

تعیین استحکام نهایی کمانش پوسته‌های جدار نازک فولادی با هندسه‌ی نیمه‌کروی تحت شرایط مختلف بارگذاری، به‌روش تجربی و عددی

محمود شریعتی (دانشیار)

حمیدرضا الله‌بخشی (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

در این نوشتار کمانش و پس‌کمانش نیمه‌کره‌های جدارنازک فولادی تحت شرایط مختلف بارگذاری، و به‌روش تجربی و عددی تحلیل شده است. همچنین تأثیر پارامترهای هندسی نیمه‌کره‌ها - از جمله شعاع، ضخامت، ارتفاع نیمه‌کره، تأثیر ایجاد گشودگی (سوراخ) مربعی و چگونگی اعمال نیروی فشاری - بر بار میانگین کمانش بررسی شده است. نیمه‌کره‌ها توسط صفحه‌ی صلب، ستون با مقطع دایره‌ای، مربعی، نوک کروی، صفحه‌ی سوراخ‌دار و توسط حلقه‌ی صلب بارگذاری شده‌اند. نیمه‌کره‌ها با ابعاد هندسی مختلف و به‌روش اسپینینگ^۱ ساخته شده‌اند. نتایج تجربی به‌کمک یک دستگاه سروهیدرولیک INSTRON ۸۸۰۲ به دست آمده‌اند. برای تمامی نمونه‌ها، نتایج عددی توسط نرم‌افزار ABAQUS استخراج، و با نتایج تجربی مقایسه شد. نتایج عددی و تجربی نزدیکی بسیار زیادی با هم دارند.

واژگان کلیدی: نیروی متوسط کمانش، نیمه‌کره‌ی جدارنازک، جاذب انرژی.

۱. مقدمه

نیمه‌کره‌های جدارنازک به‌دلیل قابلیت جذب انرژی بالایی که در تغییر شکل خمیری دارند بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. مطالعه‌ی رفتار کمانش آنها برای استفاده در مواردی مانند دماغه‌ی هواپیما، موشک‌های بالستیک، وسایل پرنده‌ی بازگشت به جو^۲ و زیردریایی‌ها ضروری است. در موشک‌های بالستیک، دماغه به‌هنگام رهاشدن و برخورد با هدف دچار کمانش می‌شوند.

تغییر شکل بزرگ پوسته‌های نیمه‌کروی که بین دو صفحه‌ی تخت فشرده می‌شوند با ایجاد چروک‌هایی در آن آغاز می‌شود. نتایج حاصل از آزمایش‌ها حاکی از آن است که در پوسته‌های نسبتاً کلفت، تغییر شکل متقارن است و قسمت اعظم نیرو به‌صورت لولاهای خمیری^۳ جذب می‌شود حال آن که اگر ضخامت به‌صورت قابل توجهی کاهش یابد، تغییر شکل به‌صورت تشکیل چند لوب غیرمتقارن دنبال می‌شود که دلیل آن شکل‌گیری لولاهای ثابت^۴ است. درمورد تغییر شکل پوسته‌های نیمه‌کروی، از دهه‌ی ۱۹۶۰ تاکنون بررسی‌های زیادی صورت گرفته است.

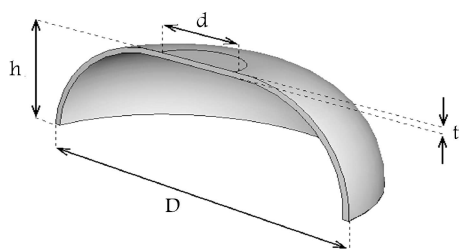
ابتدا درمورد نیمه‌کره‌های جدارنازک بارگذاری شده با ستون‌های متفاوت مطالعه‌ی تجربی صورت گرفت^[۱] و سپس این آزمایش‌ها به‌صورت تحلیلی بررسی شدند.^[۲] تغییر شکل بزرگ پوسته‌های نیمه‌کروی که بین دو صفحه‌ی صلب فشرده می‌شوند، اولین بار در سال ۱۹۷۲ بررسی شد^[۳] و طی آن مدلی تحلیلی ارائه شد که در آن برای ارتباط بین نیروی محوری و تغییر شکل نیمه‌کره رابطه‌ی ارائه شد. در آن تحقیق، تغییر شکل نمونه‌ها به‌صورت فشاری تا حدود یک‌دهم شعاع نیمه‌کره ادامه می‌یافت. پس

از آن تغییر شکل پوسته‌های نیمه‌کروی به‌صورت تحلیلی و تجربی برای محدوده‌ی $0.36 \leq \frac{R}{t} \leq 0.42$ بررسی شد.^[۴]

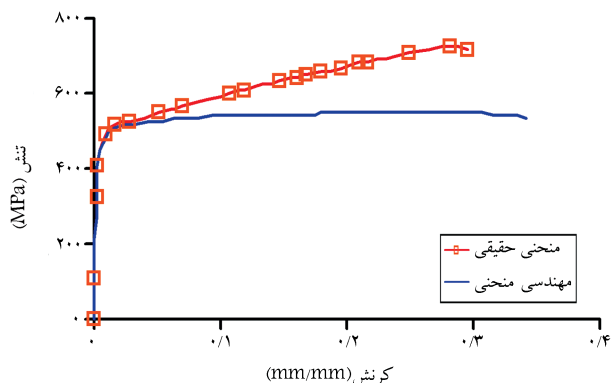
در دیگر بررسی مشابهی که در سال ۱۹۸۲ انجام گرفت،^[۵] محققین اثر اعمال بار فشاری بر پوسته‌های نیمه‌کروی متقارن را مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند. آنها همچنین نتایج حاصل از تحقیق خود را با نتایج بررسی‌های سال ۱۹۷۲ مقایسه کردند و نتیجه گرفتند که برای تغییر شکل‌های بزرگ، مادام که فاصله‌ی برخورد به‌اندازه‌ی شعاع نیمه‌کره باشد، نتایج با یکدیگر مطابقت دارد. همچنین محققین دیگری نیز نتایج حاصل از مطالعه‌ی تحلیلی نیمه‌ایستایی را که درمورد پوسته‌های نیمه‌کروی در محدوده‌ی $0.32 \leq \frac{R}{t} \leq 0.38$ انجام داده بودند^[۶] با نتایج حاصل از مطالعه‌های پیشین مقایسه کردند.

در سال ۱۹۹۹، در مطالعه‌ی تجربی که بر روی پوسته‌های نیمه‌کروی در محدوده‌ی $0.24 \leq \frac{R}{t} \leq 0.35$ انجام شد،^[۷] هر سه مرحله‌ی تغییر شکل - تخت‌شدگی موضعی^۵، فرورفتگی^۶ و تشکیل لوب‌های نامتقارن^۷ - مشاهده شده است. پس از آن در سال ۲۰۰۴، یک مدل دوبعدی عددی برای تغییر شکل متقارن پوسته‌های نیمه‌کروی تحت اثر بار محوری انجام شد^[۸] که در آن مطالعات عددی و تجربی به‌خوبی باهم مطابقت داشتند. هرچند در این بررسی به‌دلیل دوبعدی بودن، حالت گذار از تغییر شکل دوم به سوم ملاحظه نشد، اما بین نتایج عددی و تجربی در حالت گذار از تغییر شکل اول به دوم مقایسه‌ی خوبی انجام شد. بررسی تغییر شکل نامتقارن اما، به‌دلیل دوبعدی بودن، امکان‌پذیر نبود. به‌علاوه، محققین یک مدل سه‌بعدی برای محاسبه‌ی حالت گذار تغییر شکل مدها ارائه دادند.^[۹] برای انجام این

تاریخ: دریافت ۱۳۸۸/۱/۲۰، اصلاحیه ۱۳۸۹/۱/۱۸، پذیرش ۱۳۸۹/۲/۲۲.



شکل ۱. نمای برش خورده‌ی نمونه‌ها.



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش واقعی و مهندسی ماده‌ی مورد نظر.

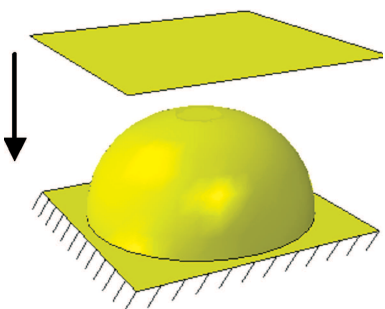
به قسمت خطی نمودار، مدول کشسانی (E) برابر با ۱۵۰ GPa و تنش تسلیم (σ_y) برابر با ۴۰۴ MPa به دست می‌آید. ضریب پواسون نیز ۰/۳۳ فرض شده است.

۳.۲. شرایط مرزی

برای اعمال بار، ورق صلبی در زیر نیم‌کره‌ها قرار داده می‌شود. سپس نمونه‌ها توسط یک صفحه‌ی صلب یا ستون صلب، جداگانه تحت نیروی محوری عمودی قرار می‌گیرند. به علاوه، همه‌ی درجات آزادی صفحه‌ی پایینی مقید شده و صفحه یا ستون بالایی فقط در جهت محوری آزادی حرکت دارد. به عنوان نمونه، در شکل ۳ شرایط تکیه‌گاهی برای بارگذاری توسط صفحه نشان داده شده است.

۴.۲. روش عددی به کار گرفته شده

برای تحلیل عددی نیم‌کره‌ها توسط نرم‌افزار ABAQUS از المان S۴R که یک المان خطی مستطیلی با چهارگره است و همچنین از المان غیرخطی مستطیلی S۸R۵ با هشت گره استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شده‌اند.^[۱۶] برای صفحه یا ستون صلب از المان R۳D۴ استفاده شده و با چند بار امتحان، چگالی مناسب مش‌بندی



شکل ۳. شرایط تکیه‌گاهی برای بارگذاری توسط صفحه.

