

بررسی اثر آغازگر کمانشی در جذب انرژی لوله‌های جدار نازک استوانه‌ای با استفاده از شبیه‌سازی عددی

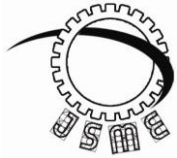
فائزه عبدالهی^۱، محمدجواد رضوانی^{۲*}

* نویسنده مسئول: m.rezvani@semnaniau.ac.ir

واژه‌های کلیدی	چکیده
آغازگر کمانشی جذب انرژی ویژه نیروی پیک اولیه شبیه‌سازی عددی	لوله‌های استوانه‌ای جدار نازک به عنوان جاذب انرژی ضربه بواسطه ساخت و نصب آسان و ظرفیت جذب انرژی بالا در صنایع خودرو سازی استفاده می‌شوند. با این حال، ضعف اصلی لوله‌های استوانه‌ای در نیروی پیک اولیه بالا می‌باشد. لذا، در این مقاله، برای غلبه بر این ضعف از یک آغازگر کمانشی در ابتدای لوله استفاده شده است. این آغازگر کمانشی شامل یک میله فولادی است که توسط نوارهای کششی در ابتدای لوله استوانه‌ای نصب شده است. در این مطالعه، پارامترهای مربوط به آغازگر از جمله ارتفاع پیش ضربه آغازگر، تعداد نوارهای کششی، زاویه قرارگیری نوارها بر روی بدنه لوله‌های استوانه‌ای بررسی می‌شوند. بدین منظور شبیه‌سازی شبه استاتیکی برای تعیین نیروی ماکزیمم لهیدگی، راندمان نیروی لهیدگی و جذب انرژی ویژه با استفاده از نرم افزار LS-Dyna انجام گردید. برای بررسی صحت شبیه‌سازی عددی، نتایج آن با تست تجربی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهند که مشخصات ضربه‌پذیری و عملکرد لوله‌های استوانه‌ای با وجود آغازگرهای کمانشی به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد.
تاریخ ارسال: ۹۵/۱۰/۱۲	
تاریخ بازنگری: ۹۵/۱۰/۲۶	
تاریخ پذیرش: ۹۵/۱۱/۰۹	

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.

۲- استادیار، مرکز تحقیقات انرژی و توسعه پایدار، مهندسی مکانیک، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران.



Investigation of the effect of buckling initiator on energy absorption of thin-walled circular tubes by using of numerical simulation

Faeze Abdollahi¹, Mohammad Javad Rezvani^{2*}

* Corresponding Author: m.rezvani@semnaniau.ac.ir

Abstract:

Cylindrical thin-walled tubes due to construction and easy installation, high energy absorption capacity are used in the automotive industry as an impact energy absorber. However, the main weakness of cylindrical tubes is in the high initial peak load. Therefore, in this paper, to overcome this weakness, a buckling initiator is used at the top of the tube. This buckling initiator is a steel rod that is installed by stretching strips at the edge of tubes. In this study, the parameters related to the initiator, including different number of pulling strips N , pre-hit height h and inclined angle of the pulling strips θ are studied. For this purpose, quasi-static simulation was conducted to determine the maximum crushing load, specific energy absorption and crush force efficiency using the software Ls-Dyna. To verify the numerical simulation, the results were compared with experimental testing. The results show that the crashworthiness characteristics and performance of the cylindrical tubes significantly improved with buckling initiator.

Key words:

Buckling initiator.
Specific energy absorption.
Maximum crushing load.
Numerical simulation.

1- MSc Student, Faculty of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

2- Assistant professor, Department of Mechanical Engineering, Semnan Branch, Islamic Azad University, Semnan, Iran.

