



# ISAV2024

چهاردهمین کنفرانس بین المللی آکوستیک و ارتعاشات  
۲۱ و ۲۲ آذر ماه ۱۴۰۳ کرج - ایران



## بررسی رفتار استاتیکی و ارتعاشی پره هلیکوپتر با هسته ساخته شده از ساختارهای فرامواد

علی بیدرام<sup>\*</sup>، سعید ضیایی راد<sup>ب</sup>، علی لقمانی<sup>پ</sup>

<sup>ا</sup> ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، فارغ التحصیل کارشناسی ارشد

<sup>ب</sup> ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، استاد

<sup>پ</sup> ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی اصفهان، دانشکده مهندسی مکانیک، کدپستی ۸۴۱۵۶۸۳۱۱۱، دانشیار

\*پست الکترونیکی نویسنده مسئول: [bidramali7777@gmail.com](mailto:bidramali7777@gmail.com)

### چکیده

فرامواد به دلیل خاصیت شکل پذیری در بال هواپیما، پره هلیکوپتر، پره توربین و غیره کاربرد بسیاری دارند. در پره های هلیکوپتر، کوپلینگ خمش-پیچش یک پدیده پیچیده و مهم در طراحی و عملکرد پرها است. هنگامی که پره در حین چرخش خم می شود، همزمان دچار پیچش نیز می شود. کوپلینگ خمش-پیچش تأثیراتی بر روی عملکرد آیرودینامیکی، استحکام ساختاری و کنترل پرواز دارد. عوامل بسیاری بر کوپلینگ خمش-پیچش اثر می گذارند که از آن ها می توان به شکل هندسی پره از جمله نسبت ابعاد، ضخامت و انحنای آن اشاره کرد. در این پژوهش، سه مدل تیر ساخته شده از فرامواد به عنوان هسته پره هلیکوپتر در نظر گرفته شده است که هندسه سلول واحد تشکیل دهنده تیرها برای دستیابی به خاصیت کوپلینگ خمش-پیچش مورد بررسی قرار گرفته شده است. تیرهای متشکل از چندین سلول واحد فرامواد به کمک فناوری ساخت افزودنی ساخته و آزمایش های تجربی استاتیکی و دینامیکی روی آن ها انجام شده است. همچنین برای راستی آزمایی نتایج تجربی، شبیه سازی های اجزاء محدود در نرم افزار آباکوس انجام شده است. نتایج بدست آمده از آزمایش های استاتیکی نشان می دهد تیر با هندسه سلول واحد متشکل از یک مکعب ساده و سلول فرعی مورب نسبت به سایر هندسه های مورد بررسی در عین سادگی ساختار از خاصیت کوپلینگ خمش-پیچش بیشتری برخوردار است. همچنین افزایش ضریب منطری در هندسه سلول واحد تأثیر بسیاری بر بهبود خاصیت کوپلینگ خمش-پیچش دارد. تحلیل دینامیکی تیرها نیز نشان می دهد که تیرها با خاصیت کوپلینگ خمش-پیچش بیشتر که در آزمایش های استاتیکی بدست آمده است، دارای فرکانس های طبیعی بالاتر هستند و تعداد مودهای پیچش در بازه فرکانسی مشخص بیشتر است که دلیلی بر اثبات خاصیت کوپلینگ خمش-پیچش در این تیرها است.

**کلمات کلیدی:** فرامواد؛ شکل پذیری؛ کوپلینگ خمش-پیچش؛ آنالیز مودال.

## ۱- مقدمه

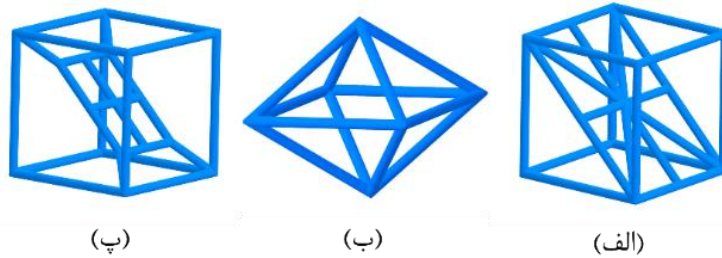
خواص طبیعی مواد موجود در طبیعت را با تغییر ریزساختار آن‌ها می‌توان تغییر داد یا اصلاح کرد. مواد حاصل را مواد مهندسی شده نیز می‌نامند. از جمله مواد مهندسی شده، فرامواد هستند که دارای خواص منحصر به فرد فراتر از مواد طبیعی هستند [۱]. فرامواد بر اساس خواصشان در حوزه‌های مختلفی کاربرد دارند. استفاده از فرامواد در ساختارهای مکانیکی این روزها مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۲].

