مقاله

کامپوزیت‌های سازه‌ای هوشمند

بهمن میرزاخانی، استادیار گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اراک
b-mirzakhani@araku.ac.ir
شهریار نظری آبکنار، دانشجوی کارشناسی ارشد مکاترونیک، دانشکدهٔ فنی و مهندسی، دانشگاه اراک
s-nazari@arshad.araku.ac.ir

چکیده

سازه‌های هوشمند از این حیث که به کاهش خطرات، کنترل ارتعاشات سازه‌ای، نظارت بر عیوب سازه‌ها، مهندسی حمل‌ونقل، کنترل حرارت و صرفه‌جویی در مصرف انرژی کمک شایانی می‌کنند، اهمیت بسیاری دارند. استفاده از مواد سازه‌ای - همچون کامپوزیت‌ها و بتن‌های هوشمند - نیاز به جاسازی یا اتصال ادوات اندازه‌گیری را درون ماده از بین می‌برد، و در نتیجه هزینهٔ تولید کاهش، مقاومت سازه افزایش و کاهش خواص مکانیکی ماده به حداقل مقدار ممکن خواهد رسید. سازه‌های هوشمند قادرند همچون انسان نسبت به محرکی خاص عکس‌العمل مناسب نشان دهند. احساس، ویژگی اساسی یک سازهٔ هوشمند است. ماده‌ای که به‌عنوان کامپوزیت سازه‌ای به‌کار گرفته می‌شود و خود نیز یک حسگر است، اصطلاحاً کامپوزیت خودحسگر[1] نامیده می‌شود. این مقاله به معرفی مفاهیم و کاربردهای کامپوزیت‌های سازه‌ای هوشمند می‌پردازد. کامپوزیت‌های سازه‌ای مورد بررسی نیز کامپوزیت‌های زمینه‌سیمانی و زمینه‌پلیمری می‌باشند.

واژگان کلیدی: کامپوزیت‌های هوشمند، حسگر، کامپوزیت‌های سازه‌ای، کامپوزیت زمینه‌سیمانی، زمینه‌پلیمری

مقدمه

کامپوزیت‌های سازه‌ای هوشمند به آن دسته از مواد سازه‌ای چندمنظوره گفته می‌شود که قادر به سنجش کرنش، تنش، آسیب یا دما می‌باشند. از این مواد می‌توان در تولید انرژی ترموالکتریک، حفاظ تداخل الکترومغناطیسی[2]، یکسوساز جریان الکتریکی و کاهندهٔ ارتعاشات استفاده کرد. این قابلیت‌ها با به‌کارگیری علم مواد سبب افزایش عملکرد سازه‌ای بدون از دست‌دادن خواص مقاومتی می‌شود. البته این قابلیت‌ها بدون جاسازی عاملی خارجی در سازه قابل دسترسی است. کامپوزیت‌های هوشمند را می‌توان در دو نوع کامپوزیت‌های زمینه‌سیمانی متشکل از الیاف کوتاه رسانای الکتریسیته و کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری به‌همراه الیاف کربن پیوسته یافت. کامپوزیت‌های زمینه‌سیمانی در زیرساخت‌ها و کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری در سازه‌های سبک استفاده می‌شوند. احساس شامل سنجش تنش یا کرنش (برای کنترل ارتعاشات سازه‌ای، نظارت بر ترافیک و

توزین)، سنجش آسیب (شامل آسیب حرارتی و مکانیکی)، سنجش دما (برای کنترل حرارتی، کاهش خطر و کنترل عملکرد سازه‌ای) و ترموالکتریسیته (برای کنترل حرارتی، تولید انرژی الکتریکی و صرفه‌جویی در مصرف انرژی) می‌شود. توانایی کامپوزیت‌های سازه‌ای برای انجام این‌گونه فعالیت‌ها در آزمایشگاه‌ها ثابت شده است و کاربرد آنها در این حوزه‌ها در بخش انتهایی مقاله معرفی خواهد شد.

کامپوزیت‌های زمینه‌سیمانی

کامپوزیت‌های زمینه‌سیمانی شامل بتن (متشکل از سنگ‌دانه‌های ریز و درشت)، ملات سیمان (متشکل از سنگ‌دانه‌های ریز) و خمیر سیمان (بدون سنگ‌دانه‌های ریز و درشت) می‌باشد. مواد افزودنی نیز به‌منظور بهبود خواص کامپوزیت می‌تواند به مخلوط اضافه شوند. مواد افزودنی ذراتی چون غبار سیلسکا یا لاتکس (پلیمری ذره‌ای‌شکل) می‌باشد. الیاف کوتاه مانند پلیمر، فولاد، شیشه یا الیاف کربن و مایعاتی نظیر متیل سلولز محلول در آب نیز می‌توانند به‌کار گرفته شوند. افزودنی‌ها برای تبدیل یک کامپوزیت به کامپوزیتی هوشمند مورد استفاده قرار می‌گیرند و خواص سازه‌ای را نه‌تنها تغییر نمی‌دهند، که آن را بهبود نیز می‌بخشند.

