

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

**دانشکده:**

مهندسی مکانیک

**گروه:**

طراحی کاربردی

**تحلیل عددی و تجربی کمانش و پس کمانش استوانه های  
ترک دار فولادی تحت بار خارج از مرکز**

مهدی صدیقی

**اساتید راهنما:**

دکتر محمود شریعتی

دکتر حمیدرضا ایپک چی

**پایان نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد**

**ماه و سال انتشار:**

خرداد ۸۹

پایان نامه کارشناسی ارشد ( رساله دکتری ) آقای / خانم .....  
 تحت عنوان:

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد  
 ( مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

نردبان این جهان ما و منی است

عاقبت این نردبان افتادنی است

لاجرم هرکس که بالاتر نشست

استخوانش سخت تر خواهد شکست

تقدیم به

**پدر و مادر عزیزم**

که در تمام لحظات زندگی حامی و راهنمای من بودند.

## تقدیر و تشکر

خدای یکتا را سپاسگزارم که در دو سال اخیر، فرصت شاگردی در کلاس علم و ادب استادان فرهیخته ای را داشته ام. به ویژه از استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر شریعتی تشکر کنم که در جوار ایشان نه تنها علم بلکه اخلاق نیز آموختم. بی شک بدون وجود کمک و راهنمایی استاد بزرگوارم جناب آقای دکتر شریعتی ، که در تمامی مراحل پایان نامه حامی و راهنمای صبور من بودند، اتمام پروژه از محالات بود. همچنین در این قسمت لازم می دانم از راهنمایی های آقای دکتر حمید رضا ایپک چی و مهندس جعفر صائمی قدردانی نمایم. در طول انجام پروژه مشکلاتی بوجود می آید که توسط مجموعه ای از انسانها برطرف می شود، لذا از خداوند متعال برای کلیه کسانی که مرا در انجام این پروژه یاری نمودند ، موفقیت و سربلندی همراه با آرامش در تمام مراحل زندگی خواستارم.

مهدی صدیقی  
Hamoons47@yahoo.com  
خرداد ماه ۱۳۸۹

پیوست شماره ۳

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه ( رساله ) نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات ، آزمایشات و نو آوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه ( رساله ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

ماه و سال

## چکیده

بررسی اثر وجود ترک بر روی ظرفیت تحمل بار و رفتار کمانش پوسته های استوانه‌ای دارای اهمیت بوده و در طراحی اینگونه سازه‌ها باید در نظر گرفته شود. در این پایان نامه پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک با طولها و قطرهای مختلف حاوی ترک به کمک روش عددی و تجربی مورد تحلیل قرار گرفته و اثر موقعیت ترک، نسبت طول ترک به محیط آن، زاویه ترک و نسبت طول به قطر پوسته بر روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته های استوانه‌ای ترک‌دار مورد تحلیل قرار گرفته است. برای چندین نمونه، تست تجربی کمانش به کمک دستگاه سرو هیدرولیک INSTRON 8802 انجام شد و نتایج حاصل با نتایج عددی مقایسه گردید. تطابق بسیار خوبی بین نتایج حاصل از تحلیل عددی و نتایج تجربی وجود دارد. در پایان به کمک نتایج تجربی و عددی بدست آمده، تاثیر هر کدام از پارامترهای ذکر شده بر روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته های استوانه‌ای ترک دار بررسی شده است.

**واژگان کلیدی:** پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار، کمانش و پس کمانش، روش المان محدود، روش تجربی.



## لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

مقالات ژورنالی (ISI):

- 1- M. Shariati, **M.Sedigh**, Jafar Saemi, H.R.Eipakchi, “An experimental study on buckling and post-buckling behavior of cylindrical panels with clamped and simply supported ends”, **Indian Journal of Engineering and Material Sciences**, Vol.17, April 2010, pp.86-90.
- 2- M. Shariati, **M.Sedigh**, Jafar Saemi, H.R.Eipakchi, “Experimental study on ultimate strength of CK20 steel cylindrical panels subjected to compressive axial load”. accepted , **Archive of Civil and Mechanical Engineering**.
- 3- M. Shariati, **M.Sedigh**, Jafar Saemi, H.R.Eipakchi, “Experimental and numerical studies on buckling of cylindrical panels subjected to compressive axial load”. **Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering**, answered to riveded paper.
- 4- M. Shariati, **M.Sedigh**, Jafar Saemi, H.R.Eipakchi, “Numerica analysis and experimental study on buckling of thin cylindrical panels”. **Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering**, answered to riveded paper.
- 5- M. Shariati, **M.Sedigh**, Jafar Saemi, H.R.Eipakchi, “Experimental and numerical studies on buckling of cracked cylindrical shells under combined loading”. **Mechanika**, answered to riveded paper.
- 6- M. Shariati, Jafar Saemi, **M.Sedigh**, , H.R.Eipakchi, “Study on buckling of cracked cylindrical panel under axial load”. Under review.

## مقالات کنفرانسی:

- ۱- محمود شریعتی، جعفر صائمی، **مهدی صدیقی**، حمیدرضا ایپک چی "بررسی استحکام نهایی پوسته-های ترک دار با مقطع مربعی تحت بار پیچشی" نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، بهمن ۱۳۸۸، صفحه ۹۵-۹۶
- ۲- محمود شریعتی، جعفر صائمی، **مهدی صدیقی** "بررسی عددی استحکام نهایی پانلهای استوانه ای ترک دار" نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، بهمن ۱۳۸۸، صفحه ۱۰۵-۱۰۶
- ۳- محمود شریعتی، جعفر صائمی، **مهدی صدیقی** "کمانش و پس کمانش استوانه های ترک دار تحت بار پیچشی" نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، بهمن ۱۳۸۸، صفحه ۱۶۵-۱۶۶
- ۴- محمود شریعتی، جعفر صائمی، **مهدی صدیقی**، حمیدرضا ایپک چی "بررسی عددی و تجربی کمانش پانل های استوانه ای ترک دار" نهمین کنفرانس انجمن هوافضای ایران تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، بهمن ۱۳۸۸، پذیرفته شده به صورت پوستر
- ۵- محمود شریعتی، **مهدی صدیقی**، جعفر صائمی، حمیدرضا ایپک چی "بررسی عددی و تجربی کمانش و پس کمانش پانل های استوانه ای با تکیه گاه های ساده و گیردار" هجدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک کنفرانس - تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۱۳۸۹، صفحه ۲۱۹
- ۶- محمود شریعتی، **مهدی صدیقی**، جعفر صائمی، حمیدرضا ایپک چی "تحلیل عددی و تجربی کمانش پوسته های استوانه ای ترک دار تحت بار خارج از مرکز" هجدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک کنفرانس - تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۱۳۸۹، صفحه ۲۲۱

## فهرست مطالب

۱- مقدمه ای در مورد پوسته و کاربرد آن .....	۱
۱-۱- مقدمه .....	۲
۲-۱- کاربرد پوسته‌ها .....	۲
۳-۱- بررسی روشهای مختلف حل مسئله کمانش پوسته‌ها .....	۴
۴-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده .....	۵
۵-۱- جمع بندی .....	۹
۲- تحلیل عددی پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار .....	۱۰
۱-۲- مقدمه .....	۱۱
۲-۲- معرفی نرم افزار ABAQUS/CAE .....	۱۲
۳-۲- مدل سازی و ابعاد نمونه‌ها .....	۱۴
۴-۲- نامگذاری نمونه‌ها .....	۱۴
۵-۲- خواص مکانیکی ماده .....	۱۵
۶-۲- شرایط مرزی نمونه .....	۱۶
۷-۲- المان بندی نمونه ها .....	۱۷
۸-۲- تعیین نوع تحلیل .....	۱۸
۱-۸-۲- تحلیل Buckle .....	۱۹
۲-۸-۲- تحلیل Static, Riks .....	۲۰
۹-۲- نتایج تحلیل عددی پوسته‌های استوانه‌ای بدون ترک تحت بار فشاری محوری .....	۲۰
۱-۹-۲- نتایج تحلیل عددی پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20 .....	۲۱
۲-۹-۲- نتایج تحلیل عددی پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد St37 .....	۲۱
۱۰-۲- نتایج تحلیل عددی پوسته‌های استوانه‌ای دارای ترک تحت بار فشاری محوری .....	۲۲
۱-۱۰-۲- بررسی تأثیر تغییر موقعیت ترک بر روی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای .....	۲۳
۲-۱۰-۲- بررسی تأثیر تغییر طول ترک بر روی رفتار کمانش پانل‌های استوانه‌ای .....	۲۹

۳۴	۲-۱۰-۳- بررسی تأثیر تغییر زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای
۳۷	۲-۱۱- نتایج تحلیل عددی پانل‌های استوانه‌ای ترک دار تحت بار خارج از مرکز
۴۰	۲-۱۲- اثر طول پوسته بر بار بحرانی کمانش
۴۳	۳- تحلیل تجربی پوسته‌های استوانه‌ای ترک دار
۴۴	۳-۱- مقدمه
۴۴	۳-۲- نتایج تست کشش
۴۵	۳-۳- شرایط آزمایش کمانش پوسته‌های استوانه‌ای
۴۶	۳-۴- نتایج تحلیل تجربی پوسته‌های استوانه‌ای بدون ترک تحت بار محوری
۴۶	۳-۴-۱- نتایج تحلیل تجربی پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20
۴۷	۳-۴-۲- نتایج تحلیل تجربی پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد St37
۴۸	۳-۵- نتایج تحلیل تجربی پانل استوانه‌ای ترک دار تحت بار محوری
۴۸	۳-۵-۱- بررسی تأثیر تغییر موقعیت ترک بر روی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای
۵۰	۳-۵-۲- بررسی تأثیر تغییر طول ترک بر روی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای
۵۳	۳-۵-۳- بررسی تأثیر زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای
۵۵	۳-۶- نتایج تحلیل تجربی پوسته‌های استوانه‌ای دارای ترک تحت بار خارج از مرکز
۶۰	۴- مقایسه نتایج تحلیل عددی و روش تجربی
۶۱	۴-۱- مقدمه
۶۱	۴-۲- مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به تحلیل موقعیت ترک
۶۳	۴-۳- مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به تحلیل زوایای ترک و طول ترک در پانل
۶۴	۴-۴- مقایسه منحنی‌های بار-جابجایی، حاصل از تحلیل‌های عددی و تجربی
۷۶	۵- نتایج و پیشنهادها
۷۷	۵-۱- مقدمه
۷۷	۵-۲- نتایج
۷۹	۵-۳- پیشنهادات
۸۰	مراجع

فهرست نمودار ها و شکل ها

- شکل ۱-۱- نمونه هایی از سازه های پوسته ای ..... ۳
- شکل ۱-۲- هندسه پوسته ترک دار ..... ۱۴
- شکل ۲-۲- نمودار تنش - کرنش برای فولاد Ck20 ..... ۱۵
- شکل ۳-۲- نمودار تنش - کرنش برای فولاد St37 ..... ۱۵
- شکل ۴-۲- شرایط مرزی نمونه ..... ۱۶
- شکل ۵-۲- شرایط مرزی نمونه برای ایجاد بارگذاری خارج مرکز ..... ۱۷
- شکل ۶-۲- نحوه مش بندی نوک ترک ..... ۱۸
- شکل ۷-۲- دو شکل مد کمانش برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  ..... ۱۹
- شکل ۸-۲- دو شکل مد کمانش برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.25$  ..... ۲۰
- شکل ۹-۲- نمودار بار - جابجایی برای طول های مختلف پوسته های استوانه ای از جنس فولاد Ck20 ..... ۲۱
- شکل ۱۰-۲- نمودار بار - جابجایی برای طول های مختلف پوسته های استوانه ای از جنس فولاد St37 ..... ۲۲
- شکل ۱۱-۲- منحنی های بار - موقعیت ترک ..... ۲۳
- شکل ۱۲-۲- منحنی های بار - جابجایی، کانتورهای تنش و میز برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  ..... ۲۶
- شکل ۱۳-۲- منحنی های بار - جابجایی، کانتورهای تنش و میز برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.25$  ..... ۲۷
- شکل ۱۴-۲- منحنی های بار - جابجایی، کانتورهای تنش و میز برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.33$  ..... ۲۸
- شکل ۱۵-۲- منحنی های بار - جابجایی پوسته ترک دار برای طول ترک های مختلف (a)  $L100 - \theta 0^\circ - C0.5$ ،  
 (b)  $L250 - \theta 90^\circ - C0.5$  ..... ۳۰
- شکل ۱۶-۲- منحنی های بار - جابجایی پوسته ترک دار برای طول ترک های مختلف (a)  $L100 - \theta 0^\circ - C0.5$ ،  
 (b)  $L250 - \theta 90^\circ - C0.5$  ..... ۳۱
- شکل ۱۷-۲- منحنی های بار - جابجایی پوسته ترک دار برای زاویه ترک های مختلف (a)  $L100 - \lambda 0.2 - C0.5$ ،  
 (b)  $L250 - \lambda 0.4 - C0.5$  ..... ۳۵
- شکل ۱۸-۲- منحنی های بار - جابجایی پوسته ترک دار برای زاویه ترک های مختلف (a)  $L150 - \lambda 0.2 - C0.5$ ،  
 (b)  $L150 - \lambda 0.4 - C0.5$  ..... ۳۶
- شکل ۱۹-۲- شرایط بار گذاری خارج از مرکز ..... ۳۷
- شکل ۲۰-۲- منحنی های بار - جابجایی، برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  ..... ۳۸
- شکل ۲۱-۲- منحنی های بار - جابجایی، برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 45^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  ..... ۳۹

- شکل ۲-۲۲- منحنی‌های بار - جابجایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.25$  ..... ۴۰
- شکل ۲-۲۳- منحنی‌های بار - جابجایی، برای سه طول مختلف از نمونه  $D42 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  ..... ۴۱
- شکل ۲-۲۴- منحنی‌های بار - جابجایی، برای سه طول مختلف از نمونه  $D42 - \theta 0^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$  ..... ۴۱
- شکل ۲-۲۵- منحنی‌های بار - جابجایی، برای سه طول مختلف از نمونه  $D42 - \theta 45^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  ..... ۴۲
- شکل ۳-۱- فیکسچر مورد استفاده در آزمایش برای اعمال بار محوری (a) تکیه گاه ساده، (b) تکیه گاه گیردار ..... ۴۵
- شکل ۳-۲- فیکسچر مورد استفاده در آزمایش برای اعمال بار خارج از مرکز ..... ۴۶
- شکل ۳-۳- نمودار بار- جابجایی برای طول های مختلف پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20 ..... ۴۷
- شکل ۳-۴- نمودار بار- جابجایی برای طول های مختلف پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد St37 ..... ۴۸
- شکل ۳-۵- تعدادی از نمونه های آزمایش با دستگاه INSTRON ..... ۴۹
- شکل ۳-۶- منحنی های بار- جابجایی برای پوسته ترک دار با ترک در موقعیت های مختلف  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.4$  ..... ۵۰
- شکل ۳-۷- منحنی های بار- جابجایی برای طول های مختلف ترک نمونه  $D42 - L100 - \theta 45^\circ - C0.5$  ..... ۵۰
- شکل ۳-۸- منحنی های بار- جابجایی برای طول های مختلف ترک نمونه  $D42 - L250 - \theta 90^\circ - C0.5$  ..... ۵۱
- شکل ۳-۹- منحنی های بار- جابجایی برای طول های مختلف ترک نمونه  $D42 - L150 - \theta 45^\circ - C0.5$  ..... ۵۱
- شکل ۳-۱۰- منحنی های بار- جابجایی برای طول های مختلف ترک نمونه  $D42 - L150 - \theta 0^\circ - C0.5$  ..... ۵۲
- شکل ۳-۱۱- مراحل کمانش نمونه  $D42 - L100 - \theta 45^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$  ..... ۵۳
- شکل ۳-۱۲- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه های مختلف ترک نمونه  $D42 - L150 - \lambda 0.4 - C0.5$  ..... ۵۴
- شکل ۳-۱۳- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه های مختلف ترک نمونه  $D42 - L150 - \lambda 0.2 - C0.5$  ..... ۵۴
- شکل ۳-۱۴- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه های مختلف ترک نمونه  $D42 - L250 - \lambda 0.4 - C0.5$  ..... ۵۵
- شکل ۳-۱۵- منحنی های بار- جابجایی برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  تحت بار خارج از مرکز ..... ۵۶
- شکل ۳-۱۶- منحنی های بار- جابجایی برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 45^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  تحت بار خارج از مرکز ..... ۵۷
- شکل ۳-۱۷- منحنی های بار- جابجایی برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  تحت بار خارج از مرکز ..... ۵۸
- شکل ۳-۱۸- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه های مختلف ترک نمونه  $D42 - L150 - \lambda 0.3 - C0.5$  ..... ۵۹
- شکل ۴-۱- مقایسه منحنی‌های بار - جابجایی تجربی و عددی  $D42 - L250 - \theta 90^\circ - \lambda 0.2 - C0.5$  ..... ۶۲
- شکل ۴-۲- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42 - L250 - \theta 0^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$  ..... ۶۴
- شکل ۴-۳- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42 - L250 - \theta 45^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$  ..... ۶۵
- شکل ۴-۴- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42 - L250 - \theta 90^\circ - \lambda 0.2 - C0.5$  ..... ۶۶
- شکل ۴-۵- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42 - L150 - \theta 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  ..... ۶۷

- شکل ۴-۶ - منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-\theta45^\circ - \lambda0.3-C0.5$  ..... ۶۸
- شکل ۴-۷ - منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-\theta90^\circ - \lambda0.3-C0.25$  ..... ۶۹
- شکل ۴-۸ - منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L100-\theta45^\circ - \lambda0.4-C0.5$  ..... ۷۰
- شکل ۴-۹ - منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L100-\theta90^\circ - \lambda0.3-C0.5$  ..... ۷۱
- شکل ۴-۱۰ - منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-\theta0^\circ - \lambda0.3-C0.5$  ..... ۷۳
- شکل ۴-۱۱ - منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-\theta45^\circ - \lambda0.3-C0.5$  ..... ۷۴
- شکل ۴-۱۲ - منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-\theta45^\circ - \lambda0.3-C0.5$  ..... ۷۵

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲- نتایج تحلیل های عددی برای قطر ۴۲ میلی متر ..... ۳۲
- جدول ۲-۲- نتایج تحلیل های عددی برای قطر ۵۰ میلی متر ..... ۳۳
- جدول ۱-۳- مشخصات هندسی و مکانیکی هر دو نمونه St37 و Ck20 ..... ۴۴
- جدول ۱-۴- نتایج تحلیل های عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف مربوط به تحلیل موقعیت ترک ..... ۶۱
- جدول ۲-۴- نتایج تحلیل های عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف برای همه نمونه های آزمایش شده ..... ۶۳



# فصل اول

مقدمه ای در مورد پوسته ها  
و کاربرد آن

## ۱-۱- مقدمه

ورقها و پوسته‌ها سازه‌هایی هستند که شکل اولیه آنها به ترتیب تخت و خمیده می‌باشد و ضخامت آنها نسبت به دو بعد دیگر بسیار کوچکتر است. معیاری که برای تعریف یک ورق یا پوسته نازک بکار برده می‌شود؛ این است که باید نسبت ضخامت به طول ضلع کوچکتر ورق کمتر از  $0/05$  باشد. این نسبت در مواردی به کمتر از  $0/1$  نیز می‌رسد.

## ۱-۲- کاربرد پوسته‌ها

امروزه پوسته‌ها و ورقها بخش اعظمی از سازه‌های صنایع مختلف را به خود اختصاص داده‌اند. پوسته‌ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد کاربرد وسیعی در صنایع دارند. این خواص ناشی از طبیعت هندسی پوسته است. سازه‌های پوسته‌ای از نظر تحمل بارهای فشاری و ضربه‌ای از بهترین سازه‌ها محسوب می‌شوند و به همین دلیل در طبیعت نیز پوشش اندام گیاهان و جانوران، ماهیت پوسته‌ای دارد. با درک ویژگی‌های مهم سازه‌های پوسته‌ای از جمله قدرت تحمل بار، استحکام بالا و راحتی ساخت، مهندسين همواره از سازه‌های پوسته‌ای در طراحی و ساخت سازه‌های مختلف استفاده می‌کنند. از کاربردهای پوسته‌ها می‌توان در سازه‌های هوایی برای بدنه هواپیماها، روکش بال و دم هواپیما، بدنه موشک و غیره اشاره کرد. استفاده از ورقها و پوسته‌ها در صنایع دیگر نظیر خودرو سازی، شناور سازی، مخازن نفت و گاز در صنایع پتروشیمی، خطوط لوله، مخازن نگهداری مایعات و سیلوهای انبار دانه‌های نباتات و غلات، مخازن تحت فشار، سرپوشها یا کله‌گیها و غیره رایج است (شکل (۱-۱)). در این تحقیق حالت خاصی از پوسته‌های متقارن محوری یعنی پوسته‌های استوانه‌ای دارای گشودگی مورد بحث قرار می‌گیرد. همانطور که بیان شد این نوع پوسته‌ها در سازه‌هایی مانند بدنه موشکها، بالگردها، هواپیماها، پایه سکوه‌های دریایی، کندانسور و دودکش نیروگاهها و تجهیزات ورزشی استفاده فراوان دارند.



شکل ۱-۱- نمونه‌هایی از سازه‌های پوسته‌ای

این سازه‌ها ممکن است تحت بارهای محوری فشاری قرار گرفته و دچار کمانش شوند. به علاوه، این اجزا اغلب در بعضی قسمت‌ها ناپیوستگی‌هایی مانند گوشه‌دگی‌ها دارند که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند در پایداری سازه‌ها تأثیرگذار باشند. برای طراحی یک پوسته استوانه‌ای تحت بار فشاری لازم است باری که پوسته تحت آن بار کمانش می‌کند، محاسبه شود. کمانش به مفهوم تغییر شکل ناگهانی سازه در برابر بار وارده به آن است. این بار غالباً به صورت فشاری به سازه اعمال می‌گردد. اگرچه برای محاسبه بار کمانش پوسته استوانه‌ای تحقیقات متعددی انجام شده است، ولی تاکنون رابطه دقیقی برای محاسبه بار بحرانی کمانش ارائه نشده است و روابط موجود با کمک فرضیات ساده کننده حاصل شده‌اند. همچنین به علت پیچیدگی معادلات و شرایط مرزی حاکم بر پوسته‌های استوانه‌ای دارای گوشه‌دگی، تاکنون رابطه دقیقی برای بار کمانش این پوسته‌ها ارائه نشده است و تحقیقات انجام شده در این زمینه محدود به روشهای عددی و تجربی هستند. در ادامه مروری بر کارهای صورت گرفته در این زمینه، ارائه خواهد شد.

### ۱-۳- بررسی روشهای مختلف حل مسئله کمانش پوسته‌ها

استفاده بسیار وسیع از ورقها و پوسته‌ها به عنوان المانهای سازه‌ای باعث شده است که تحقیقات دیرینه و بسیار وسیعی پیرامون آنها انجام شود. تحقیقات به یکی از سه روش زیر استوار هستند:

۱ - بررسی تحلیلی سازه‌ها

۲ - بررسی عددی سازه‌ها

۳ - بررسی تجربی سازه‌ها

امروزه سه روش فوق رایج بوده و گاهی از هر سه روش برای انجام یک تحقیق استفاده می‌شود. حل تحلیلی سازه‌ها، روشی است که بر یک یا چند اصل فیزیکی استوار است؛ که توسط روشهای ریاضی توسعه داده شده‌اند. این روش حل عمدتاً برای مسائل و سازه‌های با هندسه‌های ساده و بارگذاری‌ها و شرایط مرزی متقارن جوابهای دقیقی ارائه می‌دهد و حل بسیاری از مسائل ساده در کتابهای منتشر شده موجود است. از روشهای تحلیلی سازه‌ها می‌توان به تحلیل تنش یک مخزن استوانه‌ای تحت فشار داخلی یا خارجی و یا یک ورق تحت کشش که یک سوراخ در آن ایجاد شده است اشاره نمود. در روش تحلیلی اگر اندکی مسئله از لحاظ هندسه، بارگذاری یا شرایط مرزی پیچیده شود دست یافتن به جواب دقیق بسیار دشوار و حتی غیر ممکن می‌گردد. در مواردی نیز جوابهای تقریبی برای حل تحلیلی سازه‌ها بدست می‌آید. شاید دلیل تقریبی بودن این جوابها فرضهای ساده کننده‌ای باشد که برای حل معادلات بکار رفته‌اند. عدم توانایی در حل معادلات دیفرانسیلی که از حل‌های تحلیلی حاصل می‌شوند، از مهمترین مشکلات انجام حل تحلیلی می‌باشد.

حل عددی سازه‌ها نیز روش دیگری است که امروزه توسط برنامه‌های قدرتمند المان محدود به بازار صنعت آمده است. این روش بسیار ارزان قیمت و مقرون به صرفه است و همواره می‌توان از آن بهره برد. زمانی که استفاده از

روشهای تجربی و آزمایشگاهی گران قیمت و یا غیر ممکن باشد، استفاده از حل عددی می تواند کمک زیادی به انجام تحلیل بکند.

رایج ترین روش عددی که امروز مورد استفاده مهندسين و محققين قرار می گیرد روش المان محدود می باشد که بوسیله آن یک سازه پیوسته تبدیل به تعداد محدودی المان سازه ای می شود. در این زمینه کتابهای بسیار زیادی تألیف و منتشر شده است که بیانگر اهمیت و قابلیت استفاده از این روش در حل مسائل سازه ای می باشد.

آخرین روش برای حل مسائل سازه ای روش آزمایش یا روش تجربی می باشد. این روش همواره جواب نهایی مسأله می باشد. هیچ گاه نمی توان جوابهای تحلیلی یا عددی را بر جوابهای حل تجربی ترجیح داد. در بسیاری از مسائل روابط تحلیلی وجود دارند که توسط نتایج آزمایش بهینه شده اند. بنابراین اولین معیار مقایسه برای صحت نتایج عددی یا تحلیلی مقایسه با نتایج تجربی می باشد. بدست آوردن نتایج تجربی می تواند به قیمت بسیار بالایی تمام شود. بنابراین استفاده از آن مستلزم محدودیت در مسائل اقتصادی می باشد.

#### ۱-۴- مروری بر تحقیقات انجام شده

سازه های پوسته ای دارای کاربرد فراوان در صنایع هوافضا، سازه های معدنی، سدهای بزرگ، سقفهای پوسته ای، خط لوله، سازه های حمل و نگهداری سیالات و برجهای خنک کن می باشد [۱]. یکی از مهمترین مسائلی که هنگام طراحی این سازه ها باید مورد بررسی قرار گیرد، پدیده کمانش است [۲]. اولین تحقیقات بر روی تعیین بار کمانش در ناحیه الاستیک متمرکز بود ولی تحقیقات تجربی [۳ و ۴] نشان داد که ظرفیت بار کمانش سازه های پوسته ای بسیار کمتر از مقداری است که تئوریهای کلاسیک نشان می دهد و کوچکترین انحراف از شرایط ایده ال هندسی و بار گذاری باعث کاهش قابل توجه بار قابل تحمل سازه می شود [۵ و ۶].

از تئوری کلاسیک می توان برای پیش بینی بار کمانش پیوسته های استوانه ای نازک تحت بار فشاری محوری

$$N_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left( \frac{t^2}{R} \right) \quad (1-1)$$

یکنواخت، با بکار بردن فرمول زیر، استفاده کرد:

که در آن  $N$  نیروی محوری بر واحد محیط مقطع استوانه،  $E$  مدول یانگ،  $\nu$  ضریب پواسون،  $t$  ضخامت پوسته و  $R$  شعاع پوسته است. باید توجه داشت که این معادله، برای پوسته‌های نازک بدون گشودگی با  $L/R \leq 5$ ، جواب مناسبی می‌دهد [۷]. این معادله، برای پوسته‌های با ضخامت متوسط ( $R/t < 50$ ) نیز اغلب مقداری بیشتر از بار کمانش واقعی را نشان می‌دهد بطوریکه پوسته قبل از رسیدن به این بار دچار کمانش می‌شود. باید توجه کرد که معادله (۱-۱) فقط برای پوسته‌هایی که از مواد الاستیک و ایزوتروپ ساخته شده باشند بکار می‌رود.

