وجود معایب در کامپوزیتها

The Presence of Defects in Composites

تألیف: مهندس حمید صباغی

واژه‌های کلیدی:
عیب، حباب، روشهای مخرب، روشهای غیر مخرب، کامپوزیتها

گذشته از اهمیتی که کاربرد کامپوزیتها دارند، امّا عیبهای مختلفی در آنها وجود دارند که موجب بروز مسائل بسیار حین کاربرد آنها می‌شود. برای ارزیابی عیبهای موجود در کامپوزیتها، می‌توان آنها را بدو دسته تقسیم کرد. در اولین گروه، عیبهایی وجود دارند که در طول فرایند تولید تشکیل می‌شوند و برای کنترل آنها راه حل‌های محدودی وجود دارد. به عنوان مثال، حبابها از مهمترین عیبها در این گروه می‌باشند. آنها به علت هوای محصور شده در میان الیاف یا دلایل دیگر به وجود می‌آیند. وجود معایب در عمق رزین (ماتریس) اثر منفی بر خواص رزین بخت شده دارد. امّا در گروه دوم، می‌توان از عیبهایی نام برد که در طول به کارگیری کامپوزیت ایجاد می‌شوند.

در این مقاله، یک بررسی مقدماتی از عیبها و نحوهٔ شناسایی آنها ارائه می‌شود.

مقدمه

با توجه به بحثهایی که درمورد مواد کامپوزیت چه از نظر تکنولوژی ساخت و چه از نظر کاربردی صورت گرفته است، مفید بنظر می‌رسد که عیبها و نقصهای این مواد نیز بررسی شود. اگرچه فواید این مواد براحتی بر این تنگناها می‌چربد ولی درحد خود از اهمیت فراوانی برخوردار است.

به طورکلی عیبها و نقصهای کامپوزیتها چه در سطح تولید و چه در سطح کاربردی به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱ ــ مشکلات مربوط به تجهیزات و دستگاههای پخت و پلیمر شدن، ایجاد یک محیط ویژه برای انجام فازهای مختلف فرایند که نهایتاً به کنترل دما و رطوبت منتهی می‌شوند.

۲ ــ عیوبی که به هنگام پخت و پلیمر شدن بوجود می‌آیند که مهمترین آنها عبارتند از: ایجاد فضاهای خالی در داخل رزین، توزیع غیر یکنواخت رزین، ناهمواریهای سطحی، نفوذ عناصر زاید در فضاهای خالی ایجاد شده یا منفذها، ضعیف شدن خاصیت چسبندگی میان لایه‌های آغشته به رزین و سرانجام شکستن الیاف.

علاوه بر موارد فوق عیبهایی که در فلزات سنتی وجود دارند نیز در مواد کامپوزیت به مراتب حادتر جلوه می‌کنند؛ مثلاً ترک خوردگی که باعث شکستگی می‌شود. در این مقاله از بررسی این نوع عیبها صرف‌نظر می‌کنیم، زیرا به تنهایی زمینهٔ وسیعی را دربر می‌گیرد و به بررسی عیبهای مربوط به دو دسته اول می‌پردازیم.

از طبقه بندی فوق آشکار است که دو مورد ۱ و ۲ در فلزات سنتی وجود ندارند و درنتیجه از امتیازات مثبت کامپوزیتها می‌کاهند. با این حال، این بدان معنی نیست که کاربرد کامپوزیت بجای فلز انتخابی نامطلوب است زیرا کارایی و فوایدی که این مواد از خود نشان می‌دهند به هیچ وجه قابل مقایسه با فلزات سنتی نیست. به همین دلیل است که پژوهش در زمینهٔ شناسایی عیبها و چگونگی رفع آنها بطور همزمان با بکارگیری کامپوزیتها صورت می‌گیرد.

حال به طور جداگانه مسائل مربوط به هر دسته و راههای شناسایی و رفع عیبهای مربوطه مورد بحث قرار می‌گیرند.

حبابهای حاوی آب و هوا

همان‌طوری که قبلاً در سلسله مقالاتی تحت عنوان «کامپوزیتها» در همین مجله به چاپ رسیده است، روشهای مختلفی برای تولید یک ساختار کامپوزیتی وجود دارند. از مهمترین آنهای روشهای لایه‌سازی، رشته پیچی، اکستروژن و پولتروژن می‌باشند که در آنها انواع مراحل پخت و پلیمر شدن صورت می‌گیرد. از آنجائیکه در کامپوزیتهای پلیمری، ماتریس از رزین تشکیل شده

Key Words:
Defect, Void, Destructive Methods, Non-destructive Methods, Composites

است و دمای پخت رزینها چه از نوع گرما سخت و چه از نوع گرمانرم به‌طور معمول بین ۱۱۰ تا ۱۸۰ درجه سانتیگراد می‌باشد، بنابراین تجهیزات و دستگاههایی که به کار گرفته می‌شوند باید دارای یک پایداری حرارتی مطلوب باشند و گذشته از آن هیچ‌گونه چسبندگی میان فراورده و دستگاه ایجاد نشود. به‌طور مثال، در روش رشته پیچی، الیاف آغشته به رزین به روی یک مندرل استوانه‌ای می‌پیچند و در این حالت با اعمال گرما رزین فاز پخت و پلیمر شدن را پشت‌سر می‌گذارد. در نتیجه اگر رزین به کار رفته در دمای ۱۵۰ درجه سانتیگراد پخت و پلیمر شود، سیستم مندرل باید توانایی تحمل چنین گرمایی را داشته باشد. از پیشرفته‌ترین روشهای تولید کامپوزیت برداشت می‌شود که دستگاهها و تجهیزات مربوط نیز باید از مواد کامپوزیت ساخته شوند تا بدین ترتیب مشکلی از نظر پایداری گرمایی و مکانیکی وجود نداشته باشد. این انتخاب منجر به افزایش هزینهٔ کل فرایندهای تولید می‌شود و در نهایت افزایش قیمت فراورده را به دنبال خواهند داشت.

