

کاربرد کامپوزیتها در صنایع هوا - فضا

Application of Composites in Aerospace Industry

تألیف: مهندس حمید صباغی

در دهه اخیر مواد مرکب، کامپوزیتها، پیشرفت شایانی کرده اند و این به دلیل ویژگیهای منحصر به فردی است که در این مواد به چشم می خورد. امکان به کارگیری کامپوزیتها در بسیاری از زمینهها به ویژه در صنعت هوا - فضا به خاطر خواص استثنایی از قبیل مقاومت، سختی، سبکی، پایداری گرمایی و غیره است که این مواد از خود نشان می دهند و این امکان را فراهم می سازند که بتوان به افزایش کارایی و عملکرد یک ساختار هوا - فضا کمک کرد.

از طرفی دیگر تنوع فرایندها و فرآوردهها باعث شده است که چشم انداز توسعه و پیشرفت در این زمینه هرچه بیشتر وسیع شود. توانایی استفاده از مواد مرکب امروز به عنوان یک هنر محسوب می شود زیرا بسیاری از مسائل که در مورد کاربرد فلزات سنتی هر چند پیشرفته وجود

واژه های کلیدی:

ساختار، فرایند، بار مفید، لایه سازی، هوا - فضا

ساختارهایی که در صنعت هوا - فضا مورد استفاده قرار می گیرند معمولاً با مواد مرکب ساخته می شوند؛ زیرا این مواد دارای ویژگیهایی از قبیل نسبت مقاومت و وزن و نسبت سختی و وزن بالا، پایداری بهتری و غیره می باشند. هزینه نسبتاً بالای کامپوزیتها را می توان با صرفه جویی در وزن ساختار توجیه نمود. هدف از این مقاله بررسی دلایل انتخاب چنین موادی در صنعت هوا - فضا می باشد.

Key Words:

Structure, Process, Pay Load, Lay up, Aerospace

داشته و دارند از طریق یک ترکیب مناسب از این مواد و انتخاب فرایندی مطلوب حل‌شدنی به نظر می‌رسد.

یکی از عملیات مهمی که در فرایندهای مختلف وجود دارد کنترل کیفیت فرآورده‌ها می‌باشد، زیرا با وجود اینکه کامپوزیتها و سزگیهای فراوانی از خود نشان می‌دهند اما کیفیت نامطلوب آنها عواقبی وخیم می‌تواند به همراه داشته باشد.

برای بررسی علل پیشرفت و کاربرد مواد مرکب در صنعت هوا - فضا باید مروری هرچند خلاصه بر تاریخچه پیدایش آن انجام داد. آنچه امروز به عنوان کامپوزیت شناخته شده است در حقیقت تازگی چندانی ندارد و برعکس در بسیاری از زمینه‌ها دارای ریشه کهنی است. به عنوان مثال، اضافه کردن کاه به گل نمونه پارزی از یک کامپوزیت است که در آن از کاه به عنوان الیاف و از گل به عنوان ماتریس می‌توان نام برد. در همین راستا، بتون آرمه نیز به عنوان یکی از اساسی‌ترین مواد مرکب در ساختارهای ساختمانی به حساب می‌آید که در آن وجود اجزاء مسلح در بتون برای افزایش مقاومت ساختارهای بتونی در مقابل انواع تنشها می‌باشد.

ورود کامپوزیت در صنعت هوا - فضا نیز به خاطر رفع نیازهای استثنایی و منحصر به فردی است که وجود دارند و به جرأت می‌توان گفت که موفقیت کامل و ادامه پیشرفت صنایع هواپیمایی در گرو پیشرفت و تکامل کامپوزیتها و تکنیکهای مربوط به آن است.

به‌طور کلی پروژه طراحی و ساخت یک هواپیما با یک ماشین تفاوت زیادی دارد. محسوسترین آنها تفاوت وزن و نسبت وزن و مقاومت است، زیرا یک هواپیما باید سبک باشد اما در عین حال مقاومت خوبی در مقابل انواع تنشها و نیروهای وارده نشان بدهد. سبک بودن هواپیما باعث می‌شود که نیازی به نیروی جلو برنده عظیمی نباشد و به این ترتیب در مصرف سوخت صرفه جویی شود. در مورد مقاومت مطلوب و بهینه کردن خواص مکانیکی فاکتور ایمنی نیز وجود دارد که به مراتب مهمتر است و نیز مسائلی از قبیل پایداری استاتیکی، دینامیکی و گرمایی وجود دارند که هر یک اهمیت ویژه‌ای دارند. به هر صورت این نکته مهم است که سبکی هواپیما منجر به افزایش بار مفید می‌شود که در نهایت موجب افزایش کارائی و صرفه جویی در سوخت خواهد شد.

با توجه به این نکات و دیگر ویژگیهایی که در پروژه یک هواپیما مطرح است، می‌توان گفت که هیچ نوع فلزی را نمی‌توان یافت که مثل یک کامپوزیت چنین مجموعه‌ای از خصوصیات را داشته و نیازهای گوناگونی را جواگو باشد.

داده‌های آمده در جدول ۱ مطالبی را که ذکر شد بهتر روشن می‌کند. در این جدول فلزات سنتی که در صنعت هوا - فضا معمول‌اند با کامپوزیتهایی که کاربرد فراوانی دارند مقایسه شده‌اند. مثلاً چدن را در مقایسه با الیاف کربن و رزین اپوکسی در نظر می‌گیریم؛ ضریب ارتجاعی چدن کمی بیشتر از این کامپوزیت است ولی حدود ۵-۶ برابر سنگینتر

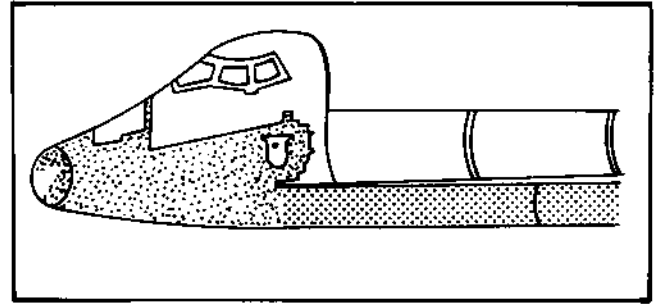
است و این در حالی است که چدن از نظر رسانندگی گرمایی و ضریب انبساط گرمایی در شرایط بدتری نیز قرار دارد. از مقایسه ارقام آمده در این جدول می‌توان به سادگی به علت اینکه مواد کامپوزیت در صنعت هوا - فضا به طور چشمگیری موفق بوده‌اند، پی برد.

