قابل دسترس در نشانی: http://jips.ippi.ac.ir

مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال بیست و چهارم، شماره ۵، صفحه ۳۸۹–۳۷۹-۱۳۹۹ ISSN: 1016-3255

رفتار مکانیکی ورقهای کامپوزیتی موجدار با هندسه شبهسینوسی

پويان قابضي، محمد گلزار*

تهران، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مکانیک، صندوق پستی ۱٤۳–۱٤۱۱

دریافت: ۹۰/٥/۲۳، پذیرش: ۹۰/۱۰/۳

چکیدہ

بال هواپیما نیاز دارد، همزمان در دو راستا رفتار مکانیکی متفاوتی داشته باشد. بال هواپیما در راستای طولی برای تحمل بارهای خمشی و آیرودینامیکی باید دارای سفتی زیاد و در راستای عرضی برای آسانی تغییر شکل باید دارای سفتی کم باشد. پوسته های موجدار با توجه به هندسه خاص، این پتانسیل را دارند که در کاربردهای مزبور استفاده شوند. بنابراین در پژوهش حاضر، سفتی های مؤثر کششی و خمشی در دو راستای طولی و عرضی در ورق های کامیوزیتی با هندسه شبه سينوسي به شكل اجزاي محدود (با استفاده از نرم افزار تجاري ABAQUS) و همچنين با استفاده از معادلههای نظری (نظریه ارایه شده توسط یوکوزوکی) بررسی شده است. میتوان با استفاده از انرژی کرنشی هر جزء و استفاده از قضایای اول و دوم کاستیگلیانو و به کارگیری نظریه تیرهای برنولی _ اویلر تغییر شکل در راستای طولی و عرضی هر جزء را به دست آورد. همچنین، بر اساس آن سفتی های کششی و خمشی را (به ازای واحد عرض) در دو راستای طولی و عرضی ورق های موجدار استخراج کرد. در انتها نتایج به دست آمده از حل اجزای محدود و تحلیلی با نتایج تجربی حاصل از آزمایش های کشش و خمش روی ورق های کامپوزیتی از جنس شیشه ـ ايوكسى و الياف بافته شده با هندسه شبه سينوسي، مقايسه شده است. با مقايسه اين نتايج مي توان گفت، معادله های نظری ارایه شده دارای خطای قابل قبولی است و می توان از آنها برای بررسی سفتی های مؤثر کششی و خمشی در راستاهای مختلف در ورق های موجدار شبه سینو سی استفاده کرد. بررسی نتایج به دست آمده نشان میدهد، ورقهای کامیوزیتی موجدار رفتار مکانیکی با ناهمسانگردی زیاد دارند، به طوری که دارای سفتی معادل کششی و خمشی زیاد در جهت عرضی موج هستند، در حالی که این ورق ها سفتی کششی و خمشی مؤثر بسیار کمی در راستای موج دارند.

واژههای کلیدی

اجزای محدود، فناوری مورفینگ، سفتیهای کششی و خمشی، کامپوزیت، ورقهای موجدار شبهسینوسی

* مسئول مكاتبات، پيامنگار: m.golzar@modares.ac.ir

www.SID.ir

انعطاف پذیر طولی (جهت و تر بال) h_c h_c

شکل ۲- طرح کلی بال هواپیما و چگونگی استفاده از ورق موجدار [۳].

دو راستا رفتار مکانیکی متفاوتی داشته باشد: سفتی زیاد در راستای عرضی برای تحمل بارهای خمشی و آیرودینامیکی و سفتی کم در راستای طولی برای سهولت تغییر شکل آن [۳]. در شکل ۲ طرح کلی بال هواپیما و چگونگی استفاده از ورق موجدار در آن نشان داده شده است.

