



## ارائه مدل آماری بر مبنای زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی عمر خستگی در اتصالات دولبه کامپوزیتی چسبی

ابراهیم صالحی<sup>۱</sup>، پوریا اکبرزاده<sup>۲\*</sup>، امیرحسین کاظمیان<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

<sup>۲</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه سیستان و بلوچستان

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۶؛ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۶/۲۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۵

### چکیده

مدل زنجیره مارکوف یکی از مدل‌های آماری-احتمالاتی است که با استفاده از نتایج تجربی در سیکل‌های اولیه می‌تواند وضعیت خرابی نمونه‌ها را در سیکل‌های بالاتر پیش‌بینی کند؛ بنابراین می‌تواند به صورت لحظه‌ای برای کنترل خرابی خستگی قطعات در حال کار استفاده شود. در این پژوهش، اتصالات چسبی دولبه تحت بارگذاری سیکلی در سه سطح بارگذاری مختلف به صورت کشش-کشش قرار گرفته‌اند و هدف از انجام این کار، بررسی فرآیند خرابی خستگی اتصالات چسبی است. در این مقاله، تغییرات کرنش سیکلی به عنوان شاخص خرابی معرفی شده است که روند رشد خرابی خستگی را نشان می‌دهد. براساس نتایج تجربی مشاهده می‌گردد، شکست خستگی بعد از ۱۸٪ رشد در اندازه کرنش سیکلی اولیه اتفاق افتاده است. این نتایج تجربی با داده‌های به دست آمده از مدل زنجیره مارکوف همخوانی و توافق دارند؛ بنابراین، این روش پیش‌بینی می‌تواند عمر باقیمانده اتصالات چسبی دولبه را بر اساس اندازه‌گیری‌های کرنش و بدون توجه به تاریخچه بارگذاری آن‌ها پیش‌بینی کند.

**کلمات کلیدی:** اتصال چسبی دولبه؛ زنجیره مارکوف؛ کرنش سیکلی؛ پیش‌بینی عمر خستگی؛ خرابی خستگی.

## Developing a statistical model based on Markov chain for fatigue life prediction of double lap composite adhesive joints

E. Salehi<sup>1</sup>, P. Akbarzadeh<sup>2,\*</sup>, A. H. Kazemian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> M.Sc. of Mech. Eng., Sistan and Baluchestan Univ., Zahedan, Iran

<sup>2</sup> Assistant. Prof., Mech. Eng., Sistan and Baluchestan Univ., Zahedan, Iran

### Abstract

The Markov chain model is the stochastic method to predict the damage status of samples in higher cycles by using experimental results in primitive cycles. So, it can be used instantaneously to control fatigue damage process of parts in service. In this study, the fatigue damage process of double lap adhesive joints subjected to constant amplitude tension-tension fatigue loading at three different applied load levels were studied. In this paper, the ratcheting strain changes have been introduced as a damage parameter which shows the growth trend of fatigue damage process. It is observed that fatigue failure occurred after 18% growth in the initial ratcheting strain size. These experimental results are consistent with the data obtained from the Markov chain model. Therefore, this forecasting method can predict the remaining life of double lap adhesive joints based on strain evaluations regardless of their loading history.

**Keywords:** Double-lap Adhesive Joint; Markov Chain Model; Ratcheting Strain; Life Prediction; Fatigue Damage.

## ۱- مقدمه

امروزه اتصالات چسبی به دلیل مزایای متعددشان نظیر نسبت استحکام به وزن خوب، سفتی بالا، توانایی اتصال مواد غیر مشابه و توزیع تنش یکنواخت‌تر مورد توجه صنعتی از قبیل خودروسازی، توربین بادی، دریایی و هوایی می‌باشند [۱-۳]؛ اما به هر حال در کنار این مزایا، یکی از عوامل محدود کننده کاربرد گسترده‌تر اتصالات چسبی، دشواری مربوط به پیش-بینی مطمئن کارکرد آن‌ها است که منجر به تمایل برای طراحی محافظه کارانه آن‌ها می‌شود. به همین منظور، بررسی رفتار سازه‌های دارای اتصالات لبه‌ای در بارهای چرخه‌ای و رفتار سازه در برابر واماندگی از نوع خستگی بسیار مهم است [۴ و ۵].

شنوی و همکارانش [۶ و ۷] به پیش‌بینی عمر خستگی در اتصالات چسبی تحت بارگذاری با دامنه متغیر با استفاده از روش مکانیک شکست و مکانیک خرابی پرداختند؛ همچنین آن‌ها از روش عددی برای پیش‌بینی عمر خستگی استفاده کردند. این روش، عمر خستگی را کمتر از واقعیت پیش‌بینی می‌کند. روش دیگری که مورد استفاده قرار گرفت، روش خرابی پیش‌رونده بر اساس ارتباط دادن خرابی موضعی به کرنش پلاستیک در یک رابطه تجربی می‌باشد. این روش بر خلاف روش مکانیک شکست، پیش‌بینی بیشینه‌ای از عمر خستگی دارد.

کوآریزم و ریکوتا [۸-۱۰] در طی سه مقاله، به ارزیابی آسیب، پیش‌بینی عمر آغاز، بررسی رفتار خستگی و گسترش ترک خستگی در اتصالات چسبی پرداختند. آن‌ها به خوبی نشان دادند که عمر آغاز ترک، حداقل ۱۰٪ عمر خستگی اتصال چسبی را شامل می‌شود. آن‌ها همچنین دریافتند که طول قسمت هم‌پوشانی چسب کاری رابطه مستقیمی با عمر خستگی و استاتیکی اتصال دارد و با افزایش طول قسمت چسب کاری شده، هر دو عمر بیشتر می‌شوند. طبق نتایج به دست آمده، درصد عمر آغاز ترک خستگی تابعی از طول قسمت هم‌پوشی چسب کاری و میزان تنش است، به طوری که با افزایش طول هم‌پوشی، افزایش و با افزایش سطح تنش، کاهش می‌یابد.

خرمیشاد و همکاران [۱۱] با استفاده از مدل ناحیه‌ی چسبنده به بررسی آسیب خستگی پرداختند و با این رویکرد عمر خستگی و عمر دوام اتصال را یافتند. آن‌ها با توجه به

اهمیتی که قسمت چسبی دارد و همچنین نحوه‌ی مدل‌سازی، دو نوع اتصال تک‌لبه و دولبه را با تمامی شرایط یکسان در این پژوهش مورد تحقیق و بررسی قرار دادند.

فراهانی و صفری [۱۲] اثرات آماده‌سازی سطح به روش سندبلاست و شات‌بلاست را بر روی استحکام اتصالات چسبی بررسی کردند. نتایج نشان داد که در صورت افزایش زبری سطح نمونه‌های شات‌بلاست و سندبلاست شده، استحکام برشی نهایی به‌طور پیوسته افزایش یافته است. زبری و پرداخت سطح بهینه برای چسب‌های نرم و ترد یکسان بوده است که عدم وابستگی زبری سطح بهینه به نوع چسب در نمونه‌های آماده شده به روش سندبلاست و شات‌بلاست را نشان داده است.

مورفینی و همکاران [۱۳] اثر دو نوع زبری سطحی را بر عملکرد اتصال لبه‌ای چسبی تحت بارگذاری استاتیکی و خستگی و همچنین اثر دو زمان پخت چسب در اتوکلاو را آزمایش کردند. آن‌ها همچنین میانگین حداکثر بار استاتیکی را برای هر یک از حالت‌های اتصال به دست آورده و میانگین بار چرخه‌ای هر حالت را به صورت درصدی از میانگین حداکثر بار استاتیکی همان حالت در نظر گرفتند. نتایج نشان داد که افزایش زمان پخت در اتوکلاو برای هر دو استحکام استاتیکی و خستگی تأثیر مثبت دارد. علاوه بر این افزایش زبری سطح برای استحکام استاتیکی مفید بوده ولی اثر تضعیف کننده بر روی عمر خستگی دارد.