جدول ۱ برخی از خصوصیات کامپوزیتها و فلزات سنتی

وزن مخصوص (g/cc)	وزن الیاف + رزین الیاف کربن الیاف پوکی	وزن الیاف + رزین الیاف پوکی	الیاف پوکی	تیتان	چدن	الیاف کربن + رزین الیاف پوکی
۱/۵	۲/۱	۲/۶۸	۲/۶۸	۴/۵	۷/۸	۱/۸
بار شکندگی (Kg/mm ²)	۹۲	۱۷۵	۳۸	۵۲-۹۸	۵۰-۷۰	۱۳۰
ضریب ارتجاعی (Kg/mm ²)	۱۸۰۰۰	۲۴۶۰۰	۷۲۰۰	۱۱۵۰۰	۲۱۰۰۰	۴۵۰۰
رسانندگی گرمایی (W/Cm ²)	۰/۰۵۱۹	۰/۰۱۳۸	۱/۳۸۱	۰/۰۷۲	۰/۱۵	-
ضریب انبساط گرمایی (۱۰ ^{-۶} /°C)	-۰/۷	۵	۲۳/۸	۸/۵	۱۷/۲۸	۸

با توجه به جدول ۱ همچنین می‌توان دریافت که چرا در میان کامپوزیتها، الیاف کربن در کنار رزین اپوکسی کاربرد بیشتری دارند؛ به ویژه می‌توان مشاهده کرد که ضریب انبساط آن حتی منفی است و این امر در مسائل مربوط به پایداری گرمایی حتی در حین فرایند تولید اهمیت بسزایی دارد. در پروژه هواپیمایی شاتل (Shuttle) مشکلات بسیاری به ویژه در رابطه با پایداری گرمایی وجود داشت، که همگی با استفاده از مواد مرکب حل شدند. همان‌طور که می‌دانیم شاتل در پروازهای خود متحمل انواع شک‌های گرمایی می‌شود، به‌ویژه هنگام ورود به اتمسفر تفاضل دما در دماغه مخروطی شکل آن در صورت به کارگیری هر نوع فلز سبب ذوب شدن آن می‌شود؛ اما با کارگیری الیاف کربن (گرافیت) در کنار رزین گرما سخت از نوع اپوکسی نه تنها موجب حل مسئله فوق شد بلکه منجر به کاهش وزن شاتل به میزان ۴۰۰ کیلوگرم شد که این خود به تنهایی نتیجه‌ای بزرگ بود (شکل ۱). البته در این پروژه قطعات زیادی به ویژه سطوح کنترل و جداره‌های خارجی مخزنهای سوخت جامد نیز از مواد

مرکب تهیه شده‌اند و موفقیت چشمگیری در زمینه علم به کارگیری این مواد حاصل گردید.



شکل ۱ - قسمت جلوی هواپیمای شاتل

یکی از مهمترین خواصی که مواد کامپوزیت نشان می‌دهند تغییراتی است که می‌توان در تقارن و همگن بودن آنها ایجاد کرد. امکان انتخاب جهت الیاف‌ها در ماتریس موجب می‌شود که بتوان مقاومت مکانیکی را تغییر داد. به عنوان مثال فرض کنید یک میله متحمل انواع نیروها در جهت محور خود می‌شود ولی نیروهایی در جهت عرضی آن وجود ندارد؛ اگر چه این میله را می‌توان با فلز سنتی ساخت ولی استفاده از یک کامپوزیت این امکان را می‌دهد که با قرار دادن الیافها در جهت محور میله ماکسیمم مقاومت را در همان جهت به دست آورد و به طور محسوسی از وزن میله کاست. به این ترتیب در پروژه یک هواپیماشناسایی نیروهای وارده بر ساختارهای مختلف و به دنبال آن انتخاب فرایند مطلوب برای استفاده از کامپوزیت موجب بهینه کردن کارایی و عملکرد همان ساختار می‌شود. با این حال، بسیاری از قسمتهای هواپیما متحمل نیروهایی در چند جهت می‌شوند که به این ترتیب پیش‌بینی کارایی کامپوزیت در ساخت آن ساختار بسیار پیچیده‌تر می‌شود. در آخرین مطالعات و تحقیقات لایه‌هایی از کامپوزیت ساخته شده‌اند که نیروهای وارده در چندین جهت را بخوبی تحمل می‌کنند.

به طور کلی، پروژه یک هواپیما با یک سلسله فرضیه‌ها، شرایط و مشخصات آغاز می‌شود و رفته رفته با بررسی دقیق و رعایت پارامترهای مختلف، هر چه بیشتر این پروژه بهینه می‌شود و به دنبال آن آزمایشهای مختلف کنترل کیفیت آغاز می‌شود. در این راستا می‌توان گفت که تفاوت عمده‌ای که میان کامپوزیت و فلزات سنتی از نقطه نظر کاربرد آنها در پروژه یک هواپیما وجود دارد وجود اتصالهای چسبنده در مواد مرکب است و اینکه تمام خواص فیزیکی و مکانیکی اجزاء در طول فرایند تولید و چرخه‌های مختلف گرمایی تعیین می‌شوند و به این ترتیب طراحی قطعات کامپوزیت و فرایندهای تولید آنها به طور چشمگیری به هم ارتباط دارند.

از نقطه نظر ساختاری اجزاء یک هواپیما به دو دسته تقسیم می‌شوند:

۱ - سازه یا ساختار اصلی: یک ساختار را هنگامی اصلی می‌نامند

که وجود آن در هواپیما غیر قابل انکار است و نبودن یا خرابی آن منجر به سقوط و نابودی هواپیما می‌شود؛ مثلاً بال یا بدنه هواپیما یک ساختار اصلی (یا از نوع I) است.

۲ - ساختار ثانویه: یک ساختار را هنگامی ثانویه می‌نامند که وجود آن در هواپیما اگر چه ضروری است اما نبودن یا خرابی آن منجر به نابودی و سقوط هواپیما نمی‌شود و به هر طریقی که ممکن است هواپیما را می‌توان فرود آورد؛ مثلاً قسمتهایی از سطوح کنترل.

به عبارتی دیگر می‌توان گفت که ساختار اصلی متحمل بارهای زیادی با شدت زیاد می‌شود و در مقابل در ساختار ثانویه شدت بارها ضعیفتر است. به هر حال، این طبقه‌بندی نشان می‌دهد که ساختار اصلی از نقطه نظر ایمنی بسیار بحرانی می‌باشد و در فازهای مختلف ساخت نیاز به دقت فراوانی دارد.

