مجله مهندسی مکانیک مدرس، خرداد ۱۳۹۳، دوره ۱۴، شماره ۳، ص‌ص ۶۰-۶۸

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

تحلیل تجربی و عددی کمانش و کنترل میزان جذب انرژی پوسته‌های با هندسه‌های مختلف از جنس فولاد ضد زنگ SS304L تحت بار محوری شبه استاتیکی

محمود شریعتی[۱*]، محمد داورپناه[۲]، حمید چاوشان[۳]، حمیدرضا الله بخش[۴]

۱- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد

۲، ۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

۴- کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

* مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵۱۱۱۱، msharіati44@um.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۹ اردیبهشت ۱۳۹۲

پذیرش: ۲۳ تیر ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

کمانش

جذب انرژی

پوسته‌های نیمه‌کروی

مخروطی

استوانه‌ای

بارگذاری محوری

چکیده

در این مقاله رفتار کمانش و جذب انرژی پوسته‌های نیمه‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی از جنس فولاد ضد زنگ، تحت بارگذاری محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. هر نوع پوسته با در نظر گرفتن جرم یکسان و دو هندسه متفاوت شامل هندسه کامل و شیاردار، طراحی شده است. در این مقاله اثر هندسه، ضخامت، ارتفاع، وجود شیار بر روی پوسته‌ها و فاصله شیارها از یکدیگر، بر بار کمانش و مقدار جذب انرژی توسط پوسته‌ها بررسی شده است. در تست تجربی، قطعات بکار رفته دارای جرم و ضخامت برابر بوده و عمق و فاصله‌ی شیارهای ایجاد شده در آنها نیز یکسان است. تست تجربی به کمک دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است. تحلیل عددی توسط نرم‌افزار آباکوس بدست آمده و دقت این مدل‌ها با نتایج تجربی سنجیده شده است.

Numerical and experimental investigations on buckling and control amount of energy absorption of stainless steel 304L shells with various shapes under axial loading

Mahmoud Shariati[1*], Mohammad Davarpanah[2], Hamid Chavoshan[2], Hamid Reza Allahbakhsh[2]

1- Mechanical Engineering, Mashhad Univ., Mashhad, Iran
2- Mechanical Engineering, Shahrood Univ. of Tech., Shahrood, Iran
* P.O.B. 917751111 Mashhad, Iran, msharіati44@um.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 19 May 2013
Accepted 14 July 2013
Available Online 11 May 2014

Keywords:
Buckling
Energy Absorption
Semi-Sphere Shells
Conical Shells
Cylindrical Shells
Axial Loading

ABSTRACT

In this paper, buckling and energy absorption behavior of stainless steel semi-sphere, cylindrical and conical shells under axial loading are studied. Every shell with the same mass and different shapes with and without groove is designed. In this paper the effect of shape, thickness, height, groove of shells and distance between grooves, on buckling and energy absorption were investigated. In experimental test, Samples had same mass and thickness and also grooves had same depth and distance. Experimental tests were performed by a servo-hydraulic INSTRON 8802 machine. Numerical analysis is carried out by ABAQUS software and is validated with experimental results.

۱- مقدمه

سازه‌های پوسته‌ای دارای کاربرد فراوانی در صنایع هوافضا، سازه‌های دریایی، سدهای بزرگ، سقف‌های پوسته‌ای، خطوط لوله‌کشی، سازه‌های حمل و نقل سیالات و صنایع خودروسازی می‌باشد. یکی از مهم‌ترین مسائلی که هنگام طراحی این سازه‌ها باید مورد بررسی قرار گیرد، پدیده کمانش و جذب انرژی است.

تغییر شکل و جذب انرژی پوسته‌های نیمه‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی در سال‌های اخیر مورد بررسی‌های زیادی قرار گرفته است. شریعتی و الله‌بخش [۱] کمانش و پس کمانش پوسته‌های نیمه کروی تحت بارگذاری‌های مختلف را بصورت عددی و تجربی مورد مطالعه قرار دادند. آنها مشاهده کردند، در حالتی‌که بار فشاری توسط یک صفحه صلب به نیم‌کره اعمال شود، نسبت به حالتی‌که توسط یک میله به آن بار اعمال

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Shariati, M. Davarpanah, H. Chavoshan, H. R. Allahbakhsh, Numerical and experimental investigations on buckling and control amount of energy absorption of stainless steel 304L shells with various shapes under axial loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 60-68, 2014 (In Persian)

می‌شود، نیم‌کره می‌تواند بار کمانش بالاتری را تحمل کند. همچنین مشاهده کردند که مقدار بار کمانش در بارگذاری با صفحه صلب سوراخ‌دار، بیشتر از بارگذاری توسط لوله‌ی صلب است. گوپتا و همکاران [۲] نیز کمانش پوسته-های نیم‌کروی تحت بار محوری را بصورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. امیری و رشید [۳] کمانش پلاستیک پوسته‌های نیم‌کروی تحت بار متمرکز بر روی قله نیم‌کره را به طور تحلیلی، تجربی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. برسانی و همکاران [۴] یک پوستهٔ استوانه‌ای الاستیک تحت فشار خارجی را به طور تحلیلی و عددی مورد مطالعه قرار دادند. شریعتی و رخی [۵] بررسی تجربی و عددی بر روی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای فولادی با گشودگی بیضوی تحت بار محوری را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که تغییر مکان گشودگی از وسط استوانه به نزدیکی لبه‌های استوانه، بار کمانش را افزایش می‌دهد. استحکام نهایی پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار تحت بارگذاری مرکب توسط شریعتی و همکاران [۶] به صورت تجربی و عددی بررسی شد و مشاهده کردند که با افزایش قطر پوسته با ضخامت ثابت، بار کمانش افزایش می‌یابد. یک مطالعه تجربی و تحلیلی توسط شریعتی و اکبرپور [۷] بر روی کمانش و پس کمانش پوسته‌های جدار نازک شامل گشودگی دایروی و بیضوی تحت بار مایل انجام شد. صالح غفاری و همکاران [۸] فروپاشی لوله-های جدار نازک با شیارهای بیرونی به عنوان وسیله‌های پراکندگی انرژی، را مورد مطالعه قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ایجاد شیار در طول استوانه باعث کاهش نیروی الاستیک و نیروی برخورد می‌شود. آنها [۹] همچنین دو روش جدید در بهتر جذب شدن انرژی توسط پوسته-های استوانه‌ای ارائه کردند. در روش اول از حلقه فولادی فشاری در ابتدای استوانه و در روش دوم از ایجاد شیار در طول پوسته، در بهبود جذب انرژی بهره بردند. حسین پور و دانش [۱۰] نیز به بررسی در مورد جذب انرژی پوسته‌های استوانه‌ای شیاردار پرداختند. آنها به این نتیجه رسیدند که شیار، عاملی برای کنترل جذب انرژی، منحنی نیرو-جابه‌جایی و شتاب نیروی اعمالی پوسته‌های تحت بار محوری می‌باشد. لی و همکاران [۱۱] تغییر شکل و جذب انرژی لوله‌های پرشده از آلومینیوم تحت بارگذاری مایل را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند. دادرسی [۱۲] کمانش پوسته‌های مخروطی تحت بار فشاری با و بدون گشودگی و ترک را با استفاده از نرم‌افزار آباکوس مورد تحلیل قرار داد و دریافت که پس از ایجاد پدیده کمانش، ظرفیت تحمل بار پوسته، به شدت کاهش می‌یابد و نتایج عددی و تجربی به دلیل عیوب ساخت در قطعه، فاصله نسبتاً زیادی با یکدیگر داشتند. گوپتا و همکاران [۱۳] در زمینه کمانش پوسته‌های مخروطی ناقص آلومینیومی مطالعاتی بصورت تجربی و عددی انجام دادند. قمریان و همکاران [۱۴] به طور عددی و تجربی کمانش پوسته‌های مخروطی با و بدون فوم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که جذب انرژی پوسته مخروطی دارای فوم از پوسته مخروطی بدون فوم بیشتر می‌باشد. آنها مشاهده کردند که در مقایسه مخروط و استوانه در تست له‌شوندگی، جذب انرژی پوسته استوانه‌ای بدون فوم به مقدار ۱۸/۴ درصد کمتر از پوسته مخروطی می‌باشد و پوسته‌ی مخروطی دارای فوم در مقایسه با پوسته استوانه‌ای، بازده جذب انرژی بیشتری را به همراه دارد. تین وون پیتوک و چومکوا [۱۵] مطالعه تجربی و عددی بر روی رفتار پوسته‌های استوانه‌ای و مخروطی با ضخامت متغیر در طول پوسته تحت بار محوری را انجام دادند. آنها مشاهده کردند که تغییر شکل پوسته استوانه‌ای با ضخامت متغیر در طول آن با افزایش جذب انرژی و در پوسته مخروطی با کاهش جذب انرژی همراه است. تاجداری و همکاران [۱۶] بررسی عددی و تجربی کمانش پوسته‌های جدار نازک استوانه‌ای فولادی با گشودگی‌های مثلثی تحت فشار محوری را مورد مطالعه قرار دادند.