ژانگ و همکاران [۱۴] نحوه‌ی عملکرد خستگی اتصال چسبی دولبه و تک‌لبه با چسب‌های اپوکسی را تحت بارگذاری خستگی مورد پژوهش و تحقیق قرار دادند. آن‌ها یک مقدار بحرانی تغییر سفتی و طول را به ترتیب برای اتصالات چسبی دولبه و تک‌لبه یافتند که در آن شکست، مستقل از سطح بار اتفاق می‌افتد. اتصالات چسبی دولبه همیشه افت سفتی خطی مستقل از سطح بار را دارند، در صورتی که اتصالات چسبی تک‌لبه چنین رفتاری را در بازه‌ی محدودی از عمر گسترش ترک نشان می‌دهد. کومازاوا و کاساهارا [۱۵] مدلی تئوری برای بررسی تنش‌های برشی در اتصال دولبه با در نظر گرفتن تأثیرات بارهای مکانیکی و حرارتی ارائه دادند. لیو و همکاران [۱۶] به طور تجربی رفتار خستگی اتصالات چسبی ساخته شده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه و فولاد را تحت تغییرات بارهای برشی در دماهای مختلف بررسی کرده‌اند.

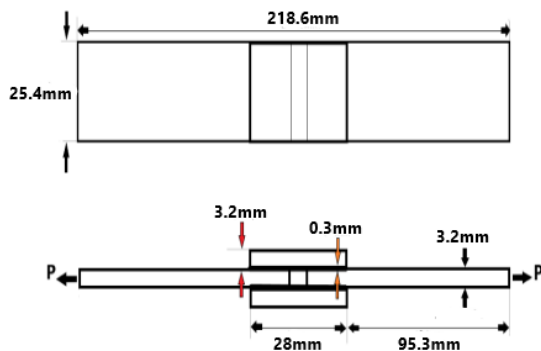
خواص مکانیکی و فیزیکی رزین اپوکسی ۸۲۸ مطابق با کاتالوگ شرکت سازنده در جدول ۱ اشاره شده است.

جدول ۱- خواص مکانیکی و فیزیکی رزین اپوکسی ۸۲۸

KER		پارامتر (واحد)	مقدار
وزن مخصوص در دمای (۲۵°C)	(Kg/m <sup>3</sup> )	۱۱۶۰	
گرانروی در دمای (۲۵°C)	(Pa.s)	۱۴-۱۲	
مدول یانگ	(GPa)	۲/۷۵	
استحکام کششی	(MPa)	۶۹	
استحکام برشی (چسبندگی)	(MPa)	۴۱	
زمان پخت نهایی	(روز)	۳	

### ۲-۲- روش ساخت اتصال چسبی دولبه

روش‌های متفاوتی برای ساخت کامپوزیت‌های لایه‌ای وجود دارد که روش چیدمان دستی یکی از روش‌های پرکاربرد و بدون نیاز به تجهیزات خاص است. در این مطالعه، کامپوزیت‌ها از ۱۶ لایه الیاف شیشه نوع E و رزین اپوکسی ۸۲۸ به عنوان چسب به روش لایه‌گذاری دستی ساخته شده‌اند. برای ساخت صفحه‌های کامپوزیتی، رزین اپوکسی و سخت‌کننده با نسبت ۱۰ به ۱ مخلوط شدند؛ همچنین نسبت رزین به الیاف ۵۰ به ۵۰ درصد وزنی انتخاب شد و پخت اولیه کامپوزیت‌ها به مدت سه روز در دمای محیط به انجام رسید. سپس صفحه‌های کامپوزیتی اولیه ساخته شده، جهت انجام آزمایش‌های کشش و خستگی به اندازه مورد نظر برش خورده تا بر طبق استاندارد ASTM D3528-Type B [۲۴] به هم متصل شوند. پیکربندی هندسی و طول ناحیه‌ی همپوشانی اتصال چسبی دولبه در شکل ۱ نشان داده شده است. همچنین می‌توان در شکل ۲ نمونه‌های آماده شده نهایی را مشاهده نمود.



شکل ۱- پیکربندی هندسی اتصال چسبی دولبه

طول عمر اتصالات تحت بار خستگی با نیروی دامنه ثابت با افزایش دما کاهش می‌یابد.

سرفراز و همکاران [۱۷] مطالعاتی در مورد رفتار خستگی اتصالات چسبی دولبه کامپوزیتی تحت الگوهای بارگذاری با دامنه ثابت مختلف شامل فشاری، کششی و معکوس شونده (ترکیب کششی و فشاری) انجام دادند.

اگرچه تحقیقات مختلفی در زمینه رفتار خستگی اتصالات چسبی صورت گرفته و روش‌های متفاوتی ارائه شده است [۱۸-۲۰]، فقدان پژوهش دربارۀ فرآیند خرابی خستگی اتصالات چسبی با استفاده از مدل‌های آماری- احتمالاتی احساس می‌شود و همچنین استفاده از این نوع مدل‌ها به منظور پیش‌بینی عمر و کارکرد این اتصالات، بسیار مناسب و ضروری به نظر می‌رسد [۲۱-۲۳]؛ بنابراین، مقاله حاضر از حیث پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات چسبی با استفاده از مدل مارکوف از پژوهش‌های پیش از خود متمایز است.

در این مطالعه، یک مدل آماری- احتمالاتی بر اساس تغییرات کرنش سیکلی برای پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات چسبی دولبه ارائه شده است. در بخش اول مقاله، نتایج آزمایش‌های تجربی انجام شده تحت بارگذاری خستگی با دامنه ثابت در سه سطح بارگذاری حداکثر مختلف ارائه شده است. در بخش دوم پژوهش حاضر، با استفاده از اندازه‌گیری تغییرات کرنش سیکلی به پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات چسبی کامپوزیتی با استفاده از تئوری زنجیره مارکوف پرداخته شده است.

### ۲- مواد و روش تحقیق

#### ۲-۱- الیاف و رزین مورد استفاده

در این تحقیق، الیاف استفاده شده در ساخت نمونه‌ها از جنس شیشه سری E محصول شرکت لاین تکس چین است. این الیاف‌ها به صورت صفحه‌ای و از نوع بافته شده است و چگالی سطحی الیاف برابر ۲۰۰ g/m<sup>2</sup> است. از خواص خوب این الیاف می‌توان به در دسترس بودن و همچنین آغشته‌سازی خوب با رزین‌های مختلف اشاره کرد. در این مطالعه به منظور ساخت نمونه‌های اتصال چسبی دولبه کامپوزیتی از رزین اپوکسی ۸۲۸ KER تهیه شده از شرکت شیمی افسون با وزن مخصوص ۱۱۶۰ Kg/m<sup>3</sup> و سخت‌کننده تنا استفاده شده است. برخی از

جدول ۲- ظرفیت نهایی تحمل نیرو و تغییر طول مربوط

نمونه	حداکثر ظرفیت تحمل نیرو (N)	تغییر طول (mm)
C1	۳۸۵۹	۰/۶۳۲
C2	۲۹۰۳	۰/۷۳۴
C3	۳۱۰۵	۰/۵۲۵
C4	۳۳۵۹	۰/۷۴۱
C5	۳۵۷۸	۰/۶۷۸
میانگین	۳۳۶۰	۰/۶۶۲
انحراف معیار	۳۷۷	۰/۰۸۸



شکل ۲- نمونه‌های آماده شده نهایی اتصال چسبی دولبه

۲-۴- آزمایش خستگی برای اتصال چسبی

آزمایش‌های خستگی با استفاده از دستگاه سنتام با ظرفیت ۵ تن در دمای محیط (دمای °C ۲۵) و رطوبت نسبی ۵۰٪ انجام شدند و برای جلوگیری از گرم شدن پلیمر در حین انجام آزمایش، فرکانس بارگذاری برای تمامی آزمایش‌ها به طور ثابت ۶ Hz تعیین شد. در تمام دسته‌های آزمایش، نسبت بارگذاری (نسبت نیروی حداکثر به حداقل) برابر ۰/۱ انتخاب شد که در نتیجه منجر به یک بارگذاری کشش-کشش شد.