کاربرد مواد کامپوزیت در صنعت هوا - فضا با به کارگیری آن در ساخت ساختارهای ثانویه آغاز شد و همچنان ادامه دارد؛ اما ضریب اطمینان در این مواد به حدی رسیده است که امروزه در بسیاری از موارد، همان طور که نمونه‌هایی ارائه خواهد شد، ساختار اصلی را نیز با کامپوزیت می‌سازند. [1]

سیر صعودی کاربرد کامپوزیت در ساخت هواپیما در سری هواپیماهای بوئینگ مشخص می‌شود. همانطور که در نمودار شکل ۲ مشاهده می‌شود، این روند با استفاده از الیاف شیشه در هواپیمای B52 آغاز شده است و مصرف آن از ۱ درصد سطوح در تماس با جریان هوا در هواپیمای B52 به ۲۸ درصد در B747 افزایش یافته است. بعلاوه در این نمودار می‌توان مشاهده کرد که در هواپیماهای B767 و B757 استفاده از الیاف گرافیت و کولار به طور چشمگیری افزایش یافته و برعکس از الیاف شیشه استفاده کمتری شده است. البته علل این روند را با کمک جدول ۱ می‌توان بررسی کرد.

در بسیاری از هواپیماهای نظامی و غیرنظامی بسیاری از اجزاء بال، سکانهای افقی و عمودی و غیره با کامپوزیت ساخته می‌شوند و این کاربرد حتی در هواپیماهایی که امروز قدیمی محسوب می‌شوند به چشم می‌خورد. در جدول ۲ نمونه‌ای از قطعات هواپیماهای نظامی ساخته شده با کامپوزیت آورده شده است. [2]

البته لازم به یادآوری است کشورهای که در این زمینه فعالیت می‌کنند به طور کامل در جدول ۲ ذکر نشده‌اند؛ از جمله ایتالیا، سوئد، آلمان، فرانسه و دیگر کشورهای اروپای غربی که به طور گسترده‌ای در این پیشرفت‌ها مشارکت دارند. البته هواپیماهای مدرن و بسیار نوینی در سالهای اخیر ساخته شده‌اند که سعی خواهیم کرد اشاره‌ای هر چند کوتاه به آنها بشود.

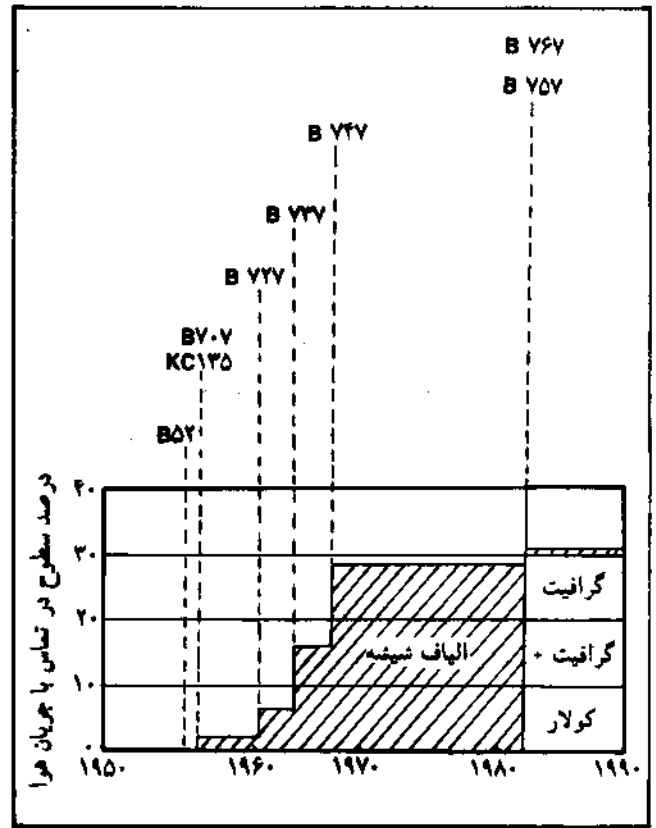
یکی از مهمترین ویژگیهایی که کاربرد کامپوزیت در صنعت هوا - فضا دارد امکان تولید قطعاتی در هواپیماست که اگر با فلزات سنتی ساخته شوند باید جزء به جزء ساخته و سپس در کنار هم قرار گیرند. این کار

باعث افزایش وزن می شود زیرا باید از پیچ و مهره، بست و غیره برای اتصال آنها استفاده شود که در نتیجه نیاز به هزینه و دقت زیادی است. با استفاده از کامپوزیت می توان همین قطعه را به طور یکپارچه و بدون هیچ گونه نیازی به اتصال دهنده ها تولید کرد. این نکته در ساخت سکان عمودی هواپیمای ایرباس (A320) و بسیاری دیگر از هواپیماها رعایت شده است (شکل ۲ - الف).

علاوه بر آن مقطعی تقویت کننده بال نیز به همین سبک ساخته شده اند که باعث صرفه جویی در وزن و وجود قطعات اضافی شده است (شکل ۲ - ب). [3]