مانند دیگر سازه‌ها، پوسته‌ها نیز مستعد ایجاد و رشد عیوبی مثل ایجاد ترک، خوردگی و تغییرات شیمیائی هستند. وجود ترک روی پوسته مانند عیب و نقصهای سازه‌ای عمل می‌کند و به شدت بر روی رفتار کمانش پوسته‌ها تاثیر گذاشته و باعث کاهش توان باربری آن می‌شود [۱۱-۱۳]. Naschie برای اولین بار کمانش پوسته‌های ترک دار را مطرح کرد [۱۴]. تمرکز وی در این مطالعه بر روی پوسته‌های استوانه‌ای که دارای ترک محیطی کامل هستند بود. بار کمانش این پوسته‌ها تقریباً نصف بار کمانش استوانه کامل بدون ترک است. Dyshel کمانش پوسته استوانه‌ای با ترک محیطی را که تحت کشش قرار دارد به روش تحلیلی- عددی بررسی کرد [۱۵]. پوسته استوانه‌ای بلند، نازک، الاستیک و ایزوتروپ است و تحت تنش کششی قرار دارد. فرض می‌شود که ترک کم عمق و دارای طول کم است. فرض می‌شود که نمودار تنش - کرنش در همسایگی نوک ترک همانند صفحه تخت است. لبه‌های ترک بوسیله یک دایره به شعاع واحد مشخص می‌شود. مرتب سازی نقطه برای معادلات حالت و مقدار ویژه بدست آمده از معادلات جبری همگن به کمک پایداری دترمینان بدست می‌آید. اهمیت عملی این نتایج، با فرضیاتی که در حل صورت گرفته محدود شده است. کمانش صفحه ترک دار نیز مشابه کمانش پوسته‌ها است. صفحات را می‌توان پوسته‌ای در نظر گرفت که انحناء ندارند. عدم وجود انحناء فرمول سازی تئوری را ساده می‌کند و به راحتی می‌توان رفتار آن را با پوسته‌های دارای انحناء مقایسه کرد. کمانش پوسته‌ها با ترک طولی مرکزی تحت کشش، به عنوان ساده‌ترین حالت کمانش صفحه در نظر گرفته می‌شود. وی شکست صفحه و پانل‌های استوانه‌ای را بررسی کرد. او مشاهده کرد که کمانش

ورقها در باری کمتر از بار بحرانی روی میدهد و رشد ترک سریع تر اتفاق می افتد. Hoff و Soong در مورد این مساله تحقیقات بیشتری انجام دادند [۱۶]. تحقیق و بررسی در زمینه کمانش پوسته ها و صفحه های ترک دار بسیار محدود است. چون شامل دو موضوع پایداری پوسته و پوسته های ترک دار می شود. تا کنون تحقیقات پایداری برای حل این مثال انجام نشده است. H. estekanchi با تمرکز بر روی مدل المان محدود (FE) روی کمانش پوسته ترک دار بحث کرده است. او یک مدل المان محدود عمومی برای تحلیل کمانش پوسته ترک دار ارائه داده است. با توجه به مشکل بودن تحلیل مسائل سازه ای، روش (FE) به عنوان یک روش مناسب برای تحلیل اینگونه مسائل بکار می رود که مسئله کمانش پوسته های ترک دار از جمله این مسائل است. در هر حال مطالب در مورد بررسی کمانش پوسته های ترک دار بسیار محدود است. بنابراین اولین گام برای حل این مسئله ارائه یک مدل المان محدود مناسب است. در حالت کلی، انرژی پتانسیل جسم الاستیک به صورت زیر است [۱۳].

$$\Pi = U + V \quad (۲-۱)$$

بر اساس اصل انرژی پتانسیل حد اقل، فرمول زیر برای تعادل استاتیک و پایداری نیرو بعد از عملیات ریاضی به شکل خطی زیر در می آید:

$$\int_V \sigma^T \delta \varepsilon dV = \int_V \delta u^T b dV + \int_A \delta u^T dA + (\delta u^c)^T P_c \quad (۳-۱)$$

تحلیل کمانش هیچ گونه اطلاعاتی درباره رفتار پس کمانش سازه ها نمی دهد. برای آزمایش اثر غیر خطی، باید برای هر مورد یک تحلیل غیر خطی انجام شود. در هر حال، تحلیل کمانش تخمین خوبی از بار کمانش واقعی در مورد تغییر شکل سازه می دهد. در مسئله کمانش پوسته ها، مش بندی مناسب مدل FE گاهی پیچیده می شود و باعث می شود باری که برای کمانش تخمین زده می شود به طور غیر منتظره ای تغییر کند.

رفتار کمانشی پوسته های ترک دار به عواملی نظیر شرایط مرزی، هندسه، طول و زاویه ترک و شرایط بارگذاری بستگی دارد. کمانش غیر خطی پوسته های استوانه ای جدار نازک با ترک طولی، تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی توسط Starnes و Rose مورد مطالعه قرار گرفت [۱۷ و ۱۸]. آنها نتیجه گرفتند که اثر غیر خطی بین تنشهای ایجاد

شده در صفحه و جابجایی های خارج صفحه در نزدیکی ترک روی رفتار کمانش پوسته اثر می گذارد. در مدل سازی المان محدود نحوه مش بندی نوک ترک برای به دست آوردن جواب دقیق از اهمیت بالایی برخوردار است. Vaziri یک مدل المان محدود مناسب برای مش بندی ارائه کرده است [۱۹]. تحلیل پس کمانش پوسته های ترک دار نشان می دهد که تغییر شکل ناشی از کمانش باعث افزایش قابل توجه ضریب شدت تنش در اطراف نوک ترک میشود [۲۱]. از طرف دیگر، افزایش بارگذاری می تواند منجر به گسترش کمانش محلی و در نهایت منجر به شکست مخرب در سازه شود [۲۲]. تحقیقات نشان می دهد که کمانش پوسته های استوانه ای به وجود ترک و بارگذاری فشاری نسبت به حالتی که پوسته فاقد ترک بوده ولی بارگذاری آن پیچشی است، حساسیت بیشتری نشان می دهد [۲۳]. Vaziri حساسیت کمانش پوسته های استوانه ای کامپوزیتی را به وجود ترکهای سراسری تحت فشار محوری بررسی کرد [۲۴]. وی تحلیل مقادیر ویژه را با استفاده از روش المان محدود انجام داد و همچنین تاثیر اندازه و زاویه ترک را بررسی کرده است. تحقیقات نشان می دهد که وجود ترک باعث تغییر مشخص در رفتار پوسته های استوانه ای ترک دار، با ایجاد کمانش محلی در اطراف ترک میشود که تابع طول ترک، راستای ترک و شرایط بارگذاری است [۲۵]. با توجه به پارامترهای زیاد موثر و نیز پیچیده بودن رفتار پوسته های ترک دار که نمی توان به کمک یک رابطه تحلیلی رفتار پوسته را پیش بینی کرد، حل عددی این مسئله بهترین روش به نظر می رسد [۲۶-۲۹].

Brighenti درباره اثر طول و زاویه ترک بر روی بار کمانش صفحه مستطیلی نازک که دارای شرایط تکیه گاهی مختلف است مطالعه کرده است [۳۰]. در این مطالعه، بارگذاری کششی و فشاری در نظر گرفته شده است. بررسی اثر ترک مرکزی بر روی استحکام نهایی پانل توسط Alinia به کمک روش المان محدود انجام شده است [۳۱]. Khedmati مقایسه ای بین اثر طول ترک و محل ترک روی رفتار کمانشی صفحه ترک دار تحت بارگذاری فشاری انجام داده است [۳۲]. شریعتی تاثیر پارامترهای هندسی و مکانیکی مانند طول ترک، زاویه ی ترک، شرایط مرزی و نوع ماده را بر روی بار کمانش و ضریب بار کمانشی در کمانش و پس کمانش ورق های ترک دار تحت بار محوری فشاری را در حالت الاستیک مورد بررسی قرار داده است. از این میان شرایط مرزی و نوع ماده از جمله عوامل موثر بر بار کمانش و ضریب تنش کمانشی ورق های ترک دار می باشد [۳۳]. سبک دست رفتار بعد از کمانش پوسته های استوانه ای ترکدار تحت



بار محوری و اثر وجود ترک بر بار کمانشی را با استفاده از روش اجزا محدود توسط بر نامه Ansys تحلیل و اثر پارامترهایی نظیر طول ترک و زاویه ترک بر روی بار بحرانی و رفتار بعد از کمانشی آن را مورد بررسی قرار داده است و نتایج بدست آمده در مواردی که نتایج آزمایشگاهی موجود بوده تطابق لازم را دارد [۳۴].

## ۱-۵- جمع بندی

به طور کلی می توان تحقیقاتی که بر روی عوامل موثر بر بار کمانش پوسته ها انجام شده است را این گونه تقسیم بندی نمود:

- (۱) مشخصات ماده: در صورت ایزوتروپ بودن  $U$  و  $E$  تنها عوامل موثر هستند.
- (۲) مشخصات هندسی پوسته: عواملی نظیر طول، ضخامت و قطر بر بار کمانش تاثیر گذار می باشد.
- (۳) مشخصات ترک: در این تحقیق عوامل اصلی موثر را می توان طول ترک، زاویه ترک و جابجائی ترک دانست که عوامل مکانیک شکستی نظیر گسترش ترک و یا جاری شدن ماده در گوشه ترک در نظر گرفته نشده اند.

در ادامه تاثیر هر کدام از عوامل بالا را به دو روش تجربی و عددی مورد بررسی قرار می دهیم.

## فصل دوم

# تحلیل عددی پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار

## ۲-۱- مقدمه

افزایش روز افزون نیازهای بشر و تلاش برای برآورده ساختن آنها، منجر به خلق مسائل تازه و پیچیده‌ای در همه زمینه‌های علمی و فنی شده که حوزه مهندسی مکانیک و سازه نیز از این امر مستثنی نبوده است.

در اغلب موارد، نیاز به طراحی و تحلیل قطعات با هندسه و خواص پیچیده تحت بارگذاری‌های نامنظم احساس می‌شود که بکارگیری روشهای کلاسیک موجود (به عنوان مثال تئوری الاستیسیته) منجر به یافتن معادلات حاکم بسیار پیچیده با شرایط مرزی و اولیه متنوع، می‌شود؛ که عملاً حل این معادلات، از روش تحلیلی را غیر ممکن می‌سازد.

معمولاً مهندسان و فیزیکدانها یک پدیده فیزیکی را به وسیله دستگامی از معادلات دیفرانسیل معمولی و یا پاره ای<sup>۱</sup> که در محدوده خاصی صادق است و شرایط مرزی و آغازین مناسبی را تامین می‌کند توصیف می‌کنند. در واقع یک معادله دیفرانسیل با شرایط مرزی و اولیه مورد نیاز خود، یک مدل ریاضی کامل از یک پدیده است. برای یافتن توزیع متغیرهای مورد نظر که ارتباط آنها به شکل دیفرانسیلی توسط معادله حاکم بیان می‌گردد، می‌بایست معادله مذکور حل گردد تا بتوان مقادیر عددی هر کمیت مرتبط را در نقاط دلخواه بدست آورد. اما با توجه به اینکه تنها می‌توان اشکال بسیار ساده این معادلات آن هم در ناحیه‌های هندسی بسیار ساده را با روشهای تحلیلی حل نمود، حل اغلب معادلات حاکم به روش تحلیلی ممکن نیست.

برای مقابله با چنین مشکلاتی و نیز جهت استفاده از قدرتمندترین وسیله موجود در قرن حاضر یعنی کامپیوتر، ضروری است که مساله مورد نظر در یک قالب مشخص ریخته شود تا حل آنها تنها نیازمند عملیات جبری باشد. برای دستیابی به چنین هدفی می‌توان از انواع مختلف روشهای گسسته سازی یک مساله پیوسته تعریف شده به وسیله معادلات دیفرانسیل استفاده نمود. در این روشها تابع و یا توابع مجهول که می‌توان آنها را با مجموعه ای نا متناهی از اعداد نشان داد، به وسیله تعداد متناهی از پارامترهای مجهول جایگزین می‌گردند که طبیعتاً در حالت کلی نوعی تقریب را در بر دارد. برای این منظور روشهای عددی متنوعی برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر

---

<sup>۱</sup> Partial

سیستمها ایجاد و امروزه به طرز وسیعی مورد استفاده قرار می گیرند. سه روش عمده در حل عددی یک معادله دیفرانسیل به شرح زیرند:

۱- روش تفاضل محدود<sup>۱</sup>

۲- روش تغییراتی<sup>۲</sup>

۳- روشهای باقیمانده وزنی<sup>۳</sup>

بسته به نوع روش عددی مورد استفاده و نوع المان بندی، روشهای مختلفی نظیر حجم محدود<sup>۴</sup>، المان محدود<sup>۵</sup>، تفاضل محدود و ... حاصل شده است. هر کدام از روشهای فوق، در قالب نرم افزارهای متنوع به کاربران عرضه شده اند. روشی که در اغلب مسائل مکانیک جامدات مورد استفاده قرار می گیرد روش المان محدود است که در قالب نرم افزارهایی چون ANSYS ، ABAQUS ، NASTRAN و غیره قابل استفاده است.

## ۲-۲- معرفی نرم افزار ABAQUS/CAE

ABAQUS یک مجموعه از برنامه های مدل سازی بسیار توانمند می باشد که مبتنی بر روش المان محدود، قابلیت حل مسایل از یک تحلیل خطی ساده تا پیچیده ترین مدل سازی غیر خطی را دارا می باشد. این نرم افزار دارای مجموعه المانهای بسیار گسترده ای می باشد که هر نوع هندسه ای را می توان به صورت مجازی توسط این المانها مدل کرد. همچنین دارای مدل های مواد مهندسی بسیار زیادی است که در مدل سازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیکها، پلیمرها، کامپوزیتها، بتن تقویت شده، فومهای فبری و شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می سازد.

نظر به اینکه ABAQUS یک ابزار مدل سازی عمومی و گسترده می باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل های مکانیک جامدات و سازه (تنش- تغییر مکان) نمی شود. با استفاده از این نرم افزار می توان مسایل مختلفی نظیر

<sup>۱</sup> Finite Difference  
<sup>۲</sup> Variational Method  
<sup>۳</sup> Weighted Residual Methods  
<sup>۴</sup> Finite Volume  
<sup>۵</sup> Finite Element

انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی اجزای الکتریکی، اکوستیک، مکانیک خاک و پیزو الکتریک را نیز مورد مطالعه قرار داد.

استفاده از نرم افزار ABAQUS با وجود اینکه مجموعه قابلیت‌های بسیار گسترده ای را در اختیار کاربر قرار می‌دهد، کار نسبتاً ساده‌ای می‌باشد. پیچیده ترین مسایل را می‌توان به آسانی مدل کرد. به عنوان مثال مسایل شامل بیش از یک جزء را می‌توان با ایجاد مدل هندسی هر جزء و سپس نسبت دادن رفتار ماده مربوطه به هر جزء و سپس مونتاژ اجزاء مختلف مدل کرد. در اغلب مدلسازی‌ها، حتی مدل‌ها با درجه غیر خطی بالا، کاربر می‌بایست تنها داده‌های مهندسی نظیر هندسه مساله، رفتار ماده مربوط به آن، شرایط مرزی و بار گذاری آن مساله را تعیین کند. در یک تحلیل غیر خطی، ABAQUS به طور اتوماتیک میزان نمو بار<sup>۱</sup> و تکرارهای همگرایی را انتخاب و همچنین در طول تحلیل مقادیر آنها را جهت دستیابی به یک جواب صحیح تعدیل می‌کند. در نتیجه کاربر بندرت می‌بایست مقادیر پارامترهای کنترلی حل عددی مساله را تعیین کند.

ABAQUS/CAE محیط اصلی و گرافیکی ABAQUS می‌باشد که در آن قابلیت‌های متنوعی جهت مدلسازی، اجرای فرمان حل و مانیتور کردن آن به طور هم زمان و نیز مشاهده نتایج در دسترس قرار گرفته است. ABAQUS/CAE به محیط های ده گانه‌ای تقسیم شده است که در هر یک از این محیط ها طبق یک فرآیند منطقی یکی از بخشهای مدلسازی انجام می‌گیرد. هنگامی که مدلسازی به اتمام رسید، ABAQUS/CAE یک فایل ورودی<sup>۲</sup> ایجاد می‌کند که ساختاری بسیار شبیه به یک کد برنامه نویسی شده دارد و توسط یکی از دو روش ضمنی و یا صریح مورد تحلیل قرار می‌گیرد. حل گر نرم افزار، فایل ورودی را خوانده و طی فرآیند حل اطلاعاتی را به CAE می‌فرستد که قابلیت مانیتور کردن پروسه حل به طور همزمان را ممکن می‌سازد. همچنین نتایج تحلیل در یک فایل خروجی<sup>۳</sup> ذخیره می‌گردد. در نهایت کاربر با استفاده از محیط Visualization فایل خروجی حل گر را باز کرده و به مشاهده نتایج به صورت نمودار، کانتور، انیمیشن و یا هر رابط گرافیکی دیگر می‌پردازد [۳۲].

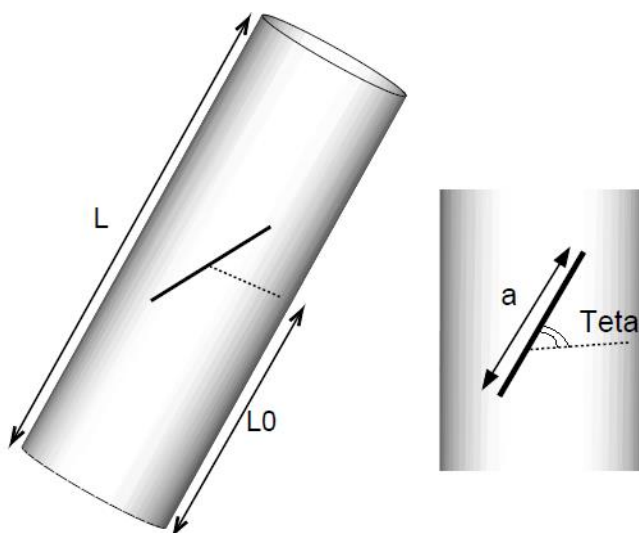
<sup>۱</sup> Load Increment

<sup>۲</sup> Input file

<sup>۳</sup> Output database

### ۲-۳- مدل سازی و ابعاد نمونه ها

در این پایان نامه، پوسته های استوانه ای جدار نازک مورد استفاده دارای دو قطر ( $D=42,50\text{mm}$ )، سه طول ( $L=100,150,250\text{ mm}$ ) و ضخامت  $t=2\text{ mm}$  می باشند. ترک های ایجاد شده روی پوسته استوانه ای دارای زوایای ( $\theta = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ) نسبت به راستای محیطی پوسته می باشد. پارامتر  $\lambda$  بیانگر نسبت طول ترک به محیط پوسته است ( $\lambda = \frac{a}{2\pi r}$ ). شکل (۱-۲) هندسه کلی استوانه ترک دار را نشان می دهد. با توجه به شکل،  $a$  نشان دهنده طول ترک،  $\theta$  زاویه راستای ترک نسبت به محور افقی و  $L_0$  فاصله وسط ترک تا لبه پوسته استوانه ای را نشان می دهد.



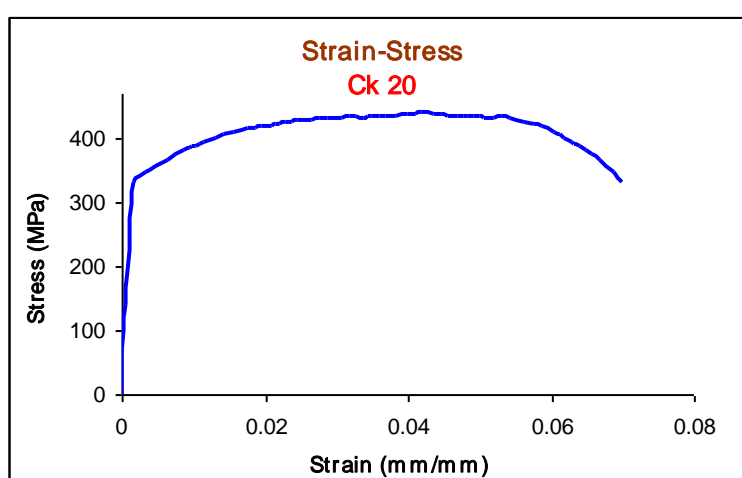
شکل ۱-۲- هندسه پوسته ترک دار

### ۲-۴- نامگذاری نمونه ها

نامگذاری هندسی نمونه ها بدین صورت است که مقدار عددی هر پارامتر در جلوی آن آورده شده است. برای بررسی اثر جابجایی ترک روی رفتار کمانش و پس کمانش پوسته استوانه ای، ترک در مکانهای مختلف روی پوسته مدل شده است. نسبت  $C=L_0/L=0.2,0.3,0.5$  بیانگر موقعیت ترک روی پوسته است. برای نمونه  $C0.5-\lambda0.4-L250-\theta45^\circ-D42$ ، نشان دهنده مشخصات پوسته ای است که طول آن  $250\text{ mm}$ ، دارای قطر  $42\text{ mm}$  و راستای ترک آن نسبت به راستای محیطی  $45^\circ$  درجه می باشد. نسبت طول ترک به محیط پوسته  $0.4/4$  بوده و  $C0.5$  نشان می دهد که ترک در وسط پوسته قرار دارد.

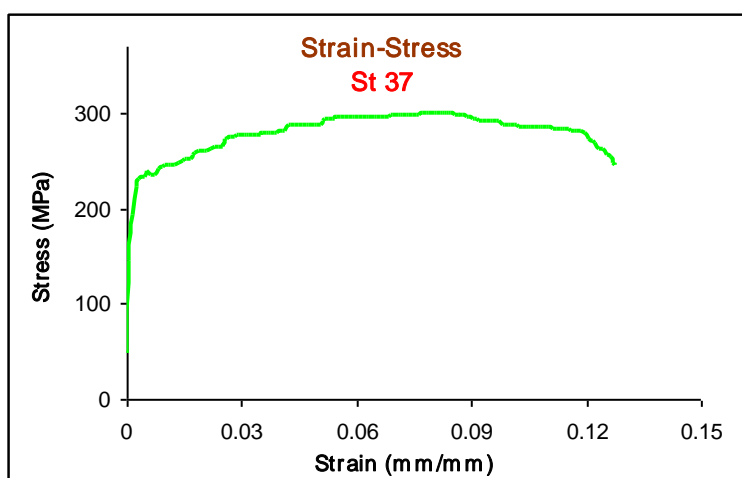
## ۲-۵- خواص مکانیکی ماده

پوسته های استوانه ای مورد استفاده در این مطالعه از فولاد آلیاژی Ck20 و St37 به ترتیب با ضخامت ۲ و ۰/۹ میلیمتر تهیه شده است. خواص مکانیکی فولاد مورد نظر بر طبق استاندارد ASTM E8 به کمک دستگاه INSTRON 8802 تعیین شده است [۳۳]. نمودار تنش- کرنش، خواص الاستیک، پلاستیک و مقادیر عددی آن در شکل های (۲-۲) و (۳-۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲- نمودار تنش- کرنش برای فولاد Ck20

به کمک بخش خطی نمودار تنش- کرنش برای نمونه فولاد Ck20 مدول الاستیک  $E = 195 \text{ GPa}$  محاسبه شده و تنش تسلیم  $\sigma_y = 345 \text{ MPa}$  بدست آمده است. ضریب پواسون برابر  $\nu = 0/33$  در نظر گرفته شده است.

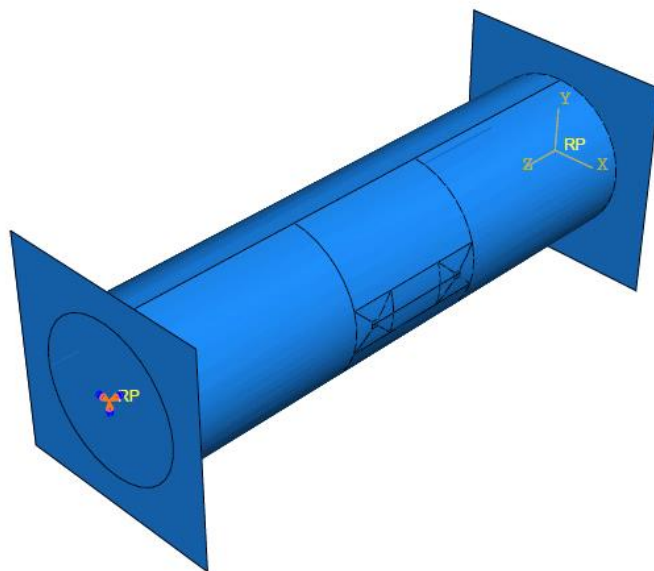


شکل ۳-۲- نمودار تنش- کرنش برای فولاد St37

به کمک بخش خطی نمودار تنش- کرنش مدول الاستیک  $E = 155 \text{ GPa}$  محاسبه شده و تنش تسلیم  $\sigma_y = 240 \text{ MPa}$  بدست آمده است. ضریب پواسون برابر  $\nu = 0.33$  در نظر گرفته شده است.

## ۲-۶- شرایط مرزی نمونه

برای ایجاد شرایط تکیه گاهی مورد نظر در دو لبه پوسته استوانه ای، دو صفحه صلب متصل به دو انتهای پوسته در نظر گرفته شده است. برای ایجاد شرایط کمانش مطابق آنچه که در شرایط آزمایشگاهی روی می دهد، مرکز صفحه بالا را به اندازه  $40 \text{ mm}$  جابجا کرده تا باعث می شود بار فشاری روی هر دو طرف پوسته توزیع شود. برای حالت تکیه گاه گیردار کل درجات آزادی صفحه پایین مقید شده است و صفحه بالایی تنها در راستای طولی می تواند حرکت کند. در بخش تجربی تکیه گاههای مورد استفاده در حالت گیردار دارای ارتفاع  $14 \text{ mm}$  می باشد و به همین خاطر در مدل تحلیلی کل درجات آزادی صفحه پایین مقید شده است و صفحه بالایی تنها در راستای طولی میتواند حرکت کند. در شکل (۲-۴) چگونگی شرایط مرزی مشخص است.

