

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده :

مهندسی مکانیک

گروه :

طراحی کاربردی

تحلیل عددی و تجربی رفتار رچتینگ پانل‌های استوانه‌ای فولادی با و بدون گشودگی
تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی

دانشجو :

حمید چاوشان

اساتید راهنما :

دکتر محمود شریعتی

دکتر حمیدرضا ایپکچی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۹۲

تقدیم به

پدرم و

مادرم

تشکر و قدردانی

ضمن سپاس بیکران خداوند، لازم می‌دانم از تمامی اساتیدی که در این مدت افتخار شاگردی ایشان را داشتم، به‌ویژه اساتید محترم آقای دکتر محمود شریعتی و آقای دکتر حمید رضا ایپک چی که با راهنمایی‌های مدبرانه، نظارت و سرپرستی این پایان‌نامه را به عهده داشتند، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم.

تعهد نامه

اینجانب حمید چاوشان دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- گرایش طراحی کاربردی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان "تحلیل عددی و تجربی رفتار رچتینگ پانل‌های استوانه‌ای فولادی با و بدون گشودگی تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی" تحت راهنمایی دکتر محمود شریعتی و دکتر حمیدرضا ایپکچی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان‌نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان‌نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان‌نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

در این تحقیق، به مطالعه‌ی تجربی و عددی رفتار رچتینگ پانل‌های استوانه‌ای فولادی ضدزنگ SS304L و Ck45 تحت بارگذاری متناوب مرکب و محوری پرداخته شده است. پانل‌های استوانه‌ای از جنس SS304L به دو صورت عمودی و مایل تحت زاویه 20° قرار گرفته و بار تناوبی با نیروی میانگین غیرصفر در شرایط نیرو-کنترل به انتهای آنها اعمال شده است. پانل‌های استوانه‌ای از جنس Ck45 با زوایای مختلف و طول یکسان تحت بار محوری با حداکثر تنش برابر $\sigma_y / 1.05$ به صورت سیکلی قرار گرفته‌اند و در نتیجه‌ی آن انباشتگی کرنش پلاستیک یا پدیده‌ی رچتینگ مشاهده شد. آزمایش‌های تجربی توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است. تحلیل عددی توسط نرم افزار آباکوس و با استفاده از مدل پیشرفته سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک انجام شده و با نتایج تجربی مقایسه شده است. در این تحقیق اثر طول پانل استوانه‌ای مایل، زاویه‌ی قرارگیری پانل استوانه‌ای، زاویه‌ی پانل استوانه‌ای و تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار رچتینگ مورد تحلیل قرار گرفته است. در بارگذاری تک مرحله‌ای، رابطه‌ی خطی بین انرژی پلاستیک و نرخ تغییر شکل پلاستیک مشاهده شد. در بررسی تاریخچه‌ی بارگذاری پانل استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب، پیش بارهای اعمالی در بارگذاری چند مرحله‌ای باعث مهار رفتار رچتینگ و توقف انباشتگی تغییرشکل پلاستیک در بارگذاری‌های سیکلی با دامنه‌ی نیروی کمتر شدند. همچنین تأثیر گشودگی بر پانل‌های استوانه‌ای تحت این نوع بارگذاری‌ها مورد تحلیل قرار گرفته است. علاوه بر مطالعه‌ی تأثیر عوامل مختلف بر رفتار رچتینگ، تأثیر طول و زاویه‌ی پانل استوانه‌ای بر طول عمر آن نیز مورد مطالعه قرار گرفته است و مشاهده شد که با افزایش طول و زاویه پانل استوانه‌ای، طول عمر آن کاهش می‌یابد.

کلید واژه: پانل استوانه‌ای، تحلیل عددی و تجربی، رچتینگ، بارگذاری متناوب مرکب و محوری، گشودگی.

فصل ۱. مقدمه ای بر پانل ها و رچتینگ	۱
۱-۱- تعریف و کاربرد پانل ها	۲
۲-۱- رچتینگ	۳
۳-۱- مروری بر کارهای انجام شده	۹
فصل ۲. تحلیل تجربی	۱۳
۱-۲- مقدمه	۱۴
۲-۲- رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای از جنس SS304L	۱۴
۱-۲-۲- هندسه نمونه‌ها	۱۴
۲-۲-۲- خواص مکانیکی نمونه‌ها	۱۵
۳-۲-۲- خواص شیمیایی نمونه‌ها	۱۶
۴-۲-۲- شرایط مرزی	۱۷
۵-۲-۲- دستگاه آزمایش	۱۸
۶-۲-۲- جزئیات ساخت	۱۹
۷-۲-۲- نتایج تجربی	۲۰
۱-۷-۲-۲- رفتار رچتینگ در پانل استوانه‌ای	۲۲
۲-۷-۲-۲- تاثیر طول پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن تحت بارگذاری مرکب	۲۲
۳-۷-۲-۲- اشباع جابجایی رچتینگ در طول‌های مختلف	۲۳
۴-۷-۲-۲- تاثیر طول پانل استوانه‌ای بر طول عمر آن تحت بارگذاری مرکب	۲۵
۵-۷-۲-۲- تاثیر طول بر انرژی پلاستیک و رابطه انرژی با نرخ جابجایی رچتینگ در طول‌های مختلف	۲۶
۶-۷-۲-۲- تأثیر زاویه قرارگیری پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن	۳۱
۷-۷-۲-۲- اشباع جابجایی رچتینگ در زوایای مختلف قرارگیری	۳۳
۸-۷-۲-۲- تاثیر زاویه قرارگیری بر انرژی پلاستیک و رابطه انرژی با نرخ جابجایی رچتینگ در زوایای	

مختلف.....	۳۵
تأثیر گشودگی بر رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای.....	۳۹-۲-۷-۹
تأثیر تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای دارای گشودگی.....	۴۲-۲-۷-۱۰
رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای از جنس Ck45.....	۴۴-۲-۳
هندسه نمونه‌ها.....	۴۴-۲-۳-۱
خواص مکانیکی نمونه‌ها.....	۴۶-۲-۳-۲
خواص شیمیایی نمونه‌ها.....	۴۶-۲-۳-۳
فیکسچرها و نحوه اعمال بارگذاری.....	۴۷-۲-۳-۴
نتایج تجربی.....	۴۹-۲-۳-۵
رفتار رچتینگ در پانل استوانه‌ای.....	۴۹-۲-۳-۱-۵
تأثیر زاویه پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن تحت بار محوری.....	۵۰-۲-۳-۵-۲
اشباع کرنش رچتینگ در زاویه‌های مختلف.....	۵۰-۲-۳-۵-۳
تأثیر زاویه پانل استوانه‌ای بر طول عمر نمونه تحت بار محوری.....	۵۲-۲-۳-۵-۴
تأثیر زاویه پانل استوانه‌ای بر انرژی پلاستیک و رابطه انرژی با نرخ کرنش رچتینگ در زوایای مختلف.....	۵۳-۲-۳-۵-۵
نتیجه گیری.....	۵۵-۲-۴
فصل ۳. تحلیل عددی و مقایسه نتایج عددی و تجربی.....	۵۹
مقدمه.....	۶۰-۳-۱
تحلیل عددی.....	۶۵-۳-۲
نتایج عددی و مقایسه نتایج عددی و تجربی پانل استوانه‌ای SS304L.....	۶۷-۳-۳
تأثیر طول پانل استوانه‌ای مایل بر رفتار رچتینگ آن تحت بارگذاری مرکب در تحلیل عددی.....	۷۱-۳-۴
تأثیر زاویه‌ی پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن در تحلیل عددی.....	۷۲-۳-۵
نتیجه گیری.....	۷۴-۳-۶

فصل ۴. نتیجه گیری و پیشنهادها ۷۷

۴-۱- نتیجه گیری ۷۸

۴-۲- پیشنهادها ۸۱

فهرست اشکال

- شکل (۱-۱) کاربرد پانل‌های استوانه‌ای در سازه‌های صنایع مختلف (برگرفته از سایت www.nal.res.ir) ۲
- شکل (۲-۱) حالت‌های مختلف ماده تحت بارگذاری‌های تناوبی ۴
- شکل (۳-۱) طرحی از فرآیند تغییر شکل سیکلی ۴
- شکل (۴-۱) رچتینگ و در نهایت گسیختگی ۶
- شکل (۵-۱) بدست آوردن منحنی تنش- کرنش سیکلی از اتصال رئوس حلقه‌های هیستریزیس پایدار شده ۷
- شکل (۶-۱) انواع متفاوت منحنی‌های تنش- کرنش سیکلی ۸
- شکل (۷-۱) رچتینگ پانل‌ها در صنایع هوافضا در بال هواپیما (برگرفته از سایت www.asd-europe.org) ۹
- شکل (۱-۲) هندسه‌ی نمونه‌های مورد تحلیل از جنس SS304L ۱۵
- شکل (۲-۲) دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و استفاده از طول سنج برای آزمایش کشش استاندارد ۱۵
- شکل (۳-۲) نمودار تنش- کرنش واقعی و مهندسی ماده‌ی مورد نظر از جنس SS304L ۱۶
- شکل (۴-۲) شماتیکی از نحوه‌ی اتصال پانل استوانه‌ای به فیکسچر با استفاده از پیچ‌های رزوه شده در بارگذاری ۱۷
- شکل (۵-۲) دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲، الف) بارگذاری مرکب، ب) بارگذاری محوری ۱۸
- شکل (۶-۲) تغییرات اعمال شده بر نمونه مورد آزمایش از جنس SS304L ۱۹
- شکل (۷-۲) استفاده از مهره برای جلوگیری از چرخش ۲۰
- شکل (۸-۲) تقویت صفحه بالایی برای جلوگیری از خمش ۲۰
- شکل (۹-۲) الف) شماتیک بارگذاری بر روی نمونه در بارگذاری مرکب، ب) بارهای ایجاد شده در مقطع پانل استوانه‌ای در بارگذاری مرکب (V نیروی برشی، F نیروی محوری و M گشتاور خمشی) ۲۱
- شکل (۱۰-۲) رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L ۲۲
- شکل (۱۱-۲) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل از جنس SS304L ۲۳
- شکل (۱۲-۲) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L ۲۴
- شکل (۱۳-۲) طول عمر قطعه بر حسب طول نمونه از جنس SS304L ۲۵

- شکل (۲-۱۴) پانل‌های استوانه‌ای آزمایش شده با سه طول مختلف از جنس SS304L ۲۵
- شکل (۲-۱۵) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول‌های ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L ۳۰
- شکل (۲-۱۶) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای طول‌های ۱۷۵، ۱۹۵ و ۳۶۰ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L ۳۰
- شکل (۲-۱۷) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۱
- شکل (۲-۱۸) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۲۹۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۲
- شکل (۲-۱۹) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۲
- شکل (۲-۲۰) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل استوانه‌ای با طول ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۳
- شکل (۲-۲۱) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل استوانه‌ای با طول ۲۹۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۴
- شکل (۲-۲۲) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل استوانه‌ای با طول ۳۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۴
- شکل (۲-۲۳) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۵
- شکل (۲-۲۴) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول ۲۹۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۶
- شکل (۲-۲۵) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول ۳۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۶
- شکل (۲-۲۶) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای طول ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۷
- شکل (۲-۲۷) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای طول ۲۹۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L ۳۸

- شکل (۲-۲۸) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای طول ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L..... ۳۸
- شکل (۲-۲۹) گشودگی دایروی در میانه‌ی پانل استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی قبل و بعد از شکست..... ۳۹
- شکل (۲-۳۰) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر با و بدون گشودگی دایروی تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L..... ۴۰
- شکل (۲-۳۱) رفتار پانل استوانه‌ای با گشودگی دایروی در میانه‌ی آن تحت بارگذاری محوری تناوبی..... ۴۱
- شکل (۲-۳۲) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر با و بدون گشودگی دایروی تحت بارگذاری محوری تناوبی از جنس SS304L..... ۴۱
- شکل (۲-۳۳) اثر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای دارای گشودگی با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L..... ۴۳
- شکل (۲-۳۴) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای پانل استوانه‌ای دارای گشودگی با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی چند مرحله‌ای از جنس SS304L..... ۴۴
- شکل (۲-۳۵) زاویه‌ی مرکزی و شعاع پانل از جنس Ck45..... ۴۵
- شکل (۲-۳۶) هندسه‌ی یک پانل با زاویه‌ی ۱۸۰ درجه از جنس Ck45..... ۴۵
- شکل (۲-۳۷) نمودار تنش-کرنش ماده مورد تحقیق حاصل از کشش استاندارد..... ۴۶
- شکل (۲-۳۸) سر دنده و فیکسچر مورد استفاده در آزمایش..... ۴۸
- شکل (۲-۳۹) یک نمونه پانل ۹۰ درجه تحت آزمایش از جنس Ck45..... ۴۸
- شکل (۲-۴۰) حلقه هیستریزیس نیرو-جابجایی مربوط به پانل ۹۰ درجه با طول ۳۶۰ میلی متر از جنس Ck45..... ۴۹
- شکل (۲-۴۱) رفتار کرنش رچتینگ پانل‌ها با زوایای مختلف بر حسب تعداد سیکل بارگذاری از جنس Ck45..... ۵۰
- شکل (۲-۴۲) رفتار نرخ کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل از جنس Ck45..... ۵۱
- شکل (۲-۴۳) رفتار طول عمر نمونه‌ها بر حسب زاویه‌ی پانل از جنس Ck45..... ۵۲
- شکل (۲-۴۴) پانل‌های استوانه‌ای آزمایش شده با زوایای ۳۵۵، ۲۷۰، ۱۸۰ و ۹۰ درجه به طول ۳۶۰ میلی متر از جنس Ck45..... ۵۳
- شکل (۲-۴۵) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های با زوایای ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۵۵ درجه از جنس Ck45..... ۵۴

شکل (۲-۴) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای زاویه‌ی پانل ۹۰ درجه و طول ۳۶۰ میلی متر از جنس Ck45..... ۵۵

شکل (۳-۱) نیم سیکل نخست آزمایش کشش یک بعدی..... ۶۴

شکل (۳-۲) پانل استوانه‌ای مدل شده در نرم افزار آباکوس تحت بارگذاری مرکب تناوبی..... ۶۵

شکل (۳-۳) پانل استوانه‌ای دارای گشودگی المان بندی شده..... ۶۶

شکل (۳-۴) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۶۰ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L..... ۶۷

شکل (۳-۵) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۲۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L..... ۶۸

شکل (۳-۶) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L..... ۶۸

شکل (۳-۷) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل استوانه‌ای دارای گشودگی دایروی با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری محوری تناوبی از جنس SS304L..... ۷۰

شکل (۳-۸) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل استوانه‌ای دارای گشودگی دایروی با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L..... ۷۰

شکل (۳-۹) تغییر شکل انجام شده برای پانل استوانه‌ای دارای گشودگی دایروی با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر از جنس SS304L تحت بارگذاری مرکب تناوبی در سیکل ۵..... ۷۱

شکل (۳-۱۰) جابجایی رچتینگ پانل بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول‌های مختلف تحت بارگذاری مرکب تناوبی در نتایج عددی از جنس SS304L..... ۷۲

شکل (۳-۱۱) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی از جنس SS304L..... ۷۳

شکل (۳-۱۲) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۲۹۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی از جنس SS304L..... ۷۳

شکل (۳-۱۳) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی از جنس SS304L..... ۷۴

فهرست علائم

جابجایی رجتینگ پانل استوانه‌ای (mm)	X_r
طول مؤثر پانل استوانه‌ای (mm)	L_{eff}
نیروی میانگین (kN)	F_m
نیروی دامنه (kN)	F_a
کرنش رجتینگ پانل استوانه‌ای	ϵ_r

فصل ۱

مقدمه‌ای بر پانل‌ها و رچتینگ

۱-۱- تعریف و کاربرد پانل‌ها

اگر قسمتی از یک پوسته‌ی استوانه‌ای بسته در امتداد محوری جدا شود، در این صورت پوسته‌ی استوانه‌ای باز و یا پانل استوانه‌ای نامیده می‌شود [۱]. سازه‌های جدار نازک به سازه‌هایی نسبت داده می‌شود که اجزای تشکیل دهنده‌ی آن دارای ضخامت بسیار کمتری نسبت به ابعاد دیگرشان باشد از این رو این عناصر در رسته‌ی سازه‌های دو بعدی به حساب می‌آیند [۲]. معیاری که برای تعریف یک پانل استوانه‌ای نازک بکار برده می‌شود، این است که باید نسبت ضخامت به شعاع کمتر از $0/1$ باشد، این نسبت در مواردی به کمتر از $0/05$ نیز می‌رسد [۳].

وزن کم و استحکام زیاد پانل‌ها، باعث شده تا بخش قابل توجهی از اجزای سازه‌های صنایع مختلف را به خود اختصاص دهند [۴]. این خواص ناشی از طبیعت هندسی آن‌ها است. پانل‌ها در صنایع هوافضا مانند هواپیماها، بالگردها و موشک‌ها، صنایع خودروسازی، سازه‌های معدنی و سازه‌های دریایی کاربردهای فراوانی دارند (شکل (۱-۱)). به دلیل نازک بودن پانل‌ها، اصولاً مقاومت عمود بر سطح آن‌ها کم است و بنابر شاخصه‌ی فیزیکی‌شان، نیروهای خارجی را به وسیله‌ی مقاومت غشایی جذب می‌کنند.



شکل (۱-۱) کاربرد پانل‌های استوانه‌ای در سازه‌های صنایع مختلف (برگرفته از سایت www.nal.res.ir)

پانل‌های استوانه‌ای در کاربرهای مختلف ممکن است تحت بارگذاری‌های محوری و مرکب تناوبی قرار گیرند. برای طراحی یک پانل استوانه‌ای تحت بار فشاری لازم است باری که پانل تحت آن کمانش می‌کند، محاسبه شود. کمانش به مفهوم تغییر شکل ناگهانی سازه در برابر بار وارده بر آن است. هرگونه تغییر قابل توجه در هندسه و بار می‌تواند این تغییر شکل را ایجاد کند [۵]. همچنین این اجزا بیشتر در بعضی قسمت‌ها، ناپیوستگی‌هایی مانند گشودگی‌ها دارند که این ناپیوستگی‌ها می‌توانند در پایداری سازه تاثیرگذار باشند. به دلیل پیچیدگی معادلات و شرایط مرزی حاکم بر پانل‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، تاکنون رابطه‌ی دقیقی برای بار کمانش این پانل‌ها ارائه نشده است و پژوهش‌های انجام شده در این زمینه محدود به روش‌های عددی و تجربی هستند.

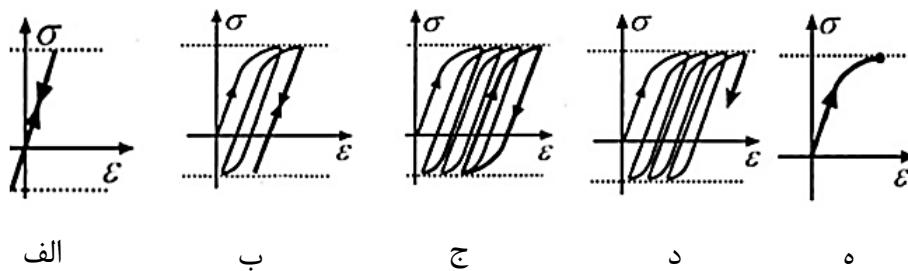
۱-۲- رجتینگ

سازه‌های مهندسی عموماً تحت بارگذاری سیکلی یا تناوبی می‌باشند که این بارگذاری می‌تواند تحت یک تنش میانگین و یا یک کرنش میانگین باشد. این سازه‌ها ممکن است تحت بارگذاری محوری، پیچشی و یا مرکب تناوبی قرار گیرند. فلز تحت تنش تکراری یا نوسانی، در تنشی به مراتب کمتر از تنش لازم برای شکست در اثر یک مرتبه اعمال بار، خواهد شکست. به طور کلی وقتی که جسمی تحت بارگذاری سیکلی قرار گیرد ممکن است که هر یک از حالت‌های زیر رخ دهد:

الف- الاستیک خالص^۱، ب- شیک‌دان الاستیک^۲، ج- شیک‌دان پلاستیک^۳، د- رجتینگ^۴، ه- فروپاشی^۵.

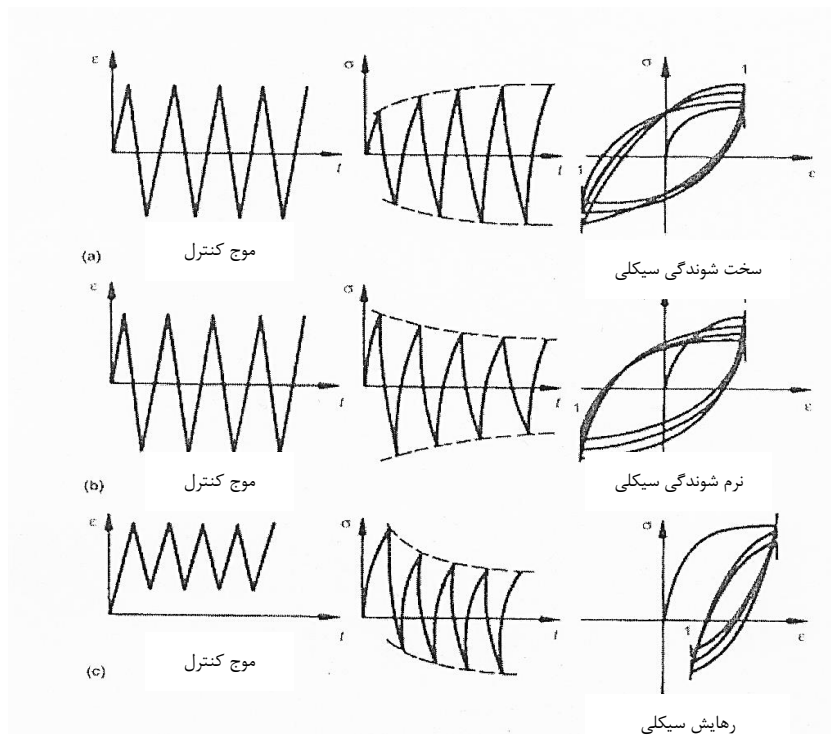
در شکل (۱-۲) هر یک از این حالت‌های فوق الذکر نشان داده شده است [۶].

-
- 1- Pure Elastic
 - 2- Elastic Shakedown
 - 3- Plastic Shakedown
 - 4- Ratcheting
 - 5- Collapse



شکل (۲-۱) حالت‌های مختلف ماده تحت بارگذاری‌های تناوبی [۶]

رفتار تغییر شکل سیکلی، همانند کار نرمی^۱ یا کار سختی^۲ سیکلی، اشاره به تغییری پیوسته در استحکام سیکلی دارد که ممکن است در سراسر آزمایش خستگی یا حداقل در مراحل اولیه تغییر شکل سیکلی رخ دهد. طرح‌های مربوط به رفتار کارسختی سیکلی ماده که در شکل (۳-۱) ارائه شده-اند، نشان دهنده تغییرات مربوط به تنش سیکلی و شکل حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش سیکلی در یک آزمایش تحت کنترل-کرنش توسط اعمال سیگنالی مثلثی و با اندازه ثابت هستند.



شکل (۳-۱) طرحی از فرآیند تغییر شکل سیکلی [۷]

- 1- Work softening
- 2- Work hardening

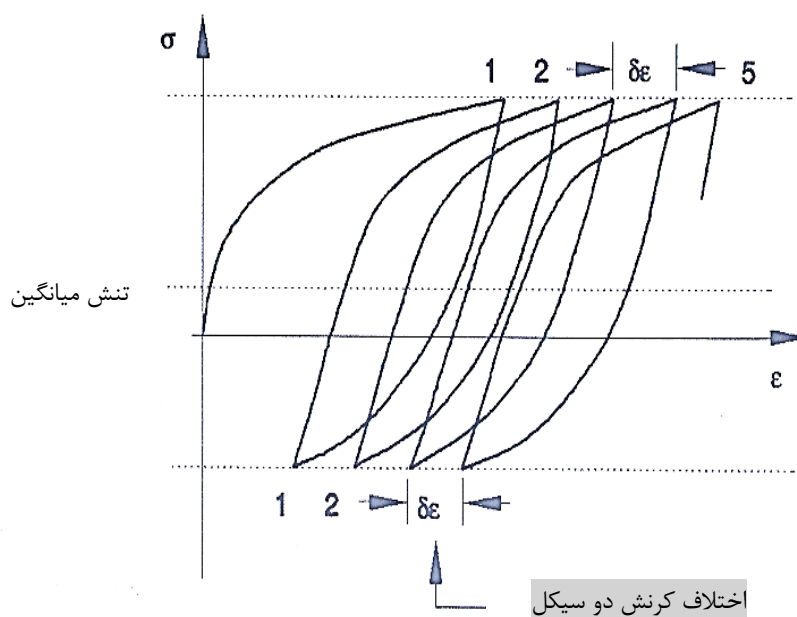
در بعضی منابع از رچتینگ به عنوان خزش سیکلی^۱ نیز یاد شده است. رچتینگ عبارتست از انباشتگی کرنش پلاستیک تحت بار سیکلی با تنش میانگین غیرصفر که در اثر تنش سیکلی و انتقال حلقه‌های هیستریزس تنش-کرنش ایجاد می‌شود. برای محاسبه‌ی مقدار رچتینگ می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$\varepsilon_r = \frac{1}{2}(\varepsilon_{max} + \varepsilon_{min}) \quad (1-1)$$

بسیاری از سازه‌های تحت بارگذاری متناوب وجود دارند که تنش در آن‌ها از حد الاستیک مواد تشکیل دهنده سازه فراتر می‌رود. به دلیل اینکه رچتینگ می‌تواند منجر به خرابی‌های فاجعه باری در این نوع سازه‌ها شود پیش بینی دقیق رچتینگ در طراحی و تحلیل این نوع سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. حتی در سازهایی که تنش‌های به وجود آمده در محدوده‌ی الاستیک می‌باشد کرنش‌های پلاستیک می‌تواند در محل تمرکز تنش و یا در نوک ترک‌ها رخ دهند و نواحی پلاستیک را به وجود آورند. ترک‌های خستگی نیز می‌توانند از همین نواحی پلاستیک شروع شوند و انتشار پیدا کنند. بنابراین برای پیش بینی خستگی‌های پرتکرار بهبود مدل‌های شبیه سازی سیکل‌های پلاستیک اهمیت می‌یابد.