۱- مقدمه

دارای عملکرد بهتری نسبت به لوله‌های ساده می‌باشد. در سال ۲۰۰۹، ژانگ و همکارانش ستون جدار نازک توخالی با مقطع مربعی مجهز به آغازگر را به صورت عددی و آزمایشگاهی مطالعه کردند [۶]. آنها، آغازگر را به کمک تعدادی تسمه به ستون متصل نمودند. نتایج نشان دادند که نیروی اوج اولیه ۳۰٪-۲۰٪ کاهش می‌یابد ولی طول آغازگر نیز باید دارای اندازه بهینه باشد و اگر این طول بیشتر از حالت بحرانی باشد، دیگر آغازگر اثری بر نیروی اوج اولیه ندارد. از طرفی تعداد تسمه‌های متصل کننده آغازگر به لوله نیز، در مد کمانش تاثیر بسزایی دارد. همچنین، در سال ۲۰۰۹ ژانگ و همکارانش لوله جدار نازک دایره‌ای شکل توخالی مجهز به آغازگر را در شرایطی مشابه با کار قبلی به صورت تجربی بررسی کردند [۷]. نتایج نشان دادند که برای تغییر شکل‌های بزرگ، آغازگر کمانشی حالت فروریزش متقارن یا ترکیبی را به فروریزش نامتقارن تغییر می‌دهد. همچنین با انتخاب مناسب طول پیش ضربه آغازگر، نیروی ماکزیمم لهیدگی تا ۳۰٪ کاهش می‌یابد.

نگهبان و همکاران، ضربه‌پذیری لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با استفاده از آغازگر را به صورت تجربی و شبیه‌سازی عددی با نرم افزار آباکوس مطالعه کردند [۸]. نتایج نشان دادند که جذب انرژی ویژه در لوله استوانه‌ای پر شده از فوم پلی‌اورتان با آغازگر به میزان ۱۵٪ نسبت به حالت بدون آغازگر افزایش یافت. همچنین، ماکزیمم نیروی لهیدگی با وجود آغازگر در لوله‌های استوانه‌ای پر شده از فوم با تاخیری به اندازه طول آغازگر ایجاد شد. در واقع ابتدا فوم با توجه به طول آغازگر له شده و سپس جداره لوله شروع به فروریزش می‌کند. بنابراین، مزیت اصلی استفاده از آغازگر در لوله‌های پر شده از فوم، ایجاد تاخیر به میزان طول آغازگر در رسیدن لوله به نیروی پیک اولیه می‌باشد. لذا، استفاده از آغازگر کمک شایانی در به حداقل رساندن کمانش ناخواسته اولری یا گلوبال شده و از شدت ضربه ناگهانی به سازه اصلی جلوگیری می‌کند. علاوه بر این، ماکزیمم نیروی لهیدگی در نمونه‌های با آغازگر در

لوله‌های جدار نازک به علت کاهش اثر ضربه وارده به سرنشینان و افزایش ایمنی در صنایع مختلف همچون صنایع خودروسازی، کشتی‌سازی و آسانسور کاربرد فراوانی دارند. همچنین، این لوله‌ها به دلیل سبکی، ظرفیت جذب انرژی بالا به عنوان یکی از کارآمدترین سیستم‌های جذب انرژی ویژه مورد استفاده قرار می‌گیرند. جاذب‌های انرژی به شکل لوله‌های جدار نازک، دارای اشکال و اندازه‌های مختلف بوده که عمدتاً برای محافظت از ضربه وسایل نقلیه در طول برخورد استفاده می‌شوند. زمانی که این جاذب‌ها تحت بارهای ضربه‌ای قرار می‌گیرند انرژی جنبشی ناشی از برخورد از طریق مکانیزم‌های مختلف مانند اصطکاک، برش، خمش، کشش، لهیدگی و تغییر شکل پلاستیک جذب می‌شود. در طی چند سال اخیر تحقیقات زیادی روی لوله‌های جدار نازک برای کاهش نیروی ماکزیمم لهیدگی انجام شده است. ایده ایجاد شیارهای داخلی و خارجی بر روی بدنه جاذب به عنوان یک مکانیزم راه انداز جهت کاهش نیروی ماکزیمم انجام شده است [۱-۴]. دانشی و حسینی پور [۱] تست تجربی بر روی لوله‌های استوانه‌ای شیاردار انجام دادند. آنها نشان دادند که وجود شیار علاوه بر کاهش نیروی ماکزیمم لهیدگی، باعث یکنواختی بیشتر منحنی نیرو-جابجایی و پایداری شکل فروریزش می‌شود. رضوانی و همکاران [۲] اثر هندسه شیار را بر روی مشخصات ضربه‌پذیری لوله استوانه‌ای بررسی کردند. در ادامه تحقیقات، رفتار لهیدگی لوله‌های مخروط شیاردار با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط رضوانی و دامغانی نوری مورد مطالعه قرار گرفت [۴]. آنها نشان دادند که با ایجاد شیارهای داخلی و خارجی بر روی مخروط نه تنها باعث کاهش نیروی ماکزیمم لهیدگی شده بلکه شکل لهیدگی آن پایدار و متقارن می‌شود. ژانگ و همکاران با استفاده از شبیه‌سازی عددی رفتار لهیدگی یک مدل جدید از لوله‌های تلسکوپ-جمع شونده را تحت بار محوری بررسی کردند [۵]. نتایج نشان دادند که مدل پیشنهادی از هر جنبه (نیروی پیک اولیه پایین‌تر، راندمان نیروی لهیدگی بیشتر)

