



## استخراج خواص مکانیکی نانولوله‌های کربنی در لاتکس پلیمری پایه آبی برای کاربرد در سیمان چاه‌های نفت و گاز

حمید بذرکار<sup>1</sup>، علیرضا لورک<sup>2\*</sup>، بابک امین‌نژاد<sup>3</sup>

1- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی عمران، واحد بین‌المللی کیش، دانشگاه آزاد اسلامی، جزیره کیش

2- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد صفادشت، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران

3- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد رودهن، دانشگاه آزاد اسلامی، رودهن

\* جزیره کیش، 79417-75883، lork@safaiu.ac.ir

اطلاعات مقاله:	چکیده
دریافت: 1400/11/08	این تحقیق به منظور تقویت خواص مکانیکی سیمان، بر بکارگیری از نانولوله‌های کربنی به دلیل داشتن خواص مکانیکی عالی تمرکز کرده است. اگرچه کاربرد نانولوله‌های کربنی بعنوان تقویت کننده مواد سیمانی به موضوع هیجان‌انگیزی برای تحقیقات در توسعه بتن و سیمان مطرح شده بود، اما به دلیل چالش‌های ذاتی این ماده در توزیع و انطباق پذیری با محیط کاربرد، عملکرد چشم‌گیری مطابق بر انتظارات حاصل نشد. در این راستا به عنوان یک نوآوری تحقیقاتی، برای غلبه بر چالش عدم توزیع یکنواخت نانولوله‌های کربنی آلی در محیط پایه آبی زمینه سیمان از فن‌های پیشرفته سنتز نانوکامپوزیت‌های پلیمر و پلیمریزاسیون مینی امولسیون استفاده شد. نتایج این تحقیق نشان داد که نانولوله‌های کربنی در امولسیون‌های پلیمری پراکنده می‌شوند و لاتکس پلیمری نیز به خوبی در زمینه پایه آبی سیمان پراکنده می‌شود و توزیع گسترده‌ای از نانوذرات را به منظور بهره‌گیری از بیشترین عملکرد سطحی و خصوصیات مکانیکی آن‌ها میسر می‌کند. عدم کلوخه شدن و تجمع نانوذرات در ساختار سیمان سبب بهره‌گیری از بیشترین سطح واکنشی و فیزیکی از این نانوذرات شده است که به‌طور چشمگیری بر تقویت خصوصیات مکانیکی توده سیمان پس از سخت شدن تأثیر داشته است، به طوری که نتایج تجربی افزایش قابل توجه مدول یانگ تا 580٪، از 12.4 گیگاپاسکال برای نمونه معیار در مقایسه با 28 گیگاپاسکال برای نمونه 4 اصلاح‌شده با 4 درصد وزنی نانوپلیمر را نشان می‌دهد. این نمونه‌ها در فرم دوغاب نیز خصوصیات رئولوژی معیار برای قابلیت پمپاژ و اعمال فشار هیدروستاتیکی کافی برای کنترل چاه را به خوبی مهیا می‌کنند.
پذیرش: 1401/02/26	
کلیدواژگان	
مقاومت مکانیکی، خواص الاستیک، نانولوله‌های کربنی، سیمان و بتن، نانوکامپوزیت پلیمر	

## Extraction of Mechanical Properties of Carbon Nanotubes in Water-Based Polymer Latex for Application in Petroleum Well Cementing

Hamid Bazrkar<sup>1</sup>, Alireza Lork<sup>2\*</sup>, Babak Aminnejad<sup>3</sup>

1- Department of Civil Engineering, Kish International Branch, Islamic Azad University, Kish Island, Iran.

2- Department of civil engineering, Safadasht Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

3- Department of Civil Engineering, Roudehen Branch, Islamic Azad University, Roudehen, Iran

\* P.O.B. 79417-75883, Kish, Iran, lork@safaiu.ac.ir

### Keywords

Mechanical Strength  
Elastic Properties  
Carbon Nanotubes  
Cement Compounds  
Concrete Strength  
Oil Well Cement

### Abstract

In order to enhance the mechanical properties of cement protector sheath, this research has focused on the use of carbon nanotubes due to their proven excellent mechanical properties. Although this idea has previously been an exciting topic for research in the development of cement and concrete, many research results did not live up to expectations due to the dispersion inherent challenges of Carbon nanotube materials. In this regard, as a research innovation, to overcome the non-uniform distribution challenges of organic carbon nanotubes in the cement aqueous base medium, an advanced technique for making emulsion nano polymers was handled to disperse the nanoparticle cores in the polymer matrix. According to the findings of this work, carbon nanotubes disperse effectively in polymer emulsions, and polymer latex disperses well in the aqueous base of cement, allowing for a wide dispersion of nanoparticles to benefit from their maximal surface performance and mechanical properties. Non-agglomeration of nanoparticles in the cement structure has led to the use of the highest reactive and physical surface of these nanoparticles, which has significantly strengthened the mechanical properties of cement mass after hardening. The experimental results significantly increase the Young's modulus to 580% From 4.12 GPa for the benchmark sample compared to 28 GPa for the modified sample with 4% wt. of the nanopolymer. The optimized samples in slurry form also provide good rheological properties for pumping capability and sufficient hydrostatic pressure to control the wellbore pressure.

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Bazrkar, H., Lork, A., Aminnejad, B., "Extraction of Mechanical Properties of Carbon Nanotubes in Water-Based Polymer latex for Application in Petroleum Well Cementing", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 4, pp. 1758-1766, 2022.

https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.547520.1768

**1- مقدمه**

مواد پیشرفته باهدف تقویت و استحکام‌بخشی به خواص مکانیکی سازه‌های رایج مورد استفاده در عرصه صنایع مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند. خصوصیات مکانیکی از ویژگی‌های مورد انتظار برای حصول مقاومت و دوام در سازه‌های مهندسی مانند تجهیزات مکانیکی و مواد ساخت‌وساز است. مواد مورد استفاده در صنعت ساخت‌وساز و بتن، رکن استراتژیک و پایه توسعه زیرساخت‌های صنایع اصلی کشورهاست که تقویت، دوام و پایداری سازه‌ها را امکان‌پذیر می‌کند [1]. با توجه به ماهیت بتن و مواد سیمانی، خصوصیات مکانیکی فوق‌العاده این مواد به سرعت جایگاه خود را در توسعه زیرساخت‌های حیاتی صنایع مادر مانند آب و برق، نیروگاه‌های هسته‌ای و صنایع نفت و گاز تثبیت کرده است. با توسعه دانش و تکنولوژی طراحی مواد پیشرفته، قابلیت حصول خصوصیات مکانیکی بهبود یافته در سیمان و بتن با بهره‌گیری از خواص ترکیبی مواد با زدهی بالا مورد توجه قرار گرفته است. رفع نقایص ذاتی سیمان بتن، تقویت ویژگی‌های مکانیکی و پایداری طولانی مدت از جمله دستاوردهایی است که مواد جدید برای صنعت سیمان و بتن به ارمغان آورده‌اند [2]. در میان مواد تقویت‌کننده، الیاف طبیعی و مصنوعی، لاتکس‌های پلیمری و نانوذرات مختلف، بیشترین محبوبیت و بهترین عملکرد را در بهبود خواص مکانیکی مواد سیمانی ارائه داده‌اند. از آنجا که سیمان یک مخلوط فیزیکی ساده از چند مواد اولیه رایج است، استفاده برخی از این مواد و استخراج خواص مکانیکی از آن‌ها در این محیط به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. نانوذرات از جمله موادی هستند که برای ارائه خصوصیات ویژه خود نیازمند اصلاح سطح یا واکنش‌های پایدارکننده برای تطبیق با محیط واکنش هستند. این مواد که به‌واسطه داشتن سطح‌فعال واکنش بیشتر نسبت به مواد رایج از نوع خود امکان برقرار کردن پیوندهای شیمیایی و سطح واکنشی بیشتری را فراهم می‌کنند، خصوصیات مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی بسیار بهتری نسبت به مواد مشابه رایج ارائه می‌دهند. شرط اصلی میسر شدن چنین فرایندی، بهره‌گیری از تمام ظرفیت واکنشی سطح‌فعال در این مواد است [3].

