کرنش نهایی و درجه‌ی ناهمسان‌گردی در ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار

پویان قابضی* و محمد گلزار

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس

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

چکیده- در کاربردهایی مانند فناوری مورفینگ، دارا بودن میزان کرنش و ناهمسانگردی زیاد یکی از ملزومات و مزایای بسیار کاربردی است. ورق‌های موج‌دار به‌دلیل هندسه‌ی مواج‌شان این پتانسیل را دارند که در اثر اعمال نیروی کششی دچار تغییر شکل زیادی می‌شوند. در این پژوهش برای بررسی میزان کرنش نهایی و ناهمسان‌گردی در ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار نمونه‌هایی از جنس شیشه/ اپوکسی با هندسه‌های شبه-سینوسی، مربعی، مثلثی و ذوزنقه‌ای ساخته شده و تحت آزمون کشش و خمش در راستای طولی و عرضی موج قرار گرفتند. در ادامه به منظور بررسی میزان ناهمسان‌گردی در نمونه‌های موج‌دار، دو مفهوم بدون بعد درجه‌ی ناهمسان‌گردی کششی و خمشی تعریف شده و براساس آن میزان ناهمسان‌گردی به‌صورت نظری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. معادلات نظری مورد استفاده در این پژوهش، روابط تحلیلی ارایه شده توسط یوکوزوکی (نمونه شبه- سینوسی) و همین نویسندگان (نمونه‌های ذوزنقه‌ای، مربعی و مثلثی) هستند. نتایج تجربی نشان می‌دهد که ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار این قابلیت را دارند که تا ۹۰ درصد کرنش نهایی 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. به طور کلی می‌توان گفت ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار با هندسه‌ی شبه- سینوسی دارای کرنش نهایی زیادی (بیش از ۵۰ درصد) هستند. مقایسه نتایج مربوط به المان‌های ذوزنقه‌ای و مربعی نشان می‌دهد که یکی از عوامل مهم (به نوعی مهم‌ترین عامل) در میزان کرنش نهایی، دامنه‌ی ورق است. به‌طور کلی با افزایش دامنه و تعداد المان‌ها در واحد طول، میزان کرنش نهایی افزایش ولی با افزایش گام میزان آن کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: **تکنولوژی مورفینگ، کامپوزیت ، درجه ناهمسان‌گردی، کرنش نهایی، ورق‌های موج‌دار.**

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 مکاتبات، پست الکترونیکی: 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 quasi-sinusoidal 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.***

فهرست علائم

A_{22}	سفتی کششی در راستای عرضی ورق تخت	l_c	طول بخش مستقیم المان شبه‌سینوسی
D_{11}	سفتی خمشی در راستای طولی ورق تخت	L	طول ورق
D_{22}	سفتی خمشی موثر در راستای عرضی ورق	M	ممان
D_{Leff}	سفتی خمشی موثر در راستای طولی ورق موج‌دار	P	نیرو
D_{Teff}	سفتی خمشی موثر در راستای عرضی ورق موج‌دار	r_c	شعاع بخش دایروی المان شبه‌سینوسی
E1	مدول یانگ در جهت طولی ورق تخت	t	ضخامت ورق
E2	مدول یانگ در جهت عرضی ورق تخت	W	عرض ورق
E_{Leff}	سفتی کششی موثر در راستای عرضی ورق		
E_{Teff}	سفتی کششی موثر در راستای عرضی ورق	**نمادهای یونانی**	
g	گرانش زمین	δ	تغییر شکل انتهای ورق در اثر بار P
h_c	ارتفاع المان	θ	زاویه چرخش در اثر ممان
l_c	طول بخش مستقیم المان شبه‌سینوسی		

۱- مقدمه

اگر با نگاهی کنجکاوانه به طبیعت بنگریم می‌توان دریافت که جنبه‌های فناوری بی‌نظیر و منحصر به فردی در ساختار بدن پرندگان به‌کار رفته است. هم‌چنین اگر از دیدگاه یک متخصص به این قضیه نگریسته شود، بی‌شک 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 می‌توان تفاوت‌های فاحشی را ملاحظه کرد که کفه‌ی ترازوی فناوری را به نفع پرنده سنگین‌تر کرده است. با نیل به این مطلب و با توجه به درک میزان ظرافت به‌کار 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[1] است.

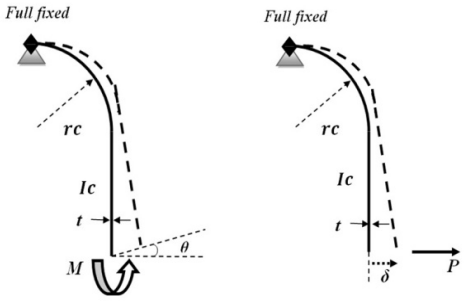
فناوری مورفینگ یکی از روش‌هایی است که استفاده از آن در صنایع هوا و فضا به‌خصوص در ساخت بال سازه‌های هوایی رو به گسترش است. با استفاده از ایده‌ی موج‌دار کردن یک ورق تخت، می‌توان از یک ماده ایزوتروپ، رفتار مکانیکی متفاوتی در جهت‌های مختلف (در دو جهت عمود بر هم) انتظار داشت. یک بال هواپیما نیاز دارد که 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 [۴]، با استفاده از فناوری مورفینگ و فرایند موج‌دار کردن کامپوزیت‌ها قابل پیش‌بینی است. تلاش‌های زیست محیطی که امروزه به منظور کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن انجام می‌گیرد بیان‌گر اهمیت ویژه‌ی استفاده از این ایده است.

