

## انتخاب ساختار مشبک بهینه در آزمون لهیدگی محوری لوله‌های جدارنازک آلومینیومی با استفاده از تصمیم‌گیری چندمعیاره: روش کوپراس

وحید مدانلو<sup>۱\*</sup>، مجید الیاسی<sup>۲</sup>، امین صفی جهانشاهی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سیرجان، سیرجان، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران

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

یادداشت پژوهشی، تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۲۸؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۱/۲۰

### چکیده

استفاده از طرح‌های مشبک در ساخت لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای فلزی به‌عنوان یک گزینه مناسب جاذب انرژی بسیار رایج است. در این تحقیق، شش طرح هندسی متفاوت برای بررسی قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای از جنس آلایژ آلومینیوم ۶۰۶۱ ارائه شده است. از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوپراس برای انتخاب بهترین طرح هندسی استفاده شده است. مقادیر پیک اولیه نیرو، انرژی جذب‌شده کل و جذب انرژی مخصوص لوله‌ها به‌عنوان معیارهای انتخاب بهترین گزینه در نظر گرفته شدند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که لوله مشبک با سوراخ‌های دایروی غیرهم‌اندازه با چینش یکی در میان به‌عنوان بهترین گزینه جذب انرژی با در نظر گرفتن هم‌زمان همه معیارها است. در این طرح هندسی بهینه، چیدمان سوراخ‌های دایروی به صورت یکی در میان با ۳ ردیف سوراخ، ۸ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ و قطر بزرگ ۶ میلی‌متر بوده است. مقادیر پیک اولیه نیرو، انرژی جذب‌شده کل و جذب انرژی مخصوص در این لوله به ترتیب برابر با ۳۲/۰۴ کیلونیوتن، ۱/۲۰ کیلوژول و ۲۰/۸۸ کیلوژول بر کیلوگرم به‌دست آمد.

**کلمات کلیدی:** لوله‌های مشبک؛ جذب انرژی؛ بار محوری؛ روش کوپراس؛ رتبه‌دهی.

## Selection of the optimal perforated structure in the axial loading of aluminum thin-walled tubes using multi-criteria decision-making: COPRAS method

Vahid Modanloo<sup>1\*</sup>, Majid Elyasi<sup>2</sup>, Amin Safi Jahanshahi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Assist. Prof., Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

<sup>2</sup> Assoc. Prof., Mechanical Engineering Department, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

<sup>3</sup> Assist. Prof., Mechanical Engineering Department, Sirjan University of Technology, Sirjan, Iran

### Abstract

The use of perforated designs in the manufacturing of thin-walled cylindrical metallic tubes is very common as a suitable option for absorbing energy. In this research, six different geometric designs have been presented to investigate the energy absorption capability of cylindrical thin-walled AA6061 tubes. The COPRAS multi-criteria decision-making method has been used to select the best geometric design. Initial peak force (IPF), total absorbed energy ( $E_t$ ), and the specific energy absorption (SEA) of the tubes were considered as selection criteria of the best alternative. The obtained results showed that the perforated tube with unequal circular holes arranged one in the middle is the best option for absorbing energy with simultaneously considering all the criteria. In this optimal geometrical pattern, the arrangement of circular holes is one in the middle with 3 rows of holes, 8 holes in each row, a diameter of the small hole of 5 mm and a diameter of the large hole of 6 mm. In this tube, the IPF,  $E_t$ , and SEA values were obtained as 32.04 kN, 1.20 kJ, and 20.88 kJ/kg, respectively.