در ادامه خواص به‌وجود آمده در اثر به‌کارگیری این افزودنی‌ها بررسی خواهد شد.

قابلیت بازتاب امواج رادیویی

قابلیت رسانایی الکتریکی الیاف کربن سبب خواهد شد که در اثر افزودن الیاف کوتاه کربن به سیمان، قابلیت کامپوزیت به بازتاب امواج رادیویی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. بدین صورت می‌توان از این کامپوزیت‌ها به‌عنوان حفاظ EMI و راهنمای جانبی در بزرگراه‌ها استفاده کرد [۱]. تارهای[۳] کربنی ناپیوسته با قطر ۰/۱ میکرومتر[۴] بازتاب بهتری در برابر امواج رادیویی نسبت به الیاف کربنی Pitch (با قطر ۱۵ میکرومتر) دارند. اما الیافی با قطر ۱۵ میکرومتر به‌عنوان تقویت‌کننده در مقابل تارهایی با قطر ۰/۱ میکرومتر مؤثرتر عمل می‌کند [۲]. از نظر بازتاب امواج رادیویی، کامپوزیت‌های زمینه‌سیمانی در مقایسه با کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری مطلوب‌ترند. این تفاوت ناشی از قابلیت رسانش اندک سیمان در مقایسه با عدم رسانش الکتریکی پلیمر است. قابلیت رسانش سیمان سبب می‌شود حتی هنگامی‌که تراکم الیاف کربن پایین‌تر از آستانهٔ نفوذ[۵] باشد، امکان اتصال الکتریکی میان الیاف برقرار گردد.

ضریب هدایت الکتریکی کامپوزیت با زمینهٔ نارسانا بستگی به ضریب هدایت، کسر حجمی، اندازه و نسبت طول به عرض[۶] مادهٔ افزودنی دارد. ضریب هدایت کامپوزیت همچنین به توزیع مادهٔ افزودنی درون کامپوزیت بستگی دارد. توزیع مادهٔ افزودنی درون کامپوزیت نیز با روش ساخت کامپوزیت در ارتباط است. در حالت کلی، ضریب هدایت کامپوزیت به‌صورت غیرخطی با افزایش کسر حجمی مادهٔ افزودنی افزایش می‌یابد. ضریب هدایت در کسر حجمی معینی به‌نام آستانهٔ نفوذ ناگهان افزایش می‌یابد. آستانهٔ نفوذ کسر حجمی مادهٔ افزودنی است که در آن واحدهای مادهٔ افزودنی با یکدیگر در تماس‌اند و بدین ترتیب مسیرهای هدایت الکتریکی درون کامپوزیت تشکیل می‌شود. در نقاط بالا و پایین آستانهٔ نفوذ ضریب هدایت با افزایش کسر حجمی مادهٔ افزودنی به‌تدریج رشد می‌کند [۲].

سنجش کرنش

سیمان تقویت‌شده با الیاف کربن می‌تواند کرنش خود را حس کند. این قابلیت با بهره‌گیری از اثر کرنش بر مقاومت الکتریکی حجمی[۷] و قطبش الکتریکی[۸] امکان‌پذیر می‌شود [۳]. کشش محوری سیمان تقویت‌شده با الیاف کربن در محدودهٔ الاستیک سبب افزایش برگشت‌پذیر[۹] مقاومت الکتریکی حجمی در راستای طولی و عرضی می‌شود. به‌گونه‌ای‌که مقدار ضریب مقیاس[۱۰] (تغییرات جزئی مقاومت

بر واحد کرنش) در دو راستا از نظر اهمیت مشابه یکدیگر می‌باشد. در مقابل، فشار محوری سبب کاهش برگشت‌پذیر مقاومت در دو راستا می‌شود. بدون وجود الیاف، تغییرات مقاومت اندک و کمتر برگشت‌پذیر است. افزایش مقاومت نشانگر تولید عیوب، تحت کشش و بهبود عیوب، تحت فشار می‌باشد. لازم به‌ذکر است که تغییرات جزئی مقاومت بر واحد کرنش (ضریب مقیاس) تا ۷۰۰ واحد متغیر است [۴].

در اثر کشش محوری مقاومت افزایش می‌یابد و از سوی دیگر، فشار محوری سبب کاهش مقاومت در راستای تنش می‌شود. چون میزان کرنش و تغییرات مقاومت می‌توانند مثبت و یا منفی باشند، مقدار ضریب مقیاس نیز برای پدیده‌های کشش و فشار در دو راستای طولی و عرضی از نظر اندازه و علامت متفاوت می‌باشد. تغییر مقاومت در دیگر جهات نیز مشابه تغییر مقاومت در جهات طولی و عرضی تحت کشش محوری می‌باشد. با وجود آنکه ضریب مقیاس در راستای طولی و عرضی قابل قیاس است، اما تغییر جزئی مقاومت تحت کشش محوری در راستای طولی به‌مراتب بیشتر از راستای عرضی است. بنابراین استفاده از مقاومت طولی برای خود حسگری ترجیح داده می‌شود. رفتار مشابهی نیز در مقاومت الکتریکی حجمی سیمان تقویت‌شده با الیاف کربن - که به شکل لایه‌ای پوششی[11] استفاده می‌شود - مشاهده شده است [۵]. اثر مستقیم پیزوالکتریک (اثر پیزوالکتریک به‌طور عمده از جابه‌جایی یون‌ها در سیمان حاصل می‌شود) در ملات سیمان نیز به‌وسیلهٔ اندازه‌گیری ولتاژ و مشاهدهٔ قطبش الکتریکی هنگام اعمال پی‌درپی بار فشاری مشاهده شده است.

