

کاربرد نانوپلیمرهای مهندسی پیشرفته در ارتقاء عملکرد کامپوزیت های ساختمانی سبک و مقاوم با تمرکز بر

بهینه سازی جرم و تاب آوری سازه ای در برابر بارهای دینامیکی و عوامل محیطی

مهدی رضایی^۱، محسن قوهستانی^۲

۱. کارشناس ارشد مهندسی عمران

۲. دانشجوی دکتری مهندسی عمران (مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد داراب)

چکیده:

افزایش نیاز به مصالح ساختمانی سبک و در عین حال مستحکم ، ضرورت بهره گیری از فناوری های نوین به ویژه در حوزه نانومواد را بیش از پیش آشکار ساخته است . در این پژوهش ، با هدف بهینه سازی وزن ، بهبود دوام و ارتقاء پاسخ سازه ای کامپوزیت ها از نانوپلیمرهای مهندسی پیشرفته شامل نانوسیلیکا ، نانولوله های کربنی و نانوگرافن بهره گرفته شده است روش تحقیق مبتنی بر ترکیب آزمایش های مکانیکی (کشش ، فشارش ، خمش و چقرمگی شکست) با شبیه سازی عددی المان محدود در نرم افزار ABAQUS بوده و بارگذاری های دینامیکی نیز در قالب تحلیل گذرای زمانی بررسی شده است . نتایج حاکی از آن است که افزودن نانوذرات موجب افزایش چشمگیر استحکام مکانیکی (تا ۷۵٪ در کشش و ۵۸٪ در فشار) بهبود رفتار شکست ، کاهش جا به جایی ناشی از بارهای ضربه ای و افزایش فرکانس طبیعی سیستم شده است . همچنین تحلیل هزینه - کارایی نشان می دهد که افزودن ۷-۵٪ حجمی نانوپلیمرها ، بهترین بازده مهندسی را در برابر هزینه تولید فراهم می سازد . این یافته ها نشان دهنده ظرفیت بالای نانوکامپوزیت ها در بهبود عملکرد سازه های عمرانی در شرایط پیچیده بارگذاری است .

واژگان کلیدی: نانوکامپوزیت ، نانوسیلیکا ، نانولوله های کربنی ، شبیه سازی عددی ، رفتار دینامیکی ، سبک سازی سازه ای ، پایداری مکانیکی

مقدمه :

۲.۱- پیش زمینه و اهمیت موضوع :

در شرایط فعلی صنعت ساخت و ساز ، کاهش جرم سازه ای بدون افت عملکرد سازه ها به یکی از اهداف کلیدی در طراحی های مهندسی تبدیل شده است . وزن زیاد مصالح سنتی نظیر بتن و فولاد ، نه تنها منجر به افزایش بارهای مرده و هزینه های اجرایی می شود ، بلکه رفتار سازه را در برابر پدیده های دینامیکی مانند زلزله و باد های شدید آسیب پذیر تر می کند .

در پاسخ به این نیاز ، استفاده از نانوکامپوزیت های پلیمری مهندسی شده به عنوان یک راهکار نوین در بهینه سازی خواص مکانیکی و وزن سازه ، مورد توجه پژوهشگران و مهندسان قرار گرفته است .

۲.۲- نقش نانوپلیمرها در مصالح نوین :

نانوپلیمرها به دلیل ساختار فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد ، قابلیت هایی نظیر افزایش استحکام کششی ، بهبود مقاومت به ضربه ، کاهش نفوذپذیری ، و افزایش عمر مفید مصالح را فراهم می آورد . افزودن نانوذراتی مانند نانوسیلیکا ، نانولوله های کربنی و نانوگرافن به رزین های پلیمری یا بتن های پلیمری ، منجر به تولید موادی می شود که هم سبک تر و هم مقاوم تر از ترکیبات سنتی هستند .

