مقاله

مروری بر کاربردهای متنوع مواد مرکب در صنایع هواپیماسازی

رضا جواهری
معاون بازاریابی و فروش
بخش حمل‌ونقل ریلی، گروه مپنا
javaheri_r@mapnagroup.com

محمد اسدزاده*
کارشناس مهندسی مکانیک
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کاشان
mohammad.asadzadeh@rocketmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۰۶/۰۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۶/۱۵

چکیده

در این مقاله کاربردهای متنوع و چشم‌گیر مواد مرکب در حوزهٔ صنعت حمل‌ونقل به‌اجمال مرور و بررسی شده است. برای این منظور ابتدا، مقدمه‌ای جامع از ظهور و بروز و کاربرد این دسته از مواد در صنعت حمل‌ونقل جاده‌ای، ریلی و هوایی مطرح می‌شود. سپس کاربردهای متعدد مواد مرکب در صنعت طراحی و ساخت قطعات و بخش‌های گوناگون انواع هواپیما، اعم از هواپیماهای تجاری، مسافری و نظامی، معرفی می‌گردد. پس از آن، موارد متعدد کاربرد کامپوزیت‌ها در فرایند طراحی و ساخت انواع هلی‌کوپترها بررسی و نهایتاً مقایسه‌ای آماری میان موارد کاربرد و میزان استفاده از مواد مرکب در انواع پرنده‌های تجاری و نظامی معرفی می‌شود. خوانندهٔ این مقاله، پس از مطالعه و واکاوی مطالب عنوان‌شده، افق فراروی این صنعت فناورمحور را بهتر درک کرده، نسبت به کاربردهای متنوع این مواد درکی فنی‌تر پیدا خواهد کرد و قادر خواهد بود فرصت‌ها و تهدیدهای فراروی صنعت تولید این مواد را تاحدودی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد.

واژگان کلیدی: کامپوزیت، مادهٔ مرکب، صنعت حمل‌ونقل، صنایع هواپیماسازی

۱. مقدمه

امروزه به‌طور چشمگیری از مواد مرکب در شاخه‌های متنوع صنعت استفاده می‌شود. جدای از ویژگی‌هایی چون وزن، استحکام و سفتی بالا، مقاومت در برابر خستگی، ضربه، خوردگی و سایش، عایق حرارتی و صوتی، مقاومت خزشی بالا، امکان طراحی ماده‌ای با خواص مورد انتظار، امکان تولید شکل‌های پیچیده با قیمت‌های مناسب، هزینهٔ سرمایه‌گذاری نسبتاً کم برای ایجاد کارخانهٔ تولید سازه‌های مرکب، دوام بالا و هزینهٔ نگه‌داری کم، مشخصات مهم دیگری چون سازگاری نسبی خوب در موقعیت‌های گوناگون و سهولت در ترکیب با دیگر مواد مهندسی از جمله مهم‌ترین دلائل اقبال روزافزون به‌سمت این دسته از مواد است. به‌عنوان مثال در صنعت حمل‌ونقل، انواع پلاستیک‌های تقویت‌شده[1] به‌دلائلی چون استحکام ویژهٔ[2] نسبتاً بالا، سهولت در اجرای طرح‌های متنوع، سفتی زیاد و

دیگر ویژگی‌های قابل توجهی که می‌توان برای یک مادهٔ مهندسی متصور بود، به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. این در حالی است که طی سالیان اخیر، استفاده از مواد مرکب در طراحی و تولید ادوات و وسائط نقلیه و ماشین‌آلات سنگین نیز روبه افزایش بوده است [۲]. علاوه بر انواع خودروهای سبک و سنگین، در طراحی و ساخت انواع خودروهای مسابقه نیز از کامپوزیت‌ها استفاده می‌شود [۳]. شاید قابلیت استفاده از این مواد در کارخانه‌ها و کارگاه‌هایی با نیروی انسانی نه‌چندان ماهر نیز خود از جمله عواملی باشد که استفاده از این مواد را همه‌گیر کرده است.

روزگاری نخستین مادهٔ مرکبی که در صنعت حمل‌ونقل جاده‌ای مورد استفاده قرار می‌گرفت، کامپوزیت‌هایی با ماتریس پلی‌استر بود [۴]. دلیل استفاده از این ماده نیز نیل به اهدافی چون کاهش هزینهٔ تولید و سهولت طراحی و تولید اجزای خاص بود. امروزه این دسته از مواد مرکب همچنان استفاده می‌شوند. مادهٔ گرمانرمی[۳] چون پلی‌استر با انواع تقویت‌کننده‌ها به نسبت‌های گوناگون ترکیب می‌شود. برای طراحی و ساخت بخش‌های گوناگون وسائل نقلیه از مواد گرمانرم نیز از روش‌های تولید متنوعی استفاده می‌شود. مثلاً برای ساخت اجزایی که پس از تولید قابلیت رنگ‌آمیزی ندارند، می‌توان از مواد مرکب با ماتریس‌های گرماسخت[۴] استفاده کرد، حال آنکه برای تولید قطعات و اجزایی که پس از اتمام فرایند تولید باز هم قابلیت رنگ‌آمیزی دارند، می‌توان از مواد مرکبی با ماتریس‌های گرمانرم استفاده نمود [۵].

امروزه در تولید بخش‌ها و قطعات متنوع انواع خودرو از مواد مرکب با ماتریس پلی‌استر و تقویت‌کننده‌هایی از جنس شیشه و رشته‌های سیسل[۵] استفاده می‌شود [۶]. دلیل استفاده از این ماده را نیز می‌توان در هزینهٔ اندک تولید رشته‌های سیسل دانست. البته ناگفته نماند که این دسته از کامپوزیت‌ها در تولید قطعات و بخش‌هایی استفاده می‌شوند که نمای ظاهری آنها اهمیت چندانی نداشته باشد [۷]. در صنعت ساخت خودرو، که شاخصه‌هایی چون کیفیت، تنوع محصول، قدرت موتور، میزان مصرف سوخت و آلایندگی محیط زیست از جمله ویژگی‌های اساسی برای جلب توجه مشتریان و تسلط بر بازار فروش است، استفاده از مواد و فناوری‌هایی که خودروسازان را به این اهداف نزدیک‌تر کند، از اهم امور محسوب می‌شود. در چنین شرایطی، به‌یقین استفاده از مواد مرکب برای ساخت قطعات و اجزایی که برای آنها استحکام ویژه پارامتر مهمی است، بر استفاده از انواع فولاد و دیگر محصولات فلزی برتری می‌یابد. مثلاً موادی که در ساخت بدنهٔ انواع خودرو استفاده می‌شوند، باید از مقاومت کششی و قابلیت خمشی بالایی برخوردار باشند؛ ترد و شکننده نباشند و حد سیلان آنها در محدودهٔ قابل قبولی باشد. همین ویژگی‌های خاص است که استفاده از مواد مرکب را برای ساخت چنین بخش‌هایی مناسب می‌کند. در وسائط نقلیهٔ تجاری اما، شکل ظاهری وسیله نیز همچون شاخصه‌های عملکردی آن از اهمیت بسیاری برخوردار است. برای طراحی و تولید چنین ادواتی استفاده از مواد مرکب با ویژگی‌های خاص از اولویت بالایی برخوردار است. مطالعات و پژوهش‌های اخیر نشان می‌دهد که برای ساخت پوستهٔ بیرونی بدنهٔ انواع خودروها می‌توان از ورق‌های کامپوزیتی استفاده کرد [۸] و از این رهگذر، علاوه بر ویژگی‌های مکانیکی خاص، به ظاهری منحصر بفرد نیز دست یافت؛ مقوله‌ای که در صنعت خودرو اهمیت بسزایی دارد. مثلاً مقاومت در برابر ضربه و خوردگی، عمر خستگی بالا، وزن کم، مقاومت حرارتی در برابر گرمای موتور و ارتعاشات کم‌دامنهٔ حاصل از لرزش‌های جاده از جمله شاخصه‌هایی است که کامپوزیت‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای ساخت انواع سپر و ضربه‌گیر خودروهای سنگین مبدل کرده است [۹]. جالب اینکه برای تولید انواع چراغ خطر و دیگر علائم نشانگر نیز از مواد مرکب استفاده می‌شود [۱۰]. شاید مهم‌ترین دلیل برای استفاده از این مواد در ساخت چنین ادواتی نیز موضوع کاهش وزن محصول باشد. حقیقت این است که در تولید انواع خودرو، شاخص وزن بر ویژگی‌های عملکردی دیگری چون ظرفیت

حمل‌ونقل، میزان مصرف سوخت و بهرهٔ اقتصادی محصول نیز اثرگذار است. لذا خودروسازان همواره به هر روشی که بتواند از وزن محصول بکاهد و بر مقاومت آن بیافزاید، متوسل می‌شوند. امروزه از فایبرگلاس در ساخت قطعات انواع کامیون استفاده می‌شود [۱۱]. چون تولید پلاستیک‌های تقویت‌شده هزینهٔ چندانی ندارند، به‌طور گسترده‌ای برای ساخت قسمت‌های متنوع خودرو مورد استفاده قرار می‌گیرند. برای ساخت بخش‌هایی از بدنهٔ کامیون‌ها و انواع تریلر نیز از این مواد استفاده می‌شود. از طرفی، ضریب انتقال حرارت پایین مواد مرکب، استفاده از آنها را در تولید چنین قطعاتی نسبت به فلزات سبک و مقاوم متمایز می‌کند.

فایبرگلاس ماده‌ای است که به‌دلیل دارابودن ویژگی‌های خاص، گزینه‌ای مناسب برای ساخت قطعات انواع کامیون و تریلر می‌باشد. برای ساخت واگن انواع کامیون نیز از ترکیب تخته‌های سه‌لایی با لایه‌های نازکی از پلاستیک‌های تقویت‌شده استفاده می‌شود. روش‌های متنوع تولید قطعات دلخواه از یکسو و هزینهٔ اندک تولید از سویی دیگر، از جمله ویژگی‌هایی است که استفاده از ترکیب تخته‌های سه‌لایی و پلاستیک‌های تقویت‌شده را برای چنین مقاصدی مطلوب می‌نماید [۱۲]. البته شاید وزن این ترکیبات به اندازهٔ دلخواه طراحان کم نباشد، اما وجود ویژگی خاصی چون دوام بالا نسبت به ترکیب مواد معمولی، بهره‌برداری از آنها را در صنعت تولید وسائط نقلیهٔ سنگین ممتاز ساخته است. ناگفته نماند که در عرصهٔ تولید انواع وانت‌بار نیز چنین تقاضایی وجود دارد و تولیدکنندگان خودروهای باری نیمه‌سنگین نیز برای طراحی و تولید بهینهٔ محصولات خود از مواد مرکب به‌وفور استفاده می‌کنند [۱۳]. خودروسازان همواره علاقه دارند تا محصولاتی با ظاهری متفاوت و زیبا و کارایی منحصر بفرد تولید و روانهٔ بازار کنند تا از این رهگذر بازار مصرف را از آن خود نمایند. برای نیل به این هدف، ترکیبی از قطعات کامپوزیتی و بدنهٔ فلزی وسیلهٔ نقلیه می‌تواند راه‌کار مناسبی باشد. بدون شک یکی از مهم‌ترین حوزه‌های کاربرد مواد مرکب، دنیای مهندسی هوافضا و طراحی و تولید انواع هواپیماهای تجاری و نظامی است. از جمله پارامترهای مهم به‌هنگام طراحی و تولید این محصولات، لحاظ‌نمودن شاخصه‌هایی چون پایداری در برابر فشار، حفظ امنیت سرنشینان و نهایتاً وزن کم است. دستیابی به چنین ویژگی‌هایی با بهره‌گیری از مواد مرکب میسر می‌شود. برای طراحی یک هواپیمای غیرنظامی پیشرفته لازم است تا ویژگی مهمی چون امنیت پرواز از هر حیث تأمین شود. این در حالی است که خانوادهٔ مواد مرکب، همچون فایبرگلاس، از جمله کارآمدترین مواد برای تأمین شاخصه‌های متعدد طراحی بهینهٔ انواع هواپیما محسوب می‌شوند. در مواردی که ضریب الاستیسیتهٔ ماده اهمیت چندانی نداشته باشد، فایبرگلاس گزینه‌ای مناسب برای طراحی و تولید قطعات خواهد بود. با این‌حال، ماتریس مادهٔ مرکبی که همراه با فایبرگلاس استفاده می‌شود، استفاده از آن را در دماهای کم محدود می‌کند.

