Comparison between fatigue behavior of polymeric composites manufactured by hand lay up and vacuum infusion process (VIP)

Mehran Toghraee[1], Ahad Zabett[2], Sirus Javadpour[3]
1, 2- Ferdowsi University of Mashhad
3- Shiraz University

Corresponding Author's Email: (ahad@um.ac.ir)

Abstract

In this study, the fatigue behavior of fiber reinforced polymer (FRP) composites (reinforced epoxy with different orientations of E-glass woven mat (0°, 90°, ±45°)) made by hand lay up and vacuum infusion process (VIP) has been compared. According to the results of static tension test, fracture strength was higher in VIP specimens than hand lay up ones, which was 387 MPa and 233 MPa respectively. With respect to the results of tension-tension fatigue test (R=0.1), higher fatigue properties were also observed for VIP specimens. At 76 MPa stress amplitude, VIP specimens survived for 151624 cycles; whereas the fatigue life of hand lay-up specimens was 44422 cycles at 65.57 MPa stress amplitude. These observations can be related to the more defects formed during manufacturing of hand lay up specimens. Studying fracture surfaces of the mentioned specimens after fatigue test by the means of SEM (scanning Electron Microscopy) revealed that fiber pull out and debonding in hand lay up specimens and matrix cracking, and debonding in VIP specimens were the main mechanisms for their fatigue failures.

Key words: fiber reinforced polymer composite, fatigue, hand lay up method, Vacuum Infusion Process (VIP)

1- M. Sc. student of Material science and engineering
2- Associate Professor of material science and engineering department
3- Associate Professor of material science and engineering department

مقایسه رفتار خستگی کامپوزیت‌های پلیمری ساخته شده با روش‌های لایه‌گذاری دستی و تزریق رزین به کمک خلأ (VIP)

مهران طغرایی[۱]، احد ضابط[۲]، سیروس جوادپور[۳]

۱ و ۲- دانشگاه فردوسی مشهد

۳- دانشگاه شیراز

ایمیل مسئول مقاله: (ahad@um.ac.ir)

چکیده

در این پژوهش رفتار خستگی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (رزین اپوکسی (Epoxy) تقویت شده توسط پارچه بافته شده با الیاف E-glass و جهت‌گیری‌های متفاوت (°۰، °۹۰ و °۴۵±)) که به دو روش لایه‌گذاری دستی و تزریق رزین به کمک خلأ (VIP) ساخته شده‌اند مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. با توجه به نتایج حاصل از آزمون کشش استاتیکی، استحکام شکست در نمونه‌های تولید شده به روشVIP بیشتر از نمونه‌های تولید شده به روش لایه‌گذاری دستی بود، که به ترتیب برابر با ۳۸۷ MPa و ۲۳۳ MPa به دست آمد. بر اساس نتایج آزمون خستگی کشش-کشش (R=0.1)، رفتار خستگی بهتری برای نمونه‌های VIP مشاهده شد. در دامنه تنش ۷۶ MPa، نمونه‌های VIP، ۱۵۱۶۲۴ سیکل را تا زمان واماندگی تحمل کردند؛ در صورتی که در دامنه تنش ۶۵٫۵۷ Mpa، نمونه‌های دستی ۴۴۴۲۲ سیکل را تحمل نمودند. این مشاهدات را می‌توان به عیوب ایجاد شده در حین ساخت نمونه به روش لایه‌گذاری دستی نسبت داد. بررسی سطوح شکست بعد از آزمون خستگی به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، دو مکانیزم متفاوت را برای واماندگی خستگی این دو نوع نمونه نشان داد، که در نمونه‌های تولید شده به روش دستی مکانیزم‌های بیرون آمدن الیاف و جدایش الیاف از زمینه و در نمونه تولید شده به روش VIP ترک خوردن زمینه و جدا شدن الیاف از زمینه به عنوان مکانیزم غالب مشاهده شد.

واژه‌های کلیدی: کامپوزیت پلیمری تقویت شده با الیاف، خستگی، روش لایه‌گذاری دستی، فرایند تزریق رزین به کمک خلأ (VIP)

۱- دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مواد

۲- دانشیار و عضو هیئت علمی بخش مهندسی مواد

۳- دانشیار و عضو هیئت علمی بخش مهندسی مواد

مقدمه

با وجودی که از ابتدا مواد کامپوزیتی به عنوان جایگزینی برای مواد مرسوم[1] مانند فولاد، آلومینیوم یا چوب استفاده شد؛ اما رفتار خستگی آن‌ها کاملاً با مواد فلزی متفاوت است. بنابراین، روش‌های معتبری که تا کنون برای مدل‌سازی و پیش‌بینی عمر خستگی مواد مرسوم ارائه شده اند، به طور مستقیم قابل به کارگیری برای مواد کامپوزیتی نیستند. به علاوه، حالات مختلف و زیاد چیدمان مواد که ناشی از الیاف، زمینه‌ها، روش‌های ساخت، ترتیب قرارگیری لمینت‌ها و ... است، ارائه یک روش مورد قبول را برای کلیه این حالات مشکل ساخته است (واسیلوپولوس (Vassilopoulos) و کلر (Keller)، ۲۰۱۱).

