

# تحلیل تجربی گسیختگی در مواد مرکب تک‌جهته پلیمری با وجود

## اتصالات مکانیکی

محمد مهدی عطار<sup>۱</sup>، احسان یاری<sup>۲</sup>، محمدحسین قائدشرف<sup>۳</sup>، وحید آئینی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

<sup>۳</sup> دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک - تبدیل انرژی، دانشگاه صنعتی مالک اشتر اصفهان

<sup>۴</sup> کارشناس ارشد مهندسی مکانیک - ساخت و تولید، دانشگاه فنی و حرفه‌ای تهران

### چکیده:

کامپوزیت‌ها (مواد چند سازه‌ای) رده‌ای از مواد پیشرفته هستند که در آن‌ها از ترکیب مواد ساده به منظور ایجاد موادی جدید با خواص مکانیکی و فیزیکی برتر استفاده شده است. اجزای تشکیل‌دهنده ویژگی خود را حفظ کرده، در یکدیگر حل نشده و با هم ممزوج نمی‌شوند. استفاده از کامپوزیت‌ها در شناورها مزایای متعددی چون کاهش وزن، بهبود خواص راداری و مغناطیسی، مقاومت در برابر خوردگی شیمیایی و خوردگی مکانیکی و خستگی، جذب ارتعاش و نویز، نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خوب در برابر شوک‌های زیر آب را دارد. جایگزین کردن اجزای فولادی با اجزای کامپوزیت می‌تواند سبب ۶۰ تا ۸۰ درصد صرفه‌جویی در وزن جزء و ۲۰ تا ۵۰ درصد صرفه‌جویی در وزن با تعویض قطعات آلومینیومی و کامپوزیتی شود. در این تحقیق، اتصالات پینی مورد استفاده در تجهیزات دریایی کامپوزیتی در چندلایه مرکب تک‌جهته از جنس الیاف شیشه و اپوکسی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. به این منظور مدلی برای مسئله در نظر گرفته شد و پارامترهای نسبت فاصله مرکز پین از لبه آزاد چندلایه به قطر پین  $(w/d)$  و نسبت عرض چندلایه به قطر پین  $(e/d)$  به عنوان متغیرهای مسئله تعریف گردید. سپس برای بدست آوردن نیروی گسیختگی و مود گسیختگی، نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حداکثر تحمل نیرو و مود گسیختگی به طور چشمگیری تحت تاثیر پارامترهای  $w/d$  و  $e/d$  بوده و با افزایش نسبت  $w/d$  حد تحمل نیرو نیز افزایش یافته و مود گسیختگی از حالت برشی به حالت لهیدگی تغییر می‌یابد و برای هر نسبت  $e/d$ ، حد بهینه‌ای برای مقدار  $w/d$  وجود دارد.

### واژه‌های کلیدی:

کامپوزیت، شناور، الیاف شیشه، اپوکسی، گسیختگی، کشش، برش، لهیدگی.

## Empirical Analysis of Fracture in Polymeric Unidirectional Composites With mechanical connections

Mohammadhusein Qaedsharaf<sup>1</sup>, Mohammadmahdi Attar<sup>2</sup>, Ehsan Yari<sup>3</sup>, Vahid Aeeni<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. student of mechanical engineering, University of Technology Malik Ashtar, Isfahan

<sup>2</sup> Department of Mechanical Engineering, Islamic Azad University, Hamedan Branch

<sup>3</sup> Assistant Professor, Department of Mechanical Engineering, Malik Ashtar University of Technology, Isfahan

<sup>4</sup> Instructor of Males' No. 1 Technical and Vocational University (Shahid Mofatteh Hamedan)

### Abstract

Composites are a class of advanced materials in which simple material combinations are used to create new materials with superior mechanical and physical properties. The use of composites in vessels has several advantages such as weight loss, improvement of radar and magnetic properties, resistance to chemical corrosion and mechanical corrosion and fatigue, vibration absorption and noise, high strength-to-weight ratio, good resistance to underwater shocks. Replacing steel components with composite components can save 60 to 80 percent on component weight and 20 to 50 percent weight

savings by replacing aluminum and composite components. In this study, the pin joints used in marine composite equipment were investigated in multilayer monodirectional composite made of glass and epoxy fibers. For this purpose, a model was considered for the problem and the parameters of the center of the pin from the free edge of the multilayer to the pin diameter ( $w/d$ ) and the ratio of multilayer width to pin diameter ( $e/d$ ) were defined as the variables of the problem. Then, to obtain the rupture force and rupture mode, the samples were subjected to tensile loading. The results showed that the maximum force tolerance and rupture mode were significantly affected by  $w/d$  and  $e/d$  parameters and with increasing the  $w/d$  ratio, the force tolerant increased and the mode of the rupture changed from shear to the mode of shear to the crush mode, and for each  $e/d$  ratio, there is an optimal limit for  $w/d$ .

**Keywords:** Composite, floating, glass fiber, epoxy, rupture, stretching, cutting, crush.

#### ۱- مقدمه

استفاده از مواد مرکب در طول تاریخ نیز مرسوم بوده است. از اولین کامپوزیت‌ها یا همان چندسازه‌های ساخت بشر می‌توان به کاه گل و آجرهای گلی که در ساخت آن‌ها از تقویت‌کننده استفاده می‌شده است اشاره کرد. هنگامی که این دو با هم مخلوط بشوند در نهایت آجر پخته به دست می‌آید که بسیار ماندگارتر و مقاوم‌تر از هر دو ماده اولیه یعنی گل و کاه است. در یک کامپوزیت به طور کلی الیاف، عضو بارپذیر اصلی سازه هستند در حالی که ماتریس آن‌ها را در محل و آرایش مطلوب نگاه داشته و به عنوان یک محیط منتقل کننده بار بین الیاف عمل می‌کند؛ به علاوه آن‌ها را از صدمات محیطی در اثر بالا رفتن دما و رطوبت حفظ می‌کند؛ اما کامپوزیت‌هایی نیز در طبیعت یافت می‌شود که بارزترین آن‌ها استخوان، چوب و صدف است. در استخوان فیبرهای هیدروکسی آپاتایت با کلاژن به هم می‌چسبند. مواد کامپوزیت برای حل مشکلات تکنولوژیکی که برای زمان طولانی وجود داشت بوجود آمدند؛ اما تنها در سال ۱۹۶۰ این مواد شروع به جلب توجه صنایع بزرگ کردند. با ورود کامپوزیت‌های پلیمری در صنعت از آن زمان به بعد، مواد کامپوزیتی، به مواد رایج مهندسی تبدیل شده‌اند و برای کاربردهای مختلف از جمله خودرو، طراحی و تولید قطعات، لوازم ورزشی، قطعات و هوافضا، کالاهای مصرفی، دریایی و صنایع نفت بکار برده شدند. اولین بار از مواد کامپوزیتی در ساخت قایق‌های گشت‌زنی کوچک و لندینگ کرافت‌ها استفاده شد. با توجه به کیفیت کم مواد و استحکام کم آن‌ها منحصراً شناورهای نظامی با طول کمتر از ۱۵ متر و جابه‌جایی ۲۰ تن ساخته شد.

