

# تحلیل عددی و تجربی کمانش و پس کمانش پوسته های نیمه کروی فولادی

محمود شریعتی\*<sup>۱</sup> و حمیدرضا الله بخش<sup>۲</sup>

استاد دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شاهرود

دانش آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک - دانشگاه صنعتی شاهرود

(تاریخ دریافت ۸۸/۶/۲۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۹/۷/۱۵، تاریخ تصویب ۹۰/۱۰/۲۵)

## چکیده

در این مقاله کمانش و پس کمانش عددی و تجربی نیمکره های جدار نازک فولادی تحت نیروی فشاری تحلیل شده است. تاثیر پارامترهای هندسی نیمکره ها از جمله شعاع و ضخامت، شرایط تکیه گاهی و چگونگی اعمال نیروی فشاری بر بار میانگین کمانش بررسی شده است. همچنین با برش دادن قسمت بالای نیمکره به بررسی تاثیر ارتفاع نیمکره بر بار میانگین کمانش پرداخته شده و مقادیر انرژی جذب شده و نیروی میانگین کمانش برای نمونه ها به دست آمده است. نیمکره ها با ابعاد هندسی مختلف به روش اسپینینگ<sup>۱</sup> ساخته شده اند. نتایج تجربی به کمک یک دستگاه سرو هیدرولیک ۸۸۰۲ INSTRON به دست آمده اند. نتایج نشان می دهد که شرایط تکیه گاهی تاثیری بر بار کمانش ندارد. همچنین در ضخامت های یکسان هر قدر قطر نیمکره کمتر باشد بار کمانش آن بالاتر است. بعلاوه نتایج نشان می دهد که وجود یا عدم وجود بخش بالایی نیمکره تاثیری بر بار کمانش ندارد و هر قدر با برشهایی ارتفاع نیمکره کوتاهتر شود، بار کمانش آن افزایش می یابد. نتایج عددی برای همه نمونه ها توسط نرم افزار ABAQUS به دست آمده و با نتایج تجربی مقایسه شده اند. نتایج عددی و تجربی نزدیکی بسیار زیادی با هم دارند.

**واژه های کلیدی:** کمانش، جاذب انرژی، نیمکره جدار نازک، تحلیل عددی و تجربی

## مقدمه

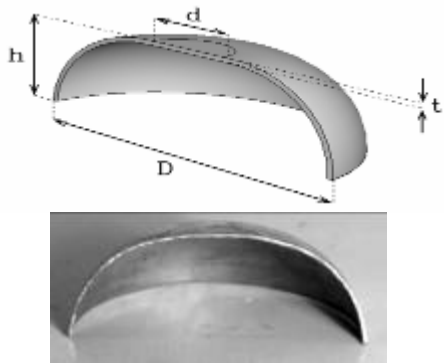
صفحه صلب فشرده می شوند، اولین بار توسط Updike [۱] بررسی شد و یک مدل تحلیلی ارائه گردید که در آن رابطه ای بین نیروی محوری و تغییر شکل نیم کره ارائه شد. در تحقیق آنها تغییر شکل نمونه ها به صورت فشاری تا حدود یک دهم شعاع نیمکره ادامه می یافت. تغییر شکل پوسته های نیمکروی توسط Kitching et al [۲] به صورت تحلیلی و تجربی برای محدوده R/t بین ۳۶۰ تا ۴۲۰ بررسی شد. یک مطالعه تحلیلی شبه استاتیک توسط Kinkead et al [۳] بر روی پوسته های نیمه کروی در محدوده R/t بین ۸ تا ۳۲ انجام شده است و نتایج تحقیق آنها با مطالعه های پیشین مقایسه شد. مطالعه تجربی بر روی پوسته های نیمه کروی با R/t بین ۱۵ تا ۲۴۰ توسط Gupta et al [۴] انجام شد که در آن هر سه مرحله تغییر شکل یعنی تخت شدگی محلی<sup>۴</sup>، فرورفتگی<sup>۵</sup> و تشکیل لوب های نا متقارن<sup>۶</sup> مشاهده شده است. Venkatesh و Gupta [۵] یک مدل دو بعدی عددی برای تغییر شکل متقارن پوسته های نیمه کروی در اثر بار

نیمکره های جدار نازک به دلیل قابلیت جذب انرژی بالایی که در تغییر شکل پلاستیک، دارند بسیار مورد استفاده قرار می گیرند. مطالعه بر روی رفتار کمانش آن ها برای استفاده در مواردی مانند دماغه هواپیما و یا موشک های بالستیک ضروری می باشد. در مورد موشک های بالستیک، دماغه آن ها از ترکیب پوسته نیمه کروی و مخروطی ساخته شده که به هنگام رها شدن و برخورد با هدف دچار کمانش می شوند. تغییر شکل بزرگ پوسته های کروی که بین دو صفحه تخت فشرده می شوند با ایجاد چروکهایی در آن آغاز می شود. آزمایشات نشان می دهد که در پوسته های نسبتاً کلفت، تغییر شکل به صورت متقارن است و قسمت اعظم نیرو به صورت لولاهای پلاستیک<sup>۲</sup> جذب می شود و حال آنکه اگر ضخامت به صورت قابل توجهی کاهش یابد، تغییر شکل به صورت شکل گیری چند لب غیر متقارن دنبال می شود که دلیل آن شکل گیری لولاهای ثابت<sup>۳</sup> می باشد. تغییر شکل بزرگ پوسته های نیمه کروی که بین دو

## تحلیل عددی

### هندسه نمونه ها

در این مقاله پوسته های نیمه کروی با سه قطر مختلف ( $D = ۱۰۲$  و  $۷۷$  و  $۵۳$  میلی متر) و با چهار ضخامت ( $۱$  و  $۰.۸$  و  $۰.۷$  و  $t = ۰$  میلی متر) تحلیل شده اند. شکل (۱) هندسه نیمکره های مورد تحلیل را نشان می دهد که در آن قطر بزرگ،  $d$  قطر کوچک،  $h$  ارتفاع و  $t$  ضخامت را نشان می دهد. نامگذاری هندسی نمونه ها در جلوی آن قرار گرفته است. مثلاً نمونه ای که به صورت  $D102-d25-t1-h48$  نامگذاری می شود به این صورت تفسیر می شود که  $۱۰۲$  و  $۲۵$  به ترتیب قطر پایینی و بالایی پوسته،  $۱$  ضخامت پوسته و  $۴۸$  ارتفاع آن می باشد.



شکل ۱. نمای برش خورده نمونه ها.

### خواص مکانیکی نمونه ها

پوسته های نیمه کروی مطالعه شده از آلیاژ فولاد ساخته شده است. خصوصیات مکانیکی فولاد مورد نظر بر طبق استاندارد ASTM E8 [۱۱] و به وسیله INSTRON ۸۸۰۲ تعیین شده است. نمودار تنش - کرنش واقعی و مهندسی و مقادیر مربوط به ماده مورد مطالعه در شکل (۲) نشان داده شده است. با توجه به قسمت خطی، نمودار مدول الاستیسیته برابر  $E = ۱۵۰ \text{ GPa}$  و تنش تسلیم برابر  $\sigma = ۴۰۴ \text{ MPa}$  به دست می آیند. به علاوه ضریب پواسون نیز  $۰.۳۳$  فرض شده است.

