



## مقایسه عملکرد جذب انرژی سازه‌های چند جداره مربعی و دایروی با استفاده از روش کپراس و بهینه‌سازی سازه دایروی با استفاده از روش سطح پاسخ

سجاد پیرمحمد<sup>۱\*</sup> و سبحان اسماعیلی مرزدشتی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۰/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۱/۰۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۲/۰۹

### چکیده

در این مقاله به عملکرد جذب انرژی سازه‌های دو جداره به همراه صفحات تقویتی که واصل بین این جداره‌ها است، تحت بارگذاری شبه استاتیکی به صورت محوری و مایل پرداخته شده است. سطح مقطع این سازه‌ها، به دو صورت مربعی و دایروی در نظر گرفته شده است. در این تحقیق گام اول، صحت سنجی درستی نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود صورت گرفته در نرم افزار ال اس-داینرا در مقایسه با نتایج بدست آمده از آزمایشات تجربی بوده است. سپس از مدل اجزاء محدود مذکور، جهت بررسی رفتار جذب انرژی سازه‌های دو جداره مربعی و دایروی با مقیاس‌های مختلف (۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱) در حالت‌های متفاوت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری و مایل استفاده شده است. گام دوم تحقیق حاضر، به‌کارگیری روش رتبه‌بندی کپراس جهت پیدا کردن بهترین سازه از نقطه نظر جذب انرژی بوده است. نتایج حاصل از این روش نشان داد که جذب انرژی سازه‌های بررسی شده با مقیاس ۰/۵ بهترین حالت سازه‌ها بوده، از سوی دیگر طبق داده‌های استخراج شده، سازه با سطح مقطع دایروی در مقایسه با سطح مقطع مربعی، دارای میزان جذب انرژی بالایی است؛ همچنین با افزایش زاویه بارگذاری، میزان جذب انرژی و بیشترین نیروی لهیدگی کاهش یافت. در انتهای تحقیق، با استفاده از روش‌های سطح پاسخ و طرح ترکیب مرکزی و همچنین شناسایی نقاط مهم، متغیرهای طراحی از قبیل، ضخامت و شعاع سازه دو جداره دایروی بهینه گردید.

**کلمات کلیدی:** جذب انرژی؛ سازه دو جداره؛ تحلیل شبه استاتیکی؛ بارگذاری محوری و مایل؛ بهینه‌سازی.

## Comparison of Energy Absorption Performance of Multi-Walled Square and Circular Structures Using COPRAS Method and Optimization of Circular Structures Using RSM

S. Pirmohammad<sup>1,\*</sup>, S. Esmaili Marzdashti<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Assist. Prof., Mech. Eng., Mohaghegh Ardabili Univ., Ardabil, Iran

<sup>2</sup> M.Sc. Student, Mech. Eng., Mohaghegh Ardabili Univ., Ardabil, Iran

### Abstract

In this paper, the energy absorption performance of double-walled structures with reinforcements that joint the inner and outer members together were studied under axial and oblique quasi-static loading. These structures were assumed to have square and circular cross-sections. In the first step of this research, the finite element simulations performed in LS-DYNA were validated by comparing with experimental results. This validated code was then used to simulate energy absorption behavior of the double-walled square and circular structures with different scales (0, 0.25, 0.5, 0.75, and 1) under different axial and oblique quasi-static loading. In the second step, a multi-criteria decision-making method namely complex proportional assessment (COPRAS) was employed to select the best possible structure in view point of crashworthiness. The results demonstrated that the cross-sections with the scale of 0.5 were the best energy absorbers. Moreover, the circular cross-section was found to be the best energy absorber due to having higher number of sides. In addition, both energy absorption and peak crushing force reduced by increasing the loading angles. Finally, the response surface (RSM) and central composite design methods were used to optimize the design parameters including the thickness and radius of the double-walled circular structure.

**Keywords:** Energy Absorption; Double-Walled Structure; Quasi-Static Analysis; Axial and Oblique Loading; Optimization

## ۱- مقدمه

همان‌طور که می‌دانیم تصادف وسائط نقلیه، یک رخداد بسیار کوتاهی است و در این مدت کوتاه نیروی ضربه وارد شده به سرنشینان موجب صدمات جانی و مالی جبران ناپذیری می‌شود. جهت کاهش آسیب وارده بر قطعاتی که تحت تاثیر بارگذاری دینامیکی، استاتیکی و شبه استاتیکی قرار می‌گیرند، جذب انرژی و تعیین واکنش این قطعات در برابر ضربات وارده از جمله مباحث مهمی است که در این حوزه مورد مطالعه و بررسی قرار می‌گیرد. ضربه‌گیرها در مباحث مکانیک ضربه جهت جلوگیری از شوک، نقش مهمی را در صنایع هواپیماسازی، خودروسازی، ریلی، هوافضا و غیره ایفا می‌کنند. قطعات، انرژی جنبشی ناشی از ضربه را از طریق تغییر شکل الاستوپلاستیک جذب می‌کنند. میزان جذب انرژی و میانگین نیروی لهیدگی، از جمله پارامترهای مهم و اساسی در سازه‌های جذب انرژی می‌باشند که در بسیاری از پژوهش‌ها، تلاش شده است که این پارامترها پیش‌بینی و محاسبه شوند.

الکساندر [۱] برای اولین بار میزان جذب انرژی سازه‌های جدار نازک استوانه‌ای شکل را تحت بارگذاری محوری محاسبه کرد و مکانیزم چین‌خوردگی را در فرایند جذب انرژی معرفی کرد. ابراهیم‌ویج و ویرزبکی [۲ و ۳] و اندروس [۴] در تحقیقاتشان، قابلیت جذب انرژی سازه‌های جدار نازک با مقاطع دایروی و مربعی تحت بارگذاری دینامیکی و شبه‌استاتیکی را بصورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه کردند. در تحقیق دیگری، ابراهیم‌ویج و جونز [۵ و ۶] جذب‌های انرژی مربعی ساخته شده از فولاد را بررسی کرده، مکانیزم‌های چین‌خوردگی متقارن و نامتقارن را در فرایند لهیدگی مشاهده کردند. لنگسس و هپورستد [۷] جذب‌های انرژی مربعی و دایروی را تحت بارهای دینامیکی و استاتیکی مورد مطالعه قرار داده، نتیجه گرفتند که نیروی لهیدگی میانگین در حالت بارگذاری استاتیکی، بزرگتر از حالت بارگذاری دینامیکی است؛ همچنین مکانیزم لهیدگی در مقاطع مربعی و دایروی مشابه هم می‌باشند. حسینی تهرانی و پیرمحمد [۸ و ۹]، میزان جذب انرژی مقاطع چند ضلعی (مربعی، شش‌ضلعی، هشت‌ضلعی و دایروی) و سازه‌های مخروطی را در حالت‌های بارگذاری محوری و مایل بررسی کردند و مشاهده کردند که مقاطع هشت‌ضلعی و سازه‌های

مخروطی دارای پتانسیل زیادی جهت جذب انرژی تصادفات می‌باشند.

در طول دو دهه اخیر، مطالعات حوزه مکانیک ضربه روی سازه‌های چندلایه متمرکز شده است که این سازه‌ها دارای مزایای وزن پایین، قابلیت جذب انرژی بالا و سادگی ساخت بوده، به همین خاطر، به طور گسترده‌ای به عنوان جاذب انرژی در وسایل نقلیه مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ژنگ و همکاران [۱۰]، سازه‌های دو جداره ساده پر شده از فوم را تحت بارگذاری محوری مطالعه کردند و دریافتند که با افزایش ضلع‌های اشکال هندسی میزان جذب انرژی بیشتر می‌شود و در حالت کلی هرچه تعداد لبه‌های تماسی بین فوم و اضلاع سازه بیشتر باشد، این سازه‌ها انرژی بیشتری را جذب می‌کنند. در تحقیق دیگری تانگ [۱۱]، رفتار جذب انرژی سازه‌های چندلایه‌ای با مقاطع مربعی و دایروی را مورد مقایسه قرار داده، نشان داد که ظرفیت جذب انرژی سازه با مقطع دایروی نسبت به مقطع مربعی بیشتر است. نجفی و رئیس روحانی [۱۲]، تحقیقاتی را جهت درک بهتر خصوصیات جذب انرژی سازه‌های جدار نازک چندلایه‌ای تحت بارگذاری شبه استاتیکی انجام دادند و دریافتند که این سازه‌های چندلایه‌ای، دارای عملکرد جذب انرژی مناسب‌تری نسبت به سازه‌های تک‌لایه‌ای مرسوم می‌باشند. حسینی-تهرانی و پیرمحمد [۱۳]، کارهای عددی روی رفتار جذب انرژی سازه‌های جدار نازک دولایه آلومینیومی را تحت بارگذاری محوری و مایل انجام دادند و نتایج تحقیقات آنها نشان داد که سازه‌های جدار نازک دولایه، از سازه‌های تک-لایه جدار ضخیم، کارآمدتر و رفتار لهیدگی بهتری را دارند.

آمارها نشان می‌دهند که خودروها حین تصادف به ندرت تحت نیروی محوری کامل مواجه می‌شوند، لذا براساس تجربه بایستی در مسائل مربوط به فروریزش سازه‌ها، بارگذاری زاویه‌ای را هم در نظر گرفت؛ بطوری‌که سپر وسایل نقلیه را طوری طراحی می‌کنند که توان تحمل بارگذاری به بزرگی ۳۰ درجه را داشته باشند [۱۴]. کارهای بسیار زیادی در این خصوص [۱۵-۱۸] انجام شده است. برای مثال، علوی نیا و همکاران [۱۹] اثر شروع‌کننده‌های لهیدگی را روی قابلیت جذب انرژی سازه‌های مربعی تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری و مایل بررسی کردند و با در نظر گرفتن زوایای ۷، ۱۴ و ۲۷ درجه نشان دادند که بطور کلی با قرارگیری مناسب

دایروی بصورت  $C_{1,2,3,4,5,6}$  نامگذاری شدند که اندیس ۱ سازه تک‌جداره به ضخامت ۲mm و اندیس‌های ۲ تا ۶ به ترتیب سازه با مقیاس‌های (محیط جداره داخلی نسبت به محیط جداره خارجی) ۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵ و ۱ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که کلیه سازه‌های بررسی شده در این تحقیق (به جز  $C_6$  و  $S_6$  که ضخامتشان ۴mm می‌باشد)، دارای ضخامت و طول یکسان به ترتیب برابر با ۲mm و ۱۰۰mm انتخاب شدند. در ضمن محیط جداره خارجی برای مقاطع مربعی و دایروی نیز، یکسان و برابر با ۱۷۷/۲mm در نظر گرفته شد.