کار، آنان پوسته‌های نیمه‌کروی را در محدوده‌ی $\frac{R}{t} \leq 219$ به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کردند که نتایج تجربی و تحلیلی به خوبی با هم مطابقت داشتند. در سال ۲۰۰۵، در تحقیقی تجربی که درخصوص پوسته‌های نیمه‌کروی ساخته شده از آلومینیوم انجام شد،^[۱۰] اثر سرعت بارگذاری بر روی کماتش پوسته‌ها مورد بررسی قرار گرفت. در تحقیقی دیگر نیز رفتار کماتش پوسته‌های نیمه‌کروی ساخته شده از آلومینیوم را در بارگذاری ضربه‌یی و در محدوده‌ی $\frac{R}{t} \leq 219$ به صورت تجربی و عددی بررسی شد^[۱۱] و اثر ضخامت، شعاع و ارتفاع پوسته نیز مورد سنجش قرار گرفت.

در بررسی تجربی و عددی که بر روی نیم‌کره‌های با نسبت $\frac{R}{t} \leq 45$ صورت گرفت،^[۱۲] مشاهده شد که همه‌ی نیم‌کره‌های مورد بررسی فقط حالت گذار اول را شامل می‌شوند. همچنین در تحقیقی تجربی که بر روی توپ‌های پینگ‌پونگ صورت گرفت،^[۱۳] پوسته‌ها توسط صفحه، ستون، و لوله‌ی صلب بارگذاری شدند و با مدل‌های تحلیلی پیشین^[۵،۳،۲] مقایسه شدند.

هدف اصلی تحقیقات انجام شده، مطالعه بر روی قابلیت جذب انرژی این پوسته‌هاست. این قابلیت جذب انرژی به خواص مکانیکی مواد، نحوه بارگذاری، چگونگی بارگذاری، هندسه‌ی جاذب انرژی و در نهایت سازوکار کماتش بستگی دارد.^[۱۴] تاکنون بیشتر مقالات ارائه شده به بارگذاری توسط صفحه‌ی صلب اختصاص دارد و مقالات کمی درمورد انواع دیگر بارگذاری ارائه شده است. یادآوری می‌شود که با تغییر نوع بارگذاری می‌توان به مقادیر بالاتر و همچنین کنترل شده‌یی از نیرو دست یافت. در این نوشتار به کمک نرم‌افزار ABAQUS، کماتش پوسته‌های نیمه‌کروی به منظور بررسی اثر نوع بارگذاری، ضخامت، ارتفاع و قطر پوسته تحلیل شده است. چندین پوسته با نسبت $\frac{R}{t} \leq 72$ مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در نهایت به کمک یک دستگاه سرویهیدرولیک INSTRON ۸۸۰۲ نمونه‌ها به صورت تجربی نیز مورد آزمایش قرار گرفتند، و سپس نتایج عددی و آزمایشگاهی با هم مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که نتایج تجربی و عددی بسیار سازگارند و بدین ترتیب می‌توان به نتایج عددی حاصل از نرم‌افزار ABAQUS اعتماد کرد.

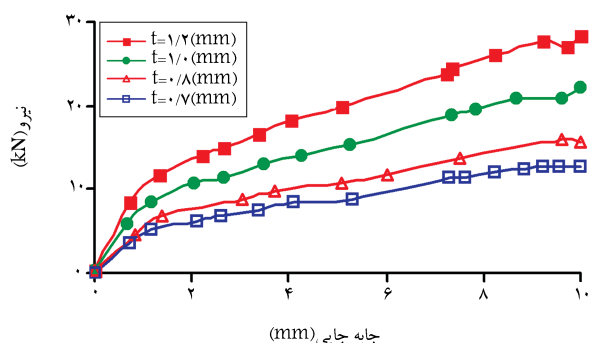
۲. تحلیل عددی

۱.۲. هندسه‌ی نمونه‌ها

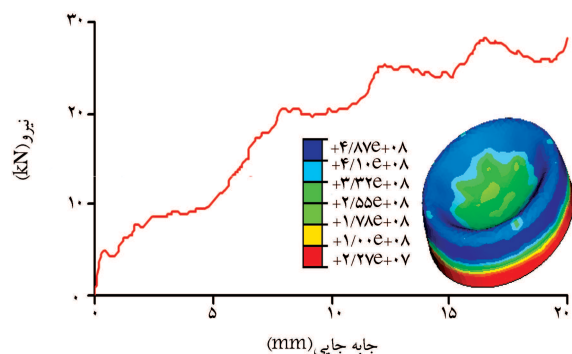
در این نوشتار پوسته‌های نیمه‌کروی با سه قطر (D) مختلف ۵۳، ۷۷ و ۱۰۲ میلی‌متر و با چهار ضخامت (t) متفاوت ۰/۷، ۰/۸، ۱ و ۱/۲ میلی‌متر تحلیل شده‌اند. در شکل ۱ هندسه‌ی نیم‌کره‌های مورد تحلیل نشان داده شده است که در آن نشان‌گر قطر بزرگ، d قطر کوچک، h ارتفاع و t ضخامت متوسط است. نام‌گذاری هندسی نمونه‌ها بدین صورت است که مقدار عددی هر پارامتر برحسب میلی‌متر در جلوی آن آورده شده است. مثلاً در نمونه‌یی که به صورت $D102 - d25 - t1 - h48$ نام‌گذاری می‌شود، قطر بزرگ پوسته ۱۰۲ میلی‌متر، قطر کوچک آن ۲۵ میلی‌متر، ضخامت متوسط پوسته ۱ و ارتفاع آن ۴۸ میلی‌متر است.

۲.۲. خواص مکانیکی نمونه‌ها

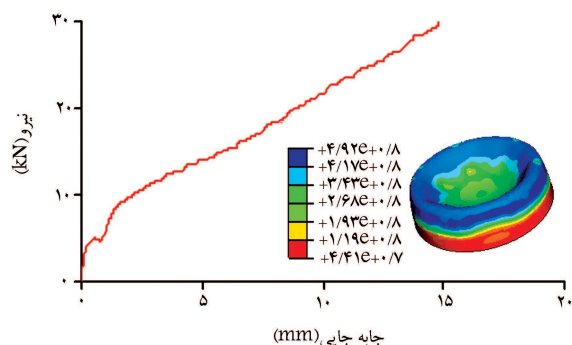
پوسته‌های نیمه‌کروی مورد مطالعه از آلیاژ فولاد ساخته شده است. خصوصیات مکانیکی فولاد مورد نظر طبق استاندارد ASTM E۸ و به وسیله‌ی INSTRON ۸۸۰۲ تعیین شده است.^[۱۵] نمودار تنش - کرنش واقعی و مهندسی و مقادیر مربوط به ماده‌ی مورد مطالعه در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه



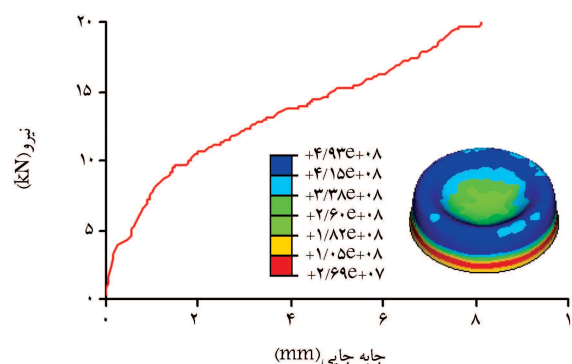
شکل ۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌های (D۵۳ - d۱۸ - h۲۸) با ضخامت‌های مختلف.



شکل ۷. نمودار نیرو - جابه‌جایی و کانتور تنش فون میسس برای نمونه‌ی (h۴۸ - D۱۰۲ - d۲۵ - t۱) برحسب پاسکال.



شکل ۸. نمودار نیرو - جابه‌جایی و کانتور تنش فون میسس برای نمونه‌ی (h۳۸ - D۷۷ - d۲۵ - t۱) برحسب پاسکال.



شکل ۹. نمودار نیرو - جابه‌جایی و کانتور تنش فون میسس برای نمونه‌ی (h۲۸ - D۵۳ - d۱۸ - t۱) برحسب پاسکال.

انتخاب شده است. برای تماس صفحه یا ستون صلب با نیم‌کره، ضریب اصطکاک برابر ۰/۱ در نظر گرفته شده است. مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که تغییر ضریب اصطکاک از ۰/۰۸ به ۰/۱۲ کم‌تر از ۱٪ در مقدار نیرو تأثیر می‌گذارد.^[۹]

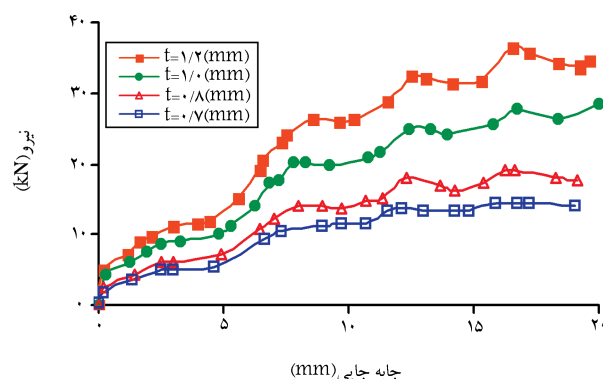
۵.۲. نتایج عددی

۱.۵.۲. بارگذاری توسط یک صفحه‌ی صلب

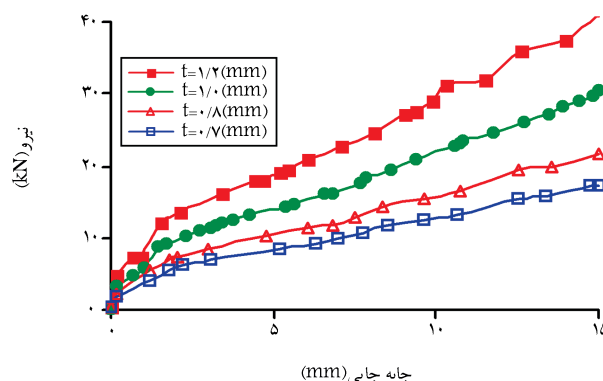
در این بخش نتایج عددی کمانش پوسته‌های نیمه‌کروی $D۵۳ - d۱۸ - h۲۸$ و $D۷۷ - d۲۵ - h۴۸$ با ضخامت‌های ۱/۲ و ۱/۸ و ۰/۷ و ۰/۱ میلی‌متر تحلیل، و نمودار نیرو - جابه‌جایی برای هرکدام ترسیم شده است. برای مقایسه‌ی نمودارهای نیرو - جابه‌جایی، تعریف پارامتری به نام «نیروی میانگین کمانش» -- که نشان‌دهنده‌ی ظرفیت تحمل نمونه در مقابل بار کمانش است -- ضرورت دارد. این پارامتر از طریق انتگرال‌گیری از سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی و تقسیم بر جابه‌جایی کل صفحه‌ی بالایی محاسبه می‌شود.

