

مطالعه‌ی رفتار مکانیکی زمانمند کششی فشاری و برشی فوم پی‌وی‌سی با کاربردهای دریایی

محمد رضایی سنگتابی^۱، حامد مرادی^۲، مهدی سعید کیاست^۳

^۱دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ rezai_sangtabi@aut.ac.ir

^۲دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ hamed.moradi@aut.ac.ir

^۳عضو هیئت علمی، دانشکده مهندسی دریا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ kiasat@aut.ac.ir

چکیده

با توجه به کاربردهای فراوان فوم‌های پی‌وی‌سی در ساخت پانل‌های ساندویچی بدنه شناورها، مطالعه رفتار مکانیکی زمانمند این مواد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. با مطالعه رفتار مکانیکی زمانمند فوم، می‌توان رفتار مکانیکی پانل ساندویچ را از نظر میرایی و جذب انرژی پیش بینی نمود. در این مقاله با طراحی و انجام تست‌های دینامیکی بر روی فوم ایرکس C70.75 رفتار مکانیکی زمانمند این فوم مورد مطالعه قرار گرفته است. در تست‌های دینامیکی، ماده فوم تحت بارگذاری‌هایی از نوع کششی، فشاری و برشی بصورت هارمونیک در فرکانسهای مشخص و از پیش تعریف شده قرار داده شد و این بارگذاری‌ها در چند دمای مختلف تکرار گردیدند. بدین ترتیب خواص دینامیکی فوم اعم از مدول ذخیره و مدول اتلاف برای هریک از سه نوع بارگذاری در دامنه فرکانس بدست آورده شد. با استفاده از تئوری جمع آثار دما - زمان مدول‌های بدست آمده در دماهای مختلف، برای بدست آوردن منحنی‌های کامل مدول رهايش کششی، مدول رهايش فشاری و مدول رهايش برشی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که ماده فوم تا حد زیادی تئوری جمع آثار دما - زمان را تبعیت می‌نماید. همچنین تفاوت قابل توجه میان مدول رهايش کششی و مدول رهايش فشاری فوم مشاهده گردید.

کلمات کلیدی: رفتار مکانیکی زمانمند، فوم پی وی سی، تست دینامیک، مدول ذخیره، مدول رهايش

مقدمه

امروزه استفاده از فوم‌های پی وی سی به عنوان هسته پانل‌های ساندویچی با توجه به خواص متنوع آنها بسیار رواج یافته است. این نوع فوم‌ها با داشتن طیف وسیعی از دانسیته (۴۰-۲۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب) کاربردهای فراوانی را در صنایع مختلف از جمله صنایع دریایی دارا می‌باشد. استفاده از پانل‌های ساندویچی در ساخت بدنه شناورهای مختلف با توجه به مزیت کاهش وزن امروزه مدنظر طراحان شناورها قرار دارد مخصوصاً در شناورهای تندرو که کاهش وزن تاثیر به سزایی در افزایش سرعت شناورها دارد. همچنین در بدنه شناورهای مین شکار به دلیل نیاز به غیرمغناطیس بودن جنس بدنه و مقاومت بالای آن استفاده از پانل‌های ساندویچی امروزه بسیار مدنظر قرار گرفته است. بنابراین استفاده از فوم‌های پی وی سی در ساخت بدنه شناورها از کاربردهای مختلفی برخوردار است که این کاربردها بسته به بخش‌های مختلفی از شناور و بارهای وارد بر آن از دانسیته‌های مختلف این فوم‌ها استفاده می‌شود. به طور مثال در کف شناورهای طولی از دانسیته‌های بالا استفاده می‌شود. شناورهای دریایی با توجه به ماهیت عملکردی خود در معرض بارهای مختلف استاتیکی و دینامیکی قرار دارند. از جمله بارهای وارد بر سازه شناورهای تندرو که بیشترین کاربرد پانل‌های ساندویچی را دارند می‌توان به بار کوبش کف اشاره کرد که این نوع بارگذاری در بازه زمانی کوتاه اتفاق می‌افتد و برای تحلیل دقیق پانل‌های ساندویچی تحت بارهای زمان مند مختلف از جمله کوبش کف و یا بار ناشی از انفجار زیر آب شناسایی رفتار زمانمند مواد مورد استفاده در ساخت بدنه شناورها بسیار مفید می‌باشد. بنابراین در این مقاله سعی شده رفتار زمانمند فوم‌های پی وی سی مورد مطالعه قرار گیرند که یکی از مواد تشکیل دهنده سازه شناورها مخصوصاً شناورهای تندرو و یا مین شکارها هستند. با توجه به اینکه پانل‌های ساندویچی استفاده شده در بدنه شناورها تحت بارگذاری‌های یاد شده تحت خمش زمانمند واقع می‌شوند بررسی تاریخچه مطالعات انجام شده در این زمینه در ادامه صورت پذیرفته است.

