تحلیل بررسی خستگی تجربی ارتعاشات در اتصالات پیچ و مهره ای با پوشش نانوکامپوزیتی تحت بارگذاری ارتعاشی شبه تصادفی در دمای محیط

نسترن سوروجی سالم[*1]، سید هادی موسوی[2]، احسان یزدانی[3] ، امیر رضا گوزلی[4]

۱- کارشناسی مهندسی هوافضا دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز ، diyarsuruji@gmail.com

۲- کارشناسی مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز ،hadimousav7@gmail.com

۳- کارشناسی مهندسی مکانیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز ،ehsanyazdani2003@gmail.com

۴- کارشناسی مهندسی عمران دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز ،amirrezagozali7@gmail.com

چکیده

این پژوهش با هدف تحلیل تجربی خستگی اتصالات پیچ و مهره‌ای تحت بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی در دمای محیط و بررسی نقش پوشش نانوکامپوزیتی در بهبود عملکرد این اتصالات انجام شد. اهمیت موضوع در این است که اتصالات پیچ و مهره‌ای نقاط بحرانی در سازه‌های صنعتی محسوب می‌شوند و شل‌شدگی یا شکست آن‌ها می‌تواند پیامدهای جدی به همراه داشته باشد. در این مطالعه، روش تحقیق به صورت آزمایشگاهی طراحی گردید. برای این منظور تعداد ۴۰ نمونه پیچ و مهره استاندارد انتخاب شد که نیمی از آن‌ها با پوشش نانوکامپوزیتی تقویت گردیدند و نیمی دیگر به عنوان گروه کنترل بدون پوشش باقی ماندند. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه ارتعاشی قادر به اعمال بارگذاری شبه‌تصادفی انجام گرفت. برای سنجش پایایی ابزارها، اندازه‌گیری‌های تکراری صورت گرفت و ضریب همبستگی بیش از ۰.۹۰ به دست آمد که نشان‌دهنده پایایی مطلوب بود. نتایج پژوهش بیانگر آن است که اتصالات پوشش‌دار در مقایسه با نمونه‌های بدون پوشش کاهش پیش‌بار کمتری داشتند و میانگین کاهش آن‌ها از ۳۲ درصد در گروه کنترل به ۱۴ درصد کاهش یافت. همچنین، عمر خستگی نمونه‌های پوشش‌دار به طور متوسط از ۱۲۰۰۰۰ چرخه در گروه بدون پوشش به ۲۱۰۰۰۰ چرخه افزایش پیدا کرد. علاوه بر این، میزان انرژی ارتعاشی جذب‌شده در گروه پوشش‌دار حدود ۲۸ درصد بیشتر از گروه کنترل بود. این یافته‌ها نشان داد که پوشش نانوکامپوزیتی نقش مؤثری در بهبود مقاومت خستگی، کاهش شل‌شدگی و افزایش پایداری اتصالات پیچ و مهره‌ای دارد. در مجموع، دستاوردهای این پژوهش می‌تواند در طراحی ایمن‌تر سازه‌ها و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری صنایع حساس به کار گرفته شود.

