

بارگذاری همزمان و نظارت ساختاری بر دکل سکان الیاف کربن:

نتایج تجربی حاصل از آزمون کششی شبه استاتیک

چکیده

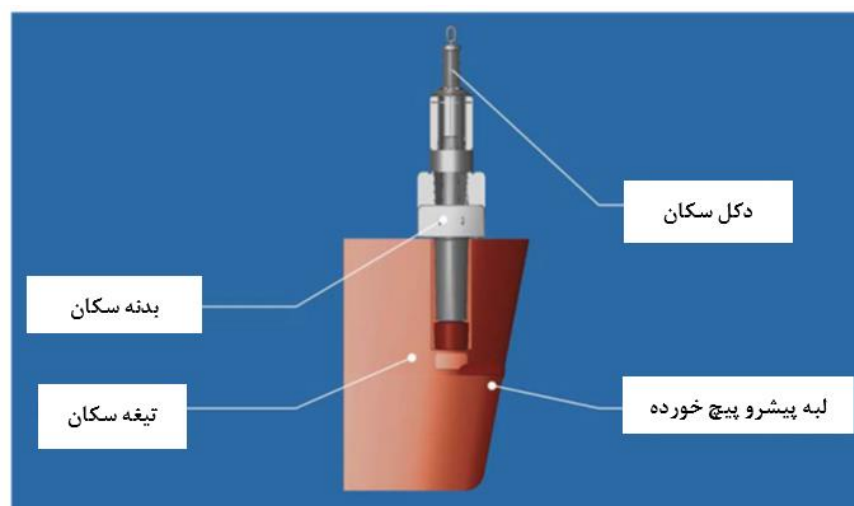
پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف کربن به دلیل استحکام بالا و رفتار خستگی عالیشان، در سازه‌های دریایی سبک مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله، یک روش نوآورانه برای بارگذاری همزمان و نظارت ساختاری بر یک دکل سکان پلاستیکی تقویت شده با الیاف کربن را به عنوان بخشی از یک کشتی بزرگ تجاری ارائه خواهیم کرد. نتایج تجربی در اینجا از یک آزمون کششی شبه استاتیک ارائه شده است که در آن نظارت بر بار با استفاده از سنسورهای کرنشی تعبیه شده انجام می‌شود. نظارت ساختاری، مبتنی بر طیف‌سنجی امپدانس الکترومکانیکی فرکانس بالا همراه با پردازش سیگنال اختصاصی و مبدل‌های پیزوالکتریک نصب شده در سطح است. ما به نتایج زیر رسیده‌ایم: (1) نمایش سیستم نظارت ترکیبی شامل بار و نظارت ساختاری، (2) جاسازی موفقیت‌آمیز کرنش‌سنج‌ها در طول تولید کامپوزیت دکل سکان پلاستیکی تقویت شده با الیاف کربن، (3) توسعه سخت افزار ابزار دقیق برای اندازه‌گیری امپدانس الکترومکانیکی چند کاناله، و (4) تشخیص موفقیت‌آمیز آسیب با استفاده از طیف‌سنجی امپدانس الکترومکانیکی در نمونه‌های ضخیم بدنه سکان پلاستیکی تقویت شده با الیاف کربن با استفاده از داده‌های کرنش.

کلمات کلیدی: دکل سکان، سازه‌های دریایی، امپدانس الکترومکانیکی، بار و نظارت ساختاری.

در کاربردهای بیشتر و بیشتر در سازه‌های دریایی، مخلوط‌های چند ماده برای ساختن سازه‌های کارآمد همراه با مزایایی در وزن و عملکرد انتخاب می‌شوند. پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف کربن (CFRPs) به دلیل استحکام بالا و به خصوص رفتار خستگی عالی، می‌توانند ماده مناسبی برای بخش‌های با بارگذاری بالا باشند. در این مقاله، یک دکل سکان در CFRP برای یک کشتی بزرگ تجاری در نظر گرفته شده، همانطور که در شکل 1 نشان داده شده است، جایی که تیغه سکان باید با فشار مناسب به دکل متصل شود. این فشار مناسب باعث ایجاد تنش‌های زیاد در جهت شعاعی دکل می‌شود، که عمود بر جهت الیاف یک لوله CFRP آسیب دیده با رشته مرطوب است. به عنوان یک نتیجه، قسمت CFRP از دکل سکان باید به قطعات فلزی متصل شود، که می‌توانند تیغه سکان را به دکل وصل کنند. این امر منجر به تمرکز تنش زیاد بین قطعات فلزی و CFRP می‌شود، به طوری که این مناطق اغلب بحرانی هستند (Piggott, 1989؛ Wang et al., 2017). در اجزای CFRP با ضخامت دیواره بسیار زیاد، وضعیت تنش در مقایسه با قطعات CFRP با دیواره نازک پیچیده‌تر بوده و پیش‌بینی مکانیک شکست دشوار است. این بدان معنی است که یک بار پیوسته و نظارت ساختاری برای چنین اجزای CFRP ضخیم به شدت مورد نیاز است.

چندین نمونه در متن یافت می‌شود که در آن یک نظارت بر بار با استفاده از سنسورهای تعبیه شده با نظارت بر سلامت ساختاری¹ (SHM) در همان سازه ترکیب شده است (Ling and Bosse and Lechleiter, 2016؛ Mahadevan, 2012؛ Yuan et al., 2006). کارهای قبلی در مورد سازه‌های کشتی عمدتاً بر نظارت بر بار یا نظارت ساختاری معطوف بوده است. اصول گسترده‌ای که برای نظارت بر بار استفاده می‌شود، مبتنی بر کرنش‌سنج‌های مقاومتی یا نوری (شبکه براگ الیاف) است (Torkildsen و همکاران، 2005). علاوه بر این، شتاب‌سنج‌ها توسط فلپس و موریس (2013) برای تشخیص رفتار مرتعش سراسری (حرکت لنگری) استفاده شده است. چنین رویکردهای نظارت بر بار امکان تخمین مدت زمان عمر باقیمانده سازه‌ها را فراهم می‌کند و بازخورد فوری را به اپراتور می‌دهد تا تغییرات زمان واقعی در مانور را برای به حداقل رساندن فراتنش ایجاد کند (فلپس و موریس، 2013).

¹ structural health monitoring



شکل 1. نمایی از دکل سکان که بار پیچشی را از مکانیک فرمان به تیغه منتقل می‌کند (با احترام، GmbH

سیستم‌های دریایی Becker).

با این حال، چندین روش SHM برای سازه‌های کشتی در متن گزارش شده است. اوکاشا¹ و همکاران (2010) یکپارچگی SHM را در ارزیابی عملکرد چرخه عمر سازه‌های کشتی تحت عدم قطعیت نشان دادند. مدل مبتنی بر SHM بدنه‌های کشتی نیروی دریایی توسط استول و همکاران نشان داده شده است (2011). یک سیستم SHM بی‌سیم برای سازه‌های زیر دریایی توسط Nugroho و همکاران ارائه شده است (2016). شناسایی آسیب در ساختارهای پوسته‌ای غوطه‌ور شده با استفاده از الگوریتم تکامل افتراقی توسط رید² و همکاران انجام شده است (2013). سیستم نظارت چند منظوره برای کشتی‌های یخ‌شکن توسط ژیرنوف و همکاران ارائه شده است (2016). روش SHM نویدبخش با استفاده از روش امیدانس الکترومکانیکی (EMI) ارائه شده است که برای اولین بار توسط لیانگ و همکاران شرح داده شد (1994). روش EMI بر اساس این واقعیت است که امیدانس الکتریکی یک تکه پیزوالکتریک با امیدانس مکانیکی سازه‌ای که به آن پیوند یافته، مرتبط است. در عمل، اغلب از معکوس امیدانس پیچیده، یعنی گذارایی³ Y استفاده می‌شود. EMI با موفقیت برای تشخیص تورق (لایه لایه شدگی) به طور مصنوعی ایجاد شده در مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته است (Ostachowicz و همکاران، 2017). همچنین با

¹ Okasha

² Reed

³ admittance

استفاده از روش EMI می‌توان آسیب ساختاری در یک اتصال تزریق شده را تشخیص داد (Moll, 2018). مروری بر تحولات اخیر روش EMI در حوزه‌های مختلف کاربردی توسط وندوفسکی و همکاران ارائه شده است (2017). با بهترین دانش نویسندگان، تنها یک نشریه وجود دارد که از روش EMI در کشتی‌ها با تمرکز بر روی سازه‌های خرابایی آلومینیومی استفاده می‌کند (گریسو، 2013).