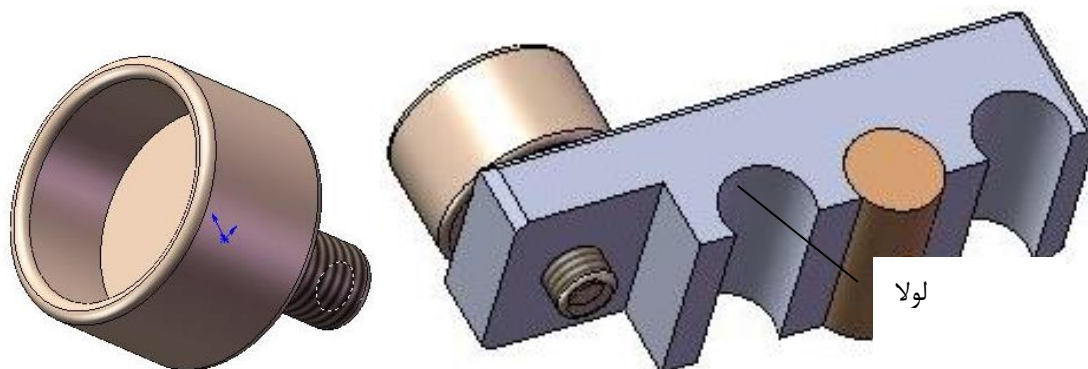


شکل ۲-۴- شرایط مرزی نمونه

برای ایجاد بارگذاری خارج مرکز که در نتیجه آن پوسته همزمان تحت بار فشاری محوری و گشتاور خمشی قرار می گیرد، از فیکسچر نشان داده شده در شکل (۲-۵) استفاده شده است. مشخص است که با توجه به لولا بودن



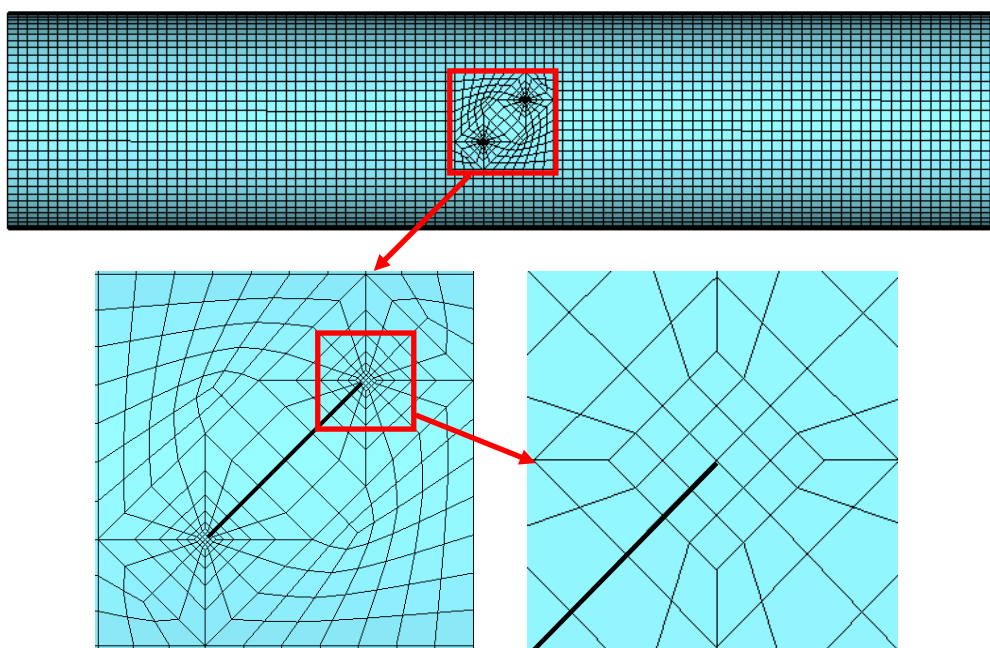
تکیه‌گاه که نیرو را به پوسته منتقل می‌کند، پس از اعمال بار محوری و دوران تکیه‌گاه حول لولا بارگذاری مرکب روی پوسته اعمال می‌شود. فاصله مرکز لولا تا وسط پوسته، میزان خروج از مرکز بار است.



شکل ۲-۵- شرایط مرزی نمونه برای ایجاد بارگذاری خارج مرکز

## ۲-۷- المان بندی نمونه ها

در این تحلیل از المان غیر خطی S8R5، که دارای هشت گره و شش درجه آزادی برای هر گره می‌باشد، و برای تحلیل پوسته ها مناسب است، استفاده شده است و از المان خطی S4R که یک المان خطی مستطیلی با چهار گره می‌باشد، استفاده شده است. از هر دو المان خطی و غیر خطی برای تحلیل استفاده شده و در نهایت نتایج با هم مقایسه شده اند. در مدل سازی المان محدود نحوه مش بندی نوک ترک برای به دست آوردن جواب دقیق از اهمیت بالایی برخوردار است. نحوه مش بندی نوک ترک در شکل (۲-۶) نشان داده شده است.



شکل ۲-۶- نحوه مش بندی نوک ترک

همانطور که مشخص است اطراف ترک و بخصوص نوک ترک، بخاطر حساسیت بیشتر از مش بندی ریزتری استفاده شده است. کمانش محلی در پوسته از نوک ترک شروع به رشد می کند. برای مش بندی مناسب، که برای زوایای مختلف ترک متفاوت است، ابتدا پوسته متناسب با زاویه ترک تقسیم بندی شده و سپس المان بندی می شود.

## ۲-۸- تعیین نوع تحلیل

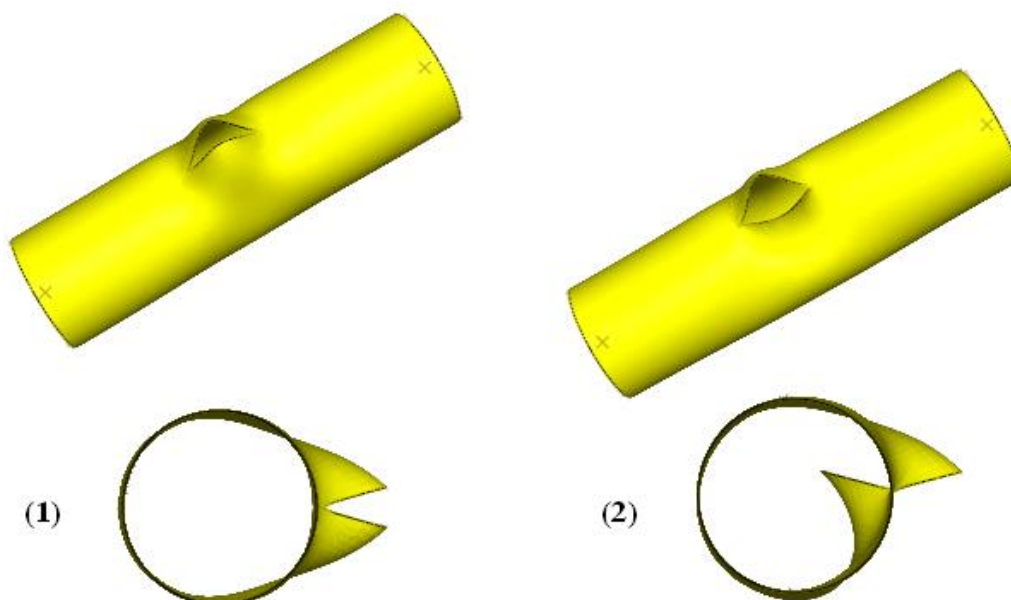
روش المان محدود به عنوان یک روش مناسب برای تحلیل مسائل سازه ای که تحلیل آن ها مشکل است می باشد. مسئله کمانش پوسته های ترک دار از جمله این مسائل است. روش المان محدود به عنوان یک روش موفق در حل مسائل کمانش پوسته ها مطرح است. در هر حال مطالب در مورد بررسی کمانش پوسته های ترک دار که شبیه سازی برهم کنش دو پدیده می باشد بسیار محدود است. بنابراین اولین گام برای حل این مسئله ارائه یک مدل المان محدود مناسب است.

تحلیل کمانش هیچ گونه اطلاعاتی درباره رفتار پس کمانش سازه ها نمی دهد. برای آزمایش اثر غیر خطی، باید برای هر مورد یک تحلیل غیر خطی انجام شود. در هر حال، تحلیل کمانش تخمین خوبی از بار کمانش واقعی در

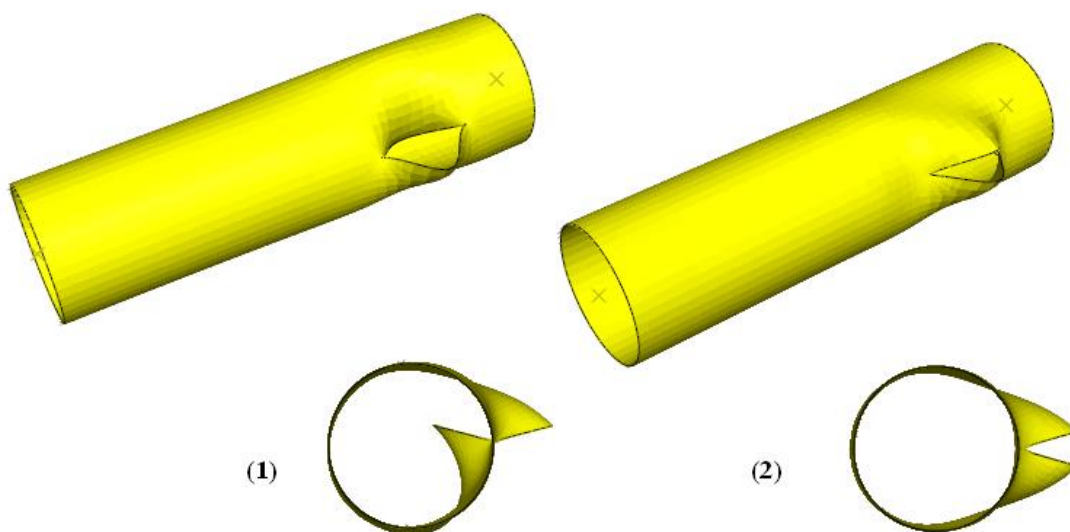
مورد تغییر شکل سازه می دهد. تحلیل مقدار ویژه، بار کمانش را بیشتر از مقدار واقعی آن نشان می دهد، زیرا از خواص پلاستیک ماده در فرایند تحلیل هیچ استفاده ای نمی شود. برای تحلیل کمانش، برای همه نمونه ها ابتدا باید تحلیل مقدار ویژه انجام گیرد تا شکل مد و مقدار ویژه بدست آید. مدهای اول کمانش مقدار ویژه کمتری دارند و کمانش معمولاً در این مدها اتفاق می افتد.

## ۲-۸-۱- تحلیل Buckle

برای حل مقادیر ویژه در تحلیل از مرحله ای به نام Buckle استفاده می شود که باید نتایج آن در تحلیل غیر خطی کمانش لحاظ شود. در غیر این صورت، نرم افزار ممکن است شکل مدهای کمانش را به صورت اختیاری انتخاب کند که باعث بروز جوابهای غیر واقعی در تحلیل غیر خطی می شود. در مرحله Step، نرم افزار از روش حل Subspace استفاده می کند. لازم است که بین صفحات صلب و پوسته یک تماس تعریف شود، لذا نمی توان از روش حل Lanczos استفاده کرد [۳۲]. در شکل های (۲-۷) و (۲-۸) دو شکل مد کمانش برای نمونه نمایش داده شده است.



شکل ۲-۷- دو شکل مد کمانش برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$



شکل ۲-۸- دو شکل مد کمانش برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.25$

## ۲-۸-۲- تحلیل Static, Riks

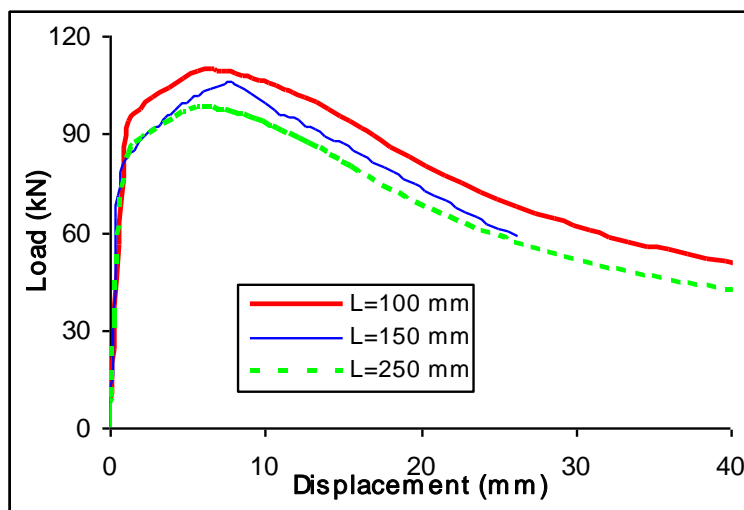
بعد از تحلیل Buckle، از یک تحلیل غیر خطی برای بدست آوردن نمودار نیرو- جابجایی استفاده می‌شود. مقدار ماکزیمم در این نمودار، نشان دهنده بار کمانش است. این مرحله (Static Riks) نامیده می‌شود و از روش Arc length برای تحلیل پس کمانش استفاده می‌کند. در این مرحله خواص غیر خطی و پلاستیک ماده در نظر گرفته می‌شود.

## ۲-۹- نتایج تحلیل عددی پوسته‌های استوانه‌ای بدون ترک تحت بار محوری

در این بخش نتایج تحلیل کمانش پوسته‌های استوانه‌ای بدون ترک تحت بار فشاری محوری برای نمونه‌هایی از جنس فولاد Ck20 و St 37 با سه طول مختلف ( $L=100 \text{ mm}, 150 \text{ mm}, 250 \text{ mm}$ ) ارائه شده است. هدف از انجام این تحلیل‌ها بررسی تأثیر طول پوسته بر روی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک است.

### ۲-۹-۱- نتایج تحلیل عددی پوسته های استوانه ای از جنس فولاد Ck20

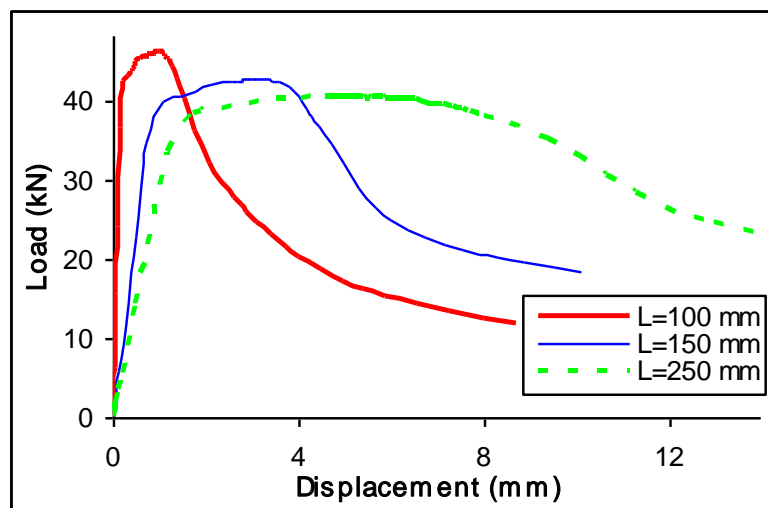
نتایج عددی برای استوانه ای از جنس فولاد Ck20 با سه طول (L=100, 150, 250 mm) با قطر 42 mm به ضخامت 2 mm در نمودار شکل (۲-۹) نشان داده شده است. تاثیر طول در نمودار نشان می دهد که افزایش طول پوسته از 100 mm به 250 mm در شرایط یکسان، باعث کاهش ۱۱ درصد در بار بحرانی کمانش می شود.



شکل ۲-۹- نمودار بار-جابجایی برای طول های مختلف پوسته های استوانه ای از جنس فولاد Ck20

### ۲-۹-۲- نتایج تحلیل عددی پوسته های استوانه ای از جنس فولاد St37

نتایج عددی برای استوانه ای از جنس فولاد St37 با سه طول (L=100, 150, 250 mm) با قطر 60 mm به ضخامت 0.9 mm در نمودار شکل (۲-۱۰) نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش طول پوسته بار کمانش می یابد.



شکل ۲-۱۰- نمودار بار-جابجایی برای طول های مختلف پوسته های استوانه ای از جنس فولاد St37

## ۲-۱۰- نتایج تحلیل عددی پوسته های استوانه ای دارای ترک تحت بار فشاری محوری

در این بخش نتایج تحلیل عددی کمانش پوسته های استوانه ای دارای ترک تحت بار فشاری محوری برای نمونه های با سه طول مختلف ( $L=100\text{ mm}, 150\text{ mm}, 250\text{ mm}$ ) و با قطر خارجی ( $D = 42\text{ mm}, 50\text{ mm}$ ) ارائه شده است. هدف از انجام این تحلیل ها بررسی تأثیر موقعیت، ابعاد و زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پوسته های استوانه ای جدار نازک است.

قابل ذکر است که نتایج بدست آمده برای نمونه های تحلیل شده با قطر ۴۲ میلیمتر، برای کلیه نمونه هایی با هندسه مشابه، که نسبت قطر به ضخامت و نسبت طول به قطر آنها در رابطه (۲-۱۴) صدق کند و از ماده مشابهی تشکیل شده باشند، صادق است.

$$L / D = 2.381 , 3.571 , 5.952 \quad (۲-۱)$$

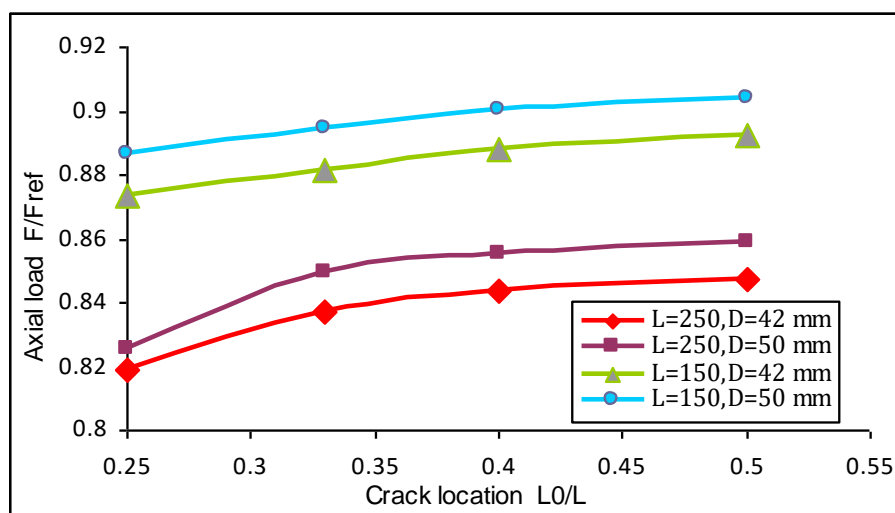
همچنین در مورد نمونه های دارای قطر ۵۰ میلیمتر، نتایج بدست آمده، برای کلیه نمونه هایی با هندسه مشابه، که در رابطه (۲-۱۵) صدق کنند و از ماده مشابهی تشکیل شده باشند، صادق است.

$$D/t = 25 \quad L/D = 2, 3, 5 \quad (2-2)$$

### ۲-۱۰-۱- بررسی تأثیر تغییر موقعیت ترک بر روی رفتار کمانش پوسته های استوانه ای

برای بررسی تأثیر موقعیت ترک روی رفتار کمانش پوسته های استوانه ای، یک ترک که نسبت طول آن به محیط سطح مقطع پوسته برابر  $\frac{a}{\pi D} = 0.5$  و زاویه ترک  $\theta = 45^\circ$  در فاصله هایی برابر با  $L_0 = 0.5L, 0.33L, 0.25L$  از لبه پایینی استوانه روی نمونه ها ایجاد شد.

نتایج حاصل از تحلیل ها با المان غیر خطی در نمودار شکل (۲-۱۱) ارائه شده است. نتایج نشان می دهد که تغییر موقعیت ترک بر بار کمانش تأثیر می گذارد. منحنی های شکل (۲-۱۱) نسبت بار کمانش (حاصل از تحلیل نمونه ها با المان های غیر خطی)، بر حسب موقعیت ترک برای پوسته های استوانه ای با طولهای مختلف و قطرهای متفاوت را نشان می دهد.



شکل ۲-۱۱- منحنی های بار - موقعیت ترک

مشاهده می شود که افزایش قطر پوسته باعث افزایش در بار کمانش می شود. شکل (۲-۱۱) به وضوح نشان می دهد که با تغییر موقعیت ترک از میانه پوسته به طرف لبه های پوسته، بار کمانش کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که پوسته های با طول بلندتر، نسبت به تغییر موقعیت ترک حساس ترند. به عنوان مثال برای

پوسته‌های با نسبت  $L/D = 5$  و  $D/t = 21$  با تغییر موقعیت ترک، از میانه پوسته به فاصله ۲۵ درصدی طول پوسته، بار کمانش حدود ۴ درصد کاهش می‌یابد؛ در حالی که برای پوسته‌های با نسبت  $L/D = 3$  و  $D/t = 25$  کاهش در بار کمانش حدود ۱/۵ و برای پوسته‌های با نسبت  $L/D = 2$  و  $D/t = 21$  این کاهش در بار کمانش به ۲ درصد محدود می‌شود.

شکل (۱۱-۲) منحنی‌های بار بر حسب نسبت طول به قطر استوانه را نیز نشان می‌دهد. واضح است که با افزایش طول پوسته‌های استوانه‌ای، برای ترک با موقعیت یکسان، بار کمانش کاهش می‌یابد و نیز پوسته‌هایی که دارای قطر بیشتری هستند، بار کمانش بیشتری دارند.

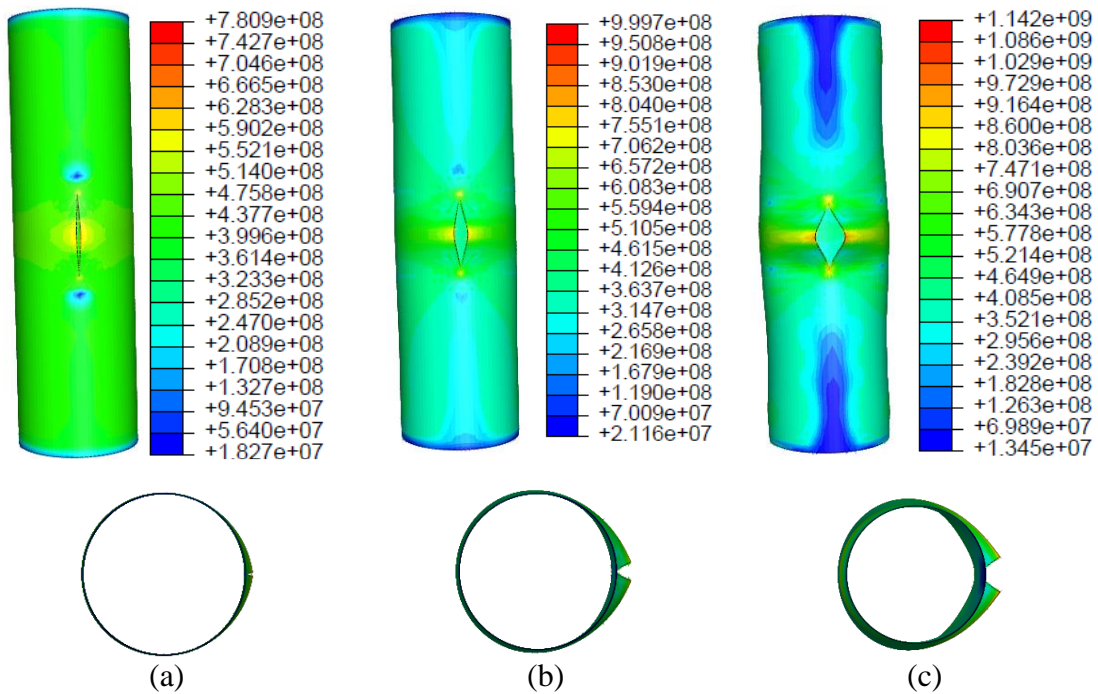
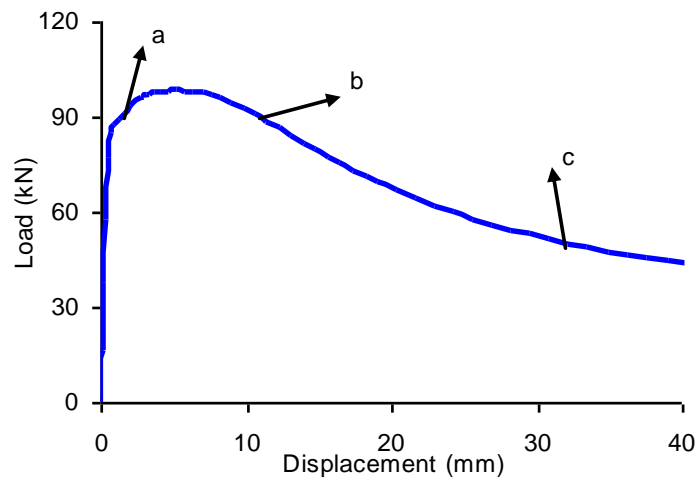
منحنی‌های بار-جابجایی، برای چند نمونه در شکل‌های (۱۲-۲) تا (۱۴-۲) نشان داده شده است. این منحنی‌ها مربوط به تحلیل‌های اجزای محدود با المان خطی S4R است. زیرا همانطور که در فصل بعد توضیح داده خواهد شد، این المان‌ها در مقایسه با سایر المان‌ها ناحیه‌ی پس‌کمانش را بهتر نشان می‌دهند. از منحنی‌های بار-جابجایی مشاهده می‌شود با ایجاد ترک در پوسته، بار کمانش پوسته افت چشمگیری پیدا می‌کند.

در ادامه برای سه نمونه با نسبت‌های  $L/D = 5.676$  و  $D/t = 61.667$ ، دارای ترک با ابعاد ثابت در موقعیتهای متفاوت، ( $L_0/L = 0.5$  و  $L_0/L = 0.25$  و  $L_0/L = 0.33$ ) منحنی‌های بار-جابجایی و نماهای ایزومتریک و بالای پوسته، همراه با کانتورهای تنش ون میزز، در اشکال (۱۲-۲) تا (۱۴-۲) نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های (۱۲-۲) تا (۱۴-۲)، مشاهده می‌شود که قبل از رسیدن بار به مقدار بحرانی، تنش در بیشتر نواحی پوسته غیر از نواحی اطراف ترک، بطور یکنواخت توزیع شده و با افزایش بار، افزایش می‌یابد. کانتورهای تنش برای نمونه دارای ترک در میانه پوسته کاملاً متقارن است. ناحیه جلویی پوسته به علت وجود ترک، تنش کمتری را تحمل می‌کند (اشکال (a-۱۲-۲)، (a-۱۳-۲) و (a-۱۴-۲)) و تا رسیدن به بار بحرانی وسعت این نواحی افزایش می‌یابد. با این وجود، تنش در نواحی اطراف ترک و در جهت محیطی به سرعت بالا رفته بطوریکه این نواحی قبل از رسیدن پوسته به حالت کمانش، تسلیم می‌شوند (اشکال (b-۱۲-۲)، (b-۱۳-۲) و (b-۱۴-۲)). با افزایش بار وسعت این نواحی در جهت محیط پوسته، بیشتر شده و در نهایت پوسته کمانش می‌کند.