برای هر سه نوع نیم‌کره با ضخامت‌های مختلف (۱/۲ و ۰/۸ و ۰/۷)، نمودار نیرو - جابه‌جایی در شکل‌های ۴ تا ۶ ترسیم شده است. همچنین برای سه نیم‌کره، کانتور تنش فون میسس و نمودار نیرو - جابه‌جایی در شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. در شکل ۱۰ نیز نمودار مقدار نیروی متوسط کمانش نسبت به $\frac{R}{t}$ برای هر سه نمونه نشان داده شده است (R شعاع دایره‌ی پایینی نیم‌کره است).

در شکل ۱۱ نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نیم‌کره‌ی با مشخصات $D۱۰۲ - d۲۵ - h۴۸ - t۰/۸$ ، که از پایین برش خورده و توسط صفحه‌ی صلب به آن



شکل ۴. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌های (D۱۰۲ - d۲۵ - h۴۸) با ضخامت‌های مختلف.



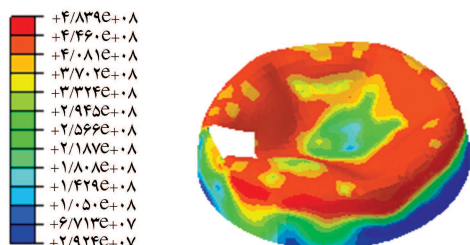
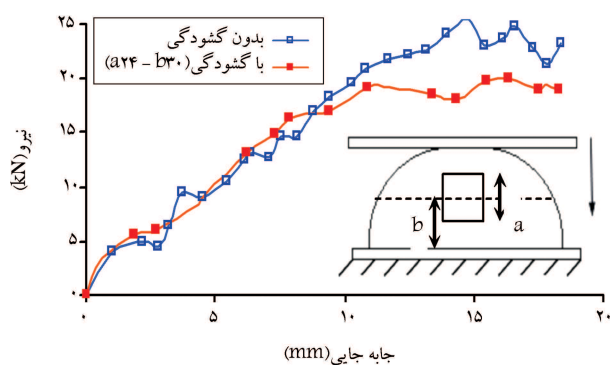
شکل ۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌های (D۷۷ - d۲۵ - h۳۸) با ضخامت‌های مختلف.

بررسی می‌کنیم. شکل ۱۳ نمودار نیرو - جابه‌جایی را برای یک نیم‌کره با گشودگی و بدون گشودگی نشان می‌دهد. شکل ۱۴ نیروی میانگین کمانش را برحسب a و b نشان می‌دهد. از شکل ۱۴ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش a و b بار میانگین کمانش کاهش می‌یابد. مقدار انرژی جذب‌شده و نیروی متوسط کمانش در جدول ۱ ارائه شده است.

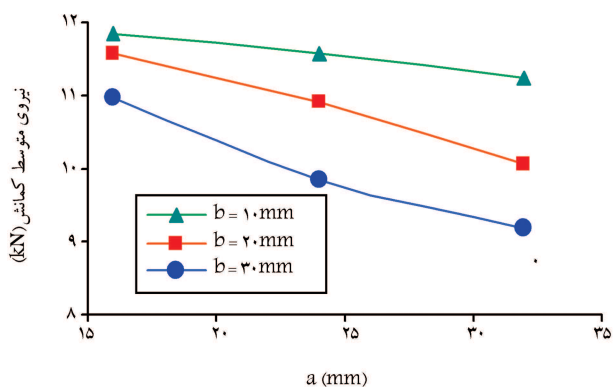
۲.۵.۲. تأثیر شرایط بارگذاری بر بار کمانش

در این بخش نیروی متوسط کمانش پوسته‌های نیمه‌کروی در حالت بارگذاری توسط ستون‌های صلب با مقاطع مختلف دایره‌ای، مربعی و نوک کروی بررسی می‌شود (شکل ۱۵).

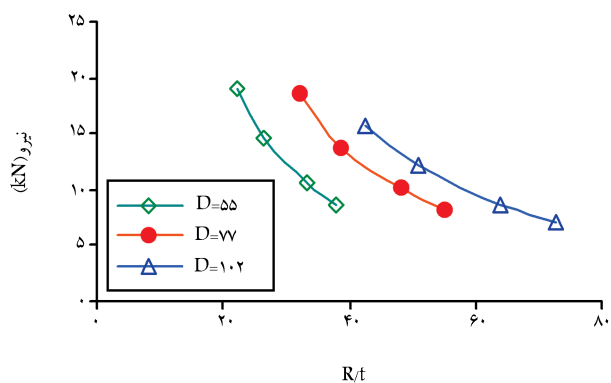
الف) بارگذاری توسط ستون صلب با مقطع دایره‌ای. در این بخش تأثیر شرایط بارگذاری بر بار کمانش بررسی می‌شود. بدین منظور، برچند نیم‌کره (مطابق شکل ۱۵ الف) توسط ستونی با مقطع دایره‌ای که قطر آن برابر با قطر دایره‌ی کوچک بالایی نیم‌کره ($d = 25 \text{ mm}$) است نیرو اعمال می‌شود. در شکل ۱۶ نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌ی $D102 - d25 - h48$ که توسط ستونی با مقطع



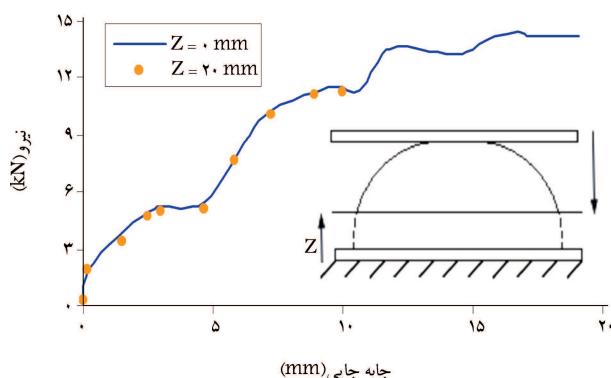
شکل ۱۳. مقایسه نمودار نیرو-جابه‌جایی برای نیم‌کره‌ی $D102 - d25 - t0.8 - h48$ در حالت بدون گشودگی و دارای گشودگی، و کانتور تنش فون میسس در حالت دارای گشودگی.



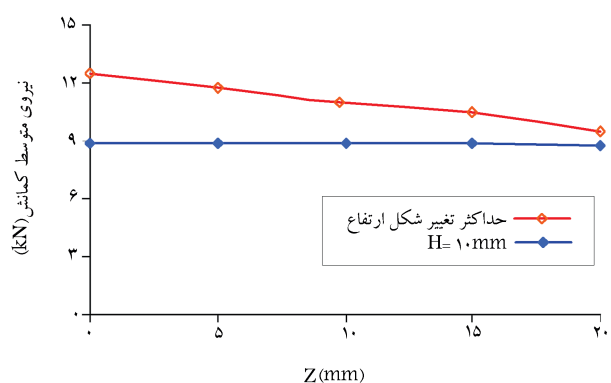
شکل ۱۴. تغییرات نیروی متوسط کمانش نیم‌کره‌های دارای گشودگی.



شکل ۱۰. تغییرات نیروی متوسط کمانش نسبت به R/t .



شکل ۱۱. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌ی $D102 - d25 - t0.8 - h48$ در حالت برش خورده.



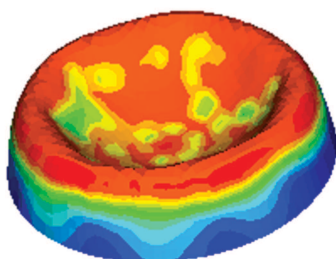
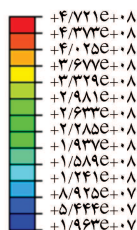
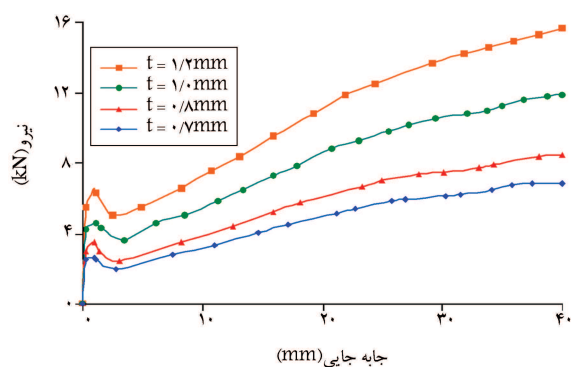
شکل ۱۲. مقایسه نیروی متوسط کمانش برای نمونه‌ی $D102 - d25 - t0.8 - h48$ در حالت برش خورده.

نیرو اعمال می‌شود، نشان داده شده است. چنان که مشاهده می‌شود با کم کردن ارتفاع نیم‌کره نمودار نیرو - جابه‌جایی آن تغییر محسوسی نمی‌کند و تنها ارتفاع فشردگی نیم‌کره کاهش می‌یابد. در شکل ۱۲ نمودار نیروی متوسط کمانش برای نمونه‌ی $D102 - d25 - t0.8 - h48$ در دو حالت بیشینه ارتفاع فشردگی و حالت ارتفاع فشردگی برابر ($h = 10 \text{ mm}$) نشان داده شده است. از این نمودار می‌توان نتیجه گرفت که در حالت بیشینه ارتفاع فشردگی با افزایش ارتفاع برش، نیروی متوسط کمانش کاهش می‌یابد اما در ارتفاع فشردگی برابر، نیروی متوسط کمانش ثابت می‌ماند.

در ادامه، نیم‌کره‌های دارای گشودگی مربعی را در بارگذاری با صفحه صلب

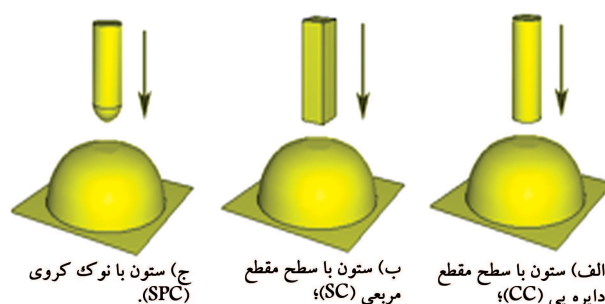
جدول ۱. نتایج تحلیل عددی کمانش پوسته‌های نیمه‌کروی فولادی.