بسیار مشکل است که بتوان یک رویکرد کلی را برای رفتار خستگی مواد کامپوزیتی شامل کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، و انواع دیگر کامپوزیت‌ها به دست آورد (باتیاس (Bathias)، ۲۰۰۶). دلایل بسیار زیادی در رابطه با علت اهمیت خستگی در رابطه با سازه‌ها و قطعات کامپوزیتی وجود دارد که برخی از آن‌ها عبارتند از (واسیلوپولوس (Vassilopoulos) و کلر (Keller)، ۲۰۱۱):

- کامپوزیت‌ها برای قطعات سازه‌های بحرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند و باید بارهای خستگی قابل توجهی را در حین عمل‌کرد تحمل کنند؛ مانند هواپیماها، پره روتور توربین بادی، کشتی‌های تفریحی، پل‌های عبور و مرور و ... . این پیشرفت‌ها، درک معمول را در رابطه با اهمیت حساسیت هر سازه به خستگی تغییر می‌دهد.
- مواد کامپوزیتی تک جهته به طور کلی شکننده هستند و تحت بار به صورت خطی رفتار می‌کنند. از آنجایی که واماندگی در این مواد به صورت ناگهانی و بدون هرگونه نشانه‌ای از قبل است، درک رفتار خستگی و پیش‌بینی عمر خستگی آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.
- توانایی شبیه‌سازی رفتار خستگی ماده، قطعات سازه‌ای و یا سازه، هزینه را کاهش داده و اجازه توسعه محدوده گسترده‌ای از محصولات را بدون نیاز به افزایش تعداد نمونه‌های فیزیکی اولیه می‌دهد.

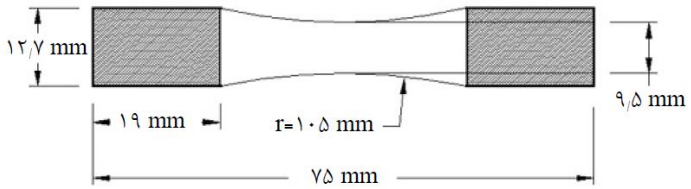
در این پژوهش به مقایسه رفتار خستگی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه که به دو روش لایه‌گذاری دستی و تزریق رزین به کمک خلأ[2] (VIP) ساخته شده‌اند می‌پردازیم و در انتها با بررسی سطح شکست نمونه‌های مذکور بعد از آزمون خستگی کشش-کشش (R=0.1)، مکانیزم واماندگی غالب را برای هر نمونه مورد بررسی قرار می‌دهیم.

مبانی نظری پژوهش

جهت انجام آزمون خستگی از استاندارد ASTM D3479 استفاده شد. این استاندارد هندسه نمونه‌های آزمون خستگی را مشابه نمونه‌های آزمون استاتیکی (استاندارد ASTMD3039) پیشنهاد می‌کند، اما تلاش‌ها جهت انجام آزمون با استفاده از این نمونه‌های کششی بی‌نتیجه ماند ((بائر (Baere)، ون پاپگم (Van Paepegem)، هوچارد (Hochard) و دگریک (Degrieck)، ۲۰۱۱). پیش‌تر نیز محققان زیادی به این مساله اذعان نموده‌اند که استفاده از این نوع نمونه‌ها با محدودیت روبروست. علت عدم کارایی این نمونه‌های استاندارد، شکست نمونه‌ها در داخل فک و نیز نیروی بالای مورد نیاز جهت آزمون با توجه به ابعاد بزرگ نمونه‌هاست. نمونه‌های آزمون خستگی کشش-کشش در ابتدا به صورت مستطیلی شکل برش خورده و سپس با استفاده از ماشین‌کاری شکل دمبلی به خود می‌گیرند. سپس سطوح ماشین‌کاری شده با استفاده از سمباده نرم پرداخت می‌شوند. دلیل استفاده از سمباده نرم در اینست که

[1] Conventional materials
[2] Vacuum infusion process

ترک‌های موجود در سطح که در اثر ماشین‌کاری بوجود آمده‌اند حذف شوند. استفاده از شکل دمبلی نیز جهت جلوگیری از شکست نمونه‌ها در فک است. همچنین جهت اطمینان از عدم شکست نمونه‌ها در فک از تب[1] نیز استفاده می‌شود. شکل ۱ هندسه نمونه پیشنهاد شده را نمایش می‌دهد (واهل (Wahl)،۲۰۰۱).

