

تحلیل تجربی رفتار رچتینگ پانل‌های استوانه‌یی فولادی ضد زنگ ۴L SS۳۰ تحت بارگذاری متناوب مرکب و محوری

محمد شریعتی*

(استاد)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

حیدر جاوشن (کارشناس ارشد)

حمدود رضا امیری چی (دانشیار)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهroud

کمال کلاسنجیانی (دانشجوی دکتری)

دانشکده‌ی مهندسی مکانیک، دانشگاه فردوسی مشهد

در این نوشتار رفتار رچتینگ پانل‌های استوانه‌یی از جنس فولاد ضدزنگ ۴L SS۳۰ تحت بارگذاری متناوب مرکب و محوری مورد مطالعه قرار گرفته است. آزمایش‌های تجربی رچتینگ توسط دستگاه سرو هیدرولیک اینسترون ۸۸۰ ۲ انجام شده است. پانل‌ها به صورت مایل و تحت زاویه ۲۰ درجه نسبت به محور عمود قرار گرفته و بار تناوبی به آنها اعمال شده است. تأثیر پارامتر طول و زاویه‌ی نمونه بر رفتار رچتینگ و انرژی خمیری پانل‌های استوانه‌یی مورد تحقیق قرار گرفته است. با توجه به نتایج آزمایشگاهی، گشتوار خمیری تأثیر قابل ملاحظه‌یی بر انرژی اتلافی و افزایش تعییر شکل‌های خمیری دارد. مشاهده شد که تعییر شکل خمیری در پانل استوانه‌یی مایل در مقایسه با پانل استوانه‌یی عمودی به دلیل وجود گشتوار خمیری در مقاطع مختلف آن بیشتر است. نتایج نشان می‌دهد که در بارگذاری مرکب تناوبی، با افزایش طول نمونه‌ها، جایه‌جایی رچتینگ و انرژی خمیری افزایش و عمر نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

mshariati44@gmail.com
hchavoshan@gmail.com
hamidre2000@gmail.com
kamal_kolasangiani@yahoo.com

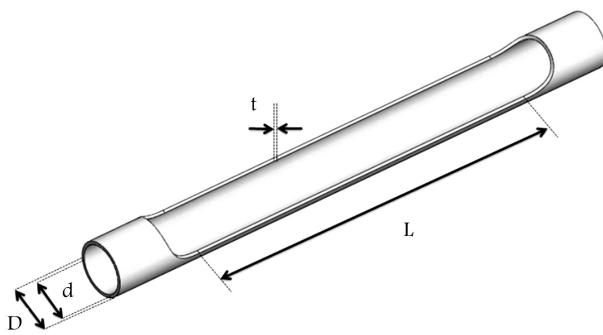
واژگان کلیدی: پانل استوانه‌یی، رچتینگ، بارگذاری محوری تناوبی، بارگذاری
مرکب تناوبی، انرژی خمیری، فولاد ضدزنگ ۴L .SS۳۰

۱. مقدمه

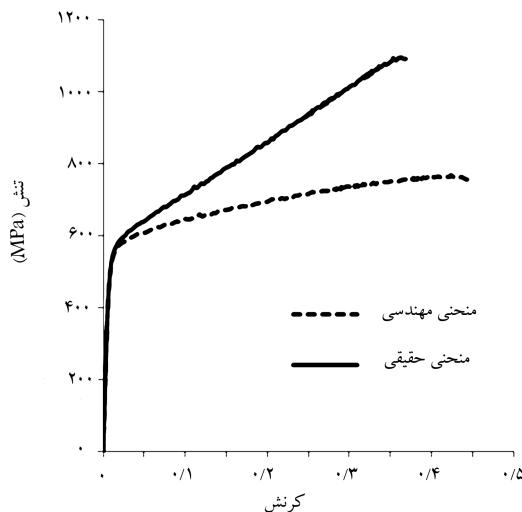
Riftar خستگی کم‌تکرار و رچتینگ فولاد CK۴۵ تحت بارگذاری تکمحوره^[۱] بررسی، و براساس نتایج آزمایش‌های کرنش - کنترل، عمر خستگی پیش‌بینی و از آنها برای پیش‌بینی آسیب خستگی در شکست رچتینگ استفاده شد. محققین با استفاده از فیفسچر خوش شبه سه‌ نقطه‌یی به مطالعه تجربی Riftar رچتینگ فولادهای کربنی پرداختند^[۲] و مشاهده کردند که در آزمایش خمیش چند مرحله‌یی، نزخ کرنش رچتینگ با افزایش مقدار بار افزایش می‌یابد. در تحلیل شیوه‌سازی اجزاء محدود رچتینگ با نرم‌افزار ANSYS مشاهده شد که مدل جیانگ - سهیتگalo با کمترین تعییرات به نتایج قابل قبولی منجر می‌شود. بررسی تجربی Riftar رچتینگ تکمحوره ۶۳Sn۳۷Pb solder نشان داد که با افزایش نتش دامنه، در یا نتش میانگین، کرنش رچتینگ و نزخ آن افزایش می‌یابد و نزخ کرنش رچتینگ شدیداً به نزخ نتش وابسته است^[۳] و با کاهش نزخ نتش، نزخ کرنش رچتینگ نیز افزایش می‌یابد. بررسی تأثیرات رچتینگ و خستگی فولاد ضدزنگ ۴ SS۳۰ در بارگذاری تکمحوره تحت شرایط نیرو - کنترل و در دمای اتاق^[۴] نشان داد که کرنش

پانل‌ها در صنایع هواپیماها و موشک‌ها، سازه‌های معدنی و سازه‌های دریابی کاربردهای فراوانی دارند. وزن کم و استحکام زیاد این پانل‌ها باعث شده تا بخش قابل توجهی از اجزای سازه‌های صنایع مختلف را به خود اختصاص دهند. گرچه مقدار کرنش خمیری در یک دوره بارگذاری کم است، اینباشتگی آنها در راستای طول بارگذاری، قابل ملاحظه است. از آنجاکه خمیرسانی دوره‌یی^[۱] یا رچتینگ^[۲] یک اینباشتگی منظم تحت نتش با مقدار میانگین غیر صفر است، شیوه‌سازی و تعیین Riftar دقیق آن به آسانی امکان‌پذیر نیست. همچنین مدل‌های ساختاری دوره‌یی برگرفته از نتایج آزمایشگاهی تاکنون به طور کامل قادر به تعیین دقیق رچتینگ نبوده‌اند. با توجه به این که در رسال‌های گذشته در زمینه‌ی رچتینگ پانل‌های استوانه‌یی اقدامات قابل توجهی انجام نشده، در اینجا از کارهای انجام شده در زمینه‌ی رچتینگ پوسته‌های استوانه‌یی نام برده شده است.

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۲/۴/۱، اصلاحیه ۱۳۹۲/۷/۳۰، پذیرش ۱۳۹۲/۸/۱۳



شکل ۱. هندسه‌ی نمونه‌های تحلیل شده در مطالعه‌ی حاضر.



شکل ۲. نمودار تنش - کرنش واقعی و هندسی فولاد SS۳۰۰ ۴L.

D25-d22L بیان می‌شود. نوع هندسه (ایجاد انحنای) در محل اتصال پانل به پوسته، به منظور کاهش تمرکز تنش در نظر گرفته شده است.

۳. خواص مکانیکی نمونه‌ها

نمونه‌های مورد مطالعه از فولاد ضد زنگ SS300 4L ساخته شده‌اند. خصوصیات مکانیکی فولاد مورد نظر طبق استاندارد ASTM E8 و به وسیله‌ی ماشین آزمایشگاهی اینسترون ۸۸۰۲ تعیین شده است. نمودار تنش - کرنش واقعی و هندسی نیز در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۲ مدول کشسانی برابر GPa ۲۰۲ و تنش تسلیم برابر ۵۱۳ MPa به دست می‌آید. ضریب پواسون نیز ۰/۳۳ در فرض شده است.

