

پویان قابضی^{*} و محمد گلزار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

(دریافت مقاله: ۱۳۹۱/۰۴/۱۳ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۱/۱۲/۲۷)



واژگان کليدي:

Ultimate Strain and Anisotropic Behavior in Corrugated Composites

P.Ghabezi^{*}, M.Golzar

Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares university, Tehran, Iran.

Abstract: In some applications such as morphing technology, high strain and anisotropic behavior are considered a good advantage. The corrugated composite sheets due to their special geometries have a potential of high deflection under axial loading. In this research, to investigate the strain and anisotropic behavior of corrugated composite sheets some glass/epoxy samples with Quasi-sinusoidal, trapezoidal, rectangular and triangular geometries were manufactured and put to tension and

* : مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي: pouyan.ghabezi@gmail.com

flexural tests in the longitudinal and transverse directions of corrugation. Then, in order to determine anisotropic behavior of corrugated sheets two concepts were introduced: tensile anisotropic and flexural anisotropic criteria based on which anisotropic magnitude was investigated theoretically and experimentally. This research used Yokozeki's theoretical model for quasisinusoidal geometry and his model for trapezoidal, rectangular and triangular geometries. Experimental results showed that corrugated sheets have a strain more than 90%. In the corrugated samples, the strain magnitude was dependent on amplitude and pitch of elements; in other words, it was dependent on the number of elements per length unit. Generally, the Quasi-sinusoidal corrugated sheets have a high strain (more than 50%). Experimental results of trapezoidal sheets showed that amplitude of the elements is one of the most important parameters in the ultimate strain. Generally, increasing the amplitude leads to the growth of the ultimate strain

Keywords: Morphing technology, Composite, Anisotropic behaviour, Ultimate strain, Corrugated sheets.

A22
$$J_{11}$$
 J_{11} J_{12} J_{11} J_{12} J_{12}

۱– مقدمه

اگر با نگاهی کنجکاوانه به طبیعت بنگریم می توان دریافت که جنبههای فناوری بی نظیر و منحصر به فردی در ساختار بدن پرندگان به کار رفته است. هم چنین اگر از دیدگاه یک متخصص به این قضیه نگریسته شود، بی شک باید به این مطلب اقرار کرد که از لحاظ سطح دانش به کار رفته در ساختار بال یک پرنده و قیاس آن با بال یک هواپیما، به وضوح می توان تفاوتهای فاحشی را ملاحظه کرد که کفهی ترازوی فناوری را به نفع پرنده سنگین تر کرده است. با نیل به این مطلب و با توجه به درک میزان ظرافت به کار رفته در خلق بال پرندگان، متخصصان آیرودینامیک و پرواز، چندی

است که به یکی از ویژگیهای منحصر به فرد بینظیرترین بال دنیا (بال یک پرنده) علاقهمند شده و تلاشهایی را برای به کارگیری گسترده از این ویژگی در هواپیماهای نسلهای آینده آغاز کردهاند. این فناوری منحصر به فرد فناوری مورفینگ' است.

فناوری مورفینگ یکی از روش هایی است که استفاده از آن در صنایع هوا و فضا به خصوص در ساخت بال سازه های هوایی رو به گسترش است. با استفاده از ایدهی موجدار کردن یک ورق تخت، می توان از یک ماده ایزو تروپ، رفتار مکانیکی متفاوتی در جهت های مختلف (در دو جهت عمود بر هم) انتظار داشت. یک بال هواپیما نیاز دارد که همزمان در

دو راستا رفتار مکانیکی متفاوتی داشته باشد، ۱- دارای سفتی بالا در راستای عرضی برای تحمل بارهای خمشی و ایرودینامیکی و ۲- سفتی کم در راستای طولی برای سهولت تغییر شکل آن [۱]. دارا بودن خواص ایرودینامیک، مزایای عملکردی [۲و۳] و در نتیجه صرفهجویی در مصرف سوخت ا۲]، با استفاده از فناوری مورفینگ و فرایند موجدار کردن کامپوزیتها قابل پیشبینی است. تلاشهای زیست محیطی که امروزه به منظور کاهش انتشار دی اکسیدکربن انجام می گیرد بیان گر اهمیت ویژهی استفاده از این ایده است.

در ایـن پـژوهش بـرای بررسـی میـزان کـرنش نهـایی و ناهمسانگردی در ورقهای کامپوزیتی موجدار نمونههایی از جنس شیشه/ اپوکسی با هندسههای شبه- سینوسی، مربعی، مثلثی و ذوزنقهای ساخته شده و تحت آزمون.های کـشش و خمش در راستای طولی و عرضی موج قرار گرفتهاند. میرزان کرنش نهایی در نمونههای کامپوزیتی موجدار بهصورت تجربی بررسی شده است و در ادامه دو مفهوم بدون بعد درجه ناهمسان گردی کششی و خمشی تعریف شده که براساس آن میران ناهمسان گردی در نمونههای موجدار بهصورت نظری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بهدست آوردن سفتی های موثر کششی و خمشی در راستای طولی و عرضی موج از معادلات تحلیلی ارایه شده توسط يوكوزوكي [۵]، قابضي و گلـزار [۶–۸] اسـتفاده شـده است. به عبارت دیگر می توان جنبه های نو آوری این پژوهش را در بررسی تئوری و تجربے کرنش نہایی و میزان ناهمسانگردی ورق های موجدار، بررسی منحنیهای کشش و خمش، بررسی رفتار غیر خطی این گونه ورق ها و تعریف مفاهیم نوینی در سنجش رفتار ورق،ای موجدار، جـستجو کر **د**.

