



تحلیل استاتیکی استحکام سازه‌ی بال با مقطع Naca4412 با دو جنس متفاوت: کامپوزیت CFRP و پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA)

حسین دوستی ایرانی^{۱*}، میثم کماسی^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی هوافضا گرایش سازه‌های هوایی، دانشگاه صنعتی مالک

اشتر، hosseindoostiirani8099@gmail.com

۲- فارغ التحصیل کارشناسی مهندسی هوافضا، دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری، m.k13800906@gmail.com

چکیده:

در این پژوهش، تحلیل عددی سازه‌ای بال یک پهنپد سبک با استفاده از روش اجزای محدود انجام شده است. هدف، بررسی و مقایسه عملکرد سازه‌ای بال با دو ماده متفاوت شامل کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن و پلی‌لاکتیک‌اسید تحت بارگذاری یکنواخت استاتیکی است. مقطع بال بر پایه پروفیل آیرودینامیکی NACA 4412 طراحی شده و هندسه نهایی به صورت بال مستطیلی با طول دهانه ۱۲۰۰ میلی‌متر و وتر ۲۵۰ میلی‌متر مدل‌سازی شده است. تحلیل‌ها در نرم‌افزار آباکوس با در نظر گرفتن خواص مکانیکی غیرهمسان‌گرد کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن و خواص ایزوتروپیک پلی‌لاکتیک‌اسید انجام شده است. نتایج اولیه نشان می‌دهد که بال ساخته‌شده با کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن دارای سختی بالاتر، جابجایی کمتر و نسبت استحکام به وزن مطلوب‌تری نسبت به پلی‌لاکتیک‌اسید است، در حالی که پلی‌لاکتیک‌اسید به عنوان گزینه‌ای اقتصادی برای نمونه‌سازی و ساخت اولیه قابل توجه است. این مقایسه می‌تواند به طراحان در انتخاب مصالح مناسب برای بال پهنپادهای سبک با توجه به نیازهای کاربردی کمک نماید.

کلمات کلیدی: تحلیل اجزای محدود، بال پهنپاد، پروفیل NACA 4412، کامپوزیت CFRP، پلی‌لاکتیک‌اسید (PLA)

۱. مقدمه

پهنپادها به عنوان یکی از ارکان اصلی در حوزه‌های پایش محیطی، نظامی، نقشه‌برداری و حمل‌ونقل هوشمند، نیازمند طراحی بهینه سازه‌ای جهت تضمین عملکرد، پایداری و کارایی در مأموریت‌های مختلف هستند. از میان اجزای سازه‌ای پهنپاد، بال به دلیل نقش کلیدی در تولید نیروی برا، تأمین پایداری و تحمل بارهای آیرودینامیکی، نیازمند تحلیل دقیق و انتخاب مصالح مناسب است [1].

در طراحی آیرودینامیکی، پروفیل‌های سری NACA به ویژه NACA 4412، به علت دارا بودن انحنای متوسط و تولید نیروی برا بالا در زاویه حمله‌های پایین، گزینه‌ای متداول در طراحی بال پهنپادهای سبک و آموزشی به شمار می‌روند [2].



این پروفیل در بسیاری از مطالعات و کاربردهای واقعی به عنوان پایه طراحی بال به کار رفته است و خواص آیرودینامیکی آن به خوبی شناخته شده است [3].

از منظر مصالح، کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن به دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، سختی بالا، مقاومت در برابر خستگی و خوردگی، و قابلیت بهینه‌سازی با استفاده از چیدمان لایه‌ای، جایگاه ویژه‌ای در صنایع هوایی و فضایی دارند. تحقیقات متعددی نظیر پژوهش دانیل و ایشای [4] و مالیک [5] نشان داده‌اند که استفاده از کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن در سازه‌های خمشی، نظیر بال، منجر به افزایش چشمگیر در سختی خمشی و کاهش جابجایی می‌شود. در مقابل، پلی‌لاکتیک‌اسید که یک پلیمر زیست‌تجزیه‌پذیر قابل استفاده در فرآیند چاپ سه‌بعدی است، به علت در دسترس بودن، قیمت پایین، و سهولت در فرآیند تولید، برای نمونه‌سازی سریع و طراحی‌های اولیه به‌ویژه در پروژه‌های تحقیقاتی و آموزشی، مورد توجه قرار گرفته است [6,7].