به خوبی شناخته شده است که طیف‌های EMI به عوامل بیرونی از قبیل دما (واندوفسکی و همکاران، 2017)، بار سازه (Annamdas et al., 2007; Taylor et al., 2013) و ضخامت/سفتی چسب (Islam and Huang, 2014; Tinoco and Rosas-Bastidas, 2016; Tinoco and Serpa, 2011) بستگی دارد. جبران این اثرات برای جلوگیری از مثبت‌های کاذب در تشخیص آسیب بسیار مهم است. خرابی‌های مبدل در اثر شکست یا گسیختگی و همچنین عوامل محیطی تأثیر بیشتری بر بخش تصویری گذارایی نسبت به بخش واقعی دارد (Giurgiuti and Zagrai, 2000).

همکاری‌های جدید این مقاله توسط موارد زیر آورده شده است:

1. نمایش سیستم نظارت هیبریدی در ترکیب با بار و نظارت ساختاری. بنابراین، نمونه‌های ضخیم CFRP از دکل سکان در یک آزمون کششی شبه استاتیک تولید شده و مورد مطالعه قرار گرفته است.
2. جاسازی موفقیت‌آمیز کرنش-سنج‌های طی تولید کامپوزیت دکل سکان.
3. توسعه سخت افزار ابرار دقیق برای اندازه‌گیری‌های EMI چند کاناله. برخلاف دستگاه‌های موجود، سخت افزار اندازه‌گیری ارائه شده از فرکانس‌های بالا (حداکثر 1 مگاهرتز) و جریان‌های زیاد (حداکثر A2) پشتیبانی می‌کند، به طوری که می‌توان مواد بسیار سبک مانند دکل سکان CFRP پیشنهادی را بازرسی کرد.
4. بحث در مورد ترکیب موفقیت‌آمیز بار و نظارت ساختاری برای تشخیص آسیب با استفاده از طیف-سنجی EMI در نمونه‌های ضخیم دکل سکان CFRP. وابستگی نشانه‌های EMI به موارد بار را می‌توان با استخراج اطلاعات بار از کرنش-سنج‌های جاسازی شده حذف کرد.

باقیمانده این مقاله به روش زیر سازماندهی می‌شود. بخش "تکنیک‌های اندازه‌گیری بار و نظارت ساختاری" تکنیک‌های اندازه‌گیری برای نظارت بر بار و نظارت ساختاری را ارائه می‌دهد. پس از آن، بخش "راه‌اندازی تجربی" آماده‌سازی تجربی آزمون کشش شبه استاتیک شامل توصیفی از نمونه‌های دکل سکان را شرح می‌دهد. نتایج حاصل از مفهوم نظارت هیبریدی در بخش "نتایج تجربی" ارائه شده و پس از آن بحثی در بخش "بحث و گفتگو" انجام می‌شود. سرانجام، نتیجه‌گیری‌ها در بخش "نتیجه‌گیری" ارائه می‌شود.

تکنیک‌های اندازه‌گیری برای بار و نظارت ساختاری

نظارت بر بار با استفاده از کرنش‌سنج‌های تعبیه شده

نظارت بر بار با کرنش‌سنج LI66-10 / 350 توسط HBM که به طور مستقیم در بین لایه‌های کامپوزیت تعبیه شده، انجام می‌شود. این سنسور دارای ابعاد کلی 10×22 میلی‌متر است. به دلیل یکپارچه بودن، یک لوله CFRP در دو مرحله مختلف تولید می‌شود. در حالت اول، لمینیت رزوه شده و تا ضخامتی که سنسورها در آن قرار دارند، پخته می‌شوند. در سطح پدیدار شده، سنسورها در قسمت مرکزی نمونه نهایی قرار دارند (شکل 7 را ببینید). از یک چسب اپوکسی (Hardman Double Bubble Epoxy Hardman)، که از نظر شیمیایی بسیار شبیه به رزین است، برای تثبیت کرنش‌سنج‌ها برای سیم پیچ رشته‌ای مرطوب CFRP استفاده شد. ضخامت فیلم چسبنده چند میکرون است. سنسورها دارای پین‌های اتصال به طرف خارج هستند (شکل 8 را ببینید)، که امکان پیچاندن قسمت دوم لمینت CFRP بدون از دست دادن دسترسی به سنسور را می‌دهد. پس از آن، سنسور در صفحه لمینت، جایی که کرنش جالب توجهی در آن رخ می‌دهد، قرار گرفته و لمینیت بخش دوم رزوه شده و تا ضخامت نهایی پخته می‌شود. شکل 2 سنسورهای چسبیده را در سمت چپ و لمینت را قبل از مرحله نهایی پخت در سمت راست نشان می‌دهد. طرح سنسور امکان تعبیه در طی تولید و همچنین یک رفتار ساختاری کارآمد و پاسخ‌سنجی معقول را فراهم می‌کند. در صورت عدم آسیب دیدن ساختار میزبان، نظارت بار پیوسته می‌تواند توسط یک سنسور تعبیه شده انجام شده و اطلاعات کرنش به درستی با بار واقعی در ارتباط باشد. چندین نتیجه امیدوارکننده هنگام بررسی عمر خستگی، مقاومت

در برابر برش میان لایه‌ای (ILS) و انرژی چقرمگی شکست میان لایه‌ای (GIC) بر روی نمونه‌های تست طراحی شده همراه با مواد مشابه و تکنیک تولید گزارش شده است (Horoschenkoff و همکاران، 2006). متأسفانه، هیچ تحقیقی در متن در مورد دومین حالت شکست و سفتی خمشی وجود ندارد، که برای طراحی سازه‌های با بار خمشی مانند دکل سکان حیاتی است. به همین دلیل، پاسخ خمشی در اینجا با تمرکز بر عملکرد ساختاری و پاسخ سنجی سنسور، تجزیه و تحلیل می‌شود.

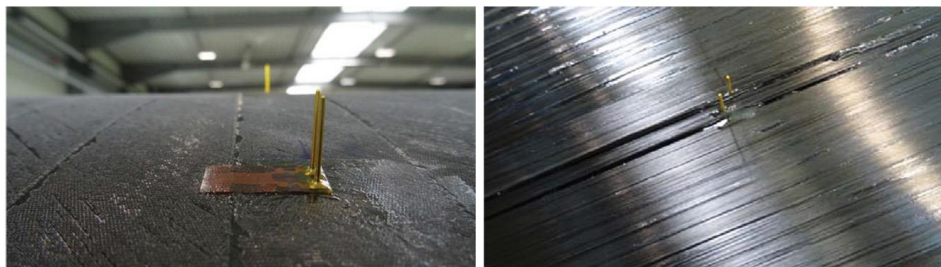
برای دستیابی به یک توصیف جامع از کرنش سنج‌های یکپارچه، بررسی‌های ساختاری و مترولوژی¹ با استفاده از چندین نمونه استاندارد (250 mm × 40 mm × 2 mm) ساخته شده از مواد کربن اپوکسی انجام شده است. الیاف کربن با کشش بالا و رزین اپوکسی برای تولید دکل سکان، برای بدست آوردن لمینیت تک جهته که خواص آن در جدول 1 گزارش شده است، استفاده می‌شوند. هشت لایه به صورت متقارن در یک صفحه شبه ایزوتروپیک² (همسانگرد) انباشته شده تا 20 نمونه از آن‌ها بدست آید، که از هرگونه اتصال مکانیکی بین بار درون صفحه‌ای و تغییر شکل‌های خارج از صفحه و بالعکس جلوگیری می‌کند (جونز، 1998).

در میان آن‌ها، 10 نمونه برای انجام تست‌های خمش با شکاف (ENF) با هدف ارزیابی چقرمگی حالت دوم G_{IIC} مجهز شده‌اند (Sham Prasad و همکاران، 2011). آن‌ها مطابق با استاندارد مربوطه (ASTM D7905 / D7905M-14، 2014)، یک فیلم پلی تترا فلورو اتیلن (PTFE) 13 میکرومتری را در امتداد صفحه خنثی معرفی می‌کنند. نیروها از طریق یک فیکسچر مخصوص خمش سه نقطه‌ای تحت بارگذاری جابجایی کنترل شده که توسط یک دستگاه تست KN Zwick-Roell Z010-10 ارائه شده، به نمونه اعمال می‌شوند. ثبت نیروی اعمال شده در مقابل جابجایی غلتک مرکزی با استفاده از ثبت کننده زمان واقعی آنالوگ به دیجیتال X-Y (A/D) دستگاه و تعیین نرخ نمونه‌برداری از 50 هرتز بدست می‌آید. G_{IIC} با استفاده از روش کالیبراسیون سازگاری (CC) بدست می‌آید (Jagannathan و همکاران، 2015)، که اعتقاد بر این است که نرخ آزاد شدن انرژی کرنش بحرانی برای رشد ترک از فیلم جاسازی شده را نشان می‌دهد (Bru et al.، 2016). میانگین نتایج G_{IIC} از پنج آزمایش مشابه در هر یک از

¹ metrology

² isotropic

ساختارهای مسطح و یکپارچه انجام شده است. آن‌ها به ترتیب در حدود 217 و 201 J/m^2 هستند، با پراکندگی در حدود 7% که مانع از هرگونه اثر بحرانی بر رفتار شکست می‌شود در حالی که حسگرهای تعبیه شده برای نمونه تحت آزمایش است.