رچتینگ و عمر خستگی این ماده شدیداً به تنش میانگین، دامنه‌ی تنش و نسبت تنش وابسته است. محققین در پژوهشی دیگر به طور عددی و تجربی به بررسی رفتار سخت‌شوندگی دوره‌ی آلیاز آلومینیم AC4C-T6 در شرایط جابه‌جایی - کنترل در دمای اتان و دمای ۱۶۵- درجه سانتی‌گراد پرداختند.^[۶] آنها نتایج حاصل از تحلیل عددی را با نتایج آزمایشگاهی مقایسه، و مشاهده کردند که مدل سخت‌شوندگی غیرخطی ایزوتوپیک/سینماتیک نسبت به سایر مدل‌ها پیش‌بینی بهتری ارائه داد. با بررسی خستگی کم تکرار و منحنی تنش - کرنش سازه‌هایی از جنس فولاد کربنی و ضدزنگ^[۴] و نیز با استفاده از آزمایش‌های کرنش - کنترل تک محوره عمر خستگی سه نوع فولاد مورد مطالعه قرار گرفت. با مطالعه‌ی پوسته‌های استوانه‌ی آلیازی تحت بارگذاری‌های دومحوره^[۷] با استفاده از روش‌های عددی و به کارگیری مدل‌های سخت‌شوندگی، منحنی‌های هیستوگرام شیبی سازی شد. محققین با انجام بارگذاری‌های محوری روی نمونه‌های استاندارد پانل^[۸] تأثیر دامنه‌ی نیرو و نیروی متوسط را بر رفتار رچتینگ نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند. افزایش کرنش رچتینگ و نزد کرنش رچتینگ با افزایش پارامترهای دامنه‌ی نیرو و نیروی متوسط از نتایج به دست آمده طی این مطالعه است. همچنین بارگذاری روی پوسته‌های استوانه‌ی از جنس منزیم تنها به صورت کرنش - کنترل اعمال شده و تعداد دوره‌ها تا شکست نمونه‌ها تحت تأثیر دامنه‌ی کرنش و کرنش میانگین مورد مطالعه قرار گرفته است.^[۹] رفتار نرم‌شوندگی پوسته‌های استوانه‌ی فولادی ضدزنگ SS300 4L تحت شرایط بارگذاری جابه‌جایی - کنترل پوسته رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان داد که به علت ایجاد کمانش در بارگذاری فشاری، نرم‌شوندگی شدت یافت. محققین با بررسی تجربی کرنش رچتینگ تحت بار خشکی روی میله‌ی فولادی Z2CND ۱۸/۱۲ مشاهده کردند که کرنش رچتینگ به شدت به دما وابسته است.^[۱۰] با تحلیل تجربی رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ی فولادی ضدزنگ ۴L SS300 ۴L تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی^[۱۱] مشاهده شد که در بارگذاری مرکب دوره‌ی تحت شرایط بارگذاری جابه‌جایی - کنترل پوسته رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان داد که به علت ایجاد کمانش در بارگذاری فشاری، نرم‌شوندگی شدت یافت. محققین با بررسی تجربی کرنش رچتینگ تحت بار خشکی روی میله‌ی فولادی Z2CND ۱۸/۱۲ مشاهده کردند که کرنش رچتینگ به شدت به دما وابسته است.^[۱۱] با تحلیل تجربی رفتار رچتینگ پوسته‌های استوانه‌ی فولادی ضدزنگ ۴L SS300 ۴L تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی^[۱۲] مشاهده شد که در بارگذاری مرکب دوره‌ی تحت شرایط بارگذاری جابه‌جایی - کنترل پوسته رفتار نرم‌شوندگی از خود نشان داد که به علت ایجاد همچنین در بررسی تاریخچه بارگذاری پوسته‌ی استوانه‌ی برازیلی دوره‌ی میانگین تأثیر داشت. افزایش طول پوسته‌ی استوانه‌ی برازیلی دوره‌ی میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پوسته‌ی استوانه‌ی برازیلی دوره‌ی معین، جابه‌جایی رچتینگ به دلیل افزایش گشتاور خشمی افزایش می‌یابد. همچنین در بررسی تاریخچه بارگذاری پوسته‌ی استوانه‌ی برازیلی دوره‌ی میانگین تأثیر داشت. افزایش و توقف انباستگی تغییر شکل خمیری در بارگذاری‌های دوره‌ی با دامنه‌ی رچتینگ و نیروی کمتر می‌شود.

در نوشتار حاضر، تحلیل تجربی رفتار رچتینگ پانل‌های استوانه‌ی فولادی تحت بارگذاری مرکب با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ مورد بررسی قرار گرفته و اثر پارامتر هندسی طول نمونه بر رفتار رچتینگ پانل‌های استوانه‌ی تحلیل می‌شود.

۴. شرایط مرزی

برای اعمال بارگذاری مرکب و استقرار پانل به صورت زاویه‌دار نسبت به خط عمود، از فیکسچرهای گوهی استفاده شده است. پیچ‌های رزوه شده با طول مشخص نیز به اندازه mm ۲۰ درون دو انتهای پانل قرار گرفته و از طریق جوش آرگون به لبه‌های پانل جوش شده است. بنابراین طول مؤثر پانل با کاهش mm ۲۰ از هر طرف آن به دست می‌آید. پیچ‌ها نیز از هر دو انتهای پانل از طریق سوراخ‌های رزوه شده روی سطح بالایی گوه به آن متصل می‌شوند. از آنجا که اعمال بارگذاری مرکب

در این تحقیق پانل‌های استوانه‌ی از ورق فولادی به ضخامت یکسان mm ۱/۵ و طول‌های مؤثر ۱۷۵، ۲۹۵، ۳۷۵ میلی‌متر تحلیل شده است. هندسه‌ی نمونه‌های مورد تحلیل در شکل ۱ نشان داده شده که در آن D قطر بزرگ، d قطر کوچک، L طول مؤثر نمونه، و t ضخامت متوسط است. مقادیر فوق در پانل‌ها با شاخصه‌ی $t = 1/5 D$ و $L = 22-L+1/5 D$ تعریف شده‌اند.

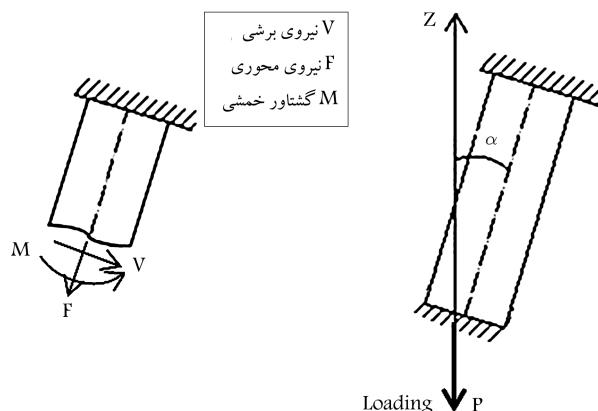
۶. نتایج تجربی

در این قسمت پانل های استوانه‌یی به دو صورت عمود و مایل تحت زاویه‌ی $\alpha = 20^\circ$ فرازگرفته که بار تناوبی در شرایط نیرو-کنترل به صورت سینوسی با نیروی دامنه kN/s و نیروی میانگین یکسان ۱۳/۵ kN به آنها اعمال می‌شود. نزد بارگذاری مرکب به دلیل استفاده از دو نمونه در هر آزمایش، نیروی دامنه و نیروی میانگین N ۲۷ kN اعمال می‌شود که سهم هریک از پانل های استوانه‌یی، نیروی دامنه و نیروی میانگین N ۱۳/۵ kN از بار اعمالی است. بار اعمالی بر نمونه‌ها با توجه به بار تسیلیم پانل استوانه‌یی انتخاب شده است. یک پانل استوانه‌یی به منظور یافتن محدوده‌ی تسیلیم آن مورد آزمایش فرازگرفته که با توجه به حد تسیلیم پانل، مقدار نیروی اعمالی به آنها در هین انجام آزمون‌های تجربی، بیشتر از نیروی مربوط به حد تسیلیم و کمتر از نیروی شکست پانل است.

در این تحقیق، تغییر طول پانل به عنوان جابه‌جایی رچتینگ تعریف می‌شود. به منظور بی‌بعد کردن، پارامتر x به عنوان نسبت جابه‌جایی رچتینگ پانل به طول مؤثر آن تعیین می‌شود. بار تناوبی از طریق فک پایین (شکل ۵(الف)) به ابتدای پانل اعمال می‌شود. با برش پانل در طول های متفاوت، نیروی محوری، نیروی برشی و گشتاور خمشی به صورت تناوبی مطابق شکل ۵ ب در مقاطع ایجاد می‌شود که به دلیل ضخامت کم پانل‌ها از اثر نیروی برشی صرف‌نظر می‌شود. به عبارت دیگر شکل ۵ نمودار آزاد پانل استوانه‌یی را به نمایش می‌گذارد.

۱.۶. رفتار رچتینگ در پانل استوانه‌یی

در شرایط نیرو-کنترل با تنش میانگین غیرصرف، انباشتگی تغییر شکل خمیری با رچتینگ مشاهده شد. تغییر شکل دوره‌یی باعث به دست آمدن یک حلقه‌ی هیسترزیس برای هر دوره‌ی بارگذاری می‌شود. در آزمایش‌هایی که پدیده‌ی رچتینگ رخ می‌دهد، حلقه‌ی هیسترزیس بسته نمی‌شود. در شکل ۶ حلقه‌های هیسترزیس نیرو- جابه‌جایی ابتدای پانل استوانه‌یی با طول مؤثر mm ۱۷۵ تحت بارگذاری مرکب نشان داده شده است.



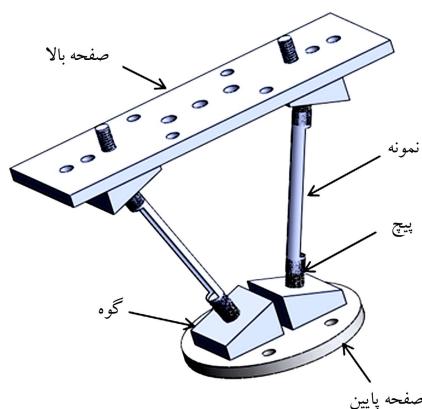
الف) شماتیک بارگذاری بر روی نمونه در بارگذاری مرکب؛
استوانه‌یی در بارگذاری مرکب؛

شکل ۵. نحوه بارگذاری بر نمونه و بارهای ایجاد شده در مقاطع پانل استوانه‌یی در بارگذاری مرکب.