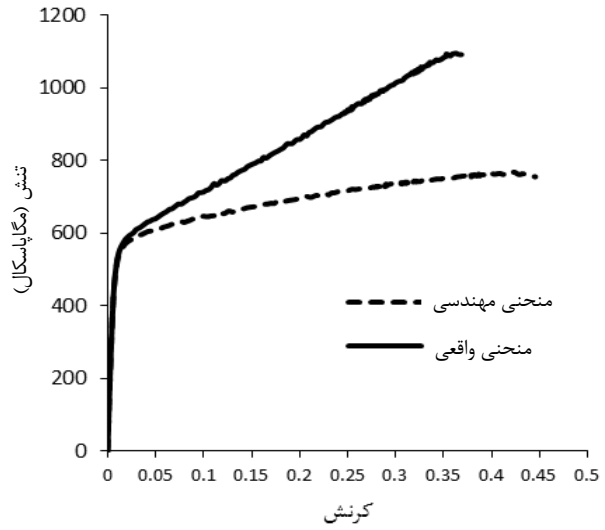
در این مقاله رفتار کمانش و جذب انرژی پوسته‌های نیمه‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی از جنس فولاد ضد زنگ SS304L تحت بارگذاری محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. نمونه‌ها به کمک نرم‌افزار آباکوس و دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ به‌صورت عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. اثر هندسه، ضخامت، ارتفاع، وجود شیار بر روی پوسته‌ها و فاصله‌ی شیارها از یکدیگر، بر بار کمانش و مقدار جذب انرژی توسط پوسته‌ها بررسی گردید. از نتایج تجربی مشاهده شده است که در پوسته‌های نیم‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی، شیارها، باعث کاهش بار کمانش و بهبود انتقال انرژی می‌شوند.

۲- خواص مکانیکی نمونه‌ها

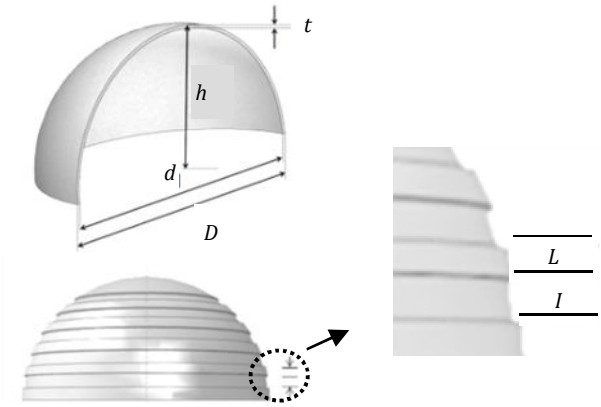
نمونه‌های مورد مطالعه از فولاد ضد زنگ SS304L تهیه شده‌اند. خصوصیات مکانیکی فولاد مورد نظر طبق استاندارد ASTM E8 و به‌وسیله دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ تعیین گردیده است. نمودار تنش-کرنش واقعی و مهندسی در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل، مدول کشسانی برابر با ۲۲۰ گیگاپاسکال و تنش تسلیم برابر با ۵۱۳ مگاپاسکال به-دست می‌آید. ضریب پواسون نیز ۰/۳۳ فرض شده است.

۳- هندسه نمونه‌ها

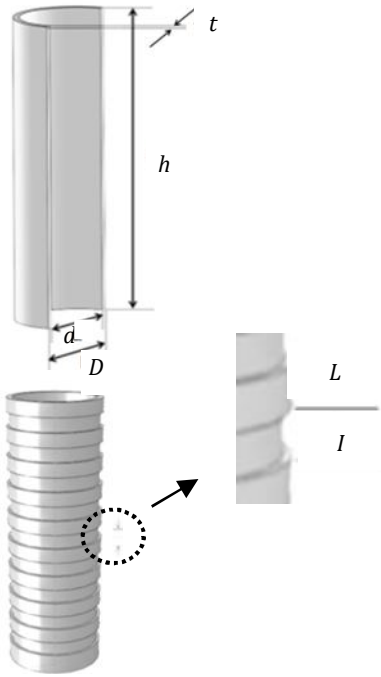
در این نوشتار پوسته‌های استوانه‌ای با سه هندسهٔ مختلف استوانه، مخروط ناقص و نیم‌کره با جرم یکسان ۱۸۶ گرم بدون شیار و جرم یکسان ۱۶۸ گرم شیاردار و ضخامت یکسان ۲ میلی‌متر تحلیل شده‌اند. در شکل‌های ۲، ۳ و ۴ هندسه نمونه‌های مورد تحلیل نشان داده شده است که در آن D قطر بزرگ، d قطر کوچک، h ارتفاع، t ضخامت متوسط، I فاصلهٔ شیارهای تورفته و L فاصله برآمدگی‌ها می‌باشد. نام-گذاری نمونه‌ها برای نیم‌کره بصورت D100-d96-h50.5-t2-I5-L5، برای استوانه بصورت t2-I5-L5-D40-d36-h97.05 و برای مخروط بصورت D60-d30-h85.5-t2-I5-L5 می‌باشد. در تمامی نمونه‌ها و مراحل عمق شیارها ۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. در این نامگذاری مقدار هر پارامتر بر حسب میلی‌متر در جلوی آن ذکر شده است.



