



## شبیه‌سازی و بهینه‌سازی کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار

سعید وحیدی، جمال ارغوانی هادی\*، علیرضا استادرحیمی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

<b>چکیده:</b> در این پژوهش رفتار مکانیکی کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار و اجزای آن با استفاده از معادلات ساختاری سه‌بعدی و به روش حل ضمنی در نرم‌افزار آباکوس با استفاده از زیربرنامه ماده تعریف شده توسط کاربر مطالعه شده است. پارامترهای مادی با استفاده از شبیه‌سازی‌های عددی و نتایج تجربی موجود استخراج گردیده است. تحلیل اجزاء محدود ابتدا برای کابل فولادی الاستیک و سپس کابل سوپرالاستیک آلیاژ حافظه‌دار صورت می‌پذیرد. مقایسه نتایج عددی و تجربی برای این دو نوع کابل بیانگر دقت قابل قبول نتایج بدست آمده و اطمینان از صحت روش شبیه‌سازی در کار حاضر است. در ادامه، عملگر کابل آلیاژ حافظه‌دار تحت ویژگی حافظه‌شکلی شبیه‌سازی گردیده و رفتار مکانیکی کابل با ارائه نمودارهای تنش نرمال، تنش برشی، کرنش و دما برای هر دو ویژگی سوپرالاستیسیته و حافظه‌شکلی بررسی شده است. همچنین، بهینه‌سازی کابل آلیاژ حافظه‌دار تحت ویژگی حافظه‌شکلی با هدف دستیابی به بیشترین انرژی مخصوص کابل به کمک روش طراحی آزمایش‌ها مطالعه شده است. روش ارائه شده در این تحقیق، برای طراحی و بهینه‌سازی عملگرهای کابل حافظه‌دار قابل استفاده است.	<b>تاریخچه داوری:</b> دریافت: بازنگری: پذیرش: ارائه آنلاین:
<b>کلمات کلیدی:</b> کابل آلیاژ حافظه‌دار ویژگی سوپرالاستیسیته ویژگی حافظه‌شکلی عملگر طراحی آزمایش	

### ۱- مقدمه

گرفتن رفتار الاستوپلاستیک مطالعه شده است [۶]. در کابل‌های تحت نیروی کششی و یا پیچشی، با کاهش ناگهانی نیرو، تک‌تک مفتول‌ها از مفتول مغزی جدا شده و کابل به صورت پیازی (پدیده قفس پرنده) تغییر شکل دائمی می‌یابد [۱ و ۲]. با توجه به ویژگی‌های خاص کابل‌ها و همچنین رفتار مکانیکی ویژه آلیاژهای حافظه‌دار، استفاده از کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار به عنوان عملگر مورد توجه قرار گرفته است. این کابل‌ها به سبب ویژگی‌های منحصر به فرد سوپرالاستیسیته<sup>۱</sup>، حافظه‌شکلی<sup>۲</sup>، جذب انرژی زیاد، استحکام کششی مناسب و مقاومت خوردگی بالا و قابلیت بازیابی کرنش‌های بزرگ، در برابر تابیدگی و بارهای ضربه‌ای مقاوم می‌باشند [۱]. کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار با برخورداری از چگالی انرژی بیشتر نسبت به دیگر ابزارهای انتقال‌دهنده نیرو، امکان طراحی با حجم کم و توان بالا را فراهم می‌آورند [۷]. از کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار تحت ویژگی حافظه‌شکلی می‌توان برای تولید عملگرهایی با توان نیرویی قابل توجه، قفل‌های حرارتی، عملگرهای حرارتی و ابزارهای با جذب انرژی ضربه‌ای زیاد استفاده نمود [۱]. استفاده از عملگرهای سوپرالاستیسیته آلیاژ حافظه‌دار نیز در دندانپزشکی [۱]، رفع گرفتگی رگ‌های قلب [۸]، آنتن تلفن همراه [۹] و کاهش ارتعاشات در زمین لرزه‌ها [۱۰] رایج می‌باشد. مطالعه تحلیلی، عددی و تجربی فنر مارپیچ

امروزه استفاده از عملگرها به سبب کاربردهای گوناگون آن‌ها در حال افزایش است. از جمله مهم‌ترین عملگرها به عنوان ابزارهای انتقال دهنده نیرو کابل‌ها می‌باشند. آرایش هندسی گوناگون مفتول‌های کابل، خصوصیات مکانیکی متفاوتی در آن‌ها ایجاد می‌نماید که می‌توان به انعطاف‌پذیری، مقاومت سایشی و مقاومت خوردگی قابل توجه آن‌ها اشاره نمود [۱]. حفظ ایمنی کابل‌ها علیرغم گسیختگی یکی یا تعدادی از مفتول‌ها، از ویژگی‌های مهم آن‌ها است. همچنین بکسل کردن، نگهداری پل‌های معلق، استفاده در پهلوگیری کشتی‌ها و سکوها نفتی از مهم‌ترین کاربردهای کابل است [۱]. از این رو کابل‌ها جایگاه ویژه‌ای در صنایع دریایی، حمل و نقل، ماشین‌آلات و هوافضا یافته‌اند. به منظور بررسی رفتار مکانیکی کابل‌ها، مطالعات متعددی تحت بارگذاری‌های متفاوت و آرایش هندسی گوناگون صورت پذیرفته است. از جمله مطالعات تحلیلی، حل معادلات تعادل مفتول‌های کابل فولادی تحت بارگذاری‌های پیچشی و محوری می‌باشد [۲]. معادلات تعادل کابل فولادی با ساختمان  $1 \times 7$  تحت کشش مطالعه شده است و با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است [۳]. به منظور بررسی مطالعات عددی صورت گرفته در زمینه کابل‌ها می‌توان به مدل‌سازی و شبیه‌سازی مفتول‌های فولادی با پیچش تک محوره و دو محوره و کابل فولادی با ساختمان  $1 \times 37$  اشاره کرد [۴ و ۵]. همچنین شبیه‌سازی کابل فولادی با ساختمان  $6 \times 19$  با در نظر

1 Bird Cage  
2 Superelasticity  
3 Shape Memory Effect

برای حالتی است که ماده کاملاً به یک واریانت مارتنزیتی جهت یابد. در مدل سوزا معادلات حاکم بر رفتار ماده به صورت زیر می‌باشد [۱۷]:

$$p = k \theta \quad (2)$$

$$s = 2G(e - e^{tr}) \quad (3)$$

$$X = s - \alpha \quad (4)$$

$$\alpha = [\tau_M(T) + H \|e^{tr}\| + \gamma] e^{tr} / \|e^{tr}\| \quad (5)$$

که  $p$  تنش هیدروستاتیک<sup>۴</sup>،  $s$  تنش انحرافی،  $\theta$  کرنش حجمی و  $e$  کرنش انحرافی می‌باشد.  $X$  تانسور تنش ترمودینامیکی وابسته به کرنش تغییر فاز  $e^{tr}$  است. مدول حجمی و برشی به ترتیب با  $K$  و  $G$  نشان داده می‌شود.  $H$  شیب نمودار تنش-کرنش ناحیه‌ی تغییر فاز و تانسور  $\alpha$  نقش مشابه تنش زمینه<sup>۵</sup> در تئوری پلاستیسیته را ایفا می‌کند. همچنین  $\tau_M$  و  $\gamma$  به ترتیب به صورت زیر معرفی می‌شوند:

$$\tau_M = \begin{cases} \beta(T - T_0) & \text{if } T > T_0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \gamma = 0 & \text{if } \|e^{tr}\| < \varepsilon_L \\ \gamma \geq 0 & \text{if } \|e^{tr}\| = \varepsilon_L \end{cases} \quad (7)$$

که در رابطه‌ی (۶)،  $T_0$  دمای مرجع و  $\beta$  پارامتر ماده است. به منظور توصیف  $e^{tr}$  تابع تغییر فاز  $F$  (مشابه تابع تسلیم) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$F = \|X\| - R \quad (8)$$

که  $R$  شعاع ناحیه الاستیک را نشان می‌دهد. تابع  $F$  زمانی که تغییر فاز امکان‌پذیر می‌باشد برابر با صفر بوده و در غیر این صورت مقادیر منفی برای آن حاصل می‌شود.