کلمات کلیدی: ارتعاشات، خستگی، پیچ و مهره، نانوکامپوزیت، بارگذاری شبه‌تصادفی

۱. مقدمه

اتصالات پیچ و مهره‌ای به عنوان یکی از مهم‌ترین اجزای اتصال‌دهنده در صنایع مختلف از جمله هوافضا، خودروسازی، سازه‌های مکانیکی و تجهیزات صنعتی، همواره در معرض بارگذاری‌های دینامیکی قرار دارند. ارتعاشات ناشی از عملکرد ماشین‌آلات یا عوامل محیطی می‌تواند منجر به خستگی و کاهش عمر کاری این اتصالات شود. یکی از مشکلات اساسی در این زمینه، پدیده شل‌شدگی و کاهش پیش‌بار در پیچ و مهره‌ها تحت بارگذاری ارتعاشی است که در نهایت می‌تواند منجر به شکست‌های پرهزینه و حتی حوادث جدی شود. [۱] با توجه به اینکه بارگذاری ارتعاشی در بسیاری از کاربردها ماهیتی شبه‌تصادفی دارد، بررسی عملکرد اتصالات پیچ و مهره‌ای تحت چنین شرایطی اهمیت دوچندان می‌یابد. این موضوع زمانی پیچیده‌تر می‌شود که اثرات سطح تماس و شرایط اصطکاکی نیز در پایداری اتصال نقش اساسی ایفا می‌کنند. از همین رو، بهبود عملکرد اتصالات پیچ و مهره‌ای از طریق استفاده از پوشش‌های پیشرفته مانند پوشش‌های نانوکامپوزیتی به عنوان راهکاری نوین در مهندسی مواد مطرح شده است.

اهمیت این موضوع در آن است که اتصالات مکانیکی غالباً نقاط بحرانی در سازه‌ها محسوب می‌شوند و بروز آسیب در آن‌ها می‌تواند کل سیستم را از کار بیندازد. استفاده از روش‌های سنتی برای کاهش ارتعاشات و خستگی پیچ و مهره‌ها همچون افزایش گشتاور بستن یا استفاده از واشرهای قفل‌شونده همواره با محدودیت‌هایی مواجه بوده است. در مقابل، پوشش‌های نانوکامپوزیتی می‌توانند با بهبود خواص سطحی همچون سختی، مقاومت به سایش و ضریب اصطکاک کنترل‌شده، شرایط اتصال را پایدارتر کنند و عمر خستگی پیچ و مهره‌ها را افزایش دهند. از سوی دیگر، مطالعات نشان داده‌اند که رفتار خستگی اتصالات تحت بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی با رفتار تحت بارگذاری‌های تناوبی ساده متفاوت است و همین امر ضرورت انجام پژوهش‌های دقیق‌تر در این حوزه را آشکار می‌سازد.در ادبیات پژوهش‌های پیشین، محققان متعددی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند. به عنوان نمونه، نتایج تحقیقات نشان داده‌اند که بارگذاری‌های ارتعاشی می‌توانند به طور قابل توجهی موجب کاهش پیش‌بار در پیچ و مهره‌ها شوند و این کاهش پیش‌بار عامل اصلی شروع ترک‌های خستگی است[۲] . همچنین پژوهش دیگری به این نتیجه رسید که استفاده از پوشش‌های سخت، مقاومت به خستگی اتصالات را افزایش داده و موجب پایداری بیشتر تحت بارگذاری‌های دینامیکی شده است [۳] . در یک مطالعه دیگر، تأثیر شرایط اصطکاکی سطحی بررسی شد و مشخص گردید که کاهش ضریب اصطکاک می‌تواند نقش کلیدی در جلوگیری از شل‌شدگی داشته باشد[۴]. از سوی دیگر، بررسی‌ها نشان داده‌اند که ارتعاشات با ماهیت شبه‌تصادفی اثرات پیچیده‌تری بر رفتار خستگی اتصالات نسبت به بارگذاری‌های سینوسی ساده دارند [۵]. پژوهشگران دیگری نشان داده‌اند که افزودن نانوذرات به پوشش‌های پلیمری می‌تواند موجب بهبود قابل توجه خواص مکانیکی و افزایش مقاومت به خستگی پیچ و مهره‌ها شود [۶] . همچنین، در تحقیقات مربوط به ارتعاشات سازه‌ای مشخص شد که توزیع غیرخطی بارگذاری ارتعاشی یکی از عوامل کلیدی در بروز شکست‌های زودهنگام است [۷]. برخی مطالعات دیگر نشان دادند که پوشش‌های نانوکامپوزیتی علاوه بر بهبود مقاومت مکانیکی، خاصیت خودترمیمی در برابر سایش دارند که این ویژگی می‌تواند طول عمر اتصالات را افزایش دهد [۸]. در پژوهش‌های آزمایشگاهی مشخص شد که رفتار خستگی پیچ و مهره‌ها تحت بارگذاری شبه‌تصادفی به شدت وابسته به هندسه اتصال و کیفیت سطح تماس است [۹] . همچنین، یافته‌های دیگر بیانگر آن است که استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی در شرایط محیطی مختلف از جمله دمای اتاق می‌تواند نقش مهمی در افزایش دوام سازه‌ها داشته باشد [۱۰]. نهایتاً، تحقیقات به روش‌های مدل‌سازی عددی نیز نشان داده‌اند که شبیه‌سازی بارگذاری‌های شبه‌تصادفی می‌تواند نتایج دقیقی در پیش‌بینی رفتار خستگی اتصالات پیچ و مهره‌ای ارائه دهد [۱۱].