**Keywords:** Perforated tubes; Energy absorption; Axial loading; COPRAS method; Ranking.

## ۱- مقدمه

طی سالیان اخیر، وجود استانداردهای ایمنی سخت و محکم در صنعت خودروسازی، مهندسان این حوزه را ملزم به طراحی خورروهای ایمن در برابر تصادفات کرده است. در همین راستا، استفاده از سازه‌های سبک‌وزن و جدارنازک به‌منظور جذب انرژی حاصل از برخورد وسیله نقلیه و تضمین سلامت و ایمنی سرنشینان آن بسیار پرکاربرد شده است. لوله‌های جدارنازک مشبک (سوراخ‌دار) به دلیل وزن کم، انعطاف‌پذیری و قابلیت جذب انرژی بالا، یکی از گزینه‌های مناسب برای استفاده در سیستم‌های جاذب انرژی در صنعت حمل و نقل می‌باشند. مقدار لهیدگی زیاد، سهولت در ساخت، قیمت کم و در دسترس بودن از جمله دیگر ویژگی‌های لوله‌های جدارنازک مشبک در سیستم‌های جاذب انرژی است [۴-۱]. لهیدگی تحت بار فشاری محوری یکی از انواع رایج لهیدگی حین تصادفات وسایل نقلیه است. تاکنون، طرح‌های هندسی زیادی برای لوله‌های مشبک فلزی به‌منظور جذب حداکثر انرژی حین لهیدگی توسط پژوهشگران ارائه شده است. یک جاذب انرژی خوب باید کمترین پیک اولیه نیرو، بیشترین انرژی جذب شده، بیشترین جذب انرژی مخصوص و بیشترین نیروی میانگین ضربه را ارائه کند [۵]. علاوه بر معیارهای مذکور، سادگی طرح هندسی و سهولت در فرآیند ایجاد شبکه (سوراخ) در لوله‌های جدارنازک فلزی نیز باید مدنظر قرار گیرد [۶]. در پژوهش‌های پیشین، سطح مقطع لوله‌ها معمولاً به صورت دایروی، مربعی، شش ضلعی، لوزی و بیضی بوده است. سطح مقطع سوراخ‌ها نیز به شکل‌های مذکور بوده است. به‌عنوان مثال، محسنی‌زاده و احمد از لوله‌های جدارنازک آلومینیومی پر شده با فوم پلی‌اورتان برای جذب انرژی تحت بار محوری استفاده کردند [۷]. راهی قابلیت جذب انرژی لوله‌های جدارنازک آلومینیومی با سطح مقطع دایروی، مربعی و ترکیبی را به صورت عددی و تجربی بررسی نمود [۸]. پیرمحمد و اسماعیلی‌مرزدشتی قابلیت جذب انرژی لوله‌های آلومینیومی دولایه با سطح مقطع مربعی و هشت‌ضلعی را مورد مطالعه قرار دادند [۹]. بارگذاری لوله‌ها به‌صورت فشاری در راستاهای محوری و مورب انجام شد. سطح مقطع سوراخ‌های ایجادشده به‌صورت مستطیلی، شش‌ضلعی و بیضی در نظر گرفته شد. سانگ و همکاران از سطح مقطع مربعی با سوراخ‌های مربعی و مستطیلی برای بررسی جذب انرژی لوله‌های فولادی تحت بار فشاری محوری استفاده