به عبارت دیگر رچتینگ، یکی از پاسخ‌های خستگی کم چرخه، به عنوان انباشتگی کرنش پلاستیک که با افزایش سیکل‌ها رخ می‌دهد، تعریف شده است. برای آزمون تنش-کنترلی^۲ در حالتی که میانگین تنش کمینه و بیشینه مقداری غیر از صفر باشد، رچتینگ ایجاد خواهد شد (شکل ۱-۱).
 .((۴

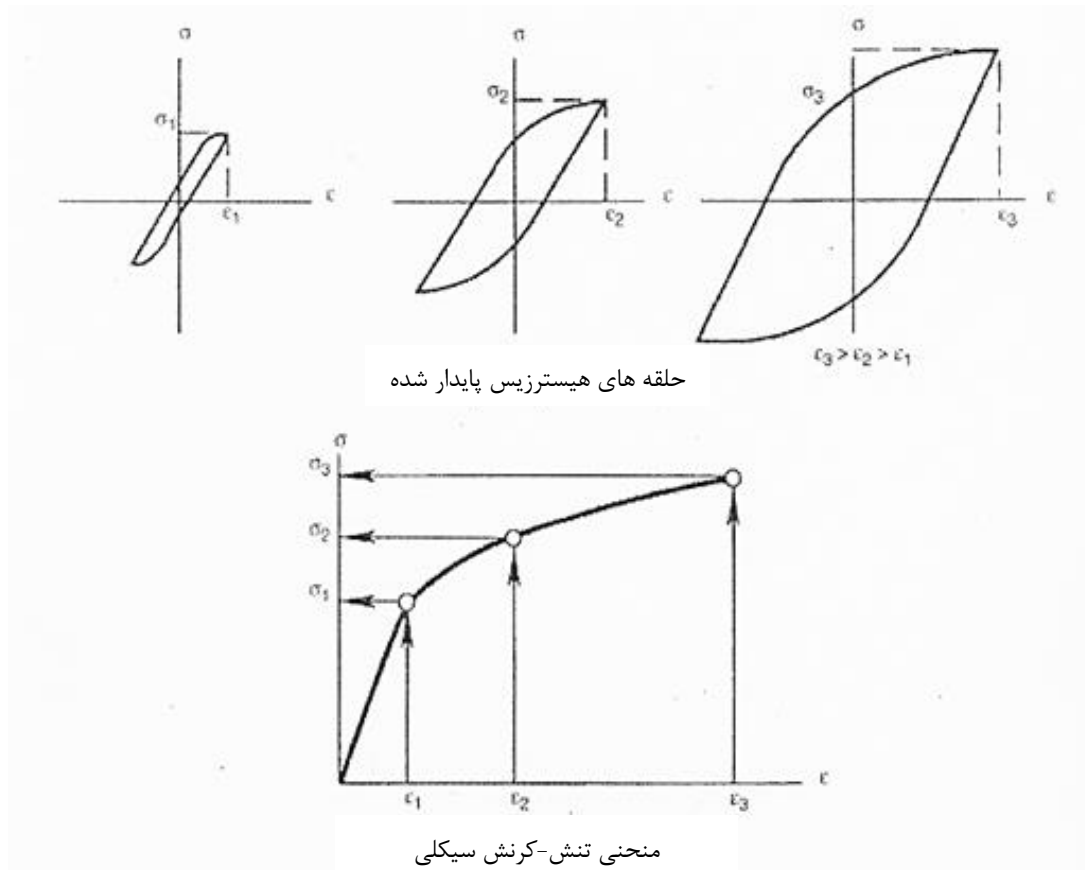
1- Cyclic creep
 2- Stress controlled



شکل (۱-۴) ایجاد پدیده‌ی رچتینگ و در نهایت گسیختگی [۸ و ۹]

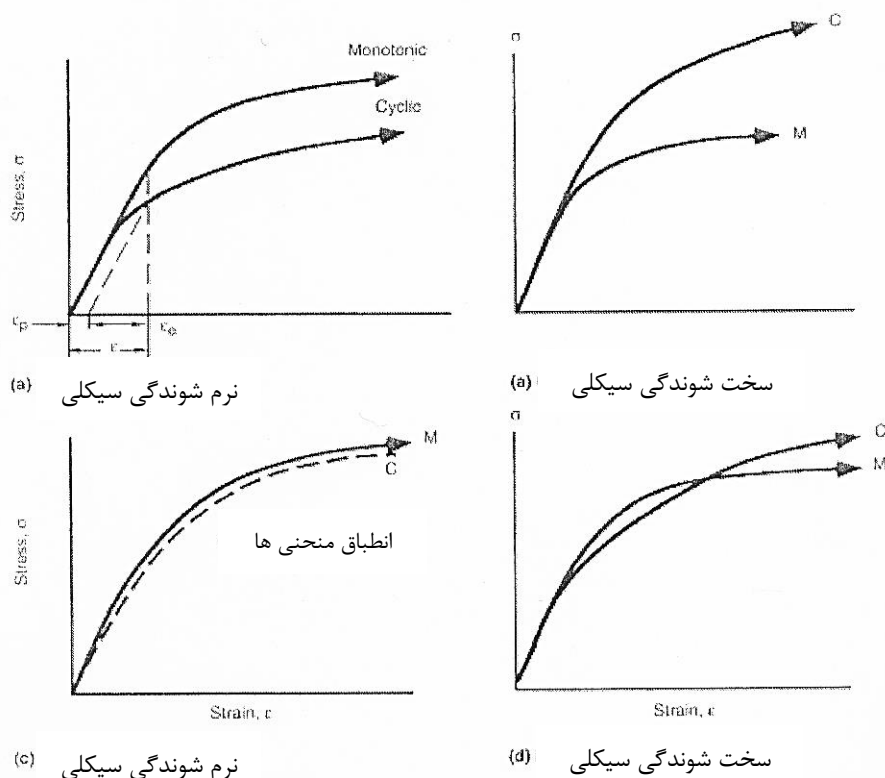
بنابراین به منظور توسعه و بررسی یک مدل پایه برای شبیه سازی رچتینگ، ضروری است که نحوه‌ی پاسخ رچتینگ مواد مطالعه شود. بعد از رسیدن به یک مدل مناسب برای پیش بینی رچتینگ سیکل‌های پایداری مواد، می‌توان آن را برای سخت شونده‌گی و نرم شونده‌گی سیکلی مواد بسط داد. مدل سازی رچتینگ ناشی از بارگذاری تک محوره به طور ذاتی با مدلی که برای شبیه سازی رچتینگ ناشی از بارگذاری چند محوره باشد، تفاوت دارد.

منحنی تنش-کرنش سیکلی برای آزمایش خستگی کم چرخه توسط اتصال رئوس مربوط به منحنی‌های هیستریزس پایدار شده در مقادیر کرنش سیکلی متفاوت، قابل دستیابی است (شکل ۱-۵). لازم به ذکر است که برخی از پارامترهای مورد استفاده در توسعه مدل‌های مربوط به عمر-کرنش سیکلی از منحنی تنش-کرنش سیکلی استخراج می‌شوند.



شکل (۵-۱) بدست آوردن منحنی تنش-کرنش سیکلی که از اتصال رئوس حلقه های هیستریزس پایدار شده بدست آمده است [۷]

معمولاً یک حلقه هیستریزس پایدار شده، به صورت حلقه هیستریزس در ۵۰ درصد عمر خستگی تعریف می شود. برای ارزیابی کمی تغییرات در رفتار سیکلی مکانیکی ماده، منحنی تنش-کرنش سیکلی را می توان مستقیماً با منحنی تنش-کرنش غیر سیکلی مقایسه کرد. باید توجه کرد که کسر ۵۰ درصد از عمر خستگی ممکن است مقدار همیشگی برای تعیین حالت پایدار نباشد؛ لیکن در هر حالتی مقدار مورد استفاده باید در گزارش های ارائه شده برای منحنی تنش-کرنش سیکلی ذکر شود. مثال هایی از انواع متفاوت منحنی های تنش-کرنش سیکلی در شکل (۶-۱) ارائه شده است.

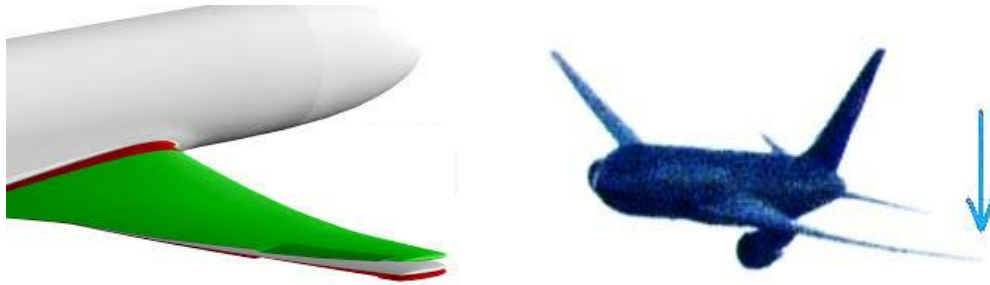


شکل (۶-۱) انواع متفاوت منحنی‌های تنش-کرنش سیکلی [۷]

با توجه به شکل (۶-۱) هنگامی که یک ماده دارای رفتار کار نرمی است، استحکام تسلیم سیکلی به میزان قابل توجهی پایین‌تر از مقدار استحکام تسلیم غیر سیکلی است. هنگامی که حالت پایدار منحنی هیستریزیس ۲۰ تا ۴۰ درصد از عمر کل (در آزمایش بصورت کنترل شونده با اندازه ثابت) در نظر گرفته می‌شود، یک فرابارگذاری منفرد و بزرگ در طول سرویس‌دهی واقعی ماده، می‌تواند باعث تغییری ناگهانی از منحنی غیر سیکلی به منحنی سیکلی گردد.

همانطور که در قبل اشاره شد پانل‌های استوانه‌ای به دلیل وزن کم و استحکام زیاد، باعث شده تا بخش قابل توجهی از اجزای سازه‌های صنایع مختلف را به خود اختصاص دهند؛ از جمله در صنایع هوافضا مانند هواپیماها، بالگردها، موشک‌ها، صنایع خودروسازی، سازه‌های معدنی و سازه‌های دریایی. احتمال رخداد پدیده‌ی رچتینگ در هر یک از این سازه‌ها وجود دارد. در شکل (۷-۱) بال یک هواپیما

نشان داده شده است که در قسمت ابتدا و انتهای بال تحت بارگذاری سیکلی قرار گرفته است. بال هواپیما در صنایع هوافضا نمونه‌ی پرکاربردی از رچتینگ پانل‌های استوانه‌ای می باشد.



شکل (۷-۱) رچتینگ پانل‌ها در صنایع هوافضا در بال هواپیما (برگرفته از سایت www.asd-europe.org)

۳-۱- مروری بر کارهای انجام شده

اگرچه مقدار کرنش پلاستیک در یک سیکل بارگذاری کم می باشد، اما انباشتگی آن‌ها در یک جهت در طول بارگذاری، قابل ملاحظه است. از آنجایی که پلاستیسیته سیکلی، یک انباشتگی منظم تحت تنش با مقدار میانگین غیر صفر می باشد، شبیه سازی و تعیین رفتار دقیق آن به آسانی امکان پذیر نبوده و علاوه بر آن، مدل‌های ساختاری سیکلی برگرفته از نتایج آزمایشگاهی نیز تاکنون به طور کامل قادر به تعیین دقیق رچتینگ نیستند و با توجه به اینکه در سال‌های گذشته در زمینه‌ی رچتینگ پانل‌های استوانه‌ای اقدامات قابل توجهی انجام نشده است؛ لذا در اینجا از کارهای انجام شده در زمینه‌ی کماتش پانل‌های استوانه‌ای که در واقع بیانگر رفتار یک نیم سیکل از رفتار رچتینگ می باشد، نام برده شده است.

افخمی و همکاران [۱۰] در مورد پایداری یک پانل استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای شکل در حالت الاستیک به روش تحلیلی مورد بررسی قرار دادند و مشاهده کردند که تاثیر ضخامت پانل بر بار

کمانش بحرانی در مقایسه با تاثیر شعاع، بیشتر می‌باشد. همچنین مشاهده کردند که با افزایش ضخامت پوسته، بار و تنش بحرانی بی بعد، افزایش می‌یابد.

برمن و همکاران [۱۱] یک مدل تحلیلی برای بررسی پس کمانش پانل‌های استوانه‌ای تقویت شده ارائه دادند. آن‌ها از روش ریکس^۱ برای حل معادلات و از نرم افزار ABAQUS برای مطابقت مدل خود با روش تحلیلی استفاده کردند و مشاهده کردند که برای پانل‌هایی که نسبت طول به عرض آن‌ها بیشتر از ۲ می‌باشد، رفتار پس کمانش منظم و در راستای طولی است.

شریعتی و همکاران [۱۲] به کمک روش عددی و تجربی به کمانش و پس کمانش پانل‌های استوانه‌ای ترک‌دار تحت بارگذاری محوری پرداختند. آن‌ها تاثیر پارامترهای هندسی مختلف مانند طول ترک، موقعیت ترک، زاویه ترک و طول پانل بروی رفتار کمانش و پس کمانش پانل استوانه‌ای ترک‌دار را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که ترک با زاویه ۴۵ درجه بیشترین و ترک افقی، کمترین تاثیر بر روی بار کمانش را به همراه دارد. همچنین دریافتند که با افزایش طول ترک، بار کمانش کاهش می‌یابد.

جیانگ و همکاران [۱۳] روش المان یک چهارم دیفرانسیلی برای تحلیل کمانش پانل استوانه‌ای تقویت شده تحت تنش محوری یکنواخت مورد استفاده قرار دادند. روش پیشنهادی آن‌ها برای کمانش پانل‌های استوانه‌ای تقویت شده، نزدیکی قابل قبولی با نتایج دیگر روش‌ها داشت.

چاپلین و پالازوتو [۱۴] با استفاده از روش المان محدود و تحلیل عددی، کمانش پانل‌های استوانه‌ای کامپوزیتی با ضخامت‌های مختلف و دارای گشودگی مرکزی تحت فشار محوری را بررسی کردند.

1- Riks method

افخمی و همکاران [۱۵] پایداری یک پانل استوانه‌ای با مقطع دایره‌ای شکل را در حالت الاستیک به دو روش تحلیلی و عددی مورد بررسی قرار دادند. در تحلیل آن‌ها معادلات دانل برای کمانش پانل و روش گالرکین در تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفته شد و مشاهده کردند که با افزایش قیدها در پانل همانند حالتی که سه یا چهار طرف پانل دارای تکیه‌گاه باشد، بار و تنش بحرانی کمانش چند برابر افزایش می‌یابد.

ال راهب [۱۶] پاسخ پانل استوانه‌ای مقید از حرکت در راستای لبه‌های صاف و تکیه‌گاه‌های ساده در لبه‌های منحنی شکل تحت فشار یکنواخت شعاعی را بصورت تحلیلی مورد مطالعه قرار داد. شریعتی و همکاران [۱۷] رفتار کمانش و پس کمانش پانل‌های استوانه‌ای فولادی جدار نازک با تکیه‌گاه ساده و گیردار به صورت تجربی و عددی را مورد تحلیل قرار دادند و دریافتند تکیه‌گاه گیردار تحمل بار کمانش بیشتری را نسبت به تکیه‌گاه ساده دارد.

پناهنده و همکاران [۱۸] آنالیز غیر خطی کمانش عرضی پانل‌های استوانه‌ای با تکیه‌گاه ثابت را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها از روش رایلی-ریتز^۱ و کیرشهف-لاو^۲ برای تاثیر پارامترهای هندسی پانل‌های استوانه‌ای استفاده کردند و مشاهده کردند که تعداد طول موج بوجود آمده به پارامترهای موثر از قبیل زاویه‌ی مرکزی و نسبت وجوه بستگی دارد و بار کمانش با افزایش مدول فونداسیون^۳ افزایش می‌یابد.

اشمیلز [۱۹] تحلیل عددی و تجربی کمانش پانل‌های استوانه‌ای کامپوزیتی^۴ با گشودگی را مورد مطالعه انجام داد. او مشاهده کرد، گشودگی منجر به کاهش نیروی کمانش تا ۵۰ درصد می‌گردد. شریعتی و همکاران [۲۰] رفتار نهایی پانل‌های استوانه‌ای از جنس فولاد Ck20 تحت بارگذاری محوری و مرکب، با استفاده از آزمایش‌های تجربی متعدد مورد مطالعه قرار دادند و دریافتند که

1-Rayleigh-Ritz method

2- Kirchhoff-Love's hypotheses

3- Foundation

4- Composite

کمانش پانل استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب نسبت به بارگذاری محوری بسیار کمتر است. همچنین آن‌ها تاثیر طول و زاویه‌ی پانل را مطالعه کردند و دریافتند که افزایش طول به ازای طول‌های نسبتاً کم، تا حدودی منجر به کاهش بار کمانش بحرانی می‌شود ولی در طول‌های بلند بار بحرانی کمانش مستقل از طول پانل است. همچنین افزایش زاویه‌ی پانل از ۹۰ درجه به ۱۲۰ درجه باعث افزایش بار کمانش می‌گردد؛ ولی از ۱۲۰ تا حدود ۳۵۵ درجه تاثیر چندانی بر کمانش ندارد و با نزدیک شدن شکل هندسی پانل به هندسه‌ی کامل، بار کمانش بحرانی افزایش می‌یابد.

مگنوک‌ی و ماکیویس [۲۱] کمانش الاستیک پانل‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری را بصورت تحلیلی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پانل‌های استوانه‌ای دارای سه تکیه‌گاه ساده و یک لبه آزاد را با استفاده از معادلات دائل مورد مطالعه قرار دادند.

تونگ [۲۲] در زمینه‌ی کمانش و پس کمانش پانل‌های استوانه‌ای تحت بارهای گرمایی و مکانیکی بصورت تحلیلی به مطالعه پرداخت. او خواص مواد را با توجه به دمای اتاق و معادلات بدست آمده را بر اساس روش ترکیبی غیر خطی ون کارمن و دائل، مد نظر قرار داد.

ایپک‌چی و شریعتی [۲۳] کمانش پانل‌های استوانه‌ای تحت بار محوری را با استفاده از روش پرتوربیشن^۱ مورد مطالعه قرار دادند و نتایج تحلیلی را با روش عددی مورد مقایسه قرار دادند.

هو و یانگ [۲۴] در زمینه‌ی بهینه‌سازی کمانش پانل‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری نتایجی را بدست آوردند و مشاهده کردند که نیروی کمانش بهینه برای پانل‌های بدون گشودگی جدار نازک، با اعمال شرایط مرزی در لبه‌های منحنی شکل پانل بدست می‌آید.

1- Perturbation

فصل ۲

تحليل تجربي

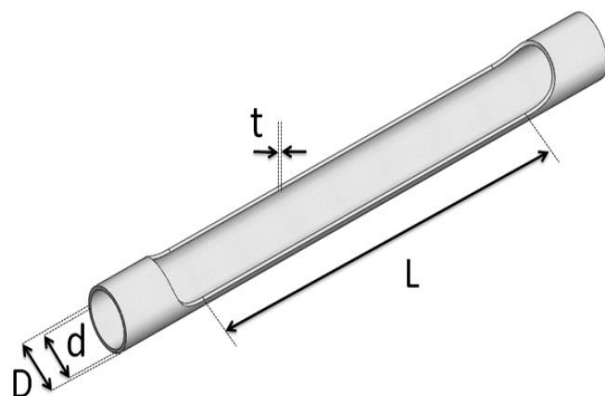
۲-۱- مقدمه

در این فصل رفتار رچتینگ پانل‌های استوانه‌ای فولادی ضدزنگ SS304L تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی و همچنین رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای از جنس فولاد Ck45 تحت بارگذاری محوری تناوبی مورد مطالعه قرار گرفته است. برای چندین نمونه آزمایش تجربی رچتینگ به کمک دستگاه سرو هیدرولیک INSTRON 8802 انجام شده است، بطوریکه پانل‌های استوانه‌ای از جنس SS340L بصورت عمودی و مایل تحت زاویه‌ی ۲۰ درجه نسبت به محور عمود قرار گرفته و بار تناوبی به آن‌ها اعمال شده است. در این فصل تاثیر طول و زاویه‌ی پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ و انرژی پلاستیک مورد تحلیل قرار گرفته است. همچنین پانل‌های استوانه‌ای با گشودگی دایروی در میانه‌ی پانل بصورت مایل و عمودی مورد مطالعه قرار گرفته و با پانل‌های استوانه‌ای بدون گشودگی مقایسه شده‌اند. پانل‌های استوانه‌ای از جنس Ck45 با زوایای مختلف و طول یکسان تحت بار محوری با حداکثر تنش برابر $\sigma_y / 0.5$ به صورت سیکلی قرار گرفته‌اند.

۲-۲- رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای از جنس SS304L

۲-۲-۱- هندسه نمونه‌ها

در این تحقیق پانل‌های استوانه‌ای از ورق فولادی به ضخامت یکسان ۱/۵ میلی متر و طول‌های موثر ۱۷۵، ۲۹۵، ۳۷۵ میلی متر و قطر خارجی ۲۵ میلی متر تحلیل شده‌اند. در شکل (۲-۱)، هندسه‌ی نمونه‌های مورد تحلیل نشان داده شده است که در آن D قطر بزرگ، d قطر کوچک، L طول موثر نمونه، t ضخامت متوسط است. مقادیر فوق در پانل‌ها بصورت D25-L175-t1.5 و D25-L295- و D25-L375-t1.5 می باشند.



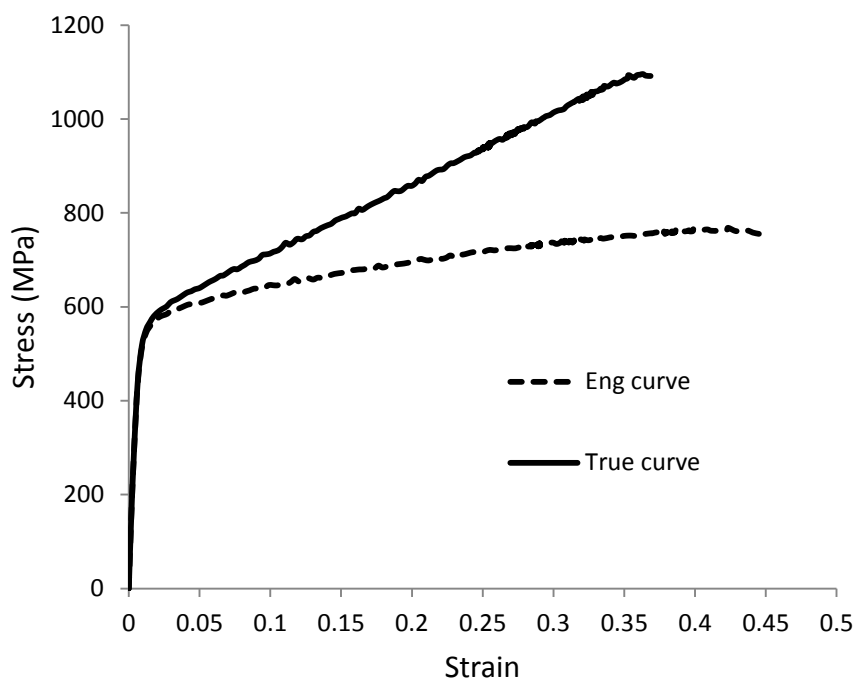
شکل (۱-۲) هندسه‌ی نمونه‌های مورد تحلیل از جنس SS304L

۲-۲-۲- خواص مکانیکی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد مطالعه از فولاد ضد زنگ SS304L ساخته شده‌اند. خصوصیات مکانیکی فولاد مورد نظر طبق استاندارد ASTM E8 [۲۶] و به‌وسیله INSTRON 8802 تعیین شده است (شکل (۲-۲)). نمودار تنش-کرنش واقعی و مهندسی در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۳-۲) مدول کشسانی برابر با ۲۰۲ GPa، تنش تسلیم برابر با ۵۱۳ MPa و تنش نهایی برابر MPa ۷۶۸ به‌دست می‌آید. ضریب پواسون نیز ۰/۳۳ فرض شده است.



شکل (۲-۲) دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ و استفاده از طول سنج برای آزمایش کشش استاندارد



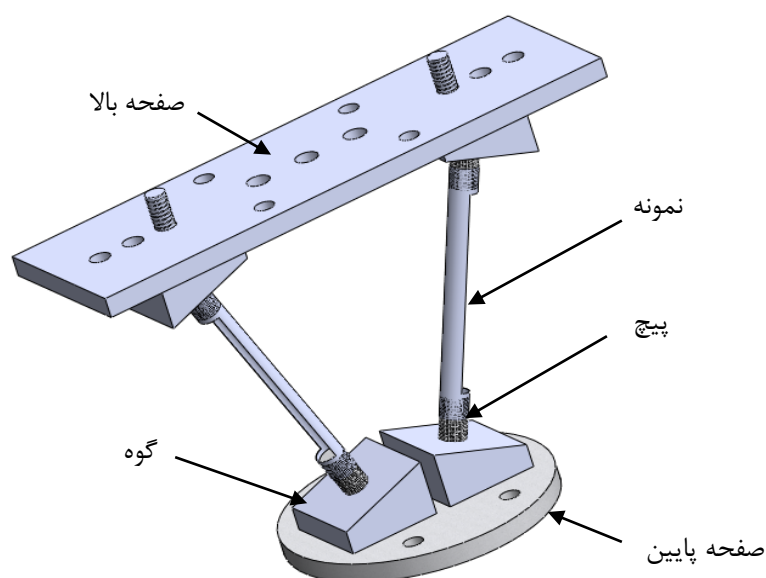
شکل (۳-۲) نمودار تنش-کرنش واقعی و مهندسی فولاد SS304L

۳-۲-۲- خواص شیمیایی نمونه‌ها

فولاد ضد زنگ 304، به دلیل مقاومت بالا در برابر تنش و خوردگی کاربرد فراوانی در صنایع دارد. این فولاد دارای سه نوع 304، 304L و 304H می باشد. نوع 304L از رده فولاد دارای کربن کم فولاد ضد زنگ 304 می باشد. این نوع فولاد به دلیل قابلیت جوشکاری بهتر نسبت به نوع 304، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد. 304L در بعضی منابع با نام قدیمی خود ۱۸/۸ ارجاع داده می شود. این نام گذاری به دلیل وجود عنصر شیمیایی کروم به میزان ۱۸ درصد و نیکل ۸ درصد انتخاب شده است. عناصر تشکیل دهنده 304L، شامل کربن ۰/۰۳ درصد، سیلیسیم ۱ درصد، منگنز ۲ درصد، فسفر ۰/۰۴۵ درصد، گوگرد ۰/۰۳ درصد، کروم ۱۸ درصد، نیکل ۸ درصد و نیتروژن ۰/۱ درصد می باشد [۲۵].

۲-۲-۴- شرایط مرزی

برای اعمال بارگذاری مرکب و قرار گیری پانل به صورت زاویه دار نسبت به خط عمود، از فیکسچرهای گوه‌ای استفاده شده است. جنس فیکسچر از فولاد St37 می باشد. پیچ‌های رزوه شده با طول مشخص نیز به مقدار ۲۰ میلی متر درون دو انتهای پانل قرار گرفته و از طریق جوش آرگون به لبه‌های پانل جوش شده اند. بنابراین طول مؤثر پانل با کاهش ۲۰ میلی متر از هر طرف آن بدست می‌آید. پیچ‌ها نیز از هر دو انتهای پانل از طریق سوراخ‌های رزوه شده بر روی سطح بالایی گوه به آن متصل می شوند. از آنجایی که اعمال بارگذاری مرکب باعث ایجاد نیروهای افقی ناخواسته‌ای می‌شود، از دو نمونه پانل استوانه‌ای با شرایط بارگذاری و هندسه‌ی متقارن به منظور عدم آسیب دیدن دستگاه و فک آن، استفاده شده است. بار تناوبی به صفحه پایین مطابق شکل (۲-۴) به ابتدای پانل‌ها اعمال می شود. در بارگذاری محوری، پانل‌ها به طور مستقیم و عمودی به فک‌های بالا و پایین دستگاه متصل شده و تحت بار محوری تناوبی قرار می‌گیرند که نتیجه‌ی آن، تنها ایجاد نیروی محوری در پانل استوانه‌ای است.



