

## آنالیز ارتعاش آزاد ورق کامپوزیت ساندویچی با هسته فوم ویسکوالاستیک در تماس با محیط آب

سید ساعد رضوانی<sup>۱</sup>، مهدی سعید کیاست<sup>۲</sup>

kiasat@aut.ac.ir

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۲- استادیار، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

### چکیده

ورقهای کامپوزیت ساندویچی دارای کاربرد گسترده‌ای در ساخت بدنه شناورهای تندروی پیشرفته می‌باشند. ورق ساندویچی بدنه شناور که از یک طرف با آب در تماس است نه تنها فراهم‌کننده سفتی خمشی بالا برای بدنه می‌باشد بلکه میراکننده بخشی از انرژی ارتعاش ناشی از عوامل محرک داخلی و خارجی شناور نیز است. در این تحقیق ورق کامپوزیت ساندویچی دارای دو پوسته خارجی لمینیت متشکل از دو نوع پارچه‌ی الیاف گرافیت و الیاف شیشه در کنار رزین اپوکسی، و یک لایه داخلی هسته از جنس فوم پلی‌ایزوبوتیلن در نظر گرفته شده است. لمینیت‌های پوسته دارای رفتار الاستیک ارتوتروپیک و لایه‌ی هسته دارای رفتار ویسکوالاستیک ایزوتروپیک است که اطلاعات خواص مکانیکی این مواد از مراجع اخذ شده است. برای رفتار ویسکوالاستیک فوم هسته، در این تحقیق منحنی اساسی رهایش با استفاده از نتایج تست‌های دما ثابت که در طیفی از دماهای مختلف در مرجع انجام شده‌اند استخراج می‌گردد. با اعمال خواص زمانمند هسته و خواص پوسته در نرم‌افزار اجزای محدود، ورق کامپوزیت ساندویچی تحت شرایط مرزی چهار طرف گیردار تحلیل مودال می‌گردد. نتایج تحلیل مودال اعم از فرکانسهای طبیعی و شکل مودها برای ورق لمینیت کامپوزیت و همچنین ورق کامپوزیت ساندویچی در هوا و همچنین در تماس با محیط آب مقایسه می‌گردند.

واژگان کلیدی: ورق کامپوزیت ساندویچی، رفتار ویسکوالاستیک هسته، منحنی اساسی رهایش، ارتعاش در آب.

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۱۰/۰۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۵/۱۳

## ۱- مقدمه

مطالعه رفتار ارتعاشی سازه‌های دریایی از مهمترین بخشهای طراحی سازه‌ای در کنار طراحی هیدرومکانیکی سازه است. ارتعاش موضعی و یا عمومی بدنه سازه در مجاورت آب کاملاً متفاوت با ارتعاش بدنه خارج از آب و در مجاورت هوا است زیرا وقتی سازه در تماس با آب قرار می‌گیرد دو پدیده جرم و دمپینگ افزوده بوجود می‌آید که باعث تغییر در فرکانس طبیعی سازه می‌گردد.

در سال ۲۰۱۰، توسط آقای اوزکول آنالیز ارتعاشی تیر کامپوزیت با هسته ماده ویسکوالاستیک با استفاده از روش تبدیل دیفرانسیل صورت گرفت [۱]. در سال ۲۰۱۳، آقای کرامر آنالیز ارتعاشی ورق کامپوزیت یک طرف گیردار را در آب و هوا انجام داد. در این مقاله اثرات جرم افزوده بر روی فرکانس طبیعی سازه در سیال در نظر گرفته شده است. روش حل این مسأله به صورت ترکیبی از روشهای المان محدود و تحلیلی است [۲]. در سال ۲۰۱۳، ارتعاشات با دامنه محدود یک ورق در سیال ویسکوز توسط آقای پان مورد بررسی قرار گرفته است. تقابل سازه وسیال به صورت تابع هیدرودینامیکی موهومی که قابل ارائه جرم افزوده و اثرات دمپینگ می باشد بیان شده است. معادلات خیز ورق با استفاده از روش اولر- برنولی بیان گردیده است [۳]. آقای محمود خانی و همکارانشان در سال ۲۰۱۴، اثرات عوامل غیر خطی روی ارتعاش ورق کامپوزیت ساندویچی مورد بررسی قرار دادند. جابجاییهای خطی لایه داخلی و جابجاییهای درجه دوم برای لایه‌های خارجی در نظر گرفته شد [۴]. در سال ۲۰۱۴، آقای زانگ و همکارانشان آنالیز ارتعاش آزاد ورق کامپوزیتی را مورد بررسی قرار دادند. با استفاده از تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول، اثرات تغییر شکل برشی عرضی مشخص گردید. روش ایملس- ریتز، به منظور محاسبات عددی مورد استفاده قرار گرفت. مطالعه دقت این روش با استفاده از همگرایی صورت پذیرفت [۵]. در سال ۲۰۱۵، آقای زغال روش کاهش مدل برای سازه‌های ساندویچی ویسکوالاستیک را در حوزه زمان و فرکانس مورد بررسی قرار داد. روش مدلسازی بصورت ترکیب تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول و مدل گلا- هوگز- ام سی تاویش<sup>۱</sup>، انجام گرفت [۶]. در سال ۲۰۱۶، آقای یانگ و همکارانشان، حل