Yokozeki و همکاران از اولین کسانی بودند که ورق های موجدار ساخته شده از کامپوزیتهای کربن ـ اپوکسی را برای استفاده در پوسته مورفینگ پیشنهاد کردند [۳]. Thill و همکاران رفتار لبه انتهایی بال موجدار ساخته شده با هندسه های سینوسی، ذوزنقه ای و مثلثی را در اعداد رینولدز مختلف بررسی کردند. آنها دریافتند، خواص آیرودینامیکی به شدت به دامنه و گام امواج و عدد رینولدز وابسته است [٤]. کاظم اهوازی، مدلی تحلیلی برای پیش بینی رفتار برش و فشاری سازههای ساندویچی موجدار ارایه کرده است [۵]. Wu و Duan، ماتریس های سفتی کششی، خمشی و جفت شدن مربوط به پوستههای کامپوزیتی موجدار با هندسه سینوسی را به شکل تحلیلی استخراج کرد و صحت آنها را با آزمونهای تجربی تأیید کرد [٦]. Norman و همکاران [۷]، ورق های موج داری از جنس مس _ بریلیم را از راه کار سرد تولید کردند که قابلیت انعطاف پذیری و لوله شدن داشتند و مهم ترین کاربرد آنها استفاده در بال تغییر شکل پذیر هواپیماهای بدون سرنشین است. Butler [۸]، با استفاده از ایده يوكوزوكي قطعات كامپوزيتي موجدار از جنس كولار ٩١٤ توليد كرد. وی توانست به نسبت مدول عرضی به طولی حدود ۸۰۰۰ دست یابد مقدمه

در سال های اخیر فناوری مورفینگ (morphing) توجه مهندسان يرواز و متخصصان آيروديناميک را به خود جلب کرده است. مورفینگ در لغت به معنای تغییر شکل از حالتی به حالت دیگر بدون ایجاد گسستگی است. در علوم مهندسی و صنایع، مورفینگ به سازههایی اطلاق می شود که قابلیت تغییر شکل و هندسه سازه را با توجه به شرایط مختلف پرواز دارند و از این راه سبب افزایش عملكرد سازهها مي شوند [1]. امروزه استفاده از اين سازهها كه به آنها سازههای هوشمند نیز گفته می شود، در صنایع مختلف به ویژه صنایع هوايي، مورد علاقه طراحان قرار گرفته است [۲]. افزايش قدرت مانور هواپیماها و نیز روند رو به توسعه سفینهها و ماهوارههای فضایی از جمله دلایل افزایش تمایل به استفاده از این سازه هاست. ایده استفاده از فناوری مورفینگ و سازههای موجدار که رفتاری کاملاً متفاوت در جهت های مختلف دارند، مانند بسیاری از فناوری های دیگر ریشه در طبیعت دارد. در محیط طبیعی می توان نمونه های بسیار زیادی از این نوع ساز و کارها را مشاهده کرد. بال پرندگان و حشرات نمونههای بارزی از وجود این فناوری در طبیعت است. در شکل ۱، استفاده از این ساز و کارها در بال پرندگان، ماهیان و حشرات و مقایسه آن با ورق موجدار كاميوزيتي ساخته شده از جنس شيشه ـ ايوكسي نشان داده شده است. یکی از مهمترین سازههایی که پتانسیل به کارگیری در فناوری مورفینگ را دارد، ورق های کامپوزیتی موج دار است.

با استفاده از ایده موجدار کردن ورق تخت، می توان از مادهای همسانگرد، رفتار مکانیکی متفاوتی در جهتهای مختلف (در دو جهت عمود بر هم) انتظار داشت. بال هواپیما نیاز دارد، همزمان در



شکل ۱- ساختار موجدار بالهای طبیعی و نمونههای کامپوزیتی.

که این مقدار نیز با استفاده از میله های کربنی در راستای عرضی موج، افزایش یافت. Ruijun و همکاران، تغییر شکل ورق های کامپوزیتی موجدار از جنس شیشه – اپوکسی را به شکل عددی بررسی کردند و آنها را گزینه مناسبی برای استفاده در ساخت سازه های مورفینگ معرفی کردند [۹]. Kress، اثر لایه چینی و هندسه را بر حداکثر تغییر شکل مجاز ورق های کامپوزیتی موج دار بررسی کرد. وی برای بررسی اثر غیر خطی هندسه، نتایج شبیه سازی اجزای محدود را با معادله های کرنش خطی مقایسه کرد [۱۰].