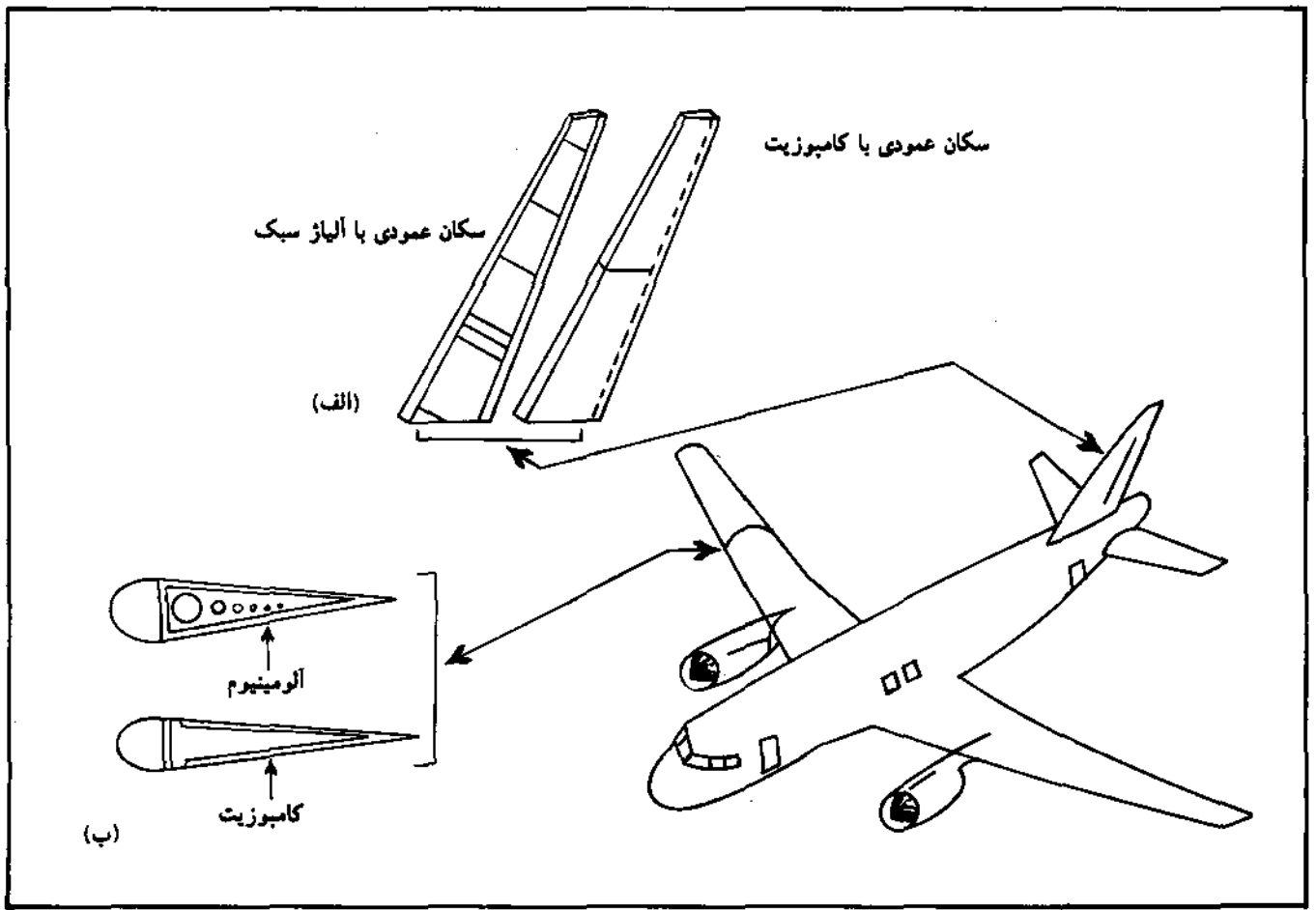
اما مهمترین تکنیکهایی که در ساخت ساختارهای کامپوزیت بکار گرفته می شوند رشته پیچی و لایه سازی هستند. در تکنیک رشته پیچی الیاف آغشته به رزین به روی یک مندرل (mandrel) می پیچند و به طور همزمان مرحله و فاز پلیمر شدن آغاز می شود. چرخه گرمایی اعمال شده باعث می شود که رزین از حالت جامد به حالت مایع تبدیل و در حین پیچش به حالت جامد باز گردد. البته در این تکنیک مسائل زیادی وجود دارند که جای بحث آن اینجا نیست؛ و فقط یادآوری می کنیم که میزان کشش الیافها به روی مندرل و همین طور سرعت گردش مندرل که با یک موتور کنترل می شود در کیفیت نهایی ساختار بسیار مؤثرند. با این تکنیک قطعات استوانه ای شکل ساخته می شوند. نمونه آشکار به کارگیری این تکنیک ساخت جداره های خارجی مخزن سوخت جامد شاتل (Shuttle) است که به طور کامل با کامپوزیت ساخته می شود. با همین تکنیک دماغه مخروطی شکل شاتل، شکل ۱، تولید می شود.

جدول ۲ - نمونه هایی از اجزاء ساخته شده با کامپوزیت در هواپیماهای نظامی



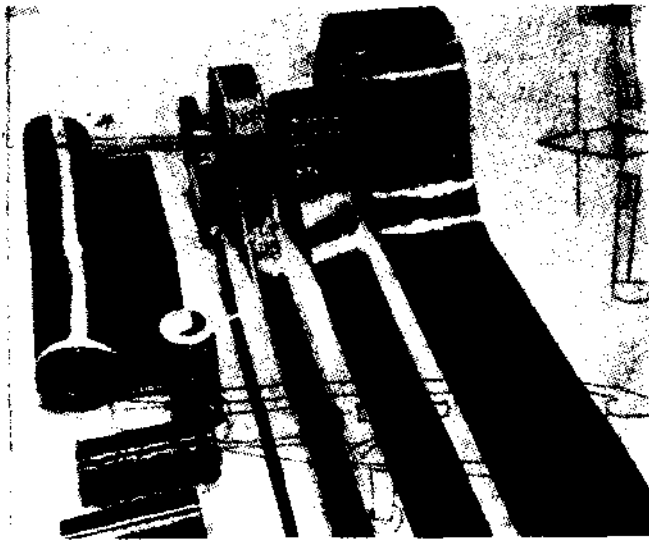
شکل ۲ - سیر صعودی کاربرد کامپوزیت در هواپیماهای بونینگ

کشور	کارخانه	هواپیما	قطعات هواپیما از جنس کامپوزیت
انگلیس	بریتیش ایرکرافت کورپ. (BRITISH AIRCRAFT CORP.)	۱۱-۳ ستریک ماستر - ۱۶۷ (167 STRIKEMASTER)	اجزاء مستحکم کننده، تیرهای کف هواپیما و بدنه سکان عمودی و باریکه های آرایش سکان باریکه های آرایش سکانها
	هاوکر سیدلی (HAWKER - SIDDLEY)	جت پرووست (JET PROVOST)	نوک بال - آنتن ها - درهای ورود لوله پیچش
	وستلند (WESTLAND)	هارییر (HARRIER) 748	مقطع های دم، لپه های فرار و حمله پروانه های قسمت گردنده موتور ...
		واسپ هلی کوپتر (WASP HELICOPTER)	
آمریکا	جنرال دینامیکس (GENERAL DYNAMICS)	اف - ۱۱۱ (F-111)	محورهای دابل بال - روکش های فوقانی بال
	گرومن (GRUMMAN)	اف - ۱۴ (F-14)	درهای خروج چرخ ها - درهای ورود
	لینگ تمکو وولت (LING TEMCO VOUGHT)	آ - ۷ کورس ایر ۲ (A 7 CORSAIR 2)	نوک های بال
	لاک هید (LOCK HEED)	سی ۵ (C5A)	صفحه های کف بدنه
	نورث امریکن راکول (NORTH AMERICAN ROCKWELL)	اف - ۱۰۰ (F-100)	مقطعی بال
	نورث رپ نورایر (NORTHROP NORAIR)	اف - ۵ (F-5)	بردهای حمله و نوک بال
	تله دایان - رایان (TELEDYNE - RYAN)	فایر بی (FIREBEE)	سکان افقی