در همین راستا کنترل شرایط محیط بویژه دما و رطوبت از دیگر مسائل مهمی است که باید در نظر گرفته شود، چون فازهای مختلف فرایند تولید به آنها حساس‌اند. رطوبت، بویژه می‌تواند اثر بسیار مهمی در کیفیت نهایی فراورده داشته باشد، زیرا باعث تشکیل حبابهایی از بخار و هوا در داخل رزین می‌شود که در نهایت مرغوبیت فراورده را زیر سؤال خواهد برد *[1]*.

غلظت آب در رزین، در شرایط تعادل، با رطوبت نسبی (٪) رابطهٔ زیر را دارد.

$$C_W = a\,(\frac{RH}{۱۰۰})^b \qquad (۱)$$

که در آن C_W غلظت آب، RH رطوبت نسبی، a و b ضرایب ثابتی هستند که به نوع ماده‌ای که در آن حباب تشکیل می‌شود بستگی دارد. در مورد رزین گرماسخت مقادیر این ضرایب برابر است با:

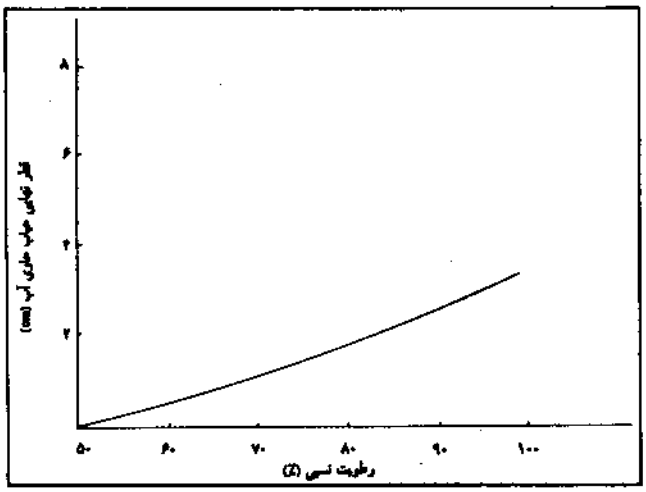
$$a = ۰/۰۱۸ \qquad ،b = ۱$$

در نتیجه رابطهٔ (۱) به صورت زیر خواهد بود:

$$C_W = ۰/۰۱۸\,(\frac{RH}{۱۰۰}) \qquad (۲)$$

رابطهٔ فوق نشان می‌دهد که با افزایش درصد رطوبت نسبی در رزین، غلظت آب در حباب افزایش می‌یابد. این رابطه را می‌توان در غالب افزایش قطر حباب حاوی آب با افزایش غلظت C_W نیز توجیه و آن را در نموداری ترسیم کرد. منحنی (شکل ــ ۱) که مربوط به یک رزین گرماسخت از نوع اپوکسی است، وجود این رابطه را تأیید می‌کند و نشان می‌دهد که چگونه قطر نهایی حباب حاوی آب با افزایش درصد رطوبت نسبی افزایش می‌یابد.

نکتهٔ قابل توجه این است که با تشکیل حباب، اثرات رطوبت به مراتب حادتر می‌شود و در نهایت منجر به رشد هرچه سریعتر حباب می‌گردد. از طرف دیگر با توجه به منحنی شکل ــ ۱ معلوم می‌شود که اگر درصد رطوبت نسبی در حدود ۵۰٪ باقی بماند قطر نهایی حباب افزایش محسوسی نخواهد داشت. بنابراین، نتیجه فوق را می‌توان به عنوان یک امر مهمّ در کنترل رطوبت تلقی کرد.



شکل ــ ۱: اثر رطوبت نسبی بر قطر نهایی حباب حاوی آب در رزین[1].

گذشته از رطوبت نسبی، یکی از روشهای جلوگیری از افزایش قطر حباب حاوی آب کنترل فشار در رزین است. در یک ورقهٔ کامپوزیتی، برای جلوگیری از پتانسیل رشد حباب در هر دمایی، مقدار فشار باید در رابطهٔ زیر صدق کند:

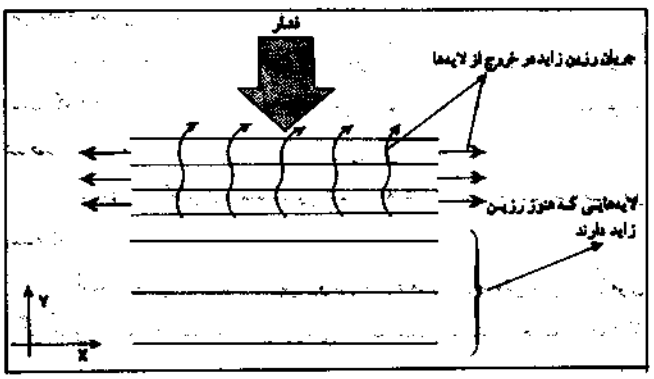
$$P \geqslant ۴,۹۶۲\times۱۰^{۳}\ exp\,(\frac{-۴۸۹۲}{T})\ (RH)_o \qquad (۳)$$

در رابطهٔ فوق $(RH)_o$ رطوبت نسبی اولیه در داخل رزین، T مقدار دما در طول چرخهٔ پخت ($^\circ K$) و P فشار داخل رزین است. (در ارتباط با مقدار P، با تقریبی مطلوب، آن را می‌توان فشار تحمیل شده در طول چرخهٔ پخت فرض کرد.) رابطهٔ (۳) برای حباب حاوی آب خالص و برای هر نوع سیستم الیاف آغشته به رزین صادق است؛ از این رابطه می‌توان نتیجه گرفت که هرچه فشار داخل رزین بیشتر باشد، پتانسیل رشد حباب کاهش می‌یابد. البته در افزایش فشار محدودیتهایی وجود دارد و این افزایش به مقدار فشار تحمیل شده در طول چرخهٔ پخت بستگی دارد و عدم کنترل فشار سرانجام در فراوردهٔ کامپوزیتی تنشهای پس‌ماند ایجاد می‌کند که به این ترتیب کیفیت فراورده مطلوب نخواهد بود *[1, 2, 8]*.