در حوزه تحلیل سازه‌ای، روش اجزای محدود ابزار قدرتمندی برای بررسی رفتار مکانیکی سازه‌ها در برابر بارگذاری‌های مختلف فراهم می‌کند. در مطالعاتی مشابه با تمرکز بر پره‌های توربین، بال پرنده و سازه‌های پهنادهای سبک، نشان داده شده است که انتخاب جنس ماده نقش حیاتی در توزیع تنش، شکل‌پذیری و کارایی کلی سازه ایفا می‌کند [8-10]. بر این اساس، مقایسه دقیق دو ماده کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن و پلی‌لاکتیک‌اسید در شرایط بارگذاری یکسان می‌تواند معیارهای مؤثری برای تصمیم‌گیری در انتخاب مصالح فراهم آورد.

در این تحقیق، یک تحلیل استاتیکی خطی از بالی با مقطع NACA 4412، وتر ۲۵۰ میلی‌متر و طول دهانه ۱۲۰۰ میلی‌متر، با استفاده از نرم‌افزار آباکوس و روش اجزای محدود انجام شده است. پاسخ سازه‌ای بال تحت بار یکنواخت، در دو حالت جنس کامپوزیت‌های تقویت‌شده با الیاف کربن و پلی‌لاکتیک‌اسید بررسی شده و پارامترهایی مانند جابجایی، تنش، و نسبت سختی به وزن مقایسه گردیده است. نتایج این تحلیل می‌تواند در طراحی مفهومی و انتخاب مواد برای پهنادهای سبک بسیار مؤثر باشد.

۲. مواد و روش

در این پژوهش، هندسه بال پهناد بر اساس پروفیل آیرودینامیکی NACA 4412 طراحی شده است. مختصات پروفیل از یک فایل متنی حاوی نقاط بی‌بعد استخراج و با استفاده از دستور Spline در محیط Sketch نرم‌افزار آباکوس ترسیم گردید. برای مقیاس‌دهی، مختصات در وتر بال به اندازه ۲۵۰ میلی‌متر ضرب شده‌اند.

در ادامه، با استفاده از دستور Base Solid Extrude، مدل سه‌بعدی بال به طول دهانه ۱۲۰۰ میلی‌متر و مقطع NACA 4412 ایجاد شده است. برای انجام تحلیل عددی، از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده و دو ماده متفاوت برای ساخت بال بررسی شده‌اند: کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن، این ماده با فرض رفتار غیرهمسان‌گرد مدل شده است.