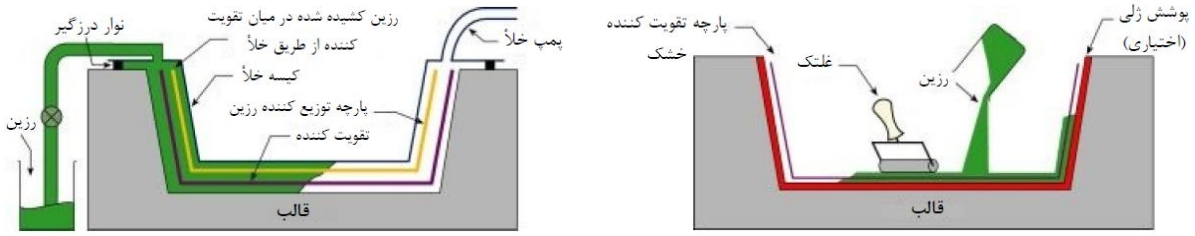


شکل ۱- هندسه نمونه آزمون خستگی کشش-کشش

همان‌طور که در بخش مقدمه اشاره شد، یکی از مهم‌ترین سازه‌هایی که در آن خستگی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در واماندگی دارد، پره توربین بادی است. مواد مورد استفاده در ساخت پره‌ها به طور قابل ملاحظه‌ای بر روی کارایی و خواص آن‌ها، مانند وزن پره، مکانیزم آسیب، و عمر خستگی اثرگذار است. پره‌های توربین‌های بادی از مواد غیر همسان‌گرد ساخته می‌شوند که معمولاً از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، در ترکیبی از یک تک پوسته و کامپوزیت ساندویچی، تهیه شده‌اند. طراحی‌های امروزی عمدتاً بر اساس کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه[2] (GFRP) صورت می‌گیرد. ساختار کامپوزیتی به عنوان یک نوع خاص از لمینت‌های کامپوزیتی تلقی می‌شود و مقبولیت گسترده‌ای به عنوان یک روش عالی برای دست‌یابی به اجزایی با وزن کم و ساختارهایی با سفتی خمشی[3] بسیار بالا، استحکام زیاد، و مقاومت کمانشی بسیار زیاد به دست آورده است. این مواد توسط روش VIP، لایه‌گذاری دستی، و غیره ساخته می‌شوند. به طور کلی مواد مورد استفاده در ساخت پره‌های بادی باید تحمل بارگذاری‌های خستگی شدید را در شرایط کاری داشته باشند. مواد و روش‌های مختلف به طور قابل ملاحظه‌ای بر روی عمر کاری توربین‌های بادی تحت شرایط بارگذاری پیچیده اثرگذار هستند (یانگ (Yang) و سان (Sun)، ۲۰۱۳).

لایه‌گذاری دستی متداول‌ترین روش تولید قطعات در صنعت کامپوزیت‌ها می باشد. معمولاً از این روش برای ساخت قطعات با تعداد کم استفاده می‌شود. با این وجود موارد موفقی نیز بوده است که از این روش برای تولید قطعات با تولید بالا نیز استفاده شده است. شکل ۲ (الف) شماتیکی از فرایند لایه‌گذاری دستی را نشان می‌دهد. در روش VIP که یکی دیگر از پرکاربردترین روش‌ها در ساخت پره‌های توربین است، به کمک خلاء، رزین گاززدایی شده تزریق می‌شود و در نهایت عملیات پخت صورت می‌گیرد. شکل ۲ (ب) این فرایند را نشان می‌دهد (هاشمی، اسفندیاری، حجتی، علاقه بند، گلپریان، ۱۳۸۷).

[1] Tab
[2] Glass fiber reinforced plastics
[3] Bending stiffness



(ب) (الف)

شکل ۲- شماتیکی از (الف) فرایند لایه‌گذاری دستی، (ب) فرایند تزریق رزین به کمک خلأ (VIP)

پیشینه پژوهش

در خلال سال‌های گذشته، برنامه‌های آزمایشگاهی بسیار زیادی به منظور شناسایی رفتار خستگی سازه‌های کامپوزیتی FRP انجام شده است. با پیشرفت تکنولوژی، چارچوب‌های آزمون‌های جدید و ابزارهای اندازه‌گیری اختراع شدند که انجام آزمایش‌های خستگی پیچیده و اندازه‌گیری خواص و ویژگی‌ها را بسیار آسان‌تر کرد، چیزی که تا چند سال پیش ازآن ممکن نبود (واسیلوپولوس (Vassilopoulos) و کلر (Keller)، ۲۰۱۱).

ناتاراجان (Natarajan) در سال ۲۰۰۳، بر روی رفتار خستگی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با پارچه شیشه‌ای کار کرد. او سه کامپوزیت FRP را، که در ساخت اجزاء پل‌ها به کار می‌روند، تحت بارگذاری خستگی مورد آزمایش قرار داد و بر اساس انرژی کرنشی داخلی مدلی را برای پیش‌بینی طول عمر خستگی این مواد ارائه کرد. او هم‌چنین بر روی یکپارچگی ساختاری و تخریب کامپوزیت‌های FRP با وزن کم، هنگامی که تحت بار شبیه‌سازی شده سیکلی حاصل از چرخ‌های ماشین قرار می‌گیرند، نیز تحقیق کرد. (ناتاراجان (Natarajan)، ۲۰۰۳).