شکل (۲-۴) شماتیکی از نحوه‌ی اتصال پانل استوانه‌ای به فیکسچر با استفاده از پیچ‌های رزوه شده در بارگذاری

۵-۲-۲- دستگاه آزمایش

آزمایش‌های انجام گرفته در این مطالعه با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده است که توانایی اعمال بار دینامیکی تا مقدار ظرفیت ۲۵۰ کیلونیوتن را دارد (شکل (۵-۲)). برای بدست آوردن جابجایی با دقت بالاتر در آزمایش کشش استاندارد، از طول سنج^۱ نیز استفاده شده است.

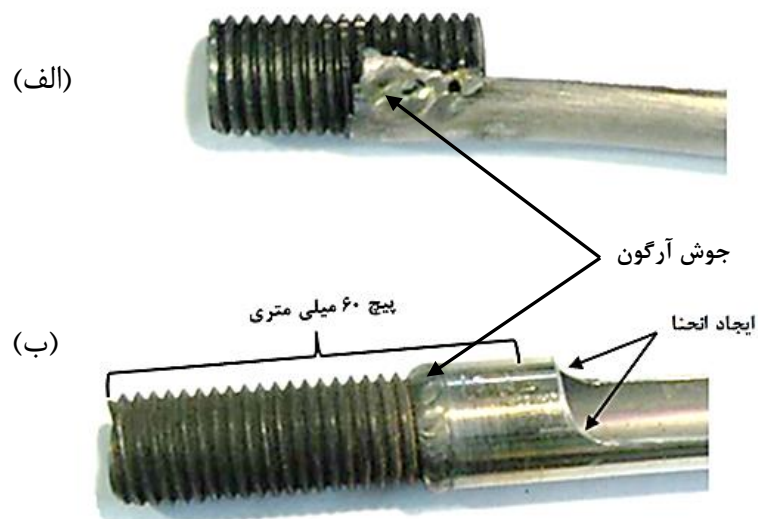


شکل (۵-۲) دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲، (الف) بارگذاری مرکب، (ب) بارگذاری محوری

1- Extensometer

۲-۲-۶- جزئیات ساخت

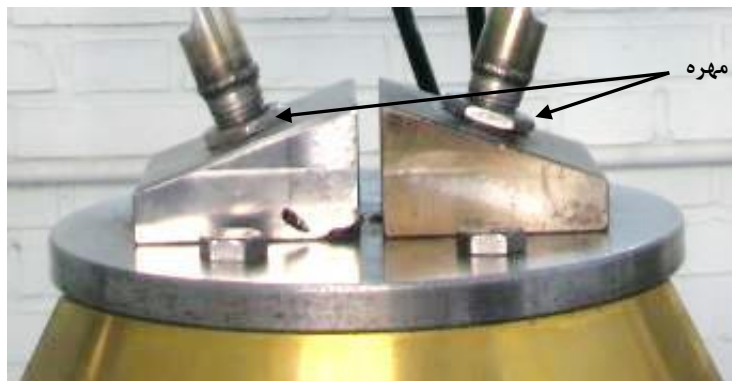
در انجام این تحقیق، ابتدا در آزمایش کشش از جوش برق جهت اتصال پیچ‌های انتهایی به پانل‌های استوانه‌ای استفاده شد. مشاهده شد که شکست نمونه‌ها از خط جوش اتفاق افتاده است، بنابراین از جوش آرگون به دلیل استحکام زیاد استفاده شد. جوش آرگون، شکست نمونه‌ها از خط جوش را برطرف ساخت، با این وجود مشاهده شد که در نمونه‌های مورد آزمایش با گذشت چند سیکل، کشیدگی زیاد و شکست از منطقه‌ای نزدیک خط جوش پیچ‌ها رخ داده است. به منظور ممانعت از ایجاد این پدیده، ۲۵ میلی متر ابتدایی نمونه‌ها به صورت پوسته در نظر گرفته شد. نوع هندسه (انحنا) در انتهای پانل، به منظور کاهش تمرکز تنش در نظر گرفته شده است (شکل ۲-۶)). همانطور که قبلاً گفته شد پیچ‌های انتهایی به مقدار ۲۰ میلی متر درون پانل قرار گرفته و سپس از اطراف جوش شده اند. علت این نوع اتصال اینست که شکست و تسلیم از انتهای طول موثر پانل و نه از انتهای جوش است.



شکل (۲-۶) تغییرات اعمال شده بر نمونه مورد آزمایش، الف) نمونه‌ی اولیه ب) نمونه‌ی اصلاح شده از جنس

SS304L

به منظور تقویت پانل‌ها برای جلوگیری از چرخش، از مهره در دو انتهای پانل استفاده شده است (شکل ۷-۲). همچنین مشاهده شد که صفحه بالایی مورد استفاده در آزمایش به دلیل بالا بودن بار اعمالی به نمونه‌ها و فیکسچر، دچار خمش قابل ملاحظه‌ای می‌گردد. به همین دلیل برای جلوگیری از خمش، از نبشی‌های نشان داده شده در شکل (۸-۲) استفاده شد.



شکل (۷-۲) استفاده از مهره برای جلوگیری از چرخش نمونه‌ها در حین آزمایش



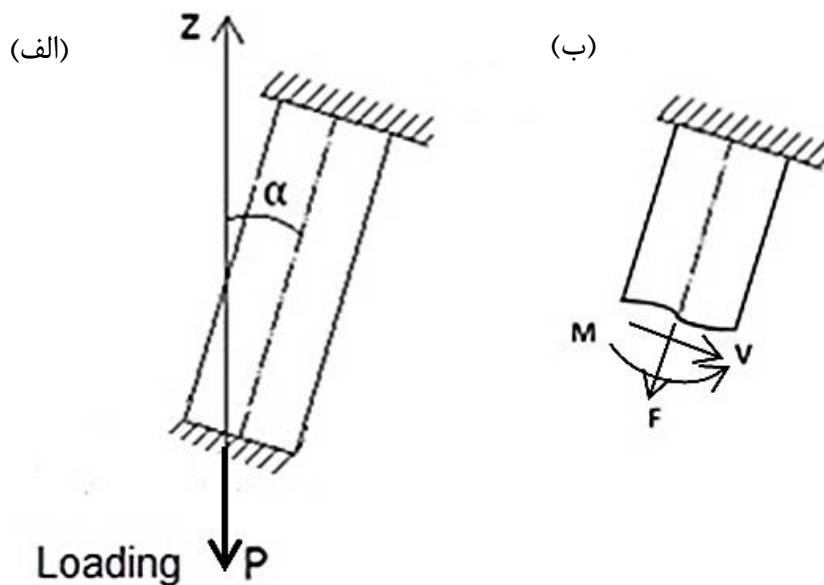
شکل (۸-۲) تقویت صفحه بالایی برای جلوگیری از خمش

۷-۲-۲- نتایج تجربی

در این قسمت پانل‌های استوانه‌ای به دو صورت عمود و مایل تحت زاویه‌ی $\alpha = 20^\circ$ قرار گرفته و بار تناوبی در شرایط نیرو-کنترل به صورت سینوسی با نیروی دامنه و نیروی میانگین یکسان $13/5 \text{ kN}$ به آن‌ها اعمال می‌شود. نرخ بارگذاری 27 kN/s در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که در بارگذاری مرکب به دلیل استفاده از دو نمونه در هر آزمایش، نیروی دامنه و نیروی میانگین 27 kN

اعمال می شود که سهم هریک از پانل‌های استوانه‌ای، نیروی دامنه و نیروی میانگین $13/5 \text{ kN}$ از بار اعمالی می باشد. در بررسی تاریخچه‌ی بارگذاری، پانل‌های استوانه‌ای دارای گشودگی تحت بارگذاری محوری قرار می گیرند. در این تحقیق، بیشترین جابجایی ابتدای پانل در هر سیکل به عنوان جابجایی رجتینگ تعریف می شود و به منظور بی بعدکردن، پارامتر X_r به عنوان نسبت جابجایی رجتینگ پانل به طول مؤثر آن تعیین می شود.

بار تناوبی از طریق فک پایین مطابق شکل (۹-۲)-الف به ابتدای پانل اعمال می شود. با برش پانل در طول‌های متفاوت، نیروی محوری، برشی و گشتاور خمشی به صورت تناوبی مطابق شکل (۹-۲)-ب در مقطع ایجاد می شود که به دلیل ضخامت کم پانل‌ها از اثر نیروی برشی صرفه نظر می شود. به عبارت دیگر شکل (۹-۲) بیانگر دیاگرام آزاد پانل استوانه‌ای است.

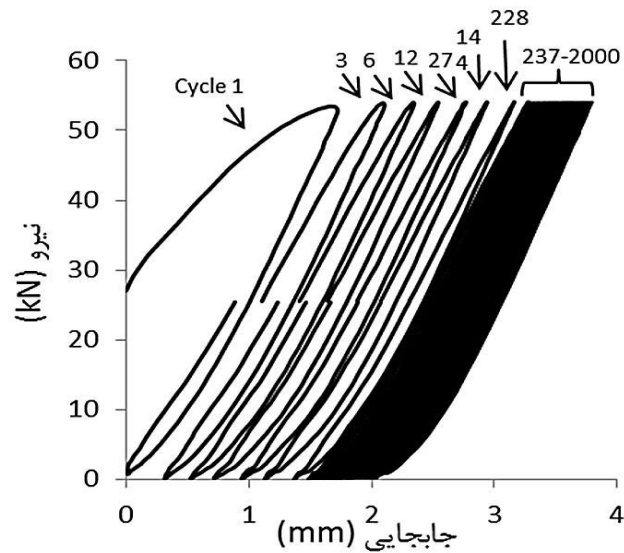


شکل (۹-۲) الف) شماتیک بارگذاری بر روی نمونه در بارگذاری مرکب، ب) بارهای ایجاد شده در مقطع پانل

استوانه‌ای در بارگذاری مرکب (V نیروی برشی، F نیروی محوری و M گشتاور خمشی)

۲-۷-۲-۱- رفتار رچتینگ در پانل استوانه‌ای

در شرایط نیرو-کنترل با تنش میانگین غیرصفر، انباشتگی تغییر شکل پلاستیک یا پدیده‌ی رچتینگ مشاهده شد. تغییر شکل سیکلی، باعث بدست آمدن یک حلقه‌ی هیستریزیس برای هر سیکل بارگذاری می‌گردد و در آزمایش‌هایی که پدیده‌ی رچتینگ رخ می‌دهد، حلقه‌ی هیستریزیس بسته نمی‌شود. در شکل (۲-۱۰)، حلقه‌های هیستریزیس نیرو-جابجایی ابتدای پانل استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب نشان داده شده است.



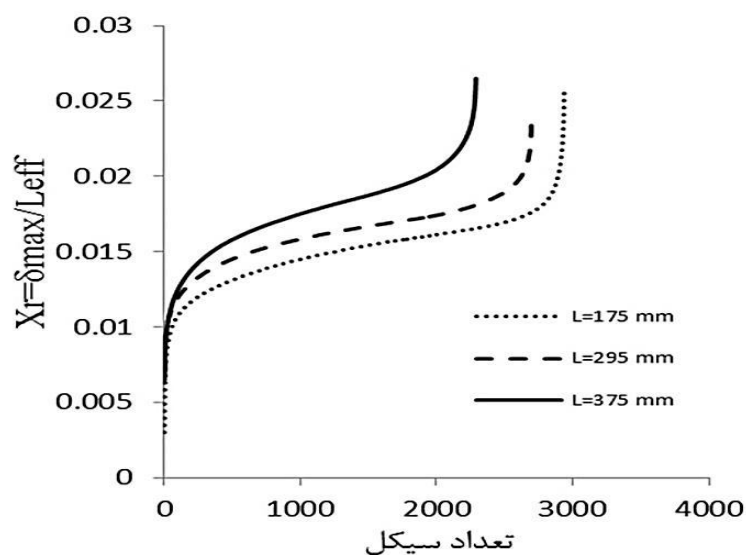
شکل (۲-۱۰) رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L

۲-۷-۲-۲- تاثیر طول پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن تحت بارگذاری

مرکب

آزمایش‌های نیرو-کنترل در محدوده‌ی سیکلی ۲۰۰۰ تا ۳۰۰۰ سیکل انجام شد و در شکل (۲-۱۱)، نسبت جابجایی رچتینگ به طول مؤثر پانل بر حسب تعداد سیکل برای سه طول مختلف نشان داده

شده است. مشاهده می‌شود برای یک طول معین پانل استوانه‌ای با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ جابجایی رچتینگ کاهش می‌یابد که این رفتار در حرکت حلقه‌های هیستریزس و نزدیک شدن حلقه‌ها به هم با افزایش تعداد سیکل در شکل (۲-۹) نیز مشاهده شد. همچنین با افزایش طول پانل‌های استوانه‌ای، جابجایی رچتینگ نیز افزایش می‌یابد که این تغییر به دلیل افزایش گشتاور خمشی و افزایش تنش‌های عمودی در مقاطع مختلف پانل‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر است. همانطور که در شکل (۲-۱۱) مشاهده می‌شود، جابجایی رچتینگ در سیکل‌های انتهایی، رفتار صعودی از خود نشان می‌دهد، علت این صعود نزدیک شدن به مرحله شکست پانل استوانه‌ای است.



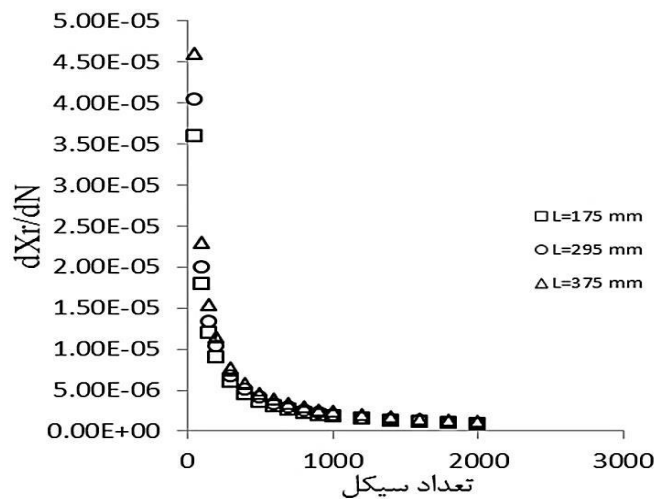
شکل (۲-۱۱) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل از جنس SS304L

۲-۷-۳- اشباع جابجایی رچتینگ در طول‌های مختلف

در شکل (۲-۱۲)، تغییرات نرخ جابجایی رچتینگ با افزایش تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول‌های ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی‌متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نرخ جابجایی رچتینگ برای هر دو طول با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد؛ اما در هر سیکل، نرخ جابجایی

رچتینگ برای پانل‌های استوانه‌ای با طول‌های مذکور اختلاف بسیار کمی نسبت به هم دارند و پانل استوانه‌ای با طول ۳۷۵ میلی متر دارای نرخ جابجایی بالاتری است. در ۵۰ سیکل ابتدایی، کاهش نرخ جابجایی رچتینگ بسیار زیاد است؛ اما در ادامه این کاهش قابل چشم پوشی می‌باشد. مقدار نرخ جابجایی رچتینگ در سیکل‌های انتهایی تقریباً ثابت و به صفر میل می‌کند.

کاهش نرخ جابجایی رچتینگ و میل کردن آن به صفر یا به عبارت دیگر توقف انباشتگی تغییرشکل پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ، به دلیل شکل‌گیری و گسترده‌ی نابجایی‌ها^۱ با تغییرشکل‌های سیکلی است. وقتی که ماده ای تحت تغییرشکل‌های سیکلی است، نابجایی‌هایی در ساختار آن در نتیجه‌ی سخت‌شوندگی کرنشی تولید می‌شوند. این نابجایی‌ها، ابتدا به حالت آشفته قرار گرفته‌اند و سپس با افزایش تعداد سیکل، به شکل المان‌های نابجایی منظم در می‌آیند [۲۷]. پس از تعداد سیکل معین (بستگی به کرنش‌های سیکلی اعمالی دارد)، نابجایی‌های تولید شده‌ی جدید، شکل‌بندی پایدار و منظمی به خود گرفته و این تغییر موجب کاهش و صفر شدن نرخ جابجایی رچتینگ می‌شود.

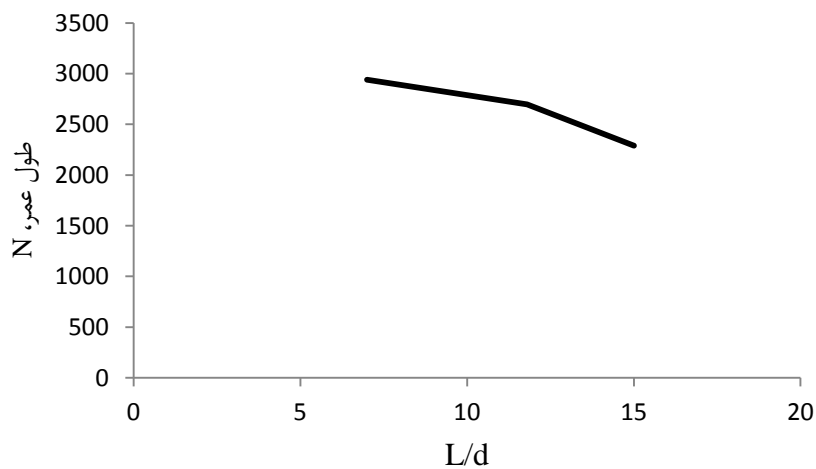


شکل (۲-۱۲) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی از

جنس SS304L

۲-۲-۷-۴- تاثیر طول پانل استوانه‌ای بر طول عمر آن تحت بارگذاری مرکب

در پانل‌های استوانه‌ای با افزایش طول نمونه‌ها، طول عمر قطعه‌ها یا تعداد سیکل لازم برای شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد (شکل (۲-۱۳)). گشتاور خمشی در نقاط انتهایی پانل‌های استوانه‌ای مایل دارای بیشترین مقدار است و در آزمایش‌های تجربی مشاهده شد که پانل‌های استوانه‌ای در این نواحی دچار شکست می‌شوند و کشیدگی در این نواحی بیشتر است (شکل (۲-۱۴)).



شکل (۲-۱۳) رفتار طول عمر قطعه بر حسب طول نمونه از جنس SS304L



شکل (۲-۱۴) پانل‌های استوانه‌ای آزمایش شده با سه طول مختلف، (الف) طول پانل برابر ۱۷۵ میلی‌متر، (ب) طول پانل

برابر ۲۹۵ میلی‌متر، (ج) طول پانل برابر ۳۷۵ میلی‌متر از جنس SS304L

۲-۷-۵- تاثیر طول بر انرژی پلاستیک و رابطه انرژی با نرخ جابجایی رچتینگ در طول-

های مختلف

انرژی به عنوان یک تابع با مقدار اسکالر و مستقل از جهت، قابل مقایسه برای بارگذاری مختلف عمودی و مرکب سیکلی برای طول‌های مختلف می باشد. به همین منظور در این بخش مساحت سطح حلقه هیستریزیس در هر سیکل که نشانگر انرژی تغییر شکل پلاستیک در هر نمونه است، برای پانل-های استوانه‌ای با طول‌های ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی با نیروی میانگین و دامنه‌ی نیرو ۱۳/۵ کیلو نیوتن مطابق شکل (۲-۱۵) ترسیم شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، در تمامی طول‌ها، در سیکل‌های اولیه با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک به شدت کاهش یافته و در انتها به مقدار ثابتی می رسد. همچنین برای یک سیکل معین با افزایش طول پانل، مقدار انرژی پلاستیک افزایش می یابد که این به دلیل ایجاد گشتاور خمشی بزرگ تر در انتهای پانل با طول بزرگ تر با اعمال بارگذاری یکسان است. در مقایسه با شکل ۷ مشاهده می‌شود که تحت تنش سیکلی یکسان برای پانل‌های استوانه‌ای با طول کمتر، انرژی اتلافی تغییر شکل پلاستیک کمتر و در نتیجه عمر آن بیشتر می باشد.

به منظور بررسی تغییرات انرژی پلاستیک پانل استوانه‌ای بر حسب تغییرات نرخ کرنش رچتینگ، شکل (۲-۱۶) برای پانل استوانه‌ای با طول‌های ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی رسم شده است. در این شکل، یک رابطه‌ی خطی بین انرژی پلاستیک در هر سیکل نسبت به نرخ کرنش رچتینگ مشاهده می شود. همچنین با کاهش انرژی پلاستیک، نرخ کرنش رچتینگ به صورت تقریباً خطی کاهش می یابد. اختلاف شیب منحنی انرژی کرنش پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای سه طول ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی‌متر به وضوح مشاهده می شود و پانل استوانه‌ای با طول بیشتر دارای شیب بیشتری است.

همه‌ی مدل‌های سخت شوندگی دارای یک مشخصه مشترک می‌باشند و آن اینست که بر اساس

معیار تسلیم ون مایز و مدل سخت شونددگی سینماتیک بنا نهاده شده‌اند. معیار تسلیم ون مایز به صورت رابطه‌ی (۱-۲) تعریف می‌شود.

$$f(\sigma - \alpha) = \sqrt{(s - \alpha) \cdot (s - \alpha)} - k = 0 \quad (1-2)$$

در این رابطه S تانسور تنش انحرافی، α تانسور پیش تنش انحرافی (نشان دهنده‌ی مرکز سطح

تسلیم) و $k = \sqrt{\frac{2}{3}} \sigma_0$ اندازه سطح تسلیم است که در مدل سخت‌شونددگی ثابت است.

مدل سخت شونددگی آرمسترانگ-فریدریش^۱، به عنوان یکی از مدل‌های اولیه با اضافه کردن یک

ترم، مورد استفاده محققین بسیاری قرار گرفته است و به صورت رابطه‌ی (۲-۲) می‌باشد.

$$d\alpha = \frac{2}{3} \beta d\varepsilon^P - \gamma \alpha \sqrt{\frac{2}{3}} d\varepsilon^P d\varepsilon^P \quad (2-2)$$

مدل سخت شونددگی AF برای بارگذاری تک محوره به فرم رابطه‌ی (۳-۲) می‌باشد.

$$d\alpha_x = \frac{2}{3} \beta d\varepsilon_x^P - \gamma \alpha |d\varepsilon_x^P| \quad (3-2)$$

با حل رابطه‌ی (۳-۲) برای شرایط بارگذاری و باربرداری خواهیم داشت [۲۸].

$$\begin{cases} \alpha_x = \frac{2\beta}{3\gamma} + \left(\alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma}\right) \exp[-\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)], & d\varepsilon_x^P \geq 0 \\ \alpha_x = -\frac{2\beta}{3\gamma} + \left(\alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma}\right) \exp[\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)], & d\varepsilon_x^P < 0 \end{cases} \quad (4-2)$$

همچنین خواهیم داشت:

$$\alpha_y = \alpha_z = -\frac{1}{2} \alpha_x \quad (5-2)$$

با توجه به روابط (۱-۲) و (۵-۲):

$$\left| \sigma_x - \left(\frac{3}{2}\right) \alpha_x \right| = \sigma_0 \quad (6-2)$$

1- Armstrong-Frederick

پس:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_0 + \left[\frac{\beta}{\gamma} + \frac{3}{2} \left(\alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[-\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)] \right], & d\varepsilon_x^P \geq 0 \\ \sigma_x &= -\sigma_0 + \left[\frac{\beta}{\gamma} - \frac{3}{2} \left(\alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right) \exp[\gamma(\varepsilon_x^P - \varepsilon_{x0}^P)] \right], & d\varepsilon_x^P < 0 \end{aligned} \quad (7-2)$$

تنش‌های ابتدایی و انتهایی در حالت بارگذاری به ترتیب برابر $\sigma_m - \sigma_a$ (اختلاف تنش میانگین و دامنه) و $\sigma_m + \sigma_a$ (مجموع تنش میانگین و دامنه) است و در حالت باربرداری، تنش‌های ابتدایی و انتهایی به ترتیب $\sigma_m + \sigma_a$ و $\sigma_m - \sigma_a$ می‌باشند و در این شرایط و با استفاده از رابطه‌ی (۲-۲)، کرنش‌های ابتدایی در حالت بارگذاری (ε_1) و باربرداری (ε_3) و کرنش‌های انتهایی در حالت بارگذاری (ε_2) و باربرداری (ε_4) طبق روابط (۲-۸) و (۲-۹) می‌باشند. بیشترین کرنش در حالت بارگذاری و با تنش $\sigma_m + \sigma_a$ رخ می‌دهد. در لحظه‌ی بارگذاری خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \varepsilon_{x0}^P - \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\sigma_m - \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{\frac{3}{2} \left(\alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \\ \varepsilon_2 &= \varepsilon_{x0}^P - \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\sigma_m + \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{\frac{3}{2} \left(\alpha_{x0} - \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \end{aligned} \quad (8-2)$$

و در لحظه‌ی باربرداری خواهیم داشت:

$$\begin{aligned} \varepsilon_3 &= \varepsilon_{x0}^P + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\sigma_m + \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{-\frac{3}{2} \left(\alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \\ \varepsilon_4 &= \varepsilon_{x0}^P + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\sigma_m - \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{-\frac{3}{2} \left(\alpha_{x0} + \frac{2\beta}{3\gamma} \right)} \right) \end{aligned} \quad (9-2)$$

انرژی کرنشی پلاستیک در هر سیکل طبق رابطه‌ی (۲-۱۰) محاسبه می‌شود:

$$W_P = \oint_{cycle} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^P = \int_{\sigma_m - \sigma_a}^{\sigma_m + \sigma_a} (\sigma_x)_{Loading} d\varepsilon_x^P + \int_{\sigma_m + \sigma_a}^{\sigma_m - \sigma_a} (\sigma_x)_{Unloading} d\varepsilon_x^P \quad (10-2)$$

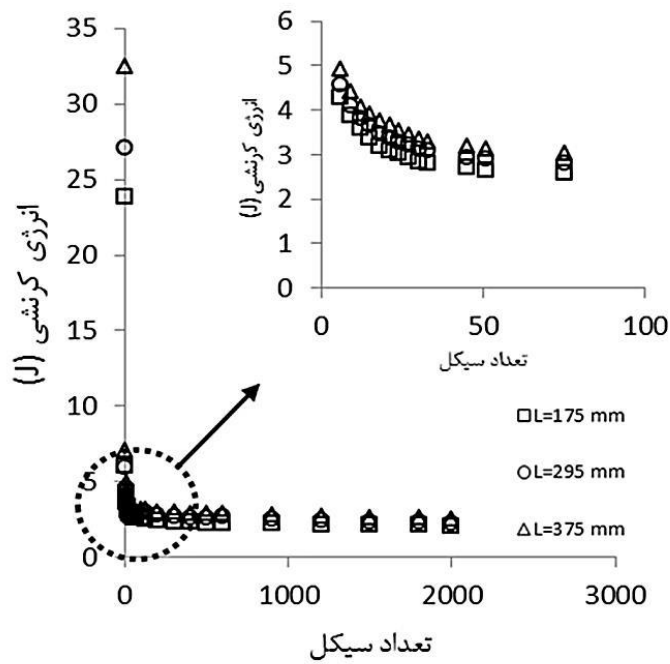
$$\begin{aligned}
&= -\frac{1}{\gamma} \left[2\sigma_a + \left(\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) \left[\text{Ln} \left(\sigma_m + \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) - \text{Ln} \left(\sigma_m - \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) \right] \right] \\
&+ \frac{1}{\gamma} \left[-2\sigma_a + \left(-\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) \left[\text{Ln} \left(\sigma_m - \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) - \text{Ln} \left(\sigma_m + \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma} \right) \right] \right] \\
&= -\frac{4\sigma_a}{\gamma} + \left(\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) [(\varepsilon_2 - \varepsilon_{x0}^P) - (\varepsilon_1 - \varepsilon_{x0}^P)] \\
&+ \left(-\sigma_0 + \frac{\beta}{\gamma} \right) [(\varepsilon_4 - \varepsilon_{x0}^P) - (\varepsilon_3 - \varepsilon_{x0}^P)]
\end{aligned}$$

با مقایسه‌ی روابط (۲-۱۰) و (۲-۱۲)، نتیجه می‌شود که انرژی کرنشی پلاستیک با نمو بیشترین کرنش در هر سیکل، رابطه‌ی خطی دارد. از خطی بودن رابطه‌ی انرژی پلاستیک و نرخ کرنش پلاستیک می‌توان نتیجه گرفت که فیکسچرهای مورد استفاده در این آزمایش، تا حد خوبی صلب می‌باشند و تغییر شکل‌های قابل ملاحظه‌ای که باعث ایجاد خطا در آزمایش می‌شود، وجود ندارد.