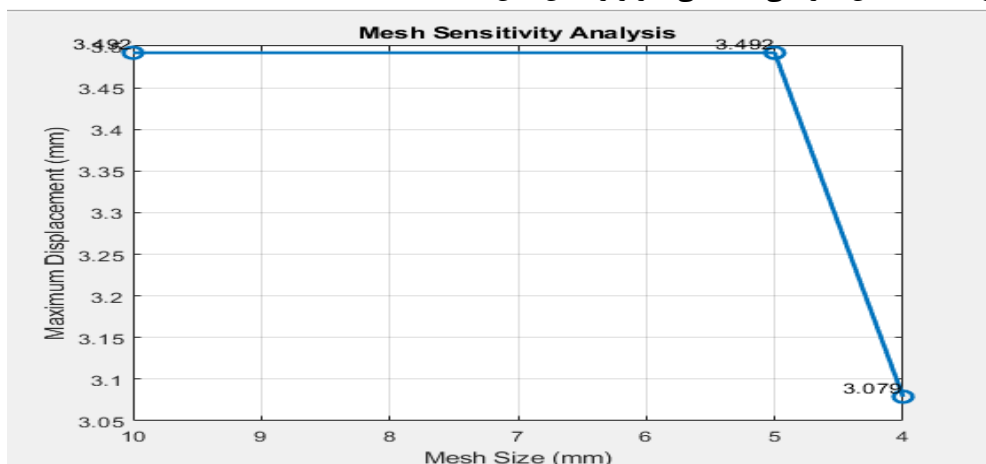
خواص مکانیکی معادل (Homogenized) به صورت ماتریس الاستیسیته وارد شده‌اند و در این مرحله، ساختار به صورت حجمی مدل شده است. در صورت نیاز به دقت بالاتر، امکان جایگزینی با المان‌های پوسته‌ای و تعریف دقیق چیدمان لایه‌ای نیز وجود دارد. پلی‌لاکتیک‌اسید، این ماده به صورت ایزوتروپیک خطی و با فرض رفتار کشسان الاستیک مدل شده است. خواص الاستیکی آن شامل مدول یانگ و ضریب پواسون از مراجع معتبر استخراج شده‌اند.

در شرایط مرزی، ریشه بال به صورت گیردار در نظر گرفته شده و یک فشار یکنواخت استاتیکی بر سطح فوقانی بال اعمال گردیده است. این بارگذاری به منظور شبیه‌سازی شرایط پرواز در سرعت‌های پایین و حالت پایدار انجام شده است.

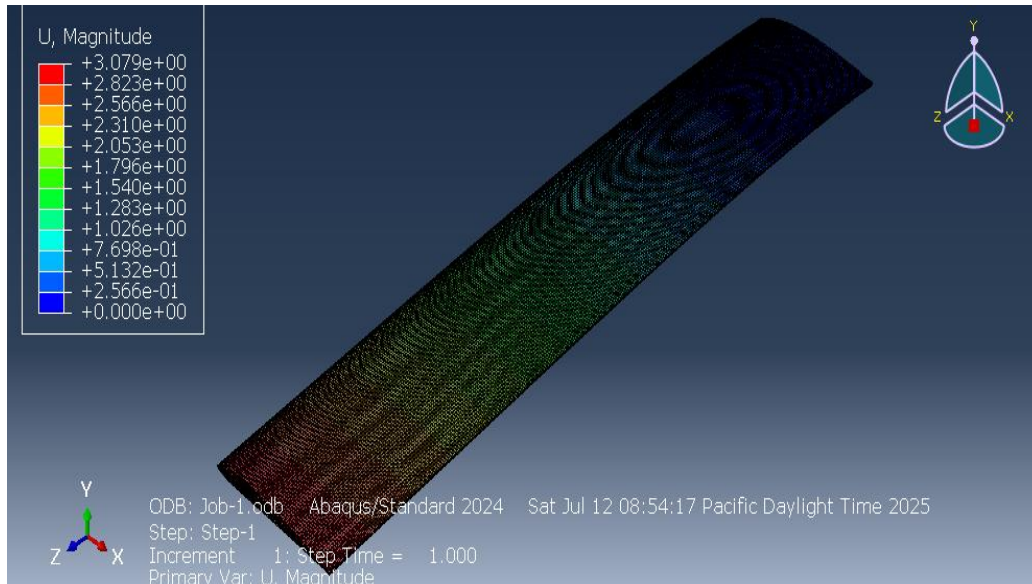
برای مش‌بندی، از المان‌های حجمی هشت‌گره‌ای کاهش‌یافته (C3D8R) استفاده شده و مدل‌سازی به گونه‌ای انجام گرفته که نسبت منظری المان‌ها در محدوده قابل قبول قرار گیرد. همچنین، جهت اطمینان از دقت نتایج و همگرایی حل عددی، تحلیل حساسیت به مش انجام شد.