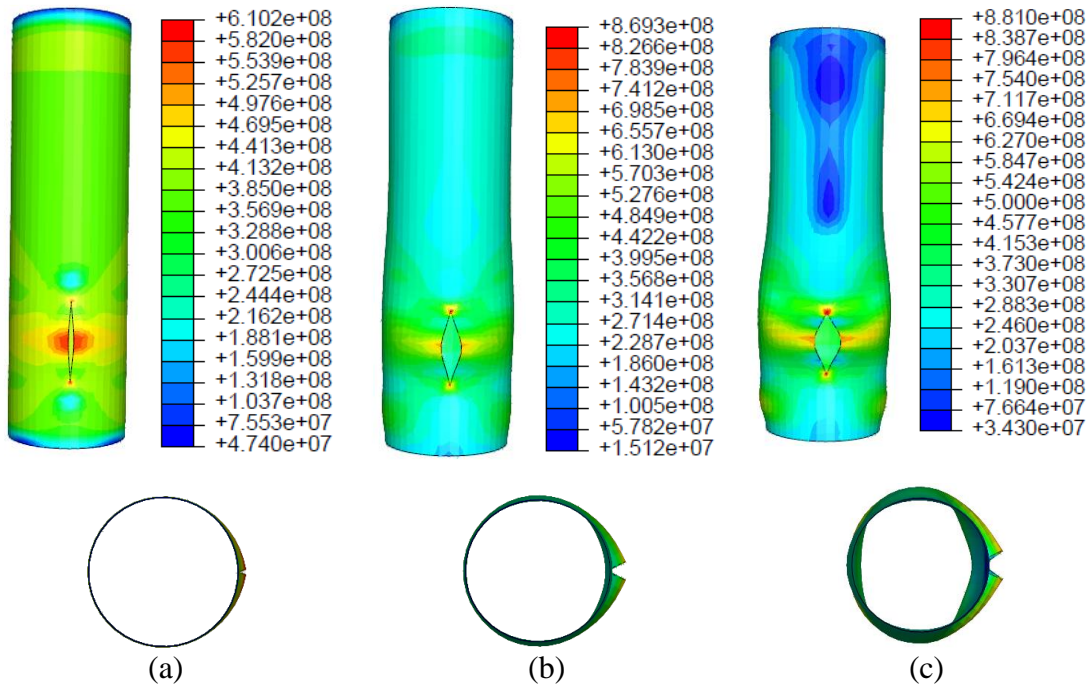
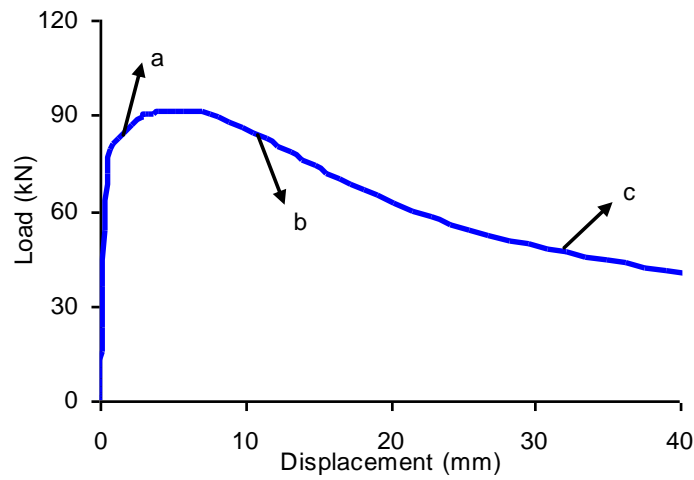


همانطور که از شکل (۲-۱۴-۵) پیداست، بعد از کمانش پوسته، تنش در قسمت‌های میانی پوسته و اطراف ترک بالا رفته و وسعت نواحی پلاستیک شده افزایش می‌یابد. در عوض تنش در دو لبه پوسته شروع به کم شدن می‌کند. دلیل اینگونه توزیع تنش در پوسته این است که چون در ابتدا پوسته تحت فشار محوری قرار دارد، با افزایش نیروی محوری تنش در پوسته بالا می‌رود؛ ولی نواحی اطراف ترک نمی‌توانند نیروی زیادی را تحمل کنند و تنش در این نواحی افزایش چندانی نشان نمی‌دهد. بعد از کمانش، بار فشاری محوری، افت پیدا می‌کند و پوسته کم‌کم دچار خمش کلی می‌شود. بنابراین، تنش در لبه‌ها که کمتر تحت تأثیر خمش قرار دارند کاهش ولی در نواحی اطراف ترک افزایش می‌یابد. مشاهده می‌شود کانتورهای تنش در حالت کمانش و قبل از آن در نواحی بیشتری از پوسته یکنواخت هستند و تمام نقاط پوسته، بجز اطراف ترک، تنش یکسانی را تحمل می‌کنند که این باعث می‌شود حالت پوسته، به پوسته‌ی بدون ترک نزدیکتر شود و بار کمانش افزایش یابد. همچنین ملاحظه می‌شود که کمانش به صورت موضعی و در لبه‌های ترک اتفاق می‌افتد و مقدار تنش در نوک ترک خیلی بیشتر از تنش تسلیم پوسته است. علت این که مقدار تنش در نوک ترک از لحاظ فیزیکی به بی‌نهایت میل کرده است، به این خاطر است که نوک ترک در واقع یک نقطه تکین است.



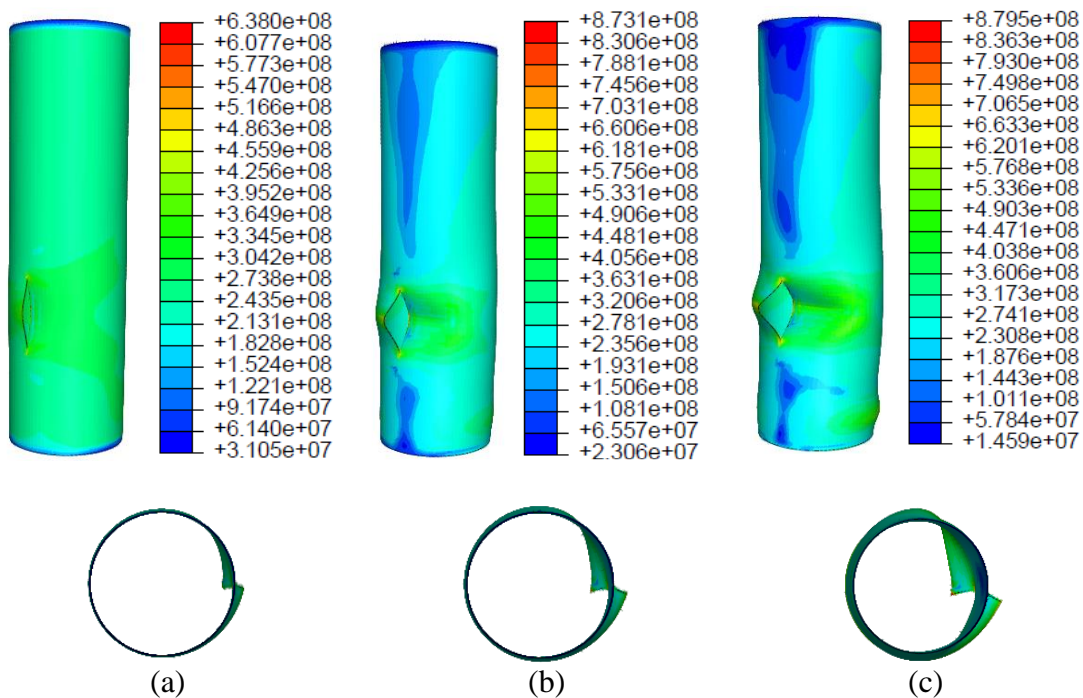
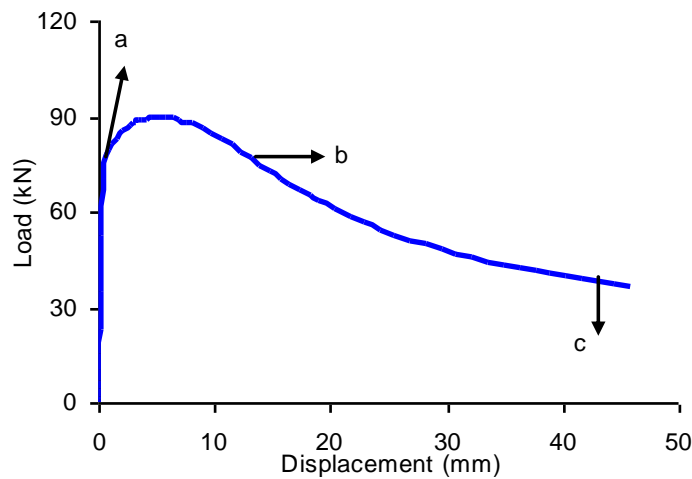
شکل ۲-۱۲- منحنی های بار - جابجایی انتهایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه

$$D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$$



شکل ۲-۱۳- منحنی های بار - جابجایی انتهایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه

$D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.25$



شکل ۲-۱۴- منحنی های بار - جابجایی انتهایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه

$$D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.33$$

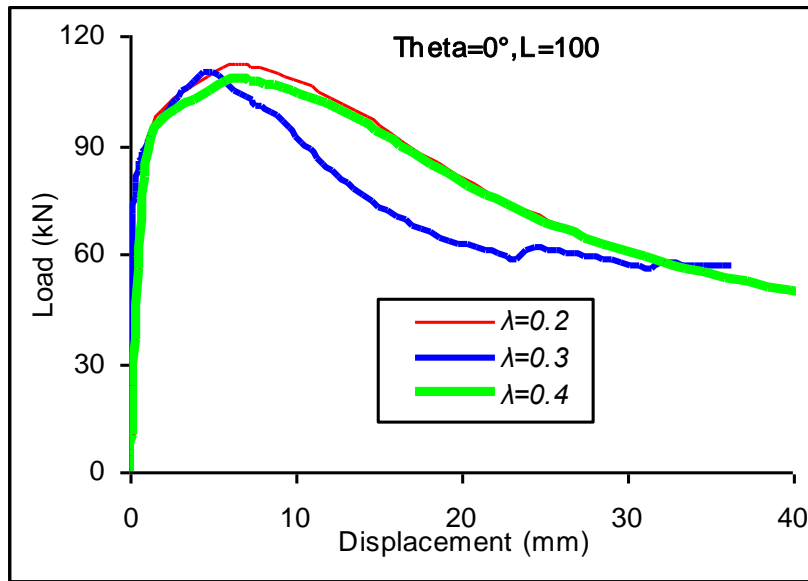
با مقایسه شکل های (۲-۱۲)، (۲-۱۳) و (۲-۱۴) می توان نتیجه گرفت که با افزایش نسبت  $L_0 / L$  ، توزیع تنش چه قبل و چه بعد از کمانش یکنواخت تر می شود و در واقع به جز در نواحی اطراف ترک، به توزیع تنش پوسته بدون ترک نزدیک می شود. به عبارت دیگر نواحی بیشتری از پوسته بار فشاری را تحمل می کنند. این می تواند دلیل افزایش بار کمانش با افزایش نسبت  $L_0 / L$  باشد.

همانطور که دیده می شود، کمانش به صورت موضعی<sup>۱</sup> اتفاق می افتد و سپس پوسته دچار خمش کلی می شود، زیرا مقدار بدست آمده برای جابجایی زاویه ای پوسته حول محوری عمود بر محور طولی استوانه و موازی با امتداد ترک در جهت محیطی، در حالت کمانش و در نواحی اطراف ترک، برای پوسته های استوانه ای با نسبت های  $L_0 / L = 0.08$  ,  $L_0 / L = 0.12$  ,  $L_0 / L = 0.09$  ,  $L_0 / L = 0.25$  ,  $L_0 / L = 0.33$  ,  $L_0 / L = 0.5$  به ترتیب حدود 0.08 و 0.12 رادیان است.

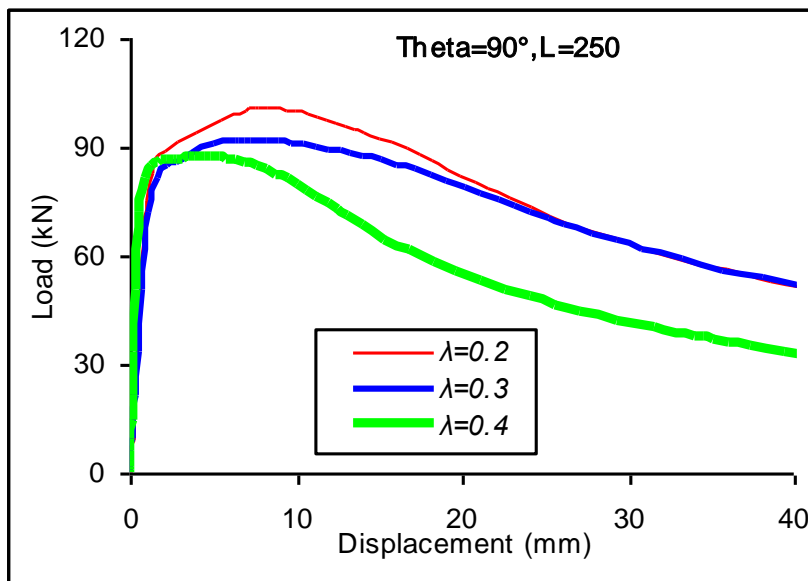
## ۲-۱۰-۲- بررسی تأثیر تغییر طول ترک بر روی رفتار کمانش پوسته های استوانه ای

برای بررسی تأثیر تغییر طول ترک، روی بار کمانش پوسته های استوانه ای، ترک هایی با نسبت طولهای مختلف در پوسته ها ایجاد و تغییرات بار کمانش، بررسی شد. نتایج تحلیل ها در جدول (۱-۲) ارائه شده است. همچنین منحنی های بار کمانش (حاصل از تحلیل نمونه ها با المانهای غیر خطی)، در اشکال (۲-۱۵) و (۲-۱۶) نشان داده شده است.

<sup>۱</sup> Local



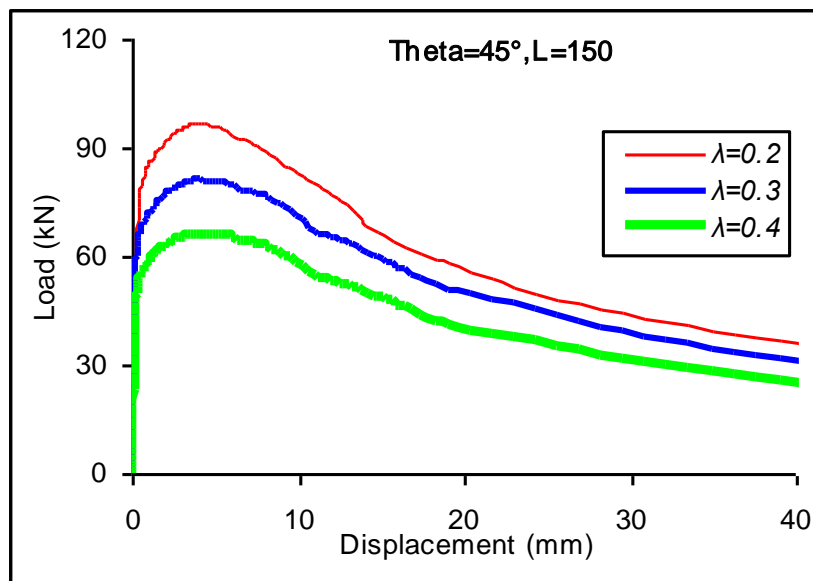
(a)



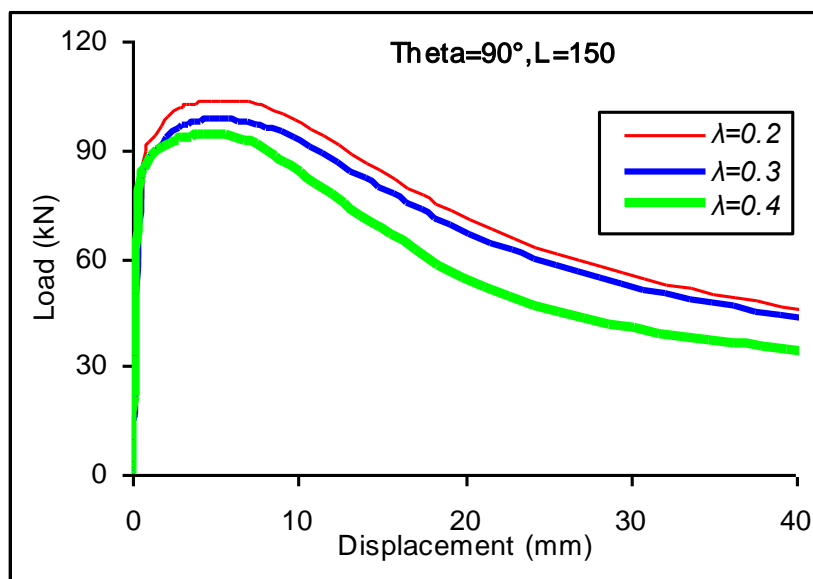
(b)

شکل ۲-۱۵- منحنی های بار - جابجایی پوسته ترک دار برای طول ترک های مختلف

a)  $L100 - \theta 0^\circ - C0.5$     b)  $L250 - \theta 90^\circ - C0.5$



(a)



(b)

شکل ۲-۱۶- منحنی های بار - جابجایی پوسته ترک دار برای طول ترک های مختلف

$L150 - \theta 90^\circ - C0.5$  (b)  $L150 - \theta 45^\circ - C0.5$  (a)

جدول ۲-۱- نتایج تحلیل های عددی برای قطر ۴۲ میلی متر

بار کمانش (kN)		موقعیت ترک (L0/L)	قطر پوسته (mm)	عنوان نمونه
S8R5	S4R			
109.47	111.15	-	42	D42-L100-Perfect
106.50	107.83	0.5	42	D42-L100-00-λ0.2
102.06	105.24	0.5	42	D42-L100-00-λ0.3
95.39	98.620	0.5	42	D42-L100-045-λ0.2
83.79	85.90	0.5	42	D42-L100-045-λ0.3
96.71	99.08	0.5	42	D42-L100-090-λ0.3
92.24	94.37	0.5	42	D42-L100-090-λ0.4
105.68	107.94	-	42	D42-L150-Perfect
101.13	105.85	0.5	42	D42-L150-00-λ0.2
100.07	103.94	0.5	42	D42-L150-00-λ0.3
99.42	102.15	0.5	42	D42-L150-00-λ0.4
94.56	96.83	0.5	42	D42-L150-045-λ0.2
78.94	81.05	0.5	42	D42-L150-045-λ0.3
94.65	98.04	0.5	42	D42-L150-090-λ0.3
88.95	90.39	0.5	42	D42-L150-090-λ0.4
89.14	89.73	0.5	42	D42-L150-060-λ0.4
92.71	94.63	0.25	42	D42-L150-090-λ0.3
92.97	95.17	0.33	42	D42-L150-090-λ0.3
95.76	98.05	0.5	42	D42-L250-00-λ0.2
78.82	79.32	0.5	42	D42-L250-045-λ0.3
94.08	101.27	0.5	42	D42-L250-090-λ0.2
87.68	92.01	0.5	42	D42-L250-090-λ0.3
84.95	87.19	0.5	42	D42-L250-090-λ0.4

شکل های (۲-۱۵) و (۲-۱۶) نشان می دهد که با افزایش طول ترک، بار کمانش کاهش می یابد. اما این کاهش در بار کمانش، برای پوسته با طولهای بزرگتر بیشتر است. تغییرات بار کمانش با افزایش طول ترک از  $\lambda = 0.3$  تا  $\lambda = 0.5$  برای پوسته های بلند، ( $L=250$ )، متوسط ( $L=150$ ) و کوتاه ( $L=100$ ) با قطر ۴۲ میلیمتر، به ترتیب حدود ۱۵/۹ ، ۱۲/۸ درصد و ۹ درصد است. برای پوسته های دارای قطر ۵۰ میلیمتر، با افزایش طول ترک از  $\lambda = 0.3$  تا  $\lambda = 0.5$  بار کمانش حدود ۸/۴ ، ۷/۵ و ۶/۴ درصد، به ترتیب برای پوسته های بلند، متوسط و کوتاه، کاهش می یابد. بنابراین مشاهده می شود که پوسته های بلندتر و با قطر کمتر، نسبت به تغییرات طول ترک حساس ترند.



جدول ۲-۲- نتایج تحلیل های عددی برای قطر ۵۰ میلی متر

بار کمانش (kN)		موقعیت ترک (L0/L)	قطر پوسته (mm)	عنوان نمونه
المان S4R	المان S58R			
124.68	122.07	0.5	50	D50-L100-00-λ0.2
110.26	101.61	0.5	50	D50-L100-045-λ0.3
118.17	114.73	0.5	50	D50-L100-090-λ0.3
115.79	112.09	0.5	50	D50-L100-090-λ0.4
121.08	117.38	0.5	50	D50-L150-00-λ0.3
107.83	105.63	0.5	50	D50-L150-045-λ0.3
114.36	112.39	0.5	50	D50-L150-090-λ0.3
111.64	109.75	0.25	50	D50-L150-090-λ0.3
112.73	110.24	0.33	50	D50-L150-090-λ0.3
111.25	110.17	0.5	50	D50-L250-00-λ0.2
103.67	102.91	0.5	50	D50-L250-045-λ0.3
104.35	103.07	0.5	50	D50-L250-090-λ0.4

واضح است که پوسته های دارای قطر بیشتر و دارای ترک مشابه، مقاومت بیشتری در برابر کمانش از خود نشان می دهند.

منحنی های بار-جابجایی برای برخی نمونه های جداول (۱-۲) و (۲-۲) در شکل های (۲-۱۵) و (۲-۱۶) نشان داده شده است. می توان دید که منحنی بار-جابجایی برای نمونه های دارای طول ترک کوتاه و پوسته  $L=100$  mm کاملاً مشابهند و اختلاف ناچیزی دارند. اما اختلاف این منحنی ها با منحنی مربوط به پوسته بلند زیاد است. در واقع با ایجاد ترک مقاومت در برابر کمانش افت زیادی پیدا می کند.

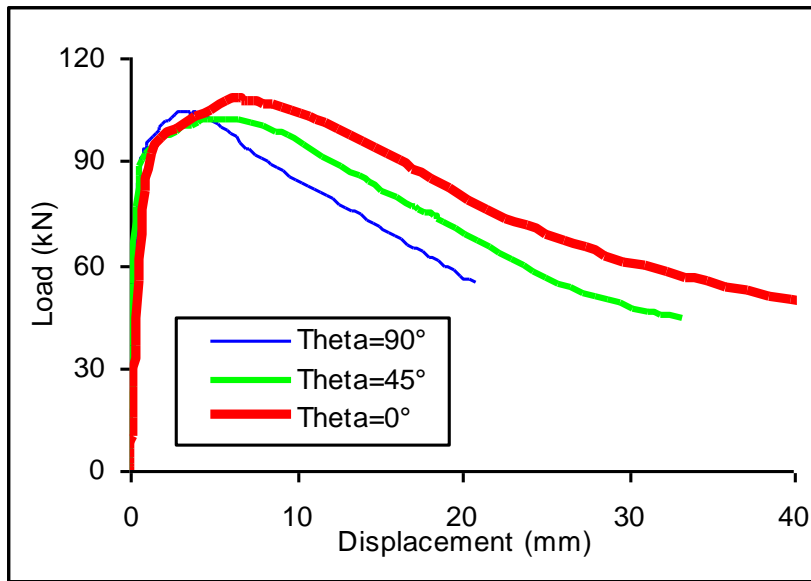
همانند قبل می توان مشاهده کرد که شیب منحنی بار-جابجایی برای تمامی نمونه های دارای ترک برابر است و شیب منحنی مربوط به نمونه های کامل اندکی زیادتر است. همانطور که قبلاً گفته شد، از منحنی های نشان داده شده، واضح است که نمونه هایی که طول ترک در آنها زیادتر است، مقاومت کمتری در برابر ترک از خود نشان می دهند.

نکته دیگری که از نمودارهای نشان داده شده می توان دریافت این است که اگر یک ترک با ابعاد یکسان در پوسته های بلند، متوسط و کوتاه ایجاد شود، پوسته های استوانه ای با طول بلندتر، نسبت به ایجاد این ترک حساس ترند و در ناحیه پس کمانش با افت شدیدتری در قابلیت تحمل بار مواجه می شوند. دلیل این پدیده، قابلیت ایجاد خمش بیشتر در این پوسته ها است.

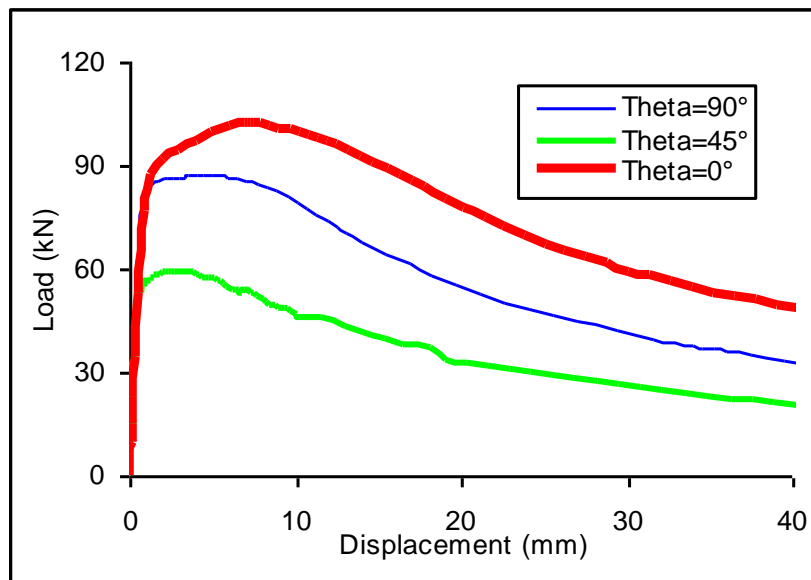
## ۳-۱۰-۲- بررسی تأثیر تغییر زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پوسته های استوانه ای

برای بررسی نحوه تغییرات بار کمانش با تغییرات زاویه ترک، در پوسته های استوانه ای یک ترک با ابعاد ثابت و زوایای متغیر بین صفر تا ۹۰ درجه ایجاد شد. نتایج تحلیل نمونه ها در جدول (۲-۱) ارائه شده است. منحنی های بار-جابجایی برای نمونه های تحلیل شده در شکل های (۲-۱۷) و (۲-۱۸) نشان داده شده است.

ترک افقی ( $\theta=0^\circ$ ) تاثیر بسیار کمی روی کاهش بار کمانش دارد. زیرا بعد از اینکه پوسته استوانه ای تحت بارگذاری قرار می گیرد، دو لبه ترک بر روی هم قرار می گیرند و رفتاری تقریباً مشابه پوسته کامل و بدون ترک را از خود نشان می دهد و در سه طول مختلف تنها باعث کاهش حدود ۴٪ بار بحرانی کمانش می شود. افزایش نسبت طول ترک به محیط  $\lambda$ ، از  $\lambda=0.3$  تا  $\lambda=0.5$  هم تاثیر بسیار ناچیزی بر کاهش بار کمانش دارد. ترک با زاویه ( $\theta=45^\circ$ )، بیشترین اثر را بر کاهش بار بحرانی کمانش دارد و در بیشترین نسبت طول ترک  $\lambda=0.5$ ، بار کمانش برای پوسته به طول  $L=100$  mm، بار بحرانی به ۶۴٪ بار کمانش استوانه کامل می رسد. این مقدار برای طولهای و  $L=250, 150$  mm به ترتیب ۶۱٪ و ۵۳٪ بار کمانش استوانه با همان طول بدون ترک است. در ترک ( $\theta=90^\circ$ ) در حین بارگذاری هیچ برهم کنشی بین دو لبه ترک بوجود نمی آید و لبه های ترک کاملاً از هم باز میشود. در طول ترک یکسان، اثر ترک قائم روی بار بحرانی کمانش از ترک افقی بیشتر و از ترک مایل کمتر است. نتایج نشان می دهند که با افزایش طول پوسته حساسیت بار بحرانی کمانش نسبت به زاویه ترک زیاد می شود و بار بحرانی کمانش در ترک با زاویه ( $\theta=45^\circ$ ) کاهش شدیدتری دارد.