نمودند [۱۰]. نیک‌خواه و همکاران از سطح مقطع‌های دایروی، شش‌ضلعی و مربعی با سوراخ‌های دایروی و لوزی برای بررسی رفتار جذب انرژی لوله‌های جدارنازک آلومینیومی تحت بار دینامیکی استفاده کردند [۱۱]؛ همچنین محمداسماعیل از لوله آلومینیومی با سطح مقطع مربعی با سوراخ‌های دایروی، مربعی و لوزی برای بررسی جذب انرژی تحت بار محوری استفاده نمود [۱۲]. از آنجا که ایجاد سوراخ‌های دایروی آسانتر است، این نوع سوراخ بیشتر در نظر گرفته شده است. استفاده از لوله‌های مختلف با سطح مقطع و شبکه‌های متفاوت، منجر به یک پاسخ جدید و در نتیجه رفتار جذب انرژی جدید تحت بارگذاری محوری فشاری خواهد شد. از همین رو، انتخاب بهترین طرح هندسی برای لوله‌های جدارنازک مشبک جهت دستیابی به بهترین جذب انرژی همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. یکی از ابزارهای کاربردی در انتخاب بهترین الگوی هندسی لوله‌های فلزی جدارنازک مشبک با در نظر گرفتن همزمان چندین معیار جذب انرژی، روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره است. این روش‌ها هنگامی که هدف مسأله، انتخاب بهترین گزینه از بین چند گزینه با توجه همزمان به چند معیار باشد، قابل استفاده می‌باشند. بعضی از مهم‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره عبارت است از تاپسیس [۱۳]، مورا [۱۴]، ویکور [۱۵] و کوپراس [۱۶]. در روش کوپراس، معیارهای مثبت و منفی، تفکیک‌شده و مشخص می‌شود. در معیار مثبت، با افزایش مقدار، میزان مطلوبیت آن نیز افزایش یافته است، اما در معیارهای منفی، با افزایش مقدار از میزان مطلوبیت کاسته می‌شود [۱۶]. از روش‌های مذکور جهت انتخاب بهترین ماده، بهترین شرایط آزمایش و بهترین ساختار استفاده می‌شود. مانند پژوهش مرادیان و همکاران [۱۵] که از روش‌های تاپسیس، ویکور و مورا به‌منظور انتخاب بهترین جنس پلیمری در ساخت بدنه بوستر ترمز خودرو استفاده کردند. پژوهش مدانلو و همکاران [۱۷] که با استفاده از روش‌های تاپسیس و مورا به انتخاب بهترین حالت خمکاری لوله از نظر فشار سیال و نوع عملیات حرارتی پرداختند؛ همچنین پژوهش فان و همکاران [۱۶] که به انتخاب بهترین ساختار (لوله دولایه با سطح مقطع و سوراخ دایروی) جاذب انرژی تحت بار محوری با استفاده از روش کوپراس پرداختند. هدف این تحقیق، انتخاب بهترین لوله جدارنازک مشبک از جنس آلیاژ آلومینیوم ۶۰۶۱ در آزمون لهیدگی تحت

جابجایی،  $P$  نیروی وارده در هر لحظه و  $m$  جرم لوله است [۱۸].

جدول ۱- مشخصات هندسی لوله‌های مختلف

لوله	تعداد ردیف	تعداد سوراخ در هر ردیف	قطر سوراخ	
			کوچک (میلی-متر)	بزرگ (میلی-متر)
۱#	۳	۶	۴	۴/۸
۲#	۷	۶	۵	۷
۳#	۳	۸	۵	۶
۴#	۳	۱۲	۵	۷
۵#	۵	۶	۶	-
۶#	-	-	-	-



شکل ۱- شماتیک لوله‌های در نظر گرفته شده الف: با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه منظم، ب: با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه نامنظم، ج: با سوراخ‌های هم‌اندازه، د: بدون سوراخ

$$E_t = \int_0^L P(x) dx \quad (1)$$

بارگذاری محوری با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوپراس است. سطح مقطع لوله‌ها و سوراخ‌ها به صورت دایروی در نظر گرفته شده‌اند. شش لوله آلومینیومی با الگوهای هندسی مختلف شامل مشبک با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه (۲ لوله)، مشبک با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه یکی در میان (۲ لوله)، مشبک با سوراخ‌های هم‌اندازه (یک لوله) و بدون سوراخ (یک لوله) به‌عنوان گزینه‌ها در نظر گرفته شده‌اند. به‌علاوه، مقادیر پیک اولیه نیرو، انرژی جذب‌شده کل و جذب انرژی مخصوص لوله‌ها به‌عنوان معیارهای انتخاب در نظر گرفته شده‌اند. در پایان، با تحلیل نمودارهای نیرو-جابجایی برای لوله‌های مختلف، بهترین طرح برای لوله با هدف جذب انرژی حداکثر انتخاب خواهد شد.