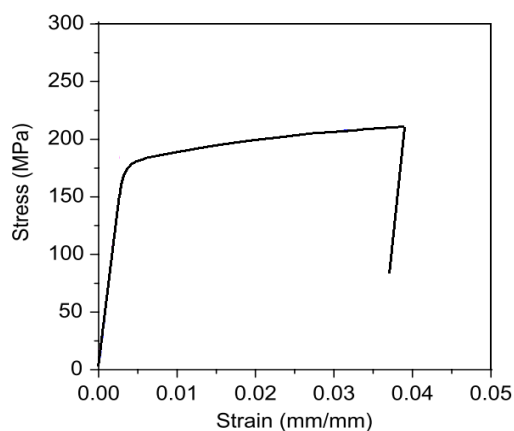
	۵	۶۰	۲
C-N2-60	۱۵	۶۰	۲
	۲۵	۶۰	۲
	۵	۶۰	۳
C-N3-60	۱۵	۶۰	۳
	۲۵	۶۰	۳
	۵	۶۰	۴
C-N4-60	۱۵	۶۰	۴
	۲۵	۶۰	۴
	۵	۶۰	۵
C-N5-60	۱۵	۶۰	۵
	۲۵	۶۰	۵

۳- خصوصیات مواد

جنس لوله استوانه‌ای از نوع آلایاز آلومینیوم بوده که خصوصیات مکانیکی آن مطابق جدول (۲) و براساس مرجع [۷] می‌باشد.

جدول (۲) خصوصیات مکانیکی آلایاز آلومینیوم	
چگالی (kg/m^3)	۲۷۰۰
مدول یانگ (GPa)	۶۵
ضریب پواسون	۰/۳۳
تنش تسلیم (MPa)	۱۸۱
استحکام نهایی (MPa)	۲۱۰

شکل (۱) منحنی تنش برحسب کرنش براساس مرجع [۷] رسم شده است. بنابراین، نقاط تنش-کرنش واقعی در نرم افزار ال اس دینا طبق شکل (۱) تقریب زده شده است.

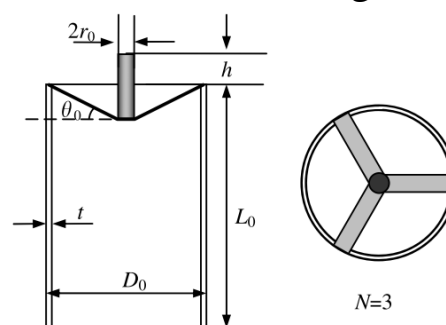


شکل (۲) نمودار تنش-کرنش آلایاز آلومینیوم

مقایسه با نمونه بدون آغازگر کاهش یافته و در محدوده نسبتاً ثابتی باقی می‌ماند.

۲- بیان مسئله

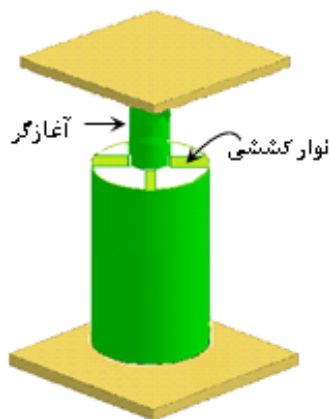
به طور کلی، انجام تستهای تجربی در بهترین شرایط هزینه بر بوده و زمان زیادی برای آن صرف می‌شود. لذا، در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از شبیه‌سازی عددی توسط نرم Ls-Dyna، مکانیزم لهیدگی لوله‌های استوانه‌ای با آغازگر کمانشی مورد بررسی قرار گیرد. شماتیکی از جاذب انرژی استوانه‌ای با آغازگر کمانشی در شکل (۱) نشان داده شده است. در این مطالعه، اثر ارتفاع آغازگر (h)، تعداد نواریهای کششی (N) و زاویه قرارگیری نواریها (θ) در بدنه لوله جدار نازک، در مکانیزم لهیدگی و میزان جذب انرژی مطابق با جدول (۱) بررسی می‌شود. در ادامه به منظور بررسی صحت شبیه‌سازی عددی، نتایج آن با نتایج تست تجربی در مرجع [۷] مقایسه می‌شوند.



