

Polymer concrete prepared from polyester resin containing CNF/SiO₂ nanocomposite and checking mechanical performance and durability

Mohsen Karimi ^a, Seyed Mojtaba Movahedifar ^{b*}, Amin Honarbakhsh ^c, Mahdi Nobahari ^d, Rahele Zhiani ^e

^a. Department of Civil Engineering, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran;

^{b*}. New materials technology and processing research center, Department of Civil Engineering, Neyshabur branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran

^c. Department of Chemistry, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran.

^d. New Materials Technology and Processing Research Center, Department of Chemistry, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran

^e. Department of Chemistry, Faculty of Sciences, Neyshabur Branch, Islamic Azad University, Neyshabur, Iran

<https://doi.org/10.22034/ispdrc.2024.2043888.1145>

ARTICLE INFO

Keywords:

Polymer concrete
Polyester resin
Mechanical resistance
Durability
Nanocomposite

Received:

06 November 2024

Received in revised form:

01 December 2024

Accepted:

14 December 2024

pp.128-146

ABSTRACT

Today, the use of polymer concrete is limited to special cases due to the high price. The most popular polymer resin used in concrete is unsaturated polyester resin. This kind of resin is widely used because it is accessible, affordable, has good mechanical qualities, and has a high compressive strength. This article's goal is to look into the mechanical characteristics of polyester resin-prepared polymer concrete with CNF/SiO₂ nanocomposite, compressive, bending, and abrasion resistances, water penetration depth under pressure and its durability in acidic environments. The mixing plan including samples containing 5, 10 and 15% of polyester resin and 1, 2, 3% of CNF/SiO₂ was prepared and the resistance and durability were investigated. The findings of this study then demonstrated that, during the initial processing of polymer concrete, it showed high mechanical resistance and with the increase of CNF/SiO₂, its resistance increased more, the best sample CP10-CS2 has 10% polyester resin and 2% of CNF/SiO₂. Also, after 3 and 10 months exposure to corrosive acid, the samples showed less than 10% and 20% loss in compressive strength, respectively.

Corresponding author (Email: movahedi_far@yahoo.com)

Extended Abstract

This study focuses on enhancing the performance of polymer concrete (PC) by incorporating a nanocomposite of cellulose nanofibers (CNF) and silica (SiO₂) into an unsaturated polyester resin matrix. Polymer concrete, known for its superior mechanical strength, low permeability, and exceptional durability compared to conventional cement-based concrete, is often limited by its high production costs. The motivation behind this research is to optimize the material properties of polymer concrete by modifying its composition to achieve a balance between performance and cost-efficiency. By introducing CNF/SiO₂ nanocomposites, the study aims to improve mechanical and chemical performance, thereby expanding the potential applications of polymer concrete in various industries, especially where enhanced durability and mechanical resistance are required.

1. Introduction

Polymer concrete, which has been in development since the 1950s, is highly regarded for its remarkable mechanical properties, including high compressive and tensile strengths, superior resistance to chemical attacks, and minimal water permeability. However, the prohibitive cost of polymer resins, particularly unsaturated polyester resins, has limited its adoption in large-scale construction projects. One of the primary objectives of this research is to develop a cost-effective formulation of polymer concrete that retains the material's exceptional properties while reducing overall production costs. The incorporation of nanocomposites, specifically CNF/SiO₂, into the polymer matrix is expected to enhance the performance characteristics of polymer concrete, making it more viable for diverse applications, including use in harsh environments and high-stress applications.

2. Materials and Methods

The materials used in this research include unsaturated polyester resin, cellulose nanofibers (CNFs), and silica (SiO₂). CNF, known for its high surface area and excellent mechanical properties, was functionalized with carboxyl groups using concentrated nitric acid to facilitate its dispersion within the polymer matrix. Silica (SiO₂), a widely used nanofiller, was introduced to further enhance the mechanical properties and increase the surface area for polymer interactions. The CNF/SiO₂ nanocomposite was then prepared through electrospinning, followed by mixing with the polyester resin at different concentrations.

For the experimental work, various samples of polymer concrete were prepared by varying the polyester resin content (5%, 10%, and 15%) and the nanocomposite concentration (1%, 2%, and 3%). These samples were identified by their respective compositions, such as PC10-CS2, which represents 10% resin and 2% nanocomposite. The key tests performed to evaluate the mechanical and durability properties of the samples include:

- Compressive strength: Measured according to European standard EN 12390-3.
- Bending strength: Evaluated using German National Standard DIN 1048-5.
- Abrasion resistance: Determined based on European standard EN 1338.
- Water penetration depth: Measured under pressure as per EN 12390-8.
- Durability against sulfuric acid: Samples were exposed to sulfuric acid for 300 days to evaluate their chemical resistance.

3.Results and Discussion

3.1 Mechanical Properties

The addition of CNF/SiO₂ nanocomposites significantly enhanced the mechanical properties of the polymer concrete. The compressive strength of the samples showed a marked improvement with the incorporation of 2% CNF/SiO₂ nanocomposites. Among all formulations, the PC10-CS2 sample, containing 10% polyester resin and 2% CNF/SiO₂ nanocomposites, exhibited the highest compressive strength. This sample achieved a significant increase in compressive strength compared to pure polyester resin samples without nanocomposites. However, further increases in nanocomposite content (3%) did not show any additional benefits, indicating an optimal threshold for nanocomposite inclusion.

The bending strength of the polymer concrete was also improved with the addition of nanocomposites. The sample with 2% CNF/SiO₂ outperformed other formulations, exhibiting enhanced flexibility and resistance to bending forces. This suggests that the nanocomposites contribute to a more robust bonding between the resin and the aggregates, resulting in better load distribution and higher overall strength.

In terms of abrasion resistance, the polymer concrete containing 10% resin and 2% CNF/SiO₂ (PC10-CS2) demonstrated superior wear resistance compared to all other formulations. This property is particularly crucial for applications where the material is subject to high abrasion, such as in flooring or infrastructure exposed to heavy traffic.

3.2 Durability

Water penetration tests revealed that the incorporation of CNF/SiO₂ nanocomposites significantly reduced the water penetration depth. The PC10-CS2 sample demonstrated the lowest water penetration, indicating that the nanocomposites acted as an effective barrier against moisture ingress. This characteristic is vital for applications in wet or submerged environments, where the material's resistance to water absorption can prevent degradation and prolong the life of structures.

In acidic environments, particularly sulfuric acid exposure, the polymer concrete with CNF/SiO₂ nanocomposites exhibited exceptional chemical resistance. After 300 days of exposure, the compressive strength of the PC10-CS2 sample showed only a 23% reduction, a remarkable result considering the aggressive nature of sulfuric acid. This performance highlights the potential of this polymer concrete formulation for use in corrosive environments, such as sewage treatment facilities and industrial applications where exposure to harsh chemicals is common.

4. Conclusion and Future Work

This research demonstrates that the incorporation of CNF/SiO₂ nanocomposites into unsaturated polyester resin significantly enhances the mechanical and durability properties of polymer concrete. The optimal formulation, PC10-CS2, consisting of 10% resin and 2% CNF/SiO₂ nanocomposites, achieved the best overall performance, showing significant improvements in compressive strength, bending resistance, abrasion resistance, water penetration, and chemical durability. These findings suggest that polymer concrete with CNF/SiO₂ can be a promising material for applications in harsh environments, potentially revolutionizing the construction industry by providing a more durable, high-performance alternative to traditional concrete.

Further research is recommended to explore the

long-term performance of these materials under real-world conditions, such as thermal cycling, exposure to different environmental stresses, and load-bearing tests over extended periods. Additionally, the effects of varying the processing conditions or exploring other types of fibers or nanomaterials could lead to further improvements in the performance and cost-effectiveness of polymer concrete.

5. Implications for Industry

The results of this study have significant implications for industries requiring high-performance materials that can withstand harsh conditions, including marine structures, wastewater treatment facilities, and high-traffic infrastructure. The ability to tailor the mechanical and chemical properties of polymer concrete by adjusting the nanocomposite content provides a flexible approach to meeting the demands of diverse applications.

Keywords

Polymer concrete, polyester resin, mechanical resistance, durability, CNF/SiO₂ nanocomposite.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

Authors contributed equally to the conceptualization and writing of the article. All of the authors approved the content of the manuscript and agreed on all aspects of the work declaration of competing interest none.

Conflict of Interest

Authors declared no conflict of interest.

Acknowledgments

We are grateful to all the scientific consultants of this paper.