## ۲- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، از لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای از جنس آلایاز آلومینیومی ۶۰۶۱ برای انجام آزمایش‌های لهیدگی تحت بارگذاری فشاری محوری استفاده شد. طول، قطر خارجی و ضخامت لوله‌ها به ترتیب ۹۶، ۵۵ و ۲ میلی‌متر است. آزمون‌های تجربی لهیدگی تحت بار فشاری محوری با استفاده از یک دستگاه پرس سنتام با ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن انجام و منحنی‌های نیرو-جابجایی هر آزمایش استخراج شد. در آزمایش‌های تجربی، فک پایین پرس ثابت بوده و فک بالا با سرعت ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه به سمت پایین حرکت کرده تا از جابجایی ۶۰ میلی‌متر اطمینان حاصل شود. تعداد شش لوله آلومینیومی با الگوهای هندسی مختلف (مطابق با جدول ۱) به‌عنوان گزینه‌های مورد بررسی در نظر گرفته شدند. لازم به ذکر است که در این جدول، لوله‌های ۱# و ۲# از نوع مشبک با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه منظم، لوله‌های ۳# و ۴# از نوع مشبک با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه نامنظم، لوله ۵# از نوع مشبک با سوراخ‌های هم‌اندازه و لوله ۶# از نوع بدون سوراخ (توپر) است. شکل ۱ شماتیک لوله‌های در نظر گرفته شده را نشان می‌دهد. پس از انجام آزمایش‌های تجربی، پیک اولیه نیرو، انرژی جذب‌شده کل و جذب انرژی مخصوص برای هر لوله لهیده‌شده استخراج شد؛ همچنین، انرژی جذب‌شده کل ( $E_t$ ) و جذب انرژی مخصوص ( $SEA$ ) لوله‌ها به ترتیب با استفاده از روابط (۱) و (۲) به‌دست آمدند که در آنها  $L$  میزان

خواهد داد. لازم به ذکر است که در روابط فوق پارامتر  $i$  تعداد گزینه‌ها ( $m=6$ ) و پارامتر  $j$  تعداد معیارها ( $n=3$ ) می‌باشند [۱۶].

$$R = [r_{ij}]_{m \times n} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad (3)$$

$$D = [y_{ij}]_{m \times n} = r_{ij} \times w_j \quad (4)$$

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^n y_{ij}^+ \quad (5)$$

$$S_i^- = \sum_{j=1}^n y_{ij}^- \quad (6)$$

$$Q_i = S_i^+ + \frac{S_{\min}^- \sum_{i=1}^m S_i^-}{S_i^- \sum_{i=1}^m (S_{\min}^- / S_i^-)} \quad (7)$$

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{\max}} \times 100\% \quad (8)$$

#### ۴- نتایج و بحث

شکل‌های ۲ تا ۷، نمودارهای نیرو-جابجایی حاصل از آزمون لهیدگی تحت بار فشاری محوری برای لوله‌های مختلف در نظر گرفته شده به‌عنوان گزینه‌ها را نشان می‌دهند؛ همچنین جهت مقایسه رفتار لوله‌ها تحت بار فشاری محوری، نمودارهای نیرو-جابجایی هر شش لوله در شکل ۸ باهم مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، لوله #۵ بیشترین و لوله #۴ کمترین مقادیر پیک اولیه نیرو را دارند. همانطور که قبلاً ذکر شد، هر چقدر معیار مذکور برای یک جاذب انرژی کمتر باشد، آن گزینه مطلوب‌تر خواهد بود؛ در نتیجه، لوله #۴ یعنی سوراخ‌دار با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه نامنظم (۳ ردیف سوراخ، ۱۲ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و قطر بزرگ ۷ میلی‌متر) به‌عنوان بهترین گزینه جذب و لوله #۵ یعنی سوراخ‌دار با سوراخ‌های هم‌اندازه (۵ ردیف سوراخ، ۶ سوراخ در هر ردیف و قطر سوراخ ۶ میلی‌متر) به‌عنوان بدترین گزینه انتخاب خواهند شد؛ همچنین، مقادیر بیشتر انرژی جذب شده کل و جذب انرژی مخصوص برای یک جاذب انرژی مطلوب خواهند بود؛ لذا لوله‌های #۵ و #۳ (۳ ردیف سوراخ، ۸

$$SEA = \frac{\int_0^L P(x) dx}{m} \quad (2)$$

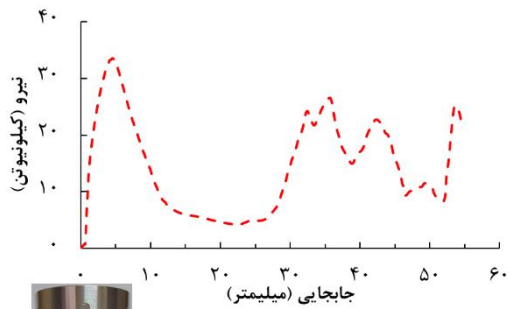
#### ۳- تصمیم‌گیری چندمعیاره با روش کوپراس

در این پژوهش، به‌منظور انتخاب بهترین گزینه جذب انرژی از بین لوله‌های جدارنازک مختلف در نظر گرفته شده، از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوپراس استفاده شده است. در این روش، اولین گام تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری است. همانطور که در جدول ۲ آمده است، تعداد شش لوله به‌عنوان گزینه و تعداد سه خروجی جذب انرژی به‌عنوان معیار در نظر گرفته شده تا ماتریس تصمیم‌گیری تشکیل شود.