شکل (۱) شماتیکی از لوله استوانه‌ای با آغازگر کمانشی

جدول (۱) مشخصات نمونه‌ها

نمونه	$h(mm)$	$\theta(^{\circ})$	N
C-N2-90	۵	۹۰	۲
	۱۵	۹۰	۲
	۲۵	۹۰	۲
C-N3-90	۵	۹۰	۳
	۱۵	۹۰	۳
	۲۵	۹۰	۳
C-N4-90	۵	۹۰	۴
	۱۵	۹۰	۴
	۲۵	۹۰	۴
C-N5-90	۵	۹۰	۵
	۱۵	۹۰	۵
	۲۵	۹۰	۵



شکل (۳) مدل سه بعدی لوله استوانه ای و آغازگر کمانشی

شرایط مرزی در این مدل به این صورت است که صفحه بالایی در برخورد با آغازگر صلب در جهت عمودی آزاد و انتهای دیگر لوله به یک صفحه صلب ثابت، متصل و در همه جهت ها مقید شده است (شکل ۳ را ببینید). لوله ها از روابط المان پوسته ای دایره ای، با سه نقطه انتگرال گیری استفاده شده است. جهت تعیین اندازه المان مناسب در شبکه بندی لوله ها، تحلیل های همگرایی انجام گرفت و در نهایت اندازه آنها به صورت 1×1 میلی متر انتخاب گردید. جهت تعریف تماس بین صفحه های صلب با لوله از قید تماسی سطح به سطح و از قید تماس اتوماتیک جهت جلوگیری از فرو رفتن لوله در خودش استفاده شده است. در شبیه سازی برای اعمال اصطکاک بین اجزا مدل از اصطکاک استاتیکی با ضریب 0.2 و اصطکاک دینامیکی با ضریب 0.1 استفاده شده است.

۶- اعتبارسنجی

به منظور اطمینان از روش مدل سازی، ابتدا لوله استوانه ای ساده بدون آغازگر با نرم افزار ال اس داینما مدل سازی گردید. همانطور که از شکل (۴) مشخص است شکل فروریزش با نمونه تجربی در مرجع [۷] مطابقت خوبی را نشان می دهد. لذا، شبیه سازی عددی با استفاده از نرم افزار ال اس داینما می تواند رفتار لهیدگی و ضربه پذیری نمونه های استوانه ای با آغازگر کمانشی را به خوبی برآورد نماید.

۴- معیارهای ارزیابی جاذب های انرژی

پارامترهای مورد نظر در این مقاله که از منحنی های نیرو-جابجایی به دست می آیند به شرح ذیل هستند:

۴-۱- انرژی جذب شده

این پارامتر کل انرژی صرف شده جهت تغییر شکل سازه را نشان می دهد و برابر با مساحت زیر منحنی نیرو جابجایی می باشد.

$$E_{abs} = \int Pd\delta \quad (1)$$

که P و δ به ترتیب نیرو و طول لهیدگی می باشند.

۴-۲- نیروی متوسط لهیدگی

نیروی متوسط لهیدگی (P_m) برای یک تغییر شکل معین به صورت زیر تعریف می شود. که در آن کل انرژی جذب شده (E_{abs}) بر کل تغییر شکل (δ) تقسیم می گردد.

$$P_m = \frac{E_{abs}}{\delta} \quad (2)$$

۴-۳- راندمان نیروی لهیدگی

این پارامتر به منظور مقایسه کارآیی جاذب های انرژی مورد استفاده قرار می گیرد و به صورت نسبت نیروی متوسط لهیدگی به ماکزیمم نیروی لهیدگی تعریف می شود.

$$CFE = \frac{P_m}{P_{max}} \quad (3)$$

۴-۴- جذب انرژی ویژه

جذب انرژی ویژه به صورت نسبت انرژی جذب شده بر واحد جرم تعریف می شود:

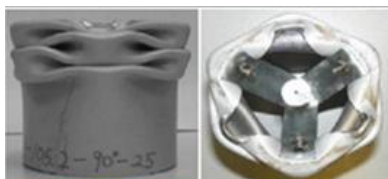
$$SEA = \frac{E_{abs}}{m} \quad (4)$$

۵- شبیه سازی عددی

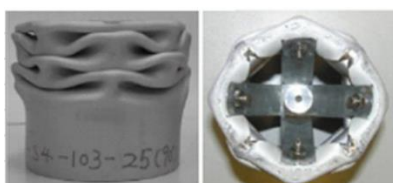
در این مطالعه، رفتار لهیدگی محوری لوله های استوانه ای با قطر و ضخامت یکسان $D_0 = 50\text{mm}$ و $t = 1.3\text{mm}$ با استفاده از نرم افزار ال اس دینا تحت بارگذاری شبه استاتیکی مدل سازی شده اند. در شکل (۳) مدل سه بعدی لوله استوانه ای با آغازگر کمانشی نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود، آغازگر کمانشی صلب توسط نوارهای کششی که بر روی جدار لوله نصب شده اند، هم مرکز با لوله استوانه قرار گرفته است.



الف



ب

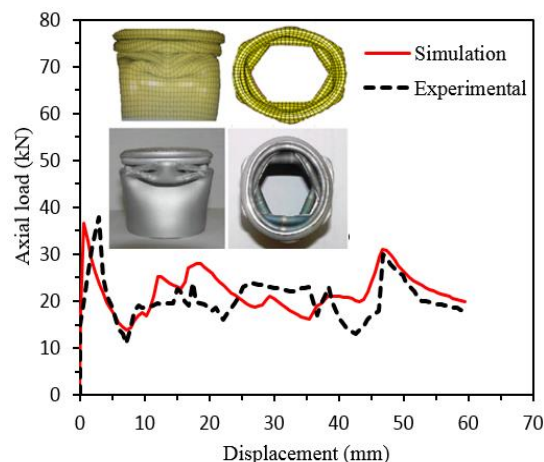


پ

شکل (۵) مقایسه شکل لهیدگی لوله استوانه‌ای با آغازگر برای: الف) C-N2-90، ب) C-N3-90، پ) C-N4-90

۲-۷- نمودار نیرو-جابجایی

نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه C-N3-90 در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه‌هایی که از آغازگر استفاده شده است شامل دو مرحله می‌باشد: مرحله اول مربوط به جابجایی آغازگر به اندازه طول پیش ضربه (h) و مرحله دوم مربوط به لهیدگی لوله است. زمانیکه دیواره‌های لوله توسط آغازگر و نوارهای کششی به سمت داخل کشیده می‌شوند، لوله آلومینیومی با افزایش خطی نیرو وارد ناحیه



شکل (۴) مقایسه تجربی و شبیه‌سازی نمودار نیرو-جابجایی و مکانیزم فروریزش نمونه استوانه‌ای بدون آغازگر