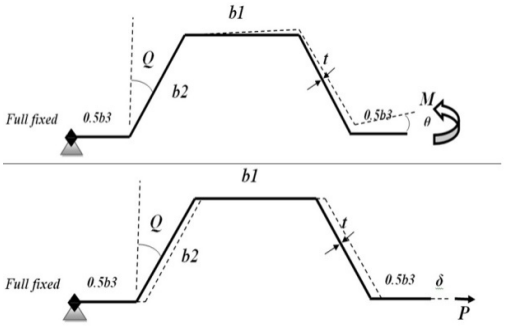
در این پژوهش برای بررسی میزان کرنش نهایی و ناهمسان‌گردی در ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار نمونه‌هایی از جنس شیشه/ اپوکسی با هندسه‌های شبه- سینوسی، مربعی، مثلثی و ذوزنقه‌ای ساخته شده و تحت آزمون‌های کشش و خمش در راستای طولی و عرضی موج قرار گرفته‌اند. میزان کرنش نهایی در نمونه‌های کامپوزیتی موج‌دار به‌صورت تجربی بررسی شده است و در ادامه دو مفهوم بدون بعد درجه ناهمسان‌گردی کششی و خمشی تعریف شده که براساس آن میزان ناهمسان‌گردی در نمونه‌های موج‌دار به‌صورت نظری و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. برای به‌دست آوردن سفتی‌های موثر کششی و خمشی در راستای طولی و عرضی موج از معادلات تحلیلی ارایه شده توسط یوکوزوکی [۵]، قابضی و گلزار [۶-۸] استفاده شده است. به عبارت دیگر می‌توان جنبه‌های نوآوری این پژوهش را در بررسی تئوری و تجربی کرنش نهایی و میزان ناهمسان‌گردی ورق های موج‌دار، بررسی منحنی‌های کشش و خمش، بررسی رفتار غیر خطی این‌گونه ورق‌ها و تعریف مفاهیم نوینی در سنجش رفتار ورق‌های موج‌دار، جستجو کرد.

۲- کارهای گذشته

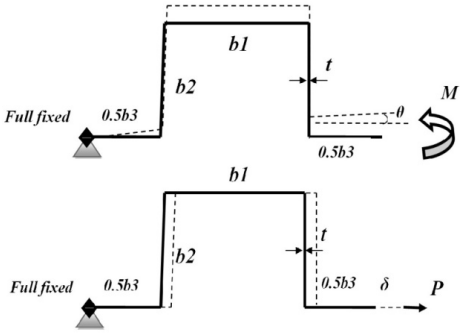
یوکوزوکی میله‌های کربنی را در راستای عرضی امواج به‌کار برد و یک طرف را توسط لاستیک انعطاف‌پذیری پر کرد. وی دریافت که لاستیک منعطف سفتی ویژه را کاهش می‌دهد و پیشنهاد کرد به جای آن از فیلم‌های نازکی استفاده شود. هم‌چنین دریافت استفاده از میله‌های کربنی روشی مناسب جهت افزایش مدول سفتی، بدون کاهش انعطاف‌پذیری در راستای امواج است [۵] . در دو دهه‌ی اخیر پروژه‌های تحقیقاتی زیادی برای به‌کارگیری فناوری مورفینگ در هواپیماهای بدون سرنشین و آزمون‌های تونل باد آن‌ها مانند پروژه مورفینگ ناسا، پروژه بال هوشمند وزارت دفاع آمریکا [۹-۱۱] و پروژه سازه‌های هوایی مورفینگ [۱۲-۱۵] انجام شده است. هیل و همکارانش، به بررسی رفتار لبه‌ی انتهایی بال موج‌دار ساخته شده با هندسه‌های سینوسی، ذوزنقه‌ای و مثلثی در عدد رینولدزهای مختلف پرداخته است. وی دریافته است که خواص ایرودینامیکی به شدت به دامنه، گام امواج و عدد رینولدز وابسته است [۱۶]. کاظم اهوازی و زنکرت، مدلی تحلیلی برای پیش‌بینی رفتار برشی و فشاری، سازه‌های ساندویچی موج‌دار ارائه کرده اند [۱۷]. روژان و همکارانش، به بررسی تغییر شکل ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار از جنس شیشه/ اپوکسی به‌صورت عددی پرداخته، آن‌ها را گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در ساخت سازه‌های مورفینگ معرفی کردند [۱۸]. کرس، به بررسی اثر لایه‌چینی و هندسه بر حداکثر تغییر شکل مجاز ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار پرداخت. وی برای بررسی اثر غیرخطی هندسه، نتایج شبیه-سازی المان محدود را با معادلات کرنش خطی مقایسه کرد [۱۹]. وو و دوان، ماتریس‌های سفتی کششی، خمشی و کوپلینگ مربوط به پوسته‌های کامپوزیتی موج‌دار با هندسه سینوسی را به‌صورت تحلیلی استخراج و صحت آن‌ها را با آزمون‌های تجربی تایید کردند [۲۰]. هیل و همکارانش سفتی موثر کششی در راستای طولی در ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار با هندسه‌ی ذوزنقه‌ای را به‌صورت نظری مورد بررسی قرار دادند، با توجه به اشتباهاتی که در محاسبه‌ی تغییر شکل‌های ورق تحت بار محوری و هم‌چنین محاسبه سطح مقطع معادل داشتند، روابطشان دارای خطای بسیار بالایی است [۲۱].