بدین منظور، مدل بال با سه اندازه مختلف دانه‌بندی مش، شامل ۱۰ میلی‌متر، ۵ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر، مورد بررسی قرار گرفت. برای هر اندازه مش، یک تحلیل استاتیکی خطی جداگانه در نرم‌افزار آباکوس اجرا شد. جابجایی ماکزیمم در نوک بال نقطه با مختصات ($x=1200\text{mm}$) به عنوان معیار اصلی ارزیابی انتخاب گردید.

نتایج نشان داد که جابجایی ماکزیمم برای مش با اندازه ۱۰ میلی‌متر برابر با ۳.۴۹۲ میلی‌متر، برای مش ۵ میلی‌متر نیز ۳.۱۱۲ میلی‌متر و برای مش ۴ میلی‌متر برابر با ۳.۰۷۹ میلی‌متر به دست آمد. اختلاف جابجایی بین مش ۵ میلی‌متر و ۴ میلی‌متر حدود ۱۳.۴ درصد بوده است، که نشان‌دهنده همگرایی قابل قبول ولی بهبودپذیر در مش ۵ میلی‌متر می‌باشد. برای نمایش بصری همگرایی، نمودار تغییرات جابجایی ماکزیمم بر حسب اندازه مش در شکل شماره ۱ ارائه شده است. این نمودار نشان‌دهنده کاهش تدریجی جابجایی با ریزتر شدن مش است.