در سال ۱۹۹۶، انودا نوعی از مکانیزم شکل‌گیری تاشونده در بسیاری از سازه‌های خرپایی، مانند خرپا شش‌پایه دوبعدی را پیشنهاد کرد که در آن مکانیزم‌های شکل‌گیری با ادغام چندین لولای لغزشی در طراحی سازه ایجاد شده بودند [۳]. مواد سلولی یا شبکه‌ای دستیابی به خواص مکانیکی برتر مانند استحکام بالا، تحمل آسیب و جذب انرژی را در چگالی بسیار کم امکان‌پذیر می‌سازند [۴]. چندین مفهوم برای کشف پتانسیل آن‌ها در هواپیماهای تغییر شکل‌پذیر توسعه یافته است. برای نمونه در سال ۲۰۱۰، یک ساختار کایرال توسط بتینی و همکاران در یک ایرفویل پیاده‌سازی شد که امکان جابجایی کلی زیادی را با کرنش کمی در پایه‌ها ایجاد می‌کرد [۵]. ژنگ و همکاران در سال ۲۰۱۹، یک فراماده را پیشنهاد کردند که کولپینگ کشش-پیچشی قابل توجهی را نشان داد. این ماده با روی هم چیدن لایه‌های لانه زنبوری تتراکایرال ساخته شده بود [۶]. همچنین در همین سال، وو و همکاران طیف وسیعی از فرامواد را بررسی کردند و پتانسیل آن‌ها را در کاربردهای چند منظوره مورد بحث قرار دادند [۷].

در پره‌های هلیکوپتر، کولپینگ خمش-پیچش به ارتباط بین خمش و پیچش پره اشاره دارد و یک پدیده پیچیده و مهم در طراحی و عملکرد پره‌های هلیکوپتر است. کولپینگ خمش-پیچش تأثیرات قابل توجهی بر عملکرد، پایداری و کنترل پرواز هلیکوپتر خواهد داشت. عدم پیچش پره در حین خمش باعث کاهش تولید نیروی برآ<sup>۱</sup> و در نتیجه کاهش قابل توجه در ارتفاع و سرعت هلیکوپتر، عدم تعادل در توزیع نیرو و لرزش شدید در پره‌ها و بدنه هلیکوپتر و از دست دادن کنترل هلیکوپتر به دلیل ناتوانی هلیکوپتر در تولید نیروی برآ و گشتاور کافی برای مانور و حفظ ثبات در هوا می‌شود. علاوه بر این پیچش می‌تواند بر مواردی همچون عمر مفید پره‌ها و سایر جنبه‌های آیرودینامیکی هلیکوپتر، مانند مقاومت و مصرف سوخت تأثیر بگذارد. عوامل بسیاری بر کولپینگ خمش-پیچش اثر می‌گذارند که از آن‌ها می‌توان به شکل هندسی پره از جمله نسبت ابعاد، ضخامت و انحنا، مواد سازنده پره و شرایط پرواز از جمله سرعت، ارتفاع و شرایط جوی، اشاره کرد [۸].

هندسه‌های مختلف توسط محققان بررسی شده اما تنها تعداد کمی از توپولوژی‌ها، کولپینگ خمش-پیچش را مورد بحث قرار می‌دهند. بنابراین، در پژوهش حاضر ایجاد چنین ساختاری که دارای خاصیت خمش-پیچش مؤثری باشد و از این طریق بتوان از آن به عنوان گزینه‌ای قابل استفاده برای مفهوم پیچش اینرسی تغییر شکل‌پذیر استفاده کرد، هدف قرار داده شده است. از این‌رو از هندسه سلول واحد مطرح شده توسط جو و همکاران طبق مراجع [۴، ۹] استفاده و تیر با فناوری ساخت افزودنی تولید می‌شود و تحت بارهای مختلف آزمایش‌های استاتیکی خمش-پیچش انجام می‌شود و با نتایج به‌دست آمده از شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود مقایسه می‌گردد. از مهم‌ترین وجه تمایزی که بین پژوهش حاضر و کار جو و همکاران است، بررسی دینامیکی و آزمایش‌های آنالیز مودال و اثبات کولپینگ خمش-پیچش از طریق مطالعه شکل مودال‌های به‌دست آمده از شبیه‌سازی است. سپس هندسه سلول واحد دیگری از کار کرامر و همکاران [۱۰] که با همکاری سازمان ملی هوانوردی و فضا (ناسا) انجام شده، مورد بررسی قرار گرفته و تیر ساخته شده مورد ارزیابی استاتیکی و دینامیکی قرار می‌گیرد. در شکل (۱) الف و شکل (۱) ب- هندسه سلول‌های واحد مورد مطالعه در این پژوهش آمده است. در نهایت تلاش می‌شود با تغییر بسیار کوچک در هندسه سلول واحد کار جو و همکاران، سلول واحد جدیدی به روش آزمون و خطا که دارای خاصیت کولپینگ خمش-پیچش به مراتب بهتری است، ارائه گردد. در شکل (۱) پ- هندسه سلول واحد مورد نظر آمده است.