سنجش آسیب

آسیب‌های مکانیکی و حرارتی، هر دو، در مواد پایهٔ سیمانی در خور اهمیت‌اند. آسیب در مواد پایهٔ سیمانی حتی برای آسیب‌های کوچک با حساسیت بالا نیز قابل اندازه‌گیری است. زمانی‌که صحبت از آسیب به میان می‌آید، آسیب‌های مکانیکی بیش از آسیب‌های حرارتی مد نظر قرار می‌گیرند. این در حالی است که آسیب‌های حاصل از انجماد و یخزدایی‌های پی‌درپی، همچنین آسیب‌های حاصل از شعلهٔ آتش نیز مهم و زیان‌آورند [۶].

مواد پایهٔ سیمانی قادر به سنجش آسیب‌های کلی و جزئی می‌باشند که این آسیب‌ها، آسیب‌های محدودهٔ الاستیک را نیز در بر می‌گیرد. در این مواد، مقاومت الکتریکی همسو با رشد آسیب افزایش می‌یابد. استفاده از الیاف کوتاه کربن به‌عنوان مادهٔ افزودنی حساسیت را بهبود می‌بخشد. آسیب‌های سطحی و درونی مواد پایه سیمانی (مثلاً مابین مادهٔ پایه سیمانی و میل‌گرد، یا مابین مواد پایه سیمانی قدیمی و جدید) هر دو قابل اندازه‌گیری‌اند. آسیب داخلی یک مادهٔ پایه سیمانی توسط افزایش مقاومت الکتریکی حجمی ماده نمایانگر می‌شود. به‌عبارت دقیق‌تر، مادهٔ پایه سیمانی خود به‌عنوان حسگر عمل می‌کند. آسیب سطحی نیز توسط افزایش مقاومت الکتریکی سطحی[12] نمایانگر می‌شود. این بدان معناست که سطح ماده خود به‌عنوان یک حسگر عمل می‌کند. کرنش و آسیب، به‌صورت همزمان، با اندازه‌گیری مقاومت می‌توانند سنجیده شوند. به‌عبارت دیگر، در حالت تنش/کرنش (هنگام بارگذاری دینامیکی) که وقوع آسیب را محتمل می‌سازد، یافتن منشأ آسیب تسهیل می‌گردد. همان‌طور که گفته شد، وقوع آسیب توسط افزایش مقاومت نمایانگر می‌شود و هنگامی‌که مقدار تنش افزایش یابد، مقدار مقاومت بیشتر و از سوی دیگر کمتر برگشت‌پذیر می‌گردد. تغییر مقاومت می‌تواند به‌صورت ناگهانی یا تدریجی، هنگام بارگذاری در نمودار تنش - مقاومت، جابه‌جا شود [۷].

آسیب حرارتی نیز در یک چرخهٔ دما[13] توسط اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی قابل سنجش است. حتی آسیب‌های جزئی حرارتی نیز سبب افزایش بازگشت‌ناپذیر مقاومت الکتریکی می‌شود. در مقابل افزایش دما سبب کاهش برگشت‌پذیر مقاومت می‌شود. بدین ترتیب آسیب حرارتی و

دما به‌صورت همزمان و مجزا از یکدیگر به‌واسطهٔ اندازه‌گیری مقاومت سنجیده می‌شوند [۶].

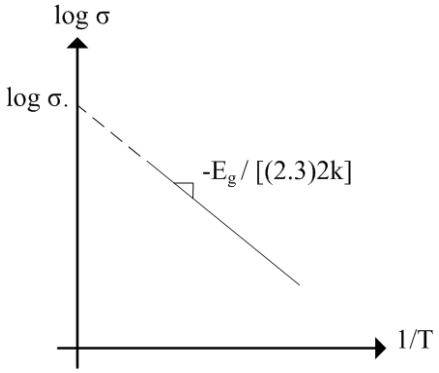
ترمیستورها

ترمیستور[۱۴] وسیله‌ای ترموالکتریک، متشکل از ماده‌ای نیمه‌رسانا (همان مادهٔ پایه سیمانی) است که مقاومت الکتریکی آن با افزایش دما تغییر می‌کند. در واقع، ترمیستور وسیله‌ای برای اندازه‌گیری دماست. دما توسط هدایت الکتریکی نشان داده می‌شود. هدایت الکتریکی نیز عکس مقاومت الکتریکی است. مادهٔ پایه سیمانی تقویت‌شده با الیاف کربن، از آن‌رو که مقاومت الکتریکی آن به‌صورت برگشت‌پذیر با افزایش دما کاهش می‌یابد، یک ترمیستور است. انرژی فعال‌سازی[۱۵] (برحسب الکترون ولت) از هدایت الکتریکی ترمیستورهای نیمه‌رسانا قابل اندازه‌گیری است. بدون وجود الیاف کربن، حساسیت ترمیستور کم است. وابستگی دمایی مقاومت الکتریکی، اطلاعات اساسی پیرامون سازوکار هدایت، به‌ویژه انرژی فعال‌سازی هدایت، به‌دست می‌دهد [۸].