مواد غیر آلی باوجود سازگاری برای پراکنده شدن در محیط‌های آبی نیز نیازمند فن‌های اصلاح سطح برای بهره‌گیری از بیشترین مقدار بازدهی در واکنش‌های سطحی هستند. باین‌حال، مواد آلی به‌واسطه عدم سازگاری در محیط قطبی آبی با پراکنده شدن در محیط آبی و انجام واکنش‌های سطح با چالش بزرگی مواجه هستند. نانولوله‌های کربنی از جمله نانوذرات آلی هستند که به‌واسطه خصوصیات مکانیکی عالی خود محبوبیت زیادی کسب کرده‌اند و همین سبب شده است تا تمایل پژوهشگران را بر استفاده از آن‌ها به‌عنوان تقویت‌کننده در ساختار سیمان و بتن برانگیزد. همانطور که گفته شد، توزیع و پراکنده‌سازی این مواد آلی در بسترهای پایه آبی یکی از چالش‌های مهندسی در اجرای موفقیت‌آمیز این طرح است که سبب شده است گاهی استفاده از نانولوله‌های کربنی، نتایج چشمگیر مورد انتظار را برآورده نسازد [4، 5]. از همین رو این تحقیق می‌کوشد تا به عنوان یک نوآوری، با بهره‌گیری از روش ساخت نانوکامپوزیت‌های پلیمری راهکاری ویژه‌ای برای استخراج خواص مکانیکی نانولوله‌های کربنی از طریق امکان توزیع و پراکنده‌سازی مناسب آن‌ها در محیط پایه آبی سیمان و بتن و در نهایت بهره‌گیری از خواص مکانیکی عالی مورد انتظار از نانولوله‌های کربنی را در سازه‌های سیمانی امکان‌پذیر سازد.

**2- پیشینه تحقیق****2-1- کاربرد نانولوله‌های کربنی در ساختار سیمان**

در کاربردهای مهندسی عمران تحقیقات زیادی در مورد کاربرد نانولوله‌های

کربنی در ساختارهای بتنی اصلاح‌شده و ترکیبات سیمانی انجام‌گرفته است. استینوسکی و همکاران [6] افزایش 11٪ در حداکثر تنش و افزایش 11.4٪ در مدول الاستیسیته را گزارش کرد. ژو و همکاران [7] افزایش مقاومت فشاری سیمان در حدود 12.1٪ و بهاراج و همکاران [8] افزایش مشابهی را در مقاومت فشاری سیمان ثبت کردند.

مطالعات دیگر بهبود چشمگیر خواص مکانیکی و انعطافی سیمان تقویت‌شده با نانولوله‌های کربن را گزارش کرده‌اند [9]. در میان این گزارش‌ها، افزایش قابل توجهی در مقاومت کششی تا 260٪ در یک سازه بتنی با 0.2٪ وزنی نانولوله‌های کربنی چند دیواره به‌عنوان مواد افزودنی مشاهده شد [9].

پراکندگی ناپایدار و کلوخه شدن ذرات نانولوله‌های کربنی یک مشکل اساسی است که اخیراً توسط چندین محقق در مورد سازه‌های بتن مسلح با نانولوله‌های کربنی یا نانو الیاف کربن گزارش شده است [11]. یکی از فن‌های متداول که اخیراً برای پراکنده‌سازی مخلوط‌های سیمان تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، استفاده از سورفاکتانت‌ها و انرژی فراصوت است [12]. ژو و همکاران [13] بر تأثیر انرژی اولتراسونیک بر پراکندگی نانولوله‌های کربنی تمرکز کردند و تأثیرات پراکندگی خوب و توزیع مناسب این ذرات را بر خصوصیات سیمان‌های اصلاح‌شده با نانولوله‌های کربنی بررسی کردند [13].

**2-2- تقویت پیوند سیمانی تحت تأثیر کامپوزیت‌های مهندسی نانولوله‌های کربن و نانو الیاف کربن**

مواد سیمانی در اولین لحظات گیرش مقاومت کششی کافی ندارند. این امر به‌صورت ظهور ریزترک‌ها در ساختار سیمان و مقاومت کم سیمان در برابر تنش‌های خارجی بروز می‌یابد. تقویت مواد سیمانی بادوام با استفاده از نانولوله‌های کربنی مستلزم تشکیل پیوندهای محکم به‌عنوان بستری مناسب برای انتقال بار از ماتریس سیمان به ذرات تقویت‌کننده است. سیستم‌های تقویت‌کننده الیافی یا نانوذرات بر اساس مکانیسم انتقال بار اعمال‌شده از ماتریس سیمان به الیاف یا ذرات بهینه‌سازی می‌شوند. برای تحقق یافتن هدف جابجایی مؤثر بار خارجی اعمال‌شده از ماتریس سیمان به این مواد، ایجاد پیوندهای قوی بین ماتریس سیمان و مواد تقویت‌کننده ضروری است [20].

کامپوزیت‌های سیمانی نانو الیاف کربن نیز در حال ارزیابی و استفاده برای استفاده در صنایع سیمان هستند. متاکسا و همکاران [15] گزارش دادند که سیمان‌های تقویت‌شده با نانو الیاف کربنی قادر به مقاومت در برابر ترک‌خوردگی در مقیاس نانو هستند. در نتیجه، هم مقاومت خمشی و هم سختی نانوکامپوزیت‌ها به‌طور قابل توجهی بهبود یافته است.

مواد آب‌گریز نانو الیاف کربن و نانولوله‌های کربنی اغلب پیوند مناسبی با ماتریس سیمان ایجاد نمی‌کنند. در نتیجه، از روش‌های متعدد اصلاح سطح برای انطباق آن‌ها به‌منظور بهره‌برداری در برنامه‌های تقویت ترکیبات سیمانی استفاده می‌شود. دانش اثبات‌شده در مورد اثرات انقباض سیمان نشان می‌دهد که تنش‌های کشش موبینگی در طی فرآیند هیدراتاسیون سیمان، تمایل به ایجاد ترک‌های ریز در ماتریس سیمان دارند [16]. در صورت ایجاد پیوند مناسب بین نانولوله‌های کربنی و ماتریس سیمان، سیمان تقویت‌شده با نانولوله‌های کربنی با ایجاد پل‌های نانولوله بر روی دهانه درزه‌ها و میکرو ترک‌های اولیه، می‌تواند از توسعه این درزه‌ها جلوگیری و انتشار آن‌ها را در سراسر ماتریس سیمانی به‌طور چشمگیری کاهش دهد. در این حالت بار تحمل شده توسط ماتریس سیمان به‌طور مؤثری توسط پیوندهایی قوی به نانولوله‌ها

ترکیب نانو فیبر کربن/پلی‌وینیل الکل منجر به افزایش انعطاف‌پذیری در ساختارهای اصلاح‌شده سیمانی گردید [25].

### 3- روش کار

#### 3-1- اجزای اصلی ترکیبات سیمان چاه‌های نفت و گاز

در این مطالعه، مواد استفاده‌شده از یک سیمان پایه و برخی مواد افزودنی تشکیل شده است. سیمان کلاس G مواد سیمان پایه را فراهم می‌کند. سیمان کلاس G مقاومت بالایی در برابر سولفات دارد و به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان یک سیمان حفاری چاه‌های نفت و گاز مورد استفاده قرار می‌گیرد. افزودنی‌های رایج سیمان مورد استفاده در عملیات سیمان‌کاری چاه‌های نفتی شامل کندکننده واکنش، پخش‌کننده، کنترل‌کننده از دست دادن مایعات نیز به‌عنوان افزایه به مخلوط سیمان اضافه می‌شوند.