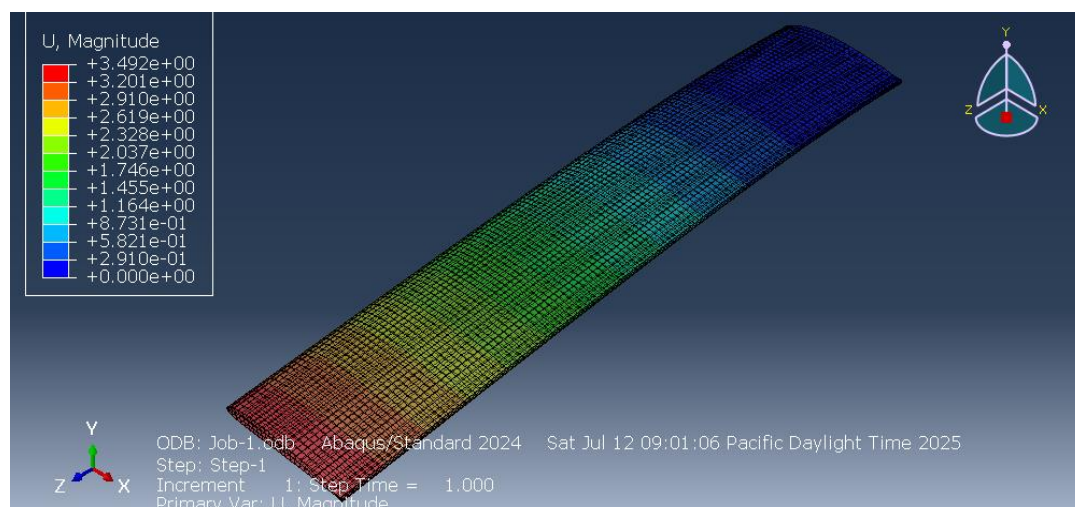


شکل شماره ۱) نمودار حساسیت مش با سایزهای ۴ میلی‌متر، ۵ میلی‌متر و ۱۰ میلی‌متر

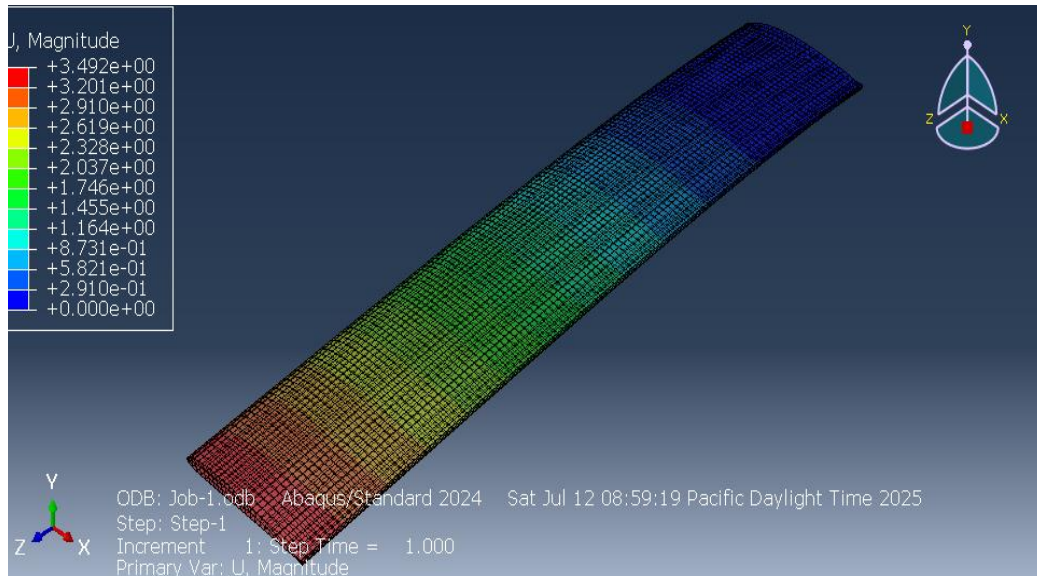


شکل شماره ۲) تصویر مربوط به جابجایی سازه از جنس PLA در اثر بار استاتیکی با مش بندی ۴ میلی متر

همچنین، توزیع جابجایی ماکزیمم برای هر اندازه مش در شکل های شماره ۲ (مش ۴ میلی متر) و شماره ۳ (مش ۵ میلی متر)، و شکل شماره ۴ (مش ۱۰ میلی متر) نشان داده شده است. با توجه به این تحلیل، مش با اندازه ۴ میلی متر برای ادامه تحلیل ها انتخاب گردید. در این تحلیل، مش در دو حالت با اندازه متفاوت تولید شده و تغییرات جابجایی ماکزیمم بین آن ها مقایسه گردیده است. نتایج حاکی از همگرایی مناسب حل عددی در مش ریز بوده است. در پایان، تحلیل به صورت استاتیکی خطی انجام شده و خروجی هایی نظیر توزیع تنش، کرنش، تغییر شکل کلی و جابجایی ماکزیمم برای هر دو ماده استخراج شده اند.

