





دانشکده :

مهندسی مکانیک

گروه :

طراحی کاربردی

تحلیل عددی و تجربی کمانش و پس کمانش

پانل‌های استوانه‌ای ترک‌دار فولادی تحت بار محوری و خارج از مرکز

دانشجو: جعفر صائمی

اساتید راهنما :

دکتر محمود شریعتی - دکتر حمیدرضا ایپک چی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

ماه و سال انتشار:

خرداد ۸۹

پایان نامه کارشناسی ارشد (رساله دکتری) آقای / خانم

تحت عنوان:

تحلیل عددی و تجربی کمانش و پس کمانش پانل‌های استوانه‌ای ترک‌دار فولادی تحت بار

محوری و خارج از مرکز

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 :

تقدیم به:

پدر و مادر و همسر

به پاس نثار مهربانی ها، تحمل رنجها، همراهی بی دریغ و
صبوری های بی حساب

بر خود بایسته می دانم که از راهنمایی‌ها، دلگرمی‌های بزرگوارانی سپاس
بگذارم که نگارنده را در انجام این دفتر رهنمون ساختند.

استاد بزرگوار و دانا، جناب آقای دکتر محمود شریعتی که همواره مشوق و
راهنمای کارها بوده اند که گامی به پیش باشند.

استاد توانا جناب آقای دکتر حمیدرضا ایپک چی که با شور و شوق تمام
می آموزد و با دقت تمام آموخته‌ها را می‌خواند.

دوست فرهیخته جناب آقای مهدی صدیقی که از سر دوستی، نگارنده را از
پیشنهادها و راهنمائیهای خود بهره مند ساخت.

همچنین لازم است تا سپاسگزاری خود را از تمامی اساتید بزرگوار و دوستان
عزیزم که در انجام این پایان نامه مرا یاری نمودند ابراز دارم.

جعفر صائمی

saemijafar@yahoo.com

خرداد ماه ۱۳۸۹

تعهد نامه

اینجانب *احمد صیقلی* دانشجوی دوره کارشناسی ارشد / دکتری رشته *مکانیک*
دانشکده *مکانیک* دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه / رساله *تحلیل عددی و تجربی*
پایان نامه *تحلیل عددی و تجربی* تحت راهنمایی *دکتر سید علی حسینی* متعهد می شوم :

- تحقیقات در این پایان نامه / رساله توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصلیت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه/رساله تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچگونه مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در بدست آمدن نتایج اصلی پایان نامه / رساله تاثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه/رساله رعایت می گردد .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه/رساله ، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا از آن استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

تاریخ :

۱۸ شهریور ۱۳۹۷
امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و این مطلب باشد به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه / رساله بدون ذکر منبع مجاز نمی باشد .

- متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه/رساله وجود داشته باشد .

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 ایپک‌چی "بررسی استحکام نهایی پوسته‌های ترک‌دار 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، حمید رضا ایپک‌چی "بررسی عددی و تجربی کمانش پانل‌های استوانه‌ای ترک‌دار" 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 ایپک‌چی "بررسی عددی و تجربی کمانش و پس کمانش پانل‌های استوانه‌ای با تکیه‌گاه‌های 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 ایپک‌چی "تحلیل عددی و تجربی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای ترک‌دار تحت بار خارج از مرکز" هجدهمین کنفرانس سالانه بین المللی مهندسی مکانیک کنفرانس- تهران، دانشگاه صنعتی شریف، اردیبهشت ۱۳۸۹، صفحه ۲۲

چکیده

بررسی اثر وجود ترک بر روی ظرفیت تحمل بار و رفتار کمانش پانلهای استوانه‌ای دارای اهمیت بوده و در طراحی اینگونه سازه‌ها باید در نظر گرفته شود. در این پایان نامه پانلهای استوانه‌ای جدار نازک با طولهای مختلف حاوی ترک به کمک روش المان محدود و تجربی مورد تحلیل قرار گرفته و اثر موقعیت ترک، نسبت طول ترک به محیط آن، زاویه ترک و نسبت طول به قطر پانل بر روی رفتار کمانش و پس کمانش پانلهای 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، تأثیر هر کدام از پارامترهای ذکر شده بر روی رفتار کمانش و پس کمانش پانلهای استوانه‌ای ترک‌دار بررسی شده است.

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

فهرست مطالب

۱- مقدمه ای در مورد پانل و کاربرد آن	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- کاربرد پوسته ها	۲
۳-۱- بررسی روشهای مختلف حل مسئله کمانش پانل ها	۴
۴-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده	۵
۵-۱- جمع بندی	۱۳
۲- تحلیل عددی پانل استوانه ای ترک دار	۱۴
۱-۲- مقدمه	۱۵
۲-۲- معرفی نرم افزار ABAQUS/CAE	۱۶
۳-۲- مدل سازی و ابعاد نمونه ها	۱۸
۴-۲- نامگذاری نمونه ها	۱۹
۵-۲- خواص مکانیکی ماده	۱۹
۶-۲- شرایط مرزی نمونه	۲۰
۷-۲- المان بندی نمونه ها	۲۲
۸-۲- تعیین نوع تحلیل	۲۳
۱-۸-۲- Buckle تحلیل	۲۳
۲-۸-۲- Static, Riks تحلیل	۲۴
۹-۲- نتایج تحلیل عددی پانل های استوانه ای بدون ترک تحت بار فشاری محوری	۲۵
۱-۹-۲- نتایج تحلیل عددی پانل های استوانه ای از جنس فولاد Ck20	۲۵
۲-۹-۲- نتایج تحلیل عددی پانل های استوانه ای از جنس فولاد St37	۲۶
۱۰-۲- نتایج تحلیل عددی پانل های استوانه ای دارای ترک تحت بار فشاری محوری	۲۷
۱-۱۰-۲- بررسی تأثیر تغییر موقعیت ترک بر روی رفتار کمانش پانل های استوانه ای	۲۸
۲-۱۰-۲- بررسی تأثیر تغییر طول ترک بر روی رفتار کمانش پانل های استوانه ای	۳۵
۳-۱۰-۲- بررسی تأثیر تغییر زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پانل های استوانه ای	۳۸

۱۱-۲- نتایج تحلیل عددی پانل‌های استوانه‌ای ترک دار تحت بار خارج از مرکز.....	۴۱
۱۲-۲- اثر طول پانل بر بار بحرانی کمانش.....	۴۵
۱۳-۲- اثر زاویه پانل بر بار بحرانی کمانش.....	۴۵
۱۴-۲- جمع بندی	۴۶
۳- تحلیل تجربی پانل استوانه‌ای ترک‌دار	۴۷
۱-۳- مقدمه.....	۴۸
۲-۳- نتایج تست کشش.....	۴۸
۳-۳- نتایج تحلیل تجربی کمانش پانل‌های استوانه‌ای.....	۴۹
۴-۳- نتایج تحلیل تجربی پانل‌های استوانه‌ای بدون ترک تحت بار محوری.....	۵۰
۱-۴-۳- نتایج تحلیل تجربی پانل‌های استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20	۵۱
۲-۴-۳- نتایج تحلیل تجربی پانل‌های استوانه‌ای از جنس فولاد St37.....	۵۲
۵-۳- نتایج تحلیل تجربی پانل استوانه‌ای ترک دار تحت بار محوری.....	۵۳
۱-۵-۳- بررسی تأثیر تغییر موقعیت ترک بر روی رفتار کمانش پانل‌های استوانه ای.....	۵۳
۲-۵-۳- بررسی تأثیر تغییر طول ترک بر روی رفتار کمانش پانل‌های استوانه ای.....	۵۴
۳-۵-۳- بررسی تأثیر زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پانل‌های استوانه ای.....	۵۷
۶-۳- نتایج تحلیل تجربی پانل‌های استوانه‌ای دارای ترک تحت بار خارج از مرکز.....	۵۸
۷-۳- جمع بندی	۶۲
۴- مقایسه نتایج تحلیل عددی و روش تجربی.....	۶۳
۱-۴- مقدمه.....	۶۴
۲-۴- مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به تحلیل موقعیت ترک.....	۶۴
۳-۴- مقایسه نتایج عددی و تجربی مربوط به تحلیل زوایای ترک و طول ترک در پانل.....	۶۶
۴-۴- مقایسه منحنی‌های بار- جابجایی، حاصل از تحلیل‌های عددی و تجربی.....	۶۷
۵-۴- جمع بندی	۸۰
۵- نتایج و پیشنهادها.....	۸۱
۱-۵- مقدمه.....	۸۲

٨٢.....٢-٥- نتایج

٨٤.....٣-٥- پیشنهادات

٨٦.....مراجع

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱- نمونه‌هایی از سازه‌های پوسته‌ای ۳
- شکل ۱-۲- مختصات هندسی پانل تحت بار فشاری محوری و شرط مرزی یک لبه آزاد ۶
- شکل ۱-۳- مشخصات هندسی پانل و نمای از شرایط مرزی ۷
- شکل ۱-۴- دستگاه سروهیدرولیکی MTS ۷
- شکل ۱-۵- پانل مورد آزمایش قبل و بعد از بارگذاری ۸
- شکل ۱-۶- نمودار بار-جابجائی مرکز پانل (نقطه A) و لبه مرزی (نقطه B) ۸
- شکل ۱-۷- مقایسه عددی و آزمایشگاهی جابجائی خارج از محور نقطه مرکزی پانل (نقطه A) تحت بار محوری ۹
- شکل ۱-۸- پانل استوانه ای با ترک محیطی تحت کشش ۱۲
- شکل ۱-۹- شکل مدهای پانل تحت کشش ۱۲
- شکل ۲-۱- هندسه کلی پانل استوانه ای ترک دار ۱۸
- شکل ۲-۲- نمودار تنش- کرنش برای فولاد Ck20 ۱۹
- شکل ۲-۳- نمودار تنش- کرنش برای فولاد St37 ۲۰
- شکل ۲-۴- شرایط مرزی نمونه ۲۱
- شکل ۲-۵- شرایط مرزی نمونه برای ایجاد بارگذاری خارج مرکز ۲۱
- شکل ۲-۶- نحوه مش بندی نوک ترک ۲۲
- شکل ۲-۷- سه شکل مد کمانش برای نمونه $L150 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۲۴
- شکل ۲-۸- سه شکل مد کمانش برای نمونه $L150 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.5 - C0.33$ ۲۴
- شکل ۲-۹- نمودار بار- جابجائی برای طول های مختلف پانل استوانه‌ای با زاویه مرکزی $\theta 90^\circ$ از جنس فولاد Ck20 ۲۵
- شکل ۲-۱۰- نمودار بار- جابجائی برای زاویه‌های مختلف پانل‌های استوانه‌ای برای طول 100 از جنس فولاد Ck20 ۲۶
- شکل ۲-۱۱- نمودار بار- جابجائی برای طول های مختلف پانل استوانه‌ای با زاویه مرکزی $\theta 90^\circ$ از جنس فولاد St37 ۲۶
- شکل ۲-۱۲- نمودار بار- جابجائی برای زاویه‌های مختلف پانل‌های استوانه‌ای برای طول 100 از جنس فولاد St37 ۲۷
- شکل ۲-۱۳- منحنی‌های بار- موقعیت ترک $D42 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۲۹
- شکل ۲-۱۴- منحنی‌های بار- موقعیت ترک $D42 - \theta 120^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۲۹
- شکل ۲-۱۵- منحنی‌های بار- جابجایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه $L150 - \theta 120^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.7 - C0.5$ ۳۲
- شکل ۲-۱۶- منحنی‌های بار- جابجایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه $L150 - \theta 120^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.7 - C0.33$ ۳۳
- شکل ۲-۱۷- منحنی‌های بار- جابجایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه $L150 - \theta 120^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.7 - C0.25$ ۳۴

- شکل ۲-۱۸- منحنی‌های بار- جابجایی پانل ترک دار برای طول ترک های مختلف ($L100 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - C0.5$)،
 ۳۶..... $L150 - \theta 120^\circ - \alpha 45^\circ - C0.5$ (b
 شکل ۲-۱۹- منحنی‌های بار - جابجایی پانل ترک دار برای زاویه ترک های مختلف $L150 - \theta 120^\circ - \lambda 0.5$ (a)
 ۳۹..... $L150 - \theta 120^\circ - \lambda 0.5$ b
 شکل ۲-۲۰- منحنی‌های بار - جابجایی پانل ترک دار برای زاویه ترک های مختلف $L100 - \theta 90^\circ - \lambda 0.7$ (a)
 ۴۰..... $L250 - \theta 180^\circ - \lambda 0.5$ (b)
 شکل ۲-۲۱- شرایط بار گذاری خارج از مرکز
 ۴۱.....
 شکل ۲-۲۲- منحنی‌های بار- جابجایی، برای نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.5$
 ۴۲.....
 شکل ۲-۲۳- منحنی‌های بار- جابجایی، برای نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5$
 ۴۳.....
 شکل ۲-۲۴- منحنی‌های بار - جابجایی، برای نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.5$
 ۴۴.....
 شکل ۲-۲۵- منحنی‌های بار- جابجایی، برای سه طول مختلف از نمونه $\theta 180^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.4$
 ۴۵.....
 شکل ۲-۲۶- منحنی‌های بار - جابجایی، برای سه زاویه مختلف از نمونه $L100 - \alpha 0^\circ - \lambda 0.3$
 ۴۶.....
 شکل ۲-۲۷- منحنی‌های بار- جابجایی، برای سه زاویه مختلف از نمونه $L250 - \alpha 90^\circ - \lambda 0.4$
 ۴۶.....
 شکل ۳-۱- فیکسچر مورد استفاده در آزمایش برای اعمال بار محوری (a) تکیه گاه ساده، (b) تکیه گاه گیردار.....
 ۵۰.....
 شکل ۳-۲- فیکسچر مورد استفاده در آزمایش برای اعمال بار خارج از مرکز.....
 ۵۰.....
 شکل ۳-۳- نمودار بار- جابجایی برای طول های مختلف پانل استوانه‌ای با زاویه مرکزی $\theta 90^\circ$ از جنس فولاد Ck20.....
 ۵۱.....
 شکل ۳-۴- نمودار بار- جابجایی برای زاویه‌های مختلف پانل‌های استوانه‌ای برای طول 100 از جنس فولاد Ck20.....
 ۵۱.....
 شکل ۳-۵- نمودار بار- جابجایی برای طول های مختلف پانل استوانه‌ای با زاویه مرکزی $\theta 90^\circ$ از جنس فولاد St37.....
 ۵۲.....
 شکل ۳-۶- نمودار بار- جابجایی برای زاویه‌های مختلف پانل‌های استوانه‌ای برای طول 100 از جنس فولاد St37.....
 ۵۲.....
 شکل ۳-۷- تعدادی از نمونه های آزمایش با دستگاه INSTRON
 ۵۳.....
 شکل ۳-۸- منحنی‌های بار- جابجایی برای پانل ترک دار با ترک در موقعیت های مختلف.....
 ۵۴.....
 شکل ۳-۹- منحنی‌های بار- جابجایی برای طول ترک های مختلف نمونه $D42 - L100 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - C0.5$
 ۵۵.....
 شکل ۳-۱۰- منحنی‌های بار- جابجایی برای طول ترک های مختلف نمونه $D42 - L100 - \theta 90^\circ - \alpha 0^\circ - C0.5$
 ۵۵.....
 شکل ۳-۱۱- منحنی‌های بار- جابجایی برای طول ترک های مختلف نمونه $D42 - L100 - \theta 90^\circ - \alpha 45^\circ - C0.5$
 ۵۶.....
 شکل ۳-۱۲- مراحل کمانش نمونه $D42 - L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$
 ۵۶.....
 شکل ۳-۱۳- منحنی‌های بار- جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه $D42 - L100 - \theta 90^\circ - \lambda 0.7 - C0.5$
 ۵۷.....
 شکل ۳-۱۴- منحنی‌های بار- جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه $D42 - L250 - \theta 180^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$
 ۵۸.....
 شکل ۳-۱۵- منحنی‌های بار- جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه $D42 - L150 - \theta 180^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$
 ۵۹.....

- شکل ۳-۱۶- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه $D42 - L150 - \theta 120^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۶۰
- شکل ۳-۱۷- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه $D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۶۱
- شکل ۳-۱۸- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه پائل های مختلف نمونه $D42 - L150 - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۶۲
- شکل ۴-۱- مقایسه منحنی های بار - جابجایی تجربی و عددی برای نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۶۵
- شکل ۴-۲- مقایسه منحنی های بار - جابجایی تجربی و عددی برای نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.33$ ۶۵
- شکل ۴-۳- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L250 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$ ۶۸
- شکل ۴-۴- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L250 - \theta 180^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$ ۶۹
- شکل ۴-۵- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L150 - \theta 120^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$ ۷۰
- شکل ۴-۶- منحنی های بار- جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.33$ ۷۱
- شکل ۴-۷- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۷۲
- شکل ۴-۸- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.25$ ۷۳
- شکل ۴-۹- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L100 - \theta 180^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$ ۷۴
- شکل ۴-۱۰- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L100 - \theta 120^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$ ۷۵
- شکل ۴-۱۱- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L100 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۷۶
- شکل ۴-۱۲- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۷۷
- شکل ۴-۱۳- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۷۸
- شکل ۴-۱۴- منحنی های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ ۷۹

فهرست جداول

جدول ۲-۱- نتایج تحلیل های عددی.....	۳۷
جدول ۳-۱- مشخصات هندسی و مکانیکی هر دو نمونه St37 و Ck20.....	۴۸
جدول ۴-۱- نتایج تحلیل های عددی و تجربی مربوط به موقعیت ترک.....	۶۴
جدول ۴-۲- نتایج تحلیل های عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف.....	۶۶

فصل اول

مقدمه ای در مورد پانل ها و کاربرد آن

۱-۱- مقدمه

ورقها و پانل ها سازه هایی هستند که شکل اولیه آنها به ترتیب تخت و خمیده می باشد و ضخامت آنها نسبت به دو بعد دیگر بسیار کوچکتر است. معیاری که برای تعریف یک ورق یا پانل نازک بکار برده می شود؛ 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 می رسد.

۱-۲- کاربرد پوسته ها

امروزه پوسته ها و ورقها بخش اعظمی از سازه های صنایع مختلف را به خود اختصاص داده اند. پوسته ها به دلیل وزن کم و مقاومت زیاد کاربرد وسیعی در صنایع دارند. این خواص ناشی از طبیعت هندسی پوسته است. سازه های پوسته ای از نظر تحمل بارهای فشاری و ضربه ای از بهترین سازه ها محسوب می شوند و به همین دلیل در طبیعت نیز پوشش اندام گیاهان و جانوران، ماهیت پوسته ای دارد. با درک ویژگی های مهم سازه های پوسته ای از جمله قدرت تحمل بار، استحکام بالا و راحتی ساخت، مهندسين همواره از سازه های پوسته ای در طراحی و ساخت سازه های مختلف استفاده می کنند. از کاربردهای پوسته ها می توان در سازه های هوایی برای بدنه هواپیماها، روکش بال و دم هواپیما، بدنه موشک و غیره اشاره کرد. استفاده از ورقها و پوسته ها در صنایع دیگر نظیر خودرو سازی، شناور سازی، مخازن نفت و گاز در صنایع پتروشیمی، خطوط لوله، مخازن نگهداری مایعات و سیلوهای انبار دانه های نباتات و غلات، مخازن تحت فشار، سرپوشها یا کله گیها و غیره رایج است (شکل (۱-۱)). پانل های استوانه ای نیز در سازه هایی مانند بدنه موشکها، بالگردها، هواپیماها، پایه سکوها دریایی، کندانسور و دودکش نیروگاهها و تجهیزات ورزشی استفاده فراوان دارند.



شکل ۱-۱- نمونه‌هایی از سازه‌های پوسته‌ها

این سازه‌ها ممکن است تحت بارهای محوری فشاری قرار گرفته و دچار کمانش شوند. به علاوه، این اجزا اغلب در بعضی قسمت‌ها ناپیوستگی‌هایی مانند گشودگی‌ها دارند که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند در پایداری سازه‌ها تأثیرگذار باشند. برای طراحی یک پانل استوانه‌ای تحت بار فشاری لازم است باری که پانل 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 گشودگی، 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 پانل ها

استفاده بسیار وسیع از ورقها و پانل ها به عنوان المانهای سازه ای 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 سازه ها

۲ - بررسی عددی سازه ها

۳ - بررسی تجربی سازه ها

امروزه سه روش فوق رایج بوده و گاهی از هر سه روش برای انجام یک تحقیق استفاده می شود. حل تحلیلی سازه ها، روشی است که بر یک یا چند اصل فیزیکی استوار است؛ که توسط روشهای ریاضی توسعه داده شده اند. این روش حل عمدتاً برای مسائل و سازه های با هندسه های ساده و بارگذاری ها و شرایط مرزی متقارن جوابهای دقیقی ارائه می دهد و حل بسیاری از مسائل ساده در کتابهای منتشر شده موجود است. از روشهای تحلیلی سازه ها می توان به تحلیل تنش یک مخزن استوانه ای 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 می گردد. در مواردی نیز جوابهای تقریبی برای حل تحلیلی سازه ها بدست می آید. شاید دلیل تقریبی بودن این جوابها فرضهای ساده کننده ای باشد که برای حل معادلات بکار رفته اند. عدم توانایی در حل معادلات دیفرانسیلی که از حل های تحلیلی حاصل می شوند، از مهمترین مشکلات انجام حل تحلیلی می باشد.

حل عددی سازه ها نیز روش دیگری است که امروزه توسط برنامه های قدرتمند المان محدود به بازار صنعت آمده است. این روش بسیار ارزان قیمت و مقرون به صرفه است و همواره می توان 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.

۴-۱- مروری بر تحقیقات انجام شده

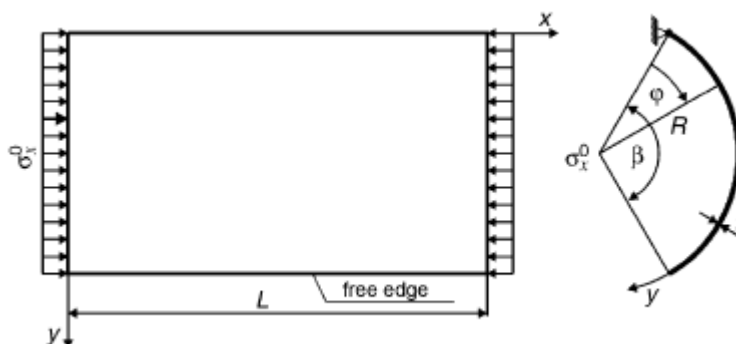
سازه های پوسته ای دارای کاربرد فراوان در صنایع هوافضا، سازه های معدنی، سدهای بزرگ، سقفهای پوسته ای، خط لوله، سازه های حمل و نگهداری سیالات و برجهای خنک کن می باشد [۱]. یکی از مهمترین مسائلی که هنگام طراحی این سازه ها باید مورد بررسی قرار گیرد، پدیده کمانش است [۲]. اولین تحقیقات بر روی تعیین بار کمانش 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 آل هندسی و بارگذاری 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 یکنواخت، با بکار بردن فرمول زیر، استفاده کرد:

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

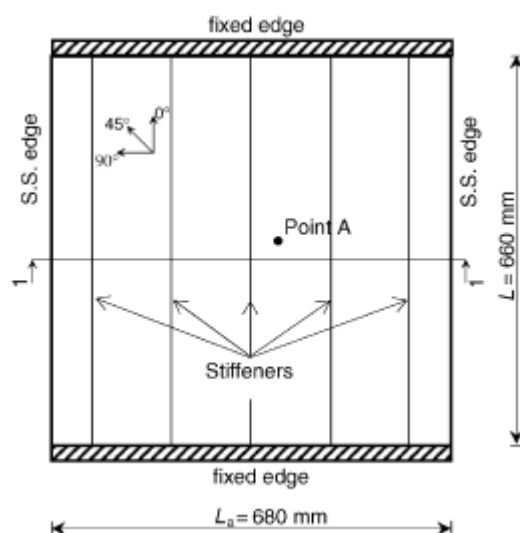
که در آن N نیروی محوری بر واحد محیط مقطع استوانه، E مدول یانگ، ν ضریب پواسون، t ضخامت پوسته و R شعاع پوسته است. باید توجه داشت که این معادله، برای پوسته های نازک بدون گشودگی با $L/R \leq 5$ ، جواب مناسبی می دهد [۷]. این معادله، برای پانل های با ضخامت متوسط ($R/t < 50$) نیز اغلب مقداری بیشتر از بار کمانش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

محققین دیگری اثر شرایط مرزی و مشخصات هندسی پانل در بار کمانش را مورد بررسی قرار داده اند. از آن جمله می توان به Magnucki در سال ۲۰۰۴ که به بررسی تحلیلی اثر زاویه پانل شکل (۱-۲) و نیز اثر پارامتری M ، که نشان دهنده تعداد سطر و ستون ماتریس در بدست آوردن σ_x می باشد، بر روی بار کمانش پرداخته اند [۸].



شکل ۱-۲- مختصات هندسی پانل تحت بار فشاری محوری و شرط مرزی یک لبه آزاد [۸]

در سال ۲۰۰۶ تست تجربی برای بدست آوردن بار کمانش در پانل ها توسط E.Gal انجام شد. برای آزمایش کمانش از نمونه پانل هائی با شعاع $R=938\text{mm}$ و طول $L=660\text{mm}$ و طول قوس $L_{\alpha}=680\text{mm}$ و تعداد ۵ تا تشودگی جهت تقویت پانل در زوایای مختلف $0, 45, 90^\circ$ به عرض $h=20\text{mm}$ و ضخامت $t=0.125\text{mm}$ و شرایط مرزی را همانطور که در شکل (۳-۱) مشخص شده در طول پانل ساده (s.s.edge) و دوسر دیگر بصورت ثابت (fixed edge) در نظر گرفته، مشخصات مکانیکی نمونه عبارت است از مدول الاستیک طولی $E_{11}=1.473 \times 10^{11}\text{ pa}$ مدول الاستیک عرضی $E_{22}=1.18 \times 10^{10}\text{ pa}$ ، مدول $G_{12}=6.0 \times 10^9\text{ pa}$ و ضریب پواسون $\nu_{12}=0.3$.



شکل ۳-۱- مشخصات هندسی پانل و نمای از شرایط مرزی [۹]



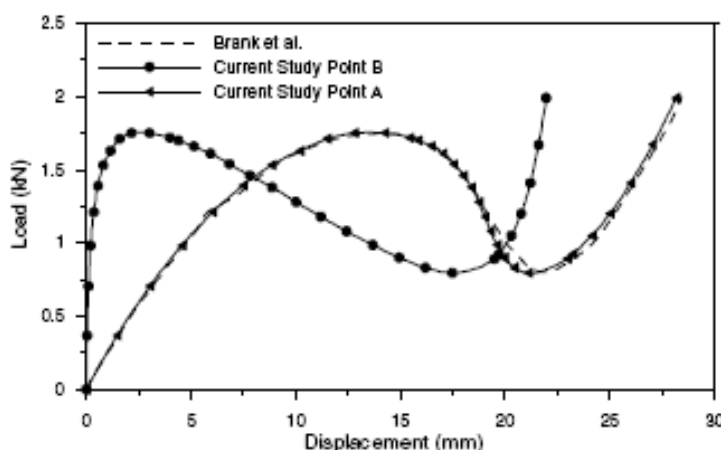
شکل ۴-۱- دستگاه سرویهیدرولیکی MTS [۹]

برای انجام تست در آزمایشگاه دانشکده هوافضا و توسط دستگاه سروهیدرولیکی MTS با ظرفیت 50ton (شکل (۴-۱)) رفتار کمانش پانل مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته با وارد کردن نیروی تدریجی فشاری افزاینده تا حدود 13ton نمونه به نقطه شکست رسید. شکل (۵-۱) نمای از پانل مورد آزمایش قبل و بعد از بارگذاری را نشان می دهد [۹].