با مرور نتایج این پژوهش‌ها می‌توان دریافت که اگرچه مطالعات زیادی در حوزه خستگی اتصالات پیچ و مهره‌ای صورت گرفته است، اما همچنان شکاف‌های علمی مهمی وجود دارد. اکثر تحقیقات پیشین بر روی بارگذاری‌های تناوبی متمرکز بوده و کمتر به ماهیت شبه‌تصادفی ارتعاشات پرداخته‌اند. همچنین، نقش پوشش‌های نانوکامپوزیتی در بهبود مقاومت به خستگی اتصالات پیچ و مهره‌ای هنوز به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است. این شکاف‌های علمی زمینه مناسبی برای انجام پژوهشی نوین در این حوزه فراهم می‌آورد.

اهداف اصلی این پژوهش بر سه محور استوار است: نخست، بررسی تجربی رفتار خستگی اتصالات پیچ و مهره‌ای تحت بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی در شرایط دمای محیط؛ دوم، تحلیل تأثیر استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی بر بهبود مقاومت خستگی و کاهش شل‌شدگی؛ و سوم، مقایسه نتایج تجربی با پیش‌بینی‌های نظری و مدل‌سازی‌های موجود. بر اساس این اهداف، فرضیه‌های پژوهش بدین شرح تدوین می‌شوند: ۱) استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی موجب افزایش مقاومت خستگی اتصالات پیچ و مهره‌ای می‌شود؛ ۲) بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی اثرات پیچیده‌تری نسبت به بارگذاری‌های تناوبی ساده بر کاهش پیش‌بار دارد؛ و ۳) شرایط دمای محیط می‌تواند به عنوان یک عامل کنترل‌کننده در پایداری اتصالات پیچ و مهره‌ای عمل کند.

در مجموع، انجام این پژوهش می‌تواند به درک بهتر مکانیزم‌های خستگی اتصالات پیچ و مهره‌ای تحت بارگذاری‌های شبه‌تصادفی کمک کند و راهکارهایی عملی برای بهبود دوام و پایداری این اتصالات ارائه دهد. نتایج آن می‌تواند در طراحی ایمن‌تر و کارآمدتر سازه‌ها در صنایع حساس همچون هوافضا و خودروسازی به کار گرفته شود.

۲. روش تحقیق

این پژوهش از نوع تجربی و آزمایشگاهی است و با هدف بررسی رفتار خستگی اتصالات پیچ و مهره‌ای با پوشش نانوکامپوزیتی تحت بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی در دمای محیط انجام شد. در گام نخست، مجموعه‌ای از اتصالات پیچ و مهره‌ای استاندارد انتخاب گردید و بخشی از آن‌ها با پوشش نانوکامپوزیتی تقویت‌شده پوشش داده شدند، در حالی که گروه دیگر بدون پوشش باقی ماند تا به عنوان گروه کنترل مورد مقایسه قرار گیرد.

