Quarterly Journal of Defense Technology Engineering Imam Ali University

Spring 2025, Vol. 41

Original Research

Structural analysis of helicopter landing skid using PEEK-based composite materials

Mirabolfazl Mokhtari *

Associate Professor of Aerospace Engineering, Faculty of Engineering, Imam Ali University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Received: 2025.04.01

Accepted: 2025.05.12

Published: 2025.06.09

Keyword:

Landing skid

Composite

Numerical simulation

Safety factor

***Corresponding Author:**

Mirabolfazl Mokhtari

Email:

abolfazlmokhtariia@gmail.com

ABSTRACT

In recent years, composite materials have emerged as viable alternatives to metals in various engineering applications, particularly in the aerospace and automotive industries, due to their high strength-to-weight ratio, corrosion resistance, and design flexibility. One of their critical applications in the aerospace sector is in structural components such as helicopter landing skid, where excellent mechanical performance is essential under severe loading conditions. This study investigates the performance of two poly ether ether ketone (PEEK)–based composites reinforced with glass fibers (GF/PEEK) and carbon fibers (CF/PEEK), respectively, as potential replacements for the commonly used 6061-T6 aluminum alloy in helicopter landing gear systems. Finite element simulations were conducted in ABAQUS under various landing scenarios with different impact velocities to evaluate and compare the mechanical responses of these materials. The results indicate that CF/PEEK not only demonstrates mechanical behavior comparable to aluminum but also offers advantages such as reduced weight, higher strength-to-density ratio, and potential cost savings. These findings highlight the promising role of PEEK-based composites in the future development of advanced helicopter landing systems.

فصل نامه مهندسی فناوری‌های دفاعی دانشگاه افسری امام علی (ع)

بهار 1404 ، دوره 41

مقاله پژوهشی

تحلیل ساختاری ارابه فرود بالگرد با استفاده از مواد کامپوزیتی پایه PEEK

میرابوالفضل مختاری*

دانشیار مهندسی هوافضا، دانشکده مهندسی و پرواز، دانشگاه امام علی(ع)، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

دریافت مقاله: 1404/01/10

پذیرش مقاله: 1404/02/22

انتشار مقاله: 1404/03/19

کلید واژگان:

ارابه فرود،

کامپوزیت،

شبیه‌سازی عددی،

ضریب ایمنی

*نویسنده مسئول

میرابوالفضل مختاری

پست الکترونیکی:

abolfazlmokhtariia@gmail.com

چکیده

طی سالیان اخیر، مواد کامپوزیتی به‌دلیل نسبت بالای استحکام به وزن، مقاومت در برابر خوردگی و آزادی عمل در طراحی، جایگزین مناسبی برای فلزات در بسیاری از کاربردهای مهندسی، به‌ویژه در صنایع هوافضا و خودروسازی محسوب شده‌اند. یکی از کاربردهای حیاتی این دسته از مواد، استفاده در اجزای حساس سازه‌ای نظیر ارابه فرود بالگرد است که نیازمند عملکرد مکانیکی بالا تحت شرایط بارگذاری شدید هستند. در این پژوهش، دو نوع کامپوزیت پایه پلی اتر اتر کتون (PEEK) تقویت‌شده با الیاف شیشه (GF/PEEK) و الیاف کربن (CF/PEEK) به‌عنوان جایگزین‌های بالقوه برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6، که به‌طور رایج در ساخت ارابه فرود بالگرد استفاده می‌شود، مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با بهره‌گیری از روش شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS، پاسخ مکانیکی این مواد تحت سناریوهای مختلف فرود با سرعت‌های گوناگون شبیه‌سازی و تحلیل شده است. نتایج نشان می‌دهد که کامپوزیت CF/PEEK ضمن ارائه عملکردی قابل مقایسه با آلومینیوم، به‌دلیل وزن کمتر، نسبت استحکام به چگالی بالاتر و پتانسیل کاهش هزینه‌های نگهداری، گزینه‌ای مناسب برای به‌کارگیری در طراحی آینده ارابه فرود بالگردها محسوب می‌شود. این نتایج بیانگر ظرفیت بالای کامپوزیت‌های پایه PEEKدر توسعه اجزای مرتبط با صنایع هوافضا است.