درسالهای اخیر با توجه به بهبود طراحی، ساخت و مشخصات مکانیکی کامپوزیت‌ها، شناورهای بزرگ گشت‌زنی، هاورکرافت، مین‌یاب و رزم‌ناوها نیز ساخته شده‌اند. مطالعات نشان می‌دهد که وزن قایق‌های گشت‌زنی ساخته شده از مواد کامپوزیتی فشرده GRP در حدود ۱۰ درصد نسبت به شناورهای آلومینیومی و حدود ۳۶ درصد نسبت به شناورهای فولادی هم‌اندازه کمتر است. استفاده از آخرین تکنولوژی‌های ساخت از قبیل روش فرایند تزریق کامپوزیت Seeman یا استفاده از الیاف کربن می‌تواند وزن را بیش از این هم کاهش دهد. با کاهش وزن بدنه انتظار می‌رود که ظرفیت حمل بار نظامی افزایش یافته، محدوده عملیاتی گسترش پیدا نموده و مصرف سوخت کاهش یابد. هزینه‌های عملیاتی شناورهای کامپوزیتی در مقابل شناورهای فولادی کمتر است؛ زیرا خوردگی وجود نداشته و مصرف سوخت کمتر است. هزینه چرخه عمر شناور کامپوزیتی در حدود ۷ درصد کمتر از شناور فولادی است. مزیت‌های بکارگیری کامپوزیت در شناورها عبارتند از: الف. وزن کمی دارند؛ در نتیجه باعث افزایش پایداری، محدوده عملیات و باربری و کاهش مصرف سوخت می‌شوند.

ب. به تعمیر و نگهداری کمتری نیاز دارند.

پ. مشخصات گرمایی، راداری و مغناطیسی کمی دارند

ت. در مقابل خوردگی شیمیایی و خوردگی مکانیکی مقاوم هستند.

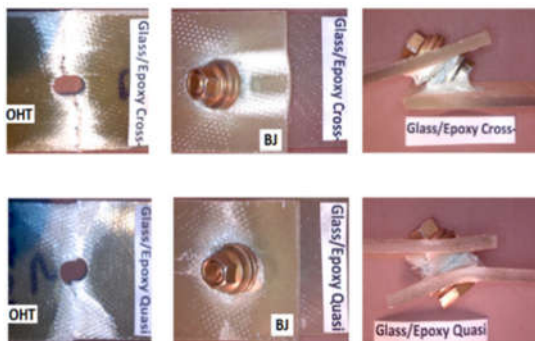
ث. در مقابل خستگی مقاوم هستند.

ج. جاذب ارتعاش و نویز هستند.

چ. نسبت استحکام به وزن بالایی دارند.

تاو و همکاران [۲] در سال ۲۰۱۶ یک مدل تحلیلی ارائه کردند که می‌توان با آن تنش در حوالی پین در ماده مرکب را به دست آورد. آن‌ها همچنین اثر جنس لایه‌ها بر میزان تمرکز تنش و توزیع تنش در نزدیکی پین را با این مدل بررسی کردند و دریافتند تغییر جنس لایه‌ها بر توزیع تنش تأثیر بسیاری زیادی دارد؛ بخصوص در توزیع تنش حلقه‌ای. آن‌ها برای مدل تحلیلی خود از یک سیستم جرم-فنر بعنوان مدل استفاده کردند و نتایج را با یک مدل اجزاء محدود مقایسه نمودند.

گمدانی و همکاران [۳] سال ۲۰۱۵ مقاومت کششی سه نوع مختلف ماده، کربن-اپوکسی، شیشه-اپوکسی و آلومینیوم سری ۶۰۰۰ را در حضور پین، اتصال یک طرفه و سوراخ بررسی کردند. آن‌ها دریافتند مقاومت کششی تابعی از خواص ماده است و نشان داده شد تحمل بار آلومینیوم در حضور دو عدد اتصال یک طرفه بیشترین مقدار خود را دارد؛ درحالی که در ماده مرکب کربن-اپوکسی بیشترین مقاومت در حضور چهار اتصال حاصل می‌شود که این نشان از وابستگی این موضوع به رفتار ماده است. آن‌ها همچنین نشان دادند که نمونه‌هایی که باریک‌تر هستند تعداد کمتری اتصال نیاز دارند تا به بیشترین سطح مقاومت کششی برسند. همچنین نشان داده شد در مواد مرکب اتصال پیچی یک طرفه از اتصال پینی عملکرد بهتری دارد. آن‌ها پی بردند اتصال پیچی یکطرفه از تورق جلوگیری می‌کند در حالی که اتصال پینی خود عامل تورق است.



شکل ۲: مودهای گسیختگی نمونه گلاس-اپوکسی گمدانی و همکاران

وانگ و همکاران [۴] سال ۲۰۱۵ در تحقیق خود برای بررسی اشاعه ترک‌های خستگی در مواد لایه‌ای مرکب الیاف، فلز، پلیمر از داده‌های تجربی و مدل سازی ورق‌ها با ایجاد شیار اولیه استفاده کرده‌اند و رشد ترک‌ها را در لایه‌ها مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

ح. نصب کامپوزیت‌ها طی یک فرایند سرد انجام می‌گیرد؛ بنابراین تنش‌ها در یک ناحیه کوچک متمرکز نمی‌شود.

خ. با تغییر ترکیبات و الیاف‌های بکاررفته در کامپوزیت، می‌توان به استحکام موردنیاز رسید.

د. مقاومت خوب در برابر شوک‌های زیرآبی

ذ. آغاز کاویتاسیون در سرعت‌های بالاتر برای پروانه‌های کامپوزیتی

معایب بکارگیری کامپوزیت در شناورها عبارت‌اند از: الف. در برابر گرما مقاومت کمی دارند.