امروزه برای ساخت قطعات و بخش‌های متنوع هواپیما، خصوصاً قطعات داخلی موتور، از مواد مرکب استفاده می‌شود [۲]. استفاده از چنین موادی به بهبود عملکرد سیستم می‌انجامد.

تا چندی پیش، کامپوزیت‌های گرافیت - بور برای طراحی و تولید قطعات و اجزای گوناگون هواپیماهای جنگنده مورد استفاده قرار می‌گرفتند و کمتر در هواپیماهای تجاری استفاده می‌شدند [۱۴]. امروزه اما موارد استفادهٔ تجربی و نظری این ماده در صنعت هوافضا گسترش چشم‌گیری یافته است؛ به‌طوری‌که از آن برای تأمین امنیت پرواز در هواپیماهای تجاری به‌وفور استفاده می‌شود.

در موتورهای توربوجت، شرایط استاتیکی و دینامیکی موجود محققان را به این سمت‌وسو کشانده است که با استفاده از مواد مرکب و کاهش وزن و افزایش دوام اجزای دوار همچون روتورها و کمپرسورها طراحی و تولید این دسته از موتورها را به‌سوی طراحی بهینه و اقتصادی با قدرت و سرعت بیشتر سوق دهند. در برخی از موتورهای

توربوفن نیز استفاده از مواد مرکب پیشرفته سبب افزایش نیروی پیشرانش و کاهش وزن موتور شده است [۱۵]. سفتی و مقاومت قابل توجه این دسته از مواد سبب کاهش گام‌های کمپرسور[۶] به‌وسیلهٔ افزایش میزان بار وارده بر تیغه‌های آن می‌شود [۴]. برای پژوهشگران این نکته کاملاً آشکار شده است که استفاده از مواد مرکب در طراحی و ساخت اجزای دواری چون روتور انواع موتور هواپیما و کمپرسور سبب کاهش چشمگیر وزن سیستم می‌شود [۱۶].

در عرصهٔ هوانوردی و هوافضا نیز حوزه‌های مطالعاتی و پژوهشی متنوعی برای طراحی و ساخت ادوات و اجزای مورد نیاز به‌کمک کامپوزیت‌های پیشرفته وجود دارد؛ حوزه‌هایی که هریک به‌تنهایی موجب رشد و تعالی روزافزون این شاخه از دانش مهندسی شده است. اصولاً طراحی بدنهٔ هواپیما با ارزیابی شرایط پرواز آغاز می‌شود. برای این منظور، مطالعات و آزمایش‌های متنوعی با هدف تعیین نیروی بـرآر[۷] و پسـار[۸] انواع هواپیما، در تونل‌های باد انجام می‌شود. پس از انجام آزمایش‌ها و تحلیل‌های مورد نظر، شاخصه‌های گوناگون طراحی تعریف و درپی آن مادهٔ مورد نظر برای ساخت قطعات مشخص می‌شود. تحقیقات اخیر جملگی مؤید این واقعیت‌اند که استفاده از مواد مرکب پیشرفته امکان طراحی و تولید ماهیوارهایی[۹] با نسبت ابعادی[۱۰] بزرگ‌تر و در نتیجه نیروی بـرآر بیشتر را درپی دارد [۱۷].

استفاده از مواد مرکب از طراحی و ساخت تجهیزات پرواز و فرودگاهی گرفته تا طراحی و تولید اجزای کارآمد انواع فضاپیما، این عرصه از دانش مهندسی هوانوردی و هوافضا را متحول کرده است. مثلاً، تا سالیان متمادی از الیاف شیشه در ادوات خاص فضایی استفاده می‌شد. این ماده به‌دلیل ویژگی‌هایی چون مقاومت ویژهٔ بالا، هزینهٔ تولید پایین، شکل‌پذیری خوب، مقاومت در برابر ضربه و پایداری حرارتی ناسب گزینه‌ای مناسب برای طراحی و تولید تجهیزات فضایی، که در دما و شرایطی خاص کار می‌کنند، محسوب می‌شود [۱۸].

گرافیت از دیگر مواد در دسترس و مقرون به‌صرفه‌ای است که ویژگی‌هایی چون سفتی بالا، مقاومت خوب و کارایی تجربی و نظری بالایی دارد. از نقاط ضعف این ماده می‌توان به مقاومت اندک آن در فشار نسبت به حالت کشش اشاره کرد [۱۹]. از جمله محاسن آن نیز قابلیت ماشینکاری خوب است. این ماده قابلیت شکل‌پذیری بالایی دارد و ضریب انبساط حرارتی آن اندک است. گرافیت را می‌توان به‌شکل‌های بافته‌شده درآورد. این ویژگی‌ها راه را برای استفاده از آن در ساختارهای خاص کامپوزیتی هموار می‌سازد [۲۰].

از دیگر مباحث مهم در روند بهره‌برداری از مواد مرکب، مبحث وزن است. مطالعات و پژوهش‌های اخیر مبین این حقیقت است که با استفاده از این مواد می‌توان در مصرف مواد اولیه و انرژی از ۲۰ تا ۴۵ درصد صرفه‌جویی کرد، این در حالی است که با استفاده از ساختارها و مواد فلزی تنها ۱۰ تا ۲۵ درصد صرفه‌جویی حاصل می‌شود [۲۱].

در صنعت حمل‌ونقل ریلی نیز بهره‌گیری از مواد مرکب سبب کاهش وزن واگن‌ها و درپی آن اعمال نیروی کمتر بر بستر ریل‌ها و ریل‌بندها[۱۱] شده، نهایتاً میران مصرف سوخت را کاهش می‌دهد [۲۲]. با کاهش وزن، هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات نیز کاهش می‌یابد. از مواد مرکب در تولید تزئینات داخلی واگن‌ها و کفشک ترمز قطار نیز استفاده می‌شود. از سوی دیگر، مسئله‌ای چون هزینهٔ قابل توجه تأمین مواد اولیه، میزان استفاده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده را در تولید واگن‌های حمل بار کاهش می‌دهد. اما با وجود تمام محدودیت‌های موجود، از مواد مرکب در تولید قطعات و بخش‌هایی خاصی چون چفت‌وبست‌ها، اهرم‌ها، درپوش انواع واگن‌های ته‌ریز[۱۲] و جز این‌ها استفاده می‌شود. پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه، که در تولید انواع کاتینر مورد استفاده قرار می‌گیرد، نیز به‌عنوان دیوارپوش در وسائط نقلیهٔ ریلی مورد استفاده قرار می‌گیرد. فایبرگلاس از جمله بهترین گزینه‌ها برای چنین کاربردهایی است [۲۲].

امروزه از طریق استفاده از مواد مرکب، تحولاتی شگرف در فرایند طراحی و تولید ادوات و سیستم‌های مهندسی رخ داده است. با استفاده از این مواد، زمان و هزینه‌های تولید کاهش یافته است؛ ویژگی‌هایی که در فرایندهای ساخت و تولید از جمله کلیدی‌ترین شاخص‌ها محسوب می‌شوند.

ملاک طراحی اصولی در تولید ادوات و ماشین‌آلات حمل‌ونقل کمینه‌کردن وزن ساختار است تا از این رهگذر در مصرف مواد اولیه صرفه‌جویی و دیگر شاخص‌های مطلوب طراحی تأمین و بایدها و نبایدهای زیست محیطی لحاظ شود؛ سیستم یا قطعهٔ تولیدی از عمر کاری و قابلیت اطمینان خوبی برخوردار باشد و هزینه‌های نگه‌داری و تعمیرات آن چندان قابل توجه نشود. برای این منظور از مواد تقویت‌شده توسط الیاف شیشه در سیستم‌های حمل‌ونقل درون‌شهری به‌وفور استفاده می‌شود [۲۲].

در این مقاله مواد مرکب و کاربردهای متنوع آنها در صنعت حمل‌ونقل، خصوصاً صنایع هواپیماسازی بررسی شده است. خوانندهٔ این مقاله، پس از مطالعه و واکاوی مطالب عنوان‌شده، افق فراروی این صنعت فناورمحور را بهتر درک کرده، نسبت به کاربردهای متنوع این مواد درکی شهودی پیدا خواهد کرد و قادر خواهد بود فرصت‌ها و تهدیدهای فراروی صنعت تولید این مواد را تاحدودی مورد تجزیه و تحلیل قرار دهد.

۲. کاربرد مواد مرکب در صنعت هواپیماسازی

امروزه به‌دلیل نیاز روزافزون به استفاده از مواد ترکیبی برای دستیابی به خواص و عملکرد مطلوب و بهینه، استفاده از مواد مرکب به‌طور چشم‌گیری در صنایع گوناگون، خصوصاً صنعت حمل‌ونقل هوایی و هواپیماسازی، روبه رشد است. در این بخش از مقاله، موارد کاربرد کامپوزیت‌های پیشرفته در طراحی و ساخت انواع هواپیماهای تجاری و نظامی بررسی شده است. برای این منظور، ابتدا کامپوزیت‌های مورد استفاده در این شاخه از صنعت معرفی و کاربردهای متنوع آنها در فرایند طراحی و تولید قطعات و بخش‌های گوناگون هواپیماهای تجاری بررسی می‌شود. در ادامه، مقایسه‌ای آماری میان میزان استفاده از این مواد در سال‌های نخستین طراحی هواپیماهای تجاری و هواپیماهای فوق‌پیشرفتهٔ امروزی انجام می‌شود. سپس، موارد کاربرد مواد مرکب در طراحی و تولید جنگنده‌های پیشرفتهٔ امروزی مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد و نهایتاً فرصت‌ها و تهدیدهای بهره‌گیری از این مواد در صنعت حمل‌ونقل هوایی و هواپیماسازی معرفی می‌شود.