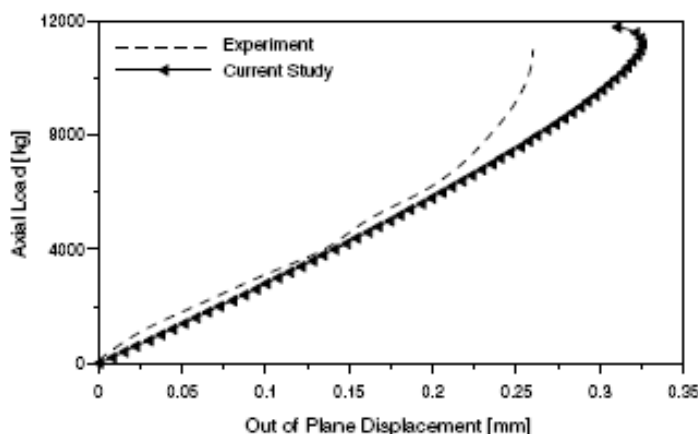
شکل ۵-۱- پانل مورد آزمایش قبل و بعد از بارگذاری [۹]

در قسمت دوم این پژوهش بار کمانش بصورت عددی در مرکز پانل (نقطه A) و لبه مرزی پانل (نقطه B) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته که نتایج در نمودار شکل (۶-۱) مشاهده می شود.



شکل ۶-۱- نمودار بار-جابجایی مرکز پانل (نقطه A) و لبه مرزی (نقطه B) [۹]

در نهایت جابجایی خارج از محور نقطه مرکزی پانل (نقطه A) تحت بار محوری به دو روش آزمایشگاهی و المان محدود در شکل (۷-۱) نشان داده شده که نسبتاً بر هم منطبقند.



شکل ۱-۷- مقایسه عددی و آزمایشگاهی جابجائی خارج از محور نقطه مرکزی پانل (نقطه A) تحت بار محوری [۹]

مانند دیگر سازه ها، پانل ها نیز مستعد ایجاد و رشد عیوبی مثل ایجاد ترک، خوردگی و تغییرات شیمیائی هستند. وجود ترک روی پانل مانند عیب و نقصهای سازه ای عمل می کند و به شدت بر روی رفتار کمانش پانل ها تاثیر گذاشته و باعث کاهش توان باربری آن می شود [۱۰-۱۲]. Naschie برای اولین بار کمانش پانل های ترک دار را مطرح کرد [۱۳]. تمرکز وی در این مطالعه بر روی پانل های استوانه ای که دارای ترک محیطی کامل هستند بود. بار کمانش این پانل ها تقریباً نصف بار کمانش استوانه کامل بدون ترک است. Dyshel کمانش پانل استوانه ای با ترک محیطی را که تحت کشش قرار دارد به روش تحلیلی- عددی بررسی کرد [۱۴]. پانل استوانه ای بلند، نازک، الاستیک و ایزوتروپ است و تحت تنش کششی قرار دارد. فرض می شود که ترک کم عمق و دارای طول کم است. فرض می شود که نمودار تنش- کرنش در همسایگی نوک ترک همانند صفحه تخت است. لبه های ترک بوسیله یک دایره به شعاع واحد مشخص می شود. مرتب سازی نقطه برای معادلات حالت و مقدار ویژه بدست آمده از معادلات جبری همگن به کمک پایداری دترمینان بدست می آید. اهمیت عملی این نتایج، با فرضیاتی که در حل صورت گرفته محدود شده است. کمانش صفحه ترک دار نیز مشابه کمانش پانل ها است. صفحات را میتوان پانل ای در نظر گرفت که انحناء ندارند. عدم وجود انحناء فرمول سازی تئوری را ساده می کند و به راحتی می توان رفتار آن را با پانل های دارای انحناء مقایسه کرد. کمانش پانل ها با ترک طولی مرکزی تحت کشش، به عنوان ساده ترین حالت کمانش صفحه در نظر گرفته می شود. وی شکست صفحه و پانل های

استوانه‌ای را بررسی کرد. او مشاهده کرد که کمانش ورقها در باری کمتر از بار بحرانی روی می‌دهد و رشد ترک سریع‌تر اتفاق می‌افتد. Hoff و Soong در مورد این مساله تحقیقات بیشتری انجام دادند [۱۵]. تحقیق و بررسی در زمینه کمانش پانل‌ها و صفحه‌های ترک‌دار بسیار محدود است. چون شامل دو موضوع پایداری پوسته و پوسته‌های ترک‌دار می‌شود. 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 سازه‌ای، روش (FE) به عنوان یک روش مناسب برای تحلیل اینگونه مسائل بکار می‌رود که مسئله کمانش پوسته‌های ترک‌دار از جمله این مسائل است. در هر حال مطالب در مورد بررسی کمانش پانل‌های ترک‌دار 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 سازه‌ها نمی‌دهد. 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 می‌دهد. در مسئله کمانش پانل‌ها، مش بندی مناسب مدل FE گاهی پیچیده می‌شود و باعث می‌شود باری که برای کمانش تخمین زده می‌شود به طور غیر منتظره‌ای تغییر کند.

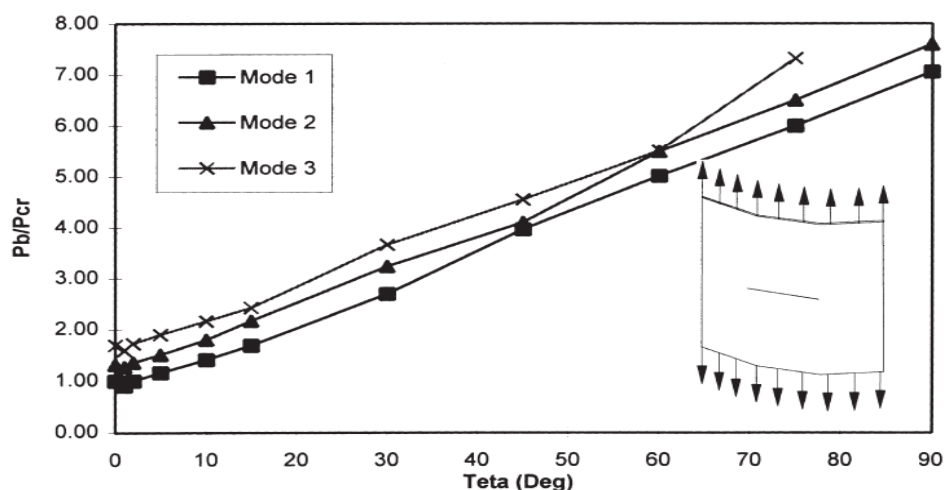
رفتار کمانشی پوسته‌های ترک‌دار به عواملی نظیر شرایط مرزی، هندسه، طول و زاویه ترک و شرایط بارگذاری بستگی دارد. کمانش غیر خطی پوسته‌های استوانه‌ای جدار نازک با ترک طولی، تحت بارگذاری محوری و فشار داخلی توسط Starnes و Rose مورد مطالعه قرار گرفت [۱۶ و ۱۷]. آنها نتیجه گرفتند که اثر غیر خطی بین تنشهای ایجاد شده در صفحه و جابجایی‌های خارج صفحه در نزدیکی ترک روی رفتار کمانش پوسته اثر می‌گذارد. 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 [۱۸]. تحلیل پس کمانش پوسته‌های ترک دار نشان می‌دهد که تغییر شکل ناشی

از کمانش باعث افزایش قابل توجه ضریب شدت تنش در اطراف نوک ترک می شود [۱۹]. از طرف دیگر، افزایش بارگذاری می تواند منجر به گسترش کمانش محلی و در نهایت منجر به شکست مخرب در سازه شود [۲۰]. 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 [۲۱]. Vaziri حساسیت کمانش پوسته های استوانه ای کامپوزیتی را به وجود ترکهای سراسری تحت فشار محوری بررسی کرد [۲۲]. 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 می شود که تابع طول ترک، راستای ترک و شرایط بارگذاری است [۲۳]. 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 [۲۴-۲۷].

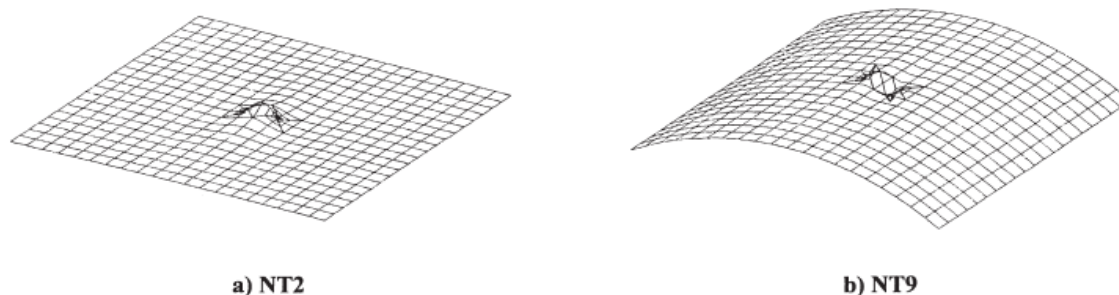
Brighenti درباره اثر طول و زاویه ترک بر روی بار کمانش صفحه مستطیلی نازک که دارای شرایط تکیه گاهی مختلف است مطالعه کرده است [۲۸]. در این مطالعه، بارگذاری کششی و فشاری در نظر گرفته شده است. بررسی اثر ترک مرکزی بر روی استحکام نهایی پانل توسط Alinia به کمک روش المان محدود انجام شده است [۲۹]. Khedmati مقایسه ای بین اثر طول ترک و محل ترک روی رفتار کمانشی صفحه ترک دار تحت بارگذاری فشاری انجام داده است [۳۰]. 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 [۳۱]. سبک دست رفتار بعد از کمانش پوسته های استوانه ای ترک دار تحت بار محوری و اثر وجود ترک بر بار کمانشی را با استفاده از روش اجزا محدود توسط بر نامه

Ansysis 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 [۳۲].

در تحلیلی دیگر کمانش پانلهای استوانه ای ترکدار در کشش با زاویه مرکزی از (0° به 90°) برای سه مد اول کمانش تغییر می کند بررسی شده و بار کمانش برای سه مد اول نسبت به زاویه مرکزی پانل در شکل (۸-۱) آورده شده است. مشخص است که با افزایش زاویه پانل بار کمانش افزایش می یابد. شکل (۹-۱) نیز تغییر شکل مد برای صفحه و پانل استوانه ای را نشان می دهد [۳۳].



شکل ۸-۱- پانل استوانه ای با ترک محیطی تحت کشش [۳۳]



شکل ۹-۱- شکل مدهای پانل تحت کشش [۳۳]

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، قطر و زاویه پانل استوانه ای سالم 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 عددی و تجربی مورد بررسی قرار می دهیم.

فصل دوم

تحلیل عددی پانل های 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 دستگاهی از معادلات دیفرانسیل معمولی و یا پاره ای^۱ 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

^۱ Partial

و یا توابع مجهول که می توان آنها را با مجموعه ای نامتناهی از اعداد نشان داد، به وسیله تعداد متناهی از پارامترهای مجهول جایگزین می گردند که طبیعتاً در حالت کلی نوعی تقریب را در بر دارد. برای این منظور روشهای عددی متنوعی برای حل معادلات دیفرانسیل حاکم بر 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^۱

۲- روش تغییراتی^۲

۳- روشهای باقیمانده وزنی^۳

بسته به نوع روش عددی مورد استفاده و نوع المان بندی، روشهای مختلفی نظیر حجم محدود^۴، المان محدود^۵، تفاضل محدود و ... حاصل شده است. هر کدام از روشهای فوق الذکر، 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 ABAQUS، ANSYS، 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

^۱ Finite Difference

^۲ Variational Method

^۳ Weighted Residual Methods

^۴ Finite Volume

^۵ Finite Element

است که در مدلسازی انواع مواد با خواص و رفتار گوناگون نظیر فلزات، لاستیک‌ها، پلیمرها، کامپوزیت‌ها، بتن تقویت شده، فوم‌های فنی و شکننده و همچنین مواد موجود در زمین نظیر خاک و سنگ، قابلیت بالایی را ممکن می‌سازد.

نظر به اینکه ABAQUS یک ابزار مدلسازی عمومی و گسترده می‌باشد، استفاده از آن تنها محدود به تحلیل‌های مکانیک جامدات و سازه (تنش- تغییر مکان) نمی‌شود. با استفاده از این نرم افزار می‌توان مسایل مختلفی نظیر انتقال حرارت، نفوذ جرم، تحلیل حرارتی المان 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. پیچیده‌ترین 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 بارگذاری آن مساله را تعیین کند. در یک تحلیل غیر خطی، ABAQUS به طور اتوماتیک میزان نمو بار^۱ 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 محیط‌های ده‌گانه‌ای تقسیم شده است که در هر یک از این محیط‌ها طبق یک فرآیند منطقی یکی از بخش‌های مدلسازی انجام می‌گیرد. هنگامی که مدلسازی

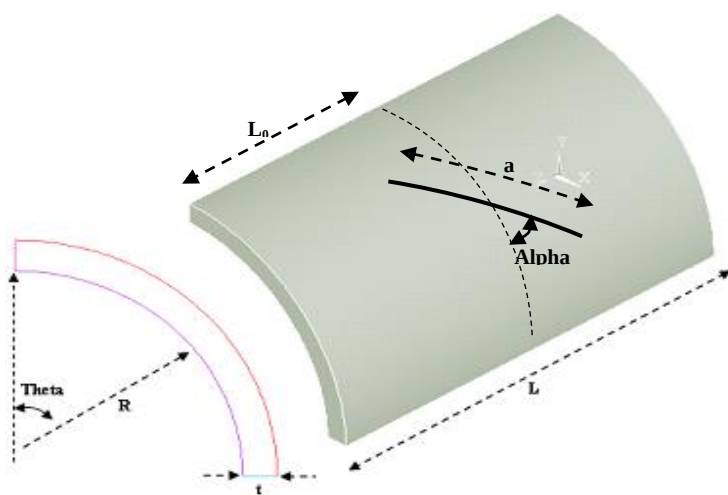
^۱ Load Increment

به اتمام رسید، ABAQUS/CAE یک فایل ورودی^۱ ایجاد می کند که ساختاری بسیار شبیه به یک کد برنامه نویسی شده دارد و توسط یکی از دو روش ضمنی و یا صریح مورد تحلیل قرار می گیرد. حل گر نرم افزار، فایل ورودی را خوانده و طی فرآیند حل اطلاعاتی را به CAE می فرستد که قابلیت مانیتور کردن پروسه حل به طور همزمان را ممکن می سازد. همچنین نتایج تحلیل در یک فایل خروجی^۲ ذخیره می گردد. 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 می پردازد [۳۴].

۲-۳- مدل سازی و ابعاد نمونه ها

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

شعاع پانل و L_0 فاصله



شکل ۱-۲- هندسه کلی پانل استوانه ای ترک دار

^۱ Input file

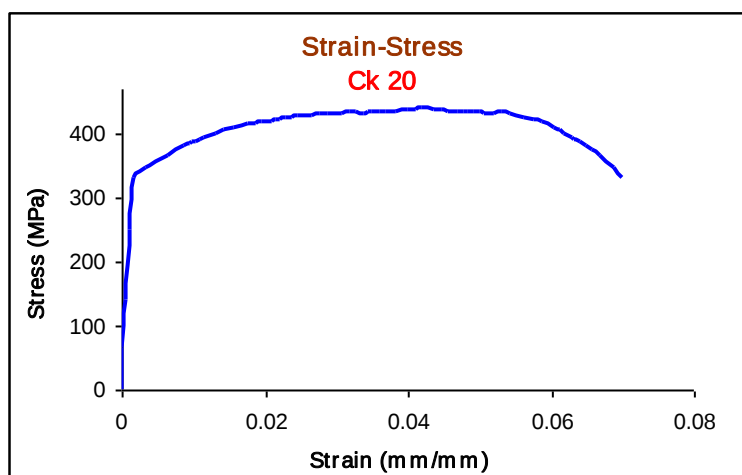
^۲ Output database

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 پانل استوانه‌ای، ترک در مکان-های مختلف روی پانل مدل شده است. نسبت $c=L_0/L=0.25, 0.33, 0.5$ بیانگر موقعیت ترک روی پانل است. برای نمونه $c0.5-\lambda0.5-\alpha45^\circ-\theta90^\circ-L150$ ، نشان دهنده مشخصات پانل‌ای است که طول آن 150 mm، دارای زاویه مرکزی ۹۰ درجه و راستای ترک آن نسبت به راستای محیطی ۴۵ درجه می باشد. نسبت طول ترک به محیط پانل ۰/۵ بوده و c0.5 نشان می دهد که ترک در وسط پانل قرار دارد.

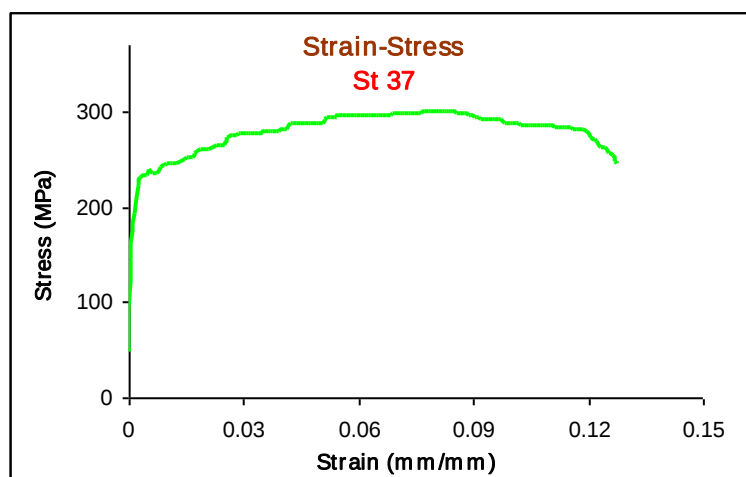
۲-۵- خواص مکانیکی ماده

پانل‌های استوانه‌ای مورد استفاده در این مطالعه از فولاد آلیاژی Ck20 و St37 به ترتیب با ضخامت ۲ و ۹/۰ میلیمتر تهیه شده است. خواص مکانیکی فولاد مورد نظر بر طبق استاندارد ASTM E8 به کمک دستگاه INSTRON 8802 تعیین شده است [۳۵]. نمودار تنش- کرنش، خواص الاستیک، پلاستیک و مقادیر عددی آن در شکل‌های (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.

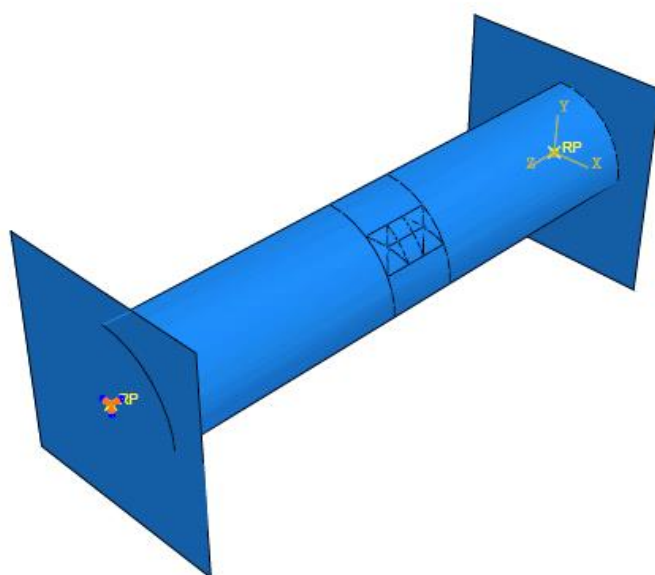


شکل ۲-۳- نمودار تنش - کرنش برای فولاد St37

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.

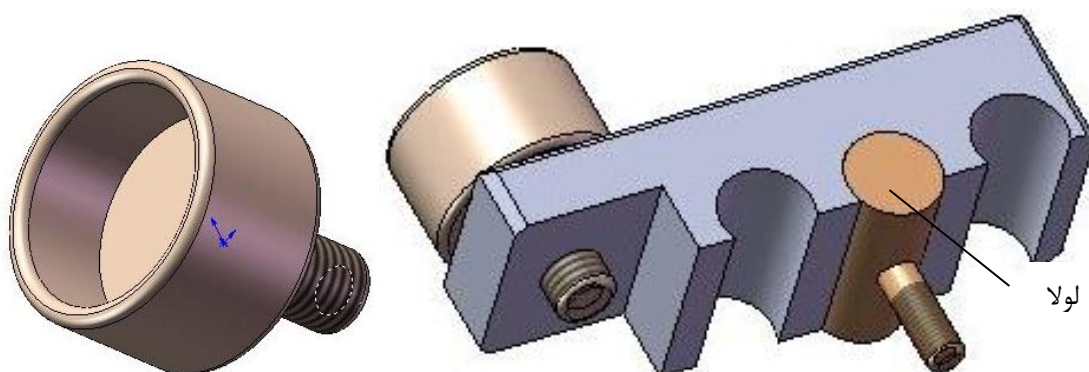
۲-۶- شرایط مرزی نمونه

برای ایجاد شرایط تکیه‌گاهی مورد نظر در دو لبه پانل استوانه‌ای، دو صفحه صلب متصل به دو انتهای پانل در نظر گرفته شده است. برای ایجاد شرایط کمانش مطابق آنچه که در شرایط آزمایشگاهی روی می‌دهد، مرکز صفحه بالا را به اندازه 40 mm جابجا کرده تا باعث می‌شود بار فشاری روی هر دو طرف پانل توزیع شود. برای حالت تکیه‌گاه گیردار کل درجات آزادی صفحه پایین مقید شده است و صفحه بالایی تنها در راستای طولی می‌تواند حرکت کند. در بخش تجربی تکیه‌گاههای مورد استفاده در حالت گیردار دارای ارتفاع 14 mm می‌باشد 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

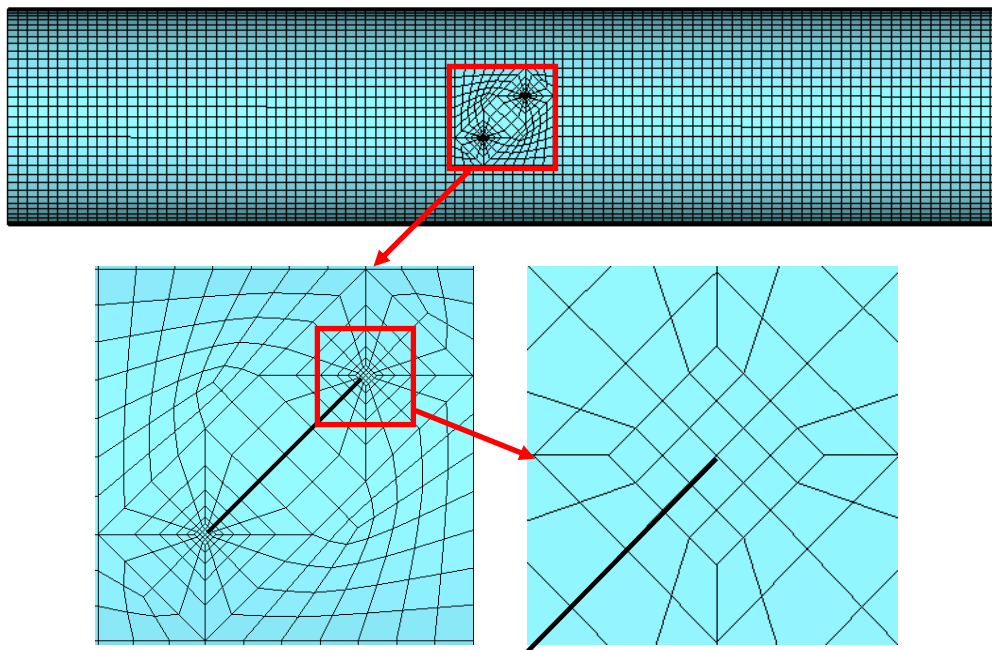
برای ایجاد بارگذاری خارج مرکز که در نتیجه آن پانل همزمان تحت بار فشاری محوری و گشتاور خمشی قرار می گیرد، از فیکسچر نشان داده شده در شکل (۲-۵) استفاده شده است. مشخص است که با توجه به لولا بودن تکیه گاه که نیرو را به پانل منتقل می کند، پس از اعمال بار محوری و دوران تکیه گاه حول لولا بارگذاری مرکب روی پانل اعمال می شود. فاصله مرکز لولا تا وسط پانل، 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 می باشد، و برای تحلیل پانل ها مناسب است، استفاده شده است و از المان خطی S4R که یک المان خطی مستطیلی با چهار گره می باشد، 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 پانل از نوک ترک شروع به رشد می کند. برای مش بندی مناسب که برای زوایای مختلف ترک متفاوت است، ابتدا پانل متناسب با زاویه ترک تقسیم بندی شده و سپس المان بندی می شود.

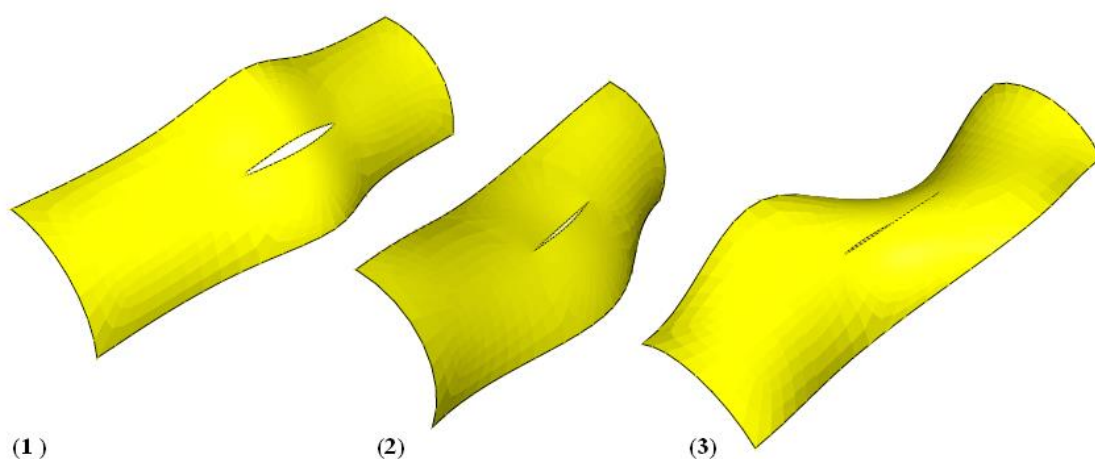
۲-۸- تعیین نوع تحلیل

روش المان محدود به عنوان یک روش مناسب برای تحلیل مسائل سازه ای که تحلیل آن ها مشکل است می باشد. مسئله کمانش پانل های ترک دار از جمله این مسائل است. روش المان محدود به عنوان یک روش موفق در حل مسائل کمانش پانل ها مطرح است. در هر حال مطالب در مورد بررسی کمانش پانل 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.