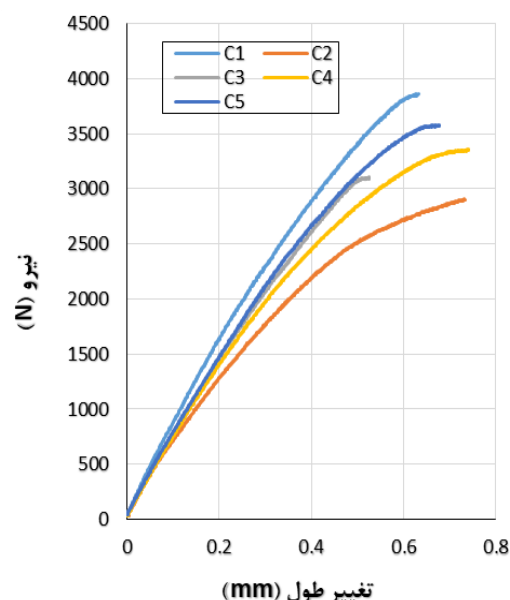
در این پژوهش، آزمایش‌های خستگی تحت بارگذاری سیکلی با سه سطح نیروی حداکثر مختلف انجام شدند. در ابتدا ۷ نمونه دسته (a) تحت بارگذاری معادل با ۶۰٪ سطح بار (متوسط) شکست استاتیکی (۳۳۶۰N) قرار گرفتند. در این دسته، نیروی سیکلی حداکثر اعمال شده برابر با ۲۰۰۰N است. در دسته (b) تعداد ۷ نمونه تحت بارگذاری خستگی با نیروی معادل ۶۸٪ نیروی شکست استاتیکی که برابر با ۲۳۰۰N است، قرار گرفتند و در پایان، دسته (h) تعداد ۸ نمونه نیز تحت بارگذاری خستگی با نیروی معادل ۷۴٪ نیروی شکست استاتیکی آزمایش شدند که برابر با ۲۵۰۰N است. در جدول ۳ تعداد نمونه‌های آزمایش مشخص شده است.

جدول ۳- تعداد نمونه‌ها و سطح بارگذاری اعمال شده

تعداد نمونه (کد دسته)	درصد بارگذاری نسبت به بار شکست نهایی (%)	$F_{min}$ (N)	$F_{max}$ (N)
۷ (دسته a)	۶۰	۲۰۰	۲۰۰۰
۷ (دسته b)	۶۸	۲۳۰	۲۳۰۰
۸ (دسته h)	۷۴	۲۵۰	۲۵۰۰

۲-۳- آزمایش کشش اتصال چسبی

در این پژوهش تعداد پنج نمونه از اتصالات چسبی دولبه ساخته شده برای آزمایش کشش با دستگاه سنتام در دمای اتاق با نرخ بارگذاری ۱ mm/min انتخاب شد تا میزان استحکام نهایی اتصالات چسبی به دست آید. در این آزمایش، منحنی بار-جابجایی برای ۵ نمونه اتصال چسبی دولبه که تحت نیروی کششی استاتیکی می‌باشند رسم شد که در شکل ۳ نشان داده شده است؛ همچنین نتایج مربوط به حداکثر ظرفیت تحمل نیرو و تغییر طول تا شکست برای ۵ نمونه مورد آزمایش کشش در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۳- منحنی بار-جابجایی برای ۵ نمونه آزمایش کشش



شکل ۵- یک نمونه شکست در لایه چسب در اثر خرابی خستگی

#### ۴- ارزیابی کرنش سیکلی اتصالات چسبی دولبه

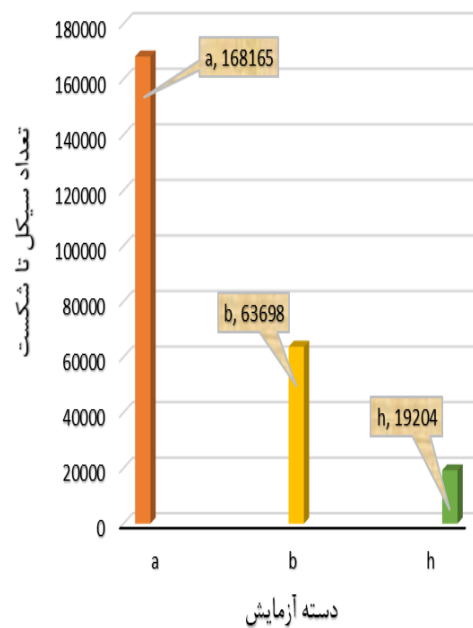
در این مطالعه، شاخص خرابی بر اساس تغییرات کرنش سیکلی در نظر گرفته شده است؛ زیرا قابلیت اندازه‌گیری کرنش‌های سیکلی در حین کارکرد سازه را دارد و در طول بارگذاری سیکلی تغییرات آن به شکل پیش‌رونده است و روند خرابی را به خوبی نشان می‌دهد؛ بنابراین با توجه به این شاخص خرابی، می‌توانیم رفتار خرابی خستگی اتصالات چسبی دولبه را مورد بررسی قرار دهیم. برای به دست آوردن کرنش سیکلی در این پژوهش، از اختلاف بین تغییر طول حداکثر و حداقل که به ترتیب در اثر نیروی حداکثر و حداقل در یک سیکل مشخص ایجاد می‌شود، استفاده کرده‌ایم که در ادامه فرمول مربوط به محاسبه کرنش سیکلی نشان داده شده است و در این فرمول  $i$  اشاره به شماره سیکل انتخابی در طی عمر خستگی دارد.

$$\delta_r(i) = (\delta_{max} - \delta_{min})_i \quad (1)$$

با توجه به آزمایش‌های خستگی انجام شده در این پژوهش، سه ناحیه به آسانی قابل شناسایی است. ناحیه اول، که در طی آن کرنش سیکلی با یک نرخ کاهشی افزایش می‌یابد، ناحیه دوم (یکنواخت) که با یک نرخ رشد ثابت قابل مشاهده می‌باشد و در ناحیه سوم یا ناحیه شکست سریع که در آن ترک ناپایدار شده و با یک نرخ افزایشی منجر به شکست سریع و ناگهانی اتصال می‌شود. در شکل‌های ۶ الی ۸، شکل اول مربوط به تغییرات کرنش سیکلی در طی عمر خستگی برای نمونه‌ای از دسته (a) که تحت آزمایش خستگی با حداکثر نیروی اعمال شده  $2000\text{N}$  بوده‌اند می‌باشد. در شکل دوم و سوم نیز نمودارهای مربوط به تغییرات کرنش سیکلی در طی عمر خستگی برای نمونه‌ای از دسته (b) و دسته (h) که به ترتیب

#### ۳- نتایج آزمایش خستگی

نتایج آزمایش‌های خستگی اتصال چسبی دولبه برای نمونه‌های دسته (a)، (b) و (h) که به صورت میانگین تعداد سیکل تا شکست به ترتیب با حداکثر نیروی اعمال شده  $2000\text{N}$ ،  $2300\text{N}$  و  $2500\text{N}$  در شکل ۴ بیان شده است. ذکر این نکته لازم است که عمر خستگی نمونه‌های اتصال چسبی برحسب تعداد چرخه‌های بارگذاری طی شده تا جدا شدن کامل اتصال از ناحیه‌ی هم‌پوشانی در نظر گرفته شده است.