شکل ۳ - هواپیمای ابرپاس ۸۲۲۰

دلخواه و مورد نظر بوسیله چاقوی مخصوص بریده می‌شوند و در قالب قرار می‌گیرند. در کارخانه‌های پیشرفته معمولاً عمل برش با کامپیوتر



شکل ۴ - نمونه‌ای از الیاف‌های آغشته به رزین

اما تکنیک لایه‌سازی در قالب، بسیار معمول است و در ساخت ساختارهای مسطح و یا ساختارهایی که دارای شعاع انحنا بسیار زیادند به کار گرفته می‌شود. در این تکنیک در آغاز کار الیاف در رزین که بطور جزئی پلیمر شده است قرار دارند و به صورت لایه‌هایی بسیار نازک در دسترس می‌باشند؛ معمولاً این لایه‌های بسیار نازک را لواشک می‌نامند. در ایران، در صنایع نظامی این لایه‌ها به لواشک معروف‌اند ولی در واقع آنها الیاف آغشته به رزین هستند؛ به هر صورت تشابه زیاد بین این لایه‌ها و لواشک موجب شده است که آنها به لواشک مشهور شوند. شکل ۴ نمونه‌ای از این لایه‌ها را نشان می‌دهد که در آن الیاف کربن در رزین گرما سخت از نوع اپوکسی قرار گرفته‌اند.

الیاف آغشته به رزین (لواشک) در یخچال‌های مخصوصی قرار دارند و در دمای حدود 5°C - نگهداری می‌شوند که به این ترتیب مانع نفوذ هرگونه عنصر ناشناخته و اثرات احتمالی رطوبت و هوا می‌شود. هنگام استفاده، آنها از یخچال‌ها خارج می‌شوند و سپس در دمای محیط (23°C) قرار می‌گیرند و برای برش و قالب‌گیری آماده می‌شوند. [1]، [2]

برای ساخت یک ساختار هواپیما با کامپوزیت، این لایه‌ها به شکل

کنترل می‌شود. یادآوری می‌شود که مرحلهٔ برش دادن از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا هرگونه بی‌دقتی و بی‌احتیاطی موجب بروز تنشهای باقیمانده خواهد شد.

بهر صورت لایه‌های بریده شده در قالب‌های لایه‌سازی می‌شوند و سیستم در اوتوکلاو برای تکمیل پخت قرار می‌گیرد. طراحی قالب‌ها که شکل موردنظر را ارائه می‌دهند، از اهمیت زیادی برخوردار است؛ زیرا در طول چرخهٔ گرمایی، دمای بالا نباید در پایداری قالب تأثیری بگذارد. کارخانهٔ سازندهٔ هواپیمای لرفن ۲۱۰۰ (Lear Fan 2100) یکی از پیشرفته‌ترین کارخانجات در این زمینه است زیرا جدید بودن این کارخانه باعث شده است که کلیهٔ سیستم‌های موردنیاز در تولید ساختارهای کامپوزیت به‌بهترین نحو طرح‌ریزی شده‌اند. از جمله قالب‌هایی که برای ساخت قطعات هواپیمای لرفن تهیه شده‌اند همگی از کامپوزیت می‌باشند و به‌این ترتیب مشکلات مربوط به انبساط احتمالی قالب‌ها به‌بهترین روش حل شده است.

چنین انتخابی فوائد زیادی را به‌همراه دارد:

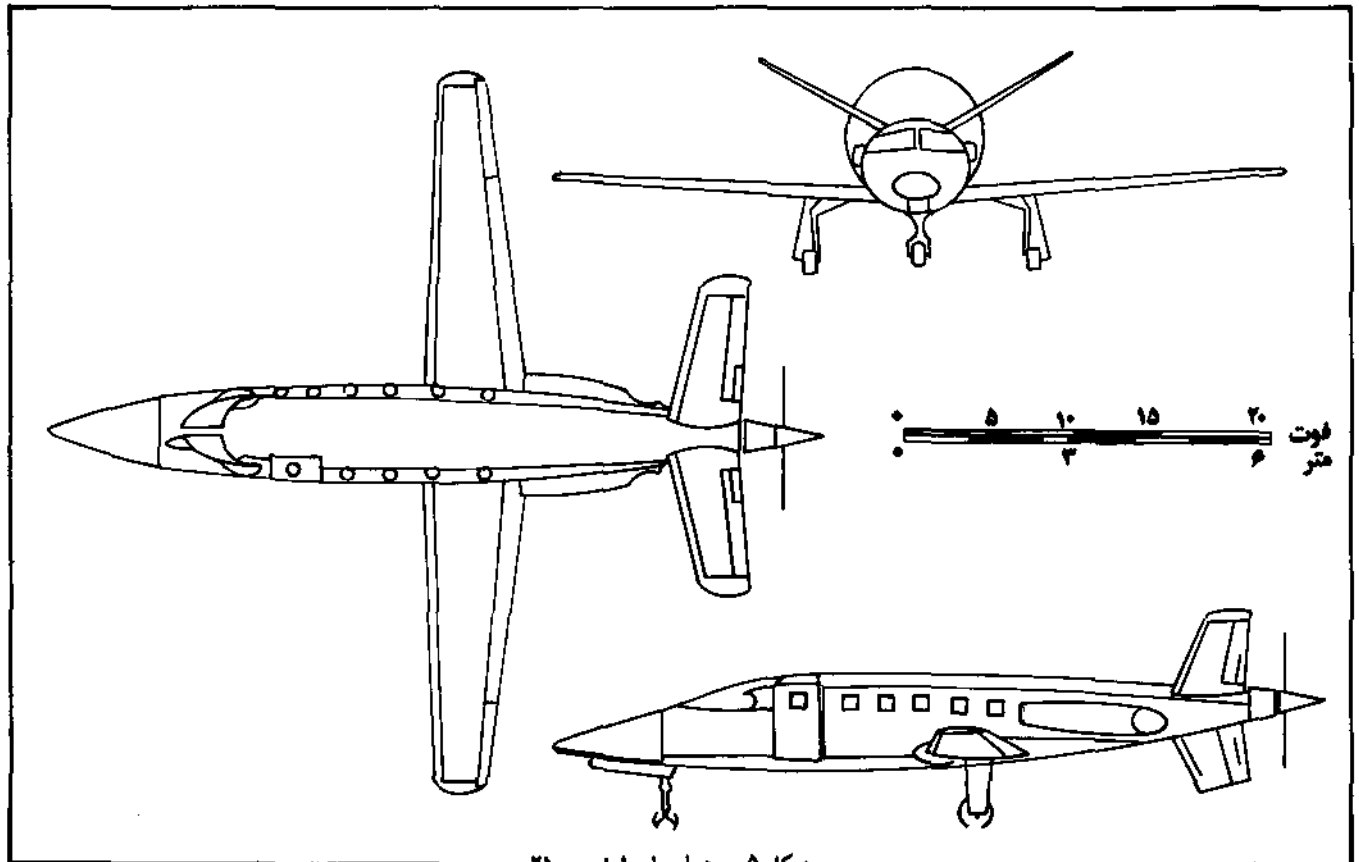
- ۱) مسئله‌ای از قبیل انبساط گرمایی دیفرانسیلی بین قالب و قطعهٔ مورد ساخت وجود ندارد. این موضوع هنگامی که ساختار طولی و یا انحنا زیادی دارد بسیار مفید است.
- ۲) وزن و گرمای ویژهٔ کمتر در مقایسه با ابزار و قالب‌های سنتی