با توجه به مطالب گفته شده در بالا، نرخ جابجایی رچتینگ یا به عبارت دیگر افزایش جابجایی رچتینگ در هر سیکل مانند سیکل Kام با انرژی پلاستیک همان سیکل، رابطه‌ای خطی مشابه رابطه-ی (۲-۱۱) دارد. در این رابطه A و B ثابت هستند.

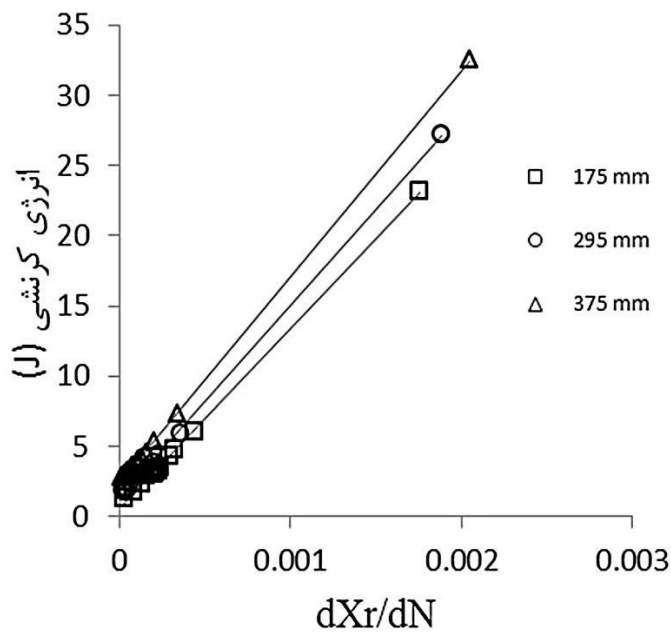
$$(W_P)_k = A(\Delta X_r^P)_k + B \quad (۲-۱۱)$$

در رابطه‌ی (۲-۳)، ΔX_r^P تغییر جابجایی رچتینگ در هر سیکل و W_P انرژی پلاستیک در هر سیکل مشخص می‌باشد. رابطه‌ی خطی (۲-۱۱) با رابطه‌ی (۲-۱۰) در بخش قبل مطابقت دارد و می‌توان نتیجه گرفت که فیکسچرهای مورد استفاده در این آزمایش، تا حد قابل قبولی صلب می‌باشند و تغییر شکل‌های قابل ملاحظه‌ای که باعث ایجاد خطا در نتایج می‌شود، وجود ندارد.



شکل (۲-۱۵) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول‌های ۱۷۵، ۲۹۵ و

۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L

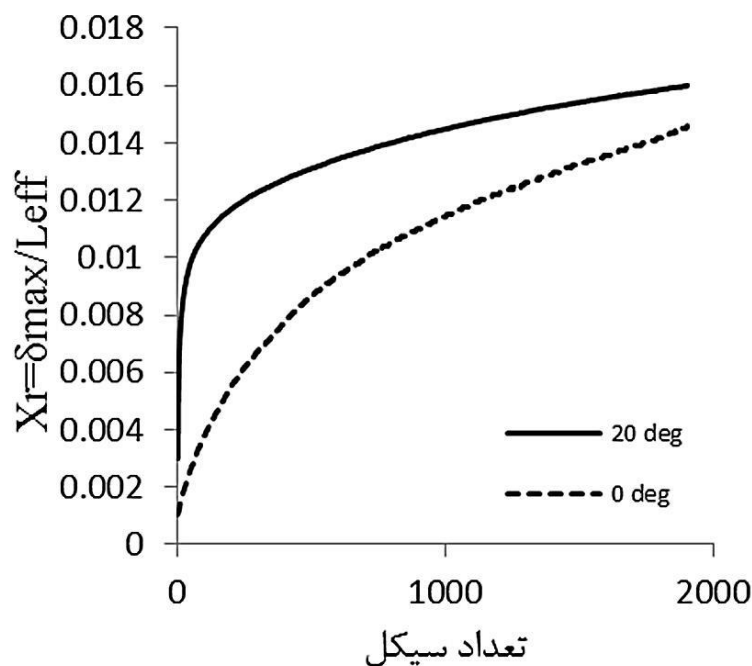


شکل (۲-۱۶) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای طول‌های ۱۷۵، ۱۹۵ و ۳۶۰ میلی‌متر

تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L

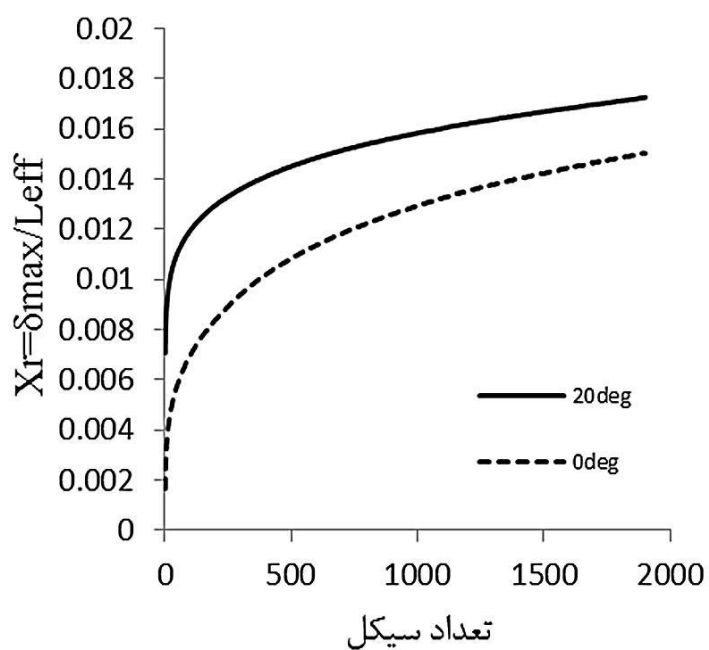
۲-۷-۶- تأثیر زاویه قرارگیری پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن

در این قسمت پانل‌های استوانه‌ای به دو صورت عمودی و مایل تحت زاویه‌ی $\alpha=20^\circ$ قرار گرفته‌اند. شکل‌های (۱۷-۲)، (۱۸-۲) و (۱۹-۲) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با سه طول ۱۷۵، ۲۹۵، ۳۷۵ میلی‌متر رسم شده است. در این سه شکل مشاهده می‌شود که در حالت بارگذاری عمودی مشابه بارگذاری مرکب، با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد. برای یک طول ثابت و تعداد سیکل معین، پانل استوانه‌ای مایل دارای جابجایی رچتینگ بیشتری نسبت به پانل استوانه‌ای عمودی است که این به دلیل ایجاد گشتاور خمشی علاوه بر نیروی عمودی در مقاطع مختلف پانل استوانه‌ای مایل است که با خمش پانل استوانه‌ای مایل همراه است؛ در حالی که در پانل استوانه‌ای عمودی، تنها نیروی عمودی اعمال شده است.



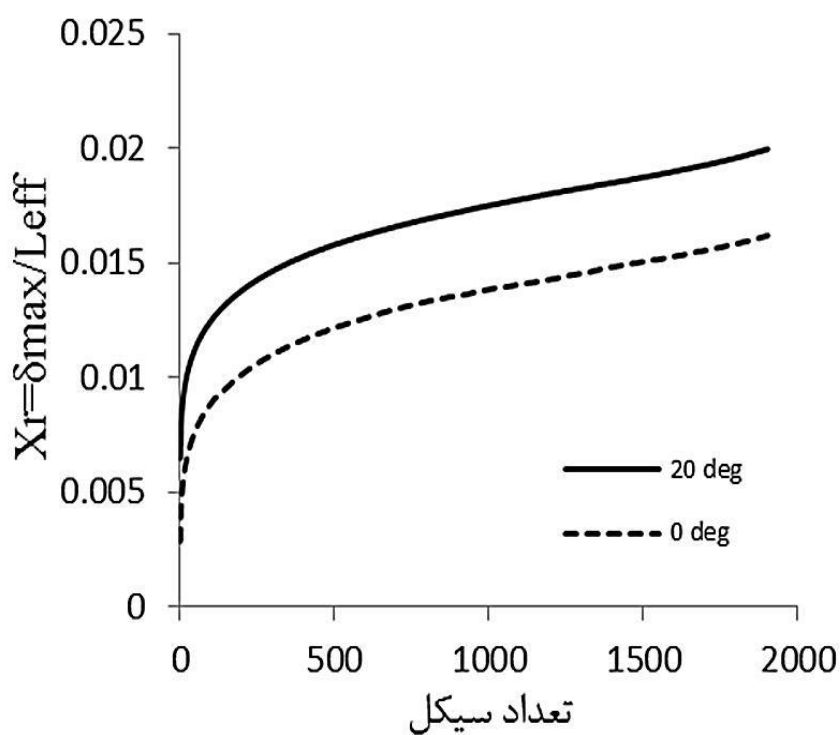
شکل (۱۷-۲) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی‌متر تحت

بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L



شکل (۱۸-۲) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۲۹۵ میلی‌متر تحت

بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L

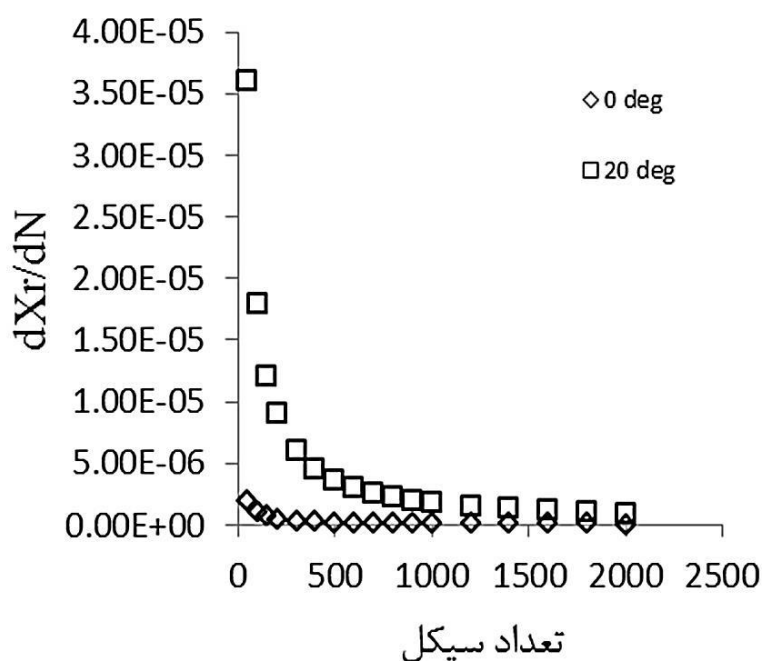


شکل (۱۹-۲) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۷۵ میلی‌متر تحت

بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L

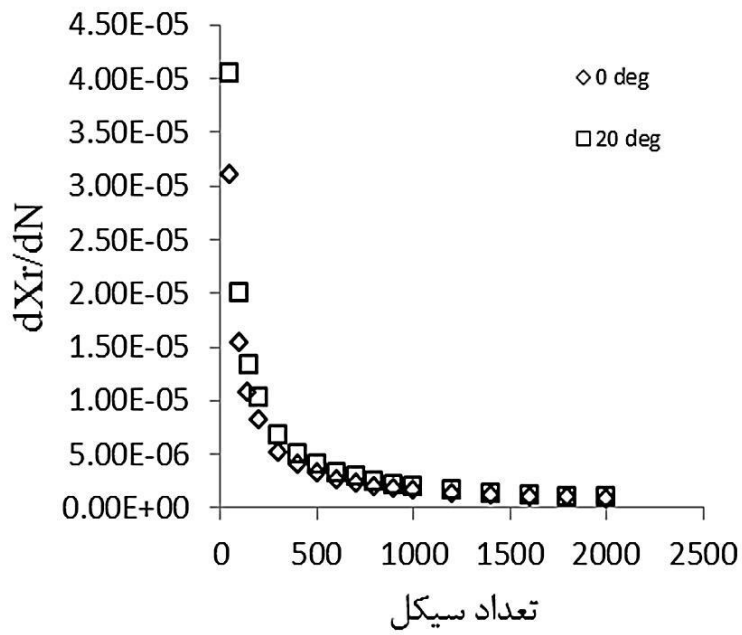
۲-۷-۷- اشباع جابجایی رچتینگ در زوایای مختلف قرارگیری

در شکل‌های (۲۰-۲)، (۲۱-۲) و (۲۲-۲) تغییرات نرخ جابجایی رچتینگ با افزایش تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با زوایای صفر و ۲۰ درجه نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که نرخ جابجایی رچتینگ برای هر دو زاویه با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد؛ اما در هر سیکل، نرخ جابجایی رچتینگ برای پانل‌های استوانه‌ای با طول‌های مذکور اختلاف بسیار کمی نسبت به هم دارند و پانل استوانه‌ای با زاویه ۲۰ درجه دارای نرخ جابجایی بالاتری است. در ۵۰ سیکل ابتدایی، کاهش نرخ جابجایی رچتینگ بسیار زیاد است؛ اما در ادامه این کاهش قابل چشم پوشی می‌باشد. مقدار نرخ جابجایی رچتینگ در سیکل‌های انتهایی تقریباً ثابت و به صفر میل می‌کند.



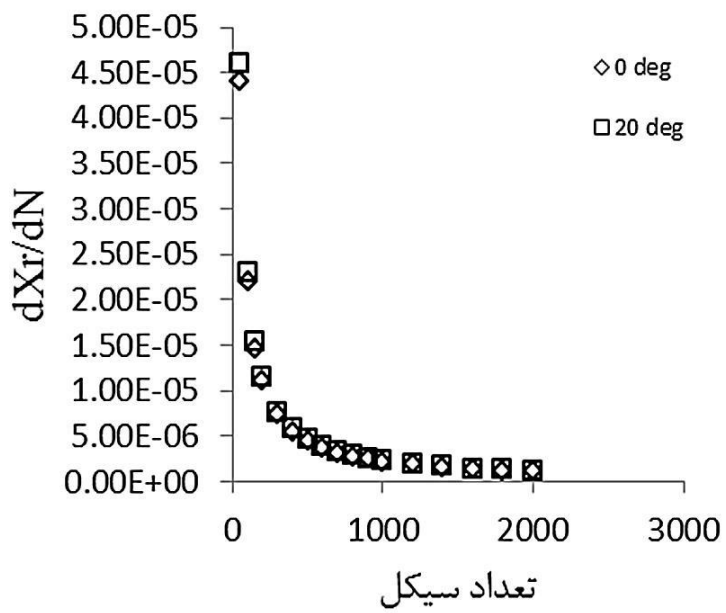
شکل (۲۰-۲) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل استوانه‌ای با طول ۱۷۵ میلی متر تحت

بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L



شکل (۲-۲۱) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل استوانه‌ای با طول ۲۹۵ میلی متر تحت

بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L



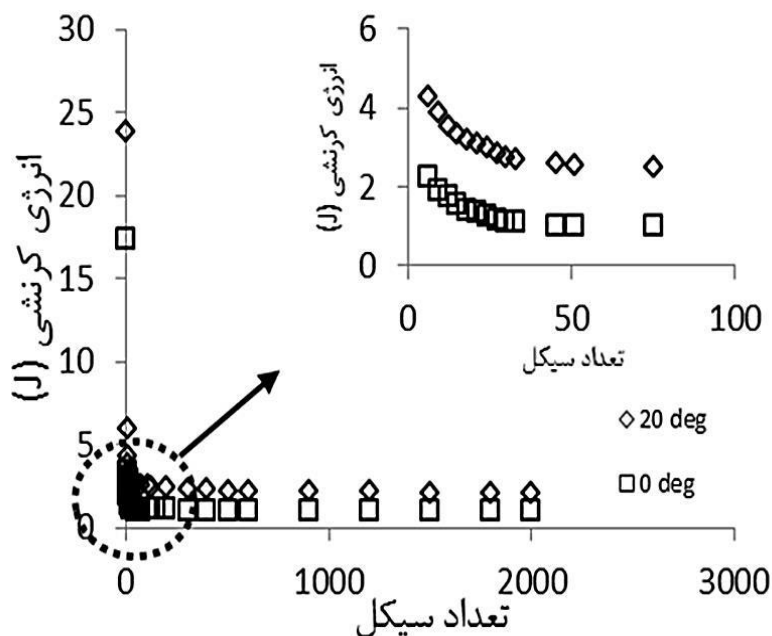
شکل (۲-۲۲) نرخ جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل استوانه‌ای با طول ۳۷۵ میلی متر تحت

بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L

۲-۷-۸- تاثیر زاویه قرارگیری بر انرژی پلاستیک و رابطه انرژی با نرخ جابجایی

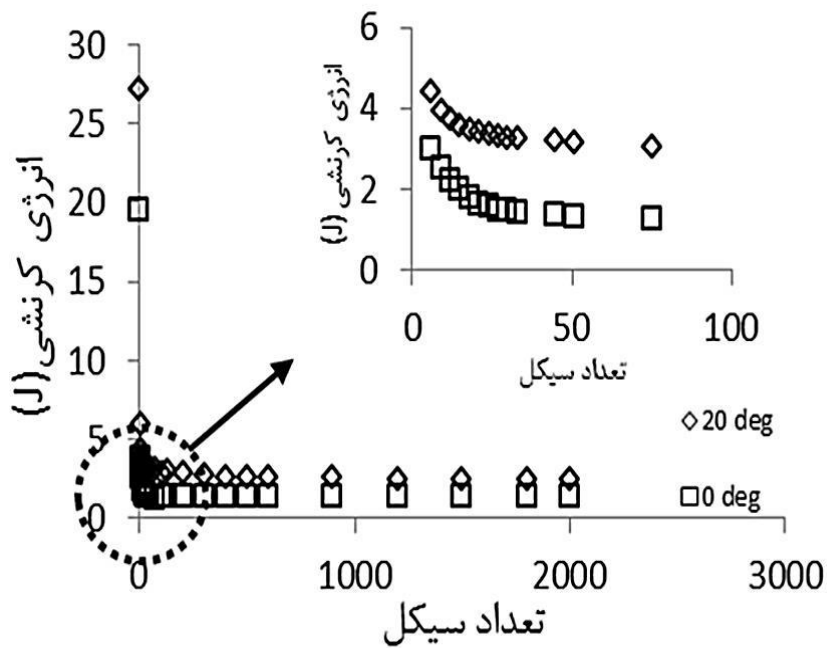
رچتینگ در زوایای مختلف

در این قسمت انرژی پلاستیک به عنوان انرژی اتلافی در دو حالت پانل‌های استوانه‌ای با زاویه‌ی صفر و ۲۰ درجه نسبت به عمود، با هم مقایسه شده است. شکل‌های (۲-۲۳)، (۲-۲۴) و (۲-۲۵) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی را نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل، انرژی اتلاف شده و به عبارت دیگر تغییر شکل پلاستیک در هر سیکل کاهش می‌یابد تا اینکه پایدار و ثابت شود. همچنین در پانل‌های استوانه‌ای مایل نسبت به پانل‌های استوانه‌ای عمودی، در هر سیکل اتلاف انرژی بیشتر است و این نیز بر وجود و تاثیر گشتاور خمشی در پانل‌های استوانه‌ای مایل صحنه می‌گذارد. بنابراین گشتاور خمشی در پانل باعث افزایش انرژی اتلافی و افزایش تغییر شکل پلاستیک می‌شود.



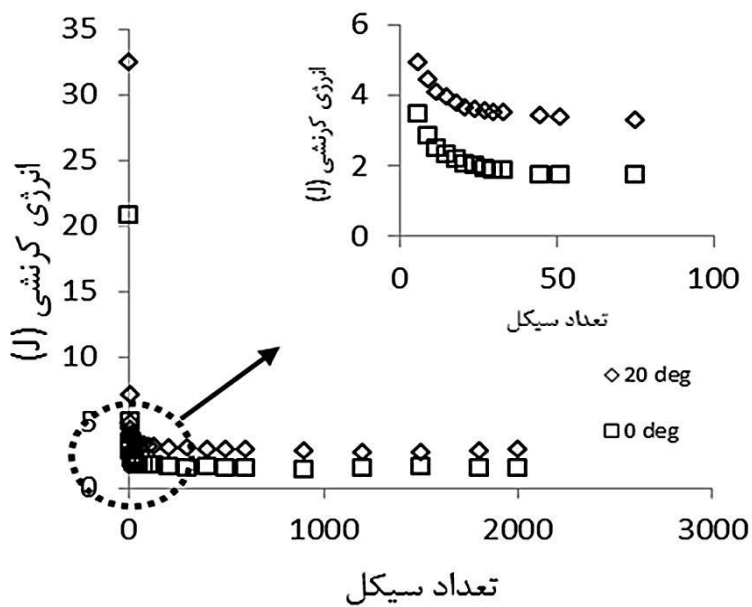
شکل (۲-۲۳) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول ۱۷۵ میلی‌متر

تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L



شکل (۲-۲۴) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول ۲۹۵ میلی متر

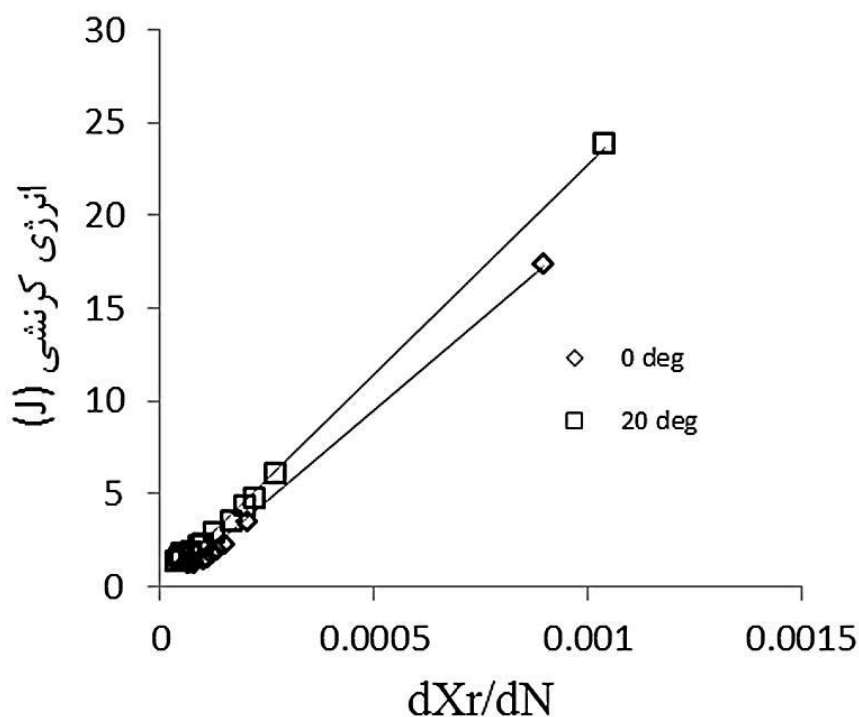
تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L



شکل (۲-۲۵) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول ۳۷۵ میلی متر

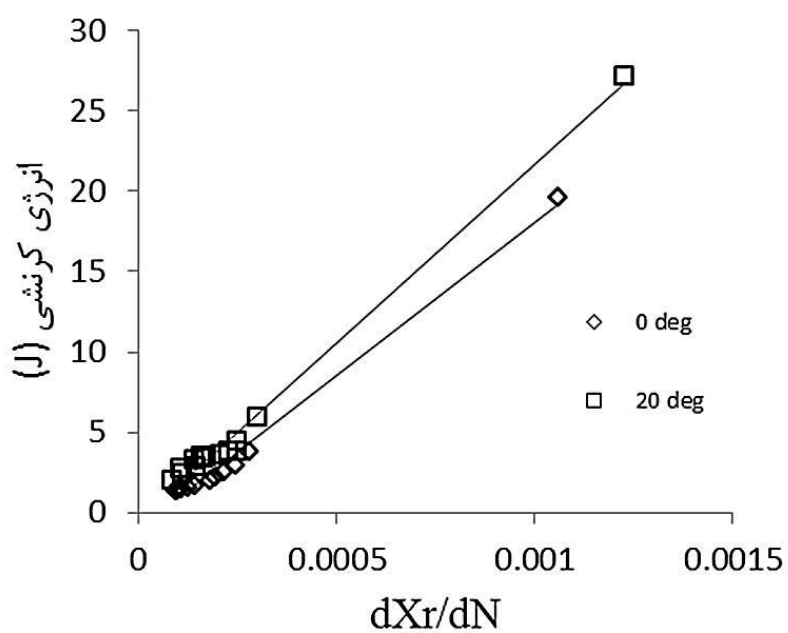
تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L

در شکل‌های (۲۶-۲)، (۲۷-۲) و (۲۸-۲) رابطه‌ی بین انرژی پلاستیک و نرخ جابجایی رچتینگ برای پانل‌های استوانه‌ای مایل و عمودی با طول‌های موثر ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی‌متر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به ازای افت معین نرخ جابجایی رچتینگ، کاهش انرژی پلاستیک در پانل استوانه‌ای مایل بیشتر است. اگرچه در هر سیکل، پانل‌های استوانه‌ای مایل دارای انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به پانل‌های استوانه‌ای عمودی است: ولی در پانل‌های استوانه‌ای مایل با کاهش معین نرخ جابجایی رچتینگ به کاهش در مقدار ممان خمشی در هر سیکل منجر می‌شود و در نتیجه به دلیل کاهش چشم‌گیر ممان خمشی، با کاهش قابل ملاحظه در مقدار انرژی پلاستیک همراه است.