رفتار خستگی فوم‌های پی‌وی‌سی تحت بارگذاری خمشی بررسی شده است. در این مطالعه خواص ویسکوالاستیک فوم پی‌وی‌سی توسط آزمایش‌های DMA و در گستره فرکانسی 1-10 هرتز اندازه‌گیری شده‌اند [1]. رفتار تیر ساندویچ کامپوزیتی با پوسته‌های FRP و هسته فوم تحت بارگذاری‌های ارتعاشی و کماتش بررسی شده‌است که رفتار هسته به صورت ویسکوالاستیک در نظر گرفته شده‌است. در این مطالعه خواص ویسکوالاستیک هسته اندازه‌گیری شده است [2]. رفتار زمانمند تیر ساندویچ کامپوزیتی با هسته فوم پلیمری مورد بررسی قرار داده شده است. در این مطالعه، هسته فوم تحت بارگذاری خمشی خزش قرار داده شده و خواص ویسکو الاستیک آن اندازه‌گیری شده است [3].

بررسی‌هایی نیز بر روی رفتار خمشی زمانمند تیر ساندویچ کامپوزیتی انجام شده است. این بررسی‌ها شامل روش‌های تجربی، تحلیلی و عددی می‌باشند. اولین تحلیل اجزاء محدود بر روی نمونه‌های تیر و ورق ساندویچی توسط خاتوا ارائه شده است [4]. مدلی تحلیلی برای رفتار خمشی زمانمند تیر ساندویچ کامپوزیتی با هسته فوم پلیمری ارائه شده است. در این مطالعه، نمونه‌های تیر ساندویچی تحت بارگذاری خمش سه نقطه‌ای قرار گرفته‌اند. همچنین یک مدل بر اساس رفتار ویسکوالاستیک خطی برای تعیین مقدار خیز تیر ارائه شده که در مقایسه با بررسی تجربی، نتایج قابل قبولی به دست آمده است [5]. پاسخ الاستیک ورق کامپوزیتی ساخته شده از رزین پلیمری تقویت شده با الیاف، مورد بررسی قرار گرفته است. در این بررسی از تئوری تغییرشکل برشی مرتبه اول استفاده شده است. همچنین برای در نظر گرفتن تاثیر پارامتر زمانی t ، از روش عددی استفاده شده است [6].

یک روش استاتیک و شبه استاتیک برای تحلیل رفتار ویسکو الاستیک یک ورق ساندویچ کامپوزیتی ارائه شده است. در این تحلیل یک تیر ساندویچی با شرایط تکیه گاهی ساده، تحت بارگذاری های خمشی و برشی قرار گرفته است همچنین یک حل کلاسیک برای تحلیل تیر استفاده شده است [7]. رفتار یک تیر ساندویچ کامپوزیتی با هسته همگن و پوسته هایی که لایه لایه شدگی اولیه در آن ها وجود دارد، تحت بارگذاری دینامیکی قرار گرفته اند. در این مطالعه، همچنین هدف فرموله کردن مدل های تئوری جهت توضیح دادن تغییرشکل و اثر متقابل مکانیزم های خرابی برای لایه لایه شدن پوسته ها و هسته در ساندویچ های کامپوزیتی در معرض بارهای دینامیکی خارج صفحه ای است [8]. رفتار خمشی یک تیر ساندویچ کامپوزیتی به روش خمش ۴ نقطه ای آزمایش شد. نمونه در ابتدا یک رفتار الاستیک خطی و سپس یک رفتار الاستوپلاستیک از خود نشان داد. از تحلیل اجزاء محدود نیز برای تحلیل رفتار خمشی سازه استفاده شد. از این تحلیل دریافت شد که گذر از رفتار خطی الاستیک به رفتار غیر خطی الاستوپلاستیک نتیجه‌ی تنش فشاری ایجاد شده در هسته که در معرض فرورفتگی^۱ در تیر بوده است، بوده است. این موضوع هم چنین باعث زوال نخستین در هسته می شود. یک جابجایی در محور ثقل تیر به سمت هسته‌ی تحت کشش نیز مشاهده شد. سازه (ساختار) های ساندویچی ساخته شده از هسته‌های فومی پی‌وی‌سی و پی‌ام‌آی نیز برای مقایسه تحلیل شد. بعلاوه یک مطالعه‌ی پارامتری بر روی اثر دانسیته‌ی سطحی و زاویه‌ی پلای پوسته‌ی الیافی و ضخامت هسته‌ی نیز با استفاده از روش اجزاء محدود انجام شد.