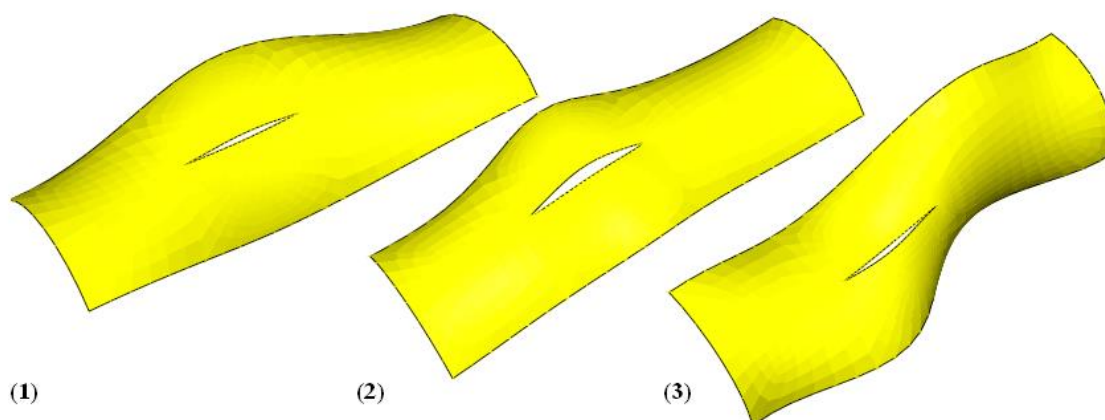
تحلیل کمانش هیچ گونه اطلاعاتی درباره رفتار پس کمانش سازه ها نمی دهد. برای آزمایش اثر غیر خطی، باید برای هر مورد یک تحلیل غیر خطی انجام شود. در هر حال، تحلیل کمانش تخمین خوبی از بار کمانش واقعی در مورد تغییر شکل سازه را می دهد. تحلیل مقدار ویژه، بار کمانش را بیشتر از مقدار واقعی آن نشان می دهد، زیرا از 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 پانل یک تماس تعریف شود، لذا نمی توان از روش حل Lanczos استفاده کرد [۳۴]. در شکل های (۲-۷) و (۲-۸) سه شکل مد کمانش برای نمونه نمایش داده شده است.



شکل ۲-۷- سه شکل مد کمانش برای نمونه $L150 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$



شکل ۲-۸- سه شکل مد کمانش برای نمونه $L150 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.5 - C0.33$

۲-۸-۲- تحلیل Static ,Riks

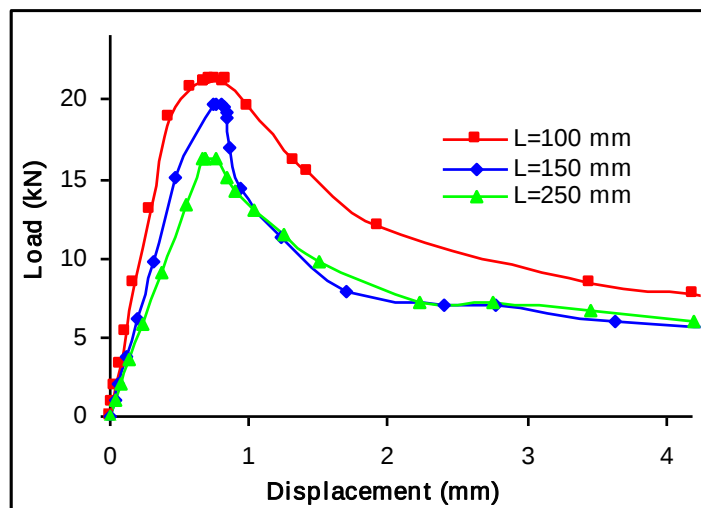
بعد از تحلیل Buckle، از یک تحلیل غیر خطی برای بدست آوردن نمودار نیرو- جابجایی استفاده می شود. مقدار ماکزیمم در این نمودار، نشان دهنده بار کمانش است. این مرحله (Static Riks) نامیده می شود و از روش Arc length برای تحلیل پس کمانش استفاده می کند. در این مرحله خواص غیر خطی و پلاستیک ماده در نظر گرفته می شود.

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

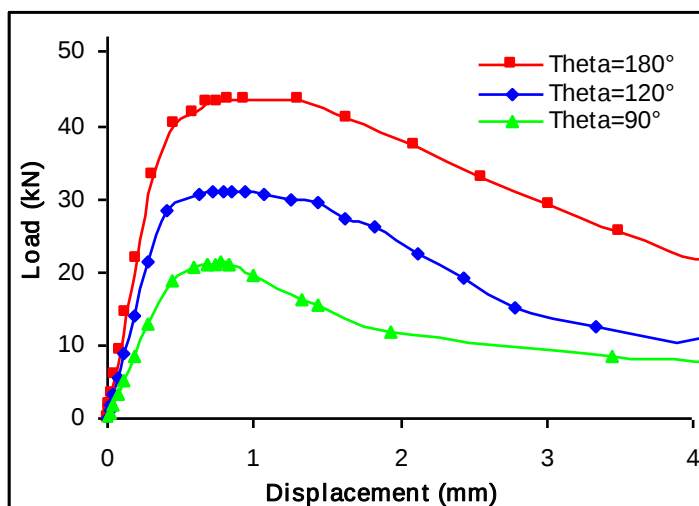
در این بخش نتایج تحلیل کمانش پانل‌های استوانه‌ای بدون ترک تحت بار فشاری محوری برای نمونه‌هایی از جنس فولاد Ck20 و St 37 با سه طول مختلف ($L=100\text{ mm}, 150\text{ mm}, 250\text{ mm}$) ارائه شده است. هدف از انجام این تحلیل‌ها بررسی تأثیر طول پانل بر روی رفتار کمانش پانل‌های استوانه‌ای جدار نازک است.

۹-۲-۱- نتایج تحلیل عددی پانل‌های استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20

نتایج عددی برای پانل‌های استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20 با سه طول ($L=100, 150, 250\text{ mm}$) با قطر 42 mm به ضخامت 2 mm در نمودار شکل (۹-۲) و (۱۰-۲) نشان داده شده است تأثیر طول در نمودار نشان می‌دهد که افزایش طول پانل از 100 mm به 250 mm در شرایط یکسان، باعث کاهش ۱۱ درصد در بار بحرانی کمانش می‌شود.



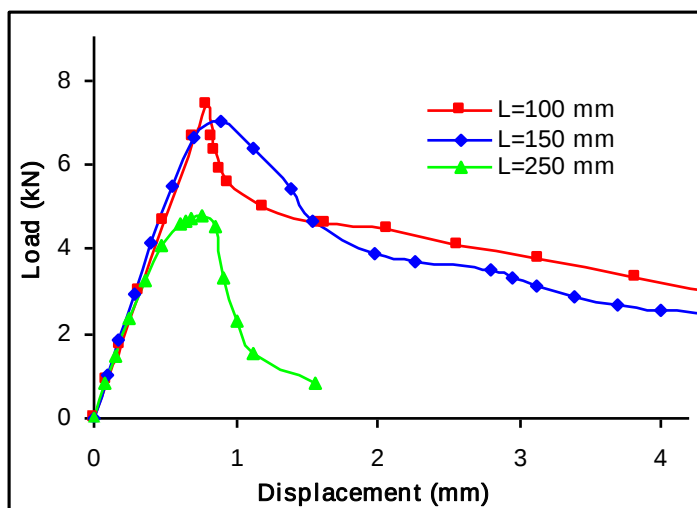
شکل ۹-۲- نمودار بار-جابجائی برای طول‌های مختلف پانل استوانه‌ای با زاویه مرکزی 90° از جنس فولاد Ck20



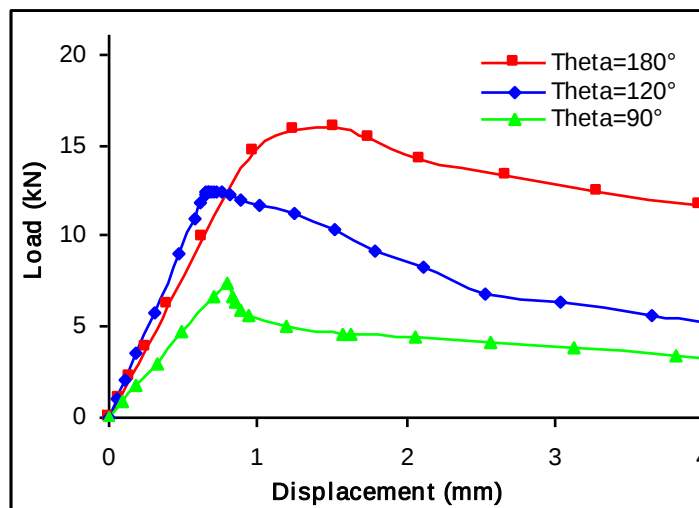
شکل ۲-۱۰- نمودار بار- جابجائی برای زاویه های مختلف پانل های استوانه ای برای طول 100 از جنس فولاد Ck20

۲-۹-۲- نتایج تحلیل عددی پانل 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 mm ۶۰ میلیمتر به ضخامت mm ۰/۹ در نمودار شکل (۲-۱۱) و (۲-۱۲) نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش طول پانل بار کمانش کاهش می یابد.



شکل ۲-۱۱- نمودار بار- جابجائی برای طول های مختلف پانل استوانه ای با زاویه مرکزی 90° از جنس فولاد St37



شکل ۲-۱۲- نمودار بار - جابجائی برای زاویه های مختلف پانل های استوانه ای برای طول 100 از جنس فولاد St37

۲-۱۰- نتایج تحلیل عددی پانل های استوانه ای دارای ترک تحت بار فشاری

محوری

در این بخش نتایج تحلیل کمانش پانل های استوانه ای دارای ترک تحت بار فشاری محوری برای نمونه هایی از جنس فولاد Ck20، با سه طول مختلف ($L=100, 150, 250$ mm) و قطر ($D = 42$ mm) ارائه شده است. پانل های استوانه ای در این تحلیل دارای زوایای مرکزی ($\theta = 90^\circ, 120^\circ, 180^\circ$) است و هدف از انجام این تحلیل ها بررسی تأثیر موقعیت، ابعاد و زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پانل 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 (۲-۱۳) صدق کند و از ماده مشابهی تشکیل شده باشند، صادق است.

$$D/t = 21 \quad L / D = 2.381, 3.571, 5.952 \quad (2-1)$$

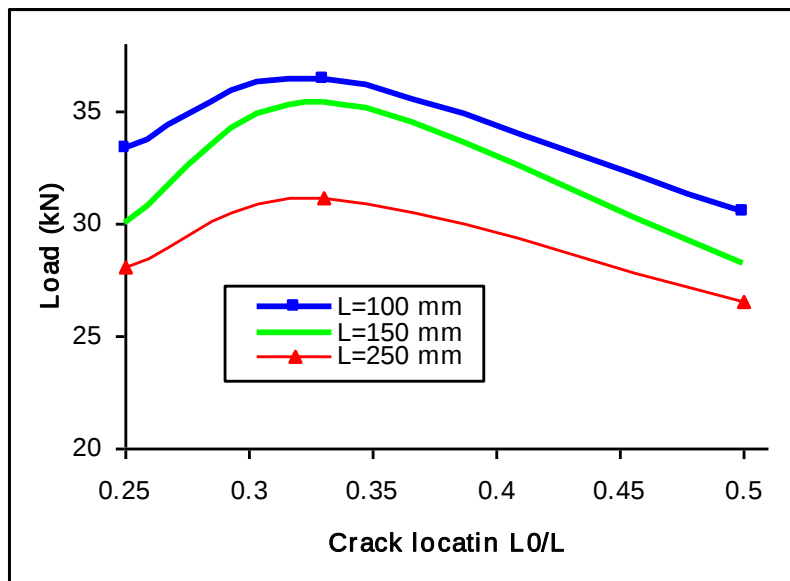
همچنین در مورد نمونه‌های دارای قطر ۵۰ میلیمتر، نتایج بدست آمده، برای کلیه نمونه‌هایی با هندسه مشابه، که در رابطه (۲-۱۴) صدق کنند و از ماده مشابهی تشکیل شده باشند، صادق است.

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

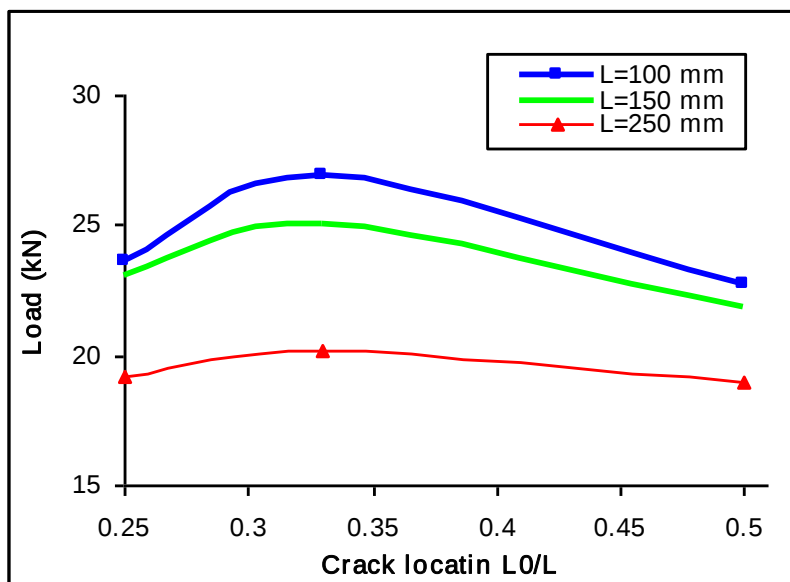
۲-۱۰-۱- بررسی تأثیر تغییر موقعیت ترک بر روی رفتار کمانش پانل‌های استوانه‌ای

برای بررسی تأثیر موقعیت ترک روی رفتار کمانش پانل‌های استوانه‌ای، یک ترک که نسبت طول آن به محیط سطح مقطع پانل برابر $\frac{a}{R\theta} = 0.5$ و زاویه ترک $\alpha = 45^\circ$ در فاصله‌هایی برابر با $L_0 = 0.5L$ ، $0.25L$ ، $0.33L$ از لبه پایینی استوانه روی نمونه‌ها ایجاد شد. البته ابعاد ترک برای تعدادی از نمونه‌ها، به ناچار و به دلیل هماهنگی با نمونه‌های آزمایش، مقداری متغیر است که در نتیجه‌گیری کلی تأثیری ندارد.

نتایج حاصل از تحلیل‌ها با المان غیر خطی در نمودارهای (۲-۱۳) و (۲-۱۴) ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تغییر موقعیت ترک بر بار کمانش تأثیر می‌گذارد. منحنی‌های شکل (۲-۱۳) و (۲-۱۴) بار کمانش (حاصل از تحلیل نمونه‌ها با المان‌های غیر خطی)، برحسب موقعیت ترک برای پانل‌های استوانه‌ای با طول‌های مختلف و قطرهای متفاوت را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۳- منحنی های بار- موقعیت ترک $D42 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5$



شکل ۲-۱۴- منحنی های بار- موقعیت ترک $D42 - \theta 120^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5$

شکل های (۲-۱۳) و (۲-۱۴) به وضوح نشان می دهند که با تغییر موقعیت ترک از میانه پانل به طرف لبه های پانل، بار کمانش ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که پانل های با طول کوتاه تر، نسبت به تغییر موقعیت ترک حساس ترند. به عنوان مثال برای پانل های با طول ۱۰۰ میلی متر با تغییر موقعیت ترک، از میانه پانل به فاصله ۳۳ درصدی طول پانل، بار کمانش حدود ۱۱ درصد افزایش می یابد؛ در حالی که برای پانل های با طول ۲۵۰ میلی متر با تغییر موقعیت ترک افزایش

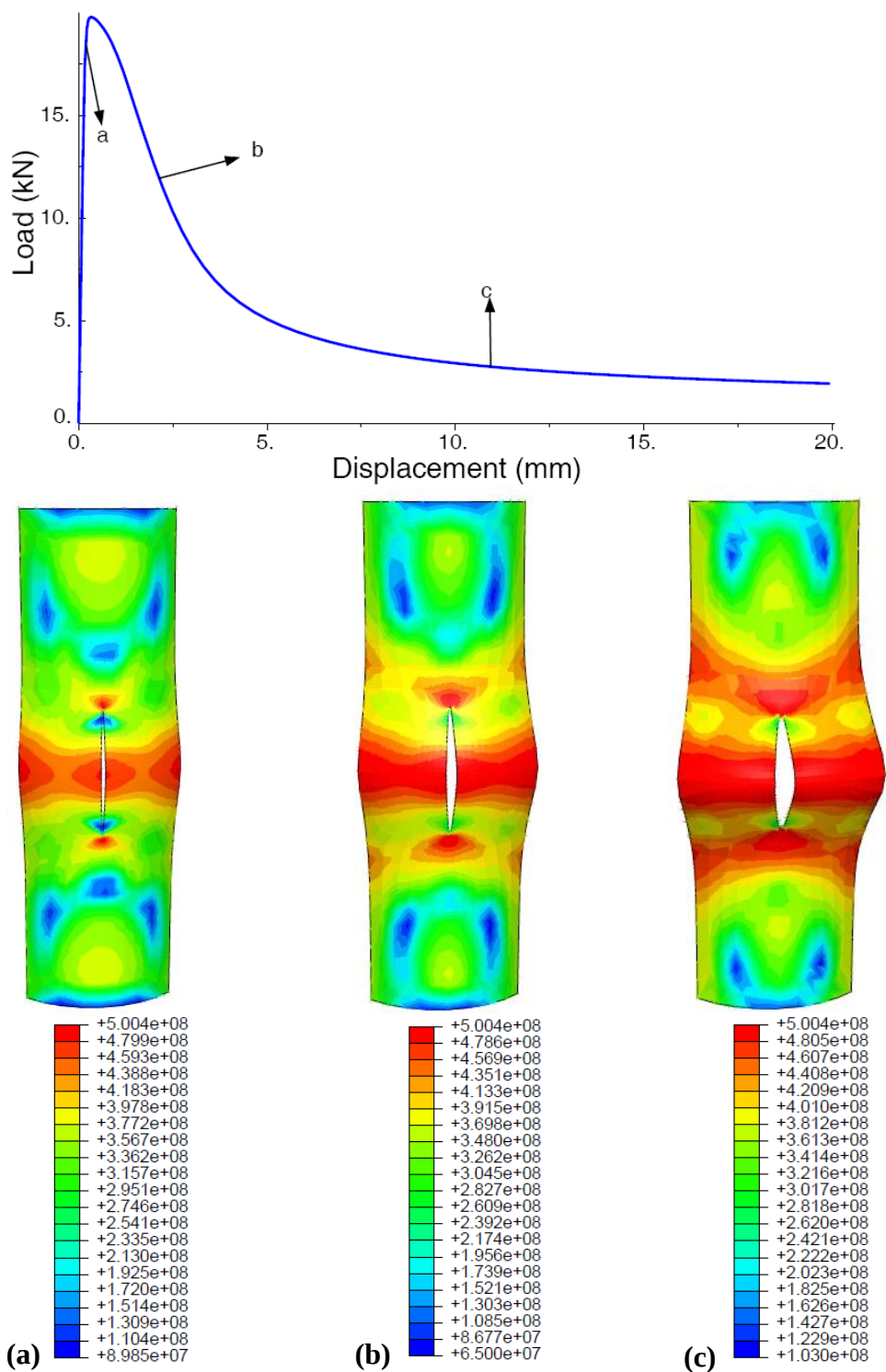
در بار کمانش تنها در حدود $3/5$ درصد بار کمانش افزایش می یابد. همان طور که از شکل های (۲-۱۳) و (۲-۱۴) مشخص است، با تغییر موقعیت ترک به 25 درصدی طول پانل دوباره بار بحرانی کمانش افت می کند ولی مقدار آن از بار کمانش پانل وقتی که ترک در وسط پانل قرار دارد بیشتر است. واضح است که با افزایش طول پانل های استوانه ای، برای ترک با موقعیت یکسان، بار کمانش کاهش می یابد و نیز پانل هایی که دارای قطر بیشتری هستند، بار کمانش بیشتری دارند.

منحنی های بار- جابجایی، برای چند نمونه در شکل های (۲-۱۵) تا (۲-۱۷) نشان داده شده است. این منحنی ها مربوط به تحلیل های اجزای محدود با المان خطی S4R است. این المانها در مقایسه با سایر المانها ناحیه ی پس کمانش را بهتر نشان می دهند. از منحنی های بار- جابجایی مشاهده می شود با ایجاد ترک در پانل، بار کمانش پانل افت چشمگیری پیدا می کند.

در ادامه برای سه نمونه با نسبت های $L/D = 5.676$ 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 $L_0/L = 0.33$) منحنی های بار- جابجایی و نمای ایزومتریک پانل، همراه با کانتورهای تنش ون میز به ترتیب، در اشکال (۲-۱۵) تا (۲-۱۷) نشان داده شده است. مشاهده می شود که قبل از رسیدن بار به مقدار بحرانی، تنش در بیشتر نواحی پانل غیر از نواحی اطراف ترک، بطور یکنواخت توزیع شده و با افزایش بار، افزایش می یابد. کانتورهای تنش برای نمونه دارای ترک در میانه پانل کاملاً متقارن است. ناحیه جلویی پانل به علت وجود ترک، تنش کمتری را تحمل می کند (اشکال (۲-۱۵)، (۲-۱۶) و (۲-۱۷)) و تا رسیدن به بار بحرانی وسعت این نواحی افزایش می یابد. با این وجود، تنش در نواحی اطراف ترک و در جهت محیطی به سرعت بالا رفته بطوریکه این نواحی قبل از رسیدن پانل به حالت کمانش، تسلیم می شوند (اشکال (۲-۱۵)، (۲-۱۶) و (۲-۱۷)). با افزایش بار وسعت این نواحی در جهت محیط پانل، بیشتر شده و در نهایت پانل کمانش می کند. همانطور که پیداست، بعد از کمانش پانل، تنش در قسمت های

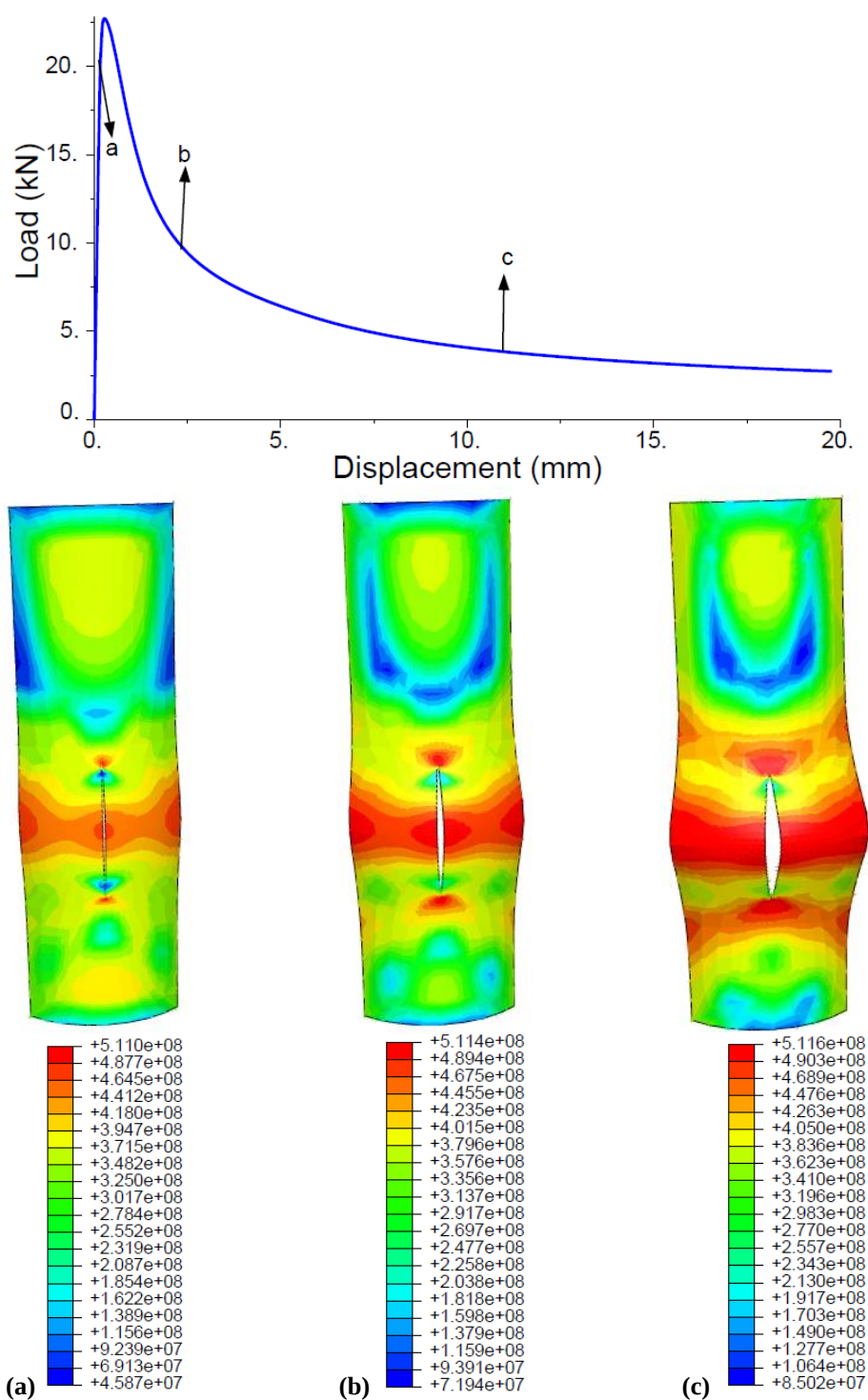
میانی پانل و اطراف ترک بالا رفته و وسعت نواحی پلاستیک شده افزایش می یابد. در عوض تنش در دو لبه پانل شروع به کم شدن می کند.

دلیل اینگونه توزیع تنش در پانل این است که چون در ابتدا پانل تحت فشار محوری قرار دارد، با افزایش نیروی محوری تنش در پانل بالا می رود؛ ولی نواحی اطراف ترک نمی توانند نیروی زیادی را تحمل کنند و تنش در این نواحی افزایش چندانی نشان نمی دهد. بعد از کمانش، بار فشاری محوری، افت پیدا می کند و پانل کم کم دچار خمش کلی می شود. بنابراین، تنش در لبه ها که کمتر تحت تأثیر خمش قرار دارند کاهش ولی در نواحی اطراف ترک افزایش می یابد. مشاهده می شود کانتورهای تنش در حالت کمانش و قبل از آن در نواحی بیشتری از پانل یکنواخت هستند و تمام نقاط پانل، بجز اطراف ترک، تنش یکسانی را تحمل می کنند که این باعث می شود حالت پانل، به پانلی بدون ترک نزدیکتر شود و بار کمانش افزایش یابد. همچنین ملاحظه می شود که کمانش به صورت موضعی و در لبه های ترک اتفاق می افتد.