انجمن علمی پدافند غیر عامل ایران

نشریه علمی شهر ایمن

شابا الکترونیکی: 2676-556X

Journal Homepage: www.ispdre.ir



مقاله پژوهشی

بتن پلیمری تهیه شده از رزین پلی استر حاوی نانو کامپوزیت CNF/SiO₂ و بررسی عملکرد مکانیکی و دوام آن

محسن کریمی - گروه مهندسی عمران، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی نیشابور، ایران

سید مجتبی موحدی فر* - گروه مهندسی عمران، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی نیشابور، ایران

امین هنر بخش - مرکز تحقیقات فناوری و فرآوری مواد جدید، گروه مهندسی عمران، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی نیشابور، ایران

مهدی نوبهار - گروه مهندسی عمران، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی نیشابور، ایران

راحله ژبانی - گروه شیمی، واحد نیشابور، دانشگاه آزاد اسلامی نیشابور، ایران

<https://doi.org/10.22034/ispdre.2024.2043888.1145>

چکیده

با توجه به افزایش امروزه استفاده از بتن پلیمری به دلیل قیمت بالا، محدود به موارد خاص است. محبوب ترین رزین پلیمری که در بتن استفاده می شود، رزین پلی استر غیر اشباع می باشد. این نوع رزین به دلیل در دسترس بودن، قیمت مناسب، کیفیت مکانیکی خوب و مقاومت فشاری بالا به طور گسترده ای مورد استفاده قرار می گیرد. هدف این مقاله بررسی ویژگی های مکانیکی بتن پلیمری تهیه شده با رزین پلی استر با نانو کامپوزیت CNF/SiO₂، مقاومت فشاری، خمشی و سایش، عمق نفوذ آب تحت فشار و دوام آن در محیط های اسیدی است. طرح اختلاط شامل نمونه هایی با ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد رزین پلی استر و ۱، ۲، ۳ درصد CNF/SiO₂ تهیه شد و مقاومت و دوام آنها مورد بررسی قرار گرفته است. یافته های این مطالعه نشان داد که بتن پلیمری در هنگام فرآوری اولیه مقاومت مکانیکی بالایی را نشان داد و با افزایش CNF/SiO₂ مقاومت آن بیشتر افزایش یافت. بهترین نمونه CP10-CS2 دارای ۱۰ درصد رزین پلی استر و ۲ درصد CNF/SiO₂ است. همچنین، پس از قرار گرفتن در معرض اسید خورنده به مدت ۳ و ۱۰ ماه، نمونه ها به ترتیب کمتر از ۱۰ درصد و ۲۰ درصد افت مقاومت فشاری را نشان دادند.

واژگان کلیدی

سازماندهی
نیروهای داوطلب
واکنش های اضطراری
شهر مشهد

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۸/۱۶

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۹/۲۴

۱۲۸-۱۴۶

مقدمه

، (Elalaoui et al, 2012:415). با این حال، این مواد کامپوزیت شکننده هستند و اکثر خواص آنها به شدت به قرار گرفتن در معرض دماهای بالا برای مدت طولانی حساس است (Gao et al, (Ataabadi et al, 2021:125293)، (Kodur et al, 2019: 107104)، (2022: 3454)، (Khotbehsara et al, 2019:108994). دلیل این امر این است که مواد آلی نسبت به مواد معدنی مقاوم تر در برابر حرارت نیستند و به عنوان چسب در PC عمل می کنند. بنابراین، PC برای استفاده طولانی مدت در محیط های با دمای بالا توصیه نمی شود زیرا رزین را تخریب می کند و ممکن است منجر به شکست و از دست دادن مقاومت مکانیکی شود (Elalaoui et al, 2018:233). تنوع رزین های قابل استفاده در بتن های پلیمری باعث شده است که طیف متنوعی از خواص فیزیکی/مکانیکی به دست آید که توسط محققان مختلف مورد بررسی قرار گرفته است (Asthana & Lakhani, 2004: 639). (Reis & Ferreira, 2004: 523). در تعدادی از مطالعات نشان داده شده است که بتن پلیمری با اضافه کردن مواد ضد شعله، مواد اتصال دهنده و الیاف یا با جایگزینی قسمت جامد با محصولات جانبی صنعتی (مانند ضایعات صنعتی، مواد بازیافتی و غیره) عملکرد بهتری دارد. با این حال، مطالعات کمی در مورد بررسی چگونگی شکست PC و حفظ خواص مکانیکی آن پس از قرار گرفتن در معرض شرایط بسیار گرم برای مدت طولانی انجام شده است (Farooq & Kou & Poon, 2013:146). (Sosoi et al, 2018: 347). (Banthia, 2022:125705). مصرف بالای مواد پلیمری در بتن پلیمری (بین ۱۰ تا ۲۵ درصد کل) باعث افزایش چشمگیر قیمت این نوع محصول شده است. بنابراین در جهان، بتن های پلیمری بر پایه رزین پلی استر غیر اشباع (به دلیل قیمت نسبتاً ارزان تر) بیشتر رایج هستند. اگرچه مصرف بتن های پلیمری در کاربردهای عمومی کم است، اما در تولید قطعات پیش ساخته که نیاز به مقاومت و دوام بالایی دارند و در مواد تعمیراتی برای بتن های در معرض خوردگی شدید بسیار رایج است. یکی از مهمترین کاربردهای بتن پلیمری، ساخت لوله ها، کانال ها، راه های دسترسی و سایر اجزای مورد استفاده در صنعت فاضلاب و تصفیه فاضلاب است. مهمترین مزایای بتن پلیمری در این شرایط می تواند

در بتن های حاوی پلیمر از حدود سال ۱۹۵۰ میلادی به دلیل تنوع و ویژگی های منحصر به فرد آنها و کاربردهای فراوان آنها در جهان مورد توجه صنعتی قرار گرفتند (ACI Committee 548, 1992). اما به دلیل قیمت بالا، کاربردهای آنها محدود بود. در سال های اخیر، استفاده از این نوع بتن به طور کلی در مواردی است که بتن معمولی کاربرد محدودی دارد یا به اندازه کافی مقاوم و بادوام نیست. یکی از سه نوع مختلف بتن پلیمری، بتن پلی استر (PC) است. در این نوع بتن از چسب های پلی استر مانند رزین استفاده می شود که یک ماده پلیمری مایع است که هنوز فرآوری نشده است و با تغییر ماده چسبنده بتن (مواد سیمانی) (Ohama, 1997:31) استفاده می شود. در PC از چسب پلیمری استفاده می شود که ذرات بتن جامد را به هم متصل می کند (Douba et al, (Bulut & Şahin, 2017:50)، (2019:468). این امر باعث ایجاد تغییرات عمده در رئولوژی، نوع و مدت زمان کاربرد، خواص فیزیکی/مکانیکی و شکست (مانند مقاومت مکانیکی بالا، سفت شدن سریع و زمان گیرش سریع) می شود (Hameed & Hamza, 2019:43). علاوه بر این، PC در مقایسه با بتن سیمان پرتلند، قالب گیری سریع تر، ترک خوردگی کمتر، مقاومت مکانیکی بالاتر، اتصال بهتر به زیرساخت های قدیمی، مقاومت سایشی بهتر، مقاومت شیمیایی (Li et al, (Toufigh et al, 2019:333)، (2016) را نشان داده است. بتن پلیمری در طرح اختلاط خود نیازی به آب ندارد و در کمتر از ۲۴ ساعت به حداکثر مقاومت خود می رسد. ویژگی اصلی بتن های پلیمری را می توان مقاومت های بسیار بالاتر (حداقل دو برابر) در مقایسه با بتن معمولی در نظر گرفت. این توضیح می دهد که چرا PC به سرعت در بسیاری از کاربردهای مهندسی عمران پذیرفته شده است. بتن پلیمری با استفاده از رزین های مختلفی از جمله اپوکسی (Rahman & Akhtarul Islam, 2022:1949)، (Committee ACI, 2016)، پلی استر غیر اشباع (Gao, (Kumar, 2016: 7249743)، (2019:116709)، اکریلیک و وینیل تهیه شده است. پلیمرهایی مانند استر، پلی پروپیلن، رزین پایه فوران و غیره (Aliha et al, 2022:126139)

حرارتی و الکتریکی این کامپوزیت‌ها تأکید دارد. نویسندگان به استفاده از نانوذرات مختلف مانند نانوالیاف، نانوپوشش‌ها و نانوذرات فلزی اشاره کرده‌اند که می‌توانند باعث بهبود استحکام کششی، مقاومت در برابر خستگی، کاهش سایش و افزایش انعطاف‌پذیری این مواد شوند. همچنین به چالش‌ها و محدودیت‌های موجود در تولید و توزیع نانوذرات در ماتریس پلیمری اشاره کرده و پیشنهادهایی برای بهبود روش‌های پردازش این کامپوزیت‌ها ارائه داده‌اند. این مطالعه نه تنها به کاربردهای وسیع این مواد در صنایع خودروسازی، هوافضا، دفاع و پزشکی اشاره دارد، بلکه بر اهمیت تحقیقات بیشتر در این حوزه برای دستیابی به نانوکامپوزیت‌های پایدار و با عملکرد بالا تأکید می‌کند (Adib 2024: e24692). عبدالله و همکارانش نشان دادند که افزودن نانو مواد مانند نانو سیلیس، نانو آلومینا، گرافن اکسید و نانو لوله‌های کربنی به مخلوط‌های سیمانی می‌تواند خصوصیات مکانیکی و دوام بتن را به شدت بهبود بخشد. نتایج این مطالعه نشان داد که نانو سیلیس به عنوان یکی از پرکاربردترین نانو مواد، توانایی قابل توجهی در بهبود مقاومت فشاری و کاهش نفوذپذیری بتن دارد، همچنین خطر حمله شیمیایی را نیز کاهش می‌دهد. نانو آلومینا به افزایش مقاومت در برابر دماهای بالا و بهبود ساختار میکروسکوپی کمک می‌کند، در حالی که گرافن اکسید توانمندی بیشتری در جلوگیری از نفوذ یون‌های کلریدی و حمله‌های اسیدی دارد. همچنین، نانو لوله‌های کربنی نیز در تقویت و توزیع یکنواخت مخلوط‌های بتنی مؤثر بودند. در نهایت، نتایج آن‌ها نشان داد که ترکیب روش‌های مختلف نانو مواد می‌تواند به ارتقاء عملکرد بتن‌ها در صنعت ساخت و ساز کمک شایانی کند و به مقابله با چالش‌های روزافزون در زمینه دوام، کارایی و پایداری محیطی بتن یاری رساند (Abdalla et al, 2023: e02197). دو فرآیند متداول برای اعمال اکسید سیلیکون به نانومواد کربنی، هیدرولیز تترائوکسی سیلان و استفاده از گوگرد تهیه شده روی سطح مواد کربنی است. کامپوزیت CNF-SiO₂ در جو خنثی تا ۱۳۰۰ درجه سانتی گراد پایداری حرارتی دارد. در دماهای بالاتر از ۱۳۵۰ درجه سانتی گراد، اکسید سیلیکون تحت احیای کربوترمال قرار می‌گیرد و الیاف کاربید سیلیکون (SiC) را تولید می‌کند. ویژگی‌های بتن پلیمری تقویت شده با نانو مواد به طور کامل مورد مطالعه قرار نگرفته است. بنابراین، هدف اصلی این