فلزی، زمانهای گرمایش و سرمایش را کوتاه‌تر می‌کند. به‌علاوه قالب‌های سبکتر امکان انتقال سریع و آسان را فراهم می‌سازند.

۳) قالب‌های لایه‌سازی به‌طور آسانتری با استفاده از تکنیک لایه‌سازی لواشکها ساخته می‌شوند.

شکل ۵ هواپیمای لرفن ۲۱۰۰ را در نماهای مختلف نشان می‌دهد. حدود ۷۰ درصد از وزن ساختار این هواپیما از کامپوزیت تشکیل شده است.

جدول ۳ فهرست قطعاتی از هواپیما که با این مواد ساخته شده‌اند را ارائه می‌دهد. روکشهای بال، بدنه و سطوح کنترل همگی با تکنیک لایه‌سازی ساخته شده‌اند (در مورد چرخه‌های پخت با لایه‌های الیاف آغشته به‌رزین که به‌کار گرفته شده توضیحی مختصر خواهیم داد). یادآوری می‌شود که اینگونه طرز عمل امروزه در اکثر کارخانه‌های سازنده هواپیمای کامپوزیتی معمول است و تفاوت چندانی ندارد. همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود عمدتاً فیبرهای کربن به‌صورت بافته‌های پیچیده در لایه‌ها قرار می‌گیرند. الیاف کربن از نوع تُرنل ۳۰۰۰ (Thornel 3000) در کارخانهٔ یونیون کارباید (Union Carbide) تولید شده‌اند و الیاف مصنوعی از نوع کولار است که ساخت کارخانهٔ دوپون (DuPont) می‌باشد رزینهای مورد استفاده گرما سخت و از نوع اپوکسی می‌باشند به این ترتیب که با الیاف کربن رزین اپوکسی باکد اپوکسی رزین ۹۳۲



شکل ۵ - هواپیمای لرفن ۲۱۰۰

مواد مصرفی	اجزا ساختار	ساختار
<p>— رشته‌های پیچیده الیاف کربن به صورت لوانسک و نوارهای باریک یک سویی و استفاده از تکنیک لایه‌سازی</p> <p>— رشته‌های پیچیده الیاف کربن</p>	<p>● روکشهای پوششی فوقانی و تحتانی</p> <p>● تیرهای اصلی به صورت یک پارچه</p> <p>● تیرکهای عرضی در بال</p>	تیر
<p>— رشته‌های پیچیده الیاف کربن به صورت لوانسک و نوارهای باریک یک سویی</p> <p>— رشته‌های پیچیده الیاف کربن در اتصال پسالانه زنبوری نسومکس (NOMEX) برای تشکیل صفحه‌های ساندویچ.</p> <p>— رشته‌های پیچیده الیاف کربن و نوارهای باریک</p>	<p>● صفحه‌های روکش اصلی</p> <p>● تیغه فشار</p> <p>● کابین، قسمت پار، کف و جایگاه موتور</p> <p>● چهارچوب (قاب)</p>	بدنه
<p>— رشته‌های پیچیده الیاف کربن</p> <p>— رشته‌های پیچیده الیاف کربن یا نوارهای باریک یک سویی و استفاده از تکنیک لایه‌سازی</p> <p>— رشته‌های پیچیده الیاف کربن</p>	<p>● روکشهای سکان عمودی و افقی</p> <p>● تیرهای اصلی</p> <p>● تیرکها</p>	بالچه‌ها
<p>— رشته‌های پیچیده الیاف کولار به صورت لوانسک — روکشها صفحه‌های ساندویچی هستند که از اتصال لوانسک به قسمت میانی شانه زنبور عمل ساخته شده است.</p> <p>— رشته‌های پیچیده الیاف کربن</p> <p>— در این مورد با توجه به کاربرد آنها از رشته‌های پیچیده الیاف کربن و کولار به صورت لوانسک استفاده می‌شود.</p>	<p>● روکشهای شهبر و تیرهای آن</p> <p>● روکشهای بالا برنده و تیرهای آن</p> <p>● روکشهای سکان و تیرهای آن</p> <p>● روکشهای بالچه‌های مستقر در بال</p> <p>● تیرهای بالچه‌های مستقر در بال</p> <p>● تیرکها</p>	سطوح کنترل

مکانیکی مورد نظر و توانایی مقاومت در مقابل انواع تنشهای محیط در کامپوزیت بهینه می‌شوند. در سیستمهای آمده در جدول ۴ نیازی به این مرحله پس پخت نیست. مراحل پخت این سیستمها به شرح زیر است:

الف — سیستم لوانسکی از الیاف کربن (دمای پخت ۱۷۳°C)

۱ — گرمایش تا دمای ۱۲۱°C و نگهداری شرایط به مدت ۶۰ دقیقه؛ در این مرحله رزین به حالت مایع درمی‌آید و رزین زائد از میان لایهها آماده خروج می‌شود.

۲ — تحمیل فشار به میزان ۶۸۹ KPa پس از گذشت ۲۰ دقیقه از زمان گرمایش، و در حالتی که رزین مایع است مقدار زائد آن می‌تواند از لایهها خارج شود. در اینجا باید متذکر شد که میزان تحمیل فشار و زمان تحمیل آن به نوع سیستم رزین بستگی دارد و قبل از اینکه حالت ژلاتینی در رزین ایجاد شود باید صورت گیرد؛ زیرا تحمیل فشار هنگامی که رزین ژلاتینی شده است ممکن است موجب ایجاد تنشهایی در آن شود و به این ترتیب کیفیت ساختار مورد نظر به حداقل می‌رسد. با این حال تحمیل فشار در زمانهای نامعین قبل از اینکه حالت ژلاتینی ایجاد شود باعث می‌گردد که از خروج رزین زائد اطمینان صد درصد حاصل نشود.