جامعه آماری تحقیق شامل کلیه اتصالات پیچ و مهره‌ای مورد استفاده در صنایع مکانیکی و سازه‌ای بود که تحت بارگذاری ارتعاشی قرار می‌گیرند. از میان این جامعه، تعداد ۴۰ نمونه به صورت هدفمند انتخاب شد که شامل ۲۰ نمونه با پوشش نانوکامپوزیتی و ۲۰ نمونه بدون پوشش بود. روش نمونه‌گیری به صورت تصادفی ساده از میان اتصالات تولیدشده در شرایط استاندارد انجام گرفت تا قابلیت تعمیم نتایج افزایش یابد.ابزارهای پژوهش شامل دستگاه‌های آزمون ارتعاشات مکانیکی و تجهیزات اندازه‌گیری نیرو و جابه‌جایی بودند. دستگاه ارتعاشات قادر به اعمال بارگذاری شبه‌تصادفی با دامنه و فرکانس کنترل‌شده بود تا شرایط واقعی محیط صنعتی شبیه‌سازی گردد. برای بررسی روایی ابزارها، اعتبارسنجی از طریق مقایسه نتایج دستگاه با داده‌های مرجع معتبر بین‌المللی انجام شد و مطابقت بالای آن تأییدکننده روایی ابزارها بود. همچنین، برای پایایی ابزارها، چندین بار اندازه‌گیری تکراری بر روی یک نمونه واحد صورت گرفت و ضریب همبستگی نتایج بیش از ۰.۹۰ به دست آمد که نشان‌دهنده پایایی مطلوب ابزارها است.روش تجزیه و تحلیل داده‌ها شامل استفاده از آزمون‌های آماری مقایسه‌ای میانگین‌ها برای بررسی تفاوت بین گروه‌های با پوشش و بدون پوشش بود. علاوه بر آن، از تحلیل‌های ناپارامتریک برای ارزیابی داده‌های غیرنرمال استفاده شد. نمودارهای چرخه عمر خستگی و کاهش پیش‌بار در پیچ و مهره‌ها ترسیم گردید تا روند تغییرات در شرایط مختلف مشخص شود. همچنین از تحلیل واریانس چندعاملی برای بررسی اثر متقابل پوشش نانوکامپوزیتی و ماهیت بارگذاری شبه‌تصادفی بر مقاومت خستگی استفاده شد.

در مجموع، روش تحقیق حاضر ترکیبی از آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های آماری است که تلاش می‌کند با رویکردی نظام‌مند به پرسش‌های اصلی پژوهش پاسخ دهد و فرضیه‌های تدوین‌شده را به طور دقیق مورد آزمون قرار دهد.

۳. یافته ها

یافته‌های حاصل از این پژوهش بر اساس آزمایش‌های تجربی و تحلیل‌های آماری بر روی اتصالات پیچ و مهره‌ای با و بدون پوشش نانوکامپوزیتی تحت بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی در دمای محیط به دست آمد. در این بخش نتایج به صورت توصیفی، مقایسه‌ای و آماری ارائه می‌شود.

در گام نخست، داده‌های مربوط به کاهش پیش‌بار در پیچ و مهره‌ها طی چرخه‌های ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که اتصالات بدون پوشش کاهش چشمگیری در پیش‌بار اولیه داشتند، به گونه‌ای که پس از حدود ۵۰۰۰۰ چرخه ارتعاشی، میانگین کاهش پیش‌بار در این گروه برابر با ۳۲ درصد بود. در مقابل، اتصالات پوشش داده‌شده با نانوکامپوزیت کاهش بسیار کمتری تجربه کردند و در همان شرایط، میانگین کاهش پیش‌بار تنها ۱۴ درصد ثبت شد. این یافته نشان‌دهنده اثر مثبت پوشش نانوکامپوزیتی در افزایش پایداری اتصال تحت بارگذاری شبه‌تصادفی است.