ب. هزینه اتصال مواد کامپوزیتی به فولاد و آلومینیوم بسیار زیاد است.

پ. تغییر شکل زیادی دارد. افزایش تغییر شکل بدنه باعث ایجاد مسائلی از قبیل ترک خوردگی خستگی در طول اتصالات و ایجاد عدم تطابق شفت-پروانه می‌گردد.

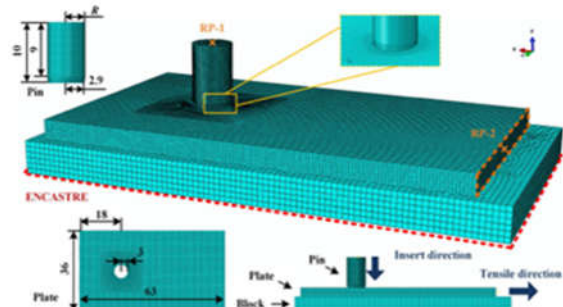
ت. الیاف‌های کربنی به‌کاررفته در کامپوزیت‌ها (جهت افزایش استحکام) قیمت بسیار بالایی دارند.

ث. کاهش مشخصات هیدرودینامیکی بعضی از پروانه‌های کامپوزیتی.

ج. افزایش تنش‌های خمشی و برشی در پروانه‌های کامپوزیتی.

## ۲- مروری بر ادبیات و پیشینه تحقیقات انجام‌شده

عطار و همکاران [۱] در سال ۲۰۱۶ یک مدل تحلیلی به منظور به دست آوردن مودها و بارهای گسیختگی در چندلایه‌های کامپوزیتی ارائه کردند. آن‌ها به منظور اعتبارسنجی مدل تحلیلی یک سری آزمایش طراحی کردند و نتایج حاصل نشان داد که مدل تحلیلی معتبر بوده و قابل اعتماد است.

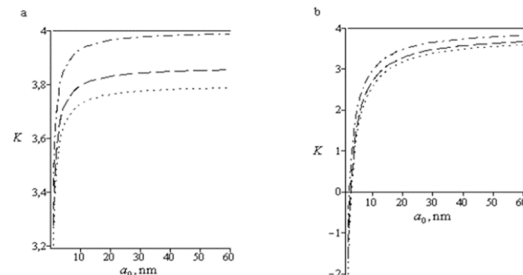


شکل ۱: مدل اجزاء محدود تاو و همکاران

مور و همکاران [۵] سال ۲۰۱۵ در بارگذاری صفحه‌ای نحوه مقاومت و تغییر خواص را در ماده کامپوزیتی لایه‌ای مورد ارزیابی قرار داده‌اند و برای ارزیابی از حالت‌های ورق‌های با سوراخ و بدون سوراخ استفاده کرده و تمرکز تغییرات خواص را در هر یک از لایه‌های ماده مرکب مورد بررسی و ارزیابی تجربی و تحلیلی قرار داده‌اند.

موهوتو و همکاران [۶] سال ۲۰۱۴ ورق‌های آلومینیومی کامپوزیت شده با لایه‌های پلی اورتان را مورد ارزیابی قرار داده و در تحقیق خود برخورد یک جسم با ماده مرکب را با سرعت تا ۱۵ متر بر ثانیه به ورق‌های مرکبی با ضخامت تا ۱۲ میلی‌متر را بررسی کرده‌اند تا تأثیر میزان جذب انرژی در این ماده مرکب و نحوه تغییر شکل و پارگی آن را با ورق‌های معمولی آلومینیوم مورد بررسی قرار دهند.

گروکوف و همکاران [۷] سال ۲۰۱۴ تأثیر تنش سطح بر مقاومت کششی ورق مرکب در حضور سوراخ دایره‌ای و مثلی در مقیاس نانو را بررسی کردند. آن‌ها برای محاسبه تنش سطح از مدل گارتین-موردوخ استفاده نمودند و در نهایت تأثیر ابعاد این نانو سوراخ‌ها و تنش سطح را بر میزان تمرکز تنش مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها نشان دادند که تنش سطح زمانی که ابعاد سوراخ بین ۱ تا ۱۰ نانومتر است مهم‌ترین پارامتر است.



شکل ۳: نمودارهای ضریب تمرکز تنش بر حسب شعاع نانو دایره گروکوف و همکاران

وینایاک و همکاران [۸] سال ۲۰۱۴ میزان مقاومت خستگی ماده لایه‌ای مرکب را با بارگذاری صفحه‌ای در ماده‌ای مرکب با وجود سوراخی دایره‌ای شکل مورد ارزیابی قرار داده‌اند و میزان سیکل‌های مورد تحمل ماده و نیز محل‌های ایجاد عیوب و ترک‌ها را مورد بررسی قرار داده‌اند.

فدیل و همکاران [۹] سال ۲۰۱۳ اثر سه نوع دمایی آب گرم بر مقاومت کششی ماده مرکب دارای ۲ پین سری را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند با افزایش دما مقاومت کششی ماده کاهش یافته و همچنین زمان غوطه‌وری را پارامتری

تأثیرگذار معرفی کردند. آن‌ها دریافتند زمان غوطه‌وری باعث کاهش ماکزیمم نیروی تحملی توسط چندلایه مرکب می‌شود. درویش و همکاران [۱۰] سال ۲۰۱۲ با استفاده از یک مدل اجزاء محدود ضریب تمرکز تنش را برای یک چندلایه مرکب در حضور یک سوراخ پخ‌دار بدست آوردند. آن‌ها تأثیر ضخامت، زاویه پخ، عمق پخ و زاویه الیاف هر لایه بر ضریب تمرکز تنش را بررسی کردند. در نهایت آن‌ها پی بردند مهم‌ترین پارامتر تأثیرگذار بر ضریب تمرکز تنش زاویه پخ است که این پارامتر در زوایای ۵۰ تا ۶۰ درجه تأثیر چشمگیری بر ضریب تمرکز تنش دارد.