۲.۳- خلا های موجود در پژوهش ها :

اگر چه تاکنون مطالعات متعددی در زمینه استفاده از نانوذرات در ساخت کامپوزیت های ساختمانی صورت گرفته اما اغلب این پژوهش ها تمرکز خود را صرفاً بر خواص مکانیکی اولیه (نظیر مقاومت فشاری و کششی) معطوف کرده اند . بررسی رفتار دینامیکی و زمان وابسته این مصالح در مواجهه با بارهای متغیر کمتر مورد توجه بوده است . این در حالی است که در شرایط عملیاتی واقعی ، سازه ها اغلب تحت اثر بارهای دینامیکی ، ضربه ای یا لرزه ای قرار دارند .

۲.۴- اهداف تحقیق :

در این پژوهش تلاش شده است با ترکیب رویکرد های تجربی و شبیه سازی عددی ، تاثیر بکارگیری نانوپلیمرهای مهندسی پیشرفته بر عملکرد کامپوزیت های ساختمانی از نظر :

- ✓ بهینه سازی جرم و سبک سازی
- ✓ ارتقاء عملکرد سازه ای
- ✓ بهبود تاب آوری در برابر بارهای دینامیکی

✓ ارزیابی اقتصادی کارایی این فناوری

مورد بررسی جامع قرار گیرد .

۲.۵ - ساختار مقاله :

مقاله حاضر در ادامه ، ابتدا به مرور پژوهش های کلیدی در این زمینه پرداخته ، سپس مواد مورد استفاده و روش های تحقیق معرفی می شود . در ادامه ، نتایج حاصل از آزمون های مکانیکی و شبیه سازی عددی تحلیل می گردد و در نهایت ، جمع بندی و پیشنهاداتی برای ادامه مسیر پژوهش ارائه خواهد شد .

۳- مروری بر پژوهش های پیشین :

۳.۱ - جایگاه نانوپلیمرها در مصالح ساختمانی نوین :

تحقیقات چند دهه اخیر در حوزه فناوری های نانو ، منجر به توسعه گسترده موادی با ویژگی های فیزیکی ، شیمیایی و مکانیکی پیشرفته شده است . در این میان ، نانوپلیمرها و نانوذرات معدنی در تقویت مصالح ساختمانی به ویژه کامپوزیت ها ، جایگاهی مهم یافته اند . طبق مطالعات (Sobolev and Sanchez (2010 کاربرد نانوذراتی مانند نانوسیلیکا موجب ارتقاء ویژگی هایی نظیر مقاومت فشاری ، کاهش تخلخل و افزایش دوام بتن شده است .

۳.۲ - اثرات مکانیکی نانوذرات منتخب :

نانوسیلیکا (SiO_2) : ذرات ریز مقیاس با خاصیت پوزولانی بالا که در اصلاح ریزساختار سیمان و افزایش چگالی ماتریس کامپوزیتی موثرند .

نانولوله های کربنی (CNTs) : ساختاری با نسبت فوق العاده بالای استحکام به وزن که می تواند ترک خوردگی را مهار کرده و مدول کشسانی کامپوزیت ها را به طور قابل ملاحظه ای افزایش دهد .

نانوگرافن : به دلیل سطح گسترده و هدایت حرارتی بالا ، موجب ارتقاء چقرمگی شکست و پایداری حرارتی مصالح می شود .

بر اساس یافته های (Lu et al ., (2024 ، افزودن تنها ۰.۰۵٪ نانولوله های کربنی به ماتریس پلیمری باعث افزایش ۲۰٪ در مقاومت کششی شده است . این مقدار با استفاده ترکیبی از CNT و گرافن حتی تا ۶۰٪ قابل افزایش است .

۳.۳- استفاده از شبیه سازی عددی در تحلیل عملکرد نانوکامپوزیت ها :

پیشرفت های نرم افزاری در حوزه مکانیک جامدات ، امکان مدلسازی دقیق عملکرد نانوساختار را فراهم کرده است .

در پژوهش (Konsta-Gdoutos et al (2010 از نرم افزار ABAQUS برای مدلسازی ماتریس پلیمری حاوی نانوسیلیکا استفاده شده و نشان داده شده که حضور نانوذرات ، موجب پخش تنش یکنواخت تر در مقطع و تاخیر در شروع شکست می شود .