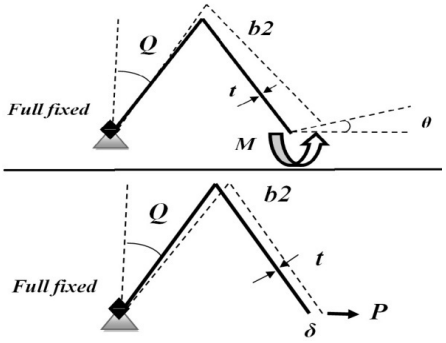
شکل۱ - پارامترهای المان شبه-سینوسی



شکل ۲- پارامترهای المان ذوزنقه ای



شکل ۳- پارامترهای المان مربعی



شکل ۴- پارامترهای المان مثلثی

۳- روابط نظری

برای بررسی میزان ناهمسان‌گردی 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 ۵ لایه الیاف ۱۰۰ گرمی شیشه (با چگالی سطحی ۱۰۰ گرم بر متر مربع) با ضخامت الیاف ۱۲۵ میکرومتر استفاده شده است. خواص الیاف و رزین مورد استفاده برای ساخت نمونه های تجربی در جدول (۵) آورده شده است. از آن‌جایی‌که 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 بیش‌تری 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 ورق‌های کامپوزیتی با هندسه‌ی شبه- سینوسی [۵] .

سفتی کششی معادل در راستای طولی	$E_{Leff}=\frac{r_c.D_{11}}{h_c.[\frac{I_c^3}{3}+r_c\{\frac{\pi}{4}(2I_c^2+r_c^2)+2I_cr_c\}]}$
سفتی کششی معادل در راستای عرضی	$E_{Teff}=\frac{2\pi r_c+4I_c}{W_c.h_c}.A_{22}$
سفتی خمشی معادل در راستای طولی	$D_{Leff}=\frac{r_c.D_{11}}{\frac{\pi}{2}r_c+I_c}$
سفتی خمشی معادل در راستای عرضی	$D_{Teff}=\frac{A_{22}\{16I_c^3+24\pi I_c^2r_c+3\pi r_c(4r_c^2+t^2)+8I_c(12r_c^2+t^2)\}}{48r_c}$

جدول ۲- سفتی‌های موثر ورق‌های کامپوزیتی با هندسه‌ی ذوزنقه‌ای [۶]

سفتی کششی معادل در راستای طولی	$E_{Leff}=\frac{P.L}{W.h.\delta}$
سفتی کمشی معادل در راستای طولی	$D_{Leff}=\frac{(b_1+2b_2\sin(Q)+b_3).D_{11}}{(b_1+2b_2+b_3)}$
سفتی خمشی معادل در راستای عرضی	$D_{Teff}=\frac{I.A_{22}}{t.(b_1+2b_2\sin(Q)+b_3)}$
سفتی کششی معادل در راستای عرضی	$E_{Teff}=\frac{(b_1+2b_2+b_3).A_{22}}{(b_2.\cos(Q)+t).(b_1+2b_2.\sin(Q)+b_3)}$
که:	$\delta=\frac{P.(b_1+b_3)}{A_{11}.W}+\frac{2P.b_2.h^2}{3D_{11}.W}+\frac{P.b_1.h^2}{D_{11}.W}+\frac{2P.(\sin(Q))^2.b_2}{A_{11}.W}$
	$I=\frac{b_1.t^3}{12}+b_1.t.[\frac{h.(b_2+b_3)}{b_1+2b_2+b_3}]^2+\frac{b_3t^3}{12}+b_3.t.[\frac{h.(b_1+b_2)}{b_1+2b_2+b_3}]^2+\frac{b_2.\sin^2(Q).t^3}{6}+\frac{b_2^3.\cos^2(Q).t}{6}$

جدول ۳- سفتی‌های موثر ورق‌های کامپوزیتی با هندسه‌ی مربعی [۷] .

سفتی کششی معادل در راستای طولی	$E_{Leff}=\frac{P.(b_1+b_3)}{W.b_2.\delta}$
سفتی کششی معادل در راستای عرضی	$D_{Leff}=\frac{(b_1+b_3).D_{11}}{(b_1+2b_2+b_3)}$
سفتی خمشی معادل در راستای طولی	$D_{Teff}=\frac{I.A_{22}}{t.(b_1+b_3)}$
سفتی خمشی معادل در راستای عرضی	$E_{Teff}=\frac{(b_1+2b_2+b_3).A_{22}}{b_2.(b_1+b_3)}$
	$\delta=\frac{P.(b_1+b_3)}{A_{11}.W}+\frac{2P.b_2^3}{3D_{11}.W}+\frac{P.b_1.b_2^2}{D_{11}.W}$
که:	$I=\frac{b_1.t^3}{12}+b_1.t.[\frac{h.(b_2+b_3)}{b_1+2b_2+b_3}]^2+\frac{b_3t^3}{12}+b_3.t.[\frac{h.(b_1+b_2)}{b_1+2b_2+b_3}]^2+\frac{b_2^3.t}{6}$

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

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

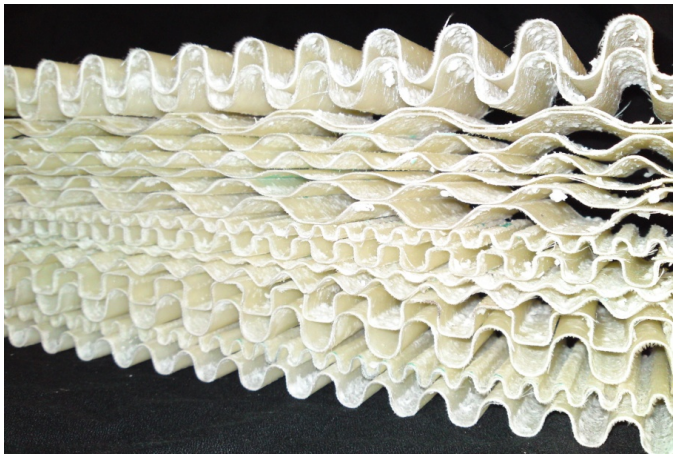
جدول ۵- مشخصات رزین و سخت کننده استفاده شده درآزمایش‌ها [۲۲].