انرژی فعال‌سازی، انرژی لازم برای جهش الکترون از یک لایه به لایهٔ دیگر است. این انرژی هدایت الکتریکی درون ماده را امکان‌پذیر می‌کند. نمودار آرنیوس[۱۶]، لگاریتم هدایت الکتریکی برحسب معکوس دمای مطلق، در شکل ۱ نمایش داده شده است. شیب نمودار معرف انرژی فعال‌سازی برای فرایند گرم یا سردشدن است. رابطهٔ ۱ بیانگر معادلهٔ خط رسم‌شده در نمودار آرنیوس می‌باشد.

$$\log\sigma = \log\sigma_0 - \frac{E_g}{(2.3)2kT} \qquad (۱)$$

به‌طوری‌که در این رابطه σ هدایت الکتریکی برحسب $(\Omega.cm)^{-1}$، E_g اختلاف انرژی بین لایهٔ هدایت و لایهٔ والانس برحسب الکترون ولت، k ثابت بولتزمن و نهایتاً T دمای مطلق برحسب کلوین می‌باشد. لازم به‌ذکر است که هدایت الکتریکی فلزات با افزایش دما کاهش می‌یابد، در حالی‌که هدایت الکتریکی نیمه‌رساناها با افزایش دما افزایش پیدا می‌کند.



شکل ۱. نمودار آرنیوس

تغییرات هدایت الکتریکی برحسب دما برای مادهٔ نیمه‌رسانا

تجهیزات ترموالکتریک

پدیدهٔ زیبک[۱۷] پدیده‌ای ترموالکتریک است و مبنای کارکرد ترموکوپل‌ها و تولید انرژی ترموالکتریک می‌باشد. این پدیده ناشی از حرکت حامل‌های جریان از نقطهٔ گرم به سرد درون ماده می‌باشد و به‌موجب آن، بین این دو نقطه اختلاف پتانسیل به‌وجود می‌آید. اختلاف ولتاژ ناشی از حرکت حامل‌های سیار از نقطهٔ گرم به سرد را ولتاژ زیبک بین نقاط گرم و سرد می‌نامند. تغییر ولتاژ زیبک بر اثر افزایش دما به اندازهٔ یک درجهٔ سانتی‌گراد، توان ترموالکتریک نامیده می‌شود. توان ترموالکتریک را توان ترمو یا ضریب زیبک نیز می‌نامند. حفره‌ها (حامل‌های مثبت) تمایل دارند تا توان ترموالکتریک مثبت‌تر شود، در حالی‌که الکترون‌ها (حامل‌های منفی) تمایل دارند تا توان ترموالکتریک منفی‌تر گردد [۹].

پدیدهٔ زیبک در سیمان تقویت‌شده با الیاف کربن حاصل از وجود الکترون‌ها و یا یون‌های زمینهٔ سیمانی و حامل‌های مثبت به‌وجود آمده از الیاف می‌باشد. هنگامی‌که درصد جرمی الیاف درون ملات سیمان (بدون مواد افزودنی) بین ۰/۵ تا ۱/۰ درصد گردد، توان ترموالکتریک مطلق[۱۸] ۲- میکرو ولت بر درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. توزیع

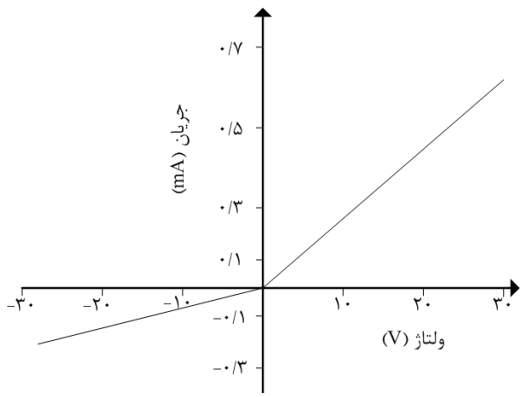
حامل‌های مثبت با افزایش تعداد الیاف به‌طور یکنواخت افزایش می‌یابد و توان ترموالکتریک مطلق مثبت‌تر می‌گردد. با به‌کارگیری الیاف کربن به‌همراه یک مادهٔ پذیرنده[19] (مانند برم)، توزیع حامل‌های مثبت بهبود می‌یابد و توان ترموالکتریک مطلق به ۱۷ میکرو ولت بر درجهٔ سانتی‌گراد می‌رسد.