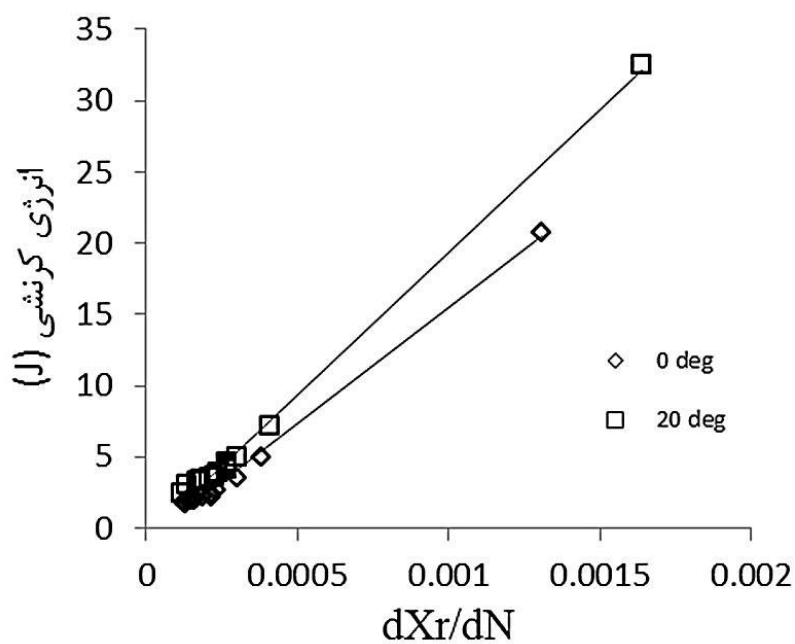
شکل (۲۶-۲) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای طول ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری

مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L



شکل (۲۷-۲) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای طول ۲۹۵ میلی متر تحت بارگذاری

مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L



شکل (۲۸-۲) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای طول ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری

مرکب و محوری تناوبی از جنس SS304L

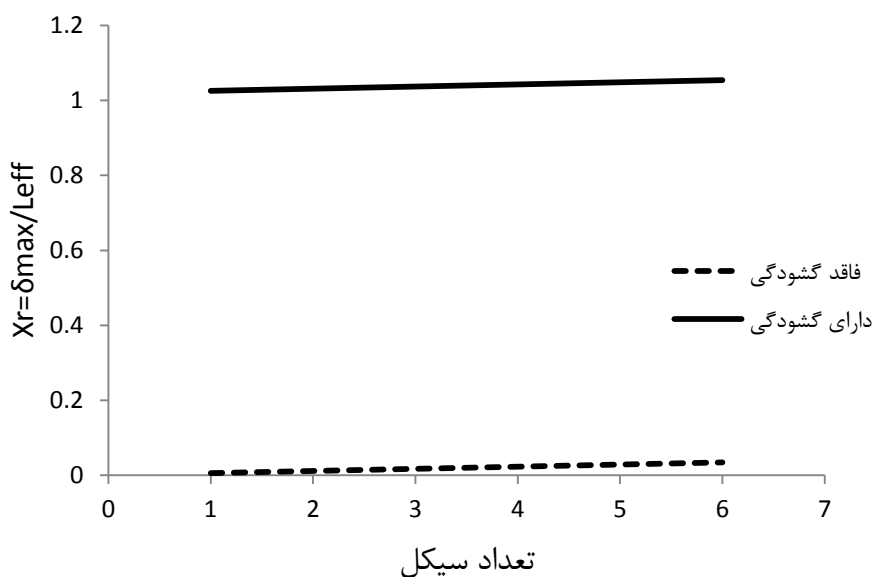
۲-۷-۹- تاثیر گشودگی بر رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای

در این قسمت پانل‌های استوانه‌ای با طول ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری قرار گرفته‌اند. یک گشودگی دایروی با قطر ۱۰ میلی‌متر در میانه‌ی پانل استوانه‌ای ایجاد شده است و بار میانگین و بار دامنه‌ی ۲۷ kN به مجموعه‌ی دو نمونه اعمال شد. با توجه به شکل (۲-۲۹)، طریقه‌ی قرارگیری پانل‌ها به صورتی است که نیروی عمودی اعمالی و گشتاور خمشی ایجاد شده در جهت باز شدن گشودگی است.

در شکل (۲-۳۰) مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ برای پانل استوانه‌ای با گشودگی دایروی در میانه‌ی آن، افزایش می‌یابد و جابجایی رچتینگ و نرخ آن برای پانل استوانه‌ای با گشودگی دایروی بیشتر از پانل‌های استوانه‌ای بدون گشودگی است. گشتاور خمشی و نیروی اعمالی در مقاطع شامل گشودگی در جهت باز شدن آن عمل می‌کند و گشودگی دایروی با افزایش تعداد سیکل، تبدیل به شکل بیضوی می‌شود. از آنجایی که ایجاد گشودگی باعث افزایش تنش‌های نرمال در اطراف گشودگی می‌شود، در نتیجه شاهد کرنش‌های پلاستیک بزرگتری در اطراف گشودگی هستیم و اطراف گشودگی به عنوان محل بحرانی در این پانل‌ها می‌باشد و این امر باعث افزایش جابجایی رچتینگ و شکست در سیکل ۶ از محل گشودگی می‌شود.



شکل (۲-۲۹) گشودگی دایروی در میانه‌ی پانل استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی قبل و بعد از شکست



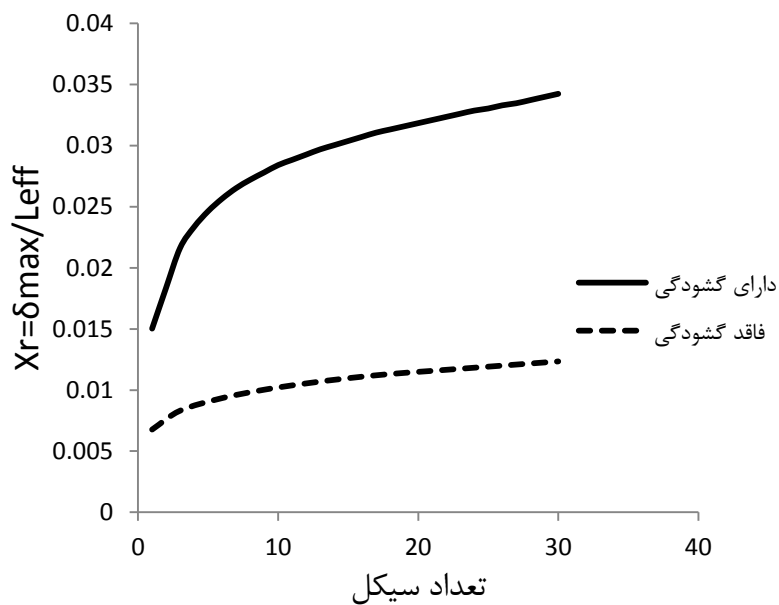
شکل (۲-۳۰) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی‌متر با و بدون گشودگی دایروی تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L

در این قسمت پانل استوانه‌ای با طول ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری محوری قرار گرفته است. یک گشودگی دایروی با قطر ۱۰ میلی‌متر در میانه‌ی پانل استوانه‌ای ایجاد شده است و بار میانگین و بار دامنه‌ی ۱۳/۵ kN به نمونه اعمال شد (شکل (۲-۳۱)). در این حالت نیز با توجه به شکل (۲-۳۲)، با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ برای پانل استوانه‌ای با گشودگی دایروی در میانه‌ی آن افزایش می‌یابد و جابجایی رچتینگ و نرخ آن برای پانل‌های استوانه‌ای با گشودگی دایروی بیشتر از پانل‌های استوانه‌ای بدون گشودگی است؛ اما این اختلاف در مقایسه با پانل‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب، کمتر است و این به دلیل وجود گشتاور خمشی در پانل‌های مایل است که در اطراف گشودگی، تنش‌های نرمال بزرگتری را ایجاد می‌کند و موجب افزایش اختلاف جابجایی رچتینگ پانل‌های مایل با گشودگی در مقایسه با پانل‌های مایل بدون گشودگی می‌شود. در حالت بارگذاری محوری نیز شاهد تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگتری در اطراف گشودگی به دلیل وجود تنش‌های عمودی

ماکزیمم هستیم و گشودگی دایروی در حین بارگذاری تبدیل به گشودگی بیضوی می‌شود و این نقاط به عنوان نقاط بحرانی می‌باشند.



شکل (۲-۳۱) رفتار پانل استوانه‌ای با گشودگی دایروی در میانه‌ی آن تحت بارگذاری محوری تناوبی



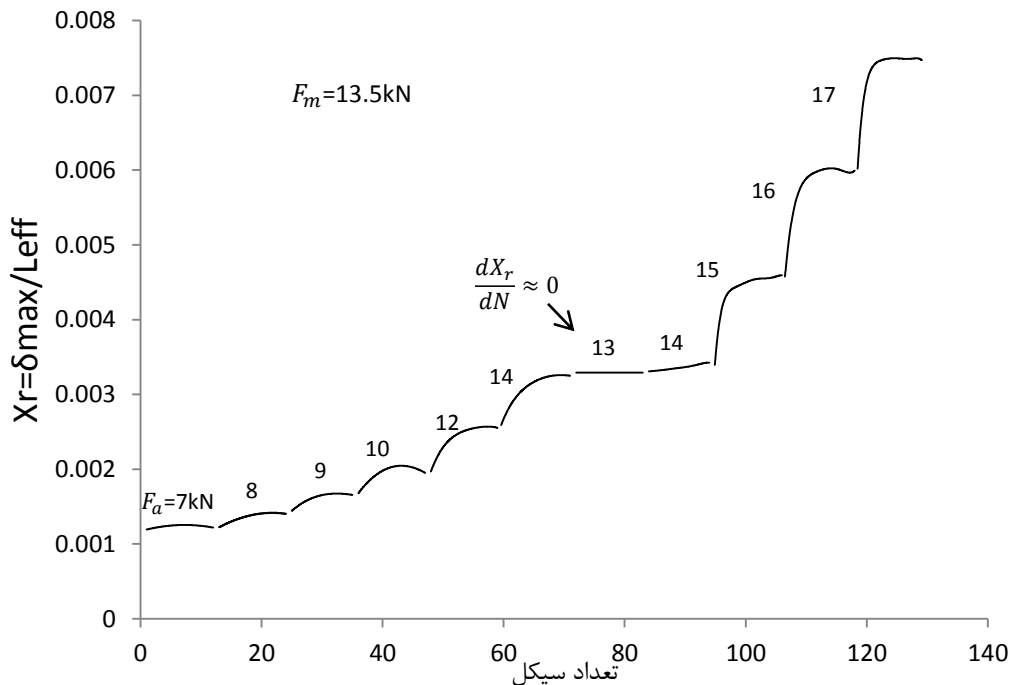
شکل (۲-۳۲) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی‌متر با و بدون

گشودگی دایروی تحت بارگذاری محوری تناوبی از جنس SS304L

۲-۷-۱۰- تأثیر تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای دارای گشودگی

در این قسمت پانل استوانه‌ای دارای گشودگی (۱۰ میلی متر) مایل با طول ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری متوالی با نیروی میانگین ثابت ۱۳/۵ kN و دامنه‌ی نیرو از ۷ kN تا ۱۷ kN قرار گرفته است. همانطور که در شکل (۲-۳۳) مشاهده می شود، تأثیر تاریخچه‌ی بارگذاری بر رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای دارای گشودگی، در ۱۳۰ سیکل مورد بررسی قرار گرفت و تغییرات جابجایی رچتینگ در این تعداد سیکل، حدود ۰/۰۰۷ مشاهده شد. به دلیل بارگذاری نیرو-کنترل نامتقارن (نیروی میانگین غیرصفر) رفتار رچتینگ در پانل‌های استوانه‌ای ایجاد شده است. با توجه به شکل (۲-۳۴)، با افزایش دامنه‌ی نیرو، جابجایی رچتینگ و نرخ جابجایی رچتینگ ($\frac{dX_r}{dN}$) افزایش می‌یابد. در شرایط بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین ثابت و دامنه‌ی نیروی متغیر، افزایش دامنه‌ی نیرو موجب افزایش نیروی ماکزیمم می‌شود و باعث ایجاد تغییر شکل‌های پلاستیک بزرگ‌تر می‌گردد و در نتیجه انباشتگی کرنش نیز افزایش می‌یابد. این پدیده به نابجایی زیر ساختارهای ماده در طول بارگذاری سیکلی مربوط می‌باشد. به دلیل بارگذاری سیکلی نامتقارن با تنش میانگین غیرصفر، تعداد نابجایی‌های ایجاد شده در بارگذاری سیکلی بیشتر از باربرداری سیکلی است. به هر حال، یک قسمت از نابجایی‌های تولید شده، در بارگذاری معکوس (باربرداری) خنثی می‌شوند. در نتیجه مقداری از نابجایی‌های تولید شده به عنوان پسمان در زیر ساختارهای ماده باقی می‌مانند و مشخص است که افزایش چگالی نابجایی باقی‌مانده، موجب افزایش انباشتگی کرنش پلاستیک می‌شود و بالعکس. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که افزایش دامنه‌ی نیرو با نیروی میانگین مشخص که باعث افزایش انباشتگی کرنش پلاستیک کل می‌شود به دلیل افزایش چگالی نابجایی‌ها است [۲۹].

با کاهش دامنه‌ی نیرو از ۱۴ kN به ۱۳ kN، نرخ جابجایی رچتینگ تقریباً صفر فرض می‌شود و انباشتگی تغییرشکل پلاستیک متوقف می‌گردد. این پدیده نتیجه‌ی افزایش مقاومت تغییرشکل ماده^۱ است که به دلیل پیش بارهای سیکلی با دامنه‌ی نیروی بالاتر ایجاد شده است. این سخت شوندگی سبب کند شدن انباشتگی کرنش پلاستیک در بارگذاری‌های سیکلی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شود. نتایج این آزمایش نشان می‌دهد که پیش بارهای اعمالی باعث مهار رفتار رچتینگ در بارگذاری‌های سیکلی متوالی با دامنه‌ی نیروی کمتر می‌شوند.

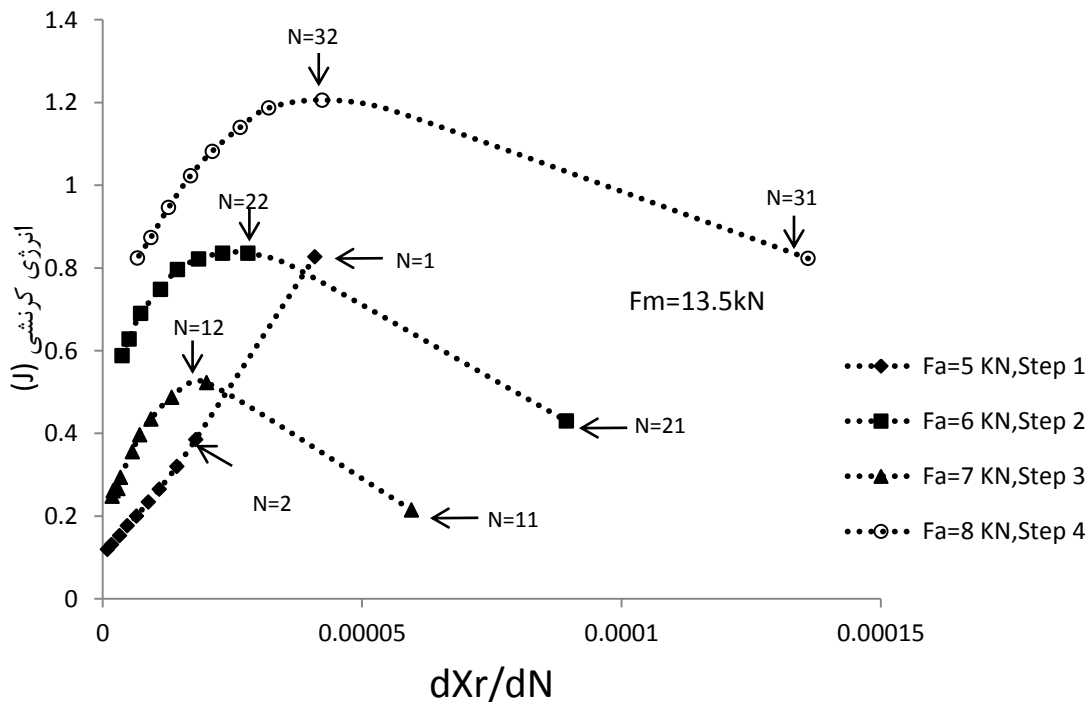


شکل (۲-۳۳) اثر تاریخچه بارگذاری بر رفتار رچتینگ پانل استوانه‌ای دارای گشودگی با طول موثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L

در شکل (۲-۳۳)، انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ در گام‌های متوالی نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در گام ۱، همانطور که در بخش قبل گفته شد، انرژی کرنش پلاستیک با نرخ جابجایی رچتینگ رابطه خطی دارد، اما در گام‌های ۲، ۳، ۴ با افزایش دامنه نیرو، نرخ جابجایی

1- Material deforming resistance

در سیکل اول، زیاد اما انرژی پلاستیک کم می باشد و این به دلیل سخت شوندگی در اثر اعمال بارگذاری در گام‌های قبلی می باشد، اما در ادامه شاهد افزایش ناگهانی در انرژی سطح حلقه‌های هیستریزس هستیم که با افزایش سیکل کاهش می یابد و این در گام‌های ۲، ۳ و ۴ به صورت تقریباً خطی با کاهش نرخ جابجایی رجتینگ همراه است.



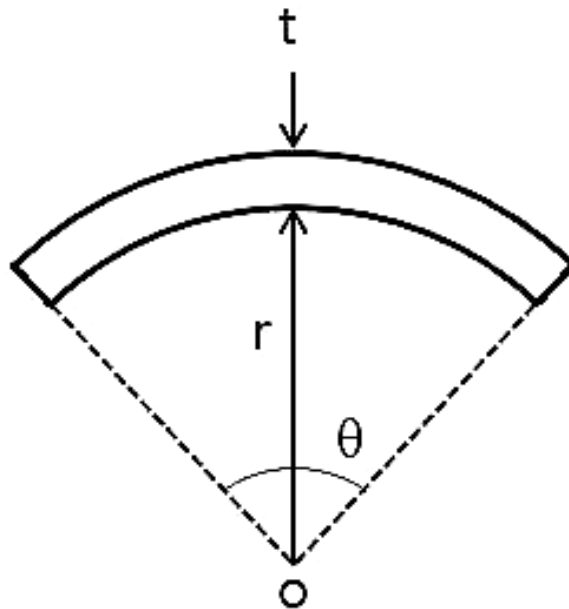
شکل (۲-۳۴) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رجتینگ برای پانل استوانه‌ای دارای گشودگی با طول موثر ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی چند مرحله‌ای از جنس SS304L

۲-۳- رفتار رجتینگ پانل استوانه‌ای از جنس Ck45

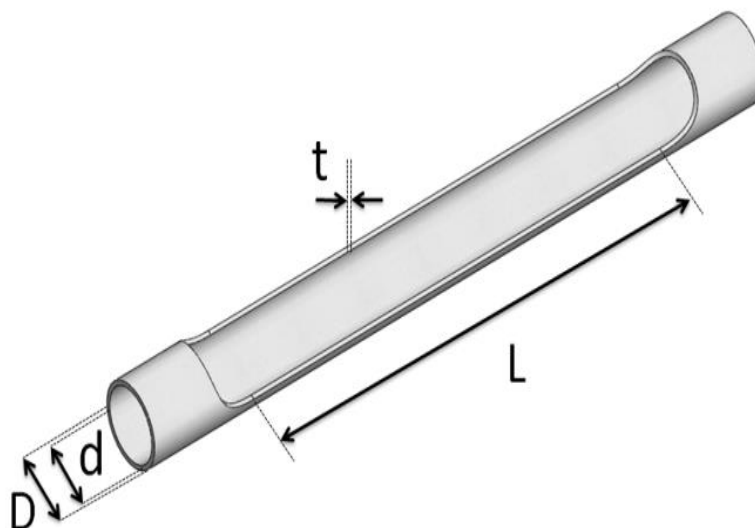
۲-۳-۱- هندسه نمونه‌ها

در این تحلیل، پانل‌های استوانه‌ای مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی با زوایای θ برابر ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰، ۳۵۵ و ۳۶۰ درجه در نظر گرفته شده‌اند. θ زاویه‌ی مرکزی پانل و I شعاع پانل استوانه‌ای می‌باشد (شکل (۲-۳۵)). هندسه‌ی یک پانل با زاویه‌ی ۱۸۰ درجه در شکل (۲-۳۶) نشان داده شده است که در آن L طول موثر نمونه، D قطر خارجی، d قطر داخلی، t ضخامت نمونه می‌باشد. نمونه‌ها از

لوله‌ای به طول ۳۶۰ میلی متر، ضخامت ۲ میلی متر و قطر خارجی ۴۲ میلی متر تهیه شده اند. نوع هندسه در دو انتهای پانل، به منظور کاهش تمرکز تنش در نظر گرفته شده است.



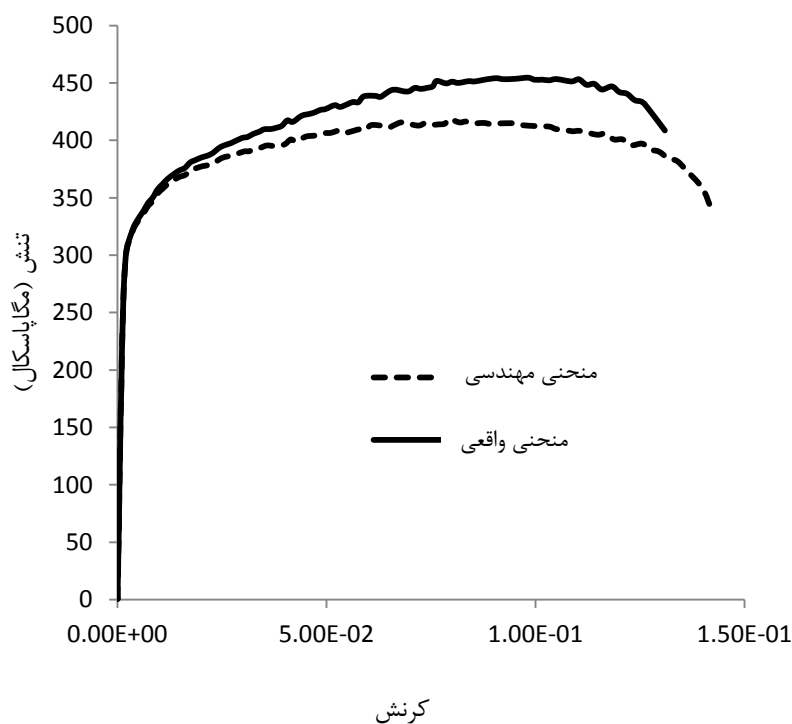
شکل (۲-۳۵) زاویه‌ی مرکزی و شعاع پانل از جنس Ck45



شکل (۲-۳۶) هندسه‌ی یک پانل با زاویه‌ی ۱۸۰ درجه از جنس Ck45

۲-۳-۲- خواص مکانیکی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد مطالعه از جنس فولاد Ck45 می باشند. خصوصیات مکانیکی فولاد مورد نظر طبق استاندارد ASTM E8 [۲۶] و به وسیله‌ی دستگاه سرو هیدرولیک INSTRON 8802 تعیین شده است. نمودار تنش-کرنش مهندسی و حقیقی برای ماده مورد نظر در شکل (۲-۳۷) نشان داده شده است. با توجه به داده‌های تجربی مدول الاستیسیته برابر با ۲۰۰ GPa و تنش تسلیم برابر با ۳۲۰MPa به دست می آید. ضریب پواسون نیز برابر ۰/۰۳ فرض شده است.



شکل (۲-۳۷) نمودار تنش-کرنش فولاد Ck45 حاصل از آزمایش کشش استاندارد

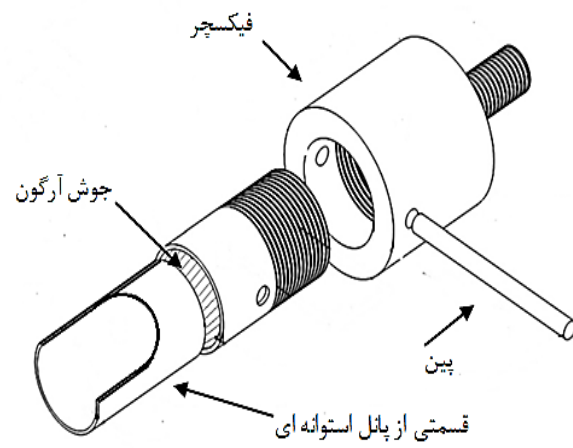
۲-۳-۳- خواص شیمیایی نمونه‌ها

از فولاد Ck45 در مواردی که استحکام بالا مورد نیاز باشد، استفاده می شود. موارد استفاده Ck45 در قطعات خودرو، شافت‌ها، میل بادامک‌ها و اتصالات مکانیکی در ماشین آلات می باشد. عناصر

تشکیل دهنده Ck45 شامل کربن ۰/۴۶ درصد، سیلیسیم ۰/۴ درصد، منگنز ۰/۶۵ درصد، کروم ۰/۴ درصد و نیکل ۰/۴ درصد می باشد [۲۵].

۲-۳-۴- فیکسچرها و نحوه اعمال بارگذاری

برای اعمال بار، نمونه‌ها در فیکسچرهای مخصوص قرار داده می شوند. به علت ضخامت زیاد پانل‌ها، از سردنده با ضخامت ۷ میلی متر برای تقویت دو سر پانل استفاده شده است. سردنده با ضخامت بالا مطابق شکل (۲-۳۷) درون دو انتهای پانل قرار گرفته و از طریق جوشکاری به لبه‌های پانل جوش شده اند. در این تحقیق پانل‌های استوانه‌ای مطابق شکل ۵ به صورت عمودی در داخل فیکسچر و فک‌های دستگاه قرار می گیرند. به منظور ثابت کردن و جلوگیری از پیچش پانل‌ها از پین‌های نگه دارنده با طول مشخص استفاده شده است. در شکل (۲-۳۸)، فیکسچر، سردنده جوش داده شده به پانل، پین نگه دارنده و نحوه‌ی قرارگیری آن‌ها نشان داده شده است. آزمایش‌ها تحت شرایط نیرو-کنترل و به صورت سیکلی انجام شدند که انباشتگی کرنش پلاستیک در هر سیکل یا همان پدیده‌ی رچتینگ مشاهده شد. برای انجام آزمایش از دستگاه سرو هیدرولیک INSTRON 8802 استفاده شده است که توانایی اعمال بار دینامیکی تا ظرفیت ۲۵۰ کیلو نیوتن را دارد (شکل (۲-۳۹)). پانل‌های استوانه‌ای بین دو فک در داخل فیکسچر قرار گرفته اند. در این آزمایش به منظور بررسی اثر زاویه‌ی پانل، تنش اعمالی به صورت سینوسی بین صفر تا $1/05\sigma_y$ تغییر می‌کند که در آن تنش تسلیم ماده (320MPa) می باشد. بار تناوبی از طریق فک پایین به ابتدای پانل اعمال می شود که نتیجه‌ی آن ایجاد نیروی محوری در پانل استوانه‌ای است.