<sup>۱</sup> Lift<sup>۲</sup> Mode shapes



شکل ۱- سلول واحد (الف) کار جو و همکاران، (ب) کار کرامر و همکاران و (پ) پیشنهاد شده، دارای خاصیت شکل‌پذیری برای دستیابی به خاصیت کوپلینگ خمش-پیچش

## ۲- مدل‌سازی

در این پژوهش ابتدا سلول واحد مطرح شده در مراجع [۴، ۹] مطابق شکل (۱)-الف مورد بررسی قرار گرفته است. همان‌طور که مشخص است سلول واحد از یک مکعب ساده و یک سلول فرعی مثلثی در امتداد مورب با زاویه شیب  $\alpha$ ، تشکیل شده است. هدف از سلول فرعی مورب، اصلاح صفحات متقارن مکعب است که منجر به خواص الاستیک ناهمسانگرد می‌شود. توپولوژی سلول فرعی از مربع‌ها و مثلث‌های ترکیبی ساخته شده است که منجر به یک مدول شبه همسانگرد می‌شود که استحکام بیشتری را در جهت عرضی سلول ایجاد می‌کند [۴]. یکی دیگر از کارهایی که در پژوهش مرجع [۹] مورد مطالعه قرار گرفته است، بررسی اثر ضریب منطری<sup>۳</sup> بر کوپلینگ خمش-پیچش است. ضریب منطری نسبت ارتفاع به طول مکعب سلول واحد است. در این پژوهش ۵ مقدار از ۱ تا ۵ برای ضریب منطری در نظر گرفته شده و به کمک تحلیل اجزاء محدود با استفاده از شبیه‌سازی در نرم افزار آباکوس اثبات شده است که در صورت مقید بودن سلول‌ها از یک طرف و اعمال نیروی محوری ۱۰ نیوتن ( $Fz$ ) به هر مدل سلول واحد، با افزایش مقدار ضریب منطری، کرنش بیشتری در جهت برشی و محوری به وجود می‌آید که این موضوع نشان‌دهنده دستیابی به کوپلینگ موثرتر در سلول‌های با ضریب منطری بزرگ‌تر است.

### ۱-۲ راستی‌آزمایی نتایج تحلیل اجزاء محدود مرجع [۹]

به منظور راستی‌آزمایی نتایج تحلیل اجزاء محدود کار مرجع [۹]، پنج مدل تیر با ضرایب منطری متفاوت در نرم‌افزار آباکوس مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. ماده تشکیل دهنده تیرها، آلومینیوم-۶۰۸۲ در نظر گرفته شده که خواص آن، شامل مدول الاستیسیته ۷۰۰۰۰ مگاپاسکال، نسبت پواسون ۰/۳۳ و تنش تسلیم ۲۵۵ مگاپاسکال می‌باشد [۴]. شرایط مرزی و بارگذاری به گونه‌ای بوده است که تمامی تیرها از انتها کاملاً مقید بوده و در ابتدا یکبار تحت ممان خمشی ثابت ۱ نیوتن متر دورانی<sup>۴</sup> در داخل صفحه و سپس تحت گشتاور پیچشی ۱ نیوتن متر قرار می‌گیرد. حل‌گر مورد استفاده در این تحلیل، حل‌گر آباکوس استاندارد<sup>۵</sup> از نوع استاتیکی<sup>۶</sup> بوده است که برای مسائل استاتیکی و شبه استاتیکی مورد استفاده قرار می‌گیرد. از المان B31 برای این تحلیل استفاده شده است. این المان که برای مدل‌سازی سازه‌های تیر مانند مورد استفاده قرار می‌گیرد، یک المان تیر تیموشنکو خطی است. برای دستیابی به بهترین نتایج بررسی همگرایی شبکه‌بندی برای ۵ مدل انجام شده است که بر این اساس تعداد المان‌ها برای تیر با ضریب منطری ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ به ترتیب ۳۴۴۷۰، ۲۷۸۸۶، ۲۴۷۵۲، ۲۳۵۹۶ و ۲۹۳۲۴ می‌باشد. طبق جدول (۱) تطابق قابل قبولی بین نتایج مرجع [۹] و نتایج پژوهش حاضر وجود دارد. اختلاف نتایج در برخی موارد به خصوص نتایج تحلیل تیر با ضریب منطری ۵ می‌تواند به دلیل اختلاف اندک در نحوه شبیه‌سازی تیرها در پژوهش حاضر و پژوهش مرجع [۹] باشد، زیرا در پژوهش مرجع درباره شبیه‌سازی در آباکوس به طور کلی

<sup>۳</sup> Aspect ratio (AR)

<sup>۴</sup> Lagwise

<sup>۵</sup> Abaqus/standard

<sup>۶</sup> Static general

صحبت شده است و همچنین درباره همگرایی شبکه‌بندی توضیحی داده نشده است. این در صورتی است که با تغییر اندازه شبکه‌بندی نیز می‌توان به نتایج مرجع [۹] نزدیک‌تر شد اما در پژوهش حاضر اندازه شبکه‌بندی پس از بررسی همگرایی انتخاب شده است.