مطالعه‌ی پارامتری آشکار کرد که گذر از رفتار خطی به رفتار غیر خطی از فرآیند های مختلف با تغییر در پارامترهای ذکر شده ایجاد شد [9]. در این مطالعه، پاسخ زمانمند ساندویچ های کامپوزیتی هوشمند که از پوسته های از الیاف شیشه^۲، هسته‌ی فوم پلی ارتان و PZT قرار داده شده در پوسته ها ساخته شده اند، مورد بررسی قرار گرفته اند. از PZT برای بررسی طول عمر عملکرد ساندویچ های کامپوزیتی استفاده شده است. از یک مدل چند مقیاسی برای ایجاد مدلی کامل از همه‌ی اجزای سازه‌ی کامپوزیتی استفاده شده است. آزمایش های شبه استاتیک و خزش برای حجمی از رزین اپوکسی، GFRP، هسته‌ی پلی ارتان و نمونه های ساندویچی تحت خمش و کشش تک محوره، انجام شده اند. آزمایش ها در دمای اتاق و دمای ۸۰ درجه‌ی سانتی گراد انجام شده اند. داده های تجربی برای خواص مواد و مقایسه استفاده شده اند. مدل چند مقیاسی برای تشخیص اثر اجزاء مختلف بر رفتار زمانمند سازه‌ی ساندویچی و بررسی امکان استفاده از PZT برای تعیین عمر عملکرد سازه‌ی ساندویچی، استفاده شده است [3].

تست های آزمایشگاهی

جهت مطالعه رفتار خمشی زمانمند لامینیت های ساندویچی نیاز به تعیین خواص زمانمند مواد بکار رفته در این پانل ها می باشد. در این تحقیق پانل های ساندویچی از لامینیت های کربن/اپوکسی و هسته فوم پی وی سی ساخته شده است. بنابراین بیشترین رفتار زمان مند در این پانل ها در خواص زمانمند فوم می باشد و رفتار زمانمند لامینیت های کامپوزیتی کربن/اپوکسی در مقایسه با رفتار زمانمند فوم پی وی سی قابل صرف نظر کردن می باشد. فوم بکار گرفته شده در این تحقیق از نوع Airex C70.75 می باشد. علت انتخاب این فوم کاربرد فراوان آن در ساخت بدنه شناورهای کامپوزیتی ساندویچی می باشد. دانسیته و ضخامت این فوم به گونه ای انتخاب شده است که در عرشه شناورهای نسبتا بزرگ و در کناره های شناورهای کوچک کاربرد دارد. خواص مکانیکی الاستیک این فوم استخراج شده از مستندات شرکت سازنده در جدول ۱ ارائه شده است.

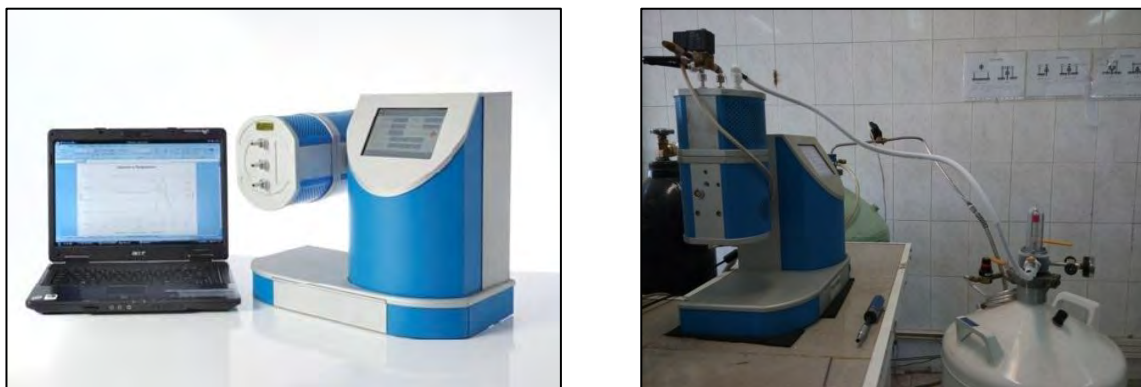
جدول ۱: خواص الاستیک فوم Airex C70.75

ضخامت (mm)	دانسیته (kg/m ³)	مدول کششی (MPa)	مدول فشاری (MPa)	مدول برشی (MPa)
۱۵	۸۰	۶۶	۱۰۴	۳۰