۲-۱. کامپوزیت‌های مورد استفاده در صنایع هوایی

در صنعت امروز، فیبرهای پلیری تقویت‌شده به‌طور چشمگیری جایگزین فلزات و آلیاژهای معمول در عرصهٔ طراحی و تولید قطعات انواع هواپیماها شده است [۲۳]. دلیل این تحول را باید در ویژگی‌هایی چون مقاومت و طول عمر بالا، مقاومت در برابر خوردگی و خستگی، انعطاف‌پذیری خوب و وزن کم این دسته از مواد جستجو کرد. قطعاتی که با استفاده از این مواد تولید می‌شوند، بین ۲۰ تا ۳۰ درصد سبک‌تر از قطعات مشابه فلزی‌اند [۲۴]. اگرچه هواپیماهای تمام‌کامپوزیت در بازار امروز وجود دارد، اما پژوهشگران امیدوارند با پیشرفت‌هایی که در حوزهٔ دانش مواد مرکب حاصل می‌شود، پرنده‌هایی به‌مراتب سبک‌تر طراحی و تولید کنند. مادهٔ مرکبی که عموماً در صنایع هواپیماسازی مورد استفاده قرار می‌گیرد، فیبرهای پلیمری تقویت‌شده[۱۳] است. معمول‌ترین فیبرها نیز از جنس کربن، شیشه، آرامید و یا پیوندهای آنها می‌باشد.

بین سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ م، نخستین قطعات ساخته‌شده از جنس مواد مرکب در عرصهٔ صنایع هواپیماسازی استفاده شدند. این قطعات که غالباً از جنس فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه یا جی. اف. آر. پی.[۱۴] بودند، شامل سایبان هلی‌کوپتر[۱۵]، انواع چارچوب، آنتن‌پوش[۱۶]، بادشکن[۱۷]، پرهٔ روتور، سکان هواپیما[۱۸] و قطعات دیگر از این دست می‌شدند. مواد مرکبی چون پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف بور[۱۹] به‌دلیل دارابودن

ویژگی‌هایی چون مقاومت و سفتی بالا و چگالی نسبتاً پایین، برای پاره‌ای از اجزای پرکاربرد و مهم هواپیما نسبت به آلومینیوم از اولویت بیشتری برخوردارند. برای ساختارها و اجزای سبک‌تر اما، فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف آرامید، که دارای مقاومت کششی بالا و مقاومت فشاری و چگالی پایینی هستند، برای طراحی و تولید قطعات و اجزای سبک مورد استفاده قرار می‌گیرند. مثلاً، برای ساخت انواع هواپیماهای سبک و آن دسته از قطعاتی که تحت بارهای اندک قرار می‌گیرند، پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف شیشه از جمله بهترین گزینه‌ها خواهد بود. طی سالیان گذشته، کاربرد مواد مرکب در صنعت هواپیماسازی از طرحی و تولید قطعات کوچک و کم اهمیتی چون انواع سایبان‌ها ارتقاء یافته است، تا جایی‌که امروزه بخش اعظمی از بدنهٔ انواع هواپیماها با استفاده از مواد مرکب ساخته می‌شوند. این مقوله خود به ارتقای عملکرد، کاهش نیروی پسار، افزایش قابلیت اطمینان و بهبود مقاومت در برابر خوردگی منجر می‌شود. کامپوزیت‌هایی چون فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه (جی. اف. آر. پی.)، فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن (سی. اف. آر. پی.[۲۰]) و فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف آرامید (ای. اف. آر. پی.[۲۱]) گزینه‌هایی استاندارد برای طراحی و تولید قطعات متنوعی چون انواع سطوح کنترلی هواپیما، آشیانهٔ موتور یا همان موتورپوش، بادشکن، آنتن‌پوش، درب ارابهٔ فرود[۲۲] (شکل ۱)، پانل‌های کف هواپیما، کانال فن‌ها و قطعاتی دیگر از این دست محسوب می‌شوند.

شکل ۱. ارابهٔ فرود بوئینگ ۷۷۷ به‌همراه درپوش کامپوزیتی آن

باید توجه داشت که کاهش وزن در اثر استفاده از مواد مرکب خود به نوع و کلاس هواپیما بستگی دارد. اجزای کامپوزیتی هواپیما معمولاً به‌صورت ساختارهای ساندویچی[۲۳] طراحی، تولید و استفاده می‌شوند. مغزی مورد استفاده در این دسته از مواد مرکب نیز می‌تواند به سه گونهٔ متنوع لانه‌زنبوری، برجسته و موج‌دار باشد. برای استفاده از مواد مرکب ساندویچی در صنایع هوافضا معمولاً از مغزی لانه‌زنبوری استفاده می‌شود [۲۵]. برای این منظور، موادی چون ورقه‌هایی از الیاف کربن و یا الیاف کربن همراه با آرامید یا شیشه به‌شکل لانه‌زنبوری ترکیب و برای استفاده در بخش‌های داخلی استفاده می‌شوند. برای طراحی و تولید قسمت‌های داخلی هواپیما لازم است تا کامپوزیت‌های مورد استفاده دارای ویژگی‌های مکانیکی و قابلیت شکل‌دهی مطلوبی باشند. این در حالی است که باید مواد مورد استفاده برای طراحی و ساخت قطعات بیرونی - که تحت فشار و شرایط کاری سخت‌تری قرار دارند - ویژگی‌های خاصی چون مقاومت در برابر اشتعال‌پذیری[۲۴] داشته باشند. برای طراحی و تولید بخش‌های داخلی هواپیما همچون محفظه‌های بار، جداره‌های بدنه، سقف، کف کابین، کف بارگیر[۲۵] و بخش‌هایی دیگر از این دست، از مواد مرکبی چون الیاف تقویت‌شده با اپوکسی[۲۶] یا الیاف تقویت‌شده با رزین فنول[۲۷] استفاده می‌شود [۲۶]. دلیل این امر نیز مقاومت خوب این ماده در برابر حریق است. این مادهٔ مرکب دارای ویژگی‌های دیرگدازی[۲۸] همچون اشتعال‌پذیری کم و انتشار اندک دود و گازهای آلاینده و سمی است [۲۷]. ویژگی‌های دیگری چون مقاومت در برابر ضربه، سفتی و صافی سطح از دیگر شاخصه‌های کلیدی در استفاده از مواد مرکب برای ساخت قطعات داخلی انواع هواپیما محسوب می‌شوند.

۲-۱-۱. هواپیماهای تجاری

شرکت هواپیماسازی ایرباس در تولید هواپیمای ایرباس ای. ۳۰۰-۲۹۰ از کامپوزیت‌های پیشرفته استفاده کرد. در این

هواپیما از مواد مرکب برای ساخت لبهٔ حملهٔ[۳۰] بال و صفحات بادشکن استفاده شده است. در سال ۱۹۷۹ م، ارزیابی‌ها و بررسی‌های فنی، مهندسان و متخصصان شرکت هواپیماسازی ایرباس را برآن داشت تا اجزای بیشتری از این پرنده را از مواد مرکب بسازند. برای این منظور بادشکن‌ها[۳۱] از جنس پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف کربن ساخته شدند. چندی بعد قطعات و بخش‌های دیگری چون سکان‌ها، ترمز هوایی[۳۲] و ارابهٔ فرود یا فرودافزار نیز از مواد مرکب تولید شدند. طی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۱۹۸۵ م، استفاده از مواد مرکب در ساخت قطعات و بخش‌های متنوع هواپیمای ایرباس ای. ۳۱۰[۳۳] رشد چشم‌گیری پیدا کرد و بعدها در سال ۱۹۸۶ م، این روند در طراحی و ساخت خانوادهٔ ایرباس ای. ۳۲۰[۳۴] نیز ادامه یافت [۲۸]. در جدول ۱ فهرستی از اجزای کامپوزیتی محصولات شرکت هواپیماسازی ایرباس معرفی شده است. در جدول ۲ اما، میزان استفاده از مواد مرکب در محصولات این شرکت ذکر شده است. در هواپیماهای ایرباس ای. ۳۰۰ بی. ۲ و بی. ۴، تنها مواد مرکب با الیاف شیشه مورد استفاده قرار گرفته است [۲۹]. حال آنکه در هواپیمای ایرباس ای. ۳۱۰ و ای. ۲۰۰ از فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف آرامید و کربن استفاده شده است [۳۰]. در مدل‌های ایرباس ای. ۳۲۰، ای. ۳۳۰ و ای. ۳۴۰ نیز از موادی چون فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه، کربن و آرامید به‌وفور استفاده شده است. بهره‌گیری از مواد مرکب پیشرفته در محصولات شرکت هواپیماسازی ایرباس، از مدل ایرباس ای. ۳۰۰ شروع شده و تا به امروز همچنان ادامه داشته است. مثلاً حدود ۱۵ درصد از قطعات و ساختار هواپیمای ایرباس ای. ۳۲۰ از مواد مرکب تشکیل شده است و یا در مدل ایرباس ای. ۳۲۰ و ای. ۳۴۰، اگرچه وزن تمامی ساختارها و قطعات کامپوزیتی در جای خود قابل توجه است، اما وزن مجموع این قطعات تنها ۱۲ درصد از وزن کل سازه را تشکیل می‌دهند.

جدول ۱. قطعات و بخش‌های ساخته‌شده از مواد مرکب در محصولات شرکت هواپیماسازی ایرباس [۳۰]

نام هواپیما	بخش‌ها و قطعات ساخته‌شده از جنس مواد مرکب
ایرباس ای. ۳۰۰ بی. ۲ و بی. ۴	آنت‌پوش، لبهٔ حمله و لبهٔ فرار[۳۵] ماهیوار، کف کابین و بارگیر پایهٔ موتور، بادشکن‌ها، قسمت عقب بدنه، بال‌های عقب
ایرباس ای. ۳۰۰ و ایرباس ای. ۳۱۰	سکان، سکان افقی متحرک، پایدارکنندهٔ قائم، بادشکن‌ها، آشیانهٔ فن‌ها و موتور گهواره‌های موتور، بدنهٔ بال‌ها، درب ارابه‌های فرود، لبهٔ حمله و لبهٔ فرار ماهیوارها
ایرباس ای. ۳۲۰، ای. ۳۱۹ و ای. ۳۲۱	شهپر، پایدارکنندهٔ افقی (یا سکان افقی) و پایدارکنندهٔ قائم، سکان افقی متحرک، سکان، بادشکن‌ها، بالچه‌ها، آشیانهٔ موتور، آنتن‌پوش، درب ارابهٔ فرود، کف کابین، لبهٔ حمله و لبهٔ فرار ماهیوار، گهواره‌های موتور، بدنهٔ بال‌ها، پایهٔ اصلی ارابهٔ فرود
ایرباس ای. ۳۳۰	شهپرها، سکان، بالچه‌ها، بادشکن‌ها، سکان افقی متحرک، پایدارکننده‌های افقی و قائم، لبهٔ حمله و لبهٔ فرار ماهیوار، درب ارابهٔ فرود، گهواره‌های موتور، بدنهٔ بال‌ها
ایرباس ۳۴۰	شهپرها، سکان، بالچه‌ها، بادشکن‌ها، سکان افقی متحرک، پایدارکننده‌های افقی و قائم، لبهٔ حمله و لبهٔ فرار ماهیوار، درب ارابهٔ فرود، گهواره‌های موتور، بدنهٔ بال‌ها

جدول ۲. میزان مواد مرکب مورد استفاده در محصولات شرکت هواپیماسازی ایرباس [۳۱]