نرم‌افزار اجزاء محدود ال-اس-داینا، جهت شبیه‌سازی سازه‌های نشان داده شده در شکل ۱ به کار گرفته شده است. جهت اعمال بار شبه استاتیکی محوری و مایل ( $۱۸^\circ$ ،  $۲۷^\circ$ ،  $۹^\circ$ ) به این سازه‌ها، از یک مکعب صلب با سرعت ثابت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه استفاده شده است. مطابق شکل ۲، شرایط مرزی سازه‌ها به این صورت است که در قسمت برخورد با دیوار صلب مذکور کاملاً آزاد و انتهای دیگر سازه‌ها به یک مکعب صلب و ثابت، متصل و در همه جهت‌ها مقید شده است. مقدار لهیدگی سازه‌ها برابر، ۷۵mm در نظر گرفته شده است که برابر ۰/۷۵٪ لهیدگی کامل سازه‌ها است. در کلیه قسمت‌های مختلف سازه‌های بررسی شده، از روابط المان پوسته‌ای چهارگوش، نوع بلیچکو-تسای<sup>۴</sup> با پنج نقطه انتگرال-گیری در راستای ضخامت استفاده شده است. جهت تعیین اندازه المان مناسب در شبکه‌بندی سازه‌ها، تحلیل‌های همگرایی انجام گرفت و در نهایت اندازه آن‌ها بصورت  $1 \times 1$  میلی‌متر انتخاب گردید. جهت تعریف تماس بین صفحه‌های صلب با سازه، از قید تماسی سطح به سطح<sup>۵</sup> و از قید تماس اتوماتیک، جهت جلوگیری از فرورفتن لوله در خودش استفاده شده است. اصطکاک کولمب<sup>۶</sup> برای همه سطوح تماسی، ۰/۱۵ فرض شده است [۲۱]. ماده‌ای که برای سازه-های بررسی شده لحاظ شد، عبارتست از آلایژ آلومینیم AA6060-T4 که خواص مکانیکی آن به این صورت است: چگالی برابر ۲۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب، نسبت پواسون

شروع‌کننده‌های لهیدگی روی سازه، قابلیت جذب انرژی بهبود می‌یابد.

در تحقیق حاضر، رفتار جذب انرژی طرح جدید سازه‌های دو جداره با مقاطع مربعی و دایروی به همراه صفحات تقویتی که واصل بین این جداره‌ها است و تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری و مایل قرار می‌گیرند، مورد بررسی قرار گرفته است. جهت شبیه‌سازی این سازه‌های دو جداره مربعی و دایروی با مقیاس‌های مختلف (۰، ۰/۲۵، ۰/۵، ۰/۷۵، ۱)، از نرم‌افزار ال-اس-داینا استفاده شده است؛ همچنین روش رتبه‌بندی کپراس جهت پیدا کردن بهترین سازه از نقطه نظر جذب انرژی روی نتایج ال-اس-داینا پیاده‌سازی شده است و در انتهای تحقیق، با استفاده از روش‌های سطح پاسخ<sup>۱</sup> و طرح ترکیب مرکزی<sup>۲</sup> (در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت<sup>۳</sup>) و همچنین شناسایی نقاط مهم، پارامترهای طراحی از قبیل، ضخامت و شعاع سازه دو جداره با مقطع دایروی بهینه شده است.

## ۲- تحلیل عددی

### ۲-۱- مدل اجزاء محدود

همانطور که در بالا ذکر گردید، در این تحقیق طرح جدیدی از سازه‌های دو جداره جهت جذب انرژی پیشنهاد شده است. شکل ۱، این سازه‌های دو جداره تقویت شده با صفحات داخلی و با مقاطع مربعی و دایروی در مقیاس‌های مختلف را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که علوی نیا و پارسا پور- [۲۰]، هنگام مطالعه رفتار جذب انرژی سازه‌های تک جداره از دو نوع تقویتی بهره بردند. حالت اول: استفاده از صفحات تقویتی طوری که مرکز شکل را به وسط اضلاع وصل می‌کنند. حالت دوم: صفحاتی که مرکز شکل را به کنج مقاطع وصل می‌کنند. نتایج تحقیق آن‌ها نشان داد که به کارگیری تقویتی نوع دوم منجر به نتایج جذب انرژی بهتری شد؛ بنابراین در تحقیق حاضر، از تقویتی نوع دوم در طرح سازه-های دو جداره (همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود) استفاده گردید. به منظور سهولت شناسایی مدل‌های تحلیل شده در این تحقیق، سازه‌های مربعی بصورت  $S_{1,2,3,4,5,6}$  و

<sup>4</sup> Belytschko-Lin-Tsay

<sup>5</sup> Automatic Surface to Surface

<sup>6</sup> Automatic Single Surface

<sup>7</sup> Coulomb Friction

<sup>1</sup> RSM (Response Surface Method)

<sup>2</sup> Central Composite Design

<sup>3</sup> Design-Expert

## ۲-۲- صحت سنجی تحلیل‌های عددی

به منظور ارزیابی صحت مدل‌سازی عددی انجام شده در نرم افزار ال اس-داینا، ابتدا آزمایش لهیدگی روی نمونه‌های مستطیلی شکل به ابعاد سطح مقطع  $25\text{mm} \times 25\text{mm}$ ، ضخامت  $2\text{mm}$  و طول  $90\text{mm}$  توسط دستگاه STM-150 تحت بارگذاری شبه‌استاتیکی محوری با سرعت  $10\text{mm/min}$  انجام شد. شکل ۳، دستگاه آزمایش یونیورسال به همراه نمونه سازه چهارگوش را نمایش می‌دهد. این دستگاه از دو قسمت فک بالایی و پایینی تشکیل یافته است. پس از گذاشتن نمونه آزمایشگاهی روی فک پایینی، صفحه صلب بالایی دستگاه به صورت کنترل جابجایی با سرعت ثابت به سمت پایین تغییر موقعیت داده، باعث فروریزش سازه می‌شود. بدین ترتیب آزمایش لهیدگی لوله مذکور، تحت بارگذاری محوری و شبه-استاتیکی پس از گذاشتن نمونه سازه روی فک پایینی دستگاه آزمایش یونیورسال نشان داده شده در شکل ۳ و با حرکت رو به پایین فک بالایی با نرخ بارگذاری  $10$  میلی‌متر بر دقیقه صورت گرفت. در ادامه، لوله مذکور در ال اس-داینا مشابه شرایط آزمایش مورد تحلیل قرار گرفت. شکل ۴، نتایج آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود (شامل سازه لهیده شده، میزان جذب انرژی اندازه‌گیری شده و منحنی نیرو-جابجایی) را نشان می‌دهد. سازه مستطیلی لهیده شده حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی، از نظر تعداد چین‌ها و شکل لهیدگی یکسان بوده، همچنین نمودار نیرو-جابجایی و میزان جذب انرژی حاصل از نتایج تجربی و عددی شبیه هم می‌باشند؛ بنابراین نتایج تحلیل‌های عددی، تطابق قابل قبولی با نتایج آزمایش تجربی دارند.

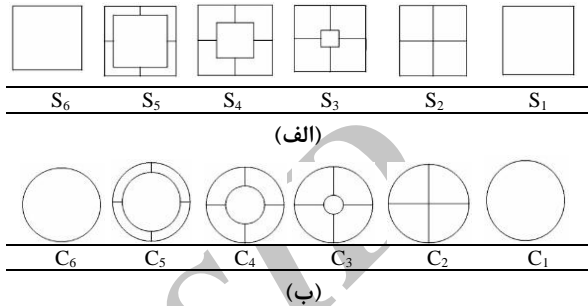


(الف)

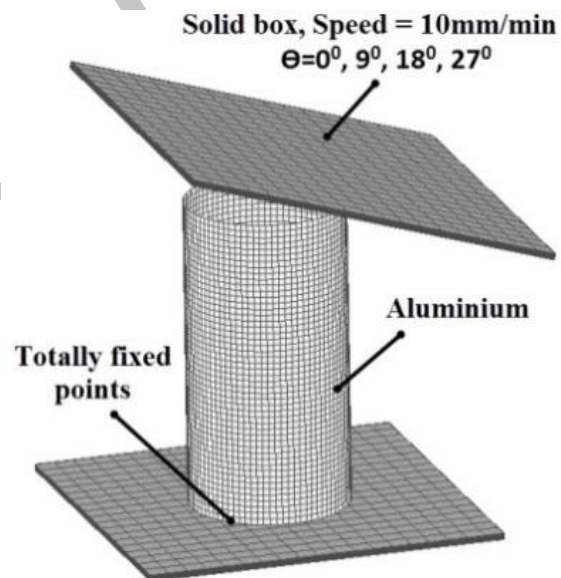
(ب)

شکل ۳- نمای دستگاه یونیورسال STM-150 (ب و الف) نمونه آزمایشگاهی سازه با مقطع مستطیل

برابر  $0.33$ ، مدول ینگ برابر  $63000$  مگاپاسکال، تنش تسلیم برابر  $56$  مگاپاسکال و استحکام کششی نهایی برابر  $156$  مگاپاسکال است؛ همچنین مشخصات ماده مذکور در ناحیه پلاستیک که از طریق آزمون کشش محاسبه شده در جدول ۱ آورده شده است.