۲- کارهای گذشته

یوکوزوکی میلههای کربنی را در راسـتای عرضـی امـواج بهکار برد و یک طرف را توسط لاسـتیک انعطـاف.پـذیری پـر

کرد. وی دریافت که لاستیک منعطف سفتی ویژه را کاهش میدهد و پیشنهاد کرد به جای آن از فیلمهای نازکی استفاده شود. همچنین دریافت استفاده از میلههای کربنی روشی مناسب جهت افرایش مدول سفتی، بدون کاهش انعطافپذیری در راستای امواج است [۵] . در دو دههی اخیر پروژههای تحقیقاتی زیادی برای بهکارگیری فناوری مورفینگ در هواپیماهای بدون سرنشین و آزمون،های تونل باد آن،ها مانند پروژه مورفینگ ناسا، پروژه بال هوشـمند وزارت دفـاع آمریکا [۹–۱۱] و پروژه سازههای هـوایی مورفینگ [۱۲–۱۵] انجام شده است. هیل و همکارانش، به بررسی رفتار لبهی انتهایی بال موجدار ساخته شده با هندسه های سینوسی، ذوزنقهای و مثلثی در عدد رینولدزهای مختلف پرداخته است. وى دريافته است كه خواص ايروديناميكي به شدت به دامنـه، گام امواج و عدد رینولدز وابسته است [۱٦]. کاظم اهـوازی و زنکرت، مدلی تحلیلی برای پیش بینی رفتار برشی و فساری، سازههای ساندویچی مـوجدار ارائـه کـرده انـد [۱۷]. روژان و همکارانش، به بررسی تغییر شکل ورق،ای کامپوزیتی موجدار از جنس شیشه/ اپوکسی بهصورت عـددی پرداختـه، آن، ا گزینهی مناسبی برای استفاده در ساخت سازه ای مورفینگ معرفی کردند [۱۸]. کرس، به بررسی اثر لایهچینی و هندسه بر حداكثر تغيير شكل مجاز ورق،اي كامپوزيتي موجدار پرداخت. وی برای بررسی اثر غیرخطی هندسه، نتایج شبیه-سازی المان محدود را با معادلات کرنش خطی مقایـسه کـرد [۱۹]. وو و دوان، مـاتریس،هـای سـفتی کشـشی، خمـشی و کوپلینگ مربوط به پوستههای کامپوزیتی مـوجدار بـا هندسـه سينوسي را بهصورت تحليلي استخراج و صحت أنها را با آزمون های تجربی تایید کردند [۲۰]. هیل و همکارانش سفتی موثر کششی در راستای طولی در ورق،های کامپوزیتی موجدار با هندسهی ذوزنقهای را بهصورت نظری مورد بررسی قرار دادند، با توجه به اشتباهاتی که در محاسبهی تغییر شکل های ورق تحت بار محوري و همچنين محاسبه سطح مقطع معادل داشتند، روابطشان دارای خطای بسیار بالایی است [۲۱].



شکل ۱ - پارامتر های المان شبه-سینوسی



شکل ۳- پارامترهای المان مربعی

۳– روابط نظری

برای بررسی میزان ناهمسان گردی در ورقهای کامپوزیتی موجدار، از روابط تحلیلی ارائه شده توسط یوکوزوکی برای المانهای شبه-سینوسی و معادلات تحلیلی ارایه شده توسط همین نویسندگان مولف برای المانهای ذوزنقهای، مربعی و مثلثی استفاده شده است. در شکلهای (۱) تا (۴) شماتیک و پارامترهای ابعادی در المانهای شبه-سینوسی، ذوزنقهای، مربعی و مثلثی نشان داده شده است. در جدولهای (۱) تا (۴) معادلات تحلیلی برای محاسبه سفتیهای کششی و خمشی در راستای طولی و عرضی موج ارائه شده است.

۴- ساخت نمونهها

برای ساخت نمونهها از ۵لایه الیاف ۱۰۰ گرمی شیشه (با چگالی سطحی ۱۰۰ گرم بر متر مربع) با ضخامت الیاف



شکل ۲- پارامترهای المان ذوزنقه ای



شکل ۴- پارامترهای المان مثلثی

۱۲۵ میکرومتر استفاده شده است. خواص الیاف و رزین مورد استفاده برای ساخت نمونه های تجربی در جدول (۵) آورده شده است. از آنجایی که الیاف شیشه دارای خاصیت برگشت فنری بوده و خواباندن آنها درون قالب قدری دشوار است، بنابراین از الیاف شیشه با چگالی سطحی ۱۰۰ گرم بر متر مربع استفاده شد تا عمل خواباندن الیاف با سهولت بیش تری انجام شود.

برای ساخت نمونهها از روشی ابتکاری استفاده شد که در مرجع (۷) از همین مولف به تفصیل شرح داده شده است. در شکل (۵) قطعات موجدار ساخته شده نشان داده شدهاند.

پس از آمادهسازی و برش نمونهها در ابعاد پیشنهاد شده (برای انجام آزمون بر روی ورقهای کامپوزیتی موجدار، استانداری وجود ندارد)، تحت آزمونهای کشش و خمش در

جدول۱– سفتیهای موثر ورق،های کامپوزیتی با هندسهی شبه– سینوسی [۵] .				
$E_{\text{Leff}} = \frac{r_{\text{c}}.D_{11}}{h_{\text{c}}.[\frac{I_{\text{c}}^{3}}{3} + r_{\text{c}}\{\frac{\pi}{4}(2I_{\text{c}}^{2} + r_{\text{c}}^{2}) + 2I_{\text{c}}r_{\text{c}}\}]}$	سفتی کششی معادل در راستای طولی			
$E_{\text{Teff}} = \frac{2\pi r_c + 4I_c}{W_c \cdot h_c} \cdot A_{22}$	سفتی کششی معادل در راستای عرضی			
$D_{\text{Leff}} = \frac{r_{\text{c}}.D_{11}}{\frac{\pi}{2}r_{\text{c}} + I_{\text{c}}}$	سفتی خمشی معادل در راستای طولی			
$D_{\text{Teff}} = \frac{A_{22}\{16I_c^3 + 24\pi I_c^2 r_c + 3\pi r_c (4r_c^2 + t^2) + 8I_c (12r_c^2 + t^2)\}}{48r_c}$	سفتی خمشی معادل در راستای عرضی			