تفاوت عمدهٔ حبابهای آب و هوا از نظر کیفیت کامپوزیت در نحوهٔ تشکیل آنهاست، زیرا همان‌طوری که در قبل ذکر کردیم حبابهای حاوی آب عمدتاً به خاطر کنترل نامطلوب رطوبت ایجاد می‌شوند، در حالی که حبابهای هوا می‌توانند به راههای مختلف در داخل رزین تشکیل شوند که به‌طور مختصر به شرح آنها می‌پردازیم.

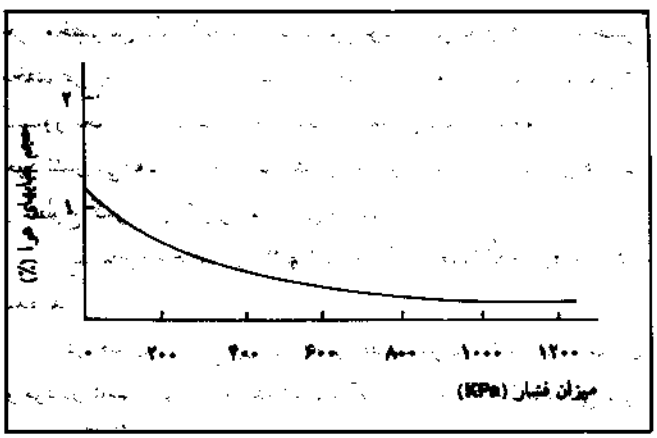
دو علت مهم تشکیل حبابهای هوا عبارت‌اند از: عدم یکنواختی توزیع رزین و وجود الیاف شکسته در لایه‌های آغشته به رزین. برای درک این علتها کافی است روشهای مورد استفاده در تولید یک قطعه کامپوزیتی

را بررسی کنیم. به عنوان مثال در روش لایه‌گذاری (*Lay up*) هنگامی که لایه‌های آغشته به رزین روی‌هم قرار می‌گیرند معمولاً حاوی درصدی از رزین زایدی می‌باشند که با تحمیل فشار در چرخهٔ پخت از میان لایه‌ها خارج می‌شوند. بدیهی است که تنها با یک کنترل دقیق و مقدار معینی فشار تحمیلی می‌توان امیدوار بود که در پایان فرایند پخت توزیع رزین در ورقهٔ کامپوزیتی یکنواخت باشد (شکل ــ ۲).



شکل ــ ۲: نحوهٔ خروج رزین زاید از میان لایه‌های آغشته به رزین [1].

اغلب مشاهده می‌شود که توزیع رزین یکنواخت نیست و در بعضی از قسمتهای آن کمبود یا فراوانی رزین وجود دارد؛ همین مسئله موجب ایجاد فضای خالی (حباب) در داخل رزین می‌شود و به این ترتیب فراوردهٔ کیفیت نهایی خود را از دست می‌دهد. تنها راه جلوگیری از وجود حباب هوا در یک فراوردهٔ کامپوزیتی، کنترل دقیق فرایند پخت و پلیمر شدن و تحمیل به موقع چرخهٔ فشار می‌باشد زیرا فقط زمانی که رزین هنوز به صورت مایع است می‌توان این حبابها را با اعمال فشار ازبین برد. منحنی شکل ــ ۳ ارتباط میان میزان فشار تحمیلی و درصد حجم حبابهای هوا را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچه این فشار یکنواخت‌تر و مقدار آن بیشتر باشد درصد حجمی حبابها کاهش می‌یابد.



شکل ــ ۳: منحنی تغییرات فشار در چرخهٔ فشار با حجم حبابهای هوا [1].

در اینجا نکته قابل توجه این است که زمان تحمیل فشار نقش مهمی را ایفا می‌کند. اعمال فشار باید زمانی صورت گیرد که رزین حالت ژلاتینی دارد، زیرا اگر رزین درحالت جامد باشد، اعمال فشار موجب بروز تنشهای مکانیکی خواهد شد. همان طور که اشاره شد علت دیگر ایجاد حبابهای هوا در رزین شکستگی الیاف است. شکستگی الیاف هم در حین آرایش یافتن الیاف در رزین روی می‌دهد و هم هنگامی که فرایندهای نهایی تولید کامپوزیت اجرا می‌گردد. شکستگی الیاف علاوه بر اینکه موجبات افت مقاومت در مقابل انواع تنشها را فراهم می‌سازد باعث ایجاد فضاهای خالی در داخل رزین می‌شود. در شکل ــ ۴ حبابهای موجود در یک کامپوزیت به وسیله یک میکروسکوپ الکترونی شناسایی شده‌اند. در این شکل قسمتهای روشن نمایانگر این حبابها می‌باشند.

شکل ــ ۴: وجود حباب در کامپوزیت با رزین از نوع اپوکسی، نقاط روشن نمایانگر این حبابها می‌باشند [7].