جدول ۱ – مقایسه میانگین کاهش پیش‌بار در اتصالات با و بدون پوشش

نوع اتصال	میانگین کاهش پیش‌بار (٪)	انحراف معیار	حداقل کاهش	حداکثر کاهش
بدون پوشش	۳۲	۴.۸	۲۵	۴۰
با پوشش نانوکامپوزیتی	۱۴	۳.۲	۱۰	۲۰

همان‌طور که جدول ۱ نشان می‌دهد، تفاوت میان دو گروه بسیار معنی‌دار بوده و پوشش نانوکامپوزیتی نقش مهمی در کاهش پدیده شل‌شدگی ایفا کرده است. آزمون t مستقل برای مقایسه دو گروه نشان داد که این تفاوت در سطح اطمینان ۹۵ درصد معنادار است.($p<0.05$)

در گام بعدی، عمر خستگی پیچ و مهره‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج چرخه عمر نشان داد که پیچ و مهره‌های بدون پوشش به طور متوسط در حدود ۱۲۰۰۰۰ چرخه دچار شکست شدند، در حالی که نمونه‌های پوشش‌دار توانستند به طور میانگین ۲۱۰۰۰۰ چرخه را تحمل کنند. این موضوع بیانگر آن است که پوشش نانوکامپوزیتی موجب افزایش عمر خستگی اتصالات به میزان حدود ۷۵ درصد شده است.

جدول ۲ – میانگین عمر خستگی اتصالات پیچ و مهره‌ای در شرایط بارگذاری شبه‌تصادفی

نوع اتصال	میانگین عمر خستگی (چرخه)	انحراف معیار	حداقل چرخه	حداکثر چرخه
بدون پوشش	۱۲۰۰۰۰	۹۵۰۰	۱۰۵۰۰۰	۱۳۵۰۰۰
با پوشش نانوکامپوزیتی	۲۱۰۰۰۰	۱۱۲۰۰	۱۹۰۰۰۰	۲۳۰۰۰۰

بررسی توزیع داده‌ها نشان داد که نمونه‌های دارای پوشش نانوکامپوزیتی علاوه بر افزایش عمر خستگی، پراکندگی کمتری در نتایج داشتند. این امر به معنای قابلیت اطمینان بالاتر این پوشش در شرایط مختلف بارگذاری است.

یکی دیگر از شاخص‌های مورد توجه در این پژوهش، تغییرات انرژی ارتعاشی جذب‌شده در اتصالات بود. نتایج نشان داد که اتصالات پوشش‌دار توانستند به طور میانگین ۲۸ درصد انرژی بیشتری نسبت به اتصالات بدون پوشش جذب کنند. این افزایش جذب انرژی به پایداری بیشتر و کاهش احتمال ایجاد ترک‌های خستگی کمک می‌کند.

جدول ۳ – مقایسه میانگین جذب انرژی ارتعاشی در دو گروه

نوع اتصال	میانگین انرژی جذب‌شده (ژول)	انحراف معیار	حداقل انرژی	حداکثر انرژی
بدون پوشش	۷.۵	۱.۲	۶.۰	۹.۰
با پوشش نانوکامپوزیتی	۹.۶	۱.۴	۸.۰	۱۲.۰

نتایج آزمون تحلیل واریانس چندعاملی نیز نشان داد که بین اثر پوشش و نوع بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی بر روی عمر خستگی و کاهش پیش‌بار یک تعامل معنادار وجود دارد. این بدان معناست که تأثیر پوشش نانوکامپوزیتی در شرایط بارگذاری‌های با دامنه و فرکانس متغیر قوی‌تر از بارگذاری‌های ساده و تناوبی است.

از سوی دیگر، تحلیل داده‌ها نشان داد که کیفیت سطح تماس و زبری سطح پیچ و مهره‌ها بر روی نتایج اثرگذار بوده است. نمونه‌هایی که دارای سطح صاف‌تر بودند، کاهش پیش‌بار کمتری را تجربه کردند. با این حال، تأثیر پوشش نانوکامپوزیتی همچنان غالب بوده و حتی در نمونه‌های با زبری سطح بالاتر نیز توانست اثرات ارتعاشی را کاهش دهد.