### شرایط مرزی

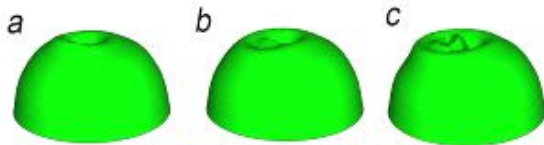
برای اعمال بار، دو ورق صلب در بالا و پایین نیمکره قرار داده شده و سپس نمونه ها تحت نیروی محوری عمودی قرار می گیرند. به علاوه همه درجات آزادی صفحه

محوری انجام دادند که مطالعات عددی و تجربی به خوبی با هم مطابقت داشتند. هر چند در این بررسی به دلیل دو بعدی بودن حالت گذار از مد تغییر شکل دوم به سوم ملاحظه نشد، اما یک مقایسه خوب بین نتایج عددی و تجربی در حالت گذار از مد تغییر شکل اول به دوم ایجاد شد و به دلیل دو بعدی بودن، تغییر شکل نامتقارن قابل بررسی نبود. بعلاوه [۶] Gupta یک مدل سه بعدی برای محاسبه حالت گذار تغییر شکل مدها به کار گرفت. او پوسته های نیمه کروی با  $R/t$  بین  $۲۸$  تا  $۲۱۹$  را به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کرد که نتایج تجربی و تحلیلی به خوبی با هم مطابقت داشتند. [۷] Gupta همچنین رفتار کمانش مخروطهای آلومینیومی با نوک کروی را به صورت تجربی و عددی بررسی کرد و مشاهده کرد که رفتار کمانش قسمت کروی شکل مرکب آنها شبیه به رفتار کمانش نیمکره های بررسی شده در کارهای قبلی آنها می باشد.

Shariati [۸] رفتار کمانش نیمکره های جدار نازک فولادی را در بارگذاری های مختلف به صورت تجربی و عددی بررسی کردند. وی همچنین تغییرات ضخامت در نیمکره ها را در هنگام کمانش بررسی کرد. Amiri [۹]- [۱۰] رفتار کمانش نیمکره های جدار نازک و ضخیم را تحت بارگذاری نقطه ایی به صورت تجربی و تحلیلی بررسی کرد و به کمک نرم افزار ABAQUS صحت نتایج تجربی و تحلیلی خود را بررسی کرد. وی از یک میله نوک تیز برای اعمال نیرو به بالای نیمکره استفاده کرد.

در این مقاله به کمک نرم افزار ABAQUS تحلیل کمانش پوسته های نیمه کروی به منظور بررسی نوع بارگذاری، ضخامت، قطر پوسته، شرایط تکیه گاهی و ایجاد یک گشودگی محوری با قطرهای مختلف در بالای نیمکره انجام شده است. چندین پوسته با نسبت  $R/t$  بین  $۲۲$  تا  $۷۲$  مورد بررسی قرار گرفته اند. در نهایت به کمک یک دستگاه سرو هیدرولیک INSTRON ۸۸۰۲ نمونه ها به صورت تجربی مورد آزمایش قرار گرفته و نتایج عددی و آزمایشگاهی با هم مقایسه شده اند. مشاهده می شود که نتایج تحلیلی و عددی با هم بسیار سازگار می باشند. در این بررسی ها تنها حالت گذار مد اول به دوم مشاهده گردید.

بروز جواب های غیر واقعی در تحلیل غیر خطی می شود . لازم است که بین پوسته و صفحه صلب یک تماس تعریف شود لذا نمی توان از حلگر Lanczos استفاده کرد [۱۲]. به عنوان مثال در شکل (۳) ، سه شکل مد برای نمونه D۱۰۲-d۲۵-t۱-h۳۸ نشان داده شده است . بعد از تحلیل Buckle ، از یک تحلیل غیر خطی برای به دست آوردن نمودار نیرو - جابجایی استفاده می شود .



شکل ۳: شکل مدهای نمونه D۷۷-d۲۵-t۱-h۳۸ (a) : شکل مد اول ، (b) شکل مد دوم و (c) شکل مد سوم.

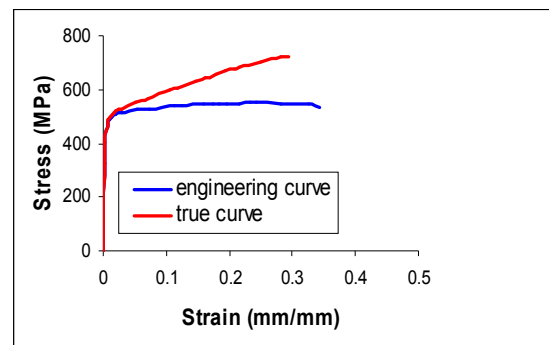
### نتایج عددی

در این بخش نتایج عددی کمانش پوسته های نیمه کره D۱۰۲ با ضخامت های ۱،۲ و ۱ و ۰،۸ و ۰،۷ میلیمتر تحلیل و نمودار نیرو - جابجایی برای هر کدام ترسیم شده است . برای مقایسه نمودارهای نیرو - جابجایی نیاز به تعریف پارامتری به نام نیروی میانگین کمانش است که نشان دهنده ظرفیت تحمل نمونه در مقابل بار کمانش می باشد . این پارامتر با انتگرال گیری از سطح زیر نمودار نیرو - جابجایی و تقسیم بر جابجایی کل صفحه بالایی محاسبه می شود. برای هر سه نوع نیمکره با ضخامت های مختلف (۱،۲ و ۰،۸ و ۰،۷ میلیمتر) ، نمودار نیرو - جابجایی در شکل های (۴) تا (۶) ترسیم شده است . همچنین برای سه نیمکره کانتور تنش Von Mises و نمودار نیرو - جابجایی در شکل (۷) تا (۹) نشان داده شده است . بعلاوه ، مقدار انرژی جذب شده و نیروی متوسط کمانش در جدول (۱) آورده شده است . همچنین در شکل (۱۰) نمودار مقدار نیروی متوسط کمانش نسبت به  $\frac{R}{t}$  برای هر سه نمونه نیمکره نشان داده شده است که R شعاع دایره پایینی نیمکره می باشد. رفتار یک جاذب انرژی ایده آل، به صورت یک خط افقی در نمودار نیرو - جابجایی است [۱۳] . بنابراین هر چه نمودار نیرو - جابجایی دارای شیب کمتری باشد و موازی محور طولی باشد، جاذب انرژی بهتری می باشد. در شکل های (۵) و (۶) ملاحظه می شود تمام نمونه ها دارای شیب نسبتاً

پائینی و بالایی به جز جهت محوری برای صفحه بالایی مقید شده است .

linear:

Stress (Mpa)	strain
0.00	0.0000
160.79	0.0011
253.16	0.0017
301.60	0.0020
361.52	0.0024



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

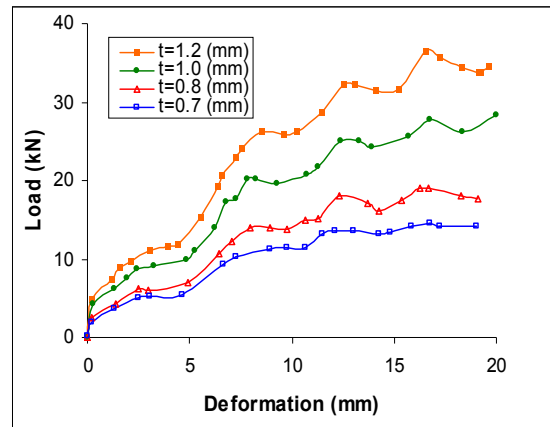
### روش عددی به کار گرفته شده

برای تحلیل عددی نیمکره ها از المان S۴R که یک المان خطی مستطیلی با چهار گره می باشد و همچنین از المان غیر خطی مستطیلی S۸R۵ با هشت گره استفاده شده و نتایج با هم مقایسه شده اند . برای صفحه صلب از المان R۳D۴ استفاده شده و با چند بار امتحان چگالی مناسب مش بندی انتخاب شده است . برای تماس صفحه صلب با نیمکره ضریب اصطکاک برابر ۰،۱ در نظر گرفته شده است . مطالعات انجام شده نشان می دهد که تغییر ضریب اصطکاک از ۰،۰۸ به ۰،۱۲ کمتر از ۱٪ در مقدار نیرو تأثیر می گذارد [۶] .