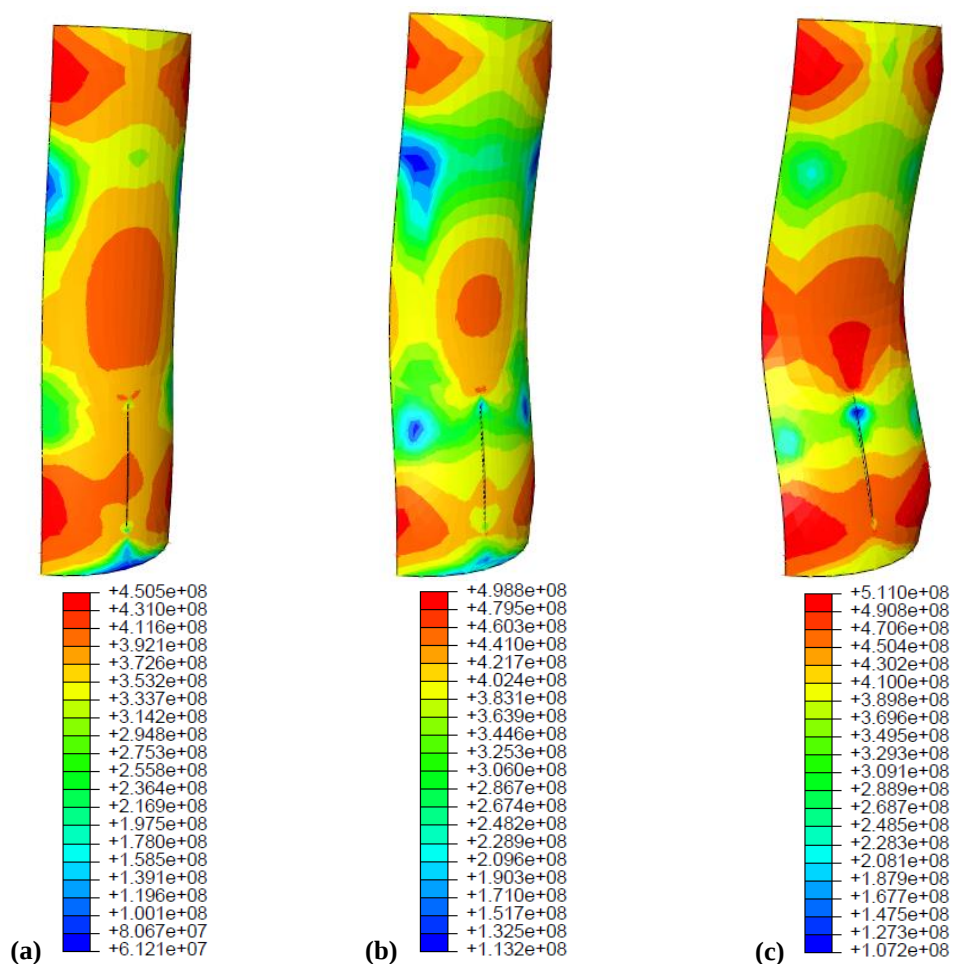
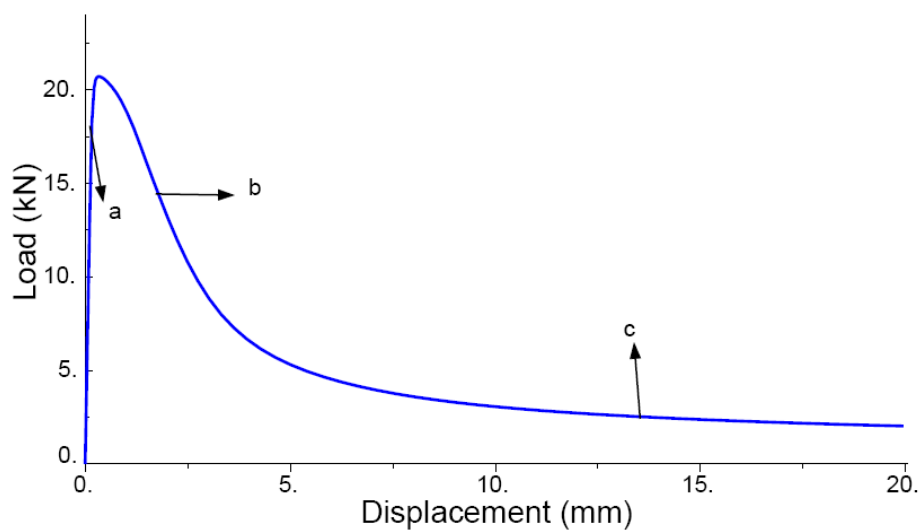
شکل ۲-۱۵- منحنی های بار- جابجایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه

$D42 - L150 - \theta 120^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.7 - C0.5$



شکل ۲-۱۶- منحنی های بار - جابجایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه

$D42 - L150 - \theta 120^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.7 - C0.33$



شکل ۲-۱۷- منحنی های بار- جابجایی، کانتورهای تنش ون میزز برای نمونه

$D42 - L150 - \theta 120^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.7 - C0.25$

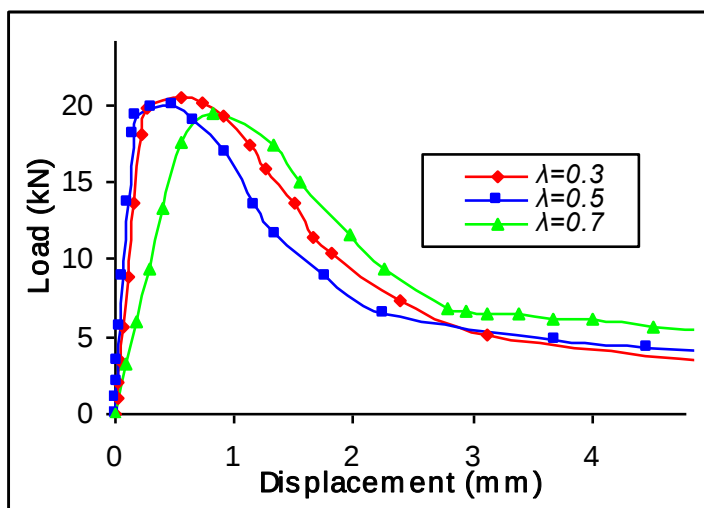
با مقایسه شکل های (۲-۱۵)، (۲-۱۶) و (۲-۱۷) می توان نتیجه گرفت که با کاهش نسبت L_0/L ، توزیع تنش چه قبل و چه بعد از کمانش یکنواخت تر می شود و در واقع به جز در نواحی اطراف ترک، به توزیع تنش پانل بدون ترک نزدیک می شود. به عبارت دیگر نواحی بیشتری از پانل بار فشاری را تحمل می کنند. این می تواند دلیل افزایش بار کمانش با افزایش نسبت L_0/L باشد. همانطور که دیده می شود، کمانش به صورت موضعی^۱ اتفاق می افتد و سپس پانل دچار خمش کلی می شود.

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

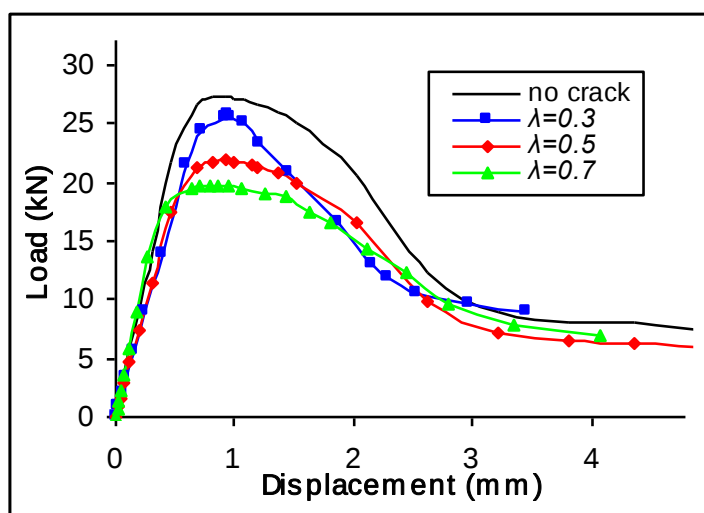
برای بررسی تأثیر تغییر طول ترک، روی بار کمانش پانل های استوانه ای، ترک هائی با نسبت طولهای مختلف در پانل ها ایجاد و تغییرات بار کمانش، بررسی شد. نتایج تحلیل ها در جدول (۲-۱) ارائه شده است. همچنین منحنی های بار کمانش (حاصل از تحلیل نمونه ها با المانهای غیر خطی)، در شکل (۲-۱۸) نشان داده شده است.

شکل (۲-۱۸) نشان می دهد که با افزایش طول ترک، بار کمانش کاهش می یابد. این کاهش در بار کمانش برای پانل با طول های بزرگتر بیشتر است. با توجه به نتایج جدول (۲-۱) تغییرات بار کمانش با افزایش طول ترک از $\lambda = 0.3$ تا $\lambda = 0.7$ برای پانل های بلند ($L=250$)، بیشتر از پانل های کوتاه ($L=100$) است. بنابراین مشاهده می شود که پانل های بلندتر، نسبت به تغییرات طول ترک حساس ترند. همچنین واضح است که پانل های دارای طول کمتر و دارای ترک مشابه، مقاومت بیشتری در برابر کمانش از خود نشان می دهند.

^۱ Local



(a)



(b)

شکل ۲-۱۸- منحنی های بار- جابجایی پانل ترک دار برای طول ترک های مختلف
 (a) $L100 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - C0.5$, (b) $L150 - \theta 120^\circ - \alpha 45^\circ - C0.5$

منحنی بار- جابجایی برای نمونه های دارای طول ترک کوتاه، کاملاً مشابهند و اختلاف ناچیزی دارند. اما اختلاف این منحنی ها با منحنی مربوط به پانل بلند زیاد است. در واقع با ایجاد ترک مقاومت در برابر کمناش افت زیادی پیدا می کند.

بار کمانش عددی (kN)		موقعیت ترک (L0/L)	نسبت طول ترک	عنوان نمونه
S8R5المان	S4Rالمان			
21.21	21.32	---	---	L100-090-no crack
20.24	20.74	0.5	0.3	L100-090- α 0- λ 0.3-c0.5
20.14	20.34	0.5	0.5	L100-090- α 0- λ 0.5-c0.5
19.98	20.13	0.5	0.7	L100-090- α 0- λ 0.7-c0.5
17.45	17.90	0.5	0.7	L100-090- α 45- λ 0.7-c0.5
19.98	20.47	0.5	0.3	L100-090- α 90- λ 0.3-c0.5
19.77	19.98	0.5	0.5	L100-090- α 90- λ 0.5-c0.5
19.54	19.40	0.5	0.7	L100-090- α 90- λ 0.7-c0.5
30.45	31.02	---	---	L100-0120-no crack
27.86	30.38	0.5	0.4	L100-0120- α 0- λ 0.4-c0.5
44.57	45.60	---	---	L100-0180-no crack
43.21	45.02	0.5	0.3	L100-0180- α 0- λ 0.3-c0.5
41.98	43.80	0.5	0.4	L100-0180- α 0- λ 0.4-c0.5
32.02	31.95	0.5	0.5	L100-0180- α 45- λ 0.5-c0.5
19.77	20.02	---	---	L150-090-no crack
18.90	19.22	0.5	0.3	L150-090- α 90- λ 0.3-c0.5
26.04	27.28	---	---	L150-0120-no crack
23.45	23.11	0.5	0.5	L150-0120- α 0- λ 0.5-c0.5
20.87	21.83	0.5	0.5	L150-0120- α 45- λ 0.5-c0.5
22.88	22.66	0.5	0.5	L150-0120- α 90- λ 0.5-c0.5
44.87	47.02	---	---	L150-0180-no crack
44.04	45.85	0.5	0.3	L150-0180- α 0- λ 0.3-c0.5
29.33	29.41	0.5	0.5	L150-0180- α 45- λ 0.5-c0.5
34.41	35.42	0.33	0.5	L150-0180- α 45- λ 0.5-c0.33
30.14	30.03	0.25	0.5	L150-0180- α 45- λ 0.5-c0.25
16.03	16.30	---	---	L250-090-no crack
10.22	10.32	0.5	0.3	L250-090- α 90- λ 0.3-c0.5
8.12	8.52	0.5	0.4	L250-090- α 90- λ 0.4-c0.5
44.25	45.13	---	---	L250-0180-no crack
40.14	41.04	0.5	0.3	L250-0180- α 0- λ 0.3-c0.5
35.99	36.96	0.5	0.4	L250-0180- α 0- λ 0.4-c0.5

همانند قبل می توان مشاهده کرد که شیب منحنی بار- جابجایی برای تمامی نمونه های دارای ترک برابر است. 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.

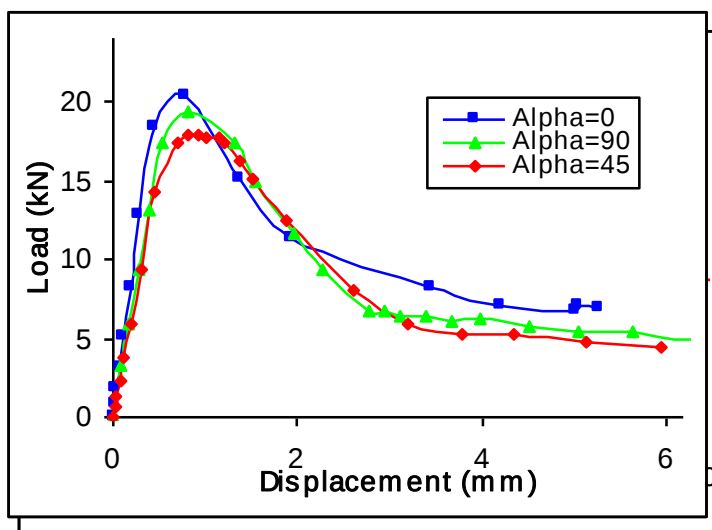
۳-۱۰-۲- بررسی تأثیر تغییر زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پانل های استوانه ای

برای بررسی نحوه تغییرات بار کمانش با تغییرات زاویه ترک، در پانل 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 (۲-۱۹) و (۲-۲۰) نشان داده شده است.

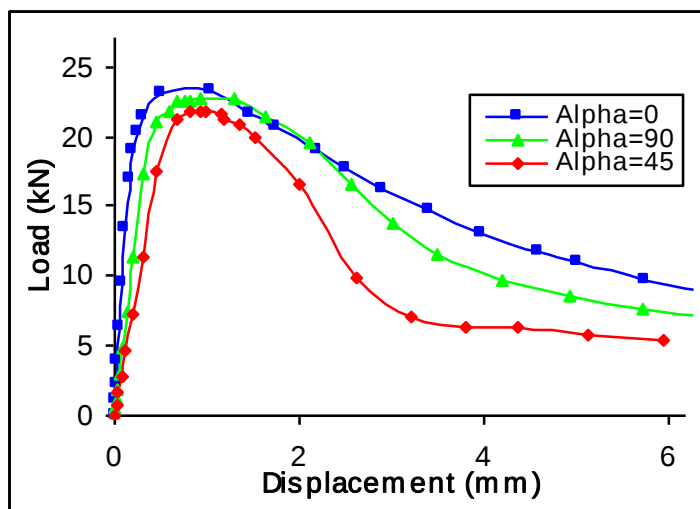
ترک افقی ($\alpha=0^\circ$) تأثیر بسیار کمی روی کاهش بار کمانش دارد. زیرا بعد از اینکه پانل استوانه ای تحت بارگذاری قرار می گیرد، دو لبه ترک بر روی هم قرار می گیرند و رفتاری تقریباً مشابه پانل کامل و بدون ترک را از خود نشان می دهد. افزایش نسبت طول ترک به محیط λ ، از $\lambda = 0.3$ تا $\lambda = 0.5$ هم تأثیر بسیار ناچیزی بر کاهش بار کمانش دارد.

ترک با زاویه ($\alpha=45^\circ$)، بیشترین اثر را بر کاهش بار بحرانی کمانش دارد و در نسبت طول ترک $\lambda = 0.5$ ، بار کمانش برای پانل به طول $L=150 \text{ mm}$ و زاویه مرکزی $\theta = 180^\circ$ ، به ۳۴٪ بار کمانش پانل بدون ترک می رسد. این مقدار برای طولهای $L=250, 100 \text{ mm}$ به ترتیب ۲۸٪ و ۴۹٪ بار کمانش پانل بدون ترک با همان مشخصات است.

در ترک ($\alpha=90^\circ$) در حین بارگذاری هیچ بر هم کنشی بین دو لبه ترک بوجود نمی آید و لبه های ترک کاملاً از هم باز می شوند. 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 پانل حساسیت بار بحرانی کمانش نسبت به زاویه ترک زیاد می شود و بار بحرانی کمانش در ترک با زاویه ($\alpha=45^\circ$) کاهش شدیدتری دارد.



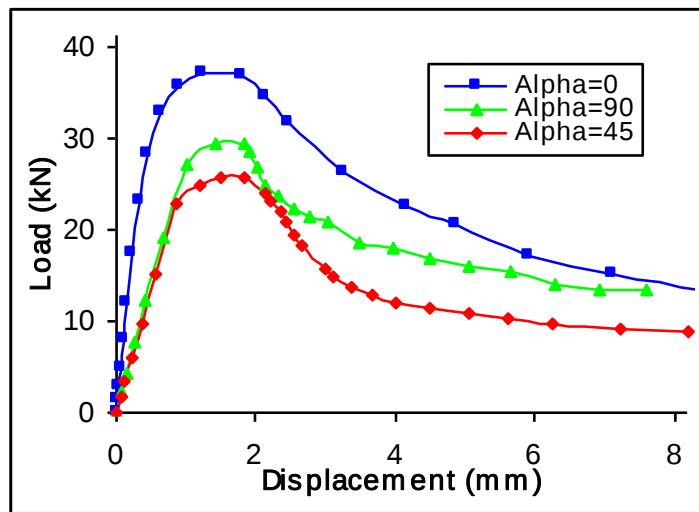
(a)



(b)

شکل ۲-۱۹- منحنی های بار - جابجایی پانل ترک دار برای زاویه ترک های مختلف
 (a) $L100 - Perfect - \lambda 0.5$ (b) $L150 - \theta 120^\circ - \lambda 0.5$

(a)



(b)

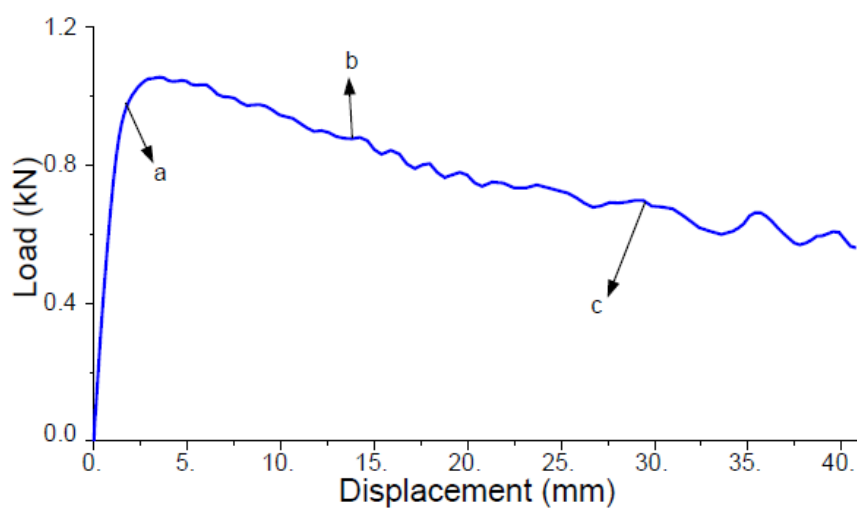
شکل ۲-۲۰- منحنی های بار - جابجایی پانل ترک دار برای زاویه ترک های مختلف
 (a) $L100 - \theta 90^\circ - \lambda 0.7$ (b) $L250 - \theta 180^\circ - \lambda 0.5$

همچنین برای پانل های استوانه ای بلند ($L=250$)، متوسط ($L=150$) و کوتاه ($L=100$)، بار کمانش نسبت به حالتی که زاویه مرکزی پانل کمتر است تغییر کمتری را از خود نشان می دهد. بنابراین پانل های بلندتر و دارای زاویه مرکزی بزرگتر، نسبت به تغییرات زاویه ترک حساسیت بیشتری نشان می دهند.

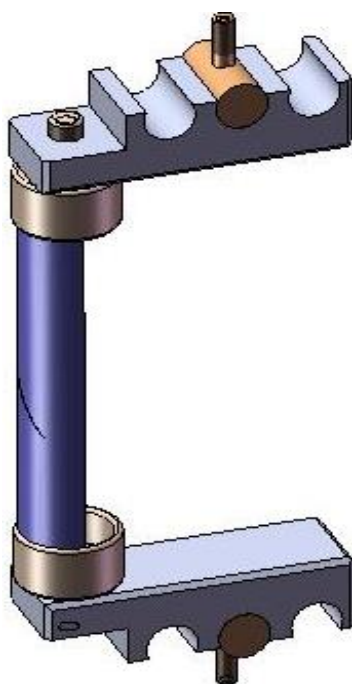
از نمودارهای بار - جابجایی نشان داده شده مشاهده می شود که شیب تمام نمودارها تقریباً یکسان است. بنابراین می توان گفت که ایجاد ترک روی سفتی نمونه ها قبل از کمانش تأثیری ندارد.

۲-۱۱- نتایج تحلیل عددی پانل های استوانه ای ترک دار تحت بار خارج از مرکز

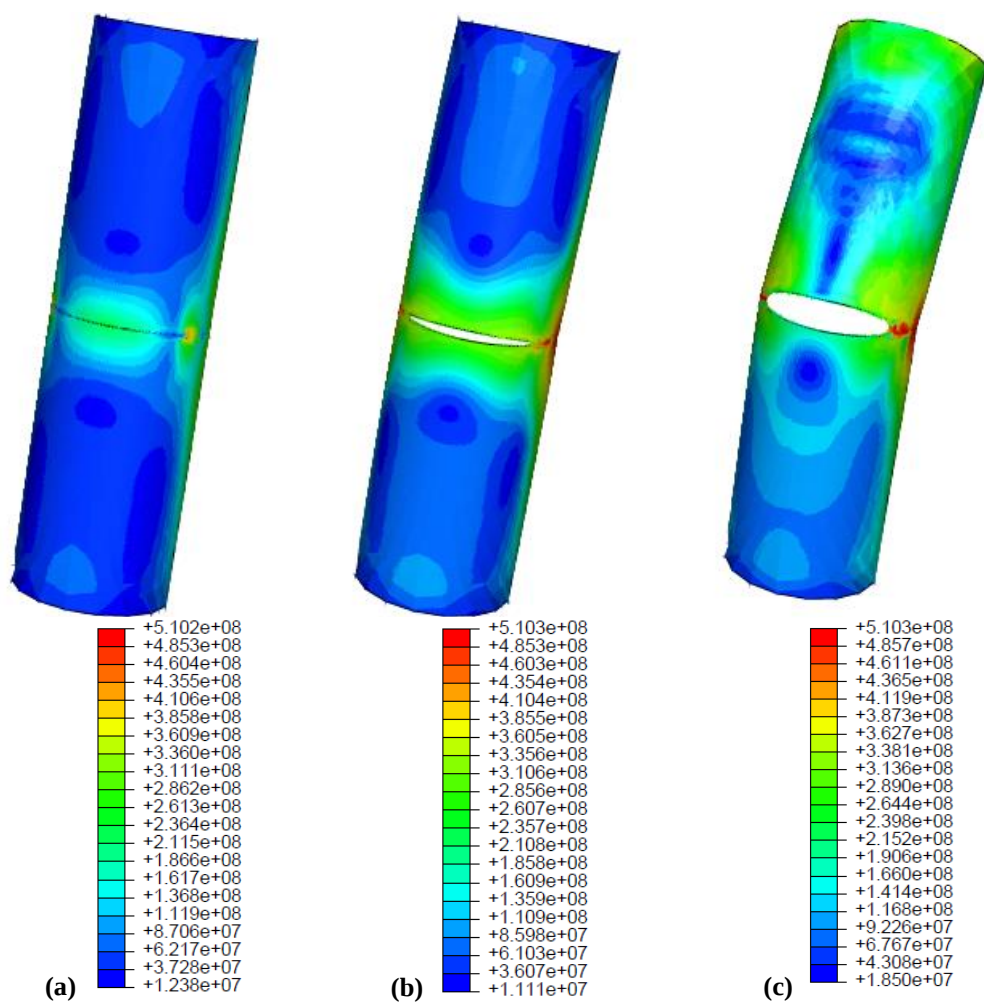
در این بخش نتایج تحلیل عددی پانل های استوانه ای دارای ترک که تحت بار خارج از مرکز قرار دارد ارائه شده است. برای ایجاد شرایط بار گذاری خارج از مرکز یک نقطه به عنوان نقطه مرجع و در خارج از صفحه پانل تعریف شده است (شکل (۲-۲۱)). پانل به گونه ای قرار گرفته که ترک بیشترین فاصله



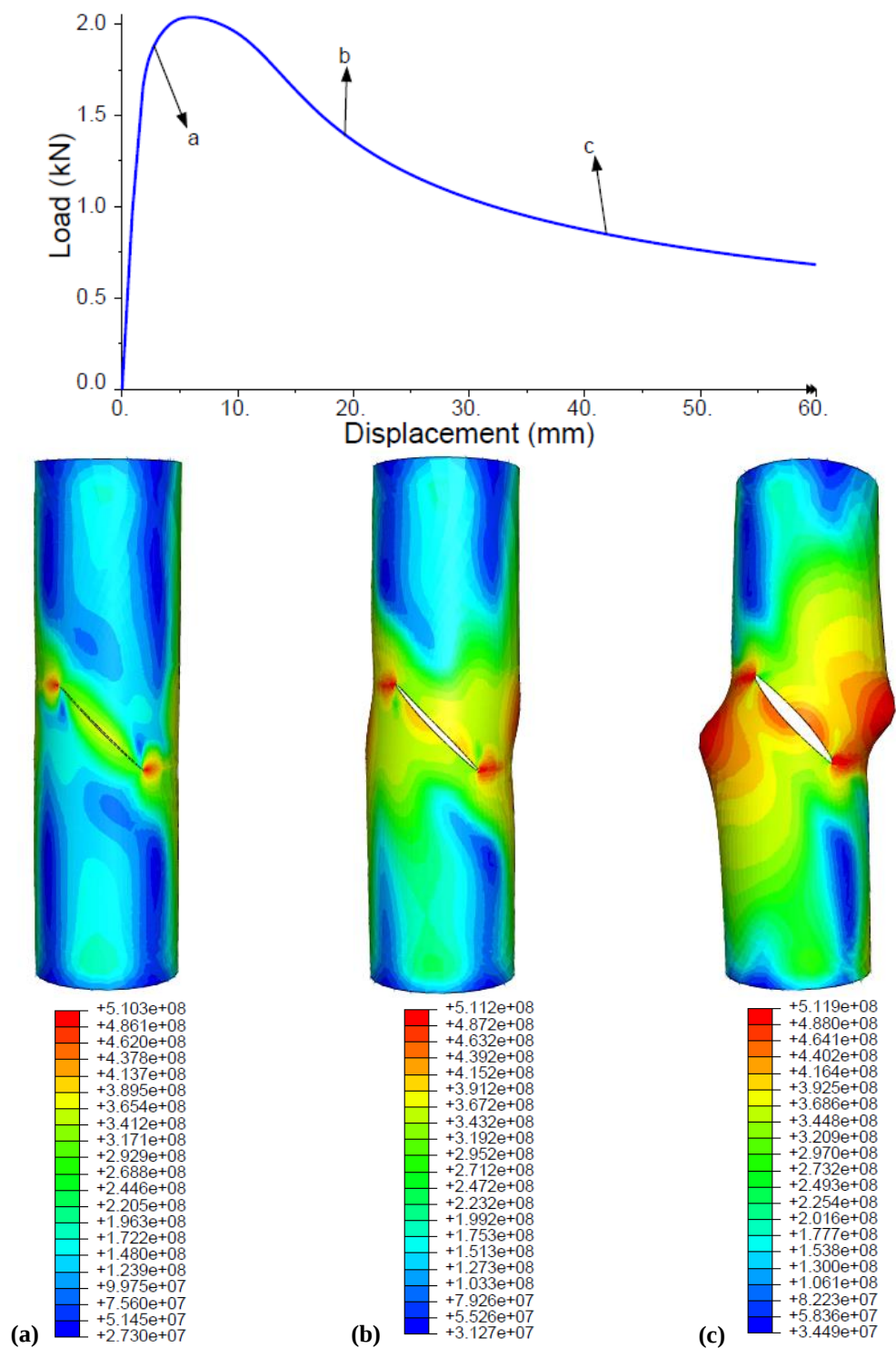
از مرکز لولا داشته باشد. منحنی های بار- جابجایی و تغییر شکل پانل حین بارگذاری برای نمونه های تحلیل شده در شکل های (۲-۲۲) تا (۲-۲۴) نشان داده شده است.