ویژگی	رزین (EPOLAM 2015)	سخت کننده RZ30273	ترکیب رزین و سخت کننده
نسبت ترکیب بر حسب وزن	۱۰۰	۲۹	–
حالت	مایع	مایع	مایع
رنگ	زرد کم رنگ	زرد کم رنگ	زرد کم رنگ
ویسکوزیته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد (m.Pa.s)	۱۵۵۰	۴۵۰	۱۱۰۰
وزن مخصوص در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد	۱/۱۵	۱/۰۱	- ۱/۱
وزن مخصوص محصول پخته شده در دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد	–	–	
زمان ژل شدن در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای ۱۲۹ گرم	–	–	۱۸ دقیقه

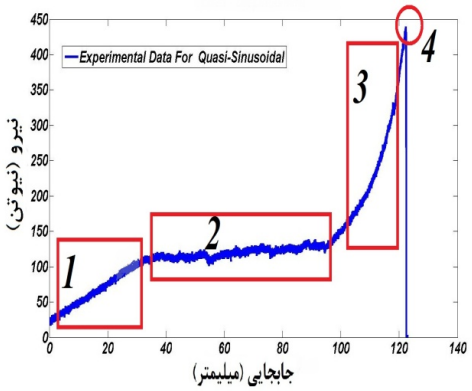
دو راستای طولی و عرضی قرار گرفتند. سرعت حرکت فک‌ها در آزمون کشش برای نمونه‌ی تخت ۰/۵ mm/min و برای نمونه‌های موج‌دار ۵ mm/min بود [۲۱]. به منظور انجام آزمون‌های خمش و کشش از دستگاه Instron 5500 استفاده شده است. قطر پین‌های تکیه‌گاه و نوک دماغه 10mm است. ابعاد ورق‌های موج‌دار مورد استفاده در آزمون‌های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

۴-۱- آزمون کشش در نمونه‌های موج دار

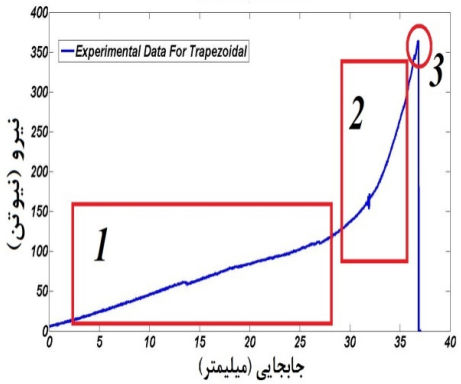
همان‌طور که می‌دانیم یک ورق کامپوزیتی با هندسه‌ی تخت، تحت بار کششی رفتاری تقریباً ترد دارد. اما ورق‌های کامپوزیتی با هندسه موج‌دار به دلیل هندسه‌ی خاص‌شان رفتاری کاملا متفاوت داشته که در ادامه به بررسی رفتار این‌گونه ورق‌ها تحت آزمون کشش و خمش پرداخته می‌شود. نتایج آزمون کشش در راستای عمود بر موج برای نمونه‌های کامپوزیتی موج‌دار رفتاری شبیه به نمونه‌ی تخت دارند. هم‌چنین این‌گونه ورق‌ها در راستای عرضی تحت بار کششی



شکل ۵- قطعات نهایی



شکل ۶- آزمون کشش برای نمونه‌ی شبه- سینوسی (rc=3/5mm, Ic=1/5mm)



شکل ۷- آزمون کشش برای نمونه‌ی ذوزنقه‌ای (Q=45 b1=b3=5mm,b2=8mm,)

رفتاری کاملا خطی دارند، در حالی که این‌گونه ورق‌ها در آزمون کشش در راستای امواج رفتاری غیر خطی از خود نشان می‌دهند. در شکل‌های (۶) تا (۹) منحنی‌های نیرو-جابه‌جایی تحت آزمون کشش در راستای طولی موج برای ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار با هندسه‌های مختلف نشان داده شده است.

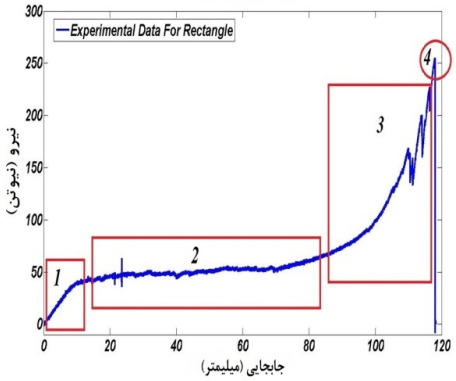
همان‌گونه که از منحنی‌های نیرو-جابجایی برای نمونه‌های کامپوزیتی موج‌دار برمی‌آید، به‌طور کلی می‌توان گفت رفتار این‌گونه ورق‌ها تحت بار کششی دارای چهار ناحیه متفاوت است که البته در رابطه با نمونه‌ی ذوزنقه‌ای در واقع نواحی یک و دو با هم ترکیب شده که در ادامه به شرح این مراحل پرداخته می‌شود.