شکل 2. موقعیت‌یابی و تعبیه کرنش‌سنج در صفحه میانی یک لوله CFRP.

جدول 1. خواص مکانیکی ورقه اپوکسی کربن.

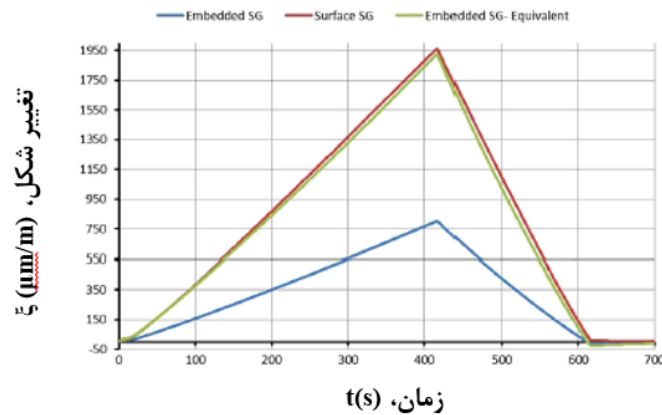
E_1 (GPa)	$E_2 = E_3$ (GPa)	$G_{12} = G_{13}$ (GPa)	G_{23} (GPa)	$\nu_{12} = \nu_{13}$	ν_{23}	ρ (kg/m ³)
175.0	9.8	4.3	3.2	0.25	0.43	1500

با استفاده از همان ترتیب، 10 آزمایش دیگر طبق استاندارد D7264 / D7264M-15 (2015) انجام می‌شود. مدول خمشی الاستیک به عنوان مدول وتر الاستیسیته از بار و جابجایی ثبت شده محاسبه می‌شود. مقدار میانگین از پنج آزمایش مشابه در ساختارهای مسطح و یکپارچه به ترتیب حدود $12/5$ و $13/5$ GPa است. با وجود پراکندگی حدود 9% هنوز هم قابل قبول است، اما به طور غیر منتظره نشان می‌دهد که سفتی خمشی در حین قرار دادن سنسور به دلیل پیکربندی عمودی پین‌ها افزایش می‌یابد (برای موقعیت کرنش‌سنج و پین‌ها به شکل 3 مراجعه کنید). نکته مهم برای هدف این تحقیق، کارآیی مترولوژی سنسور تعبیه شده است. مقایسه اندازه‌گیری با انجام تست‌های خمشی بر روی نمونه‌های یکپارچه ریز مطابق استاندارد D7264 / D7264M-15 (2015) انجام شده است. نتایج حاصل از کرنش‌سنج‌های تعبیه شده به صورت مناسب برای بدست آوردن حداکثر تغییر شکل مورد انتظار در سطح فوقانی، جایی که یک کرنش‌سنج معمولی دیگر نصب شده، قابل درجه‌بندی است. کرنش‌سنج LY46- 10 / 350A نصب شده در سطح توسط HBM برای مطابقت با مشخصات محلول تعبیه شده انتخاب شده است. از سیستم تقویت‌کننده متراکم چند کاناله PICAS برای تقویت کرنش‌سنج‌ها با یک پیکربندی چند بخشی استفاده می‌شود، در

حالی که اسیلوسکوپ OnoSokki CF3600 سیگنال‌های ولتاژ را با نرخ نمونه‌گیری 10 هرتز دیجیتالی می‌کند. یک نتیجه معمولی بدست آمده در شکل 4 گزارش شده است. توزیع پروانه‌ای کرنش از طریق ضخامت نمونه منجر به خروجی ولتاژهای مختلف می‌شود. از این رو، یک عامل هم ارزی β با توجه به اینکه توزیع به منظور دستیابی به تغییر شکل معادل نشان داده شده، محاسبه می‌شود. اندازه‌گیری‌های مختلف در پنج نمونه انجام شده است، که تکرارپذیری و همچنین تکثیرپذیری آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. جدول 2 β را با نسبت α بین حداکثر تغییر شکل‌های اندازه‌گیری شده توسط هر دو کرنش‌سنج مقایسه می‌کند. با توجه به جزئیات، وقتی α از β بزرگتر باشد، کرنش‌سنج معمولی تغییر شکل بزرگتر از داده‌های معادل حاصل از سنسور تعبیه شده را بر می‌گرداند. عامل هم ارزی کرنش‌سنج بستگی به ضخامت نمونه (h) و فاصله از سطح (d) دارد که در اینجا محاسبه شده است و همچنین ضخامت کرنش‌سنج (t). درصد خطایی که در همان جدول گزارش شده است تفاوت بسیار ناچیزی را در حین استفاده از مورد دومی نشان می‌دهد. شایان ذکر است که خطا به دلیل ناهمراستایی محتمل سنسورها که در اینجا به شدت با توالی لایه‌ای شدن محدود شده، استفاده می‌شود (Horoschenkoff و همکاران، 2006).



شکل 3. نمایی از توالی چیدمان $(+45^0 / -45^0 / 0^0 / 90^0)$ S نمونه آزمایشی که نشان دهنده موقعیت کرنش‌سنج و پین‌ها است. ضخامت ساختار حدود 2 mm است (ابعاد به mm است).



شکل 4. سوابق کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج تعبیه شده (آبی) و در سطح نصب شده (قرمز). مقدار هم ارزی (سبز) ضخامت سنسور را در نظر می‌گیرد ($t = 0.0885 \text{ mm}$).

جدول 2. تغییر شکل حداکثری اندازه‌گیری شده با استفاده از کرنش‌سنج‌ها تحت بارگذاری جابجایی-کنترل شده، ضریب هم ارزی (β) و نسبت بین تغییر شکل‌های ماکزیمم (α).

نمونه	$\epsilon_{surf} (\mu\epsilon)$	$\epsilon_{int} (\mu\epsilon)$	β	α	E(%)
R_1	2323	977	2.4	2.38	0.83
R_2	2192	894	2.4	2.45	2.083
R_3	2083	883	2.4	2.36	1.67
R_4	2085	885	2.4	2.32	3.33
R_5	1962	802	2.4	2.45	2.083

طیف‌سنجی EMI

یک دستگاه اندازه‌گیری به وضوح برای التراسوند SHM در مواد بسیار ضعیف طراحی شده است. این دستگاه قادر به انجام هر دو اندازه‌گیری EMI و نصب در حداکثر 12 کانال با تسهیم تقسیم زمان است. ولتاژ القایی بالا تا $V_{pp} 100$ و جریان‌ها تا 2 A توسط محرک پیزو PD200 تولید شده توسط PiezoDrive فراهم می‌شوند. تبدیل A / D با استفاده از گستره دستی HS3 در MSPS 10 انجام می‌شود. دستگاه برای فعال‌سازی EMI تا حداکثر 1 مگاهرتز مشخص شده است. هر کانال تسهیم‌کننده از دو قطب همراه با دو پرتابه مکانیکی تشکیل شده است تا هم سیگنال‌های فعال‌سازی و هم سیگنال‌های پایه را تغییر دهند (شکل 5). این طراحی پیچیده فقط برای قابلیت اضافه شدن گیره به