شامل مقاومت عالی در برابر مواد شیمیایی فاضلاب، مقاومت عالی (بدون نیاز به مواد تقویتی)، ضریب اصطکاک بسیار کم با مواد فاضلاب و جریان آسان تر مواد در آن، مقاومت سایشی عالی و تولید قطعات متعدد باشد (Reis & Jurumenh, 2011: 326). (Martínez-Barrera et al, 2013). (Kumar, 2014:1).

در مقایسه با رزین ارتوفتالیک غیر اشباع، پلی استر غیر اشباع ایزوفتالیک، پایداری فیزیکی و مقاومت بیشتر در برابر تغییرات شیمیایی نسبت به دو نوع دیگر رزین پلی استر دارد. رزین پلی استر غیر اشباع ایزوفتالیک به دلیل مقاومت بالاتر در برابر جذب آب و خواص مکانیکی بالا اغلب در کارهای فنی و مهندسی استفاده می‌شود، اما به طور کلی رزین‌های پلی استر غیر اشباع عملکرد مشابهی دارند. در ابتدا رزین پلی استر به صورت مایع با قوام مربا است، اما زمانی که با شتاب دهنده ها و کاتالیزورها (به اصطلاح سخت کننده ها) مخلوط می‌شود، پس از مدتی دمای آن بالا می‌رود و به ژله تبدیل می‌شود و سپس سخت و جامد می‌شود (Peng et al, 2016:361). (Chen et al, 2017:1700826). (Vorob'eva, 2010:257).

مانند پلاستیک‌ها، صاف و بدون نقص است. نانولوله‌های کربنی (CNT) و نانوفیبرهای کربنی (CNF) از جمله جدیدترین و امیدوارکننده ترین مواد هستند و استفاده از نانو مواد می‌تواند راه مناسبی برای بهبود خواص آنها باشد. از جمله ویژگی‌های خاص این مواد می‌توان به مقاومت بالا، رسانایی الکتریکی، مقاومت در برابر خوردگی، انعطاف پذیری، سطح تماس بالا، سازگاری با بافت‌های زنده و سایر ویژگی‌های متمایز اشاره کرد. این ویژگی‌ها استفاده از این مواد را در طیف گسترده‌ای از زمینه‌ها امکان پذیر می‌کند (Morales et al, 2010:1416). در مطالعات قبلی نشان داده شده است که لایه نازکی از SiO₂ که روی سطح یک نانوماده کربنی اعمال می‌شود، اکسیداسیون کربن را کند می‌کند (de Yang et al, Salazar et al, 2008:494). (2009:4539).

در مقاله‌ای که آیدیب بین رشید و همکاران در سال ۲۰۲۴ منتشر کرده‌اند، به بررسی تأثیرات نانوذرات بر بهبود خواص کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف (FRP) پرداخته شده است. به‌ویژه بر نقش نانوذرات در ارتقاء خواص مکانیکی،

مطالعه ارزیابی و حفظ ویژگی های مکانیکی بتن پلیمری بر پایه رزین پلی استر تقویت شده با CNF/SiO₂ است. در این مطالعه، ۵، ۱۰، ۱۵ درصد رزین پلی استر و ۱، ۲، ۳ درصد نانو کامپوزیت نسبت به وزن کل اضافه شد. آزمایش های مختلفی شامل خواص مکانیکی (مقاومت فشاری، خمشی و سایشی)، عمق نفوذ آب تحت فشار و دوام در برابر اسید سولفوریک مورد بررسی قرار گرفت.

مواد و روش ها

تترااتیل ارتوسیلیکات (TEOS)، پلی وینیل استات ((PVAc)، N,N-دی متیل استامید (DMAC، 99.8٪)، اسید استیک (۹۹.۷٪) با خلوص بالا از Fluka و Merck خریداری شد. نانوفیبرهای کربنی (CNF) از US-NANO خریداری شدند. طیف های FTIR طیف سنجی انتقال برای همه پودرها روی یک طیف سنج (VERTEX 70 (Bruker) در قرص های KBr ثبت شد. از یک مدل Bruker D8 Advance با تابش Cuka برای جمع آوری داده های پراش اشعه ایکس استفاده شد. تجزیه حرارتی سنجی (TGA) روی STA449F3 انجام شد. گرمایش با سرعت ۱۰ درجه سانتیگراد در دقیقه تحت نیتروژن انجام شد. تصاویر بتن با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (FESEM)، تولید کننده TESCAN، مدل MIRA III مشاهده شد.

تهیه نانولوله های کربنی عامل دار شده با کربوکسیل (CNF-COOH)

CNF با استفاده از بازگشت به جوش با HNO₃ غلیظ کربوکسیله شد (Aryal et al, 2006:131). (Aryal et al, 2008:75). مخلوطی از (۱۰۰ میلی گرم) CNF و (۲۰۰ میلی لیتر، ۶۰ درصد) HNO₃ به مدت ۳۰ دقیقه هم زده شد. سپس مخلوط به مدت ۱۵ ساعت در دمای ۱۱۰ درجه سانتیگراد قرار گرفت. محصول نهایی با استفاده از سانتریفیوژ جدا شد و پس از شستشو با آب دیونیزه، در یک کوره خشک شد.

سنتز کامپوزیت های CNF-SiO₂ با استفاده از الکتروریسی

برای ساخت محلول الکتروریسی از TEOS، CNF-COOH، اسید استیک، PVAc و DMAC استفاده شد (Peining et al, 2011:588). چند میلی گرم نانولوله های کربنی فعال

شده با COOH به مدت ۳ ساعت تحت سونیکاسیون به طور مختصر در ۱۰ میلی لیتر DMAC پراکنده شدند. سپس (1.2 PVAc گرم) به محلول اضافه شد و هم زده شد. دو میلی لیتر استیک سرد شده و یک مول TEOS پس از ۱۵ دقیقه هم زدن به محلول اضافه شد. پس از همگن شدن محلول چسبناک تیره و هم زدن آن به مدت ۱۲ ساعت، محلول با استفاده از یک دستگاه الکتروریسی با ولتاژ اعمال شده ۲۵ کیلو ولت، فاصله کاری ۱۴ سانتی متر و سرعت جریان ۱۰۰ میلی لیتر در ساعت الکترولیز شد. رطوبت اتافک الکتروریسی در حدود ۵۰ درصد حفظ شد. الیاف الکتروسپین شده روی یک فویل آلومینیومی که توسط یک درام چرخان احاطه شده بود، جمع آوری شد. برای ایجاد کامپوزیت های CNF-SiO₂، الیاف رسوب شده به عنوان یک ورق جداگانه جدا شدند و به مدت ۳ ساعت در دمای ۴۵۰ درجه سانتیگراد با نرخ رمپ متوسط ۲ درجه سانتیگراد در دقیقه انجام شد.

سنگدانه

سنگدانه های مورد استفاده در این تحقیق، ماسه، شن و ماسه بادی بودند. مشخصات فیزیکی و درجه بندی سنگدانه در جداول ۱ و ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. خواص فیزیکی سنگدانه ها

وزن مخصوص (SSD) kg/m ³	جذب آب (%)	مدول الاستیسیته	نوع سنگدانه
۲/۵۴	۳	-	ماسه بادی
۲/۵۳	۲/۶	۲/۷	شن
۲/۵۶	۲/۴۶	۶/۵	ماسه

جدول ۲. دانه بندی سنگدانه های مورد استفاده

نوع الک	درصد عبور از الک	
	ماسه	شن
mm ۱۲/۵	۱۰۰	-
mm ۹/۵	۸۵	-
mm ۴/۷۵	۰/۵	۱۰۰
mm ۲/۳۶	-	۹۰
mm ۱/۱۸	-	۱۴
۶۰۰ μm	-	۱۵
۳۰۰ μm	-	۰/۳
		۷۳

۷۸	۲	۵	PC5-CS2	۷
۷۳	۲	۱۰	PC10-CS2	۸
۶۸	۲	۱۵	PC15-CS2	۹
۷۷	۳	۵	PC5-CS3	۱۰
۷۲	۳	۱۰	PC10-CS3	۱۱
۶۷	۳	۱۵	PC15-CS3	۱۲

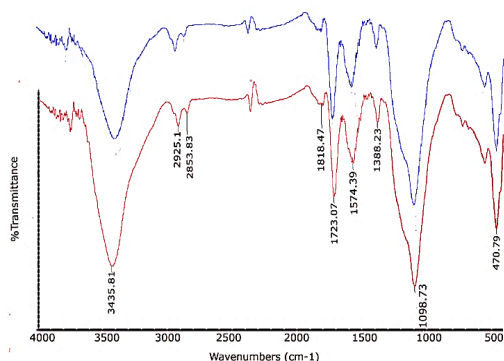
نمونه‌های بتن پلیمری از نظر مقاومت فشاری، مقاومت خمشی، مقاومت در برابر سایش، مقاومت در برابر نفوذ آب تحت فشار و مقاومت در برابر محیط اسیدی با pH کمتر از ۱ مورد بررسی قرار گرفتند.