بطور کلی خطر وجود حباب در کامپوزیت افت مقاومت در مقابل انواع تنشهاست؛ اگر در یک ساختار درصد بالایی حباب وجود داشته باشد ترک خوردگی (*fracture*) در داخل رزین ایجاد و تشدید می‌شود و این امر در نهایت موجب شکستن قطعه کامپوزیتی خواهد شد. در هر حال درصد حباب در کامپوزیت بین ۱٪ تا بیش از ۵٪ متغیر است. تجربه نشان می‌دهد که اگر این درصد در یک قطعه کامپوزیتی حدود ۳ باشد، اثر چشمگیری در کیفیت نهایی آن نخواهد داشت *[1]*.

در انتهای این قسمت از بحث، به معرفی دو روش ساده برای محاسبهٔ درصد حبابهای موجود در یک کامپوزیت اکتفا می‌کنیم:

الف) در این روش اگر بخواهیم علاوه بر حجم حبابها، جرم مخصوص نظری کامپوزیت را نیز محاسبه کنیم، فرمول زیر را بکار می‌بریم.

$$V = ۱۰۰ \times (T_a - M_d) / T_a \qquad (۴)$$

که در آن V درصد حجمی حبابها، T_a جرم مخصوص نظری کامپوزیت و M_d جرم مخصوص اندازه‌گیری شده کامپوزیت است. در اینجا جرم مخصوص نظری را می‌توان از فرمول زیر محاسبه کرد:

$$T_a = ۱۰۰ / (R/D + r/d) \qquad (۵)$$

در رابطهٔ فوق R درصد جرمی رزین در کامپوزیت، D جرم مخصوص رزین، r درصد جرمی الیاف و d جرم مخصوص الیاف است.

ب) این روش هنگامی مناسب است که می‌خواهیم فقط درصد حجمی حبابها را تعیین کنیم و جرم مخصوص نظری اهمیت چندانی ندارد. در این روش فرمولی که مورد استفاده قرار می‌گیرد عبارت است از:

$$V = ۱۰۰ - M_d(\frac{r}{d_r} + \frac{R}{d_R}) \qquad (۶)$$

که در آن M_d جرم مخصوص اندازه‌گیری شده، r درصد حجمی رزین، R درصد حجمی الیاف، d_r جرم مخصوص رزین و d_R جرم مخصوص الیاف در کامپوزیت است.

دقت عمل این دو روش قویاً به ابعاد حبابهای موجود و همین طور نحوهٔ توزیع آنها بستگی دارد و هرچه حبابها کوچکتر باشند و به طور یکنواخت‌تر توزیع شده باشند صحت محاسبات بیشتر خواهد بود [3].

در طول فرایند پخت و پلیمر شدن کنترل دما حائز اهمیت است، زیرا مقدار حرارت تحمیلی در این فرایند با دمای انتقال شیشه‌ای و ماکسیمم دمای پخت رزین در ارتباط است. هر سیستم رزین دارای یک دمای انتقال شیشه‌ای و ماکسیمم دمای پخت است. در صورتی که دمای پخت از ماکسیمم دما بیشتر باشد، در رزین سوختگیهای موضعی ایجاد می‌شود و برعکس اگر دمای پخت بسیار کمتر از ماکسیمم دما باشد، پخت به طور ناقص صورت می‌گیرد [1].

سایر عیبهای دیگر در کامپوزیتها

به طور کلی منظور از عیب و نقص هر گونه تغییرات «منفی» و غیر قابل قبولی است که در رفتار یک ساختار پدید می‌آید. این عیبها به دو دسته تقسیم می‌شوند:

- عیبهای داخلی
- عیبهای خارجی

عیبها در رابطه با نوع و وسعت‌شان می‌توانند در هر سطحی از سازه اثرهای مختلفی داشته باشند. اساساً دلایلی که باعث بروز آنها، به ویژه در سازه‌های هوا فضا می‌شوند عبارت‌اند از:

- اشتباهات در طراحی که می‌توانند به خاطر انتخاب نامناسب مواد ترکیب شونده، اتصال ضعیف بین آنها یا عدم پیش‌بینی صحیح نیروهای وارده و تنشهای احتمالی صورت گیرند.
- اشتباهات در فازهای مختلف فرایند تولید مثلاً در لایه‌گذاری یا پلیمر شدن.
- اشتباهات در محاسبه و تحلیلها که می‌توانند به دنبال اشتباهات در محاسبهٔ استاتیکی یا دینامیکی سازه‌ها و یا در ارزیابی دوام آنها صورت گیرند.
- اشتباهات در سوار کردن قطعات مختلف که احتمالاً دارای تنشهای پس ماند می‌باشند.
- اشتباهاتی در عملکرد، به ویژه جا به جا کردن غیر محتاطانه سازه، تنشهای موضعی و غیره.
- اشتباهات تکنیکی و انسانی که به ویژه در سازه‌های هوا فضایی به خاطر خرابی سیستمهای کنترل، عملکرد نامطلوب سیستمهای کنترل، تماس با هوا، فرودهای اضطراری و سهل‌انگاری در بازرسی، بروز می‌کنند.
- آثار محیطی از جمله باران، گردوغبار، اشعه‌های یونیده و سرانجام تماس طولانی با محیط گرم یا سرد.

قسمت عمدهٔ عیبها ناشی از سهل‌انگاری در طول فرایند تولید است که قبلاً به آنها اشاره شد و مهمترین آنها ایجاد حبابهای آب، هوا و عناصر ناشناخته در داخل سیستم رزین می‌باشد.

روشهایی که برای شناسایی عیوب به کار گرفته می‌شوند دو دسته‌اند:

الف) روش مخرّب: با این روش سازهٔ مورد آزمایش پس از آزمون دیگر قابل استفاده نیست. این روشی است که باید در حد امکان از بکارگیری آن خودداری نمود. ولی در مواردی که سازه مورد آزمایش دیگر قابل استفاده نباشد، برای شناسایی علت نقص و عیب آن می‌توان از روش مخرّب استفاده کرد.