دقیق برای ارتعاشات ورقهای ساندویچ ویسکوالاستیک و  $FG^2$  تحت شرایط مرزی متغیر ارائه نمودند [۷]. در سال ۲۰۱۶، آقای لی و همکارانشان، تأثیر زاویه الیاف ورقهای  $CFRP^3$  را بر پاسخ ارتعاشی و آکوستیکی آن مشاهده و بررسی نمودند [۸]. در سال ۲۰۱۷، آقای کاهیا و توران، یک مدل اجزای محدود بر اساس تئوری تغییر شکل برشی مرتبه اول برای ارتعاش و کمانش ورق  $FG$  ارائه نمودند [۹]. در سال ۲۰۱۷، آقای مارینوسکی، با استفاده از روش عددی، ارتعاشات ورق کامپوزیت تحت اثر بار حرارتی را مورد بررسی قرار داد [۱۰].

پیشرفت سریع استفاده از ورقهای کامپوزیت ساندویچی در صنعت باعث شده است که روشهای جدید تحلیلی و عددی جهت آنالیز و مطالعه رفتار آنها تحت بارگذاریهای استاتیکی و دینامیکی، بسیار مورد توجه قرار گیرد. رفتار مکانیکی ورقهای کامپوزیت ساندویچی کاملاً پیچیده‌تر از رفتار لمینیت‌های کامپوزیت است. علاوه بر رفتار غیرایزوتروپیک لمینیت کامپوزیت، رفتار زمانمند لایه داخلی هسته، باعث می‌شود که ورق کامپوزیت ساندویچی رفتار ویسکوالاستیک غیرایزوتروپیک پیچیده‌ای داشته باشد. رفتار زمانمند و ایزوتروپیک مواد فوم با چگالی‌های مختلف و همچنین رفتار غیرایزوتروپیک مواد لمینیت کامپوزیت بسیار محدود بصورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته و اطلاعات مربوطه به ندرت در دسترس است.

در این مقاله هدف مشخص نمودن فرکانسهای طبیعی و شکل مودها برای ورق لمینیت کامپوزیت و همچنین ورق کامپوزیت ساندویچی در هوا و همچنین در تماس با محیط آب است، که شامل پنج بخش اصلی است. در قسمت دوم معادلات حاکم بر رفتار دینامیکی مواد با خواص ویسکوالاستیک مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در قسمت سوم خواص زمانمند لایه داخلی هسته از جنس فوم پلی‌ایزوبوتیلن که در مرجع برای دماهای مختلف موجود است، به یک منحنی اساسی ره‌ایش تبدیل خواهد شد و در قسمت چهارم شبیه‌سازی ارتعاش آزاد ورق لمینیت کامپوزیت و همچنین ورق کامپوزیت ساندویچی در هوا و همچنین در تماس با محیط آب، تحت شرایط مرزی چهارطرف گیردار انجام خواهد شد و در انتها در قسمت پنجم

<sup>1</sup> Golla- Hughes- Mc Tavish (GHM) Model

<sup>2</sup> Functionally Graded

<sup>3</sup> Carbon-Fiber-Reinforced Plastic

$$E^*(\omega) = E_1(\omega) + E_2(\omega) \quad (5)$$

مدول ذخیره مربوط به حالت الاستیک ماده و مدول اتلاف مربوط به حالت ویسکو ماده است و مدول ذخیره جهت استخراج فرکانس طبیعی و مدول اتلاف جهت استخراج دمپینگ مورد استفاده قرار می‌گیرد. اگر بجای تحریک کرنش از تحریک تنش استفاده گردد، آنگاه نرمی اتلاف و نرمی ذخیره داریم.