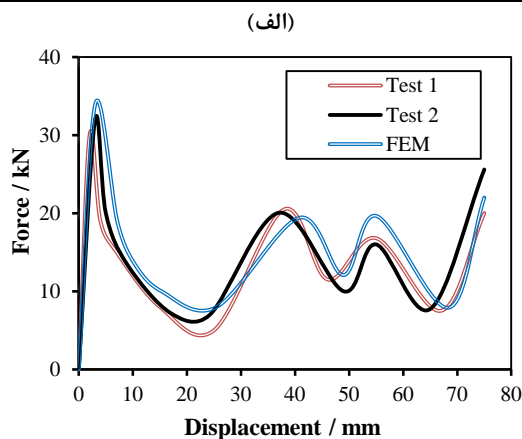
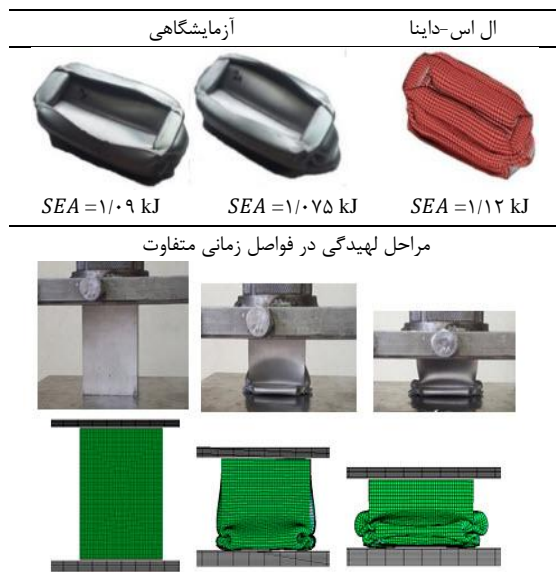
شکل ۱- سازه‌های با مقیاس‌های مختلف و با مقاطع (الف) مربعی و (ب) دایروی



شکل ۲- نمای مدل اجزاء محدود سازه‌ها تحت بارگذاری محوری و مایل

جدول ۱- تغییرات تنش - کرنش آلومینیم AA6060-T4

تنش (MPa)	۵۶	۷۱	۱۲۶	۱۴۳	۱۴۶	۱۵۲	۱۵۶
کرنش پلاستیکی	۰	۰/۰۰۲	۰/۰۲۵	۰/۰۵	۰/۰۷۵	۰/۱	۰/۱۵



شکل ۴- الف) الگوی تغییر شکل و میزان جذب انرژی به دست آمده از آزمایش‌ها و شبیه‌سازی عددی (ب) نمودار نیرو-جابجایی

### ۳-۲- روش رتبه‌بندی کپراس

در این مطالعه، برای انتخاب سازه با بهترین عملکرد از نظر قابلیت جذب انرژی جهت کاهش آسیب وارده به سرنشینان و قطعات خودرو از روش کپراس استفاده شده است. این روش به طور گسترده‌ای، جهت حل کردن مشکلات مربوط به انتخاب بهترین طرح با توجه به معیارها و شاخص‌های متفاوت، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۶-۲۲] مراحل اجرای این روش بصورت زیر است:

### ۳- مقایسه قابلیت جذب انرژی سازه‌ها تحت

#### زوایای بارگذاری مختلف

#### ۳-۱- شاخص‌های لهیدگی

در تحقیق حاضر، سه شاخص اصلی به نام‌های جذب انرژی مخصوص<sup>۱</sup> (SEA)، بیشترین نیروی لهیدگی ( $F_{max}$ ) و بازدهی نیروی لهیدگی<sup>۲</sup> (CFE)، در نظر گرفته شده است. جذب انرژی مخصوص به عنوان یک شاخص کلیدی برای اندازه‌گیری میزان انرژی جذب شده در سازه مورد استفاده قرار می‌گیرد که با استفاده از رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$SEA = \frac{EA}{m} = \frac{\int_0^{\delta} F(x) dx}{m} \quad (1)$$

در این رابطه،  $F(x)$  نشانگر نیروی لهیدگی لحظه‌ای و  $\delta$  میزان کل لهیدگی سازه است که در این تحقیق  $\delta$  برای همه سازه‌های بررسی شده برابر،  $75\text{mm}$  فرض شده است؛ همچنین جرم  $m$  جرم سازه است. شاخص بعدی بیشترین نیروی لهیدگی ( $F_{max}$ ) بوده که در واقع بیشترین مقدار  $F(x)$  است و یکی از مهمترین شاخص‌ها برای ایمنی سرنشینان وسایل نقلیه محسوب می‌شود. شاخص دیگری که در ارزیابی جاذب‌های انرژی استفاده می‌شود، عبارتست از بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) که از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$CFE = \frac{F_{avg}}{F_{max}} \times 100 \quad (2)$$

$F_{avg}$  نیروی میانگین بوده، از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

$$F_{avg} = \frac{\int_0^{\delta} F(x) dx}{\delta} \quad (3)$$

کاهش سرعت (شتاب منفی در لحظه برخورد)، باعث افزایش مقدار  $F_{max}$  شده، در ارزیابی جذب انرژی به عنوان عامل منفی شناخته می‌شود. سازه با عملکرد بهتر دارای بیشترین مقدار جذب انرژی مخصوص (SEA) بوده، در کنار آن اگر مقدار CFE افزایش یابد، کاهش سرعت به کمترین حالت خود خواهد رسید، چیزی که برای جاذب‌های انرژی مطلوب است.

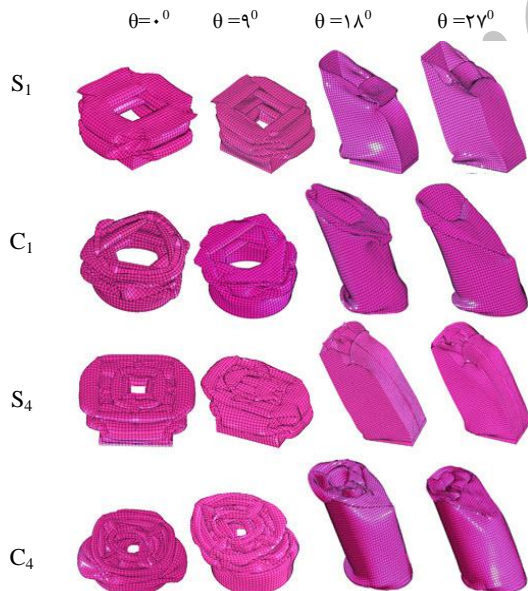
<sup>1</sup> Specific Energy Absorption

<sup>2</sup> Crush Force Efficiency

در این رابطه،  $Q_{max}$  در واقع بزرگترین مقدار  $Q_i$  محاسبه شده است.

### ۳-۳- نتایج شبیه‌سازی‌های عددی سازه‌های جدار نازک

سازه‌های نشان داده شده در شکل ۱، مطابق نکات مطرح شده در بخش ۱-۲ در نرم‌افزار ال اس-داینا، شبیه‌سازی و مورد تحلیل قرار گرفتند. شکل ۵ الگوی لهیدگی برخی از این سازه‌ها را نشان می‌دهد. در حالت کلی، لهیدگی سازه‌ها اغلب به سه صورت چین‌خوردگی پیش‌رونده، خمش کلی<sup>۱</sup> و ترکیبی از آنها صورت می‌گیرد. از شکل ۵ مشخص است که سازه‌ها در حالت بارگذاری محوری، بصورت چین‌خوردگی پیش‌رونده دچار فروریزش شده‌اند. برای حالت بارگذاری مایل با زاویه کم ( $\theta=9^\circ$ ) می‌توان گفت که فروریزش بصورت ترکیبی است؛ در صورتی که برای حالت‌های بارگذاری مایل با زاویه بیشتر ( $18^\circ$  و  $27^\circ$ )، فروریزش از نوع خمش کلی است. لازم به ذکر است که در طراحی سازه‌ها تلاش می‌شود که سازه‌ها انرژی برخورد را با فروریزش پیش‌رونده (تشکیل



شکل ۵- الگوی تغییرشکل سازه‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری و مایل

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری بصورت رابطه زیر که شامل،  $m$  معیار در سطر ماتریس و  $n$  گزینه در ستون آن است. این ماتریس در واقع همان ماتریس داده‌ها است.

$$X = [X_{ij}]_{mn} = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

گام دوم: عبارتست از بی بعد کردن ماتریس تصمیم‌گیری بصورت رابطه (۵) است:

$$R = [r_{ij}]_{mn} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (5)$$

گام سوم: وزن‌دهی به هر کدام از شاخص‌ها بر طبق اهمیت آن. قابل ذکر است که در این نوع وزن‌دهی منحصر بفرد، شاخص‌ها به صورت دوتایی بطور همزمان با هم مقایسه می‌شوند و تعداد مراحل قیاس این شاخص‌ها، با استفاده از رابطه (۶) قابل محاسبه است

$$N = \left( \frac{n(n-1)}{2} \right) \quad (6)$$

در این مقایسه، به معیار مهمتر عدد ۳ و به معیار کم اهمیت عدد ۱ اختصاص داده می‌شود؛ همچنین اگر دو معیار دارای ارزش یکسان داشته باشند، عدد ۲ به هر دو آنها تعلق می‌گیرد. این روند برای همه معیارهای مقایسه شده، تکرار می‌شود و سپس مجموع همه امتیازات کسب شده برای هر شاخص، از طریق رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

$$\sum_{i=1}^m w_{ij} = W_j \quad (7)$$

گام چهارم: محاسبه ماتریس بی‌بعد وزن‌دهی شده از طریق رابطه (۸) است:

$$D = [y_{ij}]_{mn} = r_j \times W_j \quad (8)$$

گام پنجم: جمع کردن مقادیر سودمند و غیر سودمند هر ستون با یکدیگر طبق روابط (۹) و (۱۰) است.

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^n y_{-ij} \quad (9)$$

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n y_{+ij} \quad (10)$$

گام ششم: محاسبه مقدار پارامتر حق تقدم از طریق رابطه (۱۱) است.

$$Q_i = S_{+i} + \frac{S_{-i} \sum_{i=1}^n S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^n (S_{min}/S_{-i})} \quad (11)$$

گام هفتم: محاسبه مقدار  $U_i$  که قابلیت طرح‌های پیشنهادی را بیان می‌کند. بیشترین مقدار آن ۱۰۰٪ بوده، به بهترین طرح جاذب انرژی اختصاص می‌یابد.