مقدمه

طراحی سازه‌های مدرن در حوزه هوانوردی نیازمند به‌کارگیری مواد پیشرفته‌ای است که از استحکام و سختی بالایی برخوردار باشند. در این میان، کامپوزیت‌های پلیمری به‌دلیل خواص مکانیکی مناسب، مقاومت بالا در برابر عوامل شیمیایی و تنش‌های فیزیکی، و نیز نسبت بالای استحکام به چگالی، به گزینه‌ای مطلوب در این زمینه تبدیل شده‌اند. این ویژگی‌ها نه‌تنها منجر به کاهش وزن و افزایش بهره‌وری و عملکرد سوخت می‌شوند، بلکه دوام و قابلیت اطمینان لازم برای تحمل شرایط سخت محیطی و بارهای دینامیکی را نیز فراهم می‌آورند. به همین دلیل، استفاده از این مواد در اجزایی همچون ارابه فرود بالگرد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در راستای ارزیابی عملکرد ارابه فرود بالگرد، مطالعات متعددی صورت گرفته است. به‌عنوان نمونه، شراتری و همکاران، طراحی ارابه فرود ساخته‌شده از کامپوزیت هیبریدی مبتنی بر آلومینیوم را مورد بررسی قرار داده و عملکرد آن را با بهره‌گیری از شبیه‌سازی المان محدود در نرم‌افزار ABAQUS تحت شرایط مختلف ارزیابی نمودند. نتایج این پژوهش نشان داد که ترکیب آلومینیوم و کامپوزیت، ضمن کاهش وزن تا حدود 49 درصد، استحکام مورد نیاز را نیز تأمین می‌نماید (Shrotri et al, 2008). در پژوهشی دیگر، چوی و همکاران از شبیه‌سازی اجزای محدود برای تحلیل رفتار ارابه فرود بالگرد استفاده کردند. نتایج آن‌ها حاکی از آن بود که بیشترین تمرکز تنش در محل اتصال ارابه فرود به بدنه بالگرد رخ می‌دهد (Choi et al, 2012). ییلدیریم و همکاران عملکرد ارابه فرود را در شرایط فرود اضطراری مورد ارزیابی قرار دادند. در این پژوهش، سه نوع آلیاژ آلومینیومی 2024-T3، 7075-T6 و 6061-T6 از طریق آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی المان محدود بررسی شدند. نتایج نشان داد که آلیاژ 6061-T6 بهترین عملکرد را از نظر جذب انرژی و مقاومت در برابر ضربه از خود نشان می‌دهد (Yildirim et al, 2015). ینگ و همکاران عملکرد ارابه فرود را با استفاده از تحلیل اجزای محدود مورد بررسی قرار دادند. یافته‌های این پژوهش بر اهمیت حفظ زاویه پایدار حین فرود تأکید داشت و همچنین نقاط آسیب‌پذیر در محل اتصالات را که نیازمند تقویت ساختاری بودند، شناسایی نمود (Yang et al, 2023).

پلی اتر اتر کتون (PEEK) یک پلیمر ترموپلاستیک نیمه‌کریستالی است که خواص مکانیکی برجسته‌ای مانند استحکام و سختی همراه با پایداری حرارتی و شیمیایی فوق‌العاده و چگالی کم از خود نشان می‌دهد. این ویژگی‌ها PEEK را به ماده‌ای بسیار متنوع برای کاربرد در صنایع مختلف ازجمله پزشکی، خودروسازی و هوافضا تبدیل کرده است. در مقایسه با فلزات، PEEK چگالی به‌مراتب پایین‌تری دارد، درحالی‌که عملکرد مکانیکی مطلوب و مقاومت بالایی در برابر شرایط محیطی سخت حرارتی و شیمیایی ارائه می‌دهد؛ امری که آن را برای شرایط عملیاتی متنوع، گزینه‌ای ایده‌آل می‌سازد (Attwood et al, 1981, Karger-Kocsis et al, 1986, and Wei et al, 2003). ترکیب منحصر به‌فرد

خواص PEEK، آن را به گزینه‌ای مناسب برای توسعه مواد پیشرفته در صنایع هوایی، ازجمله ساخت اجزای بالگرد، تبدیل کرده است.