نام‌گذاری نمونه‌ها	$\frac{R}{t}$	ارتفاع فشرده‌گی (mm)	انرژی (kN.mm)		بار میانگین کمانش (kN)	
			S4R	S8R5	S4R	S8R5
$D53 - d18 - t0.7 - h28$	37.85	10	86.5	84.7	8.6	8.5
$D53 - d18 - t0.8 - h28$	33.12	10	105.8	102.6	10.6	10.3
$D53 - d18 - t1.0 - h28$	26.5	10	146.7	140.3	14.7	14.0
$D77 - d25 - t0.7 - h38$	55	15	238.0	228.5	15.9	15.2
$D77 - d25 - t0.8 - h38$	48.12	15	294.0	284.5	19.6	19.0
$D77 - d25 - t1.0 - h38$	38.5	15	398.6	390.2	26.6	26.0
$D102 - d25 - t0.7 - h48$	72.85	20	205.7	201.2	10.3	10.1
$D102 - d25 - t0.8 - h48$	63.75	20	251.0	249.4	12.6	12.5
$D102 - d25 - t1.0 - h48$	51	20	373.4	367.1	18.7	18.4
$D102 - d25 - t0.8 - h48$ ($z = 10\text{ mm}$)	63.75	10	94	91	9.4	9.1
$D102 - d25 - t0.8 - h48$ ($z = 20\text{ mm}$)	63.75	15	165	162	11	10.8
$D102 - d25 - t0.8 - h48$ (گشودگی=10, b=32mm)	63.75	20	224	222	11.2	11.1
$D102 - d25 - t0.8 - h48$ (گشودگی=30, b=32mm)	63.75	20	182	180	9.1	9.0



شکل ۱۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه $D102 - d25 - h48$ در ضخامت‌های مختلف در حالت بارگذاری توسط ستون دایره‌ای و کانتور تنش فون میسز مربوطه برحسب پاسکال.

سه نوع بارگذاری دیگر، یعنی بارگذاری توسط ستونی با مقطع دایره‌ای و مربعی و همچنین بارگذاری توسط یک صفحه‌ی صلب، مشاهده می‌شود که قسمت ابتدایی نمودار در سه نوع بارگذاری قبلی به‌صورت خطی با شیب تند است، اما در بارگذاری توسط ستونی با نوک کروی این رفتار خطی مشاهده نمی‌شود. این پدیده نشان می‌دهد که در بارگذاری توسط ستونی با نوک کروی، حالت اول



شکل ۱۵. بارگذاری پوسته‌های نیمه‌کروی توسط ستون‌هایی با مقاطع متفاوت.

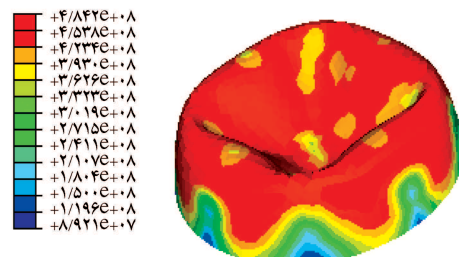
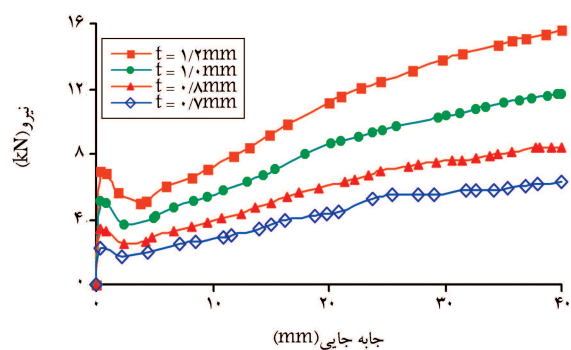
دایره‌ای بارگذاری شده، در ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است. در این نوع بارگذاری، حالت‌های تخت‌شوندگی موضعی و ایجاد مخروط درونی مشاهده می‌شود.

ب) بارگذاری توسط ستون صلب با مقطع مربع. برای بررسی تأثیر شرایط بارگذاری بر بار متوسط کمانش از ستونی با مقطع مربعی و با طول ضلع ۲۲ میلی‌متر (مطابق شکل ۱۵ ب) استفاده می‌شود که سطح مقطع آن برابر با سطح مقطع ستون دایره‌ای استفاده شده در بخش قبل است. در شکل ۱۷ نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌های $D102 - d25 - h48$ که توسط ستونی با مقطع مربعی بارگذاری شده در ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است. در این نوع بارگذاری مشاهده می‌شود که علاوه بر دو حالت تخت‌شوندگی موضعی و ایجاد مخروط درونی که در بارگذاری توسط یک ستون دایره‌ای ایجاد شد، حالت سوم - یعنی تشکیل لوب‌های نامتقارن - نیز ایجاد می‌شود.

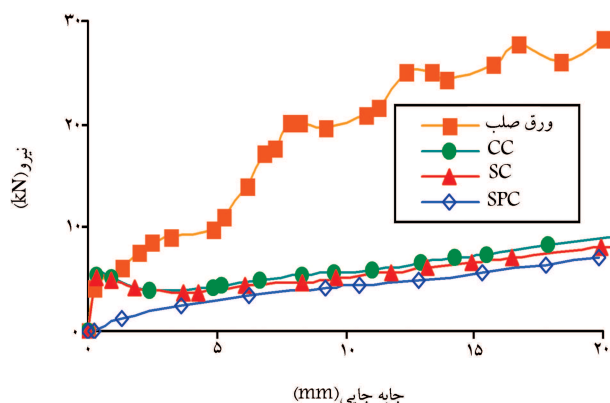
ج) بارگذاری توسط ستون صلب با نوک کروی. در این قسمت بارگذاری توسط ستونی با نوک کروی (مطابق شکل ۱۵ ج) انجام می‌شود. در شکل ۱۸ نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌های $D102 - d25 - h48$ در ضخامت‌های مختلف آورده شده است. از مقایسه‌ی نمودار نیرو - جابه‌جایی این بارگذاری با

جدول ۲. نیروی متوسط کمانش نیم‌کره‌های بارگذاری شده توسط ستون‌هایی با شکل سطح مقطع متفاوت.

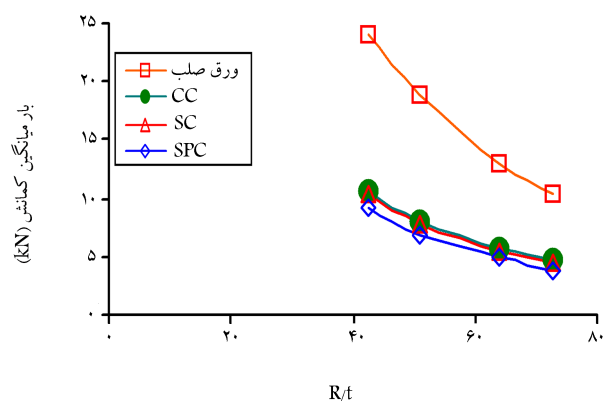
بار میانگین کمانش (kN)			ارتفاع تغییر شکل (mm)	نام گذاری نمونه‌ها
CC	SC	SPC		
۴٫۲	۴٫۲	۳٫۶	۲۵	$D55 - d18 - t0.7 - h28$
۵٫۲	۵٫۱	۴٫۳	۲۵	$D55 - d18 - t0.8 - h28$
۷٫۳	۷٫۱	۶٫۰	۲۵	$D55 - d18 - t1.0 - h28$
۹٫۸	۹٫۴	۷٫۸	۲۵	$D55 - d18 - t1.2 - h28$
۵٫۰	۴٫۷	۴٫۰	۳۵	$D77 - d25 - t0.7 - h38$
۶٫۱	۵٫۸	۴٫۹	۳۵	$D77 - d25 - t0.8 - h38$
۸٫۵	۸٫۱	۶٫۷	۳۵	$D77 - d25 - t1.1 - h38$
۱۱٫۱	۱۰٫۴	۸٫۶	۳۵	$D77 - d25 - t1.2 - h38$
۴٫۷	۴٫۴	۳٫۸	۴۰	$D102 - d25 - t0.7 - h48$
۵٫۷	۵٫۴	۴٫۹	۴۰	$D102 - d25 - t0.8 - h48$
۸٫۱	۷٫۸	۶٫۸	۴۰	$D102 - d25 - t1.0 - h48$
۱۰٫۶	۱۰٫۴	۹٫۱	۴۰	$D102 - d25 - t1.2 - h48$



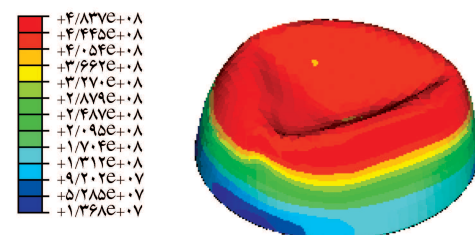
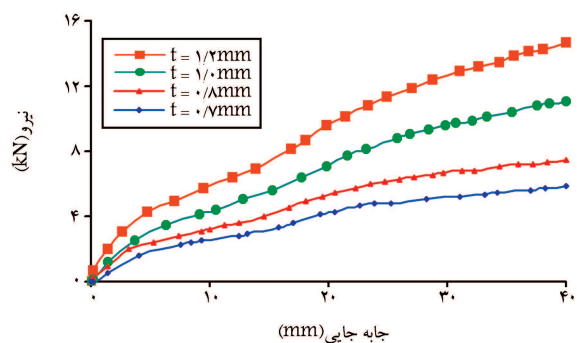
شکل ۱۷. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه $D102 - d25 - h48$ در ضخامت‌های مختلف در حالت بارگذاری به‌وسیله‌ی ستونی با مقطع مربعی و کانتور تنش فون میسز مربوطه برحسب پاسکال.



شکل ۱۹. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه $D102 - d25 - t1 - h48$ در بارگذاری‌های مختلف.