ب) روش غیر مخرّب: با این روش می‌توان عیب را بدون وارد آوردن هیچ گونه آسیبی به سازه شناسایی کرد. در اینجا به روش غیر مخرّب اشاره می‌کنیم، زیرا از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. تنها یادآوری این نکته کافی است که وقتی روش غیر مخرّب کارایی مطلوب را در شناسایی عیبها نداشته باشد، ناچاراً از روش مخرّب استفاده می‌کنیم.

در معرّفی روشهای غیر مخرّب به سه نوع سازه کامپوزیتی که به طور عمده در صنعت هوا فضا از آنها استفاده می‌شوند اشاره می‌کنیم که عبارت‌اند از:

- ورقه‌های کامپوزیتی که مثلاً با تکنیک لایه‌سازی تولید می‌شوند.
- سازه‌های ساندویچی (لانه زنبوری). این سازه‌ها نوع خاصی از کامپوزیت می‌باشند. روش ساخت آنها به این ترتیب است که ماده‌ای با جرم مخصوص پایین (که مغز نامیده می‌شود) بین دو ورقه با جرم مخصوص بیشتر قرار می‌گیرد. در نتیجه سازه به دست آمده دارای یک گشتاور لختی بزرگ است که در نتیجه در مقابل تنش مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد. این نوع سازه‌ها در لبه‌های حمله و فراز بالهای هواپیما و سطوح کنترل آن کاربرد فراوانی دارند.
- سطوح محافظ (روکشها) که معمولاً از چند لایه و ورقه تشکیل شده‌اند.

در جدول ۱ انواع روشهای غیر مخرّب برای شناسایی عیبهای موجود در کامپوزیتها آورده شده است و گذشته از آن یک مقایسه کلّی بین روشهای گوناگون ارائه شده است. هر کدام از این روشها بر مبنای برخی از خواص فیزیکی اجسام می‌باشند؛ به این صورت که، هنگامی که سازه

تحت آزمون قرار می‌گیرد بخاطر وجود عیبها ممکن است تغییراتی در خواص فیزیکی و مکانیکی آن مشاهده شود که با بررسی این تغییرات می‌توان از وجود عیب، نوع آن و بالاخره بزرگی آن اطلاعاتی را کسب نمود.

جدول ۱ ــ روشهای شناسایی عیوب مختلف در سه نوع سازهٔ کامپوزیتی

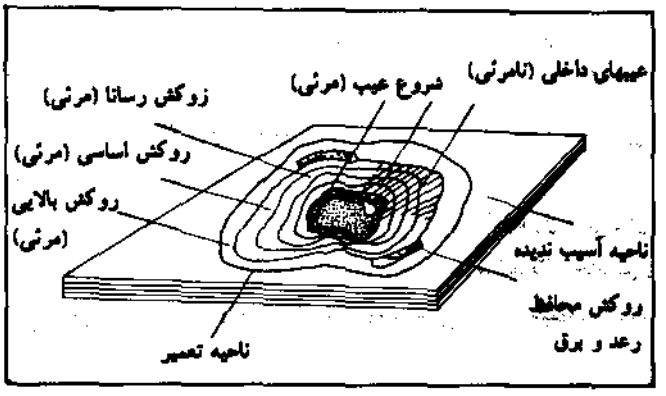
نوع عیب		روشهای غیر مخرب	بازرسی عینی با کمک تجهیزات کمکی	بازرسی عینی بدون استفاده از تجهیزات کمکی	آزمون رزونانسی	آزمون ضربه‌ای	اندازه‌گیری قابلیت انتقال حرارت	رادیوگرافیک	ماورای صوت	اشعه ایکس
		بسیار مطلوب و مناسب = ■								
		مناسب = ●								
		تا حدی مناسب = ◐								
		نامطلوب = ○								
در سطوح محافظ (روکش)	جدایی سطح محافظ (روکش)		■	○	○	○	○	○	○	○
	تکه‌های حل شده		●	○	○	○	○	○	○	○
	خراش		●	○	○	○	○	○	○	○
	رنگ پریدگی		●	○	○	○	○	○	○	○
	حبابهای داخلی		●	●	●	●	●	●	●	●
	عیب روکش رسانای حرارت		●	●	●	●	■	○	○	○
	عیبهای مربوط به محافظ ناشی از رعد و برق		●	●	●	●	●	○	○	○
	چسبندگی سطح محافظ		●	○	○	●	●	○	○	○
	عیبهای بین سطوح محافظ و ورقه کامپوزیت		●	○	○	○	●	○	○	○
عیوب در ورقه	الیاف شکسته		■	●	●	○	●	○	●	■
	الیاف شکسته و ترک‌خوردگی		■	●	●	●	●	○	●	●
	عیب در الیاف و ماتریس		○	●	●	○	●	○	●	●
	پوسته پوسته شدن سازه		○	■	■	○	●	●	●	●
	جدایی بین لایه‌ها		○	●	●	●	●	●	●	●
	خراش‌خوردگی		○	○	●	●	●	●	●	●
در ساختار ساندویچی	واژگون شدن لانه زنبوری		■	○	○	○	○	●	○	●
	کشیده شدن لانه زنبوری و تغییر فرم عینی آن		■	●	○	○	○	●	●	●
	فشرده شدن محدودهٔ لانه زنبوری		■	●	○	○	○	●	●	●
	عیبهایی در اتصال لانه زنبوری		■	●	●	○	○	●	●	●
	نفوذ عناصر ناخواسته		■	●	●	○	○	●	●	●
	نفوذ آب در مغز ساندویچ		■	●	◐	○	○	●	●	●
	جدایی سطوح بالایی و پایینی		○	■	■	●	○	○	●	●
	عیبهایی در اتصال		■	○	●	●	○	○	●	●
	عیبهایی ناشی از عدم چسبندگی		■	○	●	●	○	○	●	●

در جدول ۱ این گروه‌ها به دو دسته تقسیم شده‌اند: در اولین گروه بازرسی عینی با کمک تجهیزات کمکی و یا بدون تجهیزات کمکی امکان‌پذیر است که عمدتاً عیبهای خارجی (یا مرئی) را می‌توان شناسایی نمود. در گروه دوم که شامل آزمون‌های اشعه ایکس، ماورای صوت، رزونانس، ترموگرافیک، اندازه‌گیری قابلیت انتقال حرارت و خمش می‌باشند عیبهای نامرئی را می‌توان مورد مطالعه قرار داد.