### ۳- معرفی کابل

مجموعه‌ای از مفتول‌ها که در قطرهای مختلف به یکدیگر تابیده می‌شوند استرند<sup>۶</sup> نام دارد (شکل ۱). هر یک از استرندها با آرایش هندسی گوناگون به دور استرند مغزی پیچیده می‌شوند و کابل را تشکیل می‌دهند. سه مشخصه تاب<sup>۷</sup>، بافت و گام<sup>۸</sup> تعیین‌کننده ساختار کابل‌ها است که به ترتیب جهت قرارگیری مفتول‌ها و استرندها، نحوه قرارگیری مفتول‌ها در استرند و فاصله یک دور پیچش کامل مفتول‌ها (استرندها) به دور مفتول

سوپرالاستیک آلیاژ حافظه‌دار تحت بارگذاری محوری با استفاده از مدل سه‌بعدی لاگوداس صورت پذیرفته است [۱۰]. همچنین مطالعه تجربی رفتار مکانیکی مجموعه‌ای از رشته مفتول‌های سوپرالاستیک آلیاژ حافظه‌دار با دو ساختمان  $7 \times 7$  و  $1 \times 27$  تحت نیروهای کششی انجام شده است [۱ و ۱۱].

با توجه به تلاش‌های صورت گرفته می‌توان دریافت که مطالعه جزئیات رفتار مکانیکی کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار مورد توجه کمتری قرار گرفته است. انگیزه اصلی این مقاله، مطالعه و توصیف دقیق رفتار مکانیکی حافظه‌شکلی و سوپرالاستیسیته کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار است. علاوه بر این، بهینه‌سازی کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار در ابعاد گوناگون نیز مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این پژوهش، به منظور مطالعه رفتار کابل آلیاژ حافظه‌دار، از میان مدل‌های ساختاری ارائه شده (تاناکا [۱۲]، لیانگ و راجرز [۱۳]، برینسون [۱۴]، فرموند [۱۵]، آریکیو و لوبلیئر [۱۶]، سوزا و همکاران [۱۷]، آریکیو و پترینی [۱۸]، ارغوانی و همکاران [۱۹ و ۲۰]، لاگوداس و همکاران [۲۱]) مدل ساختاری سوزا [۱۷]، به دلیل سادگی و تطابق قابل قبول با نتایج تجربی به صورت یومت<sup>۱</sup> استفاده می‌شود. با استفاده از روش تحلیل اجزاء محدود، عملکرد کابل آلیاژ حافظه‌دار با ساختمان  $1 \times 27$  و  $1 \times 6$  تحت ویژگی‌های سوپرالاستیسیته و حافظه‌شکلی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور اعتبارسنجی روش تحلیل، مطالعه و شبیه‌سازی کابل فولادی با ساختمان  $1 \times 37$  در ناحیه الاستیک صورت می‌پذیرد و نتایج حاصل از آن با نتایج عددی موجود [۵] مقایسه می‌شود. سپس تحلیل اجزاء محدود کابل سوپرالاستیسیته آلیاژ حافظه‌دار با نتایج تجربی شاو و همکاران [۱۱] اعتبارسنجی می‌گردد. با اطمینان از صحت تحلیل صورت گرفته، رفتار مکانیکی کابل آلیاژ حافظه‌دار و اجزای آن تحت ویژگی حافظه‌شکلی بررسی شده و نمودارهای تنش نرمال-کرنش-دما و تنش برشی-کرنش-دما ارائه می‌شود. همچنین بهینه‌سازی کابل آلیاژ حافظه‌دار با هدف رسیدن به بیشترین انرژی مخصوص آن صورت می‌پذیرد.

### ۲- مدل ساختاری سوزا

سوزا با استفاده از تئوری پلاستیسیته، مدل سه‌بعدی که قادر به توصیف رفتار آلیاژ حافظه‌دار تحت دو ویژگی سوپرالاستیسیته و حافظه‌شکلی می‌باشد را ارائه نمود [۱۷]. در این مدل کرنش  $\varepsilon$  و دمای مطلق  $T$  به عنوان متغیرهای کنترلی و تانسور مرتبه دوم کرنش تغییر فاز  $e^{tr}$  به عنوان متغیر داخلی در نظر گرفته شده است.  $e^{tr}$  تغییر فاز بین دو حالت آستنیت<sup>۲</sup> و واریانت مارتنزیتی<sup>۳</sup> را تعیین می‌کند و حد اشباع آن در محدوده رابطه (۱) قرار دارد.

$$\|e^{tr}\| \leq \varepsilon_L \quad (1)$$

که  $\varepsilon_L$  نرم اقلیدسی و  $\varepsilon_L$  ماکزیمم کرنش تغییر فاز است. مقدار صفر، حالتی است که هیچگونه تغییر جهت مارتنزیتی وجود نداشته باشد و مقدار  $\varepsilon_L$

4 Hydrostatics  
5 Back Stress  
6 Strand  
7 Lay  
8 Pitch

1 UMAT  
2 Austenite  
3 Martensite

#### ۴- مطالعه تجربی انجام شده توسط شاو و همکارانش [۱] بر روی کابل سوپرالاستیسیته آلیاژ حافظه‌دار

کابل سوپرالاستیسیته آلیاژ حافظه‌دار ۱×۲۷ با در نظر گرفتن تاب مفتول‌ها، به صورت تجربی مطالعه شده است. در آزمایش ترمومکانیکی صورت گرفته (شکل ۴) به منظور جلوگیری از حرکت مفتول‌ها نسبت به یکدیگر، دو انتهای نمونه بین صفحات فولادی با گیره‌های پنوماتیکی نگه داشته می‌شود، بطوری که یک انتها امکان جابجایی در راستای طول کابل را دارد. در این بررسی توزیع کرنش محوری محلی کابل و کرنش میانگین محوری آن اندازه‌گیری می‌شود. همچنین دما به طور همزمان توسط

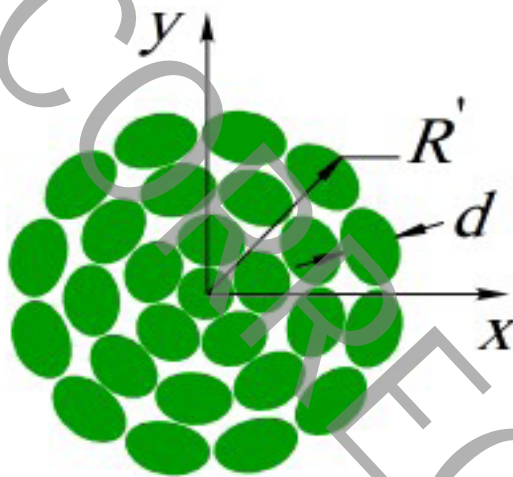


Fig. 3.

شکل ۳: سطح مقطع برش خورده‌ی کابل آلیاژ حافظه‌دار ۱×۲۷ مورد مطالعه در کار حاضر و کار تجربی [۱].

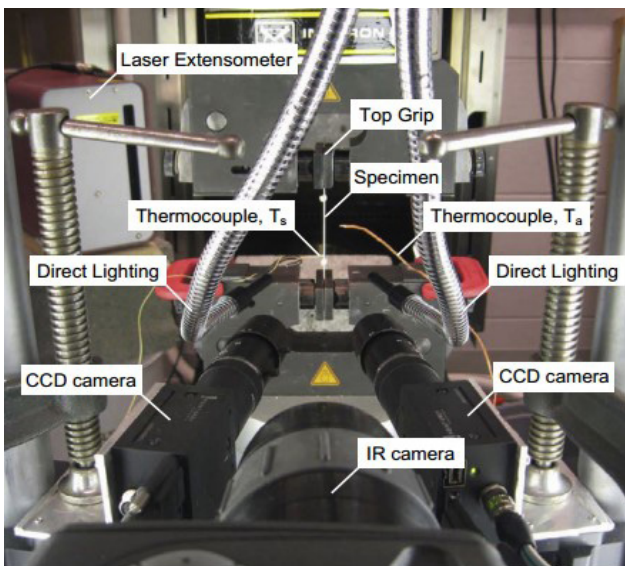


Fig. 4.

شکل ۴: آزمایش ترمومکانیکی کابل آلیاژ حافظه‌دار انجام شده توسط شاو و همکاران [۱].