جدول ۱- راستی‌آزمایی میزان خمش و پیچش نتایج مرجع [۹] تحت ممان خمشی و گشتاور پیچشی ۱ نیوتن متر در ابتدای تیر

ممان خمشی ۱ نیوتن متر						
AR	U <sub>y</sub> /L			θ/L (°/m)		
	مرجع [۹]	پژوهش حاضر	درصد خطا	مرجع [۹]	پژوهش حاضر	درصد خطا
۱	۰/۰۰۳۹۱	۰/۰۰۳۹۹	۲/۰۲	۰/۵۹۰۰	۰/۵۸۷۳	۰/۴۷
۲	۰/۰۰۳۸۵	۰/۰۰۳۹۴	۲/۴۱	۱/۲۰۰۰	۱/۲۱۳۸	۱/۱۵
۳	۰/۰۰۳۹۰	۰/۰۰۳۷۵	۳/۸۴	۱/۸۲۰۰	۱/۸۰۴۰	۰/۸۸
۴	۰/۰۰۳۷۶	۰/۰۰۳۷۷	۰/۳۲	۲/۳۱۰۰	۲/۳۳۶۸	۱/۱۶
۵	۰/۰۰۳۵۹	۰/۰۰۳۵۷	۰/۶۴	۲/۷۵۰۰	۲/۸۷۰۲	۴/۳۷

گشتاور پیچشی ۱ نیوتن متر						
AR	U <sub>y</sub> /L			θ/L (°/m)		
	مرجع [۹]	پژوهش حاضر	درصد خطا	مرجع [۹]	پژوهش حاضر	درصد خطا
۱	۰/۰۰۲۱۰	۰/۰۰۲۱۰	۰/۱۲	۴۳/۹۰۰۰	۴۲/۹۲۰۷	۲/۲۳
۲	۰/۰۰۴۴۰	۰/۰۰۴۳۶	۰/۹۷	۵۴/۹۰۰۰	۵۲/۴۵۳۹	۴/۴۶
۳	۰/۰۰۶۶۰	۰/۰۰۶۳۵	۳/۸۵	۵۷/۸۲۰۰	۵۶/۷۴۴۴	۰/۴۵
۴	۰/۰۰۸۵۰	۰/۰۰۸۳۹	۱/۲۹	۵۶/۰۰۰۰	۵۵/۶۲۸۳	۰/۶۶
۵	۰/۰۱۰۰۰	۰/۰۰۹۹۲	۰/۸۳	۵۸/۲۰۰۰	۶۱/۷۶۷۶	۶/۱۳

درصد خطا با معیار قرار دادن نتایج مرجع [۹] به‌دست آمده است.

## ۲-۲ تحلیل دینامیکی تیرها با ضرایب منظری متفاوت با شبیه‌سازی در آباکوس

برای شبیه‌سازی تیرها در نرم افزار آباکوس از حل‌گر آباکوس استاندارد و نوع فرکانسی<sup>۷</sup> استفاده شده است. شرایط مرزی در شبیه‌سازی نیز به گونه‌ای بوده که یک تیر دو سر آزاد داشته باشیم. در جدول (۲) مقادیر فرکانس طبیعی برای تیرها با ضرایب منظری متفاوت آمده است.

جدول ۲- فرکانس طبیعی تیرها با ضرایب منظری متفاوت

ضرایب منظری	فرکانس طبیعی (Hz)					
	ω <sub>1</sub>	ω <sub>2</sub>	ω <sub>3</sub>	ω <sub>4</sub>	ω <sub>5</sub>	ω <sub>6</sub>
AR= 1	۲۶۸/۳۴	۲۹۵/۳۰	۳۳۰/۱۹	۵۷۹/۷۴	۷۱۴/۹۵	۷۲۴/۴۶
AR= 2	۳۱۶/۰۰	۳۲۴/۷۸	۳۵۶/۳۲	۶۶۶/۷۳	۷۴۴/۰۹	۸۴۴/۹۹
AR= 3	۳۴۵/۷۲	۳۵۰/۸۷	۴۰۷/۱۳	۷۴۲/۹۵	۸۳۰/۰۶	۹۰۲/۱۹
AR= 4	۳۳۸/۹۴	۳۴۸/۰۲	۴۲۱/۱۰	۷۳۸/۰۷	۸۵۵/۷۵	۸۵۵/۸۵
AR= 5	۳۵۶/۱۶	۳۶۵/۰۵	۴۶۰/۱۲	۷۹۴/۳۴	۸۶۶/۰۷	۹۱۲/۹۶