¹ Indentation

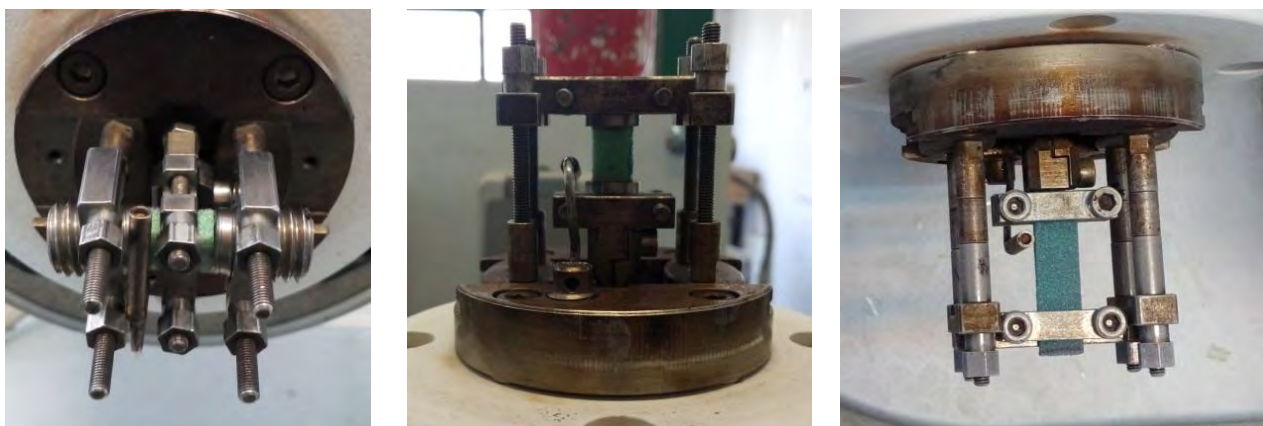
² GFRP

جهت اندازه گیری رفتار زمانمند فوم یک سری آزمایش دینامیکی طرح ریزی شده است. انجام این آزمایش های دینامیکی، به وسیله دستگاه تست Triton Technology صورت پذیرفته که می توان در شکل ۱ مشاهده نمود. این دستگاه قابلیت انجام آزمایش های کششی، فشاری و برشی را دارد که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از یک مخزن نیتروژن مایع جهت ایجاد دماهای پایین و یک هیتر جهت ایجاد دماهای بالا استفاده می شود.



شکل ۱: نمایی از دستگاه تست DMA به همراه مخزن نیتروژن مایع برای ایجاد دمای پایین

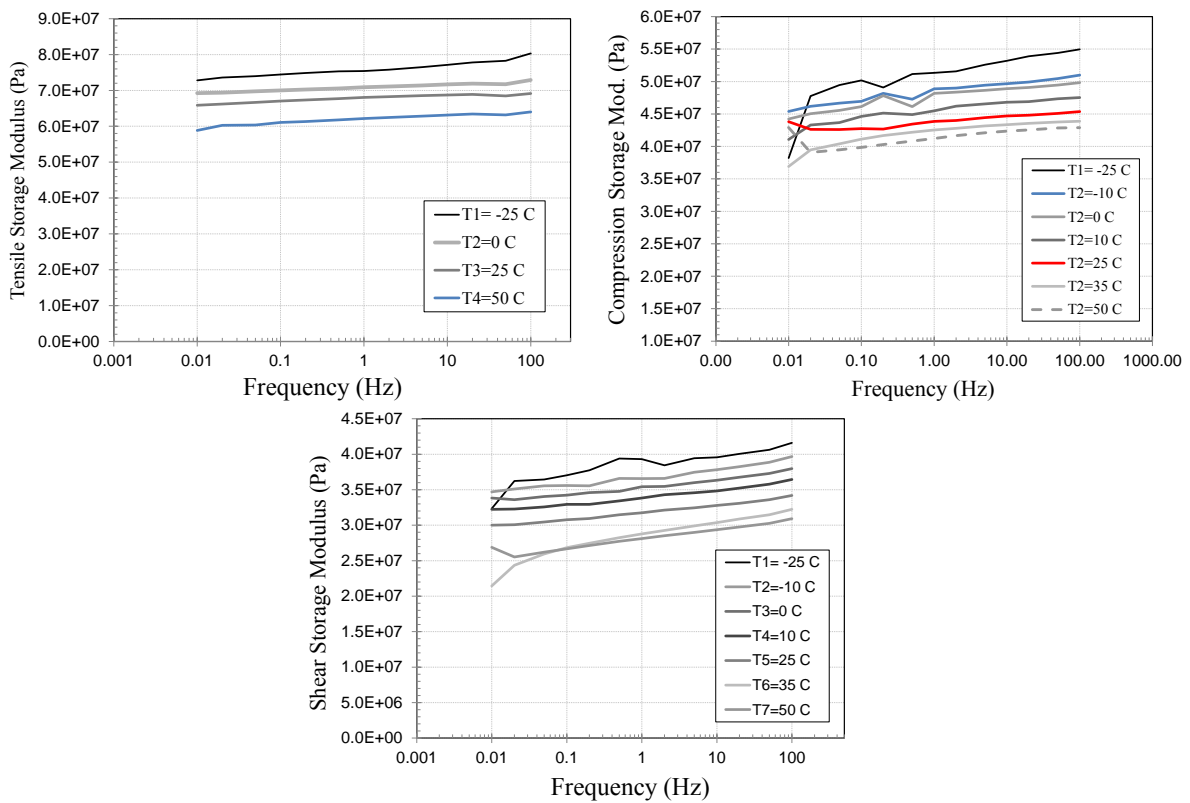
شکل ۲ نمونه های تهیه شده جهت آزمایش های دینامیکی کششی، فشاری و برشی نصب شده بر روی قیدهای مربوطه بر روی دستگاه نمایش داده شده است. ابعاد نمونه های ساخته شده کششی، فشاری و برشی به ترتیب $27.5 \times 7.4 \times 2 \text{ mm}$ ، $7.3 \times 6.3 \times 9.8 \text{ mm}$ و $7.05 \times 6.5 \times 2.25 \text{ mm}$ بوده است. در انجام این آزمایشات محدوده فرکانسی به صورت ۱۳ فرکانس ثابت 0.01, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, همچنین آزمایش برای حالت کشش در چهار دمای $-25, 0, 25, 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ولی برای حالت های فشار و برش در هفت دمای $-25, -10, 0, 10, 25, 35, 50 \text{ }^\circ\text{C}$ انجام شده است.