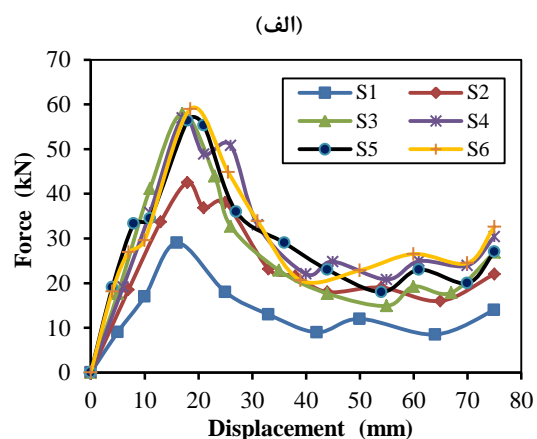
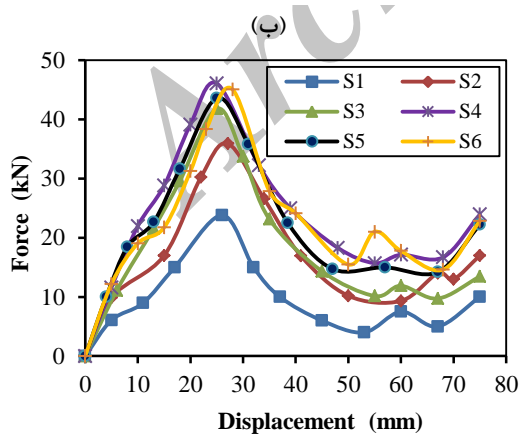
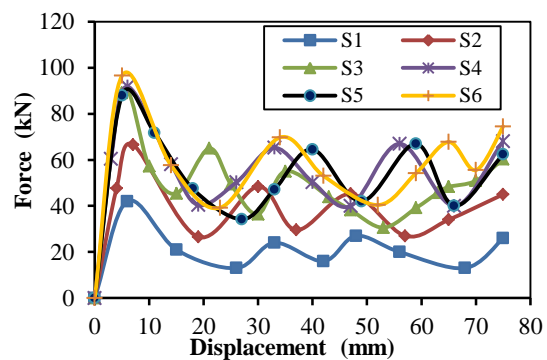
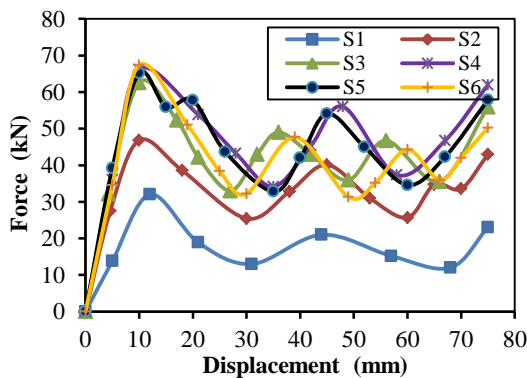
$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \times 100 \quad (12)$$

<sup>1</sup> Global Bending

جابجایی مشابه حالت بارگذاری محوری بوده، با این تفاوت که شیب اولیه افزایش نیرو و همچنین مقدار نیروی بیشینه کمتر شده است. این تفاوت به این خاطر است که در برخورد مایل صفحه صلب با سازه، ابتدا گوشه سطح مقطع سازه‌ها با صفحه صلب برخورد کرده است و بنابراین نیروی کمتری به صفحه صلب اعمال می‌شود؛ در حالی که در بارگذاری محوری، از همان ابتدا کل سطح مقطع سازه‌ها با صفحه صلب برخورد دارد و در نتیجه مقدار نیروی برخورد بیشتر است. برای حالت‌های بارگذاری مایل با زاویه بیشتر ( $18^\circ$  و  $27^\circ$ )، اولاً شیب اولیه افزایش نیرو بطور محسوسی کاهش یافته، ثانیاً نیرو پس از رسیدن به مقدار بیشینه خود تقریباً بطور پیوسته کاهش یافته است و دیگر نوسانات نیرو که در حالت بارگذاری محوری وجود دارد، مشاهده نمی‌شود. این نوع تغییرات نیرو، بدلیل فروریزش سازه‌ها بصورت خمش کلی است.

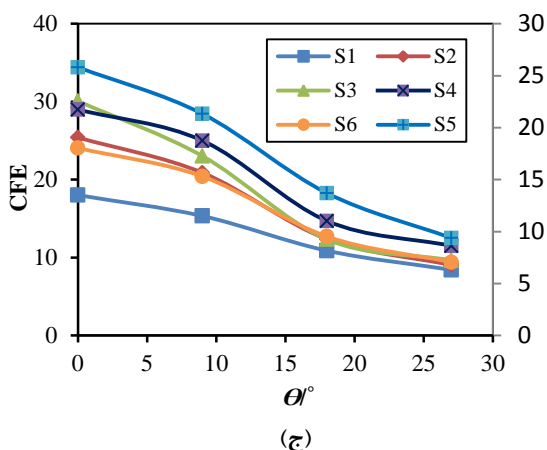
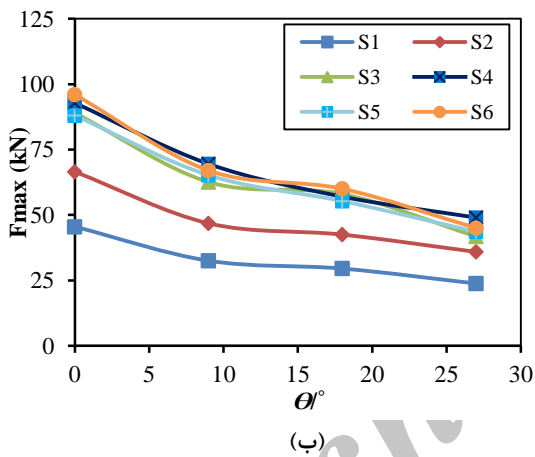
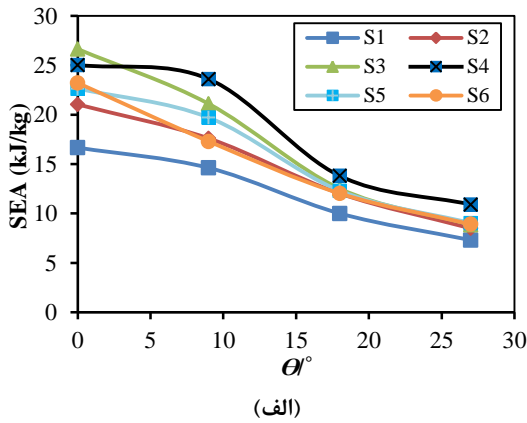
چین مستهلک کنند؛ چرا که انرژی بیشتری را جذب می‌کنند. اگرچه در برخوردهای مایل، همچنانکه در شکل ۵ دیده می‌شود، فروریزش خمش کلی غیرقابل اجتناب است.

برای بررسی و محاسبه جذب انرژی سازه‌ها و اینکه حین فرایند لهیدگی چه رفتاری از خود نشان می‌دهند، رسم نمودارهای نیرو-جابجایی الزامی است که در شکل ۶، به عنوان نمونه برای مقاطع مربعی نمایش داده شده است. از این شکل‌ها مشخص است که برای حالت بارگذاری محوری، نیرو ابتدا با شیب تند افزایش یافته، پس از رسیدن به بیشترین مقدار خود کاهش یافته (مربوط به تشکیل چین اول می‌باشد) و سپس با چند نوسان (مربوط به تشکیل چین‌های بعدی) ادامه پیدا کرده است. واضح است که تشکیل چین اولیه، انرژی بیشتری را مستهلک کرده است. برای حالت بارگذاری مایل با زاویه کم ( $\theta=9^\circ$ )، تغییرات نیرو با



شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی سازه‌های مربعی (الف)  $\theta=0^\circ$ ، (ب)  $\theta=9^\circ$ ، (ج)  $\theta=18^\circ$  و (د)  $\theta=27^\circ$

لهیدگی و بیشترین نیروی لهیدگی، دارای بیشترین مقدار در زاویه  $\theta=9^\circ$  و بعد از آن بطور کلی به ترتیب در زوایای  $0^\circ$ ،  $18^\circ$  و  $27^\circ$  درجه (برای سازه‌های مربعی و دایروی) است.



شکل ۷- مقایسه عملکرد سازه‌های مربعی تحت زوایای مختلف بارگذاری الف) SEA (ب)  $F_{max}$  و ج) CFE

در ادامه به ارزیابی شاخص‌های لهیدگی سازه‌های بررسی شده در این تحقیق پرداخته می‌شود که از نمودارهای نیرو-جابجایی استخراج شده‌اند. سه شاخص بیشترین نیروی لهیدگی ( $F_{max}$ )، جذب انرژی مخصوص (SEA) و بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) برای همه سازه‌های بررسی شده در این تحقیق، در شکل ۷ (برای مقاطع مربعی) و شکل ۸ (برای مقاطع دایروی) آورده شده است. از این شکل‌ها مشخص است که با افزایش مقیاس (محیط جداره داخلی نسبت به محیط جداره خارجی) از سازه  $S_2$  ( $C_2$ ) تا  $S_6$  ( $C_6$ )، میزان بیشترین نیروی لهیدگی ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد؛ بطوریکه این پارامتر در مقیاس  $0.5$  برای سازه  $S_4$  ( $C_4$ )، دارای بیشترین مقدار است؛ همچنین سازه  $S_6$  ( $C_6$ ) نسبت به سازه  $S_1$  ( $C_1$ )، دارای  $F_{max}$  بیشتری (بخاطر داشتن ضخامت بالاتر) است. ضمن اینکه با افزایش زاویه بارگذاری برای هر دو مقاطع مربعی و دایروی، مقدار بیشترین نیروی لهیدگی کاهش می‌یابد و این کاهش برای زاویه بارگذاری مایل  $\theta=9^\circ$  نسبت به بارگذاری محوری، بسیار محسوس است. علت این کاهش، بدلیل کوچکتر شدن اندازه اولین چین تشکیل شده در سازه‌ها است و از نمودار نیرو-جابجایی مشخص است که با افزایش زاویه بارگذاری،  $F_{max}$  در جابجایی‌های بالاتر اتفاق می‌افتد. روند تغییرات جذب انرژی مخصوص (SEA) با پارامتر مقیاس، مشابه بیشترین نیروی لهیدگی است؛ به این صورت که با افزایش مقیاس (محیط جداره داخلی نسبت به محیط جداره خارجی) از سازه  $S_2$  ( $C_2$ ) تا  $S_6$  ( $C_6$ )، میزان بیشترین SEA ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش می‌یابد؛ بطوریکه SEA در مقیاس‌های  $0.5$  (برای حالت بارگذاری محوری) و  $0.25$  (برای بارگذاری‌های مایل)، دارای بیشترین مقدار است؛ همچنین سازه  $S_6$  ( $C_6$ ) نسبت به سازه  $S_1$  ( $C_1$ )، دارای SEA بیشتری است.