۷- تجزیه و تحلیل نتایج

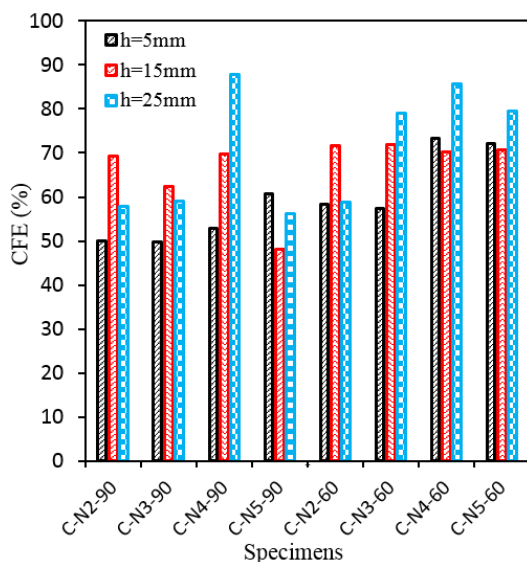
۷-۱- حالت فروریزش

در شکل (۵) مقایسه‌ای از حالت نهایی فروریزش تعدادی از لوله‌های استوانه‌ای با آغازگر کمانشی به صورت شبیه‌سازی عددی و تجربی نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود مطابقت نسبتاً خوبی بین شبیه‌سازی عددی و تست تجربی ایجاد شده است. روند تغییر شکل لهیدگی به این صورت است که هنگامیکه به آغازگر نیرو اعمال می‌شود، تغییر شکل جاذب در دو مرحله انجام گرفته و فرآیند لهیدگی لوله پس از جابجایی آغازگر به اندازه طول پیش ضربه (h) صورت می‌پذیرد. در مرحله اول، نیرو از بالا به نوک ستون آغازگر اصابت نموده و منجر به جابجایی آغازگر می‌شود. در مرحله دوم، با اعمال نیرو به نوارهای متصل به ستون آغازگر، باعث کشیده شدن جداره لوله به سمت داخل شده و لوله مستقیماً تحت فروریزش پیشرونده قرار می‌گیرد. همانطور که از شکل (۵) دیده می‌شود، تغییر شکل لوله‌های استوانه‌ای بصورت الماسی یا حالت ترکیبی می‌باشد.

مطابقت خوبی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی عددی بدست آمده است؛ به طوری که بیشترین خطای مربوط به نیروی ماکزیمم لهیدگی، ۱۳/۲۴ درصد و برای نمونه C-N3-60 با ارتفاع $h=25\text{mm}$ می‌باشد. همچنین با افزایش ارتفاع پیش ضربه آغازگر و تعداد نوارهای کششی متصل به آغازگر نیروی متوسط لهیدگی و ماکزیمم نیروی لهیدگی کاهش می‌یابد.

۷-۴- اثر ارتفاع پیش ضربه آغازگر، نوارهای کششی و زاویه قرارگیری نوارها بر روی راندمان نیروی لهیدگی

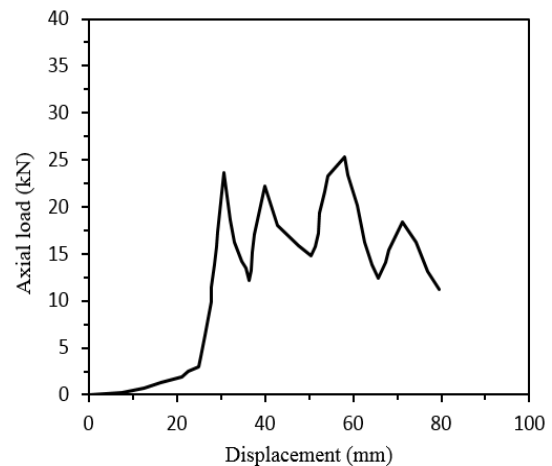
در شکل (۷) تغییرات راندمان نیروی لهیدگی (CFE) به ازای ارتفاع‌های مختلف پیش ضربه آغازگر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین راندمان نیروی لهیدگی ۸۸٪ برای نمونه C-N4-90 می‌باشد. علت آن به خاطر این است که نمونه C-N4-90 دارای کمترین مقدار نیروی ماکزیمم بوده و بنابراین منجر به افزایش راندمان نیروی لهیدگی شده است.



شکل (۷) منحنی تغییرات راندمان نیروی لهیدگی

الاستیک شده، و چین‌ها به ازای هر بیشینه بار تشکیل می‌شوند.

در ماکزیمم نیروی لهیدگی، با ایجاد اولین لولای پلاستیک نیرو به شدت کاهش می‌یابد. کاهش نیرو، تا زمان تشکیل یک چین به صورت کامل ادامه پیدا می‌کند. سپس لولای بعدی شکل گرفته و مجدداً کاهش و افزایش نیرو در منحنی دیده می‌شود.



شکل (۶) منحنی نیرو-جابجایی نمونه C-N3-90

بنابراین، می‌توان گفت که هر یک از قله‌های ایجاد شده در منحنی نیرو-جابجایی معرف تشکیل یک چین هستند. لذا، از مزیت اصلی استفاده از آغازگر، ایجاد تاخیر به میزان طول آغازگر در رسیدن لوله به ناحیه الاستیک است. بنابراین استفاده از آغازگر کمک شایانی در به حداقل رساندن کماتش ناخواسته اولری یا گلوبال شده و از شدت اعمال نیروی ناگهانی به سازه اصلی جلوگیری می‌کند.