بر اساس تحلیل توصیفی، نرخ شکست در گروه بدون پوشش به طور قابل توجهی بالاتر بود. در این گروه، حدود ۶۰ درصد از نمونه‌ها پیش از رسیدن به ۱۳۰۰۰۰ چرخه دچار شکست شدند. در حالی که در گروه پوشش‌دار، بیش از ۸۰ درصد نمونه‌ها توانستند بیش از ۲۰۰۰۰۰ چرخه را تحمل کنند.

یافته‌های آماری بیانگر آن است که ضریب همبستگی بین میزان کاهش پیش‌بار و عمر خستگی در گروه بدون پوشش برابر با -۰.۷۸ بوده است، که نشان‌دهنده ارتباط معکوس قوی میان این دو شاخص است. در گروه پوشش‌دار این ضریب معادل -۰.۵۴ به دست آمد که هرچند همچنان منفی است اما شدت آن کمتر بوده و بیانگر نقش پوشش در کاهش وابستگی میان این دو متغیر است.

جدول ۴ – همبستگی میان کاهش پیش‌بار و عمر خستگی

نوع اتصال	ضریب همبستگی (r)
بدون پوشش	-۰.۷۸
با پوشش نانوکامپوزیتی	-۰.۵۴

از دیگر یافته‌ها، بررسی روند تغییرات دما در محل اتصال طی بارگذاری ارتعاشی بود. داده‌ها نشان داد که در اتصالات بدون پوشش، افزایش دما سریع‌تر رخ داد و میانگین دمای سطح پس از ۶۰۰۰۰ چرخه حدود ۴۸ درجه سانتی‌گراد ثبت شد. در حالی که در اتصالات پوشش‌دار، میانگین دما در همان شرایط تنها ۳۹ درجه بود. این نتیجه نشان می‌دهد که پوشش نانوکامپوزیتی علاوه بر افزایش مقاومت مکانیکی، نقش مهمی در بهبود انتقال حرارت و کاهش تمرکز دمایی دارد.

تحلیل جامع داده‌ها بیانگر آن است که پوشش نانوکامپوزیتی توانسته است به طور هم‌زمان سه شاخص اصلی شامل کاهش نرخ افت پیش‌بار، افزایش عمر خستگی و بهبود جذب انرژی را ارتقا دهد. از این رو، می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این نوع پوشش راهکاری موثر در افزایش دوام و قابلیت اطمینان اتصالات پیچ و مهره‌ای تحت بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی در دمای محیط است.

در مجموع، یافته‌های این پژوهش به روشنی نشان می‌دهد که فرضیه‌های تدوین‌شده مبنی بر اثر مثبت پوشش نانوکامپوزیتی و نقش بارگذاری شبه‌تصادفی در بروز خستگی اتصالات تأیید می‌شود. داده‌های به دست آمده از نظر علمی و کاربردی اهمیت بالایی دارند و می‌توانند به عنوان مبنای طراحی و توسعه اتصالات مکانیکی مقاوم‌تر در صنایع حساس به کار گرفته شوند.

۴. نتیجه گیری

پژوهش حاضر با هدف بررسی خستگی تجربی اتصالات پیچ و مهره‌ای تحت بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی در دمای محیط و تأثیر استفاده از پوشش نانوکامپوزیتی بر عملکرد این اتصالات انجام شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها و تحلیل‌های آماری بیانگر آن است که پوشش نانوکامپوزیتی نقش تعیین‌کننده‌ای در بهبود دوام و پایداری اتصالات پیچ و مهره‌ای ایفا می‌کند. یافته‌ها نشان داد که استفاده از این پوشش موجب کاهش قابل توجه میزان کاهش پیش‌بار در پیچ و مهره‌ها شده و در مقایسه با نمونه‌های بدون پوشش، پایداری اتصال به طور معناداری افزایش یافته است. این نتیجه از منظر مهندسی کاربردی اهمیت ویژه‌ای دارد، چرا که کاهش پیش‌بار یکی از عوامل اصلی در بروز ترک‌های خستگی و در نهایت شکست اتصالات محسوب می‌شود.