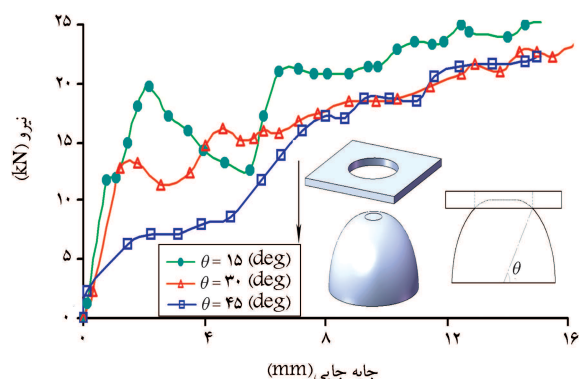


شکل ۲۰. نمودار تغییرات نیروی متوسط کمانش نسبت به R/t برای نمونه‌ی $D102 - d25 - t1 - h48$.

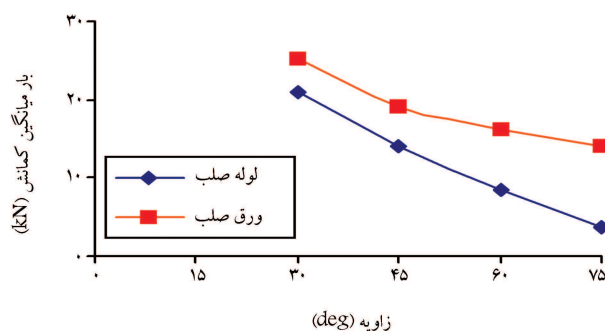


شکل ۱۸. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه $D102 - d25 - h48$ با ضخامت‌های مختلف در حالت بارگذاری به‌وسیله‌ی ستون با مقطع کروی و کانتور تنش فون میسز مربوطه برحسب پاسکال.

تغییر شکل (یعنی تخت‌شوندگی موضعی) مشاهده نمی‌شود و فقط حالت‌های ایجاد مخروط درونی و تشکیل لوب‌های نامتقارن مشاهده می‌شود. در جدول ۲ نیروی متوسط کمانش نیم‌کره‌های بارگذاری شده توسط ستون‌هایی با شکل مقاطع متفاوت نشان داده شده است. در شکل ۱۹ نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه $D102 - d25 - t1 - h48$ در حالت بارگذاری توسط صفحه‌ی صلب و نیز بارگذاری با ستون‌هایی با شکل سطح مقطع متفاوت آورده شده است. در شکل ۲۰



شکل ۲۲. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه $D102 - d25 - t0.8 - h48$ در حالت بارگذاری به وسیله صفحه‌ی سوراخ‌دار و کانتور تنش فون میسس مربوطه برحسب پاسکال.



شکل ۲۳. نمودار تغییرات نیروی متوسط کمانش نسبت به θ برای دو حالت بارگذاری توسط لوله و صفحه‌ی سوراخ‌دار صلب.

جدول ۳. نیروی متوسط کمانش در حالت بارگذاری توسط لوله و صفحه‌ی سوراخ‌دار صلب برای نمونه $D102 - d25 - t0.8 - h48$.

θ	ارتفاع تغییر شکل (mm)	لوله صلب	ورق صلب
۷۵	۱۵	۳/۷۵	۱۴/۲
۶۰	۱۵	۸/۴۶	۱۶/۲
۴۵	۱۵	۱۴/۲	۱۹/۲
۳۰	۱۵	۲۰/۹	۲۵/۳

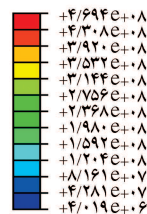
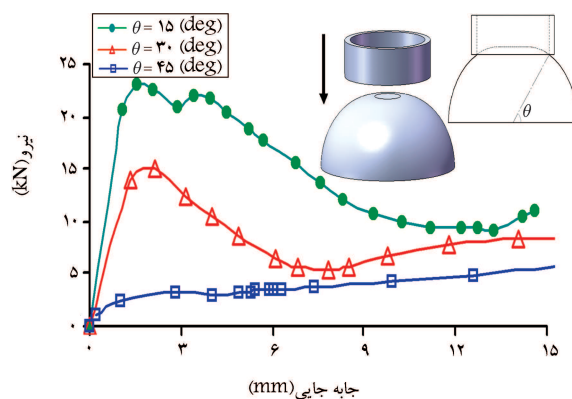
۳. نتایج تجربی

به منظور انجام آزمایشات تجربی، مطابق شکل ۲۴ از یک دستگاه سرو هیدرولیک INSTRON ۸۸۰۲ استفاده شد. در ابتدا برای اطمینان از دقت دستگاه و همچنین روش انجام آزمایش، سه نمونه‌ی مشابه با مشخصه‌ی $D53 - d18 - t1 - h28$ آزمایش، و نمودارها در یک دستگاه مختصات ترسیم شد. از مقایسه‌ی نمودارها و

نیز نمودار تغییرات نیروی متوسط کمانش ناشی از بارگذاری با ستون‌هایی با مقاطع متفاوت، نسبت به $\frac{R}{t}$ برای نمونه‌ی $D102 - d25 - h48$ در ضخامت‌های مختلف ترسیم شده است.

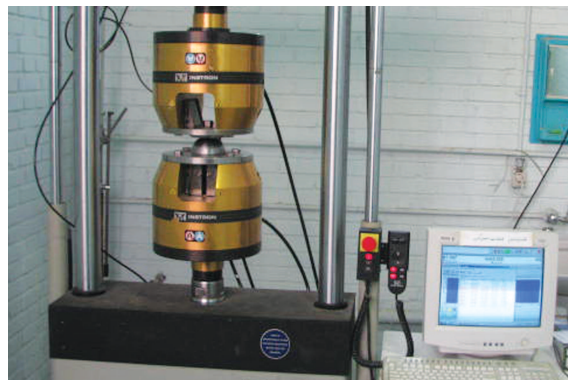
د) بارگذاری توسط لوله‌ی صلب دایره‌ای. در این بخش بارگذاری توسط یک لوله‌ی صلب دایره‌ای (مطابق شکل ۲۱) انجام می‌شود. در شکل ۲۱ نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه‌ی $D102 - d25 - t1 - h48$ برای بارگذاری توسط لوله‌ی با قطرهای داخلی مختلف ارائه شده است. در این بارگذاری مشاهده می‌شود که با کاهش θ بار میانگین کمانش افزایش می‌یابد به طوری که با کاهش زاویه از ۷۵ به ۶۰ درجه، بار میانگین کمانش ۱۲۵٪ افزایش می‌یابد و با کاهش زاویه از ۶۰ به ۴۵ درجه بار میانگین کمانش ۶۷٪ افزایش می‌یابد.

ه) بارگذاری توسط صفحه‌ی سوراخ‌دار. در ادامه برای بررسی تأثیر شرایط بارگذاری بر بار میانگین کمانش از یک صفحه‌ی سوراخ‌دار (مطابق شکل ۲۲) استفاده می‌شود. در شکل ۲۲ نمودار نیرو - جابه‌جایی نمونه‌ی $D102 - d25 - t1 - h48$ در حالت بارگذاری با صفحات صلب سوراخ‌دار ارائه شده است. با افزایش قطر سوراخ نیروی متوسط کمانش افزایش می‌یابد به طوری که با کاهش زاویه از ۷۵ به ۶۰ درجه، نیروی متوسط کمانش ۱۴٪ و با افزایش زاویه از ۶۰ به ۴۵ درجه نیروی متوسط کمانش ۱۸/۵٪ افزایش می‌یابد. در جدول ۳ مقدار بار میانگین کمانش نمونه‌ی $D102 - d25 - t1 - h48$ در بارگذاری توسط یک صفحه‌ی سوراخ‌دار و یک لوله‌ی استوانه‌ای صلب ارائه شده است. در شکل ۲۳ نمودار نیروی متوسط کمانش برحسب زاویه برای بارگذاری توسط یک صفحه‌ی سوراخ‌دار و یک لوله‌ی استوانه‌ای صلب نشان داده شده است.

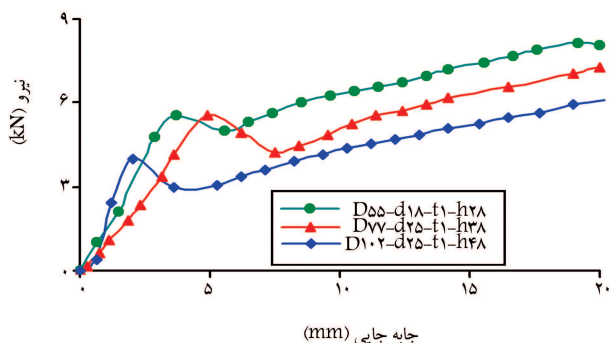


شکل ۲۱. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌ی $D102 - d25 - t0.8 - h48$ در ضخامت‌های مختلف در حالت بارگذاری به وسیله لوله صلب دایره‌ای و کانتور تنش فون میسس مربوطه برحسب پاسکال.

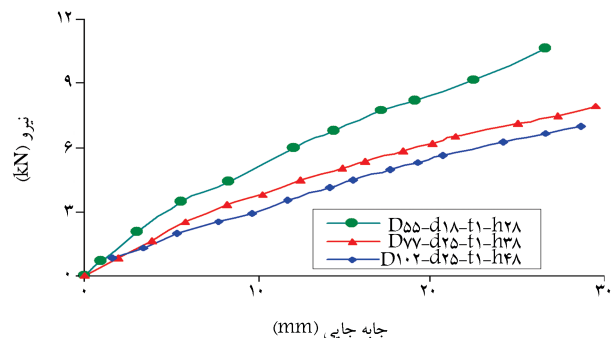
نیز محاسبه‌ی نیروی متوسط کماتش درمی‌یابیم که بیشینه خطا در آزمایش سه نمونه برابر ۱/۵٪ است. یکی از علل عمده‌ی این خطا وجود تفاوت‌های هندسی کوچک نمونه‌ها در حین ساخت است. بنابراین مشاهده می‌شود که آزمایش‌ها از دقت بسیار خوبی برخوردارند. در ادامه تعدادی از نتایج آزمایشات تجربی در شکل‌های ۲۵ تا ۳۱ آورده شده است.