ناحیه اول:

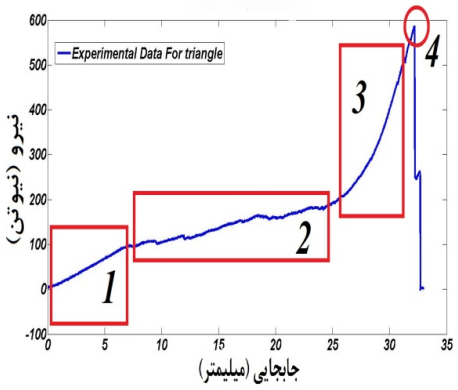
در این ناحیه، منحنی نیرو- جابه‌جایی شیب ثابتی داشته، رفتاری کاملا الاستیک از خود نشان می‌دهد. در واقع معادلات ارائه شده در جداول (۱ تا ۴) برای حالتی که ورق موج‌دار در ناحیه یک می‌باشد صادق است. با استفاده از شیب این ناحیه می‌توان بر اساس معادله (۱) سفتی کششی موثر در راستای طولی ورق موج‌دار را به‌دست آورد.

$$E_{Leff} = k.L/A \qquad (۱)$$

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



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



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

یک، طول نمونه تحت آزمون و سطح مقطع معادل ورق موج‌دار (دامنه ضرب‌در عرض نمونه موج‌دار) هستند.

ناحیه دوم:

در این ناحیه در یک نیروی تقریبا ثابت ورق‌موج‌دار دچار تغییر طول شده، عملاً تنش چندانی در نمونه ایجاد نمی‌گردد. 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 این ناحیه نیروی اعمالی سبب تغییر شکل ورق‌کامپوزیتی از حالت موج‌دار به حالت تخت می‌شود. در شکل (۱۰) لولاهای موجود در نمونه‌های موج‌دار نشان داده شده است.

ناحیه سوم:

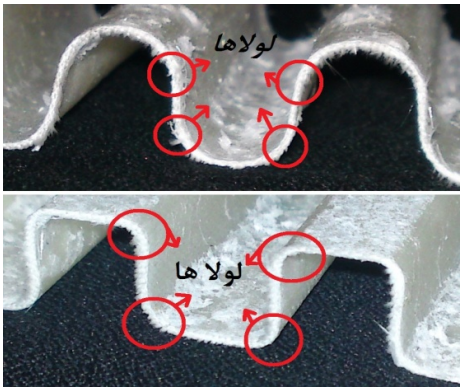
در ناحیه سوم ورق موج‌دار بیش‌ترین تغییر شکل خود را تجربه کرده، عملا به یک نمونه تخت تبدیل می‌شود به گونه‌ای که با ادامه‌ی آزمون کشش، عملا یک ورق تخت تحت آزمون قرار دارد. با به‌دست آوردن شیب منحنی نیرو جابه‌جایی در این ناحیه می‌توان مدول کشسی نمونه تخت را به‌دست آورد، اما نکته جالب توجه این است که مدول کشسی به‌دست آمده در این ناحیه بسیار کم‌تر از مدول کشسی نمونه تخت است. دلیل این پدیده این است که، نمونه‌ی موج‌دار در طی تبدیل شدن از حالت موج‌دار به حالت تخت دچار ترک‌ها و نواقصی شده و در نمونه کامپوزیتی جدایش بین لایه‌ها رخ می‌دهد. بنابراین عملا مدول کشسی به‌دست آمده در این ناحیه قابل استناد نیست. در شکل (۱۱) برخی از عیوب ایجاد شده در نمونه‌ی موج‌دار تحت بار کشسی نشان داده شده است.

ناحیه چهارم:

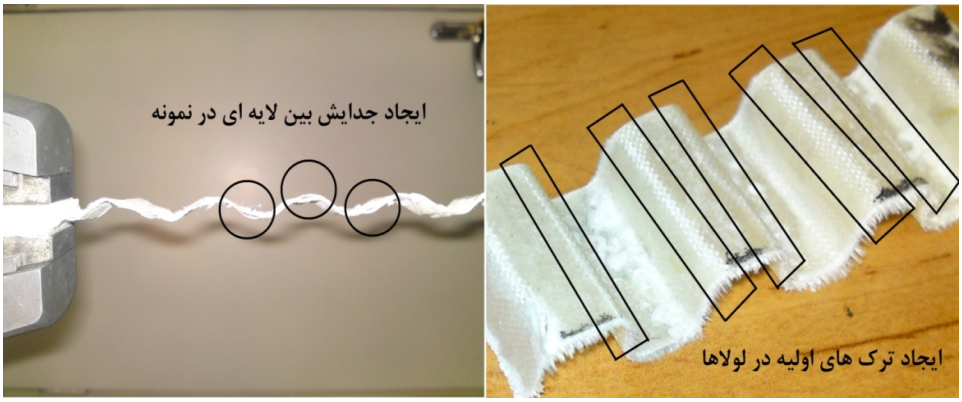
سرانجام در ناحیه چهارم در نمونه شکست نهایی رخ می‌دهد. شکل (۱۲) شکست نهایی در نمونه موج‌دار را نشان می‌دهد.

