزات و مواد کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف طراحی شده است. بین نمونه‌های بررسی شده طراحی که سطوح جانبی آن از ورق فولادی به ضخامت ۱ میلی‌متر و دو کفی سه لایه از جنس‌های فولاد، پارچه کولار-اپوکسی و شیشه-اپوکسی به ترتیب با ضخامت‌های ۱، ۱ و ۲ میلی‌متر استفاده شد، می‌تواند تا شصت درصد ضریب اطمینان را بهبود بخشد. همچنین، ساختار این نوع پوتین پیشنهادی به شکلی است که کف پا را به‌اندازه ۱۵ سانتی‌متر از مرکز انفجار دور می‌کند که موجب کاهش اثرات تخریب تا حدود ۵ برابر می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: موج انفجار، آزمودن تجهیزات دفاعی، روش المان محدود، کامپوزیت، پوتین ضد مین.

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: shaikh1381@gmail.com





۱- مقدمه

انواع مختلفی از پوتین‌های ضدمین در صنایع نظامی جهت کاهش تهدیدات ناشی از انفجار طراحی گردید. سازندگان هرکدام از جنبه متفاوتی به تقویت استحکام کفی پوتین توجه نموده‌اند. اندروواز^۱ نوعی از پوتین ضدمین برای مین‌های با وزن کمتر از ۶۰ گرم ارائه کرد. کفی این پوتین از جنس پلاستیک بود که با ۱۰ لایه کامپوزیتی به ضخامت هرکدام ۰,۲۵ میلی‌متر از جنس کولار اپوکسی تقویت شده بود. در این پژوهش نتیجه شد که چندلایه نازک عملکرد بهتری نسبت به یک‌لایه با ضخامت معادل دارد [۱]. دیون^۲ و همکارانش در پژوهش دیگری به بررسی نوع دیگری از پوتین ضدمین عنکبوتی پرداخت. در نتیجه این طراحی پوتین، به دلیل قطع ارتباط مستقیم پا در معرض انفجار، صدمات وارده کاهش پیدا کرد [۲]. در پژوهش دیگری هایدآ و همکارانش به بررسی کارایی چهار نوع مختلف از پوتین‌های ضدمین در معرض انفجار سه نوع مین پرداخت. در این پژوهش اثر انفجار هر کدام از مین‌ها روی صدمات اندام‌های تحتانی بررسی گردید [۳]. هاراجای^۳ و همکارانش به بررسی نوع دیگری از پوتین تحت عنوان پوتین عنکبوتی^۴ پرداختند. این پوتین متشکل از یک صفحه فولادی و چندلایه نازک کامپوزیتی بود. در نتیجه این پژوهش فقط حدود ۶ درصد از افرادی که از این پوتین استفاده کردند دچار شکستگی در ناحیه استخوان تیبیا پا شدند [۴]. فلاوادانا^۵ همکارانش طرح تکامل‌یافته‌تری از پوتین‌های طراحی شده توسط اندروواز را ارائه کردند. در کفی این پوتین یک صفحه کامپوزیتی از جنس الیاف پلی آرامید صنعتی به‌صورت مورب استفاده شده است [۵]. پرگراین^۶ و همکارانش رفتار مواد بکار رفته در کفی پوتین و بافت‌های بدن انسان را از لحاظ اختلاف در قدرت رسانش موج مورد توجه قرار دادند. همچنین برای منحرف کردن موج میله‌هایی که به‌صورت مورب در بخش زیرین کفی تعبیه شده بود را پیشنهاد دادند. این میله‌ها از جنس الیاف شیشه با زاویه ۳۰ درجه در محلولی از آب و الکل قرار گرفته بودند. در این پژوهش نتیجه شد این نوارها باعث انحراف موج می‌شوند [۶]. شوشتی^۷ تحلیل پدیده‌ی انفجار بر یک سازه نامتقارن را به‌وسیله کد نویسی در نرم‌افزار opensees و SAMBlast انجام و تحلیل دقیقی از بارگذاری انفجاری بر سطوح مایل را ارائه داد [۷]. توسط دامغان نوری و همکارانش به بررسی رفتار یک ورق الاستیک ترک‌دار تحت شوک ناگهانی حاصل از انفجار پرداخته شده است. در اینجا ابتدا روابط تحلیلی مربوط به توزیع تنش و خیز ورق الاستیک در حالت بارگذاری دینامیکی (وابسته به زمان) به‌دست آمده و سپس با استفاده از این روابط، میزان ضریب شدت تنش دینامیکی و به دنبال آن میدان‌های تنش در نوک ترک موجود در صفحه با در نظر گرفتن دو مورد شکست یک و دو تعیین می‌شود [۸]. مهمت کاراهان^۸ از شبکه مشبک فلزی بر اساس ساختار ساندویچ پانل برای جذب انرژی بیشتر در پوتین بهره گرفت [۹]. در پژوهش دیگری مهمت کاراهان از صفحه V شکل برای منحرف کردن موج انفجار استفاده کرد کاراهان و همکاران تحقیقات مشابهی را روی مقایسه نتایج آزمون‌های تجربی که عموماً بر پایه اندازه‌گیری مقدار کرنش ایجاد شده روی اندام‌های شبیه‌سازی شده که با پوتین‌های نظامی معمولی و نه پوتین ضد مین محافظت شده بودند، مقایسه کردند. نتایج حاصل حاکی از دقت قابل قبول ۸۰ درصد بود [۱۰]. مرتضایی و همکارانش به بررسی اثر اندازه المان در تحلیل غیرخطی اعضای بتن‌آرمه پرداخت و در پی دستیابی به پاسخ این سؤال هست که رفتار اعضای بتن‌آرمه تحت اثر انفجار آیا وابسته به اثرات ابعاد المان هست یا خیر. نتایج حاصل از تحلیل‌ها نشان می‌دهند که اجزاء مربعی منجر به نتایج نزدیک‌تر به واقعیت می‌شوند [۱۱]. باکر^{۱۱} صدمات وارده به سرنشینان خودرو را هنگام برخورد وسیله نقلیه با مین ضدخودرو را مورد بررسی قرارداد. آن‌ها نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده به‌وسیله شبیه‌سازی اندام‌های تحتانی^{۱۱} و مدل کامل بدن^{۱۲} را با نتایج مدل‌سازی کامپیوتری مقایسه کردند [۱۲]. توسط باقری پور اصلیل و همکارانش به‌منظور بررسی روش متداول مسیر بار جایگزین در پیش‌بینی پتانسیل خرابی پیش‌رونده ناشی از بارگذاری انفجاری، مدل المان محدود سه‌بعدی یک ساختمان فولادی قاب خمشی ۴ طبقه با استفاده از نرم‌افزار Abaqus/CAE 6.11 شبیه‌سازی گردید و به دو روش مسیر بار جایگزین و روش مستقیم اعمال بار انفجار مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل حاکی از آن است که اگر در هنگام ارزیابی پتانسیل وقوع خرابی پیش‌رونده، عامل شروع خرابی، بارگذاری انفجاری در