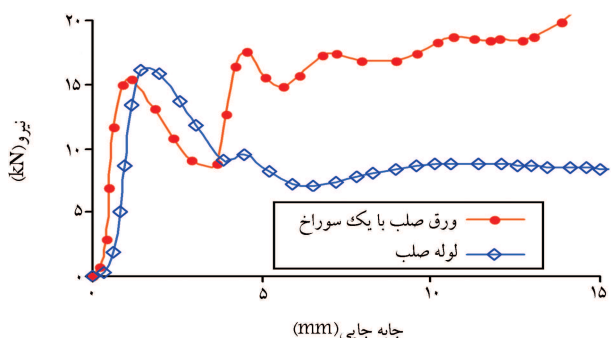
شکل ۲۴. یک دستگاه INSTRON ۸۸۰۲ در حال بارگذاری روی یک نیم‌کره به‌وسیله‌ی صفحه‌ی صلب.



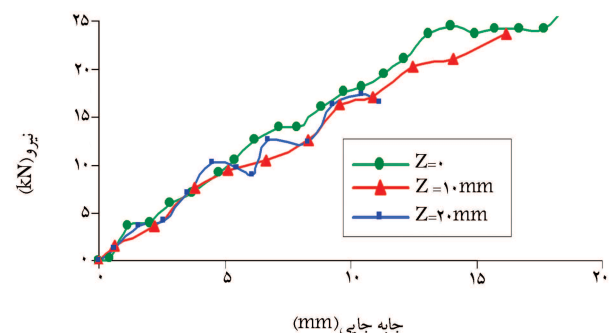
شکل ۲۷. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای سه نیم‌کره با قطرهای مختلف در حالت بارگذاری توسط ستونی با سطح مقطع دایره‌یی.



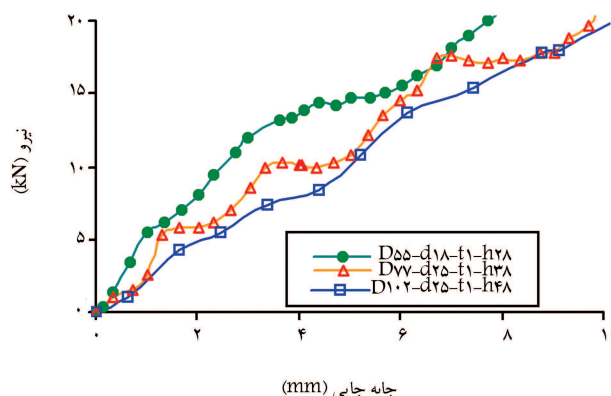
شکل ۲۸. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای سه نیم‌کره با قطرهای مختلف در حالت بارگذاری توسط ستونی با نوک کروی.



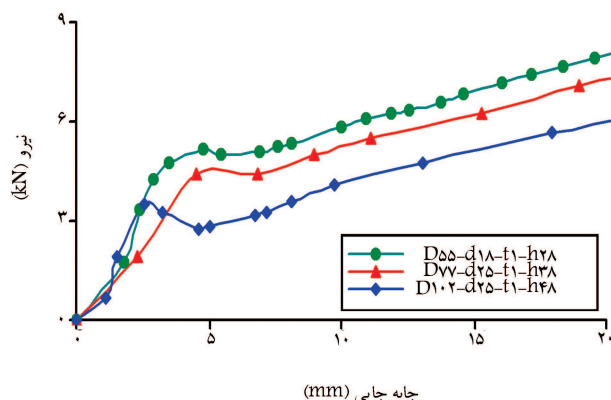
شکل ۲۹. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نمونه‌ی $D102 - d25 - t0.8 - h48$ در دو حالت بارگذاری توسط لوله و صفحه‌ی سوراخ‌دار صلب با قطر داخلی ۵ میلی‌متر.



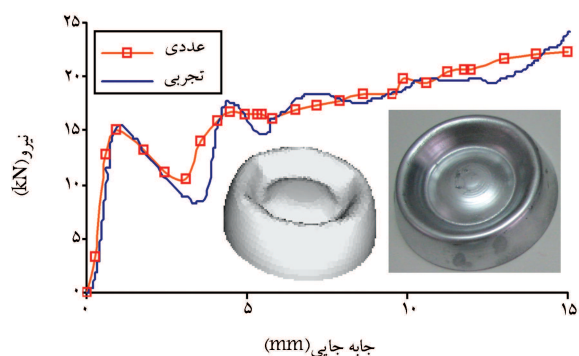
شکل ۳۰. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای نیم‌کره‌ی $D102 - d25 - t0.8 - h48$ با سه ارتفاع مختلف (برش‌خورده)، در حالت بارگذاری با صفحه‌ی صلب.



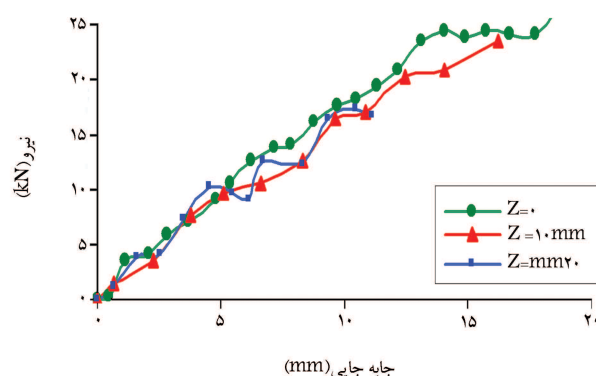
شکل ۲۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای سه نیم‌کره با قطرهای متفاوت در حالت بارگذاری توسط صفحه‌ی صلب.



شکل ۲۶. نمودار نیرو - جابه‌جایی برای سه نمونه با قطرهای مختلف در حالت بارگذاری توسط ستونی با سطح مقطع مربعی.



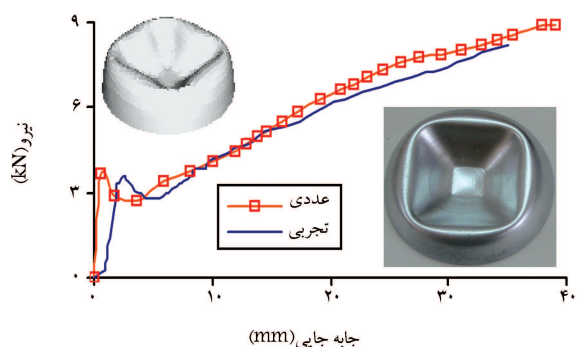
شکل ۳۴. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه‌ی h_{48} - $D_{102} - d_{25} - t_{0.8}$ در حالت بارگذاری توسط صفحه‌ی سوراخ‌دار.



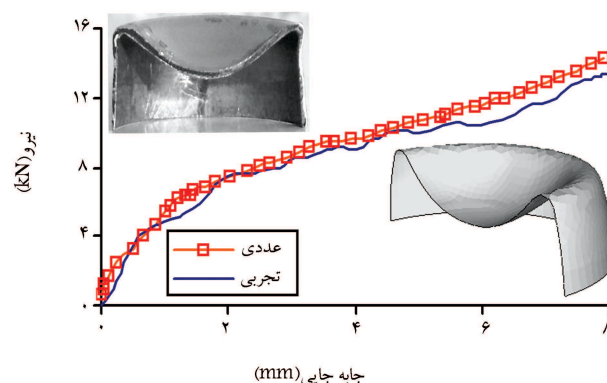
شکل ۳۱. نمودار نیرو- جابه‌جایی برای نیم‌کره‌ی $h_{48} - t_{0.8} - d_{25} - D_{102}$ دارای گشودگی در حالت بارگذاری با صفحه‌ی صلب.

۴. مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی

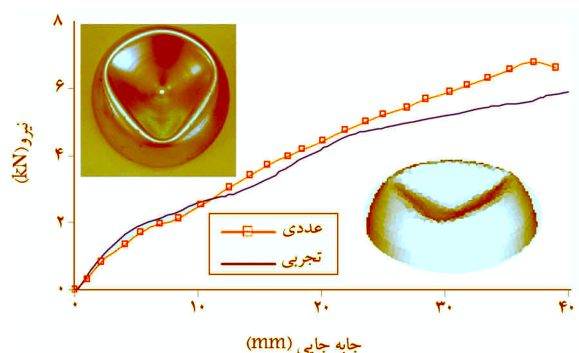
در این بخش به‌منظور بررسی صحت و دقت تحلیل‌های عددی انجام‌شده، نتایج عددی و تجربی برای نمونه‌های مختلف در شکل‌های ۳۲ تا ۳۹ با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در جداول ۴ تا ۶ و نیز نتایج عددی و تجربی برای نمونه‌های آزمایش‌شده آورده شده است. از جدول ۵ چنین نتیجه می‌شود که میانگین خطا برای المان SFR برابر ۵/۶۷٪ و برای المان SAR5 برابر ۴/۲۶٪ است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از تعداد المان برابر، المان‌های غیرخطی خطای کم‌تری دارند.



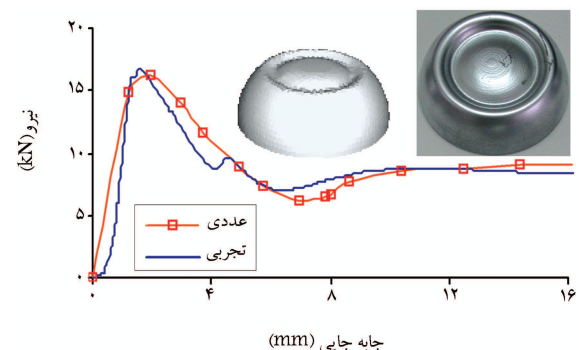
شکل ۳۵. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه‌ی h_{48} - $D_{102} - d_{25} - t_{0.8}$ در حالت بارگذاری با ستون مربعی.