شکل ۲: نمونه های آزمایش در قیدهای دستگاه DMA، کشش (راست)، فشار (وسط)، برش (چپ)

نتایج حاصل از آزمایش ها، دیگرام مدول بر حسب فرکانس در دماهای مختلف می باشد که در شکل ۳ قابل مشاهده می باشد. حال با توجه به تئوری جمع آثار دما - زمان، دمای 25°C به عنوان دمای مبنا در نظر گرفته شده و مقادیر مربوط به مدول دماهای مختلف انتقال افقی داده شده تا بتوان منحنی کامل^۳ مربوط به مدول این ماده در حوزه فرکانس را بدست آورد.

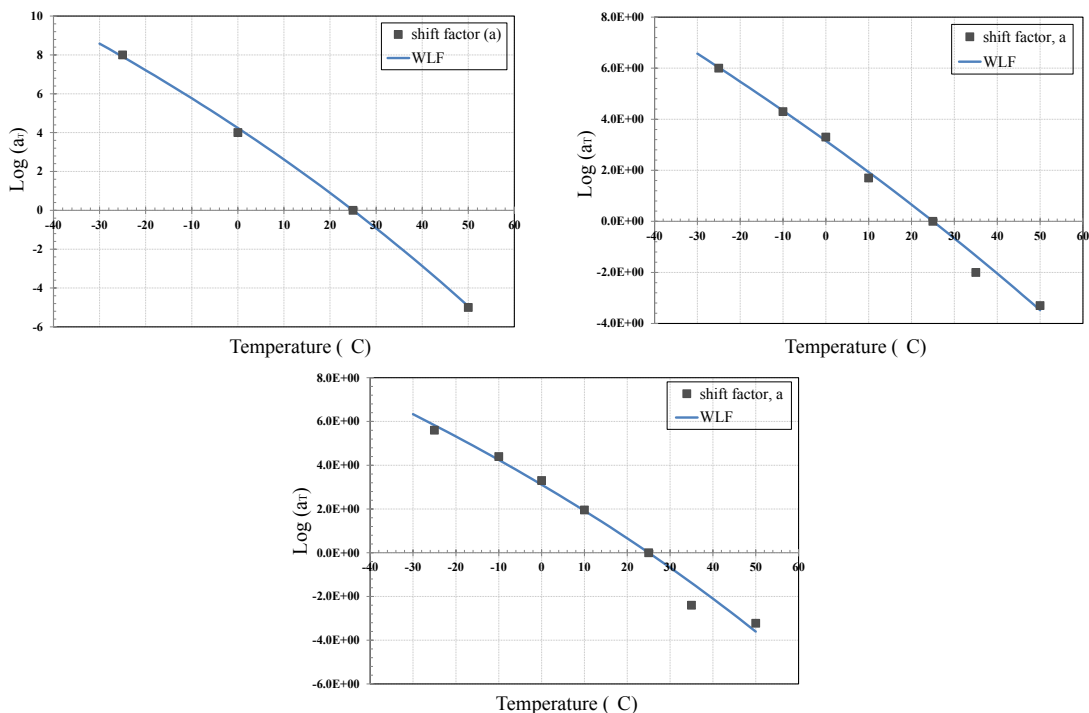
³ Master Curve



شکل ۳: نتایج مدول بر حسب فرکانس در دماهای مختلف، مدول کششی (بالا، چپ)، مدول فشاری (بالا، راست)، مدول برشی (پایین)

حال با توجه به میزان جابجایی افقی دیاگرام های دماهای بالاتر به سمت چپ و میزان جابجایی افقی دیاگرام های دماهای پایین تر به سمت راست می توان میزان تابع جابجایی را بدست آورد. این میزان تابع جابجایی به کمک رابطه WLF تقریب زده می شود. تابع WLF در رابطه ۱ نمایش داده شده است. در شکل ۴ می توان میزان نقاط تابع جابجایی را به همراه تقریب WLF مشاهده نمود. ضرایب ثابت C_1 و C_2 را برای تابع جابجایی در هر یک از مدول های کششی و فشاری و برشی در جدول ۲ نمایش داده شده است.

$$\text{Log}(a_T) = \frac{-C_1(T-T_0)}{C_2+(T-T_0)} \quad (1)$$



شکل ۴: تابع جابجایی به همراه تقریب WLF، مدول کششی (بالا، چپ)، مدول فشاری (بالا، راست)، مدول برشی (پایین)