در این پژوهش، با به کارگیری قضیههای اول و دوم کاستیگلیانو، نظریه تیرهای برنولی _ اویلر و با استفاده از مدلی ساده که توسط یوکوزوکی برای پیش بینی سفتی های کششی و خمشی مؤثر در دو راستای طولی و عرضی ورق،های کامپوزیتی موج،دار با هندسه شبهسينوسي ارايه شده است، رفتار مكانيكي مؤثر اين نوع ورق،ها به طور نظری بررسی شده است. در انتها معادلات نظری با نتایج حاصل از تحلیل عددی و نتایج تجربی مقایسه و صحت آنها ارزیابی شده است. ذکر این نکته ضروری است که در مقایسه با نتایج اجزای محدود و تحلیلی از دادههای موجود در مراجع (خواص کشسانی ورق،های کامپوزیتی) استفاده شده، در حالی که برای مقایسه نتایج تجربی و تحلیلی از دادههای به دست آمده از آزمون های کشش و خمش استفاده شده است. جنبه نوآوری پژوهش پیشرو را می توان. هندسه خاص قطعات مورد بررسی، نحوه ساخت قطعات، شیوه استفاده شده در اندازه گیری سفتی خمشی معادل در جهت طولی موج، بررسی رفتار مکانیکی مؤثر این نوع ورق، تحلیل همزمان نظری، اجزای محدود و تجربی ورق های موجدار و بررسی صحت معادلات نظری استفاده شده بیان کرد.

مدل تحليلي

خواص مؤثر مربوط به کامپوزیتهای موجدار با استفاده از خواص مؤثر الیاف، رزین و پارامترهای هندسی به دست می آید. در جهت عمود بر موج، خواص کششی و خمشی مؤثر پوسته را می توان به



ترتیب با توجه به هندسه موج و ممان اینرسی آن در ناحیه تحلیلی به دست آورد. خواص مؤثر در جهت موج را می توان بر اساس قضیه کاستیگلیانو و با استفاده از نظریه برنولی _اویلر مربوط به تیرها به دست آورد. در این پژوهش، جهت امواج و جهت عمود بر راستای امواج، به ترتیب راستای طولی و عرضی موج نامیده شده است (شکل ۳).

امواج با هندسه شبهسينوسي

با فرض یک جزء شبه سینوسی که در شکل ٤، پارامترهای هندسی آن نشان داده شده است، با اعمال نیروی کششی، ٩، و ممان خمشی، M، به انتهای آن می توان با استفاده از قضایای کاستیگلیانو، تغییر شکلهای ۶ و 6 انتهای آن را به دست آورد [۳]:

$$\delta = \frac{12(1-\gamma_{12}.\gamma_{21})}{E_1.t^3} \left[\frac{I_c^3}{3} + r_c \left\{ \frac{\pi}{4} (2I_c^2 + r_c^2) + 2I_c r_c \right\} \right] P \qquad (1)$$

سفتی کششی مؤثر در راستای طولی امواج، E_{Leff}، را می توان براساس معادله (۲) بیان کرد:

$$E_{\text{Leff}} = \frac{r_{\text{c}} \cdot P}{2h_{\text{c}} \cdot \delta}$$
(Y)

که در آن:

$$h_c = r_c + I_c$$

به همین ترتیب زاویه چرخش، θ، در انتهای تیر تحت ممان خمشی، M، برابر است با:

$$\theta = \frac{1}{D_{11}} \left(\frac{\pi}{2} r_{c} + I_{c} \right) . M$$
 (£)

سفتی خمشی به ازای واحد عرض، در راستای طولی ورق موجدار



پویان قابضی، محمد گلزار

کامپوزیتی، D_{Leff}، را می توان به شکل زیر بیان کرد:

$$D_{\text{Leff}} = \frac{r_{\text{c}} D_{11}}{\frac{\pi}{2} r_{\text{c}} + I_{\text{c}}}$$
(6)