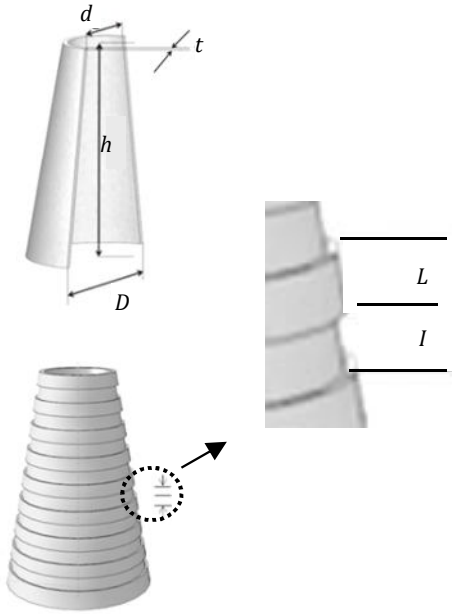
شکل ۱ نمودار تنش-کرنش واقعی و مهندسی برای فولاد SS304L



شکل ۲ نمای برش خوردهٔ نیم‌کره بدون شیار و نمای کامل نیم‌کره شیاردار



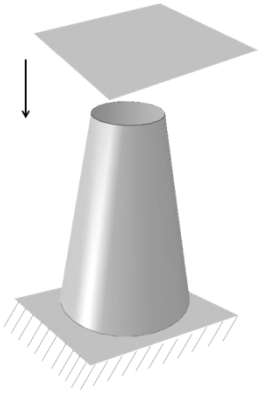
شکل ۳ نمای برش خوردهٔ استوانه بدون شیار و نمای کامل استوانه شیاردار



شکل ۴ نمای برش خورده مخروط ناقص بدون شیار و نمای کامل مخروط ناقص شیاردار

۴- شرایط مرزی

برای اعمال بار، ورق صلبی در زیر نمونه‌ها قرار داده می شود. سپس نمونه‌ها توسط یک صفحه‌ی صلب یا ستون صلب، جداگانه تحت نیروی محوری قرار می گیرند. به علاوه، همه درجات آزادی صفحه‌ی پایینی مقید شده و صفحه بالایی یا ستون در جهت محوری آزادی حرکت دارد. در شکل ۵ شرایط مرزی برای بارگذاری توسط صفحه نشان داده شده است.



شکل ۵ شرایط مرزی برای بارگذاری توسط صفحه در مخروط استوانه‌ای ناقص

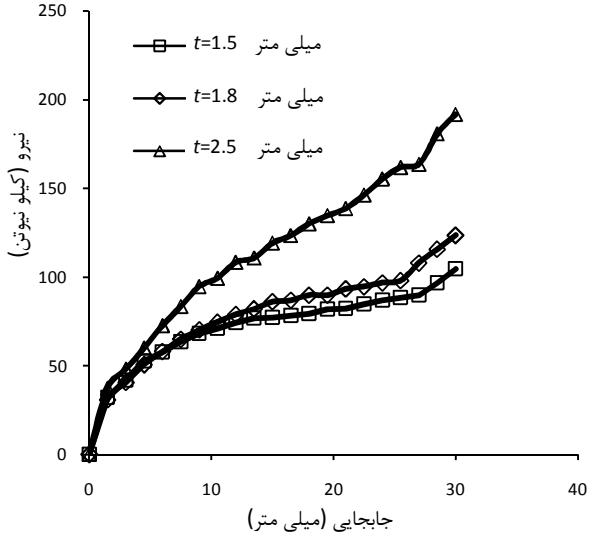
۵- نتایج عددی

برای تحلیل عددی نمونه‌ها توسط نرم‌افزار آباکوس از المان S4R که یک المان خطی مستطیلی با چهار گره می‌باشد، در نیم‌کره، مخروط و استوانه استفاده شده است. همچنین برای صفحه یا ستون صلب از المان R3D4 استفاده شده است. با توجه به شبه استاتیکی بودن آزمایش، در نرم‌افزار، میزان جابه‌جایی مورد نظر به جای میزان سرعت استفاده شده است. نتایج بدست آمده برای نیم‌کره، استوانه و مخروط ساده و شیاردار در ادامه آمده است. ضریب اصطکاک برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. تأثیر پارامترهای ضخامت، ارتفاع و فاصله شیارها در تحلیل عددی پوسته‌های مختلف بررسی شده‌اند.

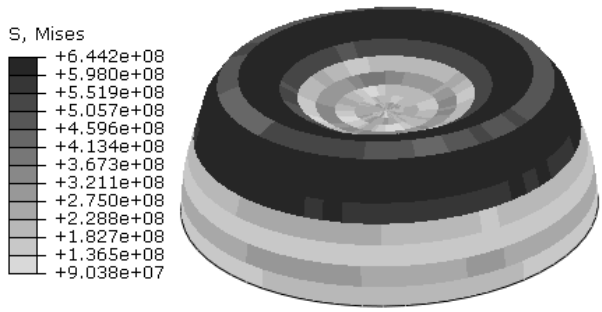
۵-۱- تأثیر ضخامت بر رفتار کمانش نیم‌کره بدون شیار

به منظور بررسی عددی اثر ضخامت بر رفتار کمانش نیم‌کره بدون شیار D100-d96-h50.5-t2، سه ضخامت مختلف شامل ۱/۵، ۱/۸و ۲/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای هر سه نیم‌کره بدون شیار، نمودار نیرو-جابه‌جایی آن در یک نمودار مطابق شکل ۶ رسم شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در یک جابه‌جایی معین با افزایش ضخامت نیم-کره بدون شیار، مقدار نیروی اعمالی جهت تغییر شکل نیم‌کره هم افزایش می‌یابد، به طوری که نیروی اعمالی در جابه‌جایی ۳۰ میلی‌متر برای نیم‌کره بدون شیار با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر از جنس SS304L، حدود ۲۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد. مطابق شکل ۶، در ضخامت‌های بالاتر، تغییرات نیرو بر حسب جابه‌جایی دارای شیب بیشتری نسبت به ضخامت‌های پایین‌تر می‌باشد. در شکل ۷ کانتور[1] تنش فون میزز برای نیم‌کره بدون شیار با ضخامت ۱/۸ میلی‌متر آورده شده است.

1- Contour



شکل ۶ نمودار عددی نیرو- جابه‌جایی برای نیم‌کره $D100$-d96-h50.5 بدون شیار با ضخامت‌های ۱/۵، ۱/۸ و ۲/۵ میلی‌متر



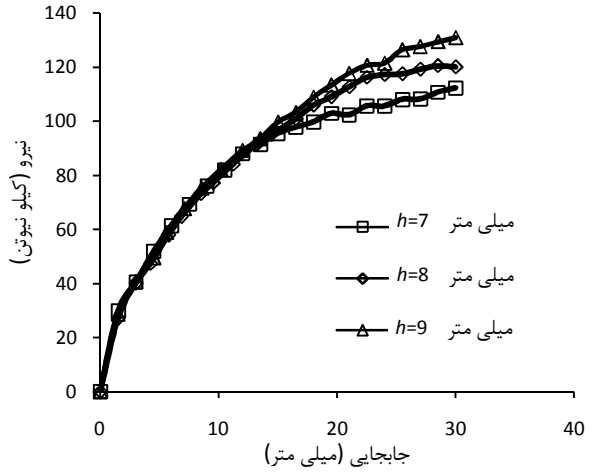
شکل ۷ کانتور تنش فون میزز (مگاپاسکال) برای نمونه $D100$-$d96$-$h50.5$-$t1.8$ نیم‌کره بدون شیار