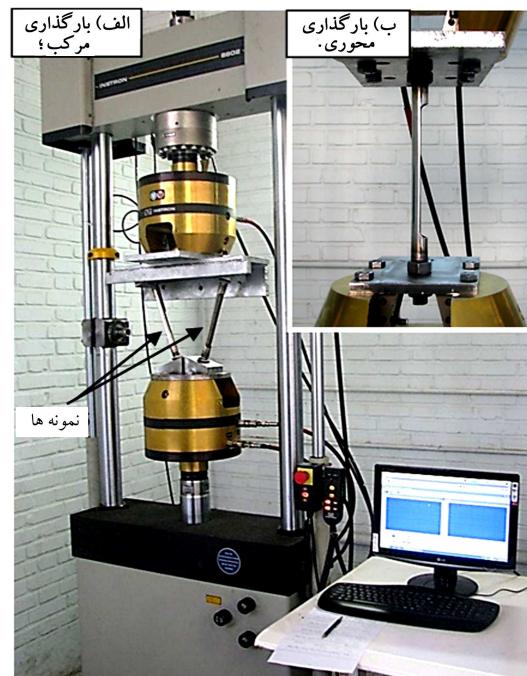
باعث ایجاد نیروهای افقی ناخواسته می‌شود، از دو نمونه پانل استوانه‌یی با شرایط بارگذاری و هندسه‌ی متقارن به منظور عدم آسیب به دستگاه و فک آن، استفاده شده است. بار تناوبی به صفحه‌ی پایین مطابق شکل ۳ به ابتدای پانل‌ها اعمال می‌شود.

۵. دستگاه آزمایش

آزمایش‌های انجام شده در این تحقیق با استفاده از دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲ انجام شده که توانایی اعمال بار دینامیکی تا ظرفیت ۲۵۰ کیلونیوتن را دارد (شکل ۴). برای به دست آوردن جابه‌جایی با دقت بالاتر در آزمایش کشش استاندارد، از طول سنج نیز استفاده شده است.



شکل ۳. شماتیکی از نحوه‌ی اتصال پانل استوانه‌یی به فیکسچر با استفاده از پیچ‌های رزوه شده در بارگذاری مرکب.



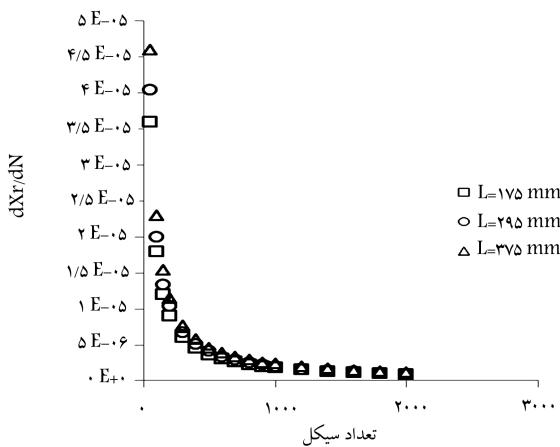
شکل ۴. دستگاه سروهیدرولیک اینسترون ۸۸۰۲.

جدول ۱. درصد افزایش جابه‌جایی رچتینگ به‌زای تغییر طول اولیه‌ی نمونه‌ها از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی‌متر در دوره‌های مشخص بارگذاری.

تعداد دوره	١٠٠	١٠٠٠	١٥٠٠
%٩,٩٥	%٨,٥١	%٧,٦٢	

جدول ۲. درصد افزایش نرخ جایه‌جایی رچتینگ به‌ازای تغییر طول اولیه‌ی نمونه‌ها از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی‌متر در دوره‌های مشخص بارگذاری.

تعداد دوره

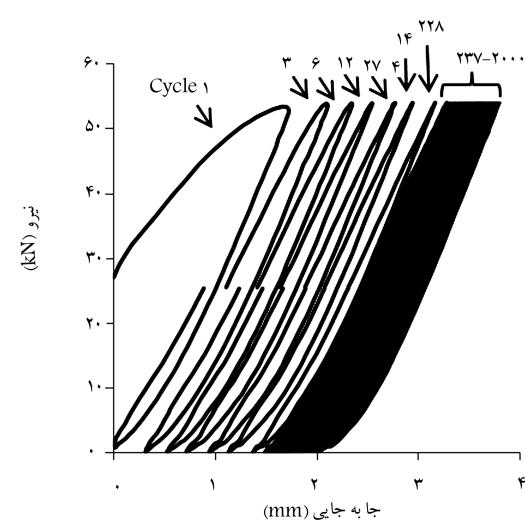


شکل ۸. نز جایه جایی رچتینگ بر حسب تعداد دوره برای پانل های استوانه ای تحت بارگذاری مرکب تناوبی.

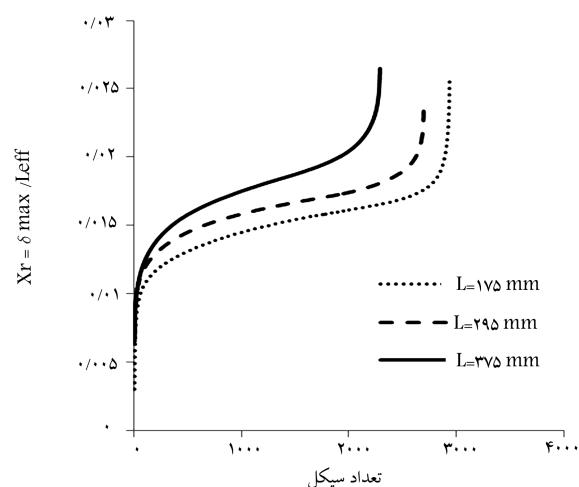
ین صعود نزدیک شدن به مرحله‌ی شکست پانل استوانه‌یی است. با توجه به شکل ۷ و داده‌های تجربی، در دوره‌های ۱۰۰، ۱۰۵۰ و ۱۵۰۰ درصد افزایش جابجایی رچتینگ به ازای تغیر طول از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی‌متر در جدول ۱ اورد شده است.

۳.۶. اشباع جایه‌جایی ریتینگ در طول‌های مختلف

در شکل ۸ تغییرات نزد جایه جایی رچتینگ با افزایش تعداد دوره برای پانل های استوانه ای با طول های mm ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که نزد جایه جایی رچتینگ برای هر دو طول با افزایش تعداد دوره کاهش می یابد؛ اما در هر دوره، نزد جایه جایی رچتینگ برای پانل های استوانه ای با طول های مذکور اختلاف بسیار کمی نسبت به هم دارند؛ پانل استوانه ای با طول mm ۳۷۵ دارای نزد جایه جایی بالاتری است. در ۵۰ دوره ابتدایی، کاهش نزد جایه جایی رچتینگ بسیار زیاد است، اما در ادامه این کاهش قابل چشم پوشی است. مقدار نزد جایه جایی رچتینگ در دوره های انتهایی تقریباً ثابت و به صفر میل می کند. در جدول ۲، درصد افزایش نزد جایه جایی رچتینگ در سه دوره ۱۰۰، ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ به ازای تغییر طول نمونه ها از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی متر نشان داده شده است.



شکل ۶. رفتار رچتینگ پانل استوانه‌بی با طول مؤثر ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب تناوبی.



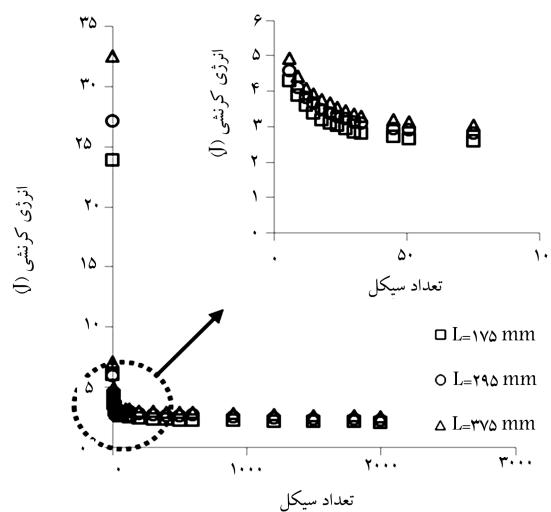
شکل ۷. جایه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد دوره برای پانل‌های استوانه‌بی تحت بارگذاری مرکب تناوبی.