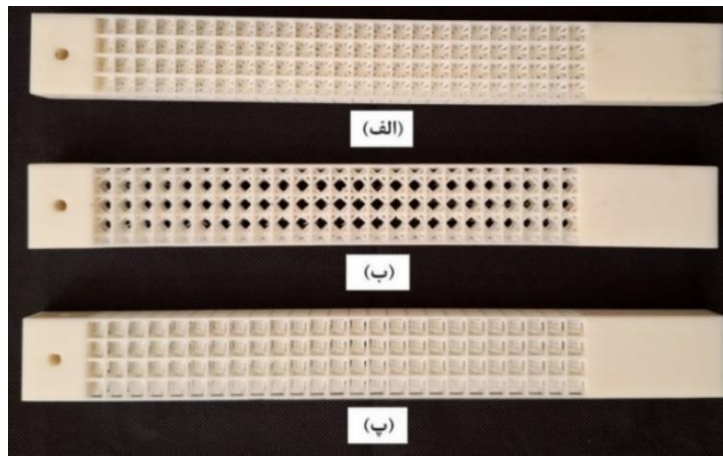
همان‌طور که از جدول (۲) مشخص است با افزایش ضریب منظری، مقادیر فرکانس طبیعی افزایش یافته است. همچنین با افزایش ضریب منظری، تعداد مدهای پیچش بیش‌تری در بازه‌ی فرکانسی ۰ تا ۱۰۰۰ هرتز مشاهده شده است.

## ۳-۲ طراحی، ساخت و تحلیل تیرهای مورد مطالعه در این پژوهش

در این پژوهش، سه مدل تیر با ابعاد برابر اعم از طول، عرض، ارتفاع و شعاع پایه طراحی شده است. این مدل‌ها از کنار هم قرار گرفتن ۲۰۰ عدد ریزسازه یا سلول واحد مطابق شکل (۱) ساخته شده‌اند. تمامی تیرها با ضریب منظری ۱ طراحی شده‌اند، این در حالی

<sup>۷</sup> Linear perturbation / Frequency

است که در بخش ۲ مشاهده شد که تیر با ضریب منظری ۵ تحت گشتاور در جهات مختلف دارای میزان خمش و پیچش بیشتری نسبت به سایر تیرها است، اما به دلیل محدودیت در ساخت افزودنی<sup>۸</sup> با کمک چاپگر سه بعدی، ساخت این تیرها امکان‌پذیر نبوده است. پس از طراحی و امکان‌سنجی ساخت، تیرها ساخته شده‌اند. برای ساخت از چاپگر سه بعدی FDM<sup>۹</sup> تک نازل و با قطر نازل ۰/۴ میلی‌متر استفاده شده است. تیرهای ساخته شده در این پژوهش در شکل (۲) آمده است.



شکل ۲- تیرهای ساخته شده براساس سلول واحد (الف) مرجع [۹]، (ب) مرجع [۱۰] و (پ) پیشنهادی.

ماده مصرفی برای ساخت تیرها پلی لاکتیک اسید (PLA) بوده است. از این رو یافتن خواص مکانیکی آن ضروری است. سه نمونه تست کشش با استفاده از چاپگر سه بعدی با همین جنس مطابق با استاندارد ASTM D638-14 مورد آزمایش قرار گرفتند و میانگین مقدار خواص الاستیک در جدول (۳) محاسبه شده است.

جدول ۳- خواص الاستیک ماده سازنده تیرها.

Material	E (MPa)	$\nu$	$\sigma_{ut}$ (MPa)	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )
PLA	۴۳۰۰	۰/۳۵	۵۱/۸	۱۱۸۹

برای تحلیل تیرها در نرم افزار آباکوس همانند آنچه در بخش‌های ۱-۲ و ۲-۲ آمده است برای تحلیل استاتیکی و دینامیکی به ترتیب از حل گر آباکوس استاندارد از نوع استاتیک و نوع فرکانسی استفاده شده است. همچنین از المان B31 برای المان تیر و المان‌های ۱۰ گره‌ای چهار وجهی مرتبه دوم (C3D10) برای قسمت بارگذاری و المان ۲۰ گره‌ای مکعبی مرتبه دوم (C3D20R) برای قسمت ثابت شدن در نگاه‌دارنده استفاده شده است. برای دستیابی به بهترین نتایج بررسی همگرایی شبکه‌بندی برای ۳ مدل با بارگذاری ۶۰۰ گرمی و محاسبه بیشترین جابجایی نوک تیر انجام شده است و تعداد المان‌ها برای مدل اول، دوم و سوم به ترتیب ۹۲۱۳۳، ۱۳۳۶۰۹ و ۵۲۰۹۲ می‌باشد.

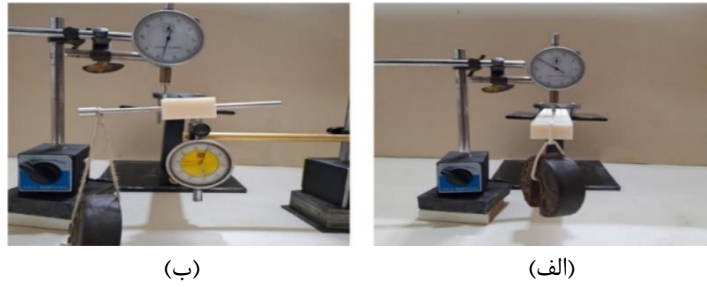
### ۳- آزمایش‌های تجربی

#### ۳-۱- آزمایش تجربی برای تحلیل استاتیکی تیرها

آزمایش‌های تجربی برای محاسبه جابجایی و پیچش تیرها مطابق شکل (۳) با آویزان کردن نیروهای مختلف انجام شده است.