الکترون آزاد موجود در الیاف فلزی مانند فولاد باعث می‌شود تا سیمان با الیاف فلزی دارای توان ترموالکتریک منفی‌تری نسبت به سیمان بدون الیاف باشد. دست‌یابی به توان ترموالکتریک بسیار مثبت قابل توجه است. ماده‌ای با توان ترموالکتریک مثبت و ماده‌ای با توان ترموالکتریک منفی می‌تواند یک پیوند ترموکوپلی تشکیل دهد (هرچه این اختلاف بیشتر باشد، ترموکوپل حساس‌تر است). به‌عنوان نمونه ترکیب روی و آنتیموان[20] دارای توان ترموالکتریک ۲۲۰ میکرو ولت بر درجهٔ سانتی‌گراد می‌باشد. اکثر مواد ترموالکتریکِ نیمه‌رسانا گران‌اند و خواص مکانیکی ضعیفی دارند [۱۰].

دیودها: پیوند p-n

پیوند p-n بین یک مادهٔ رسانا نوع p (ماده‌ای رسانا که حفره‌ها به‌عنوان حامل‌های جریان می‌باشند) و یک مادهٔ رسانا نوع n (ماده‌ای که الکترون‌ها به‌عنوان حامل‌های جریان می‌باشند) سبب یکسوسازی جریان الکتریسیته می‌شود. ویژگی جریان - ولتاژ در این پیوند به‌گونه‌ای است که اگر ولتاژ سمت p نسبت به سمت n مثبت باشد، جریان عبوری زیاد است و اگر ولتاژ سمت n نسبت به سمت p مثبت باشد، جریان عبوری کوچک می‌باشد.

پیوند p-n قلب مدارهای الکتریکی و اساس کار دیودها و ترانزیستورهاست. همانند پیوند p-n، پیوند $n\text{-}n^{+}$ بین یک مادهٔ رسانا نوع n ضعیف و یک مادهٔ رسانا نوع n قوی (n^{+}) تشکیل می‌شود. امروزه یک پیوند p-n از تماس یک مادهٔ نیمه‌رسانا نوع p و یک مادهٔ نیمه‌رسانا نوع n حاصل می‌شود. هر دو ماده با افزودن مقدار مناسبی ناخالصی به‌عنوان دهندهٔ[21] الکترون (برای نیمه‌رساناهای نوع n) و یا پذیرندهٔ الکترون (برای نیمه‌رساناهای نوع p) تولید می‌شود. سیمان به‌طور ذاتی و با مقدار اندکی از الکترون، مادهٔ نوع n ضعیف محسوب می‌شود. با افزودن مقدار کافی از الیاف کوتاه کربن به سیمان، کامپوزیت نوع p حاصل می‌شود. افزودن الیاف کوتاه فولاد، سبب تشکیل کامپوزیتی از نوع n قوی می‌شود. به‌عبارت دیگر، الیاف کربن با ایجاد حفره و الیاف فولاد با ایجاد الکترون سبب هدایت الکتریکی می‌شوند [۱۱]. یکسوساز جریان الکتریکی و ترموکوپل‌ها از طریق پیوندهای پایه سیمانی قابل دست‌یابی می‌باشند (پیوند نوع p-n نسبت به پیوند نوع $n\text{-}n^{+}$ به‌دلیل عملکرد بهتر ترجیح داده می‌شود). با کنار هم گذاشتن دو نوع مخلوط سیمان که خواص الکتریکی ناهمسان دارند، این پیوندها ساخته می‌شوند. شکل ۲ مشخصهٔ جریان - ولتاژ یک پیوند p-n پایه سیمانی را نمایش می‌دهد.



شکل ۲. مشخصهٔ جریان - ولتاژ یک پیوند p-n پایه سیمانی

کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری

کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری برای کاربردهای سازه‌ای از الیاف پیوستهٔ کربن، پلیمر و شیشه تشکیل می‌شوند. الیاف پیوسته به‌عنوان تقویت‌کننده، نسبت به الیاف کوتاه دارای عملکرد بهتری می‌باشند. خواص مکانیکی انواع الیاف طبیعی و مصنوعی به‌کار رفته در کامپوزیت‌های پلیمری در مرجع ۱۲ یافت می‌شود. همچنین خواص حرارتی و

الکتریکی کامپوزیت‌های پلیمری و ارزیابی انواع تقویت‌کننده‌ها در مرجع ۱۳ معرفی شده است.

کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری با الیاف کربن در صنایع هوافضا، خودروسازی و سازه‌های عمرانی مورد استفاده قرار می‌گیرند (البته این الیاف برای تقویت بتن بسیار گران قیمت‌اند). الیاف کربن رسانای جریان الکتریسیته می‌باشند، در حالی‌که الیاف پلیمر و شیشه، رسانای جریان الکتریسیته نمی‌باشند. این بدان معناست که کامپوزیت‌های الیاف کربنی در میان کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری هوشمند کاربرد بیشتری دارند.