مواد ویسکوالاستیک نسبت به تغییر دما دارای خواص مکانیکی متفاوتی می‌باشند و هر چه دما افزایش می‌یابد، ماده ویسکوالاستیک با رشد بیشتری دچار رهاش خواهد گردید. بر اساس معادله WLF<sup>۱</sup> می‌توان منحنی‌های مدول رهاش و نرمی خزش ماده ویسکوالاستیک که بر حسب زمان و دمای ثابت در طیفهای مختلفی از دما توسط نتایج تجربی استخراج گردیده‌اند، را به صورت منحنی اساسی رهاش<sup>۲</sup> بر حسب دمای مرجع مورد نظر، بیان نمود. معادله WLF به صورت زیر بیان می‌گردد [۱۱].

$$\log a_T = -\frac{C_1 \times (T - T_{ref})}{C_2 + (T - T_{ref})} \quad (6)$$

$$a_T = \frac{t}{t_R} \quad (7)$$

ضرایب ثابت  $C_1$  و  $C_2$  با توجه به مقدار ضریب انتقال  $a_T$  بدست می‌آیند.  $T_{ref}$  دمای مرجع مورد نظر است و  $t, T$  به ترتیب دما و زمانی می‌باشند که خواص مکانیکی ماده ویسکوالاستیک در آن دما و زمان مورد نظر است.  $t_R$  دمای کاهش یافته<sup>۳</sup> است.

### ۳- استخراج خواص مکانیکی هسته فوم ویسکو الاستیک

پلی ایزوبوتیلن<sup>۴</sup> با چگالی  $920 \frac{kg}{m^3}$ ، به عنوان هسته فوم ویسکوالاستیک ورق کامپوزیت ساندویچی در نظر گرفته می‌شود. مقادیر مدول رهاش ذخیره در دماها و فرکانسهای مختلف با استفاده از تست DMA<sup>۵</sup> بدست می‌آیند و پس از استخراج نمودارها در حوزه فرکانس، با تبدیل آنها به حوزه زمان، مقادیر شکل (۱) نسبت به زمان و دما مشاهده می‌شوند [۱۳].

نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار خواهد گرفت و تأثیر محیط آب و هسته فوم، بر روی فرکانسهای طبیعی ورق لمینیت کامپوزیت و همچنین ورق کامپوزیت ساندویچی، مشخص خواهد شد.

### ۲- معادلات مکانیکی حاکم بر رفتار مواد ویسکو الاستیک

در این قسمت معادلات حاکم بر رفتار مکانیکی مواد با خواص ویسکوالاستیک، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانطور که می‌دانیم خواص مکانیکی مواد ویسکوالاستیک نسبت به زمان متغیر است و از اینرو معادلات حاکم بر مواد الاستیک، برای مواد ویسکوالاستیک صادق نمی‌باشند. مواد ویسکوالاستیک دارای دو خاصیت مهم دمپینگ و فنریت می‌باشند. از اینرو معادلات تنش در آنها وابسته به کرنش و نرخ کرنش خواهد بود.

رابطه تنش و کرنش در مواد ویسکوالاستیک به صورتهای گوناگونی متناسب با رفتار ماده تعریف می‌گردد. یکی از دقیقترین روابط تنش و کرنش در حالت رفتار خطی مواد ویسکوالاستیک، اصل جمع حالات بولتزمن است [۱۱].

$$\sigma(t) = \int_0^t E(t - \xi) \frac{d\varepsilon}{d\xi} d\xi \quad (1)$$

$$\varepsilon(t) = \int_0^t D(t - \xi) \frac{d\sigma}{d\xi} d\xi \quad (2)$$

E نشان دهنده مدول رهاش و D نرمی خزش است. مدل ریاضی مدول رهاش و نرمی خزش به صورت سری پرونی قابل بیان می‌باشند [۱۱].

$$E(t) = \sum_{i=1}^n E_i \times \exp\left(\frac{-t}{\tau_i}\right) \quad (3)$$

$$D(t) = \sum_{i=1}^n D_i \times \left(1 - \exp\left(\frac{-t}{\eta_i}\right)\right) \quad (4)$$

$\tau$  و  $\eta$  نشان دهنده بازه‌های زمانی،  $E_i$  و  $D_i$  به ترتیب نشان دهنده مدول رهاش و نرمی خزش در بازه‌های زمانی مربوط می‌باشند. رفتار ماده ویسکوالاستیک در مقابل تحریک هارمونیک کرنش، باعث بوجود آمدن مدول دینامیکی  $E^*(\omega)$  می‌شود که شامل مدول ذخیره  $E_1(\omega)$  و مدول اتلاف  $E_2(\omega)$  است [۱۲].