۳.۴ - مطالعات مربوط به عملکرد دینامیکی :

اگر چه بیشتر تحقیقات ، بر خواص استاتیکی نانوکامپوزیت ها متمرکز بوده اند مطالعات محدودی مانند Gdoutos et al (2011) به رفتار دینامیکی مصالح پرداخته اند . در این مطالعات رفتار ارتعاشی و پاسخ به بارهای لحظه ای بررسی شده و مشخص شده است که افزودن نانوذرات می تواند باعث افزایش فرکانس طبیعی و کاهش جا به جایی ماکزیمم شود . با این حال ، همچنان خلایه هایی در تحلیل جامع پاسخ دینامیکی در مقیاس سازه ای وجود دارد .

۳.۵ - جایگاه این پژوهش در میان ادبیات موضوع :

مطالعه حاضر با ترکیب تحلیل های مکانیکی ، شبیه سازی عددی و دینامیکی و همچنین ارزیابی هزینه - کارایی ، گامی نو در تکمیل پژوهش های پیشین تلقی می شود . نوآوری این تحقیق در ارائه رویکرد یکپارچه به عملکرد نانوکامپوزیت ها در شرایط واقعی بارگذاری و توجه هم زمان به معیارهای سازه ای و اقتصادی است .

۴ - مواد و روش ها :

در این بخش ، جزئیات مربوط به مواد اولیه ، فرایند ساخت کامپوزیت ها ، نحوه پراکنش نانوذرات ، روش های آزمایشگاهی و شبیه سازی عددی برای بررسی رفتار سازه ای کامپوزیت های نانوپلیمری ارائه می شود .

۴.۱ - ترکیب مواد و نانوذرات مورد استفاده :

برای تولید کامپوزیت های ساختمانی سبک و مقاوم ، از ماتریس پلیمری بر پایه رزین اپوکسی به عنوان زمینه اصلی استفاده شد . این ماتریس با درصد های مختلفی از نانوذرات تقویت شد که در جدول زیر آورده شده است :

جدول شماره ۱ - ترکیب مواد نانوکامپوزیتی

ردیف	نوع ماده	ترکیب شیمیایی	ویژگی فنی اصلی	نسبت وزنی مورد استفاده
۱	اپوکسی پایه رزین	$C_{21}H_{25}ClO_5$	چسبندگی بالا ، مدول متوسط	۶۵٪
۲	نانوسیلیکا	SiO_2	افزایش مقاومت فشاری ، بهبود دوام	۷-۵٪
۳	نانولوله های کربنی	C	افزایش مدول کشسانی ، کنترل ترک	۵-۳٪
۴	نانوذرات گرافن	C	تقویت کشش و خمش ، رسانایی	۴-۲٪

۴.۲ - فرایند آماده سازی نمونه ها :

پیش پراکندگی نانوذرات : برای دستیابی به توزیع یکنواخت نانوذرات ، از دستگاه اولتراسونیک با فرکانس ۴۰ کیلو هرتز استفاده شد .

اختلاط با ماتریس پلیمری : نانوذرات در رزین اپوکسی مخلوط شده و به مدت ۳۰ دقیقه با سرعت ثابت به هم زده شدند .

قالب گیری و پخت حرارتی : ترکیب آماده شده در قالب های استاندارد ریخته شده و در دمای ۸۰ درجه سلسیوس به مدت ۴ ساعت پخته شد .