گوربت اورسن و همکاران [۱۱] سال ۲۰۱۲ اثر آب دریا بر مقاومت لهیدگی، بارهای گسیختگی و مودهای گسیختگی را بررسی کردند. آن‌ها پس از غوطه‌ورسازی نمونه‌هایشان در آب شور به مدت ۳ تا ۶ ماه، آن‌ها را تحت تست کشش ساده قرار دادند و بارهای گسیختگی را برای هر نمونه بدست آوردند. آن‌ها دریافتند که با غوطه‌ورسازی نمونه‌ها در آب دریا مودهای گسیختگی به مود لهیدگی تبدیل می‌شود و همچنین بار تحملی توسط نمونه‌ها افت پیدا می‌کند. کامانهو و لمبرت [۱۲] سال ۲۰۱۱ با استفاده از یک روش نیمه‌تحلیلی و عددی به بررسی توزیع تنش در مواد مرکب تحت تأثیر پین پرداختند. در این تحقیق با استخراج معادله دیفرانسیل بی هارمونیک و حل معادلات مزبور با استفاده از توابع مختلط، توزیع تنش در اطراف پین را مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق جهت بیان اثر پین از یک توزیع فشار سینوسی، استفاده شده است. در این تحقیق با توجه به معیار گسیختگی ارائه شده، مودهای مختلف گسیختگی بررسی شده است.

نظری و دیده‌ور [۱۳] در سال ۲۰۱۱ در تحقیق خود تأثیر افزایش لایه‌های آلومینیوم و اپوکسی و نیز تغییر نوع رزین را برای بررسی مقاومت ماده مرکب مورد ارزیابی قرار داده و با انجام تست‌های ضربه (شارپی) در ورق‌ها با وجود شیار و بدون وجود شیار مقاومت و قابلیت جذب انرژی ورق‌ها قبل از پارگی را مورد ارزیابی قرار داده‌اند.

### ۳- مواد و آزمایش‌های تجربی

در این پژوهش از پارچه الیاف‌های شیشه به منظور ساخت نمونه‌های آزمایش استفاده شده است. الیاف شیشه E-glass تک‌جهته (UE) در بستر رزین ترموست اپوکسی EPL 1012، با سخت‌کننده EPH 112 قرار گرفت. پس

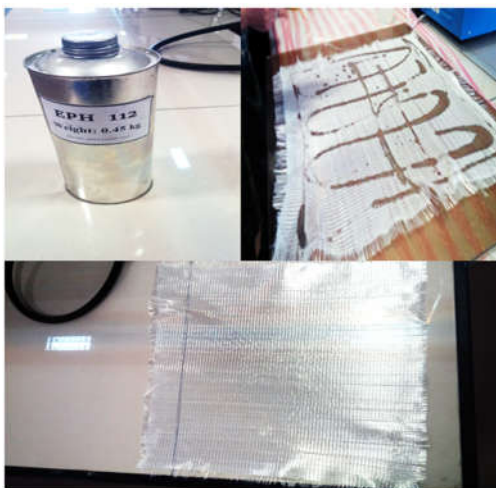
در جدول ۵ می‌توان زمان لازم را برای اجرای فرآیندهای پخت<sup>۴</sup> و پس‌پخت<sup>۵</sup> در دماهای مختلف مشاهده نمود.

#### جدول ۵- فرآیندهای پخت و پس‌پخت مختلف

زمان پخت	زمان پس‌پخت
۸ تا ۱۶ ساعت در ۲۵C°	۷ روز در ۲۵C°
۴ تا ۸ ساعت در ۴۰C°	۱۵ ساعت در ۵۰C°
۱ تا ۲ ساعت در ۶۰C°	۲ تا ۱۰ ساعت در ۸۰C°

#### ۳-۱- فرآیند ساخت چند لایه مرکب

به منظور ساخت نمونه‌ها، ابتدا سه لایه از پارچه الیاف شیشه به ابعاد ۵۰\*۵۰ سانتی‌متر بریده شد. سپس وزن رزین اپوکسی با توجه به اطلاعات سازنده ابتدا با ترازو اندازه‌گیری شدند سپس سخت‌کننده مربوط با توجه به درصد وزنی به رزین اضافه شدند. در قدم بعدی یک سطح صاف و صیقلی (شیشه) به عنوان قالب به واکسی مخصوص برای جلوگیری از چسبیدن چند لایه به سطح قالب آماده شد و سپس رزین با کمک قلم‌مو به سطح آن اضافه شد؛ در ادامه لایه‌های پارچه الیاف یکی پس از دیگری بصورت دستی روی هم گذاشته شدند. به منظور از بین بردن هرگونه حباب و ناپیوستگی از غلتکی مخصوص استفاده گردید. سپس با توجه به اطلاعات سازنده رزین به مدت ۱ هفته در دمای ۲۵ درجه به پخت کامل رسید. در این ۱ هفته به رزین اجازه داده می‌شود که به بالاترین استحکام خود دست یابد.



شکل ۴: هاردنر، پارچه الیاف شیشه و الیاف آغشته شده به رزین اپوکسی

از اندازه‌گیری برخی خواص، نتایج در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

#### جدول ۱- برخی خواص الیاف مورد استفاده در آزمایش‌ها

ماده	چگالی (تولید کننده) (g/cm <sup>3</sup> )	چگالی سطحی <sup>۱</sup> (اندازه‌گیری) (g/cm <sup>2</sup> )	چگالی سطحی (تولید کننده) (g/cm <sup>2</sup> )
E	۲/۵۷	۵۰۰	۴۰۰

در جدول ۲ نحوه ترکیب رزین و سخت‌کننده به دو شیوه بیان شده است. کار ترکیب رزین و سخت‌کننده، به دو شیوه وزنی و حجمی صورت می‌گیرد که بر حسب شرایط از هر یک از آن‌ها می‌توان استفاده کرد.

#### جدول ۲- نسبت اختلاط رزین و سخت‌کننده

اجزاء	نسبت وزنی	نسبت حجمی
EPL 1012	۸۸	۸۵
EPH 112	۱۲	۱۵

اگر حجم زیادی از رزین و سخت‌کننده با هم مخلوط شوند، در اثر گرمای واکنش، عمر مفید سیستم، کم خواهد شد. در جدول ۳ عمر مفید سیستم<sup>۲</sup> در دماهای مختلف آمده است.

#### جدول ۳- عمر مفید سیستم در دماهای مختلف

دما (°C)	زمان (دقیقه)
۱۸	۲۸۰-۳۲۰
۲۵	۲۲۰-۲۶۰
۴۰	۴۵-۵۵

زمان ژل شدن<sup>۳</sup> نیز تابعی از دما است. در جدول ۴ این تغییرات به نمایش گذارده شده است.