<sup>۸</sup> Additive Manufacturing (AM)

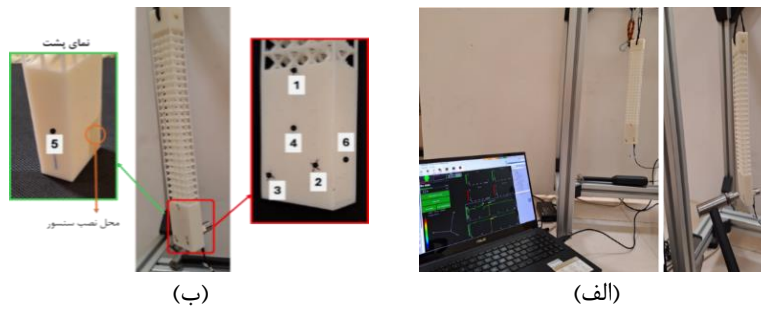
<sup>۹</sup> Fused Deposition Modelling



شکل ۳- (الف) محاسبه میزان جابجایی تیرها و (ب) میزان پیچش تیرها

### ۲-۳ آزمایش تجربی برای تحلیل دینامیکی تیرها

برای آنالیز مودال تیرها در آزمایشگاه به منظور یافتن فرکانس‌های طبیعی، از یک دستگاه آنالیز و جمع آوری داده پیشرفته با ۸ ورودی آنالوگ مجزا و همچنین نرم افزار اختصاصی DewesoftX 2024، یک چکش ۱۰ ضربه‌ای آنالیز مودال با سری جنس استیل و دامنه نیرویی ۰/۱ تا ۵۰۰۰ نیوتن و سنسور شتاب یک محوره با قابلیت اندازه‌گیری فرکانس از ۰/۵ تا ۱۵۰۰۰ هرتز استفاده شده است. آزمایش با شبیه‌سازی شرایط مرزی دو سر آزاد به وسیله یک طناب کشسان انجام شده است. اندازه‌گیری فرکانس‌ها به این صورت بوده که سنسور در یک نقطه به وسیله چسب دوطرفه به سازه چسبیده و سازه طبق شکل (۴) در نقاط مختلف چندین بار توسط چکش تحریک می‌شود.



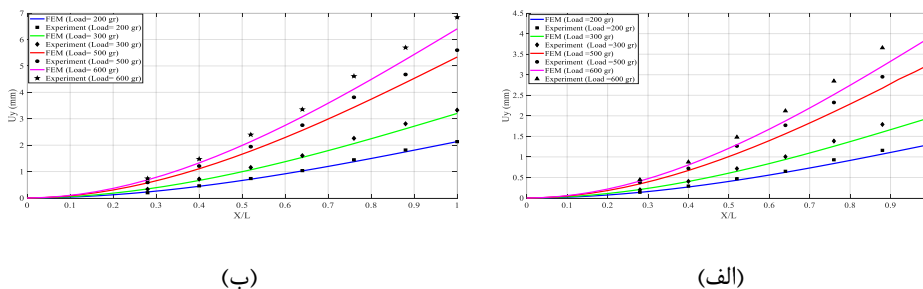
شکل ۴- (الف) نحوه آنالیز مودال تیرها و (ب) محل نصب سنسور و نقاط تحریک توسط چکش در آنالیز مودال برای هر سه مدل

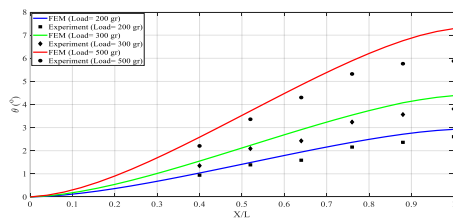
لازم به ذکر است که یافتن شکل مودها از طریق آزمایش به دلیل هندسه خاص سازه و وزن کم آن و عدم امکان قرارگیری سنسورهای دیگر بر روی سازه، ممکن نبوده است.

### ۴- مقایسه نتایج

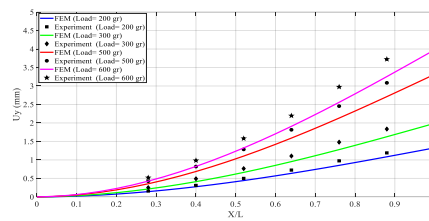
#### ۱-۴ راستی آزمایشی نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود با آزمایش تجربی برای تحلیل استاتیکی تیرها

نتایج آزمایش‌های تجربی و اجزاء محدود جابجایی و پیچش برای سه مدل تیر طبق شکل (۵) آمده است.