۴.۳ - آزمون های مکانیکی انجام شده :

آزمایش ها بر اساس استاندارد های بین المللی صورت گرفت :

جدول شماره ۲- انواع آزمون های مکانیکی و استانداردهای مربوطه

ردیف	نوع آزمون	استاندارد مربوطه	هدف آزمون
۱	آزمون کشش (Tensile Test)	ASTM D638	تعیین استحکام و مدول کشسانی در کشش
۲	آزمون فشار (Compression Test)	ASTM C109	بررسی مقاومت فشاری
۳	آزمون خمش سه نقطه ای (Three-point Bending Test)	ASTM D790	اندازه گیری مقاومت و چقرمگی خمشی
۴	آزمون چقرمگی شکست (Fracture Toughness Test)	ASTM E399	ارزیابی مقاومت در برابر گسترش ترک

۴.۴ - مدلسازی عددی المان محدود (FEM) :

برای تحلیل دقیق رفتار سازه ای نمونه ها ، از شبیه سازی عددی در محیط ABAQUS بهره گرفته شد .

ویزگی های مدلسازی :

هندسه مدل : تیر پلیمری با ابعاد $10 \times 10 \times 100$ میلی متر

نوع المان : المان های هشت گرهی (Solid 8-node brick) : (C3D8R)

شرایط مرزی : یک سر گیر دار ، بارگذاری در سر دیگر

بارگذاری دینامیکی : موج ضربه ای به مدت $S = 0.01$ و دامنه $N = 500$

تحلیل انجام شده :

تحلیل کشش استاتیکی ، تحلیل گذرای دینامیکی برای بررسی رفتار در برابر بارهای سریع .

۴.۵ - تحلیل هزینه عملکرد (Cost – performance Analysis) :

برای ارزیابی اقتصادی استفاده از نانوکامپوزیت ها ، شاخص مقدار بهبود خواص مکانیکی به ازای هر واحد افزایش هزینه تعریف و محاسبه شد . این شاخص نشان داد که افزودن نانوذرات در بازه ۵-۷٪ ، نسبت بهبود مکانیکی به هزینه را تا دو برابر نسبت به مواد پایه بهبود می دهد .

۵ - نتایج و تحلیل ها (Result and Discussion):

در این بخش یافته های بدست آمده از آزمون های تجربی و شبیه سازی عددی مورد بررسی قرار می گیرند . تحلیل ها نشان می دهند که استفاده هدفمند از نانوپلیمرها منجر به بهبود مشخصه های مکانیکی و دینامیکی کامپوزیت های ساختمانی شده است .

۵.۱ - نتایج آزمون های مکانیکی :

۵.۱.۱ - مقاومت کششی (Tensile Strength) :

افزودن نانولوله های کربنی و نانوگرافن به کامپوزیت های پلیمری ، موجب بهبود محسوس عملکرد در تنش شد .

جدول شماره ۳- مقایسه استحکام کششی نانوکامپوزیت های تقویت شده

ردیف	نمونه	مقاومت کششی (MPa)	افزایش نسبت به نمونه معمولی (%)
۱	کامپوزیت معمولی	۴۰	-----
۲	کامپوزیت با ۵٪ نانوپلیمر	۵۵	+ ۳۷.۵ %
۳	کامپوزیت با ۱۰٪ نانوپلیمر	۷۰	+ ۷۵ %

تحلیل مقاومت کششی : نانوذرات با ممانعت از رشد میکروتکرک ها ، بهبود در استحکام کششی را به دنبال داشتند .

۵.۱.۲ - مقاومت فشاری (Compressive Strength) :

جدول شماره ۴- مقایسه مقاومت فشاری نانوکامپوزیت های تقویت شده

ردیف	نوع نمونه	مقاومت فشاری (MPa)	درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع (%)
۱	اپوکسی خالص	۶۰	-----
۲	اپوکسی + ۵٪ نانوپلیمر	۸۰	+ ۳۳ %
۳	اپوکسی + ۱۰٪ نانوپلیمر	۹۵	+ ۵۸ %

تحلیل مقاومت فشاری : نانوسیلیکا با اصلاح ساختار ریزدانه ها ، موجب افزایش مقاومت به بار فشاری شد .