پلاسید (Plaseied) و فاطمی در سال ۲۰۰۹ بر روی رفتار خستگی پلیمر وینیل استر (vinyl ester) و تأثیر اضافه کردن نانوالیاف‌های کربنی به آن کار کردند. آن‌ها با انجام آزمون سیکلی کشش-کشش در دامنه‌های تنشی ثابت، رفتار تغییر فرم سیکلی و خستگی وینیل استر و نانوکامپوزیت آن با ۰/۵ درصد وزنی نانوالیاف کربنی را بررسی کردند. نتایج به دست آمده حاکی از کوتاه‌تر بودن طول عمر نانوکامپوزیت‌های وینیل استر نسبت به خود وینیل استر در دامنه‌های تنشی بالاتر بود؛ در صورتی که عکس این موضوع در دامنه‌های تنشی کوتاه‌تر مشاهده شد. سطح شکست خستگی هم نشان دهنده مجموعه‌ای از ترک‌ها و بیرون کشیده شدن[1] برخی از نانوالیاف‌ها بود (پلاسید (Plaseied) و فاطمی، ۲۰۰۹)

بائر (Baere) و همکاران در سال ۲۰۱۱ محدودیت‌های استاندارد ASTM D3039/D3479 در تعیین رفتار خستگی کشش-کشش گرمانرم‌های تقویت شده با کربن را مورد بررسی قرار دادند. چرا که نمونه‌های تهیه شده بر اساس این استاندارد در قسمت تب دچار واماندگی می‌شدند؛ به این معنی که طول عمر خستگی به طور قابل ملاحظه‌ای در نظر گرفته نمی‌شد. بنابراین تحقیق خود را بر روی تخریب سفتی[2] و تغییر فرم دائم ماده متمرکز کردند تا اینکه تعداد سیکل‌های واماندگی را بررسی کنند. نتایج نشان دهنده این بود که ترتیب چیدمان $[(0^\circ, 90^\circ)]_{4s}$ هیچ‌گونه تخریب سفتی قابل ملاحظه‌ای را نشان نمی‌دهد و تنها در این نمونه‌ها تغییر فرم دائم

[1] Pull out
[2] Stiffness degradation

محدودی مشاهده شد (بائر (Baere) و همکاران،۲۰۱۱). این افراد در تحقیقی دیگر در همان سال نمونه‌های دمبلی شکل را برای تعیین رفتار خستگی گرمانرم‌های تقویت شده با کربن مورد بررسی قرار دادند. این شکل پیشنهادی ابتدا توسط آنالیز المان محدود بهبود داده شد و سپس آزمایش‌های خستگی انجام شد. نتایج نشان دهنده بهتر بودن نمونه دمبلی شکل در مقایسه با نمونه مستطیلی ارائه شده در استاندارد، برای مواد مورد مطالعه بود؛ زیرا واماندگی هرگز در ناحیه تب اتفاق نیفتاد (بائر (Baere) و همکاران، ۲۰۱۱). با توجه به ضروری بودن استفاده از تب، همین افراد در سال ۲۰۰۹ طراحی تب‌های انتهایی را برای آزمون خستگی و کشش استاتیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ارائه کرده بودند. آن‌ها چهار نوع هندسه و ماده متفاوت را برای تب‌ها به صورت عددی مورد بررسی قرار داده و برای آزمون خستگی پلی‌فینیلین سولفید (Polyphenylene sulphide) تقویت شده با پارچه کربنی امتحان کردند. نتایج نشان دهنده آن بود که برای ماده مدنظر تب‌های انتهایی کوتاه با لایه‌گذاری $[(0^\circ, 90^\circ)]_{4s}$ باید برای نمونه استفاده شود و به گونه‌ای در دستگاه قرار گیرد که کاملاً بین فک‌ها باشد (بائر (Baere) و همکاران، ۲۰۰۹).

کِنش (Kensche) در سال ۲۰۰۶ خستگی کامپوزیت‌های مورد استفاده در ساخت پره توربین را مورد بررسی قرار داد. به منظور فهم رفتار خستگی و جنبه‌های طول عمر پره روتور (Rotor) توربین بادی، منحنی S-N نه تنها برای الیاف با جهت‌گیری 0°، بلکه برای لایه‌گذاری‌هایی با جهت‌گیری $\pm 45^\circ$، که برای قسمت‌های مختلف روتور پره توربین مورد استفاده قرار می‌گیرند، بررسی شد. تأثیر میزان الیاف، معماری آن و تأثیرات محیطی نیز بر روی پیش‌بینی طول عمر المان‌های ساختاری پره مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت طراحی ایمن خستگی برای این پره‌ها، ماده مناسب و قسمت‌های حساس‌تر پره به خستگی به دست آمد. نتایج حاصل نشان داد که میزان بیشتر الیاف منجر به شیب بیشتر منحنی‌های خستگی می‌شود؛ به علاوه کاهش سفتی[1] در لبه حمله[2] و لبه فرار[3] هنگامی که از لایه‌گذاری $\pm 45^\circ$ استفاده می‌شود، اتفاق می‌افتد (کِنش (Kensche)، ۲۰۰۶).