نتایج

برای بررسی ساختار نانوکامپوزیت، آن را با استفاده از پراش اشعه ایکس (XRD)، طیف‌سنجی مادون قرمز تبدیل فوری (FT-IR) و ترموگراویتری (TGA) تجزیه و تحلیل شد.

تجزیه و تحلیل نانوکامپوزیت CNF/SiO₂

شکل ۱ طیف FTIR نانوکامپوزیت CNF/SiO₂ و CNF را نشان می‌دهد. در ۱۳۴۳۵ cm⁻¹، پیوند هیدروژنی O-H در ۲۹۲۵ cm⁻¹ کشیده شده است و در ۱۵۷۴ cm⁻¹، یک ارتعاش تغییر شکل پیوند COOH در ۱۳۸۸ cm⁻¹ وجود دارد و C=O در حال کشش خارج از صفحه C-OH در ۶۶۰ cm⁻¹ است. حالت‌های ناحیه‌های بلوری و بی‌شکل به نوارهای ۳۴۳۵، ۱۳۸۸، ۱۲۹۲، ۱۵۷۴، ۱۳۸۸، ۱۰۹۸ حساس هستند. با مقایسه این دو طیف، می‌توان مشاهده کرد که قله مربوط به CNF/SiO₂ در ناحیه ۱۰۹۸ تیزتر است. این به دلیل وجود SiO₂ در نانوکامپوزیت CNF/SiO₂ است.



شکل ۱- تجزیه و تحلیل FT-IR از الف-CNf. ب-

۱۱/۶۸	۰/۲	-	۱۵۰ μm
رزین			
رزین مورد استفاده، پلی استر غیر اشباع ارتوفتالیک بود. مشخصات رزین در جدول ۳ فهرست شده است.			
جدول ۳. مشخصات فیزیکی و مکانیکی رزین			
۱/۱۴ g/cm ³	چگالی		
۱۱۰ N/mm ²	مقاومت خمشی		
۶۰ N/mm ²	مقاومت کششی		
۲%	کرنش در نقطه کرنش		
۳۵۰۰ N/mm ²	مدول الاستیسته		
۶۰%	درصد جامد		
۸۰ °C	Tg		

طرح اختلاط

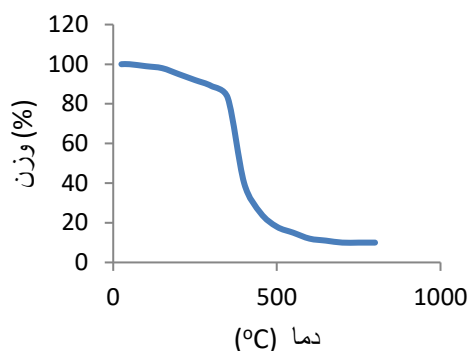
بتن پلیمری با استفاده از یک میکسر اتوماتیک که مصرف رزین کمتر را امکان پذیر می‌کرد، تهیه شد. طرح اختلاط بتن پلیمری در جدول ۴ ارائه شده است. پس از یک ساعت قالب گیری، نمونه‌ها از قالب خارج شدند و به مدت یک روز در محیط آزمایشگاه تثبیت شدند. پس از تثبیت شرایط، همه نمونه‌ها تا زمان مورد نیاز در شرایط خشک فرآوری شدند. بر اساس طرح اختلاط، نمونه‌ها کدگذاری می‌شوند (جدول ۴). اعداد نشان دهنده درصد ماده است. به عنوان مثال، نمونه PC10-CS2 نشان دهنده وجود ۱۰ درصد رزین پلی استر در بتن پلیمری (PC10) است و کد CS2 نشان دهنده وجود ۲ درصد نانو کامپوزیت CNF-SiO₂ است. در همه نمونه‌ها به طور ثابت از ۱۲/۵٪ روان کننده استفاده شده است.

جدول ۴- طرح اختلاط

نمونه	رزین (%)	CNF/SiO ₂ (%)	سنگدانه (%)
۱ PC5-CS0	۵	-	۸۰
۲ PC10-CS0	۱۰	-	۷۵
۳ PC15-CS0	۱۵	-	۷۰
۴ PC5-CS1	۵	۱	۷۹
۵ PC10-CS1	۱۰	۱	۷۴
۶ PC15-CS1	۱۵	۱	۶۹

CNF/SiO₂

درصدی مشاهده می‌شود، اما پس از ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد، با افزایش حرارت کاهش شدیدی دیده می‌شود. کاهش دیگری نیز در بازه دمایی ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده شد (شکل ۳). در نهایت، پایداری در دمای ۶۰۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد حفظ شد.



شکل ۳- TGA نانوکامپوزیت CNF/SiO₂

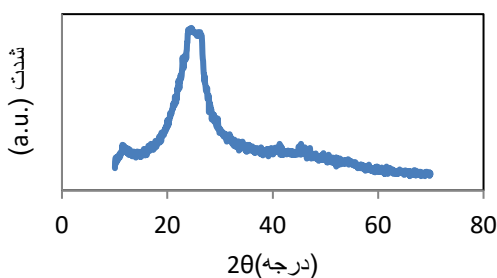
مقاومت فشاری بتن

برای محاسبه مقاومت فشاری نمونه‌ها از استاندارد اروپایی (EN) شماره ۱۲۳۹۰ - بخش III استفاده شد. شکل ۴ مقاومت فشاری بتن پلیمری با و بدون نانوکامپوزیت CNF/SiO₂ را نشان می‌دهد. مقاومت کششی سه نمونه بتن پلیمری بدون نانوکامپوزیت که شامل ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد پلیمر پلی‌استر هستند (CP5-CS0، CP10-CS0، CP15-CS0)، در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روز اندازه‌گیری شد. طبق شکل ۲، بتن پلیمری مقاومت فشاری بسیار بالایی دارد و نکته قابل مشاهده این است که مقاومت فشاری بتن پلیمری با افزایش زمان فرآوری روند ثابتی دارد. در عمل، نمونه‌های بتن پلیمری در کمتر از یک روز به مقاومت اولیه خود می‌رسند و افزایش قابل توجهی در مقاومت آنها در طول زمان مشاهده نمی‌شود. مقاومت فشاری نمونه CP15-CS0 بالاتر از دو نمونه CP10-CS0 و CP5-CS0 است، اما از نظر اقتصادی افزایش مقاومت آن در مقایسه با CP10-CS0 بسیار زیاد نیست و می‌توان آن را نادیده گرفت. به همین دلیل، نمونه بتن پلیمری بدون نانوکامپوزیت CP10-CS0 در نظر گرفته شد. برای افزایش بهره‌وری بتن پلیمری، از نانوکامپوزیت CNF/SiO₂ به میزان ۱٪، ۲٪ و ۳٪ در نمونه‌های پلیمری CP5، CP10، CP15 استفاده شده و مقاومت فشاری آنها

شکل ۲ الگوهای XRD نانوکامپوزیت CNF/SiO₂ را نشان می‌دهد. الگوی XRD، که ساختار سلولزی نوع I را نشان می‌دهد، دو قله متمایز در $2\theta = 11.5^\circ$ و $2\theta = 23.8^\circ$ را نشان می‌دهد. برای ارزیابی شاخص‌های بلورینگی (CrI) نمونه‌های CNF/SiO₂، از روش Segal، که در معادله ۱ نشان داده شده است، استفاده شد.

$$CrI = [(I_{200} - I_{Am}) / I_{200}] \times 100 \quad (1)$$

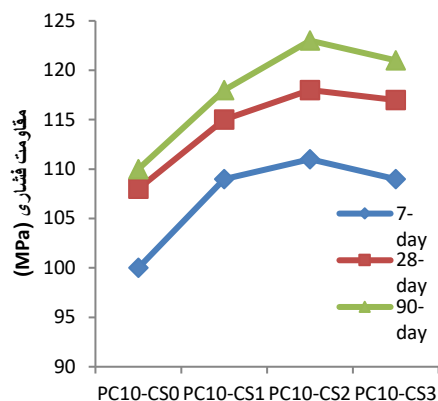
I_{200} در معادله ۱، حداکثر شدت پراش شبکه ۲۰۰ در $2\theta = 23^\circ$ است و I_{Am} حداکثر آن در $2\theta = 11^\circ$ است، جایی که CrI درجه نسبی بلورینگی را نشان می‌دهد. I_{Am} فقط نماینده ناحیه بی‌شکل است، در حالی که I_{200} نماینده هر دو ناحیه بلوری و بی‌شکل است.