برای تخمین سفتی خمشی مؤثر در راستای عرضی ورق، با به دست آوردن ممان اینرسی سطح مقطع آن، می توان سفتی خمشی را در راستای عرضی به ازای واحد عرض، D_{Teff} به شکل زیر بیان کرد:

$$D_{\text{Leff}} = \frac{A_{22} \left\{ 16I_c^3 + 24\pi I_c^2 r_c + 3\pi r_c (4r_c^2 + t^2) + 8I_c (12r_c^2 + t^2) \right\}}{48r_c} (7)$$

$$A_{\text{Teff}} = \frac{46}{4} e^{-2\pi r_c} e^{-2\pi r_c}$$

مقایسه نتایج نظری با نتایج حاصل از تحلیل اجزای محدود

در این بخش، برای بررسی سفتی های مؤثر ورق های کامپوزیتی موجدار، از خواص کامپوزیت های شیشه ـ اپوکسی با الیاف تکجهتی استفاده شده است (جدول ۱). عرض ورق موجدار ۲۰/۰۲ m

در ادامه، تغییر شکل ورق های با هندسه شبه سینوسی با استفاده از نرمافزار اجزای محدود ABAQUS، به دست آمده و بر اساس آن سفتی های مؤثر در دو راستای طولی و عرضی ورق محاسبه شده است. سپس، نتایج آن با معادلات نظری، مقایسه شده است. برای مدلسازی و تحلیل ورق های موجدار از جزء پوسته و نوع جزء S4R با اندازه مش ۲۰۰۰ استفاده شده است. در نرمافزار اجزای محدود با انتخاب نوع پوسته به شکل لایه ای خواص کشسانی ورق کامپوزیتی براساس جدول ۱ وارد شده است. با اعمال شرایط مرزی و

جدول ۱- خواص کامپوزیت شیشه ـ اپوکسی با الیاف تکجهتی [۱۱].

مدول یانگ (GPa)			
جهت ۲ (E ₂)	(E ₁) ۱ جهت ۱	کسر حجمی	جنس
٨/٢٧	۳۸/٦	•/20	شىشە _اپوكسى



شکل٥- اعمال بارگذاري به ورق موجدار.

محدود کردن تمام درجههای آزادی یک طرف ورق (تیر یک سر گیردار) و اعمال بارگذاری (بار محوری در راستای طولی یا اعمال ممان خمشی به انتهای آزاد تیر) بیشترین تغییر شکل انتهای آزاد ورق موجدار نیز اندازه گیری شده است. با به دست آوردن تغییر شکل انتهای ورق، می توان سفتیهای معادل کششی و خمشی آنها (شکلهای ۵ و ٦) را با استفاده از معادلات زیر به دست آورد:

در استخراج نتایج به شکل اجزای محدود از حل خطی استفاده شده است، زیرا حل غیرخطی زمانبر است و از آن جا که تحلیل انجام شده چندان پیچیده نیست، خطای ناچیزی بین نتایج حاصل از حل خطی و غیرخطی وجود دارد.

اثر پارامترهای هندسی مختلف مانند Ic و rc بر سفتیهای مؤثر کششی به دو روش تحلیلی و عددی در شکلهای ۷ تا ۱۰ آمده و با هم مقایسه شدهاند (اعداد سمت راست منحنیهای ارایه شده بیانگر درصد خطای معادلههای نظری با نتایج حاصل از اجزای محدود



شکل ٦- شبیهسازی ورق شبهسینوسی در نرمافزار اجزای محدود.



شکل ۷- مقایسه نتایج اجزای محدود و تحلیلی (سفتی کششی مؤثر در راستای عرضی برحسب _۲e).

است). شکل های ۷ و ۸ نشان می دهند، با افزایش _r و I_e سفتی کششی مؤثر در راستای عرضی ورق کاهش می یابد. شکل های ۹ و ۱۰ نیز نشان می دهند، با افزایش _r و _I سفتی کششی مؤثر در راستای طولی ورق نیز کاهش می یابد. همان طور که از منحنی ها مشاهده می شود، معادلات نظری ارایه شده در پیش بینی سفتی کششی مؤثر در راستای عرضی خطایی نزدیک به صفر دارد، در حالی که در پیش بینی سفتی کششی مؤثر در راستای طولی خطای بیشتری دارد.