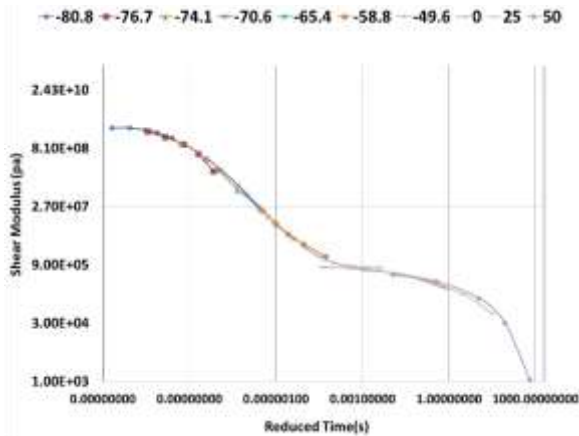
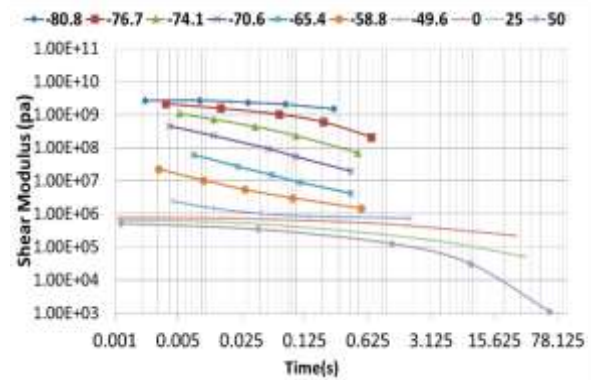
<sup>4</sup> Polyisobutylene

<sup>5</sup> Dynamic Mechanical Analysis

<sup>1</sup> Williams-Landel-Ferry Equation

<sup>2</sup> Master Curve

<sup>3</sup> Reduced Time

شکل (۲) منحنی اساسی رهایش برای دمای مرجع  $25^{\circ}\text{C}$ .

شکل (۱) نمودار مدول رهایش ذخیره بر حسب دما و زمان.

#### ۴- شبیه سازی عددی

به منظور شبیه سازی ارتعاش آزاد از نرم افزار اجزای محدود ABAQUS استفاده شده است. ورق کامپوزیت ساندویچی دارای دو پوسته خارجی لمینیت متشکل از دو نوع پارچه‌ی الیاف گرافیت و الیاف شیشه در کنار رزین اپوکسی در نظر گرفته شده است که مشخصات مکانیکی این پوسته‌ها با در نظر گرفتن الیاف تک جهته، در جدول (۲) نشان داده شده‌اند [۱۴].

مدل ورق کامپوزیت ساندویچی در شکل (۳)، شامل پوسته لمینیت بالایی با ۱۶ لایه که هر چهار لایه، تک جهته و دارای زاویه  $90^{\circ}/0^{\circ}/90^{\circ}$  نسبت به دستگاه مختصات اصلی می‌باشند. ۱۶ لایه پوسته پایینی لمینیت نیز مانند ۱۶ لایه پوسته بالایی لمینیت می‌باشند. هسته ورق از جنس فوم ویسکوالاستیک پلی ایزوپوتیلن است، که مشخصات مکانیکی آن به صورت منحنی اساسی رهایش در قسمت ۳ مشخص گردید.

پس از مدل سازی ورق، تماس مناسب بین ورق و محیط آب از یک سمت ورق برقرار می‌گردد و شرایط مرزی چهار طرف گیردار برای ورق در نظر گرفته می‌شود که می‌توان آن را در شکل (۴) مشاهده نمود.

جدول (۲) خواص مکانیکی لمینیت تک جهته.

material	$E_1$ (Gpa)	$E_2$	$G_{12}$	$G_{23}$	$\nu_{12}$	$\rho$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )
Glass/epoxy	۵۳/۷۸	۱۷/۹۳	۸/۹۶	۳/۴۵	۰/۲۵	۱۹۰۰
Graphite/epoxy (T300/976)	۱۵۰	۹	۷/۱	۲/۵	۰/۳	۱۶۰۰

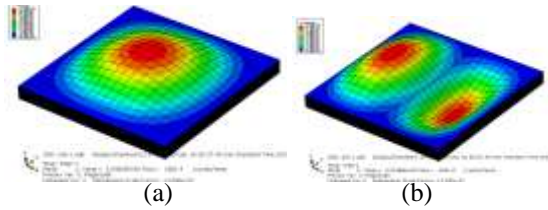
همان‌طور که در شکل (۱) مشاهده می‌گردد با افزایش دما در زمان مشخص، مقدار مدول رهایش کمتر خواهد شد. جهت انتقال منحنی‌های مدول رهایش در دمای ثابت و ترسیم منحنی اساسی رهایش بر حسب دمای مرجع مورد نظر ( $25^{\circ}\text{C}$ )، ضرایب انتقال به صورت مقادیر جدول (۱) بدست می‌آید.