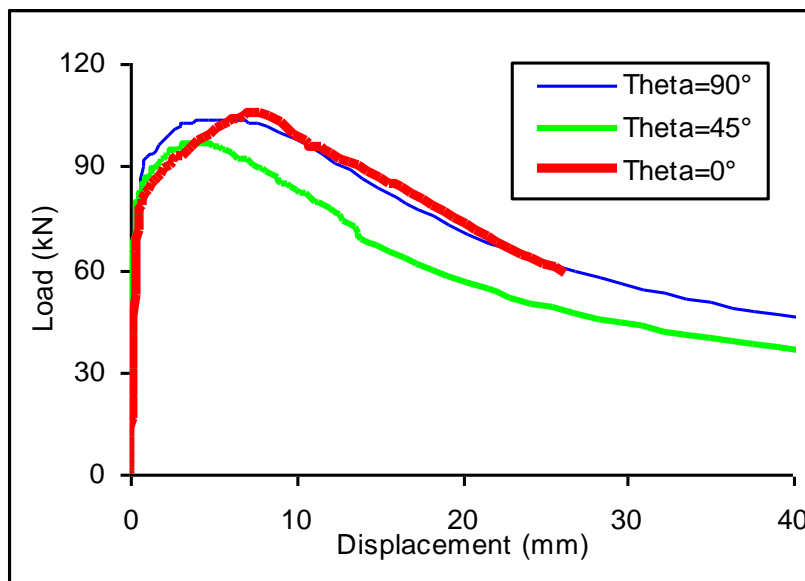


(a)

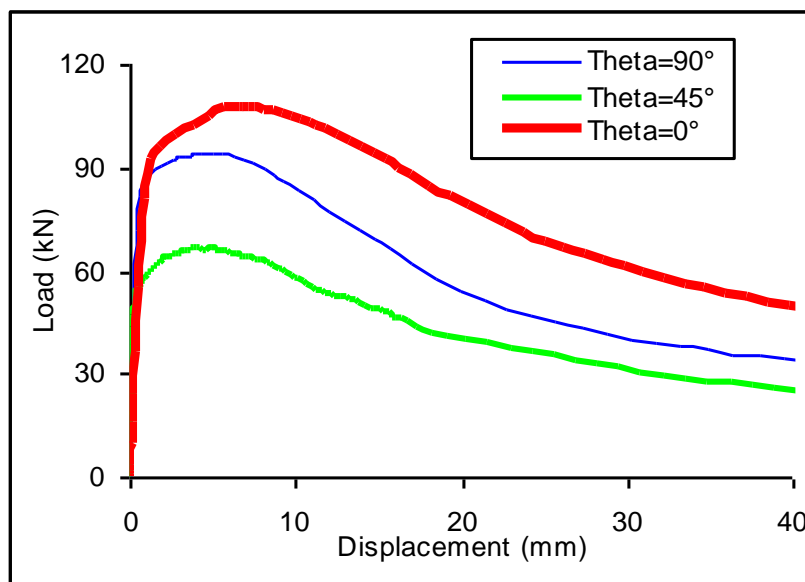


(b)

شکل ۲-۱۷- منحنی های بار - جابجایی پوسته ترک دار برای زاویه ترک های مختلف  
 $L250 - \lambda 0.4 - C0.5$  (b)  $L100 - \lambda 0.2 - C0.5$  (a)



(a)



(b)

شکل ۲-۱۸- منحنی های بار - جابجایی پوسته ترک دار برای زاویه ترک های مختلف

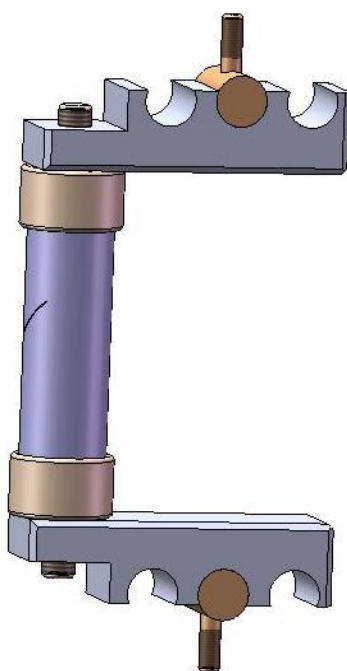
(a)  $L150 - \lambda 0.2 - C0.5$  , (b)  $L150 - \lambda 0.4 - C0.5$

همچنین برای پوسته های استوانه ای بلند ( $L=250$ )، متوسط ( $L=150$ ) و کوتاه ( $L=100$ ) با قطر ۵۰، بارکمانش نسبت به حالتی که قطر پوسته ۴۰ mm است تغییر کمتری را از خود نشان می دهد. بنابراین پوسته های بلندتر و دارای قطر کمتر، نسبت به تغییرات زاویه ترک حساسیت بیشتری نشان می دهند. در نمودارهای بار- جابجایی

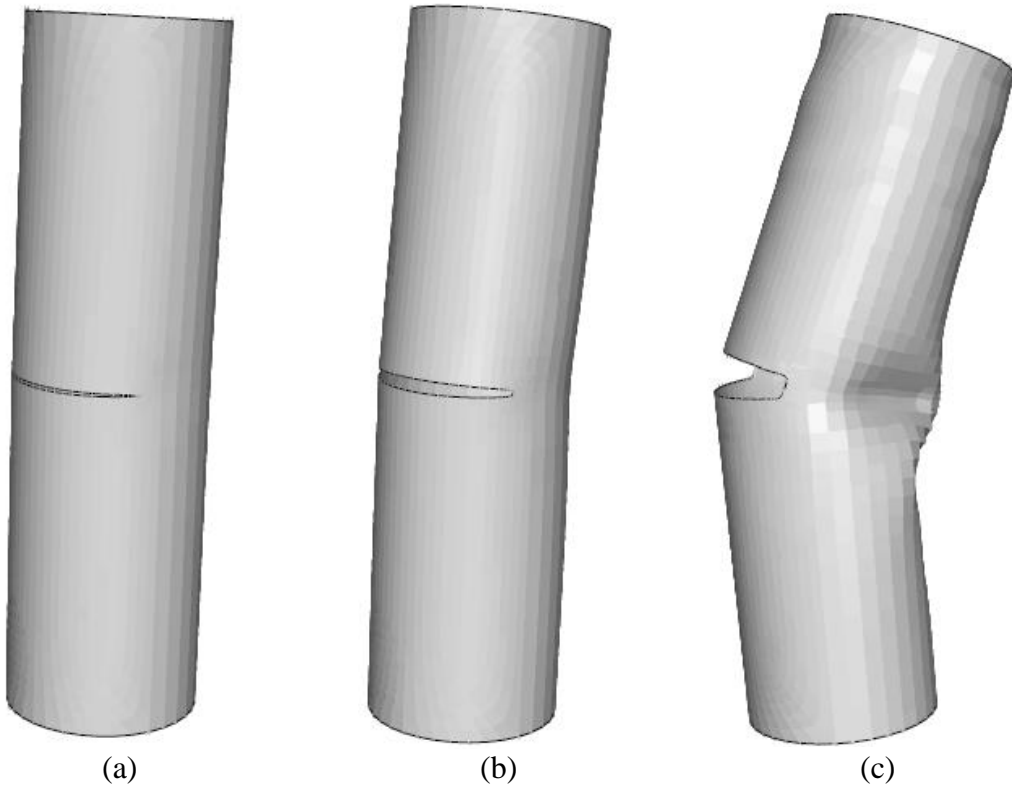
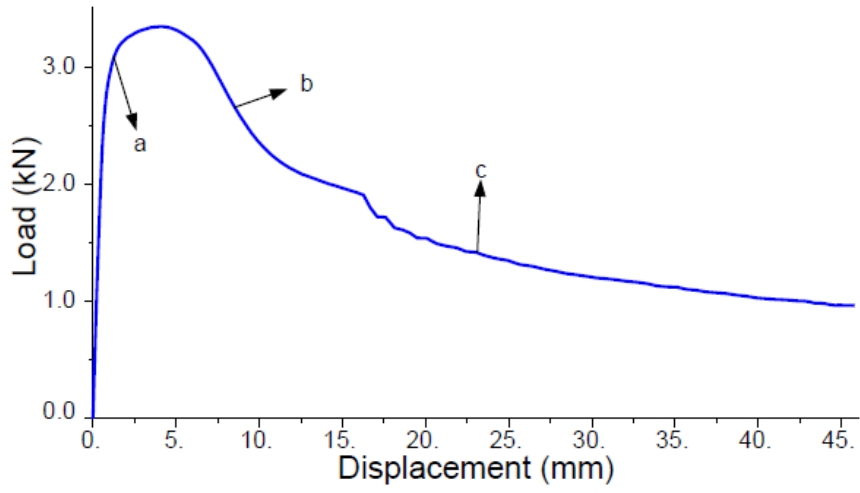
انتهایی نشان داده شده در شکل‌ها مشاهده می‌شود که شیب تمام نمودارها تقریباً یکسان است. بنابراین می‌توان گفت که ایجاد ترک روی سفتی نمونه‌ها قبل از کمانش تأثیری ندارد.

## ۱۱-۲- نتایج تحلیل عددی پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار تحت بار خارج مرکز

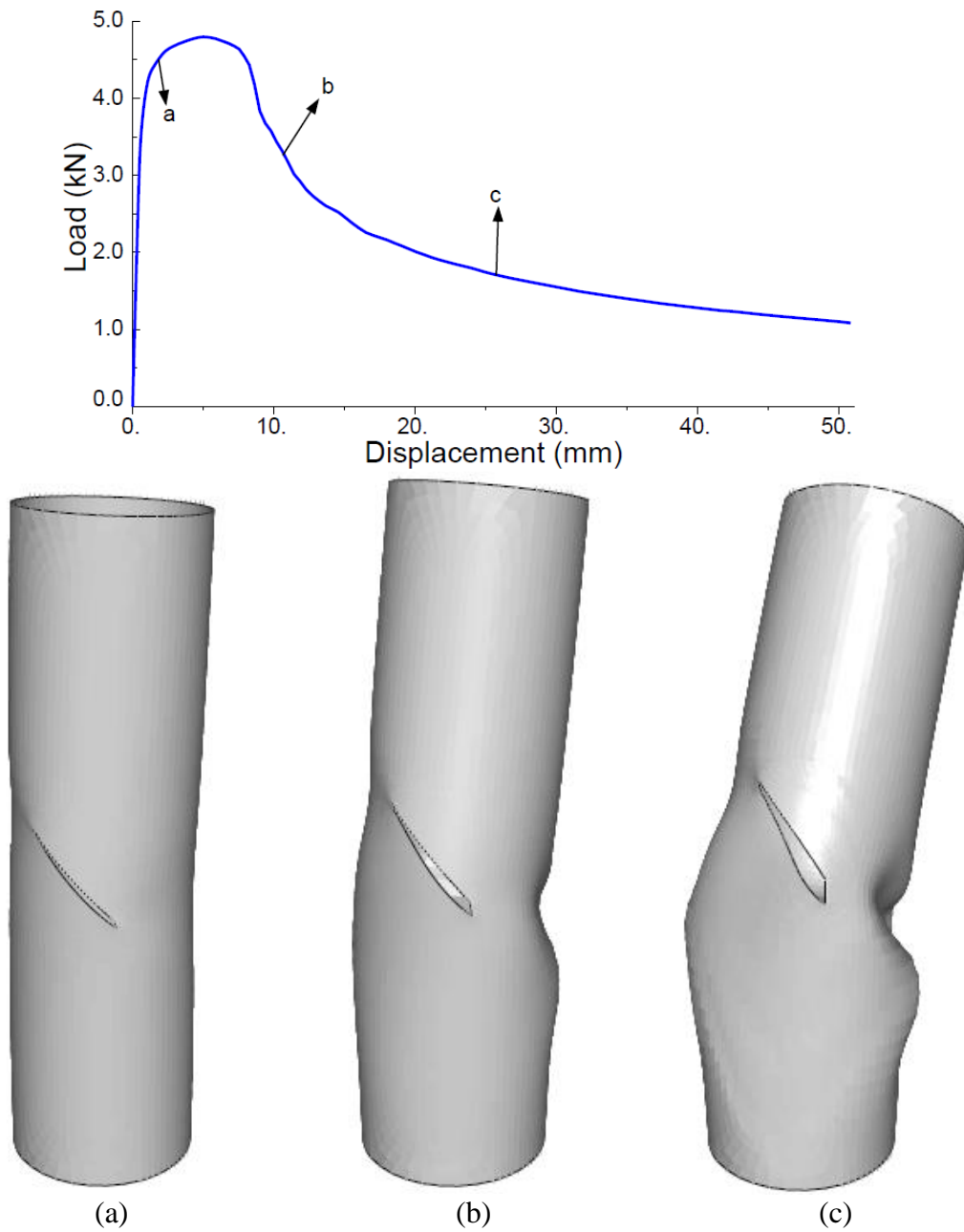
در این بخش نتایج تحلیل عددی پوسته های استوانه ای دارای ترک که تحت بار خارج از مرکز قرار دارد ارائه شده است. برای ایجاد شرایط بار گذاری خارج از مرکز مانند شکل (۱۹-۲) یک نقطه به عنوان نقطه مرجع و در خارج از صفحه پوسته تعریف شده است. جهت خمش پوسته به سمت خارج ترک در نظر گرفته شد. منحنی‌های بار-جابجایی و تغییر شکل پوسته حین بارگذاری برای نمونه‌های تحلیل شده در شکل‌های (۲۰-۲)، (۲۱-۲) و (۲۲-۲) نشان داده شده است.



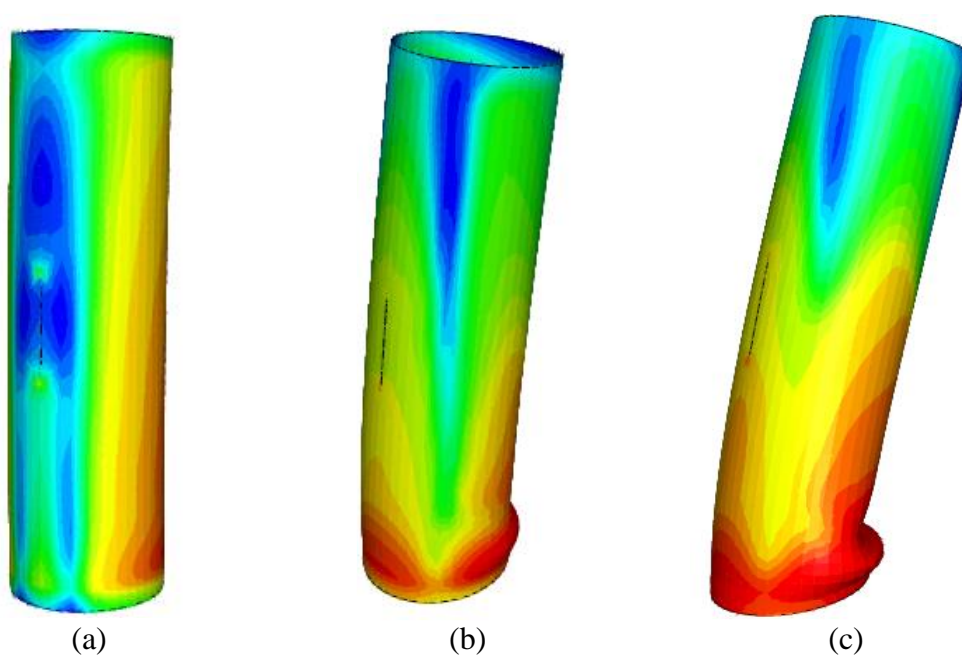
شکل ۱۹-۲- شرایط بار گذاری خارج از مرکز



شکل ۲-۲۰- منحنی های بار - جابجایی، برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$



شکل ۲-۲۱- منحنی های بار - جابجایی، برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 45^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$



شکل ۲-۲۲- منحنی های بار - جابجایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه

$$D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.25$$

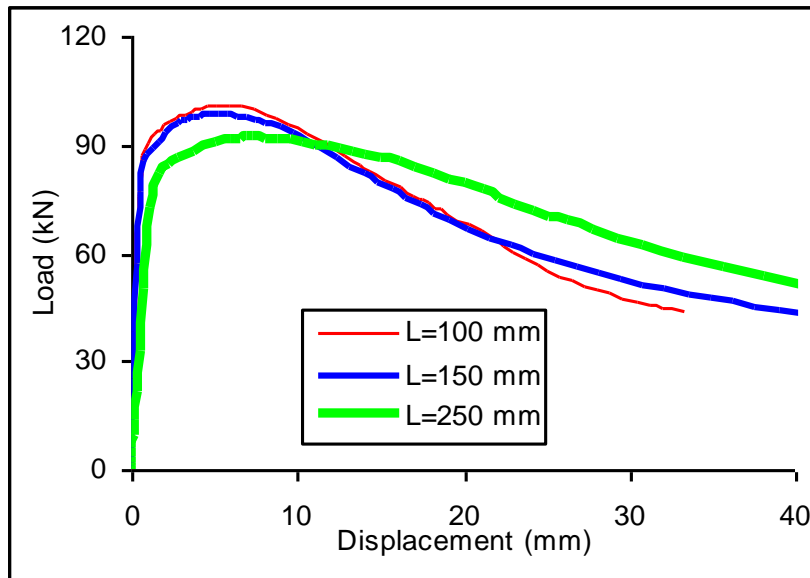
مشاهده می شود که خروج از مرکزی به اندازه ۵۰ میلی متر باعث کاهش شدید بار بحرانی می شود. برای ترک با زاویه  $(\theta = 0^\circ)$  و  $(\theta = 45^\circ)$ ، بار بحرانی کمانش به ترتیب به ۴٪ و ۵٪ بار استوانه بدون ترک افت پیدا می کند. این کاهش در ترک با زاویه  $(\theta = 90^\circ)$  کمتر دیده می شود.

## ۲-۱۲- اثر طول پوسته بر بار بحرانی کمانش

افزایش طول پوسته باعث کاهش بار بحرانی کمانش می شود. تاثیر طول پوسته در ترک مایل بیشتر است و شکل-های (۲-۲۳) تا (۲-۲۵) نشان میدهد که افزایش طول پوسته از 100 mm به 250 mm برای ترک یکسان، باعث کاهش ۱۲ درصد در بار بحرانی کمانش می شود.

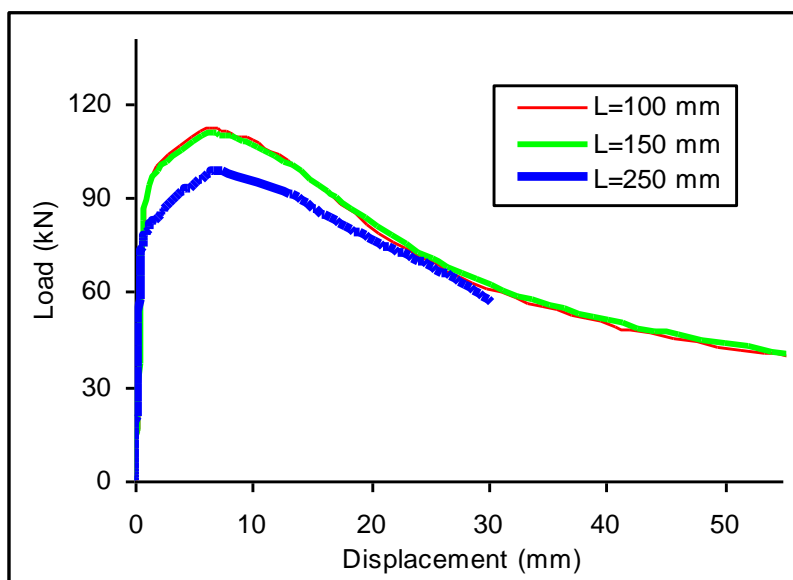


همان طور که از شکل مشخص است ترک با زاویه  $(\theta = 45^\circ)$  کمترین بار بحرانی کمانش را دارد. در طول ترک و زاویه ترک یکسان افزایش طول پوسته باعث کاهش بار بحرانی کمانش می شود و روی ترک با زاویه  $(\theta = 45^\circ)$  اثر بیشتری دارد.



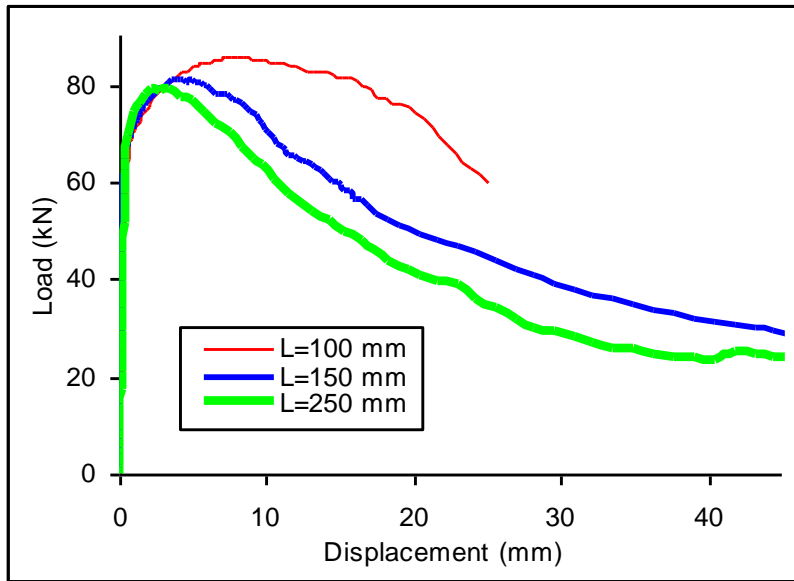
شکل ۲-۲۳- منحنی های بار - جابجایی، برای سه طول مختلف از نمونه

$$D42 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$$



شکل ۲-۲۴- منحنی های بار - جابجایی، برای سه طول مختلف از نمونه

$$D42 - \theta 0^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$$



شکل ۲-۲۵ منحنی های بار - جابجایی، برای سه طول مختلف از نمونه

$D42 - \theta 45^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$

## فصل سوم

# تحلیل تجربی پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار

### ۳-۱- مقدمه

همانطور که گفته شد، به دلیل ناتوانی در حل معادلات کمانش برای پوسته های دارای ترک، محققین و صنعتگران از روشهای عددی برای پیش بینی رفتار کمانش پوسته های دارای ترک استفاده می کنند. اما باید توجه داشت که این تحلیل ها در صورتی ارزشمند است که با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته باشند. به همین دلیل در این تحقیق نیز یک سری آزمایشات روی تعدادی از نمونه های انجام شد و نتایج این آزمایشات در این فصل ارائه شده است.

### ۳-۲- نتایج تست کشش

تعدادی نمونه تست کشش ساده، از پوسته های در نظر گرفته شده برای آزمایشات، مطابق با استاندارد ASTM E8 تهیه شد و با استفاده از دستگاه سرو هیدرولیک INSTRON 8802، آزمایش کشش ساده، در سرعتهای مختلف انجام شد.

آزمایش کشش ساده روی نمونه هایی از جنس فولاد مورد نظر صورت گرفت و از یک نیروسنج با ظرفیت ۲۵ کیلونیوتن برای انجام آزمایشات استفاده شد. منحنی های تنش- کرنش بدست آمده در شکل های (۱-۲) و (۲-۲) نشان داده شده اند. مشخصات هندسی و مکانیکی هر دو نمونه در جدول ۳-۱ ارائه شده است.

جدول ۳-۱- مشخصات هندسی و مکانیکی هر دو نمونه St37 و Ck20

مشخصات	St37	Ck20
قطر خارجی	D= ۶۰ mm	D= ۴۲ mm
ضخامت	t=۰/۹ mm	t=۲ mm
طول	L=۲۵۰,۱۰۰,۱۵۰ mm	L=۲۵۰,۱۰۰,۱۵۰ mm
مدول الاستیک	E=۱۵۵ GPa	E=۱۹۵ GPa
تنش تسلیم	$\sigma_y = ۲۴۰$ MPa	$\sigma_y = ۳۴۵$ MPa
ضریب پواسون	$\nu = ۰/۳۳$	$\nu = ۰/۳۳$

از منحنی آزمایش کشش، که با سرعت ۰/۰۵ میلیمتر بر ثانیه انجام شد، برای استفاده در نرم افزار استفاده گردید. منحنی تنش- کرنش واقعی و تنش- کرنش پلاستیک، با استفاده از روابط زیر بدست آمد:

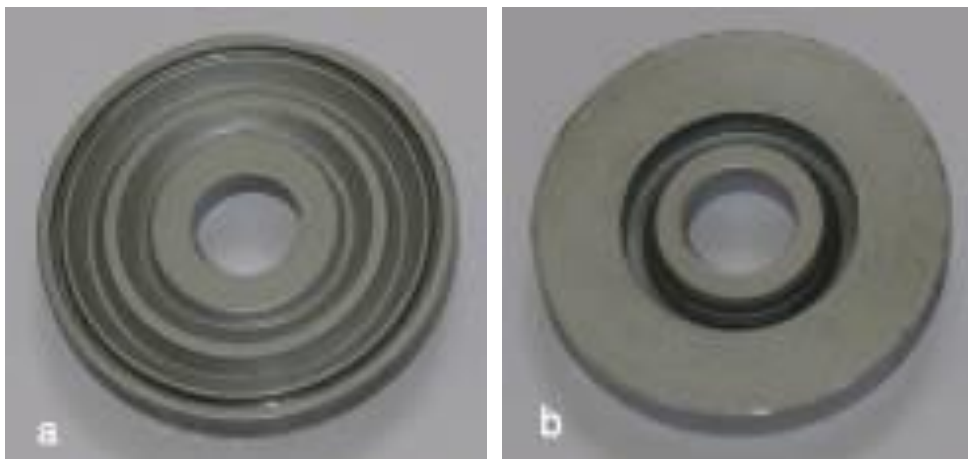
$$\varepsilon_{real} = Ln(1 + \varepsilon_{Eng.}) \quad \sigma_{real} = \sigma_{Eng.}(1 + \varepsilon_{Eng.}) \quad (1-3)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{real} - \frac{\sigma_{real}}{E} \quad (2-3)$$

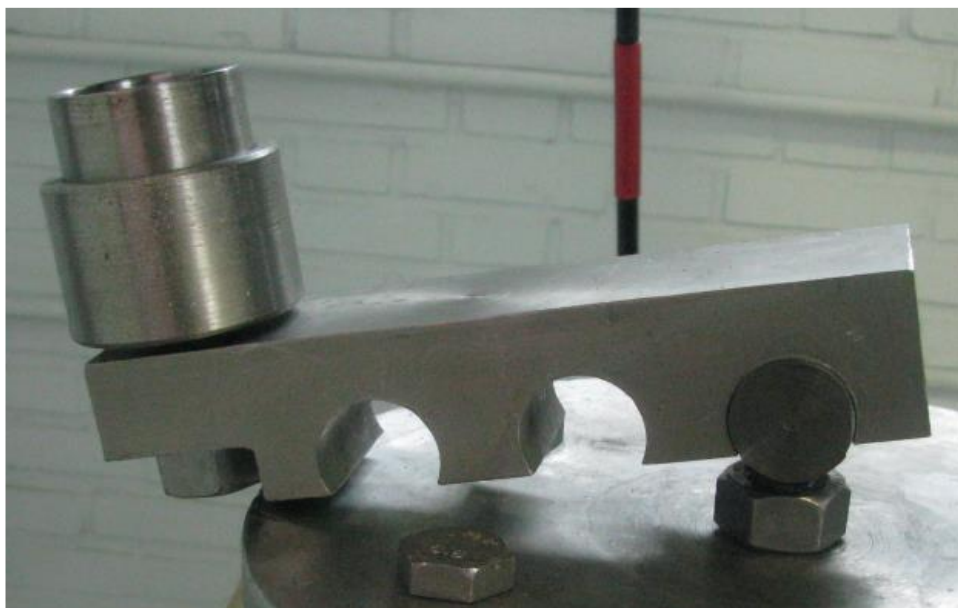
که  $\varepsilon_{real}, \sigma_{real}$  تنش و کرنش واقعی و  $\sigma_{Eng.}, \varepsilon_{Eng.}$  تنش و کرنش مهندسی و  $\varepsilon_{pl}$  کرنش قسمت پلاستیک می باشد.

### 3-3- شرایط آزمایش کمانش پوسته های استوانه ای

برای انجام آزمایشات از یک دستگاه سروهیدرولیک INSTRON8802، استفاده شد. نمونه ها در ابعاد  $t=2 \text{ mm}$ ,  $D=42 \text{ mm}$ ,  $L=100,150,250 \text{ mm}$  تهیه شدند و ترک‌هائی با استفاده از یک دستگاه Wire Cut در نمونه ها ایجاد شدند. دستگاه مورد استفاده و تعدادی از نمونه ها در شکل (3-5) نشان داده شده است. برای مقید کردن نمونه ها از فیکسچر نشان داده شده است در شکل (3-1) که از فولاد سخت تهیه شده است، استفاده گردید. برای ایجاد شرایط بار گذاری خارج از مرکز و مقید کردن نمونه ها از فیکسچر شکل (3-2) استفاده شده است. همان طور که از شکل مشخص است فیکسچر از دو قسمت تشکیل شده است. یک قسمت فوقانی که قطعه مورد آزمایش درون آن قرار می گیرد. قسمت پایینی نیز روی یک پیچ مفصل شده است و می تواند حول آن دوران کند و امکان اعمال لنگر خمشی روی پوسته را ایجاد می کند.



شکل 3-1- فیکسچر مورد استفاده در آزمایش برای اعمال بار محوری  
(a) تکیه گاه ساده، (b) تکیه گاه گیردار



شکل ۳-۲- فیکسچر مورد استفاده در آزمایش برای اعمال بار خارج از مرکز

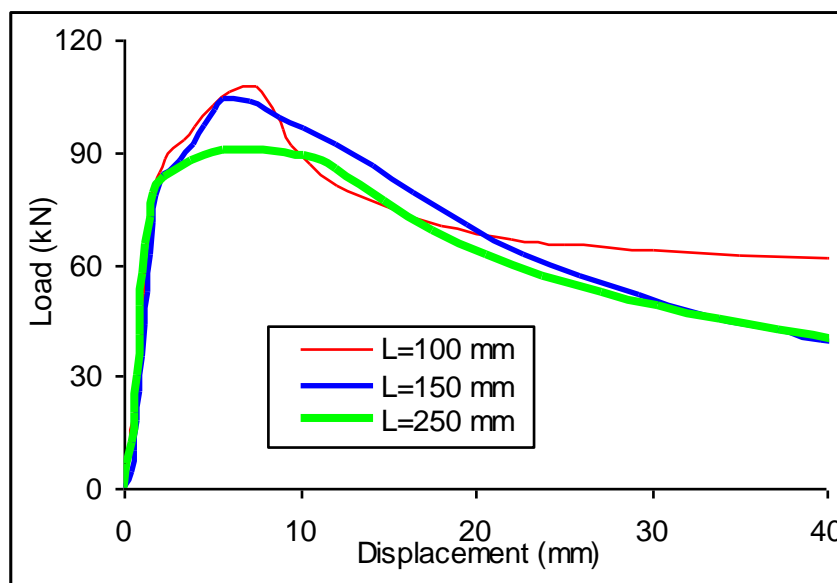
تمامی آزمایشات در حالت کنترل جابجایی انجام شد. در ادامه نتایج بدست آمده ارائه شده است.