شکل (۲-۳۸) سر دنده و فیکسچر مورد استفاده در آزمایش

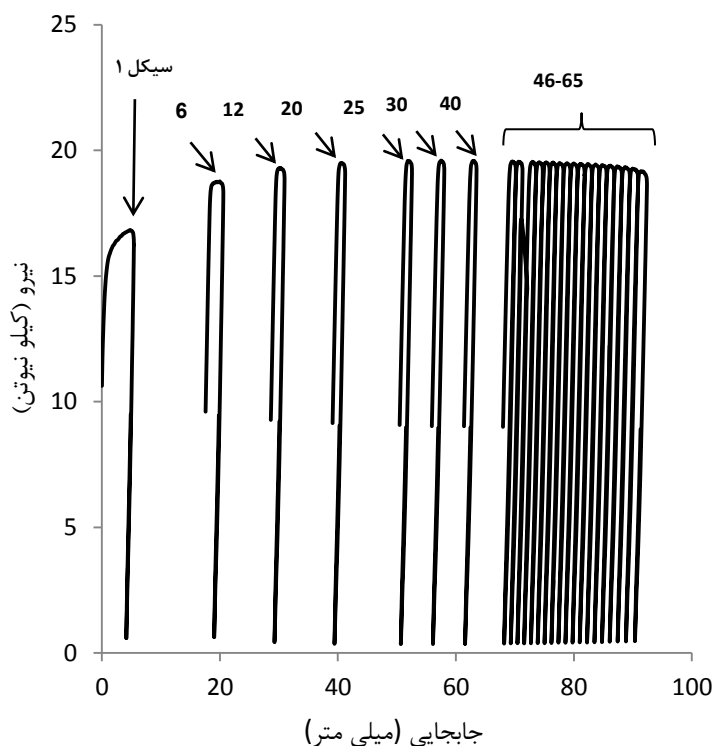


شکل (۲-۳۹) یک نمونه پانل ۹۰ درجه تحت آزمایش از جنس Ck45

۲-۳-۵- نتایج تجربی

۲-۳-۵-۱- رفتار رچتینگ در پانل استوانه‌ای

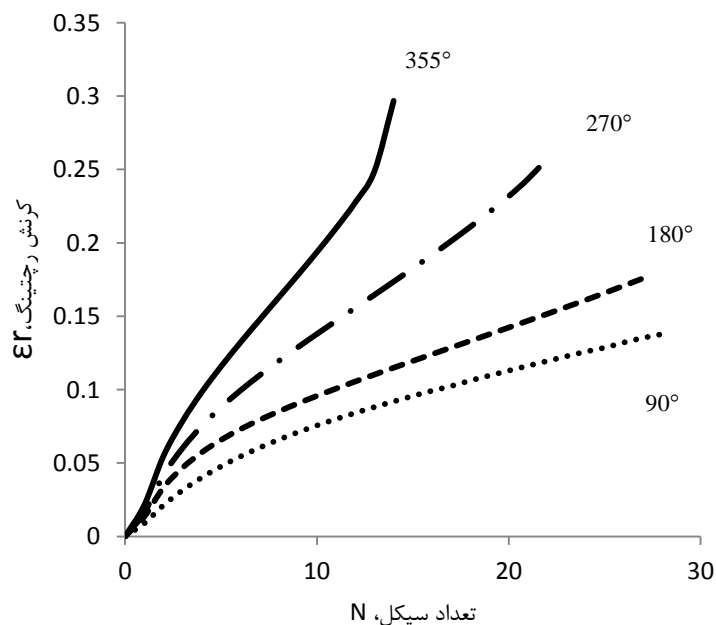
بارگذاری سیکلی، باعث ایجاد حلقه هیستریزیس برای هر سیکل بارگذاری می‌گردد. منحنی‌های نیرو-جابجایی بدست آمده تحت این نوع بارگذاری و حلقه‌های هیستریزیس مربوطه در شکل (۲-۴۰) مشاهده می‌شود. انباشتگی کرنش پلاستیک یا همان پدیده‌ی رچتینگ در شکل تا هنگام شکست مشاهده می‌شود. در آزمایش‌هایی که پدیده‌ی رچتینگ رخ می‌دهد، حلقه‌های هیستریزیس بسته نمی‌شود. بدلیل فرکانس بارگذاری نسبتاً بالا و تغییر شکل زیاد در ابتدای کار، در سیکل اول نیرویی کمتری نسبت به دیگر سیکل‌ها ظاهر می‌شود.



شکل (۲-۴۰) حلقه هیستریزیس نیرو-جابجایی مربوط به پانل ۹۰ درجه با طول ۳۶۰ میلی متر از جنس Ck45

۲-۳-۵-۲- تاثیر زاویه پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن تحت بار محوری

آزمایش‌ها بصورت نیرو-کنترل با تنش‌های میانگین غیر صفر انجام شد و با توجه به شکل (۲-۴۱)، با طول معین (۳۶۰ میلی‌متر) در یک زاویه‌ی معین با افزایش تعداد سیکل، کرنش رچتینگ افزایش یافته است که این رفتار برای پانل ۹۰ درجه در شکل (۲-۴۰) با حرکت حلقه‌های هیستریزس نیز مشاهده می‌گردد. همچنین در یک سیکل معین، با افزایش زاویه‌ی پانل، کرنش رچتینگ نیز افزایش می‌یابد که این تغییر به دلیل افزایش تنش محیطی در اثر افزایش زاویه‌ی پانل و ثابت بودن تنش محوری می‌باشد.

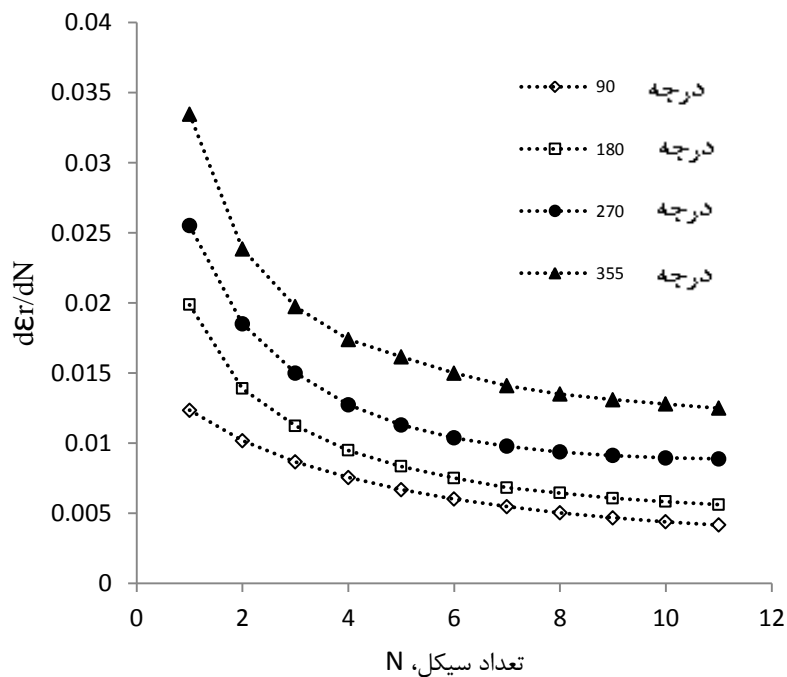


شکل (۲-۴۱) رفتار کرنش رچتینگ پانل‌ها با زوایای مختلف بر حسب تعداد سیکل بارگذاری از جنس Ck45

۲-۳-۵-۳- اشباع کرنش رچتینگ در زاویه‌های مختلف

در شکل (۲-۴۲) تغییرات نرخ کرنش رچتینگ با افزایش تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول ۳۶۰ میلی‌متر نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که نرخ کرنش رچتینگ برای هر چهار زاویه با افزایش تعداد سیکل کاهش می‌یابد؛ اما در هر سیکل، نرخ کرنش رچتینگ برای پانل‌های

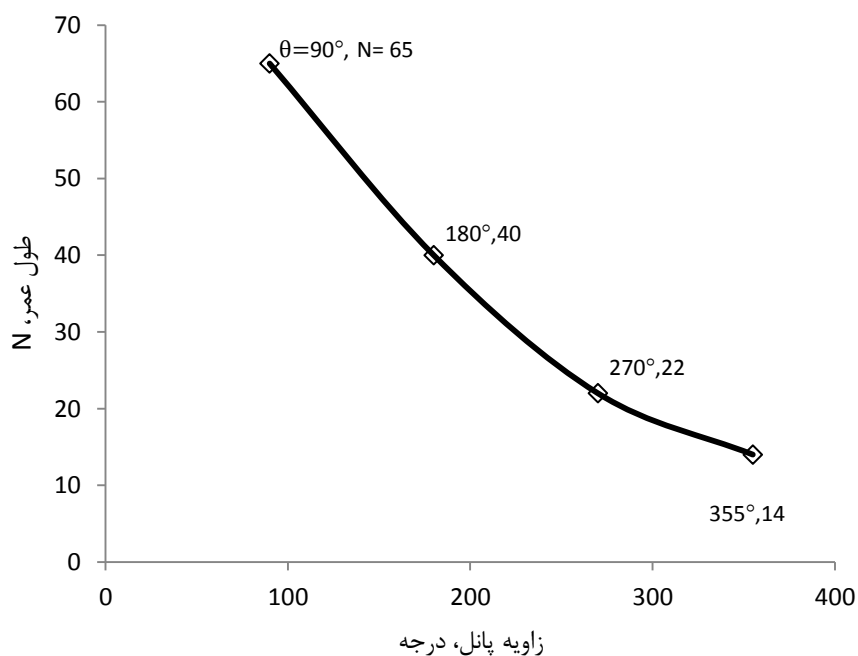
استوانه‌ای مذکور اختلاف کمی با یکدیگر دارند. با افزایش زاویه‌ی پانل‌ها میزان نرخ کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد. به طوری که پانل استوانه‌ای با زاویه‌ی ۳۵۵ درجه، نرخ رچتینگ بالاتری نسبت به دیگر زوایا دارد. نرخ کرنش رچتینگ برای همه زوایا در انتها به صفر میل می‌کند. کاهش نرخ کرنش رچتینگ و میل کردن آن به سمت صفر یا به عبارت دیگر، توقف انباشتگی تغییرشکل پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ، به دلیل شکل‌گیری و گسترده‌ی نابجایی‌ها در اثر تغییر شکل‌های سیکلی است. وقتی که ماده‌ای تحت تغییر شکل‌های سیکلی است، نابجایی‌هایی در ساختار آن در نتیجه‌ی سخت‌شوندگی کرنشی تولید می‌شوند. این نابجایی‌ها، ابتدا به حالت آشفته قرار گرفته‌اند و سپس با افزایش تعداد سیکل، به شکل المان‌های نابجایی منظم در می‌آیند و این تغییر موجب کاهش و در نهایت صفر شدن نرخ نابجایی رچتینگ می‌شود [۲۷].



شکل (۲-۴۲) رفتار نرخ کرنش رچتینگ بر حسب تعداد سیکل از جنس Ck45

۲-۳-۴-۵- تاثیر زاویه پانل استوانه‌ای بر طول عمر نمونه تحت بار محوری

با توجه به شکل (۲-۴۳)، با افزایش زاویه‌ی پانل، تعداد سیکل تا شکست نمونه یا عمر آن تحت تنش یکسان اعمالی به آنها کاهش پیدا می‌کند. به طوری که در زاویه‌ی ۹۰ درجه تعداد سیکل بارگذاری تا شکست ۶۵ سیکل و در ۳۵۵ درجه، ۱۴ سیکل می‌باشد. به عبارت دیگر، زاویه‌ی پانل نقش مهمی در تعیین عمر آن تحت بارگذاری سیکلی دارد. همان طور که در شکل (۲-۳۴) مشاهده می‌شود، تمامی نمونه از محدوده‌ی وسط پانل‌ها دچار شکست شده اند نه از محل اتصال به سر دنده که این نشانگر انتخاب جوش و سردنده‌ی مناسب در انجام آزمایش‌های تجربی می‌باشد. با توجه به شکل (۲-۴۴)، ابتدای شروع ترک تقریباً از یک سوم ابتدایی پانل شروع به رشد کرده و سپس با زاویه‌ی مورب (حدود ۴۵ درجه) منجر به شکست کامل نمونه می‌گردد. پانل استوانه‌ای با زاویه‌ی ۳۵۵ درجه، از مناسب‌ترین منطقه دچار شکست شده است.



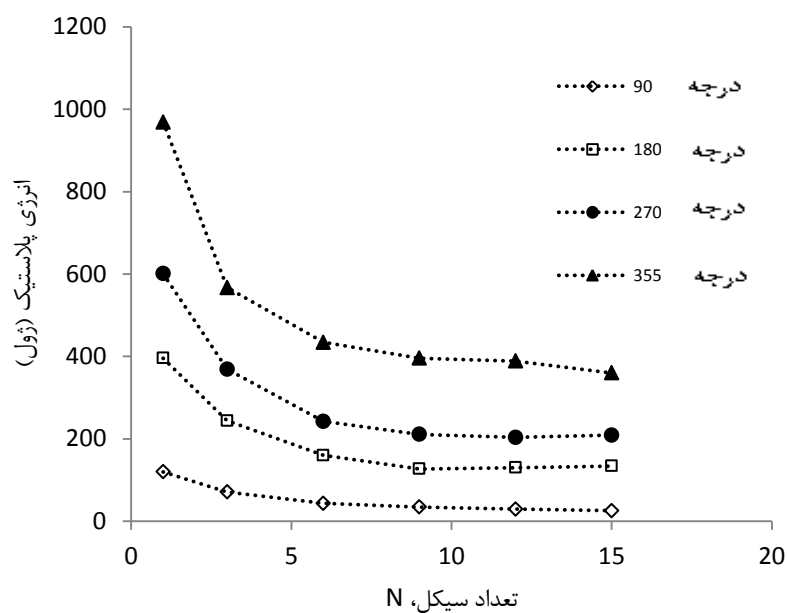
شکل (۲-۴۳) رفتار طول عمر نمونه‌ها بر حسب زاویه‌ی پانل از جنس Ck45



شکل (۲-۴۴) پانل‌های استوانه‌ای آزمایش شده با زوایای الف) ۹۰ درجه، ب) ۱۸۰ درجه، ج) ۲۷۰ درجه، د) ۳۵۵ درجه به طول ۳۶۰ میلی‌متر از جنس Ck45

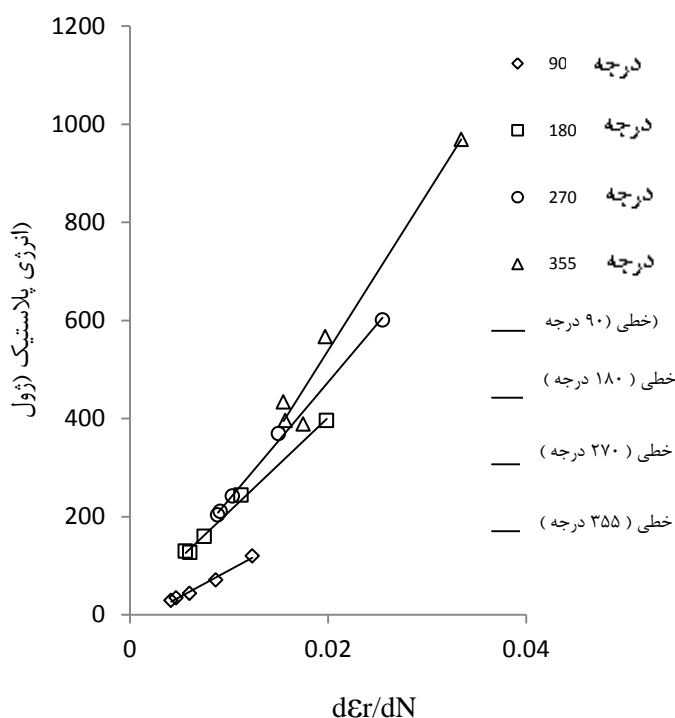
۲-۳-۵- تاثیر زاویه پانل استوانه‌ای بر انرژی پلاستیک و رابطه انرژی با نرخ کرنش رچتینگ در زوایای مختلف

انرژی به عنوان یک تابع با مقدار اسکالر و مستقل از جهت، قابل مقایسه برای بارگذاری مختلف عمودی سیکلی برای طول‌های مختلف می‌باشد. به‌همین منظور در این بخش مساحت سطح حلقه هیستریزیس در هر سیکل که نشانگر انرژی تغییر شکل پلاستیک در هر نمونه است، برای یک طول معین با زاویه‌های ۳۶۰، ۳۵۵، ۲۷۰ و ۹۰ درجه در سیکل‌های مختلف مطابق شکل (۲-۴۵) ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در تمامی زاویه‌ها، در سیکل‌های اولیه با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک به شدت کاهش یافته و در انتها به مقدار ثابتی می‌رسد. همچنین برای یک سیکل معین با افزایش زاویه پانل، مقدار انرژی پلاستیک افزایش یافته که در مقایسه با شکل (۲-۴۳) مشاهده می‌شود که تحت تنش سیکلی یکسان برای پانل‌های استوانه‌ای با زاویه‌ی کمتر، انرژی اتلافی تغییر شکل پلاستیک کمتر و در نتیجه عمر آن بیشتر است.



شکل (۲-۴۵) رفتار تغییرات انرژی پلاستیک بر حسب تعداد سیکل برای پانلهای با زوایای ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰ و ۳۵۵ درجه از جنس Ck45

به منظور بررسی تغییرات انرژی پلاستیک پانل استوانه‌ای بر حسب تغییرات نرخ کرنش رچتینگ، شکل (۲-۴۶) برای پانل با زاویه‌ی ۹۰ درجه و طول ۳۶۰ میلی متر رسم شده است. در این شکل، یک رابطه خطی بین انرژی پلاستیک در هر سیکل نسبت به نرخ کرنش رچتینگ مشاهده می شود که نشانگر صلبیت فیکسچرهای مورد استفاده در این تحقیق می باشد. همچنین با کاهش انرژی پلاستیک، نرخ کرنش رچتینگ به صورت تقریباً خطی کاهش می یابد. اختلاف شیب منحنی انرژی کرنش پلاستیک بر حسب نرخ جابجایی رچتینگ برای چهار زاویه‌ی ۹۰، ۱۸۰، ۲۷۰، ۳۵۵ درجه به وضوح مشاهده می شود و پانل استوانه‌ای با زاویه‌ی بیشتر دارای شیب بیشتری است.



شکل (۲-۴۶) انرژی پلاستیک بر حسب نرخ کرنش رچتینگ برای زاویه‌ی پانل ۹۰ درجه و طول ۳۶۰ میلی متر از جنس Ck45

۴-۲- نتیجه گیری

در این تحقیق با انجام مطالعات تجربی روی پانل‌های استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری متناوب، رفتار رچتینگ این پانل‌ها بررسی شد و تأثیر گشتاور خمشی تحت بارگذاری مرکب پانل‌های استوانه‌ای مشاهده شد. نتایج زیر از این تحلیل به دست آمد.

۱- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پانل استوانه‌ای برای یک سیکل معین، جابجایی رچتینگ به دلیل افزایش گشتاور خمشی، افزایش می‌یابد.

۲- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل برای یک طول معین پانل استوانه‌ای با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.

۳- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پانل استوانه‌ای جابجایی رچتینگ دارای نرخ بالاتری است.

۴- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل، پانل استوانه‌ای از نقاط انتهایی به دلیل وجود گشتاور خمشی بیشتر در این نواحی، دچار شکست می‌شود و کشیدگی بیشتر در این نواحی مشاهده می‌گردد.

۵- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل، پانل استوانه‌ای با افزایش طول نمونه‌ها، طول عمر یا تعداد سیکل لازم برای شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۶- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، پانل با طول بلندتر دارای انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به پانل با طول کوتاه‌تر است که با افزایش سیکل این اختلاف کاهش می‌یابد. همچنین برای یک طول معین، با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک در هر سیکل کاهش می‌یابد تا اینکه به مقدار ثابتی برسد.

۷- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل برای طول‌های مختلف پانل استوانه‌ای، رابطه‌ی خطی بین انرژی پلاستیک هر سیکل با نرخ جابجایی رچتینگ در آن سیکل مشاهده شد و با کاهش انرژی پلاستیک، نرخ جابجایی رچتینگ نیز بصورت خطی کاهش می‌یابد.

۸- با افت نرخ جابجایی رچتینگ در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، به دلیل کاهش بیشتر گشتاور خمشی در پانل‌های با طول بلندتر، کاهش در انرژی پلاستیک آن بیشتر است.

۹- در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، برای یک طول ثابت و تعداد سیکل معین، پانل استوانه‌ای مایل دارای جابجایی رجتینگ بیشتری نسبت به پانل استوانه‌ای عمودی است که این به دلیل وجود گشتاور خمشی در پانل‌های استوانه‌ای مایل است.

۱۰- در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، در پانل‌های استوانه‌ای مایل نسبت به پانل استوانه‌ای عمودی در هر سیکل، اتلاف انرژی بیشتر است که این نیز به دلیل وجود گشتاور خمشی در پانل استوانه‌ای مایل است. بنابراین گشتاور خمشی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در انرژی اتلافی و افزایش تغییر شکل پلاستیک دارد.

۱۱- در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، به دلیل کاهش در مقدار گشتاور خمشی در پانل‌های استوانه‌ای مایل، کاهش در انرژی پلاستیک پانل‌های استوانه‌ای مایل بیشتر از پانل‌های استوانه‌ای عمودی با همان طول است.

۱۲- تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر بر روی پانل‌های استوانه‌ای Ck45، انباشتگی کرنش پلاستیک و رفتار رجتینگ مشاهده شد.

۱۳- در پانل‌های استوانه‌ای Ck45، تحت بارگذاری محوری تناوبی، با افزایش تعداد سیکل، کرنش رجتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.

۱۴- در شرایط بارگذاری نیرو-کنترل با تنش محوری یکسان ($\sigma_y = 1/0.5$) بر روی پانل‌های استوانه‌ای Ck45 با طول برابر (۳۶۰ میلی‌متر)، با افزایش زاویه‌ی پانل‌ها، کرنش رجتینگ و نرخ کرنش رجتینگ افزایش می‌یابد.

۱۵- در پانل استوانه‌ای، تحت بارگذاری محوری تناوبی، با افزایش زاویه‌ی پانل، تعداد سیکل لازم برای شکست یا به عبارتی عمر قطعه کاهش می‌یابد.

۱۶- در پانل‌های استوانه‌ای Ck45، تحت بارگذاری محوری، با افزایش زاویه‌ی پانل، انرژی پلاستیک برای یک سیکل معین افزایش می‌یابد.

۱۷- در بارگذاری محوری تناوبی تحت شرایط نیرو-کنترل پانل‌های استوانه‌ای، در یک زاویه‌ی معین، با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک کاهش می‌یابد.

۱۸- در پانل‌های استوانه‌ای Ck45، تحت بارگذاری محوری، در یک سیکل معین، زاویه‌ی پانل رابطه‌ی مستقیم با کرنش رج‌تینگ، نرخ کرنش رج‌تینگ و انرژی و رابطه‌ی معکوس با عمر قطعه دارد.

۱۹- تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر بر روی پانل‌های استوانه‌ای Ck45، با کاهش انرژی پلاستیک نرخ کرنش رج‌تینگ به صورت نسبتاً خطی کاهش می‌یابد.

فصل ۳

تحليل عددی و مقایسه نتایج عددی و تجربی

۳-۱- مقدمه

نرم افزار آباکوس^۱، در کنار بسیاری از توانایی‌های خود قادر به آنالیز مسایل تحت بارگذاری سیکلی، نیز می‌باشد. برای بررسی این دسته از مسایل در ابتدا به معرفی مدل‌های ماده پلاستیک در نرم‌افزار می‌پردازیم.

برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری سیکلی باید از مدل سخت شونده‌گی سینماتیکی^۲ استفاده کرد.

این مدل در دو شاخه زیر به کار می‌رود.

۱- مدل سخت شونده‌گی سینماتیکی خطی^۳.

۲- مدل سخت شونده‌گی سینماتیکی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک^۴.

مدل نخست می‌تواند با سطح تسلیم میسس^۵ یا هیل^۶ به کار برده شود، در حالی که مدل دوم را تنها با سطح تسلیم میسس می‌توان به کار برد. در واقع تفاوت این دو سطح تسلیم در آن است که با استفاده از سطح تسلیم میسس، در هر لحظه تنش تسلیم برای ماده در تمام جهات یکسان است؛ اما با استفاده از سطح تسلیم هیل می‌توان تنش تسلیم را در جهات مختلف، متفاوت با یکدیگر تعریف کرد.

هر چند مدل سخت شونده‌گی سینماتیکی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک دارای محدودیت‌های بیشتری نسبت به مدل نخست است؛ که از آن جمله همانگونه که گفته شد، امکان استفاده از سطح تسلیم هیل را به کاربر نمی‌دهد؛ یا اینکه آنالیز مسائل کوپله تنش حرارتی به کمک این مدل امکان-

1- Abaqus
2- Kinematic Hardening
3- Linear kinematic hardening
4- Nonlinear isotropic/ kinematic hardening
5- Mises
6- Hill

پذیر نمی‌باشد؛ اما با این وجود برای آنالیز مسایل تحت بارگذاری سیکلی کامل‌ترین و دقیق‌ترین مدل است.

بنابراین ابتدا به بررسی مدل سخت شونده‌گی سینماتیکی خطی پرداخته و سپس مدل سخت شونده‌گی سینماتیکی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک توضیح داده خواهد شد [۳۰].

در مدل سخت شونده‌گی سینماتیکی خطی فرض می‌شود که سطح تسلیم متناسب با مقدار α در فضای تسلیم حرکت می‌کند؛ اما تغییر شکل نمی‌دهد. نرم افزار آباکوس از مدل خطی زیگلر^۱ استفاده می‌کند که معادله آن به صورت رابطه زیر ارائه می‌دهد:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma^0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\epsilon}^{pl} + \frac{1}{C} \dot{C} \alpha \quad (1-3)$$

که در آن C مدول سخت شونده‌گی سینماتیک^۲ و \dot{C} نرخ تغییرات C بر حسب دما است. در این مدل، اندازه سطح تسلیم ثابت می‌ماند. به بیان دیگر σ^0 در رابطه‌ی (۱-۳) همواره مساوی $\hat{\sigma}_0$ که تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است، باقی می‌ماند. برای معرفی این مدل به نرم افزار، در متن فایل ورودی و در نبود تاثیر حرارت از دستور Plastic به صورت زیر استفاده می‌شود:

*plastic

*Plastic, Hardening=Kinematic

$\hat{\sigma}_0, 0$

$\sigma_1^0, \epsilon_1^{pl}$

$\sigma_2^0, \epsilon_2^{pl}$

مقدار C با استفاده از رابطه (۲-۳) و بوسیله‌ی نرم افزار محاسبه خواهد شد:

1- Ziegler

2- Kinematic Hardening modulus

$$C = \frac{\sigma_1^0 - \hat{\sigma}_0}{\varepsilon_{pl}} \quad (2-3)$$

و برای در نظر گرفتن اثرات تغییر دما:

*Plastic, Hardening=Kinematic

$$\hat{\sigma}_0, 0, T1$$

$$\sigma_1^0, \varepsilon_1^{pl}, T1$$

$$\hat{\sigma}_0, 0, T2$$

$$\sigma_1^0, \varepsilon_1^{pl}, T2$$

به این ترتیب در هر دما، مقدار C از رابطه (۲-۳) و بوسیله نرم افزار محاسبه خواهد شد. دقت شود

که برای هر دما تنها دو مقدار تنش و کرنش پلاستیک قابل تعریف است.