۲.۶. تأثیر طول پانل استوانه‌یی بر رفتار رچتینگ آن تحت بارگذاری مرکب

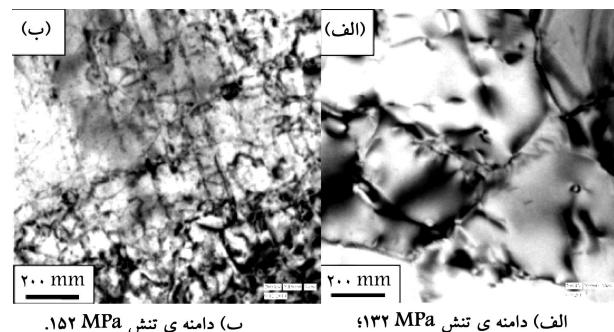
از میانش های نیرو - کنترل در محدوده دوره بی 2000 تا 3000 دوره انجام شد. در شکل 7 ، نسبت جابه جایی رچتینگ به طول مؤثر پانل بر حسب تعداد دوره برای سه طول مختلف نشان داده شده است. مشاهده می شود برای یک طول معین پانل استوانه بی با افزایش تعداد دوره، جابه جایی رچتینگ افزایش و نزدیک شدن رچتینگ کا هش می یابد. این رفتار در حرکت حلقه های هیسترزیس و نزدیک شدن حلقه ها به هم بر اثر افزایش تعداد دوره در شکل 6 نیز مشاهده شد. همچنین با افزایش طول پانل های استوانه بی، جابه جایی رچتینگ نیز افزایش می یابد که این تغییر به دلیل افزایش گشتاور خمشی و افزایش تنش های عمودی در مقاطع مختلف پانل های استوانه بی مایل با طول بلندتر است. چنان که در شکل 7 مشاهده می شود حاچار حاکم رحشگ در دوره های انعقاد، رفتار صعودی از خود روز می دهد. علت



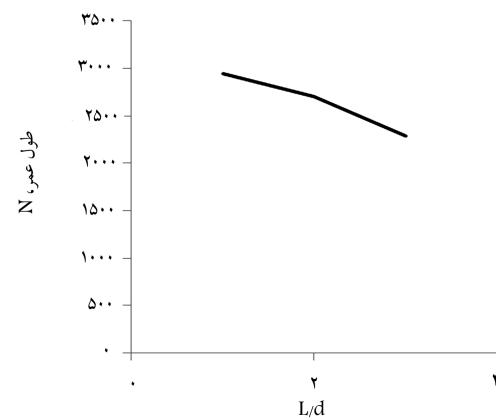
شکل ۱۱. پانل های استوانه بی آزمایش شده با سه طول مختلف.



شکل ۱۲. تغییرات انرژی خمیری بر حسب تعداد دوره برای پانل های استوانه بی با طول های ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مركب تناوبی.



شکل ۹. تصویر میکروسکوپ الکترونی رویشی نشان دهنده نابه جایی ها برای نمونه ای آلیاژ آلومینیوم تحت بارگذاری دوره بی با شرایط بارگذاری تنش میانگین ۱۲ مگاپاسکال.



شکل ۱۰. طول عمر قطعه بر حسب نسبت طول به قطر نمونه.

خمیری در هر نمونه است، برای پانل های استوانه بی با طول های ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مركب تناوبی با نیروی میانگین و دامنه نیرو ۱۳/۵ کیلو نیونتن مطابق شکل ۱۲ ترسیم شده است. همان طور که در شکل مشاهده می شود در تمامی طول ها، در دوره های اولیه با افزایش تعداد دوره، انرژی خمیری به شدت کاهش می یابد و در آنها به مقدار ثابتی می رسد. همچنین برای یک دوره معین، افزایش طول پانل منجر به افزایش مقدار انرژی خمیری می شود که علت آن ایجاد گشتاور خمیشی بزرگ تر در انتهای پانل با طول بزرگ تر و با اعمال بارگذاری یکسان است. در مقایسه با شکل ۱۱، در می بایس که تحت تنش دوره بی یکسان برای پانل های استوانه بی با طول کمتر، انرژی اضافی تغییر شکل خمیری کمتر و درنتیجه عمر آن بیشتر است. به منظور بررسی تغییرات انرژی خمیری پانل استوانه بی بر حسب تغییرات نزدیکی رچتینگ، شکل ۱۳ برای پانل استوانه بی با طول های ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مركب تناوبی رسم شده است. در این شکل، یک رابطه خطی بین انرژی خمیری در هر دوره نسبت به نزدیکی رچتینگ مشاهده می شود. همچنین با کاهش انرژی خمیری، نزدیکی رچتینگ به صورت تقریباً خطی کاهش می یابد. اختلاف شبیه منحنی انرژی کرنش خمیری بر حسب نزدیکی رچتینگ برای سه طول ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی متر به وضوح مشاهده می شود و پانل استوانه بی با طول بیشتر دارای شبیه بیشتری است. با توجه به شکل ۱۲، در جدول ۳، درصد افزایش انرژی خمیری به ازای تغییر طول اولیه نمونه ها از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی متر نیز نشان داده شده است.

همه مدل های سخت شوندگی دارای یک مشخصه مشترک اند و آن این

این نابه جایی ها، ابتدا به حالت آشفته قرار گرفته اند و سپس با افزایش تعداد دوره به شکل المان های نابه جایی منظم در می آیند.^[۱۳] این رفتار با استفاده از میکروسکوپ الکترونی رویشی روی آلیاژ آلومینیوم بررسی^[۱۴] و تصاویر مربوط به نابه جایی ها در شکل ۹ نشان داده شد. پس از تعداد دوره می معین (بسته به کرنش های دوره بی اعمالی)، نابه جایی های تولید شده جدید، شکل بندی پایدار و منظمی به خود گرفته و این تغییر موجب کاهش و صفر شدن نزدیکی رچتینگ می شود.

۴.۶. تأثیر طول پانل استوانه بی بر طول عمر آن تحت بارگذاری مركب در پانل های استوانه بی با افزایش طول نمونه ها، طول عمر قطعه ها یا تعداد دوره لازم برای شکست نمونه ها کاهش می یابد (شکل ۱۰). گشتاور خمیشی در نقاط انتهایی پانل های استوانه بی مابین دارای بیشترین مقدار است؛ در آزمایش های تجربی مشاهده شد که پانل های استوانه بی در این نواحی دچار شکست می شوند و کشیدگی در این نواحی بیشتر است (شکل ۱۱).

۵.۶. تأثیر طول بر انرژی خمیری و رابطه ای انرژی با نزدیکی رچتینگ در طول های مختلف
انرژی به عنوان یکتابع با مقدار اسکالار و مستقل از جهت، قبل مقایسه برای بارگذاری مختلف عمودی و مركب دوره بی برای طول های مختلف است. به همین منظور در این بخش مساحت سطح حلقه هیسترزیس در هر دوره که نشان گر انرژی تغییر شکل

با توجه به روابط ۱ و ۶:

$$\left| \sigma_x - \left(\frac{\beta}{\gamma} \right) \alpha_x \right| = \sigma_a$$

$$\sigma_x = \sigma_a + \left[\frac{\beta}{\gamma} + \frac{2}{\gamma} \left(\alpha_{x^0} - \frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} \right) \exp \left[-\gamma (\varepsilon_x^p - \varepsilon_{x^0}^p) \right] \right] \quad d\varepsilon_x^p \geq 0 \quad (7)$$

$$\sigma_x = \sigma_a - \left[\frac{\beta}{\gamma} - \frac{2}{\gamma} \left(\alpha_{x^0} + \frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} \right) \exp \left[\gamma (\varepsilon_x^p - \varepsilon_{x^0}^p) \right] \right] \quad d\varepsilon_x^p < 0 \quad (8)$$

در حالت بارگذاری تنش‌های ابتدایی و انتهایی به ترتیب برابر $\sigma_m - \sigma_a$ (اختلاف تنش میانگین و دامنه) و $\sigma_m + \sigma_a$ (مجموع تنش میانگین و دامنه) است. در حالت باربرداری نیز تنش‌های ابتدایی و انتهایی به ترتیب $\sigma_a + \sigma_m$ و $\sigma_m - \sigma_a$ است. در این شرایط و با استفاده از رابطه‌ی ۹ کرنش‌های ابتدایی در حالت بارگذاری (ε_1) و باربرداری (ε_2) و کرنش‌های انتهایی در حالت بارگذاری (ε_1) و باربرداری (ε_2) طبق روابط ۹ تا ۱۲ محاسبه می‌شود. بیشترین کرنش در حالت بارگذاری و با تنش رخ می‌دهد. در لحظه‌ی بارگذاری خواهیم داشت:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_{x^0}^p - \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\sigma_m - \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{\frac{2}{3} \left(\alpha_{x^0} - \frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} \right)} \right) \quad (9)$$

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{x^0}^p - \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\sigma_m + \sigma_a - \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{\frac{2}{3} \left(\alpha_{x^0} + \frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} \right)} \right) \quad (10)$$

و در لحظه‌ی باربرداری خواهیم داشت:

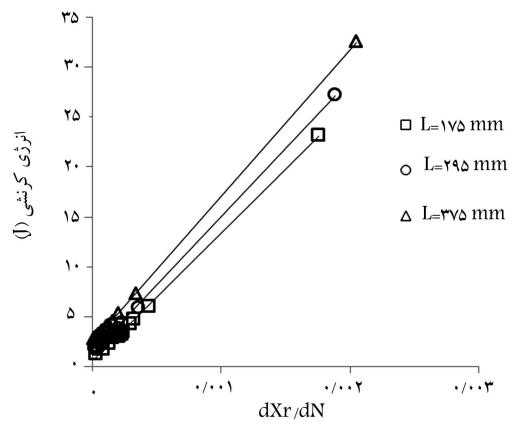
$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{x^0}^p + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\sigma_m + \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{-\frac{2}{3} \left(\alpha_{x^0} + \frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} \right)} \right) \quad (11)$$

$$\varepsilon_4 = \varepsilon_{x^0}^p + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\sigma_m - \sigma_a + \sigma_0 - \frac{\beta}{\gamma}}{-\frac{2}{3} \left(\alpha_{x^0} + \frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} \right)} \right) \quad (12)$$

انرژی کرنشی خمیری در هر دوره طبق رابطه‌ی ۱۳ محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} w_p = \oint_{Cycle} \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}^p &= \int_{\sigma_m - \sigma_a}^{\sigma_m + \sigma_a} (\sigma_x)_{Loading} d\varepsilon_x^p \\ &+ \int_{\sigma_m + \sigma_a}^{\sigma_m - \sigma_a} (\sigma_x)_{Unloading} d\varepsilon_x^p = \frac{-4\sigma_a}{\gamma} \\ &+ \left(\sigma_a + \frac{\beta}{\gamma} \right) [(\varepsilon_1 - \varepsilon_{x^0}^p) - (\varepsilon_1 - \varepsilon_{x^0}^p)] \\ &+ \left(-\sigma_a + \frac{\beta}{\gamma} \right) [(\varepsilon_2 - \varepsilon_{x^0}^p) - (\varepsilon_2 - \varepsilon_{x^0}^p)] \end{aligned} \quad (13)$$

با مقایسه‌ی روابط ۹، ۱۰ و ۱۳ در می‌یابیم که انرژی کرنشی خمیری با نمو بیشترین کرنش در هر دوره، رابطه‌ی خطی دارد. با ضرب طرفین معادله در طول اولیه می‌توان براساس جایه‌جایی رچتینگ نیز اثبات کرد. از خطی بودن رابطه‌ی انرژی خمیری و نخ کرنش خمیری می‌توان نتیجه‌گرفت که فیکسچرهای مورد استفاده در این آزمایش تا حد قابل قبولی صلب هستند و تغییر شکل‌های چندان قابل ملاحظه‌ی همچنین:



شکل ۱۳. تغییرات انرژی خمیری بر حسب نخ کرنش رچتینگ برای طول‌های ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مركب تناوبی.

جدول ۳. درصد افزایش انرژی خمیری به‌ازای تغییر طول اولیه‌ی نمونه‌ها از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی‌متر در دوره‌های مشخص بارگذاری.

تعداد دوره	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
	%۱۳,۷۴	%۱۱,۳۲	%۹,۰۱

است که همگی مبتنی بر معیار تسلیم فون‌میسنس و مدل سخت‌شوندگی سینماتیک هستند. معیار تسلیم فون‌میسنس به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف می‌شود:

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

که در آن S تانسور تنش انحرافی، α تانسور پیش‌تشن انحرافی (نشان‌دهنده‌ی مرکز سطح تسلیم)، $k = \sqrt{\frac{2}{3}\alpha}$ اندازه‌ی سطح تسلیم است که در مدل سخت‌شوندگی ثابت است. مدل سخت‌شوندگی آرمسترانگ - فریدریش^۴ به عنوان یکی از مدل‌های اولیه با اضافه‌کردن یک ترم، مورد استفاده محققین بسیاری قرار گرفته است:

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

مدل سخت‌شوندگی AF برای بارگذاری تک محوره عبارت است از:

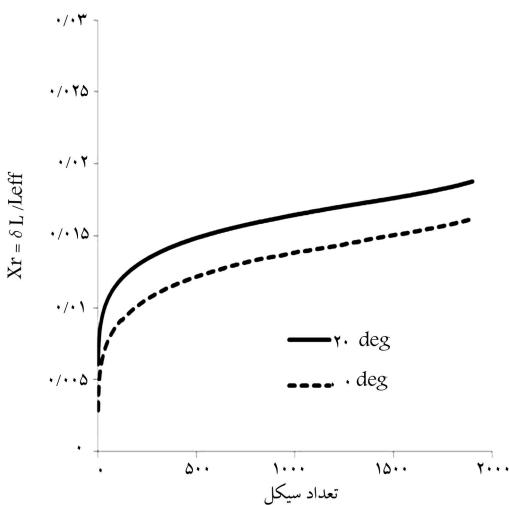
$$d\alpha_x = \frac{2}{3} \beta d\varepsilon_x^p - \gamma \alpha |d\varepsilon_x^p| \quad (3)$$

با حل رابطه‌ی ۳ برای شرایط بارگذاری و باربرداری خواهیم داشت:

$$\alpha_x = \frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} + \left(\alpha_{x^0} - \frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} \right) \exp \left[-\gamma (\varepsilon_x^p - \varepsilon_{x^0}^p) \right] \quad d\varepsilon_x^p \geq 0 \quad (4)$$

$$\alpha_x = -\frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} + \left(\alpha_{x^0} + \frac{2}{3} \frac{\beta}{\gamma} \right) \exp \left[\gamma (\varepsilon_x^p - \varepsilon_{x^0}^p) \right] \quad d\varepsilon_x^p < 0 \quad (5)$$

$$\alpha_x = \alpha_y = -\frac{1}{2} \alpha_x \quad (6)$$



شکل ۱۶. جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد دوره برای پانل‌های استوانه‌بی با طول مؤثر ۳۷۵ mm تحت بارگذاری مركب و محوری تناوبی.

جدول ۴. درصد افزایش جابه‌جایی رچتینگ به‌ازای ۲۰ درجه افزایش زاویه‌ی استقرار پانل در دوره‌های مشخص بارگذاری در طول ۱۷۵ میلی‌متر.

تعداد دوره	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
%۵۴/۷۸	%۲۱/۱۲	%۱۴/۱۸	

جدول ۵. درصد افزایش جابه‌جایی رچتینگ به‌ازای ۲۰ درجه افزایش زاویه‌ی قرارگیری پانل در دوره‌های مشخص بارگذاری در طول ۲۹۵ میلی‌متر.

تعداد دوره	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
%۴۱/۴۳	%۱۸/۳۱	%۱۴/۰۸	

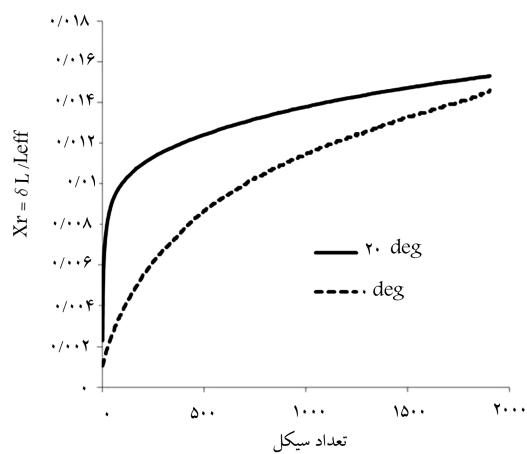
جدول ۶. درصد افزایش جابه‌جایی رچتینگ به‌ازای ۲۰ درجه افزایش زاویه قرارگیری پانل در دوره‌های مشخص بارگذاری در طول ۳۷۵ میلی‌متر.

تعداد دوره	۱۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
%۲۸/۷۸	%۲۰/۹۰	%۱۹/۵۹	

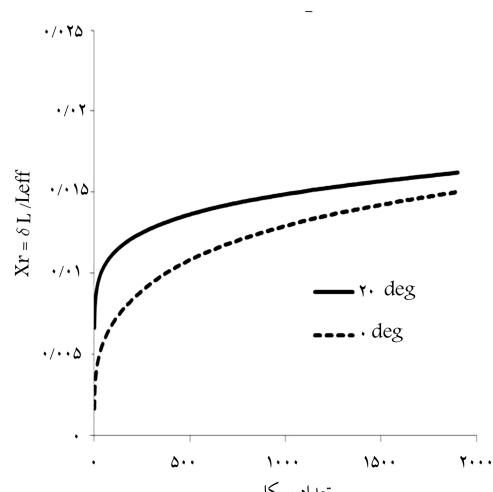
۷.۶. اشباع جابه‌جایی رچتینگ در زوایای مختلف

در شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ تغییرات نرخ جابه‌جایی رچتینگ با افزایش تعداد دوره برای پانل‌های استوانه‌بی با زوایای صفر و ۲۰ درجه نشان داده شده است. نتایج حاصله نشان‌گر آن است که نرخ جابه‌جایی رچتینگ برای هر دو زاویه با افزایش تعداد دوره کاهش می‌یابد، اما در هر دوره نرخ جابه‌جایی رچتینگ برای پانل‌های استوانه‌بی با طول‌های مذکور اختلاف بسیار کمی نسبت به هم دارند و پانل استوانه‌بی با زاویه‌ی ۲۰ درجه دارای نرخ جابه‌جایی بالاتری است. در ۵۰ دوره ابتدایی، کاهش نرخ جابه‌جایی رچتینگ بسیار زیاد است اما در ادامه، این کاهش قابل چشم‌پوشی است. نرخ جابه‌جایی رچتینگ در دوره‌های انتهایی تقریباً ثابت است و به صفر می‌کند. با توجه به شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ و داده‌های تجربی، در جداول ۷، ۸، ۹ و

۱۰. تأثیر زاویه‌ی پانل استوانه‌بی بر رفتار رچتینگ آن در این قسمت پانل‌های استوانه‌بی به دو صورت عمودی و مایل تحت زاویه‌ی $\alpha = 20^\circ$ قرار گرفته‌اند. در شکل‌های ۱۴ تا ۱۶ جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد دوره برای پانل‌های استوانه‌بی با سه طول ۲۹۵، ۱۷۵، ۱۵۰ میلی‌متر رسم شده است. در این سه شکل مشاهده می‌شود که در حالت بارگذاری عمودی – مشابه آنچه که در بارگذاری مركب مشاهده می‌شود – افزایش تعداد دوره منجر به افزایش جابه‌جایی رچتینگ و کاهش نرخ آن می‌شود. برای یک طول ثابت و تعداد دوره‌ی معین، جابه‌جایی رچتینگ پانل استوانه‌بی مایل بیشتر از پانل استوانه‌بی عمودی است که علت آن ایجاد گشتاور خمی علاوه بر نیروی عمودی در مقاطع مختلف پانل استوانه‌بی مایل است که با خمی پانل استوانه‌بی مایل همراه است؛ در حالی که در پانل استوانه‌بی عمودی فقط نیروی عمودی اعمال شده است. در جداول ۴ تا ۶ درصد افزایش جابه‌جایی رچتینگ به‌ازای ۲۰ درجه افزایش زاویه در طول‌های ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی‌متر در دوره‌های ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ نشان داده شده است.



شکل ۱۴. جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد دوره برای پانل‌های استوانه‌بی با طول مؤثر ۱۷۵ mm تحت بارگذاری مركب و محوری تناوبی.



شکل ۱۵. جابه‌جایی رچتینگ بر حسب تعداد دوره برای پانل‌های استوانه‌بی با طول مؤثر ۲۹۵ mm تحت بارگذاری مركب و محوری تناوبی.

جدول ۷. درصد افزایش نزخ جابه جایی رچتینگ به ازای 20° درجه افزایش زاویه استقرار پانل در دوره های مشخص بارگذاری در طول ۱۷۵ میلی متر.

تعداد دوره		
۱۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
%۹۴,۴	%۴۲,۲۱	%۹,۴۵

جدول ۸. درصد افزایش نزخ جابه جایی رچتینگ به ازای 20° درجه افزایش زاویه قرارگیری پانل در دوره های مشخص بارگذاری در طول ۲۹۵ میلی متر.

تعداد دوره		
۱۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
%۲۲,۸۵	%۱۷,۰۱	%۱۵,۴۴

جدول ۹. درصد افزایش نزخ جابه جایی رچتینگ به ازای 20° درجه افزایش زاویه قرارگیری پانل در دوره های مشخص بارگذاری در طول ۳۷۵ میلی متر.

تعداد دوره		
۱۰۰	۱۰۰۰	۱۵۰۰
%۹,۳۴	%۵,۰۸	%۴,۶۱

۹ درصد افزایش نزخ جابه جایی رچتینگ به ازای 20° درجه افزایش زاویه قرارگیری پانل در سه طول ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی متر نشان داده شده است. در این قسمت براساس نتایج تجربی، رابطه بی برای محاسبه بی جابه جایی رچتینگ در زاویه دلخواه با استفاده از مقدار جابه جایی رچتینگ در پوسته های استوانه بی عمودی با هندسه و ماده مشابه ارائه شده است. ضریب K را می توان چنین تعریف کرد:

$$K = \frac{(X_r)_\theta}{(X_\theta)_{\theta=0}} \quad (14)$$

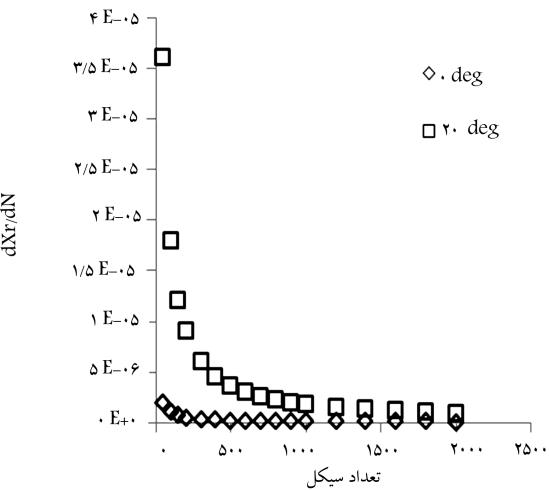
که در آن (X_r) برای پوسته بی استوانه بی مایل و $(X_\theta)_{\theta=0}$ برای پوسته بی استوانه بی عمودی است. ضریب K با استفاده از روش چند جمله بی های لاگرانژ برای پوسته بی استوانه بی به صورت رابطه ۱۵ به دست آمد:

$$K = ۴,۱۰^{-۴} \gamma + ۲,۱۰^{-۴} \gamma^2 \theta - ۰,۰۴۹۲۲\gamma\theta + ۰,۰۷۰۲\gamma + ۰,۲۵۴۳\theta - ۳,۶۰۲۰ \quad (15)$$

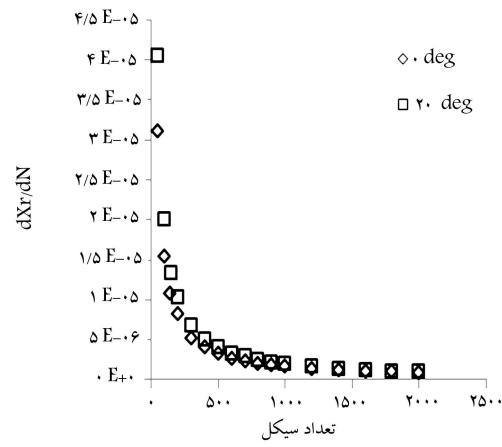
که در آن ضریب K برای پوسته های استوانه بی مایل با زاویه و طول دلخواه ارائه شده است. در این رابطه $\frac{L_{eff}}{D} = \gamma$ و θ زاویه پوسته بی استوانه بی نسبت به خط عمود است.

۸.۶. تأثیر زاویه بر انرژی خمیری و رابطه انرژی با نزخ جابه جایی رچتینگ در زوایای مختلف

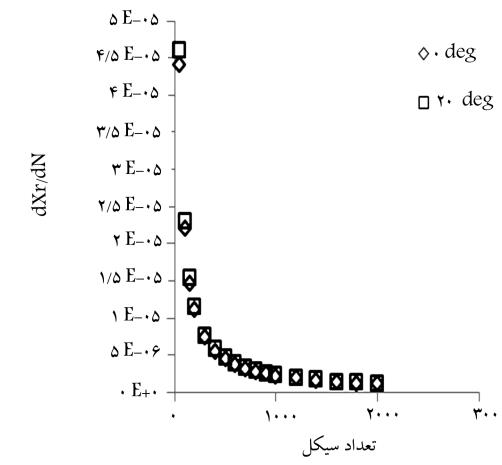
در این قسمت انرژی خمیری به عنوان انرژی اتلافی در دو حالت پانل های استوانه بی با زاویه بی صفر و 20° درجه نسبت به عمود، با هم مقایسه شده است. در شکل های 20° تا 22° ، رفتار تغییرات انرژی خمیری بر حسب تعداد دوره برای پانل های استوانه بی با طول ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی نشان داده شده است. مشاهده می شود که با افزایش تعداد دوره، انرژی اتلافی و به عبارت دیگر تغییر شکل خمیری در هر دوره کاهش می یابد تا این که پایدار و ثابت



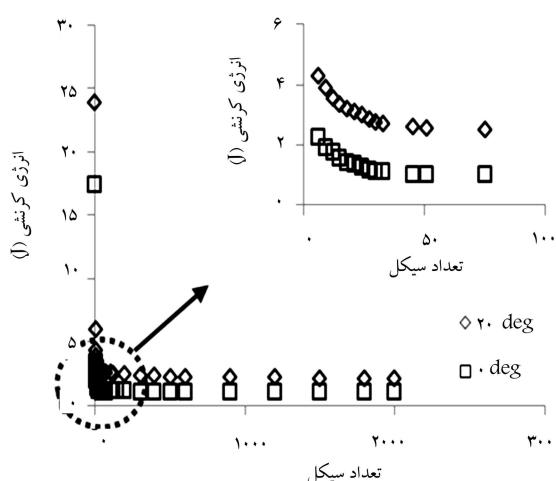
شکل ۱۷. نزخ جابه جایی رچتینگ بر حسب تعداد دوره برای پانل استوانه بی با طول ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی.