افزون بر این، با تقویت PEEK از طریق الیاف‌هایی نظیر الیاف کربن (CF) و الیاف شیشه (GF) می‌توان کامپوزیت‌هایی با کارایی بالا تولید نمود. این تقویت‌کننده‌ها منجر به بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و شیمیایی این پلیمر شده و امکان تولید مواد مهندسی‌شده متناسب با کاربردهای خاص صنعتی را فراهم می‌کنند. مطالعات متعددی با هدف بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های مبتنی بر PEEKدر شرایط کاری مختلف انجام شده‌اند. به‌عنوان نمونه، ساراسوا و همکاران خواص مکانیکی کامپوزیت‌های PEEK تقویت شده با الیاف شیشه (GF/PEEK) و الیاف کربن (CF/PEEK) تولیدشده به روش قالب‌گیری تزریقی را بررسی کردند. آنها از آزمون کشش تک‌محوره و روش اولتراسونیک غوطه‌وری جهت تجزیه و تحلیل خواص بهره گرفتند. بررسی‌های انجام‌شده، چسبندگی قوی‌تر الیاف کربن به زمینه پلیمری PEEK نسبت به الیاف شیشه را نشان داد و نتایج آزمون‌های کشش با داده‌های اولتراسونیک نیز همخوانی داشت (Sarasua et al, 1995). در پژوهشی دیگر، ری و همکاران رفتار مکانیکی PEEK را تحت نرخ‌های کرنش، دما و شرایط مختلف بارگذاری بررسی نمودند و نشان دادند که استحکام، چقرمگی و سختی این ماده به‌طور چشم‌گیری به نرخ کرنش و دما وابسته است (Rae et al, 2007). گارسیا-گونزالس و همکاران رفتار ضربه‌ای PEEK را با آلیاژ تیتانیوم در کاربردهای پزشکی مقایسه کردند و نتایج نشان داد که PEEK رفتاری نرم‌تر و فاقد شکست ترد در آزمون‌های سوراخ‌کاری از خود بروز می‌دهد (Garcia-Gonzalez et al, 2015).

پاوی و همکاران طراحی سازه‌ای FLCA را با استفاده از PEEK به‌عنوان جایگزین آلومینیوم بررسی کرده و به عملکرد مکانیکی مطلوب همراه با کاهش وزن و هزینه دست یافتند (Pawi et al, 2019). در ادامه، تانگ و همکاران رفتار شکست کامپوزیت‌های CF/PEEK و GF/PEEK را مورد بررسی قرار دادند و دریافتند که جذب انرژی در دماهای بالا کاهش می‌یابد و مکانیسم شکست از جدایش الیاف در دمای بالا به شکست الیاف در دمای پایین تغییر می‌کند (Tang et al, 2023).

در پژوهش حاضر، هدف ارزیابی عملکرد ارابه فرود بالگرد Bell 206 ساخته‌شده از کامپوزیت‌های GF/PEEK و CF/PEEK به‌عنوان جایگزین‌های بالقوه برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6، که به‌طور متداول در این جزء استفاده می‌شود، می‌باشد. این ارزیابی با استفاده از شبیه‌سازی اجزای محدود، تحلیل رفتار تنش و ضریب ایمنی و تغییرشکل صورت می‌گیرد.

روش تحقیق

با هدف ارزیابی عملکرد ارابه فرود، از دو کامپوزیت PEEK تقویت شده با 30% الیاف شیشه (GF30/PEEK) و PEEK تقویت شده با 30% الیاف کربن (CF30/PEEK) در مقایسه با آلیاژ آلومینیوم

6061-T6 استفاده خواهد شد. برای این منظور خواص مکانیکی مواد مورد نظر در جدول 1 لیست شده‌اند.

جدول 1: خواص مکانیکی مواد مورد ارزیابی (Tang et al, 2023, Chang et al, 2021, Zhang et al, 2023, and Yan et al, 2023).

ردیف	ماده	مدول الاستیسیته (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	چگالی (Kg/m3)
1	6061-T6 Aluminum	71.87	308.5	2710
2	GF30/PEEK	3.83	152.1	1662
3	CF30/PEEK	21.52	212.0	1482

در ادامه، مدل هندسی ارابه فرود مورد نظر با بهره‌گیری از داده‌برگ‌های رسمی و با استفاده از نرم‌افزار SolidWorks مطابق شکل 1،الف طراحی شد (Aviation, 2022).