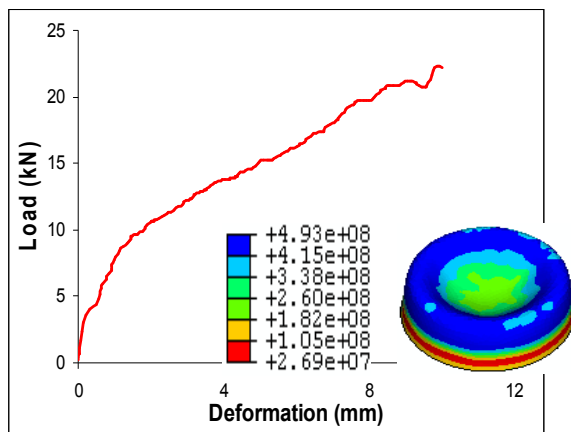
ابتدا باید حل مقدار ویژه برای همه نمونه ها انجام شود تا مقدار ویژه و شکل مدهای مربوطه به دست آید. حل مقدار ویژه مقدار بار کمانش را بیشتر از مقدار واقعی تخمین می زند؛ چون در این تحلیل خصوصیات پلاستیک مواد به کار گرفته نمی شود. مدهای اول معمولاً مقادیر ویژه کمتری دارند و کمانش معمولاً در این مدها اتفاق می افتد . برای حل مقادیر ویژه از مرحله ای با نام Buckle استفاده می شود که باید نتایج آن در تحلیل غیر خطی کمانش لحاظ شود. در غیر این صورت، نرم افزار امکان دارد شکل مدهای کمانش را به صورت اختیاری انتخاب کند که باعث

نمودار شکل (۱۰) نشان می دهد، درنیمکره های با ضخامت های یکسان، ولی با قطر بزرگ پایینی متفاوت، هر چه قطر بزرگ پایینی نیمکره کوچکتر باشد، نیروی متوسط بیشتری برای کمانش نیاز است؛ به طوری که با افزایش قطر بزرگ از ۵۳ به ۷۷ میلی متر، مقدار نیروی متوسط کمانش به ازای ۱۰ میلی متر جابجایی ۷٪ کاهش می یابد و با افزایش قطر از ۷۷ به ۱۰۲ میلی متر، مقدار نیروی متوسط کمانش ۱۲٪ کاهش می یابد. همچنین از همان نمودار مشاهده می شود که در نیمکره کوچک با قطر بزرگ ۵۳ میلی متر با افزایش ضخامت از ۰٫۷ به ۰٫۸ میلی متر، مقدار بار متوسط کمانش ۲۵٪ افزایش می یابد؛ در صورتی که برای نیمکره متوسط با قطر ۷۷ میلی متر با همان افزایش ضخامت، بار متوسط کمانش، ۲۲٪ و برای نیمکره بزرگ با قطر ۱۰۲ میلی متر، مقدار بار متوسط کمانش، ۲۰٪ افزایش می یابد.

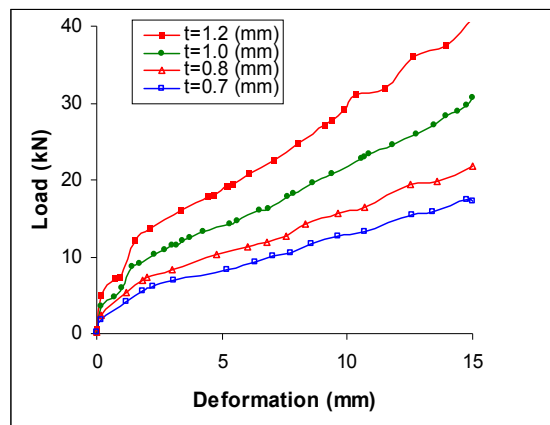
زیادی می باشند و جذب انرژی آن ها کم می باشد. بنابراین جاذب انرژی مناسبی تلقی نمی شود. ولی اگر جسم حالت گذار دوم یعنی مد تشکیل لوب های غیر متقارن در آن ایجاد شود شیب نمودار بعد از مد دوم کم می شود و جاذب انرژی خوبی تلقی می گردد.



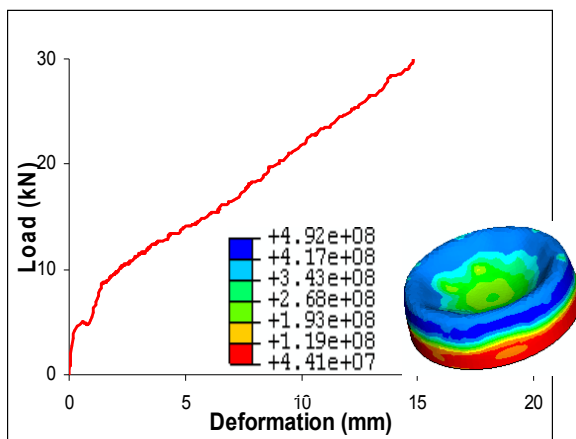
شکل ۴: نمودار نیرو- جابجایی برای نمونه های D102-d25-h48 با ضخامت های مختلف.



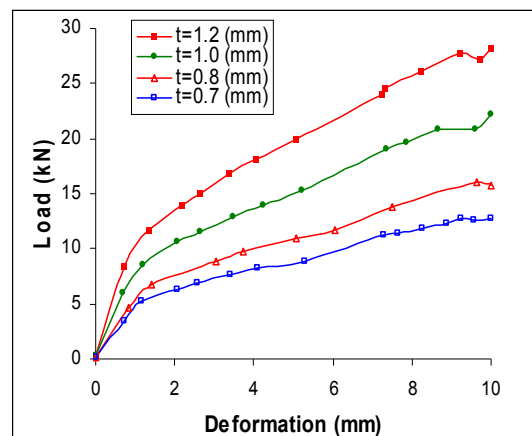
شکل ۷: نمودار نیرو- جابجایی و کانتور تنش Von Mises برای نمونه D53-d18-t1-h28 بر حسب (Pa).



شکل ۵: نمودار نیرو- جابجایی برای نمونه های D77-d25-h38 با ضخامت های مختلف.



شکل ۸: نمودار نیرو- جابجایی و کانتور تنش Von Mises برای نمونه D77-d25-t1-h38 بر حسب (Pa).