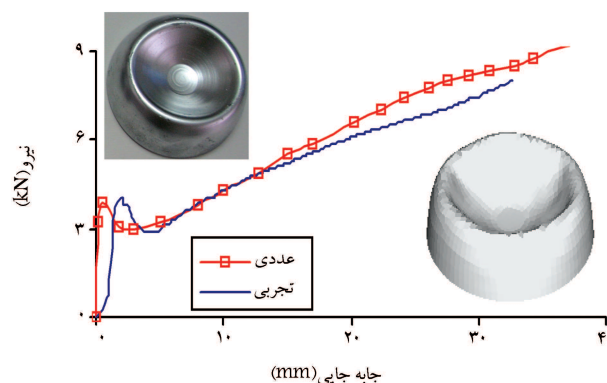
شکل ۳۲. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه‌ی h_{38} - $D_{53} - d_{18} - t_{0.8}$ در حالت بارگذاری با صفحه‌ی صلب.



شکل ۳۶. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه‌ی h_{48} - $D_{102} - d_{25} - t_{0.8}$ در حالت بارگذاری توسط ستون با نوک کروی.



شکل ۳۷. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه‌ی h_{48} - $D_{102} - d_{25} - t_{0.8}$ در حالت بارگذاری با لوله‌ی صلب.



شکل ۳۳. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه‌ی h_{48} - $D_{102} - d_{25} - t_{0.8}$ در حالت بارگذاری با ستون دایره‌یی.

۵. جمع‌بندی و بحث

۱.۵. رفتار کماتش پوسته

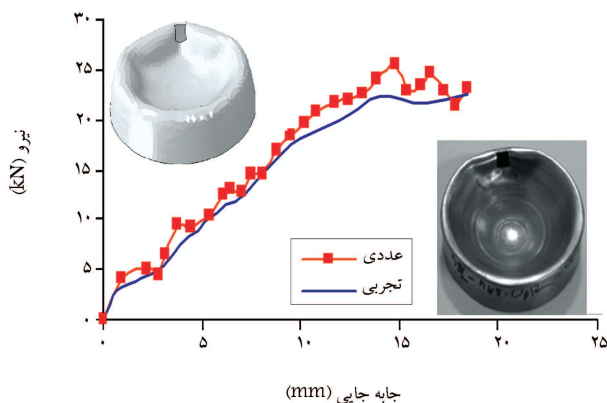
درخصوص رفتار کماتش نیم‌کره‌ها در حالت بارگذاری با یک صفحه‌ی صلب و ستون دایره‌یی مطابق شکل‌های ۳۲ و ۳۳ مشاهده می‌شود که برای این نمونه‌ها تنها یک حالت گذار مد تغییر شکل اتفاق می‌افتد. پارامترهای تأثیرگذار در حالت گذار عبارت‌اند از: ارتفاع فشردگی، ضخامت، نوع بارگذاری، شعاع نیم‌کره و خواص مکانیکی مواد. وقتی ارتفاع فشردگی کم است، پدیده‌ی تخت‌شوندگی موضعی اتفاق می‌افتد و با افزایش ارتفاع فشردگی، حالت گذار اول اتفاق می‌افتد و پدیده‌ی فرورفتگی ظاهر می‌شود. با افزایش ارتفاع فشردگی در نمونه‌های آزمایش‌شده در این تحقیق، با توجه به نوع بارگذاری حالت گذار دوم اتفاق می‌افتد و لوب‌های نامتقارن تشکیل می‌شوند.

۲.۵. نمودار نیرو - جابه‌جایی

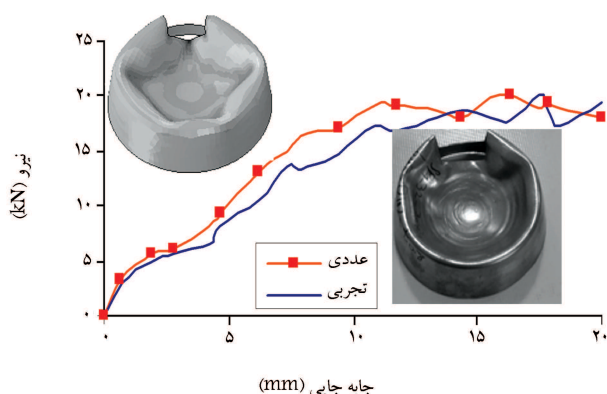
سازوکار کماتش نقش مهمی در قابلیت تحمل نیرو توسط نمونه‌ها ایفا می‌کند. از نمودارهای نیرو - جابه‌جایی نمونه‌ها در دو حالت عددی و تجربی و مقایسه‌ی آنها با یکدیگر چنین نتیجه می‌شود که نمودار تحلیل عددی همواره بالای نمودار تجربی واقع می‌شود (شکل‌های ۳۲ تا ۳۹). علت این امر آن است که در تحلیل عددی، جسم عاری از هرگونه عیب و نقص تلقی می‌شود، و لذا شیب نمودار نیرو - جابه‌جایی آن در بخش خطی بیشتر است؛ این امر با واقعیت سازگار نیست.

این نمودارها در تعیین انرژی جذب‌شده توسط هر نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد، به‌طوری‌که انرژی انتگرال‌گیری از سطح زیر نمودار نیرو - جابه‌جایی به دست می‌آید. به‌عنوان مثال، نمودار انرژی - جابه‌جایی برای نمونه‌ی $h_{38} - t_{10} - d_{25} - D_{77}$ در حالت بارگذاری توسط صفحه‌ی صلب در ضخامت‌های مختلف در شکل ۴۰ نشان داده است.

رفتار یک جاذب انرژی ایده‌آل، به‌صورت خطی افقی در نمودار نیرو - جابه‌جایی نشان داده می‌شود. بنابراین هرچه نمودار نیرو - جابه‌جایی دارای شیب کم‌تری باشد



شکل ۳۸. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه‌ی $h_{48} - t_{10} - d_{32} - D_{102}$ و دارای گشودگی $a=10^\circ$, $b=32\text{mm}$ در حالت بارگذاری با صفحه‌ی صلب.



شکل ۳۹. مقایسه‌ی نتایج تحلیل عددی و تجربی برای نمونه‌ی $h_{48} - t_{10} - d_{32} - D_{102}$ و دارای گشودگی $a=10^\circ$, $b=32\text{mm}$ در حالت بارگذاری با صفحه‌ی صلب.

جدول ۴. مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی بار کماتش پوسته‌های نیمه‌کروی در بارگذاری با ستون‌های متفاوت.

بار میانگین کماتش (kN)			بار میانگین کماتش (kN)			جابه‌جایی (mm)	نام گذاری نمونه‌ها
تجربی			عددی				
SC	CC	SPC	SC	CC	SPC		
۵٫۰	۵٫۲	۴٫۳	۵٫۲	۵٫۵	۴٫۶	۳۵	$D_{102} - d_{25} - t_{10} - h_{48}$
۵٫۳	۵٫۷	۴٫۶	۵٫۸	۶٫۱	۴٫۹	۳۰	$D_{77} - d_{25} - t_{10} - h_{38}$
۴٫۶	۴٫۷	۳٫۹	۴٫۸	۵٫۰	۴٫۰	۲۰	$D_{55} - d_{18} - t_{10} - h_{38}$

میانگین خطا برابر ۵/۵٪ است.

جدول ۵. مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی بار کماتش پوسته‌های نیمه‌کروی در بارگذاری با صفحه‌ی سوراخ‌دار و لوله‌ی صلب برای نمونه‌ی $h_{48} - t_{10} - d_{25} - D_{102}$.

$\frac{ F_{NUM} - F_{EXP} }{F_{NUM}} \times 100\%$	بار میانگین کماتش (kN)		جابه‌جایی عمودی (mm)	
	عددی	تجربی		
۵٫۴	۱۷٫۴	۱۶٫۵	۱۵	ورق صلب با یک سوراخ
۵٫۳	۹٫۳	۸٫۸	۱۵	لوله صلب

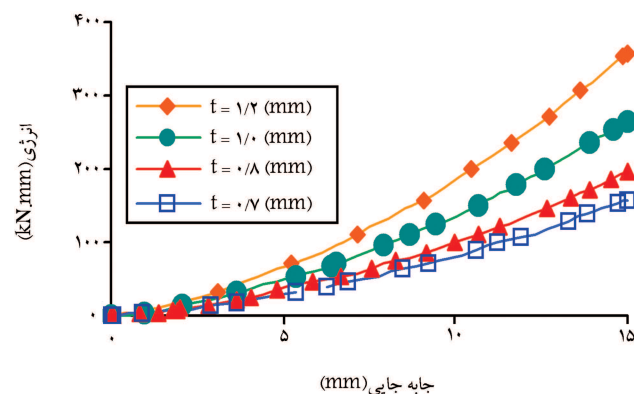
جدول ۶. مقایسه‌ی نتایج عددی و تجربی بار کمانش پوسته‌های نیمه‌کروی در بارگذاری با صفحه‌ی صلب.

نام گذاری نمونه‌ها	جابه جایی عمودی (mm)	بار میانگین کمانش (kN)				$\frac{ F_{NUM}-F_{EXP} }{F_{NUM}} \times 100\%$
		تجربی	المان SARD	المان SFR	المان SAR5	
$D53 - d18 - t_{0.7} - h28$	۸	۶٫۸	۷٫۲	۷٫۳	۷٫۴	۴٫۴
$D53 - d18 - t_{0.8} - h28$	۸	۸٫۷	۹	۹٫۲	۹	۳
$D53 - d18 - t_{1.0} - h28$	۸	۱۱٫۷	۱۲٫۳	۱۲٫۲	۱۲٫۳	۴٫۶
$D77 - d25 - t_{0.7} - h38$	۱۲	۸٫۴	۸٫۶	۸٫۸	۸٫۹	۱٫۹
$D77 - d25 - t_{0.8} - h38$	۱۲	۱۰٫۵	۱۰٫۸	۱۰٫۹	۱۰٫۷	۲٫۷
$D77 - d25 - t_{1.0} - h38$	۱۲	۱۳٫۲	۱۴	۱۴٫۱	۱۴٫۱	۵٫۶
$D102 - d25 - t_{0.7} - h48$	۲۰	۹٫۷	۱۰٫۱	۱۰٫۳	۱۰٫۳	۳٫۶
$D102 - d25 - t_{0.8} - h48$	۲۰	۱۱٫۸	۱۲٫۵	۱۲٫۶	۱۲٫۶	۵٫۳
$D102 - d25 - t_{1.0} - h48$	۲۰	۱۷٫۶	۱۸٫۴	۱۸٫۷	۱۸٫۷	۴٫۴
$D102 - d25 - t_{0.8} - h48$ ($z = 10\text{ mm}$)	۱۰	۸٫۷	۹٫۱	۹٫۴	۹٫۳	۴٫۳
$D102 - d25 - t_{0.8} - h48$ ($z = 20\text{ mm}$)	۱۵	۱۰٫۴	۱۰٫۸	۱۱	۱۱	۳٫۶
$D102 - d25 - t_{0.8} - h48$ (10° گشودگی, $b = 32\text{ mm}$)	۲۰	۱۰٫۶	۱۱٫۱	۱۱٫۲	۱۱٫۲	۵٫۴
$D102 - d25 - t_{0.8} - h48$ (30° گشودگی, $b = 32\text{ mm}$)	۲۰	۸٫۴	۹٫۰	۹٫۱	۹٫۱	۶٫۶

میانگین خطا برای المان SFR برابر ۵٫۶۷٪ و برای المان SAR5 برابر ۴٫۲۶٪ است.