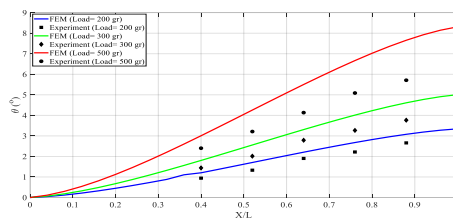




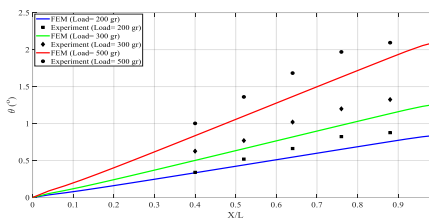
(ت)



(پ)



(ج)



(ث)

شکل ۵- توزیع جابجایی تحت تاثیر بارهای ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰ و ۶۰۰ گرمی (الف) برای مدل اول، (ب) برای مدل دوم، (پ) برای مدل سوم، و توزیع پیچش تحت تاثیر بارهای ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ گرمی (ت) برای مدل اول، (ث) برای مدل دوم، (ج) برای مدل سوم

همان‌طور که از شکل (۵) مشخص است، نتایج آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود از تطابق نسبتاً خوبی در اکثر آزمایش‌ها برخوردار هستند. درصد خطای زیاد در برخی آزمایش‌ها می‌تواند به دلیل عدم دقت لازم وسیله اندازه‌گیری (ساعت اندیکاتور)، عدم شبیه‌سازی دقیق نحوه بارگذاری در نرم‌افزار، و یا نتایج نادرست تست کشش برای تعیین خواص مکانیکی باشد. همچنین یکی از مهم‌ترین دلایل عدم تطابق نتایج در برخی آزمایش‌ها، رفتار خاص پلیمرها و پلاستیک‌ها می‌باشد که حتی ممکن است پس از گذشت مدتی از تولید، با توجه به شرایط نگهداری رفتار آن‌ها تغییر کند. با توجه به نتایج آزمایش‌های استاتیکی برای سه مدل تیر، مدل دوم با آن که دارای جابجایی به مراتب بیشتری نسبت به مدل اول و سوم است اما دارای پیچش بسیار کمتری است. این می‌تواند نشان از آن باشد که مدل دوم دارای خاصیت کوپلینگ خمش-پیچش کمتری نسبت به دو مدل دیگر است.

#### ۴-۲ راستی آزمایشی نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود با آزمایش تجربی برای تحلیل دینامیکی تیرها

نتایج آزمایش‌های تجربی آنالیز مودال و اجزاء محدود برای یافتن فرکانس‌های طبیعی برای سه مدل طبق جدول (۴) است. منظور از NA<sup>۱۱</sup> در جدول (۴) داده‌هایی است که در آزمایش تجربی آنالیز مودال گزارش نشده است.

جدول ۴- مقایسه نتایج تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود تست‌های آنالیز مودال برای یافتن فرکانس طبیعی

		فرکانس طبیعی (Hz)					
		$\omega_1$	$\omega_2$	$\omega_3$	$\omega_4$	$\omega_5$	$\omega_6$
مدل اول	FEM	۱۵۸/۳۰	۱۶۶/۱۰	۲۲۵/۲۳	۴۴۴/۳۹	۴۷۲/۹۹	۵۵۸/۵۴
	آزمایش تجربی	۱۵۴/۰۰	۱۷۲/۰۰	۲۴۴/۰۰	۴۶۲/۰۰	۵۲۱/۰۰	NA
	درصد خطا	۲/۷۲	۳/۵۵	۸/۳۳	۳/۹۶	۱۰/۱۵	-
مدل دوم	FEM	۱۳۰/۱۸	۲۶۲/۴	۳۳۳/۲۳	۳۸۵/۱۶	۷۴۳/۱۹	۷۵۵/۷۶
	آزمایش تجربی	۱۳۱/۲۰	۲۶۶/۸۰	۲۸۰/۰۰	۴۰۶/۰۰	۶۵۸/۰۰	۸۴۱/۶۰
	درصد خطا	۰/۷۸	۱/۶۸	۱۵/۹۷	۵/۴۱	۱۱/۴۶	۱۱/۳۵
مدل سوم	FEM	۱۶۱/۹۴	۱۶۸/۳۶	۲۳۸/۶۷	۴۷۴/۰۹	۴۹۲/۷۲	۵۵۲/۴۸
	آزمایش تجربی	۱۵۷/۲۰	۱۷۰/۴۰	۲۵۰/۴۰	۴۷۱/۲۰	NA	۵۴۳/۲۰
	درصد خطا	۲/۹۲	۱/۲۱	۴/۹۱	۰/۶۱	-	۱/۶۸

<sup>۱۱</sup> Not Available

بر اساس جدول (۴) تطابق قابل قبولی بین نتایج تجربی و شبیه‌سازی اجزاء محدود وجود دارد. درصد خطا با معیار قرار دادن نتایج اجزاء محدود گزارش شده است. همان‌طور که مشخص است، فرکانس‌های طبیعی مدل اول و سوم تا حد زیادی با یکدیگر برابرند. این در حالی است که فرکانس‌های طبیعی مدل دوم با دو مدل دیگر تفاوت دارد. می‌توان گفت که سختی خمشی در صفحه XY مدل‌های اول و سوم از مدل دوم بیشتر است.