۵.۱.۳ - چقرمگی شکست (Fracture Toughness Test) :

جدول شماره ۵- مقایسه آزمون چقرمگی شکست بین نانوکامپوزیت های تقویت شده

ردیف	نوع نمونه	چقرمگی شکست	درصد افزایش نسبت به نمونه مرجع (%)
------	-----------	-------------	--------------------------------------

	(Mpa. m ^{1/2})		
-----	۰.۹	اپوکسی خالص	۱
٪ ۳۳ +	۱.۲	اپوکسی + ٪۵ نانوپلیمر	۲
۱۰۰٪ +	۱.۸	اپوکسی + ٪۱۰ نانوپلیمر	۳

تحلیل آزمون چقرمگی شکست : نانوگرافن با ایجاد شبکه درون ماتریس ، انرژی شکست را جذب کرده و تاب آوری را افزایش داده است .

۵.۲ - تحلیل دینامیکی (Transient Dynamic Analysis) :

در شبیه سازی ضربه ای ، پاسخ زمانی جابه جایی در تیر های نانو تقویت شده کاهش قابل ملاحظه ای نسبت به کامپوزیت های معمولی داشت .

ماکزیمم جابه جایی در اپوکسی معمولی : ۲.۸ mm

ماکزیمم جابه جایی در اپوکسی + ٪۱۰ نانوپلیمر : ۱.۶ mm ، (کاهش = ٪۴۳)

تحلیل نتایج آزمون دینامیکی : افزایش سختی موثر ماده ، رفتار دینامیکی را پایدارتر کرده است .

۵.۲.۱ - میرایی ارتعاشات و فرکانس طبیعی :

جدول شماره ۵- مقایسه فرکانس و نرخ میرایی نمونه ها

ردیف	نوع نمونه	فرکانس طبیعی اول (HZ)	نرخ میرایی نسبی
۱	اپوکسی معمولی	۱۲۸	۲.۱٪
۲	اپوکسی + نانوپلیمر	۱۵۳	۳.۷٪

تحلیل میرایی : افزایش سختی و کاهش انرژی ذخیره شده ارتعاشی موجب ارتقاء رفتار نوسانی شده است .

۵.۳ - تحلیل عملکرد (استحکام) نسبت به وزن و هزینه :

❖ افزایش استحکام نسبت به وزن : از 16 mpa/kg در اپوکسی معمولی به 28 mpa/kg در نانوکامپوزیت ها .

❖ افزایش هزینه تولید : حدود ۲۵ - ۲۰٪

❖ افزایش عملکرد مکانیکی کلی : بیش از ۶۰٪

تحلیل : نسبت هزینه به عملکرد در محدوده ۷-۵٪ نانوذرات در بهترین حالت قرار دارد .

۵.۴ - جمع‌بندی تحلیلی :

- ❖ استفاده از نانوپلیمرها موجب افزایش قابل توجه در عملکرد مکانیکی و دینامیکی کامپوزیت ها شده است .
- ❖ شبیه سازی عددی اثر بخشی این مواد را در شرایط گذرا و بحرانی تایید می کند .
- ❖ از نظر اقتصادی ، این فناوری قابلیت تجاری سازی دارد و در سطح پروژه های عمرانی بزرگ قابل پیاده سازی است .

۶ - نتیجه گیری و پیشنهادات :

یافته های این تحقیق به روشنی نشان می دهد که استفاده از نانوپلیمرهای مهندسی شده در تولید کامپوزیت های ساختمانی می تواند موجب بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و عملکرد دینامیکی شود . حضور همزمان نانوسیلیکا ، نانولوله های کربنی و نانوگرافن در ساختار ماتریس پلیمری ، نقش کلیدی در ارتقاء مقاومت فشاری ، کششی ، چقرمگی شکست و کنترل نوسانات ناشی از بارهای دینامیکی ایفا می کند . استحکام کششی تا ۷۵٪ و استحکام فشاری تا ۵۸٪ افزایش یافت . چقرمگی شکست به میزان دوبرابر نسبت به نمونه مرجع بهبود یافت . در تحلیل دینامیکی ، جابه جایی های لحظه ای و نوسانات ، کاهش چشمگیری داشتند . فرکانس طبیعی سیستم ارتقاء یافت که نشان از بهبود عملکرد در برابر ارتعاشات می باشد . تحلیل هزینه کارایی نشان داد که نسبت بهبود عملکرد به ازای افزایش هزینه در محدوده ۷-۵٪ نانوذرات بهینه است .