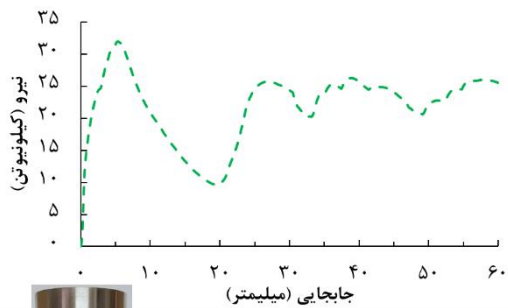
جدول ۲- ماتریس تصمیم‌گیری

گزینه	پیک اولیه نیرو (کیلو نیوتن)	انرژی کل (کیلوژول)	جذب انرژی مخصوص (کیلوگرم/کیلوژول)
#۱	۳۲/۳۴	۱/۲۲	۱۴/۵۲
#۲	۳۲/۹۱	۱/۰۵	۱۲/۸۰
#۳	۳۲/۰۴	۱/۲۰	۲۰/۸۸
#۴	۲۲/۳۹	۱/۰۷	۱۴/۰۷
#۵	۴۱/۳۵	۱/۳۲	۱۶/۹۲
#۶	۹۰/۲۴	۰/۸۹	۱۵/۴۵

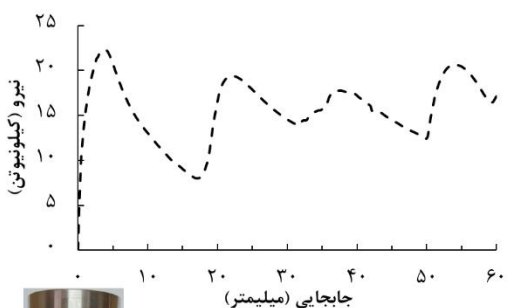
در ادامه، ماتریس تصمیم با استفاده از رابطه (۳) بی‌بعد خواهد شد. در این رابطه  $X_{ij}$  درایه‌های ماتریس تصمیم‌گیری است. سپس، درایه‌های ماتریس تصمیم بی‌بعد شده در وزن هر معیار ( $W_j$ ) ضرب شده تا ماتریس وزن‌دار تشکیل شود (رابطه (۴)). در این تحقیق، برای هر سه معیار جذب انرژی مذکور وزن یکسان برابر با ۰/۳۳۳ در نظر گرفته شد. این انتخاب با توجه به تجربه نویسندگان و مراجع مرتبط با جذب انرژی در لوله‌های جدارنازک فلزی صورت گرفته است [۱۶]. در مرحله بعد، مجموع معیارهای مثبت ( $S_i^+$ ) و مجموع معیارهای منفی ( $S_i^-$ ) برای هر گزینه به ترتیب با استفاده از روابط (۵) و (۶) تعیین می‌شوند. در این تحقیق پیک اولیه نیرو معیار منفی و انرژی جذب شده کل و جذب انرژی مخصوص نیز معیار مثبت می‌باشند. سپس، مقدار ارزیابی جامع هر گزینه ( $Q_i$ ) با استفاده از رابطه (۷) محاسبه می‌شود. در مرحله آخر، امتیاز جامع هر گزینه ( $U_i$ ) با استفاده از رابطه (۸) تعیین می‌شود. بهترین گزینه مقدار ۱۰۰ و بدترین گزینه مقدار ۱ را به خود اختصاص