۵-۲- تأثیر ارتفاع بر رفتار کمانش نیم‌کره‌ی بدون شیار

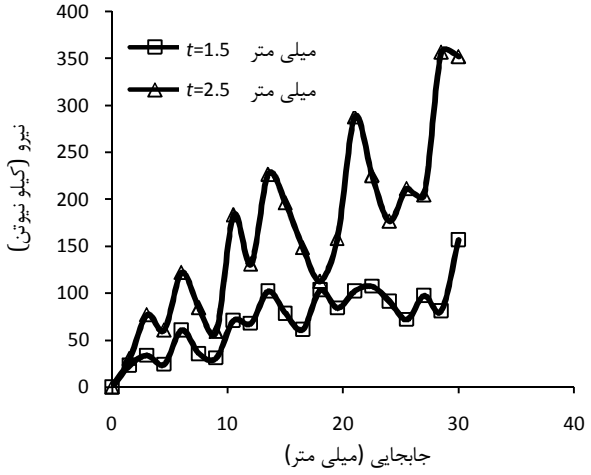
در این بخش نیم‌کره‌های بدون شیار با قطرهای مختلف شامل ۷، ۸ و ۹ میلی‌متر تحت بار محوری قرار داده شده اندالبته ضخامت در سه نمونه یکسان و برابر ۲ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به شکل ۸، ارتفاع (شعاع در نیم-کره) تأثیر کمی بر رفتار نهایی نیم‌کره بدون شیار دارد، به‌طوری که اختلاف نمودار نیرو-جابه‌جایی در تغییر ارتفاع از ۷ میلی‌متر به ۹ میلی‌متر از جابه‌جایی ۲۰ میلی‌متر به بعد مشهود بوده و از این مقدار جابه‌جایی به بعد تفاوت اندکی در نمودار مشاهده می‌شود.

۵-۳- تأثیر ضخامت بر رفتار کمانش نیم‌کره‌ی شیاردار

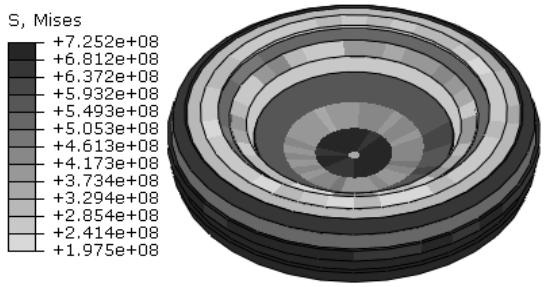
در این بخش نتایج عددی نیم‌کره‌های شیاردار با ضخامت‌های ۱/۵ و ۲/۵ میلی‌متر ارائه شده است. شیارها در هر دو نمونه یکسان می‌باشد. فاصله شیارها ۵ میلی‌متر و ضخامت آنها ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، با افزایش ضخامت، بار کمانش افزایش پیدا می‌کند. همچنین رفتار نیم‌کره شیاردار با نواسانات بیشتری در ضخامت‌های بالاتر مشاهده می‌شود. کانتور تنش فون میزز برای نیم‌کره دارای شیار با ضخامت ۲/۵ میلی‌متر در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۸ نمودار عددی نیرو- جابه‌جایی برای نیم‌کره $D100$-$d96$-$t2$ بدون شیار با ارتفاع‌های ۷، ۸ و ۹ میلی‌متر



شکل ۹ نمودار عددی نیرو- جابه‌جایی برای نیم‌کره $D100$-$d96$-$h50.5$ شیاردار با ضخامت‌های ۱/۵ و ۲/۵ میلی‌متر



شکل ۱۰ کانتور تنش فون میزز (مگاپاسکال) برای نمونه $D100$-$d96$-$h50.5$-$t2.5$ نیم‌کره شیاردار

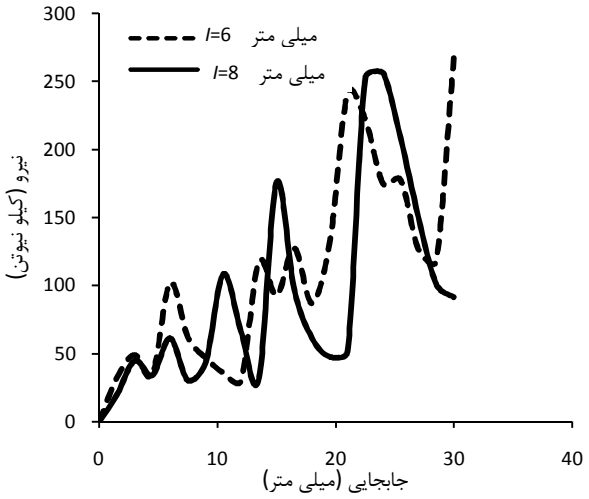
۵-۴- تأثیر فاصله شیارها بر رفتار کمانش نیم‌کرهٔ شیاردار

برای بررسی بهتر رفتار نیم‌کره‌های D100-d96-h50.5-t2-I5-L5 شیاردار، تغییر در فاصله شیارها اعمال شده است. در نمونه مورد آزمایش در تست تجربی I فاصله شیارها ۵ میلی‌متر می‌باشد. در نتایج عددی فاصله‌های ۶ و ۸ میلی‌متر نیز برای I، بررسی شده اند که نتایج آن در شکل ۱۱ آورده شده‌اند. در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که در فاصله ۶ میلی‌متر با توجه به مناسب نبودن نسبت I/L با مقدار ۳/۲، شکل نمودار به صورت نامنظم به نقاط بیشینه خود رسیده و شیارها در اثر نیروی اعمالی، به صورت نامنظم بر روی

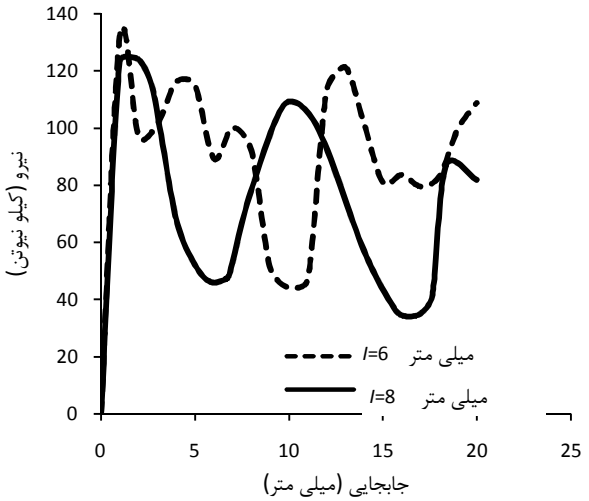
یکدیگر فشرده می‌شوند. برای ایجاد فشردگی منظم از بالا با پایین نیم‌کره باید نسبت l/L بصورت یک به چهار باشد. به‌همین منظور تحلیل عددی در فاصله ۸ میلی‌متر برای شیارهای تورفته و ۲ میلی‌متر فاصله بدون شیار بررسی شده است. همان‌طور که از شکل پیداست، نقاط بیشینه بصورت منظم تکرار شده‌اند که نشان دهنده قرارگیری یک به یک شیارها برروی یکدیگر از بالا به پایین می‌باشد.

۵-۵- تأثیر فاصله شیارها بر رفتار استوانه شیاردار

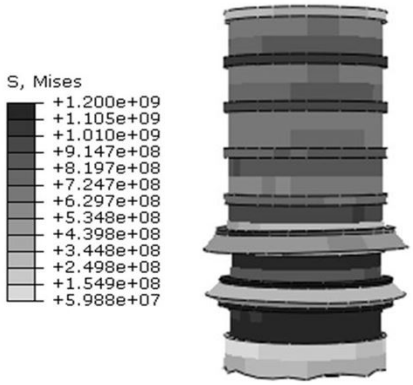
در استوانه شیاردار t2-I5-L5-D40-d36-h97.05 همانند نیم‌کره شیاردار، دو فاصله ۶ و ۸ میلی‌متر برای l، مورد تحلیل عددی قرار گرفته اند. تکرار منظم بیشینه، در فاصله ۸ میلی‌متر مشاهده شد به عبارت دیگر نسبت l/L، 1 به ۴ مقدار مناسبی جهت فشردگی منظم شیارها می‌باشد (شکل ۱۲). در شکل ۱۳، کانتور تنش فون میزز برای استوانه با فاصله‌ی شیار ۸ میلی‌متر آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود شیارها به طور منظم بر روی یکدیگر فشرده می‌شوند.