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 کشسی 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 کشسی 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 پیش‌بینی است که میزان کرنش در

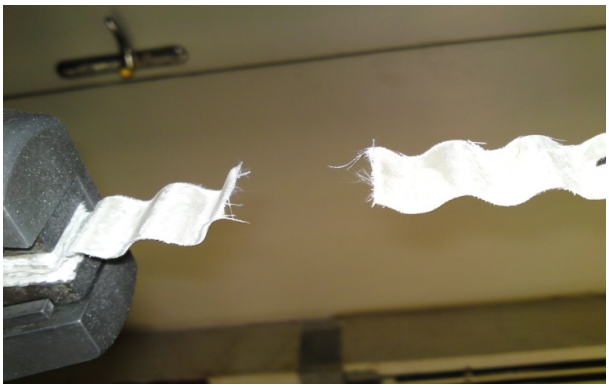


شکل ۱۰- لولاهای موجود در ورق موج دار



(ب) (الف)

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



شکل ۱۲- شکست نهایی در نمونه

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

آزمون	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
کشش در راستای طولی	۲۵۰	۲۵	۰/۷
کشش در راستای عرضی	۲۵۰	۲۵	۰/۷
خمش در راستای طولی	۱۳۵	۳۵	۰/۷
خمش در راستای عرضی	۲۱۰	۴۰	۰/۷

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

آزمون	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
کشش در راستای طولی	۱۵۰	۳۰	۰/۷
کشش در راستای عرضی	۲۵۰	۲۵	۰/۷
خمش در راستای طولی	۱۴۵	۳۰	۰/۷
خمش در راستای عرضی	۲۱۰	۴۰	۰/۷

جدول ۸-ابعاد برش نمونه‌های مثلثی جهت انجام آزمون‌های کشش و خمش.

آزمون	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
کشش در راستای طولی	۲۰۰	۲۵	۰/۷
کشش در راستای عرضی	۲۵۰	۲۵	۰/۷
خمش در راستای طولی	۱۳۵	۳۰	۰/۷
خمش در راستای عرضی	۲۰۰	۴۰	۰/۷

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 میزان۹۰ 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 ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار با هندسه‌ی شبه- سینوسی دارای کرنش نهایی زیادی (بیش از ۵۰ درصد) هستند.

با مقایسه‌ی نتایج مربوط به هندسه‌ی ذوزنقه‌ای می‌توان دریافت که با افزایش ابعاد المان (b_1، b_2 و b_3) میزان کرنش نهایی کاهش می‌یابد. دلیل این پدیده این است که با افزایش ابعاد، تعداد المان‌ها در واحد طول کم‌تر شده و در نتیجه تعداد لولاها شکل (۱۰) که نقشی اساسی در تغییر شکل و کرنش زیاد ورق‌های موج‌دار ایفا می‌کنند، کاهش می‌یابد. از طرفی با افزایش تعداد المان‌ها در واحد طول توزیع تنش به‌صورت ملایم‌تری بین لولاها تقسیم شده و در نتیجه از

جدول ۹- ابعاد برش نمونه‌های مربعی جهت انجام آزمون‌های کشش و خمش.

آزمون	طول (mm)	عرض (mm)	ضخامت (mm)
کشش در راستای طولی	۲۵۰	۲۵	۰/۷
کشش در راستای عرضی	۲۵۰	۲۵	۰/۷
خمش در راستای طولی	۱۳۵	۳۵	۰/۷
خمش در راستای عرضی	۲۱۰	۴۰	۰/۷

جدول ۱۰- میزان کرنش نهایی در ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار.

هندسه ورق	b1(mm)	b2(mm)	b3(mm)	Q (درجه)	rc (mm)	Ic (mm)	ضخامت (mm)	کرنش نهایی ٪
شبه- سینوسی	-	-	-	-	۴	۳/۱	۰/۷	۵۵/۲
شبه-سینوسی	-	-	-	-	۴/۲۵	۱/۲۵	۰/۷	۵۴
شبه- سینوسی	-	-	-	-	۲/۲۵	۱	۰/۷	۶۸
شبه- سینوسی	-	-	-	-	۵	۲/۵	۰/۷	۵۶
ذوزنقه‌ای	۵	۸	۵	۴۵	-	-	۰/۷	۲۴/۶
ذوزنقه‌ای	۸	۸/۵	۸	۴۵	-	-	۰/۷	۱۶/۶
ذوزنقه‌ای	۱۰	۱۰	۱۰	۶۰	-	-	۰/۷	۱۰
ذوزنقه‌ای	۹/۵	۵	۹/۵	۴۵	-	-	۰/۷	۶/۶
ذوزنقه‌ای	۱۰	۸/۵	۱۰	۴۵	-	-	۰/۷	۱۴
مربعی	۴	۴	۴	۰	-	-	۰/۷	۴۸
مربعی	۱۰/۵	۱۰/۵	۱۰/۵	۰	-	-	۰/۷	۹۰
مربعی	۷/۵	۷/۵	۷/۵	۰	-	-	۰/۷	۶۸/۵
مثلثی	-	۶	-	۵۰	-	-	۰/۷	۱۶/۵
مثلثی	-	۸	-	۴۷	-	-	۰/۷	۲۹

میزان ترک‌های اولیه و جدایش بین لایه‌ای کاسته می‌شود. بنابراین ورق می‌تواند قبل از شکست نهایی تغییر طول بیش‌تر و در نهایت میزان بالاتری داشته باشد. در رابطه با المان‌های مربعی و مثلثی می‌توان گفت که با افزایش دامنه میزان کرنش نهایی به شکل چشم‌گیری افزایش می‌یابد (تا ۹۰ درصد). بنابراین با مقایسه‌ی نتایج مربوط به المان‌های ذوزنقه‌ای و مربعی می‌توان گفت یکی از عوامل مهم (به نوعی مهم‌ترین عامل) در میزان کرنش نهایی زاویه Q و گام ورق است. به طور کلی با جمع‌بندی نتایج می‌توان گفت با افزایش دامنه و تعداد المان‌ها در واحد طول میزان کرنش نهایی افزایش می‌یابد، ولی با افزایش گام میزان آن کاهش می‌یابد، زیرا همان‌گونه که از نتایج نمونه‌های ذوزنقه‌ای مربعی و مثلثی برمی‌آید با افزایش b2 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 مجموع کرنش نهایی ورق موج‌دار کاهش می‌یابد. پس می‌توان گفت با افزایش دامنه میزان کرنش نهایی افزایش یافته و با افزایش گام میزان آن کاهش می‌یابد.