شکل ۱۸. نزخ جابه جایی رچتینگ بر حسب تعداد دوره برای پانل استوانه بی با طول ۲۹۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی.



شکل ۱۹. نزخ جابه جایی رچتینگ بر حسب تعداد دوره برای پانل استوانه بی با طول ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی.



شکل ۲۰. تغییرات انرژی خمیری بر حسب تعداد دوره برای پانل‌های استوانه‌بی با طول ۱۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی.

جدول ۱۰. درصد افزایش انرژی خمیری به‌ازای 20° درجه افزایش طول پانل در دوره‌های مشخص بارگذاری در طول ۱۷۵ میلی‌متر.

تعداد دوره
۱۰۰
۱۰۰۰
۱۵۰۰
%۵۴,۱۱
%۵۳,۵۳
%۵۲,۶۷

جدول ۱۱. درصد افزایش انرژی خمیری به‌ازای 20° درجه افزایش طول پانل در دوره‌های مشخص بارگذاری در طول ۲۹۵ میلی‌متر.

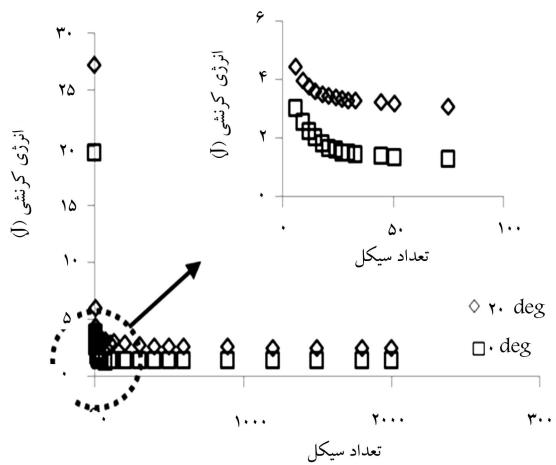
تعداد دوره
۱۰۰
۱۰۰۰
۱۵۰۰
%۵۲,۳۳
%۴۷,۸۷
%۴۵,۱۲

جدول ۱۲. درصد افزایش انرژی خمیری به‌ازای 20° درجه افزایش طول پانل در دوره‌های مشخص بارگذاری در طول ۳۷۵ میلی‌متر.

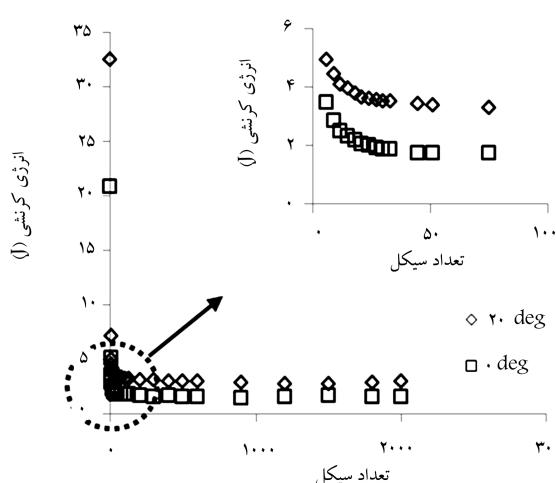
تعداد دوره
۱۰۰
۱۰۰۰
۱۵۰۰
%۴۴,۳۳
%۴۲,۳۲
%۴۰,۲

شود. همچنین در پانل‌های استوانه‌بی مایل نسبت به پانل‌های استوانه‌بی عمودی، در هر دوره اتفاق انرژی بیشتر است و این نیز بر وجود و تأثیر گشتاور خمیشی در پانل‌های استوانه‌بی مایل صحنه می‌گذارد. بنابراین گشتاور خمیشی در پانل باعث افزایش انرژی اتلافی و افزایش تغییر شکل خمیری می‌شود. با توجه به شکل‌های ۲۰ تا ۲۲، درصد افزایش انرژی خمیری به‌ازای 20° درجه افزایش طول پانل در دوره‌های مشخص در سه طول ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ و ۱۱، ۱۰ و ۱۲ نشان داده شده است.

در شکل‌های ۲۳ تا ۲۵ رابطه بین انرژی خمیری و نزدیکی جایه‌جایی رچتینگ برای پانل‌های استوانه‌بی مایل و عمودی با طول‌های مؤثر ۱۷۵، ۲۹۵ و ۳۷۵ میلی‌متر نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به‌ازای افت معین نزدیکی جایه‌جایی رچتینگ، کاهش انرژی خمیری در پانل استوانه‌بی مایل بیشتر است. اگرچه در هر دوره، پانل‌های استوانه‌بی مایل دارای انرژی خمیری بیشتری نسبت به پانل‌های استوانه‌بی عمودی است؛ ولی در پانل‌های استوانه‌بی مایل با کاهش معین نزدیکی جایه‌جایی رچتینگ به کاهش در مقدار ممان خمیشی در هر دوره منجر می‌شود و درنتیجه به دلیل کاهش چشمگیر ممان خمیشی، با کاهش قابل ملاحظه در مقدار انرژی خمیری همراه است.



شکل ۲۱. تغییرات انرژی خمیری بر حسب تعداد دوره برای پانل‌های استوانه‌بی با طول ۲۹۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی.



شکل ۲۲. تغییرات انرژی خمیری بر حسب تعداد دوره برای پانل‌های استوانه‌بی با طول ۳۷۵ میلی‌متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی.

۷. نتیجه‌گیری

در این تحقیق با انجام مطالعات تجربی روی پانل‌های استوانه‌بی فولادی تحت بارگذاری متداول، رفتار رچتینگ این پانل‌ها بررسی و تأثیر گشتاور خمیشی تحت بارگذاری مرکب پانل‌های استوانه‌بی مشاهده شد. بر این اساس:

- در بارگذاری مرکب دوره‌ی تحت شرایط نیرو - کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، با افزایش طول پانل استوانه‌بی برای یک دوره‌ی معین، جایه‌جایی رچتینگ به دلیل افزایش گشتاور خمیشی افزایش می‌یابد (به عنوان مثال درصد افزایش

جابه جایی رچتینگ تغییر طول اولیه نمونه ها از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی متر در صد مین دوره برابر ۹/۹۵ درصد است.

۲. در بارگذاری مرکب دوره بی تحت شرایط نیرو - کنترل برای یک طول معین پانل استوانه بی با افزایش تعداد دوره، جابه جایی رچتینگ افزایش و نز آن کاهش می یابد.

۳. در بارگذاری مرکب دوره بی تحت شرایط نیرو - کنترل و بار میانگین و دامنه یکسان، با افزایش طول پانل استوانه بی جابه جایی رچتینگ دارای نز بالاتری است (به عنوان مثال درصد افزایش نز جابه جایی رچتینگ تغییر طول اولیه نمونه ها از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی متر در صد مین دوره برابر ۱۰ درصد است).

۴. در بارگذاری مرکب دوره بی تحت شرایط نیرو - کنترل، پانل استوانه بی از نقاط انتهایی به دلیل وجود گشتاور خمی می بیشتر در این نواحی، دچار شکست می شود و کشیدگی بیشتر در این نواحی مشاهده می شود.

۵. در بارگذاری مرکب دوره بی تحت شرایط نیرو - کنترل، پانل استوانه بی با افزایش طول نمونه ها، طول عمر یا تعداد دوره لازم برای شکست نمونه ها کاهش می یابد (به عنوان مثال طول عمر تغییر طول اولیه نمونه ها از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی متر، برابر ۴۰ دوره می یابد).

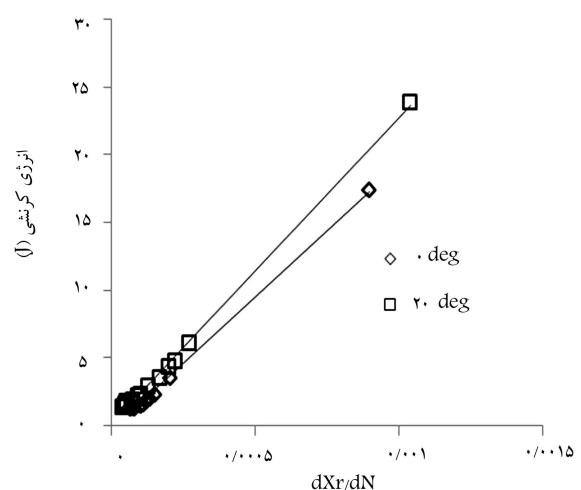
۶. در بارگذاری مرکب دوره بی تحت شرایط نیرو - کنترل و بار میانگین و دامنه یکسان، پانل با طول بلندتر دارای انرژی خمیری بیشتری نسبت به پانل با طول کوتاه تر است که با افزایش دوره این اختلاف کاهش می یابد. همچنین برای یک طول معین، با افزایش تعداد دوره انرژی خمیری در هر دوره کاهش می یابد تا این که به مقدار ثابتی برسد. (به عنوان مثال درصد افزایش انرژی خمیری تغییر طول اولیه نمونه ها از ۱۷۵ به ۲۹۵ میلی متر در صد مین دوره برابر ۱۳/۷۴ درصد است).