نام هواپیما	مواد مرکب استفاده‌شده	درصد مواد مرکب مورد استفاده
ایرباس ای. ۳۰۰	حدود ۴۰۰۰ پوند	۵ درصد
ایرباس ای. ۳۱۰	حدود ۷۴۰۰ پوند	۷ درصد
ایرباس ای. ۳۲۰	حدود ۹۰۰۰ پوند	۱۵ درصد
ایرباس ای. ۳۳۰ و ای. ۳۴۰	حدود ۱۶۰۰۰ پوند	۱۲ درصد

نخستین هواپیمای تجاری ساخته‌شده در ایالات متحدهٔ امریکا که در آن از قطعات و اجزای کامپوزیتی استفاده شده بود، توسط شرکت هواپیماسازی بوئینگ ساخته شد و در سال ۱۹۷۰ م به پرواز درآمد. هواپیمای مورد نظر، با نام تجاری بوئینگ ۷۰۷، طرحی تکمیلی بود. روند استفاده از مواد مرکب در ساخت قطعات و بخش‌های گوناگون هواپیماهای تجاری پس از تدوین و ارائهٔ برنامهٔ جامع بهره‌وری انرژی هواپیما[۳۶] از سوی ادارهٔ ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحدهٔ امریکا (ناسا)[۳۷] گسترش چشم‌گیری پیدا کرد. در این برنامه، ویژگی‌های مواد مهندسی ساخته‌شده از ترکیبات کربن و اپوکسی، که برای مدتی طولانی در شرایط مختلف قرار گرفته‌اند، در طیف گسترده‌ای از بارهای خستگی معادل بیست سال و یا ۳۶۰۰۰ پرواز در خطوط هوایی بررسی می‌شود. این برنامه شامل خدمات پرواز اجزای متعدد کامپوزیتی برای کسب اعتماد در مورد دوام ساختارها و مواد مرکب پیشرفته بحث می‌کند. تجربهٔ برآمده از اجرای این برنامه سبب شد تا متخصصان شرکت هواپیماسازی بوئینگ برای طراحی و ساخت سطوح کنترل پرواز[۳۸] در محصولاتی چون بوئینگ ۷۵۷، بوئینگ ۷۶۷ و بوئینگ ۷۳۷ از فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن استفاده کنند [۳۲]. چندی بعد، متخصصان این شرکت بادشکن‌هایی از جنس کامپوزیت کربن اپوکسی طراحی کردند و این قطعهٔ جدید را در سال ۱۹۷۳ م، در هواپیمای بوئینگ ۲۰۰-۷۳۷ به‌کار بردند [۳۳].

در جدول ۳ قطعات و بخش‌هایی از محصولات شرکت هواپیماسازی بوئینگ که برای ساخت آنها از مواد مرکب استفاده شده، معرفی شده است. در شکل ۲ نیز نمایی از قطعات و بخش‌های متنوع هواپیمای بوئینگ ۷۷۷، ساخته‌شده از مواد مرکب نمایش داده شده است. در جدول ۴ وزن کلی مواد مرکب مورد استفاده در محصولات متنوع شرکت هواپیماسازی بوئینگ ذکر شده است.

در هواپیمای بوئینگ ۳۰۰-۷۳۷ از فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن برای تولید قطعات و بخش‌هایی چون شهپرها، سکان افقی متحرک، سکان، بادشکن‌ها و درب موتورپوش‌ها استفاده شده است [۳۴]. در هواپیماهای بوئینگ ۷۵۷ و ۷۶۷ اما، فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن برای طراحی و ساخت سکان افقی متحرک، بادشکن‌ها، درب ارابه‌های فرود، موتورپوش‌ها استفاده می‌شود. در اوائل، بیشتر بادشکن‌ها و پانل‌های ثابت موجود در کابین بوئینگ ۷۵۷ و ۷۶۷ از کامپوزیت‌های ساندویچی با مغزی لانه‌زنبوری متشکل از ترکیبات آرامید و اپوکسی و یا آرامید و کربن و اپوکسی ساخته می‌شدند [۳۲]. اما رفته‌رفته طراحان شرکت بوئینگ دریافتند که به‌دلیل ترک‌خوردگی ماتریس و سطح این مواد، استفاده از آنها برای تولید چنین قطعاتی چندان منطقی و اقتصادی نیست، لذا از مواد مرکب ساندویچی با ترکیبات شیشه اپوکسی بهره گرفتند تا از این رهگذر کیفیت سطح قطعات پس از مدتی تنزل نیابد و سطح دچار ترک نشود.

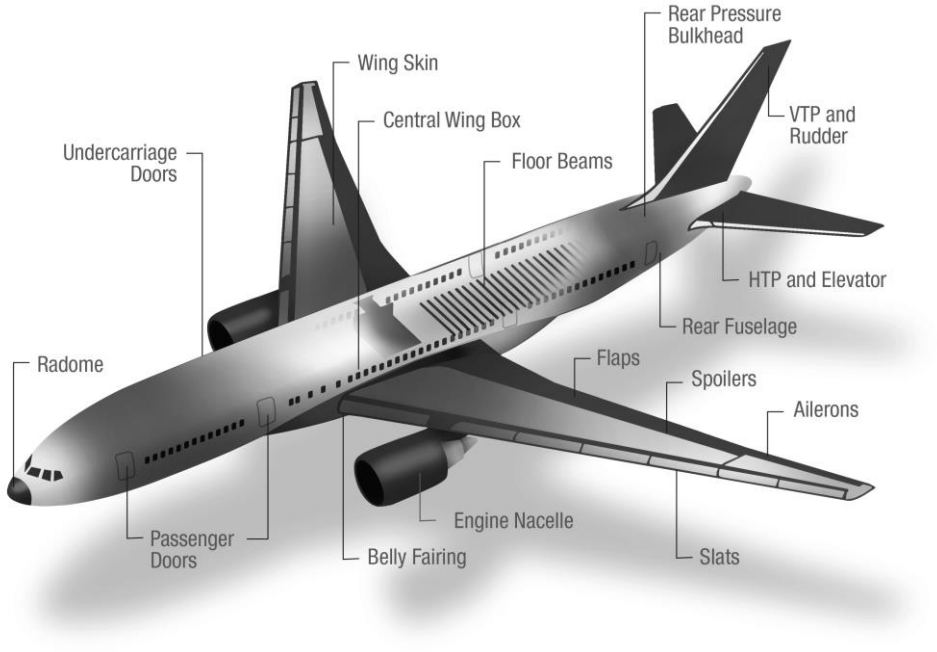
برای تولید بوئینگ ۷۷۷ از ۳۳۰۰۰ پوند مادهٔ مرکب استفاده شد که از این میان، حدود ۱۰۰۰۰ هزار پوند فیبر پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن برای ساخت قطعات و بخش‌هایی چون سطوح کنترل پرواز، قسمت داخلی دم هواپیما، تیرهای کف کابین، درب ارابهٔ اصلی فرود و گهواره‌های موتور مورد استفاده قرار گرفت. امروزه به‌نظر نمی‌رسد که شرکت بوئینگ استفادهٔ گسترده‌تری از مواد مرکب را در طراحی و تولید هواپیماهای تجاری خود لحاظ کرده باشد. به‌عنوان مثال، در تولید بوئینگ ۷۷۷ در مقایسه با هواپیمای ایرباس ای. ۳۲۰ از مواد مرکب کمتری استفاده شده است.

جدول ۳. قطعات و بخش‌های ساخته‌شده از مواد مرکب در محصولات شرکت بوئینگ [۳۵]

نام هواپیما	بخش‌ها و قطعات ساخته‌شده از جنس مواد مرکب
بوئینگ ۲۰۰-۷۳۷	بادشکن‌ها، سکان افقی، لبهٔ فرار
بوئینگ ۳۰۰-۷۳۷	شهپر، سکان افقی متحرک، سکان هواپیما، گهواره‌های موتور
بوئینگ ۴۰۰-۷۳۷	شهپر، سکان افقی متحرک، سکان هواپیما، گهواره‌های موتور
بوئینگ ۴۰۰-۷۴۷	بالچه‌ها، دیواره‌ها و کف کابین، گهواره‌های موتور
بوئینگ ۷۵۷	شهپر، سکان افقی متحرک، سکان هواپیما، بادشکن‌ها، گهواره‌های موتور
بوئینگ ۷۶۷	شهپرها، سکان افقی متحرک، سکان هواپیما، بادشکن‌ها، درهای ارابهٔ فرود، گهواره‌های موتور
بوئینگ ۷۷۷	شهپرها، سکان افقی متحرک، سکان هواپیما، بادشکن‌ها، درب ارابه‌های فرود، گهواره‌های موتور، پوستهٔ بال‌ها، آنتن‌پوش، بدنهٔ قسمت عقب هواپیما، بادشکن‌های قسمت شکم هواپیما

جدول ۴. میزان مواد مرکب مورد استفاده در محصولات متنوع شرکت هواپیماسازی بوئینگ [۳۶-۳۷]

نام هواپیما	مواد مرکب استفاده‌شده	درصد مواد مرکب مورد استفاده
بوئینگ ۲۰۰-۷۳۷	حدود ۱۲۵۰ پوند	۱ درصد
بوئینگ ۳۰۰-۷۳۷	حدود ۱۱۵۰ پوند	۳ درصد
بوئینگ ۴۰۰-۷۳۷	حدود ۱۱۵۰ پوند	۳ درصد
بوئینگ ۷۵۷	حدود ۳۴۰۰ پوند	۳ درصد
بوئینگ ۷۶۷	حدود ۳۴۰۰ پوند	۳ درصد
بوئینگ ۷۷۷	حدود ۳۳۰۰۰ پوند	۱۰ درصد



شکل ۲. قطعات متنوع ساخته‌شده از مواد مرکب در هواپیمای بوئینگ ۷۷۷

شرکت هواپیماسازی ای. تی. آر[۳۹] برای ساخت سطوح کنترل پرواز محصولات خود از کامپوزیت کربن اپوکسی استفاده می‌کند. این شرکت برای ساخت بسیاری از قطعات هواپیمای ای. تی. آر. ۴۲[۴۰] از کامپوزیت‌های کولار اپوکسی استفاده کرده است [۳۰]. همچنین از کامپوزیت کربن اپوکسی برای ساخت اسکلت بال هواپیمای ای. تی. آر. ۷۲ استفاده کرده است. جالب است بدانیم که وزن اسکلت‌های بال این هواپیما در اثر استفاده از فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن در حدود ۱۳۰ کیلوگرم کاهش یافته است [۳۸].