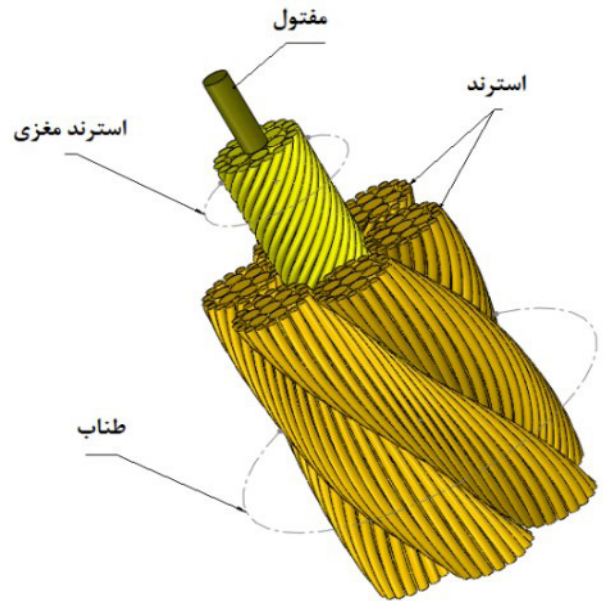


Fig. 1.

شکل ۱: ساختمان و اجزای کابل.

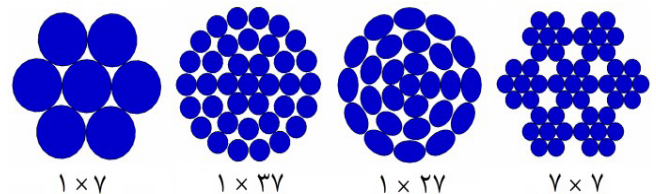


Fig. 2.

شکل ۲: نامگذاری کابل‌ها با آرایش هندسی و ساختمان متفاوت.

استرند (استرند مغزی) را تعریف می‌نمایند. با توجه به شکل ۲، نحوه نام‌گذاری ساختمان کلی کابل‌ها به صورت ضرب تعداد استرندها در تعداد مفتول تشکیل دهنده هر استرند مشخص می‌شود [۲۲].

ساختمان کابل ۱×۲۷ مورد مطالعه در این پژوهش شامل یک استرند با ۲۷ مفتول می‌باشد که تعداد مفتول‌های موجود در هر لایه در آن مشخص شده است (شکل ۳). همچنین  $d$  قطر مفتول‌ها و  $R'$  شعاع خارجی کابل می‌باشد.

به منظور مطالعه رفتار مکانیکی کابل‌ها و استخراج نمودارهای مربوط به تنش برشی و تنش نرمال، پارامترهای  $A_0$  مجموع سطح مقطع اولیه مفتول‌ها،  $\phi$  زاویه ماریچ و  $J_0$  مجموع ممان اینرسی قطبی اولیه مفتول‌های کابل معرفی می‌شود. پارامتر  $J_0$  با فرض یکسان بودن قطر مفتول‌های کابل، طبق رابطه (۹) حاصل می‌شود [۱].

$$J_0 = z \frac{\pi d^4}{32} + \sum_{j=1}^z \frac{\pi d^2}{4} r_j^2 \quad (9)$$

که در آن  $z$  تعداد مفتول‌های کابل و  $r_j$  فاصله مرکز مفتول  $j$ ام تا محور طولی کابل است.

ترموکوپل‌های<sup>۱</sup> مجزا کنترل می‌گردد. محاسبه نیروهای محوری، ممان پیچشی، کرنش و دمای تغییر فاز در کابل و اجزای آن تحت نرخ کرنش ثابت انجام شده است. پارامترهای هندسی اجزای کابل آلیاژ حافظه‌دار ۱×۳۷ در جدول ۱ ارائه شده است، که در آن  $r$  شعاع ماریچ،  $d$  قطر و  $\phi$  زاویه ماریچ مفتول‌های هر لایه معرفی می‌شود. همچنین  $A_0$  و  $J_0$  به ترتیب مجموع سطح مقطع اولیه و مجموع ممان اینرسی قطبی اولیه مفتول‌های هر لایه و کابل است.  $R'$  نیز به صورت شعاع خارجی لایه‌ها و کابل تعریف می‌شود.

## ۵- مدل‌سازی و شبیه‌سازی کابل

بخش ۱-۵ به مطالعه کابل فولادی ۱×۳۷ و شرایط تماس بین مفتول‌ها می‌پردازد.

ارغوانی و همکارانش [۱۹ و ۲۰]، با استفاده از معادلات ساختاری سوزا [۱۷] و کرنش‌های لگاریتمی بر پایه ترمودینامیک فرآیندهای برگشت‌ناپذیر و توسعه تابع انرژی آزاد هلمهولتز<sup>۲</sup>، کد عددی مورد نیاز برای تحلیل اجزاء محدود آلیاژ حافظه‌دار را استخراج نمودند. در بخش ۵-۲ از این کد عددی در محیط آباکوس<sup>۳</sup> ورژن ۱۰-۶ بهره گرفته می‌شود و با تعریف پارامترهای مادی برای آلیاژ حافظه‌دار و همچنین با در نظر گرفتن شرایط دمای مدل که برای ویژگی سوپرالاستیسیته و حافظه شکلی متفاوت می‌باشد، خواص سوپرالاستیسیته و ویژگی حافظه‌شکلی برای کابل، تعریف شده و مورد تحلیل اجزاء محدود قرار می‌گیرد.

### ۵-۱- کابل فولادی ۱×۳۷

به منظور اعتبارسنجی کار حاضر، از نتایج کار عددی مرجع [۵] استفاده می‌شود که در آن یک نمونه کابل فولادی ۱×۳۷ تحلیل اجزاء محدود شده است. با توجه به بیشتر بودن تعداد مفتول‌های کابل ۱×۳۷ نسبت به کابل ۱×۲۷ مورد مطالعه در این پژوهش، اعتبارسنجی نتایج به دست آمده با نتایج حاصل از کار عددی مرجع [۵]، می‌تواند معیاری برای اطمینان از درستی



Fig. 5.

شکل ۵: نقاط مرجع در کابل فولادی ۱×۳۷.

جدول ۱: مقادیر پارامترهای هندسی اجزای کابل آلیاژ حافظه‌دار ۱×۳۷ [۱۱].

Table 1.

$\phi$ (degree)	$R'$ (mm <sup>۲</sup> )	$J_0$ (mm <sup>۴</sup> )	$A_0$ (mm <sup>۲</sup> )	$d$ (mm)	$r$ (mm)	نمونه
-	۰/۱۱۳	$۲/۵۶ \times ۱۰^{-۴}$	۰/۰۴	۰/۲۲۶	-	مفتول مرکزی
-۳۰/۴	۰/۳۳۹	$۱/۱۵ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۲۰	۰/۲۲۶	۰/۲۲۶	لایه اول
+۴۲/۵	۰/۵۶۵	$۷/۶۰ \times ۱۰^{-۲}$	۰/۳۶۱	۰/۲۲۶	۰/۴۵۲	لایه دوم
-۴۷/۹	۰/۷۹۱	$۲/۲۴ \times ۱۰^{-۱}$	۰/۴۸۱	۰/۲۲۶	۰/۶۷۸	لایه سوم
-	۰/۷۹۱	$۳/۱۲ \times ۱۰^{-۱}$	۱/۰۸۳	-	-	کابل ۱×۲۷

4 Implicit

5 Explicit

6 Interaction

7 Surface to Surface Contact (Standard)

8 Nodes

1 Thermocouple

2 Helmholtz

3 Abaqus V 6.10

دمای پایان آستنیت  $A_r$  و پایین تر از دمای پایان مارتنزیت  $M_r$  قرار می گیرد. همچنین روش حل مشابه قسمت قبل به صورت ضمنی، در حالت دینامیکی<sup>۲</sup> در نظر گرفته شده است. پارامترهای مادی آلیاژ حافظه دار مورد استفاده در جدول ۵ ارائه می گردد.

در کار حاضر، طول کابل به گونه ای انتخاب شده است که در آن تمامی مفتول های ماریچ کابل حداقل یک دور حول مفتول مغزی تابیده شده باشد تا رفتار مکانیکی کابل به درستی شبیه سازی شود. لذا طول کابل با توجه به بیشترین گام مفتول های موجود در آن، ۴ میلی متر در نظر گرفته می شود. به منظور اعمال شرایط مرزی، مشابه کار تجربی صورت گرفته [۱] و توضیحات ارائه شده برای کابل فولادی، مدل به صورت یک سر ثابت در نظر گرفته شده است و از نقاط مرجع برای قید گذاری ها و اعمال بار کششی استفاده گردیده است. به دلیل تغییرات هندسه مدل هنگام بارگذاری و باربرداری، اثرات غیر خطی هندسی در نظر گرفته می شود و برهم کنش ها مشابه قسمت قبل به دو صورت عمودی و مماسی بر سطح مفتول ها لحاظ می گردد. به منظور تعیین تعداد برهم کنش ها ( $Int$ )، رابطه (۱۰) بدون در نظر گرفتن بافت فیلر<sup>۳</sup> پیشنهاد می شود.