روش پژوهش

در این پژوهش، به منظور ساخت نمونه‌های کامپوزیتی GFRP برای آزمون خستگی، از رزین اپوکسی (Epoxy) و پارچه بافته شده با الیاف شیشه‌ای E- glass و جهت‌گیری‌های مختلف (0°، 90° و $\pm 45^\circ$) استفاده شد. لایه‌گذاری نمونه‌ها را به صورت ترکیبی از الیاف با جهات گوناگون در نظر گرفتیم که به نوعی شرایط را به شرایط عمل‌کرد واقعی پره‌های توربین نزدیک‌تر کرده باشیم. بنابراین لایه‌چینی نمونه‌ها به شکل (۹۰/۰/±۴۵/۰/±۴۵/۰/۹۰) انجام شد. استفاده از الیاف 90° در دو سو در اثر تجارب کار با نمونه‌های خستگی بوده است (واهل (Wahl)،۲۰۰۱)، زیرا این لایه باعث توزیع بهتر نیرو در نمونه‌ها می‌شود.

از نظر تعداد نمونه‌ها، ۱۷ نمونه با هندسه شکل ۱ برای دو فرآیند لایه‌گذاری دستی و VIP در نظر گرفته شد که در نتیجه در کل ۳۴ نمونه به دست آمد. از این ۱۷ نمونه در هر سری، طبق استاندارد ASTM D3039 ، ۵ نمونه جهت انجام تست استاتیکی مد نظر قرار گرفت. در صورتی که هر ۵ نمونه رفتار تقریباً مشابهی از خود نشان دهند، میانگین تنش‌های شکست متناظر با استحکام استاتیکی در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۳ دو فرایند لایه‌گذاری دستی و VIP برای ساخت ورق‌های کامپوزیتی با جهت‌گیری مد نظر نشان داده شده است.

1 Stiffness reduction
2 Leading edge
3 Trailing edge

(الف) (ب)

شکل ۳- آماده سازی ورق کامپوزیتی GFRPبا روش (الف) لایه‌گذاری دستی، (ب) تزریق رزین به کمک خلأ (VIP)

بعد از برش دادن ورق‌های کامپوزیتی، به منظور ساخت نمونه استاندارد (شکل ۱)، مقاطع برش خورده ماشین‌کاری شده و در نهایت نمونه نهایی به دست آمد (شکل ۴). بخش هاشورخورده در شکل ۱ تب استفاده شده در تست است. لایه‌چینی را معمولاً باید تا حدی انجام داد که ضخامت نمونه به ۳-۴mm برسد، اما با توجه به قابلیت فک دستگاه، این ضخامت را ۲-۳mm انتخاب کردیم. با در نظر گرفتن نوع لایه‌چینی یکسان، این ضخامت برای نمونه‌های ساخته شده با فرایند VIP نسبت به فرآیند لایه‌گذاری دستی متفاوت می‌باشد.

(الف) (ب)

شکل ۴- (الف) ماشین‌کاری نمونه‌های برش داده شده، (ب) نمونه نهایی

دستگاه آزمون خستگی مورد استفاده کشش-کشش می‌باشد، یعنی مقادیر حداکثر و حداقل تنش و نیروی اعمالی باید به گونه‌ای باشد که همواره نمونه را تحت کشش نگه دارد. شکل ۵ دستگاه آزمون خستگی و نحوه قرارگیری نمونه در آن را نشان می‌دهد.

شکل ۵- دستگاه آزمون خستگی کشش-کشش

نیروهای بارگذاری در دستگاه (F_a و F_m) با استفاده از رابطه گودمن (Goodman)، نسبت تنش[1] برابر با ۰/۱ (R=0.1) و اندازه‌گیری سطح مقطع نمونه‌ها به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\sigma_{fat} = \frac{\sigma_a}{1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{ut}}} \quad (۱)$$

در این رابطه σ_a تنش دامنه، σ_m تنش میانگین و σ_{ut} استحکام تسلیم استاتیکی است. σ_{fat} نیز استحکام خستگی می‌باشد.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} \quad (۲)$$

$$R = 0.1 \rightarrow \sigma_{\max} = 10\sigma_{\min}$$

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \rightarrow \sigma_a = 4.5\sigma_{\min} \quad (۳)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \rightarrow \sigma_m = 5.5\sigma_{\min} \quad (۴)$$

با قرار دادن دو رابطه (۳) و(۴) در رابطه (۱) به رابطه زیر می‌رسیم:

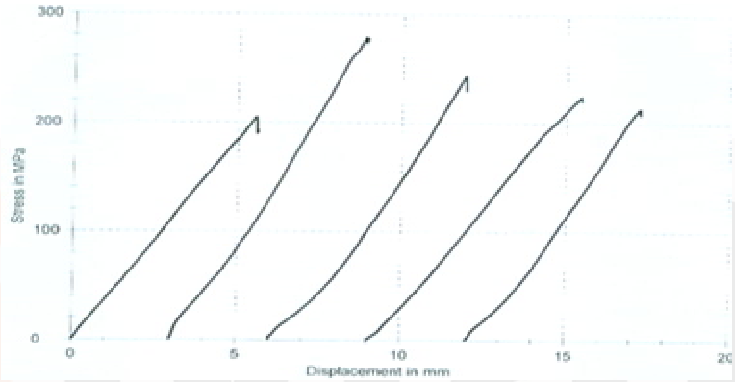
$$\sigma_{fat} = \frac{4.5\sigma_{\min}}{1 - \frac{5.5\sigma_{\min}}{\sigma_{ut}}} \quad (۵)$$

به این ترتیب با داشتن مقادیر σ_{ut} و σ_{fat}، مقدار تنش σ_{min} بدست می‌آید که با استفاده از این مقدار تنش و با توجه به ابعاد هندسی نمونه‌ها، نیروهای بارگذاری در دستگاه (F_a و F_m) بدست می‌آیند.