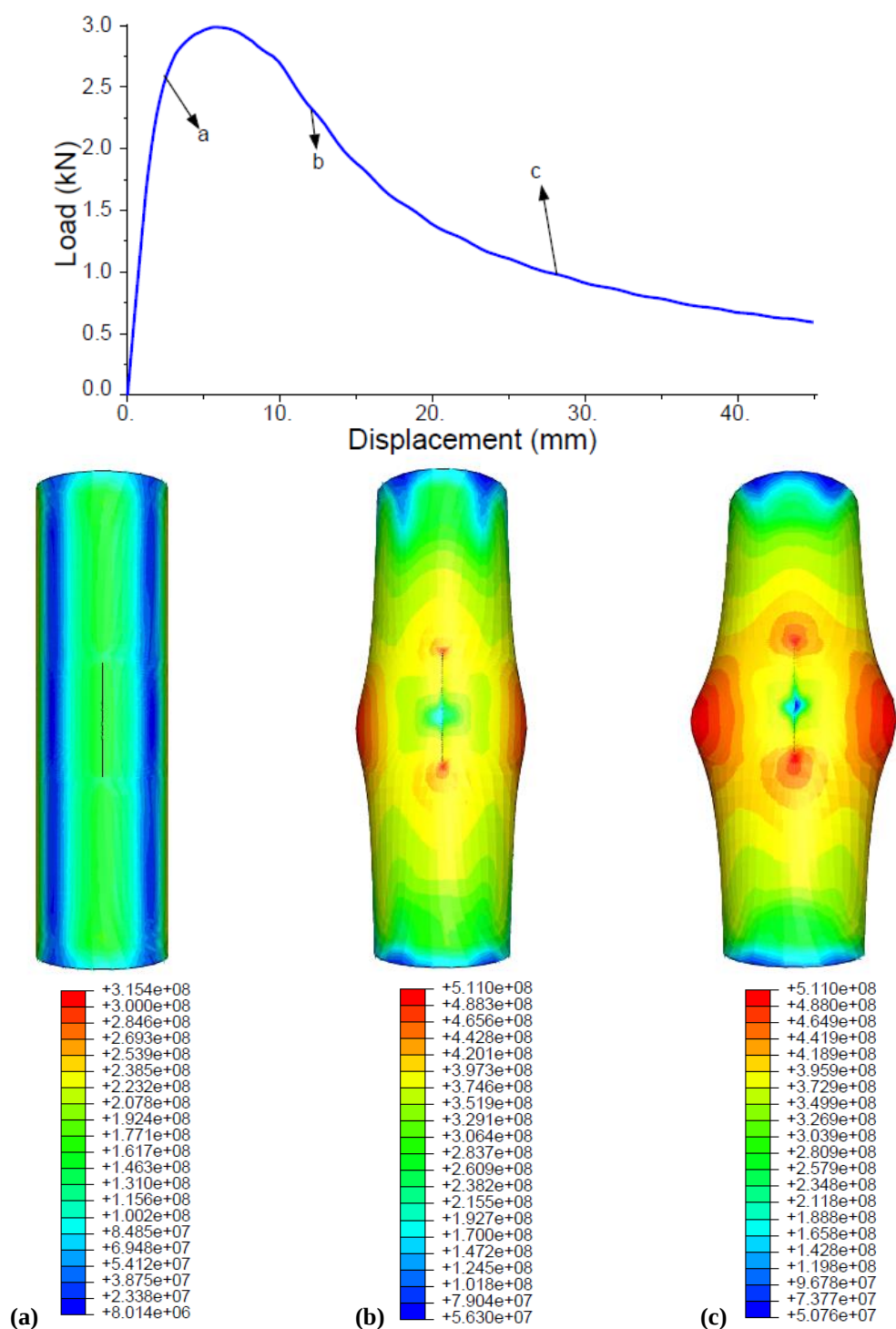
شکل ۲-۲۱- شرایط بار گذاری خارج از مرکز



شکل ۲-۲۲- منحنی های بار- جابجایی، برای نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.5$



شکل ۲-۲۳- منحنی های بار-جابجایی، برای نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5$



شکل ۲-۲۴- منحنی های بار - جابجایی، برای نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.5$

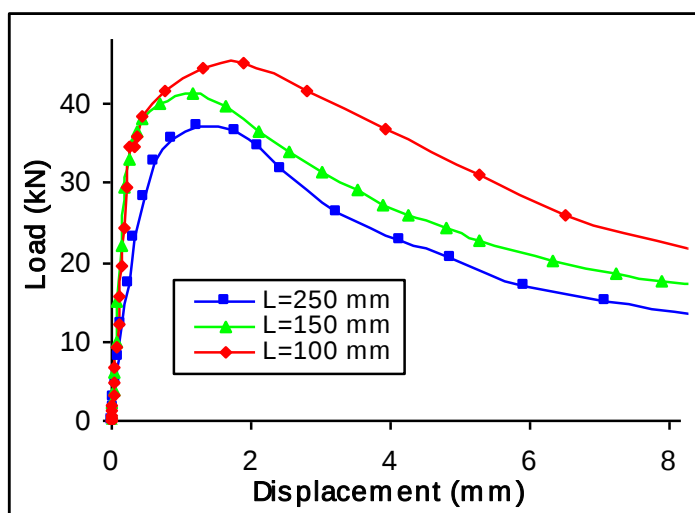
مشاهده می شود که خروج از مرکزی به اندازه ۵۰ میلی متر باعث کاهش شدید بار بحرانی می شود

بطور مثال اگر بار کمانش نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - c 0.5$ را تحت بار محوری از جدول

(۱-۲) با بار گذاری خارج مرکز شکل (۲-۲۳) مقایسه کنیم، کاهش ۹۳ درصدی در بار کمانش دیده می شود.

۱۲-۲- اثر طول پانل بر بار بحرانی کمانش

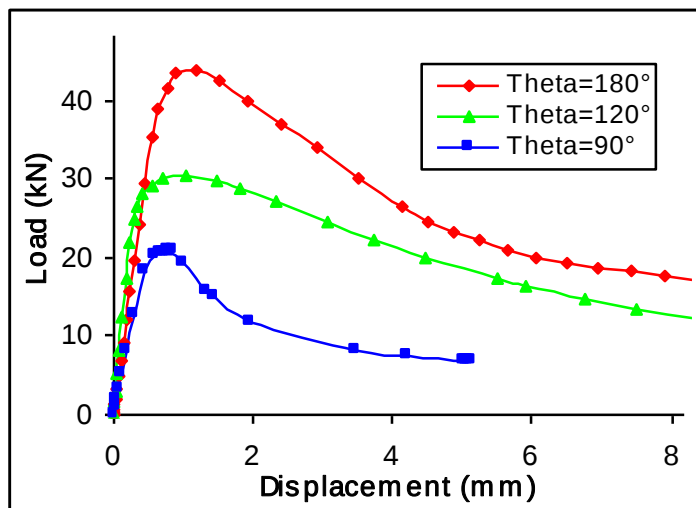
افزایش طول پانل باعث کاهش بار بحرانی کمانش می شود. تأثیر طول پانل در ترک مایل بیشتر است و شکل (۲-۲۵) نشان می دهد که افزایش طول پانل از 100 mm به 250 mm برای ترک یکسان، باعث کاهش ۱۸ درصد در بار بحرانی کمانش می شود.



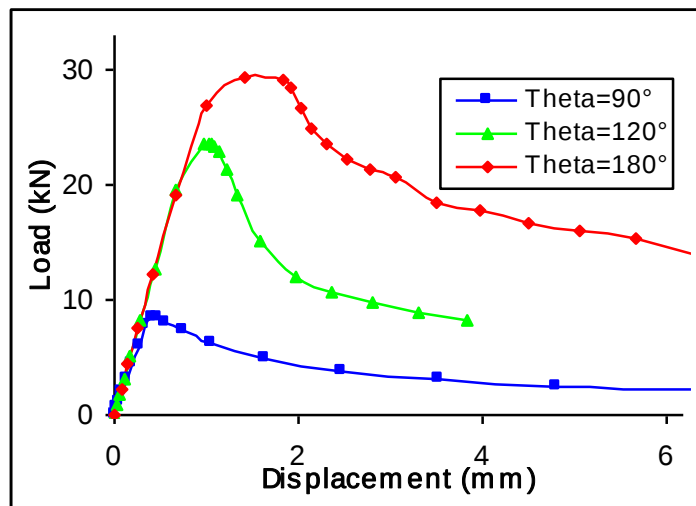
شکل ۲-۲۵- منحنی های بار-جابجایی، برای سه طول مختلف از نمونه $0.4\lambda - \alpha 0^\circ - \theta 180^\circ$

۱۳-۲- اثر زاویه پانل بر بار بحرانی کمانش

نتایج نشان می دهد که هر چه زاویه پانل بیشتر باشد، بار کمانش بحرانی آن بیشتر است. لذا زاویه، نسبت مستقیم با بار کمانش بحرانی دارد. چند نمونه پانل با طول یکسان و زاویه های مختلف، تحت بار قرار گرفت و نمودار بار- تغییر مکان آن در شکل های (۲-۲۶) و (۲-۲۷) ترسیم شد. بیشترین مقدار نیرو در نمودار، نشان دهنده بار بحرانی کمانش است.



شکل ۲-۲۶- منحنی های بار - جابجایی، برای سه زاویه مختلف از نمونه $L100 - \alpha 0^\circ - \lambda 0.3$



شکل ۲-۲۷- منحنی های بار - جابجایی، برای سه زاویه مختلف از نمونه $L250 - \alpha 90^\circ - \lambda 0.4$

۲-۱۴- جمع بندی

در این فصل به معرفی نرم افزار ABAQUS پرداخته شد، سپس با استفاده از این نرم افزار مراحل مدلسازی پانل انجام گرفت و تأثیرات مشخصات هندسی و مکانیکی مدل طراحی شده از قبیل طول و زاویه پانل، و طول، زاویه و جابجائی ترک بر بار کمانش و همچنین نوع بارگذاری محوری و خارج از مرکز نیز به صورت عددی تحلیل شد.

فصل سوم

تحلیل تجربی پانل های استوانه‌ای ترک‌دار

۳-۱- مقدمه

همانطور که گفته شد، به دلیل ناتوانی در حل معادلات کمانش برای پانل‌های دارای ترک، محققین و صنعتگران از روشهای عددی برای پیش بینی رفتار کمانش پانل‌های 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 پانل 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 انجام شد.

آزمایش کشش ساده روی نمونه‌هایی از جنس فولاد مورد نظر صورت گرفت و از یک نیروسنج با ظرفیت ۲۵ کیلونیوتن برای انجام آزمایشات استفاده شد. منحنی‌های تنش - کرنش بدست آمده در شکل‌های (۲-۱) 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	$\sigma_y = ۲۴۰ \text{ MPa}$	$\sigma_y = ۳۴۵ \text{ MPa}$
ضریب پواسون	$\nu = ۰/۳۳$	$\nu = ۰/۳۳$

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

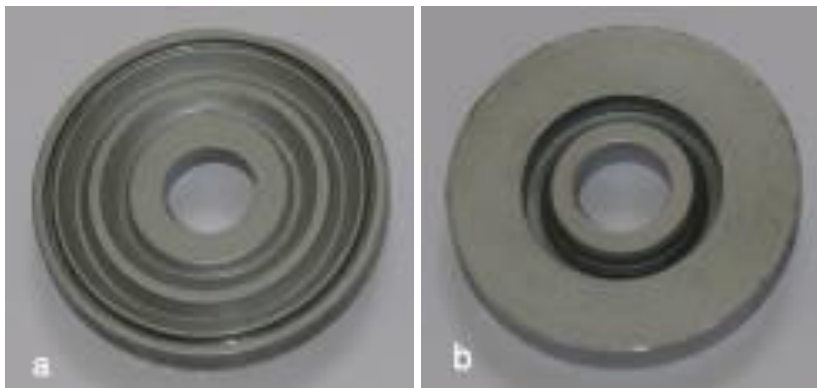
$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon_{Eng.}) \quad \sigma_{real} = \sigma_{Eng.} (1 + \varepsilon_{Eng.}) \quad (۱-۳)$$

$$\varepsilon_{pl} = \varepsilon_{real} - \frac{\sigma_{real}}{E} \quad (۲-۳)$$

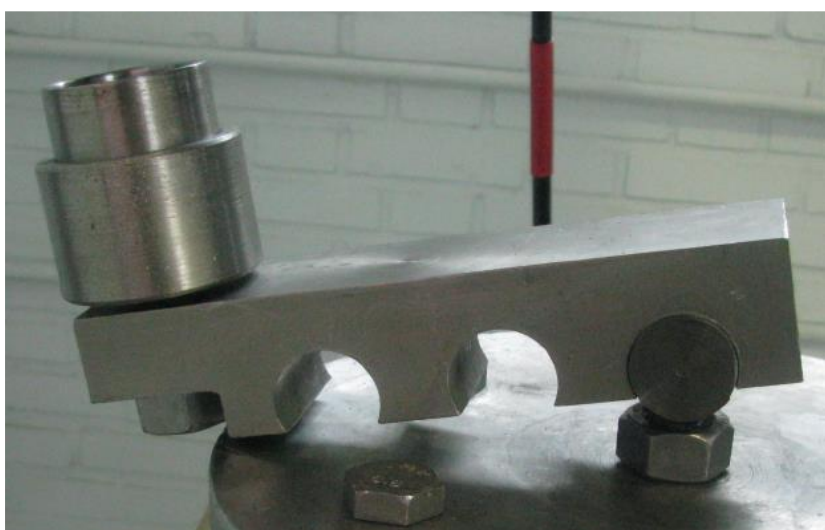
که σ_{real} ، ε_{real} تنش و کرنش واقعی و $\sigma_{Eng.}$ ، $\varepsilon_{Eng.}$ تنش و کرنش مهندسی و ε_{pl} کرنش قسمت پلاستیک می باشد.

۳-۳- نتایج تحلیل تجربی کمانش پانل 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 ترک هائی با استفاده از یک دستگاه Wire Cut در نمونه ها ایجاد شدند. دستگاه مورد استفاده و تعدادی از نمونه ها در شکل (۷-۳) نشان داده شده است. برای مقید کردن نمونه ها از فیکسچر نشان داده شده است در شکل (۱-۳) که از فولاد سخت تهیه شد، استفاده گردید. قطر داخلی این فیکسچر ۳۸ میلیمتر در نظر گرفته شده و به منظور اندازه کردن قطر داخلی فیکسچر، برای پانل های دارای قطر ۴۲ میلیمتر استفاده شد. برای ایجاد شرایط بارگذاری خارج از مرکز و مقید کردن نمونه ها از فیکسچر شکل (۲-۳) 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 پانل را ایجاد می کند.



شکل ۳-۱- 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

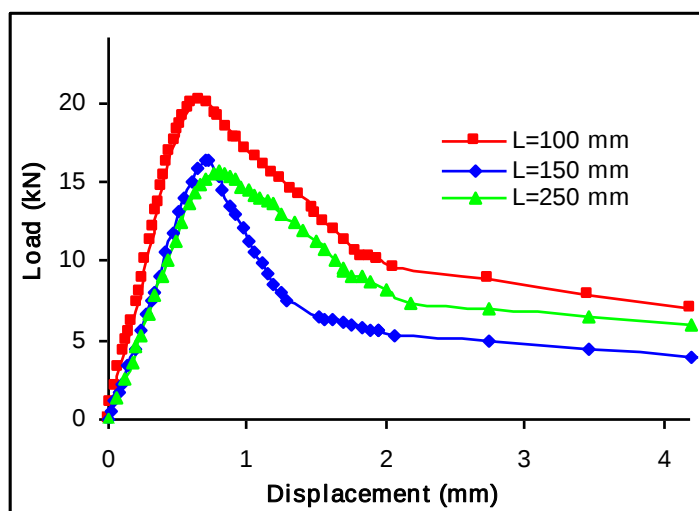
تمامی آزمایشات در حالت کنترل جابجایی انجام شد. در ادامه نتایج بدست آمده ارائه شده است.

۳-۴- نتایج تحلیل تجربی پانل‌های استوانه‌ای بدون ترک تحت بار محوری

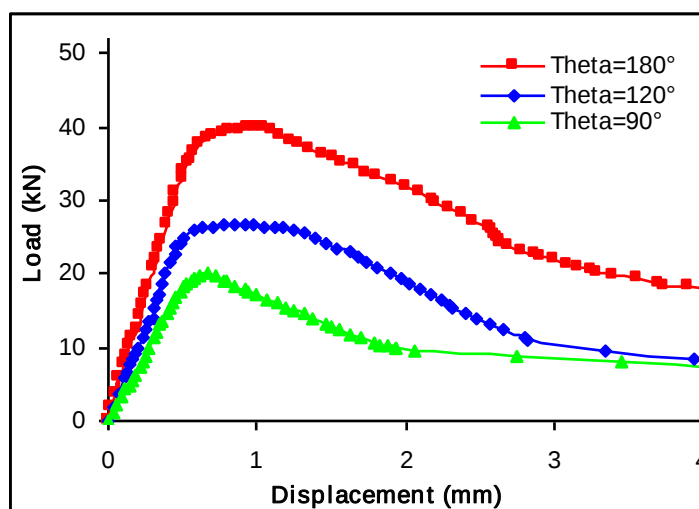
در این بخش نتایج تحلیل کمانش پانل‌های استوانه‌ای بدون ترک تحت بار فشاری محوری برای نمونه‌هایی از جنس فولاد Ck20 و St 37 با سه طول مختلف ($L=100\text{ mm}, 150\text{ mm}, 250\text{ mm}$) ارائه شده است. هدف از انجام این تحلیل‌ها بررسی تأثیر طول پانل بر روی رفتار کمانش پانل‌های استوانه‌ای جدار نازک است.

۳-۴-۱- نتایج تحلیل تجربی پانل‌های استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20

نتایج تجربی برای استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20 با سه طول ($L=100, 150, 250$ mm) با قطر ۴۲ میلی‌متر به ضخامت ۲ میلی‌متر نشان می‌دهد که افزایش طول پانل از ۱۰۰ mm به ۲۵۰ mm در شرایط یکسان، باعث کاهش ۱۹ درصد در بار بحرانی کمانش می‌شود (شکل ۳-۳) و نمودار بار-جابجایی شکل ۳-۴) برای زاویه‌های مختلف پانل‌های استوانه‌ای برای طول ۱۰۰ mm نشان می‌دهد که افزایش زاویه پانل از 90° به 180° در شرایط یکسان، باعث افزایش ۵۳ درصد در بار بحرانی کمانش می‌شود



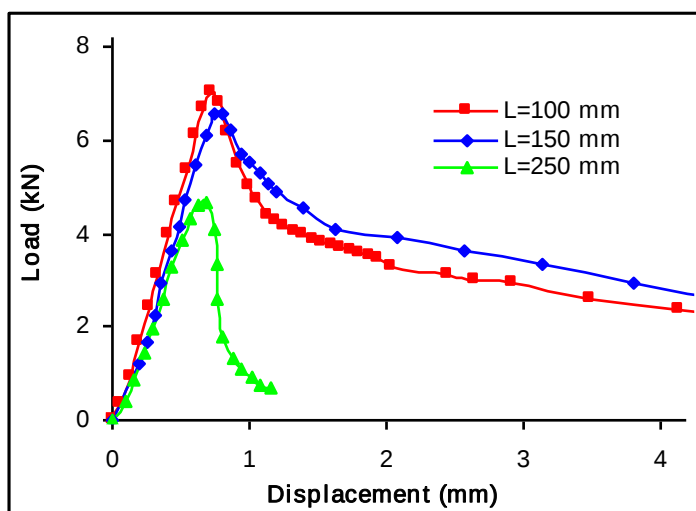
شکل ۳-۳- نمودار بار-جابجایی برای طول‌های مختلف پانل استوانه‌ای با زاویه مرکزی 90° از جنس فولاد Ck20



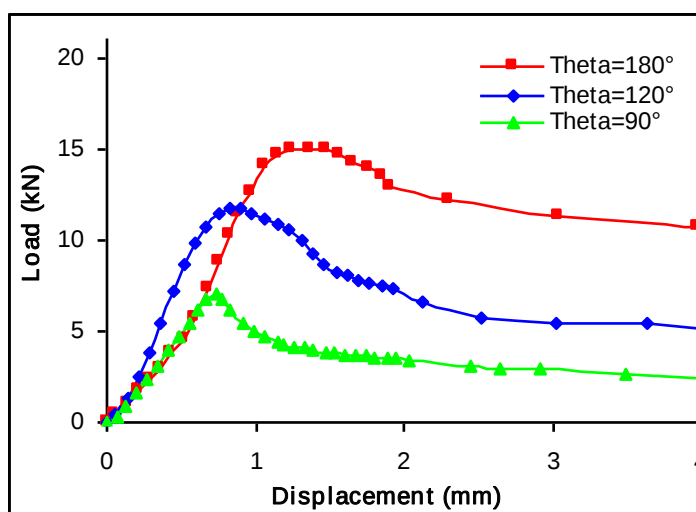
شکل ۳-۴- نمودار بار-جابجایی برای زاویه‌های مختلف پانل‌های استوانه‌ای برای طول ۱۰۰ mm از جنس فولاد Ck20

۳-۴-۲- نتایج تحلیل تجربی پانل های استوانه ای از جنس فولاد St37

نتایج تجربی برای استوانه ای از جنس فولاد St37 با سه طول (L=100, 150, 250 mm) با قطر ۶۰ میلیمتر به ضخامت ۰/۹ میلیمتر در نمودار شکل (۳-۵) نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش طول پانل بار کمانش کاهش می یابد و نمودار بار-جابجائی شکل (۳-۶) برای زاویه های مختلف پانل های استوانه ای برای طول 100 mm نشان می دهد که افزایش زاویه پانل از 90° به 180° در شرایط یکسان، باعث افزایش ۵۵ درصد در بار بحرانی کمانش می شود



شکل ۳-۵- نمودار بار-جابجائی برای طول های مختلف پانل استوانه ای با زاویه مرکزی 90° از جنس فولاد St37



شکل ۳-۶- نمودار بار-جابجائی برای زاویه های مختلف پانل های استوانه ای برای طول 100 از جنس فولاد St37

۳-۵- نتایج تحلیل تجربی پانل استوانه‌ای ترک دار تحت بار محوری

در این بخش نتایج تحلیل کمانش پانل استوانه‌ای ترک‌دار تحت بار فشاری محوری برای نمونه‌هایی از جنس فولاد Ck20 با طول ترک‌های مختلف و زاویه ترک متفاوت ارائه شده است. هدف از انجام این تحلیل‌ها بررسی تأثیر طول، زاویه و موقعیت ترک بر روی رفتار کمانش پانل استوانه‌ای جدار نازک است.

۳-۵-۱- بررسی تأثیر تغییر موقعیت ترک بر روی رفتار کمانش پانل‌های استوانه ای

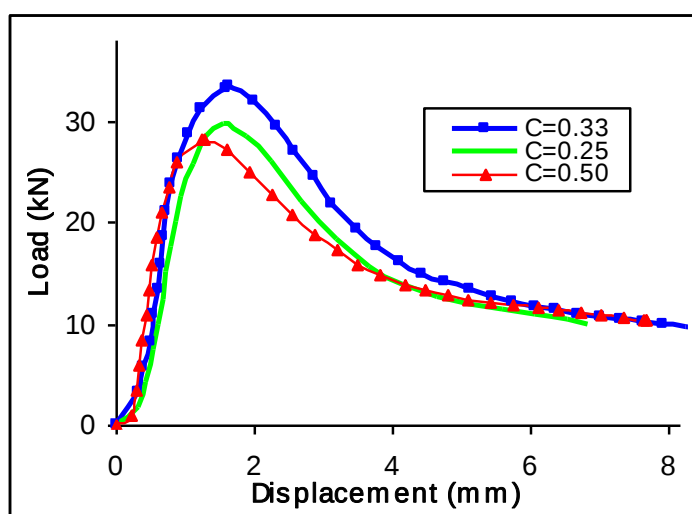
ابعاد نمونه‌های آزمایش شده، همان ابعادی هستند که در فصل پیش برای تحلیل عددی استفاده شد. فقط تعداد نمونه‌های آزمایش شده کمتر است. البته لزومی نیست که تعداد نمونه‌های بیشتری آزمایش شوند و همین تعداد آزمایش برای مقایسه و تایید نتایج بدست آمده از روش عددی کفایت می‌کند. منحنی بار کمانش برای نمونه‌هایی که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



شکل ۳-۷- تعدادی از نمونه‌های آزمایش با دستگاه INSTRON

همانطور که از تحلیل های عددی نتیجه شد، در اینجا نیز مشاهده می شود که با ایجاد ترک در پانل، بار کمانش افت زیادی پیدا می کند. همچنین مشاهده می شود که با افزایش طول ترک و نیز طول پانل مقاومت در برابر کمانش کاهش می یابد.

منحنی های بار-جابجایی برای نمونه های تجربی در شکل (۳-۸) ارائه شده است. ملاحظه می شود که تغییر موقعیت ترک از وسط پانل به سمت لبه کناری استوانه، باعث افزایش بار بحرانی کمانش می شود.

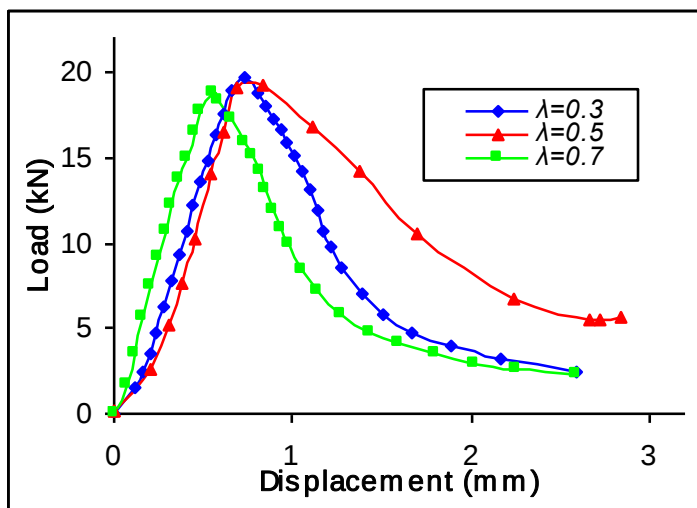


شکل ۳-۸- منحنی های بار-جابجایی برای پانل ترک دار با ترک در موقعیت های مختلف

$$D42 - L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5$$

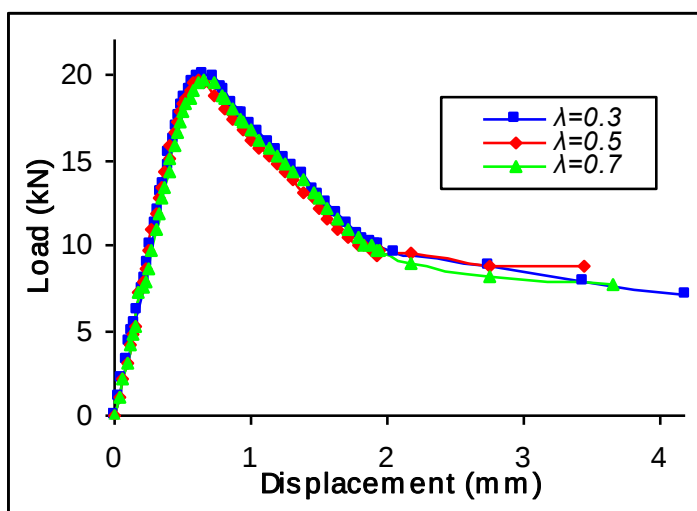
۳-۵-۲- بررسی تأثیر تغییر طول ترک بر روی رفتار کمانش پانل های استوانه ای

برای بررسی تأثیر تغییر طول ترک روی بار کمانش پانل های استوانه ای، ترک هایی با زاویه ثابت در پانل ها ایجاد شد و با تغییر طول ترک، تغییرات بار کمانش، اندازه گیری شد. منحنی های بار کمانش بر حسب جابجایی در شکل های (۳-۹) تا (۳-۱۱) نشان داده شده است.