شکل ۳- نمودار نیرو-جابجایی آزمایش لهدگی لوله #۲

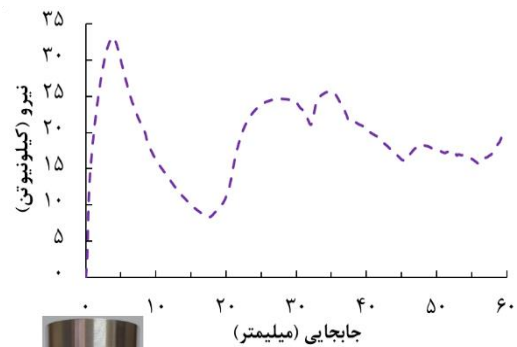


شکل ۴- نمودار نیرو-جابجایی آزمایش لهدگی لوله #۳



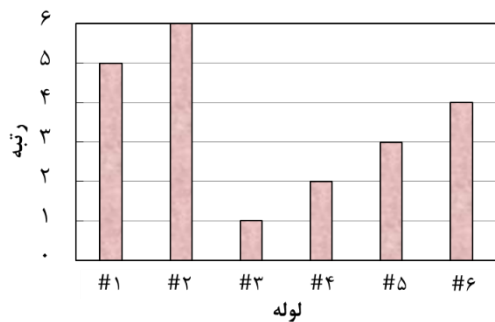
شکل ۵- نمودار نیرو-جابجایی آزمایش لهدگی لوله #۴

سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و قطر بزرگ ۶ میلی‌متر) به‌عنوان بهترین گزینه و لوله‌های #۶ و #۲ (سوراخ‌دار با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه منظم شامل ۷ ردیف سوراخ، ۶ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و قطر بزرگ ۷ میلی‌متر به‌عنوان بدترین گزینه انتخاب خواهند شد. طبق نتایج حاصل، اگر فقط معیار پیک اولیه نیرو در نظر گرفته شود، لوله #۴ بهترین انتخاب خواهد بود. اگر فقط معیار انرژی جذب شده کل در نظر گرفته شود، لوله #۵ بهترین انتخاب خواهد بود؛ همچنین، اگر فقط معیار جذب انرژی مخصوص در نظر گرفته شود، لوله #۳ بهترین انتخاب خواهد بود. همانطور که مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن جداگانه هر معیار جذب انرژی، بهترین انتخاب (گزینه) متفاوت خواهد بود. از این‌رو، تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه اهمیت می‌یابد؛ زیرا برای انتخاب بهترین گزینه، همه معیارها و اهمیت (وزن) آنها باید به‌صورت هم‌زمان در نظر گرفته شود.



شکل ۲- نمودار نیرو-جابجایی آزمایش لهدگی لوله #۱

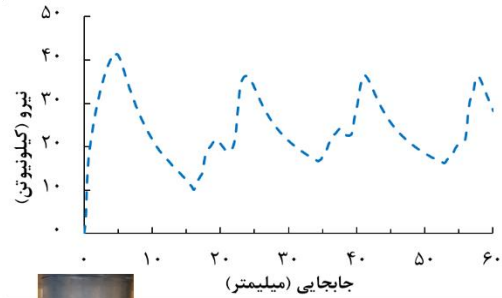
انتخاب می‌شود. در این گزینه، الگوی هندسی لوله آلومینیومی به صورت سوراخ‌دار با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه نامنظم با ۳ ردیف سوراخ، ۸ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و قطر بزرگ ۶ میلی‌متر است؛ همچنین مقادیر پیک اولیه نیرو، انرژی جذب شده کل و جذب انرژی مخصوص این لوله به ترتیب برابر با ۳۲/۰۴ کیلونیوتن، ۱/۲۰ کیلوژول و ۲۰/۸۸ کیلوژول/کیلوگرم است. این گزینه در مقایسه با سایر گزینه‌ها (لوله‌ها)، تنها دارای بیشترین جذب انرژی مخصوص بوده و بهترین مقدار از نظر پیک اولیه نیرو و انرژی جذب شده کل نمی‌باشد. به علاوه، لوله #۴ به عنوان دومین گزینه برتر انتخاب شد. این لوله، از نوع سوراخ‌دار با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه نامنظم با ۳ ردیف سوراخ، ۱۲ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و قطر بزرگ ۷ میلی‌متر است؛ همچنین، در این گزینه مقادیر پیک اولیه نیرو، انرژی جذب شده کل و جذب انرژی مخصوص به ترتیب برابر با ۲۲/۳۹ کیلونیوتن، ۱/۰۷ کیلوژول و ۱۴/۰۷ کیلوژول/کیلوگرم به دست آمد. از طرف دیگر، لوله #۲ به عنوان بدترین گزینه انتخاب شد. در این گزینه، لوله از نوع سوراخ‌دار با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه نامنظم با ۷ ردیف سوراخ، ۶ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و قطر بزرگ ۷ میلی‌متر است. به علاوه، در این گزینه مقادیر پیک اولیه نیرو، انرژی جذب شده کل و جذب انرژی مخصوص به ترتیب برابر با ۳۲/۹۱ کیلونیوتن، ۱/۰۵ کیلوژول و ۱۲/۸۰ کیلوژول/کیلوگرم است.