زمین ضروری است، که نیاز به قابلیت مسیریابی دو سیگنال مستقل به کانال‌های پیزو دلخواه دارد. تمام مسیره‌های سیگنال استفاده نشده برای جلوگیری از برخورد متقابل بین کانال‌ها پایه گذاری شده‌اند. پیزوها به کابل‌های هم محور متصل هستند، زیرا سیگنال‌های پر قدرت برای تأثیرگذاری بر تجهیزات دیگر بدون حفاظ مناسب، به اندازه کافی قوی خواهند بود. مدار EMI از یک مقاومت شانت برای اندازه‌گیری جریان از طریق مبدل استفاده کرده و همزمان ولتاژ تحریک را اندازه می‌گیرد. ایده اصلی طراحی کار پیرس و همکاران (2004) را دنبال می‌کند، همراه با برخی از اصلاحات اساسی برای بکار بردن سیگنال‌های دامنه بالا. مقدار مقاومت شانت بسیار کم‌تر از 0.05Ω برای به حداقل رساندن اتلاف انرژی استفاده می‌شود، که به یک مدار تقویت‌کننده پیچیده‌تر نیاز دارد (شکل 6). ولتاژ تحریک با ضریب 10 کاهش می‌یابد تا از تداخل بین ولتاژ و کانال‌های جریان داخل واحد مبدل آنالوگ به دیجیتال (ADC) جلوگیری شود. ولتاژهای موجود در واحد ADC به این ترتیب ارائه می‌شود:

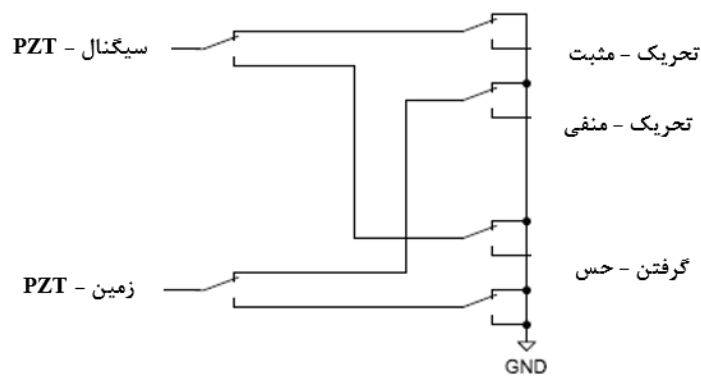
$$V^{Ch1}(t) = \frac{R_{f1}}{R_{g1}} V_{piezo}(t) \quad V^{Ch2}(t) = \frac{R_{f2}}{R_{g2}} R_{shunt} I_{piezo}(t) \quad (1)$$

برای هر فرکانس، یک موج سینوسی شکل تک صدایی ایجاد شده و دو کانال ورودی برای 15 میلی ثانیه نمونه‌برداری می‌شوند. مقادیر V_{PZT} و I_{PZT} سپس با استفاده از الگوریتم Goertzel به دامنه فرکانس منتقل می‌شوند، زیرا تنها یک فرکانس مورد علاقه (فرکانس تولید کننده سیگنال) است که به طور کلی با یک FFT-bin دقیق مطابقت نخواهد داشت. این امر به شما امکان می‌دهد هر دو فرکانس صحیح را انتخاب کرده و تنها با محاسبه یک جزء، توان محاسباتی را در مقایسه با FFT ذخیره کنید. گذارایی برای این فرکانس تحریک به صورت زیر تعریف شده است:

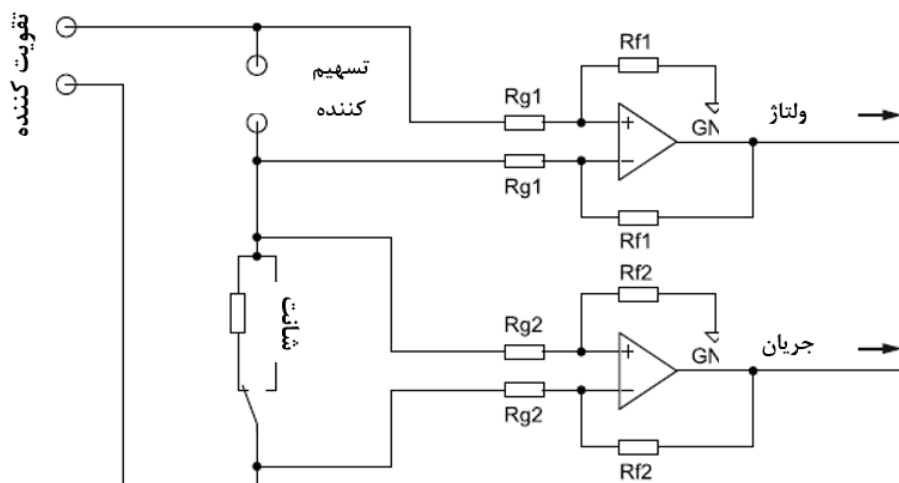
$$Y(f) = \frac{I_{PZT}(f)}{V_{PZT}(f)} \quad (2)$$

محاسبات فوق در زمان واقعی بر روی دستگاه انجام می‌شود. مقادیر گذارایی حاصل از طریق یک فصل مشترک شبکه‌ای جریان می‌یابد.

در حین اندازه‌گیری‌های EMI، دما با استفاده از سنسورهای DS18B20 اندازه‌گیری می‌شود، که وضوح نسبی 0.0625° را ارائه می‌دهند. نسخه واسطه این دستگاه توسط Neuschwander و همکاران ارائه شد (2017).



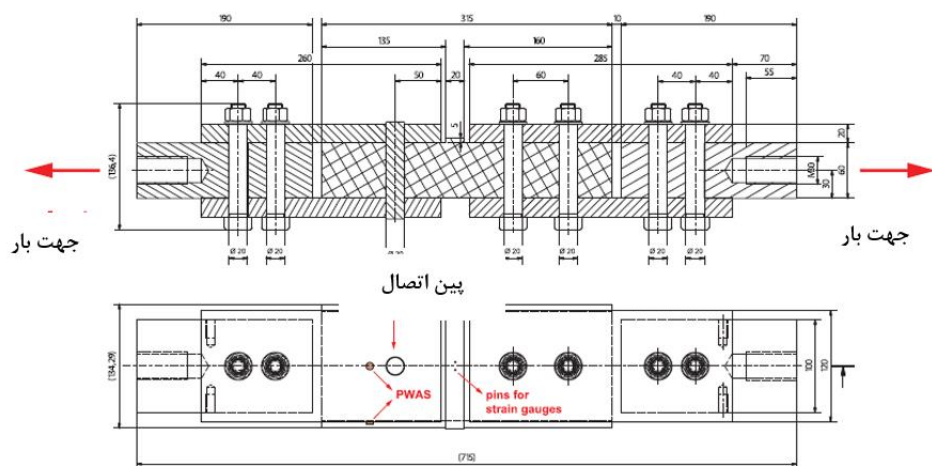
شکل 5. نمودار شماتیکی یک کانال تسهیم کننده.



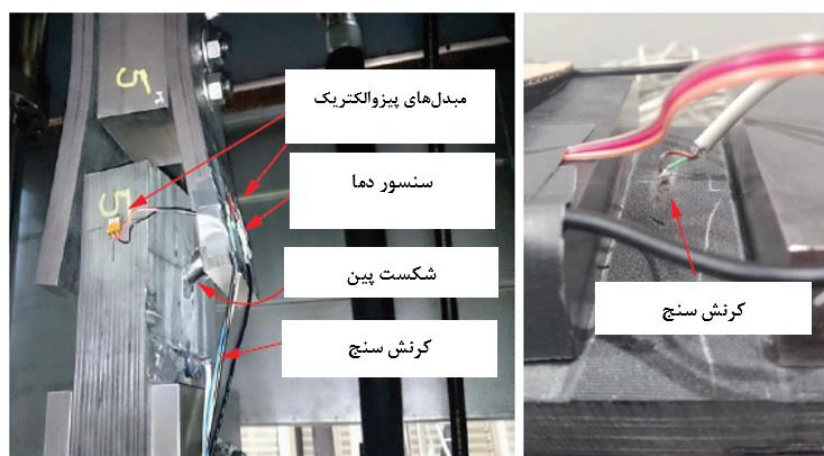
شکل 6. نمودار شماتیکی از مدار EMI.

راه اندازی آزمایشی

نقشه و تصویری از نمونه دکل سکان به ترتیب در شکل های 7 و 8 نشان داده شده است. این نمونه شامل یک هسته CFRP با سطح مقطع مستطیل شکل و یک قسمت فلزی در هر دو انتهای آن است که برای اصلاح صحیح نمونه در دستگاه تست الکترو هیدرولیکی Schenck 2500-kN اتصال پیچی شده است. علاوه بر این، یک پین فلزی به فلانچ های فلزی متصل است. این پین فلزی بخشی از طراحی واقعی دکل سکان برای اتصال قطعات CFRP به جزء فلزی است که تیغه سکان را به دکل وصل می کند. تشخیص خرابی پین برای عملکرد ایمن کشتی مهم است.