بنابراین می‌توان گفت که سازه‌های دوجداره با مقیاس حدود  $0.25$  و  $0.5$ ، دارای قابلیت جذب انرژی بهتری نسبت به سازه‌های یک جداره مرسوم و حتی جدار ضخیم ( $S_6$  ( $C_6$ )) است. بازدهی نیروی لهیدگی (CFE)، از نسبت میانگین نیروی لهیدگی بر بیشترین نیروی لهیدگی بدست می‌آید. طبق نمودارهای نیرو-جابجایی استخراج شده از نرم‌افزار ال اس داینا، CFE به دلیل اختلاف کم بین میانگین نیروی

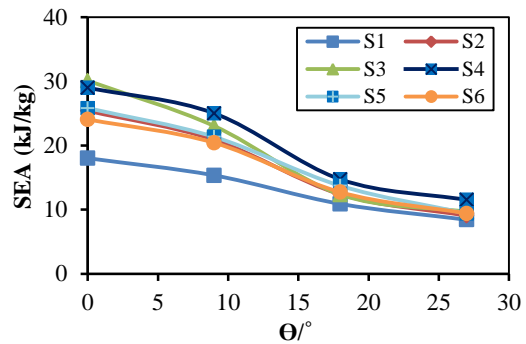


معیاره بوده که روش کپراس برای این منظور انتخاب گردید. اصول پیاده‌سازی این روش، در بخش قبل توضیح داده شد و در این قسمت روش مذکور روی نتایج حاصل از نرم‌افزار ال اس-داینایا پیاده سازی شده، رتبه هر کدام از سازه‌ها از نظر قابلیت جذب انرژی مشخص شده است.

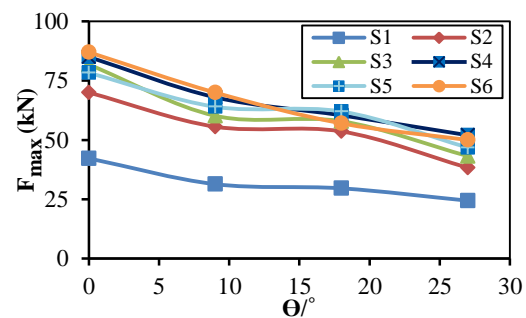
ماتریس تصمیم‌گیری و بی‌بعد شده طبق فرمول ۴ و ۵ برای شش سازه لوله‌ای که سطح مقطع خارجی آن‌ها مربعی است، در جدول ۲-الف و ۲-ب نشان داده شده است و نهایتاً نتایج رتبه‌بندی کپراس، در جدول ۲-ج آورده شده است. اندیس‌های ۱ تا ۴ شاخص‌ها در جدول به ترتیب به چهار زاویه برخورد ۰، ۹، ۱۸ و ۲۷ اشاره دارد. مطابق جدول ۲-ج، سازه دو جداره  $S_4$  بهترین جذب انرژی مقطع مربعی بوده، سازه‌های  $S_1$ ،  $S_2$ ،  $S_5$ ،  $S_3$  و  $S_6$  در رتبه‌های بعدی قرار گرفته‌اند. همین‌طور، نتایج پیاده‌سازی روش کپراس برای مقاطع دایروی در جدول ۳ آمده است. مطابق جدول ۳-ج، سازه دو جداره  $C_4$  بهترین جذب انرژی مقطع دایروی شناخته شده، سازه‌های  $C_1$ ،  $C_6$ ،  $C_3$ ،  $C_5$  و  $C_2$  در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. در ادامه به منظور پیدا کردن بهترین سازه از میان سازه‌های  $S_4$  و  $C_4$ ، روش کپراس یک بار دیگر روی این دو سازه اجرا گردید و همان‌طور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، سازه دوجداره با مقطع دایروی و مقیاس ۰/۵ ( $C_4$ )، به عنوان بهترین جذب انرژی از میان سازه‌های بررسی شده در این تحقیق معرفی می‌شود.

#### ۴- بهینه‌سازی ابعاد هندسی سازه دو جداره دایروی به روش سطح پاسخ

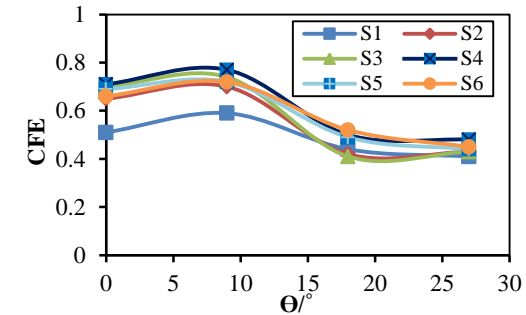
در بخش قبل، سازه دوجداره با سطح مقطع دایروی و با مقیاس ۰/۵، به عنوان بهترین طرح جذب انرژی معرفی گردید. در این قسمت، به بهینه‌سازی ابعاد هندسی (شامل شعاع و ضخامت) این سازه به روش سطح پاسخ پرداخته شده است. محدوده متغیرهای طراحی (شعاع و ضخامت) سازه دو-جداره دایروی که در پنج سطح مختلف بررسی شده، در جدول ۵ مشخص شده است. شکل ۹ نمودار مرحله‌ای اجرای روش سطح پاسخ سطح برای فرایند بهینه‌سازی در این تحقیق را نشان می‌دهد. پس از مشخص شدن محدوده متغیرهای طراحی، ۱۳ نقطه طراحی از طریق روش ترکیب مرکزی تعیین گردید.



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۸- مقایسه عملکرد سازه‌های دایروی تحت زوایای مختلف بارگذاری الف) SEA، ب)  $F_{max}$  و ج) CFE

۳-۴- انتخاب بهترین سازه از نقطه نظر جذب انرژی  
یک جذب انرژی خوب لازم است که جذب انرژی مخصوص ( $SEA$ ) و بازدهی نیروی لهیدگی ( $CFE$ ) بیشتر و همچنین بیشترین نیروی لهیدگی ( $F_{max}$ ) کمتری را در بارگذاری‌ها از خود نشان دهد تا آسیب وارد شده را به خوبی کاهش دهد. در این مطالعه برای انتخاب سازه‌های جدار نازک با بهترین عملکرد قابلیت جذب انرژی با توجه به وجود شاخص بیش از یک مورد در این تحقیق، نیاز به روش تصمیم‌گیری چند

جدول ۲- پیاده‌سازی روش کپراس برای مقاطع مربعی: الف) ماتریس تصمیم‌گیری، ب) ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد شده

و ج) نتایج کپراس  
(الف)

سازه	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
$F_{max1}$	۳۷/۹	۶۶/۵	۸۹/۳	۹۱/۸	۸۷/۹	۹۶/۳
$SEA_1$	۱۶/۶	۲۱	۲۶/۶	۲۵/۱	۲۲/۶	۲۳/۲
$CFE_1$	۰/۵۲	۰/۵۷	۰/۵۸	۰/۵۸	۰/۵۷	۰/۵۸
$F_{max2}$	۲۸/۱	۴۶/۸	۶۲/۶	۶۸/۲	۶۵/۲	۶۷/۴
$SEA_2$	۱۴/۴	۱۷/۶	۲۱/۱	۲۳/۱	۱۹/۷	۱۷/۳
$CFE_2$	۰/۵۹	۰/۷۱	۰/۶۶	۰/۷۴	۰/۷	۰/۶۲
$F_{max3}$	۲۶/۹	۴۲/۵	۵۸/۳	۵۵/۹	۵۵/۳	۵۹/۳
$SEA_3$	۱۱/۴	۱۲	۱۲/۵	۱۳/۵	۱۲/۳	۱۲/۱
$CFE_3$	۰/۵۲	۰/۵۱	۰/۴۳	۰/۵۱	۰/۵	۰/۴۹
$F_{max4}$	۱۹/۸	۳۵/۹	۴۱/۸	۴۶/۶	۴۳/۶	۴۴/۸
$SEA_4$	۷/۷۸	۸/۵	۸/۸۶	۱۰/۵	۹	۸/۹
$CFE_4$	۰/۴۶	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۴۷

(ب)

سازه	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
$F_{max1}$	۰/۰۸	۰/۱۴۱	۰/۱۹۱	۰/۱۹۵	۰/۱۸۷	۰/۲۰۴
$SEA_1$	۰/۱۲۳	۰/۱۵۵	۰/۱۹۷	۰/۱۸۵	۰/۱۶۷	۰/۱۷۱
$CFE_1$	۰/۱۵۵	۰/۱۶۶	۰/۱۶۹	۰/۱۷۱	۰/۱۶۶	۰/۱۶۹
$F_{max2}$	۰/۰۸۳	۰/۱۳۸	۰/۱۸۵	۰/۲۰۱	۰/۱۹۲	۰/۱۹۹
$SEA_2$	۰/۱۲۷	۰/۱۵۵	۰/۱۸۶	۰/۲۰۳	۰/۱۷۴	۰/۱۵۲
$CFE_2$	۰/۱۴۶	۰/۱۷۶	۰/۱۶۴	۰/۱۸۴	۰/۱۷۴	۰/۱۵۴
$F_{max3}$	۰/۰۹	۰/۱۴۲	۰/۱۹۵	۰/۱۸۷	۰/۱۸۵	۰/۱۹۸
$SEA_3$	۰/۱۵۴	۰/۱۶۳	۰/۱۶۹	۰/۱۸۳	۰/۱۶۶	۰/۱۶۲
$CFE_3$	۰/۱۷۵	۰/۱۷۱	۰/۱۴۴	۰/۱۷۳	۰/۱۶۸	۰/۱۶۵
$F_{max4}$	۰/۰۸۵	۰/۱۵۴	۰/۱۷۹	۰/۲۰۳	۰/۱۸۷	۰/۱۹۲
$SEA_4$	۰/۱۴۵	۰/۱۵۸	۰/۱۶۵	۰/۱۹۶	۰/۱۶۸	۰/۱۶۶
$CFE_4$	۰/۱۶۸	۰/۱۵۷	۰/۱۵۳	۰/۱۷۷	۰/۱۷۱	۰/۱۷۱