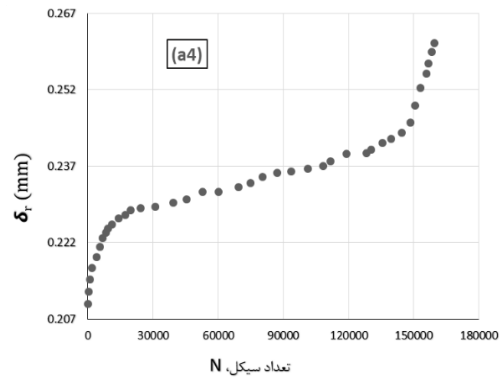


شکل ۴- میانگین تعداد سیکل تا شکست برای نمونه‌های تحت آزمایش خستگی

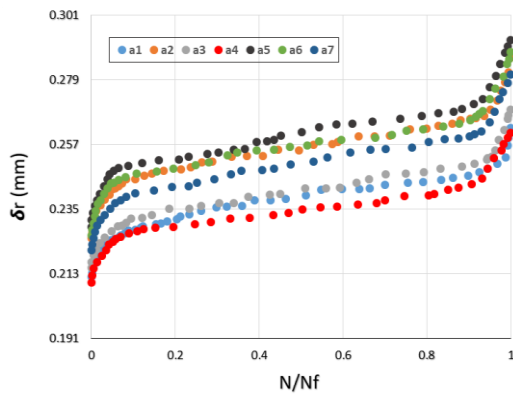
در آزمایش خستگی انجام شده بر روی اتصالات چسبی دولبه، مشاهده شد که مود شکست غالب در تمام نمونه‌های آزمایش شده تحت بارگذاری خستگی، جدا شدن رزین از اولین لایه‌ی الیاف می‌باشد. روند شکست به این صورت می‌باشد که ترک اولیه توسط بارگذاری سیکلی ایجاد شده و گسترش یافته تا زمانی که ناحیه‌ی انتقال نیرو آن قدر کوچک شود که شکست اتفاق می‌افتد. شکل ۵ یک نمونه شکست در لایه چسب در اثر خرابی خستگی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، یک وجه حاوی الیاف و وجه مقابل حاوی رزین می‌باشد که نشان دهنده‌ی جدایش از اولین لایه‌ی کامپوزیت می‌باشد.

در تمام نمونه‌های اتصال چسبی دولبه که تحت آزمایش خستگی قرار گرفتند، این رفتار مشاهده شد. در ادامه نمودارهای مربوط به تغییرات کرنش سیکلی در مقابل تعداد سیکل بی‌بعد شده (تعداد سیکل  $N$ ، نسبت به تعداد سیکل انتها تا شکست  $N_f$ ) برای هر سه دسته آزمایش خستگی رسم شده است. در شکل ۹ نمودار تغییرات کرنش سیکلی در طی عمر خستگی در مقابل تعداد سیکل بی‌بعد شده مربوط به دسته (a) آزمایش خستگی با حداکثر نیروی اعمال شده  $2000N$  رسم شده است. در شکل ۱۰ و شکل ۱۱ نیز به ترتیب نمودارهای مربوط به تغییرات کرنش سیکلی در طی عمر خستگی در مقابل تعداد سیکل بی‌بعد شده مربوط به دسته (b) آزمایش خستگی با حداکثر نیروی اعمال شده  $2300N$  و (h) آزمایش با حداکثر نیروی اعمال شده  $2500N$  نشان داده شده است.

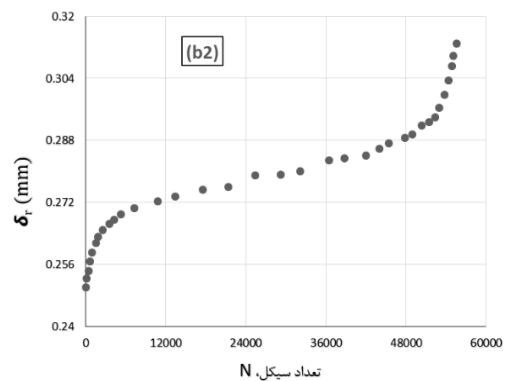
با حداکثر نیروی اعمال شده  $2300N$  و  $2500N$  تحت آزمایش خستگی قرار گرفته‌اند، نشان داده شده است. در هر یک از این شکل‌ها شماره‌ی نمونه بر روی عکس مربوطه نوشته شده است.



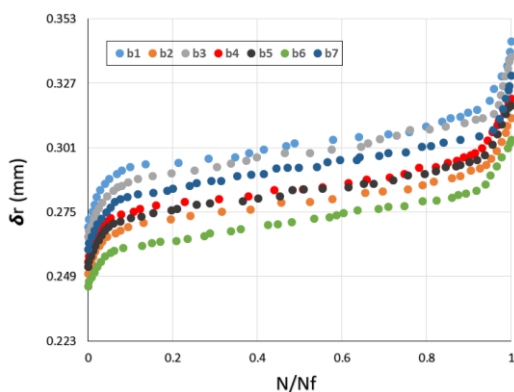
شکل ۶- تغییرات کرنش سیکلی در طی عمر خستگی برای نمونه a4



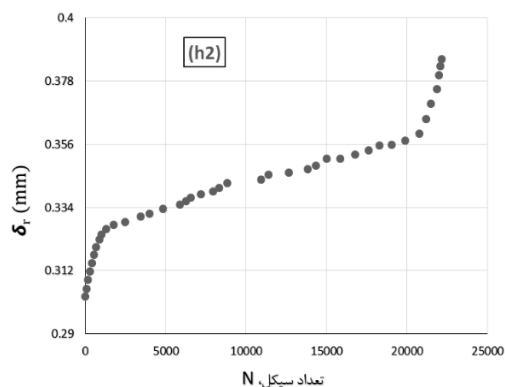
شکل ۹- تغییرات کرنش سیکلی در مقابل تعداد سیکل‌های بی‌بعد شده در طی عمر خستگی برای نمونه‌های دسته (a)



شکل ۷- تغییرات کرنش سیکلی در طی عمر خستگی برای نمونه b2

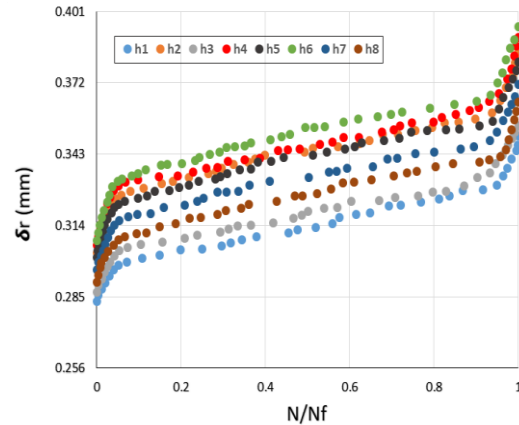
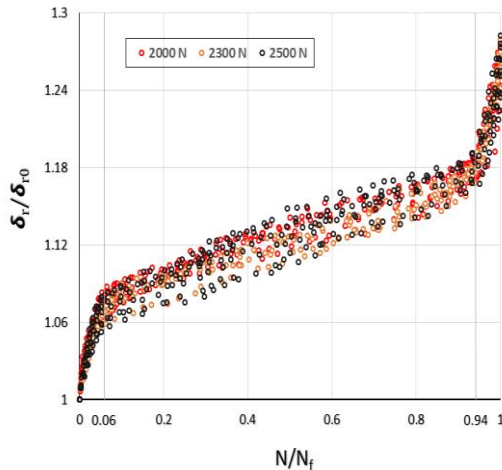


شکل ۱۰- تغییرات کرنش سیکلی در مقابل تعداد سیکل‌های بی‌بعد شده در طی عمر خستگی برای نمونه‌های دسته (b)