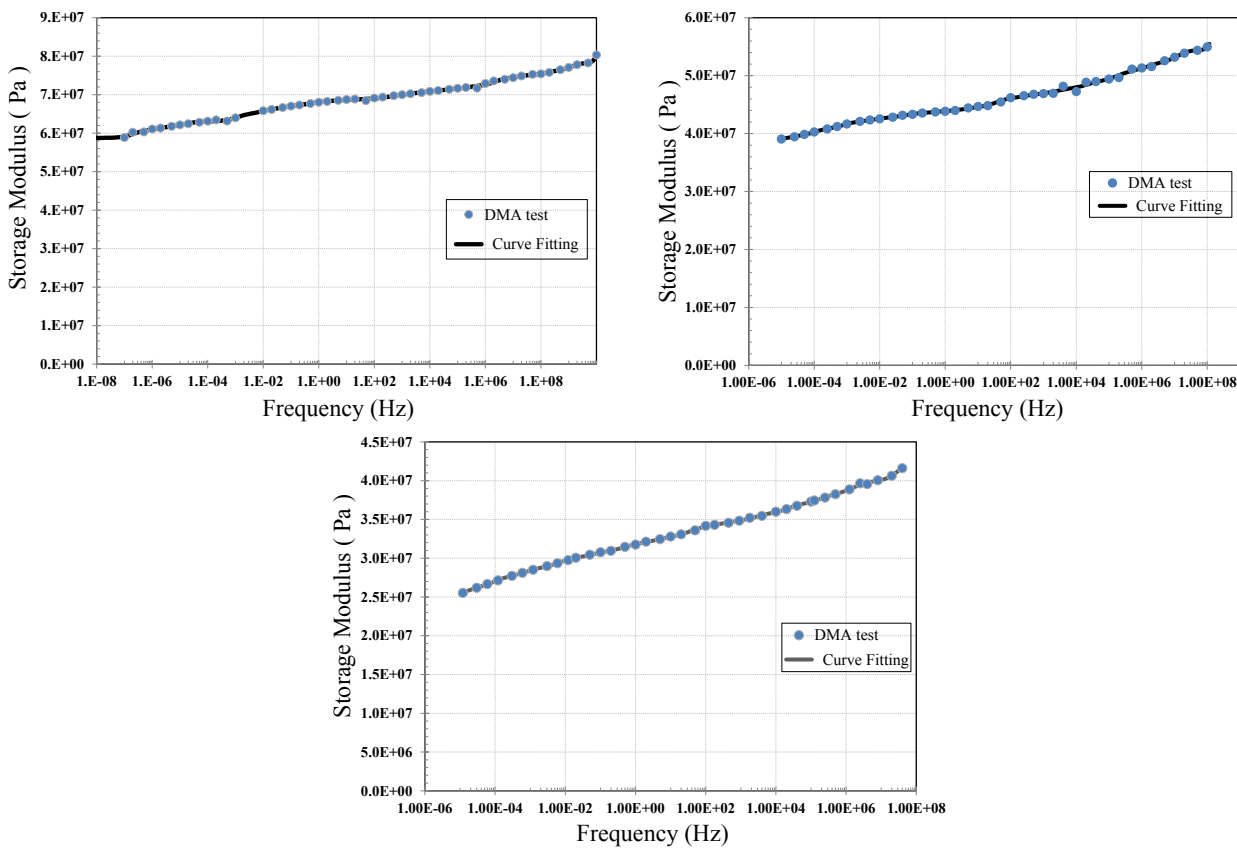
جدول ۲: ضرایب ثابت C_1 و C_2 برای تابع جابجایی مدول های مختلف

ضرایب تابع جابجایی مدول برشی		ضرایب تابع جابجایی مدول فشاری		ضرایب تابع جابجایی مدول کششی	
C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2
-۴۵/۷۳	-۳۴۲/۲۳	-۶۷/۸۷	-۵۱۳/۱۸	-۵۹/۳۸	-۳۲۵/۴

حال پس از اینکه از جابجایی افقی دیاگرام های دماهای مختلف، مسترکرو مربوط به مدول های کششی، فشاری و برشی بدست آمده باید این دیاگرام را با رابطه ۲ تقریب زد. مسترکرو حاصل از جابجایی مدول ها به همراه تابع تقریب آنها در شکل ۵ نمایش داده شده است.

$$E'(w) = \sum_{i=1}^n \frac{E_i w^2 \tau_i^2}{1 + w^2 \tau_i^2} \quad (2)$$

ثابت های مربوط به تقریب مسترکرو مدول فو پی وی سی در جدول ۳ آورده شده است. در این جدول ثابت زمانی τ_i برای مدول کششی دارای ۲۰ ترم بوده و ثابت زمانی مدل های فشاری و برشی ۱۶ ترم دارد.