(ج)

سازه	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
$S_-$	۰/۰۱۴	۰/۰۲۳	۰/۰۲۱	۰/۰۳۲	۰/۰۳۱	۰/۰۳۳
$S_+$	۰/۱۲۴	۰/۱۳۶	۰/۱۴	۰/۱۵۳	۰/۱۴۱	۰/۱۳۶
$Q_i$	۰/۱۷۴	۰/۱۶۵	۰/۱۶۳	۰/۱۷۶	۰/۱۶۳	۰/۱۵۸
$U_i$	۹۸/۹۴	۹۳/۸۶	۹۲/۷۲	۱۰۰	۹۳/۰۹	۸۹/۸۲
رتبه	۲	۳	۵	۱	۴	۶

جدول ۳- پیاده‌سازی روش کپراس برای مقاطع دایروی: الف) ماتریس تصمیم‌گیری، ب) ماتریس تصمیم‌گیری بی‌بعد شده

و ج) نتایج کپراس  
(الف)

سازه	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
$F_{max1}$	۷۳/۳	۶۹/۸	۸۱/۸	۸۱/۸	۷/۳۱	۸۷/۳
$SEA_1$	۱۸	۲/۴۲	۳۸/۱	۲۸/۹	۲/۸۲	۲/۹۸
$CFE_1$	۰/۶۱	۰/۶۵	۰/۷	۰/۷۱	۰/۵۹	۰/۶۶
$F_{max2}$	۲۹/۵	۵/۵۱	۶/۲۱	۶/۵۶	۶۳/۹	۶/۸۹
$SEA_2$	۱۶/۱۱	۲۰/۹	۲۳/۱	۲۴/۸	۲۱/۳	۲۰/۴
$CFE_2$	۰/۶۵	۰/۷۱	۰/۷۳	۰/۷۶	۰/۷۲	۰/۷۲
$F_{max3}$	۲۷/۶	۵/۶۱	۵/۹۲	۶۰/۳	۶/۲۱	۷/۱۱
$SEA_3$	۱۰/۶۷	۱۲/۳	۱۳/۳	۱۴/۲	۱/۷۱	۱۲/۷
$CFE_3$	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۴۱	۰/۴۸	۰/۴۷	۰/۵۲
$F_{max4}$	۲۱/۳	۳/۳۱	۴۲/۹	۴/۹۱	۴۶/۸	۵/۲۲
$SEA_4$	۸/۳۴	۹/۰۳	۹/۶۵	۱۱/۲	۹/۴۱	۹/۴۱
$CFE_4$	۰/۴۷	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۶	۰/۴۲	۰/۴۵

(ب)

سازه	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
$F_{max1}$	۰/۰۸۴	۰/۱۵۸	۰/۱۸۶	۰/۱۹۳	۰/۱۷۸	۰/۱۹۸
$SEA_1$	۰/۱۱۸	۰/۱۶۶	۰/۱۹۷	۰/۱۸۹	۰/۱۶۹	۰/۱۵۷
$CFE_1$	۰/۱۴۹	۰/۱۶۲	۰/۱۷۴	۰/۱۷۷	۰/۱۷۳	۰/۱۶۴
$F_{max2}$	۰/۰۸۵	۰/۱۶۱	۰/۱۷۵	۰/۱۹۳	۰/۱۸۶	۰/۱۹۷
$SEA_2$	۰/۱۵۷	۰/۱۶۵	۰/۱۸۱	۰/۱۹۵	۰/۱۶۸	۰/۱۶۱
$CFE_2$	۰/۱۵۲	۰/۱۶۳	۰/۱۷۱	۰/۱۷۷	۰/۱۶۷	۰/۱۶۷
$F_{max3}$	۰/۱۰۲	۰/۱۹۹	۰/۲۱۵	۰/۲۲۴	۰/۲۳۱	۰/۲۶
$SEA_3$	۰/۱۴	۰/۱۶۲	۰/۱۶۲	۰/۱۸۷	۰/۱۸	۰/۱۶۷
$CFE_3$	۰/۱۶۶	۰/۱۵۲	۰/۱۴۸	۰/۱۷۳	۰/۱۷	۰/۱۸۸
$F_{max4}$	۰/۰۸۵	۰/۱۵۳	۰/۱۷۲	۰/۲	۰/۱۸۷	۰/۲۰۱
$SEA_4$	۰/۱۴۶	۰/۱۵۷	۰/۱۶۹	۰/۱۶۹	۰/۱۶۴	۰/۱۶۴
$CFE_4$	۰/۱۷۶	۰/۱۶۱	۰/۱۶۱	۰/۱۷۲	۰/۱۵۷	۰/۱۶۹

(ج)

سازه	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>
$S_-$	۰/۰۱۵	۰/۰۲۸	۰/۰۳۱	۰/۰۳۳	۰/۰۳۲	۰/۰۲۶
$S_+$	۰/۱۲۲	۰/۱۳۴	۰/۱۴۲	۰/۱۵۳	۰/۱۴	۰/۱۳۹
$Q_i$	۰/۱۷۱	۰/۱۵۹	۰/۱۶۵	۰/۱۷۵	۰/۱۶۲	۰/۱۶۷
$U_i$	۹۷/۰۸	۹۱/۱۴	۹۴/۱	۱۰۰	۹۲/۶۵	۹۵/۲۲
رتبه	۲	۶	۴	۱	۵	۳



عنوان ورودی در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت تعریف گردید و توابع هدف مطابق جدول ۷ برای زوایای مختلف برخورد به دست آورده شد. همانطور که در این جدول مشاهده می‌شود، مدل ریاضی پیشنهاد شده توسط روش سطح پاسخ برای شاخص‌های  $SEA$  و  $F_{max}$  به دو صورت خطی و درجه دوم (بسته به زاویه برخورد) است. حال با استفاده از این توابع هدف، می‌توان روابط بین متغیرهای ورودی و شاخص‌های خروجی و تاثیر متقابل شاخص‌ها بر هم را مطالعه و بررسی نمود. برای بررسی نحوه اثرگذاری متغیرهای هندسی مختلف روی معیارهای طراحی و انتخاب مشخصه‌های بهینه و همچنین ارزیابی مدل منتخب، نیاز به بررسی چند معیاره جواب‌ها است. شکل‌های ۱۰ و ۱۱، اثر متغیرهای ضخامت و شعاع سازه مورد بررسی را روی شاخص‌های  $SEA$  و  $F_{max}$  نشان می‌دهد. از شکل ۱۰ مشخص است که افزوده شدن مقدار ضخامت سازه، باعث افزایش مقدار  $SEA$  برای همه زوایای برخورد شده، افزایش شعاع سازه نیز، باعث کاهش  $SEA$  برای زوایای برخورد ۰ و ۹ شده است؛ در حالی که با افزوده شدن مقدار شعاع سازه،  $SEA$  برای زوایای برخورد ۱۸ و ۲۷ کاهش یافته است. از طرف دیگر مطابق شکل ۱۱، با افزایش مقادیر شعاع و ضخامت سازه، مقدار بیشینه نیروی لهیدگی برای همه زوایای برخورد افزایش یافته است. با بررسی شکل‌های ۱۰ و ۱۱ مشخص است که ضخامت سازه در مقایسه با شعاع سازه، تاثیر بیشتری روی شاخص‌های لهیدگی دارد.

پس از تعیین توابع هدف برای شاخص‌های در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر، می‌توان ابعاد سازه بهینه را تعیین کرد. در روند بهینه‌سازی، از دو شاخص جذب انرژی ویژه به عنوان معیار سودمند و شاخص بیشترین نیروی لهیدگی به عنوان معیار منفی استفاده شده است. انتخاب مقدار وزن برای فاکتورهای ورودی تاثیر زیادی در طراحی بهینه لوله‌ها داشته و این امر در روش‌های بهینه‌سازی چند هدفه، یکی از مهمترین پارامترها است. تاثیر متغیرهای طراحی در فضای طراحی تعیین شده با در نظر گرفتن جذب انرژی ویژه بیشتر و بیشینه نیروی لهیدگی کمتر، جهت افزایش عملکرد جذب انرژی سازه مورد بررسی در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. بر اساس نتایج مشخص شده در شکل ۱۲، بهینه‌ترین نقطه برای سازه دوجداره دایروی با ضخامت  $1/63\text{mm}$  و شعاع  $3\text{mm}$  محاسبه می‌شود.