¹ Andrewvaz

² Dionne

³ Hayda

⁴ Harjai

⁵ Spider boot

⁶ Phlawadana

⁷ Pergrain

⁸ Karahan

⁹ Sandewich Panel

¹¹ Baker

¹¹ VALTs Leg

¹¹ VIAMan



نظر گرفته شود، پاسخ سازه در مقایسه با روش‌های متداولی که به ارزیابی وقوع خرابی پیش‌رونده می‌پردازند و در آن‌ها عامل اولیه ایجاد خرابی پیش‌رونده نادیده گرفته می‌شود، متفاوت خواهد بود [۱۳]. زاهدی‌نیا جهت تلف نمودن انرژی حاصل از انفجار استفاده از چندلایه کامپوزیت-فلز که بر مبنای پشت سر هم قرار دادن آلیاژهای فلزی و لایه‌های کامپوزیتی بود را پیشنهاد داد. در این تحقیق برای تست تجربی از تست لوله شاک^۱ بهره جست [۱۴]. حسینی و همکاران در مطالعه‌ای با استفاده از روش هیدرودینامیک ذرات هموار (SPH) به مطالعه‌ی تغییر شکل بدنه‌ی خودرو زرهی تحت بارگذاری انفجاری با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود پرداخت [۱۵]. یارهای و گنجی با استفاده از آزمایش‌های تجربی و مدل‌سازی المان محدود به بررسی اثر موج انفجار ناشی از ماده منفجره بر روی ورق‌های آلومینیومی پرداخته شد که مبتنی بر شناخت رفتار الاستیک و پلاستیک و پیش‌بینی فشار پارگی صفحات دایره‌ای مورد استفاده در لوله شاک‌ها و ارتباط آن با پارامترهای هندسی ورق‌های دایره‌ای بود [۱۶]. در سال‌های گذشته برای ارزیابی کارایی پوتین‌های ضدمین و مطالعه اثرات موج انفجار از آزمون‌های مخرب استفاده می‌شد که به دلیل پرهزینه بودن این آزمون‌ها (ATD) سعی شده که از مدل‌سازی و تحلیل مبتنی بر نرم‌افزار المان محدود کمک گرفته شود.

در این پژوهش در ابتدا یک نوع کفی فولادی که با دولایه کامپوزیت تقویت‌شده را به‌عنوان نمونه کفی پوتین ضد مین عنکبوتی در فاصله ۱۵ سانتی‌متری از ماده منفجره قرار داده شد و توسط نرم‌افزار Autodyn تأثیر انفجار بر پوتین بررسی گردید و با نتیجه مقاله مرجع دیون [۲] مقایسه شد. از طرفی تنش‌های به‌دست‌آمده را می‌توان با استحکام نهایی استخوان تیبیای پای انسان که در مرجع مهندسی پزشکی [۱۷] ارائه شده است، مقایسه کرد. نتایج با آمار جراحات گزارش مرجع [۴] کاملاً مطابقت دارد. سپس بعد از اعتبار سنجی شبیه‌سازی در ادامه چند نوع کفی پوتین جهت کاهش صدمات ناشی از انفجار پیشنهاد گردید.

۲- اعتبار سنجی

روش اجزاء محدود به‌طور گسترده‌ای در زمینه‌هایی از مهندسی مکانیک، مانند ضربه با سرعت بالا استفاده می‌شود. از این روش به دلیل کاهش هزینه آزمایش‌ها در تحلیل انفجار استفاده می‌شود. در مرحله اول برای اعتبارسنجی نتایج، ابتدا مدل پوتین عنکبوتی مطابق مرجع طراحی و در معرض انفجار یک مین سبک M14 قرار می‌گیرد. سپس مقادیر فشار و تنش‌های عمودی و برشی به‌دست‌آمده با مقاومت استخوان پا مقایسه می‌شود. برای تعریف خواص مواد به‌کار رفته در این پژوهش مانند فولاد، هوا، پارچه کولار-اپوکسی و اپوکسی از کتابخانه نرم‌افزار Atudyn و برای خواص ماده استخوان پا از مرجع [۱۷] و مشخصات پارچه شیشه-اپوکسی از مرجع [۱۸] استفاده شده است. مشخصات این مواد در جدول ۱ و ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات پارچه کامپوزیت شیشه-اپوکسی [۱۸].