### ۳-۴- نتایج تحلیل تجربی پوسته های استوانه ای بدون ترک تحت بار محوری

در این بخش نتایج تحلیل کمانش پوسته های استوانه ای بدون ترک تحت بار فشاری محوری برای نمونه هایی از جنس فولاد Ck20 و St 37 با سه طول مختلف ( $L=100\text{ mm}, 150\text{ mm}, 250\text{ mm}$ ) ارائه شده است. هدف از انجام این تحلیل ها بررسی تأثیر طول پوسته بر روی رفتار کمانش پوسته های استوانه ای جدار نازک است.

#### ۳-۴-۱- نتایج تحلیل تجربی پوسته های استوانه ای از جنس فولاد Ck20

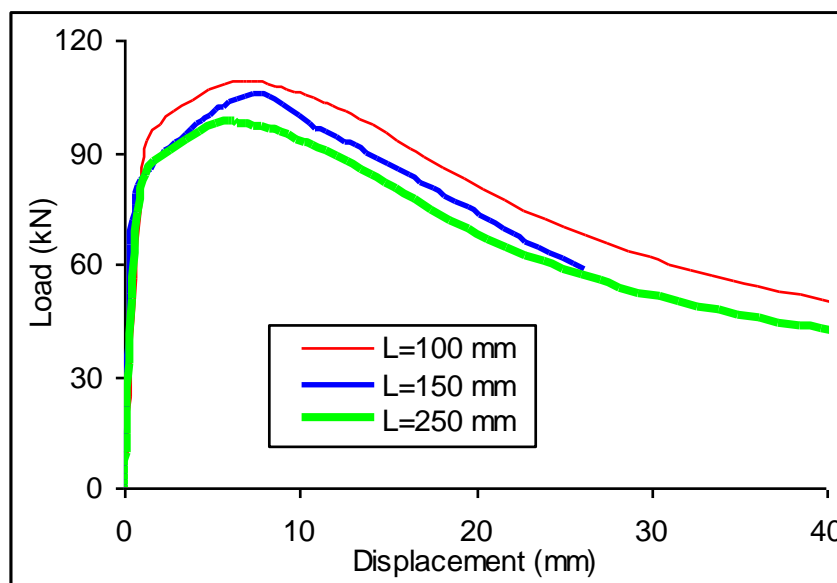
نتایج تجربی برای استوانه ای از جنس فولاد Ck20 با سه طول ( $L=100, 150, 250\text{ mm}$ ) با قطر  $42\text{ mm}$  میلیمتر به ضخامت  $2\text{ mm}$  نشان می دهد که افزایش طول پوسته از  $100\text{ mm}$  به  $250\text{ mm}$  در شرایط یکسان، باعث کاهش  $19\%$  در بار بحرانی کمانش می شود (شکل (۳-۳)).



شکل ۳-۳- نمودار بار-جابجائی برای طول‌های مختلف پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20

### ۳-۴-۲- نتایج تحلیل تجربی پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد St37

نتایج تجربی برای استوانه‌ای از جنس فولاد St37 با سه طول (L=100, 150, 250 mm) با قطر ۶۰ میلیمتر به ضخامت ۰/۹ mm در نمودار شکل (۳-۴) نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش طول پانل بار کمانش کاهش می‌یابد.



شکل ۳-۴- نمودار بار- جابجائی برای طول‌های مختلف پوسته‌های استوانه‌ای از جنس فولاد St37

### ۳-۵- نتایج تحلیل تجربی پوسته‌های استوانه‌ای دارای ترک تحت بار محوری

#### ۳-۵-۱- بررسی تاثیر تغییر موقیت ترک بر روی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای

ابعاد نمونه‌های آزمایش شده، همان ابعادی هستند که در فصل پیش برای تحلیل عددی استفاده شد. فقط تعداد نمونه‌های آزمایش شده کمتر است. البته لزومی نیست که تعداد نمونه‌های بیشتری آزمایش شوند و همین تعداد آزمایش برای مقایسه و تایید نتایج بدست آمده از روش عددی کفایت می‌کند. منحنی بار کمانش برای نمونه‌هایی که به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته‌اند، در ادامه نشان داده شده است.

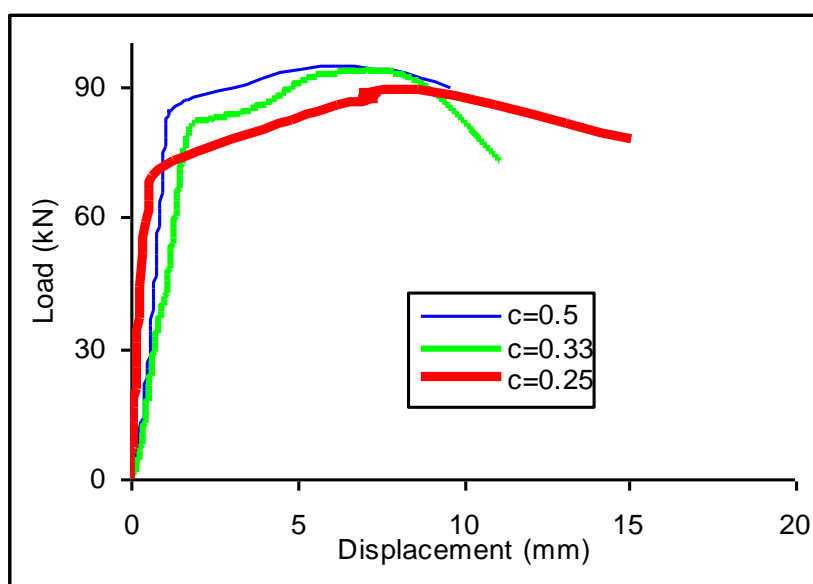
همانطور که از تحلیل‌های عددی نتیجه شد، در اینجا نیز مشاهده می‌شود که با ایجاد ترک در پوسته، بار کمانش افت زیادی پیدا می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که با افزایش طول ترک و نیز طول پوسته مقاومت در برابر کمانش کاهش می‌یابد.





شکل ۳-۵- تعدادی از نمونه های آزمایش با دستگاه INSTRON

منحنی بار-جابجایی برای نمونه های تجربی در شکل (۳-۶) ارائه شده است. ملاحظه می شود که تغییر موقعیت ترک از وسط پوسته به سمت لبه کناری استوانه، باعث کاهش بار بحرانی کمانش می شود.

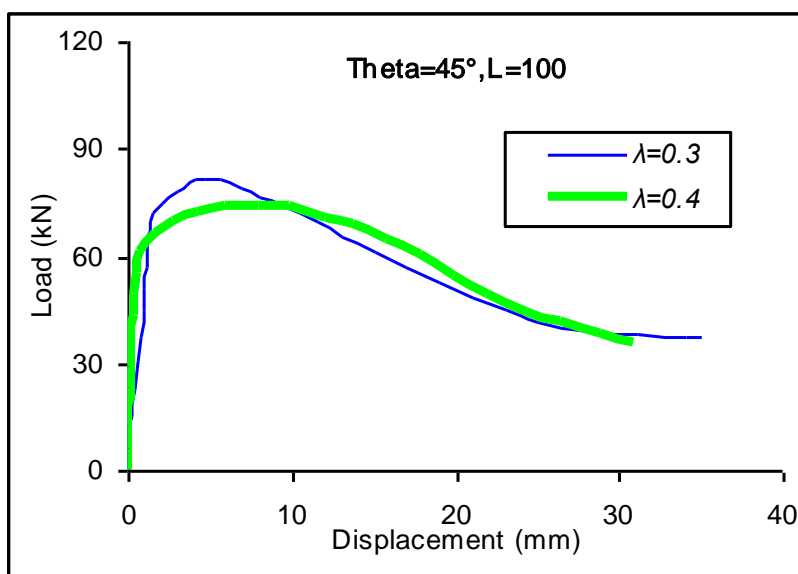


شکل ۳-۶- منحنی های بار-جابجایی برای پوسته ترک دار با ترک در موقعیت های مختلف

$$D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.4$$

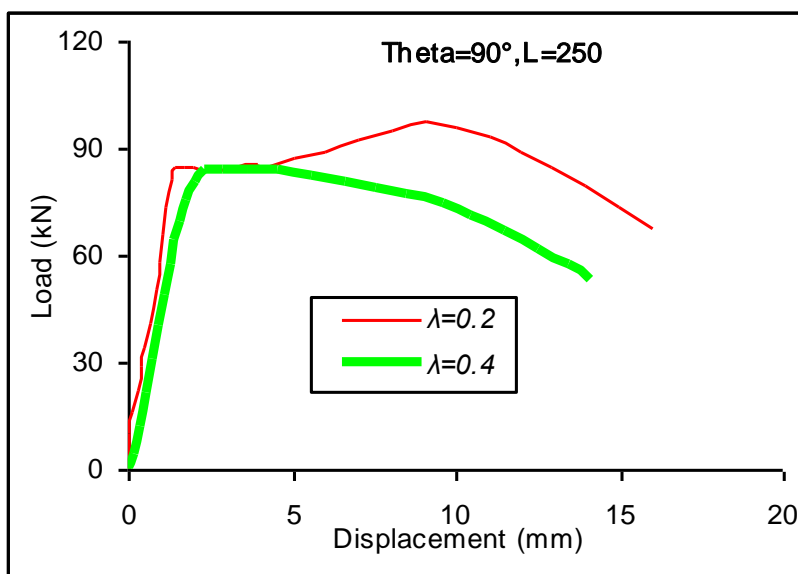
### ۳-۵-۲- بررسی تاثیر تغییر طول ترک بر روی رفتار کمانش پوسته های استوانه ای

برای بررسی تاثیر تغییر طول ترک روی بار کمانش پوسته های استوانه ای، ترک هایی با زاویه ثابت در پوسته ها ایجاد شد و با تغییر طول ترک، تغییرات بار کمانش اندازه گیری شد. منحنی های بار کمانش بر حسب جابجایی در شکل های (۳-۷) تا (۳-۱۰) نشان داده شده است.



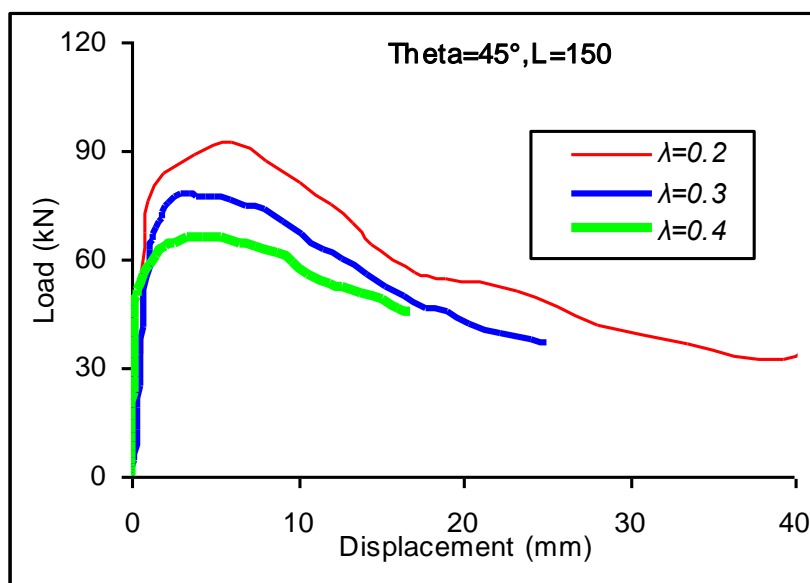
شکل ۳-۷- منحنی های بار - جابجایی برای طول های مختلف ترک نمونه

$D42 - L100 - \theta 45^\circ - C0.5$



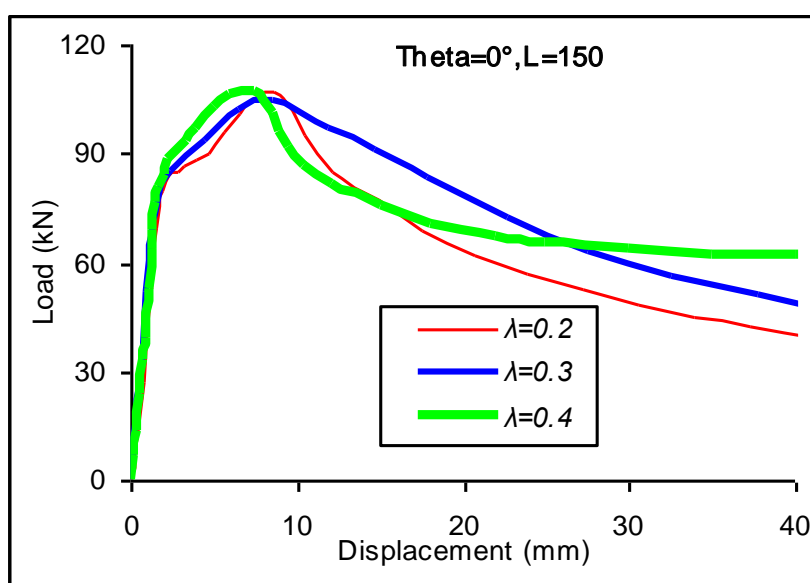
شکل ۳-۸- منحنی های بار - جابجایی برای طول های مختلف ترک نمونه

$D42 - L250 - \theta 90^\circ - C0.5$



شکل ۳-۹- منحنی های بار-جابجایی برای طول های مختلف ترک نمونه

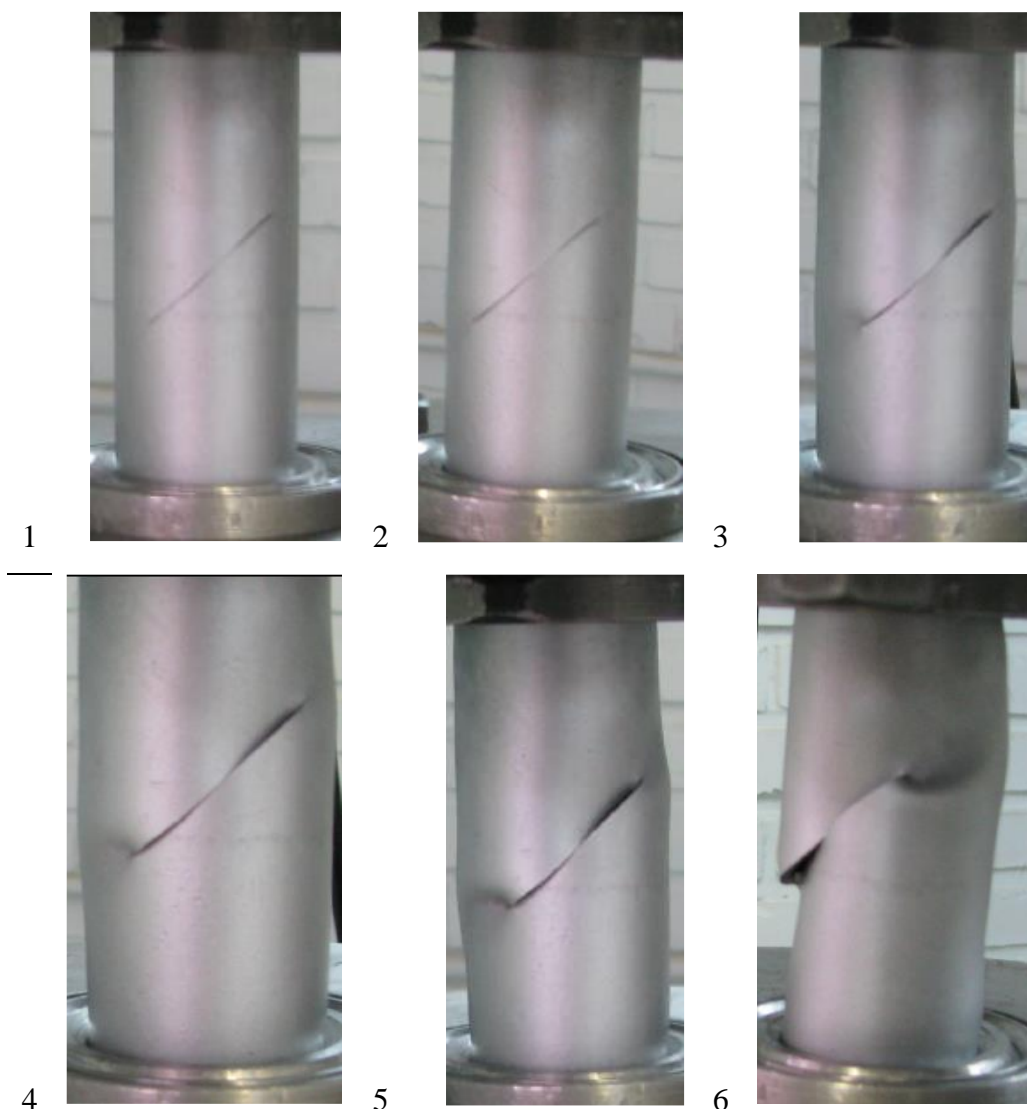
$D42 - L150 - \theta 45^\circ - C0.5$



شکل ۳-۱۰- منحنی های بار-جابجایی برای طول های مختلف ترک نمونه  $D42 - L150 - \theta 0^\circ - C0.5$

مشاهده می شود که برای یک زاویه ثابت، با افزایش طول ترک بار کمانش افت پیدا می کند. فقط در مورد نمونه  $D42-L100- \theta 0^\circ - \lambda 0.2$  مشاهده می شود که بار کمانش کمی خطا دارد. واضح است که در تحلیل های تجربی

انجام شده، احتمال ایجاد خطا و کاهش دقت در نتایج وجود دارد. زیرا نمونه‌های استفاده شده ایده‌آل و بدون عیب و نقص نیستند. هم‌چنین با افزایش طول پوسته‌های دارای ترک بار کمانش این پوسته‌ها کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، مراحل کمانش نمونه  $D42-L100-\theta 45^\circ-\lambda 0.3$  در شکل (۳-۱۱) نشان داده شده است.

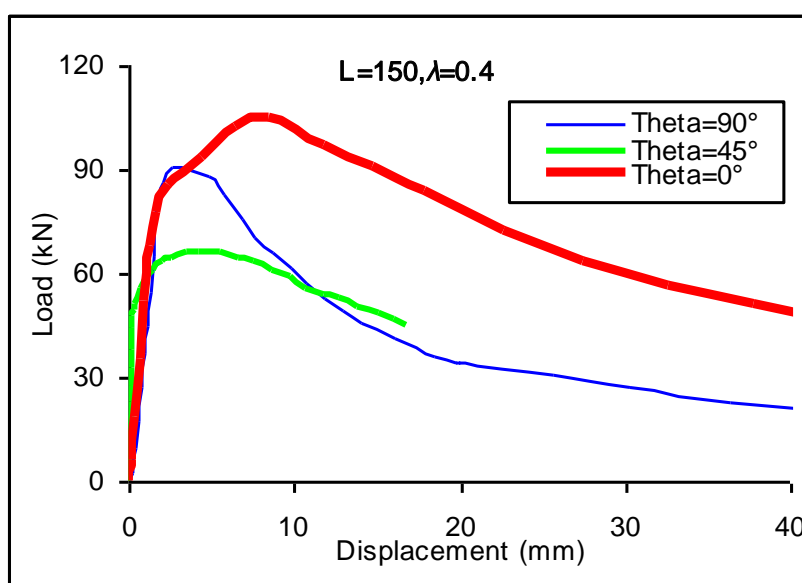


شکل ۳-۱۱- مراحل کمانش نمونه  $D42-L100-\theta 45^\circ-\lambda 0.4-C0.5$

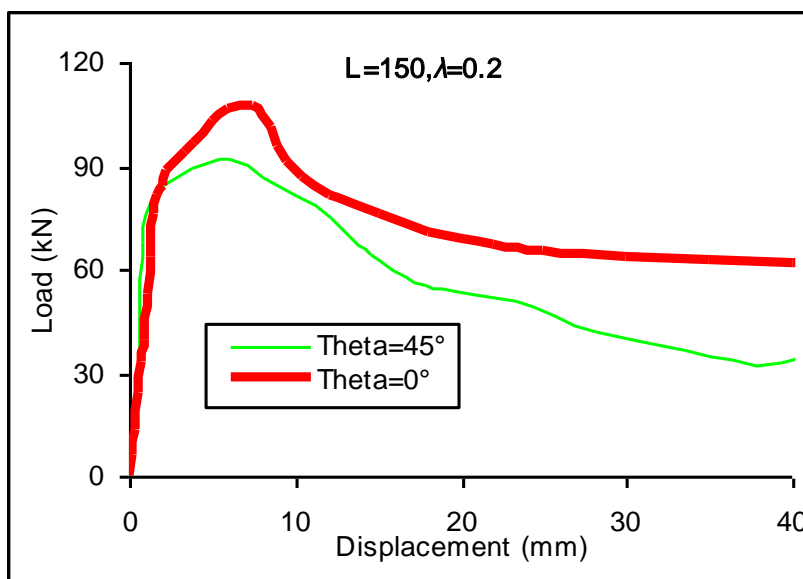
### ۳-۵-۳- بررسی تاثیر تغییر زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای

برای بررسی تاثیر تغییر زاویه ترک روی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای، ترک‌هایی با طول ثابت و زاویه‌های مختلف ( $\theta=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ ) در پوسته‌ها ایجاد شد و با تغییر زاویه ترک، تغییرات بار کمانش، تعیین شد. منحنی‌های بار کمانش بر حسب جابجایی در شکل‌های (۳-۱۲) تا (۳-۱۴) نشان داده شده است.

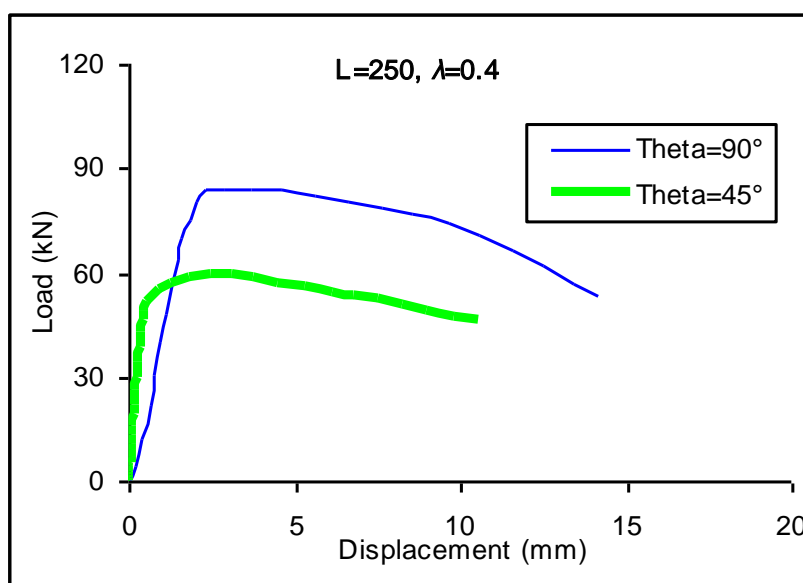
ترک افقی ( $\theta=0^\circ$ ) تاثیر بسیار کمی روی بار کمانش دارد. زیرا بعد از اینکه پوسته استوانه ای تحت بارگذاری قرار می گیرد، دو لبه ترک بر روی هم قرار می گیرند و رفتاری تقریباً مشابه پوسته کامل و بدون ترک را از خود نشان می دهد. ترک با زاویه ( $\theta=45^\circ$ )، بیشترین اثر را بر کاهش بار بحرانی کمانش دارد. در ترک ( $\theta=90^\circ$ ) در حین بارگذاری هیچ برهم کنشی بین دو لبه ترک بوجود نمی آید و ترک کاملاً از هم باز می شود. در طول ترک یکسان، اثر ترک قائم روی بار بحرانی کمانش از ترک افقی بیشتر و از مایل کمتر است. نتایج نشان می دهند که پوسته های بلندتر و دارای قطر کمتر، نسبت به تغییرات زاویه ترک حساسیت بیشتری نشان می دهند.



شکل ۳-۱۲- منحنی های بار - جابجایی برای زوایای مختلف ترک نمونه  $D42 - L150 - \lambda 0.4 - C0.5$



شکل ۳-۱۳- منحنی های بار-جابجایی برای زوایای مختلف ترک نمونه  $D42 - L150 - \lambda 0.2 - C0.5$



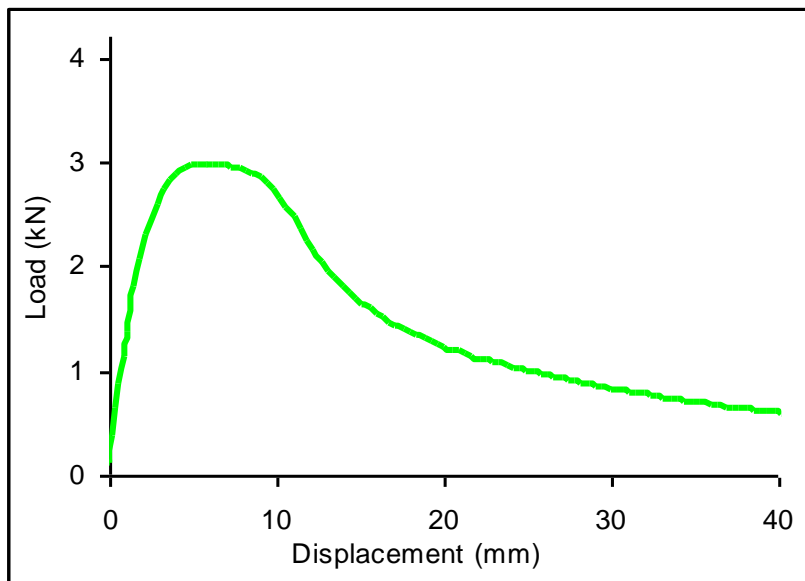
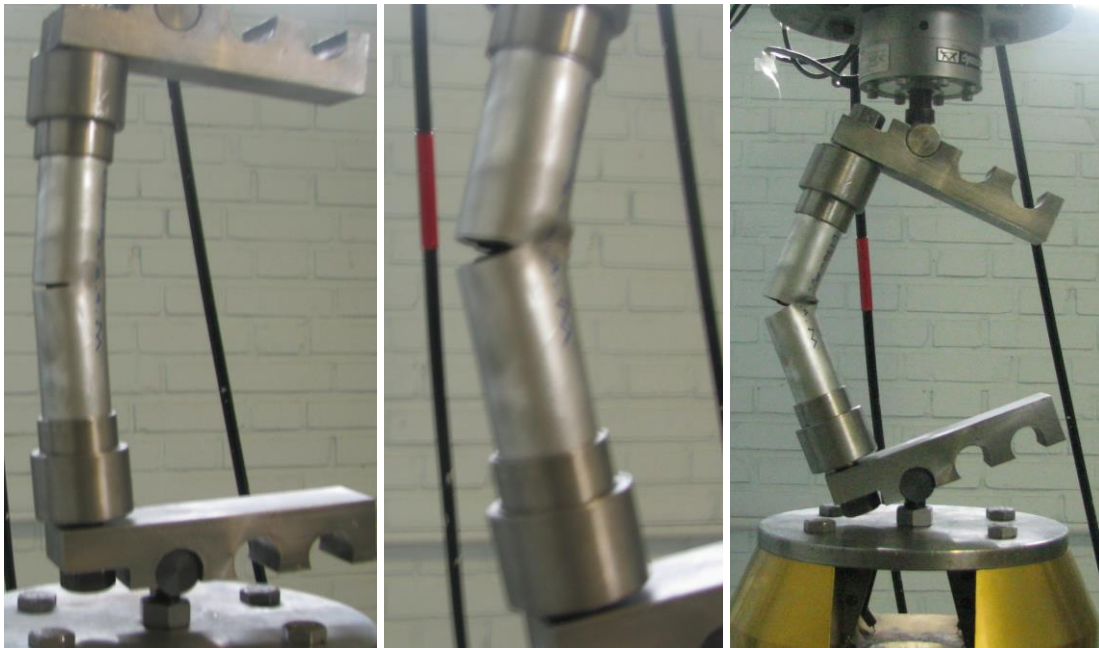
شکل ۳-۱۴- منحنی های بار-جابجایی برای زوایای مختلف ترک نمونه  $D42 - L250 - \lambda 0.4 - C0.5$

مشاهده می شود که شیب تمام نمودارها در بخش خطی تقریباً یکسان است. بنابراین می توان گفت که ایجاد ترک روی سفتی نمونه ها، قبل از کماتش تاثیر زیادی ندارد. با وجود اینکه، نمونه های بدون ترک، شیب بیشتری دارند.