جدول ۴- نتایج روش رتبه‌بندی کپراس برای انتخاب بهترین جاذب انرژی

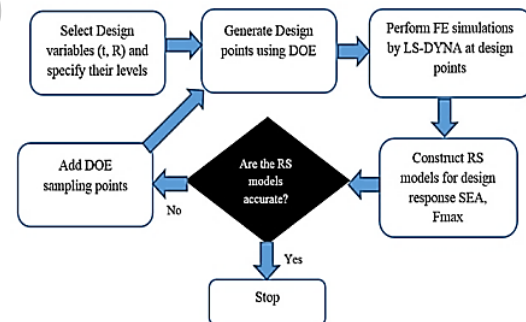
سازه	$S_4$	$C_4$
$S_-$	۰/۰۸۲۷	۰/۰۸۳۶
$S_+$	۰/۴۰۵۵	۰/۴۲۷۷
$Q_i$	۰/۴۸۹۱	۰/۵۱۰۵
$U_i$	۹۵/۷۹	۱۰۰

رتبه بندی

جدول ۵- محدوده متغیرهای طراحی لحاظ شده در روش بهینه‌سازی سطح پاسخ

متغیر	کد	۱	۲	۳	۴	۵
$R$	شعاع / mm	۱۵	۲۰	۲۵	۳۰	۳۵
$t$	ضخامت / mm	۱	۱/۵	۲	۲/۵	۳



شکل ۹- نمودار مرحله‌ای اجرای روش سطح پاسخ جهت بهینه‌سازی سازه دوجداره با مقطع دایروی

سپس سازه دوجداره دایروی با شعاع و ضخامت‌های مختلف (در نقاط طراحی) در نرم‌افزار ال اس-داینا تحت چهار زاویه برخورد ذکر شده مورد تحلیل قرار گرفت و جذب انرژی ویژه ( $SEA$ ) و بیشترین نیروی لهیدگی ( $F_{max}$ ) استخراج گردید (جدول ۶). اندیس‌های ۱ تا ۴ در شاخص‌ها به ترتیب به چهار زاویه برخورد ۰، ۹، ۱۸ و ۲۷ اشاره دارد. در ادامه مقادیر پاسخ (شاخص‌های  $SEA_{1-4}$  و  $F_{max1-4}$ ) به

### ۵- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

مهمترین نتایج بدست آمده از بررسی جذب انرژی سازه‌های دوجداره مربعی و دایروی تحت بارگذاری شبه استاتیکی محوری و مایل را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود:

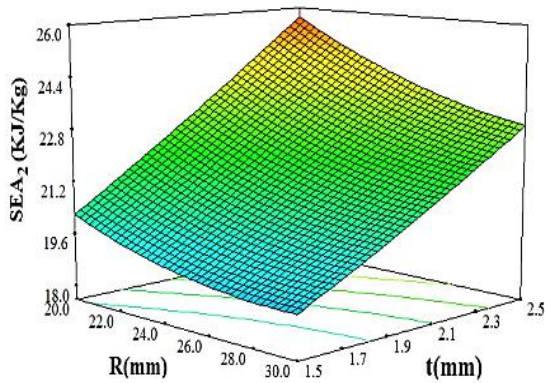
- مدل‌سازی‌های عددی در تحقیق حاضر با انجام آزمایش-های لهیدگی روی سازه مستطیلی صحت‌سنجی شدند و از این مدل برای کارهای مقایسه‌ای سازه‌های مختلف استفاده گردید.
  - شاخص‌های لهیدگی (بیشترین نیروی لهیدگی  $(F_{max})$ ، جذب انرژی مخصوص (SEA) و بازدهی نیروی لهیدگی (CFE) برای سازه‌های دوجداره مربعی و دایروی با مقیاس‌های مختلف تحت چهار حالت بارگذاری محوری و مایل با استفاده از تحلیل‌های اجزاء محدود محاسبه شدند.
  - روش تصمیم‌گیری کپراس، با در نظر گرفتن شاخص‌های لهیدگی فوق‌الذکر روی نتایج اجزاء محدود پیاده‌سازی شد
- و نتایج نشان داد که مقیاس ۰/۵ برای هر دو سازه دوجداره مربعی و دایروی، دارای شرایط جذب انرژی بهتری است؛ بنابراین سازه‌های دوجداره قابلیت جذب انرژی بالاتری نسبت به سازه‌های تک‌جداره دارند. سپس این روش روی نتایج سازه‌های دوجداره مربعی و دایروی با مقیاس ۰/۵ اجرا گردید و نشان داده شد که مقطع دایروی، دارای عملکرد جذب انرژی بهتری است.
- روش تصمیم‌گیری کپراس نشان داد که با افزایش تعداد اضلاع سطح مقطع از مربعی به دایروی، میزان عملکرد جذب انرژی سازه‌ها افزایش می‌یابد.
  - با انتخاب سازه دوجداره با سطح مقطع دایروی به عنوان بهترین جاذب انرژی، در مرحله آخر پارامترهای هندسی این سازه با استفاده از روش‌های طرح ترکیب مرکزی و سطح پاسخ بهینه‌سازی گردید.

جدول ۶- نقاط طراحی و نتایج عددی در این نقاط

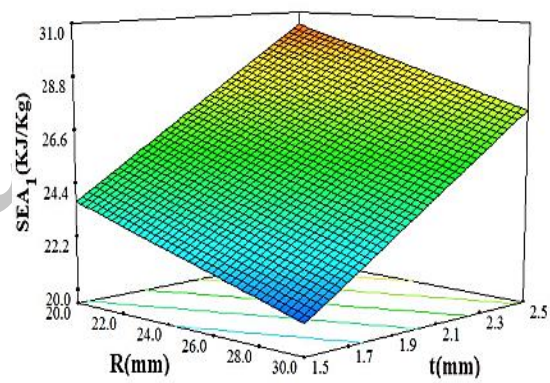
نقاط طراحی	ضخامت	شعاع	$SEA_1$	$F_{max1}$	$SEA_2$	$F_{max2}$	$SEA_3$	$F_{max3}$	$SEA_4$	$F_{max4}$
۱	۲/۵	۲۰	۳۱/۳۲	۸۸/۱۶	۲۵/۶	۷۰/۰۸	۱۴/۱۵	۵۳/۳۲	۹/۷۲	۴۵/۸۲
۲	۲	۲۵	۲۴/۷۶	۶۶/۵۱	۲۱/۴۲	۵۶/۷۵	۱۲/۸۱	۵۰/۵۱	۸/۹۱	۳۳/۰۹
۳	۱	۲۵	۱۹/۵۲	۳۰/۷	۱۷/۰۱	۲۲/۰۲	۸/۶۷	۱۸/۴۵	۶/۸	۱۳/۳۶
۴	۳	۲۵	۳۱/۴۵	۱۱۲/۳۲	۲۶/۶۲	۱۰۸/۲۳	۱۶/۷۵	۹۱/۵۳	۱۴/۱۵	۷۱/۲۳
۵	۲	۲۵	۲۴/۷۶	۶۶/۵۱	۲۱/۴۲	۵۶/۷۵	۱۲/۸۱	۵۰/۵۱	۸/۹۱	۳۳/۰۹
۶	۲	۲۵	۲۴/۷۶	۶۶/۵۱	۲۱/۴۲	۵۶/۷۵	۱۲/۸۱	۵۰/۵۱	۸/۹۱	۳۳/۰۹
۷	۲	۲۵	۲۴/۷۶	۶۶/۵۱	۲۱/۴۲	۵۶/۷۵	۱۲/۸۱	۵۰/۵۱	۸/۹۱	۳۳/۰۹
۸	۲	۱۵	۳۰/۳۲	۵۵/۴۲	۲۵/۲۱	۴۷/۳۲	۹/۶۵	۳۰/۲۳	۶/۷۲	۱۵/۶۳
۹	۱/۵	۳۰	۲۱/۴۵	۶۰/۷۹	۱۹/۲۳	۴۸/۱۹	۱۲/۳۳	۳۸/۴۲	۹/۲۲	۳۰/۷۵
۱۰	۲	۲۵	۲۴/۷۶	۶۶/۵۱	۲۱/۴۲	۵۶/۷۵	۱۲/۸۱	۵۰/۵۱	۸/۹۱	۳۳/۰۹
۱۱	۲	۳۵	۲۲/۸۱	۹۵/۵۶	۲۰/۶۷	۷۹/۷۲	۱۴/۹۱	۶۷/۲۸	۱۰/۹۲	۶۳/۲۶
۱۲	۲/۵	۳۰	۲۹/۲۹	۱۲۲/۰۵	۲۳/۲۳	۱۰۶/۳۶	۱۶/۵۸	۸۷/۴۱	۱۱/۸۲	۷۲/۲۱
۱۳	۱/۵	۲۰	۲۲/۴۷	۴۰/۹۴	۲۰/۱۴	۳۳/۶۱	۹/۴۴	۲۶/۵۵	۷/۴۸	۲۰/۷۶

جدول ۷- توابع هدف بدست آمده از روش سطح پاسخ برای شاخص‌های لهیدگی در زوایای مختلف برخورد

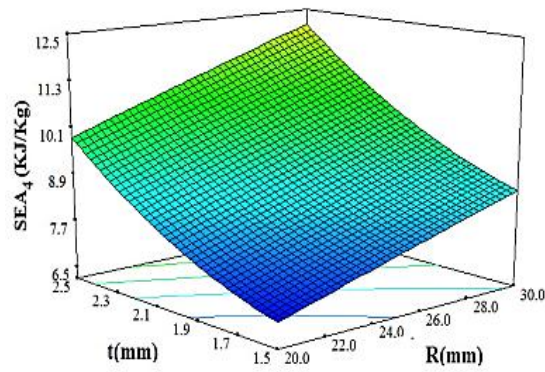
شاخص	مدل پیشنهادی	معادله‌ی مدل پیشنهادی
$SEA_1$	خطی	$19.58404 - 0.30117 R + 6.75833 t$
$F_{max1}$	خطی	$-75.22346 + 2.23367 R + 45.28667 t$
$SEA_2$	درجه ۲	$21.343 - 0.6965R + 6.592 t - 0.137 Rt + 0.0153 R^2 + 0.0406 t^2$
$F_{max2}$	خطی	$-70.7285 + 1.9276 R + 43.51 t$
$SEA_3$	خطی	$-2.1633 + 0.264 R + 4.18667 t$
$F_{max3}$	درجه ۲	$57.1204 - 2.443 R - 38.5228 t + 2.2222 Rt - 0.01738 R^2 + 4.9898 t^2$
$SEA_4$	درجه ۲	$5.0705 + 0.1673 R - 3.98 t + 0.036 Rt - 0.0007 R^2 + 1.5844 t^2$
$F_{max4}$	درجه ۲	$81.3155 - 4.4477 R - 48.935 t + 1.64 Rt + 0.067 R^2 + 9.5778 t^2$



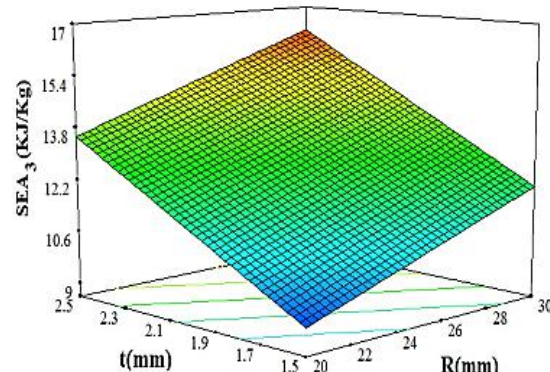
(ب)



(الف)