مدل سخت شوندهگی سینماتیکی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک که بر اساس روابط ارائه شده

توسط چابوچه^۱ در سال ۱۹۹۰ تهیه شده است، در برگیرنده حرکت سطح تسلیم متناسب با مقدار α

در فضای تنش بوده و همچنین تغییر اندازه سطح تسلیم در آن متناسب با مقدار کرنش پلاستیک

است. برای معرفی چنین مدلی، یک ترم غیر خطی به منظور نشان دادن تغییر اندازه سطح تسلیم به

رابطه (۱-۳) اضافه می شود. مدل ارائه شده در آکوس به صورت زیر است:

$$\dot{\alpha} = C \frac{1}{\sigma_0} (\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) \dot{\varepsilon}^{pl} - \gamma \alpha_{ij} \dot{\varepsilon}^{pl} + \frac{1}{c} \alpha_{ij} \dot{C} \quad (3-3)$$

که در آن C و γ ثابت‌های ماده بوده و \dot{C} نرخ تغییرات C بر حسب دما است. البته باید به این

نکته اشاره کرد که نرم افزار توانایی در نظر گرفتن نرخ تغییرات γ نسبت به دما را ($\dot{\gamma}$) ندارد. این

مدل هنگامی که C و γ مساوی صفر فرض شوند، به مدل سخت شوندهگی ایزوتروپیک و هنگامی که

γ به تنهایی مساوی صفر فرض شود، به مدل خطی زیگلر تبدیل خواهد شد.

1- Chaboche

به منظور معرفی این مدل برای نرم افزار لازم است بخش ایزوتریپیک (یا رشد سطح تسلیم در فضای تنش) و بخش سینماتیک (یا حرکت سطح تسلیم در فضای تنش)، به صورت جداگانه برای نرم‌افزار تعریف شوند.

برای تعیین رشد سطح تسلیم در نرم افزار آباکوس از رابطه (۳-۴) با معرفی اندازه σ^0 به صورت تابعی نمایی استفاده می‌شود.

$$\sigma^0 = \hat{\sigma}_0 + Q_\infty(1 - e^{-b\bar{\epsilon}^{pl}}) \quad (۳-۴)$$

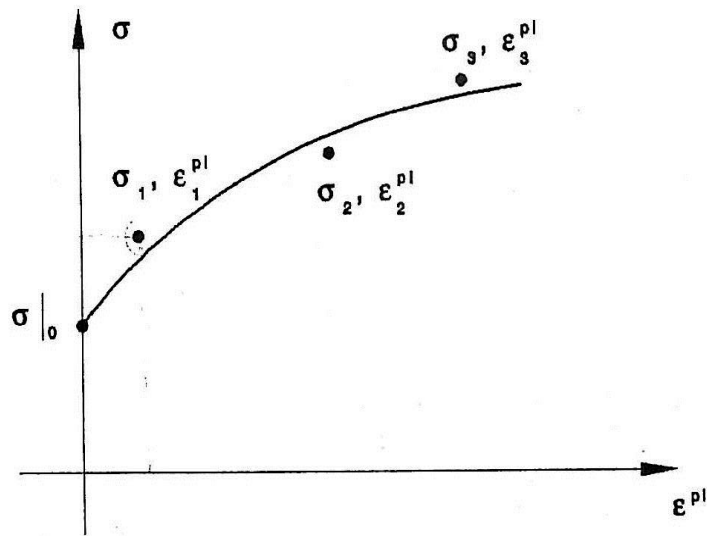
که در آن $\hat{\sigma}_0$ نشان دهنده تنش تسلیم به ازای کرنش پلاستیک صفر است. مقادیر b و Q_∞ نیز ثابت‌های ماده هستند. اگر مقادیر این ثابت‌ها مشخص باشند، می‌توان آنها را به شکل زیر برای نرم‌افزار در متن فایل ورودی تعریف کرد:

*Cyclic Hardening, Parameters

$\hat{\sigma}_0, Q_\infty, b$

برای تعیین حرکت سطح تسلیم در فضای تنش برای نرم افزار آباکوس از یک نیم سیکل مربوط به آزمایش کشش یک بعدی استفاده می‌شود.

اگر نیم سیکل نخست از آزمون یک بعدی کشش یا فشار در اختیار باشد، نرم افزار با استفاده از اطلاعات به دست آمده از این نیم سیکل، می‌تواند پارامترهای γ و C را محاسبه کند. البته به-کارگیری این روش تنها برای هنگامی که تعداد سیکل‌های بارگذاری کم باشد، سفارش شده است. نتایج حاصل از یک آزمون کشش، مانند شکل (۳-۱) را در نظر بگیرید [۳۱].



شکل (۱-۳) نیم سیکل نخست آزمایش کشش یک بعدی [۳۰]

برای هر نقطه روی این نمودار مانند $(\sigma_i, \varepsilon_i^{pl})$ ، مقدار α_i به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\alpha_i = \sigma_i - \sigma_i^0 \quad (۵-۳)$$

که در آن σ_i^0 مشخص کننده اندازه سطح تسلیم به ازای ε_i^{pl} است و همان گونه که بیان شد، این رابطه با کمک دستور **Cyclic Hardening*** برای نرم افزار تعریف شده است. با انتگرال گیری از

رابطه (۳-۳) برای α روی یک نیم سیکل نتیجه به صورت زیر خواهد بود.

$$\alpha = \frac{C}{\gamma} (1 - e^{-\gamma \varepsilon^{pl}}) \quad (۶-۳)$$

با استفاده از روابط (۵-۳)، (۶-۳) و مقادیر مختلف $(\sigma_i, \varepsilon_i^{pl})$ که توسط کاربر داده می شوند، نرم افزار توانایی محاسبه ضرایب C و γ خواهد داشت. به منظور استفاده از این روش در متن فایل ورودی از دستور زیر استفاده می شود.

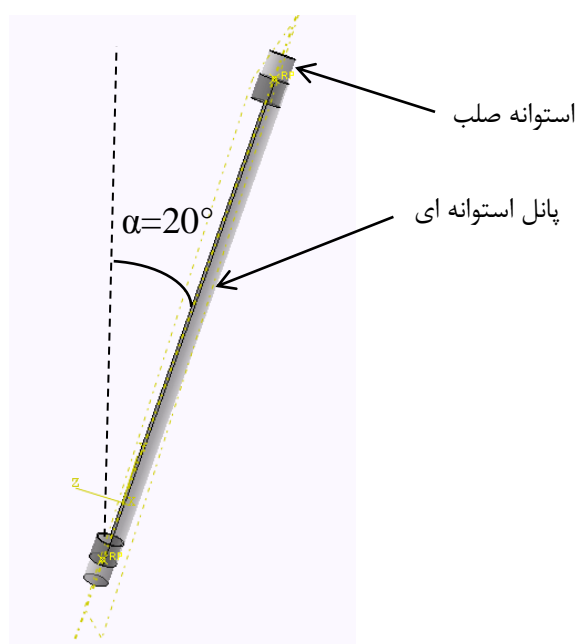
*Plastic, Hardening = Combined, Data Type = Half Cycle

$$\sigma_1, \varepsilon_1^{pl}$$

$$\sigma_2, \varepsilon_2^{pl}$$

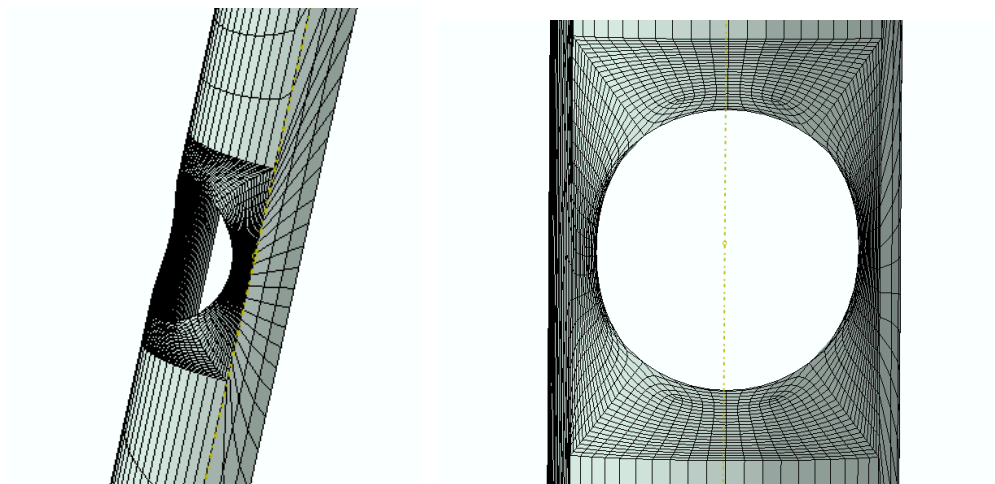
۲-۳- تحلیل عددی

در این بخش مقایسه نتایج عددی با نتایج تجربی روی پانل استوانه‌ای SS304L تحت بارگذاری سیکلی گزارش شده است. پانل‌های استوانه‌ای از جنس Ck45 به دلیل یکسان نبودن خواص ماده در کشش و فشار و همچنین مجهز نبودن نرم افزار آباکوس به مدل دراگر-پراگر^۱، رفتار رچتینگ مناسبی در نرم افزار از خود نشان نمی دهند. به پانل‌های استوانه‌ای مشابه آزمایش‌های تجربی به صورت عمودی و مایل با زاویه ۲۰ درجه نسبت به عمود تحت بارگذاری نیرو- کنترل شبیه سازی شده‌اند و نتایج بدست آمده با نتایج تجربی روی پانل استوانه‌ای با هم مقایسه شده است. دو طرف پانل از دو استوانه‌ای صلب با ارتفاع ۴۰ میلی متر استفاده شده است که مشابه شرایط مرزی آزمایش‌های تجربی، این استوانه‌های صلب به میزان ۲۰ میلی متر درون پانل استوانه‌ای قرار گرفته‌اند و سطوح خارجی استوانه‌های صلب به سطوح داخلی پانل استوانه‌ای به طور کامل متصل می‌شوند (شکل (۲-۳)).



شکل (۲-۳) پانل استوانه‌ای مدل شده در نرم افزار آباکوس تحت بارگذاری مرکب تناوبی

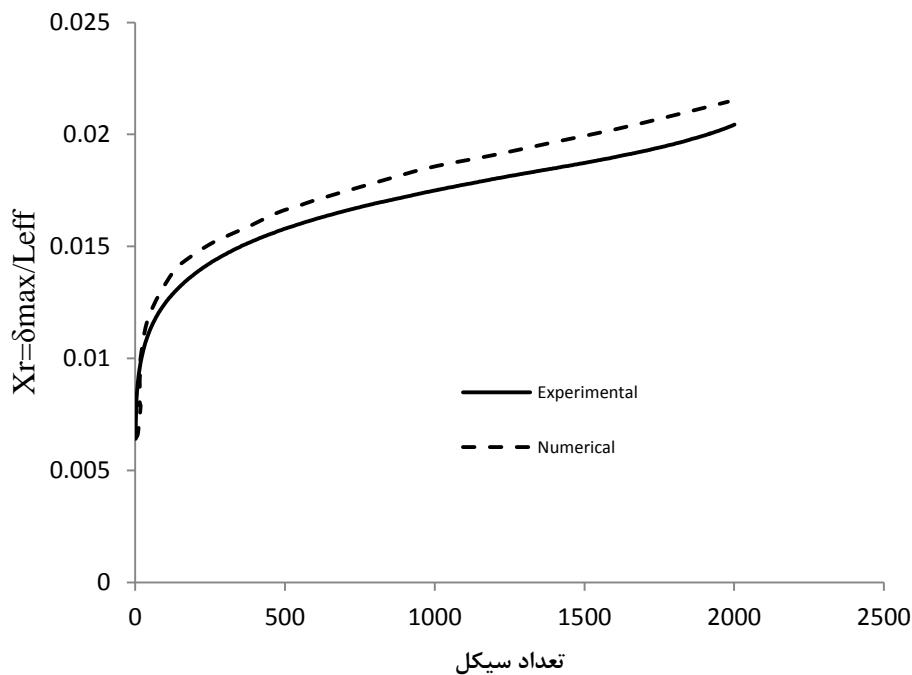
نیرو و شرایط مرزی نیز به نقطه‌ی مرجع استوانه‌های صلب اعمال می‌شود. استوانه‌ی صلب بالا با شرایط مرزی از نوع جابجایی/چرخشی در تمامی جهات مقید گردیده است ($U_1=U_2=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$). استوانه صلب پایین نیز در تمامی جهات به غیر از جهت بارگذاری عمودی (راستای محور y) مقید شده است ($U_1=U_3=UR_1=UR_2=UR_3=0$). از المان S8R5 در شبیه سازی عددی استفاده شده است که یک المان پوسته ۸ گره‌ای می‌باشد که نوع آن غیر خطی و درجه آزادی آن در هر گره ۵ می باشد. در نمونه‌های دارای گشودگی، اطراف گشودگی به علت تمرکز تنش دارای مش بندی ریزتری نسبت به سایر نقاط می‌باشند. در شکل (۳-۳)، یک نمونه پانل استوانه‌ای مش بندی شده دارای گشودگی نشان داده شده است. برای بارگذاری مشابه بارگذاری تجربی به پارامتر CF2 در جهت محور y مقدار ۱۳۵۰۰ نیوتن اختصاص می‌یابد و برای بارگذاری تناوبی از پارامتر دامنه و با موج سینوسی استفاده شده است. در این تحلیل از مدل سخت شونده‌ی غیرخطی ایزوتروپیک/سینماتیک استفاده شده است که اندازه‌ی سطح تسلیم در فضای تنش به‌طور یکنواخت در تمامی جهات تغییر کرده و مرکز آن نیز انتقال می‌یابد.



شکل (۳-۳) پانل استوانه‌ای دارای گشودگی المان بندی شده

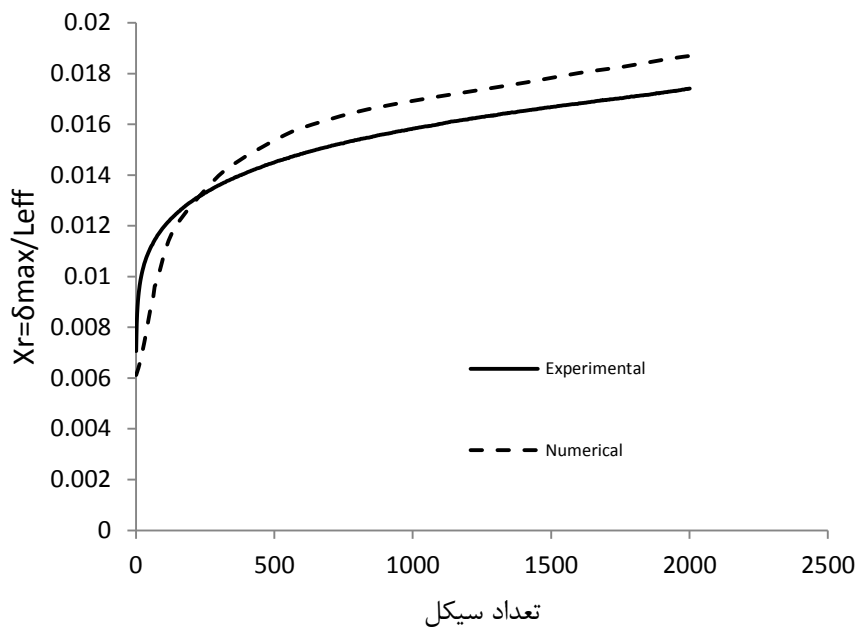
۳-۳- نتایج عددی و مقایسه نتایج عددی و تجربی پانل استوانه‌ای SS304L

در شکل‌های (۳-۴)، (۳-۵) و (۳-۶) نتایج حاصل از تحلیل عددی برای چند نمونه با نتایج تجربی مقایسه شده‌اند. مشاهده می‌شود که در منحنی‌های عددی مشابه منحنی‌های تجربی، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد. در سیکل‌های ابتدایی، منحنی‌های عددی و تجربی مطابقت خوبی دارند؛ اما در ادامه نرم افزار آباکوس جز در یک مورد، جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند.



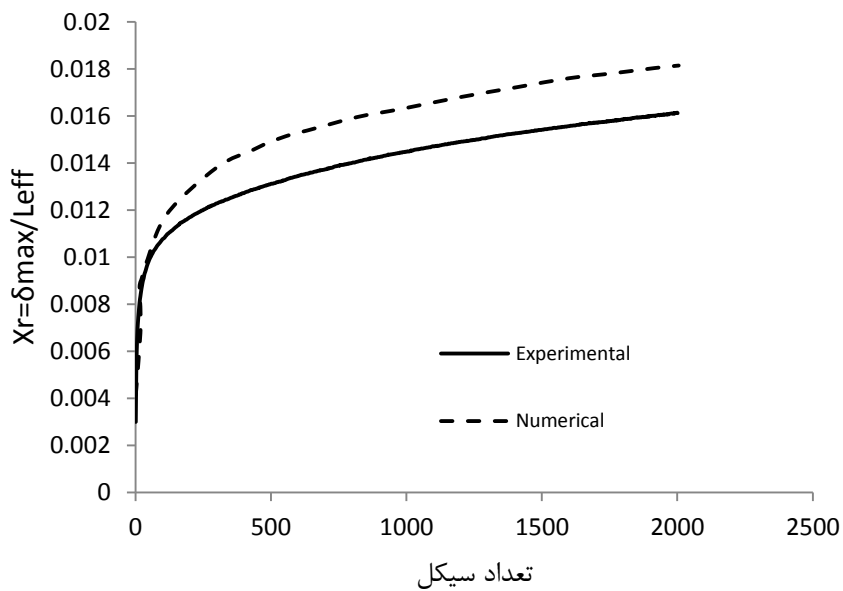
شکل (۳-۴) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۷۵

میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L



شکل (۳-۵) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۲۷۵

میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L



شکل (۳-۶) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵

میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L

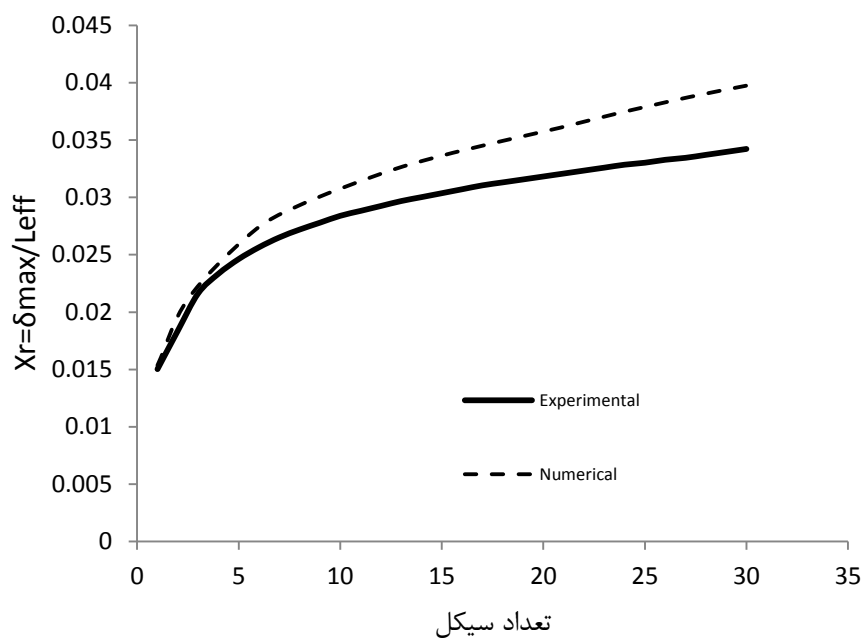
در پانل استوانه‌ای مایل دارای گشودگی در شکل‌های (۷-۳) و (۸-۳)، میزان جابجایی رچتینگ در نمونه‌ی واقعی بیشتر از نتایج عددی است و به سرعت نمونه دچار شکست می‌شود. علت این امر وجود عیوب و ترک‌های ریز در اطراف گشودگی در نمونه‌ی واقعی می‌باشد که سرعت افزایش جابجایی رچتینگ و شکست نمونه را افزایش می‌دهد؛ حال آنکه در نمونه‌ی ایده‌ال عددی، این عیوب لحاظ نشده‌اند.

در شکل (۹-۳) تغییر شکل گشودگی در میانه‌ی پانل استوانه‌ای نشان داده شده است. بارگذاری مشابه آزمایش‌های تجربی در جهت بازشدن گشودگی می‌باشد و مشاهده می‌شود که در بارگذاری‌های مرکب و محوری، ایجاد گشودگی با افزایش جابجایی رچتینگ همراه است. دلیل این امر نیز تمرکز تنش در اطراف گشودگی است. در شکل (۹-۳) تغییر شکل در سیکل ۵ برای پانل استوانه‌ای مایل با طول مؤثر میلی ۱۷۵ مشاهده می‌شود که اطراف گشودگی بیشترین تنش را تحمل می‌کنند و در واقع تمرکز تنش و شکست از این نقاط خواهد بود که شاهد چنین رفتاری در آزمایش‌های تجربی نیز بودیم.

با توجه به شکل (۹-۳)، نواحی سمت چپ پانل استوانه‌ای شامل گشودگی جز در اطراف گشودگی، تنش‌های ضعیف‌تری را نسبت به نواحی سمت راست پانل استوانه‌ای تحمل می‌کنند. خمش ایجاد شده در میانه‌ی پانل استوانه‌ای، وجود گشتاور خمشی را در بارگذاری مرکب و تأثیر آن در ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک به روشنی نشان می‌دهد.

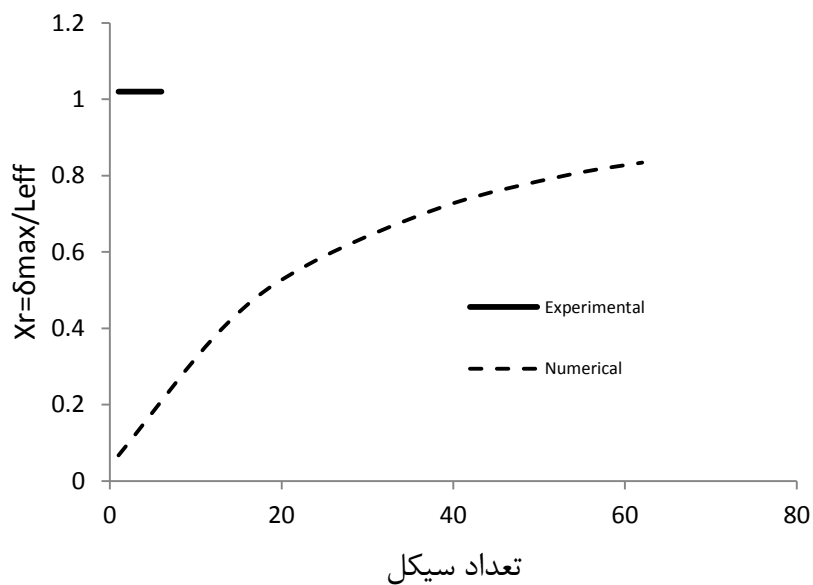
علت اختلاف نمودار تجربی و عددی در شکل (۸-۳) این است که نرم‌افزار آباکوس توانایی تحلیل آسیب^۱ در محل گشودگی را نداشته و لذا تعداد سیکل بارگذاری تا بی‌نهایت ادامه پیدا می‌کند.

1- Damage



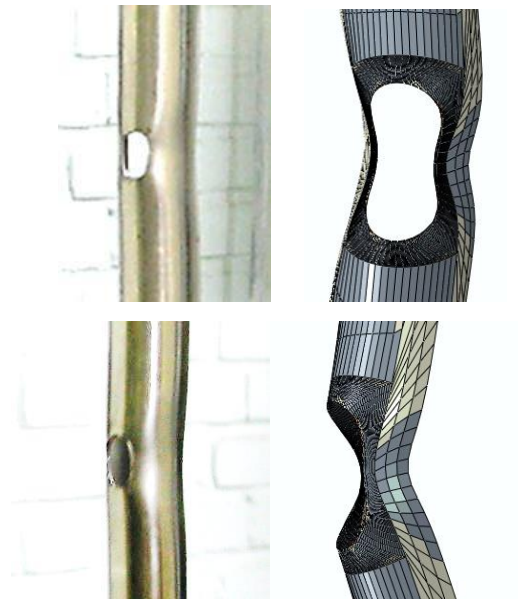
شکل (۷-۳) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل استوانه‌ای دارای گشودگی دایروی با

طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری محوری تناوبی از جنس SS304L



شکل (۸-۳) مقایسه مقادیر جابجایی رچتینگ تجربی و عددی برای پانل استوانه‌ای دارای گشودگی دایروی با

طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی از جنس SS304L



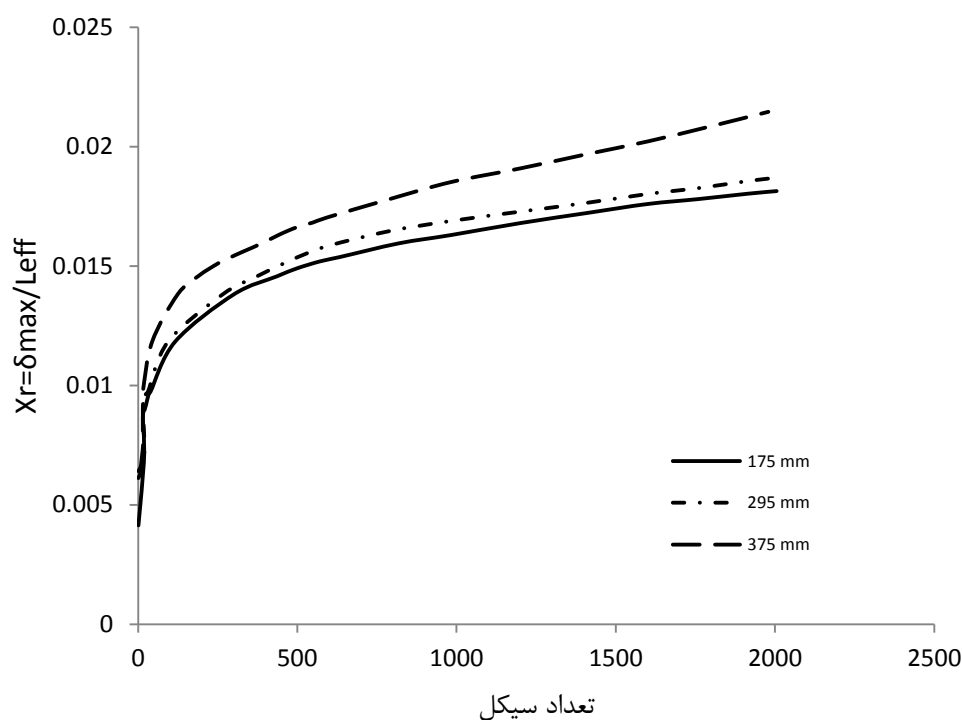
شکل (۳-۹) تغییر شکل انجام شده برای پانل استوانه‌ای دارای گشودگی دایروی با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر از

جنس SS304L تحت بارگذاری مرکب تناوبی در سیکل ۵

۳-۴- تأثیر طول پانل استوانه‌ای مایل بر رفتار رجتینگ آن تحت بارگذاری

مرکب در تحلیل عددی

در این قسمت پانل‌های استوانه‌ای با طول‌های مؤثر ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی‌متر به صورت مایل تحت بار مرکب تناوبی نیرو-کنترل و با مقدار بار و موج سینوسی یکسان قرار گرفته‌اند و توسط نرم افزار آباکوس و به صورت عددی تحلیل شده‌اند. مشاهده می‌شود که با توجه به شکل (۳-۱۰) با افزایش طول پانل استوانه‌ای، جابجایی رجتینگ نیز برای تعداد سیکل معین افزایش می‌یابد که این به دلیل وجود گشتاور خمشی بزرگتر در مقاطع مختلف پانل‌های استوانه‌ای با طول بلندتر است. این نتایج با نتایج حاصل از آزمایش‌های تجربی مطابقت دارد.