#### 3-2- نانولوله‌های کربن

نانولوله‌های کربنی در سال‌های اخیر انقلابی شگرف در علوم مهندسی مواد و کامپوزیت ایجاد کرده‌اند [26]. خصوصیات مکانیکی برتر نانولوله‌های کربنی محققان و مهندسان را ترغیب کرده است که ویژگی‌های خارق‌العاده آن‌ها را در ماتریس کامپوزیت‌های پلیمری استخراج کنند [27]. علم مهندسی مواد این امکان را فراهم کرده است که برای طراحی کلاس‌های جدید مواد پیشرفته، با قرار دادن نانولوله‌های کربن در ماتریس پلیمری، خصوصیات منحصر به فرد آن‌ها را توسعه دهیم. یکی از چالش‌های اصلی در هنگام توسعه سیستم‌های کامپوزیت تقویت‌شده با نانولوله‌های کربن، امکان ایجاد پراکندگی مناسب و پایدار و نیز ایجاد جهت‌گیری مطلوب نانولوله‌ها در طول فرایند تولید است [28]. پراکندگی نانولوله‌های کربنی در محلول‌ها ممکن است با لخته و کلوخه شدن ذرات ناشی از فعل‌وانفعال نیروهای وان-در-والس بین نانوذرات به‌ویژه در محیط‌های قطبی آبی همراه شود [29]. کلوخه شدن نانوذرات به معنی عدم امکان استفاده از مزیت اصلی آن‌ها یعنی سطح تماس (یا سطح واکنش فعال) بزرگ‌تر در مقایسه با مواد معمول است. در این شرایط استخراج خواص فوق‌العاده از این ذرات امکان‌پذیر نخواهد بود.

پلیمریزاسیون یک راه‌حل مؤثر برای بهبود پراکندگی نانولوله‌های کربنی در محیط‌های آبی و بهره‌برداری بهتر از خواص مکانیکی و پایداری حرارتی این ذرات است. از نانولوله‌های کربنی می‌توان برای تقویت خاصیت توزیع نیروی سطحی در مواد سیمانی استفاده کرد. توزیع یکپارچه و پراکندگی مداوم نانولوله‌های کربنی در یک ماتریس سیمانی سخت منجر به طراحی‌های مؤثری برای توزیع بهینه نیروهای سطحی می‌شود و در نتیجه به ایجاد سپرهای کامپوزیتی با عملکرد بالا منجر می‌شوند. شواهد اخیر نشان می‌دهد که اصلاح سطح نانولوله‌ها و عامل دار کردن آن‌ها فن‌های موفقی برای ایجاد پراکندگی مناسب در سیستم‌های کامپوزیت پلیمر هستند [30]. تلاش‌های بسیاری برای ترکیب نانولوله‌های کربن در ماتریس‌های مختلف پلیمری انجام شده است. ماتریس پلیمر باید به‌عنوان ماده‌ای انتخاب شود تا خصوصیات فیزیکی، مکانیکی یا شیمیایی مطلوب را برای محصول کامپوزیت نهایی فراهم کند.

#### 3-3- پلیمر متیل متاکریلات

این ماده یکی از سخت‌ترین و محکم‌ترین پلیمرها با شفافیتی بالاتر از شیشه و سطحی صیقلی و براق و مقاوم در برابر عوامل جوی است. علاوه بر آن درصد جذب رطوبت پایین و مقاومت کششی و الکتریکی خوبی دارند. یکی از دلایل انتخاب این پلیمر به‌عنوان ماتریس پلیمری کامپوزیتی، نتایج مؤثر آن در توزیع و پراکنده‌سازی نانوذرات در سیستم‌های نانوکامپوزیت پلیمری است. پلی متیل متاکریلات توسط چندین برنامه تحقیقاتی به‌عنوان ماتریس پلیمری انتخاب شده است [27]، زیرا خصوصیات مکانیکی، سختی و مقاومتی آن، این

منتقل می‌شود. این امر باعث می‌شود مقاومت ساختاری سیمان‌ها به دلیل ظرفیت بالای جذب و توزیع انرژی نانولوله‌های کربنی به میزان قابل‌توجهی افزایش یابد [17].

سیستم‌های اصلاح‌شده لاتکس پلیمری، مقاومت و استحکام پیوند را از طریق بهبود چسبندگی بین ذرات سیمان افزایش می‌دهند. لاتکس ذرات سیمان را به‌عنوان یک فیلم (غشاء) پلیمری می‌پوشاند و تمایل به پر کردن منافذ ایجادشده در ماتریس سیمان در هنگام سخت شدن توده سیمانی دارد [18].

#### 3-2- پلیمرها و نانوکامپوزیت‌های پلیمری در ساختار سیمان

##### 3-2-1- کاربرد پلیمرها در ساختار سیمان

مطالعات گسترده در صنعت بتن و مهندسی عمران به‌طور کلی عملکرد سودمند و قابل‌توجهی از سازه‌های سیمانی را که دارای افزایه‌های پلیمری هستند نشان می‌دهد. برخی از این مزایا را می‌توان در سیمان‌های چاه‌های نفت و گاز استفاده کرد. به دلیل شرایط سخت ته چاهی (فشار، دما، خوردگی شیمیایی)، دوغاب سیمانی که برای سیمان‌کاری چاه‌های نفت و گاز استفاده می‌شود معمولاً به طراحی‌های تخصصی بیشتری نسبت به آنچه در صنعت ساخت‌وساز سطحی استفاده می‌شود، نیاز دارد. [19].

پلیمرها ثابت کرده‌اند که یکی از مؤثرترین مواد افزودنی برای تقویت‌های چندمنظوره در مواد سیمانی هستند. از دهه ۱۹۳۰، مطالعات متعددی در مورد صنعت بتن و سیمان اثرات قابل‌توجه پلیمرها و کامپوزیت‌های پلیمری را در بهبود خصوصیات مکانیکی از جمله مقاومت فشاری بتن و سیمان گزارش کرده‌اند [20]. بتن اصلاح‌شده با پلیمر معمولاً بخشی از آب یا اجزای سیمان را با مواد پلیمری یا کامپوزیت‌های جدید در ماتریس سیمان جایگزین می‌کند. برخی از در عرصه نفت و گاز تحقیقات به‌طور سیستماتیک بر بهبود خواص مکانیکی سیمان‌های چاه نفت و گاز با افزودنی‌های پلیمر و لاتکس متمرکز شده‌اند.

لیو و همکاران [21] نشان دادند که استفاده از الیاف پلیمری سلولز (8٪) محتوای فیبر سلولز به ازای درصد وزنی سیمان) می‌تواند سیمان‌های چاه نفت را با بهبود مقاومت فشاری تا حدود 21٪ و مقاومت کششی تا حدود 24٪ تقویت کند.

اثرات پلیمرها بر روی خواص مکانیکی سیمان‌ها می‌تواند متفاوت و همچنان بحث‌برانگیز باشد. در برخی موارد، کاهش مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته گزارش شده است [22]. در حالی که در برخی موارد دیگر، افزایش در این پارامترها ثبت شده است [23]. این اختلافات به دلیل خصوصیات ذاتی پلیمرها و نحوه مهندسی مولکولی و پراکندگی آن‌ها در ساختار سیمان است.

##### 3-2-2- کاربرد پلیمرها در ساختار سیمان

بر اساس مطالعات پیشین کاربردهای منتشرشده محدودی از نانوکامپوزیت‌های پلیمری برای بهینه‌سازی سیمان چاه نفت وجود دارد؛ بنابراین احتمالاً در بیشتر کاربردهای قبلی نانولوله‌های کربنی‌ها در سیمان‌های چاه نفتی غلظت آن‌ها از نظر مهندسی بهینه‌سازی شده است، زیرا این مواد فقط به‌صورت افزودنی مخلوط خشک مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند. با این حال، برخی از مطالعات مهندسی در صنعت بتن و ساختمان از سیستم‌های نانوکامپوزیتی پلیمر ترکیبی مانند الیاف پلیمر/استایرن-بوتادین [24] یا لاستیک نیتریل کربوکسیلاته/الیاف پلی-پروپیلن در بتن استفاده کرده‌اند. در این موارد، افزودن نانوکامپوزیت پلیمری منجر به کاهش مدول الاستیسیته و افزایش جانی نسبت پواسون (انعطاف‌پذیری) برای ساختارهای سیمان اصلاح‌شده شد. با این حال، استفاده از

ترتیب به نسبت 30 درصد وزنی به 1 درصد وزنی به آب غیر یونیزه اضافه شد. محلول موجود با استفاده از همزنایزر اولتراسونیک (Hielscher UP400S، ساخت آلمان) در سطح انرژی بالا به مدت 15 دقیقه هم زده و همگن شد. در مرحله بعد، سورفاکتانت (سدیم دودسیل سولفات) و آغازگر (آمونیم پرسولفات) به ترتیب با غلظت 25 گرم در لیتر یا 0.0867 میلی‌مول در لیتر برای سورفاکتانت و 1.5 گرم در لیتر برای آغازگر واکنش به راکتور اضافه شدند. در طی عملیات اولتراسونیک، مخلوط در حمام یخ خنک نگه‌داشته شد تا از پلیمریزاسیون مجدد در حین فرایند همگن‌سازی جلوگیری شود. این روش منجر به ایجاد یک مینی امولسیون آلی/معدنی پایدار می‌شود [37].