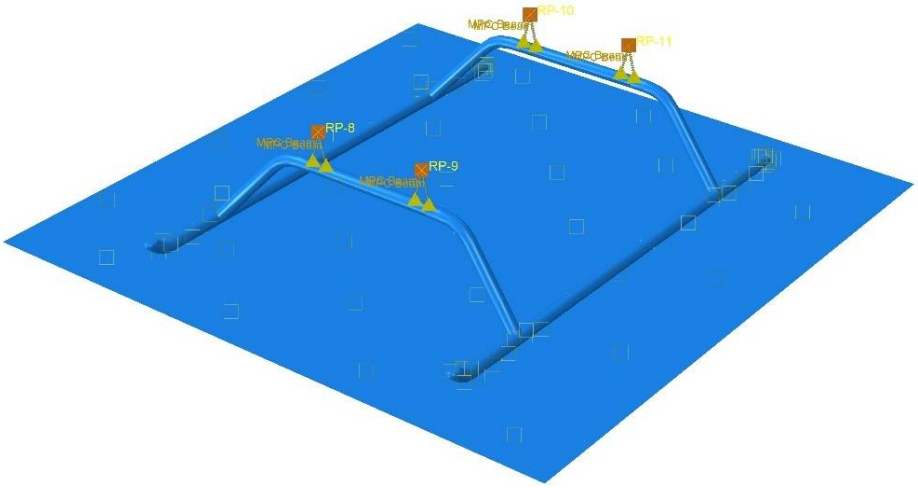
شکل 1: الف) مدل ارابه فرود طراحی شده در بستر نرم‌افزار SolidWorks و ب) مدل ارابه فرود مش‌بندی شده در بستر نرم‌افزار ABAQUS.

در گام بعد، مدل سه‌بعدی ایجادشده به نرم‌افزار ABAQUS منتقل گردید و با استفاده از المان‌های S4R مش‌بندی شد. به‌منظور انتخاب اندازه بهینه المان، تحلیل همگرایی مش صورت گرفت که بر اساس نتایج حاصل، اندازه المان برابر با 15mm انتخاب شد. این مقدار با داشتن دقت مناسب و درصد تغییرات کمتر از 10 درصد، در محدوده قابل‌قبول برای تحلیل‌های مهندسی قرار داشت. در نتیجه، تعداد کل المان‌های ایجادشده در مدل برابر با 33877 عدد بوده و نسبت طول به عرض المان‌ها برابر با 1.23 محاسبه شد. مدل مش‌بندی شده در شکل 1،ب نمایش داده شده است.

در گام بعدی، تمرکز بر اعمال شرایط مرزی بر روی ارابه فرود بالگرد قرار گرفت تا رفتار آن تحت شرایط دینامیکی مختلف هنگام تماس با سطح زمین مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور، فرآیند

شبیه‌سازی فرود بالگرد در سه سناریوی متفاوت با سرعت‌های فرود برابر با 0.5، 1 و 1.5 متر بر ثانیه انجام شد. انتخاب این مقادیر با هدف ارزیابی پاسخ سیستم در مواجهه با حالت‌های فرود نرم، متعادل و نسبتاً سخت صورت گرفت. این بازه‌ی سرعتی به‌گونه‌ای تعیین شده است که طیف وسیعی از شرایط عملیاتی رایج بالگردها، از جمله فرودهای کنترل‌شده در شرایط ایده‌آل تا فرودهای اضطراری با شدت بیشتر را پوشش دهد.

به‌منظور پیاده‌سازی شرایط بارگذاری واقعی در فرآیند شبیه‌سازی فرود بالگرد ، مطابق آنچه در شکل 2 نمایش داده شده است، جرم کل بالگرد به‌صورت نیروی متمرکز بر نقاط اتصال سازه‌ای بالگرد به ارابه فرود اعمال گردید. این نقاط به‌عنوان محل‌های اصلی انتقال بار، وظیفه‌ی دریافت نیروی ناشی از وزن کلی سازه و همچنین ضربه‌ی وارده در لحظه‌ی تماس با زمین را بر عهده دارند. لازم به ذکر است که در این شبیه‌سازی، سطح زمین به‌صورت جسم صلب مدل‌سازی شده است.