### ۳-۶- نتایج تحلیل تجربی استوانه‌ای دارای ترک تحت بارخارج از مرکز

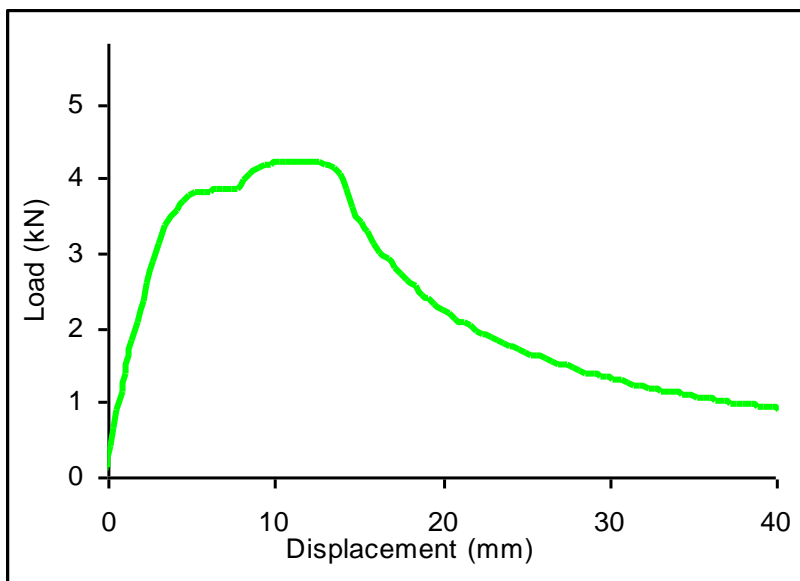
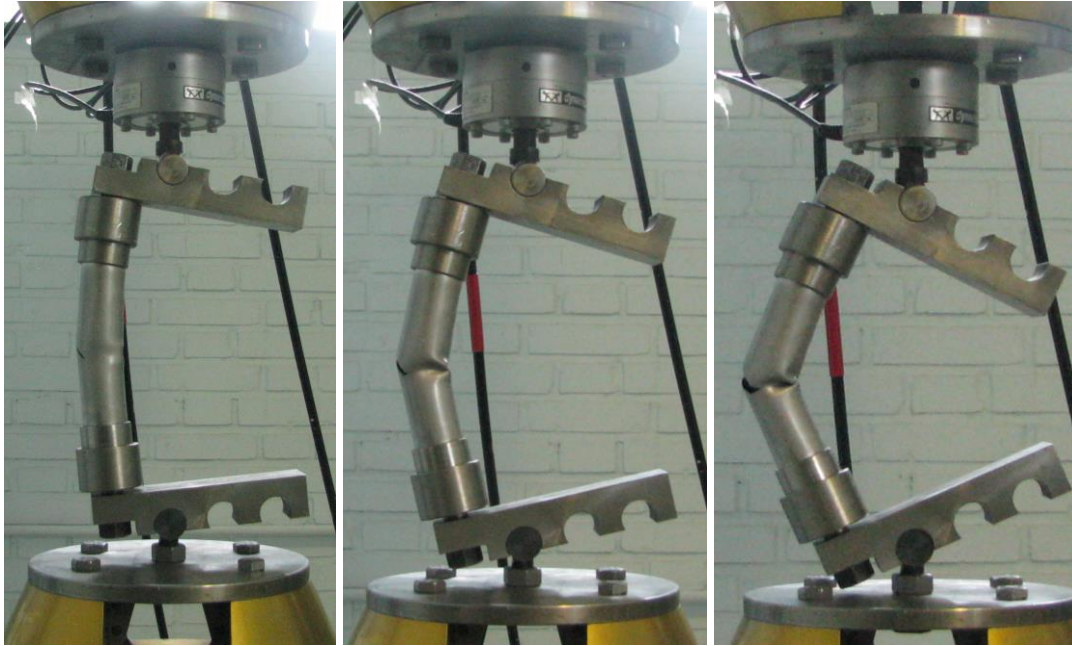
در این بخش نتایج تحلیل تجربی پوسته های استوانه‌ای با ضخامت ۱ میلیمتر و قطر ۵۰ میلیمتر، دارای ترک ارائه شده است. تعداد نمونه‌های آزمایش شده برای این نوع ترک محدود است و فقط به منظور تایید نتایج عددی انجام شده است. مراحل کمانش و منحنی‌های بار-جابجایی برای نمونه‌هایی با زاویه ترک‌های مختلف در شکل‌های (۳-۱۵)، (۳-۱۶) و (۳-۱۷) آمده است.

اگر بار محوری در مرکز صفحه به پوسته اعمال نشود، خروج از مرکز باعث ایجاد بارگذاری ترکیبی فشار محوری و گشتاور خمشی می شود. تاثیر خروج از مرکز نسبت به مرکز پوسته، بر بار کمانش در شکل (۳-۱۸) برای زوایای مختلف ترک نمایش داده شده است.

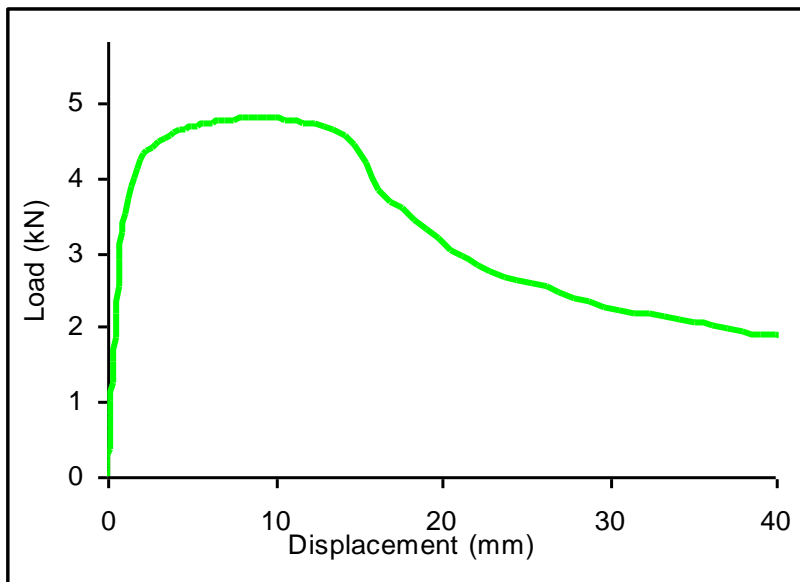
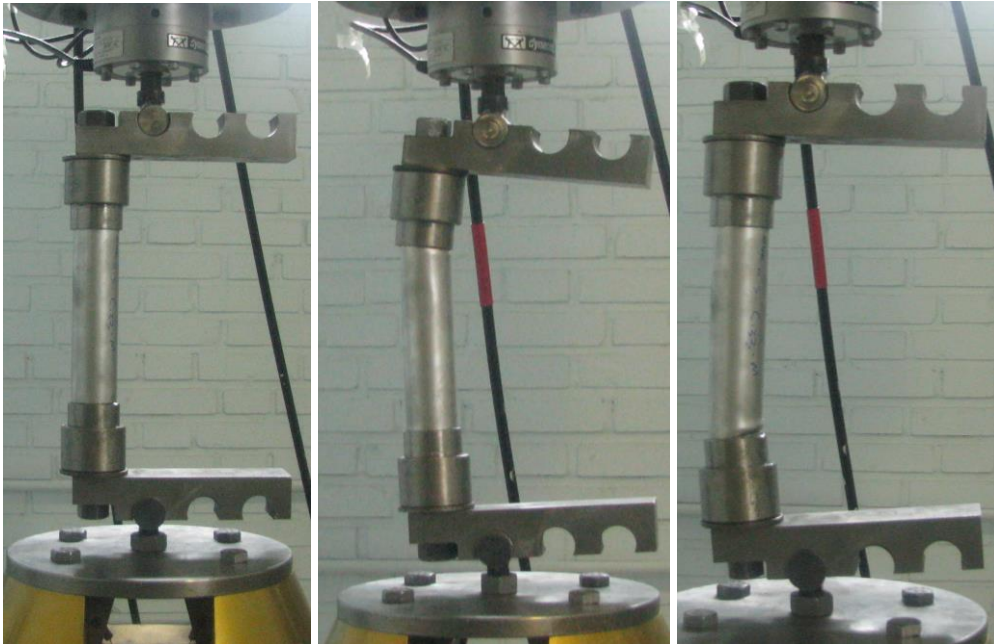


شکل ۳-۱۵- منحنی های بار- جابجایی برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  تحت بار خارج از مرکز

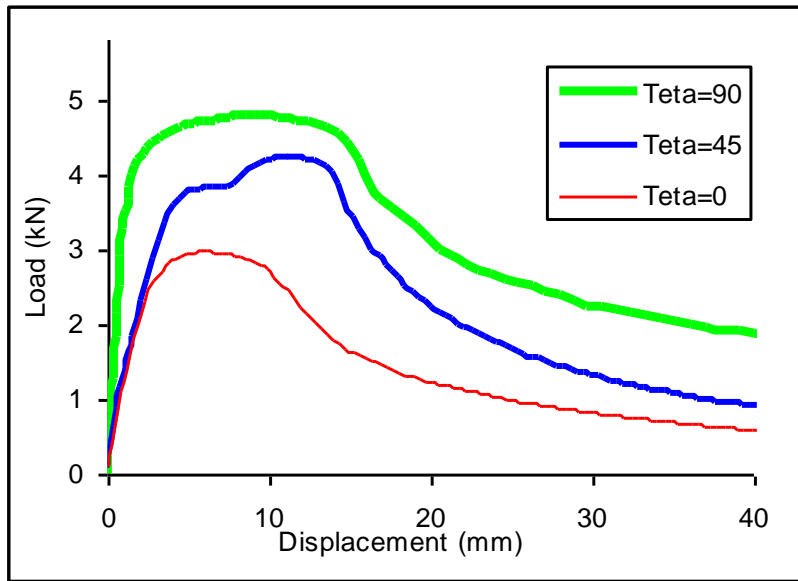




شکل ۳-۱۶- منحنی های بار-جابجایی برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 45^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  تحت بارخارج از مرکز



شکل ۳-۱۷- منحنی های بار-جابجایی برای نمونه  $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$  تحت بار خارج از مرکز



شکل ۳-۱۸ - منحنی های بار-جابجایی برای زوایای مختلف ترک نمونه  $D42 - L150 - \lambda 0.3 - C0.5$

## فصل چهارم

# مقایسه نتایج تحلیل عددی و تست تجربی

## ۴-۱- مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از تحلیل عددی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای دارای ترک با نتایج حاصل از روش تجربی مقایسه شده و صحت نتایج عددی مورد بحث قرار گرفته است. در نهایت، با استفاده از داده های عددی و تجربی درباره اثر هر کدام از پارامترهای موثر بر بار بحرانی کمانش بحث شده است.

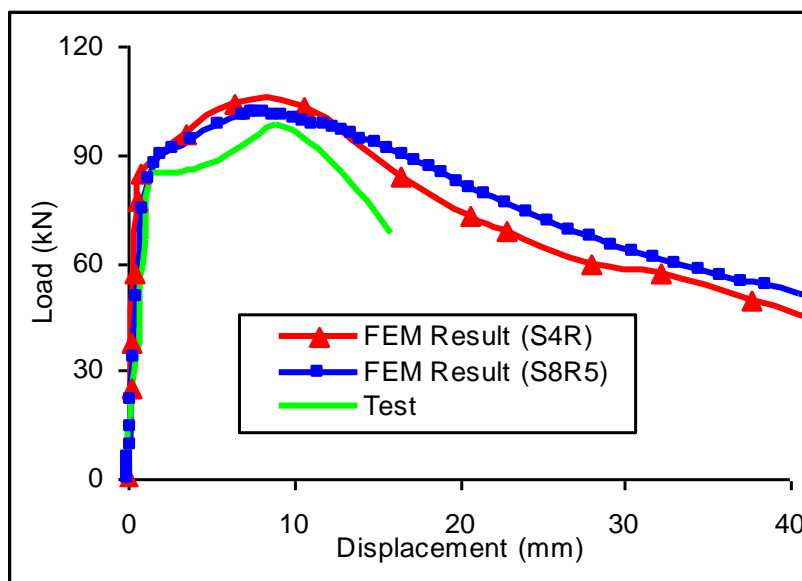
## ۴-۲- مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به تحلیل موقعیت ترک

نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف بین این نتایج در جدول (۴-۱) و شکل (۴-۱) ارائه شده است. مشاهده می شود که اختلاف بین نتایج بسیار ناچیز است.

جدول ۴-۱- نتایج تحلیلهای عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف

عنوان نمونه	بار کمانش (kN)		بار کمانش تجربی (kN)	درصد اختلاف نتایج عدی با تجربی	
	المان S4R	المان S8R5		المان S4R	المان S8R5
D42-L100-Perfect	111.15	109.47	114.92	4.82	4.74
D42-L150-Perfect	107.94	105.68	110.13	1.99	2.04
D42-L150-045-λ0.3	81.05	78.94	79.07	2.54	0.16
D42-L150-090-λ0.3-c0.5	98.04	94.65	96.27	3.61	2.13
D42-L150-090-λ0.3-c0.33	97.15	92.97	94.73	1.89	1.68
D42-L150-090-λ0.3-c0.25	94.63	92.71	93.54	1.76	0.80
D42-L150-090-λ0.4	90.39	88.95	91.51	1.23	2.79
D42-L250-Perfect	102.56	101.34	105.33	2.63	3.78
D42-L250-090-λ0.3- c0.5	92.46	90.34	91.13	1.46	1.43
D42-L250-090-λ0.3-c0.33	91.87	89.18	90.68	2.06	2.08
D42-L250-090-λ0.3-c0.25	90.17	88.43	89.73	2.34	2.12

به عنوان مثال حداکثر اختلاف نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش با المانهای غیر خطی S8R5 در مقایسه با نتایج تجربی، ۴/۷۴ درصد و برای المان S4R، ۴/۸۲ درصد است. می توان دید که بیشترین اختلاف در نتایج مربوط به نمونه های دارای طول کوتاه است. دلیل این موضوع مربوط به تئوری خمشی پوسته ها است که با کاهش نسبت  $t/L$  جواب بهتری می دهد و در نرم افزار از این تئوری استفاده شده است. [۳۲]



شکل ۴-۱- مقایسه منحنی‌های بار - جابجایی تجربی و عددی  $D42-L250-\theta 90^\circ-\lambda 0.2-C0.5$

مشاهده می شود اختلاف نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش با المانهای غیر خطی در مقایسه با نتایج تجربی برای ۹ نمونه کمتر از ۳ درصد است. همچنین میانگین درصد اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S4R در مقایسه با نتایج عددی، ۲/۶۲ درصد، و میانگین درصد اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S8R5 برابر ۱/۸۸ درصد است. بنابراین می توان گفت نتایج حاصل از تحلیل با المان های غیر خطی دقیقتر است.

از مقایسه منحنی های عددی با تجربی نتیجه می شود که منحنی های عددی و تجربی مطابقت بسیار خوبی دارند. در شکل (۴-۱) منحنی های حاصل از نتایج عددی با هر دو المان خطی و غیر خطی ارائه شده است. مشاهده می شود که منحنی های حاصل از روش عددی و المانهای خطی S4R، نسبت به منحنی های حاصل از المانهای غیر خطی ناحیه پس کمانش بهتری را نتیجه می دهند. اما بار کمانش بیشتری را ارائه می کنند.

## ۴-۳- مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به تحلیل زوایای ترک و طول ترک در پوسته

نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف این نتایج در جدول (۴-۲) ارائه شده است.

جدول ۴-۲- نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف

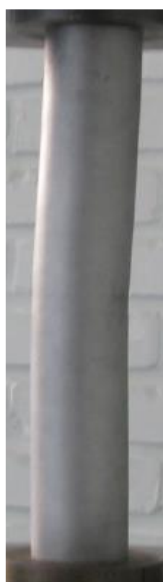
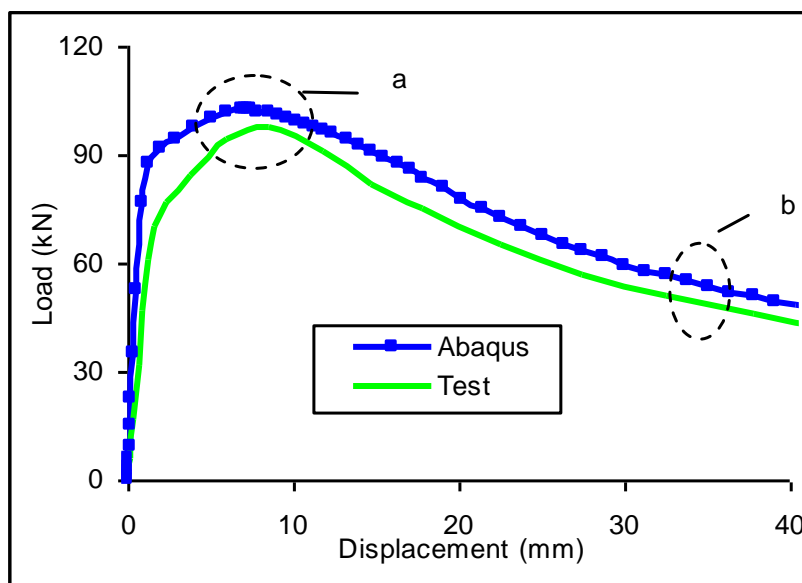
عنوان نمونه	بار کمانش (kN)		بار کمانش تجربی (kN)	درصد اختلاف نتایج عدی با تجربی	
	المان S4R	المان S8R5		المان S4R	المان S8R5
D42-L100-Perfect	111.15	109.47	114.92	4.74	3.28
D42-L100-00-λ0.2	107.83	106.50	110.07	3.25	2.03
D42-L100-00-λ0.3	105.24	102.06	103.15	1.05	2.01
D42-L100-045-λ0.2	98.62	95.39	96.81	1.46	1.87
D42-L100-045-λ0.3	85.90	83.79	83.27	0.61	3.16
D42-L100-090-λ0.3	99.08	96.71	95.38	1.38	3.87
D42-L100-090-λ0.4	94.37	92.24	91.42	0.9	3.23
D42-L150-Perfect	107.94	105.68	110.13	4.04	1.99
D42-L150-00-λ0.2	105.85	101.13	107.34	5.78	1.43
D42-L150-00-λ0.3	103.94	100.07	104.65	4.36	0.68
D42-L150-00-λ0.4	102.15	99.42	102.04	2.54	0.1
D42-L150-045-λ0.2	96.83	94.56	95.71	1.2	1.18
D42-L150-045-λ0.3	81.05	78.94	79.07	0.16	2.54
D42-L150-090-λ0.3	98.15	92.71	94.73	2.13	3.61
D42-L150-090-λ0.4	90.39	88.95	91.51	2.79	1.23
D42-L150-090-λ0.3	98.08	94.65	96.27	1.68	1.89
D42-L150-090-λ0.3	95.18	92.97	93.54	0.80	1.76
D42-L250-Perfect	102.56	101.34	105.33	3.78	2.63
D42-L250-00-λ0.2	98.05	95.76	101.28	4.44	3.64
D42-L250-045-λ0.3	79.32	78.82	79.84	1.31	0.72
D42-L250-090-λ0.2	101.27	94.08	97.72	3.71	3.63
D42-L250-090-λ0.3	92.01	87.68	88.61	1.05	3.83
D42-L250-090-λ0.4	87.19	84.95	85.03	0.09	2.54

مشاهده می‌شود که اختلاف بین نتایج عددی و تجربی بسیار ناچیز است. به عنوان مثال حداکثر اختلاف نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش با المانهای غیر خطی S8R5 در مقایسه با نتایج تجربی، ۴/۷۴ درصد و برای المان S4R برابر ۳/۸۳ درصد است. می‌توان دید که بیشترین اختلاف در نتایج مربوط به نمونه‌های دارای طول کوتاه است. دلیل این موضوع مربوط به تئوری خمشی پوسته‌ها است که با کاهش نسبت  $t/L$  جواب بهتری می‌دهد و در نرم افزار از این تئوری استفاده شده است.

نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش با المانهای غیر خطی در مقایسه با نتایج تجربی برای ۱۰ نمونه کمتر از ۲ درصد است. همچنین میانگین درصد اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S4R در مقایسه با نتایج عددی، ۲/۳۵ درصد، و میانگین درصد اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S8R5، ۲/۸۶ درصد است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که نتایج حاصل از تحلیل با المانهای غیر خطی با نتایج تجربی مطابقت بیشتری دارند.

#### ۴-۴- مقایسه منحنی های بار- جابجایی، حاصل از تحلیل های عددی و تجربی

منحنی های بار- جابجایی، حاصل از تحلیل های عددی و تجربی، برای برخی نمونه های آزمایش در شکل های (۴-۲) تا (۴-۹) ارائه شده است. همچنین تغییر شکل نمونه ها در حالت های کمانش و پس کمانش برای هر دو روش تجربی و عددی در این اشکال مقایسه شده است.



a

Experimental



ABAQUS



Experimental

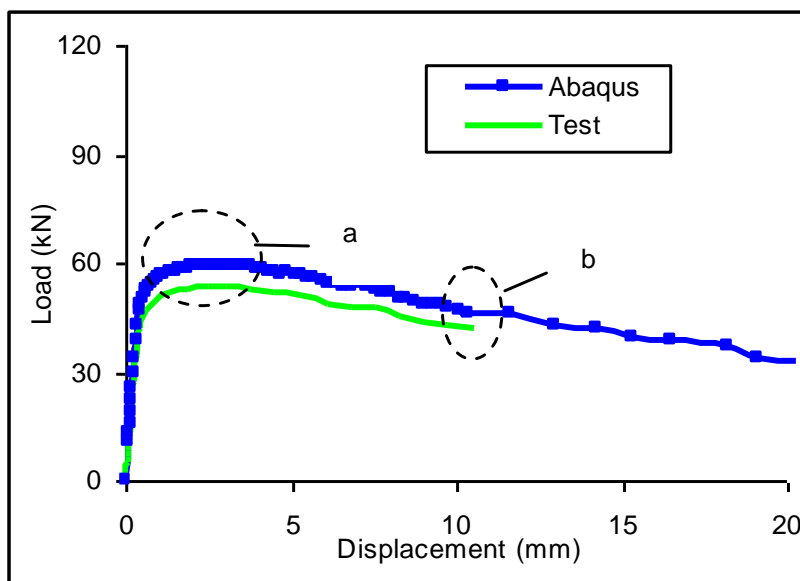


b

ABAQUS

شکل ۴-۲- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L250-\theta 0^\circ-\lambda 0.4-C0.5$





a

Experimental



ABAQUS



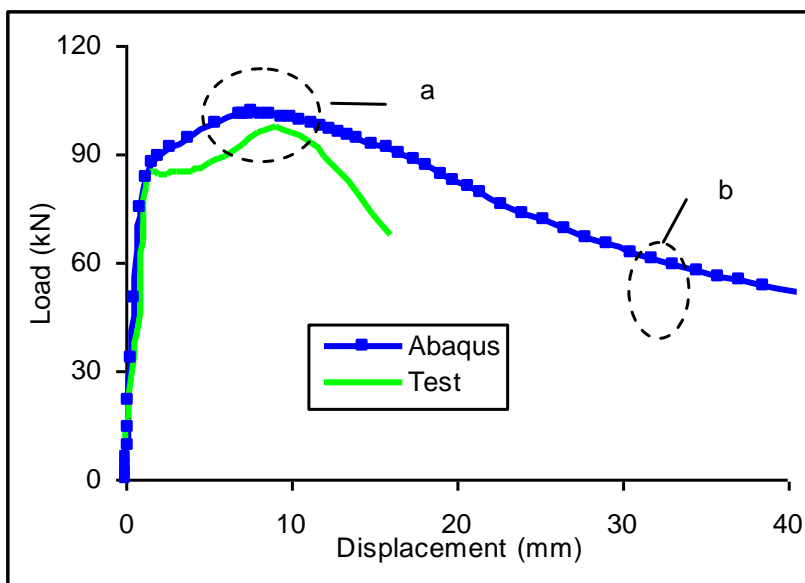
b

Experimental



ABAQUS

شکل ۴-۳- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42 - L250 - \theta 45^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$