۶.۱ - نوآوری و ارزش پژوهش :

نوآوری این پژوهش در آن است که ضمن بررسی جامع اثر نانوپلیمرها بر خواص مکانیکی مصالح ، تحلیل رفتار دینامیکی نیز به صورت عددی در نظر گرفته شده است . از سوی دیگر ، بررسی همزمان جنبه های مهندسی ، سازه ای و اقتصادی این فناوری موجب می شود نتایج تحقیق قابلیت انتقال به کاربردهای واقعی در صنعت ساختمان را دارا باشد .

۶.۲ - پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده :

- با توجه به نتایج حاصل ، پیشنهاد می شود تحقیقات آینده با تمرکز بر موارد زیر دنبال شود :
- ۱- ارزیابی عملکرد بلند مدت نانوکامپوزیت ها در معرض شرایط محیطی متغییر مانند رطوبت ، دما ، نور UV و چرخه های یخبندان
 - ۲- تحلیل رفتار لرزه ای این مصالح در مقیاس سازه ای ، به ویژه در قاب ها ، دیوارهای برشی و دال ها .
 - ۳- بررسی روش های صنعتی تولید انبوه این نوع کامپوزیت ها با هدف کاهش بیشتر هزینه ها .
 - ۴- مدلسازی دقیق تر رفتار غیر خطی و آسیب پیش رونده در نانوکامپوزیت ها .
 - ۵- مطالعه قابلیت بازیافت و پایداری زیست محیطی این مصالح در چرخه عمر کامل ساختمان .

۶.۳ - نتیجه گیری نهایی :

بکارگیری نانوپلیمرهای پیشرفته در کامپوزیت های ساختمانی ، یک رویکرد نوین برای رسیدن به مصالح سبک ، مقاوم و پایدار به شمار می رود . این فناوری می تواند مسیر طراحی سازه های مدرن ، مقاوم در برابر خطرات محیطی و مقرون به صرفه را هموار سازد .

(References) : منابع

1. Sanchez, F., & Sobolev, K. (2010). Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, 24(11), 2060–2071.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.014>
2. Lu, D., Qu, F., Punetha, P., Zeng, X., Luo, Z., & Li, W. (2024). Graphene oxide nano-engineered recycled aggregate concrete for sustainable construction: A critical review. *Developments in the Built Environment*, 100187.
3. Shcherban', E. M., Ivaschenko, A. I., & Kramar, O. M. (2021). Nanomodification of lightweight fiber reinforced concrete with microsilica. *Materials*, 14(23), 7347.
4. Shi, J., Gencel, O., & Zhang, M. (2022). Mechanical property and durability of engineered cementitious composites (ECC) with nano-material and SAPs. *Powder Technology*, 405, 117500.
5. Paul, J., Samykano, M., et al. (2023). Nano-engineered paraffin-based phase change material for building thermal management. *Buildings*, 13(4), 900.
6. Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials* (4th ed.). McGraw-Hill Education.
7. ASTM C109 / C109M-16a. (2016). *Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars*. ASTM International.
8. ACI Committee 544. (2009). *Guide for Specifying, Proportioning, and Production of Fiber-Reinforced Concrete*. American Concrete Institute.
9. Kim, Y., Lee, S., & Choi, Y. (2022). Cost-performance analysis of nano-enhanced concrete composites. *Journal of Advanced Civil Engineering*, 46(3), 112–124.
10. Gdoutos, E. E. (2011). Dynamic behavior of nanocomposite materials. In *Recent Advances in Mechanics* (pp. 157–179). Academy of Athens.
11. Konsta-Gdoutos, M.S. Metaxa, Z. S., & Shah, S. P. (2010). Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement – based materials. *cement and Concrete Research*, 40(7), 1052–1059