Fig. 1 Nanocomposite polymer synthesis reactor

شکل 1 راکتور آزمایش سنتز نانوکامپوزیت پلیمری

### 5-3- تجزیه و تحلیل ساختاری-مولکولی ترکیب نانوپلیمر متیل متاکریلات/ نانولوله کربن

مطالعه ساختار مولکولی و پیوندهای شیمیایی ترکیب نانوپلیمری با استفاده از طیف‌سنجی مادون‌قرمز تبدیل فوریه انجام شد که یکی از روش‌های شناسایی ساختار مولکولی مواد با استفاده از آنالیز طیف مادون‌قرمز است که در آن با بررسی برهمکنش موج الکترومغناطیسی در محدوده مادون‌قرمز با استفاده از نمونه، ساختار مولکول‌ها، گروه‌های عملکردی و پیوندهای موجود در نمونه قابل توصیف است. برای ارائه جزئیات بیشتر در مورد کیفیت نانوکامپوزیت پلیمری تولیدشده و در فاز نهایی برای تشریح نقش عملکردی آن در ساختار توده سیمانی سخت شده، ساختار ترکیب نانوپلیمری پیش از استفاده در سیمان و پس از ترکیب و فراوری سیمان سخت شده، با استفاده از طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی و کاوش قرار گرفت. این تجزیه و تحلیل اجازه می‌دهد تا ماهیت ساختاری مواد مرکب را بر اساس جداسازی طیف انتشار منحصربه‌فرد از هر عنصر تحلیلی تشخیص دهیم.

### 6-3- ساخت و آماده‌سازی دوغاب سیمان و روش‌های آزمایش آن

فرمول ساخت دوغاب سیمان بر اساس یک ترکیب سیمان کاربردی در عملیات سیمان‌کاری چاه‌های نفت و گاز طراحی شده است. یک نمونه دوغاب سیمان به‌عنوان نمونه معیار و سه نمونه بهینه‌سازی شده با افزاینده نانوپلیمری در

ماده را برای مواد شکننده در کامپوزیت‌های پلیمر مناسب فراهم می‌کند [31]. کارایی نانوکامپوزیت‌های پلیمری متیل متاکریلات-نانولوله‌های کربن، به‌ویژه در خواص مکانیکی به‌شدت به فن پراکندگی، کیفیت مواد و توزیع پیوسته نانولوله‌ها در کامپوزیت بستگی دارد. این بدان دلیل است که سوسپانسیون‌هایی که پراکنده‌سازی در آن‌ها محقق نشده است منجر به کلوخه شدن ذرات می‌شود و حتی در چنین مواردی با حداکثر 4 درصد وزنی نانولوله‌های کربنی تک جداره ممکن است هیچ بهبودی در خصوصیات مکانیکی ایجاد نکند. چندین گزارش در مورد افزایش مدول الاستیک در ارتباط با کامپوزیت‌های پلیمری متیل متاکریلات- نانولوله کربن وجود دارد. به‌عنوان مثال، افزایش 800 تا 1600 مگاپاسکال برای نانولوله‌های کربنی چند جداره 17 درصد وزنی [32] و همچنین از 1.3 به 6 گیگاپاسکال برای 8 درصد وزنی نانولوله کربنی تک دیواره [33].

استحکام کششی پارامتر مکانیکی دیگری است که در این نوع مواد کامپوزیتی تقویت می‌شود. مطالعات قبلی افزایش چقرمگی و سختی در کامپوزیت‌های پلیمری متیل متاکریلات- نانولوله کربن را برای 2 درصد وزنی افزودنی نانولوله چند دیواره از 1.34 به 1.49 کیلوژول بر مترمربع [34] و افزایش مقاومت کششی از 54.9 به 71.65 مگاپاسکال برای 7 درصد وزنی افزودنی نانولوله‌ها را گزارش کردند. بسیاری از مطالعات دیگر برای ارزیابی عملکرد مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمری متیل متاکریلات-نانولوله کربن انجام شده است. نتایج آن‌ها اغلب افزایش مدول الاستیک و مقاومت فشاری چنین کامپوزیتی را نشان می‌دهد. به همین دلایل، پیش‌بینی می‌شود که استفاده از این افزودنی در افزایش خواص مکانیکی سیمان چاه نفت و گاز مؤثر باشد.

### 4-3- سنتز نانوپلیمر ترکیبی با استفاده از فن پلیمریزاسیون مینی امولسیونی

نانولوله‌های کربنی چند جداره دارای گروه‌های عاملی کربوکسیلیک اسید به‌منظور جایگزینی گروه عاملی کربوکسیلیک توسط یون‌های کلر به‌عنوان مرحله قبل از پراکنده‌سازی، با تیونیل کلراید مخلوط شدند. این مخلوط با استفاده از همزنایزر اولتراسونیک به مدت 20 دقیقه در سطح انرژی کم هم زده و همگن شدند. پس‌از آن، ترکیب به مدت 24 ساعت در دمای 80 درجه سانتی‌گراد تحت ریفلکس قرار گرفت [35, 36]. پس از ریفلکس، ژل به‌دست‌آمده خنک و برای فیلتر کردن آماده شد. ژل تولیدشده توسط پمپ خلأ و فیلتر سنترال گلس در سه مرحله فیلتر شد. علاوه بر مرحله پلیمریزاسیون که در طی آن تبدیل مونومرها به پایان می‌رسد، گروه‌های عاملی کلر جایگزین شده در اطراف نانولوله‌ها، به نانولوله‌هایی که در طی واکنش پلیمریزاسیون بلااستفاده ماندند کمک می‌کنند تا با ساختار C-S-H سیمان در طی فرآیند هیدراسیون پیوند یونی قوی ایجاد کنند.

سنتز نانوپلیمر ترکیبی با استفاده از فرآیند پلیمریزاسیون مینی امولسیون [37] با سورفاکتانت در غلظت بحرانی میسل که مکانیسم غالب فرآیند هسته سازی همگن را ممکن می‌سازد، انجام شد. در طی فرآیند پلیمریزاسیون، راکتور (یک فلاسک سه دهانه) بر روی صفحه داغ با کمک پایه و گیره نگه‌داشته شد که همچنین به یک داماسنج و مجموعه کندانسور به این مجموعه الحاق شده بود. برای اطمینان از پراکندگی خوب محلول از یک همزن مکانیکی و یک همزنایزر اولتراسونیک نیز استفاده شده است (مطابق شکل 1). سدیم دودسیل سولفات به‌عنوان سورفاکتانت و آمونیم پرسولفات به‌عنوان آغازگر واکنش استفاده شد. دمای واکنش در دمای 80 درجه سانتی‌گراد کنترل شد و زمان واکنش 3 ساعت بود. مونومر متیل متاکریلات و نانولوله کربنی اصلاح‌شده به

جدول 1 ترکیبات دوغاب سیمان در نمونه‌های معیار و اصلاح‌شده با نانوپلیمر.

Table 1 Cement slurry compounds in standard and modified samples with nano-polymer.