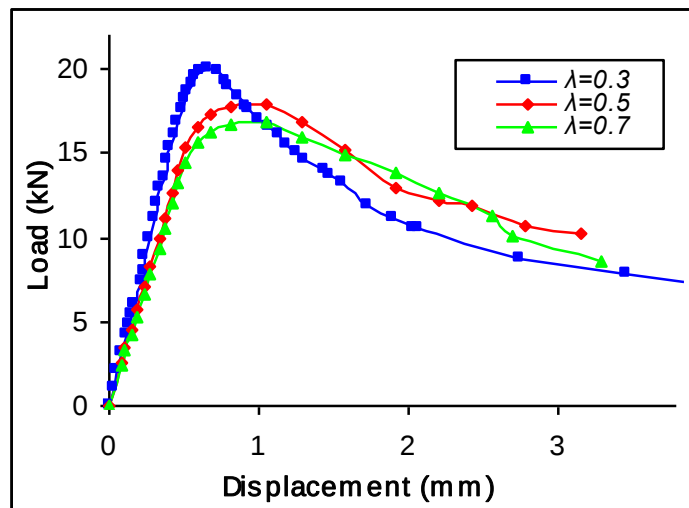
شکل ۳-۹- منحنی های بار- جابجایی برای طول ترک های مختلف نمونه

$D42 - L100 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - C0.5$



شکل ۳-۱۰- منحنی های بار- جابجایی برای طول ترک های مختلف نمونه

$D42 - L100 - \theta 90^\circ - \alpha 0^\circ - C0.5$

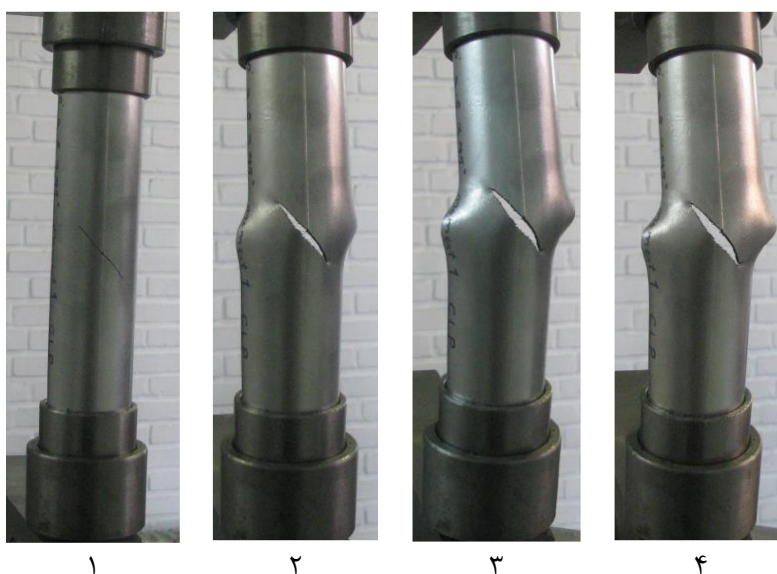


شکل ۳-۱۱- منحنی های بار - جابجایی برای طول ترک های مختلف نمونه

$$D42 - L100 - \theta 90^\circ - \alpha 45^\circ - C0.5$$

مشاهده می شود که، برای یک زاویه ثابت با افزایش طول ترک بار کمانش افت پیدا می کند. واضح است که در تحلیل های تجربی انجام شده، احتمال ایجاد خطا و کاهش دقت در نتایج وجود دارد. زیرا نمونه های استفاده شده ایده آل و بدون عیب و نقص نیستند. هم چنین با افزایش طول پانل های دارای ترک، بار کمانش این پانل ها کاهش می یابد.

به عنوان مثال، مراحل کمانش نمونه $D42 - L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$ در شکل (۳-۱۲) نشان داده شده است.



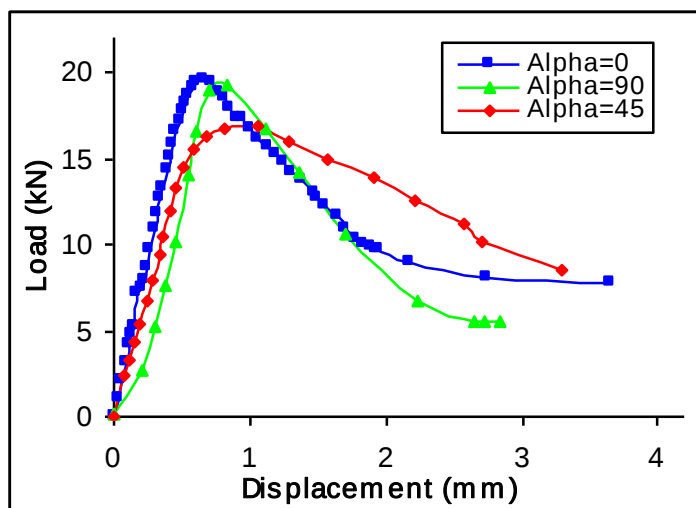
شکل ۳-۱۲- مراحل کمانش نمونه $D42 - L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$

۳-۵-۳- بررسی تأثیر تغییر زاویه ترک بر روی رفتار کمانش پانل های استوانه ای

برای بررسی تأثیر تغییر زاویه ترک روی بار کمانش پانل های استوانه ای، ترک هایی با طول ثابت و زاویه های مختلف $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ در پانل ها ایجاد شد و با تغییر زاویه ترک، تغییرات بار کمانش، تعیین شد. منحنی های بار کمانش بر حسب جابجایی در شکل های (۳-۱۳) و (۳-۱۴) نشان داده شده است.

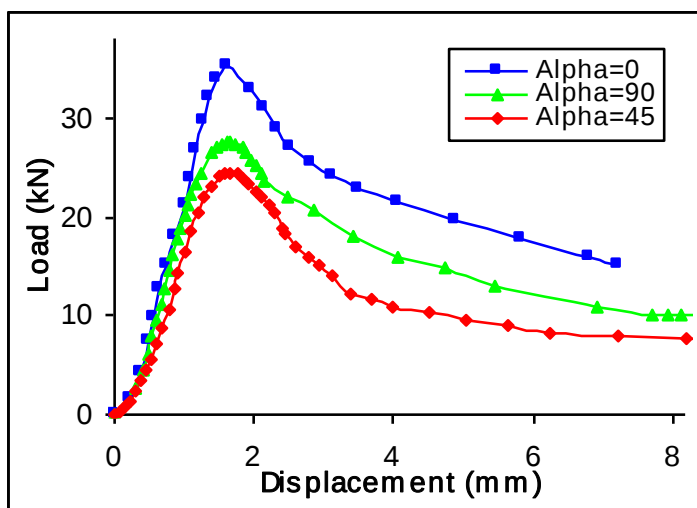
ترک افقی ($\alpha=0^\circ$) تأثیر بسیار کمی روی بار کمانش دارد. زیرا بعد از اینکه پانل استوانه ای تحت بارگذاری قرار می گیرد، دو لبه ترک بر روی هم قرار می گیرند و رفتاری تقریباً مشابه پانل کامل و بدون ترک را از خود نشان می دهد ترک با زاویه ($\alpha=45^\circ$)، بیشترین اثر را بر کاهش بار بحرانی کمانش دارد. در ترک ($\alpha=90^\circ$) در حین بارگذاری هیچ بر هم 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 پانل های بلندتر و دارای قطر کمتر، نسبت به تغییرات زاویه ترک حساسیت بیشتری نشان می دهند.



شکل ۳-۱۳- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه

$D42 - L100 - \theta 90^\circ - \lambda 0.7 - C0.5$



شکل ۳-۱۴- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه

$$D42 - L250 - \theta 180^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$$

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 کمایش تاثیر زیادی ندارد. با وجود اینکه، نمونه های بدون ترک، شیب بیشتری دارند.

۳-۶- نتایج تحلیل تجربی پانل های استوانه ای دارای ترک تحت بار خارج از

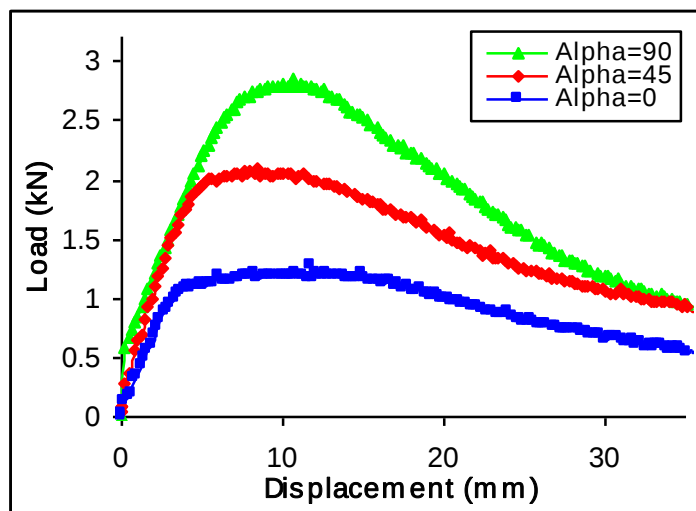
مرکز

در این بخش نتایج تحلیل تجربی پانل های استوانه ای با ضخامت ۲ میلیمتر و قطر ۴۲ میلیمتر، دارای ترک ارائه شده است. اگر بار محوری در مرکز صفحه به پانل اعمال نشود، خروج مرکز باعث ایجاد بارگذاری ترکیبی فشار محوری و گشتاور خمشی می شود. تاثیر خروج مرکز نسبت به مرکز پانل، بر بار کمایش در شکل (۳-۱۵) تا (۳-۱۷) نمایش داده شده است.

تعداد نمونه های آزمایش شده برای این نوع ترک محدود است و فقط به منظور تایید نتایج عددی انجام شده است.

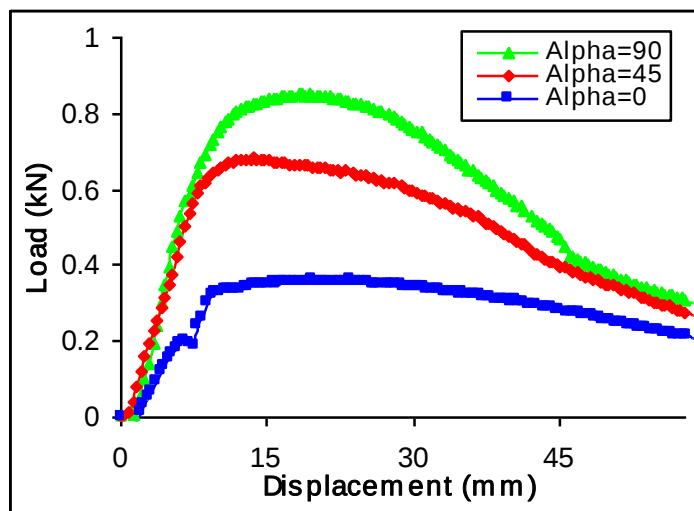
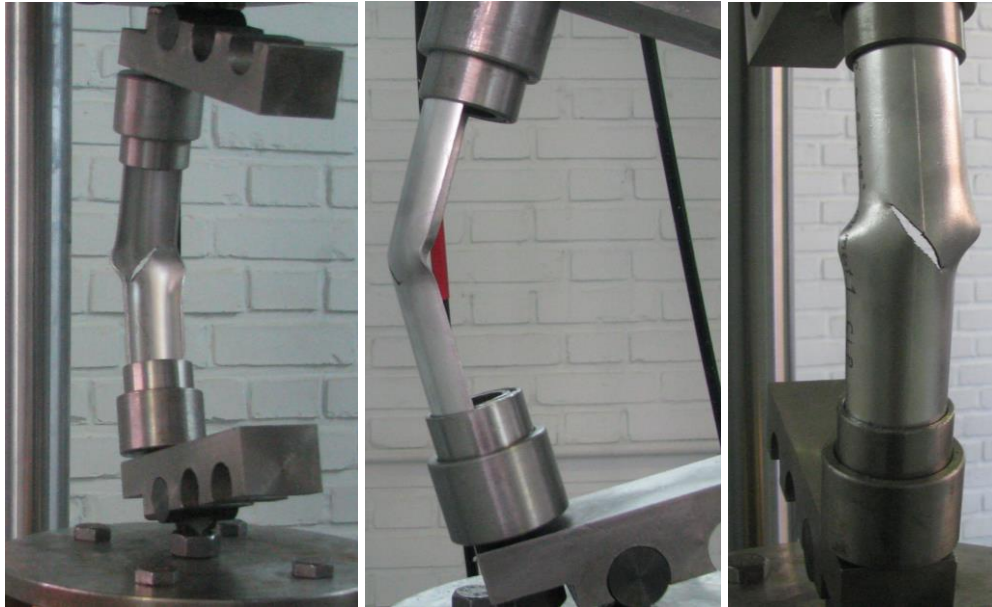
منحنی های بار کمایش بر حسب جابجایی برای سه زاویه ترک در شکل (۳-۱۸) نشان داده شده است.

ترک افقی ($\alpha = 90^\circ$) تأثیر بسیار کمی روی بار کمانش دارد. ترک با زاویه ($\alpha = 45^\circ$)، بیشترین اثر را بر بار بحرانی کمانش دارد. در طول ترک یکسان، اثر ترک افقی روی بار بحرانی کمانش از ترک قائم بیشتر و از مایل کمتر است.



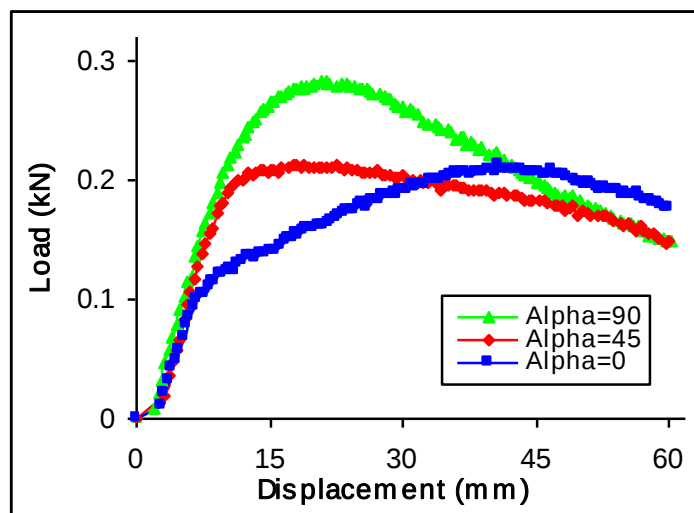
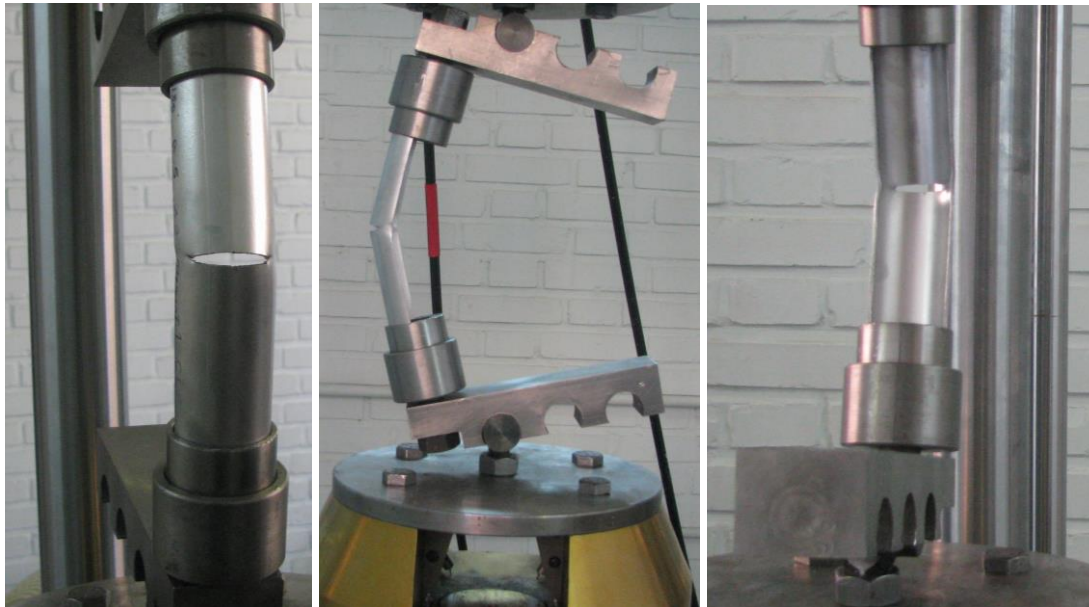
شکل ۳-۱۵- منحنی های بار - جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه

$D42 - L150 - \theta 180^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$



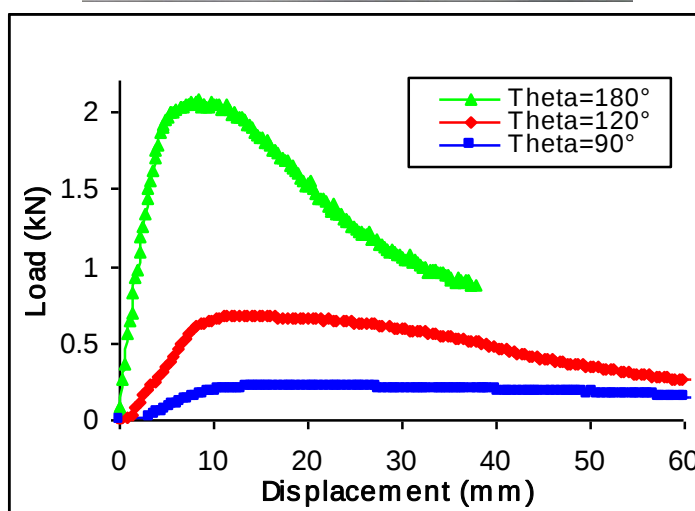
شکل ۳-۱۶- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه

$D42 - L150 - \theta 120^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$



شکل ۳-۱۷- منحنی های بار - جابجایی برای زاویه ترک های مختلف نمونه

$D42 - L150 - \theta 90^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$



شکل ۳-۱۸- منحنی های بار- جابجایی برای زاویه پانل های مختلف نمونه

$$D42 - L150 - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$$

۳-۷- جمع بندی

در این فصل برای انجام آزمایشات از یک دستگاه سروهیدرولیک INSTRON8802، استفاده شد و نمونه‌هایی از جنس فولاد St37 و Ck20 با اندازه‌های مختلف ساخته شد و پس از انجام آزمایش تأثیرات مشخصات هندسی و مکانیکی از قبیل طول و زاویه پانل، طول، زاویه و جابجایی ترک بر بار کمانش و همچنین نوع بارگذاری محوری و خارج از مرکز نیز به صورت تجربی انجام شد. در نهایت نتایج بصورت نمودار و جدول ارائه گردید.

فصل چهارم

مقایسه نتایج تحلیل عددی و تست تجربی

۴-۱- مقدمه

در این فصل نتایج حاصل از تحلیل عددی کمانش پانل‌های 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 داده‌های 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

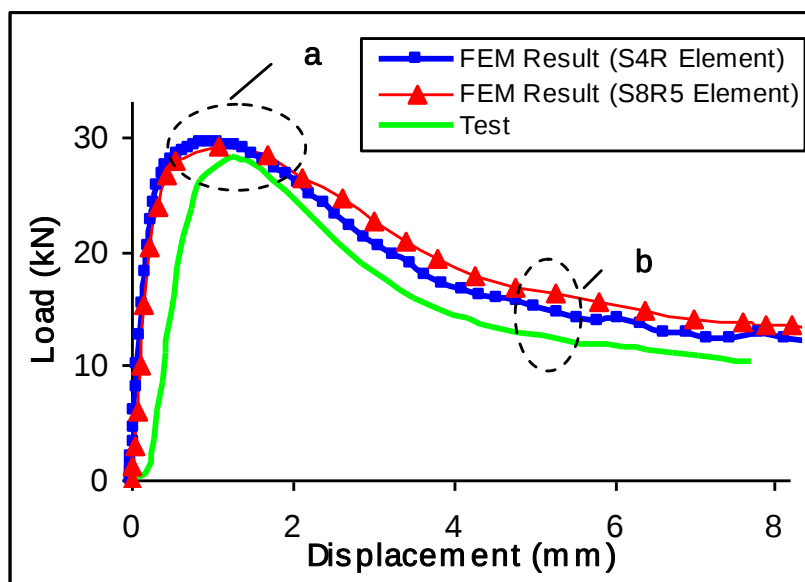
نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف بین این نتایج در جدول (۴-۱) و اشکال (۴-۱) و (۴-۲) ارائه شده است. مشاهده می‌شود که اختلاف بین نتایج بسیار ناچیز است.

جدول ۴-۱- نتایج تحلیل‌های عددی و تجربی همراه با درصد اختلاف مربوط به تحلیل موقعیت ترک

عنوان نمونه	بار کمانش (kN)		بار کمانش تجربی (kN)	درصد اختلاف نتایج عددی با تجربی	
	المان S4R	المان S8R5		المان S4R	المان S8R5
L100-090-no crack	21.32	21.21	20.75	2.7	2.2
L100-0120-no crack	31.02	30.45	27.01	14.8	12.7
L100-0180-no crack	45.60	44.57	42.23	7.9	5.5
L150-0180- $\alpha 45^\circ$ - λ 0.5-c0.5	29.41	29.33	28.24	4.1	3.9
L150-0180- $\alpha 45^\circ$ - λ 0.5-c0.33	35.42	34.41	33.43	5.9	2.9
L150-0180- $\alpha 45^\circ$ - λ 0.5-c0.25	30.03	30.14	29.69	1.1	1.5
L150-090-no crack	20.02	19.77	18.87	6.1	4.8
L150-0120-no crack	27.28	26.04	25.55	6.8	1.9
L150-0180-no crack	47.02	44.87	43.67	7.7	2.7
L250-090-no crack	16.30	16.03	15.61	4.4	2.7
L250-0180-no crack	45.13	44.25	42.23	6.9	4.8

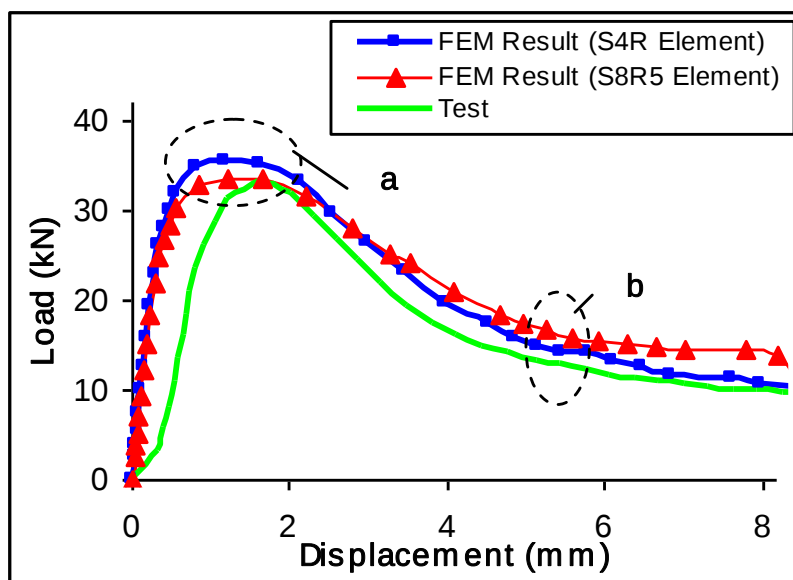
به عنوان مثال حداکثر اختلاف نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش با المانهای غیر خطی S8R5 در مقایسه با نتایج تجربی، ۱۲/۷ درصد و برای المان S4R، ۱۴/۸ درصد است. می‌توان دید که بیشترین اختلاف در نتایج مربوط به نمونه‌های دارای طول کوتاه است. دلیل این موضوع مربوط به تئوری خمشی پانل‌ها است که با کاهش نسبت t/L جواب بهتری می‌دهد و در نرم افزار از این تئوری استفاده شده است. از مقایسه منحنی‌های عددی با تجربی نتیجه می‌شود که منحنی‌های عددی و تجربی مطابقت بسیار خوبی دارند. برای تعدادی از نمونه‌ها دارای ترک در شکلهای (۴-۱۰) و (۴-۱۱) منحنی‌های حاصل از نتایج عددی با هر دو المان خطی و غیر خطی ارائه شده است. مشاهده می‌شود

که منحنی‌های حاصل از روش عددی و المانهای خطی $S4R$ ، نسبت به منحنی‌های حاصل از المانهای غیرخطی ناحیه پس کمانش بهتری را نتیجه می‌دهند. اما بار کمانش بیشتری را ارائه می‌کنند.



شکل ۴-۱- مقایسه منحنی‌های بار - جابجایی تجربی و عددی برای نمونه

$L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$



شکل ۴-۲- مقایسه منحنی‌های بار - جابجایی تجربی و عددی برای نمونه $L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.33$

اختلاف نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش با المانهای غیر خطی در مقایسه با نتایج تجربی برای ۴ نمونه کمتر از ۵ درصد است. همچنین میانگین درصد اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S4R در مقایسه با نتایج عددی، ۶/۳۴ درصد، و میانگین درصد اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S8R5 برابر ۵/۱۲ درصد است. بنابراین تحلیل با المان های غیر خطی دقیقتر است.