شکل 7. ترسیم CAD از نمونه آزمون شامل موقعیت‌های سنسور. از آنجا که طرح با توجه به ترتیب آزمایشی تا 90 درجه چرخانده شده، جهت بار در جهت افقی است.



شکل 8. سمت چپ: عکس نمونه دکل سکان پس از تست کششی با دو مبدل پیزوالکتریک، یک کرنش سنج تعبیه شده و یک سنسور دما؛ سمت راست: نمای نزدیک از کرنش سنج تعبیه شده.

دو مبدل پیزوالکتریک در سطح نمونه نصب می‌شوند. مبدل مستطیلی (PI Ceramics GmbH) با DuraAct با اندازه $16 \text{ mm} \times 13 \text{ mm} \times 0.5$ بر روی مواد CFRP با استفاده از چسب سیانواکریلات با ضخامت چند میکرون چسبانده شده است. یک مبدل دایره‌ای (PI Ceramic GmbH) با قطر 10 میلی متر و ضخامت 0.25 میلی متر در قسمت فولادی به همراه سنسور دمایی DS18B20 قرار داده شده است که دمای جریان را روی سطح نمونه ثبت می‌کند تا اثرات مربوط به دما را بتوان شناسایی کرد.

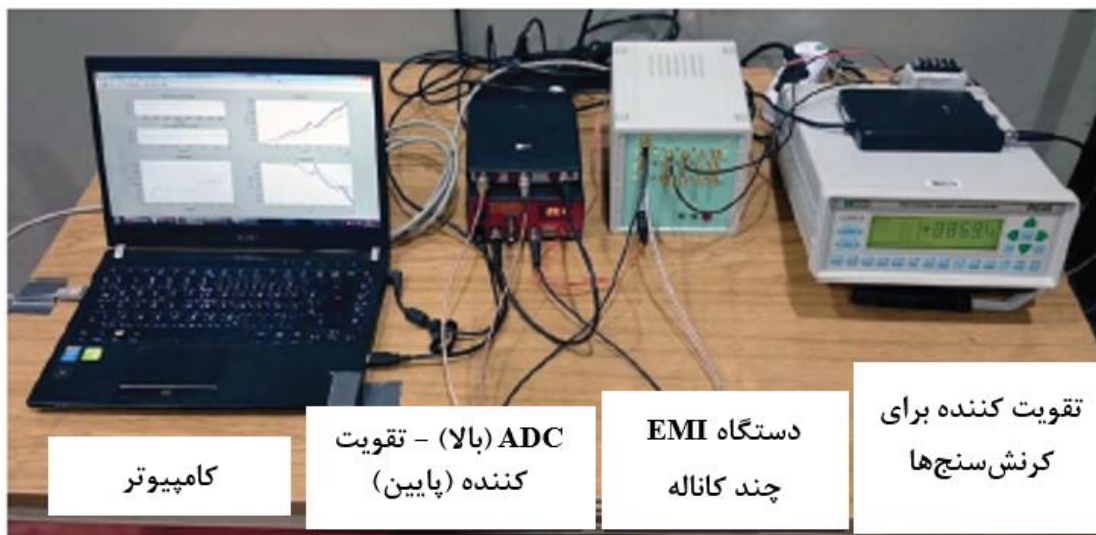
شکل 9 تصویری از سیستم کسب داده برای کرنش و EMI را نشان می‌دهد. کرنش سنج به یک تقویت کننده وصل شده که سیگنال کرنش DC تقویت شده را به ADC می‌فرستد. در این حالت، ما از Handyscope HS3 از مهندسی TiePie استفاده کرده‌ایم که از کنترل از راه دور MATLAB پشتیبانی می‌کند. طیف‌های هر دو کانال EMI و دمای جریان از طریق اترنت به رایانه منتقل می‌شوند. تمام داده‌های اندازه‌گیری به طور همزمان و در یک فایل HDF5 واحد ذخیره می‌شوند.

نتایج تجربی

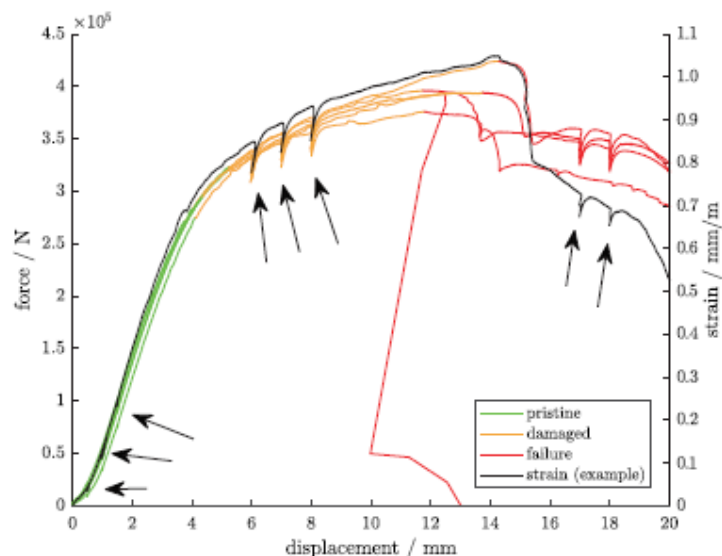
شکل 10 نمودارهای نیرو-جابجایی آزمایشات را برای 5 نمونه دکل سکان که در این مطالعه استفاده می‌شوند، نشان می‌دهد. در آغاز، همه منحنی‌ها رفتار تقریباً خطی الاستیک را نشان می‌دهند، که به رنگ سبز مشخص شده است. در این مرحله می‌توان نمونه را سالم در نظر گرفت و تاکنون با بازرسی بصری و عدم وجود وقایع انتشار آکوستیک تایید شده که هیچ آسیبی به آن وارد نشده است. با افزایش بیشتر بار، می‌توان با تغییر در شیب نمودارهای نیرو-جابجایی، کاهش سفتی را که به رنگ نارنجی مشخص شده است، مشاهده کرد (Puck, 1996; Schürmann, 2007). در CFRP، کاهش سفتی در اثر شکست بین الیافی ایجاد می‌شود، یعنی ترک‌های کوچکی در زمینه اپوکسی ایجاد می‌شود. در قطعات فولادی، کاهش سفتی در اثر پلاستیک شدن (نرم‌سازی) مواد ایجاد می‌شود. هر دو پدیده با آسیب غیرقابل برگشت در ماده مرتبط هستند که تشخیص آن‌ها هدف اصلی این مطالعه است. هنگامی که این مرحله اتفاق می‌افتد، یک افت ناگهانی معمولی در منحنی به طور جزئی ظاهر می‌شود (ASTM D7905 / D7905M-14, 2014)، اما افزایش بیشتر نیرو ممکن است. دوباره شیب خیلی سریع افزایش یافته، اما خیلی زود به سمت شکست کامل کاهش می‌یابد. هنگامی که اولین ترک‌های شدید در فولاد یا پارگی‌های اولیه الیاف کربن رخ می‌دهد، می‌توان افت سطح نیرو را تشخیص داد. در این حالت که به رنگ قرمز مشخص شده است، اتصال معمولاً شکسته شده و دیگر قادر به نگه داشتن نیرو نیست. در سناریوی واقعی، وقتی بار با جابجایی دستگاه هدایت نشود، جدا کردن قطعات متصل امکان‌پذیر است و در هر صورت با تشخیص آسیب قبل از رسیدن به سطح شکست کامل، باید از آن جلوگیری کرد. در

حین آزمایش، روندها برای 180 ثانیه در نقاط مشخص شده با فلش متوقف شده‌اند، تا اندازه‌گیری‌های EMI را بدون دخالت در نویزهای دستگاه تست انجام دهند. در طی این توقف‌ها، یک آرامش جزئی از سطح نیرو مشاهده می‌شود، اما سطح اصلی خیلی سریع پس از ادامه آزمایش بدست می‌آید.

منحنی کرنش که در شکل 10 رسم شده است، کرنش را در مقابل امتداد جابجایی از سنسور تعبیه شده در نمونه 4 نشان می‌دهد. این مثال به روشنی نشان می‌دهد که بار را می‌توان با استفاده از کرنش‌سنج تعبیه شده تا زمان شکست، کنترل کرد، که اطلاعات صحیحی در مورد افزایش بار، متوقف شدن طی روند بارگذاری و شکست وخیم را ارائه می‌کند. همانطور که در بالا بحث شد، هر دو نیرو و کرنش در مقابل طرح‌های جابجایی به وضوح نوعی از شکست لایه اولیه را از طریق افت ناگهانی و جزئی در منحنی نشان می‌دهند (ASTM D7905 / D7905M-14، 2014). این رفتار در شکل 10 از توزیع کرنش کاملاً واضح است (حدود 0.7 mm/m). با افزایش بیشتر بار، تغییر شکل دوباره و خیلی سریع به سمت شکست کامل شروع می‌شود اما شیب منحنی خیلی زود به دلیل کاهش سفتی کلی کاهش می‌یابد.