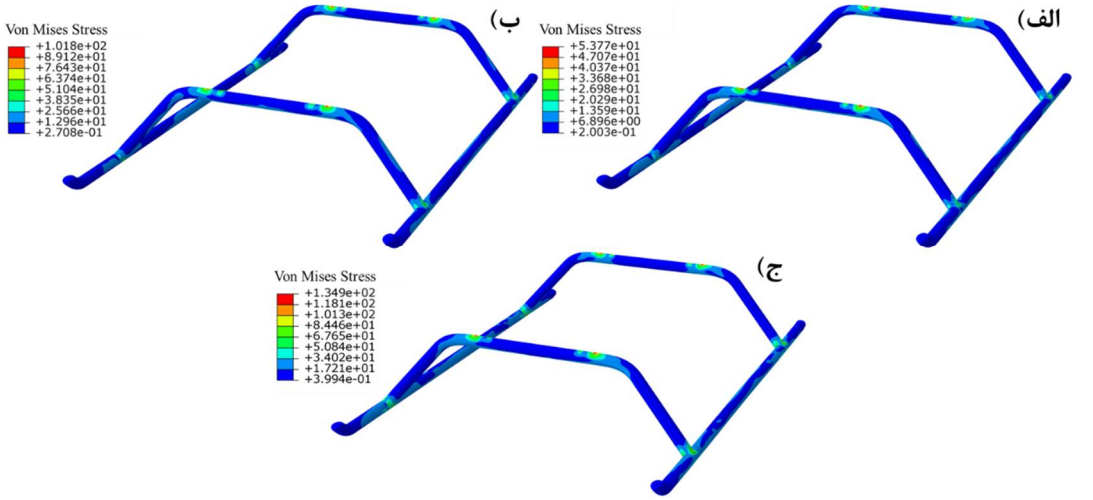


شکل 2: نواحی اعمال جرم کل به ارابه فرود در بستر نرم‌افزار ABAQUS.

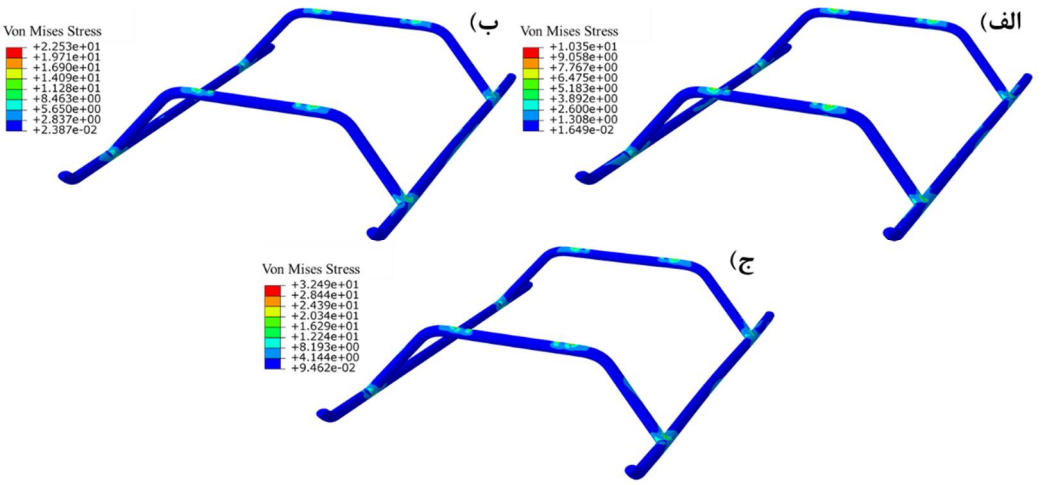
یافته ها

در این بخش، نتایج حاصل از شبیه‌سازی برخورد ارابه فرود با سطح زمین با استفاده از روش المان محدود مورد تحلیل قرار می‌گیرد. تمرکز اصلی بر بررسی نحوه توزیع تنش و تغییر شکل در ارابه فرود تحت شرایط فرود با سرعت‌های مختلف است. کانتورهای تنش ایجادشده ناشی از برخورد در سه سرعت مورد نظر، در شکل‌های 3 الی 5، به‌ترتیب برای آلیاژ آلومینیوم 6061-T6، GF30/PEEK و CF30/PEEK نمایش داده شده‌اند.