سنجش کرنش

سازه‌های هوشمندی که قادرند کرنش خود را حس کنند، برای کنترل ارتعاشات سازه‌ای با ارزش‌اند. کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی با الیاف کربن قادرند تا کرنش خود را بدون حضور حسگر درک کنند. مقاومت الکتریکی این کامپوزیت‌ها در جهت طولی با عکس کرنش متناسب می‌باشد و چون زاویهٔ چیدمان الیاف تغییر می‌یابد، ضریب مقیاس نیز تا ۴۰ واحد متغیر است. کشش در جهت الیاف کامپوزیت، زاویهٔ چیدمان الیاف را افزایش می‌دهد. با افزایش زاویهٔ چیدمان احتمال تماس الیاف با یکدیگر بیشتر می‌شود. در حالی‌که از مقاومت در جهت طولی کاسته می‌شود، مقاومت در جهت عرضی افزایش می‌یابد.

میزان حساسیت به کرنش (ضریب مقیاس)، همان‌گونه که پیشتر ذکر شد، از تقسیم $\Delta R/R_0$ (تغییرات جزئی مقاومت الکتریکی) بر مقدار کرنش حاصل می‌شود. مقدار ضریب مقیاس برای $\Delta R/R_0$ در جهت طولی منفی (۱۲- تا ۱۸-) و در جهت عرضی مثبت می‌باشد (۲۴ تا ۱۷). این مقادیر برای سنجش میزان حساسیت به کرنش در جهات طولی و عرضی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از مقاومت طولی یا عرضی برای سنجش کرنش به هندسهٔ سازهٔ هوشمند بستگی دارد [۱۴]. تغییر ابعاد نیز سبب افزایش مقاومت الکتریکی طولی هنگام اعمال بار کششی و کاهش مقاومت الکتریکی هنگام اعمال بار فشاری می‌شود. در مقابل، مقاومت الکتریکی طولی با اعمال بار کششی، کاهش و با اعمال بار فشاری، افزایش می‌یابد. مقدار $\Delta R/R_0$ ناشی از اعمال بار کششی تقریباً هفت الی یازده برابر مقدار $\Delta R/R_0$ ناشی از تغییر ابعاد می‌باشد. بنابراین می‌توان از $\Delta R/R_0$ ناشی از تغییر ابعاد در مقابل $\Delta R/R_0$ ناشی از اعمال بار صرف‌نظر کرد.

با اعمال بار متناوب کششی مشاهده می‌شود که مقدار مقاومت الکتریکی (طولی و عرضی) به‌طور برگشت‌ناپذیر پس از اولین چرخه کاهش می‌یابد. این رفتار به‌سبب از میان رفتن نظم موجود در الیاف ناشی می‌شود. هرچه الیاف نامنظم‌تر باشد، احتمال تماس آنها با یکدیگر بیشتر می‌شود.

سنجش آسیب

هنگام استفاده از قطعات کامپوزیت، تشکیل ریزترک‌ها در پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری مسئلهٔ خطرناکی به‌شمار می‌آید؛ زیرا گسترش و به‌هم پیوستن ریزترک‌ها منجر به شکست‌های ناگهانی در قطعات شده، عمر کاری قطعات را کاهش خواهد داد. بنابراین آگاهی اولیه برای تشخیص و ترمیم ریزترک‌ها جهت حذف خطرات پنهانی امری مهم و ضروری است. سنجش آسیب (در اثر تنش یا حرارت، تحت شرایط ایستا یا پویا) در کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی با الیاف کربن به‌دلیل تغییر مقاومت الکتریکی هنگام بروز آسیب قابل دستیابی است.

آسیب‌های جزئی به‌صورت آسیب‌های کوچک زمینه یا اختلال در نظم الیاف با کاهش برگشت‌ناپذیر مقاومت الکتریکی طولی و عرضی مشخص می‌شود. دلیل این امر افزایش تعداد تماس‌ها میان الیاف می‌باشد. آسیب‌های جدی‌تر در اشکال تورق[۲۲] یا تخریب سطح مشترک درون لایه‌ای[۲۳] از طریق افزایش مقاومت عرضی به‌سبب کاهش تعداد تماس‌ها میان الیاف لایه‌های مختلف نشان داده می‌شود. افزایش برگشت‌ناپذیر مقاومت طولی آسیب‌های عمده‌ای را به‌سبب از هم گسیختگی الیاف مشخص

می‌کند. در شرایط خستگی مکانیکی، شروع تورق هنگام رسیدن به ۳۰ درصد عمر خستگی و شروع از هم گسیختگی الیاف هنگام رسیدن به ۵۰ درصد عمر خستگی مشاهده شده است. هنگام چرخهٔ حرارتی نیز افزایش مقاومت تماسی سطح مشترک، آسیب سطح مشترک درون لایه‌ای را نشان می‌دهد [۱۵].