در هر حال، از بحث در مورد اصول فیزیکی و چگونگی عملکرد روشهای فوق‌الذکر خودداری می‌کنیم و علاقمندان می‌توانند به منابع آمده در پایان مقاله رجوع کنند [3,4].

جدول ۱ اکثر عیبهای ممکن را معرفی می‌کند و فقط یادآوری می‌شود که این عیبها با طبقه‌بندی که در آغاز مقاله صورت گرفت مطابقت دارد.

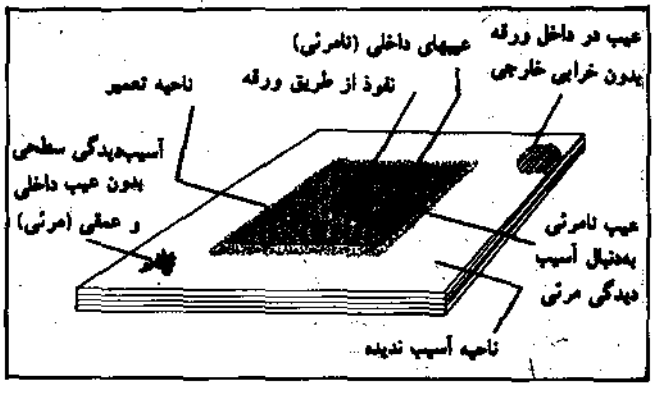
به طور کلی اگر عیبها با چشم غیر مسلح قابل مشاهده باشند، آنها را مرئی می‌خوانند و در صورتیکه به کمک دستگاهها و تجهیزاتی از قبیل میکروسکوپ الکترونی قابل رؤیت باشند آنها را نامرئی می‌خوانند. برای مثال در شکل ــ ۵ که عیبهای بالقوه در سطوح روکشهای رسانا و محافظ رعد و برق را نشان می‌دهد، عیبهایی که در داخل روکشها قرار دارند نامرئی و بقیه مرئی می‌باشند.



شکل ــ ۵: عیبهای بالقوه در سطوح محافظ روکشهای رسانا و محافظ رعد و برق [4]

با شناسایی این عیبها بوسیلهٔ روشهای غیرمخرب که در جدول ۱ آمده است، ناحیه‌ای را مشخص می‌کنیم که به‌ناحیه تعمیر معروف است. در این ناحیه کلیه عیبهای شناسایی شده قرار دارند. لازم به‌یادآوری است که یک عیب احتمالی فقط در منطقه‌ای که ایجاد شده است محصور نمی‌ماند. مثلاً ترک‌خوردگی و شکاف که ابتدا از نقطه‌ای شروع می‌شود، به‌طور مسلم دامنهٔ تأثیر آن بمرور زمان گسترده‌تر خواهد شد و بهمین جهت آن را نمی‌توان محدود بهمان ناحیهٔ شروع دانست. اینجاست که مسئله ناحیه تعمیر مطرح می‌شود.

در شکل ــ ۶ نیز عیبها به‌دو دسته تقسیم می‌شوند: عیبهای داخلی (نامرئی) و عیبهای خارجی و سطحی (مرئی). از شناسایی عیبهای ممکن بوسیلهٔ یکی از روشهای غیرمخرب آمده در جدول ۱ ناحیه تعمیر را می‌توان مشخص کرد.



شکل ــ ۶: عیبهای احتمالی در ورقهٔ کامپوزیت [4]

از طرفی دیگر در شکل ــ ۶ ملاحظه می‌شود که عیبهایی بر روی سطوح ورقه کامپوزیت می‌توانند ایجاد شوند (از جمله خراش‌خوردگی و *buckling* که به‌طور عینی قابل مشاهده‌اند) که در صورت تشخیص درست و تعمیر به‌موقع از ورقه کامپوزیت می‌توان دوباره استفاده کرد.

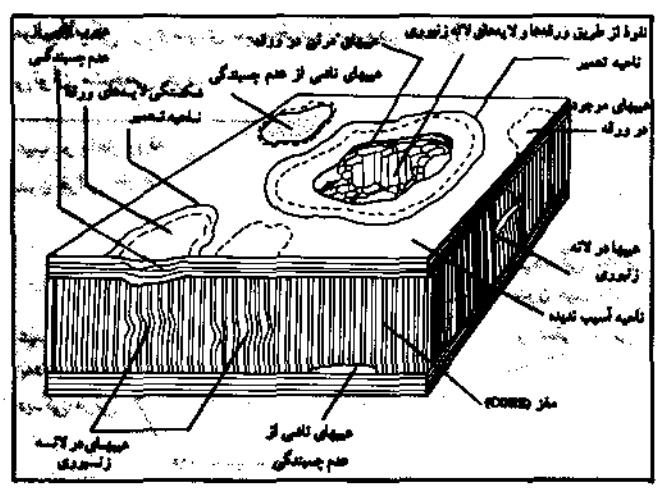
و سرانجام در شکل ــ ۷ یک ورقه از نوع لانه زنبوری (ساندویچی) نشان داده شده که انواع عیبهای ممکن در آن مشخص گردیده است. اشاره می‌شود که سازه ساندویچی در اینجا از ورقه‌های نازک آلومینیومی درست شده است که به‌شکل لانه زنبوراند و مغز را تشکیل می‌دهند. این مغز *(core)* میان دو ورقهٔ بالایی و زیری قرار گرفته است. در شکل ــ ۷ نواحی تعمیر نیز مشخص شده‌اند که بدنبال شناسایی محدودهٔ هر کدام از عیبها معین می‌گردد.