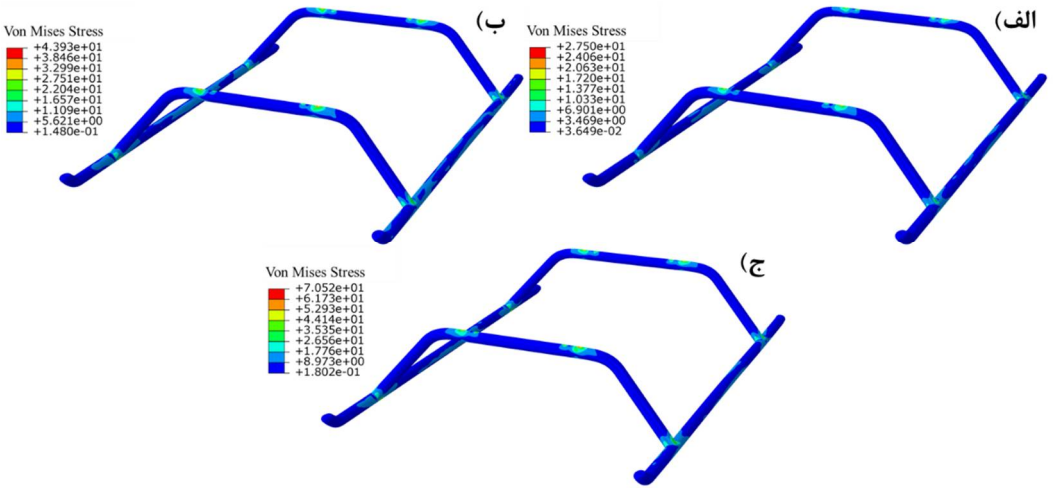
بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود، مقادیر ضریب ایمنی برای هر یک از مواد مورد بررسی شامل آلیاژ آلومینیوم 6061-T6، GF30/PEEK و CF30/PEEK تحت سه سناریوی متفاوت فرود، استخراج شده و در جدول 2 ارائه شده‌اند. این ضرایب با توجه به بیشینه تنش‌های ایجادشده در نقاط بحرانی سازه و با در نظر گرفتن تنش تسلیم هر ماده محاسبه شده‌اند.



شکل 3: کانتور تنش حاصل از برخورد ارابه فرود از جنس آلومینیوم 6061-T6 با سطح زمین با سرعت الف) 0.5 m/s، ب) 1 m/s و ج) 1.5 m/s.



شکل 4: کانتور تنش حاصل از برخورد ارابه فرود از جنس GF30/PEEK با سطح زمین با سرعت الف) 0.5 m/s، ب) 1 m/s و ج) 1.5 m/s.



شکل 5: کانتور تنش حاصل از برخورد ارابه فرود از جنس CF30/PEEK با سطح زمین با سرعت الف) m/s 0.5، ب) m/s 1 و ج) m/s 1.5.

جدول 2: مقادیر ضریب ایمنی برای سرعت‌های فرود مختلف.

ردیف	سرعت فرود (m/s)	ضریب ایمنی		
		6061-T6 aluminum	GF30/PEEK	CF30/PEEK
1	0.5	5.73	12.71	7.71
2	1	3.03	6.75	4.82
3	1.5	2.28	4.68	3.00

بر اساس مطالعات پیشین، دستیابی به ضریب ایمنی بالاتر از 2 به‌عنوان معیاری مناسب برای تضمین پایداری و ایمنی ساختار قطعه در نظر گرفته می‌شود (Dastjerdi et al, 2023). با این حال، صرف‌نظر از ایمنی سازه، میزان تغییرشکل نیز نقشی کلیدی در ارزیابی عملکرد مکانیکی قطعه ایفا می‌کند؛ چراکه تغییرشکل بیش از حد می‌تواند منجر به اختلال در عملکرد عملیاتی گردد. بر همین اساس، مقادیر تغییرشکل در دو راستای x (محل برخورد ارابه فرود با سطح زمین) و z (محل اتصال ارابه فرود به بدنه) برای هر یک از مواد مورد بررسی، همراه با درصد تغییرات آن‌ها نسبت به آلیاژ مرجع یعنی آلومینیوم 6061-T6، در جدول 3 ارائه شده است.

جدول 3: مقادیر تغییرشکل برای سرعت‌های فرود مختلف.