۳ — افزایش دما تا ۱۷۳°C و نگهداری شرایط به مدت ۹۰ دقیقه؛ این

(934 Epoxy Resin) استفاده شده است که در دمای ۱۷۳°C پخت می‌شود و سیستم رزین از نوع اپوکسی رزین ۷۷۱۴ (7714 Epoxy Resin) برای ترکیب با الیاف کولار انتخاب شده است که در دمای ۱۷۳°C پخت می‌شود. دومین رزین برای صفحه‌های ساندویچی در ساخت سطوح کنترل این هواپیما نیز بکار رفته است.

در به کارگیری کامپوزیت سیستم چسبنده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و انتقال نیروها و ایجاد یک اتصال یکپارچه و یکنواخت از مسائل مهم در انتخاب این سیستمهاست. از طرفی دیگر سیستم چسبنده باید در حد امکان با سیستم رزین بکار رفته سازگار باشد. مثلاً در مورد هواپیمای لرفن ۲۱۰۰ شرایط پخت چسبنده‌های مصرفی کاملاً با سیستمهای رزین مطابقت می‌کند و به این ترتیب شرایط یکنواخت همواره رعایت شده است. در جدول ۴ سیستمهای رزین و چسبنده به کار رفته در هواپیمای لرفن بطور کامل آورده شده است؛ به علاوه چگونگی استفاده از الیاف مشخص شده است.

بسیاری از سیستمهای الیاف آغشته به رزین (لوانسک) وجود دارند که بعد از پخت اولیه متحمل یک پخت دیگر می‌شوند که در زمان کوتاهتری انجام می‌گیرد و آن را پس پخت می‌نامند. به این ترتیب خواص

مواد	مشخصات	کارخانه سازنده
الیاف ترنل ۳۰۰ (Thornel 300) کولار (Kevlar)	الیاف به صورت رشته‌های 3K بافته‌های فیبری 285	یونین کارباید (Union Carbide) دوپون (Du Pont)
لایه‌ها HY-E 1034 C HMF 133/34 HMF 190/34 HXM 7714	توارهای گرافیت یک سویی با ضخامت ۵ تا ۱۰ میلیمتر و رزین ۹۳۴ با دمای بخت ۱۷۳ C بافته‌های پیچیده گرافیت و رزین ۹۳۴ بافته‌های پیچیده یک سویی گرافیت و شیشه با رزین ۹۳۴ بافته‌های پیچیده کولار با رزین ۷۷۱۴ با دمای بخت ۱۷۳ C	شرکت فبرایت (Fibrite Corporation)
چسبنده‌ها EA 9628 EA 9649	دمای بخت ۱۲۷C دمای بخت ۱۷۳ C	شرکت هیزول - دکستر (Hysol / Dexter Corp.)

زمینه ساخت یک هواپیمای نظامی به نام های مت (HIMAT)

(Highly Maneuverable Aircraft Technology) صورت می‌گیرد.

در پایگاه ادواردز (Edwards) در ایالت کالیفرنیا گاهی اوقات نمونه این هواپیما با کنترل از راه دور در مقیاس ۱ به ۲۷ به پرواز درمی‌آید که نمایانگر پیشرفته‌ترین هواپیمای نسل جدید است. وضعیت مواد کامپوزیت و فلزات پکار رفته از این قرار است: ۴٪ تنگستن، ۲۶٪ آلومینیم، ۱۸٪ تیتان، ۳٪ الیاف شیشه و ۲۶٪ الیاف کربن. به این ترتیب حدود ۳۰٪ کامپوزیت در این هواپیما به کار رفته است. البته باید متذکر شد که فلزاتی از قبیل تیتان و تنگستن که در آن مصرف شده اند هزینه‌های قابل توجهی را در بر می‌گیرند، با توجه به اینکه هزینه کاربرد کامپوزیت به میزان ۳۰٪ به تنهایی بسیار سنگین است.

این هواپیما برای اولین بار در سال ۱۹۷۸ از کارخانه راکول (ROCKWELL) خارج شد و ظاهر آن بیانگر یک طرح دقیق و پیچیده است که از این جهت می‌توان آن را منحصر به فرد دانست؛ به علاوه طرح بال و سطوح کنترل و همچنین زوایای مختلف مقطعی که آن را تشکیل می‌دهند این امکان را به وجود آورده است که این هواپیما دارای مقاومتی بسیار بالا و یک قابلیت مانور فوق العاده در فاکتورهای پار نسبتاً بالا باشد؛ برای اثبات این قابلیت در برنامه آزمایشهای پروازی این هواپیما پیش‌بینی می‌شود که مانورهایی با زوایای حدود ۸ درجه در سرعتهای ۱۰۰۰ کیلومتر در ساعت و در ارتفاع ۸۰۰۰ متری و همینطور در زوایای کمتر از ۶ درجه و در ارتفاع ۲۰۰ متری و ۹۰۰۰ متری با سرعت ۱۵۰۰ کیلومتر در ساعت صورت گیرد. بال این هواپیما از نظر دست‌اندرکاران

مرحله باعث تحکیم شرایط رزین از نقطه نظر تکمیل بخت، خواهد شد.

۴ - سرمایش تا دمای ۶۶°C در زیر فشار

ب - سیستم لواشکی از الیاف کولار (دمای بخت ۱۲۷°C)

مراحل بخت در این مورد شبیه مراحل بخت فوق‌الذکر است؛ با توجه به اینکه دمای بخت ۱۲۷°C است و میزان فشار تسخیم شده ۳۴۵KPa می‌باشد؛ بقیه مراحل کاملاً مشابه است.

در مورد چرخه‌های بخت چسبنده‌ها باید اضافه کرد که اساساً این چرخه‌ها شامل گرمایش بی‌وقفه تا ۱۲۷°C یا ۱۷۷°C است و دوره‌های آسایش در دماهای پیش گفته ۶۰ دقیقه است. در سیستمهای چسبنده، گرمایش و گرادیان افزایش دما بسیار مهم است و در این مورد باید با گرادیان ۱/۱ تا ۳/۹ درجه سانتیگراد در دقیقه کاهش یابد تا خواص مورد نیاز در چسبنده بهینه شوند.