نمونه واحد	نسبت آب/سیمان	غلظت نانوپلیمر % حجمی	کنترل‌کننده هرزروی % وزنی سیمان	توسعه‌دهنده % وزنی سیمان	تأخیر دهنده % وزنی سیمان	وزن دوغاب پوند بر فوت مکعب
معیار	0.41	0	0.65	0.89	0.08	119
1	0.40	1	0.65	0.89	0.08	119
2	0.39	2	0.65	0.89	0.08	119
3	0.38	3	0.65	0.89	0.08	119
4	0.37	4	0.65	0.89	0.08	119

#### 4- بحث و نتایج

نتایج آزمون تبدیل فوریه به مادون قرمز حاکی از پیوند موفق نانولوله‌ها به ساختار پلیمری است. این آزمون‌ها در مراحل مختلف پیشرفت واکنش‌های سنتزی انجام شدند و تأیید کردند که اهداف پیوندی در ساختار ایجاد شده است. شکل 3 نتایج این آزمون را در مراحل مختلف سنتز نانوپلیمر نشان می‌دهد.

بر اساس تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش طیف‌سنجی پراکندگی انرژی اشعه ایکس، بخش عمده‌ای از ساختار مولکولی ترکیب نانوپلیمری جدید مربوط به مولکول‌های کربن در ساختار نانولوله‌های کربنی و همچنین مولکول‌های کربن در ستون فقرات زنجیره پلیمر ماتیل متاکریلات است. سایر مولکول‌های موجود در این ساختار به تیونیل کلراید، آغازگر واکنش آمونیوم پرسولفات و سورفاکتانت سدیم دودسیل سولفات تعلق دارند که در جدول 2 ارائه شده‌اند.

جدول 2 نتایج کمی آزمون پراکندگی اشعه ایکس.

Table 2 Quantitative results of X-ray scattering test.

Cl	S	P	Na	O	N	C	
0.09	2.29	0.37	1.05	27.41	5.11	63.99	درصد وزنی
0.03	0.95	0.16	0.61	81.22	4.86	70.59	درصد اتمی

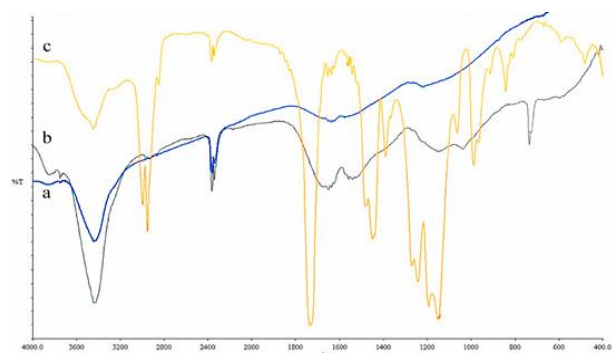


Fig. 3 Fourier transform results for infrared for samples: a) carbon nanotubes with carboxyl functional group, b) chlorine substitution instead of carboxyl functional group, c) methyl methacrylate substitution with Cl functional group).

شکل 3 نتایج آزمون تبدیل فوریه به مادون قرمز برای نمونه‌های: الف) نانولوله‌های کربن با گروه عاملی کربوکسیل، ب) جانشینی متیل متاکریلات با گروه عاملی کلر، ج) جانشینی متیل متاکریلات با گروه عاملی کلر.

منحنی a مربوط به نمونه نانولوله‌های کربنی با گروه عاملی کربوکسیل قبل از هرگونه واکنش شیمیایی است. منحنی b به نانولوله‌های اصلاح‌شده با استفاده از تیونیل کلراید تحت فرآیند ریفلکس اشاره دارد که با مشخصه پیوند کششی کربن-کلر در قالب یک پیک قوی در محدوده 750 شناسایی می‌شود. در منحنی c، نانولوله‌های کربن با حذف پیوند کلر و ایجاد پیوند کششی کربن-کربن در محدوده 1000-1300 در تشخیص داده می‌شوند.

غلظت‌های متفاوت طراحی شدند که ترکیب این نمونه‌ها در جدول 1 ارائه شده است. تمام مراحل ساخت دوغاب، قالب‌گیری و برش نمونه‌ها جهت آزمون‌های مکانیکی بر اساس توصیه‌های استاندارد انستیتو مهندسی نفت آمریکا انجام گرفته است. دوغاب سیمان توسط ویسکومتر مدل فن-32 و دستگاه فیلترپرس استاندارد برای ارزیابی خواص رئولوژی و فیلتراسیون مورد بررسی قرار گرفته است. آزمون‌های مکانیکی شامل مقاومت فشاری تک‌محوری، مدول الاستیسیته یانگ، مقاومت کششی و نسبت پواسون هستند که با بکار بردن استانداردهای آزمون سیمان چاه‌های نفت و گاز اجرا می‌شوند. دستگاه‌های مکانیکی مجهز به چندین حس‌گر خارجی برای اندازه‌گیری تغییرات ابعاد به صورت متغیر خطی است. این حس‌گرها برای اندازه‌گیری کرنش‌های محوری و جانبی علاوه بر خواندن تنش اعمال شده در سلول تحت بار، در انتها و دو طرف گیره نیز نصب شده‌اند. شکل 2 دستگاه اعمال تنش تک‌محوری با حس‌گرهای الحاقی شده برای اندازه‌گیری جانبی را نمایش می‌دهد. فرآیند نمونه‌گیری و کالیبراسیون دستگاه بر اساس استانداردهای API RP 10 b-2 [38] و ASTM C109 [39] تنظیم شد. در مرحله بعد، مقاومت کششی توسط دستگاه آزمون کششی برزلی مطابق با استاندارد ASTM D3967 اندازه‌گیری شد [40].



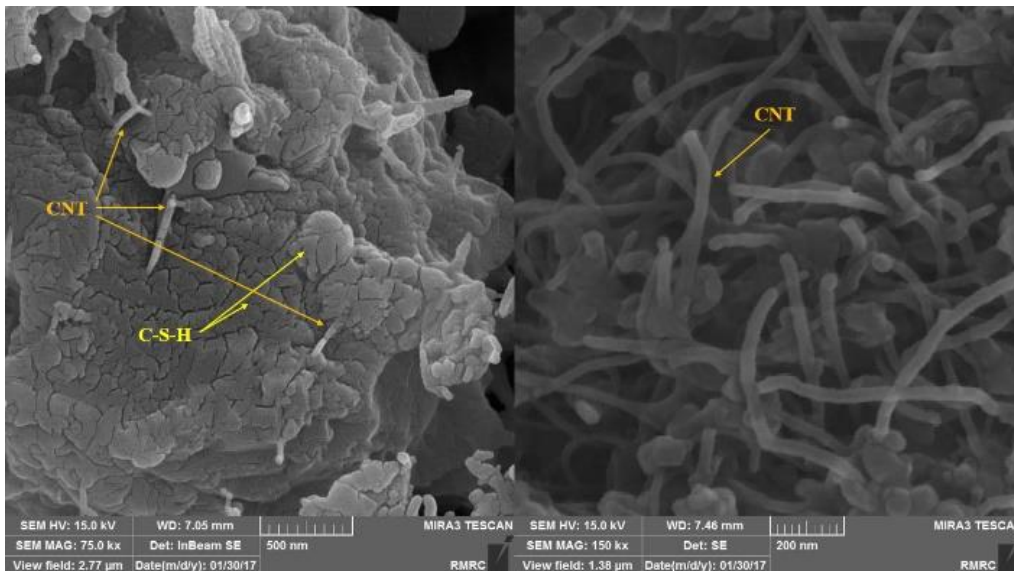
Fig. 2 Uniaxial stress device with integrated sensors to measure lateral displacement

شکل 2 دستگاه اعمال تنش تک‌محوری با حس‌گرهای الحاقی شده برای اندازه‌گیری جانبی

سیمان را نشان می‌دهد. نواحی مشخص شده در سمت چپ شکل نشان‌دهنده تحقق توزیع مورد انتظار نانولوله‌های کربنی پوشیده شده با پلیمر در ماتریس سیمان است. در سمت راست تصویر، کاوشگر بر روی باز شدن یک میکرو ترک سیمان و نشان دادن پل‌های الاستیک روی دهانه میکرو ترک تمرکز دارد که در برابر ایجاد ترک‌های ماتریس سیمان سخت مقاومت می‌کند. خصوصیات فوق‌العاده الاستیک نانولوله‌های کربنی و مقاومت کششی ماتریس واسطه‌ای پلیمری، سیمان را برای مقاومت در برابر رشد ترک‌های انقباض بدون ایجاد خطر مقاومت سیمان تقویت کرده است.