جدول ۲- سفتی های موثر ورق های کامپوزیتی با هندسهی ذوزنقهای [۶]					
$E_{\text{Leff}} = \frac{P.L}{W.h.\delta}$	سفتی کششی معادل در راستای طولی				
$D_{\text{Leff}} = \frac{(b_1 + 2b_2 \sin(Q) + b_3).D_{11}}{(b_1 + 2b_2 + b_3)}$	سفتی کمشی معادل در راستای طولی				
$D_{\text{Teff}} = \frac{\text{I.A}_{22}}{\text{t.}(b_1 + 2b_2\sin(Q) + b_3)}$	سفتی خمشی معادل در راستای عرضی				
$E_{\text{Teff}} = \frac{(b_1 + 2b_2 + b_3).A_{22}}{(b_2.\cos(Q) + t).(b_1 + 2b_2.\sin(Q) + b_3)}$	سفتی کششی معادل در راستای عرضی				
$\delta = \frac{P.(b_1 + b_3)}{A_{11}.W} + \frac{2P.b_2.h^2}{3D_{11}.W} + \frac{P.b_1.h^2}{D_{11}.W} + \frac{2P.(\sin(Q))^2.b_2}{A_{11}.W}$	که:				
$I = \frac{b_1 \cdot t^3}{12} + b_1 \cdot t \cdot \left[\frac{h \cdot (b_2 + b_3)}{b_1 + 2b_2 + b_3}\right]^2 + \frac{b_3 t^3}{12} + b_3 \cdot t \cdot \left[\frac{h \cdot (b_1 + b_2)}{b_1 + 2b_2 + b_3}\right]^2 + \frac{b_2 \cdot \sin^2(Q) \cdot t^3}{6} + \frac{b_3 \cdot b_3 \cdot t^3}{$	$\frac{\frac{3}{2}.\cos^2(Q).t}{6}$				

	• •
$E_{\text{Leff}} = \frac{P.(b_1 + b_3)}{W.b_2.\delta}$	سفتی کششی معادل در راستای طولی
$D_{\text{Leff}} = \frac{(b_1 + b_3).D_{11}}{(b_1 + 2b_2 + b_3)}$	سفتی کششی معادل در راستای عرضی
$D_{\text{Teff}} = \frac{\text{I.A}_{22}}{\text{t.}(b_1 + b_3)}$	سفتی خمشی معادل در راستای طولی
$E_{\text{Teff}} = \frac{(b_1 + 2b_2 + b_3).A_{22}}{b_2.(b_1 + b_3)}$	سفتی خمشی معادل در راستای عرضی
$\delta = \frac{P.(b_1 + b_3)}{A_{11}.W} + \frac{2P.b_2^3}{3D_{11}.W} + \frac{P.b_1.b_2^2}{D_{11}.W}$	
$I = \frac{b_1 \cdot t^3}{12} + b_1 \cdot t \cdot [\frac{h \cdot (b_2 + b_3)}{b_1 + 2b_2 + b_3}]^2 + \frac{b_3 t^3}{12} + b_3 \cdot t \cdot [\frac{h \cdot (b_1 + b_2)}{b_1 + 2b_2 + b_3}]^2 + \frac{b_2^3 \cdot t}{6}$	که:

جدول ۳- سفتی های موثر ورق های کامیوزیتی با هندسه یمربعی [۷] .

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۳، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۳

٣٧

$E_{\text{Leff}} = \frac{P.2b_2 \sin(Q)}{W.h.\delta}$	سفتی کششی معادل در راستای طولی
$E_{\text{Teff}} = \frac{2b_2.A_{22}}{(b_2.\cos(Q) + t).2b_2.\sin(Q)}$	سفتی کششی معادل در راستای عرضی
$D_{\text{Leff}} = \frac{2b_2 \sin(Q).D_{11}}{2b_2}$	سفتی خمشی معادل در راستای طولی
$D_{\text{Teff}} = \frac{\text{I.A}_{22}}{\text{t.2b}_2 \sin(Q)}$	سفتی خمشی معادل در راستای عرضی
$\delta = \frac{2P.b_2.h^2}{3D_{11}.W} + \frac{2P.(sin(Q))^2.b_2}{A_{11}.W}$	که:
$I = \frac{b_2 \cdot \sin^2(Q) \cdot t^3}{6} + \frac{b_2^3 \cdot \cos^2(Q) \cdot t}{6}$	

جدول ۴– سفتیهای موثر ورق های کامپوزیتی با هندسهی مثلثی [۸] .

، ۵- مشخصات رزین و سخت کننده استفاده شده در آزمایش ها [۲۲].

ترکیب رزین و سخت کنن <i>د</i> ه	سخت کننده RZ30273	رزين (EPOLAM 2015)	ویژگی
_	79	١٠٠	نسبت ترکیب بر حسب وزن
مايع	مايع	مايع	حالت
زرد کم رنگ	زرد کم رنگ	زرد کم رنگ	رنگ
1100	400	1000	ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد (m.Pa.s)
-	۱/۰۱	1/10	وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد
1/1	_	-	وزن مخصوص محصول پخته شده در دمای ۲۳ درجه
			سانتى گراد
۱۸ دقیقه	_	-	زمان ژل شدن در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد برای ۱۲۹ گرم

دو راستای طولی و عرضی قرار گرفتند. سرعت حرکت فکها در آزمون کشش برای نمونهی تخت mm/min ۵/۰ و برای نمونههای موجدار ۵ mm/min و بود [۲۱]. به منظور انجام آزمونهای خمش و کشش از دستگاه 5500 الات. استفاده شده است. قطر پینهای تکیهگاه و نوک دماغه 10mm است. ابعاد ورقهای موجدار مورد استفاده در آزمونهای کشش و خمش در راستاهای مختلف براساس هندسه موج در جدولهای (۶) تا (۹) آورده شده است.