شکل ۱۱ نمودار عددی نیرو- جابه‌جایی برای نیم‌کره $D100$-$d96$-$h50.5$-$t2$ شیاردار با فاصله شیار تورفتگی ۶ و ۸ میلی‌متر



شکل ۱۲ نمودار عددی نیرو- جابه‌جایی برای استوانه $D40$-$d36$-$h97.05$-$t2$ شیاردار با فاصله شیار تورفتگی ۶ و ۸ میلی‌متر

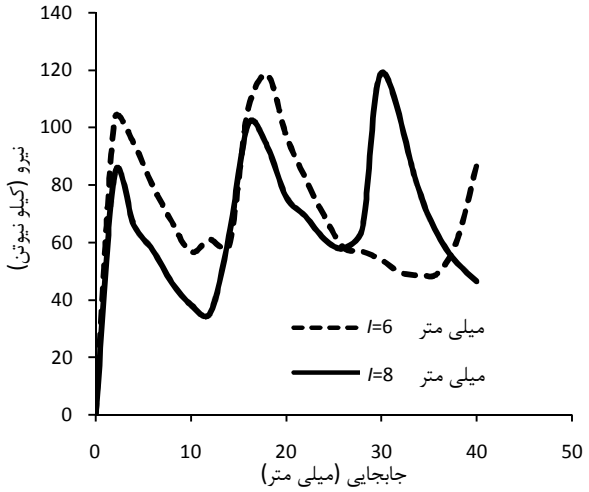


شکل ۱۳ کانتور تنش فون میزز (مگاپاسکال) برای استوانه $D40$-$d36$-$h97.05$-$t2$ شیاردار با فاصله شیار تو رفتگی ۸ میلی‌متر

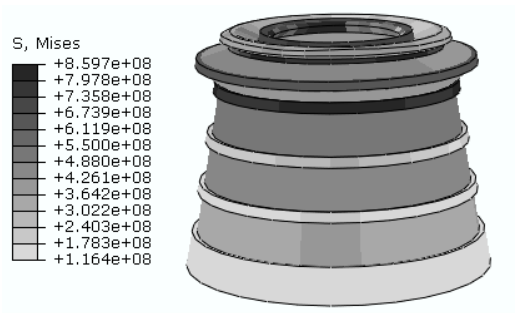
۵-۶- تأثیر فاصله شیارها بر رفتار کمانش مخروط شیاردار

در این قسمت مخروط‌های شیاردار D60-d30-h85.5-t2-I5-L5 با دو فاصله ۶ و ۸ میلی‌متر برای l جهت بررسی عددی در نظر گرفته شده اند. با افزایش جابه‌جایی، بیشینه نیرو در هر فاصله، افزایش می‌یابد.

علت این امر افزایش نیرو به دلیل افزایش سطح مقطع تحت بار با نزدیک شدن به قاعده بزرگ مخروط و نیز افزایش استحکام ماده به دلیل انجام کار مکانیکی است. با توجه به شکل ۱۴، با افزایش l، در یک جابه‌جایی معین، نیروی کمانش، کاهش می‌یابد. در شکل ۱۵، کانتور تنش فون میزز برای مخروط با فاصله شیار ۸ میلی‌متر آورده شده است. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، شیارها بطور منظم بر روی یکدیگر فشرده می‌شوند.



شکل ۱۴ نمودار عددی نیرو- جابه‌جایی برای مخروط $D60$-$d30$-$h85.5$-$t2$ شیاردار با فاصله شیار تو رفتگی ۶ و ۸ میلی‌متر



شکل ۱۵ کانتور تنش فون میزز (مگاپاسکال) برای مخروط $D60$-$d30$-$h85.5$-$t2$ شیاردار با فاصله شیار تو رفتگی ۸ میلی‌متر

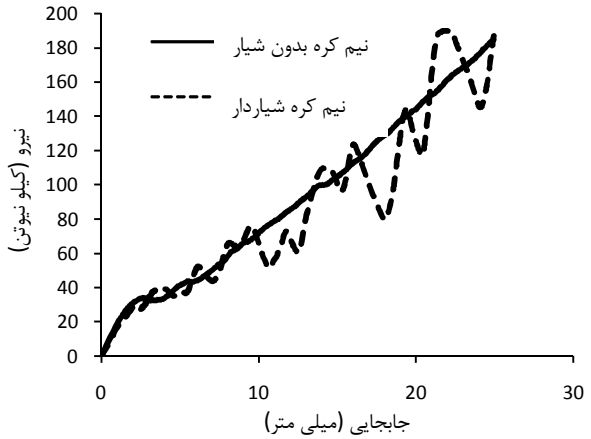
۶- نتایج تجربی

هدف اصلی این مقاله مطالعه بر روی بار کمانش و قابلیت جذب انرژی هندسه‌های متفاوت و مقایسه آنها با یکدیگر می‌باشد. قابلیت جذب انرژی به خواص مکانیکی مواد، نرخ بارگذاری، چگونگی بارگذاری، هندسه جاذب انرژی و به ساز و کار کمانش بستگی دارد. با توجه به هندسه‌های طراحی شده، جرم همه قطعات یکسان (۱۸۶ گرم) و از جنس فولاد ضد زنگ SS304L می‌باشد. به کمک دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ (شکل ۱۶) نمونه‌ها به‌صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند؛ به طوری که تمام هندسه‌ها در بین دو فک دستگاه قرار گرفته و به اندازه‌ای به آنها نیرو وارد می‌شود تا فک بالا به اندازه ۳ سانتی‌متر به سمت پایین جابه‌جا شود و سپس مقدار بار اعمالی به نمونه‌ها در هر لحظه را در زمان جابه‌جایی مورد نظر گرفته و برای تحلیل نتایج بکار می‌رود.

دو مدل نیم‌کره ساده و شیاردار تحت جابه‌جایی مشخصی قرار می‌گیرند، به علت اینکه ارتفاع شیارها کم می‌باشد، لذا با اعمال بار، شروع کمانش تسریع شده و با افزایش تغییر شکل نیم‌کره، بار نیز افزایش پیدا می‌یابد. همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود، دماغه نیم‌کره به سمت داخل فرو رفته است. اگر ارتفاع نیم‌کره افزایش یابد، بعد از اینکه دماغه به سمت پایین فرو می‌رفت، نیم‌کره از سطح پایین نیز شروع به خم شدن می‌کرد که موجب افزایش بار بصورت صعودی میشد.

همان‌طور که در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود نیم‌کره شیاردار، انرژی را مانند یک دمپر کم و زیاد می‌کند که علت آن وجود شیارها می‌باشد که انرژی جذب شده در هنگام رسیدن به شیارها به نوعی کنترل می‌شوند.