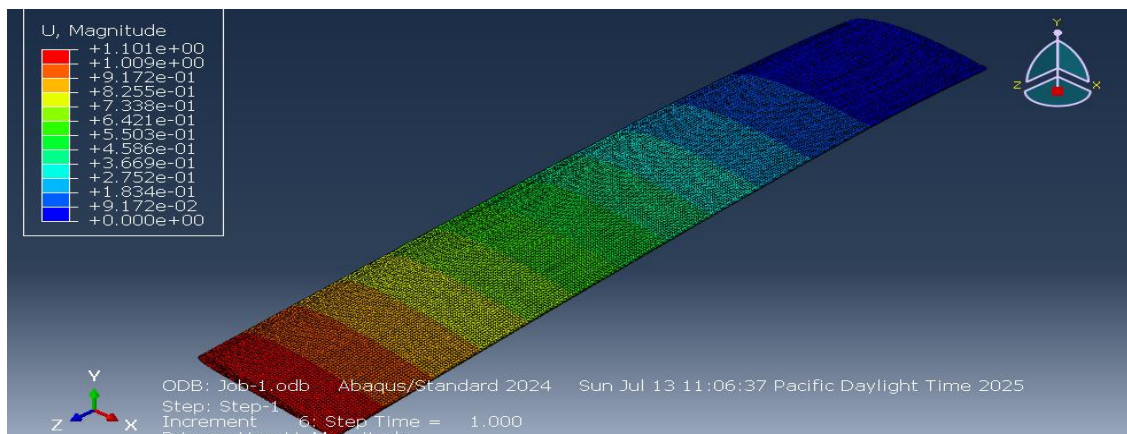


شکل شماره ۳) تصویر مربوط به جابجایی سازه از جنس PLA در اثر بار استاتیکی با مش بندی ۵ میلی متر



شکل شماره ۴) تصویر مربوط به جابجایی سازه از جنس PLA در اثر بار استاتیکی با مش بندی ۱۰ میلی متر

در ادامه ی تحلیل، همان مدل بال با استفاده از مش ۴ میلی متری و جنس کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) تحت همان شرایط مرزی و بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت. مطابق با نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی خطی در نرم افزار آباکوس، مقدار جابجایی ماکزیمم در نوک بال برابر با ۱.۱۰۱ میلی متر به دست آمد. این مقدار به طور محسوسی کمتر از جابجایی متناظر در مدل ساخته شده از پلی لاکتیک اسید (PLA) است که در تحلیل قبلی حدود ۳.۰۷۹ میلی متر گزارش شده بود. این اختلاف عمدتاً ناشی از تفاوت در مدول یانگ و خواص مکانیکی بین دو ماده بوده و نشان دهنده تأثیر چشم گیر جنس ماده در پاسخ سازه ای بال تحت بارگذاری یکنواخت است. بنابراین، استفاده از مواد کامپوزیتی با مدول بالا می تواند در کاهش تغییر شکل و بهبود عملکرد سازه ای بال پهناد نقش مؤثری ایفا کند. نتیجه تحلیل استاتیکی تحت بار مشابه برای بال با جنس کامپوزیتی به صورت شکل شماره ۵ می باشد:

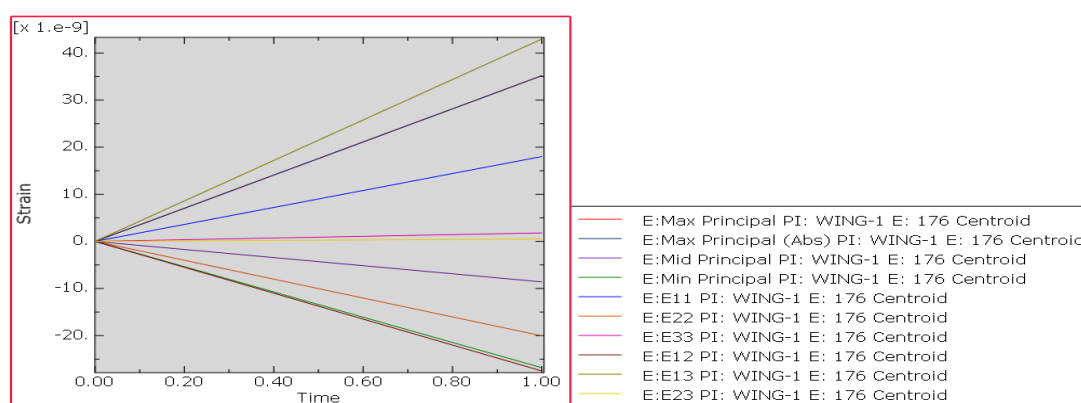


شکل شماره ۵) مربوط به جابجایی سازه از جنس کامپوزیت در اثر بار استاتیکی با مش بندی ۴ میلی متر