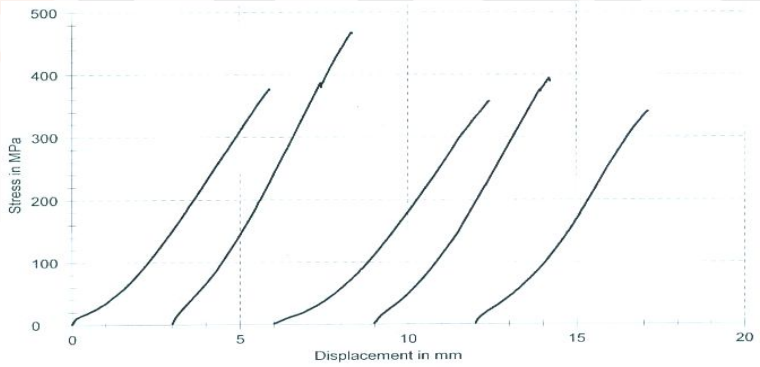
[1] Stress ratio

تجزیه و تحلیل داده‌ها

همان‌طور که در بخش روش پژوهش بیان شد، آزمون کشش استاتیکی بر روی ۵ نمونه برای هر کدام از روش‌های VIP و لایه‌گذاری دستی انجام شد. نتیجه این آزمون برای ۵ نمونه ساخته شده به روش لایه‌گذاری دستی و VIP به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ و جدول ۱ آمده است.



شکل ۶- نتایج آزمون کشش استاتیکی انجام شده بر روی ۵ نمونه ساخته شده به روش لایه‌گذاری دستی



شکل ۷- نتایج آزمون کشش استاتیکی انجام شده بر روی ۵ نمونه ساخته شده به روش VIP

جدول ۱- مقادیر σ_f به دست آمده برای نمونه‌های ساخته شده به روش لایه‌گذاری دستی و VIP

شماره نمونه (لایه‌گذاری دستی)	σ_f (MPa)	شماره نمونه (VIP)	σ_f (MPa)
۱	۲۰۴٫۴۶	۱	۳۰۷٫۸۲
۲	۲۷۸٫۲۵	۲	۴۶۷٫۷۲
۳	۲۴۳٫۱۴	۳	۳۵۷٫۰۰
۴	۲۲۴٫۶۷	۴	۳۹۴٫۲۸
۵	۲۱۳٫۵۷	۵	۳۴۰٫۶۳

از آنجا که اختلاف فاحشی در نقاط شکست ۵ نمونه متناظر با فرایند دستی با یکدیگر و ۵ نمونه متناظر با فرآیند VIP با هم دیده نمی‌شود، میانگین نقاط شکست را به عنوان نقطه شکست نهایی نمونه‌های ساخته شده در نظر می‌گیریم که در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- استحکام شکست نمونه‌های ساخته شده به دو روش لایه‌گذاری دستی و VIP

فرایند ساخت	استحکام شکست (MPa)
VIP	۳۸۷
لایه‌گذاری دستی	۲۳۳

برای انجام آزمون خستگی مقادیر σ_{fat} مطابق با آنچه در بخش روش پژوهش توضیح داده شد، انتخاب شده و آزمون بر روی نمونه‌ها انجام گرفت. میانگین نتایج آزمون‌های موفق بر روی ۱۲ نمونه ساخته شده به روش لایه‌گذاری دستی و ۱۲ نمونه ساخته شده به روش VIP به ترتیب در جداول ۳ و ۴ آمده است. شکل ۸ نیز نمونه‌های شکسته شده را بعد از انجام این آزمون نشان می‌دهد.

جدول ۳- نتایج آزمون خستگی کشش-کشش انجام شده بر روی نمونه ساخته شده به روش لایه‌گذاری دستی

تعداد نمونه	فرکانس (Hz)	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)	σ_{fat} (MPa)	N (میانگین تعداد سیکل‌ها تا واماندگی)	انحراف معیار (سیکل)
۶	۸	۸۴	۱۰۳/۶	۱۵۰	۱۱۶۱	۴۸۰
۶	۸	۶۵/۵۷	۸۰	۱۰۰	۴۴۴۲۲	۴۵۶۳۶