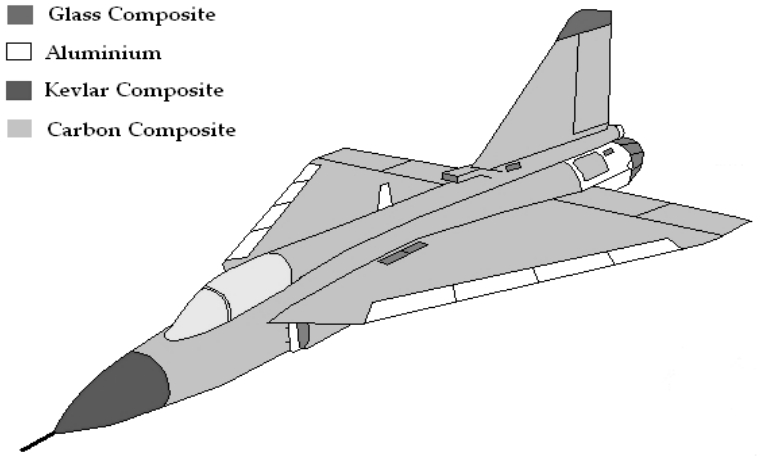
۲-۱-۲ هواپیماهای نظامی

در فرایند طراحی و تولید اغلب هواپیماهای نظامی از رشته‌های کربن تقویت‌شده با اپوکسی استفاده می‌شود [۳۹]. مثلاً حدود ۲۶ درصد از وزن جت جنگندهٔ ای. وی. ۸ بی. هریر ۲[۴۱]، شامل قطعات و بخش‌هایی چون اسکلت بال، بخش پیشین بدنه، سکان افقی ثابت، سکان افقی متحرک، سکان هواپیما و سطوح کنترل پرواز، جملگی از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن ساخته شده‌اند [۴۰]. در جدول ۵ اجزای کامپوزیتی مورد استفاده در جنگنده‌های گوناگون معرفی شده است.

جدول ۵. اجزای کامپوزیتی مورد استفاده در انواع جنگنده‌ها [۴۱]

نام هواپیما	قطعه یا بخش ساخته‌شده از مواد مرکب
گرومن اف. ۱۴ تام‌کت[۴۲]	درهای هواپیما، سکان افقی، بادشکن‌ها
مک‌دانل داگلاس اف. ۱۵ ایگل[۴۳]	سکان، پایدارکنندهٔ قائم، سکان افقی
جنرال داینامیکس اف. ۱۶ فایتینگ فالکن[۴۴]	پایدارکنندهٔ قائم، سکان افقی
مک‌دانل داگلاس اف. ای. ۱۸ هورنت[۴۵]	درها، پایدارکنندهٔ قائم، سکان افقی، اسکلت بال، بادشکن‌ها، ترمز هوایی
بی. ۱ لنسر[۴۶]	درها، پایدارکنندهٔ قائم، سکان افقی و بالچه‌ها
یوروفایتر تایفون[۴۷]	بال‌ها، سکان، شهپر و بدنهٔ هواپیما

به‌عنوان مثال در جت جنگندهٔ مک‌دانل داگلاس اف. ای. ۱۸ هورنت، در حدود ۱۰ درصد از وزن کل سازه و بیش از ۵۰ درصد از سطح بیرونی هواپیما از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن ساخته شده است. همچنین در جت جنگندهٔ یوروفایتر تایفون نیز کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن حدود ۳۰ درصد از وزن کل سازهٔ هواپیما و ۷۰ درصد از سطح بیرونی آن را تشکیل می‌دهند [۴۲]. پوستهٔ بال‌های این جنگنده نیز از چندلایه‌های کامپوزیتی طراحی و ساخته شده و در نوع خود بسیار خاص طراحی شده است. به‌عنوان مثالی دیگر در این زمینه، در جنگندهٔ ال. سی. ای.[۴۸] بیش از ۴۰ درصد از وزن کل هواپیما از مواد مرکب ساخته شده است. در این جنگنده قطعات و بخش‌هایی چون بال، پایدارکنندهٔ قائم و سطوح کنترل پرواز از مواد مرکب ساخته شده‌اند [۴۳]. در شکل ۴ نمایی شماتیک از این هواپیما و قطعات کامپوزیتی آن نمایش داده است.



شکل ۴. نحوهٔ توزیع مواد مرکب مورد استفاده در فرایند طراحی و ساخت بخش‌های متنوع جنگندهٔ ال. سی. ای.

۲-۱-۳. کاربردهای عمومی

جدای از کاربردهای فراوان مواد مرکب در طراحی و تولید قطعات و بخش‌های متنوع انواع هواپیما، اعم از هواپیماهای تجاری، مسافری و نظامی، از این مواد برای تولید بخش‌هایی از انواع هلی‌کوپتر نیز به‌وفور استفاده می‌شود. این فرایند نخستین‌بار در سال ۱۹۵۹ م با طراحی بهینه و تولید پروانهٔ اصلی هلی‌کوپتر بوئینگ سی. اچ. ۴۷ شنوک[۴۹] آغاز شد. پس از آن استفاده از مواد مرکب در صنایع ساخت هلی‌کوپتر روز به‌روز گسترش یافت؛ تا جایی‌که امروزه شاهد طراحی و ساخت بخش‌هایی چون پروانهٔ اصلی و پروانهٔ دم، سکان ثابت و بدنهٔ اصل هلی‌کوپتر از جنس مواد مرکب هستیم [۴۴]. بررسی‌های تجربی و آزمایشگاهی نشان می‌دهد که پره‌های کامپوزیتی پروانهٔ اصلی دارای عمر خستگی در حدود ۱۰۰۰۰ ساعت هستند و این در حالی است که پره‌های ساخته‌شده از جنس آلیاژهای تیتانیوم و فولاد عمر خستگی در حدود ۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ دارند [۴۵]. پره‌های منعطف روتور اصلی این هلی‌کوپتر از فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه ساخته شده‌اند. این پره‌ها در هلی‌کوپترهای ساختهٔ شرکت مک‌دانل - داگلاس[۵۰]، سری ام. دی. ۵۲۰ ان.[۵۱] و ام. دی. ۵۲۹۰۰[۵۲] نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند. محصولات این شرکت عمدتاً برای استفاده تجاری طراحی شده‌اند. این هلی‌کوپترهای سبک تجاری به سیستم نوتار[۵۳] مجهز هستند. واژهٔ نوتار مخفف عبارت هلی‌کوپتر بدون روتور دم است. این سیستم نخستین‌بار توسط مک‌دانل - داگلاس در اواخر دههٔ ۱۹۷۰ م طراحی و تولید شد. پره‌های کامپوزیتی این‌گونه از هلی‌کوپترها را می‌توان به‌گونه‌ای تولید کرد که به‌هنگام خرابی کاملاً مطمئن و بی‌خطر و یا در اصطلاح

خرابی بی‌خطر[۵۴] بوده، برخلاف پره‌های فلزی نیاز چندانی به بازرسی‌های دوره‌ای نداشته باشند [۴۶]. همچنین کارآمدی سیستم روتور و پره‌ها به‌دلیل ویژگی‌های متعدد مواد مرکب دائماً در حال بهبود و پیشرفت است. امروزه روتورها و پره‌های کامپوزیتی به‌دلائلی چون عمر کاری طولانی‌تر و هزینه‌های نگه‌داری و تعمیر کمتر، مورد توجه صنایع قرار گرفته‌اند.

جدای از مواردی که تاکنون بدانها اشاره شد، از مواد مرکب در برنامهٔ تولید هلی‌کوپترهای سبک پیشرفته[۵۵] ساخت شرکت هوانوردی هندوستان[۵۶] نیز به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شود. در فرایند طراحی و ساخت این هلی‌کوپترها، از مواد مرکب برای تولید تمامی ساختار ثانویه و بخش‌هایی از ساختار اولیهٔ هلی‌کوپتر استفاده می‌شود. دماغهٔ هلی‌کوپتر از جنس آرامید و قسمت دم آن از جنس فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن است. همچنین قطعاتی مثل توپی پروانه، پروانهٔ اصلی و پروانهٔ دم نیز از جنس کامپوزیت‌های پیشرفته طراحی و تولید می‌شوند (شکل ۷). از دیگر قسمت‌های کامپوزیتی هلی‌کوپترهای امروزی می‌توان به کابین خلبان اشاره کرد. امروزه برای ساخت بیش از ۶۰ درصد از قطعات و بخش‌های موجود در هلی‌کوپترها به‌نحوی از کامپوزیت‌های پیشرفته استفاده می‌شود و از این رهگذر چیزی در حدود ۳۰ درصد از وزن پرنده کاهش یافته است. شرکت یوروکوپتر[۵۷] در فرایند طراحی و تولید یکی از برزوترین محصولات خود با نام تجاری ایی. سی. ۱۳۵[۵۸] به‌میزان قابل توجهی از مواد مرکب استفاده کرده است. مثلاً پاشنهٔ[۵۹] پروانهٔ دم این هلی‌کوپتر تماماً از جنس کامپوزیت کربن شیشه و برای تولید مخروط دنباله[۶۰] از کامپوزیت‌های ساندویچی استفاده کرده و از این رهگذر وزن این پرنده را به‌میزان قابل توجهی کاهش داده است.

شکل ۶. هلی‌کوپتر ام. دی. ۶۰۰ان.[۶۱] مجهز به سیستم نوتار

شکل ۷. نمایی از توپی پروانهٔ ساخته‌شده از مواد مرکب

در جدول ۶ فهرستی از قطعات و بخش‌های کامپوزیتی مورد استفاده در انواع هلی‌کوپترها معرفی شده است. در صنعت ساخت هواپیما، تنها هواپیمای تمام‌کامپوزیتی که توانسته است گواهینامهٔ ادارهٔ هوانوردی فدرال[۶۲] را دریافت کند، هواپیمای ویندکر ایگل[۶۳]، ساختهٔ صنایع ویندکر[۶۴] ایالات متحدهٔ امریکاست. این هواپیما نخستین‌بار در سال ۱۹۶۷ م به‌پرواز درآمد. پس از آن، هواپیمایی با نام تجاری لیئر فان ۲۱۰۰[۶۵] بود که با بدنه‌ای از جنس فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن همراه با قطعاتی از جنس فیبرهای پلیمری تقویت‌شده با الیاف آرامید توانست نام خود را در فهرست هواپیماهای سبک تمام‌کامپوزیتی ثبت کند. هواپیمای تمام‌کامپوزیت دیگری که بخش اعظم قطعات داخلی آن از کامپوزیت‌های ساندویچی با مغزی لانه‌زنبوری و از جنس کربن اپوکسی ساخته شد، هواپیمای بیچ‌کرفت استارشیپ[۶۶]، ساختهٔ شرکت بیچ‌کرفت[۶۷] ایالات متحدهٔ امریکاست. این هواپیما نخستین‌بار در سال ۱۹۸۸ م به‌پرواز

درآمد. در هندوستان نیز، نخستین هواپیمای تمام‌کامپوزیت سبک توسط مجموعه آزمایشگاه‌های ملی هوافضا[۶۸] طراحی و تولید و با نام تجاری هـانسـا[۶۹] روانهٔ بازار شد. این هواپیما، که بیشتر برای مقاصد آموزشی مورد استفاده قرار می‌گیرد، گواهینامه‌ها و تأئیدیه‌های پرواز خود را در سال ۱۹۹۹ م دریافت کرد. این پرنده نمونه‌ای بارز از یک هواپیمای تمام‌کامپوزیت فوق‌سبک است.

به‌طور کلی قطعات و اجزای موجود در هر بخش از هواپیمای امروزی که با استفاده از کامپوزیت‌های پیشرفته طراحی و ساخته می‌شوند را می‌توان در یک نگاه بدین قرار برشمرد. اجزای کامپوزیتی موجود در قسمت بال هواپیما به‌ترتیب عبارت‌اند از: پوستهٔ تیرهای قوطی‌شکل موجود در سازهٔ بال، زیرسازهٔ[۷۰] تیرهای قوطی‌شکل موجود در سازهٔ بال، بالچه‌ها، لبهٔ حملهٔ پیش‌بال[۷۱]، بـرآافزا، شهپرها، بادشکن‌ها، لبه‌های حمله و فرار و نهایتاً انحنای موجود در محل اتصال بال و بدنه.