۴-۱- آزمون کشش در نمونههای موج دار

همانطور که میدانیم یک ورق کامپوزیتی با هندسه ی تخت، تحت بار کششی رفتاری تقریباً ترد دارد. اما ورق های کامپوزیتی با هندسه موجدار به دلیل هندسه ی خاص شان رفتاری کاملا متفاوت داشته که در ادامه به بررسی رفتار این گونه ورق ها تحت آزمون کشش و خمش پرداخته می شود. نتایج آزمون کشش در راستای عمود بر موج برای نمونه های کامپوزیتی موجدار رفتاری شبیه به نمونه ی تخت دارند. هم چنین این گونه ورق ها در راستای عرضی تحت بار کششی











رفتاری کاملا خطی دارند، در حالی که این گونه ورق ها در آزمون کشش در راستای امواج رفتاری غیر خطی از خود نشان میدهند. در شکل های (۶) تا (۹) منحنی های نیرو جابه جایی تحت آزمون کشش در راستای طولی موج برای ورق های کامپوزیتی موجدار با هندسه های مختلف نشان داده شده است.

همانگونه که از منحنی های نیرو جابجایی برای نمونه های کامپوزیتی موجدار برمی آید، به طور کلی می توان گفت رفتار این گونه ورق ها تحت بار کششی دارای چهار ناحیه متفاوت است که البته در رابطه با نمونه ی ذوزنقه ای در واقع نواحی یک و دو با هم ترکیب شده که در ادامه به شرح این مراحل پرداخته می شود.

ناحيه اول:

در این ناحیه، منحنی نیرو – جابه جایی شیب ثابتی داشته، رفت اری ک املا الاستیک از خود نیشان می دهد. در واقع معادلات ارائه شده در جداول (۱ تا ۴) برای حالتی که ورق موجدار در ناحیه یک می باشد صادق است. با استفاده از شیب این ناحیه می توان بر اساس معادله (۱) سفتی کششی موثر در راستای طولی ورق موجدار را به دست آورد. (۱)

که L ،k و A به ترتیب شیب منحنی نیرو-جابهجایی در ناحیه

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۳، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۳

٣٩



شکل ۸- آزمون کشش برای نمونهی مربعی(b1=b2=b3=4mm)



شکل ۹- آزمون کشش برای نمونهی مثلثی(b2=5mm,Q=45)

یک، طول نمونـه تحـت آزمـون و سـطح مقطـع معـادل ورق موجدار (دامنه ضربدر عرض نمونه موجدار) هستند.

ناحيه دوم:

در این ناحیه در یک نیروی تقریبا ثابت ورقموجدار دچار تغییر طول شده، عملاً تنش چندانی در نمونه ایجاد نمی گردد. نیروی اعمالی صرف باز شدن نمونه موجدار شده که دلیل این گشودگی چرخش و دوران حول لولاهای موجود در ورق موجدار به واسطهی هندسه خاصشان است. در واقع در ایس ناحیه نیروی اعمالی سبب تغییر شکل ورق کامپوزیتی از حالت موجدار به حالت تخت می شود. در شکل (۱۰) لولاهای موجود در نمونههای موجدار نشان داده شده است.

ناحيه سوم:

در ناحیه سوم ورق موجدار بیشترین تغییر شکل خود را تجربه کرده، عملا به یک نمونه تخت تبدیل می شود به گونهای که با ادامهی آزمون کشش، عملا یک ورق تخت تحت آزمون قرار دارد. با به دست آوردن شیب منحنی نیرو جابه جایی در این ناحیه می توان مدول کششی نمونه تخت را به دست آورد، اما نکته جالب توجه این است که مدول کششی به دست آمده در این ناحیه بسیار کم تر از مدول کششی نمونه تخت است. دلیل این پدیده این است که نمونهی موجدار در طی تبدیل شدن از حالت موجدار به کمپوزیتی جدایش بین لایه ها رخ می دهد. بنابراین عملا مدول کششی به دست آمده در این ناحیه قابل استناد نیست. در شکل (۱۱) برخی از عیوب ایجاد شده در نمونهی موجدار تحت بار کششی نشان داده شده است.

ناحيه چهارم:

سرانجام در ناحیـه چهـارم در نمونـه شکـست نهـایی رخ میدهد. شکل (۱۲) شکست نهایی در نمونه موجدار را نـشان میدهد.

۵- کرنش در ورق های کامپوزیتی موج دار

در کاربردهایی مانند فناوری مورفینگ، دارا بودن میزان تغییر شکل زیاد یکی از ملزومات و مزایای بسیار کاربردی است. ورقهای موجدار بهدلیل هندسه مواجشان این پتانسیل را دارند که در اثر اعمال نیروی کششی دچار تغییر شکل زیاد شوند. بنابراین در این پژوهش حداکثر کرنش در ورقهای کامپوزیتی موجدار حاصل از آزمونهای تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. در اثر اعمال نیروی کششی در راستای طولی به یک ورق موجدار، نمونه دچار بازشدگی شده تا به حالت تخت برسد که با اعمال نیروی بیشتر دچار شکست میشود. بنابراین قابل پیش بینی است که میزان کرنش در



شکل ۱۰- لولاهای موجود در ورق موج دار





(الف)

شکل ۱۱- برخی ازعیوب ایجاد شده در نمونهی موجدار تحت بار کششی



شکل ۱۲- شکست نهایی در نمونه

ضخامت (mm)	عرض (mm)	طول (mm)	آزمون
• /V	۲۵	۲۵۰	کشش در راستای طولی
• /V	۲۵	۲۵.	کشش در راستای عرضی
• /V	۳۵	180	خمش در راستای طولی
• /V	۴۰	۲۱۰	خمش در راستای عرضی

جدول ۶– ابعاد برش نمونههای شبه– سینوسی برای انجام آزمونهای کشش و خمش.

ضخامت (mm)	عرض (mm)	طول (mm)	آزمون	
• /V	٣٠	۱۵۰	کشش در راستای طولی	
• /V	۲۵	۲۵.	کشش در راستای عرضی	
• /V	٣٠	140	خمش در راستای طولی	
• /V	۴.	710	خمش در راستای عرضی	

جدول ۷– ابعاد برش نمونههای ذوزنقهای برای انجام آزمونهای کشش و خمش.