شکل 9. عکس از تجهیزات جمع‌آوری داده‌ها در طول آزمون کشش شبه استاتیک.



شکل 10. نمودار نیرو-جابجایی برای آزمایش نمونه‌های دکل سکان تقسیم شده به سالم (سبز)، آسیب دیده

(نارنجی) و حالت شکست (قرمز). یک مثال کرنش از کرنش سنج تعبیه شده ارائه شده است.

تمام طیف‌های EMI برای نمونه 4 در کل چرخه آزمایش در شکل 11 نشان داده شده است. مقادیر گذارایی حتی بدون تغییرات ساختاری متفاوت است. این اثر به طور مداوم برای سنسور 1 نسبت به سنسور 2 در تمام نمونه‌ها قوی‌تر است، که نشان می‌دهد که این اثر ناشی از مبدل‌های مختلف نیست؛ بلکه به دلیل موقعیت آن در ساختار است. هم‌دما و هم‌کرنش منابع احتمالی برای اثرات این نوع هستند. در مورد کرنش، به دلیل سفتی بیشتر CFRP، در فولاد اثر برجسته‌تر خواهد بود. هر دو متغیر نمی‌توانند به طور مستقل متفاوت باشند، بنابراین داده‌های حاصل از چندین نمونه برای یافتن روابط مداوم با تغییرات طیف باید ترکیب شوند. فقط نمونه‌های 1 و 4 برای آنالیز زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند، زیرا تنها مواردی هستند که دارای اطلاعات مربوط به کرنش و چرخه آزمایشی کامل می‌باشند. وابستگی را می‌توان با مقایسه هر منحنی با یک منحنی مرجع، در این مورد اولین اندازه‌گیری EMI، تعیین کرد. سه متغیر مستقل برای فرکانس‌های تا حداکثر 900 کیلوهرتز ثبت شده است و هر یک از آن‌ها با یک تبدیل آفین¹ که دارای دو پارامتر در هر متغیر است، تبدیل شده و شش پارامتر مستقل حاصل می‌شوند:

¹ affine

$$\Re(Y') = \alpha_{\Re} \cdot \Re(Y) + \beta_{\Re} \quad (3)$$

$$\Im(Y') = \alpha_{\Im} \cdot \Im(Y) + \beta_{\Im} \quad (4)$$

$$f' = \alpha_f \cdot f + \beta_f \quad (5)$$

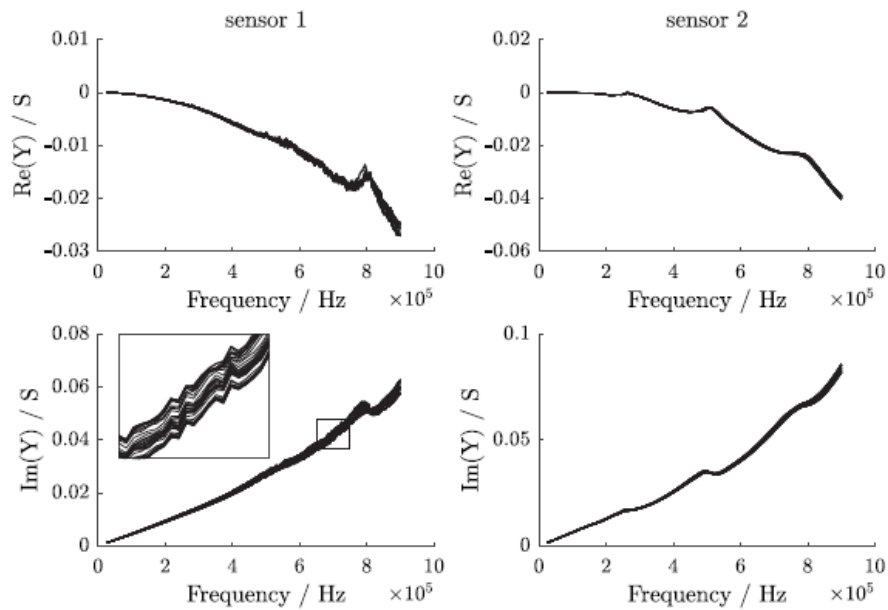
این پارامترها با قرار دادن هر منحنی رابط بر روی مرجع با استفاده از الگوریتم حداقل مربعات یافت می‌شوند. این روش مستقل از داده‌های کرنش و دما است. پارامترهای α_{\Re} و α_{\Im} آن‌هایی هستند که برای تأثیر شرح داده شده در بالا مناسب هستند، زیرا در جهت عمودی نمودار گذارایی درجه‌بندی می‌شوند.

ترسیم این پارامترها در برابر دما، دو منحنی کاملاً متفاوت را نشان می‌دهد، در حالی که رابطه کرنش برای هر دو نمونه قبل از شکست یکسان است (شکل‌های 12 و 13). این امر منجر به این نتیجه می‌شود که اثر مقیاس‌گذاری ناشی از کرنش است و نه درجه حرارت. بنابراین، اطلاعات کرنش موضعی باید در دسترس باشد تا نتایج معنی‌داری برای اندازه‌گیری‌های EMI در نمونه‌های ضخیم CFRP تحت بارگذاری قوی فراهم کند.

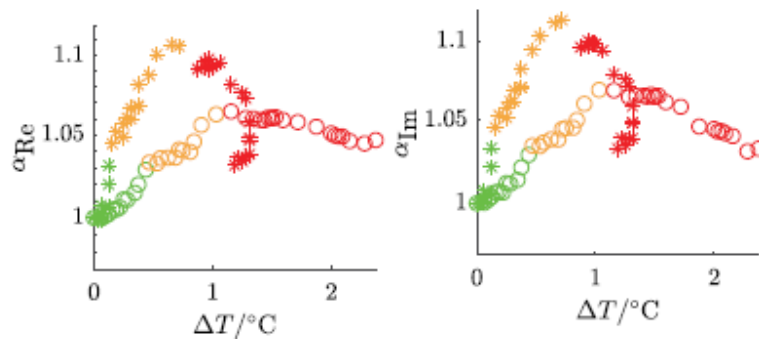
یک مدل رگرسیون خطی $\alpha_{\Re}(e)$ برای نمونه‌های سالم 1 و 4 بدست آمده است (رجوع کنید به خط سبز در شکل 13). این مدل به عنوان یک مبنا برای تعریف شاخص آسیب (DI) است که به عنوان تفاوت مطلق بین پارامتر مقیاس‌بندی α_{\Re} و مدل خطی تعریف می‌شود. از نظر ریاضی، این رابطه می‌تواند برای اندازه‌گیری i th به صورت زیر فرموله شود:

$$DI(i) = |\hat{\alpha}_{\Re}(e) - \alpha_{\Re}(i)| \quad (6)$$

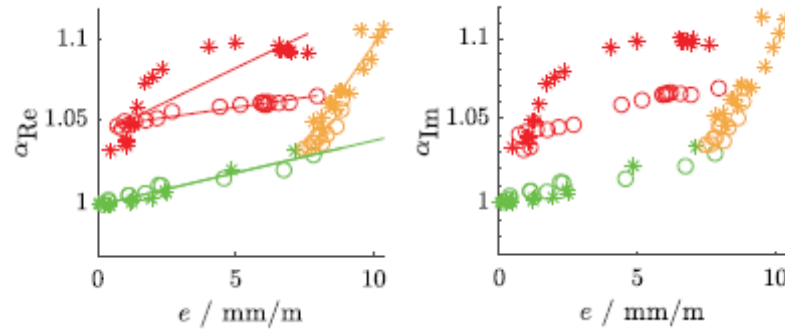
در یک روش مشابه، روش فوق نیز می‌تواند برای قسمت فرضی پارامتر مقیاس‌گذاری α_{\Im} اعمال شود.