نتایج مربوط به مقایسه سفتیهای خمشی مؤثر در راستای طولی و عرضی نیز در شکلهای ۱۱ تا ۱۶ نشان داده شده است. به طور کلی





پویان قابضی، محمد گلزار

شکل ۹- مقایسه نتایج اجزای محدود و تحلیلی (سفتی کششی مؤثر در راستای طولی برحسب r_e).



شکل ۱۱– مقایسه نتایج اجزای محدود و تحلیلی (سفتی خمشی مؤثر در راستای طولی بر حسب _۲].





شکل۱۳- مقایسه نتایج اجزای محدود و تحلیلی (سفتی خمشی مؤثر در راستای عرضی برحسب _I).



شکل ۱٤- مقایسه نتایج اجزای محدود و تحلیلی (سفتی خمشی مؤثر در راستای عرضی برحسب _rc).

می توان گفت، با افزایش _وI سفتی خمشی مؤثر در راستای طولی ورق کاهش می یابد، در حالی که با افزایش _وI سفتی خمشی مؤثر در راستای عرضی ورق افزایش می یابد. افزایش _وT سبب افزایش سفتی های خمشی مؤثر در راستای عرضی و طولی ورق می شود. با مقایسه نتایج تحلیلی و اجزای محدود می توان گفت، معادلات نظری ارایه شده، خطای بسیار کمی نشان می دهد. بنابراین، برای پیش بینی خواص مکانیکی پوسته های کامپوزیتی مواج می توان از اجزای محدود از حل غیر خطی استفاده شده است. در استخراج نتایج تحلیلی، از آثار تنش های برشی صرف نظر شده است که می تواند منشأ وجود خطای ناچیز بین نتایج تحلیلی و اجزای محدود باشد.

نتايج تجربي

توليد قطعات

از چالش های مهم در تولید نمونه های کامپوزیتی موج دار، تولید قطعه با کیفیت مطلوب، دقت ابعادی و هندسی قابل قبول و در عین حال سریع و ارزان است. برای ساخت نمونه ها از ٥ لایه الیاف ۱۰۰ گرمی شیشه (با چگالی سطحی ۱۰۰ g/m²) با میانگین قطر الیاف ۳μ ۱۲ و درصد تخلخل ۱۰/۵ استفاده شده است. خواص الیاف و رزین استفاده شده برای ساخت نمونه های تجربی در جدول ۲ آمده است. از آن جا که الیاف شیشه خاصیت برگشت فنری دارند و خواباندن آنها درون قالب قدری دشوار است، بنابراین از الیاف شیشه با چگالی سطحی g/m² استفاده شده است تا عمل خواباندن الیاف با آسانی بیشتری انجام شود.

پس از بررسی روش های تولید مختلف، روشی که در زیر مراحل آن شرح داده است، به عنوان روشی مناسب برای تولید این نوع قطعات کامپوزیتی انتخاب شده است:

۱- ایجاد هندسه مورد نظر روی دو ورق صلب مانند تخته سهلا، که
 از آن به عنوان شابلون استفاده می شود (شکل ۱۵). برای برش قطعات

جدول ۲– مشخصات رزین و الیاف استفاده شده درآزمایش ها.

گرانروی در	چگالی رزین	نوع رزين	نوع بافت
mPas) ۲۵°C)	(g/m³)		الياف
70.	1/1	اپو کسی (Epolam 2015)	پارچه بافته شده





شکل ۱۵- قطعات برش خورده با لیزر.

دستگاه برش لیزر Signtak laser LZ1216 به کار گرفته شد. ۲_برش اسفنج های پلی استیرن (با چگالی حدود ۱۰ kg/m³)، در ابعاد ۰ cm ۲۰ × ۳۰ × ۱۰.

۳_ برای ایجاد برش با کیفیت خوب روی اسفنج نیاز به دستگاه برش با سیم داغ است که در ادامه اجزای آن شرح داده شده است (شکل ۱٦):

-المنت سیمی با قطر mm ۲۰/۶ که برای برش نمونه ها مناسب است. - چارچوب چوبی یا فلزی (نیاز به عایق کاری دارد) که برای نگهداشتن دو طرف المنت و سهولت عمل برش استفاده می شود. از آن جا که طول المنت پس از گرم شدن افزایش می یابد و شل می شود، نیاز است که اتصال المنت به چارچوب به وسیله پیچ های قابل تنظیم انجام شود. تا بتوان پس از شل شدن المنت مجدداً آن را سفت کرد.