شکل ۱۶ دستگاه اینسترون ۸۸۰۲ در حال بارگذاری روی یک نمونه استوانه‌ای به‌وسیله صفحه صلب

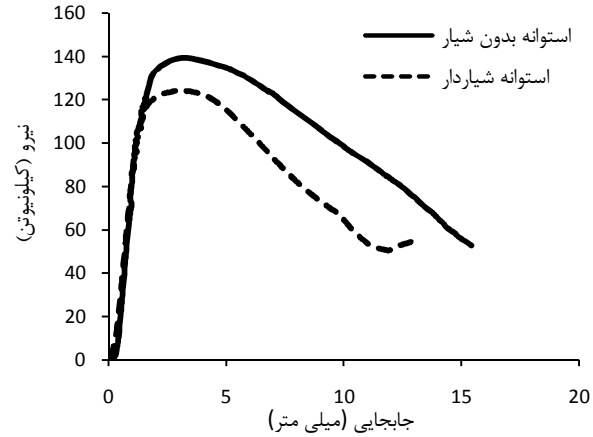


شکل ۱۷ نمودار تجربی نیرو- جابه‌جایی برای دو نیم‌کره $D100$-$d96$-h50.5-$t2$ بدون شیار و شیاردار

همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، ایجاد شیار، باعث کاهش نقطه کمانش می‌شود. انرژی کرنشی برای دو حالت نیم‌کره بدون شیار و شیاردار محاسبه شده است.

در جابه‌جایی ۲۸ میلی‌متر، انرژی کرنشی نیم‌کره شیاردار نسبت به نیم‌کره بدون شیار به مقدار ۹۷ ژول (۴/۲۵ درصد) و نقطه کمانش به مقدار ۴ کیلونیوتن (۱۳/۳ درصد) کاهش پیدا کرده است.

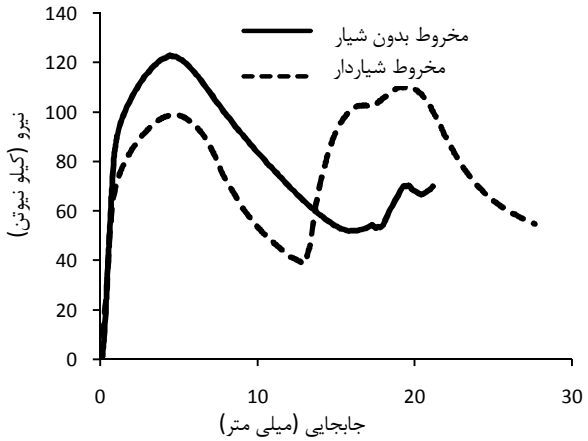
در ادامه، دو مدل استوانه ساده و شیاردار تحت جابه‌جایی مشخصی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۱۸، استوانه شیاردار نسبت به استوانه بدون شیار دارای بار کمانش کمتری است، همچنین سطح زیر منحنی استوانه شیاردار کمتر است. این بدان معنی است که شیار، ضمن نوسانی و کم و زیاد کردن نیرو، باعث کاهش ضربه اولیه و انتقال بیشتر بار می‌شود. به عبارت دیگر با استفاده از شیار، می‌توان میزان جذب انرژی توسط پوسته‌ها را کنترل کرد. برای مقایسه انرژی کرنشی، در جابه‌جایی ۱۲/۸ میلی‌متر، انرژی کرنشی استوانه شیاردار نسبت به استوانه بدون شیار، ۱۹۷ ژول (۱۵/۱۳ درصد) و نقطه کمانش ۱۶ کیلونیوتن (۱۱/۵۱ درصد) کاهش پیدا می‌کند. همچنین انرژی بر واحد جرم، برای استوانه‌ی بدون شیار ۷ ژول بر گرم و برای استوانه شیار دار ۶/۵۷ ژول بر گرم می‌باشد.



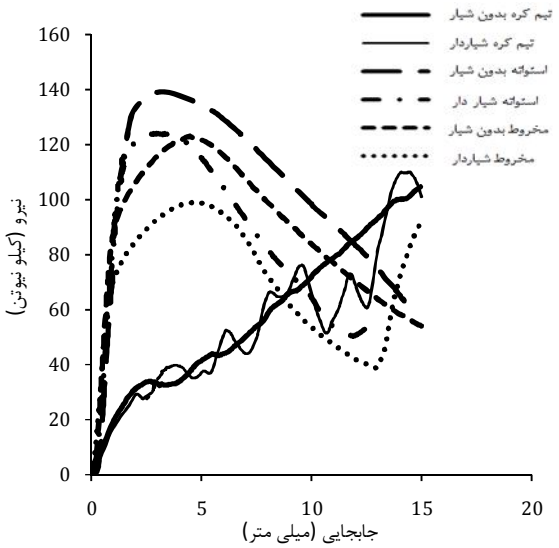
شکل ۱۸ نمودار تجربی نیرو- جابه‌جایی برای دو استوانه $D40$-$d36$-$h97.05$-$t2$ بدون شیار و شیاردار

همچنین نمودار نیرو-جابه‌جایی برای دو مخروط ناقص بدون شیار و شیاردار نیز بصورت تجربی تعیین و ترسیم شد که در شکل ۱۹ دیده می‌شود، بار کمانش برای مخروط ناقص شیاردار کمتر از مخروط ناقص ساده می‌باشد. با توجه به شکل ۱۹ و جدول ۱، انرژی کرنشی در مخروط شیاردار، در جابه‌جایی ۲۸ میلی‌متر، ۵۰ ژول (۳/۰۵ درصد) و نقطه کمانش ۲۴ کیلو نیوتن (۲۰ درصد) کمتر است.

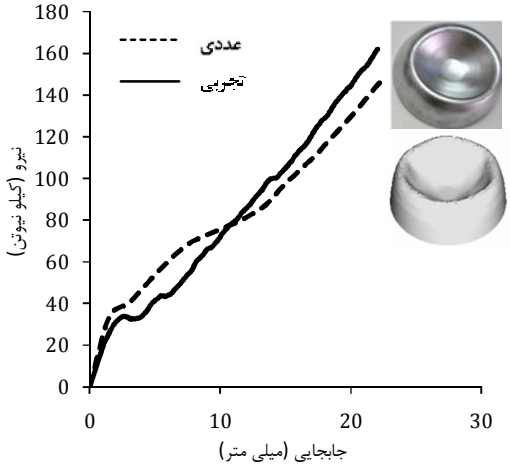
برای بررسی بهتر نتایج و مقایسه مطلوب‌تر تمام نمودارهای نیرو-جابه‌جایی در یک نمودار مطابق شکل ۲۰ مشخص شده است. در جدول ۱ انرژی کرنشی تمامی نمونه‌ها در جابه‌جایی‌های مشخص ۱۲/۸و ۲۸ میلی‌متر آورده شده است. جابه‌جایی ۱۲/۸ میلی‌متر، معیار سنجشی برای مقایسه تمامی نمونه‌ها از نظر میزان جذب انرژی در نظر گرفته شده است. در این جابه‌جایی نیم‌کره شیاردار کمترین و استوانه بدون شیار بیشترین انرژی را جذب می‌کنند.