جدول ۱۱- درجه‌ی ناهمسان‌گردی در ورق موج‌دار ذوزنقه‌ای به‌صورت تجربی.

$D^* = \frac{D_{Teff}}{D_{Leff}}$	$E^* = \frac{E_{Teff}}{E_{Leff}}$	b1 (mm)	b2 (mm)	b3 (mm)	Q (درجه)
۱۸۸/۶۲	۵۱۱/۰۲	۵	۸	۵	۴۵
۲۰۱/۳۱	۵۰۸/۰۷	۸	۸/۵	۸	۴۵
۱۳۳/۶۱	۲۵۵/۲۶	۱۰	۱۰	۱۰	۶۰
۲۵۹/۱۵	۳۸۹/۸۶	۱۰	۸/۵	۱۰	۴۵

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

D^*	E^*	ضخامت (mm)	Q (درجه)	b3 (mm)	b2 (mm)	b1 (mm)
۴۷/۰۲	۱۸۷/۸	۰/۷	۴۵	۲	۵	۲
۵۱/۳	۱۷۶/۳	۰/۷	۴۵	۵	۵	۵
۵۲/۹۱	۱۷۰/۷	۰/۷	۴۵	۸	۵	۸
۵۳/۵۱	۱۶۸/۳	۰/۷	۴۵	۱۰	۵	۱۰
۵۴/۳۳	۱۶۴/۵	۰/۷	۴۵	۱۵	۵	۱۵
۹/۲۵	۲۷/۴۴	۰/۷	۴۵	۵	۲	۵
۷۲/۴۵	۲۵۶/۸	۰/۷	۴۵	۵	۶	۵
۱۲۴/۸۷	۴۶۵/۱	۰/۷	۴۵	۵	۸	۵
۱۹۰/۳۳	۷۳۷/۳	۰/۷	۴۵	۵	۱۰	۵
۴۰۹/۰۵	۱۷۰۰	۰/۷	۴۵	۵	۱۵	۵
۱۱۲	۳۸۶	۰/۷	۱۵	۴	۴	۴
۶۳/۶۶	۲۱۸/۹	۰/۷	۳۰	۴	۴	۴
۳۳/۰۹	۱۱۳/۲	۰/۷	۴۵	۴	۴	۴
۱۴/۲۶	۴۷/۹۹	۰/۷	۶۰	۴	۴	۴
۳/۹۹	۱۲/۳۸	۰/۷	۷۵	۴	۴	۴

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 بیش‌تری برای تغییر میزان ناهمسان‌گردی سازه وجود دارد. در این پژوهش برای بررسی میزان ناهمسان‌گردی دو مفهوم بدون بعد به صورت زیر تعریف شده است.

۱- ناهمسان‌گردی کششی: نسبت سفتی کششی موثر در جهت عرضی(E_{Teff}) به سفتی کششی موثر در جهت طولی(E_{Leff}) ،

$$E^*=E_{Teff} / E_{Leff} \qquad (۲)$$

جدول ۱۳- بررسی درجه‌ی ناهمسان‌گردی در ورق های موج‌دار مثلثی به‌صورت نظری.

b2 (mm)	Q (درجه)	ضخامت (mm)	E^*	D^*
۲	۳۰	۰/۷	۹۸/۳۶	۱۸/۴
۵	۳۰	۰/۷	۶۱۲/۲	۱۱۱/۲۲
۸	۳۰	۰/۷	۱۵۶۷	۲۸۳/۳۶
۱۰	۳۰	۰/۷	۲۴۴۹	۴۴۲/۷۲
۵	۳۰	۰/۷	۵۵۱۲	۹۹۵/۲۳
۴	۱۵	۰/۷	۱۷۹۹	۳۲۶/۰۴
۴	۳۰	۰/۷	۳۹۱/۹	۷۱/۴۴
۴	۴۵	۰/۷	۱۳۱/۷	۲۴/۳۶
۴	۶۰	۰/۷	۴۴/۶۶	۸/۶۱
۴	۷۵	۰/۷	۱۰/۴۴	۲/۴۲

۲- ناهمسان‌گردی خمشی: نسبت سفتی خمشی موثر در جهت عرضی(D_{Teff}) به سفتی خمشی موثر در جهت طولی(D_{Teff})،

$$D^*=D_{T\,eff} / D_{L\,eff}، \qquad (۳)$$

در ورق‌های تخت با الیاف بافته شده درجه‌ی ناهمسان‌گردی برابر با یک است، در حالی‌که این عدد در ورق‌های موج‌دار با الیاف بافته شده بسیار بزرگ بوده که در ادامه به بررسی میزان ناهمسان‌گردی ورق‌های موج‌دار به‌صورت تجربی و نظری پرداخته شده است. از آن‌جایی‌که پراکندگی داده‌های تجربی زیاد بوده و تنها نتایج مربوط به المان ذوزنقه‌ای قابل استناد است ابتدا به‌صورت تجربی رفتار ناهمسان‌گردی ورق‌های کامپوزتی موج‌دار با هندسه ذوزنقه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول (۱۱) نتایج تجربی مربوط به درجه ناهمسان‌گردی در ورق موج‌دار ذوزنقه‌ای آورده شده است. ابعاد هندسی نمونه‌ها در جدول (۱۰) ذکر شده است.