۴-۳- مقایسه نتایج عددی و تحلیل زوایای ترک و طول ترک در پانل

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

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

درصد اختلاف نتایج عددی با تجربی		بار کمانش تجربی (kN)	بار کمانش (kN)		عنوان نمونه
S8R5 المان	S4R المان		S8R5 المان	S4R المان	
2.2	2.7	20.75	21.21	21.32	L100-090-no crack
0.9	3.4	20.05	20.24	20.74	L100-090-α0-λ0.3-c0.5
2.5	3.5	19.64	20.14	20.34	L100-090-α0-λ0.5-c0.5
0.8	1.5	19.82	19.98	20.13	L100-090-α0-λ0.7-c0.5
2.9	5.3	16.96	17.45	17.90	L100-090-α45-λ0.7-c0.5
5.9	8.1	18.81	19.98	20.47	L100-090-α90-λ0.3-c0.5
0.1	1.2	19.75	19.77	19.98	L100-090-α90-λ0.5-c0.5
1.2	0.5	19.31	19.54	19.40	L100-090-α90-λ0.7-c0.5
3.5	8.2	26.92	27.86	30.38	L100-0120-α0-λ0.4-c0.5
5.5	7.9	42.23	44.57	45.60	L100-0180-no crack
3.0	7.2	41.96	43.21	45.02	L100-0180-α0-λ0.3-c0.5
2.3	6.7	41.05	41.98	43.80	L100-0180-α0-λ0.4-c0.5
2.3	2.0	31.31	32.02	31.95	L100-0180-α45-λ0.5-c0.5
4.8	6.1	18.87	19.77	20.02	L150-090-no crack
3.5	5.3	18.26	18.90	19.22	L150-090-α90-λ0.3-c0.5
1.9	6.8	25.55	26.04	27.28	L150-0120-no crack
5.3	3.8	22.26	23.45	23.11	L150-0120-α0-λ0.5-c0.5
3.3	8.0	20.21	20.87	21.83	L150-0120-α45-λ0.5-c0.5
3.9	2.9	22.02	22.88	22.66	L150-0120-α90-λ0.5-c0.5
2.7	7.7	43.67	44.87	47.02	L150-0180-no crack
4.3	8.6	42.21	44.04	45.85	L150-0180-α0-λ0.3-c0.5
3.9	4.1	28.24	29.33	29.41	L150-0180-α45-λ0.5-c0.5
2.9	5.9	33.43	34.41	35.42	L150-0180-α45-λ0.5-c0.33
1.5	1.1	29.69	30.14	30.03	L150-0180-α45-λ0.5-c0.25
2.7	4.4	15.61	16.03	16.30	L250-090-no crack
5.4	6.4	9.70	10.22	10.32	L250-090-α90-λ0.3-c0.5
2.7	7.7	7.91	8.12	8.52	L250-090-α90-λ0.4-c0.5
4.8	6.9	42.23	44.25	45.13	L250-0180-no crack
1.5	3.8	39.53	40.14	41.04	L250-0180-α0-λ0.3-c0.5
1.8	4.5	35.36	35.99	36.96	L250-0180-α0-λ0.4-c0.5

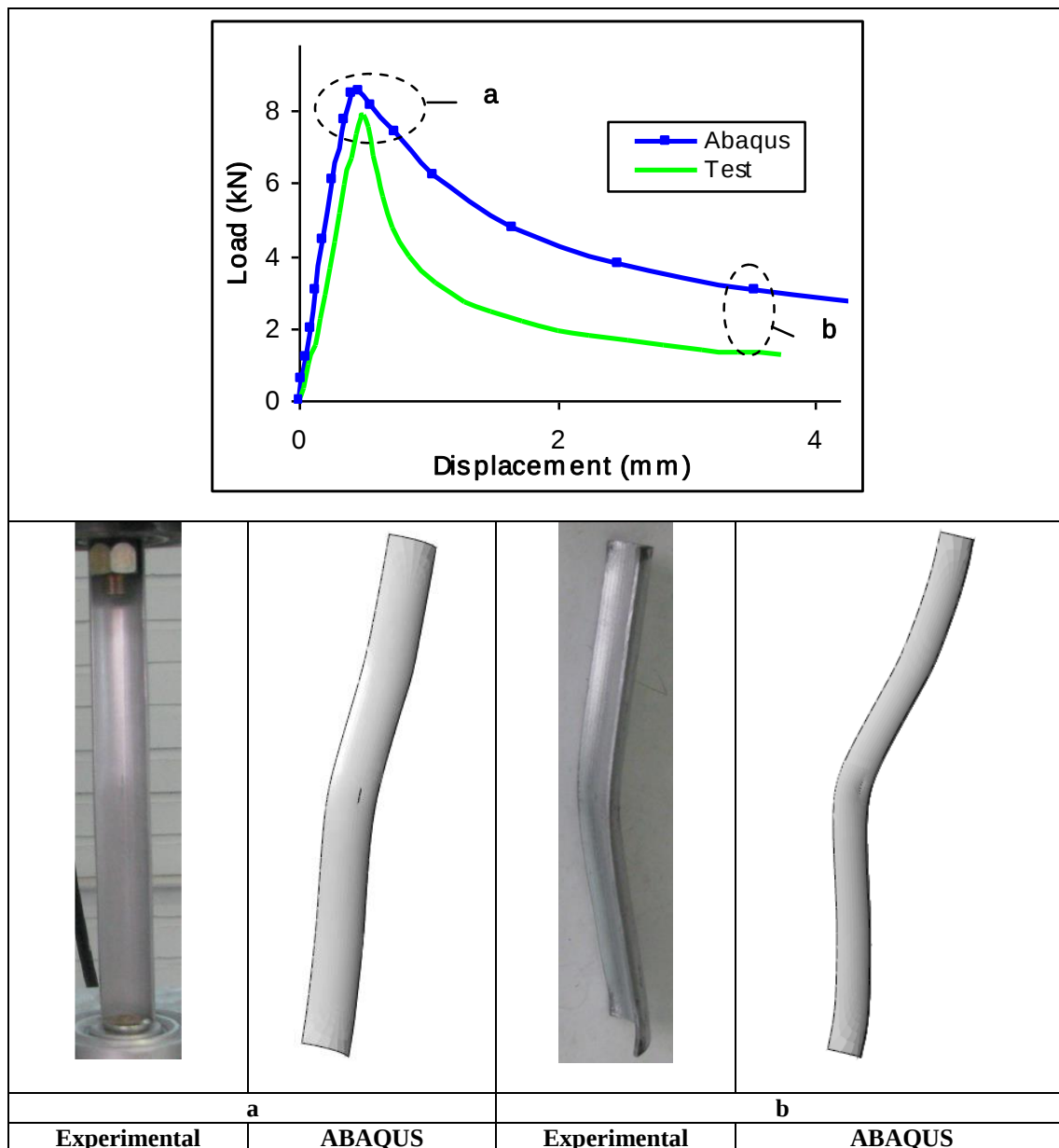
مشاهده می شود که اختلاف بین نتایج عددی و تجربی بسیار ناچیز است. به عنوان مثال حداکثر اختلاف نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش با المانهای غیر خطی S8R5 در مقایسه با نتایج تجربی، $4/5$ درصد و برای المان S4R، $8/6$ درصد است. می توان دید که بیشترین اختلاف در نتایج مربوط به نمونه های دارای طول کوتاه است.

نتایج بدست آمده از تحلیل کمانش با المانهای غیر خطی در مقایسه با نتایج تجربی برای ۲۷ نمونه کمتر از ۵ درصد است. همچنین میانگین درصد اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S4R در مقایسه با نتایج عددی، $6/3$ درصد و میانگین درصد اختلاف نتایج تحلیل عددی با المان S8R5، $4/89$ درصد است. بنابراین می توان 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

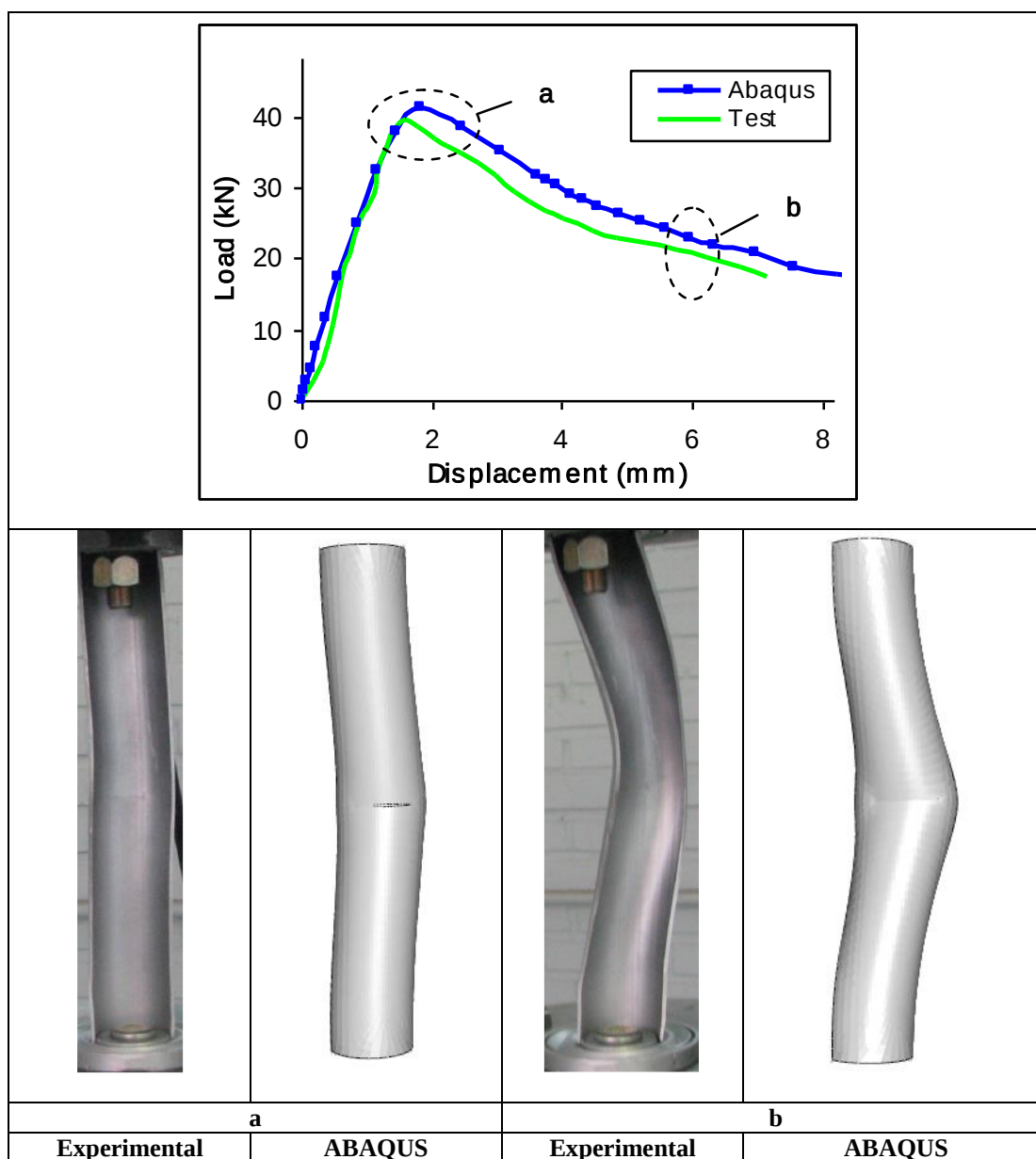
منحنی های بار- جابجایی، حاصل از تحلیل های عددی و تجربی، برای تمامی نمونه های آزمایش در شکل های (۳-۴) تا (۱۴-۴) ارائه شده است. همچنین تغییر شکل نمونه ها در حالت های کمانش و پس کمانش برای هر دو روش تجربی و عددی در این اشکال مقایسه شده است.

از مقایسه منحنی های عددی با تجربی نتیجه می شود که منحنی های عددی و تجربی مطابقت بسیار خوبی دارند. برای تعدادی از نمونه ها دارای ترک در شکل های (۶-۴) تا (۸-۴)، (۱۹-۴)، (۴-۲۰)، (۲۹-۴)، (۳۳-۴)، (۳۷-۴) و (۳۹-۴) 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 غیرخطی ناحیه پس کمانش بهتری را نتیجه می دهند. اما بار کمانش بیشتری را ارائه می کنند.



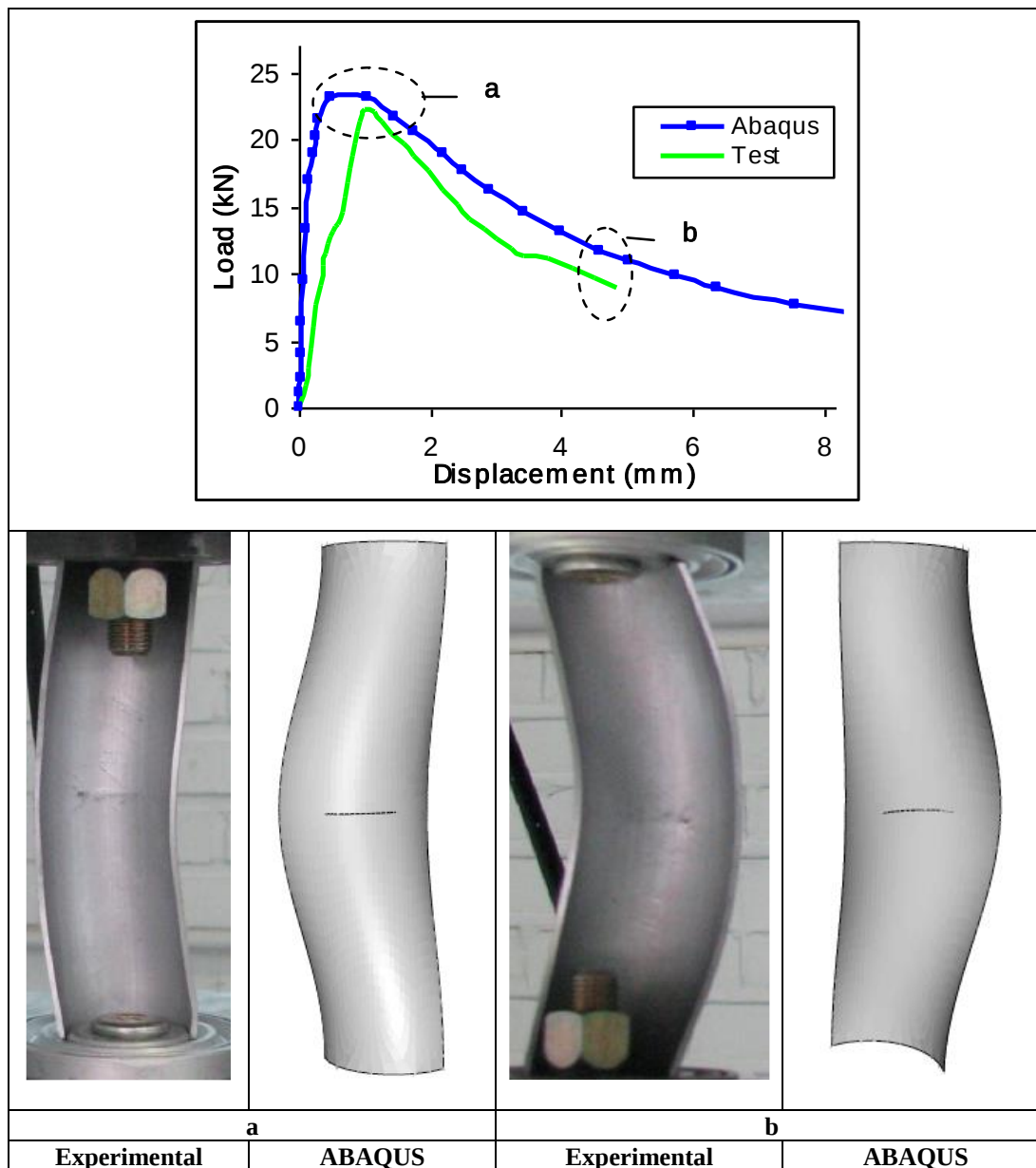
شکل ۴-۳- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L250 - \theta 90^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$



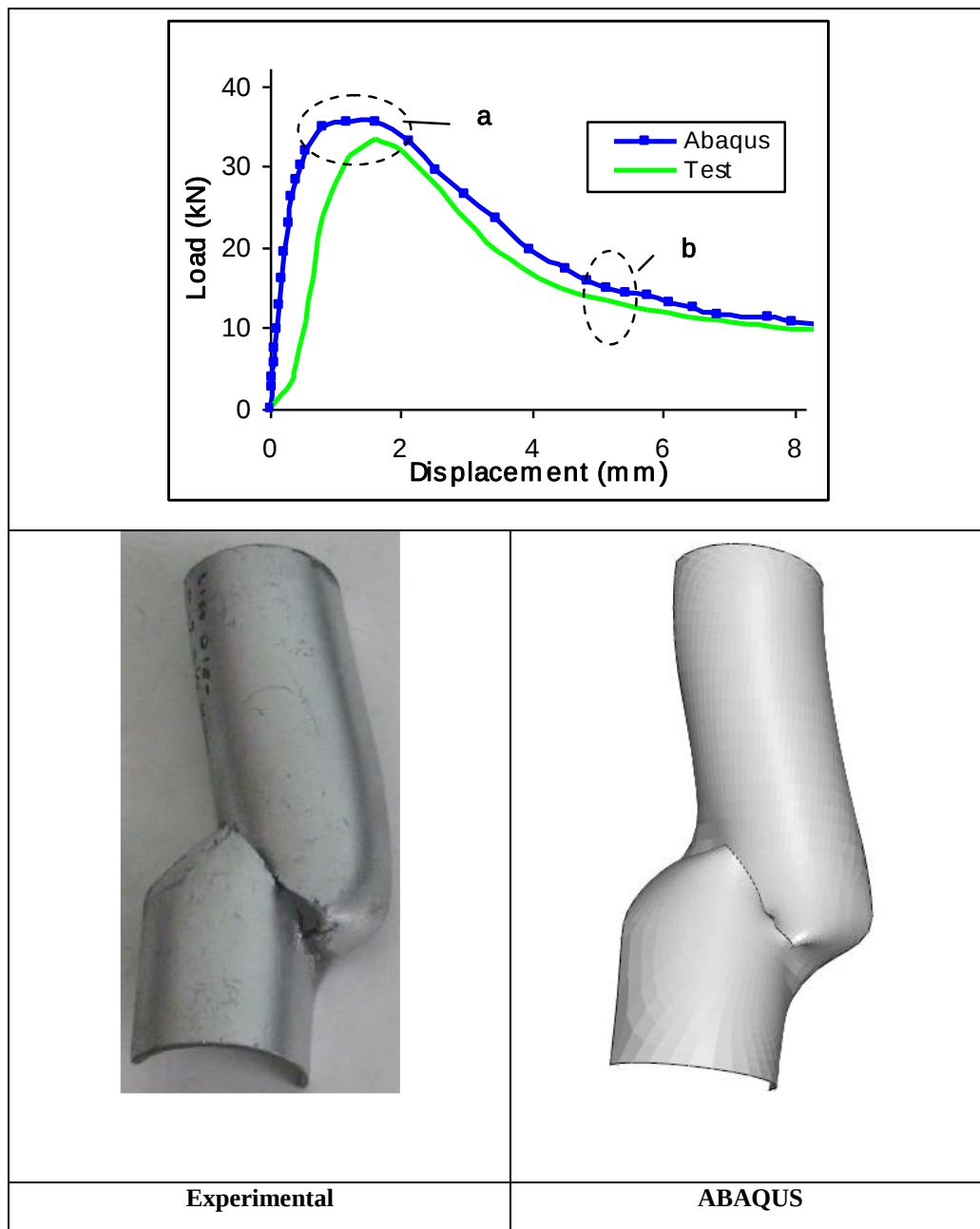
شکل ۴-۴ - منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L250 - \theta 180^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$



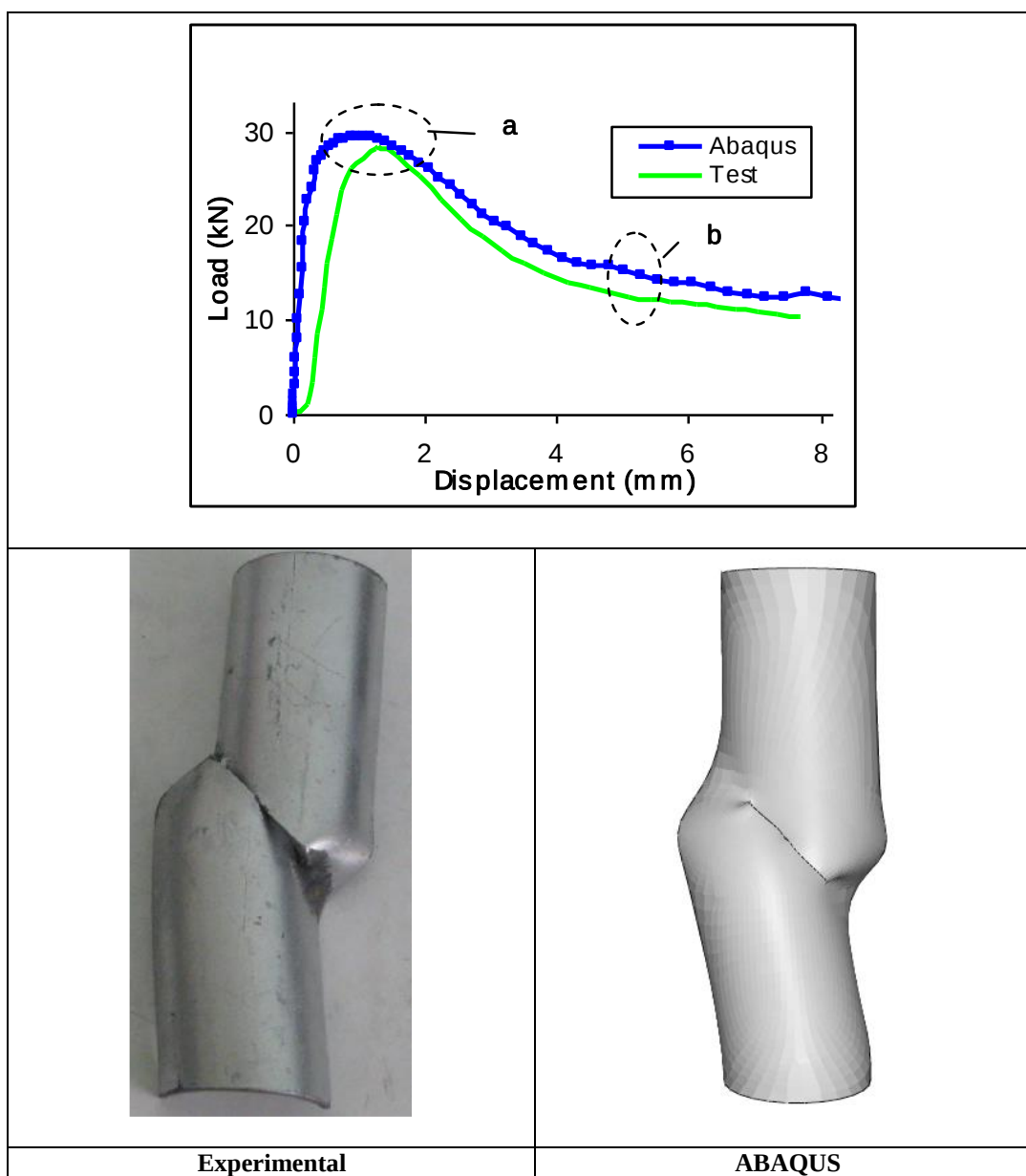
شکل ۴-۵- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L150 - \theta 120^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$



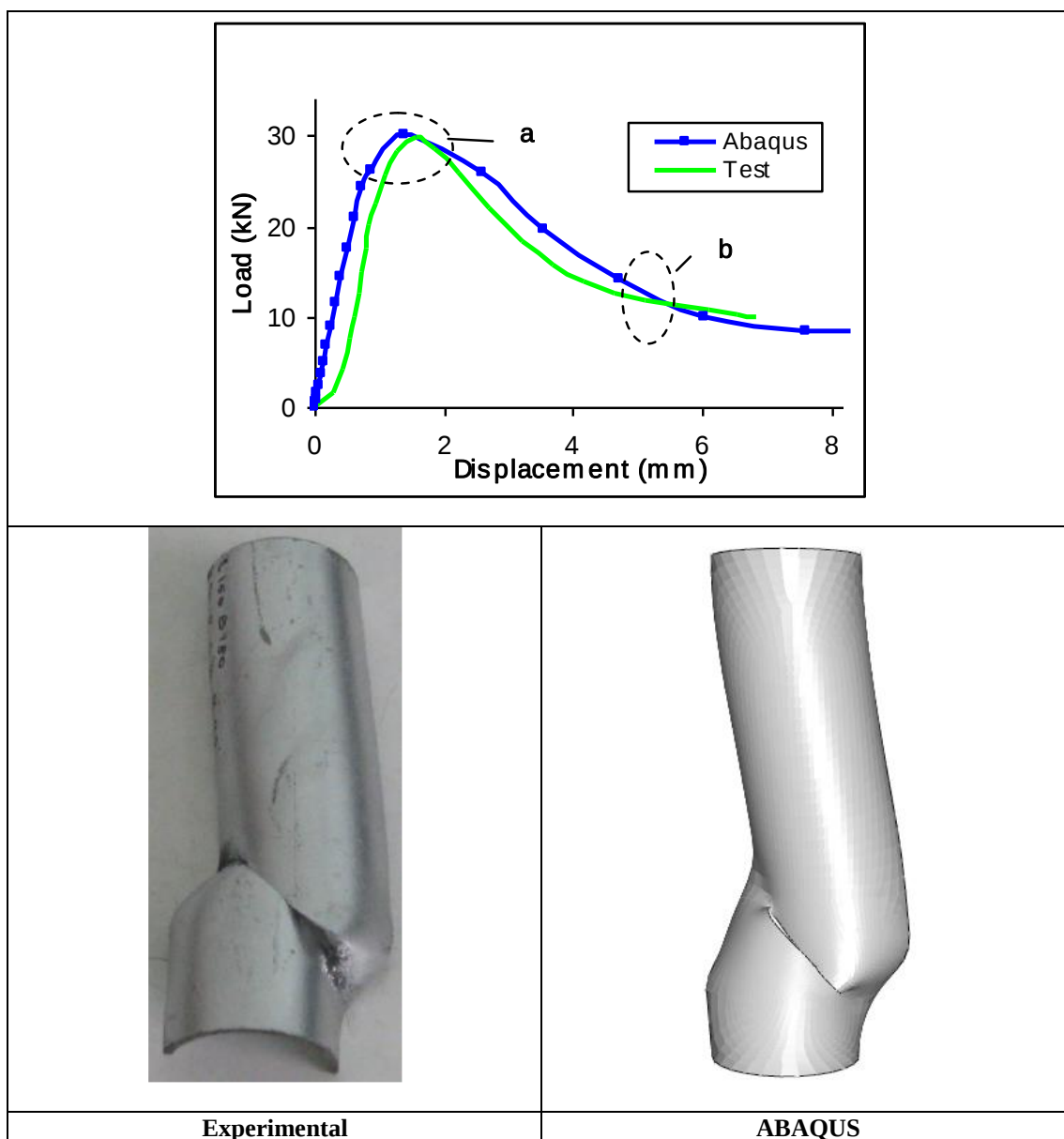
شکل ۴-۶- منحنی‌های بار-جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.33$