_ منبع تغذیه: برای گرم کردن المنتهای سیمی نیاز به اعمال



شکل ۱٦- دستگاه برش با سیم داغ.



شکل ۱۷- اسفنج آماده برش برای ایجاد قالب.

جریان الکتریسیته است که این کار با منبع تغذیه انجام می شود. برای داشتن برشی مناسب (برای المنت با قطر mm ۰/٤ و طول ۲۰ cm)، باید دستگاه روی جریان A ۳/۸ تنظیم شود.

سیم: برای انتقال جریان الکتریسیته از منبع تغذیه به المنت سیمی.

٤_ اتصال شابلونها به دو طرف اسفنج بریده شده و قرار دادن آنها در تثبیت کننده تهیهشده برای نگه داشتن مجموعه (شکل ۱۷).

 ۵- با حرکت دادن المنت داغ شده روی شابلون ها، قالب نهایی ایجاد می شود.

۲- لایه چینی و آغشته سازی الیاف روی یک سطح صاف انجام شده و سپس الیاف درون قالب موج دار شکل داده می شود. از آن جا که الیاف خاصیت برگشت فنری دارند، برای جلوگیری از تغییر شکل لایه ها روی قالب یک وزنه قرار داده می شود. ۷- پس از اتمام زمان ژل شدن اولیه و ثانویه کامپوزیت، قطعه موج دار به راحتی از قالب جدا می شود.

مقایسه معادله های نظری با نتایج تجربی آزمون های کشش و خمش برای تعیین سفتی کششی و خمشی مؤثر ورق های کامپوزیتی موج دار انجام شده است. آزمون کشش در جهت عرضی ورق موج دار رفتاری خطی نشان می دهد (مانند ورق تخت).



شكل ١٨- قطعات نهايي.

قطعات برای بررسی در این پژوهش از جنس شیشه-اپوکسی با الیاف بافته شده بودند. برای انجام آزمون خمش دستگاه Instron 5500R و با ظرفیت ۲۰ kN به کار گرفته شد. آزمونهای کشش و خمش ورقهای تخت به ترتیب مطابق استانداردهای ASTMD 3039 و ASTMD 6272 انجام شده است. برای مقایسه معادلههای تحلیلی و نتایج حاصل از آزمونهای تجربی ابتدا آزمون کشش روی ورق تخت انجام شد تا بتوان خواص کشسانی ورق کامپوزیتی تخت را به دست آورد. مدول کشسانی ورق کامپوزیتی تخت شده از جنس شیشه-اپوکسی، ۱۳/٤ GPa به دست آمده است.

برای به دست آوردن سفتی خمشی مؤثر در راستای موج، می توان ورق را مانند تیر یک سرگیردار فرض کرد که زیر بار گسترده (وزن تیر) دچار خمش شده است (شکل ۱۹). تغییر شکل حاصل از بار گسترده در یک تیر یک سرگیردار به ترتیب زیر محاسبه می شود:

$$\delta_{\max} = \frac{\omega L^4}{8E_1 I} \tag{(1.)}$$

از طرفی، سفتی خمشی به ازای واحد عرض در راستای تیر را میتوان به شکل زیر نوشت:

$$D_{\text{Leff}} = \frac{\omega L^4}{8\delta_{\text{max}}} \tag{11}$$

که در آن م_{max} و L به ترتیب، خمش اندازه گیری شده در انتهای آزاد و طول تیر هستند. اگرچه ورق های کامپوزیتی موج دار، چگالی نایکنواخت دارند، ولی می توان آنها را به عنوان مواد مرکب با چگالی یکنواخت، ۹، درنظر گرفت [۳]. لازم به توضیح است که ۹، از تقسیم جرم بر حجم ظاهری (L.W.h) به دست می آید:



شکل ۱۹–اندازه گیری تغییر شکل انتهای ورق موجدار در اثر وزن آن.