جدول ۴: مقایسه نتایج مقدار کشیدگی انتهای کابل فولادی  $1 \times 37$  در کار حاضر و مطالعه عددی موجود [۵]

Table 4.

خطا (%)	کار حاضر (mm)	حل عددی [۵] (mm)	نیرو (kn)
۱/۸۶	۰/۱۴۷۷	۰/۱۵۰۵	۱۰
۰/۳۶	۰/۲۷۳۹	۰/۲۷۴۹	۲۰
۱/۴۹	۰/۴۰۱۹	۰/۴۰۸۰	۳۰
۰/۴۴	۰/۴۷۰۷	۰/۴۷۲۸	۳۵

جدول ۵: پارامترهای مادی آلیاژ حافظه دار [۱].

Table 5.

پارامتر	واحد	مقدار
$E$	$E$	۴۰
$\nu$	$\nu$	۰/۳
$\beta$	$\beta$	۵/۵
$H$	$H$	۴۸۸
$R$	$R$	۱۰۴
$T_0$	$T_0$	-۲۵
$\epsilon_L$	$\epsilon_L$	۰/۰۵۵

برای شبکه بندی مدل از المان هایی با ابعاد  $0.16 \times 0.06$  میلی متر و از نوع خطی ( $C^3D^8R$ ) استفاده می گردد. مقادیر پارامترهای هندسی اجزای کابل فولادی  $1 \times 37$  و مقادیر پارامترهای ماده به ترتیب در جداول ۲ و ۳ ارائه شده است.  $L$  طول مفتول،  $E$  مدول الاستیسیته فولاد،  $\nu$  ضریب پواسون و  $\rho$  چگالی است.

برای نیروی ۱۰ کیلونیوتن مقدار کشیدگی<sup>۱</sup> نقاط مختلف کابل در شکل ۶ ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود صورت گرفته در کار حاضر برای نیروهای کششی ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۳۵ کیلونیوتن با نتایج عددی موجود [۵] مقایسه شده است (جدول ۴)، که از دقت خوبی برخوردار می باشد.

۵-۲- کابل آلیاژ حافظه دار  $1 \times 37$

در ویژگی سوپر الاستیسیته و حافظه شکلی دمای ماده به ترتیب بالاتر از

جدول ۲: مقادیر پارامترهای هندسی اجزای کابل فولادی  $1 \times 37$ .

Table 2.

نمونه	$d$ (mm)	$\phi$ (degree)	$L$ (mm)
مفتول مرکزی	۱/۰۹	-	۶۷/۰۰
مفتول های لایه اول	۱/۰۰	۱۰/۷۷	۶۸/۱۹
مفتول های لایه دوم	۱/۰۰	۱۰/۷۷	۶۸/۱۹
مفتول های لایه سوم	۱/۰۰	۱۰/۷۷	۶۸/۱۹

جدول ۳: خواص مادی کابل فولادی  $1 \times 37$  [۵].

Table 3.

پارامتر	واحد	مقدار
$E$	GPa	۱۹۰
$\nu$	-	۰/۳
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	۷۸۵۰

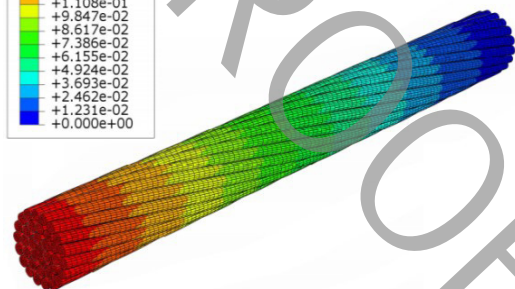
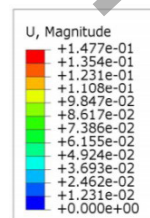


Fig. 6.

شکل ۶: کشیدگی کابل فولادی  $1 \times 37$  تحت نیروی کششی ۱۰ کیلونیوتن.

2 Dynamic, Implicit

3 Filler

1 Elongation

مسیرهای بارگذاری ترمومکانیکی سوپرالاستیک از تنش صفر در ناحیهی آستنیت شروع می‌شوند و سپس به سمت ناحیهی مارتنزیت جهت‌یافته حرکت می‌کنند و سپس مجدداً به نقطه‌ی شروع، باربرداری می‌شوند. بنابراین برای شبیه‌سازی کابل سوپرالاستیسیته آلیاژ حافظه‌دار دمای ماده بالاتر از دمای پایان آستنیت و ثابت در نظر گرفته می‌شود [۷].

نتایج مربوط به نمودار تنش نرمال - کرنش و تنش برشی - کرنش در کار حاضر با داده‌های تجربی مرجع [۱۱] به ترتیب در شکل‌های ۹ و ۱۰ مقایسه شده است. با اعمال تنش و رسیدن ماده به تنش شروع تغییر فاز، کرنش‌های بزرگ در کابل ایجاد می‌گردد.

از آنجا که مفتول‌های لایه‌های خارجی حول مفتول مغزی تابیده شده‌اند، گشتاورهای پیچشی و تنش‌های برشی در کابل تحت کشش به وجود می‌آید. در شکل ۱۰ نمودار تنش برشی-کرنش ارائه شده است.

در کار تجربی انجام شده در مرجع [۱] در حین عملیات ساخت برای

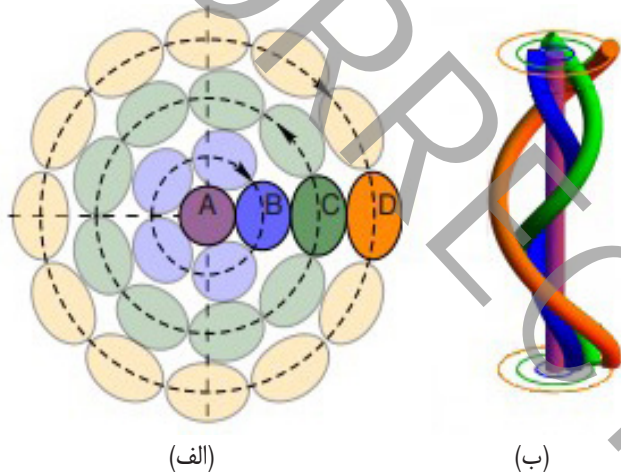


Fig. 8.

شکل ۸: الف) سطح مقطع برش خورده کابل آلیاژ حافظه‌دار ۱×۲۷ ب) نمای سه‌بعدی مفتول‌های کابل آلیاژ حافظه‌دار ۱×۲۷ [۱۱].

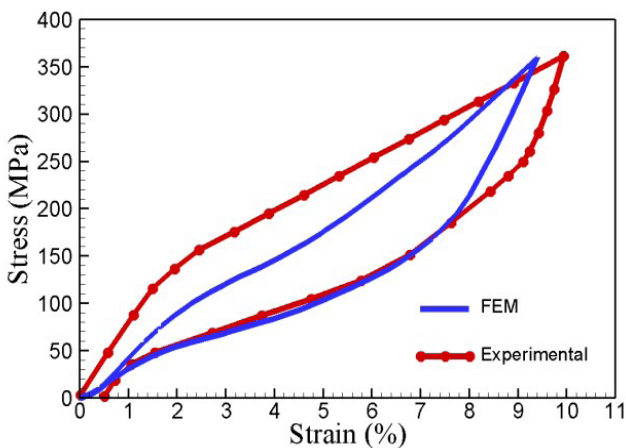


Fig. 9.

شکل ۹: مقایسه نتایج تنش نرمال-کرنش در کار حاضر با داده‌های تجربی [۱۱].

$$Int_s = \sum_{i=1}^n m_i + m_1 + \sum_{i=1}^{n-1} (m_i \times m_{i+1}) \quad (10)$$

که در آن  $m_i$  تعداد مفتول‌های لایه  $n$ ام و  $n$  تعداد لایه‌های کابل است. صافی سطح مفتول‌ها یکنواخت بوده و ضریب اصطکاک بین آن‌ها ۰/۱۱۵ در نظر گرفته می‌شود. با توجه به کار تجربی انجام شده در مرجع [۱] و مطالعه تحلیلی انجام شده در مرجع [۲]، اثر اصطکاک بر رفتار مکانیکی مدل بررسی شده است و به صراحت نشان داده شده است که این اثر ناچیز است. بنابراین عدد در نظر گرفته شده یک فرض بوده و به منظور درستی شبیه‌سازی مدل می‌باشد و با تغییر این عدد در نتایج تغییری حاصل نخواهد شد [۱]. شکل ۷، مدل شبکه‌بندی کابل آلیاژ حافظه‌دار ۱×۲۷ را نشان می‌دهد، که در آن حدود ۱۸۵۳۰۰ المان خطی C3D8 با ابعاد  $0.3 \times 0.5 \times 0.5$  میلی‌متر استفاده شده است. به دلیل پیچیدگی مدل، انحنای نسبتاً زیاد مفتول‌های کابل و وجود تعداد برهم‌کنش‌های زیاد، استفاده از این نوع المان به منظور کاهش هزینه زمانی مناسب است.