شکل ۵: مسترکرو مدول در حوزه فرکانس، مدول کششی(بالا،چپ) ، مدول فشاری(بالا،راست) ، مدول برشی(پایین)

با توجه به رابطه انتگرالی بولتزمن می توان رابطه بین مدول ذخیره شده و مدول زمانی به صورت زیر بیان نمود:

$$E'(w) = \int_0^{\infty} w E(\varphi) \sin w\varphi d\varphi \quad (3)$$

حال اگر تابع سری پرونی را به جای $E(\varphi)$ جایگذاری نماییم داریم :

$$E(\varphi) = \sum_{i=1}^n E_i \text{EXP}\left(\frac{-\varphi}{\tau_i}\right) \quad (4)$$

$$E'(w) = w \sum_{i=1}^n E_i \int_0^{\infty} \text{EXP}\left(\frac{-\varphi}{\tau_i}\right) \sin w\varphi d\varphi \quad (5)$$

$$E'(w) = \sum_{i=1}^n w E_i \times \frac{w}{\left(\frac{1}{\tau_i}\right)^2 + w^2} \quad (6)$$

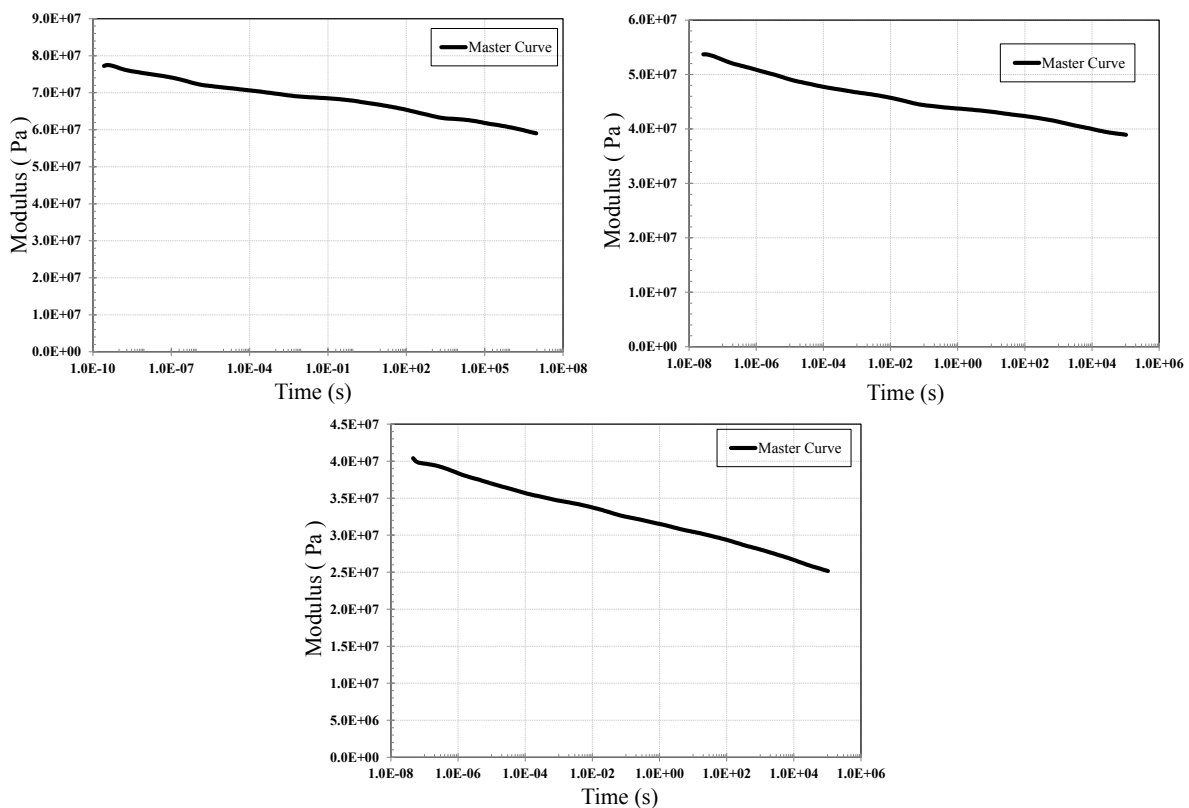
بنابر این با قرار دادن تابع پرونی نتیجه انتگرال گیری به صورت معادله زیر خواهد بود :

$$E'(w) = \sum_{i=1}^n \frac{E_i w^2 \tau_i^2}{1 + w^2 \tau_i^2} \quad (7)$$

همان طور که از معادلات مشاهده می شود، اگر نتایج حاصل از مسترکرو مدول در حوزه فرکانس را با تابع ۱ تقریب زده شود نتیجه بدست آمده برای ثابت های این معادله برابر با ثابت های سری پرونی برای مدول این ماده در حوزه زمانی خواهد بود. بنابراین با رسم تابع سری پرونی با ثابت های جدول ۳ می توان مدول های زمانمند فوم پی وی سی را بدست آورد. این مدول های زمانمند در شکل ۶ نمایش داده شده است.