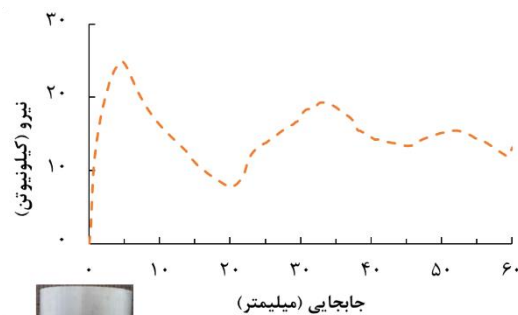
شکل ۹) رتبه‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش کوپراس

### ۵- نتیجه‌گیری

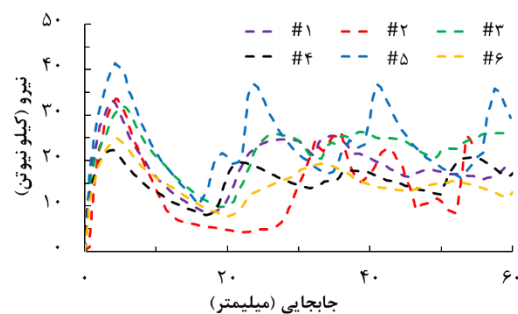
در این مقاله، قابلیت جذب انرژی در لوله‌های جدارنازک استوانه‌ای با الگوهای هندسی مختلف از جنس آلیاژ آلومینیوم



شکل ۶- نمودار نیرو-جابجایی آزمایش لهیدگی لوله #۵



شکل ۷- نمودار نیرو-جابجایی آزمایش لهیدگی لوله #۶



شکل ۸- مقایسه نمودار نیرو-جابجایی لهیدگی لوله‌ها

در شکل ۹ رتبه‌بندی گزینه‌ها (لوله‌ها) با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوپراس نشان داده شده است. همانطور که قابل مشاهده است، لوله #۳ به عنوان بهترین گزینه