#### جدول ۴- زمان ژل شدن در دماهای مختلف

دما (°C)	زمان (دقیقه)
۲۵	۴۲۰-۵۰۰
۴۰	۱۵۰-۱۷۰
۶۰	۴۰-۵۵
۸۰	۱۴-۱۷
۱۰۰	۴-۶

<sup>۴</sup>Cure

<sup>۵</sup>Post cure

<sup>۱</sup>Areal density

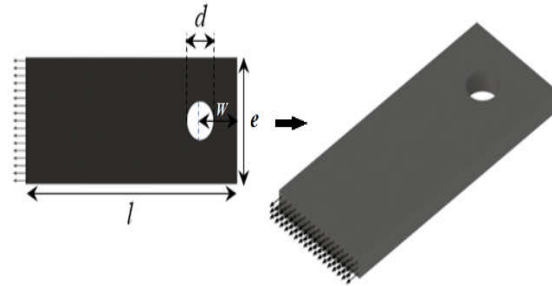
<sup>۲</sup>Pot life

<sup>۳</sup>Gel time



### ۳-۲- مدل منظور شده

شکل ۵ پارامترهای هندسی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.  $L$  نشان‌دهنده طول نمونه،  $d$  نشان‌دهنده قطر سوراخ،  $e$  نشان‌دهنده عرض ورق و  $w$  فاصله مرکز سوراخ تا لبه آزاد ورق می‌باشد. تمامی نمونه‌ها دارای طول ثابت ۸۰ میلی‌متر و عرض‌های متغیر می‌باشند. نسبت‌های  $w/d$  و  $e/d$  برای ساخت نمونه‌ها در نظر گرفته شدند.



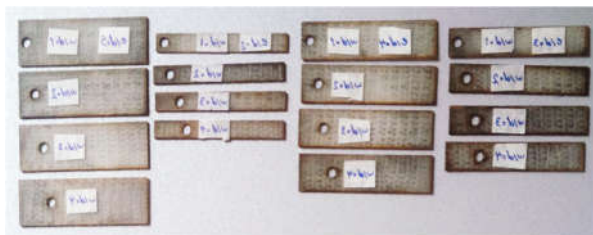
شکل ۵: پارامترهای هندسی نمونه‌های آزمایش

### ۳-۳- ساخت نمونه‌ها

بعد از کامل شدن پخت چندلایه پس از مدت زمان ۱ هفته، نمونه‌های آزمایش با ابعاد مورد نظر با استفاده از دستگاه برش لیزری CNC بریده شدند. شکل ۶ فرآیند برشکاری نمونه‌ها را با استفاده از دستگاه CNC نشان می‌دهد. در نهایت نمونه‌های آماده شده در شکل ۷ قابل مشاهده‌اند.



شکل ۶: ماشین برش لیزری CNC در حال کار



شکل ۷: نمونه‌های ساخته شده

### ۳-۴- آزمایش‌های کشش استاندارد

دستگاهی که برای تست کشش نمونه‌ها استفاده شد دستگاه کشش یونیورسال STM با ظرفیت ۶۰ تن می‌باشد (شکل ۸). دستگاه‌های تست مواد سری STM برای تست آسان و دقیق مواد با هزینه کم طراحی شده‌اند.



شکل ۸: دستگاه تست یونیورسال

### ۳-۵- تست کشش استاندارد

با استفاده از استاندارد ASTM D-3039-D3093M جهت بدست آوردن خواص مکانیکی ماده، تست کشش ساده صورت گرفت. نمودار نیرو-جابجایی نمونه استاندارد با استفاده از نرم افزار دستگاه STM استخراج گردید و سپس به کمک روابط (۱) و (۲) به منحنی تنش-کرنش تبدیل شد. به منظور افزایش دقت آزمایش، تست کشش ساده، ۳ بار تکرار گردید و با توجه به نتایج مشخص شد که آزمایش‌ها از دقت خوبی برخوردارند.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

### ۳-۶- آماده سازی نمونه‌ها برای تست کشش

برای انجام تست کشش همانطور که در شکل ۹ نیز قابل مشاهده است؛ نمونه‌ها در جهت طولی به دو فک محکم بسته می‌شوند. سپس با استفاده از نرم‌افزار تعریف شده برای دستگاه، عملیات تست کشش اجرا شده و داده‌ها بصورت میزان نیرو و جابجایی ثبت می‌گردند. مقدار نرخ کرنش، ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه تعریف گردید.

### ۷-۳- شرایط مرزی و نحوه بارگذاری

شرایط مرزی به این صورت است که با توجه به اینکه نمونه‌ها در فک‌های دستگاه قرار می‌گیرند جابجایی در دو انتهای نمونه‌ها در دو راستای Y و Z بصورت قیدهای جابجایی صفر تعریف می‌شوند. بارگذاری کششی با دو نرخ کرنش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه (شبه استاتیکی) و ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه (دینامیکی) به پین‌ها اعمال می‌گردد. سپس نتایج بصورت نمودارهای نیرو و جابجایی استخراج می‌شود. این جابجایی سبب ایجاد تنش کششی در نمونه و در نتیجه تمرکز تنش در اطراف سوراخ می‌گردد.



شکل ۹: نمونه تحت کشش

### ۴- تجزیه و تحلیل داده‌ها

#### ۴-۱- تعریف پارامترهای متغیر و مقادیر مطلوب

مسئله

پارامترهای متغیر عبارتند از:

(الف) نسبت فاصله مرکز پین از لبه آزاد نمونه به قطر پین:

$$\varphi = \frac{e}{d} \quad (3)$$

(ب) نسبت عرض چندلایه به قطر پین:

$$\psi = \frac{w}{d} \quad (4)$$

مقادیر مطلوب مسئله نیز عبارتند از:

(الف) حداکثر مقدار بار تحمل شده توسط نمونه ( $P_{max}$ )

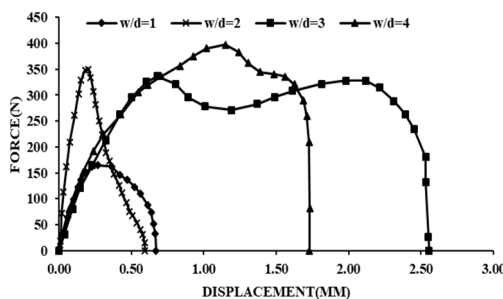
(ب) مقدار جابجایی ( $\Delta L$ )

#### ۴-۲- بررسی نتایج

در شکل ۱۰ نمودار تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای  $e/d=2$  و نرخ کرنش ۱۰ mm/min نشان داده شده است. محور عمودی مقدار تغییرات نیرو و