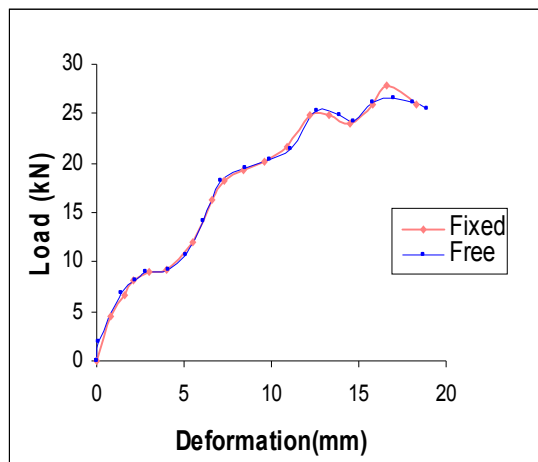


شکل ۶: نمودار نیرو- جابجایی برای نمونه های D53-d18-h28 با ضخامت های مختلف.

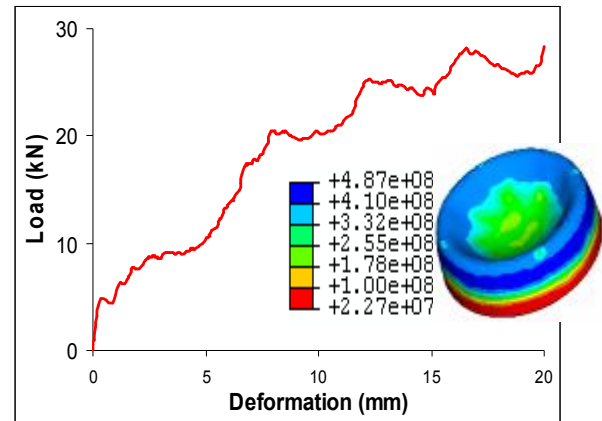
## بررسی چند پارامتر مختلف بر بار کماتش

### تأثیر شرایط تکیه گاهی بر بار کماتش

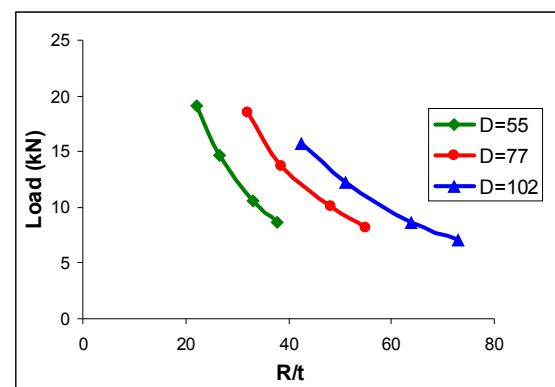
در ادامه تأثیر شرایط تکیه گاهی بر بار کماتش مورد بررسی قرار می گیرد. بدین منظور یک نیمکره ابتدا با شرایط کاملاً آزاد در لبه پایینی تحلیل شده و سپس لبه پایینی کاملاً مقید می شود و نمودار نیرو - جابجایی برای هر کدام جداگانه به دست می آید. در شکل (۱۱) مشاهده می شود، شرایط تکیه - گاهی بر روی نمودار نیرو - جابجایی و بار کماتش تأثیر ندارد.



شکل ۱۱: نمودار نیرو-جابجایی نمونه D1۰۲-d۲۵-t۱-h۴۸ در دو حالت تکیه گاه کاملاً آزاد و درگیر.



شکل ۹: نمودار نیرو - جابجایی و کانتور تنش Von Mises برای نمونه D1۰۲-d۲۵-t۱-h۴۸ بر حسب (Pa).

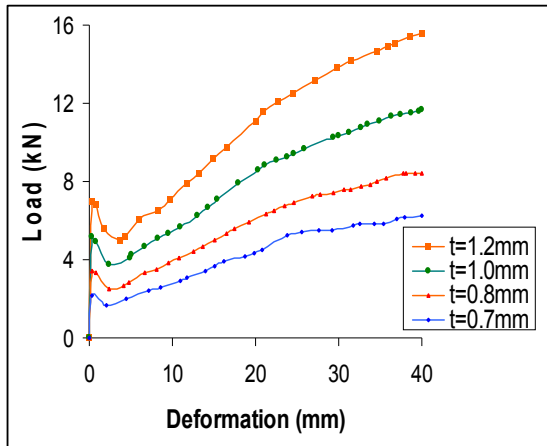


شکل ۱۰: تغییرات نیروی متوسط کماتش نسبت به R/t.

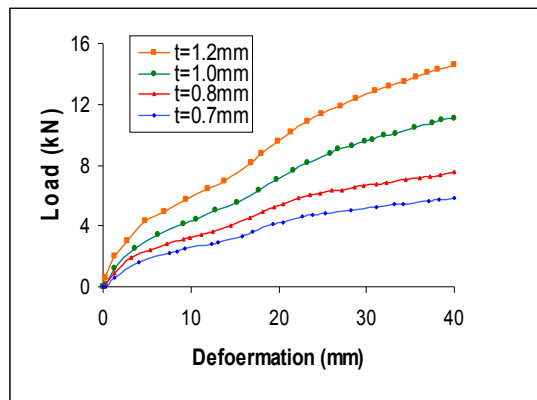
جدول ۱: نتایج تحلیل عددی کماتش پوسته های نیمه کروی فولادی .

Specimens specification	$\frac{R}{t}$	Compression Height (mm)	Energy (N.mm)		Mean collapse load (N)	
			S4R	S8R5	S4R	S8R5
D53-d18-t0.7-h28	37.85	10	86471	84741	8647	8474
D53-d18-t0.8-h28	33.12	10	105761	102562	10576	10256
D53-d18-t1.0-h28	26.5	10	146744	140250	14674	14025
D53-d18-t1.2-h28	22.08	10	190822	185652	19082	18565
D77-d25-t0.7-h38	55	15	238044	228547	15869	15236
D77-d25-t0.8-h38	48.12	15	293995	284478	19599	18965
D77-d25-t1.0-h38	38.5	15	398617	390213	26574	26014
D77-d25-t1.2-h38	32.08	15	538071	525978	35871	35065
D102-d25-t0.7-h48	72.85	20	212020	207460	10601	10373
D102-d25-t0.8-h48	63.75	20	263820	257120	13191	12856
D102-d25-t1.0-h48	51	20	384920	378500	19246	18925
D102-d25-t1.2-h48	42.5	20	495120	482500	24756	24125

می شود.



شکل ۱۳: نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه  $D102-d25-h48$  در ضخامت‌های مختلف در حالت بارگذاری توسط ستون با مقطع مربعی.



شکل ۱۴: نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه  $D102-d25-h48$  در ضخامت‌های مختلف در حالت بارگذاری به وسیله ستون کروی

#### بارگذاری به وسیله یک ستون با مقطع کروی

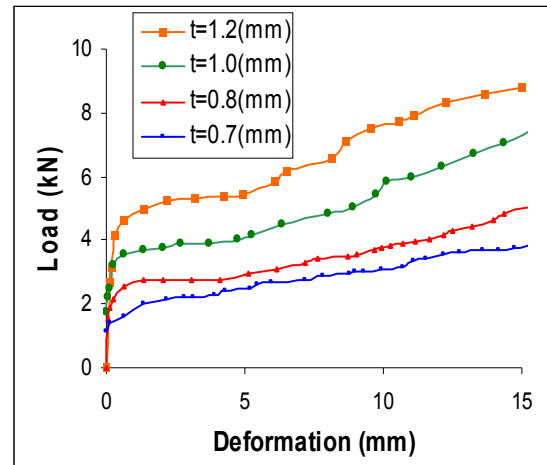
در این قسمت بارگذاری توسط یک ستون با مقطع کروی انجام می شود. در شکل (۱۴) نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه های  $D102-d25-h48$  در ضخامت‌های مختلف آورده شده است.