- design of thin-walled tubes under axial loading. *Adv in Mat and Proc Tech* 1(3-4):375-383.
- [7] Mohsenizadeh S, Ahmad Z (2019) Auxeticity effect on crushing characteristics of auxetic foam-filled square tubes under axial loading. *Thin-Walled Struc* 145:106379.
- [8] Rahi A (2018) Controlling energy absorption capacity of combined bitubular tubes under axial loading. *Thin-Walled Struc* 123:222-231.
- [9] Pirmohammad S, Esmaili-Marzdashti S (2019) Multi-objective crashworthiness optimization of square and octagonal bitubal structures including different hole shapes. *Thin-Walled Struc* 139:126-138.
- [10] Song J, Chen Y, Lu G (2013) Light-weight thin-walled structures with patterned windows under axial crushing. *Int J Mech Sci* 66:239-248.
- [11] Nikkhah H, Baroutaji A, Olabi AG (2019) Crashworthiness design and optimisation of windowed tubes under axial impact loading. *Thin-Walled Struc* 142:132-148.
- [12] Mohamed Ismail N M (2023) Performance analysis and optimization of square tubes with different shapes, sizes, and patterns of holes under axial compression loading. *Int J Crash* 1-27.
- [13] Modanloo V, Alimirzaloo V, Elyasi M (2019) Multi-objective optimization of the stamping of titanium bipolar plates for fuel cell. *ADMT J* 12(4):1-8.
- [14] Modanloo V (2023) Application of multi-criteria decision making method for selection of lightweight material in manufacturing of railway vehicles. *J. Sol. Flu. Mech.* 13(3):45-53.
- [15] Moradian M, Modanloo V, Aghaie S (2019) Comparative analysis of multi criteria decision making techniques for material selection of brake booster valve body. *J Traff Transp Eng (English Edition)* 6(5):526-534.
- [16] Fan D, Qihua M, Xuehui G, Tianjun Z (2021) Crashworthiness analysis of perforated metal/composite thin-walled structures under axial and oblique loading. *Poly Comp* 42(4):2019-2036.
- [17] Modanloo V, Elyasi M, Talebi Ghadikolaee H, Ahmadi Khatir F, Akhouni B (2023) The use of MCDM techniques to assess fluid pressure on the bending quality of AA6063 heat-treated tubes. *J Eng Res.*
- [18] Montazeri S, Elyasi M, Moradpour A (2018) Investigating the energy absorption, sea and crushing performance of holed and grooved thin-walled tubes under axial loading with different materials. *Thin-Walled Struc* 131:646-653.
- ۶۰۶۱ تحت بار فشاری محوری به صورت تجربی بررسی شد. تعداد شش لوله آلومینیومی با الگوهای هندسی متفاوت شامل دو لوله مشبک با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه، دو لوله مشبک با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه یکی درمیان، یک لوله مشبک با سوراخ‌های هم‌اندازه و یک لوله بدون سوراخ در نظر گرفته شد. از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره کوپراس برای انتخاب بهترین گزینه استفاده شد. معیارهای در نظر گرفته شده نیز پیک اولیه نیرو، انرژی جذب‌شده کل و جذب انرژی مخصوص لوله‌ها بودند. بررسی نتایج نشان داد که لوله #۳ به‌عنوان بهترین گزینه انتخاب شد. الگوی هندسی این لوله از نوع مشبک با سوراخ‌های غیرهم‌اندازه نامنظم (یکی درمیان) با ۳ ردیف سوراخ، ۸ سوراخ در هر ردیف، قطر سوراخ کوچک ۵ میلی‌متر و قطر بزرگ ۶ میلی‌متر است؛ همچنین در این لوله مقادیر پیک اولیه نیرو، انرژی جذب‌شده کل و جذب انرژی مخصوص به ترتیب برابر با ۳۲/۰۴ کیلونیوتن، ۱/۲۰ کیلوژول و ۲۰/۸۸ کیلوژول/کیلوگرم به‌دست آمد؛ همچنین، نتایج این تحقیق نشان داد که لوله‌های جدارنازک مشبک با سوراخ‌های نامنظم به‌دلیل عدم پیچیدگی و سهولت در فرآیند ساخت، به‌عنوان یک گزینه مناسب با در نظر گرفتن چندین معیار جذب انرژی در سیستم‌های جاذب انرژی قابل استفاده خواهد بود.

#### مراجع

- [1] Elyasi M, Rooholamini Ahangar M, Modanloo V (2023) Improving Energy Absorption of AA6061 Holed Thin-Walled Cylindrical Tubes. *Modares Mech Eng* 23(11):587-595.
- [2] Ghanbari-Ghazijahani T, Nabati A, Azandariani M G, Fanaie N (2020) Crushing of steel tubes with different infills under partial axial loading. *Thin-Walled Struc* 149:106614.
- [3] Moradpour A, Elyasi M, Montazeri S (2016) Developing a new thin-walled tube structure and analyzing its crushing performance for aa 60601 and mild steel under axial loading. *Trans Indian Inst Metals* 69:1107-1117.
- [4] Elyasi M, Moradpour A, Montazeri S (2014) Axial crushing in a novel technique of thin-walled tube. *Key Eng Mat* 622:709-716.
- [5] Shen W, Gu X, Jiang P, Hu J, Lv X, Qian L (2017) Crushing analysis and multiobjective optimization design for rectangular unequal triple-cell tubes subjected to axial loading. *Thin-Walled Struc* 117:190-198.
- [6] Elyasi M, Montazeri S, Moradpour A (2015) Investigating the effect of material type in the new