Experimental

a

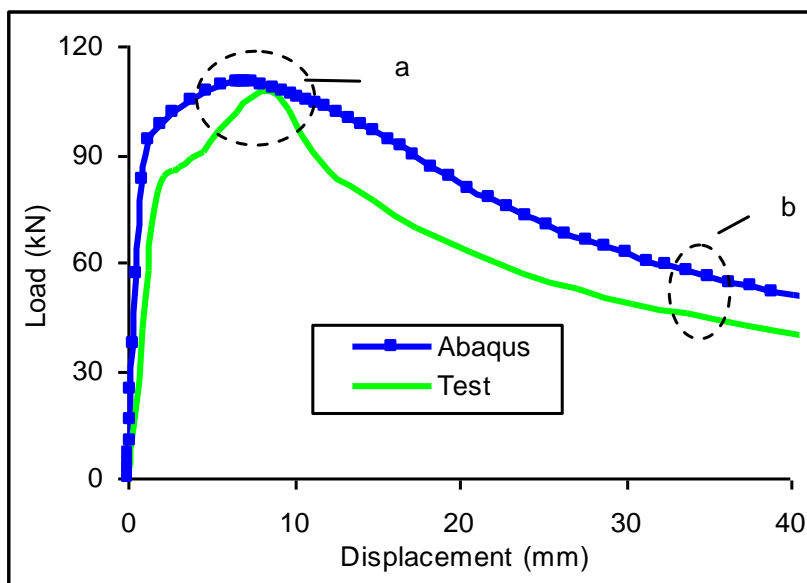
ABAQUS

Experimental

b

ABAQUS

شکل ۴-۴- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L250-\theta 90^\circ-\lambda 0.2-C0.5$



a



ABAQUS



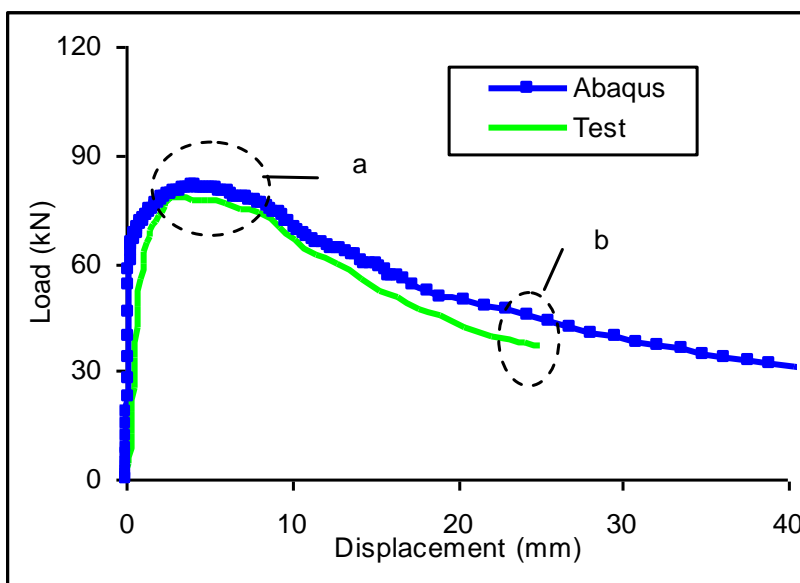
b



ABAQUS

Experimental

شکل ۴-۵- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42 - L150 - \theta 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$



a

Experimental



ABAQUS



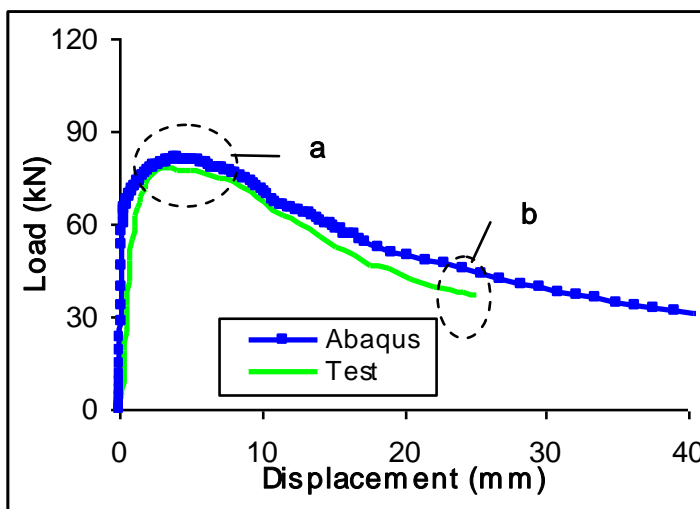
b

Experimental



ABAQUS

شکل ۴-۶- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-\theta 45^\circ-\lambda 0.3-C0.5$



a

Experimental



ABAQUS



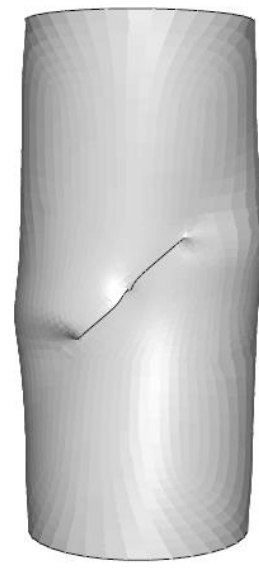
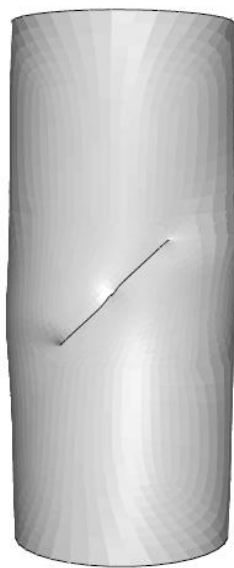
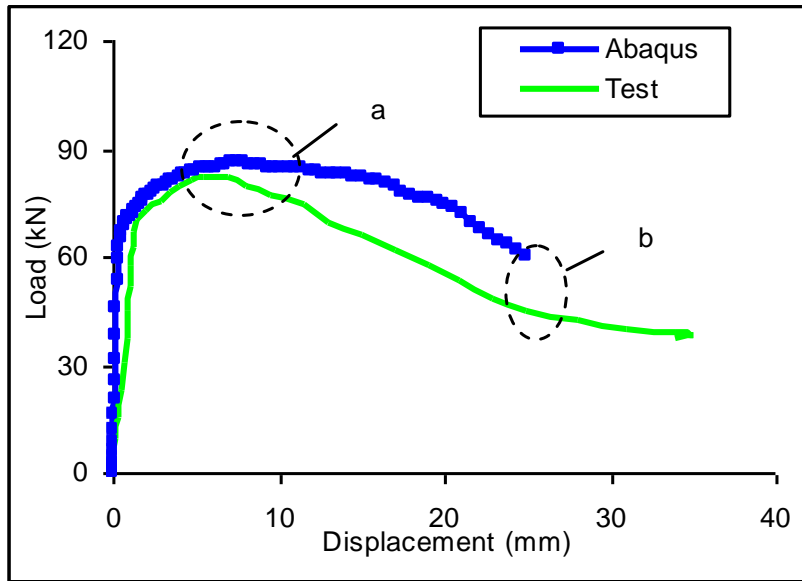
Experimental



b

ABAQUS

شکل ۴-۷- منحنی‌های بار-جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-0.90^\circ-\lambda 0.3-C0.25$



Experimental

a

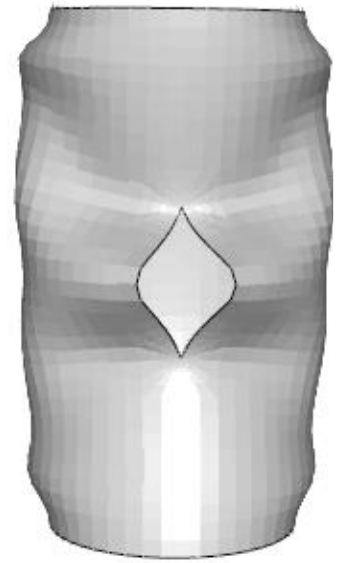
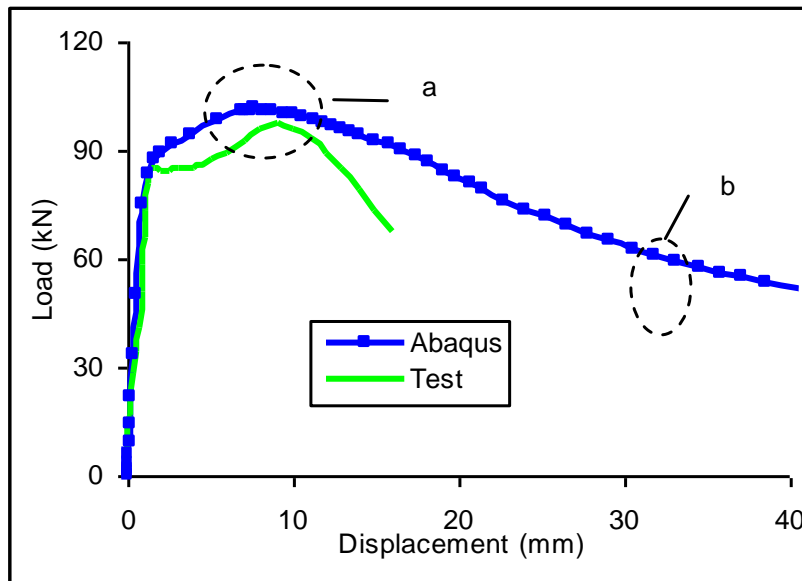
ABAQUS

Experimental

b

ABAQUS

شکل ۴-۸- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L100-\theta45^\circ - \lambda0.4-C0.5$



a

b

Experimental

ABAQUS

Experimental

ABAQUS

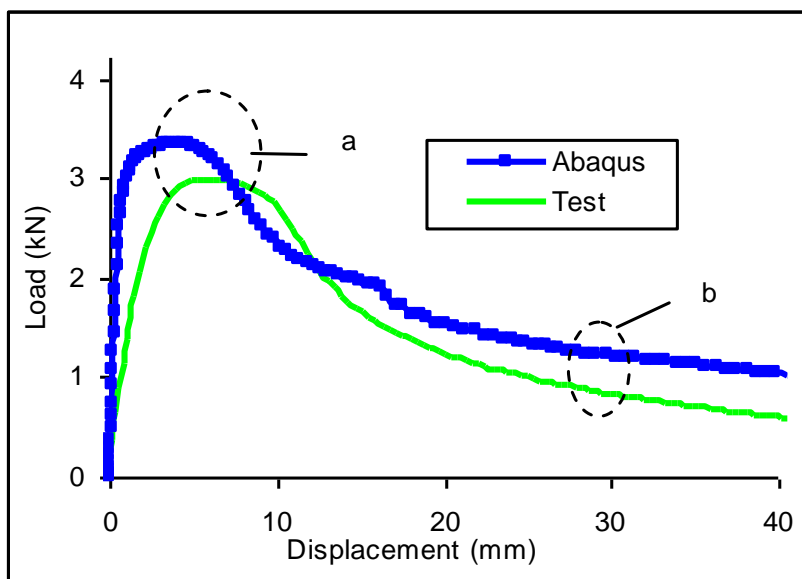
شکل ۴-۹ - منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L100-\theta 90^\circ - \lambda 0.3-C0.5$

#### ۴-۵- مقایسه نتایج تجربی و عددی برای بار گذاری خارج از مرکز

در این بخش نتایج تحلیل تجربی و عددی برای پوسته هایی که تحت بار گذاری خارج مرکز قرار گرفته اند با هم مقایسه شده اند. تعداد نمونه های آزمایش شده برای این نوع ترک محدود است و فقط به منظور تایید نتایج عددی انجام شده است. مراحل کمانش و منحنی های بار-جابجایی برای نمونه هایی با زاویه ترک های مختلف در شکل های (۴-۱۰) تا (۴-۱۲) آمده است.

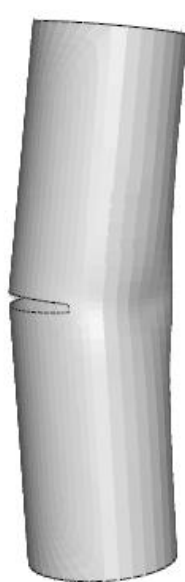
اگر بار محوری در مرکز صفحه به پوسته اعمال نشود، خروج از مرکز باعث ایجاد بار گذاری ترکیبی فشار محوری و گشتاور خمشی می شود. تاثیر خروج از مرکز نسبت به مرکز پوسته، بر بار کمانش در شکل (۳-۱۸) برای زوایای مختلف ترک نمایش داده شده است.





a

Experimental

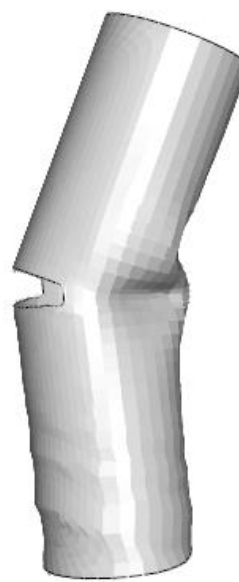


ABAQUS



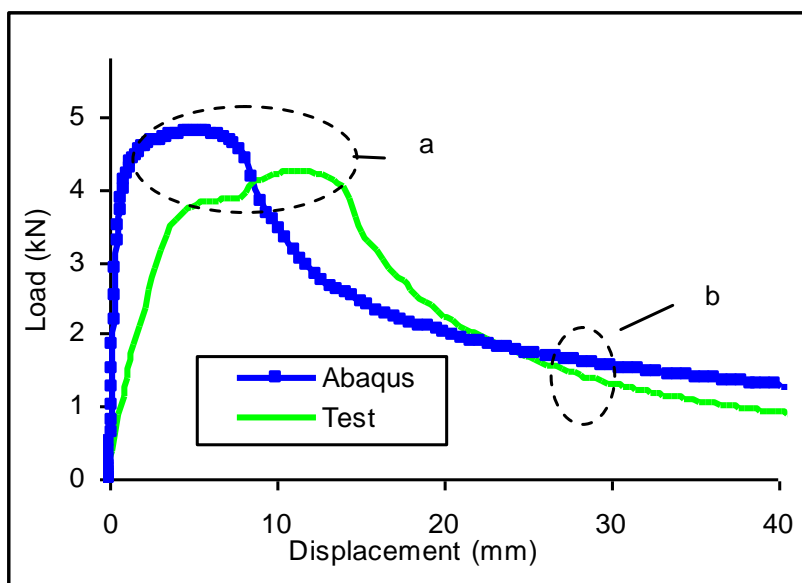
b

Experimental



ABAQUS

شکل ۴-۱۰- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-\theta 0^\circ-\lambda 0.3-C0.5$



a

Experimental

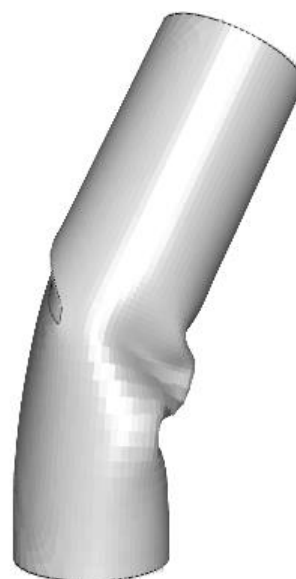


ABAQUS



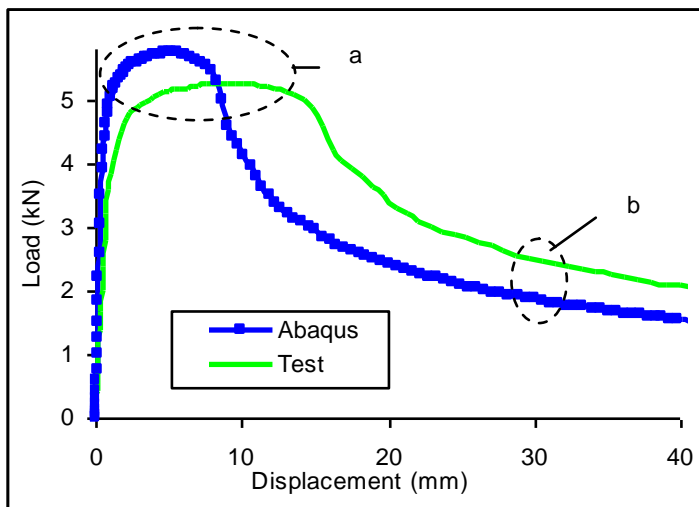
b

Experimental



ABAQUS

شکل ۴-۱۱- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-\theta45^\circ-\lambda0.3-C0.5$



a

Experimental

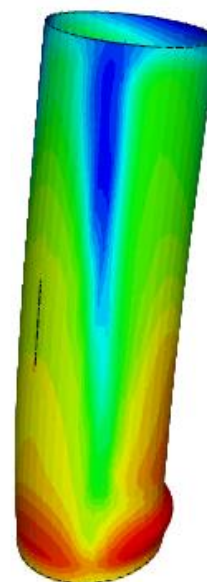


ABAQUS



b

Experimental



ABAQUS

شکل ۴-۱۲- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه  $D42-L150-\theta45^\circ-\lambda0.3-C0.5$

## فصل پنجم

### نتایج و پیشنهادات

## ۵-۱- مقدمه

در این تحقیق کمانش پوسته های استوانه ای با ابعاد مختلف، دارای ترکهای با اندازه و زوایای مختلف، تحت بارگذاری محوری و ممان خمشی، با روشهای عددی و تجربی مورد مطالعه قرار گرفت. نتایج حاصل از تحلیل ها در بخشهای مربوطه، به تفصیل مورد بحث و بررسی قرار گرفت. در این بخش نتایج بدست آمده به طور خلاصه بیان می شود.

## ۵-۲- نتایج

- ۱- با ایجاد ترک در پوسته، بار کمانش پوسته افت چشمگیری پیدا می کند.
- ۲- با تغییر موقعیت ترک از میانه پوسته به طرف لبه های پوسته، بار کمانش کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که پوسته های با طول بلندتر، نسبت به تغییر موقعیت ترک حساس ترند.
- ۳- با افزایش طول پوسته های استوانه ای، برای ترک با موقعیت یکسان، بار کمانش کاهش می یابد. در واقع با افزایش نسبت  $L/D$  بار کمانش کاهش می یابد.
- ۴- برای پوسته های استوانه ای ترک دار، کمانش به صورت موضعی اتفاق می افتد و در ادامه، پوسته دچار خمش کلی می شود.
- ۵- برای ترک با اندازه ثابت، با افزایش طول پوسته، بار کمانش کاهش می یابد.
- ۶- برای پوسته های استوانه ای ترک دار برای ترک با زاویه صفر درجه، افزایش طول ترک تاثیر چندانی در بار کمانش پوسته ندارد.
- ۷- شیب منحنی بار-جابجایی، حاصل از روش عددی، برای تمامی نمونه های ترک دار تقریباً برابر است. همچنین شیب منحنی مربوط به نمونه های کامل اندکی زیادتر است.
- ۸- با تغییر زاویه ترک و ثابت ماندن اندازه، بار کمانش افت تغییر پیدا می کند و پوسته ها نسبت به تغییرات زاویه ترک حساسترند.

- ۹- نتایج نشان می دهد که وجود ترک با ایجاد کمانش محلی باعث تغییر قابل توجه در رفتار پوسته استوانه ای ترک دار می شود. برای ترکهای بزرگتر از طول بحرانی کمانش محلی باعث می شود که کمانش کلی زودتر روی دهد که این طول بحرانی تابع طول ترک، راستای ترک و شرایط بارگذاری است.
- ۱۰- تاثیر نسبت  $D/t$  در مقاومت کمانش پوسته های ترک دار، اندکی بیشتر از تاثیر نسبت  $L/D$  است.
- ۱۱- پوسته های بلندتر و دارای قطر کمتر، نسبت به تغییرات زاویه ترک حساسیت بیشتری نشان می دهند.
- ۱۲- از مقایسه منحنی های حاصل از روش عددی و تجربی نتیجه می شود که این منحنی ها مطابقت بسیار خوبی دارند. همچنین منحنی های مربوط به المانهای خطی، در مقایسه با المانهای غیر خطی، ناحیه پس کمانش را بهتر نشان می دهند درحالی که المانهای غیر خطی بار کمانش را دقیقتر پیش بینی می کنند.
- ۱۳- اختلاف بین مقادیر بار کمانش حاصل از روش عددی و روش تجربی برای اکثر نمونه ها کمتر از ۵ درصد است. ضمناً بیشترین اختلافها مربوط به نمونه های کوتاهتر است. همچنین تغییر شکل نمونه ها، حاصل از روش اجزا محدود و روش تجربی، در حالت های کمانش و پس کمانش کاملاً شبیه یکدیگر است.
- ۱۴- در یک پوسته با طول ثابت و ترک با زاویه ثابت، افزایش طول ترک باعث کاهش بار بحرانی کمانش می شود و پوسته های بلندتر به افزایش طول ترک حساس ترند. برای ترک محیطی نیز به خاطر روی هم قرار گرفتن دو لبه روی هم رفتاری مانند پوسته بدون ترک را از خود نشان می دهد و افزایش طول ترک تاثیر ناچیزی روی بار کمانش دارد.
- ۱۵- در طول ترک یکسان، ترک مایل بیشترین اثر را روی کاهش مقدار بار بحرانی کمانش دارد. اثر ترک طولی روی بار بحرانی کمانش از ترک افقی بیشتر و از ترک مایل کمتر است. در ترک طولی در حین تغییر شکل پوسته هیچ برهم کنشی بین دو لبه ترک وجود ندارد و ترک کاملاً باز می شود. به همین دلیل رفتار پس کمانش پوسته های دارای ترک طولی بسیار شبیه به هم است و تفاوت آنها فقط در ماکزیمم نیروی کمانش است.

- ۱۶- نتایج نشان می دهد که مد کمانش پوسته استوانه ای با ترک محیطی با تغییر طول ترک تغییر می کند. همچنین مد کمانش ترک طولی وقتی که ترک در راستای پوسته جابجا شده تغییر کرده و کمانش در مد دوم روی می دهد. حساسیت بار بحرانی کمانش با کاهش ضخامت پوسته بیشتر می شود.
- ۱۷- نتایج بدست آمده از تحلیل اجزای محدود با نرم افزار ABAQUS، حتی برای المانهای با ابعاد بزرگ، کاملاً همگرا و دقیق می باشد.

### ۳-۵- پیشنهادها

- ۱- تحلیل تجربی کمانش پوسته ها تحت بار خمشی به کمک طراحی یک فیکسچر که قابلیت تبدیل حرکت خطی به چرخش را داشته باشد.
- ۲- انجام تحلیل تجربی و عددی کمانش برای پوسته هایی با مقاطع متفاوت و ترک هایی با اشکال و هندسه های مختلف، به عنوان مثال پوسته های با مقطع مربعی یا مستطیلی دارای ترک های دو طرفه.
- ۳- تحلیل تجربی و عددی پوسته های ترک دار ساخته شده از مواد پر کاربرد دیگر مثل آلومینیوم یا مس.
- ۴- تحلیل عددی کمانش پوسته های کامپوزیتی ترک دار و پیدا کردن یک ترکیب بهینه برای مقاومت پوسته ترک دار در برابر کمانش.
- ۵- انجام تحلیل های بیشتر برای پوسته های استوانه ای ترک دار و ارائه روابط کلی تر.
- ۶- استفاده از تقویت کننده های متفاوت و مقایسه کارایی آنها در بهبود مقاومت کمانش.
- ۷- تحلیل کمانش پوسته های ترک دار تحت بارگذاری دینامیکی

- [1] Farshad, M,(1992). "Design and analysis of shell structures", Dordrecht. Kluwer.
- [2] Buckling of circular cylindrical shells under axial compression. In:Budiansky B, Hutchinson JW, editors(1972). "Contributions to the theory of aircraft structures." Netherlands: **Delft University Press**;, pp. 239–60.
- [3] Arbocz J, Hol JMAM,(1991). "Collapse of axially compressed cylindrical shells with random imperfections". **AIAA J**, 29, pp. 2247–56.
- [4] Jullien JF, Limam A,(1998). "Effect of openings on the buckling of cylindrical shells subjected to axial compression". **Thin Wall Struct**, 31, pp. 187–202.
- [5] Timoshenko SP, Gere JM,(1961). "Theory of elastic stability". 2nd ed. New York, **McGraw-Hill**.
- [6] Farshad M,(1994). "Stability of structures". Amsterdam: **Elsevier**,
- [7] Ugural AC,(1981). "Stresses in plates and shells". New York, McGraw-Hill.
- [8] Hutchinson JW, Tennyson RC, Mugeridge DB,(1972). "Effect of local axisymmetric imperfection on the buckling of a cylindrical shell under axial compression". **AIAA J**,9, pp. 48–52.
- [9] Barut A, Madenci A, Britt VO, Starnes JH,(1997). "Buckling of a thin, tensionloaded,composite plate with an inclined crack". **Eng Fract Mech**, 58, pp. 233–48.
- [10] Vafai A, Estekanchi HE(1996). "A prologue to the buckling analysis of cracked shells". **Iranian Journal of Science and Technology**,20,pp.137–68.
- [11] El Naschie, M.S.,(1974). "Branching solution for local buckling of a circumferentially cracked cylindricalshell", **Int J Mech Sci**, 16,pp. 689–97,.
- [12] Dyshel' MSH.(1989). Stability of a cracked cylindrical shell in tension. *Soviet Applied Mechanics*,25,pp.542–8 [English translation by *Prikladnaya Mekhanika*].
- [13] Hoff NJ, Soong TC,(1967). Buckling of axially compressed circular cylindrical shells with nonuniform boundary conditions. **In: Symposium on Thin-Wall Structures — Their Design and Use in Building**.University College of Swansea, pp. 61–80.
- [14] Starnes, J.H., Rose, Ch,A,(1997). "A nonlinear response of thin cylindrical shells with longitudinal cracks and subjected to internal pressure and axial compression loads," *Proceedings*



of the 38th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, **structural dynamics, and materials conference**, [Part 3 (of 4)] ,pp. 2213–23, .

[15] Starnes, J.H., Rose, Ch.A,(1998) “Buckling and stable tearing responses of unstiffened aluminum shells with long cracks,”. **Proceedings of the 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC structures, structural dynamics, and materials conference and exhibit and AIAA/ASME/AHS adaptive structures forum**, [Part 3 (of 4)],pp. 2389–402

[16] Vaziri A, Estekanchi H.E.(2006) “Buckling of cracked cylindrical thin shells under combined internal pressure and axial compression” **Thin-Walled Struct**, 44,pp. 141–151,

[17] Riks, A., Rankin, C.C., Broan, F.A.,(1992) “The buckling of a central crack in a plate under tension,” **Eng Fract Mech**, 26,pp. 1023–42,.

[18] Chater, E., Hutchinson, J.W., (1984) “On the propagation of bulges and buckles, ” *J Appl Mech*, 51,pp. 1–9,.

[19] Estekanchi, H.E., Vafai, A.,(1999) “On the buckling of cylindrical shells with through cracks under axial load,” **Thin Wall Struct**, 35(4) ,pp. 255–74,.

[20] Estekanchi, H.E., Vafai, A., Kheradmandnia, K. (2002) “Finite element buckling analysis of cracked cylindrical shells under torsion,” *Asian J Civ Eng*, 3(2) ,pp.73–84,.

[21] Vaziri A.(2007) “On the buckling of cracked composite cylindrical shells under axial compression,” **Composite Structures**, 80,pp. 152–158,.

[22] Vaziri A, Nayeb-Hashemi H, Estekanchi HE,(2002). Dynamic response of cracked cylindrical shells with internal pressure. **Proceedings of the ASME congress and exposition;**

[23] Khamlichi A, Bezzazi M, Limam A,(2004). Buckling of elastic cylindrical shells considering the effect of localized axisymmetric imperfections. **Thin Wall Struct**,42(7) ,pp.1035–47.

[24] Hilburger MW, Starnes JH,(2004). Effects of imperfections of the buckling response of composite shells. **Thin Wall Struct** ,42(3) ,pp.369–97.

[25] Mackerle J,(1993). Finite and boundary element analyses of shells. A bibliography (1990–992). **Finite Elements in Analysis and Design**,14,pp.73–83.

[26] Sih GC,(1973). Methods of analysis and solutions of crack problems. Leyden (The etherlands), **Noordhiff International Publishing**,.

[27] Roberto Brighenti,(2009). Buckling sensitivity analysis of cracked thin plates under membrane tension or compression loading. **Nuclear Engineering and Design**, 239,pp. 965–980.

[28]M.M. Alinia\_, S.A.A,(2007). Hosseinzadeh, H.R. Habashi. Influence of central cracks on buckling and post-buckling behaviour of shear panels. **Thin-Walled Structures**, 45,pp. 422–431.

[29]Mohammad Reza Khedmati, Pedram Edalat, Mahyar Javidruzi,(2009). Sensitivity analysis of the elastic buckling of cracked plate elements under axial compression. **Thin Walled Structures**, 47,pp.522–536.

[۳۰] شریعتی م، مجد ثابتی ا، (۱۳۸۷) ، "کمانش و پس کمانش ورق های ترک دار تحت بار محوری فشاری در حالت الاستیک " شانزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک ، کرمان.

[۳۱] سبک دست ش، وفایی ا، (۱۳۸۳) ، "بررسی رفتار بعد از کمانش پوسته های استوانه ای ترکدار تحت بار محوری " اولین کنگره ملی مهندسی عمران، تهران.

[32] ASTM A370-05, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.

[33] Jayaswal K, Grosse IR,(1993). Finite element error estimation for crack tip singular elements. **Finite Elements in Analysis and Design**,14, pp. 17–35.

[34] ABAQUS 6.4 PR11 user's manual.

## **ABSTRACT**

The effect of crack on load-bearing capacity and buckling behavior of cylindrical shells is an essential consideration in their design. In this paper, experimental and numerical buckling analysis of steel cylindrical shells of various lengths and diameters with crack have been studied using the finite element method and the effect of crack position, crack orientation and the crack length-to-cylindrical shell perimeter ( $\lambda=a/2\pi r$ ) and shell length-to-diameter (L/D) ratios on the buckling and post-buckling behavior of cylindrical shells has been investigated. For several specimens, buckling test was performed using an INSTRON 8802 servo hydraulic machine and the results of experimental tests were compared to numerical results. A very good correlation was observed between numerical simulation and experimental results. Finally, based on the experimental and numerical results, sensitivity of the buckling load to the shell length, crack length and orientation has also been investigated.

**Keywords:** *Buckling and postbuckling, Cracked cylindrical shell, Crack length, Crack orientation, Finite element analysis, Experimental method*



**Shahrood University of Technology**

Mechanical Department

**Numerical and Experimental Investigation on the Buckling of  
Cracked Cylindrical Shells under Eccentric Load**

**By**  
Mehdi Sedighi

**Supervisors**  
Dr. Mahmoud Shariati  
Dr. Hamid Reza Eipakchi

**Date:** June 2010