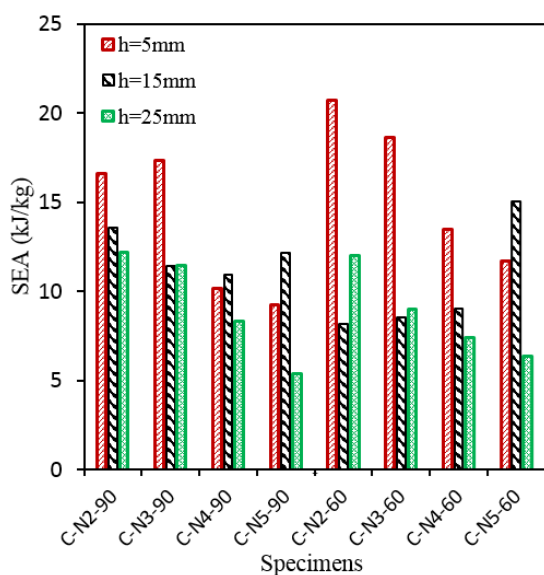
۷-۳- اثر ارتفاع آغازگر و نوارهای کششی بر روی نیروی متوسط لهیدگی و نیروی ماکزیمم لهیدگی

جدول (۳) مقایسه نتایج بین تست تجربی و شبیه‌سازی عددی برای نیروی متوسط لهیدگی و ماکزیمم نیروی لهیدگی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود،

جدول (۳) مقایسه نتایج نیروی متوسط و ماکزیمم نیروی لهدگی در حالت تجربی [۷] و شبیه‌سازی عددی

نمونه	$h(mm)$	نتایج تجربی		نتایج شبیه‌سازی	
		$P_m(kN)$	$P_{max}(kN)$	$P_m(kN)$	$P_{max}(kN)$
C-N2-90	۵	-	-	۱۶/۳	۳۲/۶
	۱۵	۱۹/۷	۳۴/۳	۱۸/۹	۳۰/۳
	۲۵	۱۷/۱	۲۷/۶	۱۵/۹	۲۷/۵
C-N3-90	۵	-	-	۱۵/۳	۳۰/۹
	۱۵	۱۵/۹	۳۰/۷	۱۶/۹	۲۷/۱
	۲۵	۱۶/۴	۲۴/۳	۱۴/۹	۲۵/۳
C-N4-90	۵	-	-	۱۵/۲	۲۸/۷
	۱۵	۱۹/۲	۳۲/۰	۱۶/۱	۲۸/۳
	۲۵	۱۸/۴	۱۸/۹	۱۵/۷	۱۶/۶
C-N3-60	۵	۱۶/۹	۳۲/۸	۱۷/۳	۳۰/۱
	۱۵	۱۶/۳	۲۸/۲	۱۴/۸	۲۴/۶
	۲۵	۱۵/۸	۲۳/۷	۱۵/۴	۲۰/۵

ارتفاع آغازگر و زاویه قرارگیری نوارها تاثیر زیادی در جذب انرژی ویژه دارد.



شکل (۸) منحنی تغییرات جذب انرژی ویژه

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ضربه‌پذیری لوله‌های استوانه‌ای با آغازگر کمانشی به صورت شبیه‌سازی عددی با نرم افزار Ls-Dyna مطالعه شد. به منظور دستیابی به این هدف، بررسی جامع روی لوله‌های استوانه‌ای آلیاژ آلومینیوم تحت بارگذاری

همچنین، همانطور که از شکل (۷) دیده می‌شود، با تغییر زاویه قرارگیری نوارهای کششی از ۹۰ درجه به ۶۰ درجه، باعث افزایش راندمان نیروی لهدگی می‌شود. علاوه بر این، از آنجا که افزایش تعداد نوارها باعث کاهش نیروی ماکزیمم لهدگی شده است، لذا، یک افزایش در راندمان نیروی لهدگی نیز مشاهده می‌شود.