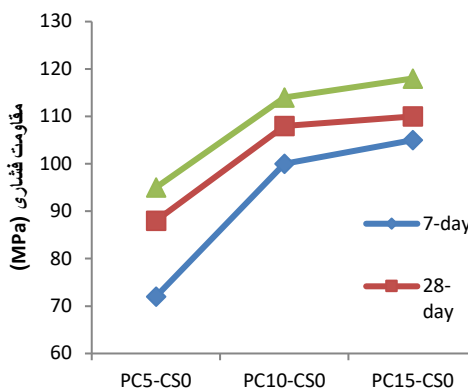
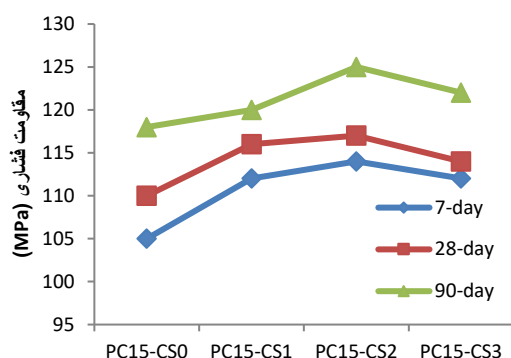
شکل ۲- XRD نانوکامپوزیت CNF/SiO₂

منحنی‌های TGA نانوکامپوزیت CNF/SiO₂ در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. کاهش وزن، تجزیه دمایی و فرآیند تخریب حرارتی نانوکامپوزیت CNF/SiO₂ مشاهده شد. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، این نانوکامپوزیت همچنین در بازه دمایی ۲۰۰ تا ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد پایداری نشان داد. علاوه بر این، کاهش وزن آن در سه مرحله رخ داد. پیش از دمای ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد، گفته شده است که آب جذب‌شده در کامپوزیت‌ها تبخیر شده که این به عنوان مرحله اول در نظر گرفته شده است. مرحله دوم در حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد آغاز شد که ناشی از تجزیه زنجیرهای جانبی مولکول‌ها و رطوبت جذب‌شده بود. مرحله سوم نیز که در حدود ۳۵۰ درجه سانتی‌گراد شروع شد، به دلیل احتراق مواد کربنی و تخریب زنجیرهای مولکولی اصلی به وقوع پیوست. در بازه دمایی ۱۰۰-۱۵۰ درجه سانتی‌گراد، کاهش وزن ۲

بررسی و نتایج مقایسه شدند.



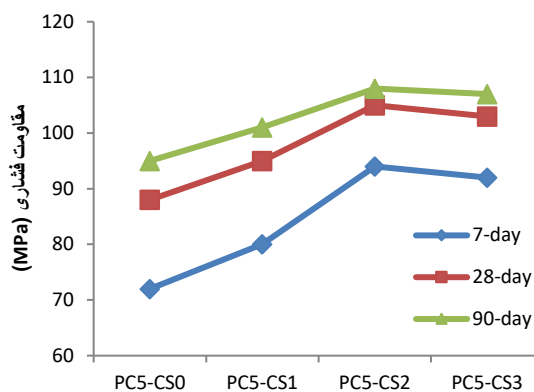
در تمام نمونه‌های CP15-CS1, CP5-CS1, CP10-CS1, CP5-CS2, CP15-CS2, CP10-CS2, CP5-CS3, CP15-CS3, CS3 با افزایش نانوکامپوزیت CNF/SiO₂، مقاومت فشاری افزایش یافت. افزایش ۲ درصدی نانوکامپوزیت در نمونه‌های CP10-CS2, CP5-CS2، اما افزایش ۳ درصدی نانوکامپوزیت در مقایسه با ۲ درصد، مقاومت فشاری را کمی کاهش داد.

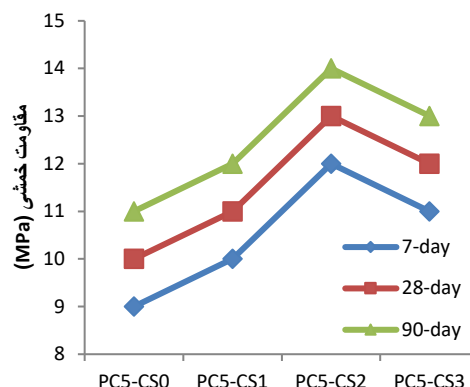
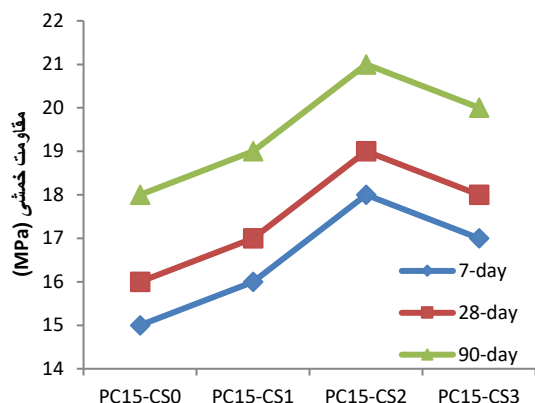


شکل ۴- نمودار مقاومت فشاری نمونه‌ها در زمان‌های مختلف پردازش

مقاومت خمشی بتن

برای ارزیابی مقاومت خمشی نمونه‌ها از استاندارد ملی آلمان (DIN) شماره ۱۰۴۸ - بخش ۵ استفاده شد. نتایج در شکل ۳ نشان داده شده‌اند. نمونه بتن پلیمری CP10-CS0 در آزمون مقاومت خمشی عملکرد بسیار بهتری نسبت به مقاومت فشاری داشت. مشابه با مقاومت فشاری، مقاومت خمشی نمونه‌های بتن پلیمری نیز بر اساس زمان استفاده تعیین می‌شود و حداکثر مقاومت در مراحل اولیه استفاده به دست می‌آید. نمونه‌هایی که حاوی ۲٪ نانوکامپوزیت CNF/SiO₂ بودند، بهترین عملکرد را در آزمون مقاومت خمشی نشان دادند. مقاومت نمونه‌های CP10-CS2, CP5-CS2، به ترتیب ۱۲، ۱۰ و ۱۵ درصد نسبت به نمونه‌های بدون نانوکامپوزیت افزایش یافته است.



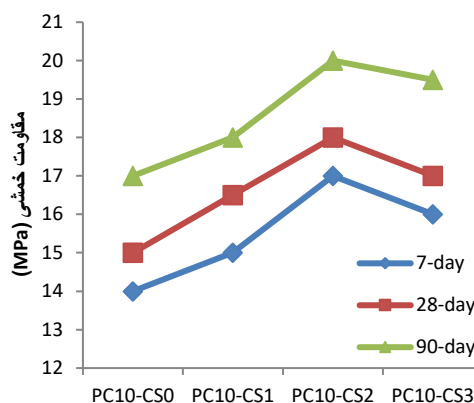
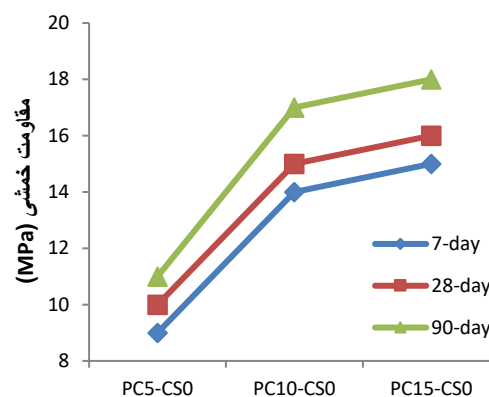
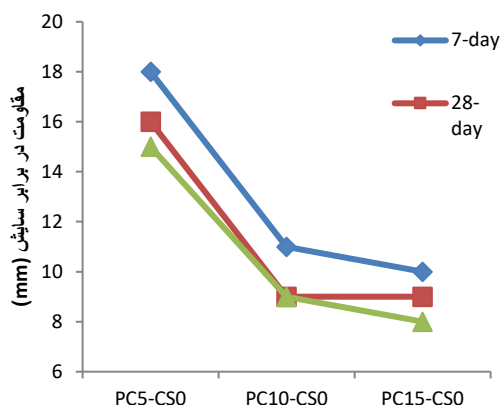


شکل ۵- مقاومت خمشی نمونه‌های بتن پلیمری

مقاومت سایشی بتن

برای ارزیابی مقاومت سایشی نمونه‌ها از استاندارد اروپایی (EN) شماره ۱۳۳۸ استفاده شد. نتایج در شکل ۶ نشان داده شده‌اند. نتایج نشان می‌دهند که نمونه PC10-CS2 دارای مقاومت سایشی، سختی و صلابت بسیار بیشتری نسبت به سایر نمونه‌ها است.

کاهش میزان سایش در تمامی نمونه‌ها با افزایش زمان فرآوری مشاهده می‌شود. یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های رزین‌های پلاستیکی (مانند پلی‌استر غیراشباع)، سختی و صلابت قابل توجه آنهاست که این ویژگی‌ها در بتن پلیمری، پس از فرآوری به محصول منتقل می‌شوند.