از مقایسه نمودار نیرو-جابجایی این بارگذاری با سه نوع بارگذاری دیگر، یعنی بارگذاری توسط ستون با مقطع دایروی و مربعی و همچنین بارگذاری توسط یک صفحه صلب مشاهده می شود که قسمت ابتدایی نمودار در سه نوع بارگذاری قبل به صورت خطی با شیب تند می باشد در حالی که در بارگذاری به وسیله ستون با مقطع کروی این قسمت دیده نمی شود که نشان دهنده آن است که در بارگذاری با ستون با مقطع کروی مود اول تغییر

#### تاثیر شرایط بارگذاری بر بار کمانش

##### بارگذاری به وسیله یک ستون با مقطع دایروی

در این بخش تاثیر شرایط بارگذاری بر بار کمانش بررسی می شود. بدین منظور برای چند نمونه یکبار به کمک یک صفحه صلب عمل اعمال نیروی محوری انجام می شود و بار دیگر به کمک یک ستون با مقطع دایروی که قطر آن برابر با قطر دایره کوچک بالایی نیمکره  $(d=25)$  می باشد اعمال نیرو می شود، در شکل (۱۲) نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه  $D102-d25-h48$  که توسط یک ستون با مقطع دایروی بارگذاری شده، در ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است. در این نوع بارگذاری مودهای تخت شوندگی محلی و ایجاد مخروط درونی مشاهده می شود.



شکل ۱۲: نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه  $D102-d25-h48$  در ضخامت‌های مختلف در حالت بارگذاری به وسیله ستون استوانه ای.

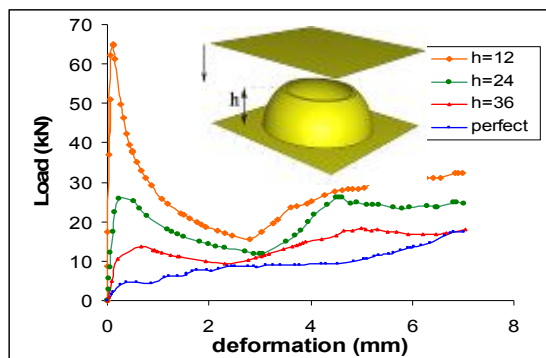
#### بارگذاری به وسیله یک ستون با مقطع مربع

در ادامه برای بررسی تاثیر شرایط بارگذاری بر بار متوسط کمانش از یک ستون با مقطع مربعی و با طول ضلع ۲۲ میلی‌متر استفاده می شود که سطح مقطع آن برابر با سطح مقطع ستون دایروی استفاده شده در بخش قبل می باشد. در شکل ۱۳ نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه های  $D102-d25-h48$  که توسط یک ستون با مقطع مربعی بارگذاری شده در ضخامت‌های مختلف نشان داده شده است. در این نوع بارگذاری مشاهده می شود که علاوه بر مود تخت شوندگی محلی و ایجاد مخروط درونی که در بارگذاری به وسیله یک ستون دایروی ایجاد شد مود سوم یعنی تشکیل لوب‌های نامتقارن نیز ایجاد

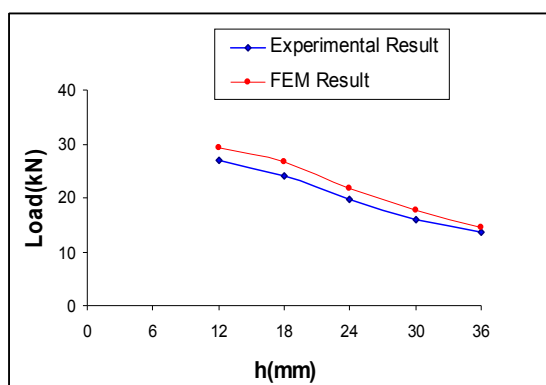
جدول ۲: نتایج عددی تحلیل پوسته های نیمه کروی در حالت برش خورده به ارتفاع های مختلف (شکل ۱۴).

Specimens height(mm)	Deformation Height(mm)	Energy(N.mm)	Mean collapse load(N)
12	7	189560	27080
18	7	169367	24195
24	7	135125	19304
30	7	112138	16020
36	7	96281	13754
perfect	7	70542	10077

نیرو-جابجایی مقدار نیروی میانگین کمانش برای حالت صفحه سوراخدار برابر  $19080\text{ N}$  برای حالت نیمکره سوراخدار برابر  $18828\text{ N}$  می باشد. از مقادیر بدست آمده نتیجه می شود که دایره بالای تنها در حدود ۱٪ در مقدار نیروی میانگین کمانش تاثیر دارد.



شکل ۱۶: نمودارهای نیرو-جابجایی و هندسه بارگذاری برای نمونه  $D102-d25-t1-h48$  در حالت برش خورده به ارتفاع های مختلف.

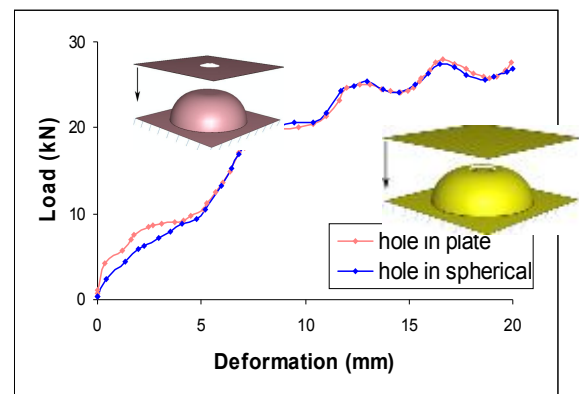


شکل ۱۷: تغییرات نیروی متوسط کمانش نسبت به  $h$  برای نمونه  $D102-d25-t1-h48$

### تاثیر ارتفاع نیمکره بر بار کمانش

در تحلیل دیگری مقدار نیروی متوسط کمانش برای پوسته نیمکره ناقص که مطابق شکل (۱۶) از بالا برش

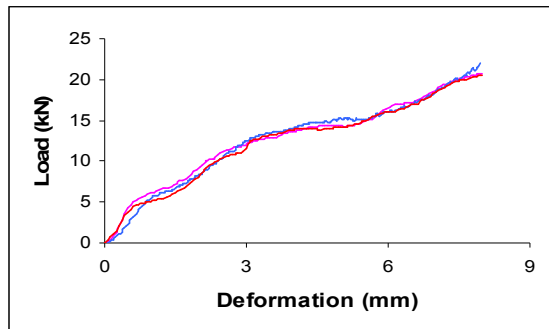
شکل یعنی تخت شوندگی محلی دیده نمی شود و فقط موده های ایجاد مخروط درونی و تشکیل لوب های نا متقارن دیده می شود.