اجزای کامپوزیتی موجود در قسمت دم هواپیما[۷۲] به‌ترتیب عبارت‌اند از: پایدارکننده‌های افقی، پوسته‌ها، زیرسازه، سکان افقی متحرک، لبه‌های حمله و فرار و نهایتاً نوک بال. اجزای کامپوزیتی موجود در پایدارکنندهٔ قائم هواپیما نیز به‌ترتیب عبارت‌اند از: پوسته‌ها، زیرسازه، سکان‌ها، لبه‌های حمله و فرار و نوک بال.

جدول ۶. قطعات و بخش‌های کامپوزیتی مورد استفاده در انواع هلی‌کوپترها

نام هلی‌کوپتر	بخش یا قطعهٔ کامپوزیتی
ام. بی. بی. کاواساکی بی. کی. ۱۱۷[۷۳]	پره‌های پروانهٔ اصلی و پروانهٔ دم، پایدارکنندهٔ افقی، پایدارکنندهٔ قائم
بل ۲۰۶[۷۴]	پایدارکنندهٔ قائم
بل ۴۱۲[۷۵]	پره‌های پروانهٔ اصلی
دوفین[۷۶]	پره‌های پروانهٔ اصلی، پایدارکنندهٔ قائم
مک‌دانل داگلاس ام. دی. ۵۲۰ ان.[۷۷]	پره‌های پروانهٔ اصلی
مک‌دانل داگلاس ام. دی. ۹۰۰[۷۸]	پره‌های پروانهٔ اصلی، بخش میانی و داخلی بدنه، سایبان، پایدارکنندهٔ افقی، پایدارکنندهٔ قائم
هلی‌کوپتر سبک پیشرفته[۷۹]	پره‌های پروانهٔ اصلی و پروانهٔ دم، توپی پروانه، مخروط دماغه، درب خدمه و مسافران، آشیانهٔ موتور و قسمت‌های اعظمی از بخش دم

۳. جمع‌بندی

در این مقالهٔ مروری، کاربردهای متنوع مواد مرکب در حوزهٔ صنعت حمل‌ونقل، خصوصاً حمل‌ونقل هوایی، تحلیل و بررسی شده است. آنچه مسلم است، افق‌های فراروی صنعت طراحی و ساخت مواد مرکب پیشرفته به‌قدری وسیع و ظرفیت‌های این عرصه از دانش مهندسی به‌حدی زیاد است که می‌تواند به بستری مساعد برای تحول در عرصهٔ صنعت و فناوری روز کشور مبدل شود. لذا بجاست تا با بومی‌سازی این حوزه از دانش راه را برای شکوفایی هرچه بیشتر استعدادهای جامعهٔ علمی و صنعتی کشور هموار سازیم.

۴. مآخذ

[1] Crane, F. A. A., J. A. Charles, J. Furness, *Selection and Use of Engineering Materials*, Butterworth-Heinemann, 3rd edition, 1997.

[2] Mortensen, Andreas, *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, Elsevier Science, 2nd edition, 2006.

[3] Davies, Geoffrey, *Materials for Automobile Bodies*, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann, 2012.

[4] Noton, Bryan R., *Engineering applications of composites*, Academic Press, 1974.

[5] Starr, Trevor, Mary Starr, Technolex, *Thermoset Resins for Composites: Directory and Databook*, 2nd edition, Woodhead Publishing, 1998.

[6] Holbery, James, Dan Houston, "Natural-fiber-reinforced polymer composites in automotive applications." *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, November 2006, Volume 58, Issue 11, pp. 80-86.

[7] Li, Yan, Yiu-Wing Mai, Lin Ye. "Sisal fibre and its composites: a review of recent developments." *Composites Science and Technology*, Volume 60, Issue 11, August 2000, pp. 2037-2055.

[8] Duffy, James E., *I-Car Professional Automotive Collision Repair*, Cengage Learning, 2000.

[9] Morello L., Lorenzo Rosti Rossini, Giuseppe Pia, Andrea Tonoli, *The Automotive Body: Volume I: Components Design*, Springer, 2010.

[10] Kline, Gordon M., *Modern Plastics, Encyclopedia Issue*, Volume 34, Breskin Publications, 1956, p. 218.

[11] Cheremisinoff, Nicholas P., Paul N. Cheremisinoff, *Fiberglass Reinforced Plastics: Manufacturing Techniques and Applications*, 1st edition, William Andrew, 1995.

[12] Kelly, Anthony. *Concise Encyclopedia of Composite Materials*, Pergamon, 1994.

[13] Rudd, C.D., *Composites for Automotive Applications*, Rapra Technology Ltd, 2000.

[14] Davis, J.G., *Composite Materials: Testing and design*, American Society for Testing and Materials, 1974.

[15] Brewer, G. Daniel, *Hydrogen Aircraft Technology*, 1st edition, CRC Press, 1991.

[16] U.S. Air Force, *Manufacturing Technology Program 1992*, DIANE Publishing Company, p. 38.

[17] Royal Aeronautical Society, "The Aeronautical Journal", Volume 98, 1994, p. 183.

[18] Adsit, A., *Composites for Extreme Environments: A Symposium*, Astm Intl, 1982.

[19] Committee on High Performance Synthetic Fibers for Composites, *High Performance Synthetic Fibers for Composites*, National Academies Press, 1992.

[20] Davis, Joseph R., *ASM Specialty Handbook: Tool Materials*, ASM International, 1995.

[21] Shenoi, R. A., J. F. Wellicome, *Composite Materials in Maritime Structures (Cambridge Ocean Technology Series 4)*, Vol. 1: Fundamental Aspects, Cambridge University Press, 1993.

[22] Martin, R., *Ageing of Composites*, 1st edition, Woodhead Publishing, 2008.

[23] Mallick, P. K., *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3rd Edition, CRC Press, 2007.

[24] Jones, Robert M., *Mechanics of Composite Materials*, CRC Press, 1998.

[25] Committee on New Materials for Advanced Civil Aircraft, Commission on Engineering and Technical Systems, National Materials Advisory Board, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council, *New Materials for Next-Generation Commercial Transports*, National Academies Press, 1996.

[26] ASM International: Handbook Committee, *Engineered Materials Handbook: Composites*, ASM International, 1987.

[27] Knop, Andre, Louis A. Pilato, *Phenolic Resins*, Springer Science & Business Media, 1985.

[28] Michael Chun-Yung Niu, *Composite airframe structures: practical design information and data*, Conmilit Press, 1992.

[29] Hoa, S.V., R. Gauvin, *Composite Structures and Materials*, Springer, 1992.

[30] Jane, Frederick Thomas, *Jane's All the World's Aircraft*, Jane's Information Group, 1989.

[31] Bunsell, A. R., J. Renard, *Fundamentals of Fibre Reinforced Composite Materials*, CRC Press, 2005.

[32] Committee on Aging of U.S. Air Force Aircraft, Commission on Engineering and Technical Systems, National Materials Advisory Board, Division on Engineering and Physical Sciences, National Research Council, *Aging of U.S. Air Force Aircraft: Final Report*, National Academies Press, 1997.

[33] Mazumdar, Sanjay, *Composites Manufacturing: Materials, Product, and Process Engineering*, 1st edition, CRC Press, 2001.

[34] Vosteen, Louis F., *Composite chronicles: A study of the lessons learned in the development, production, and service of composite structures*, National Aeronautics and Space Administration, Langley Research Center, 1994.

[35] Chawla, Krishan K., *Composite Materials: Science and Engineering*, 3rd edition, Springer, 2013.

[36] Elhajjar, Rani, Valeria La Saponara, Anastasia Muliana, *Smart Composites: Mechanics and Design*, CRC Press, 2013.

[37] Yenne, Bill, *Inside Boeing: Building the 777*, Motorbooks International, 2002.

[38] Jacques Hognat, Rene Pinzelli, Eric Gillard, *50 Years of Advanced Materials or Back to the Future. Proceedings of the 15th International European Chapter Conference of the Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Toulouse, France, June 8-10, 1994*, SAMPE, 1994.

[39] Mallick, P. K., *Composites Engineering Handbook*, 1st edition, CRC Press, 1997.

[40] Schwartz, Mel M., *Composite Materials Handbook*, McGraw-Hill, 1992.

[41] Baker, Alan A., Stuart Dutton, Donald Kelly, *Composite Materials for Aircraft Structures*, Amer Inst of Aeronautics, 2nd edition, 2004.

[42] Adanur, Sabit, *Wellington Sears Handbook of Industrial Textiles*, CRC Press, 1995.

[43] Aeronautical Society of India, "The Journal of the Aeronautical Society of India", Volume 50, p. 11.

[44] Naik, N. K., *Aerospace Manufacturing Technology: Proceedings of the 13th National Convention of Aerospace Engineers*, Allied Publishers Pvt. Ltd., 1997.

[45] Scientific and Technical Information Office, *National Aeronautics and Space Administration Conference Publication*, National Aeronautics and Space Administration, 1993.

[46] American Helicopter Society, *Journal of the American Helicopter Society*, Volumes 25-27, 1980, p. 43.

پی‌نوشت

1. reinforced plastics
2. specific strength also known as the strength-to-weight ratio or strength/weight ratio

۳. گرمانرم یا ترموپلاستیک به پلیمرهایی گفته می‌شود که با افزایش دما بدون تغییر شیمیایی ذوب می‌شوند. این پلیمرها را می‌توان به دفعات ذوب کرد و دوباره جامد نمود. چنین پلیمرهایی در حالت مذاب همچون مایعات جاری می‌شوند و از این لحاظ با پلیمرهای دارای اتصالات عرضی متمایزند. مواد گرمانرم را می‌توان به‌طور پیوسته در چرخهٔ ذوب و انجماد قرار داد. این ویژگی، مواد گرمانرم را به موادی قابل بازیافت مبدل کرده است.

۴. گرماسخت یا ترموست اصطلاحاً به پلیمرهایی گفته می‌شود که در اثر اعمال حرارت در آنها پیوندهایی عرضی با واکنش‌های شیمیایی ایجاد می‌شود و در نتیجه وزن مولکولی متوسط آنها بالا می‌رود و به‌حالت یکپارچه و صلب درمی‌آیند.

۵. گیاه سیسل گونه‌ای از گیاه آگاوه است که بیشتر در منطقهٔ جنوبی مکزیک می‌روید. رشته‌های این گیاه در صنایع به‌وفور مورد استفاده قرار می‌گیرد. در گذشته از رشته‌های این گیاه برای تولید انواع طناب، پارچه، فرش و کاغذ استفاده می‌شده است.

6. compressor stages
7. lift force
8. drag force

۹. ماهیوار یا ایرفویل نام شکل ویژه‌ای است که مقطع بال هواپیما یا برخی از تیغه‌های صنعتی همچون ملخ‌ها و پروانه‌ها دارند. فرهنگستان زبان و ادب فارسی برابرنهادهٔ ماهیوار را برای واژهٔ ایرفویل برگزیده است. البته در متون و نصوص فنی گوناگون عبارت‌های دیگری همچون هوابُر، دوکواره، برگهٔ هوا و مقطع بال نیز به‌عنوان برابرنهادهٔ واژهٔ ایرفویل به‌چشم می‌خورد.