ضخامت (mm)	عرض (mm)	طول (mm)	آزمون
• /V	۲۵	7	کشش در راستای طولی
• /V	۲۵	700	کشش در راستای عرضی
• /V	٣٠	١٣٥	خمش در راستای طولی
° /V	¥ 0	۲۰۰	خمش در راستای عرضی

جدول ۸-ابعاد برش نمونه های مثلثی جهت انجام آزمون های کشش و خمش.

نمونههای موجدار بسیار بیشتر از نمونههای تخت باشد. کرنش نهایی در ورقهای کامپوزیتی با هندسه تخت ۲/۶٪ بوده و ورقهای موجدار در راستای عرضی موج نیز دارای کرنشی برابر با نمونهی تخت میباشند (رفتاری خطی مانند ورق تخت دارند). در جدول (۱۰) کرنش نهایی در نمونههای کامپوزیتی با هندسههای مختلف آورده شده است. با توجه به این جدول میتوان دریافت که ورقهای کامپوزیتی موجدار این قابلیت را دارند که تا میزان ۹۰ میزان درصد کرنش داشته باشند. میزان کرنش نهایی در نمونههای موجدار به دامنه و گام المانها و به عبارت دیگر به تعداد المانها در واحد طول بستگی دارد. در نمونههای با هندسهی شبه-سینوسی پراکندگی دادهها به گونهای است که نمیتوان به روشنی اثر

پارامترهایی مانند دامنه و گام موج بر میزان کرنش نهایی را مورد بررسی قرار داد، ولی بهطور کلی میتوان گفت ورق،های کامپوزیتی موجدار با هندسهی شبه- سینوسی دارای کرنش نهایی زیادی (بیش از ۵۰ درصد) هستند.

با مقایسهی نتایج مربوط به هندسهی ذوزنقهای می توان دریافت که با افزایش ابعاد المان (b₁ d₂ و d₃) میزان کرنش نهایی کاهش می یابد. دلیل این پدیده این است که با افزایش ابعاد، تعداد المانها در واحد طول کم تر شده و در نتیجه تعداد لولاها شکل (۱۰) که نقشی اساسی در تغییر شکل و کرنش زیاد ورقهای موجدار ایفا میکنند، کاهش می یابد. از طرفی با افزایش تعداد المانها در واحد طول توزیع تنش بهصورت ملایم تری بین لولاها تقسیم شده و در نتیجه از

			. 1	
ضخامت (mm)	عرض (mm)	طول (mm)	ازمون	
• /V	۵۲	۲۵۰	کشش در راستای طولی	
• /V	۲۵	۲۵.	کشش در راستای عرضی	
• /V	٣۵	180	خمش در راستای طولی	
• /V	۴۰	7 I o	خمش در راستای عرضی	

جدول ۹- ابعاد برش نمونه های مربعی جهت انجام آزمون های کشش و خمش.

كرنش	ضخامت	Ia (mm)	ro (mm)	$(1 \sim 1)$	h2(mm)	h2(mm)	h1(mm)	ماريم مراتم
نهایی ٪	(mm)	ic (iiiii)	ic (iiiii)	ي (درجه)	03(11111)	02(11111)	01(11111)	هندسه وری
۵۵/۲	•/V	٣/١	۴	-	-	-	-	شبە- سىنوسى
04	•/V	1/10	4/20	-	-	-	-	شبه-سينوسي
۶۸	•/V	١	۲/۲۵	-	-	-	-	شبە- سىنوسى
۵۶	•/V	۲/۵	۵	-	-	-	-	شبە- سىنوسى
24/8	•/V	-	-	40	۵	٨	۵	ذوزنقهاي
18/8	• /V	-	-	40	٨	Λ/Δ	٨	ذوزنقهاي
١٠	• /V	-	-	۶.	١٠	١٠	١٠	ذوزنقهاي
8/8	• /V	-	-	40	٩/۵	۵	٩/۵	ذوزنقهاي
14	• /V	-	-	40	١٠	Λ/Δ	١٠	ذوزنقهاي
۴۸	• /V	-	-	٥	۴	۴	4	مربعي
٩٠	•/V	-	-	۰	۱ • /۵	۱۰/۵	۱۰/۵	مربعي
۶۸/۵	•/V	-	-	۰	V/۵	V/à	V/à	مربعي
18/0	• /V	-	-	۵۰	-	6	-	مثلثى
۲۹	•/V	-	-	41	-	٨	-	مثلثى

جدول ۱۰ – میزان کرنش نهایی در ورقهای کامپوزیتی موجدار.

میزان ترکهای اولیه و جدایش بین لایهای کاسته می شود. بنابراین ورق می تواند قبل از شکست نهایی تغییر طول بیش تر و در نهایت میزان بالاتری داشته باشد. در رابطه با المانهای مربعی و مثلثی می توان گفت که با افزایش دامنه میزان کرنش نهایی به شکل چشم گیری افزایش می یابد (تا ۹۰ درصد). بنابراین با مقایسهی نتایج مربوط به المانهای ذوزنقهای و مربعی می توان گفت یکی از عوامل مهم (به نوعی مهم ترین عامل) در میزان کرنش نهایی زاویه Q و گم ورق است. به طور کلی با جمع بندی نتایج می توان گفت با افزایش دامنه و

تعداد المانها در واحد طول میزان کرنش نهایی افزایش می-یابد، ولی با افزایش گام میزان آن کاهش مییابد، زیرا همانگونه که از نتایج نمونه های ذوزنقه ای مربعی و مثلثی برمی آید با افزایش 2d که نقش مهمی در تغییر دامنه دارد، در واقع درصد تخت بودن المان (هموار بودن المان) بیشتر شده و از آنجایی که کرنش نهایی در نمونه تخت کم است در محموع کرنش نهایی ورق موجدار کاهش مییابد. پس می توان گفت با افزایش دامنه میزان کرنش نهایی افزایش یافته و با افزایش گام میزان آن کاهش مییابد.