با استفاده از مقادیر ضرایب انتقال موجود در جدول (۱) و منحنی‌های مدول رهایش در دمای ثابت موجود در شکل (۱)، منحنی اساسی رهایش برای دمای مرجع  $25^{\circ}\text{C}$  به صورت شکل (۲) قابل مشاهده است.

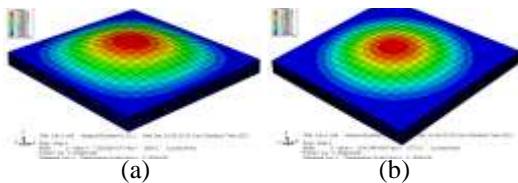
با در نظر گرفتن فرمول (۶) و دمای مرجع  $25^{\circ}\text{C}$ ، ضرایب ثابت  $C_1$  و  $C_2$  به ترتیب  $2/41$  و  $133/6$  محاسبه می‌گردند. در قسمت چهارم با در دست داشتن منحنی اساسی رهایش، می‌توان مدل ورق کامپوزیت ساندویچی با هسته فوم ویسکوالاستیک را در نرم افزار اجزای محدود شبیه سازی نمود.

جدول (۱) ضرایب انتقال جهت استخراج منحنی اساسی.

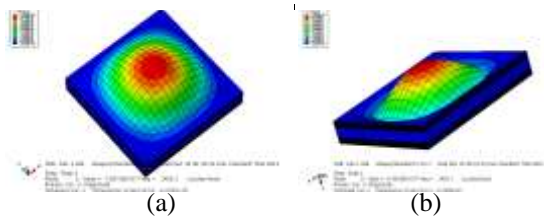
aT	log aT	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )
1000000000	9	-80/8
100000000	8	-76/7
10000000	7	-74/1
1000000	6	-70/6
100000	5	-65/4
10000	4	-58/8
398/1071706	2/6	-49/6
31/6227766	1/5	0
1	0	25
0/1	-1	50



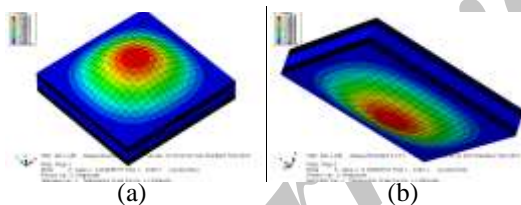
شکل (۵) مود اول (a) و دوم (b) دارای فرکانس  $۴۸۴۱/۸$ ,  $۲۵۸۱/۴$  دارای فرکانس  $۴۸۴۱/۸$ ,  $۲۵۸۱/۴$  برای ورق لمینیت کامپوزیت (Glass/epoxy) در تماس با محیط هوا.



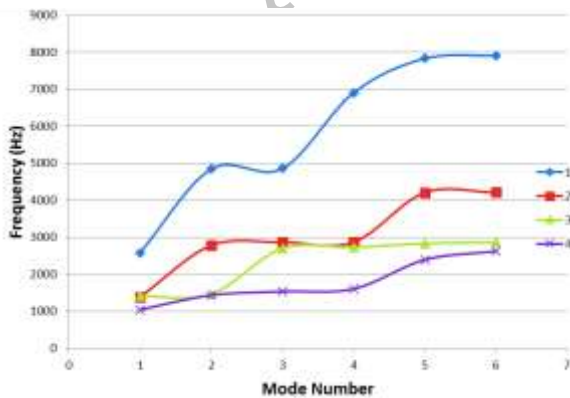
شکل (۶) مود اول (a) و دوم (b) دارای فرکانس  $۲۷۷۵/۶$ ,  $۱۳۸۰/۸$  دارای فرکانس  $۲۷۷۵/۶$ ,  $۱۳۸۰/۸$  برای ورق لمینیت کامپوزیت (Glass/epoxy) در تماس با محیط آب.



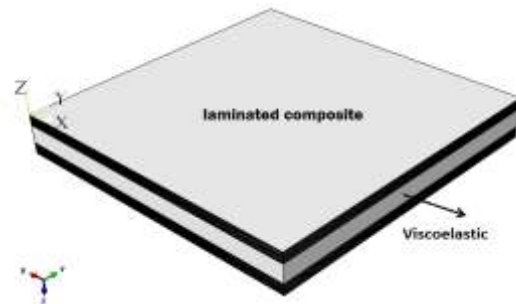
شکل (۷) مود اول (a) و دوم (b) دارای فرکانس  $۱۴۵۹/۱$ ,  $۱۴۰۶/۳$  دارای فرکانس  $۱۴۵۹/۱$ ,  $۱۴۰۶/۳$  برای ورق کامپوزیت ساندویچی (Glass/epoxy) در تماس با محیط هوا.