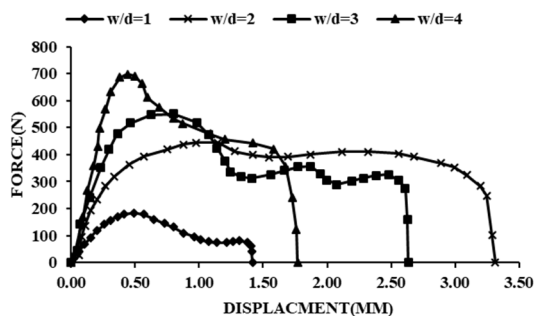
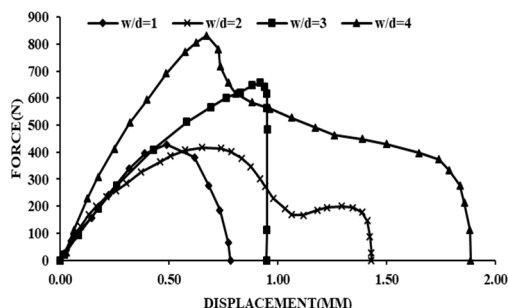
محور افقی مقدار جابجایی پین از حالت اولیه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش پارامتر w/d، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد و مود شکست برای مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب به صورت (۱) برشی، (۲) برشی و لهیدگی، (۳) لهیدگی و نت-تنشن، و (۴) لهیدگی بود. دلیل این امر را می‌توان اینطور استنباط کرد که با افزایش فاصله پین نسبت به لبه آزاد مود شکست از حالت برشی به حالت لهیدگی تغییر یافته که در حالت لهیدگی ماده مرکب تک‌جهته تنش بیشتری را تحمل می‌کند. به بیان دیگر مقدار حد تحمل نیرو برای نسبت‌های w/d برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۱۵۰، ۳۳۶، ۳۵۰ و ۳۹۶ کیلونیوتن بود. همچنین مقدار جابجایی در پیک نیرو برای نمونه با نسبت  $w/d=4$  از بقیه نمونه‌ها بیشتر بود که دلیل آن را می‌توان همان تغییر به مود لهیدگی و طبعاً افزایش تحمل نیرو دانست.

میزان افزایش تحمل بار از نسبت  $w/d=1$  به  $w/d=2$  به مقدار ۲/۳۳ برابر، از نسبت  $w/d=2$  به  $w/d=3$  به مقدار ۱/۰۴ برابر، از نسبت  $w/d=3$  به  $w/d=4$  به مقدار ۱/۱۳ برابر بود.



شکل ۱۰: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف w/d به ازای  $e/d=2$  و نرخ کرنش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه

برای نسبت  $e/d=3$  و نسبت‌های مختلف w/d نیز با افزایش پارامتر w/d حد تحمل نیرو زیاد می‌شود (شکل ۱۱). مقدار حداکثر بار برای w/d های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب برابر با ۱۸۳، ۴۴۴، ۵۳۴ و ۶۹۸ نیوتن بود. مود شکست برای مقادیر w/d های ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب به صورت برشی، برشی و لهیدگی، لهیدگی و لهیدگی مشاهده شد.



شکل ۱۱: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=3$  و نرخ کرنش  $10$  میلی‌متر بر دقیقه

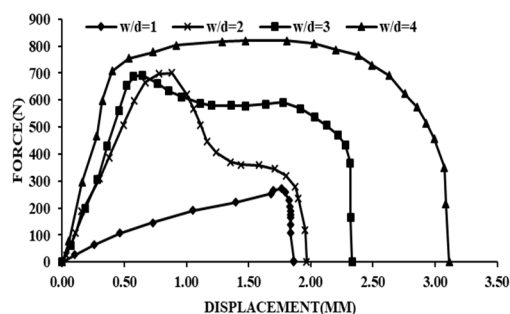
شکل ۱۲: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=5$  و نرخ کرنش  $10$  میلی‌متر بر دقیقه

در ادامه برای بررسی اثر سرعت کرنش بر حد تحمل بار، نمونه‌های مشابه در نرخ کرنش  $75$  میلی‌متر بر دقیقه مورد آزمون قرار گرفتند. شکل ۱۴ تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=2$  و نرخ کرنش  $75$  میلی‌متر بر دقیقه نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌گردد با افزایش پارامتر  $w/d$ ، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد و مود شکست برای مقادیر  $w/d$  برابر با  $1$ ،  $2$ ،  $3$  و  $4$  به ترتیب به صورت (۱) برشی، (۲) برشی و نت-تنشن، (۳) لهیدگی (۴) لهیدگی و نت-تنشن بود.

نظیر آنچه در قبل گفته شد دلیل این امر را نیز مانند آنچه قبلاً نیز گفته شد، می‌توان اینطور استنباط کرد که با افزایش فاصله بین نسبت به لبه آزاد مود شکست از حالت برشی به حالت لهیدگی تغییر یافته که در حالت لهیدگی ماده مرکب تک‌جهته تنش بیشتری را تحمل می‌کند. به بیان دیگر مقدار حد تحمل نیرو برای نسبت‌های  $w/d$  برابر با  $1$ ،  $2$ ،  $3$  و  $4$  به ترتیب برابر با  $164$ ،  $244$ ،  $223$  و  $630$  نیوتن بود. همچنین مقدار جابجایی در پیک نیرو برای نمونه با نسبت  $w/d=4$  از بقیه نمونه‌ها بیشتر بود که دلیل آن را می‌توان همان تغییر به مود لهیدگی و طبعاً افزایش تحمل نیرو دانست.

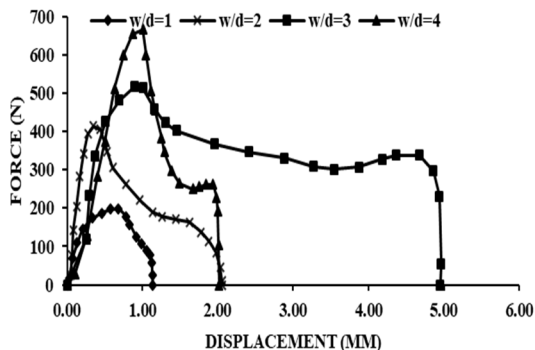
میزان افزایش تحمل بار از نسبت  $w/d=1$  به  $w/d=2$  به مقدار  $1/49$  برابر، از نسبت  $w/d=2$  به  $w/d=3$  به مقدار  $2/55$  برابر، از نسبت  $w/d=3$  به  $w/d=4$  به مقدار  $1/01$  برابر بود.