			0.5	•	
$D^* = \frac{D_{Teff}}{D_{Teff}}$	$E^* = \frac{E_{Teff}}{E_{Teff}}$	b1 (mm)	b2 (mm)	b3 (mm)	Q (درجه)
D _{Leff}	E _{Leff}				
111/87	011/°Y	۵	٨	۵	40
۲ ۰ ۱ /۳۱	$\diamond \circ \wedge / \circ \lor$	٨	Λ/Δ	٨	۴۵
188/81	Y00/Y9	١٠	١٠	١٠	۶.
109/10	$\gamma = 1 - 1$	١٠	Λ/Δ	١٠	40

جدول ۱۱– درجهی ناهمسان گردی در ورق موجدار ذوزنقهای بهصورت تجربی.

D^*	E^{*}	ضخامت (mm)	Q (درجه)	b3 (mm)	b2 (mm)	b1 (mm)
41/07	\ AV/A	• /V	۴۵	٢	۵	٢
۵۱/۳	176/2	• /V	۴۵	۵	۵	۵
67/91	۱۷°/۷	• /V	۴۵	٨	۵	٨
23/21	181/1	• /V	۴۵	١٠	۵	١٠
54/42	184/0	• /V	۴۵	10	۵	۱۵
٩/٢۵	7V/44	• /V	۴۵	۵	۲	۵
V7/40	208/1	• /V	۴۵	۵	6	۵
174/AV	480/1	• /V	۴۵	۵	٨	۵
١٩٠/٣٣	VYV/Y	• /V	۴۵	۵	10	۵
۵ ۰ / ۴	۱۷۰۰	• /V	۴۵	۵	۱۵	۵
117	۳۸۶	• /V	۱۵	۴	۴	۴
8 W /88	211/9	• /V	٣٠	۴	۴	۴
۲۳/۰۹	11777	• /V	۴۵	۴	۴	۴
14/79	41/99	• /V	۶.	۴	۴	۴
٣/٩٩	۱۲/۳۸	• /V	V۵	۴	۴	۴

جدول ۱۲– بررسی درجهی ناهمسانگردی در ورقهای موجدار ذوزنقهای بهصورت نظری.

۶- درجهی ناهمسانگردی در ورقهای موجدار

یکی دیگر از ویژگیهای منحصر بهفرد ورقهای موجدار میزان ناهمسانگردی بالای آنها در مقایسه با ورق تخت است که سبب شده انتخاب مناسبی برای استفاده در فناوری مورفینگ و کاربردهای مشابه باشند. حال اگر ورق موجدار دارای جنس کامپوزیت باشد علاوه بر دارا بودن مزایای مرسوم کامپوزیتها به دلیل اینکه کامپوزیتها ذاتاً رفتاری ناهمسانگرد دارند (ورقهای کامپوزیتی با الیاف تک جهته)

قدرت مانور بیش تری برای تغییر میزان ناهمسان گردی سازه وجود دارد. در این پژوهش برای بررسی میزان ناهمسان گردی دو مفهوم بدون بعد به صورت زیر تعریف شده است. ۱- ناهمسان گردی کششی: نسبت سفتی کششی موثر در جهت عرضی (E_{Teff}) به سفتی کششی موثر در جهت طولی (E_{Leff}) ،

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_{\mathrm{Teff}} / \mathbf{E}_{\mathrm{Leff}}$$
(7)

D^*	E^{*}	ضخامت (mm)	Q (درجه)	b2 (mm)
۱۸/۴	۹ <i>۸/۳۶</i>	• /V	٣٠	٢
111/77	817/T	• /V	٣٠	۵
۲ ۸۳/۳۶	1087	• /V	٣٠	٨
447/VY	7449	• /V	٣٠	١٠
990/78	2017	• /V	٣٠	۵
375/04	१४९९	• /V	10	۴
V1/44	m a1/a	• /V	٣٠	k
24/38	171/2	• /V	40	k
Λ/\mathcal{P} \	44/88	• /V	۶ ۰	k
7/47	10/44	• /V	V۵	k

جدول ۱۳ – بررسی درجهی ناهمسان گردی در ورق های موجدار مثلثی بهصورت نظری.

۲- ناهمسان گردی خمشی: نسبت سفتی خمشی موثر در جهـت عرضـی(D_{Teff}) بـه سفتی خمـشی مـوثر در جهـت طولی(D_{Teff})،

(٣)

 $D^* = D_{T eff} / D_{L eff}$

در ورقهای تخت با الیاف بافته شده درجهی ناهمسان گردی برابر با یک است، در حالی که این عدد در ورقهای موجدار با الیاف بافته شده بسیار بزرگ بوده که در ادامه به بررسی میزان ناهمسان گردی ورقهای موجدار به صورت تجربی و نظری پرداخته شده است. از آنجایی که پراکندگی داده های تجربی زیاد بوده و تنها نتایج مربوط به المان ذوزنقه ای قابل استناد است ابتدا به صورت تجربی رفتار ناهمسان گردی ورقهای کامپوزتی موجدار با هندسه ذوزنقه ای مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۱۱) نتایج تجربی مربوط به درجه ناهمسان گردی در ورق موجدار ذوزنقه ای آورده شده است. ابعاد هندسی نمونه ها در جدول (۱۰) ذکر شده است.

همان طور که ذکر شد درجه ی ناهمسان گردی کششی و خمشی ورق تخت برابر با یک بوده، در حالی که در نمونه های ساخته شده با هندسه ی ذوزنقه ای درجه ی ناهمسان گردی خمشی به ۲۶۰ و درجه ناهمسان گردی

کششی به ۵۱۱ میرسد. در ادامه درجه ناهمسان گردی در ورقهای موجدار ذوزنقهای بهصورت نظری آورده شده است.