شکل ۸- تغییرات کرنش سیکلی در طی عمر خستگی برای نمونه h2

نشان داده شده است. همچنین میانگین و انحراف معیار مربوط به هر دسته آزمایش خستگی قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۱۱- تغییرات کرنش سیکلی در مقابل تعداد سیکل‌های بی‌بعد شده در طی عمر خستگی برای نمونه‌های دسته (h)

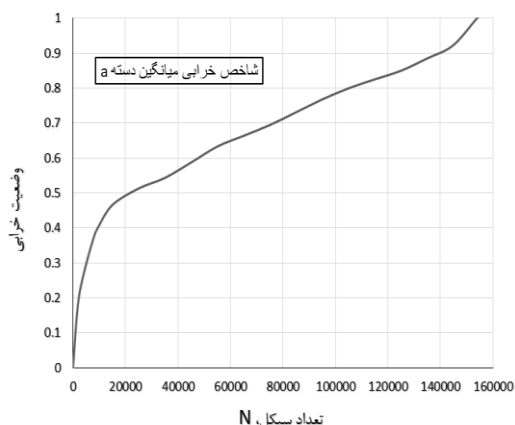
شکل ۱۲- تغییرات تغییر طول سیکلی بی‌بعد شده برای تمام نمونه‌های اتصال چسبی دولبه در طی عمر خستگی

جدول ۴- نسبت کرنش سیکلی در پایان ناحیه دوم نسبت به کرنش سیکلی اولیه (۹۴٪ از کل عمر خستگی)

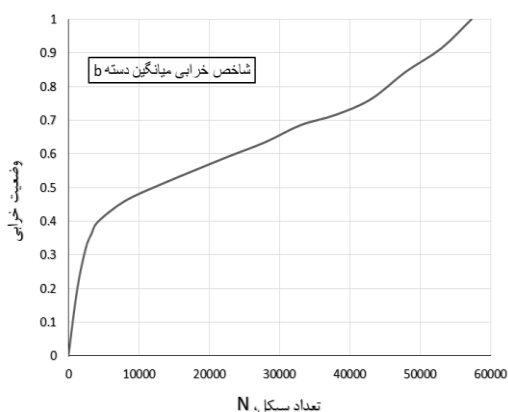
دسته (a) آزمایش، ۲۰۰۰N		دسته (b) آزمایش، ۲۳۰۰N		دسته (h) آزمایش، ۲۵۰۰N	
نمونه	$\delta_r/\delta_{r0}$	نمونه	$\delta_r/\delta_{r0}$	نمونه	$\delta_r/\delta_{r0}$
a1	۱/۱۷۳	b1	۱/۱۸۹	h1	۱/۱۶۷
a2	۱/۱۸۵	b2	۱/۱۷۶	h2	۱/۱۸۷
a3	۱/۱۷۶	b3	۱/۱۸۷	h3	۱/۱۶۸
a4	۱/۱۶۹	b4	۱/۱۷۹	h4	۱/۱۹۰
a5	۱/۱۹۱	b5	۱/۱۷۸	h5	۱/۱۸۴
a6	۱/۱۸۸	b6	۱/۱۶۸	h6	۱/۱۹۱
a7	۱/۱۸۳	b7	۱/۱۸۵	h7	۱/۱۷۷
				h8	۱/۱۷۵
میانگین	۱/۱۸۰۷	میانگین	۱/۱۸۰۲	میانگین	۱/۱۷۹۸
انحراف	۰/۰۰۸۱	انحراف	۰/۰۰۷۲	انحراف	۰/۰۰۹۵
معیار		معیار		معیار	

با توجه به توضیحاتی که ارائه داده شد، پیشرفت کرنش سیکلی نمونه‌های اتصال چسبی دولبه نرخ رشد تقریباً ثابتی را در قسمت عمده‌ی عمر خستگی برای تمام دسته‌های آزمایش نشان می‌دهد. در ادامه این مطالعه، با استفاده از تئوری زنجیره مارکوف، پیش‌بینی عمر خستگی بر اساس مقادیر مشخصی از رشد کرنش سیکلی یعنی ۱۸٪ صورت گرفته و هیچ نیازی به

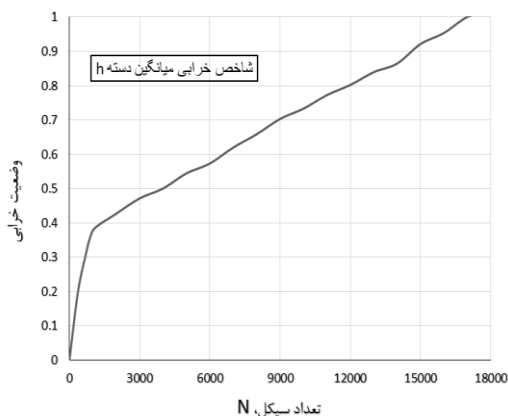
با استفاده از نتایج به دست آمده از تغییرات کرنش سیکلی در طی عمر خستگی نمونه‌های تحت آزمایش خستگی، به خوبی می‌توان از این شاخص برای کنترل فرآیند خرابی خستگی اتصالات چسبی دولبه استفاده نمود. تغییرات کرنش سیکلی برای نمونه‌های اتصال چسبی نشان می‌دهد که بدون در نظر گرفتن سطح بارگذاری، شکست در نمونه‌ها پس از افزایش کرنش سیکلی به مقدار ۲۴-۲۶٪ رخ می‌دهد. این بحث به خوبی توسط نتایج تجربی به دست آمده از آزمایش‌های خستگی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. بخش عمده‌ی فرآیند خستگی اتصالات چسبی یک رشد نسبتاً خطی برای افزایش کرنش سیکلی را نشان می‌دهد که این حدود بین بازه  $0.06 < N/N_f < 0.94$  است. مقدار افزایش کرنش سیکلی نمونه‌ها در پایان ناحیه دوم (ناحیه خطی) تقریباً برای تمام نمونه‌ها یکسان است و این مقدار در حدود ۱۸٪ است. به بیان ساده‌تر اگر  $\delta_r/\delta_{r0} = 1.18$  شود، وقتی که افزایش کرنش سیکلی به ۱۸٪ برسد، نمونه اتصال چسبی دولبه بیشتر از ۹۴٪ عمر خستگی خود را سپری کرده است، بنابراین این مقدار می‌تواند به عنوان یک شاخص پیشرفت خرابی برای مدل خرابی خستگی در نظر گرفته شود. در شکل ۱۲ اندازه تغییر طول سیکلی در سیکل  $N_f$ ،  $\delta_r$ ، نسبت به اندازه تغییر طول سیکلی نمونه در سیکل اولیه یعنی  $\delta_{r0}$ ، بی‌بعد شده است و همچنین تعداد سیکل  $N$ ، نسبت به تعداد سیکل انتها تا شکست  $N_f$ ، بی‌بعد شده است. در جدول ۴ نسبت کرنش سیکلی اتصالات چسبی دولبه در پایان ناحیه دوم منحنی تغییرات کرنش سیکلی (ناحیه خطی) نسبت به کرنش سیکلی اولیه نمونه‌های تحت آزمایش خستگی به خوبی



شکل ۱۳- شاخص خرابی میانگین برای نمونه‌های دسته (a)، با حداکثر نیروی اعمال شده  $2000N$



شکل ۱۴- شاخص خرابی میانگین برای نمونه‌های دسته (b)، با حداکثر نیروی اعمال شده  $2300N$



شکل ۱۵- شاخص خرابی میانگین برای نمونه‌های دسته (h)، با حداکثر نیروی اعمال شده  $2500N$

استخراج لحظه شکست سازه نمی‌باشد. این روش پیش‌بینی عمر نیز می‌تواند عمر باقیمانده نمونه‌ها را بدون در نظر گرفتن تاریخچه بارگذاری آن‌ها پیش‌بینی کند.