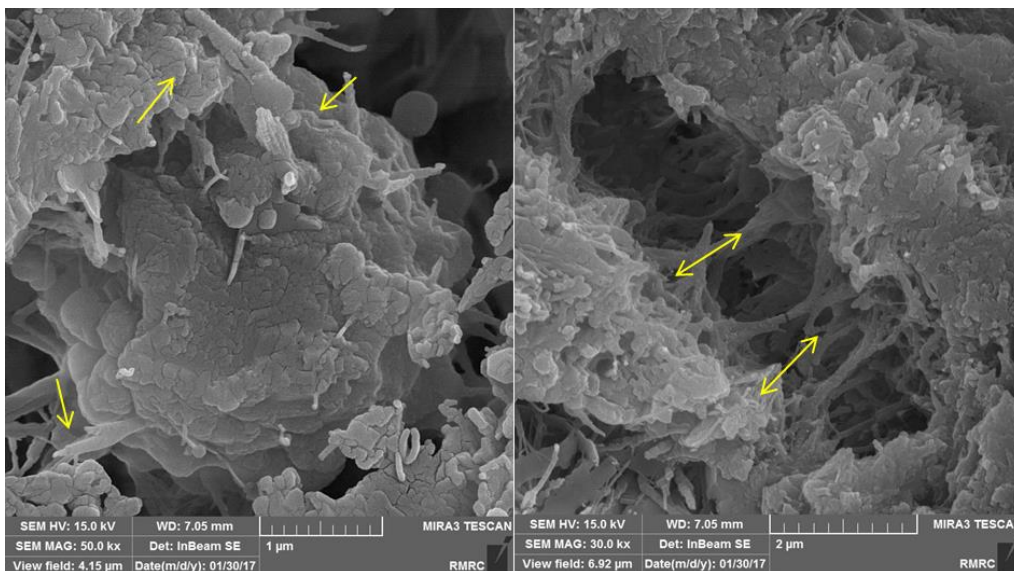
تصاویر میکروسکوپ الکترونی در شکل 4 نحوه قرارگیری مناسب نانولوله‌های کربنی در ساختار C-S-H سیمان را نمایش می‌دهد که باید منجر به تقویت مواد سیمان شود. مهم‌ترین چالش در تهیه این سیمان‌ها دستیابی به پراکندگی مناسب و جلوگیری از لخته شدن نانولوله‌های کربن در محیط‌های آبی مانند ساختار C-S-H سیمان است. شکل 3 تأیید می‌کند که این هدف اصلی محقق شده است.

شکل 5 مقطع شکسته یک نمونه سیمان تقویت‌شده با افزایه نانوپلیمر را نشان می‌دهد. شکل 5 به‌وضوح نحوه قرارگیری مواد تقویت‌کننده در ماتریس



**Fig. 4** Carbon nanotubes (CNTs) characterized in the C-S-H structure of cement and achieving their main goal as the dispersion of hydrophobic CNT particles in aqueous medium. Proper placement of CNT particles helps to strengthen the cementitious material. (Left) hard cement mass, (right) pure CNT particles before any dispersing method are applied on them.

شکل 4 نانولوله‌های کربن (CNT) مشخص شده در ساختار C-S-H سیمان و رسیدن به هدف اصلی خود به‌عنوان پراکنده شدن ذرات CNT آب‌گریز در محیط آبی. جای‌گیری مناسب ذرات CNT به تقویت مواد سیمانی کمک می‌کند. چپ) توده سیمان سخت، راست) ذرات CNT خالص قبل از اینکه هرگونه روش پراکندگی بر روی آن‌ها اعمال شود.



**Fig. 5** Reinforced cement using nano-polymer compound after mechanical failure. These images show how the hybrid composite is involved in integrating the cement matrix and creating tissue adhesion and fracture resistance by creating bridges over the cracks.

شکل 5 سیمان تقویت‌شده با استفاده از ترکیب نانوپلیمری پس از شکست مکانیکی. این تصاویر نشان می‌دهد که چگونه کامپوزیت هیبریدی در ایجاد یکپارچه‌سازی ماتریس سیمانی و ایجاد چسبندگی یافت و مقاومت در برابر شکستگی با ایجاد پل‌هایی روی شکاف‌ها نقش دارد.

غلظت بیشتر باشد. غلاف سیمان اصلاح‌شده با نانوکامپوزیت به‌وضوح قادر به کاهش تغییر شکل و آسیب احتمالی ناشی از تنش‌های بسیار بزرگ لایه‌های سنگی زیرزمینی است. چنین عملکردی در توزیع بهتر نیروهای سطحی خارجی باعث می‌شود تا غلاف سیمانی بتواند از تخریب وظیفه مهم جداسازی ناحیه‌ای خود جلوگیری کند.

ترکیب نانوپلیمری جدید ساخته و آزمایش‌شده می‌تواند انسجام ماتریس سیمان را در هنگام بندش اولیه سیمان به دلیل مقاومت کششی بالا تقویت کند. این امر بافت سیمان را قادر می‌سازد تا در برابر ترک‌خوردگی در لحظات اولیه بندش و سخت شدن که ناشی از انقباض اتوزن ذاتی مواد سیمانی است، بهتر مقاومت کند. همچنین با افزایش مقاومت کششی سیمان سخت شده در حدود 46٪ از 2.71 مگاپاسکال برای نمونه معیار در مقایسه با 3.97 مگاپاسکال برای نمونه 4 که با 5 درصد وزنی نانوپلیمر بهینه‌شده است، به یکپارچگی ماتریس سیمان در مرحله آزمایش مکانیکی کمک می‌کند. اتصال بین نانولوله‌های کربنی و اجزای سیمان به روش پل مانند توسط نانولوله‌های کربنی، می‌تواند ترک‌ها را بپوشاند و هنگام اعمال تنش به‌صورت الاستیک عمل کند. این رفتار خاص همچنین می‌تواند با توزیع انرژی به سطوح درگیر، از گسترش عرضی ترک جلوگیری کند.

نسبت پواسون تمایل تغییر فرم مواد را در جهت عمود بر یک نیروی اعمال‌شده توصیف می‌کند. نسبت پواسون سیمان‌های مورد آزمایش تا 66٪ افزایش را برای نمونه‌های بهینه‌شده نشان می‌دهد. این ارتقاء شامل تغییر در مقدار پواسون از 0.15 برای نمونه معیار در مقایسه با 0.25 برای نمونه 4 تحت بهینه‌سازی با 4 درصد وزنی نانوکامپوزیت پلیمری است. مقادیر پایین نسبت پواسون سیمان‌ها به‌عنوان عامل تأثیرگذاری بر ترک‌خوردگی ماتریس برای کامپوزیت‌های ماتریس شکننده تقویت‌شده با الیاف شناخته‌شده است. برخلاف رفتار متداول بتن یا سیمان، خواص ترکیبی نانوکامپوزیت پلیمر افزایش قابل توجهی در هر دو مدول الاستیسیته و نسبت پواسون نشان می‌دهد. این دو ویژگی به‌طور هم‌زمان خواص مقاومتی را با انعطاف‌پذیری مناسب در محدوده الاستیک ترکیب می‌کنند. شکل 6 تأثیر غلظت نانوپلیمر متیل متاکریلات-نانولوله کربن بر مقاومت فشاری و کششی را نشان می‌دهد. یک‌روند نزولی جزئی برای مقاومت فشاری هم‌زمان با یک‌روند صعودی برای مقاومت کششی با افزایش غلظت نانوپلیمر در آزمایش‌ها مکانیکی نمونه‌های سیمانی سخت شده دیده می‌شود. شکل 7 رفتار مدول الاستیک و نسبت پواسون در غلظت‌های مختلف افزایش نانوپلیمری را نشان می‌دهد. هر دو پارامتر ضریب الاستیسیته (E) و نسبت پواسون با افزایش غلظت نانوکامپوزیت پلیمر افزایش می‌یابند.