شکل 11. طیف EMI نمونه 4. در طول آزمایش، مقادیر گذارایی افزایش یافته، و در نتیجه چندین منحنی حاصل می‌شود که فقط با یک عامل مقیاس گذاری کوچک متفاوت هستند. سنسور 1 (در فولاد) یک رزونانس و یک ساختار ظریف با نوسان کم را نشان می‌دهد، در حالی که سنسور 2 (در CFRP) سه رزونانس گسترده با نوسان بالا را نشان می‌دهد. در فرکانس‌های بالا، به دلیل تغییر مکان فاز در مدار اندازه‌گیری، رسانایی منفی نشان داده می‌شود. این تغییر مکان فاز مطلق تاثیری در تغییرات نسبی طیف مورد نظر برای تشخیص خسارت ندارد.

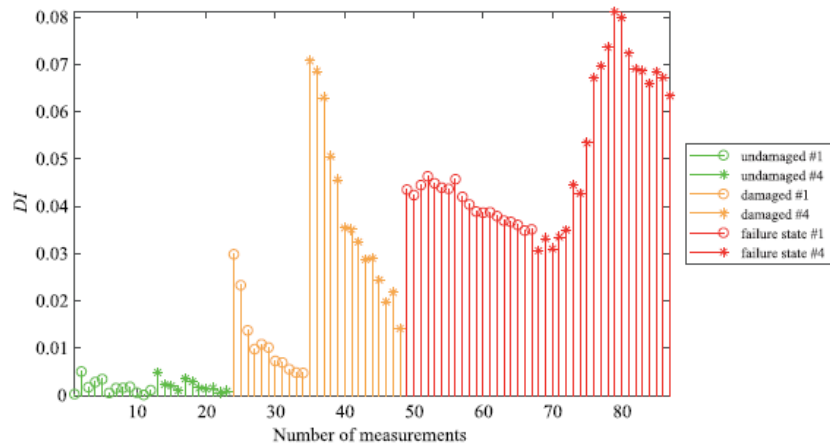


شکل 12. پارامترهای مقیاس گذاری برای اولین مبدل پیزوالکتریک در نمونه‌های 1 (°) و 4 (*) به عنوان تابعی از تغییر دما. با توجه به تغییرات کم دما در طول آزمایش، پارامترهای مقیاس گذاری وابستگی دمایی را نشان نمی‌دهند.



شکل 13. پارامترهای مقیاس گذاری برای اولین مبدل پیزوالکتریک در نمونه‌های 1 (°) و 4 (*) به عنوان تابعی از کرنش e . اتصالات خطی برای قسمت واقعی پارامترهای مقیاس گذاری محاسبه شده است.

شکل 14 تجزیه و تحلیل کمی برای سه حالت ساختاری، یعنی حالت سالم، آسیب دیده و شکست را بر اساس DI ارائه می‌دهد. برای هر دو نمونه 1 و 4 مشاهده می‌شود که DI مقدار نسبتاً کوچکی برای حالت آسیب ندیده دارد. برای حالت آسیب دیده متناسب با بار اعمال شده (که به رنگ نارنجی مشخص شده است) افزایش می‌یابد و بیشتر برای حالت شکست (با رنگ قرمز مشخص می‌شود) افزایش می‌یابد. این تجزیه و تحلیل کمی نشان می‌دهد که DI مطرح شده قادر است در حضور بارگذاری ساختاری، آسیب ساختاری را تشخیص دهد.



شکل 14. شاخص آسیب که حالات سالم، آسیب دیده و شکست دو نمونه آزمایشی را نشان می‌دهد، یعنی نمونه های 1 (*) و 4 (°).

بحث

آزمایش‌های مکانیکی اولیه نشانگر فرآیند ادغام مناسب، پاسخ‌سنجی عالی کرنش‌سنج‌ها هنگام جاسازی در بین لایه‌های کامپوزیتی و تأثیر کم بر روی خواص مکانیکی است. شایان ذکر است که انتظار می‌رود اختلافات کوچک آشکار شده، ضمن افزایش ضخامت و تعداد لایه‌ها کاهش یابد، که این در مورد دکل سکان است. علاوه بر این، تغییر شکل کم‌تر که شامل سنسور تعبیه شده و محافظتی که توسط ساختار میزبان ایجاد می‌شود، دوام آن را افزایش می‌دهد، و ایجاد این فن‌آوری و همچنین مناسب برای نظارت بر بار در طول عمر دکل سکان کامپوزیتی را ممکن می‌کند. با توجه به تنش‌های بالای درگیر در قسمت کامپوزیتی سازه در مقیاس واقعی، در طی عملیات یک سطح کرنش فراتر از 4000 میکروکرنش مورد انتظار است. این امر می‌تواند دو برابر یا بیشتر (عامل β) کاهش یابد، در صورتی که بخواهید کرنش‌سنج را به طور مناسب جاسازی کنید. این واقعیت عملکرد پایداری حسگر را افزایش می‌دهد که حداکثر کرنش آن تا حدود 1500 تا 2000 میکروکرنش محدود است. البته کرنشی که انتظار می‌رود در شکست باشد به ترکیبی از بارها و موقعیت کرنش‌سنج با توجه به خط میانی بستگی دارد (d/h). ارزش آن است که با استفاده از ضریب β نزدیک به 2، کرنش حداکثر در کرنش‌سنج پایین‌تر از حد مجاز حاصل شود. این امر تضمین می‌کند که سنسور پس از خرابی به درستی کار کند، و به طور کلی در طول عمر خود بتوان با تغییر هر چه بیشتر سطح کرنش، DIها را ارزیابی کرد. به طور کلی، با اصلاح این پارامتر، امکان طراحی و بهینه‌سازی سیستم نظارت بر بار ایمن، قابل اعتماد و با عمر طولانی‌تر فراهم می‌شود. همین بحث را می‌توان برای سنسورهای پیزو الکترونیک بکار رفته برای SHM، که در آن کرنش وابسته به ترکیب بار، در لایه خارجی به پایان عمر خود نزدیک خواهد شد، مطرح کرد.

درباره سناریوی آسیب شبیه‌سازی شده در طی آزمایشات، به دلیل بارهای زیاد درگیر، تست کشش در شرایط ایمن با یک کابین قوی در اطراف دستگاه بار انجام شد. این مانع از ارزیابی شکست به صورت درون خطی و دقیق شد. با این حال، انتشار آکوستیک در طول خرابی و ترک خوردگی الیاف به راحتی توسط اپراتورها ارزیابی شده و مربوط به جابجایی اعمال شده است. علاوه بر این، الیاف بیرون کشیده شده به صورت چشمی مورد بررسی قرار گرفته و با بازرسی بصری نمونه‌ها، شکست کل ارزیابی شد. مهم‌تر از آن، اولین شکست (همراه با ترک الیاف داخلی) را می‌توان از افت

ناگهانی معمولی در نیرو و کرنش در مقابل منحنی‌های جابجایی (حتی در شکل 10 قابل مشاهده باشد) ارزیابی کرد. این روند، ساختار لمینت کامپوزیتی معمولی را در شکست لایه اول، به وضوح به صورت حد بین شرایط سالم و آسیب دیده اولیه تعریف می‌کند و روشی کارآمد برای ارزیابی قابلیت‌های SHM در سیستم هیبریدی است. با استفاده از آزمون کشش پیشنهادی نشان داده شد که روش EMI قادر به تمایز بین حالات سالم، آسیب دیده و شکست ساختار دکل سکان است. در اینجا لازم به ذکر است که این مطالعه در یک محیط آزمایشگاهی با شرایط محیطی کنترل شده انجام شده است. هنگامی که این متدولوژی در محیط صنعتی بکار گرفته می‌شود، انواع مختلفی از شرایط محیطی در حال تغییر رخ می‌دهد که برای مثال به تغییرات قابل توجه دما، بارگیری آب و ارتعاشات مکانیکی مربوط می‌شود. تحقیقات بیشتری برای مطالعه اثرات اضافی و تأثیر آن‌ها بر روی DI‌های مطرح شده مورد نیاز است. یک سیستم نظارت ساختاری همچنین باید آستانه‌های آماری و فواصل اطمینان را مشخص کند که وضعیت ساختاری سالم را توصیف کرده و در صورت آسیب دیدن ساختار اطلاعات را ارائه می‌دهد. این امر می‌تواند در یک مرحله آموزشی به طور مستقیم پس از نصب اجرا شود، هنگامی که ساختار بتواند سالم در نظر گرفته شود.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، ما با موفقیت در یک آزمون کشش شبه استاتیک نشان دادیم که می‌توان ترکیبی از نظارت بر بار و نظارت ساختاری را برای تشخیص آسیب در نمونه‌های دکل سکان کامپوزیتی ضخیم با استفاده از ترکیبی از کرنش‌سنج‌های تعبیه شده و روش EMI استفاده کرد. بنابراین، کرنش‌سنج‌ها با موفقیت در مواد کامپوزیتی تعبیه شده‌اند. علاوه بر این، یک ابزار EMI چند کاناله ارائه شده است که از فرکانس‌های بالا (حداکثر 1 مگاهرتز) و جریان‌های زیاد (حداکثر 2A) پشتیبانی می‌کند، به طوری که می‌توان مواد بسیار ضعیف را بازرسی کرد. یک DI تعریف شده بود که قادر است اطلاعات بار را از کرنش‌سنج‌های تعبیه شده به حساب آورد. با این روش می‌توان حالت‌های آسیب ندیده، آسیب دیده و شکست سازه را تشخیص داد. نتایج ارائه شده در اینجا پتانسیل برای تحقق این مدل نظارت هیبریدی را برای سازه‌های کشتی عملیاتی نشان می‌دهد.