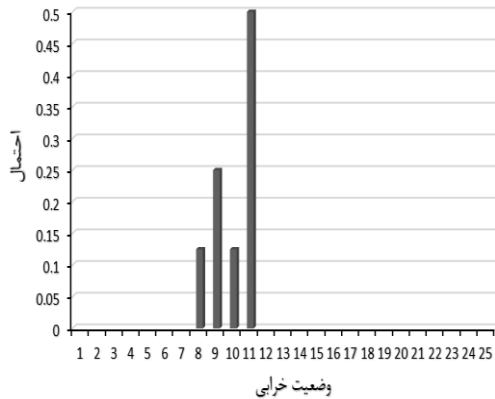
## ۵- مدل سازی احتمالاتی اتصالات چسبی دولبه بر اساس تئوری زنجیره مارکوف

زنجیره مارکوف یک فرآیند تصادفی بدون حافظه است، به این معنی که توزیع احتمال شرطی حالت‌های بعد فقط به حالت فعلی بستگی داشته و به وقایع قبل از آن وابسته نخواهد بود. زنجیره مارکوف در مدل سازی بسیار کاربرد دارد و در این پژوهش از این زنجیره برای مدل سازی پدیده رشد خرابی خستگی استفاده شده است. در مورد تئوری زنجیره مارکوف برای فرآیندهای آماری و احتمالاتی، می‌توان با استفاده از نتایج آزمایشگاهی به دست آمده، پارامترهای مورد نیاز برای زنجیره مارکوف را مشخص کرد و مدل رشد خرابی خستگی در طی تعداد سیکل می‌تواند ساخته شود. بر اساس شاخص خرابی به دست آمده از تغییرات کرنش سیکلی، تابع خرابی بی‌بعد شده  $F(N_i)$ ، به صورت زیر تعریف می‌شود. در این رابطه  $\delta_r(N_0)$  به عنوان کرنش سیکلی اولیه و  $\delta_r(N_i)$  کرنش سیکلی نمونه برای یک سیکل خستگی مشخص می‌باشد.

$$F(N_i) = \frac{\delta_r(N_i) - \delta_r(N_0)}{0.18 \times \delta_r(N_0)} \quad (2)$$

در صورتی که تابع خرابی بی‌بعد شده  $F(N_i)$  صفر شود، یعنی نمونه بدون خرابی است و زمانی که مقدار کرنش سیکلی به حدود  $1/18$  کرنش اولیه  $\delta_r(N_0)$  برسد مقدار تابع خرابی یک خواهد شد. شکل ۱۳ روند منحنی خرابی متوسط، برای شاخص خرابی حاصل از نتایج دسته (a) آزمایش تجربی که شامل ۷ نمونه اتصال چسبی دولبه با نیروی سیکلی حداکثر  $2000N$  را نشان می‌دهد؛ همچنین نمودارهای شکل ۱۴ و شکل ۱۵ بیانگر نتایج مربوط به دسته دوم و دسته سوم آزمایش را نشان می‌دهند که به ترتیب شامل ۷ و ۸ نمونه تحت نیروی سیکلی حداکثر  $2300N$  و  $2500N$  می‌باشند. توجه شود که خرابی در هر سیکل با استفاده از معادله (۲) به دست آمده است. همچنین در تمام نمودارها، تعداد سیکل تا شکست متوسط مربوط به نمونه‌های هر دسته آزمایش خستگی نشان داده شده است.





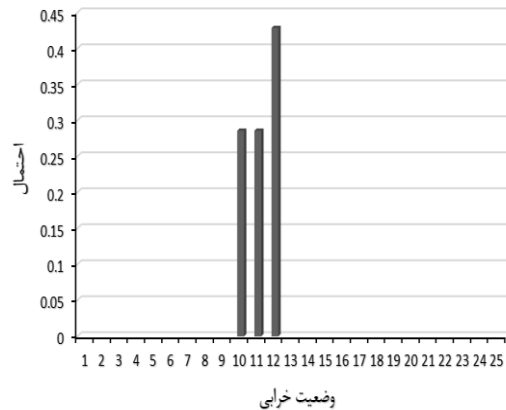
شکل ۱۸- توزیع احتمال وضعیت خرابی نمونه‌های دسته (h) در سیکل ۲۰۰۰

در قدم اول، مدل زنجیره مارکوف را برای استفاده در بیست‌وپنج وضعیت خرابی (۱-۲۵) مربوط به شاخص خرابی ۷ نمونه دسته (a) آزمایش خستگی کالیبره می‌کنیم و توزیع احتمال خرابی مربوط به تعداد سیکل ۱۵۰۰۰ را به عنوان توزیع احتمال اولیه ( $\pi_0$ ) مدل مارکوف در نظر می‌گیریم. برای ایجاد یک مدل زنجیره مارکوف، به دست آوردن یک تابع شدت مناسب است که به منظور تولید احتمالات شرطی ضروری خواهد بود. در مطالعه حاضر، تابع شدت به صورت معادله ۳ تعریف شده است. در این رابطه  $k$  و  $\lambda$  پارامترهای مارکوف و  $N$  تعداد سیکل می‌باشند که برای به دست آوردن بهترین پیش‌بینی فرآیند خرابی، باید پارامترهای  $k$  و  $\lambda$  به طور کاملاً صحیح انتخاب شوند، چون به طور مستقیم بر روی نتایج تولید شده تأثیر می‌گذارند.

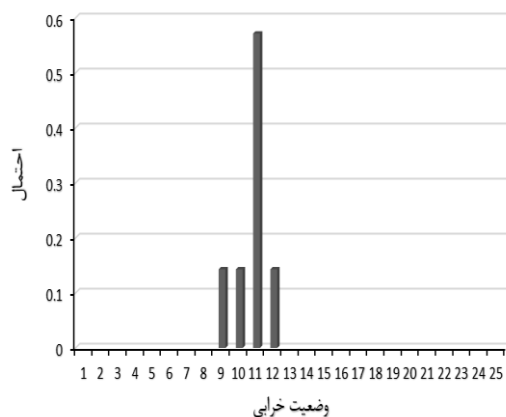
$$Z_i(N) = \frac{\lambda(1 + \lambda N^k)}{100(10 + \lambda N^2)} \quad (3)$$

که  $\lambda$  و  $k$  پارامترهای مارکوف و  $N$  تعداد سیکل هستند. به منظور حصول بهترین پیش‌بینی برای فرآیند خرابی، پارامترهای مارکوف باید به طور صحیح انتخاب شوند. در برنامه مارکوف نوشته شده در محیط Visual C++، برای تولید توزیع احتمال وضعیت خرابی نمونه‌های اتصال چسبی دوبله در هر سیکل ( $\pi_N$ )، این برنامه نیاز به یک سری داده‌های ورودی دارد که این داده‌ها عبارت‌اند از: توزیع احتمال اولیه ( $\pi_i$ )، شماره سیکل مدنظر ( $N_i$ )، سیکل نهایی که توزیع احتمال خرابی باید در آن مشخص شود ( $N_f$ )، تعداد وضعیت خرابی، شماره وضعیتی که

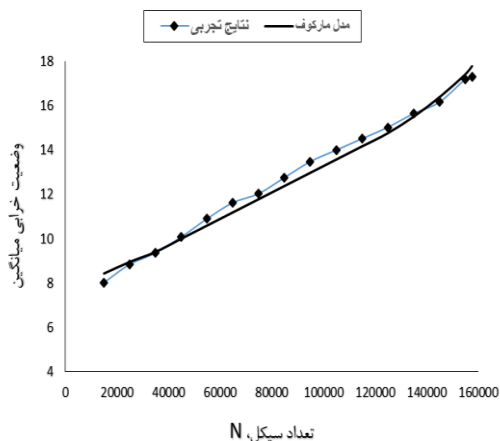
یکی از نکات مثبت مدل زنجیره مارکوف این است که برای ساخت کل فرآیند خستگی فقط تعداد محدودی از وضعیت خرابی نیاز است. در این تحقیق، از نتایج آزمایش خستگی دسته (a) برای کالیبراسیون مدل زنجیره مارکوف استفاده شده است و در ادامه برای شبیه‌سازی دو دسته دیگر آزمایش خستگی، مدل زنجیره مارکوف به کار گرفته شد و با این روش صحنه‌سنجی مدل نیز انجام خواهد شد. در شکل‌های ۱۶ الی ۱۸، احتمال خرابی در هر وضعیت خرابی در یک سیکل مشخص برای هر سه دسته آزمایش خستگی نشان داده شده است. در هر سیکل  $D(N_i) = 0-1$  میزان خرابی خستگی به ۲۵ قسمت تقسیم شده است که هر کدام از وضعیت‌ها نشان دهنده یک مقدار کرنش سیکلی در اثر بارگذاری خستگی می‌باشد.