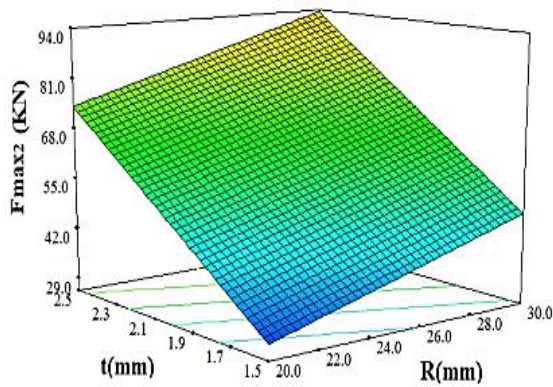


(د)

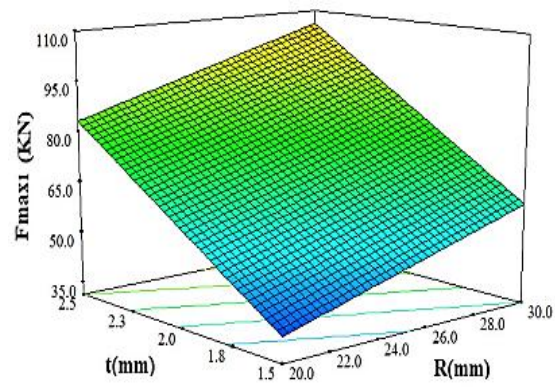


(ج)

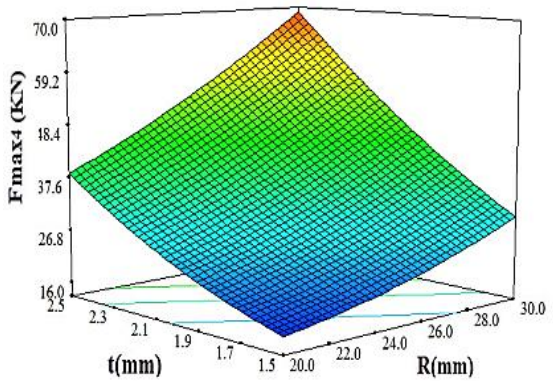
شکل ۱۰- تغییرات  $SEA_{1-4}$  با متغیرهای  $R$  و  $t$  برای زوایای برخورد: (الف)  $\theta=0^\circ$ ، (ب)  $\theta=9^\circ$ ، (ج)  $\theta=18^\circ$ ، (د)  $\theta=27^\circ$



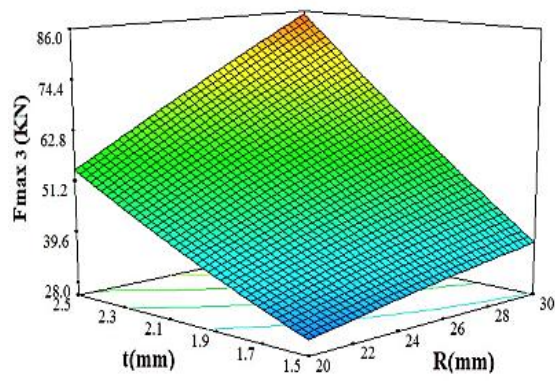
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۱۱- تغییرات  $F_{max1-4}$  با متغیرهای  $R$  و  $t$  برای زوایای برخورد: الف)  $\theta=0^\circ$ ، ب)  $\theta=9^\circ$ ، ج)  $\theta=18^\circ$  و د)  $\theta=27^\circ$

ماتریس وزن دهی شده

جذب انرژی، kJ

میانگین نیروی لهیدگی، kN

بیشینه نیروی لهیدگی، kN

طول اولیه تیوب

جرم سازه، m

پارامتر حق تقدم

ماتریس بی بعد تصمیم گیری

مقادیر غیر سودمند

مقادیر سودمند

جذب انرژی ویژه، kJ/kg

سازه‌ها با مقاطع مربعی

ضخامت، mm

پارامتر رتبه بندی

ماتریس تصمیم گیری

$D$

$EA$

$F_{avg}$

$F_{max}$

$L$

$m$

$Q_i$

$R'$

$S_{-i}$

$S_{+i}$

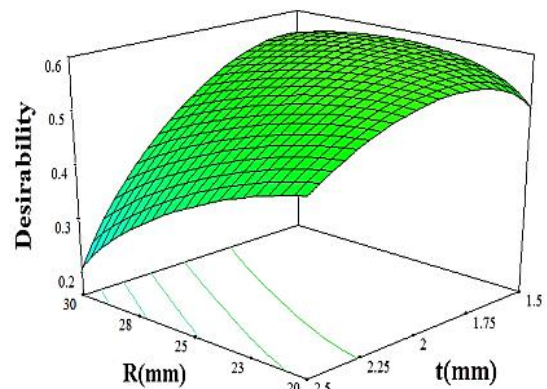
$SEA$

$S_{1-6}$

$t$

$U_i$

$X$



شکل ۱۲- سطح ایده آل مطلوبیت برای متغیرهای طراحی

#### ۶- فهرست علائم

طول لهیدگی، mm

سازه‌ها با مقاطع دایروی

ضریب بازدهی نیروی لهیدگی

$b$

$C_{1-6}$

$CFE$

- ۷- مراجع
- [15] Damghani-Nouri M, Hatami H, Ghodsbin-Jahromi A (1394) Experimental investigation of expanded metal tube absorber under axial impact loading. *Modares Mech Eng* 15(1):371-378.
- [16] Qi C, Yang S, Dong F (2012) Crushing analysis and multi-objective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading. *Thin-Walled Struct* 59(7): 103-111.
- [17] Chang Qi, ShuYang N, Fangliang D (2012) Crushing analysis and multi - objective crashworthiness optimization of tapered square tubes under oblique impact loading. *Thin-Walled Struct* 59: 103-119.
- [18] Reyes A, Langseth M, Hopperstad O (2002) Experiments-numerical analyses Crashworthiness of aluminum extrusions subjected to oblique loading. *Int J Mech Sci* 44(9): 1965-1984.
- [19] AlaviNia A, FallahNejad Kh, Badnava H, Farhoudi H.R (2012) Effects of buckling initiators on mechanical behavior of thin-walled square tubes subjected to oblique loading. *Thin-Walled Struct* 59: 87-96.
- [20] AlaviNia A, Parsapour M (2014) Comparative analysis of energy absorption capacity of simple and multi-cell thin-walled tubes with triangular, square, hexagonal and octagonal sections. *Thin Walled Struct* 74: 155-165.
- [21] Zhang X, Zhang H (2013) Energy absorption of multi-cells tube columns under axial compression. *Thin-Walled Struct* 68 :156-163.
- [22] Zavadskas EK, Kaklauskas A, Turskis Z, Tamošaitiene J (2008) Selection of the effective dwelling house walls by applying attributes values determined at intervals. *J Civil Eng Manag* 14(2): 85-93.
- [23] Kaklauskas A, Zavadskas EK, Trinkunas V (2007) A multiple criteria decision support on - line system for construction. *Eng Appl Artificial Intelligence* 20(2):163-175.
- [24] Zavadskas EK, Turskis Z, Tamošaitiene J, Marina V (2006) Multi criteria selection of project managers by applying grey criteria. *Technol Econ Dev Eco* 14(4): 462-477.
- [25] Kaklauskas A, Zavadskas EK, Raslanas S, Ginevicius R, Komka A, Malinauskas P (2006) Selection of low-e windows in retrofit of public buildings by applying multiple criteria method COPRAS: a Lithuanian case *Energy and Buildings* 38(5): 454-462.
- [26] Zavadskas EK, Kaklauskas A, Peldschus F, Turskis Z (2007) Multi-attribute assessment of road design solutions by using the COPRAS method. *The Baltic J Road and Bridge Eng* 2(4): 195-203.
- [1] Alexander JM (1960) An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading. *Mech Appl Math* 13(1): 5-10.
- [2] Wierzbicki T, Abramowicz W (1983) Study on the crushing mechanics of thin-walled structures. *Appl Mech-Trans American Society Mech Eng* 50(4): 727-234.
- [3] Abramowicz W, Wierzbicki T (1989) Axial crushing of multi - corner sheet metal columns. *Appl Mech- Trans American Society Mech Eng* 56(1): 113-120.
- [4] Andrews KRF, England GL, Ghani E (1983) Classification of the axial collapse of cylindrical tube under quasi-static loading. *Int J Mech Sci* 25 (9- 10):687-696.
- [5] Abramowicz W, Jones N (1984) Dynamic axial crushing of square tubes. *Int J Mech Sci* 2(2): 179-208.
- [6] Abramowicz W, Jones N (1986) Dynamic progressive buckling of circular and square tubes. *Int J Mech Sci* 4(4): 243-270.
- [7] Langseth M, Hopperstad OS (1996) Static and dynamic axial crushing of square thin- walled aluminium extrusions. *Int J Mech Sci* 18(7-8): 946-968.
- [8] Tehrani P. H, Pirmohammad S (2011) Collapse study of thin-walled polygonal section columns subjected to oblique loads. *J Auto Eng* 1(1): 267-279.
- [9] Hosseini-Tehrani P, Pirmohammad S. Collapse Study of A pair thin walled prismatic column subjected to oblique loads. *Int J Auto Eng* 1: 267-279.
- [10] Zheng G, Suzhen Wu, Sun G, Li G, Li Q (2014) Crushing analysis foam-filled single and bitubal polygonal thin-walled tubes. *Int J Mech Sci* 87: 226-240.
- [11] Tang Zh, Liu Sh, Zhang Z (2012) Analysis of energy absorption characteristics of cylindrical multi-cell columns. *ThinWalled Struct* 62: 75-84.
- [12] Najafi A, Rais-Rohani M (2011) Mechanics of axial plastic collapse in multi-cell, multi-corner crush tubes. *Thin-Walled Struct* 49(1):1-12.
- [13] Tehrani PH, Pirmohammad S (2010) Study on crashworthiness characteristics of several concentric thin wall tubes. *ASME 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis* 3(2): 12-14.
- [14] Niknejad A, Firouzi M, Saadatfard H (1394) Experimental investigation of energy absorption behavior by an aluminum profile with special cross-section subjected to the quasi-static lateral loading. *Modares Mech Eng* 15(4): 229-238.