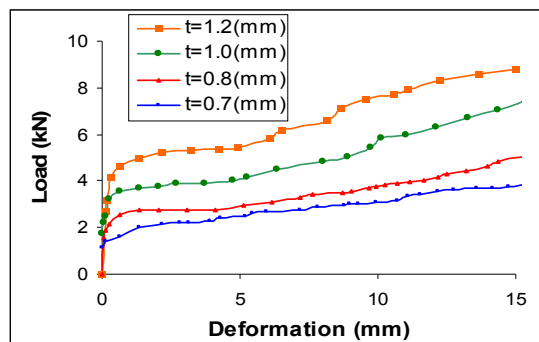
شکل ۱۵: نمودارهای نیرو-جابجایی برای دو نوع هندسه و بارگذاری مختلف: اعمال بار توسط صفحه سوراخدار بر روی نیمکره کامل (بدون سوراخ) و اعمال بار توسط صفحه صلب بر روی نیمکره سوراخدار برای نمونه  $D102-d25-t1-h48$ .

### تاثیر وجود یا عدم وجود کف بالایی نیمکره بر بار کمانش

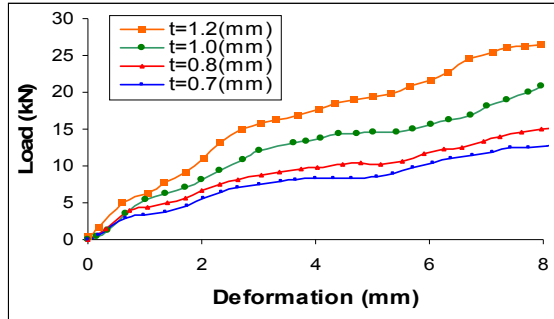
همچنین در تحلیل دیگری به بررسی تاثیر وجود یا عدم وجود دایره کوچک بالایی نیمکره بر بار کمانش پرداخته می شود. بدین منظور ابتدا مطابق شکل (۱۵) نمونه ای با مشخصه  $D102-d25-t1-h48$  را توسط یک صفحه صلب که در مرکز آن دایره ایی به قطر ۲۵ میلی متر ایجاد شده است و منطبق بر دایره کوچک بالایی نیمکره می باشد، تحت نیروی فشاری قرار داده و نمودار نیرو-جابجایی آن ترسیم می گردد. همچنین سوراخی به قطر ۲۵ میلی متر در بخش بالایی نیمکره ایی دیگر با ابعاد مشابه ایجاد شده و سپس توسط یک صفحه صلب کامل به آن نیرو اعمال شده و نمودار نیرو-جابجایی آن با حالت قبل مقایسه گردید (شکل ۱۵). با توجه به نمودار



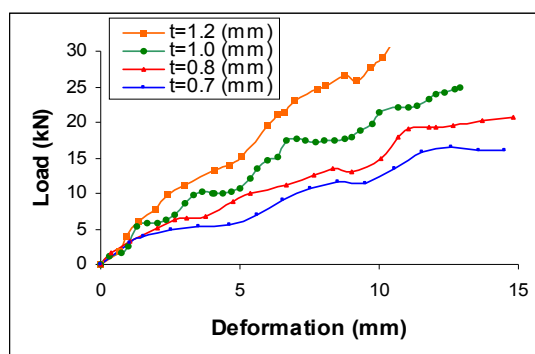
شکل ۱۹: مقایسه نمودارهای تجربی نیرو-جابجایی برای سه نمونه مشابه با مشخصه D53-d18-t1-h28.



شکل ۲۰: نمودار نیرو-جابجایی برای نمونه D102-d25-h48 در ضخامت‌های مختلف در حالت بارگذاری به وسیله ستون.



شکل ۲۱: نمودار تجربی نیرو-جابجایی برای نمونه D53-d18-t1-h28 در ضخامت‌های مختلف.



شکل ۲۲: نمودار تجربی نیرو-جابجایی برای نمونه D77-d25-h38 در ضخامت‌های مختلف.

خورده شده، مورد بررسی قرار گرفته است. از نمودارهای نیرو-جابجایی شکل (۱۶) مشاهده می‌شود که با کاهش ارتفاع  $h$  مقدار بار متوسط کمانش افزایش می‌یابد. همچنین مقادیر بار متوسط کمانش هر پوسته در جدول (۲) آورده شده است. در شکل (۱۷) نمودار تغییرات بار میانگین نسبت به ارتفاع نیمکره  $h$  برای نمونه D102-d25-t1-h48 آورده شده است.

## نتایج تجربی

به منظور انجام آزمایشات تجربی از یک دستگاه سرو هیدرولیک ۸۸۰۲ INSTRON مطابق شکل (۱۸) استفاده گردید.

در ابتدا برای اطمینان از دقت دستگاه و همچنین روش انجام آزمایش سه نمونه مشابه با مشخصه D53-d18-t1-h28 آزمایش شد و نمودارهای مربوطه مطابق شکل (۱۹) در یک دستگاه مختصات ترسیم شد. از مقایسه نمودارها و همچنین محاسبه نیروی متوسط کمانش مشاهده می‌شود که حد اکثر آزمایش شد و نمودارهای مربوطه مطابق شکل (۱۹) در یک دستگاه مختصات ترسیم شد از مقایسه نمودارها و همچنین محاسبه نیروی متوسط کمانش مشاهده می‌شود که حد اکثر خطا در آزمایش سه نمونه برابر ۱.۵٪ می‌باشد که یکی از علل عمده این خطا وجود تفاوت‌های هندسی کوچک نمونه‌ها در حین ساخت می‌باشد. بنابراین مشاهده می‌شود که آزمایش‌ها از دقت بسیار خوبی برخوردار است. در ادامه تعدادی از نتایج آزمایشات تجربی در شکل‌های (۲۰) تا (۲۴) آورده شده است.

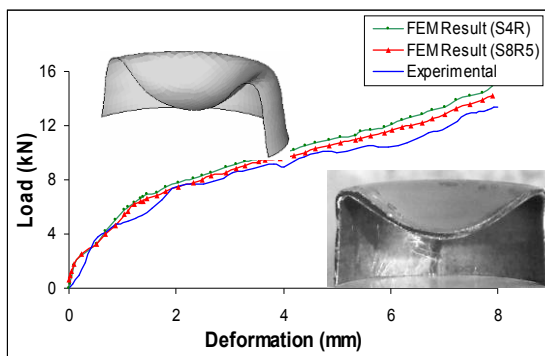


شکل ۱۸: یک دستگاه INSTRON ۸۸۰۲ در حال بارگذاری روی یک نیمکره به وسیله صفحه صلب.

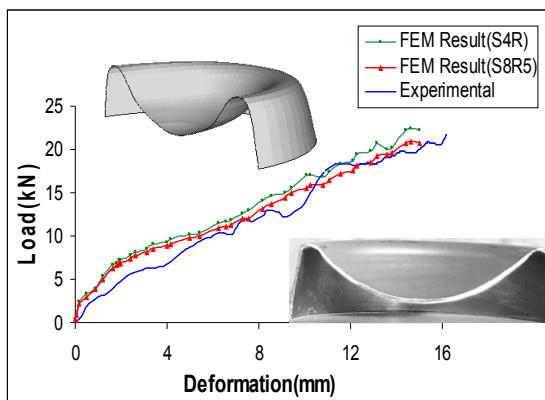


بخش خطی بیشتر است که این امر با واقعیت سازگار نیست. این نمودارها در تعیین انرژی جذب شده توسط هر نمونه مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ به طوری که انرژی با انتگرال گیری از سطح زیر نمودار نیرو - جابجایی به دست می‌آید در شکل (۲۸) نمودار تجربی و عددی انرژی - جابجایی همان نمونه آورده شده است که از انتگرالگیری سطح زیر منحنی نمودارهای شکل (۲۴) و (۱۵) به دست آمده است.