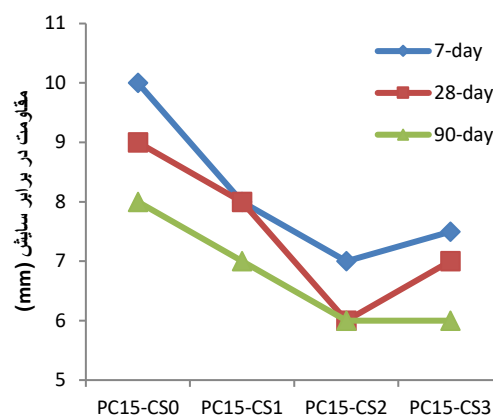
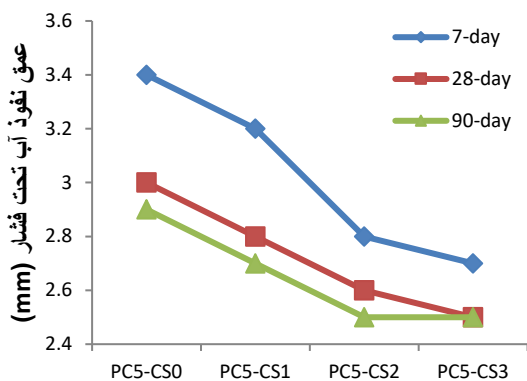
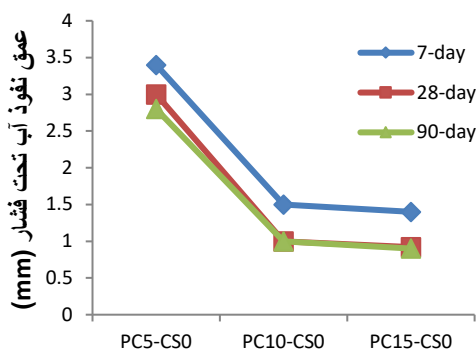
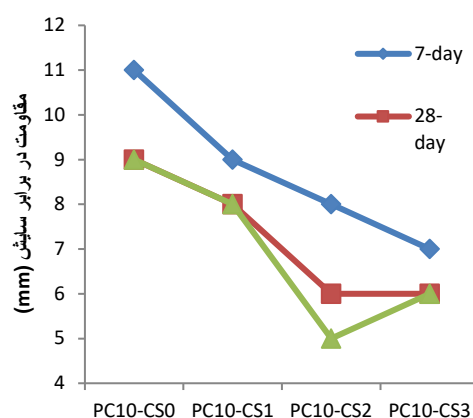
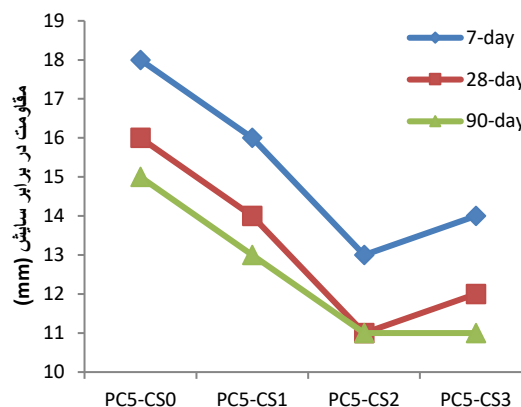
بتن پلیمری تهیه شده از رزین پلی استر حاوی نانو کامپوزیت CNF/SiO₂

به بتن پلیمری تغییر قابل توجهی با افزایش زمان فرآوری نداشته و می‌توان آن را نزدیک به صفر در نظر گرفت.

در مقایسه با سایر مواد، مقاومت پلیمرها در برابر نفوذ آب و بخار آب بسیار بالاست. این رفتار به‌ویژه در پلیمرهای غیر قطبی مانند پلی‌اتیلن و پلی‌پروپیلن مشهود است. هرچند مقاومت نفوذ آب پلیمرهای قطبی به مراتب کمتر از انواع غیر قطبی است، اما هنوز هم نسبت به سایر مواد عملکرد بهتری دارد.

این ویژگی پلیمرها ناشی از بسته بودن ساختار مولکولی آنها، تشکیل فیلم‌ها یا ماتریس‌های پیوسته و غیر متخلخل، و عدم امکان عبور مولکول‌های آب از ساختار مولکولی ریز آنها است. با افزایش میزان نانو کامپوزیت CNF/SiO₂ در نمونه‌های بتن پلیمری، نفوذ آب کاهش یافته و بزرگ‌ترین کاهش مربوط به نمونه حاوی ۲٪ نانو کامپوزیت است.

این نتایج به وضوح نشان می‌دهند که افزودن نانو کامپوزیت‌ها می‌تواند بهبود قابل توجهی در عملکرد مقاومت نفوذ آب ایجاد کند، که این امر می‌تواند کاربردهای بتن پلیمری را در محیط‌های مرطوب و چالش‌برانگیز افزایش دهد.



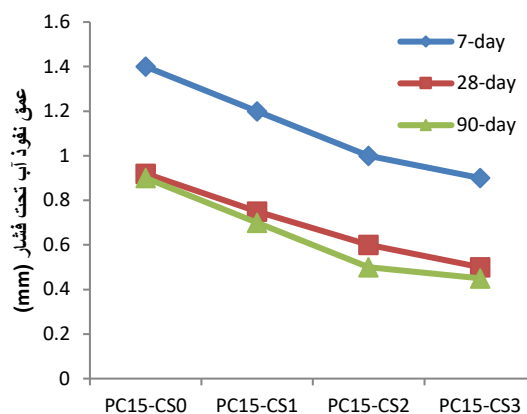
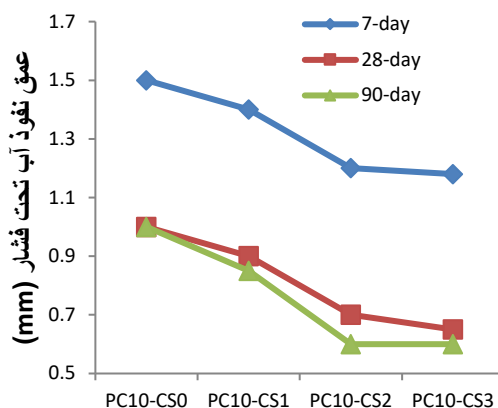
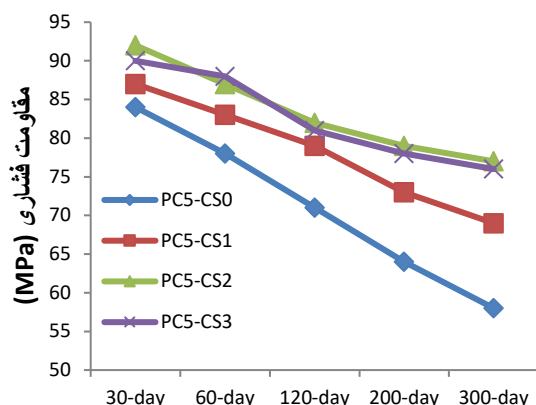
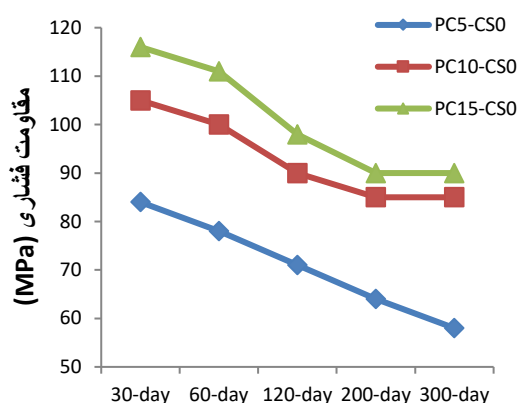
شکل ۶. نمودار مقاومت سایشی نمونه‌های بتن پلیمری

عمق نفوذ آب تحت فشار

عملکرد نمونه‌ها در برابر نفوذ آب تحت فشار، بر اساس عمق نفوذ به میلی‌متر، طبق استاندارد اروپایی (EN) شماره ۱۲۳۹۰-۸ بخش VIII ارزیابی شد. نتایج در شکل ۷ ارائه شده است. مشابه سایر رفتارهای فیزیکی و مکانیکی، عمق نفوذ آب

توجهی در نمونه‌های بتن پلیمری مشاهده نمی‌شود. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده، نمونه‌های بتن پلیمری پس از ۲۳ درصد کاهش در مقاومت فشاری در ۲۰۰ روز غوطه‌وری در اسید به مقاومت پایداری رسیده‌اند و با افزایش زمان غوطه‌وری دچار افت قابل توجهی نشده‌اند. یکی از مهم‌ترین نکاتی که می‌توان به آن اشاره کرد این است که پس از ۳۰۰ روز، مقاومت فشاری نمونه PC10-CS2 در غوطه‌وری در اسید، حدود ۹۶ مگاپاسکال است. این مقدار مقاومت نشان‌دهنده دوام مناسب بتن‌های پلیمری و نانوکامپوزیت CNF/SiO₂ در محیط‌های اسیدی متمرکز است.

این نتایج به وضوح نشان‌دهنده توانایی بتن‌های پلیمری در حفظ مقاومت و پایداری در شرایط سخت اسیدی بوده و حاکی از امکان استفاده آن‌ها در محیط‌های خورنده می‌باشد.