پارامتر	مقدار	واحد
چگالی	۱۸۵۰	kg/m ³
مدول یانگ E11	۲۴	GPa
مدول یانگ E22	۲۴	GPa
مدول یانگ E33	۴	GPa
نسبت پواسون ۱۲	۰,۱۱۵	-
نسبت پواسون ۲۳	۰,۲۵	-
نسبت پواسون ۱۳	۰,۲۵	-
مدول برشی ۱۲	۱,۷	GPa
مدول برشی ۲۳	۴,۸	GPa
مدول برشی ۱۳	۴,۸	GPa
مقاومت کششی در جهت ۱۱	۳۵۰	MPa
مقاومت فشاری در جهت ۱۱	-۳۴۰	MPa
مقاومت کششی در جهت ۲۲	۳۰۰	MPa
مقاومت فشاری در جهت ۲۲	-۲۰۰	MPa

¹ Shock tube





کرنش تخریب	۰,۲	-
------------	-----	---

جدول ۲- خواص ماده بکار رفته بجای استخوان‌های پا [۱۷].

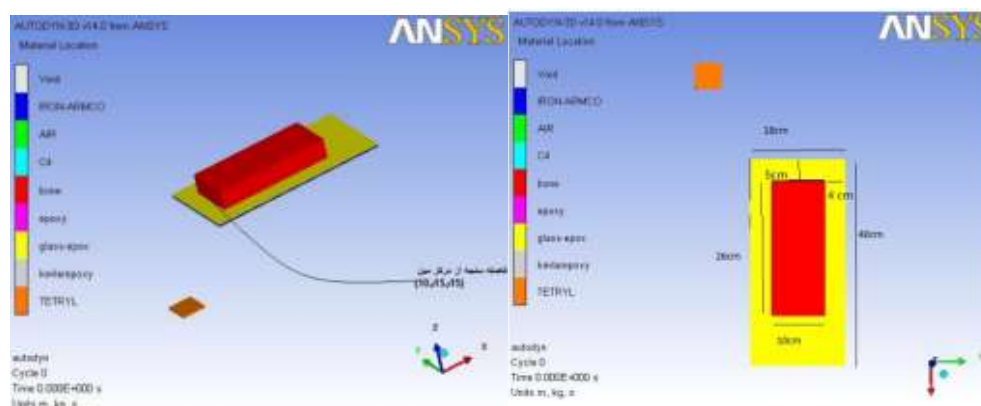
پارامتر	مقدار	واحد
چگالی	۱۲۰۰	kg/m ³
مدول بالک	۱۰۰	GPa
دمای اولیه	۲۹۳	K
مدول برشی	۵,۶	GPa
مقاومت کششی در جهت X	۵۰	MPa
مقاومت کششی در جهت Y	۵۰	MPa
مقاومت کششی در جهت Z	۱۳۰	MPa
مقاومت برشی XY	۶۵	MPa
مقاومت برشی YZ	۶۵	MPa
مقاومت برشی XZ	۶۵	MPa

پارامتر کرنش تخریب^۱ معیاری را برای جدایش المان‌ها تعریف می‌کند. در مسائلی که ماده دچار تغییر شکل‌های زیاد می‌شود احتمال وقوع جدایش ماده بسیار بالا است. معمولاً برای تعیین یک معیار جدایش برای ماده از تعریف یک سطح کرنش استفاده می‌شود. بدین ترتیب که در حین تحلیل مسئله نرم‌افزار به‌طور مداوم به کنترل کردن این سطح کرنش می‌پردازد و اگر المان به این حد از کرنش برسد این المان مجاور جدا می‌شود.

۲-۱- فرضیات شبیه‌سازی

در این تحلیل بجای پوتین عنکبوتی از یک صفحه فولادی به ابعاد ۰,۴×۰,۱۸×۰,۰۳ مترمکعب و دو صفحه شیشه-اپوکسی به همین ابعاد ولی به ضخامت ۰,۰۰۱ متر در بالا و پایین صفحه فولادی فرض شده است. پارچه الیاف این صفحه کامپوزیتی از نوع بافته‌شده با وزن ۳۰۰ گرم بر مترمکعب و ۶۰ درصد حجمی الیاف است. ماده واسط هوا با فرض ایده‌آل و انرژی داخلی ۱۱۱۳ کیلوژول بر کیلوگرم در دمای اولیه ۲۵ درجه سانتی‌گراد و فشار ۱۰۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. ماده منفجره دارای هندسه مکعبی به ابعاد ۰,۰۱×۰,۰۴×۰,۰۴ متر از جنس Tetryl به چگالی ۱۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب که خصوصیات مواد آن از کتابخانه Atudodyn استخراج شده است. به جای کف پا از مکعبی به ابعاد ۰,۲۶×۰,۱×۰,۰۵ مترمکعب که خصوصیات آن در جدول ۱ آمده است. سنجه اندازه‌گیری در وسط سطح پایین مکعب نصب شده است. مش‌بندی برای کلیه اجزا با المان‌های مربعی با اندازه ۵,۵×۰,۵ میلی‌متر انجام گرفته است. تنش اعمالی از طرف وزن بدن به کف پا به این صورت در نظر گرفته شده که فرض شده در هنگام قدم برداشتن شخصی به وزن تقریبی ۸۰ کیلوگرم حدود ۵۰ کیلوگرم از جرم بدن وی روی پای جلو قرار می‌گیرد. با محاسبه نیروی حاصل از این وزن بر روی سطح مکعب فرضی تنش حدود ۲۰ کیلو پاسکال اعمال می‌شود که در شرایط مرزی مسئله لحاظ می‌شود. مکعب فرضی بدون گیردار کردن یعنی با ۶ درجه آزادی در نظر گرفته می‌شود. این طرح در شکل ۱ نشان داده شده است.