ردیف	ماده	سرعت فرود (m/s)	تغییرشکل در راستای محور x (mm)	درصد تغییرات (%)	تغییرشکل در راستای محور z (mm)	درصد تغییرات (%)
1	6061-T6 aluminum	0.5	3.58	-	2.66	-
		1	6.93	-	4.92	-
		1.5	10.12	-	7.16	-
2	GF30/PEEK	0.5	6.81	90.26	5.16	93.84
		1	12.69	83.14	10.38	111.02
		1.5	18.46	82.35	15.12	111.93
3	CF30/PEEK	0.5	5.05	41.06	4.35	63.46
		1	9.24	33.40	8.02	63.14
		1.5	13.26	31.01	11.68	63.05

بر اساس داده‌های حاصل از شبیه‌سازی، میزان تغییرشکل در دو راستا برای GF30/PEEK نسبت به آلیاژ آلومینیوم حدود 100 درصد بیشتر است، در حالی‌که این مقدار برای CF30/PEEK در حدود 50 درصد می‌باشد. با ترکیب این یافته‌ها با نتایج ضریب ایمنی، می‌توان نتیجه گرفت که کامپوزیت CF30/PEEK علی‌رغم داشتن ضریب ایمنی کمتر نسبت به GF30/PEEK، از نظر عملکرد کلی گزینه‌ی مناسب‌تری برای کاربرد در ارابه‌ی فرود به شمار می‌آید. چراکه مقدار ضریب ایمنی آن در تمامی سناریوهای شبیه‌سازی‌شده، به‌ویژه در شرایط بحرانی نظیر فرود اضطراری، بالاتر از مقدار آستانه‌ی قابل قبول بوده و حتی به مقدار 3 نیز می‌رسد. این مقدار نه‌تنها نشان‌دهنده‌ی ظرفیت مناسب در تحمل تنش‌های ضربه‌ای است، بلکه حاکی از وجود حاشیه‌ی ایمنی مناسب در طراحی نیز می‌باشد. همچنین، تغییرشکل کمتر در CF30/PEEK نسبت به GF30/PEEK، بیانگر پایداری هندسی بالاتر این ماده در برابر بارهای دینامیکی فرود است. چنین ویژگی‌ای به‌طور مستقیم بر روی عملکرد عملیاتی، جلوگیری از ناپایداری سازه و افزایش عمر خستگی سیستم تأثیرگذار است. به‌همین دلیل، CF30/PEEK با توجه به عملکرد مکانیکی متوازن، ظرفیت جذب انرژی مناسب و پاسخ ارتجاعی مطلوب، می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین سبک‌وزن و مقاوم برای آلیاژ آلومینیوم در طراحی ارابه فرود بالگرد مورد استفاده قرار گیرد.

بحث و نتیجه‌گیری

پژوهش حاضر به ارزیابی عملکرد مکانیکی دو کامپوزیت GF30/PEEK و GF30/PEEK در

طراحی و توسعه ارابه فرود بالگرد Bell 206 ، پرداخته و نتایج حاصل را با آلیاژ پرکاربرد آلومینیوم 6061-T6 مقایسه می‌نماید. به‌منظور تحلیل جامع رفتار سازه‌ای این مواد، فرایند شبیه‌سازی دینامیکی فرود بالگرد در سه سرعت مختلف، به‌عنوان سناریوهای محتمل عملیات پروازی، در محیط نرم‌افزار ABAQUS صورت پذیرفت. پارامترهای کلیدی ضریب ایمنی سازه و میزان تغییرشکل در شرایط برخورد با زمین برای هر یک از مواد مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها نشان‌دهنده این بود که هر دو کامپوزیت مورد بررسی، حتی در شرایط فرود سخت، ضریب ایمنی بیش از 2 را ارائه دادند که به‌عنوان آستانه‌ای قابل قبول برای تضمین عملکرد ایمن سازه در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر کامپوزیت CF30/PEEK با وجود ارائه ضریب ایمنی نسبتاً کمتر از GF30/PEEK، دارای عملکرد بهینه‌تری از منظر کنترل تغییرشکل و پایداری سازه‌ای داشت. با این تفاسیر، CF30/PEEK به دلیل عملکرد مکانیکی پایدار و کاهش قابل‌توجه جرم نسبت به آلیاژ آلومینیوم، می‌تواند جایگزینی بالقوه و بهینه برای فلزات متداول در طراحی اجزای فرود بالگردها محسوب گردد.

با توجه به قابلیت قالب‌گیری دقیق و مقاومت در برابر خوردگی، بهره‌گیری از کامپوزیت‌های پایه PEEK می‌تواند در راستای اهداف توسعه‌ی پایدار در صنعت هوافضا نیز مؤثر واقع شود. در نتیجه، این تحقیق شواهد اولیه‌ای از کارآمد بودن کامپوزیت CF30/PEEK در طراحی ساختارهای سبک، مستحکم و مقاوم در کاربردهای حساس هوانوردی فراهم نموده است که می‌تواند مبنای مطالعات تجربی آتی، تحلیل‌های ارتعاشی و ارزیابی طول عمر خستگی در شرایط واقعی عملکرد قرار گیرد.