برای  $e/d$  های  $4$  و  $5$  هم روندی مشابه  $e/d=2$  مشاهده گردید (شکل‌های ۱۲ و ۱۳). مقادیر حداکثر بار برای  $w/d$  های  $1$ ،  $2$ ،  $3$  و  $4$  به ازای  $e/d=4$  به ترتیب برابر با  $270/9$ ،  $700$ ،  $692$  و  $819$  نیوتن و به ازای  $e/d=5$  با  $417$ ،  $656$  و  $831$  نیوتن بود. میزان افزایش تحمل بار به ازای  $e/d=4$  از نسبت  $w/d=1$  به  $w/d=2$  به مقدار  $2/5$  برابر، از نسبت  $w/d=2$  به  $w/d=3$  به مقدار  $0/98$  برابر، از نسبت  $w/d=3$  به  $w/d=4$  به مقدار  $1/13$  برابر و میزان افزایش تحمل بار به ازای  $e/d=5$  از نسبت  $w/d=1$  به  $w/d=2$  به مقدار  $1/2$  برابر، از نسبت  $w/d=2$  به  $w/d=3$  به مقدار  $1/26$  برابر بود.

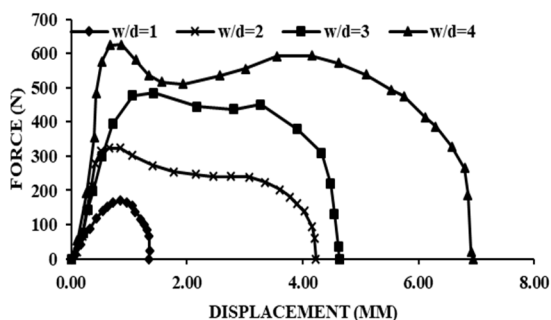


شکل ۱۳: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=4$  و نرخ کرنش  $10$  میلی‌متر بر دقیقه

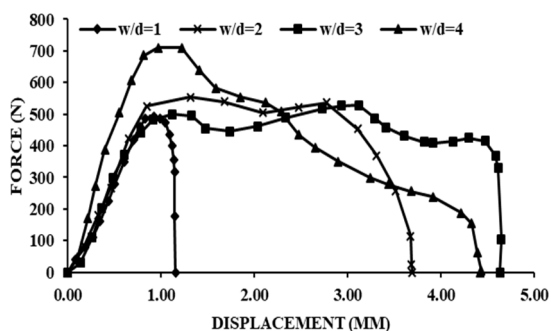




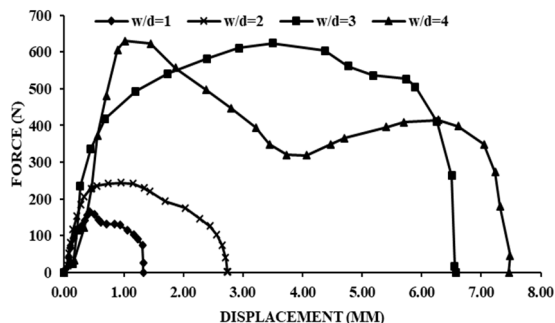
شکل ۱۵: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=3$  و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۶: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=4$  و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه



شکل ۱۷: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=5$  و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه  
برای بهتر مقایسه کردن نتایج مقدار حد تحمل نیرو به ازای مقادیر مختلف پارامترهای  $w/d$  و  $e/d$  جدول ۶ تهیه گردید. در این جدول، مقدار حداکثر تحمل بار در نمونه‌ها با پارامترهای هندسی مختلف بیان گردیده است.



شکل ۱۴: تغییرات نیرو-جابجایی با نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=2$  و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه

برای نسبت‌های  $e/d=2, 3, 4, 5$  به ازای مقادیر مختلف  $w/d$  نیز تغییرات نیرو و جابجایی در شکل‌های ۱۵ الی ۱۷ نشان داده است. همانطور که مشاهده می‌گردد به ترتیب برای: (الف) نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=3$  و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر، با افزایش پارامتر  $w/d$ ، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد. برای مقادیر ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مود شکست به صورت (۱) برشی، (۲) برشی، (۳) لهیدگی و (۴) لهیدگی و مقدار حداکثر بار برابر با ۵۱۶، ۴۱۳، ۱۹۸ و ۶۶۶ نیوتن بود.

(ب) نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=4$  و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر، با افزایش پارامتر  $w/d$ ، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد. برای مقادیر  $w/d$  برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مود شکست به صورت (۱) برشی، (۲) برشی، (۳) لهیدگی و (۴) لهیدگی و مقدار حداکثر بار برابر با ۱۷۰، ۳۲۴، ۴۸۴ و ۶۲۶ نیوتن بود.

(ج) نسبت‌های مختلف  $w/d$  به ازای  $e/d=5$  و نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر، با افزایش پارامتر  $w/d$ ، حد تحمل نیرو نیز افزایش می‌یابد. برای مقادیر  $w/d$  برابر با ۱، ۲، ۳ و ۴ به ترتیب مود شکست به صورت (۱) برشی، (۲) برشی، (۳) لهیدگی و (۴) لهیدگی و مقدار حداکثر بار برابر با ۵۰۰، ۵۵۳، ۵۲۸ و ۷۱۰ نیوتن بود.

جدول ۶: حد تحمل نیرو و مود گسیختگی برای نمونه‌ها با نسبت‌های مختلف  $w/d$  و  $e/d$

	$e/d$	Strain rate of ۱۰ mm/min		Strain rate of ۷۵ mm/min	
		Failure load (N)	Failure modes	Failure load (N)	Failure modes
$w/d=1$	۲	۱۵۰	S	۱۶۴	S
	۳	۱۸۳	S	۱۹۸	S
	۴	۲۷۰٫۹	S	۱۷۰	S
	۵	۵۱۲	S	۵۰۰	S
$w/d=2$	۲	۳۳۶	B/S	۲۴۴	S/N
	۳	۴۴۴	B/S	۴۱۳	S
	۴	۷۰۰	B/S	۳۲۴	S
	۵	۸۱۹	B	۵۵۳	S
$w/d=3$	۲	۳۵۰	B/N	۶۲۳	B/N
	۳	۵۳۴	B	۵۱۶	B
	۴	۶۹۲	B	۴۸۴	B
	۵	۶۵۶	B	۵۲۸	B
$w/d=4$	۲	۳۹۶	B	۶۳۰	B/N
	۳	۶۹۸	B	۶۶۶	B
	۴	۸۱۹	B	۶۲۶	B
	۵	۸۳۱	B	۷۱۰	B