References

- Annamdas VGM, Yang Y and Soh CK (2007) Influence of loading on the electromechanical admittance of piezoceramic transducers. *Smart Materials and Structures* 16(5): 1888–1897. Available at: <http://stacks.iop.org/0964-1726/16/i=5/a=045?key=crossref.df20627aa4e380d84e6e1fc3b70f5074>
- ASTM D7905/D7905M-14 (2014) Standard test method for determination of the mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites.
- Bosse S and Lechleiter A (2016) A hybrid approach for structural monitoring with self-organizing multi-agent systems and inverse numerical methods in material-embedded sensor networks. *Mechatronics* 34: 12–37. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957415815001464>
- Bru T, Hellström P, Gutkin R, et al. (2016) Characterisation of the mechanical and fracture properties of a uni-weave carbon fibre/epoxy non-crimp fabric composite. *Data in Brief* 6: 680–695.
- D7264/D7264M-15 (2015) Standard test method for flexural properties of polymer matrix composite materials.
- Giurgiutiu V and Zagari A (2000) Damage detection in simulated aging-aircraft panels using the electro-mechanical impedance technique. In: *Adaptive structures and material systems symposium*, Orlando, FL, 5–10 November, pp. 349–358. New York: ASME.
- Grisso BL (2013) Development of a structural health monitoring prototype for ship structures. Technical Report 468. Washington, DC: Ship Structure Committee.
- Horoschenkoff A, Klein S and Haase K (2006) Structural integration of strain gauges. Technical Report. Darmstadt: HBM GmbH.
- Islam MM and Huang H (2014) Understanding the effects of adhesive layer on the electromechanical impedance (EMI) of bonded piezoelectric wafer transducer. *Smart Materials and Structures* 23(12): 125037. Available at: <http://stacks.iop.org/0964-1726/23/i=12/a=125037?key=crossref.6842bad636c8f7340ddff98bcefb3f1e>
- Jagannathan N, Anil Chandra A and Manjunatha C (2015) Onset-of-growth behavior of mode II delamination in a carbon fiber composite under spectrum fatigue loads. *Composite Structures* 132: 477–483.
- Jones RM (1998) *Mechanics of Composite Materials* (Materials Science and Engineering Series). New York: Taylor & Francis.
- Liang C, Sun F and Rogers C (1994) Coupled electromechanical analysis of adaptive material systems determination of the actuator power consumption and system energy transfer. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 8(4): 335–343.
- Ling Y and Mahadevan S (2012) Integration of structural health monitoring and fatigue damage prognosis. *Mechanical Systems and Signal Processing* 28: 89–104. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327011003980>
- Moll J (2018) Damage detection in grouted connections using electromechanical impedance spectroscopy. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. Epub ahead of print 30 January. DOI: 10.1177/0954406218764226.
- Neuschwander K, Shrestha A, Moll J, et al. (2017) Multichannel device for integrated pitch catch and EMI measurements in guided wave structural health monitoring applications. In: *11th international workshop on structural health monitoring*, Stanford, CA, 12–14 September, pp. 1723–1730. Lancaster, PA: DEStech Publications, Inc.
- Nugroho WH, Purnomo NJH and Soedarto T (2016) An experimental work on wireless structural health monitoring system applying on a submarine model scale. *Journal of Physics: Conference Series* 776: 012094. Available at: <http://stacks.iop.org/1742-6596/776/i=1/a=012094?key=crossref.c5eada03f7b57a606bd3a3b0f13cd7c6>
- Okasha NM, Frangopol DM and Deco A (2010) Integration of structural health monitoring in life-cycle performance assessment of ship structures under uncertainty. *Marine Structures* 23(3): 303–321. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0951833910000389>

Ostachowicz W, Malinowski P and Wandowski T (2017) Highlights and challenges in damage assessment of composite structures. In: 8th ECCOMAS thematic conference on smart structures and materials, Madrid, 5–7 June, pp. 1–15.

Peairs DM, Park G and Inman DJ (2004) Improving accessibility of the impedance-based structural health monitoring method. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 15(2): 129–139.

Phelps B and Morris B (2013) Review of hull structural monitoring systems for navy ships. Technical Report DSTOTR-2818. Australian Government Department of Defence. Available at: <http://dSPACE.dsto.defence.gov.au/dSPACE/handle/dsto/10246>

Piggott M (1989) The interface in carbon fibre composites. *Carbon* 27(5): 657–662. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0008622389901991>

Puck A (1996) *Festigkeitsanalyse Von Faser-matrix-laminaten: Modelle Für Die Praxis*. München: Hanser.

Reed H, Nichols J and Earls C (2013) A modified differential evolution algorithm for damage identification in submerged shell structures. *Mechanical Systems and Signal Processing* 39(1–2): 396–408. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0888327013000976>

Schürmann H (2007) *Konstruieren Mit Faser-kunststoffverbunden: Mit 39 Tabellen*. VDI-[Buch], 2., bearb. und erw. Aufl. Berlin: Springer.

Sham Prasad MS, Venkatesha CS and Jayaraju T (2011) Experimental methods of determining fracture toughness of fiber reinforced polymer composites under various loading conditions. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering* 10: 1263–1275.

Stull CJ, Earls CJ and Koutsourelakis PS (2011) Model-based structural health monitoring of naval ship hulls. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 200(9–12): 1137–1149. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0045782510003427>

Taylor SG, Park G, Farinholt KM, et al. (2013) Diagnostics for piezoelectric transducers under cyclic loads deployed for structural health monitoring applications. *Smart Materials and Structures* 22(2): 025024. Available at: <http://stacks.iop.org/0964-1726/22/i=2/a=025024>

Tinoco HA and Serpa AL (2011) Bonding influence in the electromechanical (EM) admittance of piezoelectric sensors bonded to structures based on EMI technique. In: *Proceedings of the 14th international symposium on dynamic problems of mechanics (DINAME XIV)*, Sao Sebastiao, Brazil, 13–18 March, pp. 335–344.

Tinoco HA and Rosas-Bastidas DA (2016) Experimental study of the debonding effects on the electromechanical impedance of piezo wafer active sensors. In: *Proceedings of III international conference on advanced mechatronics, design and manufacturing technology*, Cali, Colombia, April 2016, pp. 1–10.

Torkildsen HE, Grovlen A, Skaugen A, et al. (2005) Development and applications of full-scale ship hull health monitoring systems for the Royal Norwegian Navy. In: *Recent developments in non-intrusive measurement technology for military application on model- and full-scale vehicles; Meeting proceedings RTO-MP-AVT-124*, Neuilly-sur-Seine Cedex, France: North Atlantic Treaty Organisation, Research & Technology Organisation, pp. 22–21.

Wandowski T, Malinowski PH and Ostachowicz WM (2017) Temperature and damage influence on electromechanical impedance method used for carbon fibre-reinforced polymer panels. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures* 28(6): 782–798.

Wang ZY, Wang QY, Li L, et al. (2017) Fatigue behaviour of CFRP strengthened open-hole steel plates. *Thin-Walled Structures* 115: 176–187. Available at: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263823116306693>

Yuan S, Lai X, Zhao X, et al. (2006) Distributed structural health monitoring system based on smart wireless sensor and multi-agent technology. *Smart Materials and Structures* 15(1): 1–8. Available at: <http://stacks.iop.org/0964-1726/15/i=1/a=029?key=crossref.fbeda99af830284bb3ee1cbd67a52d62>

Zhirnov A, Anufriev M, Pozhar N, et al. (2016) Multipurpose monitoring system for icebreakers: development, implementation, and testing. *MATEC Web of Conferences* 75: 04005. Available at: <http://www.matec-conferences.org/10.1051/mateconf/20167504005>