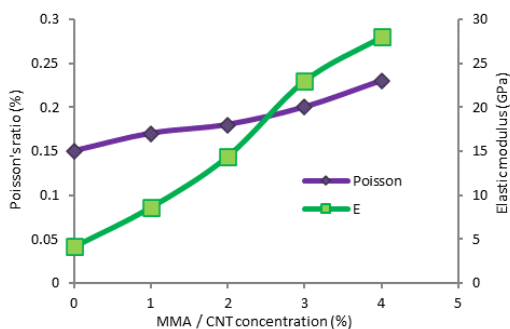


Fig. 7 The effect of nano-polymer concentration on the modulus of elasticity and Poisson's ratio of cement samples.

شکل 7 تأثیر غلظت نانوپلیمر بر مدول الاستیسیته و نسبت پواسون نمونه‌های سیمان.

جدول 3 نتایج آزمایش‌های مکانیکی برای نمونه‌های سیمان با غلظت‌های مختلف افزایش پلیمری و نمونه معیار را نشان می‌دهد. این نتایج تأیید می‌کند که ترکیب نانوپلیمری متیل متاکریلات-نانولوله کربن می‌تواند با موفقیت خواص مکانیکی برتر دو جزء ترکیب‌شونده را باهم ترکیب و مخلوط کند. به‌منظور تأیید تکرارپذیری نتایج به‌دست‌آمده، هر آزمایش فشاری سه بار تکرار شد. استحکام تراکمی مهم‌ترین خاصیت سیمان است، زیرا می‌تواند معیاری مناسب برای توصیف قدرت و استحکام سازه‌های سیمانی باشد. نتایج آزمایش‌ها تجربی نشان می‌دهد که یک کاهش جزئی در استحکام تراکمی در حدود 3٪ کاهش، از 23.91 مگاپاسکال برای نمونه معیار در مقایسه با 23.27 مگاپاسکال برای نمونه 4 با بیشترین غلظت ترکیب نانوپلیمر (شکل 6) دیده می‌شود. جایگزینی لانتکس نانوپلیمری با غلظت بیشتر در ماتریس سیمان دلیل این کاهش جزئی مقاومت فشاری است. از پلیمرهای امولسیون و لاتکس‌های پایه آبی به‌طور گسترده‌ای برای بهبود چسبندگی و بهبود جریان دوغاب در دوغاب سیمان استفاده می‌شود، با این حال این مواد افزودنی، هوا را در دوغاب سیمان به دام می‌اندازند که تأثیر قابل توجهی در کاهش مقاومت فشاری دوغاب دارد.

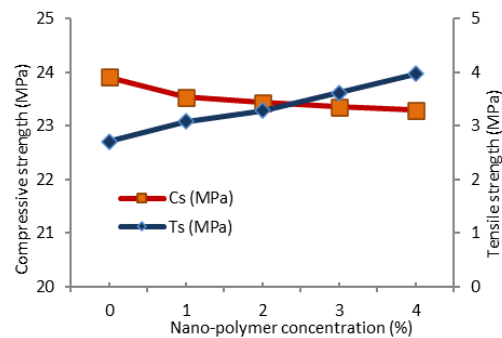


Fig. 6 Effect of nano-polymer concentration on compressive strength and tensile strength of cement samples.

شکل 6 تأثیر غلظت نانوپلیمر بر مقاومت فشاری و مقاومت کششی نمونه‌های سیمان.

جدول 3 آزمایش‌های مکانیکی برای نمونه‌های سیمان.

Table 3 Mechanical tests for cement samples.

نمونه دوغاب	مقاومت فشاری (مگاپاسکال)	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	مقاومت کششی (مگاپاسکال)	نسبت پواسون
معیار	24.02 ± 0.172	6.6	-2.50	0.12
1	21.81 ± 0.145	4.42	-2.71	15.0
2	23.46 ± 0.145	12.4	-3.28	19.0
3	23.35 ± 0.145	23	-3.62	23.0
4	23.27 ± 0.145	28	-3.97	25.0

مدول الاستیسیته یا مدول یانگ، سختی و مقاومت سازه بتنی را بیان می‌کند و ظرفیت تحمل آن را برای تغییر شکل هنگام اعمال تنش‌های سطحی ارزیابی می‌کند. با توجه به شکل 6، نتایج تجربی افزایش قابل توجه مدول یانگ تا 580٪، از 4.12 گیگاپاسکال برای نمونه معیار در مقایسه با 28 گیگاپاسکال برای نمونه 4 اصلاح‌شده با 4 درصد وزنی نانوپلیمر را نشان می‌دهد. نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص الاستیکی منحصر به فرد خود، مدول الاستیسیته ماتریس سیمان را به تدریج افزایش می‌دهند. این بهبود مشاهده‌شده در سختی بتن همچنین ممکن است تا حدی به دلیل کاهش قابل توجه تخلخل سیمان و حجم منافذ در نمونه‌های حاوی افزایش نانوپلیمر متیل متاکریلات-نانولوله کربن با

## 5- نتیجه‌گیری

بهره‌گیری از فن پراکنده‌سازی نانولوله‌های کربن در یک ماتریس پایه آبی پلیمری این امکان را فراهم کرده است تا توزیع یکنواخت و مناسبی از نانولوله‌ها را با استفاده از افزایش نانولوله‌های پلیمری در زمینه سیمانی فراهم کند. عدم کلوخه شدن و تجمع نانوذرات در ساختار سیمان سبب بهره‌گیری از بیشترین سطح واکنشی و فیزیکی از این نانوذرات شده است که به‌طور چشمگیری در تقویت خصوصیات مکانیکی توده سیمان پس از سخت شدن تأثیر داشته است. افزایش 580٪ در مدول الاستیسیته، 46٪ در استحکام کششی و 66٪ در نسبت پواسون برای نمونه سیمان بهبودیافته با 4 درصد وزنی افزایش نانولوله‌ها در مقایسه با نمونه معیار به ثبت رسیده است. این نتایج ثابت می‌کند که استخراج خواص مکانیکی فوق‌العاده نانولوله‌های کربنی با انتخاب فن صحیح پراکنده‌سازی و توزیع در ساختار سیمانی برای کاربرد در چاه‌های نفت و گاز و حتی سازه‌های عمرانی، بازدهی بسیار بالایی را به همراه دارد.