سنجش دما

با استفاده از کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی با الیاف پیوسته کربن به‌عنوان ترمیستور و ترموکوپل می‌توان دما را سنجید. خاصیت ترمیستوری از کاهش برگشت‌پذیر مقاومت الکتریکی تماسی در سطح مشترک میان لایه‌های الیاف[۲۴] به همراه دما نشأت می‌گیرد. هر لایهٔ الیاف از طناب‌های[۲۵] الیافی تشکیل شده است. طناب‌های الیافی خود نیز از هزاران رشته الیاف ساخته شده است. الیاف موجود در طناب‌های الیافی ممکن است به یکدیگر تنیده شده باشند. قطر هر الیاف بین ۷ تا ۱۲ میکرومتر می‌باشد. هر لایه از کامپوزیت از چندین لایهٔ الیاف تشکیل می‌شود. تشکیل ترک بین طناب‌های الیافی، که در یک لایهٔ الیافی قرار دارند، ضریب هدایت در جهت عرضی را کاهش می‌دهد. به‌طریقی مشابه ایجاد ترک بین لایه‌های الیافی مجاور که در هنگام تورق روی می‌دهد، تعداد تماس‌های میان الیاف را کاهش می‌دهد؛ بنابراین ضریب هدایت در جهت ضخامت کاهش می‌یابد.

خاصیت ترموکوپلی نیز با به‌کارگیری الیاف کربن نوع n و نوع p در لایه‌های الیافی مختلف حاصل می‌شود. حساسیت ترموکوپل و خطی‌بودن پاسخ به ورودی مشابه و یا برتر از انواع ترموکوپل‌های تجاری می‌باشد. با استفاده از دو لایهٔ الیافی متقاطع (با زاویهٔ ۹۰ درجه نسبت به هم) یک آرایهٔ دوبعدی از ترمیستورها یا پیوندهای ترموکوپلی به‌دست می‌آید. بدین ترتیب می‌توان دما را سنجید.

استفاده از پیوندهایی که از مواد نوع n و نوع p قوی تشکیل شده‌اند حساسیت ترموکوپل را به‌میزان ۸۲ میکرو ولت بر درجهٔ سانتی‌گراد افزایش می‌دهد. نیمه‌رساناها دارای ضریب زیبک بسیار بیشتری نسبت به فلزات می‌باشند. اما نیاز به داشتن ترموکوپل‌هایی به شکل سیم‌های بلند استفاده از ترموکوپل‌هایی با جنس فلزی را رایج کرده است. الیاف کربن Intercalated نیز دارای ضریب زیبک به‌مراتب بیشتری نسبت به فلزات می‌باشد [۱۶]. اما برخلاف نیمه‌رساناها استفاده از این الیاف برای کاربردهای عملی به‌عنوان ترموکوپل مناسب است [۱۷].

حساسیت ترموکوپلی پیوندهای کامپوزیت زمینه‌اپوکسی با الیاف کربن مستقل از مدت زمان عمل‌آوری[۲۶] است و برای پیوندهای هم‌جهت و متقاطع مشابه یکدیگر می‌باشد. پدیدهٔ ترموکوپلی کاملاً وابسته به تفاوت میان خواص حجمی[۲۷] دو جزء شرکت‌کننده است. به‌عبارت دیگر، سطوح مشترک درون لایه‌ای صرف‌نظر از ترتیب چیدمان الیاف در لایه‌های گوناگون کامپوزیت می‌توانند به‌عنوان پیوندهای ترموکوپلی به‌کار گرفته شوند [۱۶].

با وجود اینکه اپوکسی نارساناست و در محل پیوند نیز وجود دارد، اتصال بخشی از الیاف در لایه‌های الیافی مجاور سبب برقراری مسیر هدایت الکتریکی عمود بر جهت پیوند می‌شود.

نتیجه‌گیری

کامپوزیت‌های سازه‌ای هوشمند شامل کامپوزیت‌های زمینه‌سیمانی و زمینه‌پلیمری می‌باشند. کامپوزیت‌های زمینه‌سیمانی دارای الیاف کوتاه کربنی و کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری دارای الیاف پیوستهٔ کربن می‌باشند. قابلیت هدایت الکتریکی الیاف کربن سبب تغییر مقاومت الکتریکی جریان مستقیم کامپوزیت‌ها در اثر کرنش، آسیب یا دما می‌شود و به‌موجب آن می‌توان از آنها به‌عنوان حسگر استفاده کرد.

سیمان با الیاف کربن به‌عنوان حسگر تنش در سازه‌های عمرانی نظیر جاده‌ها و پل‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین می‌توان از این نوع سیمان به‌عنوان پوششی روی