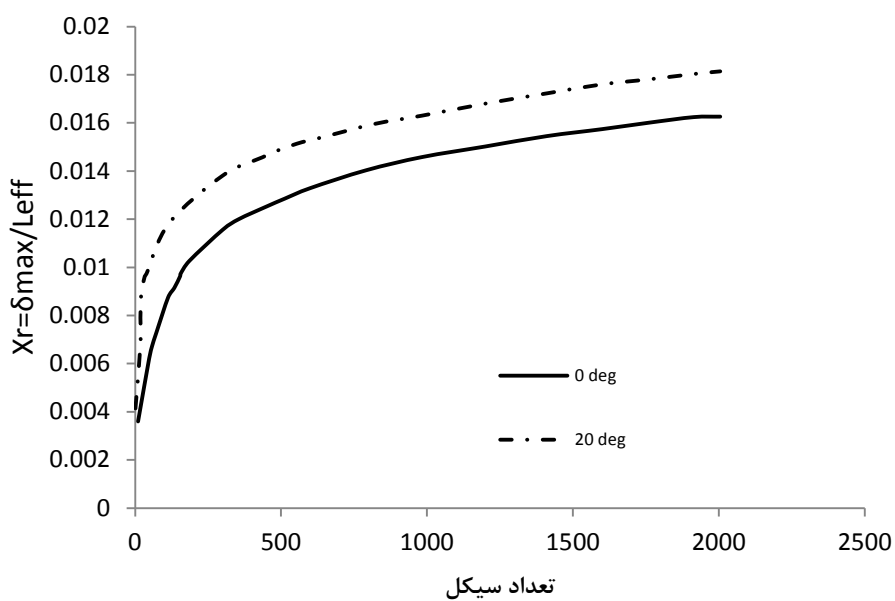


شکل (۳-۱۰) جابجایی رچتینگ پانل بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول‌های مختلف تحت

بارگذاری مرکب تناوبی در نتایج عددی از جنس SS304L

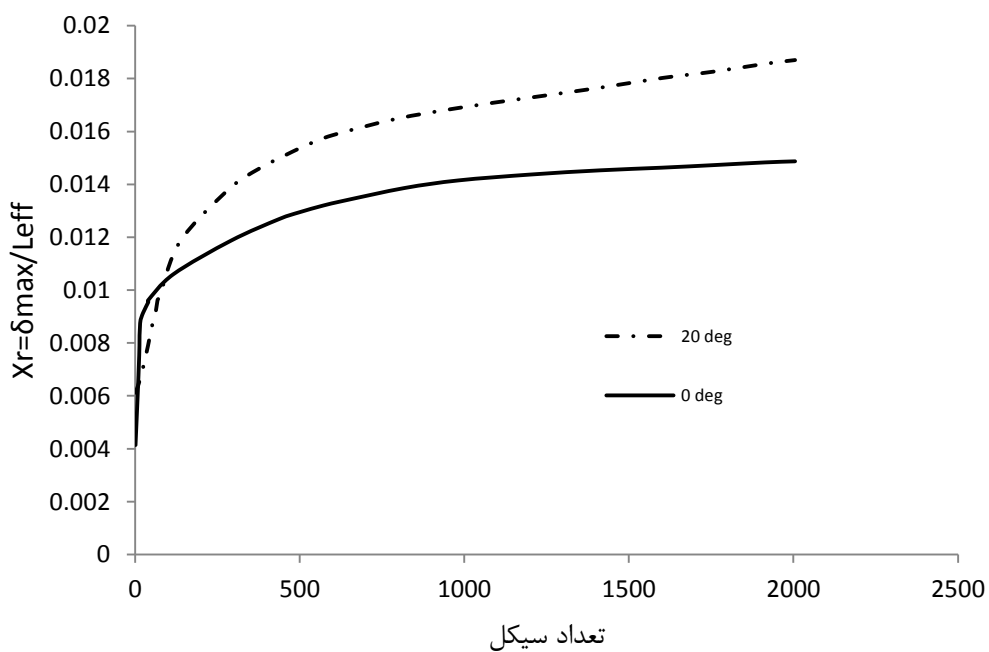
۳-۵- تأثیر زاویه‌ی پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن در تحلیل عددی

در بررسی زاویه‌ی پانل استوانه‌ای بر رفتار رچتینگ آن، با توجه به شکل‌های (۳-۱۱)، (۳-۱۲) و (۳-۱۳) مشاهده می‌شود که در تحلیل عددی مشابه تحلیل تجربی، جابجایی رچتینگ در پانل استوانه‌ای مایل بیشتر از پانل استوانه‌ای عمودی است. همانطور که قبلاً گفته شد، گشتاور خمشی نقش بسیار مهمی در ایجاد تغییرشکل‌های پلاستیک و پدیده‌ی رچتینگ ایفا می‌کند که در تحلیل‌های عددی نیز می‌توان وجود گشتاور خمشی را در افزایش جابجایی رچتینگ پانل‌های استوانه‌ای مایل در مقایسه با پانل‌های استوانه‌ای عمودی مشاهده کرد.



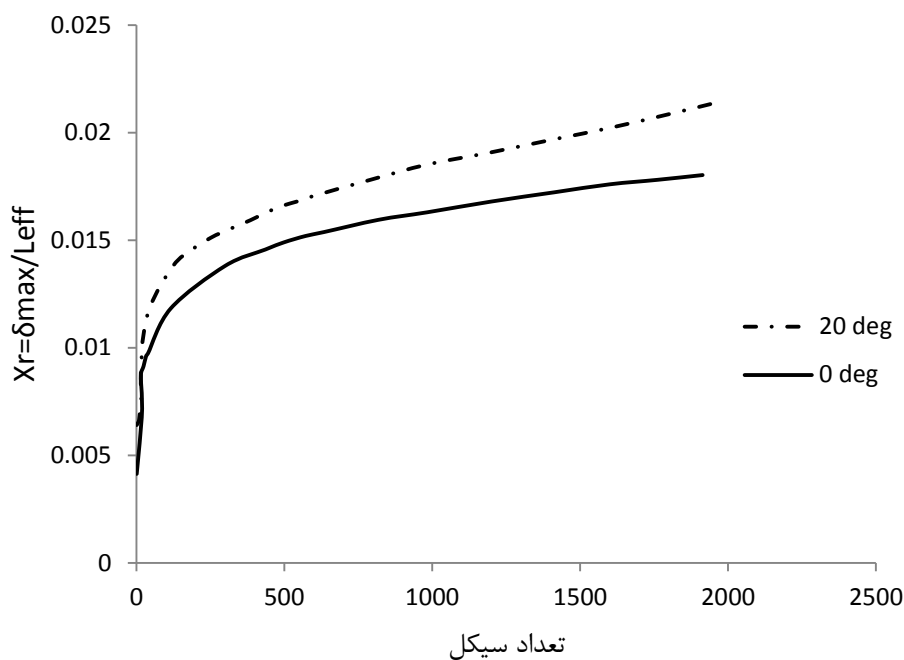
شکل (۳-۱۱) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر

تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی از جنس SS304L



شکل (۳-۱۲) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۲۹۵ میلی متر

تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی از جنس SS304L



شکل (۳-۱۳) جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای با طول مؤثر ۳۷۵ میلی متر

تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی در نتایج عددی از جنس SS304L

۳-۶- نتیجه گیری

با توجه به شبیه سازی‌های انجام شده توسط نرم‌افزار آباکوس و مقایسه با نتایج تجربی می‌توان نتایج

زیر را تحت بارگذاری محوری و مرکب سیکلی برای پانل استوانه‌ای SS304L بدست آورد:

۱. در منحنی‌های عددی جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای

تحت بارگذاری محوری و مرکب، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.

۲. در پانل‌های استوانه‌ای بدون گشودگی، منحنی‌های عددی جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد

سیکل در سیکل‌های ابتدایی مطابقت خوبی با منحنی‌های تجربی دارند؛ اما در ادامه،

جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کنند.

۳. در پانل‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، به دلیل وجود تمرکز تنش و عیوب‌های ریز در اطراف

گشودگی در نمونه‌ی واقعی، جابجایی رچتینگ بیشتر از نتایج حاصل از تحلیل عددی در

پانل‌های استوانه‌ای ایده‌ال است.

۴. در نتایج عددی، به دلیل وجود گشتاور خمشی بزرگتر در پانل‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر، جابجایی رچتینگ برای تعداد سیکل معین بیشتر است.
۵. در تحلیل‌های عددی، جابجایی رچتینگ در پانل‌های استوانه‌ای مایل بیشتر از پانل‌های استوانه‌ای عمودی است که بر وجود تأثیر گشتاور خمشی در نمونه‌های تحت بارگذاری مرکب صحنه می‌گذارد.
۶. ایجاد گشودگی در پانل‌های استوانه‌ای در نرم‌افزار آباکوس، با افزایش جابجایی رچتینگ هم در بارگذاری مرکب و هم در بارگذاری محوری همراه است. با ایجاد گشودگی، تمرکز تنش ناشی از بارگذاری محوری در پانل‌های استوانه‌ای عمودی و بارگذاری مرکب در پانل‌های استوانه‌ای مایل ایجاد می‌شود که باعث تشدید افزایش جابجایی رچتینگ می‌شود.

فصل ۴

نتیجه گیری و پیشنهادها

۴-۱- نتیجه گیری

در این تحقیق با انجام مطالعات تجربی روی پانل‌های استوانه‌ای فولادی تحت بارگذاری متناوب، رفتار رچتینگ این پانل‌ها بررسی شد و تأثیر گشتاور خمشی تحت بارگذاری مرکب پانل‌های استوانه‌ای مشاهده شد. نتایج زیر از این تحلیل به دست آمد.

۴-۱-۱- نتایج حاصل از پانل استوانه‌ای از جنس SS304L

۱- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پانل استوانه‌ای برای یک سیکل معین، جابجایی رچتینگ به دلیل افزایش گشتاور خمشی، افزایش می‌یابد.

۲- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل برای یک طول معین پانل استوانه‌ای با افزایش تعداد سیکل، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.

۳- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پانل استوانه‌ای جابجایی رچتینگ دارای نرخ بالاتری است.

۴- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل، پانل استوانه‌ای از نقاط انتهایی به دلیل وجود گشتاور خمشی بیشتر در این نواحی، دچار شکست می‌شود و کشیدگی بیشتر در این نواحی مشاهده می‌گردد.

۵- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل، پانل استوانه‌ای با افزایش طول نمونه‌ها، طول عمر یا تعداد سیکل لازم برای شکست نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

۶- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، پانل با طول بلندتر دارای انرژی پلاستیک بیشتری نسبت به پانل با طول کوتاه‌تر است که با افزایش سیکل این

اختلاف کاهش می یابد. همچنین برای یک طول معین، با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک در هر سیکل کاهش می یابد تا اینکه به مقدار ثابتی برسد.

۷- در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل برای طول‌های مختلف پانل استوانه‌ای، رابطه‌ی خطی بین انرژی پلاستیک هر سیکل با نرخ جابجایی رجتینگ در آن سیکل مشاهده شد و با کاهش انرژی پلاستیک، نرخ جابجایی رجتینگ نیز بصورت خطی کاهش می یابد.

۸- با افت نرخ جابجایی رجتینگ در بارگذاری مرکب سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، به دلیل کاهش بیشتر گشتاور خمشی در پانل‌های با طول بلندتر، کاهش در انرژی پلاستیک آن بیشتر است.

۹- در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، برای یک طول ثابت و تعداد سیکل معین، پانل استوانه‌ای مایل دارای جابجایی رجتینگ بیشتری نسبت به پانل استوانه‌ای عمودی است که این به دلیل وجود گشتاور خمشی در پانل‌های استوانه‌ای مایل است.

۱۰- در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، در پانل‌های استوانه‌ای مایل نسبت به پانل استوانه‌ای عمودی در هر سیکل، اتلاف انرژی بیشتر است که این نیز به دلیل وجود گشتاور خمشی در پانل استوانه‌ای مایل است. بنابراین گشتاور خمشی تاثیر قابل ملاحظه‌ای در انرژی اتلافی و افزایش تغییر شکل پلاستیک دارد.

۱۱- در بارگذاری سیکلی تحت شرایط نیرو-کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، به دلیل کاهش در مقدار گشتاور خمشی در پانل‌های استوانه‌ای مایل، کاهش در انرژی پلاستیک پانل‌های استوانه‌ای مایل بیشتر از پانل‌های استوانه‌ای عمودی با همان طول است.

۴-۱-۲- نتایج حاصل از پانل استوانه‌ای از جنس Ck45

۱۲- تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر بر روی پانل‌های استوانه‌ای Ck45، انباشتگی کرنش پلاستیک و رفتار رچتینگ مشاهده شد.

۱۳- در پانل‌های استوانه‌ای Ck45، تحت بارگذاری محوری تناوبی، با افزایش تعداد سیکل، کرنش رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.

۱۴- در شرایط بارگذاری نیرو-کنترل با تنش محوری یکسان ($\sigma_y = 1/0.5$) بر روی پانل‌های استوانه‌ای Ck45 با طول برابر (۳۶۰ میلی‌متر)، با افزایش زاویه‌ی پانل‌ها، کرنش رچتینگ و نرخ کرنش رچتینگ افزایش می‌یابد.

۱۵- در پانل استوانه‌ای، تحت بارگذاری محوری تناوبی، با افزایش زاویه‌ی پانل، تعداد سیکل لازم برای شکست یا به عبارتی عمر قطعه کاهش می‌یابد.

۱۶- در پانل‌های استوانه‌ای Ck45، تحت بارگذاری محوری، با افزایش زاویه‌ی پانل، انرژی پلاستیک برای یک سیکل معین افزایش می‌یابد.

۱۷- در بارگذاری محوری تناوبی تحت شرایط نیرو-کنترل پانل‌های استوانه‌ای، در یک زاویه‌ی معین، با افزایش تعداد سیکل، انرژی پلاستیک کاهش می‌یابد.

۱۸- در پانل‌های استوانه‌ای Ck45، تحت بارگذاری محوری، در یک سیکل معین، زاویه‌ی پانل رابطه‌ی مستقیم با کرنش رچتینگ، نرخ کرنش رچتینگ و انرژی و رابطه‌ی معکوس با عمر قطعه دارد.

۱۹- تحت بارگذاری نیرو-کنترل با نیروی میانگین غیر صفر بر روی پانل‌های استوانه‌ای Ck45، با کاهش انرژی پلاستیک نرخ کرنش رچتینگ به صورت نسبتاً خطی کاهش می‌یابد.

۴-۱-۳- نتایج حاصل از تحلیل عددی

۲۰- در منحنی‌های عددی جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل برای پانل‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری محوری و مرکب، جابجایی رچتینگ افزایش و نرخ آن کاهش می‌یابد.

۲۱- در پانل‌های استوانه‌ای بدون گشودگی، منحنی‌های عددی جابجایی رچتینگ بر حسب تعداد سیکل در سیکل‌های ابتدایی مطابقت خوبی با منحنی‌های تجربی دارند؛ اما در ادامه، جابجایی رچتینگ را بیشتر از مقدار واقعی پیش بینی می‌کنند.

۲۲- در پانل‌های استوانه‌ای دارای گشودگی، به دلیل وجود تمرکز تنش و عیوب ریز در اطراف گشودگی در نمونه‌ی واقعی، جابجایی رچتینگ بیشتر از نتایج حاصل از تحلیل عددی در پانل‌های استوانه‌ای ایده‌آل است.

۲۳- در نتایج عددی، به دلیل وجود گشتاور خمشی بزرگ‌تر در پانل‌های استوانه‌ای مایل با طول بلندتر، جابجایی رچتینگ برای تعداد سیکل معین بیشتر است.

۲۴- در تحلیل‌های عددی، جابجایی رچتینگ در پانل‌های استوانه‌ای مایل بیشتر از پانل‌های استوانه‌ای عمودی است که بر وجود تأثیر گشتاور خمشی در نمونه‌های تحت بارگذاری مرکب صحنه می‌گذارد.

۲۵- ایجاد گشودگی در پانل‌های استوانه‌ای در نرم افزار آباکوس، با افزایش جابجایی رچتینگ هم در بارگذاری مرکب و هم در بارگذاری محوری همراه است. با ایجاد گشودگی، تمرکز تنش ناشی از بارگذاری محوری در پانل‌های استوانه‌ای عمودی و بارگذاری مرکب در پانل‌های استوانه‌ای مایل ایجاد می‌شود که باعث تشدید افزایش جابجایی رچتینگ می‌شود.

۴-۲- پیشنهادها

با توجه به آزمایش‌هایی که روی پوسته‌های استوانه‌ای SS304L تحت بارگذاری‌های مرکب و محوری به صورت سیکلی انجام گردیده و همچنین مقایسه نتایج تجربی بدست آمده با نتایج عددی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار آباکوس، می‌توان برای ادامه این تحقیق پیشنهادهایی به شرح زیر ارائه نمود:

۱. رفتار رچتینگ پانل‌های استوانه‌ای مایل دارای ترک و همچنین گشودگی در موقعیت‌های مختلف پانل استوانه‌ای، انجام نشده است. بنابراین می‌توان تأثیر این عیوب را بر روی پانل‌های استوانه‌ای مایل بررسی کرد. می‌توان از جنس‌های پرکاربرد صنعتی مانند CK20 و یا آلومینیومی استفاده کرد.
۲. با توجه به مجهز نبودن نرم افزار اباکوس به مدل دراگر-پراگر، تلاش برای تغییر در قسمت خواص مکانیکی نرم افزار و شبیه سازی رچتینگ موادی همچون Ck45 و Ck20 وجود دارد.
۳. در این مقاله، پانل‌های استوانه‌ای مایل تحت بارگذاری نیرو-کنترل قرار گرفته‌اند. پانل‌های استوانه‌ای تحت بارگذاری مرکب می‌توانند در شرایط جابجایی-کنترل قرار بگیرند و تأثیر گشتاور خمشی بر رفتار نرم شوندگی آنها بررسی شود. همچنین می‌توان بارگذاری را به صورت ترکیبی از گشتاور خمشی و پیچشی اعمال نمود.
۴. روش‌های تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار رچتینگ، بیشتر روی نمونه‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. در بررسی تحلیلی می‌توان از مدل‌های سخت شوندگی غیرخطی برای پیش‌بینی و مقایسه‌ی نتایج تحلیلی با نتایج تجربی بر روی پانل‌های استوانه‌ای مایل و با وجود گشتاور خمشی استفاده کرد.

۵. انرژی به عنوان یک مقدار اسکالر، در نمونه‌های تحت بارگذاری سیکلی به پایداری می‌رسد و به عنوان یکی از پارامترهای آسیب‌های خستگی استفاده می‌شود. می‌توان از انرژی برای بررسی و پیش‌بینی رفتار رچتینگ پانل‌ها استفاده کرد.

- [1] Gibson J.E (1980), Thin shells, Structures and solid body mechanics series.
- [2] Amabili M. (2008), "Nonlinear vibrations and stability of shells and plates", *Cambridge University Press*, United State of America. 1.
- [۳] علی نیا م.م، (۱۳۸۹) " تئوری صفحات و پوسته‌ها" چاپ اول، انتشارات آشیان، تهران.
- [4] Farshad M. (1992), Design and Analysis of Shell Structures, *Kluwer Academic Publishers*, Dordrecht.
- [5] Wang C.M., Reddy J.N. (2005), Exact solution for buckling of structural members, *Computational Mechanics*, Texas A&M University.
- [۶] یار احمدی ح.، (۱۳۸۹)، سمینار ارشد: "مروری بر مدل‌های پلاستیسیته‌ی سیکلی و رچتینگ"، دانشکده مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [7] ASM Metal Handbook (1979), *Fatigue and fracture mechanics*, Vol. 19, 10th Ed.
- [8] Meldenson A. (1983), Plasticity: theory and applications.
- [9] Polak J. (1991), Cyclic plasticity and low cyclic fatigue life of metals.
- [10] Afkhami, A, Shariati, M. and Epakchi, H.R. (2008), "Elastic buckling analysis of a cylindrical panel under axial pressure with two simply support in curve edges and two free support in other edges", *8th Conference of Iranian Aerospace Society*, Isfahan, Iran
- [11] Buermann, P., Rolfes, R., Tessmer, J., Schagerl, M. (2006), "A semi-analytical model for local post-buckling analysis of stringer- an frame–stiffend cylindrical panels", *Thin-Walled Structures*, 44, p.p. 102-114.
- [12] Shariati, M., Saemi, J. and Sedighi, M. (2009), "Numerical and experimental analysis of cracked cylindrical panel", *9th Conference of Iranian Aerospace Society*, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran.
- [13] Jiang, L., Wang, Y., Wang, X. (2008), "Buckling analysis of stiffened circular cylindrical panels using differential quadrature element method", *Thin-Walled Structures*, 46, p.p. 390-398.
- [14] Chaplin, C.P., Palazotto, A.N. (1996), "The collapse of composite cylindrical

panels with various thickness using finite element analysis”, *Computers And Structures*, 60(5), p.p. 797-815.

[15] Afkhami, A, Epakchi, H.R and Shariati, M. (2008), “Peresentation of an analytical method and compare with numerical results for elastic critical buckling analysis of a cylindrical panel boundary conditions”, *9th Conference of Iranian Aerospace Society*, Tehran, Iran.

[16] El-Raheb, M. (2006), “Response of a thin cylindrical panel with constrained edges”, *Solid And Structures*, 43, p.p. 7571-7592.

[17] Shariati, M., Eipackchi, H.R., Sedighi, M. and Saemi, J. (2010), “Numerical and experimental survey on buckling and postbuckling of steel cylindrical panes with simply support and free constraints”, *18th International Mechanical Engineering Conference*, ISME, Tehran, Iran.

[18] Panahandeh-Shahraki, D., Shahidi, A.R., Mirdamadi, H.R., Vaseghi, O. (2013), “Nonlinear analysis of uni-lateral buckling for cylindrical panels on tensionless foundation”, *Thin- Walled Structures*, 62, p.p. 109-117.

[19] Schimmels, A. (1989), “Investigation of collapse characteristics of cylindrical composite panels with large cutout”, *Air Force Institute of Technology*, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio.

[20] Shariati, M., Sedighi, M., Saemi, J., Eipackchi, H.R., Allahbakhsh, H.R. (2010), “Experimental study on ultimate strength of CK20 steel cylindrical panels subjected to compressive axial load”, *Archives of Civil And Mechanical Engineering*, 4(2), p.p.117-130.

[21] Magnucki K., Mackiewicz (2006), “Elastic buckling of an axially compressed cylindrical panel with three edges simply supported and on edge free”, *Thin-Walled Structures*, 44, p.p. 387-392.

[22] Tung, H.V. (2013), “Postbuckling behavior of functionally graded cylindrical panels with tangential edge constraints and resting on elastic foundations”, *Composite Structures*, 100, p.p. 532-541.

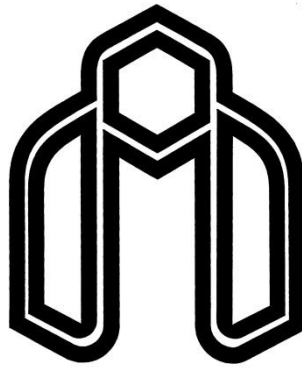
[23] Epakchi, H.R., Shariati, M. (2011), “Buckling analysis of a cylindrical panel under axial stress using perturbation technique”, *ZAMM. Angew. Math. Mech.*, 91(2), p.p. 138 – 145.

- [24] Hu, H.T., Yang, J.S. (2007), "Buckling optimization of laminated cylindrical panels subjected to axial compressive load", *Composite Structures*, 81, p.p. 374-385.
- [25] ASM Metal Handbook (1979), Properties and selections, Vol. 1, 10th Ed.
- [26] ASTM A370-05, Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products.
- [27] Gaudin, C., Feugas, X. (2004), "Cyclic creep process in AISI 316L stainless steel in terms of dislocation patterns and internal stresses", *Acta Materials*, 52, p.p. 3097-3110.
- [28] Kolasangiani, K. (2013), M.Sc. thesis, "Numerical and experimental analysis of ratcheting behavior of steel cylindrical shells with and without cutout under cyclic combined and axial loading", Mechanic department, Shahrood University of Technology.
- [29] Dutta, K. and Ray, K.K. (2012), "Ratcheting phenomenon and post-ratcheting tensile behaviour of an aluminum alloy", *Material Science & Engineering A*, vol.540, p.p. 30-37.
- [30] ABAQUS Analysis User's manual (2010), v6.10.1, section 20.2.2: models for metals subjected to cyclic loading.
- [31] Biglari, F., Darvish, R., Mirzaefar, R. (2007), "Analysis of advanced problems with abaqus software", *Yamahdi Press*, Tehran.

Abstract

In this research, ratcheting behavior of stainless steel 304L and Ck45 cylindrical panels under cyclic combined and axial loadings was studied numerically and experimentally. The SS304L cylindrical panels were fixed normal and oblique at angle of 20° with respect to the longitudinal direction of the panels and subjected to force-controlled cycling with non-zero mean force at the end of them. The Ck45 Cylindrical panels with various angles and same length were fixed normal with maximum stress $1.05 \sigma_y$ subjected to cyclic loading which causes the accumulation of plastic strain or ratcheting phenomena. Experimental tests were performed by a servo-hydraulic INSTRON 8802 machine. The numerical analysis was carried out by Abaqus using the advanced nonlinear isotropic/kinematic hardening model and results of numerical analysis were compared to experimental results. In this research, the effect of length, position angle, angle of cylindrical panel and loading history on ratcheting behavior were investigated. Linear relation was observed between plastic energy and rate of plastic deformation in one step loading. Analyzing the loading history of cylindrical panel under combined loading, by the prior load with higher force amplitude retards the ratcheting behavior and plastic deformation with smaller force amplitude. Also, cutout effect on cylindrical panels under these kinds of loading has been studied. In addition to studying effect of various subjects on ratcheting behavior, the effect of length and angle on life behavior was studied and observed that decrease life length with increasing length and angle of cylindrical panels.

Keywords: Cylindrical Panel, Numerical and Experimental Analysis, Ratcheting, Cyclic combined and axial loading, Cutout.



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering

**Numerical and experimental analysis of
ratcheting behavior of steel cylindrical panels
with and without cutout under cyclic
combined and axial loading**

Thesis

Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Science (M.Sc)

Hamid Chavoshan

Supervisors

Dr. M. Shariati

Dr. H. R. Epakchi

July 2013