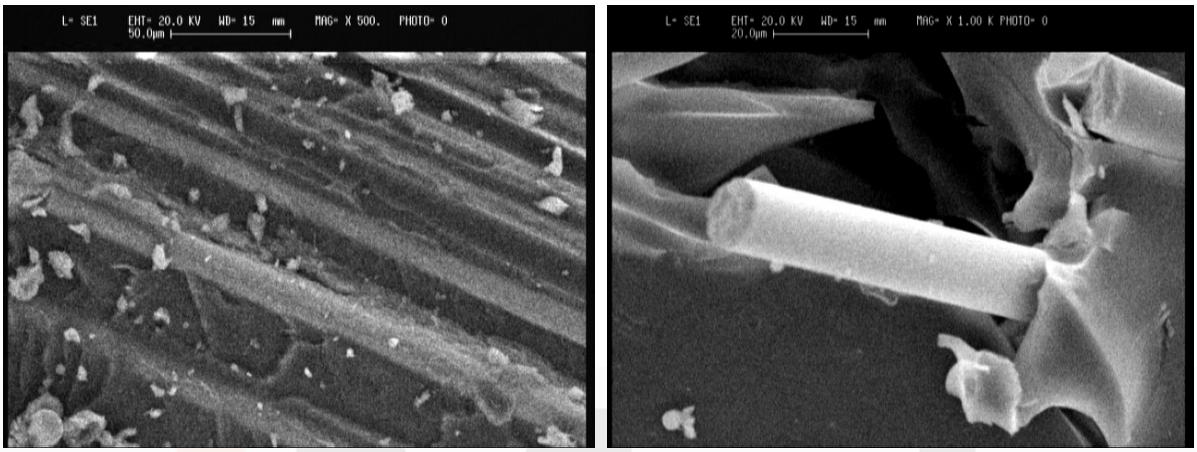
جدول ۴- نتایج آزمون خستگی کشش-کشش انجام شده بر روی نمونه ساخته شده به روش VIP

تعداد نمونه	فرکانس (Hz)	σ_a (MPa)	σ_m (MPa)	σ_{fat} (MPa)	N (میانگین تعداد سیکل‌ها تا واماندگی)	انحراف معیار (سیکل)
۶	۸	۱۰۱/۷۹	۱۲۴/۴۱	۱۵۰	۳۶۸۴۸	۴۱۶۰۰
۶	۸	۷۶	۹۲/۹	۱۰۰	۱۵۱۶۲۴	۶۸۵۹۵

شکل ۸- سطوح شکست نمونه‌های ساخته شده به روش لایه‌های گذاری دستی و VIP بعد از آزمون خستگی کشش-کشش

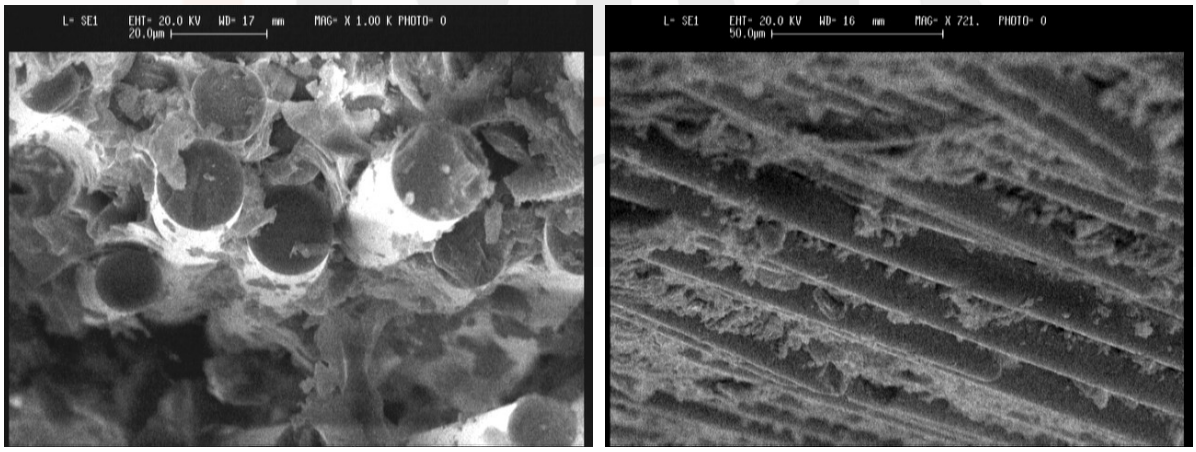
تصاویر SEM از سطوح شکست خستگی (شکل‌های ۹ و ۱۰)، مکانیزم‌های متفاوتی را برای واماندگی نمونه‌های دستی و VIP نشان می‌دهد. در شکل ۹، مکانیزم غالب در واماندگی نمونه‌های دستی جدایش الیاف از زمینه[1] و بیرون آمدن الیاف[2] است؛ در صورتی که در نمونه‌های VIP مکانیزم غالب واماندگی تحت بار خستگی به صورت ترک خوردن زمینه[3] و جدایش الیاف از زمینه دیده شد (شکل ۱۰). وجود دسته‌ای از الیاف بیرون آمده به صورت موضعی نشان دهنده ترک خوردن زمینه و رشد آن است (شکل ۱۰ (ب)) (هاریس (Harris)، ۲۰۰۳). با توجه به تصاویر SEM به دست آمده از این دو نمونه (شکل‌های ۹ (الف) و ۱۰ (ب))، می‌توان به نوع جدایش و میزان استحکام الیاف و زمینه در نمونه‌های VIP و دستی نیز پی برد. حضور بقایای زمینه بر روی الیاف جدا شده از آن در نمونه VIP حاکی از جدایش هم‌بسته[4] (جدایش در جایی غیر از فصل مشترک) و بنابراین استحکام بیشتر الیاف و زمینه در این نمونه است؛ در صورتی که عدم حضور این بقایا بر روی الیاف مشاهده شده در نمونه دستی، نشان دهنده جدایش چسبنده[5] (جدایش در فصل مشترک) و استحکام کم‌تر بین الیاف و زمینه در این نمونه است (هاریس (Harris)، ۲۰۰۳).