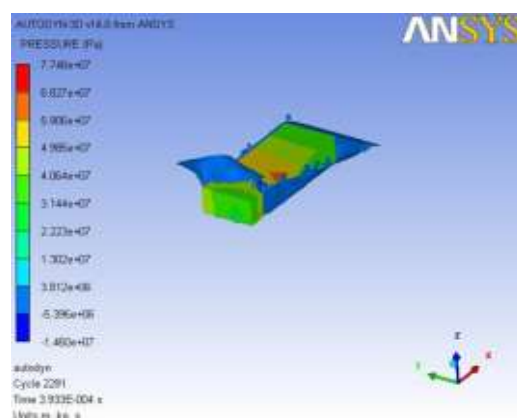
¹ Erosion Strain



شکل ۱- مدل پوتین عنکبوتی در دو نمای مختلف.

۲-۲- نتایج شبیه‌سازی و مقایسه با پژوهش مرجع ۲

مقادیر محاسبه شده مربوط به تنش در جهات مختلف و فشار هیدرو استاتیکی وارد بر کفی پوتین مدل عنکبوتی را در جدول ۳ می‌بینیم. همچنین تصویر تغییر شکل یافته این کفی بر اثر انفجار در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲- تغییر شکل مدل شبیه‌سازی شده پوتین عنکبوتی بعد از انفجار

جدول ۳- نتایج حاصل از شبیه‌سازی پژوهش حاضر

σ_{xz} MPa	σ_{zy} MPa	σ_{yx} MPa	σ_{zz} MPa	σ_{yy} MPa	σ_{xx} MPa	P MPa
۱۴	۱۲٫۶	۱۴٫۸	۸۰	۲۲٫۹	۲۳٫۱	۲۳٫۲

مقادیر پیش‌بینی شده توسط نرم‌افزار با توصیفات و آمار مربوط به پوتین عنکبوتی هم‌خوانی دارد چراکه مقادیر تنش‌ها کمتر از حداقل مقاومت استخوان‌های متراکم پا است. نتایج جدول ۲ با استحکام استخوان پا مقایسه می‌گردد. مطابق جدول ۲ مقادیر تنش به دست آمده از مقاومت نهایی استخوان انسان در جهات مختلف بسیار کمتر است پس می‌توان نتیجه گرفت که این مقادیر نیرو سبب شکستن استخوان پا نمی‌شوند. این نتیجه‌گیری با گزارش آماری جراحات مقاله آقایان هاراجای و پاتینیا [۴] گزارش شده در جدول ۲ تطابق دارد. در این پژوهش مرجع در صد شکستگی استخوان تیبیا کسانی که از پوتین عنکبوتی استفاده کرده‌اند حدود ۶ درصد اعلام شده است. در جدول ۴ نتایج حاصل مقایسه شده است. در جدول ۴ تنش اعمالی کمتر از مقاومت نهایی عضو است و موجب شکستگی و گسیختگی آن نمی‌شود.



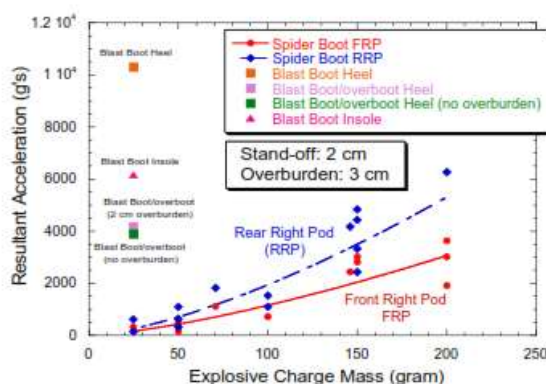


جدول ۴- مقایسه نتایج شبیه سازی با استحکام پا.

تنش	تنش های حاصل از مدل سازی (MPa)	مقاومت فشاری استخوان (2) (MPa)
σ_{xx}	۲۳,۱	۱۹۰
σ_{yy}	۲۲,۹	۱۳۰
σ_{zz}	۸۰	۱۳۰

۲-۳- نتایج شبیه سازی و مقایسه با پژوهش مرجع ۲

در بخش دوم صحت سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی عددی را می توان با نتایج حاصل از آزمایش های تجربی انجام شده پژوهش دیگری توسط مرجع [۲] بر روی پوتین عنکبوتی مقایسه کرد. شتاب حاصل از انفجار برای پای شبیه سازی شده در شکل ... نشان داده شده است. در این مطالعه به واسطه ساختار Lower Extremity Test خروجی ها فقط در راستای عمود بر زمین سنجیده می شود. در شکل ۳ نتایج پژوهش مرجع ارائه شده است.



شکل ۳- شتاب حاصل از انفجار مقاله مرجع ۲.