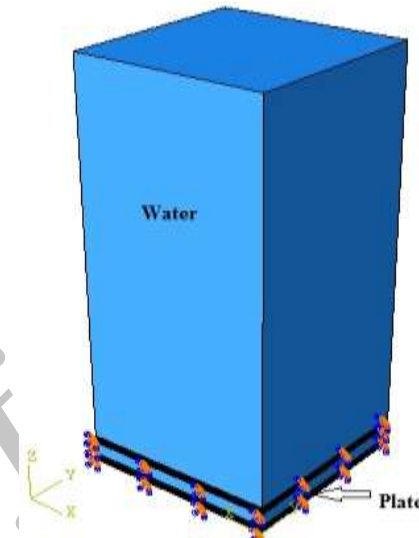
شکل (۸) مود اول (a) و دوم (b) دارای فرکانس  $۱۴۳۳/۱$ ,  $۱۰۲۹/۳$  دارای فرکانس  $۱۴۳۳/۱$ ,  $۱۰۲۹/۳$  برای ورق کامپوزیت ساندویچی (Glass/epoxy) در تماس با محیط آب.



شکل (۹) منحنی فرکانس‌های طبیعی بر حسب عدد مود برای لمینیت Glass/ epoxy.



شکل (۳) مدل ورق کامپوزیت ساندویچی.



شکل (۴) تماس ورق با حجم آب در محیط نرم افزار اجزای محدود.

نتایج شبیه سازی برای چهار حالت مورد بررسی قرار گرفته است که شامل آنالیز ارتعاش آزاد ورق کامپوزیت ساندویچی با هسته فوم ویسکوالاستیک و ورق لمینیت کامپوزیت برای دو حالت تماس با محیط آب و محیط هوا است.

ورق کامپوزیت ساندویچی به صورت مربع دارای طول و عرض  $۰/۲$  متر با ضخامت هسته فوم  $۰/۱۳$  متر و ضخامت  $۰/۰۸$  متر برای پوسته‌های بالا و پایین، است. محیط آب دارای طول و عرض  $۰/۲$  و ارتفاع  $۰/۴$  متر است. نوع المان‌های استفاده شده برای شبکه بندی مدل ورق کامپوزیت ساندویچی و محیط آب، Hex structured است. تعداد این شبکه‌ها برای محیط آب  $۲۰۰۰$ ، برای ورق لمینیت کامپوزیتی،  $۱۲۸۰۰$  و برای ورق کامپوزیت ساندویچی  $۱۳۲۰۰$  می باشد، که تعداد این شبکه‌ها به منظور رسیدن به پاسخی همگرا تعیین شده است [۱۵].

شکل (۹) منحنی‌های فرکانس طبیعی را برای چهار حالت شبیه سازی شده، نشان می‌دهد و در تمام این چهار حالت در این منحنی‌ها نوع الیاف و ماده زمینه Glass/ epoxy در نظر گرفته شده است.

جدول (۴) مقایسه فرکانس پایه نرم افزار و مرجع [۱۶].

	کمپوزیت ساندویچی		لمینیت کامپوزیت	
	مرجع [۱۶]	نرم افزار	مرجع [۱۶]	نرم افزار
Glass/ epoxy	۱۳۳۰/۵	۱۴۰۶/۳	۲۲۰۷/۹	۲۵۸۱/۴
Graphite/epoxy	۱۵۷۸/۲	۱۷۷۶/۶	۳۰۷۷	۳۳۰۷

فرکانس ورق کامپوزیت در تماس با آب در حدود ۵۰ الی ۷۰ درصد کمتر از فرکانس آن در حالت خشک است [۱۷] که این نسبت در نتایج بدست آمده توسط نرم افزار مشخص است.

##### ۵- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده در منحنی‌های شکل (۹) و (۱۰) نشان می‌دهد که فرکانس طبیعی ورق در تماس با محیط آب کمتر از فرکانس آن در محیط هوا است و می‌توان تأثیر پارامتر جرم افزوده و دمپینگ آب را در فرکانس طبیعی ورق مشاهده نمود. در مقایسه‌ای دیگر تأثیر هسته فوم ویسکوالاستیک در کاهش فرکانس طبیعی مشخص می‌گردد که با در نظر گرفتن این هسته می‌توان فرکانس طبیعی را به مقدار قابل توجهی کاهش داد. همانطور که در شکل (۹) و (۱۰) مشاهده می‌گردد، منحنی‌های فرکانس طبیعی ورق کامپوزیت ساندویچی با هسته فوم ویسکوالاستیک در محیط هوا در برخی عدد مودها نزدیک به منحنی فرکانس طبیعی ورق لمینیت کامپوزیت در تماس با محیط آب است، زیرا هر دو پارامتر آب و هسته فوم ویسکوالاستیک باعث کاهش فرکانس طبیعی ورق می‌گردند.