۱۰. اصطلاحاً نسبت عمق یا ارتفاع یک ساختار به کوچکترین بعد افقی آن را نسبت ابعادی می‌نامند.

۱۱. ریل‌بند یا تراورس اصطلاحاً به تکیه‌گاه بتونی، فولادی یا چوبی گفته می‌شود که ریل‌ها روی آن بسته می‌شوند. در گذشته، ریل‌بندهای فولادی بیشترین مورد استفاده را در صنعت حمل‌ونقل ریلی داشتند. اما امروزه، به‌دلیل هزینهٔ بالای تولید و عمر مفید اندک، این نوع از ریل‌بندها کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرند. ریل‌بندهای چوبی به‌لحاظ نرمی و سهولت تردد قطارها، مزیت بسیاری بر انواع دیگر دارند. اما این‌گونه ریل‌بندها هزینه‌های تولید زیادی دارند و بیشتر در کشورهایی استفاده می‌شوند که تولید چوب مناسب ارزان‌تر است.

12. hopper car
13. fiber-reinforced polymer (FRP)
14. Glass-fiber reinforced plastic (GFRP)
15. helicopter canopy

۱۶. آنتن‌پوش یا ریدوم به سازه‌ای معمولاً کروی‌شکل و ساخته‌شده از جنس فایبرگلاس گفته می‌شود. این سازه برای مصون نگاه‌داشتن آنتن در برابر عوامل طبیعی روی آنتن قرار داده می‌شود. از جمله دلائل استفاده از این پوشش، محافظت در برابر سرما و گرما و خوردگی ناشی از باران است. دلیل دوم نیز پوشاندن آنتن از دید دیگران است که مثلاً در کاربردهای نظامی می‌توان از آن برای پوشاندن آنتن از دید دشمن استفاده کرد. دلیل سوم ایجاد مرز بین آنتن و محیط اطراف است. مثلاً در آنتن‌های چرخان می‌توان از آنتن‌پوش استفاده کرد تا به افرادی که از کنار آنها عبور می‌کنند برخورد نکند. آنتن‌پوش‌ها از جنس‌هایی ساخته می‌شوند که دارای ضریب گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی بسیار کمی باشند تا از این رهگذر بر روی امواج الکترومغناطیس که بین محیط و آنتن درون آنها رد و بدل می‌شود اثر نامطلوب نداشته باشد.

17. Fairing
18. Rudder
19. Boron Fibre Reinforced Plastics (BFRP)
20. Carbon fiber-reinforced polymer, carbon fiber-reinforced plastic or carbon fiber-reinforced thermoplastic (CFRP, CRP, CFRTP or often simply carbon fiber, or even carbon)
21. Aramid fiber-reinforced plastic (AFRP)

۲۲. ارابهٔ فرود یا فرودافزار اصطلاحاً به سازه‌ای اطلاق می‌شود که هواپیما به‌هنگام توقف یا حرکت روی زمین بر آن تکیه می‌کند. ارابهٔ فرود معمولاً دارای چرخ است اما در برخی از انواع هواپیماها از اسکی (برای حرکت روی برف) و محفظهٔ هوا (برای حرکت روی آب) نیز به‌جای چرخ استفاده می‌شود. معمولاً چرخ‌ها در قسمت‌های دو بال، بدنه و دماغهٔ هواپیما قرار دارند. در بیشتر هواپیماها ارابهٔ فرود پس از برخاستن هواپیما جمع می‌شود تا از نیروی پسار بکاهد. برخی از انواع فرودافزارها عبارت‌اند از: فرودافزارهای ثابت فنری، فرودافزارهای ثابت تلسکوپی، فرودافزارهای ثابت اهرمی، فرودافزارهای جمع‌شوندهٔ تلسکوپی و نهایتاً فرودافزارهای جمع‌شوندهٔ اهرمی.

23. sandwich structures

۳۶. برنامهٔ جامع بهره‌وری انرژی هواپیما مجموعه‌ای از قوانین و دستورالعمل‌های مدون‌شده از سوی ادارهٔ ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحدهٔ امریکاست که باهدف گسترش فناوری‌های موجود در حوزهٔ دانش هوافضا موجب بهره‌وری هرچه بیشتر و صرفه‌جویی در میزان مصرف سوخت شده است. تدوین این برنامهٔ جامع در سال ۱۹۷۳ م آغاز شد. این برنامه مجموعه‌ای از شش پروژهٔ مجزا و در عین‌حال مرتبط با یکدیگر است که هر یک به‌طور جداگانه مدیریت می‌شوند. اجرای این برنامه سبب ظهور و بروز پیشرفت‌هایی در حوزهٔ فناوری‌های عرصهٔ مهندسی هوافضا و به‌دنبال آن صرفه‌جویی در میزان مصرف سوخت در انواع هواپیما شده است. توضیحات جامع‌تر دربارهٔ هر یک از زیرمجموعه‌های شش‌گانهٔ این برنامهٔ جامع در وبگاه رسمی ادارهٔ ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحدهٔ امریکا (ناسا) قابل دسترسی است.

37. National Aeronautics and Space Administration (NASA), http://www.nasa.gov (accessed October 11, 2014)

38. Flight control surfaces

39. ATR (Aerei da Trasporto Regionale or Avions de transport régional)

۴۰. ای. تی. آر. ۴۲ یک هواپیمای دو موتورهٔ توربو پراپ است. این هواپیما به‌عنوان محصول مشترک ایتالیا و فرانسه در سال ۱۹۸۱ م تکمیل شد. عدد ۴۲ در این هواپیما نشان‌دهندهٔ تعداد صندلی‌های آن است که از ۴۲ تا ۵۲ صندلی گنجایش دارد. طراحی و توسعهٔ این هواپیما در سال ۱۹۸۱ م آغاز و در شانزدهم اوت ۱۹۸۴ با موفقیت به پرواز در آمد. پس از دریافت گواهینامه‌های پروازی در سپتامبر ۱۹۸۵ نخستین نمونه از این هواپیما در نهم دسامبر ۱۹۸۵ وارد خطوط هوایی شد. تا سال ۱۹۹۵ مدل استاندارد، ای. تی. آر. ۳۰۰-۴۲ بود که علاوه بر ظرفیت بار مفید بیشتر از حداکثر وزن برخاست بالاتری نسبت به مدل پیش‌نمونه برخوردار بود. نمونهٔ دیگر ای. تی. آر. ۳۲۰-۴۲ بود که برای عملکرد بهتر در دما و ارتفاعات به موتورهای قوی‌تری مجهز شده بود. مهم‌ترین مدل بهبودیافته، ای. تی. آر. ۵۰۰-۴۲ است. این نمونه از موتورهای قوی‌تری نیرو می‌گیرد که همین افزایش قدرت سبب دستیابی هواپیما به سرعت کروز بالاتری می‌شود. استفاده از ملخ‌هایی با شش تیغه، حداکثر برد به اندازه ۱۸۵۰ کیلومتر، کابین خلبان دیجیتال، سکان افقی متحرک، سیستم ترمز و ارابه‌های فرود جدیدتر، بال و بدنهٔ تقویت‌شده برای تحمل وزن‌های بیشتر از دیگر ویژگی‌های این نمونه است.

۴۱. جت جنگندهٔ هریر از جمله هواپیماهای نظامی است که توانایی پرواز عمودی و برخاست و فرود در مسافت‌های کوتاه را دارد. این هواپیمای جنگنده، برای دور نگاه‌داشتن پایگاه‌های هوایی بزرگ و آسیب‌پذیر در برابر سلاح های هسته‌ای تاکتیکی استفاده می‌شد و پس از آن در ناوهای هواپیمابر مورد استفاده قرار گرفت. یک وجه تمایز هریر با دیگر جنگنده‌های غربی ساخته‌شده پس از جنگ جهانی دوم این است که

24. flammability resistance

25. cargo floor

26. fibre reinforced epoxy

27. fibre reinforced phenolic resin

28. Fire-resistant

۲۹. ایرباس ای. ۳۰۰، هواپیمایی مسافری ساختهٔ شرکت هواپیماسازی ایرباس است که نخستین‌بار در بیست و هشتم اکتبر ۱۹۷۲ معرفی شد و دو سال بعد رسماً به خدمت شرکت‌های هواپیمایی درآمد. از مشخصات فنی این هواپیما می‌توان به وجود دو موتور توربوفن در زیر دو بال آن، ۴۴/۸ متر فاصله میان نوک دو بال، ۵۴/۱ متر طول، ۱۶/۵ متر ارتفاع، ۳۶۱ نفر ظرفیت حمل مسافر، بیشینهٔ سرعت ۸۹۵ کیلومتر بر ساعت و محدودهٔ پروازی ۷۷۰۰ کیلومتر اشاره کرد. ساخت این هواپیما در ژوئیهٔ سال ۲۰۰۷ متوقف شد.

۳۰. لبهٔ حمله قسمت جلویی ماهیوار است که مستقیماً هوا را می شکافد. لبهٔ حمله نخستین بخشی است که در آغاز پرواز با هوا برخورد و در فرایند تولید نیروی بـرآر شرکت می‌کند.

31. spoilers

32. Air brakes or more formally a compressed air brake system

۳۳. ایرباس ای. ۳۱۰ یک هواپیمای باریک‌پیکر مسافربری ساختهٔ شرکت هواپیماسازی ایرباس است. این هواپیما گونهٔ کوچکتری از ایرباس ای. ۳۰۰ است که ساخت آن به سفارش شرکت‌های سوئیس ایر و لوفت‌هانزا از سال ۱۹۷۸ م آغاز شد و نخستین‌بار در سوم آوریل ۱۹۸۲ به پرواز در آمد. نخستین نمونهٔ تجاری آن یک سال بعد به شرکت هواپیمایی لوفت‌هانزا تحویل داده شد. این هواپیما دارای دو موتور توربوفن در زیر دو بال، فاصلهٔ نوک دو بال ۴۳/۹ متر، طول ۴۶/۷ متر، ارتفاع ۱۵/۸ متر، ظرفیت حمل مسافر ۲۸۰ نفر، بیشینهٔ سرعت ۸۹۵ کیلومتر بر ساعت و نهایتاً محدودهٔ پرواز ۸۰۵۰ کیلومتر است. ساخت این هواپیما در ژوئیهٔ ۲۰۰۷ متوقف شد.

۳۴. خانوادهٔ ایرباس ای. ۳۲۰ مجموعه‌ای از هواپیماهای مسافربری ساختهٔ شرکت ایرباس است. ساخت ایرباس ای. ۳۲۰ از سال ۱۹۸۴ م آغاز شد و نخستین‌بار در ۲۲ فوریهٔ ۱۹۸۷ در تولوز فرانسه به‌پرواز درآمد و در ژوئیهٔ سال بعد در اختیار شرکت هواپیمایی ایر فرانس قرار گرفت. دیگر هواپیماهای این سری عبارت‌اند از ایرباس ای. ۳۱۸، ایرباس ای. ۳۱۹ و ایرباس ای. ۳۲۱. هواپیمای ایرباس ای. ۳۲۰ دارای دو موتور توربوفن در زیر دو بال، فاصلهٔ نوک دو بال ۳۴/۱ متر، طول ۳۷/۶ متر، ارتفاع ۱۱/۸ متر، ظرفیت مسافر ۱۸۰ نفر، بیشینهٔ سرعت ۸۷۰ کیلومتر بر ساعت و نهایتاً محدودهٔ پرواز ۵۱۸۵ کیلومتر است.