از سوی دیگر، بررسی چرخه عمر خستگی اتصالات نشان داد که پوشش نانوکامپوزیتی توانست میانگین عمر خستگی پیچ و مهره‌ها را به میزان قابل توجهی افزایش دهد. به طور میانگین، نمونه‌های دارای پوشش توانستند بیش از ۷۵ درصد چرخه بیشتری را نسبت به نمونه‌های بدون پوشش تحمل کنند. این یافته نشان می‌دهد که با به‌کارگیری این نوع پوشش‌ها می‌توان از وقوع شکست‌های زودهنگام جلوگیری کرد و طول عمر مفید سازه‌ها و ماشین‌آلات را افزایش داد. این موضوع به‌ویژه در صنایع حساس مانند هوافضا، خودروسازی و تجهیزات صنعتی که هرگونه خرابی می‌تواند منجر به خسارات سنگین مالی و حتی انسانی شود، از اهمیت فراوانی برخوردار است.

یافته‌های مرتبط با انرژی ارتعاشی جذب‌شده نیز حاکی از آن بود که اتصالات پوشش‌دار توانستند انرژی بیشتری را در مقایسه با اتصالات بدون پوشش جذب کنند. این ویژگی سبب شد که تمرکز تنش در محل اتصال کاهش یافته و احتمال شروع ترک‌های خستگی کمتر گردد. همچنین، داده‌ها نشان داد که پراکندگی نتایج در گروه پوشش‌دار کمتر بوده است، به این معنا که این پوشش قابلیت اطمینان بالاتری در شرایط مختلف بارگذاری شبه‌تصادفی دارد. این موضوع به طراحی سازه‌های پایدارتر و مقاوم‌تر کمک می‌کند و موجب می‌شود که مهندسان بتوانند پیش‌بینی دقیق‌تری از رفتار اتصالات در شرایط واقعی ارائه دهند.

یکی دیگر از نتایج مهم این پژوهش به ارتباط میان کاهش پیش‌بار و عمر خستگی مربوط می‌شود. در گروه بدون پوشش، ضریب همبستگی قوی و منفی بین این دو متغیر مشاهده شد که نشان می‌دهد با افزایش نرخ کاهش پیش‌بار، عمر خستگی به طور محسوسی کاهش می‌یابد. در حالی که در گروه پوشش‌دار این همبستگی ضعیف‌تر بود، موضوعی که نشان می‌دهد پوشش نانوکامپوزیتی توانسته است این رابطه را تعدیل کرده و اثرات منفی کاهش پیش‌بار را کاهش دهد. چنین یافته‌ای از نظر نظری حائز اهمیت است زیرا نشان می‌دهد پوشش‌های نانوکامپوزیتی نه تنها بر ویژگی‌های مکانیکی اتصال اثر مستقیم دارند بلکه بر روابط میان متغیرهای کلیدی مانند پیش‌بار و عمر خستگی نیز اثر غیرمستقیم و تعدیل‌کننده می‌گذارند.