## ۵- نتیجه‌گیری کلی

در این پژوهش به مطالعه‌ی رفتار استاتیکی و دینامیکی تیرهای ساخته شده از سلول واحد فرامواد به عنوان هسته پره هلیکوپتر با روش اجزاء محدود و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس پرداخته شد. ابتدا سلول واحد تشکیل‌دهنده تیرها با ضرایب صحیح منظری ۱ تا ۵ مورد مطالعه قرار گرفت و از تحلیل استاتیکی و دینامیکی مشاهده شد که تیر با ضریب منظری بزرگ‌تر نسبت به سایر تیرها خاصیت کوپلینگ خمش-پیچش را بهتر ارضا می‌کند. سپس سه مدل تیر با هندسه سلول واحد متفاوت تحت آزمایش‌های استاتیکی و دینامیکی تجربی قرار گرفت و برای راستی‌آزمایی، نتایج تجربی با نتایج شبیه‌سازی اجزاء محدود مقایسه شد که در اکثر آزمایش‌ها از تطابق بسیار خوبی برخوردار بود. بر اساس نتایج مدل دوم که هندسه سلول واحد آن به صورت مکعب هشت وجهی بود، علیرغم داشتن خاصیت خمش حدوداً ۱/۵ برابری نسبت به دو مدل دیگر دارای خاصیت پیچش به مراتب پایین‌تری (حدود ۴ برابر کمتر) بود. این نشان از آن دارد که یک مدل با میزان خمش بالا لزوماً دارای میزان پیچش بالا نیست. مدل اول و سوم که هندسه سلول واحد آن‌ها از یک مکعب و یک سلول فرعی مورب تشکیل شده بود، در عین آن‌که دارای پیچیدگی ساختاری کمتر است، از خاصیت خمش-پیچش بیشتری نسبت به مدل دوم برخوردار است. همچنین براساس آزمایش‌های دینامیکی انجام شده بر روی سه مدل تیر ساخته شده، مشخص شد که فرکانس‌های طبیعی اول تا پنجم مدل اول و سوم تا حد زیادی با یکدیگر برابرند. این در حالی است که فرکانس‌های طبیعی مدل دوم با دو مدل دیگر تفاوت دارد و مدل دوم دارای مقادیر فرکانس طبیعی کمتری نسبت به دو مدل اول و سوم است و شرایط بروز پدیده تشدید در آن بیشتر است. همچنین با توجه به شکل مودهای بدست آمده از سه مدل تیر، می‌توان گفت که سختی خمشی در صفحه XY مدل‌های اول و سوم از مدل دوم بیشتر است.

## مراجع

- [1] G. Singh, N. Raj, and A. Marwaha, "A Review of Metamaterials and its Applications," *International Journal of Engineering Trends and Technology*, vol. 19, pp. 305-310, 01/25 2015.
- [2] A. Jha and I. Dayyani, "Shape optimisation and buckling analysis of large strain zero Poisson's ratio fish-cells metamaterial for morphing structures," *Composite Structures*, vol. 268, p. 113995, 2021/07/15/ 2021.
- [3] J. Onoda, D.-Y. Fu, and K. Minesugi, "Two-dimensional deployable hexapod truss," *Journal of Spacecraft and Rockets*, vol. 33, no. 3, pp. 416-421, 1996.
- [4] H. Gu, A. Shaw, M. Amoozgar, J. Zhang, C. Wang, and M. Friswell, "Twist morphing of a composite rotor blade using a novel metamaterial," *Composite Structures*, vol. 254, p. 112855, 08/01 2020.
- [5] P. Bettini, A. Airoidi, G. Sala, L. Di Landro, M. Ruzzene, and A. Spadoni, "Composite chiral structures for morphing airfoils: Numerical analyses and development of a manufacturing process," *Composites Part B: Engineering*, vol. 41, no. 2, pp. 133-147, 2010.
- [6] B.-B. Zheng, R.-C. Zhong, X. Chen, M.-H. Fu, and L.-L. Hu, "A novel metamaterial with tension-torsion coupling effect," *Materials & Design*, vol. 171, p. 107700, 2019.
- [7] W. Wu, W. Hu, G. Qian, H. Liao, X. Xu, and F. Berto, "Mechanical design and multifunctional applications of chiral mechanical metamaterials: A review," *Materials & design*, vol. 180, p. 107950, 2019.
- [8] J. G. Leishman, *Principles of Helicopter Aerodynamics*, 2nd Edition ed. Cambridge Aerospace Series, December 2016.
- [9] H. Gu, A. Shaw, M. Amoozgar, J. Zhang, C. Wang, and M. Friswell, "Tailored twist morphing achieved using graded bend-twist metamaterials," *Composite Structures*, vol. 300, p. 116151, 2022/11/15/ 2022.
- [10] N. Cramer, D. Cellucci, O. Formoso, C. Gregg, B. Jenett, J. Kim, M. Lendraitis, S. Swei, G. Trinh, K. Trinh, K. Cheung, "Elastic Shape Morphing of Ultralight Structures by Programmable Assembly," *Smart Materials and Structures*, vol. 28, 03/11 2019.