که در نمودار شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، در نیم‌کره‌هایی که ضخامت‌های یکسان اما قطر بزرگ پایینی‌شان متفاوت است، هرچه قطر بزرگ پایینی نیم‌کره کوچک‌تر باشد نیروی متوسط بیشتری برای کمانش نیاز است؛ به‌طوری که با افزایش قطر بزرگ از ۵۳ به ۷۷ میلی‌متر، مقدار نیروی متوسط کمانش به‌ازای ۱۰ میلی‌متر جابه‌جایی ۷٪ کاهش می‌یابد و با افزایش قطر از ۷۷ به ۱۰۲ میلی‌متر، مقدار نیروی متوسط کمانش ۱۲٪ کاهش می‌یابد. همچنین از همان نمودار مشاهده می‌شود که در نیم‌کره‌ی کوچک با قطر بزرگ ۵۳ میلی‌متر، با افزایش ضخامت از ۰٫۷ به ۰٫۸ میلی‌متر، مقدار بار متوسط کمانش ۲۵٪ افزایش می‌یابد، حال آن که بار متوسط کمانش برای نیم‌کره‌ی متوسط با قطر ۷۷ میلی‌متر با همان افزایش ضخامت معادل ۲۲٪ و برای نیم‌کره‌ی بزرگ با قطر ۱۰۲ میلی‌متر معادل ۲۰٪ افزایش می‌یابد.

در جدول ۳ مقدار بار میانگین کمانش برای نیم‌کره‌های بارگذاری‌شده توسط لوله و صفحه‌ی صلب سوراخ‌دار آورده شده است. از جدول ۳ نتیجه می‌شود که با کاهش زاویه‌ی θ مقدار بار میانگین کمانش افزایش می‌یابد. چنان که در نمودار ۲۲ مشاهده می‌شود، در θ برابر بار میانگین کمانش برای پوسته‌های بارگذاری شده توسط صفحه‌ی سوراخ‌دار بیشتر از بار میانگین کمانش برای پوسته‌های بارگذاری شده توسط لوله‌ی صلب است. از بررسی شکل ۲۰ نتیجه می‌گیریم که در بارگذاری با ستون‌هایی با شکل سطح مقطع متفاوت، در حالت استفاده از ستون با سطح



شکل ۴۰. نمودارهای انرژی- جابه‌جایی برای نمونه‌ی $D77 - d25 - h38$ در ضخامت‌های مختلف.

و موازی محور طولی باشد، جاذب انرژی بهتری است.^[۱۷] در شکل‌های ۵ و ۶ ملاحظه می‌شود تمام نمونه‌ها دارای شیب نسبتاً زیادی هستند و جذب انرژی آن‌ها کم است. بنابراین جاذب انرژی مناسبی تلقی نمی‌شود. ولی اگر حالت گذار دوم -- یعنی مد تشکیل لوب‌های غیرمقارن -- در جسم ایجاد شود، شیب نمودار بعد از مد دوم کم می‌شود و جاذب انرژی خوبی تلقی می‌شود (شکل ۲۲). همان‌طور

۲. در ضخامت‌های یکسان هرچه قطر دایره‌ی پایینی نیم‌کره کوچک‌تر باشد، نیروی متوسط کمانش آن بیشتر است.
۳. در حالتی که بار فشاری توسط یک صفحه‌ی صلب به نیم‌کره اعمال شود، نسبت به حالتی که توسط یک میله به آن بار اعمال می‌شود، نیم‌کره می‌تواند بار کمانش بالاتری را تحمل کند.
۴. مقدار بار میانگین کمانش در بارگذاری با صفحه‌ی صلب سوراخ‌دار، بیشتر از بارگذاری توسط لوله‌ی صلب است.
۵. در بارگذاری با ستون‌های دایره‌ی شاهد مد شکل‌گیری لوب‌های نامتقارن نیستیم، در حالی که در ستون‌هایی با سطح مقطع مربعی و کروی این مد تغییر شکل دیده می‌شود.
۶. نیروی متوسط کمانش در بارگذاری با ستون‌های دایره‌ی، نسبت به ستون‌های با شکل سطح مقطع مربعی و کروی بیشتر است حال آن که نیروی متوسط کمانش برای ستون‌های کروی کم‌ترین مقدار را دارد.
۷. با کاهش ارتفاع نیم‌کره نمودار نیرو - جابه‌جایی تغییر نمی‌کند.
۸. با افزایش طول اضلاع گشودگی و فاصله‌ی مرکز گشودگی از کف نیم‌کره، بار میانگین کمانش کاهش می‌یابد.

مقطع دایره‌ی، نیروی متوسط بیشتری برای کمانش نیاز است. چنانچه از ستونی با سطح مقطع کروی استفاده شود، در مقایسه با ستون‌هایی با سطح مقطع دایره‌ی و مربعی، نیروی متوسط کم‌تری مورد نیاز است. همچنین با توجه به شکل‌های ۳۳، ۳۵ و ۳۶ می‌توان نتیجه گرفت که در حالت استفاده از ستون‌هایی با سطح مقطع مربعی و نوک کروی لوب‌های نامتقارن تشکیل می‌شود، حال آن که اگر از ستون‌های با سطح مقطع دایره‌ی استفاده شود شاهد این پدیده نخواهیم بود.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش رفتار کمانش پوسته‌های نیمه‌کروی ساخته‌شده از فولاد نرم، با قطرها و ضخامت‌های مختلف به صورت تجربی و عددی بررسی شد و نیروی متوسط کمانش آن‌ها به دست آمد. نتایج زیر از این تحلیل به دست آمد.

۱. نتایج عددی با نتایج تجربی نزدیکی بسیار خوبی دارند، لذا می‌توان از نتایج عددی مشروط به مدل‌سازی و تحلیل صحیح به خوبی استفاده کرد.

پانویس

1. Spinning
2. re-entry vehicles
3. rolling plastic hinges
4. stationary hinges
5. local flattening
6. inward dimpling
7. non-symmetric lobe formation

منابع

1. Lekie, F.A. and Penny, P.K. "Plastic instability of a spherical shell", In: Heyman, J.; Leckie, F.A. (editors), *Engineering Plasticity*, pp. 401-11 (1968).
2. Morris, A. and Calladine, C.R. "The local strength of thin spherical shell loaded radially through a rigid boss", In: Berman, placeI. (editor), *Proceeding of the first international conference on pressure vessel technology*, pp. 35-44 (1969).
3. Updike, D.P. "On the large deformation of a rigid plastic spherical shell compressed by a rigid plate", *Journal of engineering for Industry*, **94**, pp. 949-955 (1972).
4. Kitching, R.; Houston, R. and Johnson, W. "A theoretical and experimental study of hemi spherical shells subjected to axial loads between flat plates", *International Journal of Mechanical Sciences*, **17**, pp. 693-703 (1975).

5. De'Oliveria, J.G. and Wierzbicki, T. "Crushing analysis of rotationally symmetric plastic shells", *Journal of Strain Analysis*, **17**(4), pp. 229-36 (1982).
6. Kinkead, A.N.; Jennings, A.; Newell, J. and Leinster, J.C. "Spherical shells in inelastic collision with a rigid wall tentative analysis and recent quasi static testing", *Journal of Strain Analysis*, **29**(1), pp. 17-41 (1994).
7. Gupta, N.K.; Eswara Prasad, G.L. and Gupta, S.K. "Axial compression of metallic spherical shells between rigid plates", *International Journal of Thin-Walled Structures*, **34**(1), pp. 21-41 (1999).
8. Gupta, N.K. and Venkatesh, G. "Experimental and numerical studies of dynamic axial compression of thin walled spherical shells", *International Journal of Impact Engineering*, **30**(8-9), pp. 1225-40 (2004).
9. Gupta, N.K.; Mohamed Sheriff, N. and Velmurugan, R. "Experimental and numerical studies of buckling of thin spherical shells under axial loads", *International Journal of Mechanical Sciences*, **50**, pp. 422-432 (2008).
10. Easwara Prasad, G.L. and Gupta, N.K. "An experimental study of deformation modes of domes and large-angled frusta at different rates of compression", *International Journal of Impact Engineering*, **32**, pp. 400-415 (2005).
11. Gupta, N.K.; Mohamed Sheriff, N. and Velmurugan, R. "Experimental and numerical investigations into collapse

- behaviour of thin spherical shells under drop hammer impact", *International Journal of Solids and Structures*, **44**, pp. 3136-3155 (2007)
12. Gupta, P.K. and Gupta, N.K. "A study of axial compression of metallic hemispherical domes", *journal of materials processing technology*, **209**, pp. 2175-2179 (2009).
13. Ruan, H.H.; Gao, Z.Y. and Yu, T.X. "Crushing of thin-walled spheres and sphere arrays", *International Journal of Mechanical Sciences*, **48**, pp. 117-133 (2006).
14. Alghamdi, A.A.A. "Collapsible impact energy absorbers: An overview", *Thin-Walled Structures*, **39**, pp. 189-213 (2001).
15. ASTM A370-05, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.
16. ABAQUS 6.4 PR11 user's manual.
17. Mohamed Sheriff, N. and et al. "Optimization of thin conical frusta for impact energy absorption", *Thin Walled Structure*, **40**, pp. 653-666 (2008).