همانطور که در جدول ۶ ملاحظه می‌گردد بیشترین حد تحمل نیرو در نرخ کرنش ۱۰ میلی‌متر بر دقیقه مربوط به نمونه‌ای با مقادیر  $w/d=4$  و  $e/d=5$  و برای نرخ کرنش ۷۵ میلی‌متر بر دقیقه نیز مربوط به نمونه‌ای با مقادیر  $w/d=4$  و  $e/d=5$  می‌باشد. در نسبت‌های  $e/d$  کمتر به دلیل سطح تنش برشی کمتر در سمت پشت پین، مود گسیختگی در حالت برشی قرار می‌گیرد و در نتیجه همانطور که در جدول نیز مشاهده می‌شود حد تحمل نیرو برای آن‌ها نسبت به دیگر نمونه‌ها با نسبت‌های بالاتر، پایین می‌باشد. در نسبت‌های  $e/d$  بالاتر، اگرچه سطح تنش برشی در پشت پین افزایش یافته و تحمل بار برشی بیشتری را دارد اما ممکن است تنش در این ناحیه از مقاومت لهدیگی ماده بیشتر شده و ماده مرکب در پشت پین دچار پدیده لهدیگی گردد. با توجه به اینکه این پدیده سبب فشردگی ماده و جمع‌شوندگی آن می‌شود؛ کاهش تحمل بار در نمونه‌ها به کندی صورت می‌گیرد.

#### ۷- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق، اتصالات پینی در چندلایه مرکب تک‌جهته از جنس الیاف شیشه و اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. به این منظور مدلی برای مسئله در نظر گرفته شد و پارامترهای نسبت فاصله مرکز پین از لبه آزاد چندلایه به قطر پین ( $w/d$ ) و نسبت عرض چندلایه به قطر پین ( $e/d$ ) به عنوان متغیرهای مسئله تعریف گردید. سپس برای بدست آوردن نیروی گسیختگی و مود گسیختگی، نمونه‌ها تحت بارگذاری کششی قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که:

- در اتصالات پینی در مواد مرکب، حداکثر تحمل نیرو و مود گسیختگی به طور چشمگیری تحت تاثیر پارامترهای  $w/d$  و  $e/d$  می‌باشد.
- با افزایش نسبت  $w/d$  حد تحمل نیرو نیز افزایش یافته و مود گسیختگی از حالت برشی به حالت لهدیگی تغییر می‌یابد.
- کاهش نیرو برای نمونه‌هایی که در آن‌ها پدیده لهدیگی رخ می‌دهد به کندی صورت می‌گیرد.
- به دلیل تک‌جهته بودن الیاف در راستای بارگذاری و همچنین مقاومت کم ماتریس، فقط مودهای گسیختگی برشی و لهدیگی مشاهده شد.
- برای هر نسبت  $e/d$ ، حد بهینه‌ای برای مقدار  $w/d$  بدست آمد.

#### ۸- مراجع

- [1] Attar, Mohammad Mahdi. Barati, Farzan. Ahmadvpour, Mahdi. Rezapour, Ehsan. (2016). Failure analysis of unidirectional polymeric matrix composites with two serial pin loaded-holes. journal of mechanical science and technology, 30, pp.2583–2591.
- [2] Tao, Wu. Kaifu, Zhang. Hui, Cheng. (2016). Analytical modeling for stress distribution around interference fit holes on pinned composite plates under tensile load. S1359-8368 (16) 30907-6.
- [3] Gamdani, Farid. Boukhili, Rachid. Vadean, Aurelian. (2015). Tensile strength of open-hole, pin-loaded and multi-bolted single-lap joints in woven composite plates. Materials and Design, 88, 702–712.
- [4] Wang, W. Rans, C. Alderliesten, R.C. Benedictus, R. (2015). Predicting the influence of discretely notched layers on fatigue crack

[۴] کاربرد آلومینیوم و مواد کامپوزیتی در شناورها، محمد فارسی، داوود پورشمس، عباس دشتی منش، مصباح سایبانی، نهمین همایش صنایع دریایی

- growth in fibre metal laminates. *Engineering Fracture Mechanics*, Volume 145, Pages 1-14.
- [5] Moure, M. M. Otero, F. García-Castillo, S. K. Sánchez-Sáez, S. Barbero, E. Barbero, E. J. (2015). damage evolution in open-hole laminated composite plates subjected to in-plane loads. *Composite Structures*, Volume 133, 1, Pages 1048-1057
- [6] Damith, Mohotti. Tuan, Ngo, Sudharshan, N. Raman. Muneeb, Ali. Priyan, Mendis. (2014). Plastic deformation of polyurea coated composite aluminium plates subjected to low velocity impact. *Materials & Design*, Volume 56, Pages 696-713.
- [7] Grekov, Mikhail. Morozov, Nikita. Yazovskaya, Anna. (2014). Effect of surface stress on strength of a plate with elliptical and triangular nanoscale holes. 20th European Conference on Fracture (ECF20)
- [8] Vinayak, B.G. Jayaprakash, K. Naik, N.K. (2012). Fatigue behavior of laminated composites with a circular hole under in-plane uniaxial random loading. *Materials & Design*, Volume 40, Pages 245-256.
- [9] Fadil, Ibrahim, Soykok. Sayman, Onur. Pasinli, Ahmet. (2013). Effects of hot water aging on failure behavior of mechanically fastened glass fiber/epoxy composite joints. *composite*, 54, pp.59-70.
- [10] Darwish, Feras. Tashtoush, Ghassan. Gharaibeh, Mohammad. (2012). Stress concentration analysis for countersunk rivet holes in orthotropic plates. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 37, 69-78.
- [11] Gurbet, örcen. Mustafa, Gür and. Mustafa, özen. (2012). Seawater effect on pin-loaded laminated composites with two parallel holes. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 26 (12), pp. 4055-4063.
- [12] Camanho, P. P. Melro, A. R. Andrade Pires, F. M. Pinho, S. T. Micromechanical analysis of polymer composites reinforced by unidirectional fibres: Part II – Micromechanical analyses. *International Journal of Solids and Structures*, Volume 50, Issues 11–12, p. 1906–1915, 2013
- [13] Nazari, Ali. Didehvar, Neda. (2011). Analytical modeling impact resistance of aluminum epoxy laminated composites. *Composites Part B: Engineering*, Volume 42, Issue 7, Pages 1912-1919.