## ۶- نتایج

در این قسمت نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود برای کابل سوپرالاستیک آلیاژ حافظه‌دار با نتایج تجربی موجود [۱] مقایسه می‌گردد. نتایج بدست آمده برای ویژگی‌های سوپرالاستیسیته و حافظه‌شکلی به ترتیب در بخش ۶-۱ و ۶-۲ ارائه می‌شود. برای استخراج نمودارها و به دست آوردن نتایج مربوط به هر لایه، مشابه توضیحات شکل ۵، برای سطح مقطع مفتول‌های هر لایه یک نقطه مرجع جداگانه تعریف شده است که باعث جابجایی یکسان بین نقطه‌های مرجع و سطح مقطع متناظر با این نقاط می‌شود. همچنین برای سادگی در بررسی رفتار مکانیکی اجزای کابل و تشریح نتایج حاصل از نمودارها، مفتول‌ها علامت‌گذاری شده‌اند (شکل ۸).

۶-۱- کابل آلیاژ حافظه‌دار تحت ویژگی سوپرالاستیسیته رفتار سوپرالاستیک آلیاژهای حافظه‌دار به دلیل بازیافت کرنش ناشی از تنش در هنگام باربرداری در دمایی بالاتر از دمای پایان آستنیت می‌باشد.

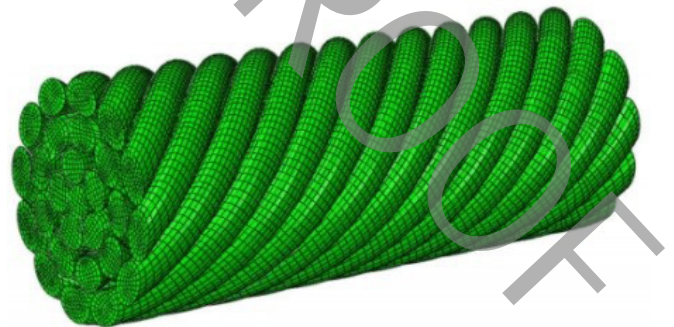


Fig. 7.

شکل ۷: مدل شبکه‌بندی کابل آلیاژ حافظه‌دار ۱×۲۷.

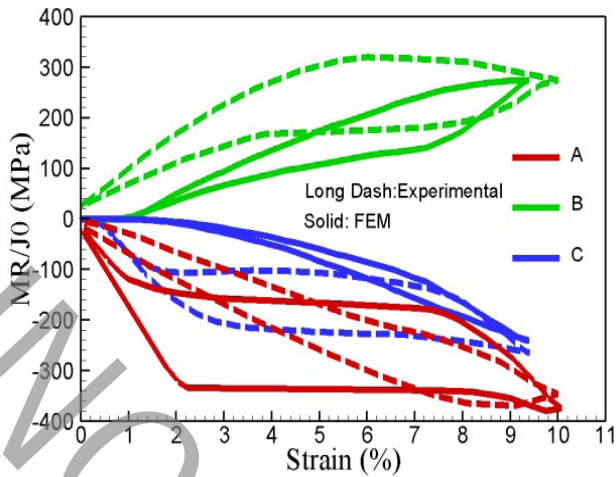


Fig. 11.

شکل ۱۱: مقایسه نتایج تنش برشی - کرنش اجزای کابل در کار حاضر با داده‌های تجربی [۱۱].

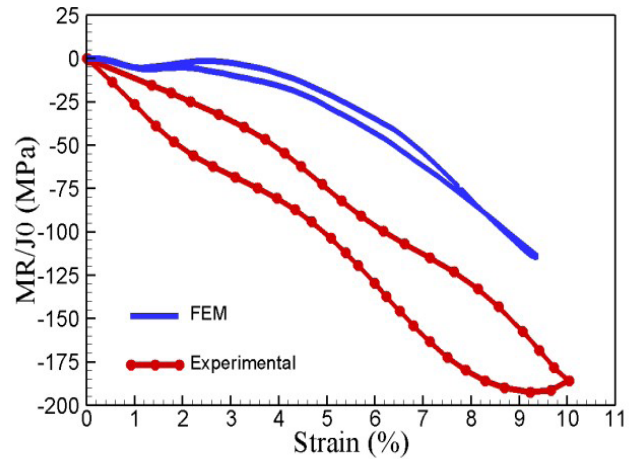


Fig. 10.

شکل ۱۰: مقایسه نتایج تنش برشی - کرنش در کار حاضر با داده‌های تجربی [۱۱].

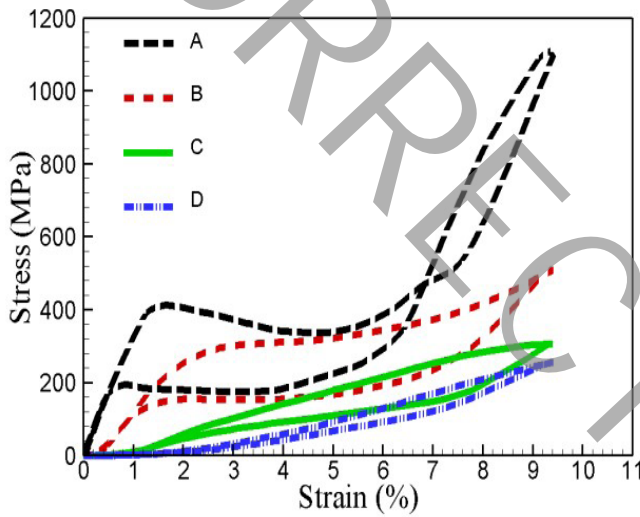


Fig. 12.

شکل ۱۲: نمودار تنش نرمال - کرنش اجزای کابل ۲۷×۱.

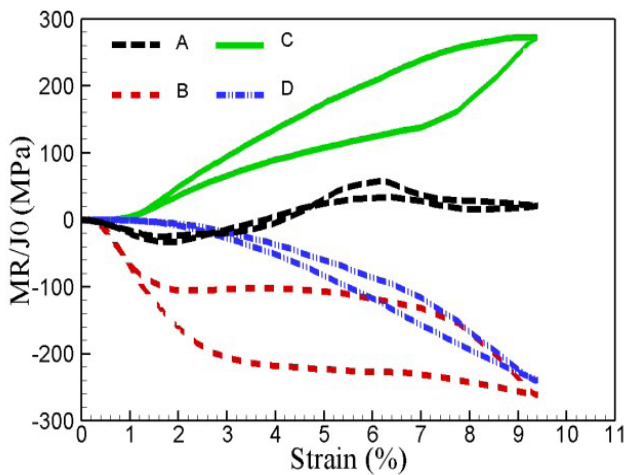


Fig. 13.

شکل ۱۳: نمودار تنش برشی - کرنش اجزای کابل ۲۷×۱.

جلوگیری از باز شدن مفتول‌ها در کابل، اندکی لهیدگی در آن‌ها صورت گرفته است. همچنین از گیره‌هایی در دو سر کابل بهره گرفته شده است که در حین تست دچار لغزش می‌شوند. از عوامل مهم در ایجاد تفاوت بین نتایج به دست آمده در کار حاضر و کار تجربی انجام شده در مرجع [۱]، می‌توان به عدم تقارن رفتار در بارگذاری کششی و فشاری، لغزش فک‌ها و نادیده گرفتن اثرات لهیدگی اشاره کرد. مدول الاستیسیته آلیاژهای حافظه‌دار در فاز آستنیت و مارتنزیت متفاوت است اما در مدل ساختاری و کد عددی استفاده شده مدول الاستیسیته برای هر دو فاز به صورت میانگین این دو مدول در نظر گرفته شده است و در طول تحلیل ثابت است. از طرفی در کار تجربی مرجع [۱] از اثرات مفتول‌های دیگر بر روی مفتول مرکزی که باعث ایجاد تنش برشی در این مفتول می‌شود، صرف‌نظر گردیده است. با توجه به صفر بودن این مقدار برای مفتول مرکزی در کار تجربی مرجع [۱] مقدار تفاوت نتایج بیشتر از نمودار تنش نرمال-کرنش می‌شود. برای روشن شدن این موضوع نمودار تنش برشی-کرنش اجزای کابل برای حالت سوپر الاستیسیته در کار حاضر و کار تجربی مرجع [۱] در شکل ۱۱ مقایسه شده است.