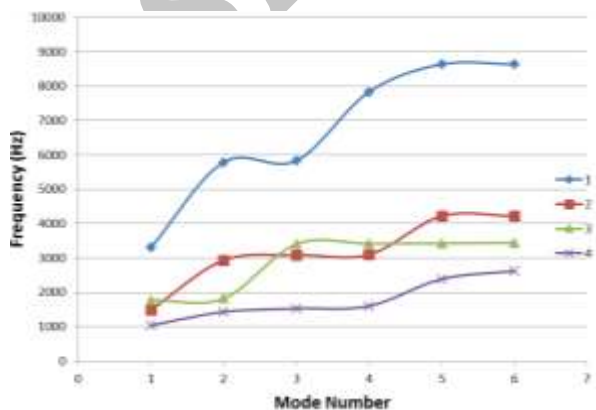
در شکل (۱۰) دو منحنی فرکانس طبیعی ورق لمینیت کامپوزیت در تماس با محیط آب و ورق کامپوزیت ساندویچی در محیط هوا دارای تداخل بیشتری نسبت به شکل (۹) می‌باشند و این بدان دلیل است که در حالت دوم از نوع الیاف گرافیت با مدول بیشتری نسبت به حالت اول استفاده شده است و می‌توان بیان نمود که تأثیر هسته فوم ویسکوالاستیک جهت دمپینگ ارتعاش آن‌ها نسبت به الیاف شیشه کمتر است. در انتها با توجه به نتایج بدست آمده در این مقاله، دو پارامتر اثر محیط سیال و خواص دمپینگ لایه‌های ویسکوالاستیک دارای نقش بسیار مهمی در رفتار ارتعاشی ورق‌ها می‌باشند و جهت بررسی ارتعاش آزاد و تعیین فرکانس‌های طبیعی ورق‌ها و پوسته‌های ساندویچی در تماس با سیال، می‌بایست تأثیر آن‌ها در نظر گرفته شوند.

##### ۶- مراجع

[1] Arikoglu, A., Ozkol I., "Vibration Analysis of Composite Sandwich Beams with Viscoelastic Core

منحنی‌ها از بالا به پایین به ترتیب برای ورق لمینیت کامپوزیت در تماس با محیط هوا (۱)، ورق لمینیت کامپوزیت در تماس با محیط آب (۲)، ورق کامپوزیت ساندویچی در محیط هوا (۳) و منحنی پایینی (۴) نشان دهنده ارتعاش آزاد ورق کامپوزیت ساندویچی در تماس با محیط آب می‌باشند. در شکل (۱۰) با تغییر در نوع الیاف، می‌توان فرکانس‌های طبیعی را برای چهار حالت مشاهده نمود (به ترتیب شکل (۹)).

در جدول (۳) می‌توان فرکانس‌های طبیعی ورق لمینیت کامپوزیت و ورق کامپوزیت ساندویچی، در محیط هوا و در تماس با محیط آب را مشاهده و مقایسه نمود. نتایج استخراج شده توسط نرم افزار برای فرکانس پایه ورق خشک، با نتایج مرجع [۱۶] در جدول (۴) مقایسه شده‌اند و صحت نتایج بدست آمده تأیید می‌گردد.



شکل (۱۰) منحنی فرکانس‌های طبیعی بر حسب عدد مود برای لمینیت Graphite/epoxy(T300/976).

جدول (۳) فرکانس طبیعی برای ۶ مود اول بر حسب هر تیز.