از مقایسهٔ سه شکل ۵، ۶ و ۷ با یکدیگر و با کمک جدول ۱ می‌توان چنین نتیجه گرفت که به‌طورکلی در ارتباط با نوع سازه، اختلاف چندانی در شناسایی ناحیه تعمیر وجود ندارد و تفاوت اصلی در نوع عیبهایی است که در این سه سازه می‌توان شناسایی کرد.

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، هنگامی که یک عیب شناسایی می‌شود، ارزیابی محدودهٔ آن و به‌طور کلی ناحیهٔ اطراف آن که تحت تأثیر عیب مزبور قرار گرفته‌اند بسیار مهم است، زیرا به‌این ترتیب می‌توان میزان آسیب‌دیدگی سازه را در ارتباط با افت کارایی آن بررسی کرد. در نتیجه زمانی که صحبت از وجود یک عیب و نقص می‌کنیم، بهتر است این نکته را مشخص کنیم که آن عیب تا چه حد در سازه پیشرفت کرده است.

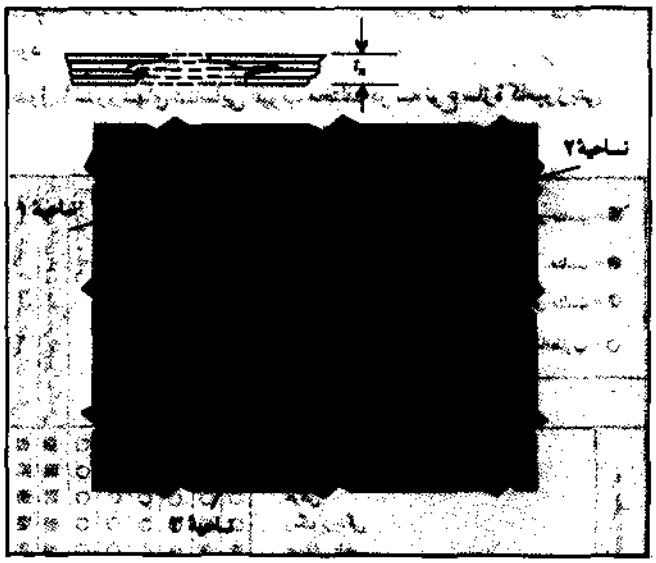
حال با یک مثال نحوهٔ ارزیابی محدودهٔ عیب در یک ورقهٔ کامپوزیتی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این روش برای سایر سازه‌های کامپوزیتی که قبلاً به‌آنها اشاره شد نیز قابل اجراست.

در شکل ــ ۸ یک ورقه کامپوزیتی نشان داده شده است. حال فرض کنید که با یکی از روشهای ذکر شده در جدول ۱، مثلاً سه نوع عیب را شناسایی کرده‌ایم و اینک می‌خواهیم بدانیم که این عیبها تا چه حد



شکل ــ ۷: عیبهای موجود در سازهٔ ساندویچی [9]

به‌سطح کامپوزیت آسیب رسانده‌اند. به‌عبارت دیگر نواحی‌ای که تحت تأثیر این عیبها قرار گرفته‌اند، کدامند.



شکل ــ ۸: چگونگی تعیین یک عیب و محدودهٔ اثر آن [4]

در مرحلهٔ اول پارامترهای زیر را تعریف می‌کنیم:

L_1، L_2 و L_3: طول ماکسیمم هر عیب

A_1، A_2 و A_3: ناحیهٔ هر عیب

d_1، d_2 و d_3 کمترین فاصله میان هر عیب

t_n: مقدار نفوذ عیب در لایهٔ کامپوزیت

به‌طور دقیقتر فاصله‌های d_1، d_2 و d_3 را می‌توان چنین توصیف کرد:

فاصلهٔ بین A_1 و A_2 با d_1 مشخص می‌شود: $d_1 > (L_1 + L_2)$

فاصلهٔ بین A_2 و A_3 با d_2 مشخص می‌شود: $d_2 > (L_2 + L_3)$

فاصلهٔ بین A_1 و A_3 با d_3 مشخص می‌شود: $d_3 > (L_1 + L_3)$

به‌این ترتیب سطوح آسیب دیده که در آنها هر کدام از عیبهای فوق قرار دارند و آنها ۱، ۲ و ۳ نامیده‌ایم به‌طریق زیر بدست می‌آیند:

ناحیهٔ ۱: $A_1 + A_2 + A_3 = \%2$ (از ناحیهٔ ۱)

ناحیهٔ ۲: $A_1 + A_2 + A_3 = \%5$ (از ناحیهٔ ۲)

ناحیهٔ ۳: $A_1 + A_2 + A_3 = \%10$ (از ناحیهٔ ۳)

درصدهای فوق میزان آسیب دیدگی سطح را در مورد هر کدام از سه عیب مشخص می‌کنند. باشناسایی نواحی آسیب دیده می‌توان دریافت که سازهٔ کامپوزیتی تا چه حد باید تعمیر و بازسازی شود.

بُعد اقتصادی و هزینه تعمیر و بازسازی سازه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

به‌طور کلی هنگامی که عیبهای موجود در یک سازه شناسایی می‌شوند دو راه باید درنظر گرفته شود: یکی اینکه سازه را در صورت امکان تعمیر کرد و دوباره به کار برد و دوم اینکه آن را کنار گذاشت و از دیگری استفاده کرد. انتخاب یکی از دو راه به نوع عیب موجود در سازه بستگی دارد.