در نمودار تنش نرمال-کرنش (شکل ۱۲) با افزایش زاویه ماریچ در مفتول‌های  $B$  تا  $D$ ، طول رشته مفتول‌ها و کشیدگی مفتول‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به معادلات حاکم بر کابل، مفتول‌های لایه‌های مرکزی نسبت به لایه‌های بیرونی تحت تاثیر کرنش بیشتری قرار گرفته‌اند که تنش ایجاد شده در آن‌ها نیز بیشتر می‌باشد [۲]. بنابراین بیشترین تنش نرمال به مفتول  $A$  (مرکزی) و پس از آن به ترتیب به مفتول‌های لایه‌های  $B$  تا  $D$  وارد می‌شود. در کار حاضر تاثیر تماس سایر لایه‌ها بر مفتول مرکزی لحاظ شده است.

به سبب تاثیر مفتول‌های لایه‌های خارجی بر مفتول مرکزی، تنش برشی در مفتول‌های کابل ایجاد می‌شود. در نمودار تنش برشی-کرنش اجزای کابل در شکل ۱۳، علامت تنش برشی با تغییر جهت تاب لایه‌ها، تغییر می‌کند. نسبت شعاع خارجی به مجموع ممان اینرسی اولیه مفتول‌ها در

فاز پس از پایان باربرداری، به سبب وجود کرنش‌های بزرگ در مفتول‌های لایه‌ی خارجی و تاثیر آن‌ها روی مفتول مرکزی، تنش پسماند در مفتول مرکزی وجود دارد. با افزایش دما و بازیافت کرنش‌های غیرالاستیک در مفتول‌های لایه خارجی، تنش باقیمانده در مفتول مرکزی کاهش یافته و به تدریج کرنش کل مجموعه باز می‌گردد.

تنش برشی ایجاد شده در مفتول مرکزی به سبب تاثیر مفتول‌های لایه‌های خارجی بر آن است. در نمودار تنش برشی-کرنش-دما اجزای کابل (شکل ۱۶) تغییر جهت تاب مفتول‌ها منجر به تغییر علامت تنش برشی می‌گردد. با اتمام باربرداری و رسیدن تنش اجزای کابل به صفر، بازیافت کرنش‌های غیرالاستیک با دما بطور یکسان صورت می‌پذیرد. برآیند تنش برشی اجزای کابل، در نمودار تنش برشی-کرنش-دما (شکل

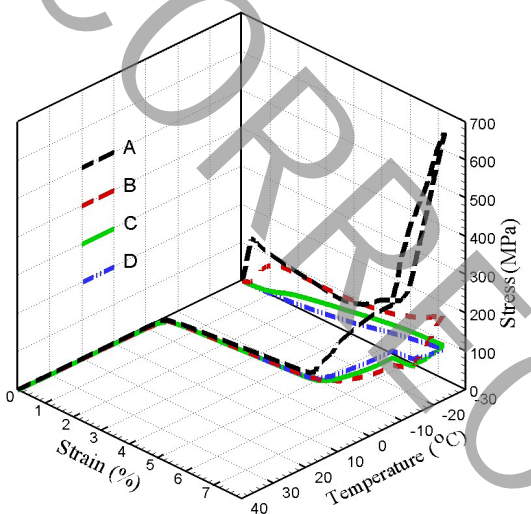


Fig. 15.

شکل ۱۵: نمودار تنش نرمال - کرنش - دما اجزای کابل ۱×۲۷

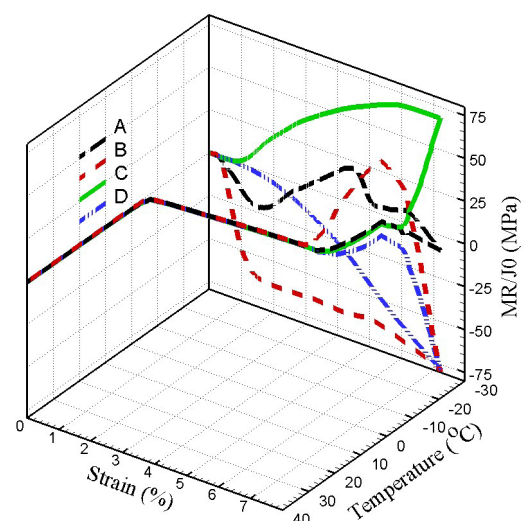


Fig. 16.

شکل ۱۶: نمودار تنش برشی-کرنش-دما اجزای کابل ۱×۲۷.

لایه‌های خارجی کمتر از لایه‌های داخلی است. بنابراین با توجه به مقادیر تنش برشی ایجاد شده، ممان پیچشی در لایه‌های خارجی نسبت به لایه‌های داخلی بیشتر می‌باشد. در نتیجه هرچه زاویه مارپیچ مفتول‌ها بیشتر باشد مقاومت کابل در برابر گشتاورهای پیچشی افزایش می‌یابد [۱۱].

#### ۶-۲- کابل آلیاژ حافظه‌دار تحت ویژگی حافظه‌شکلی

پدیده حافظه‌شکلی یک خاصیت مهم آلیاژهای حافظه‌دار در تغییر فازهای مارتنزیتی ترموالاستیک است. این رفتار زمانی بروز پیدا می‌کند که آلیاژ در فاز مارتنزیت تغییر شکل یافته و سپس در حالی که هنوز در دمایی پایین‌تر از دمای پایان مارتنزیت قرار دارد، باربرداری شود. در این صورت با گرم کردن مجدد به دمایی بالاتر از دمای پایان آستنیت ماده با تغییر فاز معکوس و برگشت به فاز آستنیت، شکل اولیه خود را باز می‌یابد [۷]. برای شبیه‌سازی کابل آلیاژ حافظه‌دار تحت ویژگی حافظه‌شکلی، تمام شرایط مدل‌سازی در حالت سوپرالاستیسیته در نظر گرفته شده است و تنها دمای ماده پایین‌تر از دمای پایان مارتنزیت قرار می‌گیرد. در نمودار تنش نرمال-کرنش-دما کابل (شکل ۱۴) مشاهده می‌شود که در هنگام بارگذاری، واریانت‌های مختلف مارتنزیتی در راستای اعمال تنش جهت‌گیری می‌کنند. این امر سبب می‌شود تا کرنش‌های غیرالاستیک در کابل به وجود آید. پس از پایان بارگذاری، بازیابی کرنش‌های الاستیک ناشی از تنش صورت می‌گیرد. با افزایش دمای کابل به دمای پایان آستنیت، بازیابی کرنش‌های غیرالاستیک کامل می‌شود و کابل به شکل اولیه خود باز می‌گردد. نرخ بازیابی کرنش‌های غیرالاستیک در حالت حافظه‌شکلی در ابتدا بسیار اندک بوده و سپس بخش اعظم بازیافت کرنش‌ها در یک محدوده دمایی کوچک صورت می‌پذیرد.

در نمودار تنش نرمال-کرنش-دما اجزای کابل (شکل ۱۵) بیشترین تنش نرمال به مفتول A (مرکزی) و پس از آن به ترتیب به مفتول‌های لایه‌های B تا D وارد می‌شود. بنابراین تنش در مفتول مرکزی بیشتر از تنش پایان ناحیه تغییر فاز بوده و وارد ناحیه اشباع می‌شود. در ناحیه تغییر

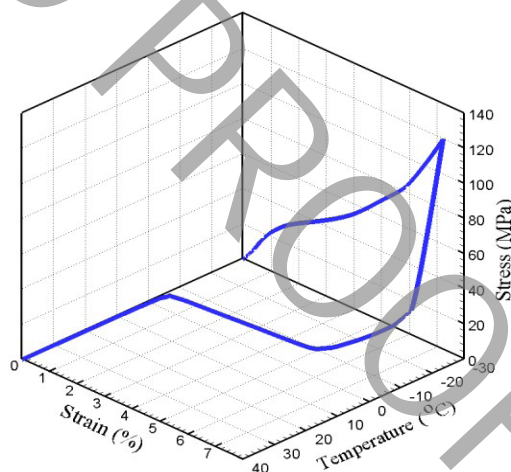


Fig. 14.

شکل ۱۴: نمودار تنش نرمال-کرنش-دما کابل ۱×۲۷.