۷-۵- اثر ارتفاع پیش ضربه آغازگر، نوارهای کششی و زاویه قرارگیری نوارها بر روی جذب انرژی ویژه

در شکل (۸) تغییرات جذب انرژی ویژه (SEA) به ازای ارتفاع‌های مختلف پیش ضربه آغازگر نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بیشترین راندمان نیروی لهدگی $20.70 kJ/kg$ برای نمونه C-N2-60 می‌باشد. همچنین، به جز برای نمونه‌های C-N5-90 و C-N5-60، افزایش تعداد نوارهای کششی جذب انرژی ویژه کاهش می‌یابد. علاوه بر این، برای ارتفاع پیش ضربه آغازگر $h=5mm$ و موقعیت قرارگیری نوارهای کششی $\theta=60^\circ$ درجه جذب انرژی ویژه بیشتر از نمونه‌های دیگر می‌باشد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که تعداد نوارهای کششی،

- grooves shape on the energy absorption of 6061-T6 aluminium tubes under axial compression," *International Journal of Materials and Structural Integrity*, vol. 6, pp. 151-168, 2012.
- [3] M. Damghani Nouri and M. J. Rezvani, "Experimental Investigation of Polymeric Foam and Grooves Effects on Crashworthiness Characteristics of Thin-Walled Conical Tubes," *Experimental Techniques*, pp. no-no, 2012.
- [4] M. J. Rezvani and M. D. Nouri, "Axial Crumpling of Aluminum Frusta Tubes with Induced Axisymmetric Folding Patterns," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 39, pp. 2179-2190, 2013.
- [5] X. Zhang, G. Cheng, and H. Zhang, "Numerical investigations on a new type of energy-absorbing structure based on free inversion of tubes," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 51, pp. 64-76, 2009.
- [6] X. W. Zhang, H. Su, and T. X. Yu, "Energy absorption of an axially crushed square tube with a buckling initiator," *International Journal of Impact Engineering*, vol. 36, pp. 402-417, 2009.
- [7] X. W. Zhang, Q. D. Tian, and T. X. Yu, "Axial crushing of circular tubes with buckling initiators," *Thin-Walled Structures*, vol. 47, pp. 788-797, 2009.
- [8] N. Negahban Vasheghani, M. J. Rezvani, and M. Damghani Nouri, "Experimental and numerical investigation of energy absorption of foam-filled cylindrical tubes with initiator," *Journal of Modeling in Engineering*, vol. 14, pp. 51-60, 2016.
- شبه-استاتیک انجام گرفت. در این مطالعه اثر ارتفاع آغازگر (h)، تعداد نوارهای کششی (N) و زاویه قرارگیری نوارها (θ) روی مکانیزم فروریزش، میزان جذب انرژی و ویژه، راندمان نیروی لهیدگی، نیروی متوسط لهیدگی و ماکزیمم نیروی لهیدگی بدست آمد. نتایج مهم حاصل از این تحقیق به صورت زیر می‌باشند:
- با افزایش ارتفاع پیش ضربه آغازگر و تعداد نوارهای کششی متصل به آغازگر، ماکزیمم نیروی لهیدگی و متوسط نیروی لهیدگی کاهش می‌یابد.
 - افزایش تعداد نوارهای کششی متصل به آغازگر باعث افزایش راندمان نیروی لهیدگی می‌شود.
 - با قرارگیری نوارهای کششی در زاویه $\theta=60^\circ$ درجه و با کاهش تعداد نوارهای کششی، جذب انرژی ویژه افزایش می‌یابد.
 - استفاده از آغازگر کماتشی کمک شایانی در به حداقل رساندن کماتش ناخواسته اوپلری یا گلوبال شده و از شدت اعمال نیروی ناگهانی به سازه اصلی یا سرنشینان جلوگیری می‌کند.
 - با توجه به تطابق قابل قبول در نتایج بین شبیه‌سازی عددی و تست تجربی می‌توان گفت که، شبیه‌سازی عددی می‌تواند پارامترهای ضربه‌پذیری لوله‌های استوانه‌ای با آغازگر کماتشی را به خوبی برآورد کند.

۹- فهرست علائم

h	ارتفاع پیش ضربه آغازگر (mm)
N	تعداد نوارهای کششی
θ	زاویه قرارگیری نوارهای کششی ($^\circ$)
SEA	جذب انرژی ویژه (kJ/kg)
CFE	راندمان نیروی لهیدگی (%)

مراجع:

- [1] S. J. Hosseinipour and G. H. Daneshi, "Technical Note: Experimental Studies on Thin-Walled Grooved Tubes Under Axial Compression," *Experimental Mechanics*, vol. 44, pp. 101-108, 2004.
- [2] M. Rezvani, M. D. Nouri, and H. Rahmani, "Experimental and numerical investigation of