منابع

K. Shrotri (2012). Composite skid landing gear design investigation. Georgia Institute of Technology, 2008.

H. T. Choi, J. J. Oh, G. W. Kim, and K. S. Shin (2012). A Study on the Behavior of Skid Gear During the Helicopter Autorotation. Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology, Vol. 15. No. 6: 746-753.

O. Yildirim, E. Günay, Ö. Anil, and C. Aygün (2015). Analysis of a skid type landing gear of a rotary wing UAV by experimental and numerical methods. Acta Physica Polonica A, Vol. 127. No. 4: 1170-1175, 2015.

H. Yang, Y. Wang, J. Dong, and H. Wang (2023). Dynamic analysis of skid landing gear of UAV under ground contact Condition based on Finite Element Method, in Advances in Machinery. Materials Science and engineering application IX: IOS Press, Vol. 1: 245-253.

T. Attwood, P. Dawson, J. Freeman, L. Hoy, J. Rose, and P. Staniland (1981). Synthesis and properties of polyaryletherketones. Polymer, Vol. 22. No. 8: 1096-1103.

J. Karger-Kocsis and K. Friedrich (1986). Temperature and strain-rate effects on the fracture toughness of poly (ether ether ketone) and its short glass-fibre reinforced composite. Polymer, Vol. 27, No. 11: 1753-1760.

C. L. Wei, M. Chen, and F. E. Yu (2003). Temperature modulated DSC and DSC studies on the origin of double melting peaks in poly (ether ether ketone). Polymer, vol. 44, No. 26: 8185-8193.

J. Sarasua, P. Remiro, and J. Pouyet (1995). The mechanical behaviour of PEEK short fibre composites. Journal of Materials Science, Vol. 30: 3501-3508.

P. Rae, E. Brown, and E. Orler (2007). The mechanical properties of poly (ether-ether-ketone)(PEEK) with emphasis on the large compressive strain response. Polymer, Vol. 48. No. 2: 598-615.

D. Garcia-Gonzalez, A. Rusinek, T. Jankowiak, and A. Arias (2015). Mechanical impact behavior of polyether–ether–ketone (PEEK). Composite Structures, Vol. 124: 88-99.

F. T. Pawi, R. Daud, H. M. Ayu, T. Kurniawan, S. H. Tomadi, M. S. Salwani, A. Shah (2019). Design and analysis of lightweight polyetheretherketone (PEEK) front lower control arm. AIP conference proceedings, Vol. 2059. No. 1.

Z. Tang, C. Chen, A. Li, Y. Deng, C. Zhang, and Y. Li (2023). Temperature-and strain-rate-dependent tensile failure behavior of short-fiber-reinforced PEEK composites. Composites Part B: Engineering, Vol. 250: 110455.

B. Chang, J. Gu, Z. Long, Z. Li, S. Ruan, and C. Shen (2021). Effects of temperature and fiber orientation on the tensile behavior of short carbon fiber reinforced PEEK composites. Polymer Composites, Vol. 42, No. 2: 597-607.

R. Zhang, L. Chen, K. Xie, K. Liu, and Z. Wu (2023). Compression properties and constitutive model of short glass fiber reinforced poly-ether-ether-ketone (PEEK). Scientific Reports, Vol. 13, No. 1: 19206.

J. B. Yan, G. Kong, and L. Zhang (2023). Low-temperature tensile behaviours of 6061-T6 aluminium alloy: Tests, analysis, and numerical simulation. Structures, Vol. 56: 105054.

Type Acceptance Report TAR 96/11 – Revision 3 Bell 206/407 Series [Online] Available: https://www.aviation.govt.nz/assets/aircraft/type-acceptance-reports/Bell_206-407.pdf (accessed January 8, 2025).

M. Dastjerdi, A. M. A. Dastjerdi, P. M. A. Dastjerdi, J. Dastjerdi, H. Garcia, B. S. Heidari, S. M. Davachi (2023). Feasibility of developing green water batteries based on poly-lactic acid and polybutylene succinate: A computational study on groasis waterboxx technology, Materials Today Communications, Vol. 36: 106537.