شده، آزمایش‌ها باید چندین بار تکرار شود [۲۳]. در کار حاضر با توجه به اینکه آزمایش‌ها به کمک نرم‌افزار تحلیل اجزاء محدود صورت می‌پذیرد عامل ایجادکننده خطا، ابعاد المان‌ها است. برای جلوگیری از تکرار، ابعاد المان با توجه به ابعاد مدل باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود. با توجه به پارامترهایی که قبلاً معرفی شده است، دامنه تغییرات زاویه مارپیچ در هر لایه از رابطه (۱۳) به دست می‌آید [۲].

$$r = \frac{1}{2}d \sqrt{1 + \frac{\tan^2\left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}\right)}{\sin^2 \phi}} \quad (13)$$

در مسئله بهینه‌سازی کابل تحت ویژگی حافظه‌شکلی، هر آزمایش خود از انجام چندین مرحله تحلیل اجزاء محدود بدست می‌آید که منجر به افزایش تعداد مراحل آزمایش می‌شود. فرض‌های ساده‌کننده‌ای برای کاهش تعداد آزمایش‌ها در نظر گرفته شده است.

در یک استرند  $n$  لایه، تعداد  $2n+1$  عامل طراحی وجود دارد. اگر تعداد سطوح عوامل طراحی یکسان و برابر با  $n$  در نظر گرفته شود، تعداد آزمایش‌ها برابر با  $a^{2n+1}$  می‌شود [۲۳]. قطر مفتول‌ها یکسان و مطابق استاندارد ارائه شده توسط شرکت تجاری دینالوی<sup>۳</sup> در نظر گرفته می‌شود. با این فرض تعداد آزمایش‌ها به  $a^{n+1}$  کاهش می‌یابد. به منظور کاهش هزینه زمانی کابل یک لایه در نظر گرفته شده است که به تعداد  $a^2$  آزمایش وجود دارد. در این پژوهش، آزمایش‌ها با تغییر سه سطح از عوامل موثر بر طراحی انجام می‌شود (جدول ۶). بنابراین  $3^3$  آزمایش مورد نیاز خواهد بود (جدول ۷).

با بررسی داده‌های آماری به دست آمده از انجام آزمایش‌ها (جدول ۸)، مقدار متغیر پاسخ با افزایش قطر مفتول‌ها و زاویه مارپیچ به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد.

می‌توان به کمک روش طراحی آزمایش‌ها و با استفاده از جدول ۸، معادله درون‌یاب متغیر پاسخ در سطوح عوامل موثر بر طراحی را به صورت رابطه (۱۴) به دست آورد.

$$\eta = +2.19 - 0.0056D - 0.17\phi - 0.11D\phi + 0.065D^2 + 0.11\phi^2 - 0.091D^2\phi + 0.12D\phi^2 \quad (14)$$

با استفاده از این رابطه، پیش‌بینی انرژی مخصوص کابل بر واحد جرم

جدول ۶: عوامل موثر بر متغیر پاسخ و سطوح تغییر آن‌ها.

Table 6.

پارامتر	واحد	سطوح		
$D$	mm	۰/۱۰	۰/۲۰	۰/۳۸
$\phi$	degree	۹/۵۴	۰/۶۳	۰/۷۲

3 Dynalloy

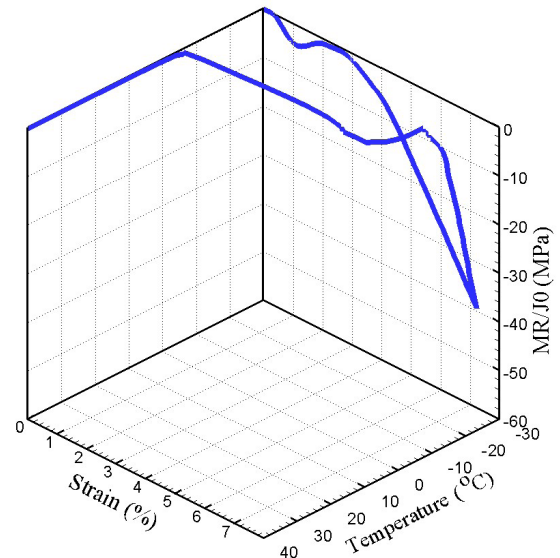


Fig. 17.

شکل ۱۷: نمودار تنش برشی- کرنش- دما کابل  $1 \times 27$ .

(۱۷) ارائه شده است. به کمک روش جمع آثار برای مقادیر تنش برشی ایجاد شده در اجزای کابل، تاثیر جهت تاب مفتول‌ها بر پاسخ کابل قابل مشاهده است. با توجه به اینکه تعداد مفتول‌های بیشتری با تاب چپگرد<sup>۱</sup> در کابل وجود دارد، بنابراین مقادیر تنش برشی منفی در کل کابل حاصل می‌شود.

#### ۷- بهینه‌سازی کابل آلیاژ حافظه‌دار

به منظور بهینه‌سازی کابل آلیاژ حافظه‌دار تحت ویژگی حافظه‌شکلی از روش طراحی آزمایش‌ها استفاده شده است. طراحی آزمایش‌ها<sup>۲</sup> روشی برای ارائه نتایج مجموعه‌ای از آزمایش‌ها است که در آن با تغییر هدفمند متغیرهای ورودی، امکان مشاهده تغییرات در پاسخ خروجی فراهم می‌شود [۲۳]. هدف از بهینه‌سازی کابل آلیاژ حافظه‌دار با ساختمان  $1 \times 6$  و تحت ویژگی حافظه‌شکلی، دستیابی به بیشترین مقدار انرژی مخصوص ( $\eta$ ) می‌باشد که به عنوان متغیر پاسخ مطابق معادله (۱۱) معرفی می‌شود.

$$\eta = W / M \quad (11)$$

که در آن  $M$  جرم مدل و  $W$  کار انجام شده توسط کابل است که می‌توان نوشت:

$$W = F \times \delta \quad (12)$$

که  $F$  نیروی کششی اعمال شده به کابل و  $\delta$  تغییر طول کابل در اثر بازیافت کرنش‌های غیرالاستیک است. به منظور بهینه‌سازی کابل، قطر و زاویه مارپیچ مفتول‌ها به عنوان عوامل موثر بر متغیر پاسخ در نظر گرفته می‌شود. در روش طراحی آزمایش‌ها عواملی وجود دارد که باعث بروز خطا در آزمایش انجام شده می‌شود که برای اطمینان از درستی آزمایش انجام

1 Left Hand Lay

2 Design Of Experiment (DOE)

جدول ۹: نتایج حاصل از بهینه‌سازی در روش طراحی آزمایش‌ها.

Table 9.

عوامل موثر بر طراحی				
پارامتر	واحد	دامنه	سطح پیشنهادی	
$D$	mm	۰/۱۰	۰/۳۸	۰/۳۸
$\phi$	degree	۵۴/۹	۰/۷۲	۵۴/۹۱
پیش بینی متغیر پاسخ				
پارامتر	واحد	مقدار		
$\eta$	J/g	۲/۸۵۰۰۵		

جدول ۷: ترکیب عوامل موثر بر متغیر پاسخ.

Table 7.

مدل	$\phi$ (degree)	$D$ (mm)
۱	۹/۵۴	۰/۱۰
۲	۰/۶۳	۰/۱۰
۳	۰/۷۲	۰/۱۰
۴	۹/۵۴	۰/۲۰
۵	۰/۶۳	۰/۲۰
۶	۰/۷۲	۰/۲۰
۷	۹/۵۴	۰/۳۸
۸	۰/۶۳	۰/۳۸
۹	۰/۷۲	۰/۳۸

جدول ۸: نتایج متغیر پاسخ از انجام آزمایش‌ها.

Table 8.

مدل	$W$ (N.mm)	$M$ (g)	$\eta$ (J/g)
۱	۱/۱۷	$4/87 \times 10^{-4}$	۲/۴۰
۲	۱/۴۱	$6/2 \times 10^{-4}$	۲/۲۷
۳	۱/۹۲	$9/16 \times 10^{-4}$	۲/۰۹
۴	۹/۴۴	$3/89 \times 10^{-3}$	۲/۴۲
۵	۱۰/۹۳	$4/96 \times 10^{-3}$	۲/۲۰
۶	۱۵/۵۸	$7/35 \times 10^{-3}$	۲/۱۲
۷	۷۵/۵۱	$2/65 \times 10^{-2}$	۲/۸۵
۸	۷۷/۱۹	$3/39 \times 10^{-2}$	۲/۲۷
۹	۱۰۵/۷۴	$5/3 \times 10^{-2}$	۲/۱۰

آن به ازای سطوح مختلف امکان‌پذیر است. در شکل ۱۸ به کمک معادله درون‌یاب (۱۴) و به ازای ترکیب‌های مختلفی از عوامل موثر بر طراحی، رویه پاسخ پیش‌بینی شده است.