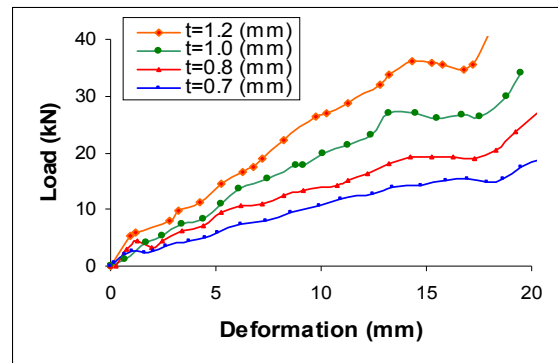
از بررسی شکل (۲۴) اینگونه نتیجه می‌شود که دو نمودار در قسمت ابتدای خود دارای اختلاف می‌باشند که به سبب وجود سوراخ می‌باشد و هنگامی که ارتفاع فشردگی به حدی می‌رسد که تماسی بین سوراخ و صفحه صلب بالایی وجود ندارد، دو نمودار بر هم منطبق می‌شوند. البته اختلافی هم در قسمت انتهایی نمودار وجود دارد که می‌تواند به دلیل تفاوت‌هایی کم در هندسه دو نمونه در حین ساخت باشد.



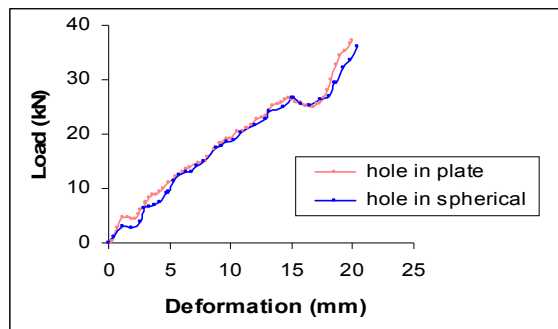
شکل ۲۵: مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی پوسته های نیمه کروی برای نمونه ۰۸-h۲۸-t۰۸-d۱۸-D۵۳.



شکل ۲۶: مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی پوسته های نیمه کروی برای نمونه ۰۸-h۳۸-t۰۸-d۲۵-D۷۷.



شکل ۲۳. نمودار تجربی نیرو- جابجایی برای نمونه ۰۲-d۲۵-h۴۸-D۱۰۲ در ضخامت‌های مختلف.



شکل ۲۴: نمودارهای تجربی نیرو - جابجایی برای دو نوع هندسه و بارگذاری مختلف: اعمال بار توسط صفحه سوراخدار بر روی نیمکره کامل (بدون سوراخ) و اعمال بار توسط صفحه صلب بر روی نیمکره سوراخدار برای نمونه ۰۲-d۲۵-t۱-h۴۸-D۱۰۲.

### مقایسه نتایج عددی و تجربی

در این بخش به منظور بررسی صحت و دقت تحلیل‌های عددی انجام شده، نتایج عددی و تجربی برای نمونه‌های مختلف در شکل‌های (۲۵) تا (۲۷) با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در جداول (۳) و (۴) نتایج عددی و تجربی برای نمونه‌های آزمایش شده آورده شده است که برای المان S4R میانگین خطا برابر ۹.۲٪ و برای المان S8R5 میانگین خطا برابر ۷.۳٪ می‌باشد. لذا می‌توان نتیجه گرفت که در صورت استفاده از تعداد المان برابر، المانهای غیر خطی خطای کمتری دارند.

از نمودارهای نیرو- جابجایی نمونه‌ها در دو حالت عددی و تجربی و مقایسه آنها با یکدیگر مشاهده می‌شود که نمودار تحلیل عددی همواره بالای نمودار تجربی واقع می‌شود، شکل‌های (۲۵) تا (۲۷)؛ و علت این امر آن است که در تحلیل عددی، جسم عاری از هر گونه عیب و نقص تلقی می‌شود لذا شیب نمودار نیرو- جابجایی آن در

۸,۱٪ می باشد و همین خطا در حالت وجود سوراخ در نیمکره حدود ۹,۶٪ می باشد. در خصوص رفتار کمانش پوسته ها مشاهده می شود که برای این نمونه ها تنها یک حالت گذار مد تغییر شکل اتفاق می افتد. پارامترهای تأثیرگذار در حالت گذار عبارتند از: ارتفاع فشردگی، ضخامت، شعاع نیمکره و خواص مکانیکی مواد. وقتی ارتفاع فشردگی کم است، پدیده تخت شوندگی محلی اتفاق می افتد و با افزایش ارتفاع فشردگی حالت گذار اول اتفاق می افتد و پدیده فرورفتگی ظاهر می شود. در نمونه های آزمایش شده در این تحقیق، به دلیل خصوصیات هندسی نمونه ها و همچنین خصوصیات مکانیکی، پدیده تشکیل لوب های غیر متقارن اتفاق نمی افتد.

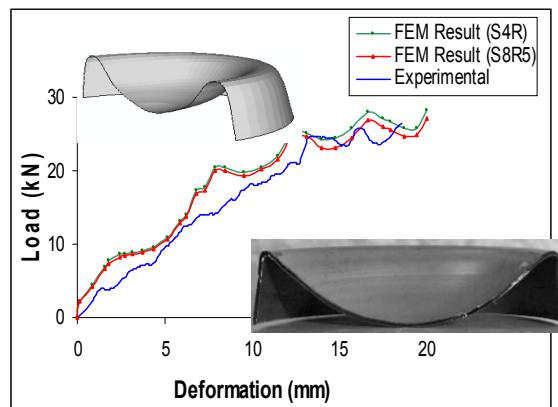
### نتایج

در این پژوهش رفتار کمانش پوسته های نیمه کره ای ساخته شده از فولاد نرم، و با قطرها و ضخامت های مختلف به صورت تجربی و عددی بررسی شد و نیروی متوسط کمانش آن ها به دست آمد. نتایج زیر از این تحلیل به دست آمد.

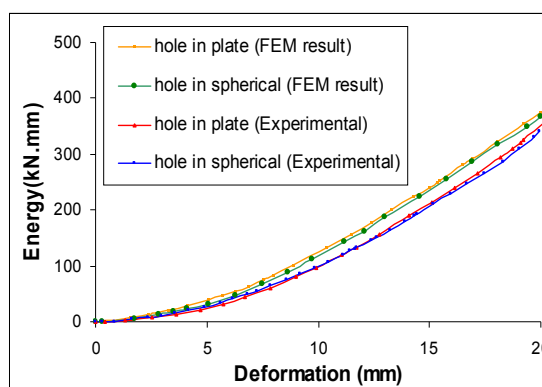
۱. در ضخامت های یکسان هر چه قطر دایره پایینی نیمکره کوچکتر باشد، نیروی متوسط کمانش آن بیشتر است.

۲. شرایط تکیه گاهی برای انتهای نیمکره که بر روی سطح قرار می گیرد، در مقدار بار کمانش بی تأثیر است.