[1] Debonding
[2] Fiber pull out
[3] Matrix cracking
[4] Cohesive debonding
[5] Adhesive debonding



(ب) (الف)

شکل ۹- تصاویر SEM از سطح شکست نمونه دستی تحت بار خستگی - (الف) بیرون آمدن الیاف از زمینه، (ب) جدا شدن الیاف از زمینه (شیارهای سیاه رنگ نشان دهنده الیاف جدا شده از زمینه است)



(ب) (الف)

شکل ۱۰- تصاویر SEM از سطح شکست نمونه VIP تحت بار خستگی –(الف) جدا شدن الیاف از زمینه، (ب) تجمعی از الیاف به صورت موضعی که نشان دهنده ترک خوردن زمینه است.

نتیجه‌گیری

استحکام کششی نمونه‌های VIP بالاتر از استحکام کششی نمونه‌های دستی است. مقدار این تفاوت ناشی از وجود عیوب موجود در نمونه‌های ساخته شده به روش لایه‌گذاری دستی است؛ چرا که در این فرایند حباب‌های بسیاری در نمونه ایجاد می‌شود که منجر به کاهش استحکام نمونه می‌شوند. وجود حباب‌های کمتر در نمونه‌های VIP به این علت است که قبل از تزریق، رزین گاززدایی می‌شود وکل فرایند تولید تحت خلأ انجام می‌شود.

نتایج آزمون خستگی نشان دهنده میانگین تعداد سیکل بیشتری تا زمان واماندگی برای نمونه‌های VIP در مقایسه با نمونه‌های دستی است. در دامنه تنش معادل سازی شده به روش گودمن (Goodman)، عمر خستگی نمونه‌های VIP در تنش MPa ۱۰۱/۷۹ و MPa ۷۶ به ترتیب برابر با۳۶۸۴۸ و ۱۵۱۶۲۴ سیکل بوده و در نمونه‌های دستی برای تنش MPa ۸۴ و MPa ۶۵/۵۷ برابر با ۱۱۶۱ و ۴۴۴۲۲ سیکل می‌باشد.

علت این اختلاف، تفاوت در مکانیزم‌های واماندگی مختلف در این دو نمونه است، که در نمونه‌های دستی مکانیزم غالب جدایش الیاف از زمینه و بیرون آمدن الیاف است؛ در صورتی که در نمونه‌های VIP مکانیزم غالب ترک خوردن زمینه و جدایش الیاف از زمینه می‌باشد.

iMat
Conference 2014

منابع

هاشمی، حمیدرضا ، اسفندیاری، کیومرث،حجتی، رضا، علاقه بند، ایرج، گلپریان، نغمه (۱۳۸۷). راهنمای صنعت کامپوزیت. تهران: انجمن کامپوزیت ایران.

Baere, De, Van Paepegem, W., Quaresimin, M., Degrieck, J. (2011), "On the tension-tension fatigue behaviour of a carbon reinforced thermoplastic part I: limitations of the ASTM D3039/D3479 standard". *Polymer Testing*, Vol. 30, Pp. 625-632.

Baere, De, Van Paepegem, W., Quaresimin, M., Degrieck, J. (2011), "On the tension-tension fatigue behaviour of a carbon reinforced thermoplastic part II: evaluation of a dumbbell-shaped specimen". *Polymer Testing*, Vol. 30, Pp. 663-672.

Baere, De, Van Paepegem, W., Degrieck, J. (2009), "On the design of end tabs for quasi-static and fatigue testing of fiber-reinforced composites". *Polymer Composites*, Vol. 30, Pp. 381-390.

Bathias, C. (2006). "An engineering point of view about fatigue of polymer matrix composite materials" *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, Pp. 1094-1099.

Harris, Bryan (Editor). (2003). Fatigue in composites. North America: CRC press.

Kensche, Christoph W. (2006). "Fatigue of composites for wind turbines". *International Journal of Fatigue*, Vol. 28, Pp. 1363–1374.

Natarajan, Venkatakrishnan (2003). Fatigue response of fabric reinforced polymeric composites [thesis]. Virginia, USA: West Virginia University, Department of Mechanical engineering.

Plaseied, A., Fatemi, A. (2009), "Fatigue behavior of vinyl ester polymer and effects of carbon nanofiber reinforcement". 12th International Congress on Fracture (ICF12), Canada, Ottawa.

Vassilopoulos, Anastasios P., Keller, Thomas (2011). Fatigue of fiber-reinforced composites. London: Springer-Verlag.

Wahl, Neil K. (2001). Spectrum fatigue lifetime and residual strength for fiberglass laminates [thesis]. Montana, USA: Montana state University, Department of Mechanical engineering.

Yang, Bin, Sun, Dongbai, (2013). "Testing, inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades: A survey". *Renewable and Sustainable Energy Reviews,* Vol. 22, Pp. 515–526.