جدول (۱۲) نشان می دهد که با افزایش گام ($\mathbf{b}_{1} \ \mathbf{b}_{3}$)، درجهی ناهمسان گردی در ورق موج دار کاهش می یابد که البته شیب این تغییرات کم است. بنابراین تغییرات گام در ورق ذوزنقهای تاثیر کمی بر درجه ناهمسان گردی ورق دارد، زیرا با افزایش $\mathbf{b}_{1} \ \mathbf{b}_{3}$ و $\mathbf{b}_{3} \ \mathbf{b}_{4}$ در ورق تخت شده و از آنجایی که درجهی ناهمسان گردی در ورق تخت یک است در نتیجه افزایش این پارامترها اثر ناچیزی بر درجهی ناهمسان گردی دارند. هم چنین می توان دریافت که با افزایش $\mathbf{b}_{2} \ \mathbf{c}_{3}$ درجه ناهمسان گردی افزایش می یابد و با ناهران راویه Q (نزدیک شدن به حالت تخت)، درجهی ناهمسان گردی رو به کاهش می گذارد.

جــدول (۱۳) اثـر پارامترهـای ابعـادی بـر درجـهی ناهمسان گردی ورقهای موجدار با هندسهی مثلثی را نـشان میدهد. همان گونه که از نتایج این جدول بر میآید با افزایش b2، درجهی ناهمسان گردی افزایش مییابد و با افزایش زاویه Q، مقدار آن کاهش مییابد.

D [*]	E [*]	(mm) ضخامت (b1=b2=b3 (mm)
47/21	180/1	• /V	۲
۲۹۵/۹۹	1077	• /V	۵
$\Delta V \Lambda / V \Delta$	7001	• /V	٧
1114/8	۴۰۸۲	• /V) o
7807/3	9171	• /V	١۵

جدول ۱۴– بررسی درجهی ناهمسان گردی در ورقهای موجدار مربعی بهصورت نظری.

D^*	E^*	ضخامت (mm)	Ic (mm)	rc (mm)
۲۲۸۰	۱۱۳۰	• /V	٢	۵
۷۴۸۰	۳۶۷۰	• /V	۵	۵
12400	۸۹۷۰	• /V	٨	۵
40400	14100	• /V	١٠	۵
$\land \forall \lor \lor \circ$	۴۰۸۰۰	• /V	۱۵	۵
۲۵۹۰	170.	• /V	٣	۲
30° °	۱V۵ •	• /V	٣	۵
۵۴۸۰	۲۷۳۰	• /V	٣	٨
۷۱۳۰	3080	• /V	٣	١٠
17400	۶۲۱۰	• /V	٣	۱۵

جدول ۱۵– بررسی درجهی ناهمسانگردی در ورقهای موجدار شبه–سینوسی بهصورت نظری.

جدول (۱۴) اثر پارامترهای ابعادی بر درجهی ناهمسان گردی ورقهای موجدار با هندسهی مربعی را نشان میدهد. نتایج این جدول نشان میدهد که با افزایش ابعاد ورق موجدار مربعی، درجهی ناهمسان گردی افرایش می یابد. سرعت رشد درجهی ناهمسان گردی کششی و خمشی تقریباً با هم برابر است.

جدول (۱۵) اثر تغییرات پارامترهای ابعادی بر درجهی ناهمسان گردی را در ورقهای شبه- سینوسی نشان میدهد به گونهای که با افزایش Ic و به عبارتی دامنه ورق موجدار، درجه ناهمسان گردی افزایش یافته و با افزایش rc نیز درجه ناهمسان گردی افزایش مییابد.

با جمعبندی مطالب گفته شده در رابطه با اثر پارامترهـای ابعادی بر درجهی ناهمسانگردی می توان گفت با افزایش گام

و دامنه، درجهی ناهمسان گردی به ترتیب کاهش و افزایش مییابد. با نزدیک شدن ورق موجدار به حالت تخت درجهی ناهمسان گردی کاهش یافته، به درجهی ناهمسان گردی ورق تخت (به جنس و نوع بافت الیاف بستگی دارد) نزدیک تر میشود. با افزایش درجهی ناهمسان گردی در نمونهی تخت و وجود ناهمسان گردی ذاتی در جنس مورد استفاده، درجهی ناهمسان گردی در نمونهی موجدار افزایش یافته و تاثیر مستقیم بر رفتار مکانیکی موثر نمونهی موجدار دارد. بنابراین با تغییر خواص کامپوزیت مورد استفاده میتوان رفتاری بسیار متفاوت از یک سازه موجدار انتظار داشت و قدرت مانور و انتخاب بیشتری در استفاده از این گونه ورقها در سازههای مورفینگ وجود خواهد داشت. همچنین با توجه به معادلات

نظری ارایه شده میتوان گفت با افزایش ضخامت، سفتیهای موثر کششی و خمشی در راستای طولی و عرضی افزایش مییابند، در حالی که با افزایش ضخامت درجهی ناهمسانگردی کششی و خمشی کاهش مییابند، زیرا با افزایش ضخامت ورق موجدار با ابعادی ثابت به ورق تخت شبیهتر شده در نتیجه درجهی ناهمسانگردی نیز به عدد یک نزدیکتر میشود.

۷- نتیجه گیری

در ایس پ ژوهش بسرای بررسسی میسزان کسرنش نهسایی و ناهمسان گردی در ورقهای کامپوزیتی موجدار نمونه هسایی از جنس شیشه/ اپوکسی با هندسه های شبه- سینوسسی، مربعی، مثلثی و ذوزنقه ای ساخته شده و تحت آزمون کشش و خمش در راستای طولی و عرضی موج قرار گرفته اند. با افزایش گما و دامنه، درجه ناهمسان گردی به ترتیب کماهش و افسزایش

واژەنامە

مراجع

- 1. Morphing Technology monomer
- Thill, C., Etches, J., Bond, I., Potter, K., and Weaver, P., "Morphing skins", *The Aeronautical Journal*, Vol. 112 (1129)., pp. 117 - 139, 2008.