شکل ۱۶- توزیع احتمال وضعیت خرابی نمونه‌های دسته (a) در سیکل ۱۵۰۰۰

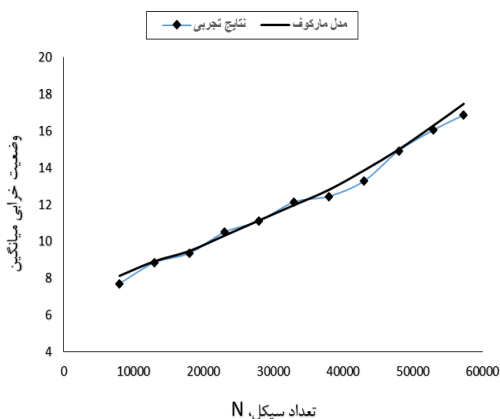


شکل ۱۷- توزیع احتمال وضعیت خرابی نمونه‌های دسته (b) در سیکل ۸۰۰۰



شکل ۱۹- مقایسه میانگین وزنی وضعیت خرابی دسته (a)

در ادامه برای معتبر سازی نتایجی که از دسته (a) به دست آمد، فرآیند خرابی خستگی را برای دو دسته دیگر آزمایش، با استفاده از برنامه مارکوف به همراه همان مقادیر پارامترهای  $\lambda=0.066$  و  $k=1.623$  شبیه سازی می کنیم. در دسته (b) که نیروی حداکثر برابر  $2300N$  بود، توزیع احتمال شاخص خرابی در تعداد سیکل  $8000$  به عنوان توزیع احتمال اولیه استفاده شد و در دسته (h) با نیروی حداکثر  $2500N$  نیز توزیع احتمال اولیه برابر  $2000$  انتخاب شد. در شکل های ۲۰ و ۲۱ مقایسه ی بین وضعیت میانگین خرابی بر اساس نتایج تجربی و نتایج پیش بینی شده مارکوف نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می دهد که مدل مارکوف با پارامترهای تعیین شده برای تمام دسته ها به خوبی می تواند فرآیند خرابی خستگی را پیش بینی کند.



شکل ۲۰- مقایسه میانگین وزنی وضعیت خرابی دسته (b)

فرض می کنیم شکست در آن اتفاق می افتد و پارامترهای مارکوف ( $\lambda$  و  $k$ ) به عنوان داده های ورودی نیاز دارد جدول ۵.

جدول ۵- پارامترهای مربوط به برنامه مارکوف

پارامتر	مقدار
وضعیت خرابی	۱۸
تعداد وضعیت	۲۵
مقدار افزایش	۵۰۰
سیکل اولیه	۱۵۰۰۰
سیکل نهایی	۱۶۰۰۰۰
k	۱/۶۲۳
$\lambda$	۰/۰۶۶

در ادامه نتایج تولید شده توسط برنامه مارکوف با نتایج به دست آمده از آزمایش های تجربی مقایسه شد. نحوه ی این فرآیند به این شکل انجام شد که برای مشخص کردن هر حالت از انتخاب پارامترها، انحراف استاندارد و میانه وزنی وضعیت خرابی در تعدادی از سیکل های مشخص محاسبه شد و با مقادیری که در آزمایش های تجربی به دست آمد، با استفاده از معیار کولموگروف- اسمیرنوف در نرم افزار Spss مقایسه شد و اختلاف میانگین نتایج مدل سازی و نتایج آزمایش تجربی کمتر از ۵٪ به دست آمد که این مقدار بیانگر توافق بسیار خوب آن ها می باشد. در نهایت کالیبراسیون پارامترهای  $\lambda$  و  $k$  به روش سعی و خطا صورت گرفت و مقادیر مناسب به صورت  $\lambda=0.066$  و  $k=1.623$  پیدا شدند.

برای مدل سازی بر اساس دسته (a) که نیروی حداکثر برابر  $2000N$  است، تعداد سیکل اولیه و گام افزایشی سیکلی به ترتیب برابر با  $15000$  و  $500$  سیکل انتخاب شد. برای معتبر سازی پیش بینی های انجام شده توسط مدل مارکوف برای دسته (a)، در قدم اول سیکل نهایی برابر  $75000$  انتخاب شد؛ بنابراین، نتیجه به دست آمده برای بقیه عمر خستگی دسته (a) یعنی  $75000$  تا  $160000$  استفاده می شود تا تطابق آن با نتایج آزمایش های تجربی بررسی شود. وضعیت میانگین خرابی بر اساس نتایج تجربی دسته (a) آزمایش های خستگی در سیکل های منتخب با نتایج به دست آمده از مدل مارکوف در شکل ۱۹ مقایسه شده است. به منظور تولید توزیع احتمال خرابی، می توان از مقادیر میانه در توزیع احتمالاتی نظیر توزیع نرمال استفاده نمود.

قسمت مقدار افزایش کرنش سیکلی در حدود ۱۸٪ می‌باشد، در نهایت در مرحله سوم با تغییر ناگهانی تا هنگام شکست مقدار کرنش سیکلی افزایش می‌یابد که همین موضوع منجر به شکست می‌شود.

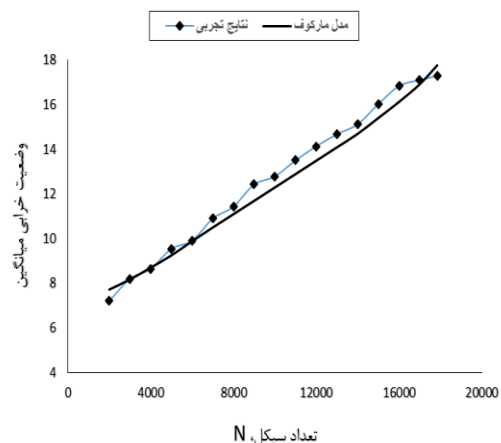
۲- با تعریف یک شاخص خرابی بر اساس تغییرات کرنش سیکلی به دست آمده از اتصالات چسبی، می‌توان در حین شرایط کاری اتصالات، ارزیابی دقیقی از کارکرد آن‌ها ارائه نمود. بنابراین تغییرات کرنش سیکلی به عنوان یک شاخص خرابی مناسب و کاربردی برای کنترل فرآیند خرابی خستگی در حین انجام کار قطعات مورد استفاده قرار گیرد.

۳- مقدار میانگین کرنش سیکلی بی‌بعد شده برای تمامی نمونه‌ها بدون توجه به سطح بار اعمال شده تقریباً ثابت است و این مقدار در حدود ۱/۱۸ برای هر یک از دسته‌های آزمایش خستگی است.