## 6- مراجع

- Properties of Carbon Nanotube Reinforced Cement Pastes“ Carbon, Vol. 85, pp. 212-220, 2015.
- [14] Rahimirad, M. and Baghbadorani, J. D., “Properties of Oil Well Cement Reinforced by Carbon Nanotubes“ in Proceeding of OnePetro, pp.
- [15] Metaxa, Z. S., Konsta-Gdoutos, M. S. and Shah, S. P., “Carbon Nanofiber Cementitious Composites: Effect of Debulking Procedure on Dispersion and Reinforcing Efficiency“ Cement and Concrete Composites, Vol. 36, pp. 25-32, 2013.
- [16] Wu, J., Li, M. and Zhang, A., “Synthesis and Characterization of Sss/Ham/Aa Terpolymer as a Fluid Loss Additive for Oil Well Cement“ Journal of Applied Polymer Science, Vol. 135, No. 22, pp. 46266, 2018.
- [17] Cui, X., Han, B., Zheng, Q., Yu, X., Dong, S., Zhang, L. and Ou, J., “Mechanical Properties and Reinforcing Mechanisms of Cementitious Composites with Different Types of Multiwalled Carbon Nanotubes“ Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 103, pp. 131-147, 2017.
- [18] Wang, M., Wang, R., Yao, H., Farhan, S., Zheng, S., Wang, Z., Du, C. and Jiang, H., “Research on the Mechanism of Polymer Latex Modified Cement“ Construction and Building Materials, Vol. 111, pp. 710-718, 2016.
- [19] Chung, D. D. L., “Use of Polymers for Cement-Based Structural Materials“ Journal of materials science, Vol. 39, No. 9, pp. 2973-2978, 2004.
- [20] Fowler, D. W., “Polymers in Concrete: A Vision for the 21st Century“ Cement and concrete composites, Vol. 21, No. 5-6, pp. 449-452, 1999.
- [21] Liu, K., Cheng, X., Zhang, X., Guo, X. and Zhuang, J., “Design of Low-Density Cement Optimized by Cellulose-Based Fibre for Oil and Natural Gas Wells“ Powder technology, Vol. 338, pp. 506-518, 2018.
- [22] Kumar, A., Gupta, G., Mehra, R., Tambe, R. and Ahuja, G., “Flexible Cement Extends Wellbore Life with an Integrated Approach to Zonal Isolation“ in Proceeding of OnePetro, pp.
- [23] Soltanian, H., Ataei, M., Khalokakaie, R. and Kazemzadeh, E., “Using an Elastic, Expandable Sealant System for Zonal Isolation of Maroon Wells: A Laboratory Study“ Journal of Petroleum Science and Technology, Vol. 7, No. 1, pp. 13-22, 2017.
- [24] Morris, W., Criado, M. A., Robles, J. and Bianchi, G., “Design of High Toughness Cement for Effective Long Lasting Well Isolations“ in Proceeding of OnePetro, pp.
- [25] Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. and Saito, R., “Physics of Carbon Nanotubes“ Carbon, Vol. 33, No. 7, pp. 883-891, 1995.
- [26] Yao, Z., Postma, H. W. C., Balents, L. and Dekker, C., “Carbon Nanotube Intramolecular Junctions“ Nature, Vol. 402, No. 6759, pp. 273-276, 1999.
- [27] Al Mafarage, A. M., “Processing and Properties of Multifunctional Two-Dimensional Nanocomposite Based on Single Wall Carbon Nanotubes“, 2019.
- [28] Hussain, F., Hojjati, M., Okamoto, M. and Gorga, R. E., “Polymer-Matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview“ Journal of composite materials, Vol. 40, No. 17, pp. 1511-1575, 2006.
- [29] Mitchell, C. A., Bahr, J. L., Arepalli, S., Tour, J. M. and Krishnamoorti, R., “Dispersion of Functionalized Carbon Nanotubes in Polystyrene“ Macromolecules, Vol. 35, No. 23, pp. 8825-8830, 2002.
- [30] Eitan, A., Jiang, K., Dukes, D., Andrews, R. and Schadler, L. S., “Surface Modification of Multiwalled Carbon Nanotubes: Toward the Tailoring of the Interface in Polymer Composites“ Chemistry of materials, Vol. 15, No. 16, pp. 3198-3201, 2003.
- [31] Star, A., Stoddart, J. F., Steuerman, D., Diehl, M., Boukai, A., Wong, E. W., Yang, X., Chung, S. W., Choi, H. and Heath, J. R., “Preparation and Properties of Polymer-Wrapped Single-Walled Carbon Nanotubes“ Angewandte Chemie, Vol. 113, No. 9, pp. 1771-1775, 2001.
- [32] Jia, Z., Wang, Z., Xu, C., Liang, J., Wei, B., Wu, D. and Zhu, S., “Study on Poly (Methyl Methacrylate)/Carbon Nanotube
- [1] Dahi Taleghani, A., Li, G. and Moayeri, M., “Smart Expandable Cement Additive to Achieve Better Wellbore Integrity“ Journal of Energy Resources Technology, Vol. 139, No. 6, 2017.
- [2] Li, M., Deng, S., Yu, Y., Jin, J., Yang, Y. and Guo, X., “Mechanical Properties and Microstructure of Oil Well Cement Stone Enhanced with Tetra-Needle Like Zn Whiskers“ Construction and Building Materials, Vol. 135, pp. 59-67, 2017.
- [3] Guo, S., Bu, Y., Liu, H. and Guo, X., “The Abnormal Phenomenon of Class G Oil Well Cement Endangering the Cementing Security in the Presence of Retarder“ Construction and Building Materials, Vol. 54, pp. 118-122, 2014.
- [4] De Andrade, J. and Sangesland, S., “Cement Sheath Failure Mechanisms: Numerical Estimates to Design for Long-Term Well Integrity“ Journal of Petroleum Science and Engineering, Vol. 147, pp. 682-698, 2016.
- [5] Petersen, T. A. and Ulm, F.-J., “Radial Fracture in a Three-Phase Composite: Application to Wellbore Cement Liners at Early Ages“ Engineering Fracture Mechanics, Vol. 154, pp. 272-287, 2016.
- [6] Stynoski, P., Mondal, P. and Marsh, C., “Effects of Silica Additives on Fracture Properties of Carbon Nanotube and Carbon Fiber Reinforced Portland Cement Mortar“ Cement and Concrete Composites, Vol. 55, pp. 232-240, 2015.
- [7] Xu, S., Liu, J. and Li, Q., “Mechanical Properties and Microstructure of Multi-Walled Carbon Nanotube-Reinforced Cement Paste“ Construction and Building Materials, Vol. 76, pp. 16-23, 2015.
- [8] Bharj, J., “Experimental Study on Compressive Strength of Cement-Cnt Composite Paste“ Indian Journal of Pure & Applied Physics (IJPAP), Vol. 52, No. 1, pp. 35-38, 2015.
- [9] Al-Rub, R. K. A., Ashour, A. I. and Tyson, B. M., “On the Aspect Ratio Effect of Multi-Walled Carbon Nanotube Reinforcements on the Mechanical Properties of Cementitious Nanocomposites“ Construction and building materials, Vol. 35, pp. 647-655, 2012.
- [10] Metaxa, Z. S., Konsta-Gdoutos, M. S. and Shah, S. P., “Mechanical Properties and Nanostructure of Cement-Based Materials Reinforced with Carbon Nanofibers and Polyvinyl Alcohol (Pva) Microfibers“ Special Publication, Vol. 270, pp. 115-124, 2010.
- [11] Sanchez, F. and Sobolev, K., “Nanotechnology in Concrete—a Review“ Construction and building materials, Vol. 24, No. 11, pp. 2060-2071, 2010.
- [12] Sobolkina, A., Mechtcherine, V., Khavrus, V., Maier, D., Mende, M., Ritschel, M. and Leonhardt, A., “Dispersion of Carbon Nanotubes and Its Influence on the Mechanical Properties of the Cement Matrix“ Cement and Concrete Composites, Vol. 34, No. 10, pp. 1104-1113, 2012.
- [13] Zou, B., Chen, S. J., Korayem, A. H., Collins, F., Wang, C. M. and Duan, W. H., “Effect of Ultrasonication Energy on Engineering



- Composites“ Materials Science and Engineering: A, Vol. 271, No. 1-2, pp. 395-400, 1999.
- [33] Jin, Z., Pramoda, K. P., Xu, G. and Goh, S .H., “Dynamic Mechanical Behavior of Melt-Processed Multi-Walled Carbon Nanotube/Poly (Methyl Methacrylate) Composites“ Chemical Physics Letters, Vol. 337, No. 1-3, pp. 43-47, 2001.
- [34] Cooper, C. A., Ravich, D., Lips, D., Mayer, J. and Wagner, H. D., “Distribution and Alignment of Carbon Nanotubes and Nanofibrils in a Polymer Matrix“ Composites science and technology, Vol. 62, No. 7-8, pp. 1105-1112, 2002.
- [35] Roy, S., Petrova, R. S. and Mitra, S., “Effect of Carbon Nanotube (Cnt) Functionalization in Epoxy-Cnt Composites“ Nanotechnology reviews, Vol. 7, No. 6, pp. 475-485, 2018.
- [36] Mayank, Kaur Billing, B., Agnihotri, P. K., Kaur, N., Singh, N. and Jang, D. O., “Ionic Liquid-Coated Carbon Nanotubes as Efficient Metal-Free Catalysts for the Synthesis of Chromene Derivatives“ ACS Sustainable Chemistry & Engineering, Vol. 6, No. 3, pp. 3714-3722, 2018.
- [37] Mamaghani, M. Y., Pishvaei, M. and Kaffashi, B., “Synthesis of Latex Based Antibacterial Acrylate Polymer/Nanosilver Via in Situ Miniemulsion Polymerization“ Macromolecular Research, Vol. 19, No. 3, pp. 243-249, 2011.
- [38] Api, R. P., “10b-2: Api Recommended Practice 10b-2, Recommended Practice for Testing Well Cements“ API RP 10B-2, 2013.
- [39] ASTM, “Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-In. Or [50-Mm] Cube Specimens)“ West Conshohocken: ASTM International, 2016.
- [40] ASTM, “Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Intact Rock Core Specimens. Astm Standards on Disc, 04.08. Desination:D3967; “ , 2001.