منظور از بررسی مراحل بخت و پلیمر شدن در مورد ساخت این هواپیما این است که طرز کاربرد کامپوزیت در ساخت ساختارهای هوایی مشخص گردد و در نتیجه مشکلاتی که احتمالاً در این زمینه وجود دارند شناسایی شوند. اگرچه مسائل زیادی در این زمینه وجود دارند که از یادآوری آن صرف نظر می‌کنیم زیرا خود شامل بخشهای مفصلی است، اما یادآوری این نکته ضروری است که رعایت تمام اصول بخت و پلیمر شدن موجب می‌شود که ساختار کیفیت خوبی پیدا کند و بدین ترتیب دستیابی به اهداف از پیش تعیین شده امکان‌پذیر گردد.

یکی از مهمترین نمونه‌هایی که نشان‌دهنده پیشرفت و اهمیت کاربرد کامپوزیت در صنعت هوا - فضایی باشد، تحقیقات و مطالعاتی است که در

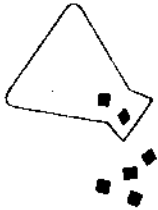
مواد ساختاری که دارای یک پایداری گرمایی مطلوب و مناسب باشند، ممکن می‌شود.

قابلیت مانور یک هواپیمای جنگنده یا به عبارت دیگر چابکی آن در شرایط مختلف تنها با ساختارهایی ممکن است که از سبکی، مقاومت و حساسیت پامخ خوبی برخوردار باشند و کوشش جهت دستیابی به این ویژگیها باعث پیشرفت کامپوزیتها در زمینه کاربردی خواهد شد؛ به علاوه قابلیت عبور دادن پرتوها توسط یک کامپوزیت موجب می‌شود که یک هواپیما به سختی با رادارهای دشمن شناسایی شود.

گذشته از این ویژگیها، قطعات کامپوزیتی مشخصاتی دارند که از لحاظ تکنیکی بسیار مهم‌اند. امکان ساخت ساختارهای اصلی (ساختار I) از فیویل بال، بالچه، بدنه و غیره از مواد کامپوزیتی موجب تسریع در امر تولید شده است و گذشته از آن یکپارچه بودن و یک دست بودن ساختارها باعث جلوگیری از مصرف قطعات اضافی و یا بطور کلی استفاده از تجهیزات اتصال و پرچ این اجزاء می‌گردد و به این ترتیب هزینه تعمیر و قطعات تعویضی به صورت جزئی بسیار کمتر می‌شود.

با این حال به کارگیری مواد کامپوزیت هنوز با مشکلاتی مواجه است، به ویژه از نظر تجهیزاتی و فرایند تولید موانعی وجود دارند که نشانگر عمل محتاطانه دست‌اندرکاران در زمینه کاربردی است. مواد اولیه کامپوزیتها هنوز گرانقیمت‌اند و به این دلیل هزینه ساخت یک هواپیما با این مواد بسیار سنگین است. از طرفی دیگر بسیاری از خواص کامپوزیتها ناشناخته‌اند و مطالعات و تحقیقات در این زمینه به موازات استفاده هر چه بیشتر از آنها پیش می‌رود.

در حال روند مطالعات نوید می‌دهد که مشکلات احتمالی که در سر راه قرار دارند به زودی برطرف خواهند شد و در سالهای آتی مواد کامپوزیت به عنوان اساسی‌ترین مواد ساخت در صنعت هوا - فضا کاربرد خواهند داشت.



REFERENCES

- [1] Thesis, Composite Material Technic and Application - 1988 - Rome
- [2] Composites in Commercial Aircraft - The Boeing Company Seattle - Washington
- [3] Mario Marchetti - Tecnologie dei materiali compositi ESA - 1988
- [4] Aviation Week and Space Technology W.B.Scott December 5, 1988

استثنایی به حساب می‌آید، زیرا برای اولین بار در تاریخ تکنولوژی هواپیما نسیم‌رخ‌های بسال و سطوح کانارد (CANARD SURFACES) طسوری طرح‌ریزی شده‌اند که قابلیت مانور در سرعت‌های کم و زیاد به طور چشمگیری افزایش یابد. به علاوه برای هر بال و سطح کانارد پیش‌بینی می‌شود که خاصیت ائروالاستیکی (aeroelastic property) وجود داشته باشد، یعنی در مانورهای خیلی شدید تغییر مکان و کرنش بروز نکند، زیرا در نهایت نیروی برآ تقبیل می‌یابد. این خاصیت ائروالاستیکی تنها به وسیله جهت‌گیری صحیح و حساب شده الیاف تقویت‌کننده در کامپوزیت عملی می‌شود. مسئولین پروژه هواپیمای هایسنت یکی دیگر از فوآند کامپوزیت را مورد استفاده قرار داده‌اند و آن سختی یک‌سویی است. این یک ویژگی خاص کامپوزیت است که بر مبنای آن ساختار هواپیما بدون هیچ‌گونه خرابی و ضرری فاکتورهای بار تا ۸ درجه را می‌تواند متحمل شود.

لازم به یادآوری است که هواپیمای هایسنت یکی از بزرگترین نمونه‌های آزمایشی مواد کامپوزیت است و در مراحل تکامل آن همه‌گونه مطالعه و تحقیق برای بهینه کردن کاربرد این مواد صورت می‌گیرد. [1] در شکل ۶ هواپیمای نظامی - جاسوسی ساخت کشور آمریکا نشان داده شده و B2 نام دارد و در ماههای اخیر به معرض نمایش گذارده شد. علاوه بر اینکه در هواپیما نیز سمس می‌شده است از خصوصیات کامپوزیتها به نحو احسن استفاده شود، طراحی منحصر به فرد بسال‌ها و کابین خلبان سبب گردیده که ویژگی رادیوترانسپرنس (radiotransparent) بودن کامپوزیت کاملاً محسوس باشد، زیرا از این طریق این هواپیما به سختی در رادارهای دشمن شناسایی می‌شود. [4]



شکل ۶ - هواپیمای نظامی - جاسوسی B2

نتیجه‌گیری

همان‌طور که اشاره شد در ساخت یک هواپیما باید اصولی رعایت شود تا از موفقیت پروژه اطمینان حاصل گردد. از طرفی دیگر با گذشت زمان نیازهایی چنان استثنایی در این زمینه احساس می‌شود که تنها با استفاده از کامپوزیتها امکان رفع آنها وجود دارد. سرعت برابر یا مافوق صوت یک هواپیما که امروزه مسئله‌ای جدید نیست و فقط با به کارگیری