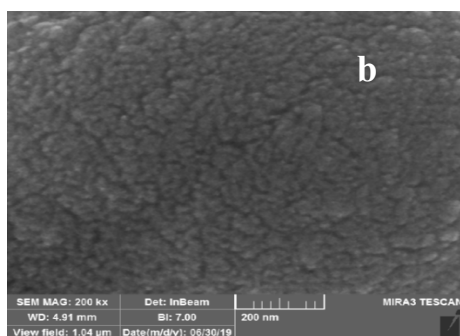
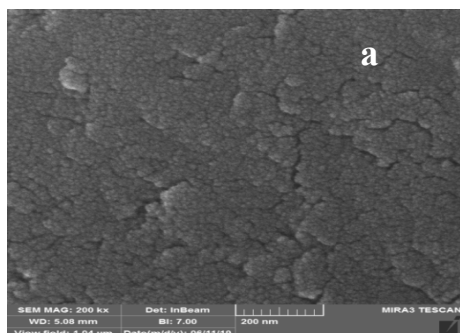


شکل ۷- نمودار عمق نفوذ آب تحت فشار در نمونه‌های بتن پلیمری

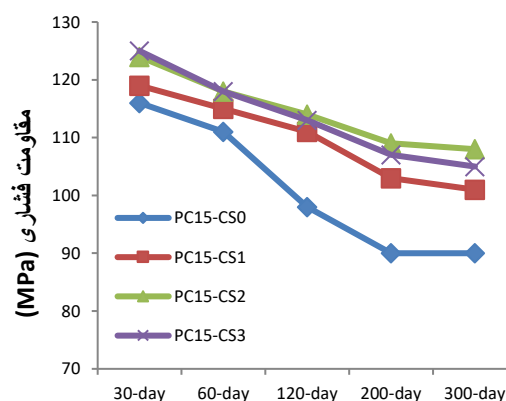
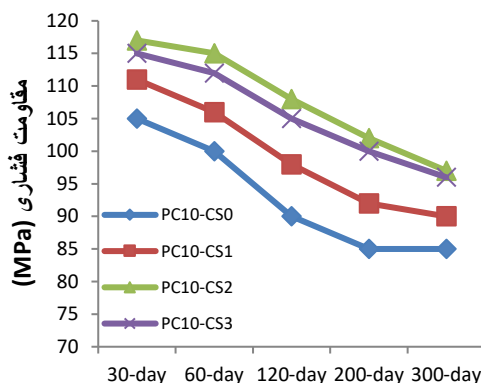
دوام درازمدت در برابر اسید سولفوریک

برای بررسی دوام نمونه‌ها در محیط‌های مهاجم سولفاتی و اسیدی، آزمونی شتاب‌یافته برای مقاومت در برابر اسید سولفوریک طراحی و اجرا شد. نمونه‌های بتن پلیمری برای این منظور تهیه و در محلول اسید سولفوریک با pH کمتر از ۱ غوطه‌ور شدند. برای هر آزمون، سه نمونه از محیط خارج شده و تحت آزمون فشار قرار گرفتند. تجهیزات آزمون مجهز به سیستم الکترونیکی برای تنظیم غلظت و سطح محلول به منظور کنترل pH بود. میانگین نتایج به صورت مقاومت فشاری نمونه‌ها گزارش شد. شکل ۷ نتایج را نشان می‌دهد.

نتایج نشان می‌دهند که پس از ۳۰۰ روز غوطه‌وری در محیط اسیدی، نمونه‌های بتن پلیمری ۲۳ درصد افت در مقاومت فشاری را تجربه می‌کنند. مشاهده ظاهری نمونه‌ها نیز حاکی از آن است که پس از ۳۰۰ روز غوطه‌وری تغییرات ظاهری قابل



شکل ۹. تصاویر SEM (الف) PC10-SC0، (ب) PC10-SC2



شکل ۸. نمودار دوام درازمدت نمونه‌های بتن پلیمری در محیط اسید سولفوریک

این مطالعه نشان داد که افزایش قابل توجه در استفاده از رزین پلی‌استر، علیرغم افزایش هزینه، تاثیر مثبتی بر خواص مکانیکی یا دوام بتن ندارد. همچنین، اضافه کردن نانومواد به بتن پلیمری موجب افزایش مقاومت و دوام آن می‌شود. در مطالعه مارتینز-لوپز و همکاران، بتن‌های پلیمری با نسبت‌های مختلف نانو سیلیکا به رزین پلی‌استر غیر اشباع بررسی شد (Martinez-Lopez et al, 2022:105083). لی و همکاران بتنی با رزین پلی‌استر غیر اشباع و تقویت شده با الیاف را بررسی کردند (Li et al, 2021:1). این تحقیقات اثر مثبت افزودن نانومواد به بتن پلیمری را نشان می‌دهد. مطالعه‌ای توسط سیکاندار و همکاران که ملات فوتوکرومیک را با پلیمر اپوکسی و پلی‌استر و بدون پلیمر مقایسه کردند، نشان داد ملات‌های فوتوکرومیک پلی‌استر و اپوکسی مقاومت بیشتری دارند (Sikandar et al, 2023:106394). می‌توانیم دو پلیمر را همزمان استفاده کنیم تا بتن پلیمری با نانوکامپوزیت را تقویت کنیم. به دلیل حضور نانوالیاف کربنی و اکسید

شکل ۹ نمونه‌ها بدون/با نانو مواد به وضوح نشان می‌دهد که با افزودن نانوکامپوزیت (PC10-SC2)، میکروساختار بتن بهبود یافته و حفره‌های داخلی بتن نسبت به نمونه کنترل (PC10-CS0) یکنواخت‌تر و متراکم‌تر می‌شوند. این تغییرات میکروساختاری نه تنها به بهبود خواص مکانیکی بتن کمک می‌کند بلکه دوام آن را نیز افزایش می‌دهد.

باوجود افزایش هزینه‌های تولید، استفاده از این بتن در پروژه‌های خاص و استراتژیک که دوام بالا و کارایی ویژه‌ای نیاز است، موجه است. در چنین مواردی، هزینه‌های بالاتر توسط عمر طولانی و نیازهای نگهداری کمتر جبران می‌شود.

این نتایج نشان می‌دهند که بتن پلیمری با نانوکامپوزیت CNF/SiO_2 ، علی‌رغم هزینه تولید، به دلیل عملکرد برتر خود، گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای خاص در محیط‌های تهاجمی شیمیایی است.

مطالعه حاضر دارای محدودیت‌هایی است از جمله، هزینه‌های بالای تولید بتن پلیمری است. علیرغم بهبودهای قابل توجه در خواص مکانیکی و دوام، هزینه بالای مواد اولیه مانند الیاف کربن (CNFs) و سیلیس (SiO_2) می‌تواند کاربرد وسیع این بتن را محدود کند. تفاوت در نسبت‌های ترکیبی مختلف رزین و نانوکامپوزیت‌ها می‌تواند به عملکرد متفاوت مکانیکی منجر شود. فرآیندهای تولید آزمایشگاهی لزوماً به مقیاس صنعتی قابل انتقال نیستند. برای تولید انبوه این نوع بتن، توسعه روش‌های تولید اقتصادی و مؤثر ضروری است. تأثیرات زیست‌محیطی تولید و استفاده از نانوکامپوزیت‌ها به‌طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است، که می‌تواند در تصمیم‌گیری برای استفاده گسترده از این بتن مؤثر باشد.

پیشنهادهای برای تحقیقات آینده

آزمایش ترکیب‌های مختلف نانوکامپوزیت‌های CNF/SiO_2 و رزین‌های مختلف برای تعیین نسبت‌های بهینه که بتوانند مشخصات مکانیکی و دوام بتن اصلاح شده با پلیمر را بهبود دهند.

مطالعات طولانی‌مدت و میدانی برای نظارت بر دوام بتن پلیمر در شرایط واقعی که شامل تغییرات دما، رطوبت بالا و چرخه‌های یخ‌زدگی و ذوب است.

تحقیقات در مورد تأثیرات زیست‌محیطی تولید و کاربرد نانوکامپوزیت‌ها از جمله ارزیابی چرخه عمر و قابلیت بازیافت این مواد.

نانومواد و رزین‌های ارزان‌قیمت که بتوانند هزینه تولید بتن پلیمر را کاهش دهند بدون اینکه به ویژگی‌های آن آسیب بزنند یا آنها را بهبود بخشند.

سیلیسیوم، نانوکامپوزیت CNF/SiO_2 دارای ویژگی‌های برجسته‌ای مانند دوام حرارتی بالا، خواص مکانیکی عالی، سایت‌های فعال خوب و سطح تماس بسیار زیاد است که در مطالعات مختلف به این موارد اشاره شده است (Chesnokov et al, 2016:273)، (Bay et al, 2021:65). بر اساس ویژگی‌های نانوکامپوزیت CNF/SiO_2 ، می‌تواند اثرات مثبتی در ساختارهای بتنی داشته باشد و تا کنون گزارشی درباره افزایش نانوکامپوزیت در بتن پلی‌استری گزارش نشده است. صنعت بتن و پژوهش‌های آینده ممکن است به شدت از این مقاله بهره‌مند شوند.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، بتن پلیمری بر پایه رزین پلی‌استر غیر اشباع ارتوفتالیک، با و بدون نانوکامپوزیت CNF/SiO_2 تهیه و مقایسه شد تا ویژگی‌های مکانیکی و دوام آن ارزیابی شود. نتایج به‌دست‌آمده شامل نکات زیر بود:

ساختار و مورفولوژی نانوکامپوزیت توسط آنالیزهای FT-IR، XRD و TGA مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که افزودن نانوکامپوزیت CNF/SiO_2 منجر به بهبود استحکام و پایداری حرارتی بتن پلیمری می‌شود.