جهت مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی مقاله حاضر و آزمون تجربی می بایست با استفاده از تنش در راستای عمود بر زمین σ_{zz} مساحت مکعب نماینده پا و جرم مکعب، شتاب حاصل از مدل سازی موج انفجار را به دست آورد که این مقدار در جدول ۵ آمده است.

جدول ۵- مقایسه نتایج شبیه سازی حاضر با مقاله مرجع

شتاب حاصل آزمون تجربی گرم بر ثانیه	شتاب حاصل از مدل سازی گرم بر ثانیه	خطا
۲۰۰۰	۱۹۳۳	۳,۳۵

۳- مدل های پیشنهادی برای پوتین ضد مین

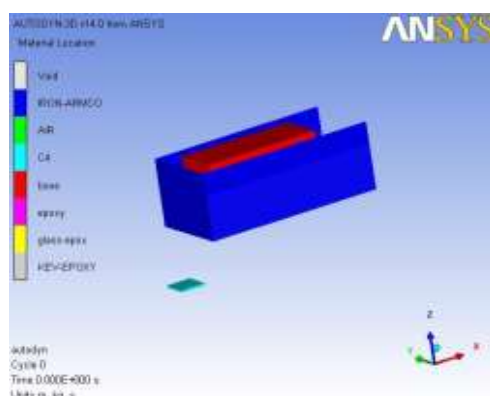
در این بخش به بررسی عددی چند مدل مختلف پوتین ضدمین در جهت کاهش صدمات ناشی از انفجار پرداخته شده است. برای برآورد فشار ناشی از ۵۰ گرم خرج C4 تعداد ۱۰ سنجه را در فواصل مختلف مطابق جدول ۶ در نظر می گیریم. همان طور که انتظار می رود، در فاصله $x=10\text{ cm}$ با تغییر در ارتفاع، فشار تغییر چندانی ندارد. پس به جای ایجاد فاصله ۱۵ سانتی متر در جهت Z (ارتفاع از سطح زمین) می توان از فاصله ۱۰ تا ۱۵ سانتی متر در جهت X و ارتفاع کمتر برای طراحی پایه های پوتین بهره برد. این حالت حفظ تعادل و سهولت راه رفتن را برای استفاده کننده را در پی خواهد داشت.



جدول ۶- نسبت مقدار فشار بافاصله از مرکز مین

مختصات سنجه نسبت به مرکز مین			فشار
Z(cm)	Y(cm)	X(cm)	MPa
۱	۱۲	۱۰	۱۷۰
۵	۱۲	۱۰	۱۷۴
۱۵	۱۲	۱۰	۱۶۸
۱	۰	۱۰	۵۸۰۰
۵	۰	۰	۳۸۰۰
۱۰	۰	۰	۲۶۰
۱۵	۰	۰	۲۳۰
۲۰	۰	۰	۲۲۰

سنجه روی پا دقیقه مانند حالت پوتین عنکبوتی است و فاصله آن تا مرکز مین مطابق شکل ۴ در جهت‌های مختلف (۱۵ سانتی‌متر) است.



شکل ۴- مدل پیشنهادی (الف)

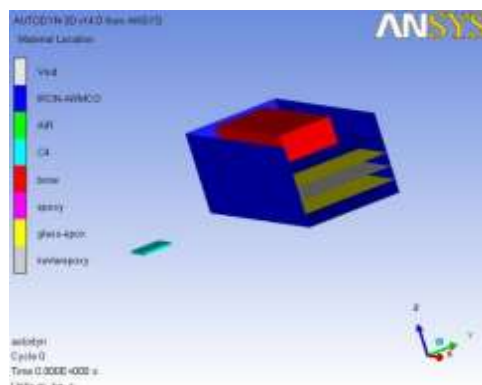
۳-۱- طرح ب

در اینجا طرح پوتین الف را با صفحات فولادی به ضخامت ۴ میلی‌متر برای کفی‌ها و ۲ میلی‌متر برای اجزاء دیگر تغییر می‌دهیم. تمامی مشخصات دیگر شبیه مدل الف است.

۳-۲- طرح ج

در اینجا پوتین طرح الف را با دولایه شیشه‌ای اپوکسی و یک‌لایه کولار هر کدام به ضخامت ۱ میلی‌متر به فاصله ۵ سانتی‌متر از هم تقویت می‌کنیم که طرح شماتیک آن در شکل ۵ نشان داده شده است.

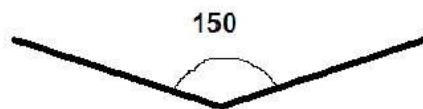
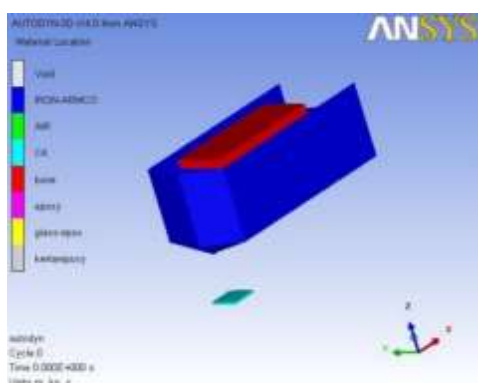




شکل ۵- مدل پیشنهادی (ج)