مییابد. با نزدیک شدن ورق موجدار به حالت تخت درجهی

ناهمسانگردی کاهش و به درجهی ناهمسانگردی ورق تخت

نزدیکتر می شود. از آنجایی که دارا بودن رفتار با

ناهمسان گردی بالا یکی از ملزومات ساختاری مورد نیاز در به کارگیری تکنولوژی مورفینگ است، بنابراین ورق های

کامپوزیتی موجدار راه حل مناسبی برای دستیابی به این

ویژگیاند. میزان کرنش در نمونههای موجدار بسیار بیشتر از

نمونههای تخت است. کرنش نهایی در ورقهای کامپوزیتی با هندسهی تخت ۲/۶٪ میباشد و ورقهای موجدار در راستای

عرضی موج نیز دارای کرنے برابر با نمونے ی تختاند

(رفتاری خطی مانند ورق تخت دارند). ورق های کامیوزیتی

موجدار این قابلیت را دارند که تـا ۹۰ درصـد کـرنش داشـته

باشند. میزان کرنش نهایی در نمونه های موجدار به دامنه و گام

المانها و به عبارت دیگر به تعداد المانها در واحد طول

بستگی دارد.

- Joshi, S. P., Tidwell, Z., Crossley, W. A., and Ramakrishnan, S., "Comparison of Morphing Wing Strategies Based Upon aircraft Performance Impacts," Proceedings of the 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Palm Springs, CA, USA: American Inst. Aeronautics and Astronautics Inc., Reston, VA 20191- 4344, USA, 2004.
- Bowman, J., Sanders, B., Cannon, B., Kudva, J., Joshi, S., and Weisshaar, T., "Development of Next Generation Moprhing Aircraft Structures", Proceedings of the 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Honolulu, Hawaii, USA, 2007.
- Spillman, J. J., "The Use of Variable Camber to Reduce Drag, Weight and Costs of Transport Aircraft", *Aeronautical Journal*, Vol. 96 (951), pp. 1-9, 1992.

 Yokozeki, T., Takeda, S., Ogasawara, T., and Ishikawa, T., "Mechanical Properties of Corrugated Composites for Candidate Materials of Flexible Wing Structures", *Compos Part A: Applied Science Manufacturing*, Vol. 37 (10), pp. 1578–1586, 2006.

۶. قابضی، پ.، گلزار، م.، "بررسی رفتار مکانیکی ورقهای کامپوزیتی موجدار به صورت تحلیلی و عددی"، اولین کنفرانس تخمین و تمدید عمر سازههای هوایی و صنعتی پیر و فرسوده، دانشگاه صنعتی شریف، تیر ۱۳۹۰.
۷. قابضی پ.، گلزار م.، "بررسی رفتار مکانیکی ورقهای کامپوزیتی موجدار با هندسه شبه سینوسی"، مجله علوم و تکنولوژی پلیمر، سال ۲۴، شماره ۵، ص ۳۸۹–۳۷۹، آذر – دی ۱۳۹۰.

8. Ghabezi, P., Golzar, M., "Corrugated Composites As Flexible Structures Theory And FEM Analysis",

مواد پیشرفته در مهندسی، سال ۳۳، شمارهٔ ۱، بهار ۱۳۹۳

۴۷

Proceedings of the 32nd Risø International Symposium on Materials Science - Composite Materials for Structural Performance: Towards Higher Limits, pp. 279-289, Denmark, 5-9 September, 2011.

- Florance, J. P., "Contributions of the NASA Langley Research Center to the DARPA/AFRL/NASA/Northrop Grumman Smart Wing Program", (Norfolk, VA) (Reston, VA: American Inst. Aeronautics and Astronautics Inc., 2007.
- 10.Bartley-Cho, J. D., "Development of High-rate, adaptive trailing edge control surface for the smart wing phase 2 wind tunnel model", *Journal of Intelligent Materials Systems and Structure*, Vol. 15, pp. 279–291. 2004.
- Kudva, J.N., "Overview of the DARPA Smart Wing Project," *Journal of Intelligent Materials Systems and Structure*, Vol.15, pp. 261–7. 2004.
- 12. Love, H., Impact of Actuation Concepts on Morphing Aircraft Structures, (Palm Springs, CA) (Reston, VA: American Inst. Aeronautics and Astronautics Inc., 2004.
- 13. Love, H., "Demonstration of Morphing Technology Through Ground and Wind Tunnel Tests", 48th *AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC* Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf., Honolulu, Hawaii, 2007.
- 14. Bowman, J., "Development of Next Generation Morphing Aircraft Structures," 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf, Honolulu, Hawaii, 2007.

- Bye, D. R., and McClure, P. D., "Design of a Morphing Vehicle", 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conf. Honolulu, Hawaii, 2007.
- 16.Thill, C., "Aerodynamic Study of Corrugated Skins for Morphing Wing Applications Aeronaut", Aeronautical Journal, Vol. 114, pp. 237–44, 2010.
- 17.Kazemahvazi, S., Zenkert, D., "Corrugated all-Composite Sandwich Structures," Part 1: Modeling', *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp. 913–919, 2009.
- 18. Ruijun, G.E., Bangfeng, W., Changwei, M., Yong, Z., "Deformation Characteristics of Corrugated Composites for Morphing Wings", *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, Vol. 5(1), pp. 73– 78, 2010.
- Kress, G., Winkler, M., "Corrugated Laminate homogenization model", *Structure Technologies*, Vol. 92, pp.795–810, 2010.
- 20.Wu, C.L., and Duan, S.H., "Buckling Behaviour of Composite Laminated Corrugated Panel with Sinusoidal Profile", Part 1: Equivalent Stiffness Terms, Aircraft Strength Research Institute of China Xi'an 710065, 2009.
- 21. Thill, C., Etches, J.A., Bond, I.P., Potter, K.D., Weaver, P.M., Wisnom, M.R., "Investigation of Trapezoidal Corrugated Aramid/Epoxy Laminates Under Large Tensile Displacements Transverse to the Corrugation Direction", *Composites: Part A*, Vol. 41, pp. 168–176, 2010.
- 22.http://www.axson.com