۷. در بارگذاری مرکب دوره بی تحت شرایط نیرو - کنترل برای طول های مختلف پانل استوانه بی، رابطه خطی بین انرژی خمیری هر دوره با نز جابه جایی رچتینگ در آن دوره مشاهده شد و با کاهش از انرژی خمیری، نز جابه جایی رچتینگ نیز به صورت خطی کاهش می یابد.

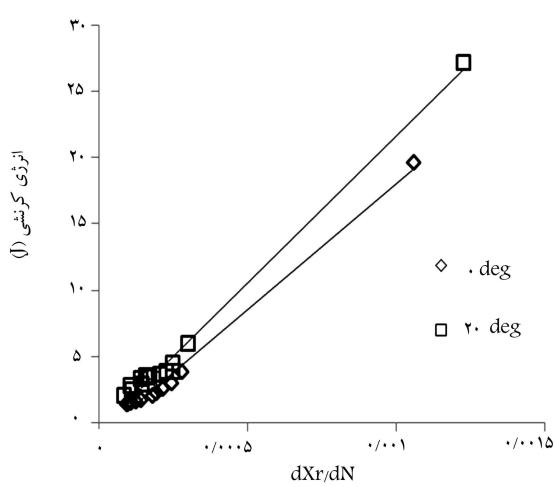
۸. بافت نز جابه جایی رچتینگ در بارگذاری مرکب دوره بی تحت شرایط نیرو - کنترل و بار میانگین و دامنه یکسان، به دلیل کاهش بیشتر گشتاور خمی در پانل های با طول بلندتر، کاهش انرژی خمیری آن بیشتر است.

۹. در بارگذاری دوره بی تحت شرایط نیرو - کنترل و بار میانگین و دامنه یکسان، برای یک طول ثابت و تعداد دوره مین، پانل استوانه بی مایل دارای جابه جایی رچتینگ بیشتری نسبت به پانل استوانه بی عمودی است که علتش وجود گشتاور خمی در پانل های استوانه بی مایل است (به عنوان مثال درصد افزایش جابه جایی رچتینگ به ازای ۲۰ درجه افزایش زاویه استقرار پانل در صد مین دوره در طول ۱۷۵ میلی متر برابر ۵۴/۷۸ درصد است).

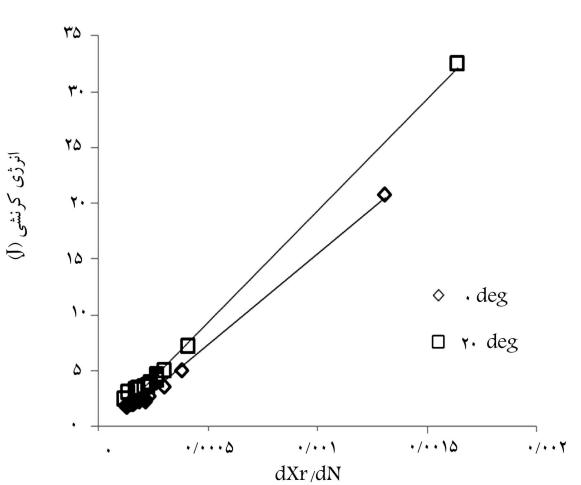
۱۰. در بارگذاری دوره بی تحت شرایط نیرو - کنترل و بار میانگین و دامنه یکسان، اتفاق انرژی در پانل های استوانه بی مایل نسبت به پانل استوانه بی عمودی در هر دوره بیشتر است که این نیز به دلیل وجود گشتاور خمی در پانل استوانه بی مایل است. بنا بر این گشتاور خمی تأثیر قابل ملاحظه بی در انرژی اتفاقی و افزایش تغییر شکل خمیری دارد (به عنوان مثال درصد افزایش انرژی خمیری به ازای ۲۰ درجه افزایش طول پانل در صد مین دوره در طول ۱۷۵ میلی متر برابر ۵۴/۱۱ درصد است).



شکل ۲۳. تغییرات انرژی خمیری بر حسب نز کرنش رچتینگ برای طول ۱۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی.



شکل ۲۴. تغییرات انرژی خمیری بر حسب نز کرنش رچتینگ برای طول ۲۹۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی.



شکل ۲۵. تغییرات انرژی خمیری بر حسب نز کرنش رچتینگ برای طول ۳۷۵ میلی متر تحت بارگذاری مرکب و محوری تناوبی.

۱۱. در بارگذاری دوره‌ی تحت شرایط نیرو - کنترل و بار میانگین و دامنه‌ی یکسان، به دلیل کاهش در مقادیر گشتاور خمشی در پانل‌های استوانه‌بی مایل، کاهش انرژی خمیری پانل‌های استوانه‌بی مایل بیشتر از پانل‌های استوانه‌بی عمودی با همان طول است.
- فهرست علایم**
- N : تعداد دوره؛
 D : قطر خارجی پانل استوانه‌بی (mm)؛
 d : قطر داخلی پانل استوانه‌بی (mm)؛
 L : طول پانل استوانه‌بی (mm)؛
 t : ضخامت پانل استوانه‌بی (mm)؛
 $\frac{dX_r}{dN}$: نرخ جابه‌جایی رچتینگ پانل استوانه‌بی؛
 α : زاویه‌ی قرارگیری پانل با محور افقی؛
 انرژی کرنشی: مساحت داخل حلقه هیسترزیس؛
 σ_y : تنش تسلیم؛
 E : مدول کشسانی؛
 v : ضریب پواسون.
- X_r : جابه‌جایی رچتینگ پانل استوانه‌بی (mm)؛
 L_{eff} : طول مؤثر پانل استوانه‌بی (mm)؛
 F_m : نیروی میانگین (kN)؛
 F_a : نیروی دامنه (kN)؛

پانوشت‌ها

1. cyclic plasticity
2. Ratcheting
3. finite element
4. Armstrong-Frederick

منابع (References)

1. Yang, X. "Low cycle fatigue and cyclic stress ratcheting failure behavior of carbon steel 45 under uniaxial cyclic loading", *International Journal of Fatigue*, **27**, pp. 1124-132 (2005).
2. Gao, B., Chen, X., and Chen, G. "Ratchetting and ratchetting boundary study of pressurized straight low carbon steel pipe under reversed Bending", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, **83**, pp. 96-106 (2006).
3. Chen, G., Chen, X. and Chang-Dong, N. "Uniaxial ratcheting behavior of 63Sn37Pb solder with loading histories and stress rates", *Materials Science & Engineering*, **421**, pp. 238-244 (2006).
4. Kang, G. and et al. "Experimental study on ratcheting-fatigue interaction of SS304 stainless steel in uniaxial cyclic stressing", *Materials Science & Engineering*, **435-436**, pp. 396-404 (2006).
5. Lee, J. and et al. "A numerical simulation model of cyclic hardening behavior of AC4C-T6 for LNG cargo pump using finite element analysis", *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, **22**, pp. 889-896 (2009).
6. Nip, K.H., Gardner, L., Davies, C.M. and Elghazouli, A.Y. "Extremely low cycle fatigue tests on structural carbon steel and stainless steel", *Journal of Constructional Steel Research*, **66**, pp. 96-110 (2010).
7. Sun, G.Q. and Shang, D.G. "Prediction of fatigue lifetime under multiaxial cyclic loading using finite element analysis", *Materials & Design*, **31**(1), pp. 126-133 (2010).
8. Shariati, M., Hatami, H., Yarahmadi, H. and Epakchi, H.R. "An experimental study on the ratcheting and fatigue behavior of polyacetal under uniaxial cyclic loading", *Materials & Design*, **34**, pp. 302-312 (2011).
9. Zhang, J., Yu, Q., Jiang, Y. and Li, Q. "An experimental study of cyclic deformation of extruded AZ61A magnesium alloy", *International Journal of Plasticity*, **27**(5), pp. 768-787 (2011).
10. Shariati, M. and Hatami, H. "Experimental study of SS304L cylindrical shell with/ without cutout under cyclic axial loading", *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **58**, pp. 35-43 (2012).
11. Zhu, J., Chen, X., Xue, F. and Yu, W. "Bending ratcheting tests of Z2CND18.12 stainless steel", *International Journal of Fatigue*, **35**, pp. 16-22 (2012).
12. Shariati, M., Kolasangiani, K. and Chavoshan, H. "An experimental study on ratcheting behavior of stainless steel 304L cylindrical shells under cyclic axial and combined loadings", *Modares Journal of Mechanic*, **13**(9), pp. 69-76 (2013).
13. Gaudin, C. and Feaugas, X. "Cyclic creep process in AISI 316L stainless steel in terms of dislocation patterns and internal stresses", *Acta Materials*, **52**, pp. 3097-3110 (2004).
14. Dutta, K. and Ray, K.K. "Ratcheting phenomenon and post-ratcheting tensile behaviour of an aluminum alloy", *Material Science & Engineering A*, **540**, pp. 30-37 (2012).