۳-۳- طرح د

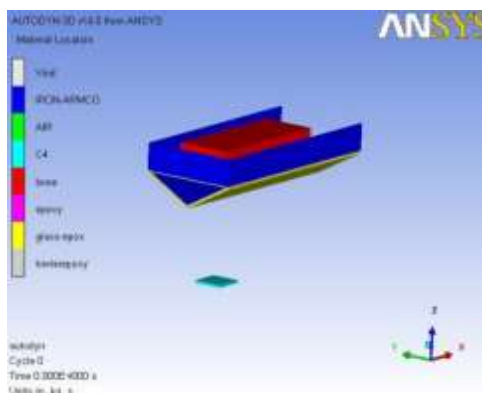
در طرح دیگر کفی و سطح جلوی پوتین طرح الف را به اندازه ۱۵۰ درجه زاویه می‌دهیم (شکل ۶). این زاویه همان‌طور که در فصل‌های قبلی برای پوتین فلودانا ۱ شاره شده موجب واگرایی هرچه بیشتر امواج و در نتیجه فشار وارده کمتر به پا می‌شود. همچنین در سطح بالایی کفی یک صفحه کولار-اپوکسی با همین ابعاد به ضخامت یک میلی‌متر و در زیر آن یک صفحه شیشه-اپوکسی به ضخامت ۲ میلی‌متر به صورت یکپارچه و بدون فاصله در نظر گرفته شده است.



شکل ۶- نمای ایزومتریک و زاویه در نظر گرفته شده برای کف و جلوی مدل (د)

۳-۴- طرح س

در این مدل بجای قسمت پایین پوتین الف از دو صفحه با زاویه ۱۲۰ درجه نسبت مدل شده که از ۳ لایه با یک‌لایه فولاد در بالا و دولایه شیشه اپوکسی و کولار اپوکسی تشکیل شده است. (شکل ۷)

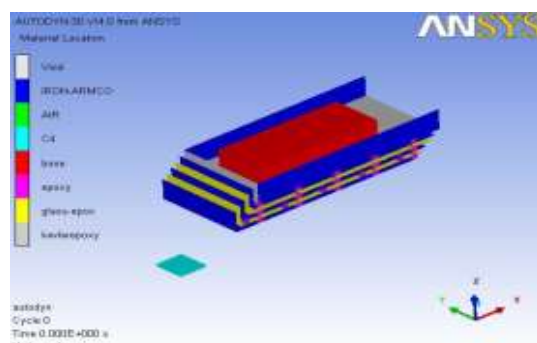


شکل ۷- مدل پیشنهادی (س)



۵-۳- طرح ش

در این طرح از سه لایه فولادی L شکل به ابعاد $0/34 \times 0/15 \times 0/001$ مترمکعب در پایین و یک صفحه به ابعاد $0/5 \times 0/8 \times 0/001$ مترمکعب در قسمت جلو به صورت عمودی که این دو قسمت به هم متصل هست. دولایه از جنش شیشه اپوکسی و یک لایه کولار اپوکسی به همین ابعاد استفاده شده که هر لایه نسبت به لایه قبلی به اندازه یک سانتی متر از لحاظ ارتفاع (محور Z) و یک سانتی متر در جهت افقی (محور X) به مین نزدیک شده اند. لایه های کامپوزیتی و فولادی به صورت یک در میان قرار داده شده اند. هر لایه به اندازه یک سانتی متر از هم فاصله دارند و پایه های این صفحات از جنس اپوکسی به ابعاد 1×1 سانتی متر به فاصله ۸ سانتی متر از جلو و چهار سانتی متر از جانب از هم فاصله دارند. طرح شماتیک این مدل در شکل ۸ نشان داده شده است.



شکل ۸- مدل پیشنهادی (ش)

۴- تجزیه و تحلیل داده ها

در این بخش نتایج محاسبه شده توسط نرم افزار مربوط به مدل های طراحی شده آمده است. برای ارزیابی این طرح ها نیاز است که تنش های محاسبه شده را به تنش های اصلی تبدیل کنیم و با استفاده از یکی از روش های محاسبه ضریب اطمینان، کارایی کفی را بررسی می کنیم. در اینجا نتیجه محاسبات نرم افزار را با رعایت فرضیات، شرایط اولیه و شرایط مرزی شرح داده شده در بخش قبل به تفکیک مدل در جداول و شکل های بخش بعد می بینیم.

۴-۱- نتایج محاسبات انجام گرفته مربوط به طرح های پیشنهادی:

در این بخش به نتایج مربوط به مدل های پیشنهادی پرداخته شده است. این نتایج در جدول ۷ آمده است.

جدول ۷- نتایج مربوط به مدل های پیشنهادی

ش	س	د	ج	ب	الف	
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	
۱۹۱,۷	۱۵۰	۳۱,۴	۴۰,۲	۱۵۳,۷	۶۳,۴	P
-۱۹۰,۴	-۱۵۰	-۴۸,۲	-۸۷,۸	-۱۵۲,۳	-۱۳۵,۱	σ_{xx}
۱۹۰,۱	-۱۵۰	-۲۵,۱	-۴۹,۸	-۱۵۳,۳	-۶۵,۲	σ_{yy}
-۱۸۹,۲	-۲۴۸,۷	-۳۰,۹	-۳۹,۲	-۱۵۲,۹	۱۴۲,۳	σ_{zz}
-۱۹۰	-۵۳,۴	-۳۱,۱	-۶۵,۴	۳۰,۵	-۵۷,۵	σ_{xy}
-۱۹۲,۷	-۳۰,۴	-۶۶,۳	-۳۱,۳	۶۳,۴	-۵۶,۴	σ_{yz}
-۶۴,۲	-۶۷,۵	-۱۵,۱	-۵۰,۸	-۴۴,۸	-۶۳,۵	σ_{xz}





۴-۲- ارزیابی داده‌ها

همان‌طور که در مقدمه اشاره شد با استفاده از نرم‌افزار متلب تمامی تنش‌های به دست آمده از نوع محوری و برشی را به تنش‌های اصلی تبدیل می‌کنیم. با توجه به خواص مکانیکی استخوان پا که به مواد ترد شبیه است، برای به دست آوردن ضریب اطمینان از روش حداکثر تنش محوری قائم استفاده می‌کنیم. نتایج حاصله را در جدول ۸ می‌بینیم. در جدول ۸ درصد تغییر ضریب اطمینان نسبت به مدل الف با پارامتر X نشان داده شده است.