شکل ۱۹ نمودار تجربی نیرو- جابه‌جایی برای دو مخروط *D*60-*d*30-*h*85.5-*t*2 بدون شیار و شیاردار



شکل ۲۰ نمودار نیرو- جابه‌جایی برای پوسته‌های نیم‌کروی، استوانه ای و مخروطی نمونه‌های بدون شیار و شیاردار



شکل ۲۱ مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه نیم‌کره *D*100-*d*96-*h*50.5-*t*2 بدون شیار

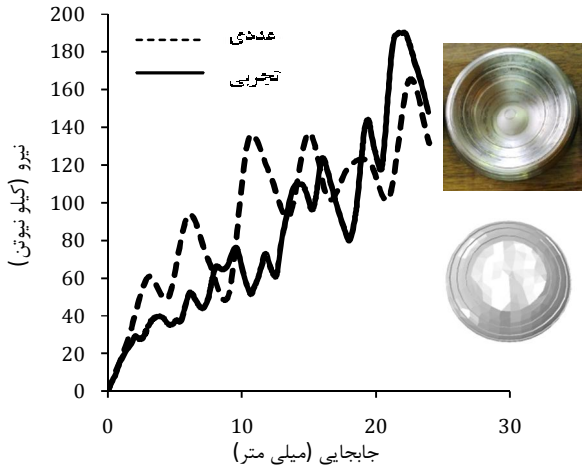
جدول ۱ مقایسه میزان جذب انرژی و بار کمانش نمونه‌های مورد آزمایش

هندسه نمونه	شناسه نمونه	جابجایی (میلی‌متر)	انرژی بر واحد جرم (ژول بر گرم)	انرژی کرنشی (ژول)	اختلاف انرژی بین دو حالت با و بدون شیار (ژول)	اختلاف انرژی بین دو حالت با و بدون شیار (درصد)	بارکمانش (کیلو نیوتن)	اختلاف بار کمانش بین دو حالت با و بدون شیار (درصد)
نیم‌کره بدون شیار	*D*100-*d*96-*h*50.5-*t*2	۲۸	۱۲/۲۹	۲۲۸۷	۹۷	۴/۲۵	۳۰	۱۳/۳
نیم‌کره شیاردار	*D*100-*d*96-*h*50.5-*t*2	۲۸	۱۳/۰۳	۲۱۹۰	–	–	۲۶	–
نیم‌کره بدون شیار	*D*100-*d*96-*h*50.5-*t*2	۱۲/۸	۳/۴۰	۶۳۴	۱۷	۲/۶۸	–	–
نیم‌کره شیاردار	*D*100-*d*96-*h*50.5-*t*2	۱۲/۸	۳/۶۷	۶۱۷	–	–	–	–
استوانه بدون شیار	*D*40-*d*36-*h*97.05	۱۲/۸	۷	۱۳۰۲	۱۹۷	۱۵/۱۳	۱۳۹	۱۱/۵۱
استوانه شیاردار	*D*40-*d*36-*h*97.05	۱۲/۸	۶/۵۷	۱۱۰۵	–	–	۱۲۳	–
مخروط بدون شیار	*D*60-*d*30-*h*85.5-*t*2	۲۰	۸/۸	۱۶۳۸	۵۰	۳/۰۵	۱۲۰	۲۰
مخروط شیاردار	*D*60-*d*30-*h*85.5-*t*2	۲۰	۹/۴۵	۱۵۸۸	–	–	۹۶	–
مخروط بدون شیار	*D*60-*d*30-*h*85.5-*t*2	۱۲/۸	۹/۹۴	۱۲۹۱	۳۷۰	۲۸/۶۵	–	–
مخروط شیاردار	*D*60-*d*30-*h*85.5-*t*2	۱۲/۸	۵/۴۸	۹۲۱	–	–	–	–

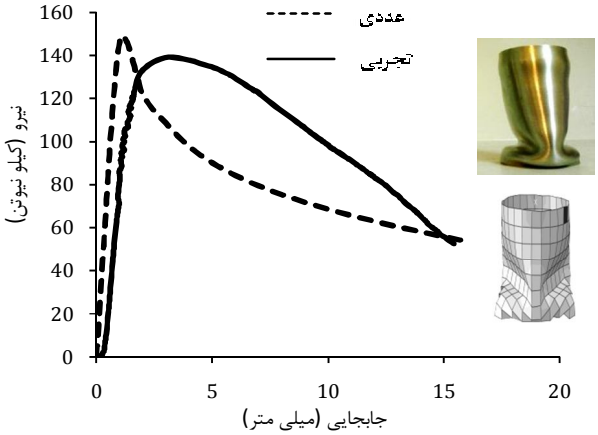
۷- مقایسه نتایج تجربی و عددی

در این بخش به منظور بررسی صحت و دقت تحلیل‌های عددی انجام شده، نتایج عددی و تجربی برای نمونه‌های مختلف در شکل‌های ۲۱ تا ۲۶ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در این شکل‌ها نمونه‌های واقعی تست گرفته شده و نمونه‌های بررسی شده در نرم‌افزار آباکوس به صورت گرافیکی نشان داده شده اند. در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ نتایج عددی و تجربی برای نیم‌کره با و بدون شیار آورده شده‌اند و در شکل‌های ۲۳ و ۲۴ نیز نتایج تجربی و عددی برای استوانه‌ی شیاردار و بدون شیار با هم مقایسه شده‌اند.

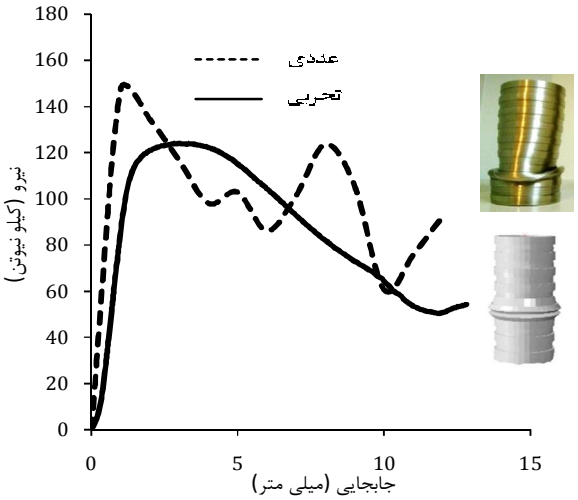
همچنین در شکل‌های ۲۵ و ۲۶ مقایسه‌ای بین مخروط شیاردار و بدون شیار به صورت تجربی و عددی انجام شده است. در صورت وجود تقدیر و تشکر و پیوست در مقاله، به ترتیب در انتهای مقاله و پس از لیست علایم و نشانه‌ها آورده می‌شود. باید به پیوست‌ها در متن مقاله اشاره و ارجاع شده باشد.



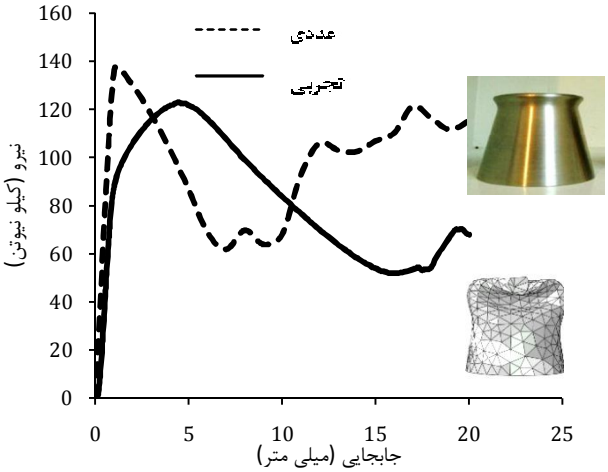
شکل ۲۲ مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه نیم‌کره $D100$-$d96$-$h50.5$-$t2$ شیاردار