	Glass/ epoxy		Graphite/epoxy (T300/976)	
	کمپوزیت ساندویچی	کمپوزیت ساندویچی	کمپوزیت ساندویچی	کمپوزیت ساندویچی
فرکانس ورق در هوا	۲۵۸۱/۴	۱۴۰۶/۳	۳۳۰۷	۱۷۷۶/۶
	۴۸۴۱/۸	۱۴۵۹/۱	۵۷۹۱/۸	۱۸۲۴/۱
	۴۸۵۶/۶	۲۶۹۷/۸	۵۸۳۵/۷	۳۴۰۴/۸
	۶۹۰۴	۲۷۲۳/۹	۷۸۳۹/۵	۳۴۱۹/۶
	۷۸۲۹/۹	۲۸۳۱/۳	۸۶۴۲/۱	۳۴۲۸/۴
	۷۹۰۹/۶	۲۸۵۶/۲	۸۶۴۲/۳	۳۴۴۳/۱
فرکانس ورق در تماس با آب	۱۳۸۰/۸	۱۰۳۹/۳	۱۴۹۱/۴	۱۱۰۶
	۲۷۷۵/۶	۱۴۳۳/۱	۲۹۳۴	۱۸۰۰/۶
	۲۸۶۰/۵	۱۵۲۹/۷	۳۰۸۴/۴	۱۸۱۸/۱
	۲۸۶۶/۹	۱۶۰۱/۸	۳۱۰۰/۶	۱۸۲۷/۲
	۴۲۰۵/۶	۲۳۸۹/۶	۴۲۲۳/۴	۲۵۴۶/۹
	۴۲۰۵/۹	۲۶۲۲/۳	۴۲۲۴/۴	۲۸۵۶/۶

- Vibration Mode and Sound Radiation”, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.117, pp.162-173, 2016.
- [9] Kahya, V., Turan, M., “Finite Element Model for Vibration and Buckling of Functionally Graded Beams based on the First-Order Shear Deformation Theory”, Composites Part B: Engineering, Vol.109, pp.108-115, 2017.
- [10] Marynowski, K., “Free Vibration Analysis of an Axially Moving Multiscale Composite Plate Including Thermal Effect”, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.120, pp.62-69, 2017.
- [11] Christensen, R., “Theory of Viscoelasticity: an Introduction”, Elsevier, 2012.
- [12] Park, S. W., “Analytical Modeling of Viscoelastic Dampers for Structural and Vibration Control”, International Journal of Solids and Structures, Vol.38, pp.8065-8092, 2001.
- [13] Trobl, G. R., “The Physics of Polymers”, Chapter 5, 2<sup>nd</sup> Ed. Springer, NY, 1997.
- [14] Khorshid, K., Farhadi, S., “Free Vibration Analysis of a Laminated Composite Rectangular Plate in Contact with a Bounded Fluid”, Composite Structures, Vol.104, pp.176-186, 2013.
- [15] Abaqus 6.13 software Documentation.
- [16] Atteshamuddin S. Sayyad, Yuwaraj M. Ghugal. “On the Free Vibration Analysis of Laminated Composite and Sandwich Plates: A Review of Recent Literature with Some Numerical Results”, Composite Structures, Vol.129, pp.177-201, 2015.
- [17] Matthew, R., Kramer, Zhanke, Liu, Yin, L. Young, “Free Vibration of Cantilevered Composite Plates in Air and in Water”, Composite Structures, Vol.95, pp.254-263, 2013.
- by Using Differential Transform Method”, Journal of Composite Structures, Vol.92, pp.3031-3039, 2010.
- [2] Matthew, R., Kramer et al., “Free Vibration of Cantilevered Composite Plates in Air and in Water”, Journal of Composite Structures, Vol.95, pp.254-263, 2013.
- [3] Phan, C. N., “Finite Amplitude Vibrations of Cantilevers of Rectangular Cross Sections in Viscous Fluids”, Journal of Fluids and Structures. Vol.40, pp.52-69, 2013.
- [4] Mahmoudkhani, S. et al., “The Effects of Nonlinearities on the Vibration of Viscoelastic Sandwich Plates”, International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol.62, pp.41-57, 2014.
- [5] Zhang, L. W. et al., “Free Vibration Analysis of Functionally Graded Carbon Nanotube-reinforced Composite Triangular Plates Using the FSDT and Element-Free IMLS-Ritz Method”, Journal of Composite Structures Available, Vol.120, pp.189-199, 2014.
- [6] Zghal, S. et al., “Model Reduction Methods for Viscoelastic Sandwich Structures in Frequency and Time Domains”, Journal of Finite Elements in Analysis and Design, Vol.93, pp.12-29, 2015.
- [7] C. Yang, G. Jin, X. Ye, Z. Liu. “A Modified Fourier-Ritz Solution for Vibration and Damping Analysis of Sandwich Plates with Viscoelastic and Functionally Graded Materials”, International Journal of Mechanical Sciences, Vol.106, pp.1-18, 2016.
- [8] Lee, S. K., Kim M. W., Park, C. J., Chol, M. J., Kim, G., Cho, J. M., Choi, C. H., “Effect of Fiber Orientation on Acoustic and Vibration Response of a Carbon Fiber/Epoxy Composite Plate, Natural