جدول ۸- تنش‌های اصلی و ضرایب اطمینان مربوط به مدل‌های مختلف

مدل	σ_1	σ_2	σ_3	n	x
عنکبوتی	۳۲/۸	-۱۷/۸	-۹۵/۲	۱/۵۲	-
الف	-۱۷۰/۳	-۶۳/۲	۱۷۵/۵	۰/۷۴	-
ب	-۲۴۶/۷	-۱۲۴/۵	-۸۷/۳	۰/۵۳	-۲۸
ج	-۱۶۵	-۱۳	۱/۳	۰/۷۹	۶
د	-۱۱۱	-۳۳	۴۰/۲	۱/۱۸	۶۰
س	-۳۰۱	-۱۵۶/۹	-۹۰/۶	۰/۴۳	-۴۲
ش	-۳۷۸/۸	-۱۲۱/۶	۳۱۸/۹	۰/۳۴	-۵۴

همان‌طور که می‌بینیم تنها دو مدل عنکبوتی و طرح د ضریب اطمینان قابل قبول بالاتر از یک را دارا می‌باشند و در بقیه موارد انفجار موجب شکستگی استخوان پا می‌شوند. البته مدل عنکبوتی فرضی در معرض ۳۰ گرم تتریل قرار گرفته که مدل د در معرض ۵۰ گرم C4 که به مراتب قدرت انفجار بیشتری دارد قرار گرفته است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش به بررسی چند مدل پوتین ضدمین پرداخته شد. ابتدا به اعتبار سنجی شبیه‌سازی پرداخته شد و سپس شش مدل مرکب با مواد کامپوزیتی پیشنهاد گردید. شبیه‌سازی با نرم‌افزار المان محدود اتوآدین انجام شد. نتایج شبیه‌سازی پژوهش حاضر با پژوهش مرجع از دقت قابل قبولی برخوردار بود. در مدل‌های پیشنهادی ضریب اطمینان برای هر مدل محاسبه و نسبت به یک مدل پایه مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی با نتایج مقالات مرجع تطابق مناسبی داشت. نتایج جدول ۶ نشان‌دهنده تأثیر بسزای فاصله هوایی از مرکز مین و چگالی کم کفی پوتین در مقدار تنش‌های وارده است. با کمک گرفتن از این دو فاکتور می‌توان تنش‌های بیشتر از یک گیگاپاسکال را به حدودی که برای مدل (الف) ثبت شده، کاهش داد. مدل‌های پیشنهادی با ترکیبی از فلزات و مواد کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف طراحی شده است. تأثیر ۰,۰۶ درصدی ضریب اطمینان را در تقویت کفی با سه صفحه کامپوزیت با فاصله پنج سانتی‌متر از هم در مدل ج و افزایش ۶۰ درصدی ضریب اطمینان را در تقویت با صفحات کامپوزیت و تغییر زوایای صفحات را به صورت توأمان در مدل (د) می‌بینیم. تأثیر ضخامت صفحات و تغییر شکل‌پذیری آن‌ها را خصوصاً در مورد فولاد را در مقایسه دو مدل الف و ب می‌توان دریافت. به این صورت که اگرچه در مدل ب ضخامت صفحات مدل (الف) را به دو برابر افزایش یافته و به تبع آن استحکام کفی بالاتر رفته اما به دلیل افزایش ضلبيت و چگالی کفی در نتیجه امپدانس صوتی کلی کفی افزایش یافته است. این پدیده باعث انتقال بهتر موج انفجار به پا و آسیب بیشتر به آن خواهد شد که کاهش ۲۸ درصدی ضریب اطمینان تصدیق‌کننده این مدعا است. کاهش این ضریب در مدل‌های (س) و (ش) هم به دلیل مشابه اتفاق افتاده است. البته باید خاطر نشان کرد که تنش‌های حالت واقعی کمتر از مقادیر محاسبه شده است چراکه مقدار زیادی از انرژی انفجار مین صرف متراکم کردن خاک و محیط پیرامون خود می‌شود که در این تحلیل از آن صرف‌نظر شده است. بین نمونه‌های بررسی شده طرحی که سطوح جانبی آن از ورق فولادی به ضخامت ۱ میلی‌متر و دو کفی سه لایه از جنس‌های فولاد، پارچه کولار-اپوکسی و شیشه-اپوکسی به ترتیب با ضخامت‌های ۱، ۱ و ۲ میلی‌متر استفاده شد، می‌تواند تا شصت درصد ضریب اطمینان را بهبود بخشد. همچنین، ساختار این نوع پوتین پیشنهادی به شکلی است که کف پا را به اندازه ۱۵ سانتی‌متر از مرکز انفجار دور می‌کند که موجب کاهش اثرات تخریب تا حدود ۵ برابر می‌گردد.



