

تحلیل خمشی و ارتعاشات آزاد ترموالکترومگنتوالاستیک تیر منحنی ساندویچی سه لایه با هسته مسی تقویت شده با گرافن اریگامی مجهز شده با لایه های پیزوالکترومگنتیک برای شرایط مرزی مختلف

در این پژوهش، به تحلیل دقیق رفتار مکانیکی و دینامیکی یک سازه‌ی تیر منحنی ساندویچی پرداخته می‌شود که تحت اثر هم‌زمان بارهای حرارتی، الکتریکی و مغناطیسی قرار دارد. ساختار تیر شامل سه لایه‌ی مجزا و ناهمسان است: لایه‌ی میانی یا هسته از جنس کامپوزیت فلزی-نانوساختاری متشکل از مس (Cu) تقویت‌شده با نانورق‌های گرافن با ساختار اریگامی بوده و دو لایه‌ی بالا و پایین از مواد پیزوالکترومگنتیک تشکیل شده‌اند. استفاده از گرافن اریگامی در هسته، به دلیل توانایی آن در ایجاد ساختارهای قابل بازآرایی و خاصیت جذب انرژی بالا، امکان تنظیم ویژگی‌های مکانیکی مانند سختی معادل، جذب ارتعاش و مقاومت به تغییر شکل را فراهم می‌کند. این ویژگی، در مقایسه با کامپوزیت‌های معمول، پتانسیل بالاتری در کنترل پاسخ سازه‌ای تحت شرایط بارگذاری پیچیده ارائه می‌دهد.

از سوی دیگر، لایه‌های پیزوالکترومگنتیک (PEM) نقش کلیدی در کوپل‌سازی بین حوزه‌های مکانیکی، الکتریکی و مغناطیسی ایفا می‌کنند. این مواد چندکارکرده قادرند در پاسخ به تنش مکانیکی، میدان الکتریکی و/یا مغناطیسی تولید کرده و بالعکس تحت تأثیر این میدان‌ها، تغییر شکل مکانیکی از خود نشان دهند. چنین ویژگی‌هایی باعث می‌شود این تیر بتواند به عنوان یک سازه هوشمند با قابلیت‌های حسگری و عملگری نیز مورد استفاده قرار گیرد.

جهت مدل‌سازی دقیق رفتار این تیر منحنی، از تئوری مرتبه بالاتر لایه‌ای (Higher-Order Layerwise Theory) بهره گرفته می‌شود. برخلاف تئوری‌های کلاسیک (مانند اویلر-برنولی) و یا تئوری‌های با مرتبه پایین‌تر مانند تئوری تیموشنکو، این تئوری توانایی مدل‌سازی توزیع پیوسته جابجایی در راستای ضخامت تیر را داشته و امکان در نظر گرفتن لغزش بین لایه‌ها را فراهم می‌سازد. بدین ترتیب، اثرات پیچیده‌ی برهم‌کنش بین لایه‌ها به‌ویژه در ساختارهای با ناهمگنی شدید، با دقت بالاتری قابل پیش‌بینی خواهد بود.

با توجه به تأثیر همزمان سه میدان حرارتی، الکتریکی و مغناطیسی، تحلیل سازه در چارچوب ترموالکترومگنتوالاستیسیته (Thermo-Electro-Magneto-Elasticity) انجام می‌پذیرد. در این چارچوب، روابط کوپل‌شده‌ی میان تنش، کرنش، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی و دما به صورت جامع در مدل لحاظ می‌گردند. این موضوع منجر به ایجاد معادلات دیفرانسیل پیچیده با کوپل غیرخطی بین حوزه‌های فیزیکی مختلف می‌شود که تحلیل آن‌ها نیازمند روش‌های پیشرفته ریاضی و عددی است.

برای استخراج معادلات حاکم بر رفتار تیر، از اصل همیلتون استفاده می‌شود که مبتنی بر موازنه‌ی انرژی در سیستم دینامیکی است. این اصل با در نظر گرفتن انرژی‌های جنبشی، پتانسیل کرنشی، انرژی حرارتی، و کار انجام‌شده توسط میدان‌های الکترومغناطیسی، معادلات حرکت حاکم بر سازه را استخراج می‌نماید. در حالت تحلیل خمش ایستا، با صرف نظر از اثرات زمانی، معادلات دینامیکی به فرم ایستایی کاهش یافته و با بهره‌گیری از روش‌های نیمه تحلیلی مانند Galerkin قابل حل خواهند بود.

در مقابل، برای تحلیل ارتعاشات آزاد، معادلات به صورت کامل دینامیکی حفظ شده و تبدیل به یک مسئله مقدار ویژه (Eigenvalue Problem) می‌گردند. در این حالت، با حل معادلات دیفرانسیل کوپل‌شده، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودهای ارتعاشی سازه محاسبه می‌شود که در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر تحریکات دینامیکی یا جذب ارتعاش نقش حیاتی دارد.

در راستای پیاده‌سازی مدل و انجام تحلیل‌های عددی، یک کد پارامتریک در محیط MATLAB توسعه داده می‌شود که قابلیت تعریف و تغییر پارامترهایی نظیر مشخصات هندسی تیر (شعاع انحناء، ضخامت هر لایه)، درصد گرافن در هسته، خواص مواد، شدت و جهت میدان‌های خارجی، و شرایط مرزی (ساده، گیردار، آزاد) را داراست. خروجی‌های این برنامه به صورت نمودارهایی شامل منحنی پاسخ خمش، توزیع تنش، فرکانس‌های طبیعی و شکل مودها برای حالات مختلف ارائه خواهد شد. از این طریق می‌توان تأثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد مکانیکی و دینامیکی سازه را به طور جامع مورد بررسی قرار داد.

در ادامه‌ی پروژه، مسیرهایی برای توسعه مدل نیز پیش‌بینی شده است. از جمله آن‌ها می‌توان به تحلیل پایداری (Buckling) تحت بارهای محوری و حرارتی، و بهینه‌سازی پارامترهای سازه‌ای با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک (GA) اشاره کرد. همچنین، جهت صحت‌سنجی مدل تحلیلی توسعه داده‌شده،

نتایج حاصل با شبیه‌سازی‌های عددی انجام‌شده در نرم‌افزارهای اجزای محدود نظیر ABAQUS یا COMSOL Multiphysics مقایسه و ارزیابی خواهند شد.