معمولاً وقتی که عیب یا خرابی به‌طور عینی قابل مشاهده باشد، سازه را می‌توان بازسازی موضعی کرد. به‌طور مثال، می‌توان روکش محافظ را تعویض یا حبابهای سازه را با نوعی گریس پر کرد. در صورتی که حاشیه‌های سازه ورقه‌ورقه شده باشند می‌توان با ترکیبات رزین که دارای ویسکوزیتهٔ کمتری است یک فاز پلیمر شدن موضعی ایجاد و به این ترتیب سازه را تعمیر کرد.

در بسیاری موارد بعد از شناسایی عیب و ارزیابی شدت اثر آن، مراحل پخت و پلیمر شدن به‌طور موضعی بر روی سازه اعمال و به این ترتیب از تکرار این مراحل بر روی کلّ سازه جلوگیری می‌شود. البته یادآوری این نکته لازم است که مسلماً راه حل‌هایی از این قبیل برای همهٔ عیبها و همیشه مفید نیستند.

هنگامی که در یک سازهٔ کامپوزیتی درصد حبابهای خالی قابل توجه باشد، عملاً این سازه قابل تعمیر و استفاده نیست؛ به‌ویژه در شرایطی که این حبابها در داخل رزین (یا ماتریس) باشند؛ همچنین وقتی که گروهی از الیاف در ماتریس شکسته باشند مقاومت سازه به‌طور چشمگیری کاهش می‌یابد و چنین عیبی در کامپوزیت به هیچ وجه قابل چشم‌پوشی یا تعمیر نیست.

بنابراین عیبهای خاصی چون درصد بالای الیاف شکسته یا حباب در سازه هیچ‌گونه راه حل مطلوب برای تعمیر و بازسازی ندارند.

مسئله تعمیر و بازسازی یک کامپوزیت از نظر اقتصادی بسیار پراهمیت است و قبل از انجام هر کاری درنظر گرفتن میزان هزینهٔ این تعمیرات ضروری است. در ارتباط با نوع سازه، به‌طور معمول وقتی هزینهٔ تعمیر ۶۰ درصد قیمت سازهٔ نو باشد، این تعمیر با صرفه نیست. با این حال تصمیم در مورد تعمیر یا تعویض سازه در هر موردی متفاوت است. به هر صورت کیفیت تعمیر عیب را به طرق زیر می‌توان بررسی کرد:

- ارزیابی و اثبات ناحیه تعمیر شده بوسیله روش غیر مخرّب؛
- نمونه‌برداری ناحیه مورد تعمیر و ارزیابی بوسیلهٔ روش مخرّب؛
- ارزیابی مدت دوام سازه که بعد از تعمیر قابل انتظار است.

با توجه به مطالبی که در اینجا مورد بحث قرار گرفت، اشاره می‌شود که خرابی در یک کامپوزیت و به‌طور کلی سرچشمه بروز آن از طرف کارخانهٔ سازنده همیشه ذکر می‌گردد، این اطلاعات در صورت امکان آسیب‌پذیری زودرس سازه را کاهش می‌دهند.

در هر حال، برای جلوگیری از بروز عیب می‌توان نکات زیر را رعایت کرد:

- بررسی کامل طرح سازه؛
- شناسایی محل احتمالی بروز عیب و نوع آن قبل از ایجاد هرگونه خرابی؛
- کنترل دقیق و تعمیرات دستی؛
- جمع‌آوری اطلاعات کافی در مورد مراحل مختلف فرایند تولید *[1,4]*.

نتیجه‌گیری

بسیاری از عیوب در کامپوزیتها ناشی از بی‌احتیاطی در طول فرایند تولید سازه می‌باشند معمولاً عیبهایی هستند که در فرآوردهٔ نهایی به ندرت می‌توان آنها را از بین برد. مهمترین عیبهایی که در طول فرایند تولید ایجاد می‌شوند، حبابها می‌باشند. تغییر مکان و جابجایی آنها در داخل رزین هنوز در دست مطالعه و بررسی است. با این حال، از طریق آزمایشها و محاسبات متعدد معلوم شده است که وقتی درصد حجمی این حبابها در حدود ۳ باشد، تحول قابل توجهی در خواص مکانیکی کامپوزیت بوجود نمی‌آید. همان‌طور که اشاره شد، شرایط ایجاد حبابها متأسفانه کم نیستند و حتی از طریق الیاف شکسته، الیاف جابه‌جا شده، فراوانی یا کمبود رزین، رطوبت و گرما تشکیل می‌شوند. در ضمن هوا، رطوبت، آب و دیگر عناصر ناشناخته می‌توانند در آنها نفوذ کنند.

REFERENCES

[1] Sabbaghi Hamid, Thesis, Composite Materials Technics and Applications, 1988, Rome (Italy)

[2] Kardos J. L., Dudukovic M. P., and Dave R., Epoxy Resins and Composites, Advances in Polymer Science, 1980

[3] ANSI/ASTM D 2734 – 70, Standard Test Methods for Void Content on Reinforced Matrix

[4] Altman und Rimmel K. H., Friedrichshafen, Scandens und Reparaturbetrachtungen für Faserverstärkte, Kunstoff stukturen an Flugzeugen, Kunstoff, 1982

[5] Davis H. E., Troxell G. E., Hauck. G. F. W, Testing of Engineering Materials. 4th Ed ., 1982

[6] Introduction to Composite Materials, Tecnomic Publishing Co., 1980, PP. 330 – 342

[7] Gill. R. M. Carbon Fibers in Composites

[8] Kelly A. and Rabotnov Yu. V, Handbook of Composites, Vol 4. "Fabrication of Composites"