Numerical Study of Redesign of Anti-Mine Safety Boots with the View of Further Reducing the Damage Caused by the Blast Wave

Saman Jafari¹, Mohammad Sheikh Ahmadi^{*}

1. Mechanical Engineering Department, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran.

2. Iranian National Standards Organization, Kurdistan Province, Sanandaj, Iran

Received: 2021/04/07

Accepted: 2021/08/23

Abstract:

Introduction: Designing and manufacturing anti-mine boots insoles is important in the military defense industry to reduce explosion damage.

Purpose and methodology: In this research, first, several types of anti-mine boots are examined and then, the proposed models are designed and analyzed by Autodein finite element software. The data presented by the reference research were used to validate the results of the numerical analysis.

Results: The simulation results of the present study with the reference research had acceptable accuracy. In the proposed models, the reliability coefficient for each model was calculated and compared to a base model.

Findings: The proposed models are designed with a combination of metals and composite materials with different thicknesses. Among the studied samples, a design with lateral surfaces of steel sheet with a thickness of 1 mm and two insoles of three layers of steel, Kevlar-epoxy fabric and glass-epoxy with thicknesses of 1, 1 and 2 mm were used, respectively, Can improve reliability by up to 60%. Also, the structure of this type of boot is proposed in such a way that the sole of the foot moves 15 cm away from the center of the explosion, which reduces the destructive effects by up to 5 times.

Keywords:

Shock wave, Defense equipment, Finite Element Method, Composite, Anti-mine boots

^{*} Corresponding Author mail: shaikh1381@gmail.com



۶- منابع و مآخذ

۶-۱- فارسی

- [۷] شوشتری، ا. و صالحی آباد، م. "تحلیل دینامیکی سازه‌های نامتقارن تحت اثر بارهای انفجاری"، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، (۱۳۹۰).
- [۸] نوری، م.د.، رحمانی، ح.، رضوانی، م.ج.، "حل تحلیلی و شبیه‌سازی تعیین ضریب شدت تنش دینامیکی و میدان تنش در صفحه ترک‌دار تحت بارگذاری انفجاری"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، شماره ۲۹ (۱۳۹۱).
- [۱۱] مرتضایی ع.، "بررسی پدیده وابستگی مش در تحلیل غیرخطی اعضای بتن‌آرمه تحت اثر انفجار" نشریه مدل‌سازی در مهندسی، دوره ۱۴، شماره ۴۷، (۱۳۹۵).
- [۱۳] میثم باقری پور اصیل، م.، محمدی، ی.، قلی‌زاد، الف.، "روش‌های تحلیل خرابی پیش‌رونده ناشی از بارگذاری انفجاری در قاب‌های خمشی فولادی"، نشریه مدل‌سازی در مهندسی، شماره ۵۱، (۱۳۹۶).
- [۱۴] زاهدی‌نیا، م. و همکاران. "مطالعه‌ی تجربی و عددی تغییر شکل صفحات چند لایه کامپوزیت- فلز با ضخامت‌های یکسان تحت بارگذاری انفجاری"، مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، شماره ۴، (۱۳۹۷).
- [۱۵] حسینی، س.ه. و همکاران، "بررسی عددی و تجربی یکپارچگی سازه بدنه‌ی خودروی زرهی در بارگذاری انفجاری"، مجله علمی و پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها، شماره ۳، (۱۳۹۷).
- [۱۶] یارهای، ش. و گنجی، م.، "مطالعه‌ی تجربی و عددی اثر موج انفجار حاصل از ماده منفجره بر روی ورق‌های آلومینیومی"، مجله مهندسی مکانیک و ارتعاشات، شماره ۲، (۱۳۹۸).

۶-۲- انگلیسی

- [1] Andrew, V., "Blast and Fragment Resistant Safety Boot Footwear", United States Patent, 1999, Patent No. Us 5,979,081.
- [2] J.P. Dionne, A. Makris, J. Nerenberg, "Design, Development, and Evaluation of the HDE Demining Ensemble and Accessories", Med-Eng Systems Internal Report Final Report, (2001).
- [3] R. Hayda, M. Harris, "Modeling Injury Effects of Landmines, Bullets, and Bombs", Clinical Orthopedics and Related Research, Vol. 3, pp. 97-108(2004).
- [4] Harjai, L. and Pathania, M., "Foot Protective System: A Boon to Demining Soldiers", Med J Armed Forces India, Vol. 63, pp. 5-6 (2007).
- [5] Phlawadana P., Vanadurongwan V., "Boots for Minimizing Injury from Explosives", United States Patent, No. Us 6, 9873,081(2009).
- [6] Peregrin V., Theodorus J., "Protective Footwear", United States Patent, No.US 7,530,181 B2 (2009).
- [9] Karahan M., Karahan E. A., "Development of an innovative sandwich composite material for protection of limb against landmine explosion: mechanical leg test results", Textile Research Journal, 0(00),pp. 1-16. (2016).
- [10] Karahan M. "Blast Performance of Demining Footwear: Numerical and Experimental Trials on Frangible Leg Model and Injury Modeling" Journal of Testing and Evaluation. Vol. 46, pp. 666-679 (2017).
- [12] Baker A., "Development and Validation of a Finite Element Dummy Lower Limb Model for Under-Body Blast Applications" Ph.D. Thesis, Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University (2017).
- [17] John C., Skofronick J. G. "The Physics of the Body", Medical Physics Publishing Corporation, (1992).
- [18] Kaw A. K., "of composite materials", CRC Press, (2005).