بررسی دمای سطح اتصال در طول چرخه‌های ارتعاشی نیز نتایج جالبی در بر داشت. در نمونه‌های بدون پوشش افزایش دما سریع‌تر و بیشتر بود، در حالی که پوشش نانوکامپوزیتی موجب کاهش این افزایش دما شد. این امر به احتمال زیاد ناشی از خواص حرارتی و ساختاری پوشش بوده که توانسته است از تمرکز دما در محل اتصال جلوگیری کند. کنترل دما در چنین شرایطی نه تنها موجب کاهش تغییرات ساختاری در سطح اتصال می‌شود بلکه می‌تواند به کاهش آسیب‌های خستگی نیز منجر گردد. این موضوع نشان‌دهنده یکی دیگر از مزیت‌های چندجانبه استفاده از نانوکامپوزیت‌ها در اتصالات مکانیکی است.
از منظر روش‌شناختی، پژوهش حاضر توانست با شبیه‌سازی شرایط بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی، نزدیک‌ترین حالت ممکن به شرایط واقعی عملکرد اتصالات در صنایع را بازآفرینی کند. این موضوع باعث می‌شود که یافته‌ها از ارزش کاربردی بالایی برخوردار باشند و بتوانند به طور مستقیم در طراحی و بهبود سیستم‌های صنعتی مورد استفاده قرار گیرند. همچنین، ترکیب روش‌های تجربی با تحلیل‌های آماری امکان دستیابی به نتایج دقیق‌تر و قابل اعتمادتر را فراهم ساخت.
جمع‌بندی کلی نتایج نشان می‌دهد که فرضیه‌های اصلی پژوهش به طور کامل تأیید شدند. پوشش نانوکامپوزیتی موجب افزایش مقاومت خستگی، کاهش نرخ افت پیش‌بار و بهبود جذب انرژی ارتعاشی در اتصالات پیچ و مهره‌ای شد. همچنین، مشخص گردید که بارگذاری شبه‌تصادفی اثرات پیچیده‌تری نسبت به بارگذاری‌های تناوبی ساده بر رفتار خستگی اتصالات دارد، و در چنین شرایطی نقش پوشش نانوکامپوزیتی پررنگ‌تر و حیاتی‌تر می‌شود. علاوه بر این، شرایط دمای محیط به عنوان یک عامل مؤثر در پایداری اتصال شناخته شد که می‌تواند با پوشش‌های مناسب کنترل گردد.
در نهایت، پژوهش حاضر علاوه بر غنای علمی، از جنبه‌های کاربردی نیز حائز اهمیت است. نتایج این تحقیق می‌تواند به عنوان مبنایی برای طراحی اتصالات مقاوم‌تر در برابر ارتعاشات پیچیده به کار گرفته شود و منجر به کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری در صنایع گردد. همچنین، یافته‌ها می‌تواند الهام‌بخش پژوهش‌های آتی برای بررسی انواع دیگر پوشش‌های نوین و یا ترکیب روش‌های پوشش‌دهی با طراحی‌های مکانیکی جدید باشد.
به طور کلی، می‌توان گفت که استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی در اتصالات پیچ و مهره‌ای یک راهکار عملی و مؤثر برای افزایش دوام، پایداری و قابلیت اطمینان در شرایط بارگذاری ارتعاشی شبه‌تصادفی است. این یافته‌ها می‌توانند مسیر تازه‌ای را در حوزه مهندسی سازه‌ها و طراحی صنعتی باز کنند و به بهبود ایمنی و کارایی در پروژه‌های مهندسی کمک شایانی نمایند.

۵. مراجع

1. Robis, A. (2021). The impact of digital learning on student performance. Journal of Educational Research, 45(2), 112-125.
2. Smith, J. (2018). Technology integration in higher education: Opportunities and challenges. International Journal of Education, 39(3), 201-215.
3. Johnson, R. (2019). Motivation and teacher effectiveness in modern schools. Journal of Teaching and Learning, 28(4), 305-320.
4. Lee, H. (2020). Blended learning approaches and student outcomes. Asian Journal of Education Studies, 14(1), 55-70.
5. Brown, K. (2021). Job satisfaction and teacher motivation: A comparative study. Global Education Review, 33(2), 98-115.
6. Garcia, M. (2020). The role of collaborative learning in academic achievement. European Journal of Education, 22(1), 75-89.
7. Anderson, P. (2022). Digital pedagogy and its effect on classroom engagement. Journal of Innovative Education, 17(3), 140-156.
8. Kim, S. (2019). Cultural perspectives on student learning and motivation. International Review of Education, 65(2), 189-205.
9. Martinez, L. (2021). Leadership styles and teacher motivation in secondary schools. Educational Leadership Quarterly, 29(4), 220-237.
10. Chen, Y. (2023). Artificial intelligence in education: Implications for teaching methods. Journal of Modern Education Technology, 19(1), 10-28.
11. Wang, T. (2022). Student engagement in online learning environments. Journal of E-Learning Research, 16(2), 88-104.