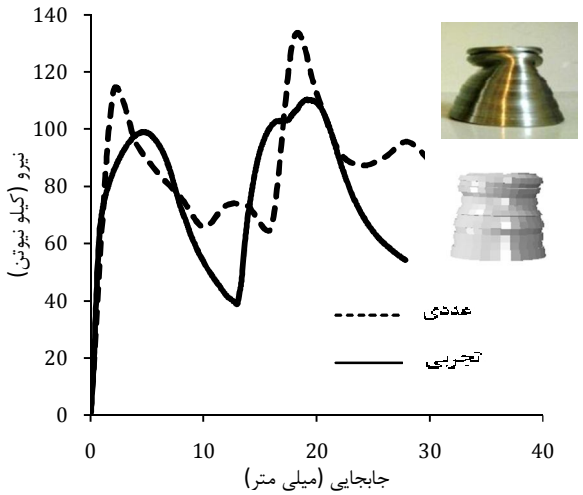
شکل ۲۳ مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه استوانه $D40$-$d36$-$h97.05$-$t2$ بدون شیار



شکل ۲۴ مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه استوانه $D40$-$d36$-$h97.05$-$t2$ شیاردار



شکل ۲۵ مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه مخروط $D60$-$d30$-$h85.5$-$t2$ بدون شیار



شکل ۲۶ مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه مخروط $D60$-$d30$-$h85.5$-$t2$ شیاردار

۸- نتیجه‌گیری

در این تحقیق رفتار کمانشی و جذب انرژی پوسته‌های نیمه‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی ساخته شده از فولاد ضد زنگ SS304L تحت بار محوری به صورت تجربی و عددی بررسی شد. با توجه به تحلیل‌های عددی و تجربی، نتایج زیر به دست آمد.

۱- ایجاد شیار، در پوسته‌های نیم‌کروی، استوانه‌ای و مخروطی، کاهش بار کمانش و کنترل جذب انرژی (نه به معنای جذب انرژی بیشتر) را به همراه دارد.

۲- استفاده از شیار در پوسته‌ها به دلیل کاهش در ضربه اولیه و نقطه کمانش (در نیم‌کره ۱۳/۳ درصد، در استوانه ۱۱/۵۱ درصد و در مخروط ۲۰ درصد) و در ادامه طراحی مناسب بدنه‌ی سازه به منظور جذب انرژی بیشتر، منجر به حداقل شدن انتقال ضربه به سازه‌های متصل به آن می‌شود.

۳- در بارگذاری محوری پوسته‌های نیم‌کروی بدون شیار از جنس فولاد ضد زنگ SS304L، با افزایش ضخامت و ارتفاع مقدار نیروی اعمالی جهت تغییر شکل نیم‌کره هم افزایش می‌یابد.

۴- در بارگذاری محوری پوسته‌های نیم‌کروی شیاردار از جنس فولاد ضد زنگ SS304L، با افزایش ضخامت بار کمانش افزایش پیدا می‌کند. همچنین رفتار نیم‌کره شیاردار با تغییرات بیشتری در ضخامت‌های بالاتر همراه است.

۵- در استوانه شیاردار همانند نیم‌کره و مخروط شیاردار، در فاصله ۸ میلی‌متر، نسبت l/L، 1 به ۴ مقدار مناسبی جهت فشردگی منظم شیارها می‌باشد.

۶- در بارگذاری محوری پوسته‌های از جنس SS304L، در جابه‌جایی کم (۱۵ میلی‌متر)، بیشترین بار کمانش را استوانه بدون شیار داشته و نیم‌کره شیاردار دارای کمترین بار کمانش می‌باشد.

۷- بیشترین مقدار جذب انرژی و کمترین انتقال را استوانه بدون شیار و کمترین میزان جذب انرژی و بیشترین انتقال را نیم‌کره شیاردار، دارا می‌باشند.

۸- نتایج عددی با نتایج تجربی در بسیاری از موارد نزدیکی خوبی با هم دارند. لذا می‌توان از نتایج عددی مشروط به مدل سازی و تحلیل صحیح، به خوبی استفاده کرد.

۹- مراجع

[1] M. Shariati, H.R. Allahbakhsh, Numerical and experimental investigations on the buckling of steel semi-spherical shells under various loadings, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 620-628, 2010.

[2] N.K. Gupta, N. Mohamed Shariff, R. Velmurugan, Experimental and theoretical studies on buckling of thin spherical shells under axial loads, *Mechanical Sciences*, Vol. 50, pp.422-432, 2008.

[3] S.N. Amiri, H.A. Rasheed, Plastic buckling of moderately thick hemispherical shells subjected to concentrated load on top, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 50, pp. 151–165, 2012.

[4] A.M. Bersani, I. Giorgio, G. Tomassetti, Buckling of an elastic hemispherical shell with an obstacle, *Continuum Mech. Thermodyn*, Vol. 10, pp.161-186, 2012.

[5] M. Shariati, M.M. Rokhi, Numerical and experimental investigations on buckling of steel cylindrical shells with elliptical cutout subject to axial compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 46, pp. 1251-1261, 2008.

[6] M. Shariati, M. Sedighi, J. Saemi, H.R. Eipakchi, H.R. Allahbakhsh, Numerical and experimental investigation on ultimate strength of cracked cylindrical shells subjected to combined loading, *Mechanika*, Vol. 84, No. 4, pp. 12-19, 2010.

[7] M. Shariati, A. Akbarpour, Buckling and post buckling investigation of thin walled shells contain elliptical and circular cutout, subjected to oblique loading, *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, Vol. 2, No. 9, pp. 9548-9557, 2012.

[8] S. Salehghaffari, M. Tajdari, F. Mokhtarnezhad, The collapse of thick-walled metal tubes with wide external grooves as controllable energy-dissipating devices, *Journal Mechanical Engineering Science*, Vol. 233, pp. 2465-2480, 2009.

[9] S. Salehghaffari, M. Tajdari, M. Panahi, F. Mokhtarnezhad, Attempts to improve energy absorption characteristics of circular metal tubes subjected to axial loading, *Thin-Walled Structures*, Vol. 48, pp. 379–390, 2010.

[10] Hosseinipour S.J., Daneshi G.H., Energy absorbtion and mean crushing load of thin-walled grooved tubes under axial compression, *Thin-Walled Structures*, Vol. 41, p.p. 31–46, 2003.

[11] Z. Li, J. Yu, L. Guo, Deformation and energy absorption of aluminum foam-filled tubes subjected to oblique loading, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol.54, pp. 48–56, 2012.

[12] A. Dadrasi, Numerical and experimental study on effect of rectangular cutout on buckling load of steel conical shells, *17th ISME conference*, Tehran, 2008. (In Persian)

[13] [13] N.K Gupta., N. Mohamed Sheriff, R. Velmurugan, A study on buckling of thin conical frusta under axial loads, *Thin-Walled Structures*, Vol. 44, pp. 986–996, 2006.

[14] A. Ghamarian, H.R. ZareiMohammad, T. Abadi, Experimental and numerical crashworthiness investigation of empty and foam-filled end-capped conical tubes, *Thin-Walled Structures*, Vol. 49, pp. 1312–1319, 2011.

[15] C. Thinvongpituk, V. Chomkwah, Experimental and numerical studies on the behavior of cylindrical and conical shells with varying thicknessalong the length subjected to axial compression, Vol. 10, Issue 4, Ver. 1, pp. 92-100, 2010.

[16] M. Tajdari, M. Azimi, M. Khoram, J. Eskandari Jam, Experimental and numerical studies on the behavior of cylindrical shells with triangular cutout subjected to axial compression, *Modares Mechanical Engineering Journal,* Vol. 13, No. 1, pp. 24-37, 2011. (In Persian)