همان‌طور که ذکر شد درجه‌ی ناهمسان‌گردی کششی و خمشی ورق تخت برابر با یک بوده، در حالی‌که در نمونه‌های ساخته شده با هندسه‌ی ذوزنقه‌ای درجه‌ی ناهمسان‌گردی خمشی به ۲۶۰ و درجه ناهمسان‌گردی کششی به ۵۱۱ می‌رسد. در ادامه درجه ناهمسان‌گردی در ورق‌های موج‌دار ذوزنقه‌ای به‌صورت نظری آورده شده است.

جدول (۱۲) نشان می‌دهد که با افزایش گام (b_1 و b_3)، درجه‌ی ناهمسان‌گردی در ورق موج‌دار کاهش می‌یابد که البته شیب این تغییرات کم است. بنابراین تغییرات گام در ورق ذوزنقه‌ای تاثیر کمی بر درجه ناهمسان‌گردی ورق دارد، زیرا با افزایش b_1 و b_3 ورق موج‌دار به ورق تخت نزدیک‌تر شده و از آنجایی‌که درجه‌ی ناهمسان‌گردی در ورق تخت یک است در نتیجه افزایش این پارامترها اثر ناچیزی بر درجه‌ی ناهمسان‌گردی دارند. هم چنین می‌توان دریافت که با افزایش b_2، درجه ناهمسان‌گردی افزایش می‌یابد و با افزایش زاویه Q (نزدیک شدن به حالت تخت)، درجه‌ی ناهمسان گردی رو به کاهش می‌گذارد.

جدول (۱۳) اثر پارامترهای ابعادی بر درجه‌ی ناهمسان‌گردی ورق‌های موج‌دار با هندسه‌ی مثلثی را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نتایج این جدول بر می‌آید با افزایش b2، درجه‌ی ناهمسان‌گردی افزایش می‌یابد و با افزایش زاویه Q، مقدار آن کاهش می‌یابد.

جدول ۱۴- بررسی درجه‌ی ناهمسان‌گردی در ورق‌های موج‌دار مربعی به‌صورت نظری.

D^*	E^*	ضخامت (mm)	b1=b2=b3 (mm)
۴۸/۵۷	۱۶۵/۲	۰/۷	۲
۲۹۵/۹۹	۱۰۲۲	۰/۷	۵
۵۷۸/۷۵	۲۰۰۱	۰/۷	۷
۱۱۷۹/۶	۴۰۸۲	۰/۷	۱۰
۲۶۵۲/۳	۹۱۸۲	۰/۷	۱۵

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

D^*	E^*	ضخامت (mm)	Ic (mm)	rc (mm)
۲۲۸۰	۱۱۳۰	۰/۷	۲	۵
۷۴۸۰	۳۶۷۰	۰/۷	۵	۵
۱۸۴۰۰	۸۹۷۰	۰/۷	۸	۵
۳۰۴۰۰	۱۴۷۰۰	۰/۷	۱۰	۵
۸۴۷۰۰	۴۰۸۰۰	۰/۷	۱۵	۵
۲۵۹۰	۱۲۵۰	۰/۷	۳	۲
۳۵۴۰	۱۷۵۰	۰/۷	۳	۵
۵۴۸۰	۲۷۳۰	۰/۷	۳	۸
۷۱۳۰	۳۵۶۰	۰/۷	۳	۱۰
۱۲۴۰۰	۶۲۱۰	۰/۷	۳	۱۵

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

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

با جمع‌بندی مطالب گفته شده در رابطه با اثر پارامترهای ابعادی بر درجه‌ی ناهمسان‌گردی می‌توان گفت با افزایش گام و دامنه، درجه‌ی ناهمسان‌گردی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن ورق موج‌دار به حالت تخت درجه‌ی ناهمسان‌گردی کاهش یافته، به درجه‌ی ناهمسان‌گردی ورق تخت (به جنس و نوع بافت الیاف بستگی دارد) نزدیک‌تر می‌شود. با افزایش درجه‌ی ناهمسان‌گردی در نمونه‌ی تخت و وجود ناهمسان‌گردی ذاتی در جنس مورد استفاده، درجه‌ی ناهمسان‌گردی 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 این‌گونه 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- نتیجه‌گیری

در این پژوهش برای بررسی میزان کرنش نهایی و ناهمسان‌گردی در ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار نمونه‌هایی از جنس شیشه/ اپوکسی با هندسه‌های شبه- سینوسی، مربعی، مثلثی و ذوزنقه‌ای ساخته شده و تحت آزمون کشش و خمش در راستای طولی و عرضی موج قرار گرفته‌اند. با افزایش گام و دامنه، درجه ناهمسان‌گردی به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. با نزدیک شدن ورق موج‌دار به حالت تخت درجه‌ی ناهمسانگردی کاهش و به درجه‌ی ناهمسان‌گردی ورق تخت نزدیک‌تر می‌شود. از آنجایی‌که دارا بودن رفتار با ناهمسان‌گردی بالا یکی از ملزومات ساختاری مورد نیاز در به‌کارگیری تکنولوژی مورفینگ است، بنابراین ورق‌های 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 کرنشی برابر با نمونه‌ی تخت‌اند (رفتاری خطی مانند ورق تخت دارند). ورق‌های کامپوزیتی موج‌دار این قابلیت را دارند که تا ۹۰ 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.

واژه‌نامه

1. Morphing Technology monomer

مراجع

1. Thill, C., Etches, J., Bond, I., Potter, K., and Weaver, P., "Morphing skins", *The Aeronautical Journal*, Vol. 112 (1129)., pp. 117 - 139, 2008.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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 به‌صورت 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 شبه‌سینوسی"، *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",

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.

9. 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.
11. 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.
15. 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.
19. 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