جدول ۳– ابعاد قطعات برش داده شده برای آزمونهای کشش و خمش.

ابعاد نمونه (mm)		Ţ		
ضخامت	عرض	طول	ازمون	
• /V	۲٥	۲۰۰	راستاي طولي	: : <i><</i>
• /V	۲٥	۲0۰	راستای عرضی	كسس
• /V	۳٥	١٣٥	راستاي طولي	
• /V	٤٠	۲۱.	راستای عرضی	حمس

$$\rho = \frac{m}{L.W.h} \tag{11}$$

در نتیجه می توان ۵ را از معادله (۱۳) محاسبه کرد:

$$\omega = \frac{mg}{L.W} \tag{17}$$

که m،g و W به ترتیب جرم تیر، گرانش و عرض تیر هستند. در ادامه، خواص مکانیکی معادل مربوط به قطعات ساخته شده با ابعاد مختلف با معادلات نظری مقایسه شده است. همان طور که قبلاً ذکر شد، مدول یانگ ورق تخت ۱۳/٤ GPa است. پس از آمادهسازی ورق های موجدار، با ابعاد ذکر شده در جدول ۳ برش داده شده و

نتايج			l _c	r _c	411
نظرى	تجربى	شعنی موتر	(mm)	(mm)	تموت
•/\0	•/139	$D_{Leff}(N.m)$	٣/٥	٤/٥	١
•/177	•/\.	D _{Leff} (N.m)	1/0	٣/٥	۲
•/1/4	•/٢•٦	$D_{Leff}(N.m)$	1/70	٤/٢٥	٣
٤٤٠	270/077	$D_{Teff}(N.m)$	۲/۸	٣/٨	٤
220	7.9/777	$D_{Teff}(N.m)$	١/٥	٣/٥	٥
۳٦٢	mrq/rvq	$D_{Teff}(N.m)$	۲	٤/٣	٦
•/٩٧٩	1/70	E _{Leff} (MPa)	٣/١	٤	٧
۲/۵۳	۲/٥٢	E _{Leff} (MPa)	۲/۲٥	٤/٢٥	٨
٩/٤	٨/٨٢	E _{Leff} (MPa)	١	٥ ۲/۲	٩
1037/01	10.7	E _{Teff} (MPa)	١	٤/٨	۱.
2103/19	۲۰۹۸	E _{Teff} (MPa)	۲/٥	٣	11
7270/07	7212	E _{Teff} (MPa)	٣	۲/٥	١٢

جدول ٤- مقايسه نتايج تجربي و نظري.

مناسبی برای دست یابی به این ویژگی هستند.

A11 سفتی کششی در راستای طولی ورق تخت

A22 سفتی کششی در راستای عرضی ورق تخت

D11 سفتی خمشی در راستای طولی ورق تخت

D22 سفتی خمشی در راستای عرضی ورق تخت

E₁ مدول یانگ در جهت طولی ورق تخت

E₂ مدول یانگ در جهت عرضی ورق تخت

اطول بخش مستقيم جزء شبه سينوسي_ء

<u>r</u> شعاع بخش دايرهاي جزء شبهسينوسي

β تغيير شکل انتهای ورق در اثر بار P

θ زاویه چرخش در اثر ممان

تغيير شكل انتهاى ورق در اثر وزن آن δ_{\max}

D_{Leff}(N.m) سفتی خمشی مؤثر در راستای طولی ورق موجدار D_{Leff}(N.m) سفتی خمشی مؤثر در راستای عرضی ورق موجدار

E_{Leff}(N.m) سفتی کششی مؤثر در راستای طولی ورق موجدار

D_{Teff}(N.m) سفتی کششی مؤثر در راستای عرضی ورق موجدار

اختصارات

g گرانش زمین h_c ارتفاع جزء

L طول ورق

t ضخامت ورق

W عرض ورق ρ چگالی ورق

ω بار گستر ده

M ممان

P نير و

آزمون های کشش و خمش روی آنها انجام شد.