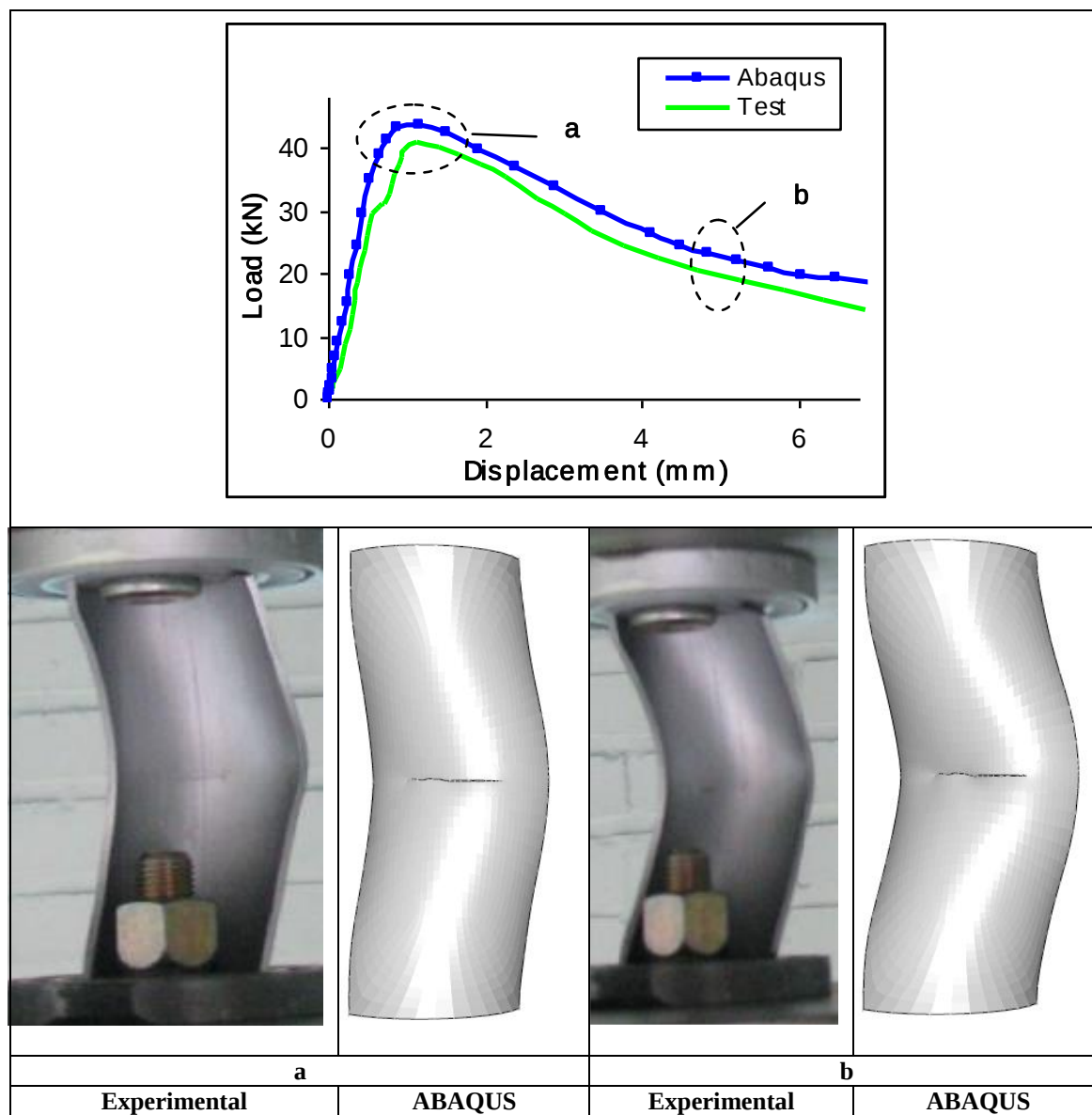
شکل ۴-۷- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$



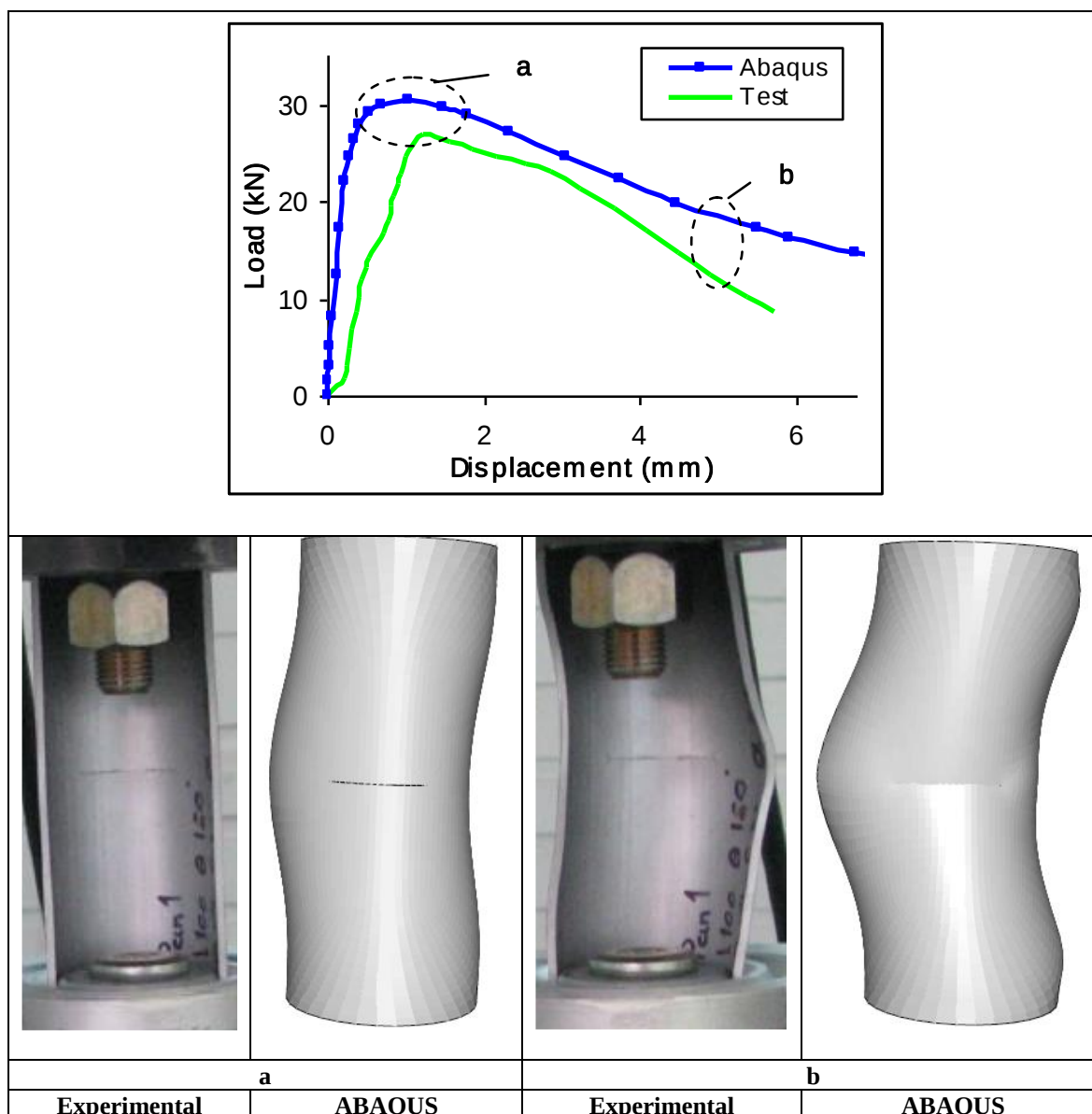
شکل ۴-۸- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.25$



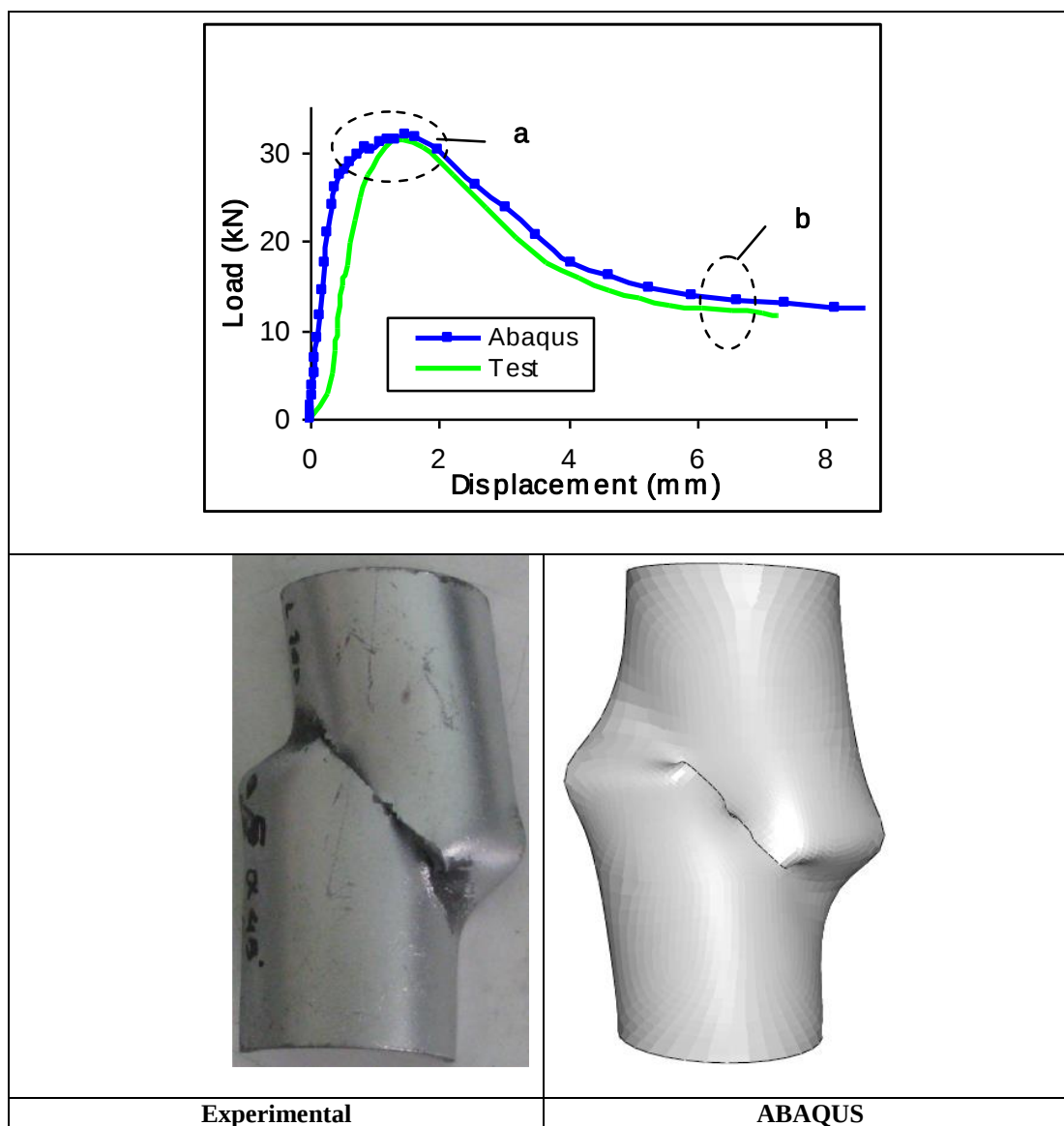
شکل ۴-۹- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L100 - \theta 180^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.3 - C0.5$



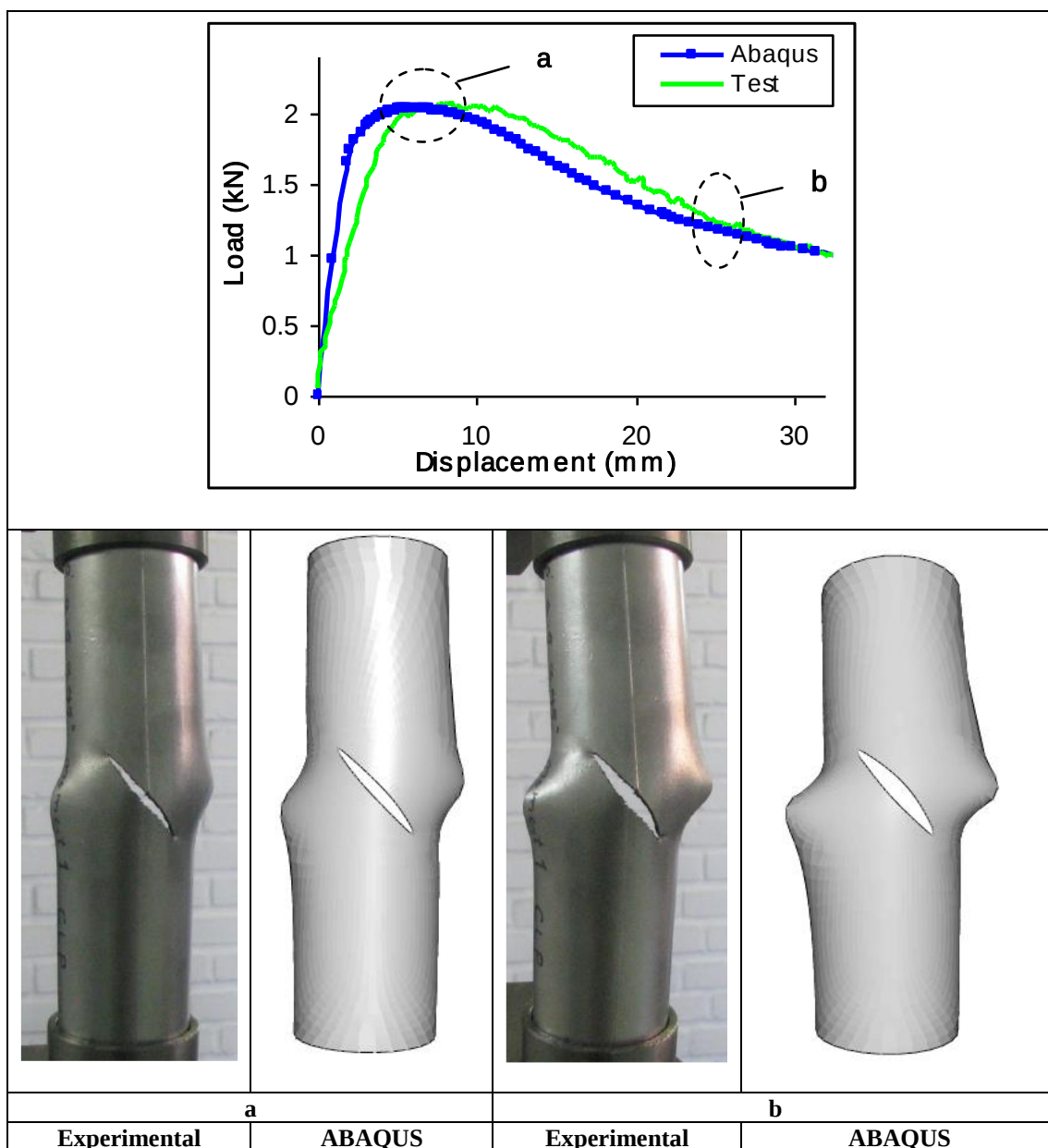
شکل ۴-۱۰- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L100 - \theta 120^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.4 - C0.5$



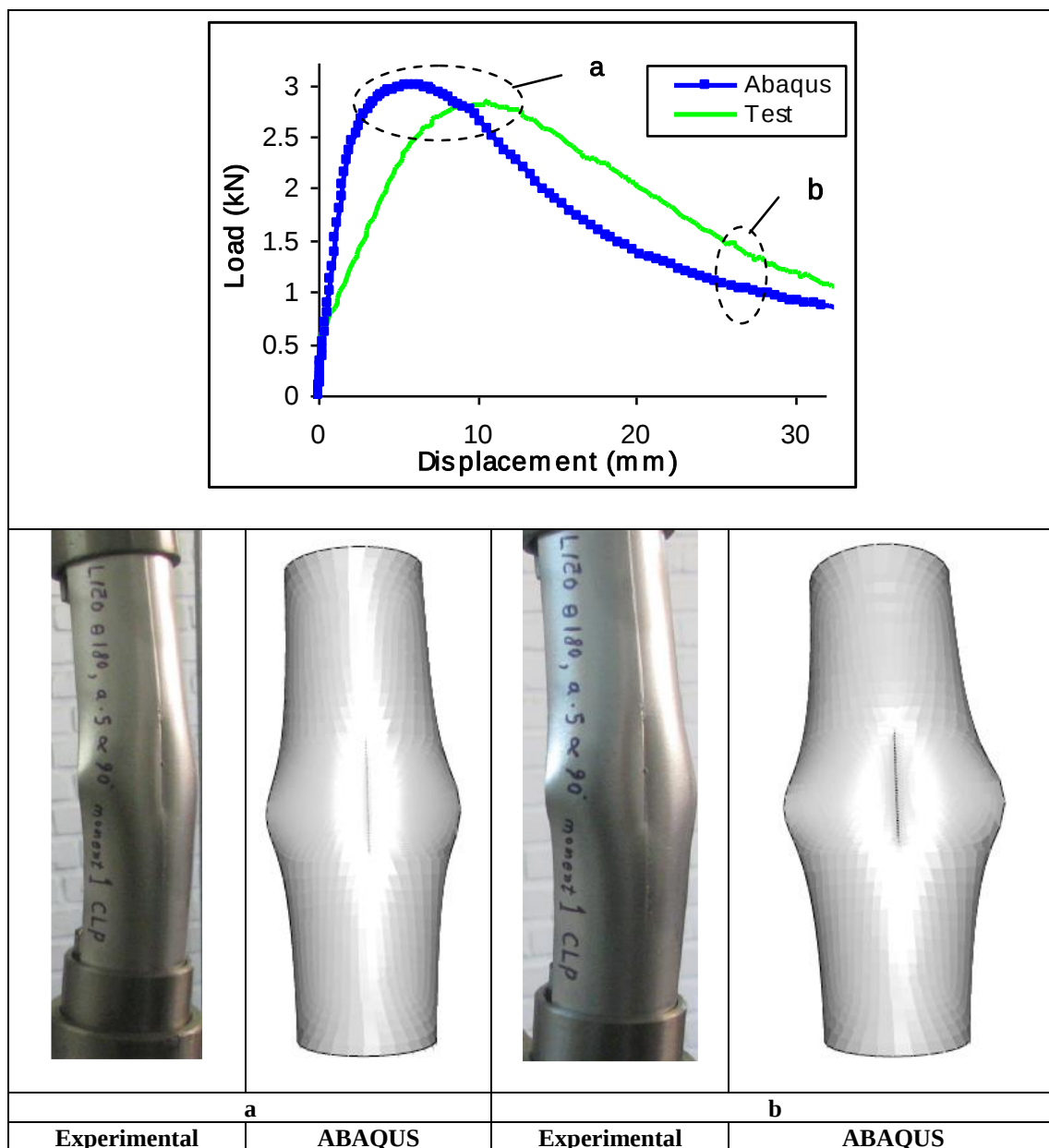
شکل ۴-۱۱- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L100 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$



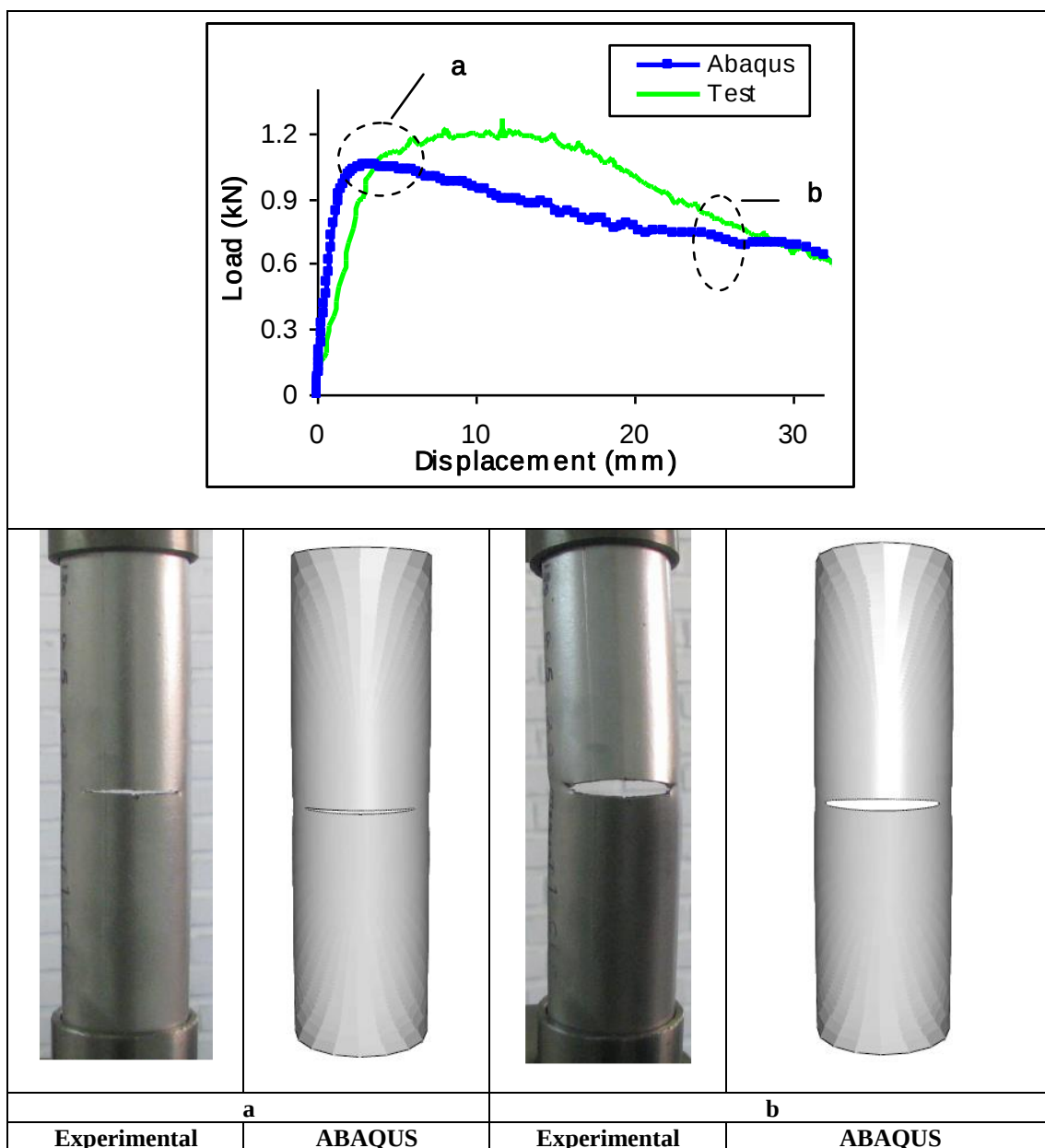
شکل ۴-۱۲- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L150 - \theta 180^\circ - \alpha 45^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$



شکل ۴-۱۳- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L150 - \theta 180^\circ - \alpha 90^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$



شکل ۴-۱۴- منحنی‌های بار - جابجایی و تصاویر تغییر شکل یافته نمونه

$L150 - \theta 180^\circ - \alpha 0^\circ - \lambda 0.5 - C0.5$

۴-۵- جمع بندی

در این فصل نتایج حاصل از تحلیل عددی 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 و میزان درصد خطا در جداول گرد آوری شد. از مقایسه منحنی های عددی با تجربی نتیجه می شود که منحنی های عددی و تجربی مطابقت بسیار خوبی دارند.

فصل پنجم

نتایج و پیشنهادات

۵-۱- مقدمه

در این تحقیق کمانش پانل 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 پانل، بار کمانش پانل افت چشمگیری پیدا می کند.
- ۲- با تغییر موقعیت ترک از میانه پانل به طرف لبه های پانل، بار کمانش کاهش می یابد. همچنین مشاهده می شود که پانل های با طول بلندتر، نسبت به تغییر موقعیت ترک حساس ترند.
- ۳- با افزایش طول پانل 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 پانل های استوانه ای ترک دار، کمانش به صورت موضعی اتفاق می افتد و در ادامه، پانل دچار خمش کلی می شود.
- ۵- برای ترک با اندازه و زاویه ثابت، با افزایش طول پانل، بار کمانش کاهش می یابد. اما این کاهش در بار کمانش ناچیز است. همچنین مشاهده می شود که پانل های بلندتر نسبت به تغییرات اندازه ترک حساسترند.
- ۶- برای پانل های استوانه ای ترک دار برای ترک با زاویه صفر درجه، افزایش طول ترک تاثیر چندانی در بار کمانش پانل 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 زیاده تر است.

۸- با تغییر زاویه ترک و ثابت ماندن اندازه، بار کمانش افت تغییر پیدا می کند و پانل 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 پانل استوانه ای ترک دار می شود.

۱۰- تاثیر نسبت D/t در مقاومت کمانش پانل های ترک دار، اندکی بیشتر از تاثیر نسبت L/D است.

۱۱- پانل 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 پانل با طول ثابت و ترک با زاویه ثابت، افزایش طول ترک باعث کاهش بار بحرانی کمانش می شود و پانل های بلندتر به افزایش طول ترک حساس ترند. برای ترک محیطی نیز به خاطر روی هم قرار گرفتن دو لبه روی هم رفتاری مانند پانل 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 پانل هیچ بر هم کنشی بین دو لبه ترک وجود ندارد و ترک کاملاً باز می شود. به همین دلیل رفتار پس کمانش پانل 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 پانل استوانه ای با ترک محیطی با تغییر طول ترک تغییر می کند. همچنین مد کمانش ترک طولی وقتی که ترک در راستای پانل جابجا شده تغییر کرده و کمانش در مد دوم روی می دهد. حساسیت بار بحرانی کمانش با کاهش ضخامت پانل بیشتر می شود.

۳-۵- پیشنهادات

- ۱- تحلیل تجربی کمانش پانل 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 پانلهایی با مقاطع متفاوت و ترکهایی با اشکال و هندسه های مختلف، به عنوان مثال پانل های با مقطع مربعی یا مستطیلی دارای ترک های دو طرفه.
- ۳- تحلیل تجربی و عددی پانل های ترکدار ساخته شده از مواد پر کاربرد دیگر مثل آلومینیوم یا مس.
- ۴- تحلیل عددی کمانش پانل های کامپوزیتی ترک دار و پیدا کردن یک ترکیب بهینه برای مقاومت پانل ترک دار در برابر کمانش.
- ۵- انجام تحلیل های بیشتر برای پانل 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 پانل 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] K. Magnucki. (2006) "Elastic buckling of an axially compressed cylindrical panel with three edges simply supported and one edge free". **Thin-Walled Structures**, 44 pp. 387–392.
- [9] E. Gal R, Levy, H. Abramovich,P. Pavsner. (2006) "Buckling analysis of composite panels". **Composite Structures** 73,pp. 179–185.
- [10] Hutchinson JW, Tennyson RC, Muggeridge DB,(1972). "Effect of local axisymmetric imperfection on the buckling of a cylindrical shell under axial compression". **AIAA J**,9, pp. 48–52.
- [11] 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.
- [12] Vafai A, Estekanchi HE(1996). "A prologue to the buckling analysis of cracked shells". **Iranian Journal of Science and Technology**,20,pp.137–68.
- [13] El Naschie, M.S.,(1974). "Branching solution for local buckling of a circumferentially cracked cylindricalshell", **Int J Mech Sci**, 16,pp. 689–97,.
- [14] Dyshel' MSH.(1989). Stability of a cracked cylindrical shell in tension. **Soviet Applied Mechanics**,25,pp.542–8 [English translation by Prikladnaya Mekhanika].
- [15] 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.

- [16] 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, .
- [17] 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
- [18] 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,
- [19] 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,.
- [20] 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,.
- [21] 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,.
- [22] Vaziri A.(2007) “On the buckling of cracked composite cylindrical shells under axial compression,” **Composite Structures**, 80,pp. 152–158,.
- [23] Vaziri A, Nayeb-Hashemi H, Estekanchi HE,(2002). Dynamic response of cracked cylindrical shells with internal pressure. **Proceedings of the ASME congress and exposition**;
- [24] 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.
- [25] Hilburger MW, Starnes JH,(2004). Effects of imperfections of the buckling response of composite shells. **Thin Wall Struct** ,42(3) ,pp.369–97.
- [26] Mackerle J,(1993). Finite and boundary element analyses of shells. A bibliography (1990–992). **Finite Elements in Analysis and Design**,14,pp.73–83.
- [27] Sih GC,(1973). Methods of analysis and solutions of crack problems. Leyden (The etherlands), **Noordhiff International Publishing**..

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

[29] 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.

[30] 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.

[۳۱] 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.

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

[33] Vafai A, Estekanchi HE.(1996). A prologue to the buckling analysis of cracked shells. **Iranian Journal of Science and Technology**, 20,pp.137–68.

[34] ABAQUS 6.4 PR11 user's manual.

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

ABSTRACT

The effect of crack on load-bearing capacity and buckling behavior of cylindrical panel is an essential consideration in their design. In this paper, experimental and numerical buckling analysis of steel cylindrical panel 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 panel, 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 Panels Under Eccentric Load**

By

Jafar Saemi

Supervisors

Dr. Mahmoud Shariati

Dr. Hamid Reza Eipakchi

Date:

June 2010