سازه‌های بتنی برای سنجش کرنش استفاده کرد. وابستگی هدایت الکتریکی به دما نیز می‌تواند برای سنجش دما به‌کار گرفته شود. چون بتن کاربرد وسیعی در ساختمان‌سازی دارد و صرفه‌جویی در مصرف انرژی و کنترل حرارت اهمیت دارد، بهره‌برداری از رفتار ترموالکتریک بتن مطلوب می‌باشد. سیمان با الیاف کربن به‌دلیل تغییر در مقاومت الکتریکی نسبت به آسیب ایجادشده می‌تواند به‌عنوان ابزاری برای برآورد مقدار آسیب خستگی و پیش‌بینی عمر خستگی سازه در برابر بارهای دینامیکی مورد استفاده قرار گیرد. کامپوزیت‌های زمینه‌پلیمری با الیاف پیوستهٔ کربن دارای خواص مشابه با کامپوزیت‌های سیمانی می‌باشند، به علاوه اینکه به‌دلیل استحکام کششی بالا، مدول کششی بالا و چگالی پایین، مواد سازه‌ای مهمی محسوب می‌شوند. این کامپوزیت‌ها برای سبک‌سازی در سازه‌هایی مانند ماهواره‌ها، هواپیماها، خودروها، دوچرخه‌ها، کشتی‌ها، زیردریایی‌ها، وسائل ورزشی و ماشین‌های دوار، از قبیل پره‌های توربین و روتور هلیکوپترها، مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین این کامپوزیت‌ها برای تعمیر سازه‌های بتنی و پل‌ها به‌کار می‌روند.

مآخذ

[1] Fu, X., D.Chung, "Radio-Wave-Reflecting Concrete for Lateral Guidance in Automatic Highways", *Cement and Concrete Research*, Vol. 28, No. 6, pp. 795-801, 1998.

[2] Chung, D., "Cement Reinforced with Short Carbon Fibers: A Multifunctional Material", *Composites*, Vol. 31, No.2, pp. 511-526, 2000.

[3] Wen, S., D. Chung, "Piezoresistivity-Based Strain Sensing in Carbon Fiber-Reinforced Cement", *ACI Materials Journal*, Vol. 104, No. 2, pp. 171-179, 2007.

[4] Chung, D.; "Piezoresistive Cement-Based Materials for Strain Sensing, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 00, pp. 1-12, 2002.

[5] Wen, S., D. Chung, "Carbon Fiber-Reinforced Cement as a Strain-Sensing Coating", *Cement and Concrete Research*, Vol. 31, pp. 665-667, 2001.

[6] Cao, J., D. Chung, "Damage Evolution during Freeze-Thaw Cycling of Cement Mortar, Studied by Electrical Resistivity Measurement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 1657-1661, 2002.

[7] Chen, B., J. Liu, "Damage in Carbon Fiber-Reinforced Concrete, Monitored by Both Electrical Resistance Measurement and Acoustic Emission Analysis", *Construction and Building Materials*, Vol. 22, pp. 2196-2201, 2008.

[8] Wen, S., D. Chung, "Carbon Fiber-Reinforced Cement as a Thermistor", *Cement and Concrete Research*, Vol. 29, pp. 961-965, 1999.

[9] Wen, S., D. Chung, "Seebeck Effect in Steel Fiber Reinforced Cement", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 661-664, 2000.

[10] Wen, S., D. Chung, "Cement as a Thermoelectric Material", *Materials Research Society*, Vol. 15, No. 12, pp. 2844-2848, 2000.

[11] Chung, D.; "Cement-Based Electronics", *Journal of Electroceramics*, Vol. 6, No. 1, pp. 75-88, 2001.

[12] Josmin, P.J.; Sant, K.M.; Sabu, T.; Kuruvilla, J.; Koichi, G.; and Meyyarappallil, S.S.; "Advances in Polymer Composites: Macro- and Microcomposites – State of the Art, New Challenges, and Opportunities", *Polymer Composites*, Vol. 1, pp. 3-16, 2012.

[13] "Composite Materials Handbook Volume 1, Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials", 2002.

[14] Chung, D., S. Wang, "Self-sensing of Damage and Strain in Carbon Fiber Polymer-Matrix Structural Composites by Electrical Resistance Measurement", *Polymers & Polymer Composites*, Vol. 11, No. 7, pp. 515-525, 2003.

[15] Wang, S., D. Chung, "Self-Sensing of Damage in Carbon Fiber Polymer-Matrix Composite by Measurement of the Electrical Resistance or Potential Away from the Damaged Region", *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 6463-6472, 2005.

[16] Wen, S., D. Chung, "Enhancing the Seebeck Effect in Carbon Fiber Reinforced Cement by Using Intercalated Carbon Fibers", *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 1295-1298, 2000.

[17] Chung, D.; "Thermal Analysis of Carbon Fiber Polymer-Matrix Composites by Electrical Resistance Measurement", *Thermochimica Acta*, Vol. 364, pp. 121-132, 2000.

پی‌نوشت

1. self-sensing composite
2. electromagnetic interference
3. filaments

۴. این تارها با استفاده از گازهای دارای کربن و تحت شرایط آزمایشگاهی رشد می‌کنند.

5. percolation threshold
6. aspect ratio
7. volume electrical resistivity (piezoresistivity)
8. electric polarization (direct piezoelectricity)
9. reversible
10. gage factor
11. coating
12. electrical resistivity of the interface
13. temperature cycling
14. thermistor
15. activation energy
16. Arrhenius
17. Thomas Johann Seebeck (1770 – 1831)
18. absolute thermoelectric power
19. acceptor
20. Zn_Sb
21. donor
22. delamination
23. interlaminar interface degradation
24. laminate
25. tows
26. curing
27. bulk properties