نتایج حاصل از بهینه‌سازی در روش طراحی آزمایش‌ها در جدول ۹ نشان داده شده است.

سطح پیشنهاد شده برای عوامل موثر بر طراحی بسیار نزدیک به مدل ۷ است. در نتیجه از میان تمام ترکیب‌های مختلف عوامل موثر بر طراحی بین سطوح ارائه شده، بیشترین مقدار متغیر پاسخ از مدل ۷ حاصل می‌شود.

### ۸- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پژوهش مطالعه دقیق رفتار مکانیکی کابل آلیاژ حافظه‌دار تحت دو ویژگی سوپرالاستیسیته و حافظه‌شکلی صورت پذیرفت. نتایج بدست آمده در مقایسه با نتایج عددی و تجربی از دقت خوبی برخوردار است.

در کابل سوپرالاستیسیته آلیاژ حافظه‌دار به دلیل اینکه تغییر شکل‌ها در دمای بالاتر از دمای پایان آستنیت صورت می‌پذیرد، پس از پایان باربرداری بدون نیاز به اعمال بارگذاری دمایی کابل به شکل اولیه خود باز می‌گردد. لذا در استفاده از اینگونه کابل‌ها، دمای محیط باید بالاتر از دمای پایان آستنیت آلیاژ حافظه‌دار قرار داشته باشد.

در کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار تحت ویژگی حافظه‌شکلی، با افزایش دما به دمای پایان آستنیت، کابل به شکل اولیه خود باز می‌گردد و نرخ بازیابی کرنش‌های غیرالاستیک کابل تحت این ویژگی نسبت به افزایش دما ابتدا بسیار اندک بوده و بخش اعظم بازیافت کرنش‌ها در اثر افزایش دما در یک بازه کوچک صورت می‌پذیرد. در کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار به دلیل بالا بودن نسبت سطح به حجم، نرخ انتقال حرارت نسبت به میله‌های یکپارچه (با سطح مقطع برابر با کابل) افزایش قابل توجهی خواهد یافت که منجر به افزایش سرعت پاسخ حرارتی در کابل می‌شود.

از مزایای استفاده از کابل به‌جای میله‌های یکپارچه آلیاژ حافظه‌دار با سطح مقطع برابر با کابل، می‌توان به مقاوت بیشتر به بارگذاری‌های پیچشی

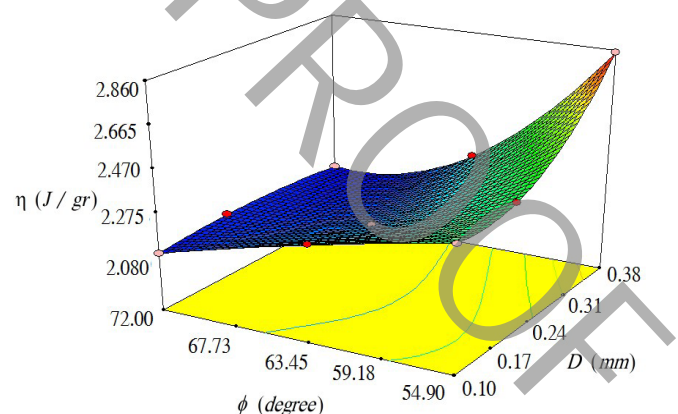


Fig. 18.

شکل ۱۸: رویه حاصل از مقادیر مختلف متغیر پاسخ.

Struct.48 611-624.

- [11] Reedlunn B S, Daly and J Shaw 2012 Superelastic Shape Memory Alloy Cables: Part II – Subcomponent Isothermal Responses Int. J. Solids Struct.50(20-21) 3027-3044.
- [12] Tanaka K 1986 A thermo mechanical sketch of shape memory effect: one-dimensional tensile behavior Res. Mech.18 63–251.
- [13] Liang C and Rogers C A 1990 One-dimensional thermo mechanical constitutive relations for shape memory materials J. Intell. Mater. Syst. Struct.1 34– 207.
- [14] Brinson L C 1993 One-dimensional constitutive behavior of shape memory alloy: thermo mechanical derivation with non-constant material functions and redefined martensite internal variable J. Intell. Mater. Syst. Struct.4 42–229.
- [15] Fremond M 1996 Shape Memory Alloy: a Thermo mechanical Macroscopic Theory Cism Courses and Lectures, New York: Springer.351 3–68.
- [16] Auricchio F and Lubliner J 1997 A uniaxial model for shape memory alloys Int. J. Solids Struct.34 3601–18.
- [17] Souza A C, Mamiya E and Zouain N 1998 Three-dimensional model for solids undergoing stress induced phase transformations Eur. J. Mech. A: Solids 17 789-806.
- [18] Auricchio F and Petrini L 2004 A three-dimensional model describing stress-temperature induced solid phase transformations: thermomechanical coupling and hybrid composite applications Int. J. Numer. Methods Eng.61 716–37.
- [19] Arghavani J, Auricchio F, Naghdabadi R and Sohrabpour S 2010 A 3-D phenomenological constitutive model for shape memory alloys under multiaxial loadings Int. J. Plast.26 976–91.
- [20] Arghavani J, Auricchio F, Naghdabadi R and Sohrabpour S 2011 An improved, fully symmetric, finite strain phenomenological constitutive model for shape memory alloys Finite Elem. Anal. Des.47 166–74.
- [21] Qidwai M A, Lagoudas D C 2000 Numerical implementation of a shape memory
- [22] alloy thermomechanical constitutive model using return mapping algorithms
- [23] Int. J. Numer. Methods Eng.47 1123–1168.
- [24] Feyer K 2007 Wire Ropes – Tension, Endurance, Reliability Berlin: Springer.
- [25] Montgomery D C 2008 Design and Analysis of Experiments John Wiley & Sons.

و همچنین وزن کمتر کابل اشاره کرد.

با در نظر گرفتن برهم کنش‌های مکانیکی بین مفتول‌ها، پاسخ مکانیکی اجزای کابل به صورت جداگانه استخراج شده است. در کابل‌های آلیاژ حافظه‌دار حرکت مفتول‌ها در دو انتها نسبت به یکدیگر مقید بوده و همواره بیشترین تنش به مفتول مرکزی و پس از آن به ترتیب به مفتول‌های لایه‌های اول تا سوم وارد می‌شود. بنابراین مفتول‌هایی که تحت تاثیر تغییر شکل‌های بیشتری قرار گرفته‌اند در بازگشت مفتول‌های دیگر به شکل اولیه خود موثر می‌باشند.

بهینه‌سازی کابل آلیاژ حافظه‌دار با ساختمان  $1 \times 6$  تحت ویژگی حافظه‌شکلی نشان می‌دهد که مقادیر انرژی مخصوص کابل با افزایش قطر و زاویه مارپیچ مفتول‌ها به ترتیب افزایش و کاهش می‌باید.

## منابع

- [1] Reedlunn B S, Daly and J Shaw 2012 Superelastic Shape Memory Alloy Cables: Part I – Isothermal Tension Experiments Int. J. Solids Struct. 50(20-21) 3009-3026.
- [2] Costello G A 1998 Theory of wire rope New York: Springer.
- [3] Utting W S, Jones N 1987 The response of wire rope strands to axial tensile loads Part I: experimental results and theoretical predictions Int. J. Mec. Sci. 29 605-619.
- [4] Stanova E G, Fedorko M, Fabian and Kmet S 2011 Computer modelling of wire strands and ropes Part I: Theory and computer implementation Advances in Engineering Software. 42 305-315.
- [5] Stanova E G, Fedorko M, Fabian and Kmet S 2011 Computer modelling of wire strands and ropes part II: Finite element-based applications Advances in Engineering Software. 42 322-331.
- [6] Wang D D, Zhang S Wang and S Ge 2012 Finite element analysis of hoisting rope and fretting wear evolution and fatigue life estimation of steel wires Engineering Failure Analysis. 27 173-193.
- [7] Lagoudas D C 2008 Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications New York: Springer.
- [8] Meier B 2007 <http://www.nytimes.com/2007/10/16/business/16device.html>.
- [9] Ft Wayne Metals 2010 Personal communication <http://www.fwmetals.com/strands.php>.
- [10] Mirzaefar R R, DesRoches and Yavari A 2010 A combined analytical, numerical, and experimental study of shape-memory-alloy helical springs Int. J. Solids