پس از آماده سازی نمونه های مختلف و انجام آزمون های کشش و خمش در دو راستای طولی و عرضی ورق های موج دار، سفتی های کششی و خمشی نمونه ها استخراج شده است. در جدول ٤ نتایج حاصل از آزمون های کشش و خمش در دو راستای طولی و عرضی ورق با نتایج حاصل از تحلیل نظری مقایسه شدند. با مقایسه این معادله ها، می توان گفت که این مدل ساده قابلیت پیش بینی رفتار مکانیکی ورق های کامپوزیتی با هندسه های موج دار را با خطای قابل قبولی دارد. با توجه به جدول ٤، به طور کلی مقادیر به دست آمده از آزمون های تجربی کمتر از مقادیر به دست آمده از معادله های تحلیلی هستند که دلیل آن مربوط به وجود عیوب احتمالی در نمونه های ساخته شده و خطای اندازه گیری دستگاه، احتمال وجود خطای غیر خطی و در نظر نگرفتن آثار عرض ورق است.

نتيجه گيري

در این پژوهش، رفتار مکانیکی ورقهای کامپوزیتی موجدار با هندسه شبه سینوسی به شکل تحلیلی، عددی و تجربی بررسی شده است. می توان گفت، از معادله های تحلیلی با دقت قابل قبول در پیش بینی رفتار مکانیکی مؤثر ورق های کامپوزیتی استفاده کرد. بررسی نتایج به دست آمده نشان می دهد، ورق های کامپوزیتی موجدار دارای رفتار مکانیکی با ناهمسانگردی زیاد هستند، به طوری که سفتی معادل کششی و خمشی زیاد در جهت عرضی موج دارند، در حالی که سفتی کششی و نقار با ناهمسانگردی زیاد یکی از نیازهای ساختاری در به کارگیری فناوری مورفینگ است، بنابراین ورق های کامپوزیتی موجدار راه حل

مراجع

- Thill C., Etches J., Bond I., Potter K., and Weaver P., Morphing Skins, *Aeronaut. J.*, **112**, 1-23, 2008.
- Thill C., Etches J.A., Bond I.P., Potter K.D., and Weaver P., Composite Corrugated Structures for Morphing Wing Skin Applications, *Smart Mater. Struct.*, **19**, 124009-124019, 2010.
- Yokozeki T., Takeda S., Ogasawara T., and Ishikawa T., Mechanical Properties of Corrugated Composites for Candidate Materials of Flexible Wing Structures, *Compos. Part A: Appl.*

Sci. Manuf., 37, 1578-1586, 2006.

- Thill C., Downsborough J.D., Lais J., Bond I.P., and Jones P. Aerodynamic Study of Corrugated Skins for Morphing Wing Applications, *Aeronaut. J.*, **114**, 237-244, 2010.
- Kazemahvazi S. and Zenkert D., Corrugated all-Composite Sandwich Structures. Part 1: Modeling, *Compos. Sci. Technol.*, 69, 913–919, 2009.
- 6. Wu C.L. and Duan S.H., Buckling Behaviour of Composite

Laminated Corrugated Panel with Sinusoidal Profile Part 1: Equivalent Stiffness *1st Conference on Buckling and Post Buckling Behaviour of Composite Laminated Shell Structures*, Israel, 1-2 March 2004.

- Norman A.D., Guest S.D. and Seffen K.A., Novel Multistable Corrugated Structures, 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, Honolulu, Hawaii, USA, 2007.
- 8. Butler G., Investigation of Corrugated Composite Laminates for Use in Morphing Wing Skin Applications, *18th International*

Conference Adaptive, Structure and Technology, Canada 2007.

- Ruijun G.E., Bangfeng W., Changwei M., and Yong Z., Deformation Characteristics of Corrugated Composites for Morphing Wings, *Front. Mech. Eng. China.* 5, 73–78, 2010,
- Kress G. and Winkler M., Corrugated Laminate Homogenization Model, Structure Technologies, ETH Zürich, Leonhardstr. 27, CH-8092 Zürich, Switzerland, *Compos. Struct.* 92, 795–810, 2010.
- Autar K. Kaw, *Mechanics of Composite Materials*, 2nd ed. CRC, Boca Raton, 2006.

"ለኅ