جدول ۳: ضرایب ثابت پرونی برای مدول های ویسکوالاستیک

ردیف	ثابت زمانی (s)	ثابت کششی (N/mm ³)	ثابت زمانی (s)	ثابت فشاری (N/mm ³)	ثابت برشی (N/mm ³)
۱	1.00E-11	8.17E+08	1.00E-09	2.81E+08	-7.81E+09
۲	8.50E-11	-1.54E+07	8.50E-09	-6.15E+06	1.37E+08
۳	7.23E-10	2.50E+06	7.23E-08	2.46E+06	-6.78E+04
۴	6.14E-09	1.04E+06	6.14E-07	1.39E+06	1.67E+06
۵	5.22E-08	755116.4	5.22E-06	1.83E+06	1.22E+06
۶	4.44E-07	2.13E+06	4.44E-05	1.27E+06	1.26E+06
۷	3.77E-06	749364.2	3.77E-04	957238.66	984269.6
۸	3.21E-05	695621.5	3.21E-03	654503.07	636519.3
۹	2.72E-04	744712.2	2.72E-02	1.66E+06	1.39E+06
۱۰	2.32E-03	1.07E+06	2.32E-01	6.36E+05	7.95E+05
۱۱	1.97E-02	346668.8	1.97E+00	370950.02	1086790
۱۲	1.67E-01	337418	1.67E+01	7.84E+05	8.06E+05
۱۳	1.42E+00	972761.5	1.42E+02	6.20E+05	1.26E+06
۱۴	1.21E+01	957202	1.21E+03	1.25E+06	1.11E+06
۱۵	1.03E+02	1.36E+06	1.03E+04	1.33E+06	1.46E+06
61	8.74E+02	1.97E+06	8.72E+04	9.49E+05	1.63E+06
61	7.43E+03	90754.04	∞	3.86E+07	2.47E+07
61	6.31E+04	1.26E+06	-	-	-
61	5.36E+05	876001.7	-	-	-
02	4.56E+06	2.12E+06	-	-	-
06	∞	5.88E+07	-	-	-



شکل ۶: مسترکرو مدول در حوزه زمان، مدول کششی (بالا،چپ)، مدول فشاری (بالا،راست)، مدول برشی (پایین)

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله به کمک انجام تست‌های دینامیکی کششی، فشاری و برشی رفتار مکانیکی زمانمند فوم پی وی سی از نوع ایرکس C70.75 مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین ترتیب خواص دینامیکی فوم یعنی مدول ذخیره برای هر یک از سه نوع بارگذاری در دامنه فرکانس بدست آورده شد. با استفاده از تئوری جمع آثار دما - زمان مدول‌های بدست آمده در دماهای مختلف، برای بدست آوردن منحنی‌های کامل مدول رهایش کششی، مدول رهایش فشاری و مدول رهایش برشی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج بدست آمده از اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهند که ماده فوم تا حد زیادی تئوری جمع آثار دما - زمان را تبعیت می‌نماید. جابجایی‌های افقی نتایج بدست آمده از تست در حوزه فرکانس به کمک رابطه WLF تقریب زده شده است که این امر بیانگر این است که این تابع برای تقریب رفتار فوم‌های پی وی سی مناسب می‌باشد. از طرف دیگر تفاوت قابل توجه میان مدول رهایش کششی و مدول رهایش فشاری فوم مشاهده گردید. همچنین از نتایج بدست آمده می‌توان میزان رهایش مدول کششی و فشاری و برشی را به ترتیب ۲۳ و ۲۶ و ۳۸ درصد دانست که این میزان رهایش در بازه زمانی معادل $1e-8$ تا $1e+5$ ثانیه اتفاق می‌افتد.

مراجع

- [1] Krishnan Kanny, Hassan Mahfuz, Leif A. Carlsson, Tonia Tomas, "Dynamic Mechanical Analysis and Flexural fatigue of PVC foams", Composite Structures, pp 175-183, 2002.
- [2] Pradeep V, Ganesan N, Bhaskar K., "Vibration and thermal buckling of composite sandwich beams with viscoelastic core", Compos Struct, 2007.
- [3] JS. Kim, L. Arronche, A. Farrugia, A. Muliana, "Multi-scale modeling of time-dependent response of smart sandwich constructions", Composite Structures, pp2196-2207, 2011.
- [4] T. P. Khatua, Y. K. Cheung, "bending and vibration of multilayer sandwich beams and plates", International Journal for Numerical Methods in Engineering, pp 11-24, 1973.
- [5] Huang JS, Gibson LJ., "Creep of sandwich beams with polymer foam cores", J Mater Civil Eng; pp171-82, 1990.
- [6] Alam MNM, Zenkour AM, El-Mckawy HF, :Bending response of inhomogeneous fiber-reinforced viscoelastic sandwich plates:, Acta Mech, pp 231-248, 2010.
- [7] Kim CG, Hong CS, "Viscoelastic sandwich plates with cross-ply faces", ASCE J Struct Eng, pp 150-164, 1998.
- [8] R. Massabo, A. Cavicchi, "Interaction effects of multiple damage mechanism in composite sandwich beam subject to time dependent loading", International Journal of Solids and Structures, pp 720-738, 2011.
- [9] S. S. Kumar, M. Milwich, B.L. Deopura, H. Plank, "Finite Element Analysis of Carbon composite Material with agglomerated Cork Core", Procedia Engineering, pp 478-483, 2011.