۳. در حالتی که توسط یک صفحه صلب به نیمکره بار فشاری اعمال شود، نسبت به حالتی که توسط یک میله به آن بار اعمال می شود، نیمکره می تواند بار کمانش بالاتری را تحمل کند.



شکل ۲۷: مقایسه نتایج تحلیل عددی و تجربی پوسته های نیمه کره ای برای نمونه ۸-h۴۸، ۰، t-d۲۵-D۱۰۲.



شکل ۲۸: نمودارهای تجربی و عددی انرژی - جابجایی برای دو حالت وجود سوراخ در صفحه با نیمکره کامل و نیمکره سوراخدار با صفحه صلب کامل.

از بررسی شکل (۲۸) اینگونه نتیجه می شود که در تحلیل عددی، اختلاف مقدار نیروی متوسط کمانش برای حالت وجود سوراخ در نیمکره و وجود سوراخ در صفحه حدود ۱,۷٪ می باشد و در تحلیل تجربی این اختلاف حدود ۳,۳٪ می باشد که نشان دهنده آن است که قسمت بالایی نیمکره تأثیر بسیار کمی در مقدار نیروی متوسط کمانش نیمکره دارد. همچنین خطا در حالت وجود سوراخ در صفحه صلب بالایی در تحلیل عددی و نتایج تجربی حدود

جدول ۳: نتایج تحلیل عددی و تجربی بار کمانش پوسته های نیمه کره ای در حالت برش خورده به ارتفاع های مختلف (شکل ۱۴).

Specimens height(mm)	Deformation Height(mm)	Energy(kN.mm) (Numerical)	Energy(kN.mm) (Experimental)	Mean collapse load(N) (Numerical))	Mean collapse load(N) (Experimental)
12	7	204953	189560	29279	27080
18	7	186060	169367	26580	24195
24	7	152081	135125	21726	19304
30	7	123516	112138	17645	16020
36	7	101530	96281	14504	13754
perfect	7	79164	70542	11309	10077

جدول ۴: مقایسه نتایج عددی و تجربی بار کماتش پوسته های نیمه کروی.

specimens specification	Vertical Deformation(mm)	Mean collapse load (N)			$\frac{ F_{NUM} - F_{EXP} }{F_{NUM}} \times 100\%$	
		S4R element	S8R5 element	Experimental	S4R element	S8R5 element
D53-d18-t0.7-h28	8	7703	7590	6847	11.1	9.8
D53-d18-t0.8-h28	8	9488	9265	8715	8.1	5.9
D53-d18-t1.0-h28	8	13109	12851	11699	10.8	9
D53-d18-t1.2-h28	8	17012	16631	15366	9.7	7.6
D77-d25-t0.7-h38	12	9120	8866	8439	7.5	4.8
D77-d25-t0.8-h38	12	11274	11140	10509	6.8	5.7
D77-d25-t1.0-h38	12	14802	14693	13163	11.1	10.4
D77-d25-t1.2-h38	12	21653	20985	19032	12.1	9.3
D102-d25-t0.7-	20	10601	10373	9702	8.5	6.5
D102-d25-t0.8-	20	13191	12856	11808	10.5	8.2
D102-d25-t1.0-	20	19246	18925	17558	8.8	7.2
D102-d25-t1.2-	20	24756	24125	23263	6	3.6

۷. در هنگام تغییر شکل پوسته های نیمه کروی فولادی با ضخامت کم، تنها یک حالت گذار مد تغییر شکل اتفاق می افتد. یعنی تغییر شکل از حالت تخت شوندگی موضعی بلافاصله به تشکیل فرورفتگی تبدیل می گردد و حالت گذار فرو رفتگی به تشکیل لوبهای نامتقارن وجود ندارد.

۸. المان S4R با هشت گره نسبت به المان S8R5 از دقت بالاتری برخوردار است.

۴. وجود یا عدم وجود دایره کوچک بالایی نیمکره، تاثیر بسیار کمی در مقدار بار کماتش دارد.

۵. با برش از بالای نیمکره و کاهش ارتفاع آن، ظرفیت تحمل بار آن بیشتر می شود. به طوری که به تدریج بار کماتش آن به بار کماتش یک استوانه به قطر نیمکره نزدیک می گردد.

۶. نتایج عددی با نتایج تجربی نزدیکی بسیار خوبی دارند (حداکثر ۱۱٪ خطا)، لذا می توان از نتایج عددی مشروط به مدل سازی و تحلیل صحیح به خوبی استفاده کرد.

## مراجع

- 1 - Updike, D.P. (1972). "On the large deformation of a rigid plastic spherical shell compressed by a rigid plate." *Journal of Engineering for Industry*, Vol. 94, PP. 949-55.
- 2 - Kitching, R. Houston, R. and Johnson, W. (1975). "A theoretical and experimental study of hemispherical shells subjected to axial loads between flat plates." *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 17, PP. 693-703.
- 3 - De'Oliveria, J. G. and Wierzbicki, T. (1982). "Crushing analysis of rotationally symmetric plastic shells." *Journal of Strain Analysis*, Vol. 17, No. 4, PP. 229-36.
- 4 - Gupta, N.K., Eswara Prasad, G.L. and Gupta, S. K. (1999). "Axial compression of metallic spherical shells between rigid plates." *International Journal of Thin-Walled Structures*, Vol. 34, No. 1, PP. 21-41.
- 5 - Gupta, N.K. and Venkatesh, G. (2004). "Experimental and numerical studies of dynamic axial compression of thin walled spherical shells." *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 30, No. 8-9, PP. 1225-40.
- 6 - Gupta, N.K., Mohamed Sheriff N. and Velmurugan, R. (2008). "Experimental and numerical studies of buckling of thin spherical shells under axial loads." *International Journal of Mechanical Sciences*. Vol. 50, PP. 422-432.

- 7 -Gupta, N.K., Mohamed Sheriff N. and Velmurugan, R. (2008). "Analysis of collapse behaviour of combined geometry metallic shells under axial impact." *International Journal of Impact Engineering*, Vol . 35, PP . 731–741.
- 8 - semi- steel Shariati, M. and Allahbakhsh, H. R. (2010). "Numerical and experimental investigations on the buckling of spherical shells under various loadings ." *Thin Walled Structure*. Vol. 48, PP. 620–628.
- 9 -Nayyeri Amiri, Sh. and Rasheed, Hayder A. (2012). "Plastic buckling of thin hemispherical shell subjected to concentrated load at the apex." *Thin-Walled Structures*. Vol. 53, No.1, PP. 72–82.
- 10 -Nayyeri Amiri, Sh. and Rasheed, Hayder A. (2012). "Plastic buckling of moderately thick hemispherical shell subjected to concentrated load at top." *International Journal of Engineering science*. Vol. 50, No.1, PP . 151–165.
- 11 - ASTM E8, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products .
- 12 - ABAQUS 6.4 PR11 user's manual .
- 13 - Mohamed Sheriff N , et al. (2008). "Optimization of thin conical frusta for impact energy absorption." *Thin Walled Structure* , Vol. 40, PP. 653–666.

### واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Spinning
- 2 - Rolling Plastic Hinges
- 3 - Stationary Hinges
- 4 - Local Flattening
- 5 - Inward Dimpling
- 6 - Non - Symmetric Lobe Formation