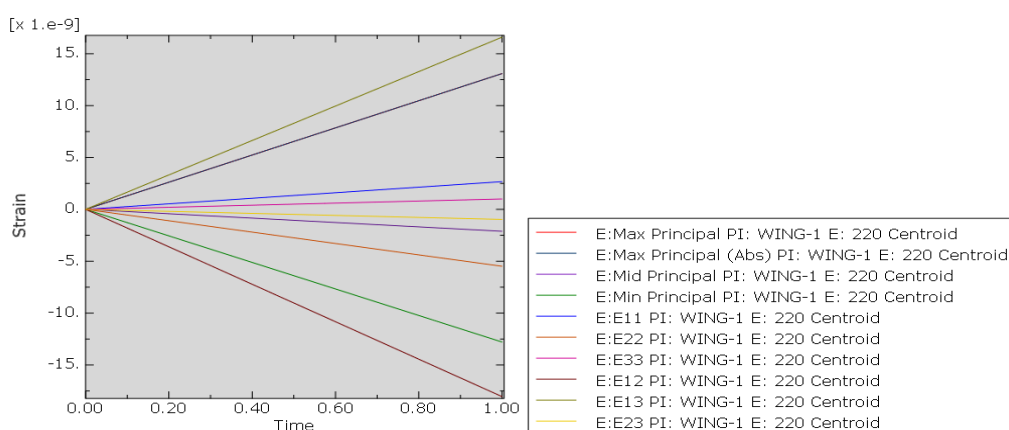


علاوه بر جابجایی، برای بررسی دقیق تر رفتار مکانیکی بال در سطح مصالح، مقادیر کرنش اصلی و مؤلفه های کرنش در نقاط بحرانی دو مدل نیز استخراج گردید.

نمودارهای حاصل از تحلیل زمانی کرنش در نقطه ای در نزدیکی نوک بال (Centroid of Element 176 و ۲۲۰) برای مواد PLA و CFRP در شکل های شماره ۶ و ۷ نمایش داده شده اند. همان طور که در شکل شماره ۶ مشاهده می شود، ماده PLA دارای کرنش های اصلی (مانند: E:Max Principal) تا حدود $10^{-8} \times 4$ (واحد کرنش) است که بیانگر تغییر شکل های بزرگ تری تحت بارگذاری استاتیکی می باشد. در مقابل، در ماده کامپوزیتی CFRP (شکل شماره ۷)، بیشینه کرنش های اصلی به حدود $10^{-8} \times 1.5$ محدود شده اند که به وضوح نشان دهنده سختی بالاتر و مقاومت بیشتر آن در برابر تغییر شکل تحت شرایط بارگذاری مشابه است.



شکل شماره ۶) نمودار زمانی کرنش در بال ساخته شده از PLA برای نقطه میانی عنصر ۱۷۶



شکل شماره ۷) نمودار زمانی کرنش در بال ساخته شده از کامپوزیت CFRP برای نقطه میانی عنصر ۲۲۰



۳. نتیجه گیری

در این پژوهش، رفتار سازه‌ای یک بال پهناد سبک با مقطع آیرودینامیکی NACA 4412 تحت بارگذاری یکنواخت استاتیکی با استفاده از روش اجزای محدود در نرم‌افزار آباکوس تحلیل گردید. برای مدل‌سازی ماده، از دو جنس مختلف شامل کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن (CFRP) و پلی‌لاکتیک‌اسید استفاده شد تا تأثیر ویژگی‌های مکانیکی مصالح بر عملکرد سازه‌ای بال مورد ارزیابی قرار گیرد.