۴- تئوری زنجیره مارکوف به منظور پیش‌بینی عمر خستگی در اتصالات چسبی دولبه بر اساس مقادیر مشخصی از رشد کرنش سیکلی به کار گرفته شد و نمونه‌ها تحت سطوح بارگذاری خستگی مختلف با استفاده از شاخص رشد کرنش سیکلی مورد تحقیق و بررسی قرار گرفتند. نتایج مدل زنجیره مارکوف نشان می‌دهند که این روش پیش‌بینی می‌تواند عمر باقیمانده نمونه‌ها را بدون در نظر گرفتن تاریخچه بارگذاری آن‌ها و فقط بر اساس شرایط خرابی لحظه‌ای پیش‌بینی کند. لذا این روش را می‌توان به عنوان یک ابزار آنلاین برای کنترل خرابی خستگی سازه‌ها و تخمین عمر باقیمانده‌ی سازه‌های در حال سرویس استفاده کرد.

## ۷- مراجع

- [1] Pizzi, A., & Mittal, K. L. (2017). Handbook of adhesive technology: CRC press.
- [2] Da Silva, L. F., Öchsner, A., & Adams, R. D. (2018). Introduction to adhesive bonding technology. In Handbook of adhesion technology (pp. 1-7): Springer.
- [3] Nejad, R. M., Moghadam, D. G., Hadi, M., Zamani, P., & Berto, F. (2022). An investigation on static and fatigue life evaluation of grooved adhesively bonded T-joints. Struct, 35, 340-349.
- [4] Moslemi, H., Farhangdoost, K., & Zamani, P. (2019). Fatigue life evaluation of single and two riveted coach peel joints using strain-life criteria. AJME, 3(2), 229-234.



شکل ۲۱- مقایسه میانگین وزنی وضعیت خرابی دسته (h)

همان‌طور که مشاهده می‌شود، پیش‌بینی‌ها به خوبی در تطابق با داده‌های تجربی هستند و مدل مارکوف با پارامترهای انتخابی به درستی فرآیند خرابی خستگی در اتصالات چسبی دولبه را پیش‌بینی می‌کند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از کرنش سیکلی به عنوان شاخص خرابی مزایای زیادی را ارائه می‌کند و با توجه به این که کرنش نمونه‌ها در حین کار قابل اندازه‌گیری است، پیش‌بینی عمر سازه‌ها در حال کار امکان‌پذیر خواهد بود. مدل زنجیره مارکوف با استفاده از شرایط خرابی نمونه‌ها در سیکل‌های اولیه به خوبی می‌تواند رشد خرابی خستگی را برای یک بارگذاری با سطح تنش حداکثر ثابت انجام دهد.

## ۶- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، رفتار خرابی خستگی اتصالات چسبی دولبه تحت بارگذاری سیکلی کششی با دامنه ثابت در سه سطح نیروی مختلف به طور تجربی بررسی شد و به طور خاص، استفاده از تئوری زنجیره مارکوف برای پیش‌بینی عمر خستگی اتصالات چسبی هدف نهایی پژوهش قرار گرفت. نکات و نتایج به دست آمده از این تحقیق عبارت‌اند از:

- ۱- مقدار کرنش سیکلی میانگین تمام نمونه‌ها در مرحله اول با یک نرخ کاهشی افزایش می‌یابد و در پایان این ناحیه، تقریباً ۶٪ از کل عمر خستگی را طی کرده‌اند، در مرحله دوم با یک نرخ ثابت دنبال می‌شود و در پایان ناحیه دوم (ناحیه خطی)، تقریباً ۹۴٪ از کل عمر خستگی سپری شده است که در این

- [15] Kumazawa, H., & Kasahara, T. (2019). Analytical investigation of thermal and mechanical load effects on stress distribution in adhesive layer of double-lap metal-composite bonded joints. *Adv Compos Mater*, 28(4), 425-444.
- [16] Liu, J., Guo, T., Hebdon, M. H., & Jia, J. (2020). Investigation of Fatigue Behavior of Steel and GFRP Double-Strap Joints under Varied Cyclic Loading at Given Temperatures. *J Mater Civ Eng*, 32(4), 04020035.
- [17] Sarfaraz, R., Vassilopoulos, A. P., & Keller, T. (2011). Experimental investigation of the fatigue behavior of adhesively-bonded pultruded GFRP joints under different load ratios. *Int J Fatigue*, 33(11), 1451-1460.
- [18] Akbarzadeh, P., & Farhangdoost, K. (2016). Fatigue Life Prediction of Adhesive Joints Based on Initial Stiffness and Stiffness Degradation. *JSFM*, 6(3), 175-183.
- [19] Zamani, P., Jaamialahmadi, A., Da Silva, L. F., & Farhangdoost, K. (2019). An investigation on fatigue life evaluation and crack initiation of Al-GFRP bonded lap joints under four-point bending. *Compos Struct*, 229, 111433.
- [20] Jiang, Z., Wan, S., Fang, Z., & Song, A. (2020). Experimental investigation of fatigue behavior for adhesively-bonded GFRP/steel joints. *Eng Struct*, 213, 110580.
- [21] Sekercioglu, T., & Kovan, V. (2008). Prediction of static shear force and fatigue life of adhesive joints by artificial neural network. *METALLIC MATERIALS*, 46(1), 51.
- [22] Lyathakula, K. R., & Yuan, F.-G. (2021). Probabilistic fatigue life prediction for adhesively bonded joints via surrogate model. Paper presented at the Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2021
- [23] Tserpes, K., Barroso-Caro, A., Carraro, P. A., Beber, V. C., Floros, I., Gamon, W., . . . Skejić, D. (2021). A review on failure theories and simulation models for adhesive joints. *J Adhes*, 1-61.
- [24] ASTM, S. (2008). Standard test method for strength properties of double lap shear adhesive joints by tension loading. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- [5] Zamani, P., & Farhangdoost, K. (2020). On the Influence of riveting process parameters on fatigue life of riveted lap joint. *J Appl Comput Mech*, 6(2), 248-258.
- [6] Shenoy, V., Ashcroft, I. A., Critchlow, G. W., & Crocombe, A. (2010). Unified methodology for the prediction of the fatigue behaviour of adhesively bonded joints. *Int J Fatigue*, 32(8), 1278-1288.
- [7] Shenoy, V., Ashcroft, I. A., Critchlow, G. W., & Crocombe, A. (2010). Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue. *Eng Fract Mech*, 77(7), 1073-1090.
- [8] Quaresimin, M., & Ricotta, M. (2006). Fatigue behaviour and damage evolution of single lap bonded joints in composite material. *Compos Sci Technol*, 66(2), 176-187.
- [9] Quaresimin, M., & Ricotta, M. (2006). Stress intensity factors and strain energy release rates in single lap bonded joints in composite materials. *Compos Sci Technol*, 66(5), 647-656.
- [10] Quaresimin, M., & Ricotta, M. (2006). Life prediction of bonded joints in composite materials. *Int J Fatigue*, 28(10), 1166-1176.
- [11] Khoramshad, H., Crocombe, A., Katnam, K., & Ashcroft, I. (2010). Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. *Int J Fatigue*, 32(7), 1146-1158.
- [12] Safari, A., & Farahani, M. (2018). Comparison of the Effects of Shot Blasting and Sandblasting Processes on the Strength of the Aluminum Adhesive Bonded Joints. *AJME*, 50(5), 1015-1022.
- [13] Morfini, I., Goglio, L., Belingardi, G., & Nassar, S. A. (2019). Effect of autoclave cure time and bonded surface roughness on the static and fatigue performance of polyurethane film Adhesive Single lap joints. *Int J Adhes and Adhes*, 92, 37-43.
- [14] Zhang, Y., Vassilopoulos, A. P., & Keller, T. (2008). Stiffness degradation and fatigue life prediction of adhesively-bonded joints for fiber-reinforced polymer composites. *Int J Fatigue*, 30(10-11), 1813-1820.