۳۵. لبهٔ فرار اصطلاحاً قسمت انتهایی بال و آخرین نقطه‌ای است که هوا پس از ردشدن از سطوح بالا و پایین بال از آن می‌گذرد. این نقطه، به نقطهٔ ترک هوا نیز معروف است.

بی. ۱ ای. در اوایل دهۀ هفتاد تولید شد، اما ساخت آنها لغو و تنها چهار فروند از آنها ساخته شد. در اوائل دهۀ هشتاد مجدداً این بمب‌افکن با نام بی. ۱ بی. با تأکید بر سطح مقطع راداری کم مورد بازنگری قرار گرفته و در سال ۱۹۸۶ به‌عنوان یک بمب‌افکن اتمی وارد خدمت در نیروی هوایی امریکا شد.

۴۷. یوروفایتر تایفون یک جت جنگندۀ چندمنظوره و دوموتوره با کانارد و بال دلتاست. این هواپیما توسط کنسرسیومی اروپایی متشکل از سه شرکت بی. ای. ایی. سیستمز، ای. ای. دی. اس. و آلنیا آئروناتیکا طراحی و ساخته می‌شود. طراحی این هواپیما از سال ۱۹۸۳ م درپی پروژه مشترک پنج کشور بزرگ اروپای غربی؛ بریتانیا، آلمان غربی، ایتالیا، اسپانیا و فرانسه برای ساخت یک هواپیمای جنگنده آغاز شد و در سال ۱۹۸۶ م کمپانی یوروفایتر جی. ام. بی. اچ. برای ساخت این پروژه تشکیل شد. نخستین پیش‌نمونۀ یوروفایتر در سال ۱۹۹۴ م به پرواز درآمد، اما پایان جنگ سرد پیشرفت پروژه را به تأخیر انداخت و ورود رسمی این جنگنده به خدمت نظامی تا سال ۲۰۰۳ طول کشید. این هواپیمای تک‌سرنشینه که مدل دوسرنشینۀ آن هم برای آموزش ساخته می‌شود هم‌اکنون در حال تولید انبوه است. تایفون جنگنده‌ای بسیار چالاک است که از توانایی بالایی برای جنگ‌های هوایی نزدیک برخوردار است. این هواپیما قابلیت پرواز ابرپیمایشی با سرعت ۱/۵ ماخ را دارد و با وزن خالی ۱۱ تن قادر به برخاست با وزن ۲۳/۵ تن است.

48. LCA Aircraft

۴۹. بوئینگ سی. اچ. ۴۷ شنوک هلی‌کوپتر ترابری سنگین دوموتوره و دوملخۀ امریکایی است که در شرکت هواپیماسازی بوئینگ طراحی شده است. کاربرد اصلی این هلی‌کوپتر برای جابه‌جایی سربازان، ادوات توپخانه‌ای، سوخت، آب، موانع و سنگر و سایر تدارکات و تجهیزات مورد نیاز در میدان‌های نبرد است. کاربردهای ثانویه آن نیز شامل آمبولانس، امداد در رخدادها و بلایای طبیعی، جستجو و نجات، انتقال هواپیماها، آتش‌نشانی و رهاسازی چتربازان می‌شود. هلی‌کوپتر شنوک با حداکثر سرعت ۳۱۵ کیلومتر بر ساعت حتی از هلی‌کوپترهای بسیار کوچکتر تهاجمی و چندمنظورۀ معاصر خود هم سریع‌تر بود. نام این هلی‌کوپتر از قبیلۀ سرخ‌پوست شنوک در امریکا گرفته شده است. شنوک یکی از معدود هلی‌کوپترهای دهۀ ۱۹۶۰ م است که هنوز در خط تولید قرار دارد.

50. McDonnell Douglas Helicopters, Inc., http://www.mdhelicopters.com (accessed October 21, 2014)

51. MD 520N helicopters

52. MD 900 helicopters

53. No Tail Rotor system (NOTAR system)

54. fail-safe or fail-secure

55. India's Advanced Light Helicopter (ALH)

56. Hindustan Aeronautics Limited, http://www.hal-india.com (accessed October 21, 2014)

برخلاف اغلب آن هواپیماها - که سرعت‌های فراصوت دارند - هریر با سرعت فروصوت پرواز می‌کند.

۴۲. گرومن اف. ۱۴ تام‌کت مشهور به تام‌کت هواپیمای جنگندۀ فراصوت دوموتوره و دو سرنشین، ساخت شرکت گرومن امریکاست. این جنگنده نخستین پرواز خود را در سال ۱۹۷۰ م انجام داد و از سال ۱۹۷۴ برای خدمت در نیروی دریایی امریکا پذیرفته شد. این هواپیما از ۱۹۷۴ تا ۲۰۰۶ م در نیروی دریایی ایالات متحده به‌عنوان جنگندۀ برتری هوایی، هواپیمای رهگیر دفاعی و هواپیمای شناسایی تاکتیکی اصلی این نیرو خدمت کرد. این هواپیما برای نیروی دریایی امریکا ساخته شده است. اف. ۱۴ تام‌کت در ۲۲ سپتامبر ۲۰۰۶ در نیروی دریایی امریکا بازنشسته شد.

۴۳. مک‌دانل داگلاس اف. ۱۵ ایگل جنگنده‌ای امریکایی است که به‌منظور برتری هوایی و به سفارش دولت ایالات متحدۀ امریکا (برای نیروی هوایی ایالات متحده و گارد ملی هوایی) طراحی و ساخته شده است. این هواپیما را شرکت مک‌دانل - داگلاس، که امروزه بخشی از شرکت بوئینگ است، می‌ساخت. اف. ۱۵ جنگندۀ اصلی امریکا برای مراقبت از مرزهای هوایی این کشور است.

۴۴. جنرال داینامیکس اف. ۱۶ فایتینگ فالکن، به‌معنای شاهین مبارز، یک جت جنگندۀ تک‌موتوره و چندمنظورۀ مافوق‌صوت است که شرکت جنرال داینامیکس به‌سفارش دولت ایالات متحدۀ امریکا در دهۀ ۱۹۷۰ م طراحی کرد. نخستین پرواز این جنگنده در سال ۱۹۷۴ م انجام و چهار سال بعد در ارتش آمریکا وارد فعالیت رسمی خود شد. از سال ۱۹۹۳ م درپی فروش شرکت هواپیمایی جنرال داینامیکس به شرکت لاکهید این هواپیما در لاکهید مارتین تولید می‌شود.

۴۵. مک‌دانل داگلاس اف. ای. ۱۸ هورنت جت جنگندۀ چندمنظوره و فراصوت دوموتوره و تک‌سرنشینه‌ای است که در اواخر دهۀ ۱۹۷۰ م براساس جنگندۀ آزمایشی وای. اف. ۱۷ توسط شرکت مک‌دانل داگلاس و نورتروپ برای استفاده در نیروی دریایی و تفنگداران دریایی امریکا طراحی و ساخته شد. این هواپیما هم توانایی نبردهای هوایی و هم قابلیت حمله به اهداف سطحی را دارد و مهمترین مأموریت‌هایی که برای آن تعریف شده است شامل دفاع هوایی از ناوگان‌های دریایی، اسکورت جنگنده‌های دیگر، سرکوب پدافند هوایی دشمن، حملات ضربتی و بمباران اهداف زمینی و دریایی، مأموریت‌های برتری هوایی، رهگیری جنگنده‌ها و بمب‌افکن‌ها و موشک‌های دشمن، پشتیبانی نزدیک هوایی و شناسایی هوایی می‌شود.

۴۶. بی. ۱ لنسر یک بمب‌افکن چهارموتورۀ استراتژیک متعلق به نیروی هوایی امریکاست که توسط شرکت راکول، که امروزه بخشی از شرکت بوئینگ است، ساخته شده است. این بمب‌افکن محصول نیاز نیروی هوایی امریکا به یک بمب‌افکن فراصوت و دوربرد است که باید جایگزین بی. ۵۲ استراتوفورترس می‌شد. نخستین مدل‌های این بمب‌افکن با نام

۵۷. ایرباس هلی‌کوپترز یک شرکت چندملیتی فعال در حوزهٔ فرآوری هوافضایی است که بازوی طراحی و ساخت انواع هلی‌کوپتر گروه ایرباس به‌شمار می‌آید. این شرکت در سال ۱۹۹۲ م با ادغام بخش‌های هلی‌کوپترسازی شرکت فرانسوی ایراسپیشیال و شرکت دایملر - بنز، تحت نام یوروکوپتر تشکیل شد و در ژانویهٔ ۲۰۱۴ نام آن به ایرباس هلی‌کوپترز تغییر یافت. ایرباس هلی‌کوپترز یکی از سه گروه صنعتی هوافضای بزرگ دنیاست و از نظر حجم معاملات در رتبهٔ نخست بین تمامی شرکت‌های هلی‌کوپترسازی قرار می‌گیرد. این شرکت از نظر تنوع تولیدات نیز بالاترین رتبه را در میان همتایان خود دارد و از هلی‌کوپترهای سبک تک‌موتوره گرفته، تا هلی‌کوپترهای سبک و متوسط دوموتوره، همچنین هلی‌کوپترهای متوسط و سنگین ترابری، هم در مدل‌های نظامی و هم در مدل‌های غیرنظامی، در کارخانه‌های آن تولید می‌شوند.

58. EC 135
59. Fenestron or fantail
60. Tail cone
61. MD 600N Helicopter

۶۲. ادارهٔ هوانوردی فدرال یا به اختصار اف. ای. ای. دایره‌ای از واحد ترابری و حمل‌ونقل ایالات متحدهٔ امریکاست که وظیفهٔ کنترل و سرپرستی تمامی امور هوانوردی غیرنظامی در امریکا را برعهده دارد. این اداره وظیفهٔ صدور گواهینامه‌های ملی پرواز را برعهده دارد.

63. Windecker Eagle
64. Windecker Industries
65. LearAvia Lear Fan 2100
66. Beechcraft Starship
67. Beechcraft Corporation, http://www.beechcraft.com (accessed October 21, 2014)
68. National Aerospace Laboratories (NAL)
69. Hansa
70. substructure

۷۱. پیش‌بال اصطلاحاً به سطح ایرودینامیکی کوچک موجود در لبهٔ حملهٔ بال گفته می‌شود. پیش‌بال صفحهٔ متحرکی روی لبهٔ حملهٔ است که با بازشدن آن شکافی میان صفحه و لبهٔ بال ایجاد می‌شود و هوا به‌آرامی از زیر به روی بال حرکت می‌کند. وقتی پیش‌بال باز شود، زاویهٔ حملهٔ بال بالاتر است. به پیش‌بال، هوازِه، زه هوایی، شهپر حمله و برآافزای لبهٔ حمله نیز گفته می‌شود.

72. empennage also known as the tail or tail assembly
73. MBB/Kawasaki BK117
74. Bell 206L
75. Bell 412
76. Urocopter SA 365/AS365 Dauphin 2
77. McDonnell Douglas MD 520N
78. McDonnell Douglas MD 900
79. Advanced Light Helicopter (ALH)