بررسی نتایج تحلیل نشان داد که جابجایی ماکزیمم در نوک بال ساخته‌شده از پلی‌لاکتیک‌اسید برابر با ۳.۰۷۹ میلی‌متر و در بال ساخته‌شده از کامپوزیت برابر با ۱.۱۰۱ میلی‌متر است. این کاهش چشم‌گیر در جابجایی در مدل کامپوزیتی بیانگر سختی بالاتر و مقاومت بیشتر آن در برابر تغییر شکل است. همچنین، نتایج حاصل از نمودارهای زمانی کرنش نشان داد که مقدار کرنش اصلی در پلی‌لاکتیک‌اسید تا حدود ۴۰ نانواسترن افزایش یافته، در حالی که در کامپوزیت این مقدار به حدود ۱۵ نانواسترن محدود شده است. این اختلاف در کرنش‌ها، به‌ویژه در کرنش‌های اصلی و برشی، نشان‌دهنده رفتار تغییرشکل‌پذیرتر پلی‌لاکتیک‌اسید و مقاومت کرنشی بیشتر کامپوزیت تحت بارگذاری مشابه است.

تفاوت عملکرد این دو ماده به ویژگی‌های ذاتی آن‌ها بازمی‌گردد. ماده کامپوزیت با ساختار غیرهمسان‌گرد، مدول یانگ بالا و قابلیت تحمل تنش‌های بالاتر، عملکردی به‌مراتب بهتر از نظر استحکام و پایداری سازه‌ای ارائه می‌دهد. در مقابل، پلی‌لاکتیک‌اسید با رفتار ایزوتروپیک و مدول کمتر، گرچه دچار تغییر شکل بیشتری می‌شود، اما به دلیل همین ویژگی، توانایی بالایی در جذب انرژی و توزیع کرنش در ساختار از خود نشان می‌دهد. این موضوع در نمودارهای کرنش ماده پلی‌لاکتیک‌اسید نیز به وضوح قابل مشاهده است و می‌تواند در شرایطی که نیاز به کنترل ضربه، میرایی ارتعاشات یا تحمل بارهای غیرمتمرکز وجود دارد، به عنوان یک مزیت در نظر گرفته شود.

همچنین، تحلیل حساسیت به مش نشان داد که استفاده از اندازه مش چهار میلی‌متر منجر به همگرایی مناسب و حفظ دقت تحلیل عددی شده است.

در نهایت می‌توان نتیجه گرفت که انتخاب ماده وابسته به هدف طراحی و کاربرد عملیاتی است. اگر هدف طراحی دستیابی به بالی با حداقل تغییر شکل، بیشینه سختی و بیشترین استحکام به وزن باشد، استفاده از کامپوزیت CFRP توصیه می‌شود. در مقابل، اگر هدف ساخت نمونه‌های اولیه، تولید مقرون‌به‌صرفه یا بهره‌گیری از ویژگی‌های جاذب انرژی در طراحی باشد، پلی‌لاکتیک‌اسید می‌تواند گزینه‌ای کارآمد و مناسب باشد. این نتایج می‌تواند به طراحان در انتخاب مصالح برای کاربردهای مختلف پهنادهای سبک، با در نظر گرفتن نیازهای عملکردی و اقتصادی، کمک شایانی نماید.



۴. مراجع

1. Abbott, I.H., and Von Doenhoff, A.E. Theory of Wing Sections. Dover Publications, 1959.
2. Clancy, L. J. Aerodynamics. Pitman Publishing Limited, 1975.
3. Daniel, I.M., and Ishai, O. Engineering Mechanics of Composite Materials, 2nd ed., Oxford University Press, 2006.
4. Mallick, P.K. Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design. CRC Press, 2007.
5. Tymrak, B.M., et al. "Mechanical Properties of Components Fabricated with Open-Source 3D Printers." Materials & Design, 58, 2014, pp. 242–246.
6. Farah, S., et al. "Physical and Mechanical Properties of PLA, and Their Applications in Biomedical Engineering." Advanced Drug Delivery Reviews, 107, 2016, pp. 367–392.
7. Zenkert, D. The Handbook of Sandwich Construction. EMAS Publishing, 1997.
8. Reddy, J. N. An Introduction to the Finite Element Method. McGraw-Hill, 2006.
9. Kim, H.S., et al. "Structural Analysis of UAV Composite Wings Using FEA." Composite Structures, 2018, 202, pp. 656–666.