نمونه PC10-CS2، که دارای ۱۰ درصد رزین و ۲ درصد CNF/SiO_2 بود، بیشترین مقاومت مکانیکی را در مقایسه با سایر ترکیبات نشان داد. افزودن نانوکامپوزیت‌ها بهبود چشمگیری در مقاومت فشاری و خمشی ایجاد کرد.

بتن پلیمری دارای زمان پردازش کوتاه و ثبات مقاومت در طول زمان بود، که آن را برای کاربردهای استراتژیک و تعمیرات سریع سازه‌ها بسیار مناسب می‌سازد.

بتن‌های پلیمری به‌ویژه در برابر سایش مقاومت بالاتری داشتند که مناسب برای استفاده در کف‌ها و قطعات پیش‌ساخته در معرض سایش است. افزودن CNF/SiO_2 این مقاومت را بیشتر تقویت کرد.

نتایج نشان داد که این بتن در برابر شرایط شیمیایی سخت، مقاومت بالایی دارد. به‌عنوان مثال، تنها ۲۳ درصد کاهش مقاومت فشاری بعد از ۳۰۰ روز در معرض اسید سولفوریک مشاهده شد. این ویژگی آن را برای سازه‌هایی مانند سیستم‌های تصفیه فاضلاب، که در معرض محیط‌های شیمیایی خورنده هستند، مناسب می‌سازد.

بتن پلیمری تهیه شده از رزین پلی استر حاوی نانو کامپوزیت CNF/SiO₂

بررسی تأثیرات بتن پلیمر در انتقال بارهای دینامیکی مانند زلزله و تأثیر آن بر قابلیت‌های جذب ضربه و توزیع تنش. تحقیقات در مورد روش‌های کم‌هزینه و کارآمد برای تولید انبوه بتن پلیمر برای کاربردهای صنعتی با استفاده از فناوری‌های مدرن.

ارزیابی قابلیت خودترمیمی بتن پلیمر با استفاده از ترمیم‌کننده‌های نانو و میکروکپسوله‌شده برای کاهش هزینه‌های تعمیر و افزایش دوام.

- Abdalla J. A., Hawileh R. A., Bahurudeen A., Jittin V , Kabeer K.I. S.A, (2023). Thomas B.S. Influence of synthesized nanomaterials in the strength and durability of cementitious composites. *Case Studies in Construction Materials*. 18: e02197. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02197>
- ACI Committee 548, Fowler DW. (1992). Guide for the Use of Polymers in Concrete.
- Aliha, M. reza Karimi, H. Abedi, M. (2022). The role of mix design and short glass fiber content on mode-I cracking characteristics of polymer concrete. *Construction and Building Materials*, 317, 126139. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126139>.
- Aryal, S. Bahadur, K. R. Dharmaraj, N. Kim, K-W. Kim, H. Y. (2006). Synthesis and characterization of hydroxyapatite using carbon nanotubes as a nano-matrix. *Scripta Materialia*, 54, 131-135. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2005.09.050>
- Aryal, S. Kim, C.K. Kim, K-W. Khil, M.S. Kim, H.Y. (2008). Multi-walled carbon nanotubes/TiO₂ composite nanofiber by electrospinning. *Materials Science and Engineering: C*, 28, 75-79. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.10.002>.
- Asthana, K. Lakhani, R. (2004). Development of polymer modified cementitious (polycem) tiles for flooring. *Construction and Building Materials*, 18, 639-643. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.037>.
- Ataabadi, H.S. Sedaghatdoost, A. Rahmani, H. Zare, A. (2021). Microstructural characterization and mechanical properties of lightweight polymer concrete exposed to elevated temperatures." *Construction and Building Materials*, 311, 125293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125293>.
- Bay, M.A. Khademieslam, H. Bazayr, B. Najafi, A. Hemmasi, A.H. (2021). Mechanical and Thermal Properties of Nanocomposite Films Made of Polyvinyl Alcohol/Nanofiber Cellulose and Nanosilicon Dioxide using Ultrasonic Method. *International Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 17, 65-76.
- Bulut, H.A. Şahin, R. (2017). A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste. *Composite Structures*, 178, 50-62. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.058>.
- Chen, L.F. Feng, Y. Liang, H.W. Wu, Z.Y. Yu, S.H. (2017). Macroscopic-scale three-dimensional carbon nanofiber architectures for electrochemical energy storage devices. *Advanced Energy Materials*, 7, 1700826. <https://doi.org/10.1002/aenm.201700826>.
- Chesnokov, V. Chichkan', A. Luchihina, V. Parmon, V. (2016). Carbon nanofibers–SiO₂ composites: Preparation and characterization. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 61, 273-278. <https://doi.org/10.1134/S0036023616030074>
- Committee ACI. (2016). Guide for Polymer Concrete Overlays (ACI PRC).
- de Salazar, J.G. Barrena, M. Merino, C. Merino, N. (2008). Preparation of CNFs surface to coat with copper by electroless process. *Materials Letters*, 62, 494-497. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2007.05.061>.
- Douba, A. Emiroglu, M. Kandil, U.F. Taha, M.M.R. (2019). "Very ductile polymer concrete using carbon nanotubes." *Construction and Building Materials*, 196, 468-477. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.021>.
- Elalaoui, O. Ghorbel, E. Ouezdou, M.B. (2018). Influence of flame retardant addition on the durability of epoxy based polymer concrete after exposition to elevated temperature. *Construction and Building Materials*, 192, 233-239. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.132>.
- Elalaoui, O. Ghorbel, E. Mignot, V. Ouezdou, M.B. (2012). Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperatures up to 250 C. *Construction and Building Materials*, 27, 415-424. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.07.027>.
- Farooq, M. Banthia, N. (2022). Strain-hardening fiber reinforced polymer concrete with a low carbon footprint. *Construction and Building Materials*, 314, 125705. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125705>.

- Gao, X. Han, T. Tang, B. Yi, J. Cao, M. (2022). Reinforced structure effect on thermo-oxidative stability of polymer-matrix composites: 2-D plain woven composites and 2.5-D angle-interlock woven composites. *Polymers*, 14, 3454. <https://doi.org/10.3390/polym14173454>.
- Gao, Y. Zhang, H. Huang, M. Lai, F. (2019). Unsaturated polyester resin concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 228, 116709. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116709>.
- Hameed, A.M. Hamza, M.T. (2019). Characteristics of polymer concrete produced from wasted construction materials. *Energy Procedia*, 157, 43-50. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.162>.
- Khotbehsara, M.M. Manalo, A. Aravinthan, T. Reddy, K.R. Ferdous, W. Wong, H. Nazari, A. (2019). "Effect of elevated in-service temperature on the mechanical properties and microstructure of particulate-filled epoxy polymers. *Polymer degradation and stability*, 170, 108994. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2019.108994>.
- Kodur, V. Bhatt, P. Naser, M. (2019). High temperature properties of fiber reinforced polymers and fire insulation for fire resistance modeling of strengthened concrete structures. *Composites Part B: Engineering*, 175, 107104. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107104>.
- Kou, S-C. Poon, C-S. (2013). A novel polymer concrete made with recycled glass aggregates, fly ash and metakaolin. *Construction and Building Materials*, 41, 146-151. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.083>.
- Kumar, K.P. (2014). "A Study on Cloud Computing. *Cosmos Journal*, 4, 1-3.
- Kumar, R. (2016). A review on epoxy and polyester based polymer concrete and exploration of polyfurfuryl alcohol as polymer concrete. *Journal of Polymers*, 1, 7249743.
- Li, H. Sun, J. Chen, J. Cai, S. Yin, J. Xu, J. (2016). Development status and application of polymer concrete. *Environment and Sustainable Development*, <https://doi.org/10.2991/ifeesd-16.2016.134>
- Li, W. Zhou, M. Liu, F. Jiao, Y. Wu, Q. (2021). Experimental study on the bond performance between fiber-reinforced polymer bar and unsaturated polyester resin concrete. *Advances in Civil Engineering*, 2021, 1-12. <https://doi.org/10.1155/2021/6676494>
- Martínez-Barrera, G. Vigueras Santiago, E. Hernandez Lopez, S. Gencel, O. Ureña-Núñez, F. (2013). "Polypropylene fibers as reinforcements of polyester-based composites." *IJPS*. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392011005000060>.
- Martínez-Lopez, A. Martínez-Barrera, G. Vigueras-Santiago, E. Martínez-Lopez, M. Gencel, O. (2022). Mechanical improvement of polymer concrete by using aged polyester resin, nanosilica and gamma rays. *Journal of Building Engineering*, 58, 105083. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105083>
- Morales, G. Barrena, M. De Salazar, J.G. Merino, C. Rodríguez, D. (2010). Conductive CNF-reinforced hybrid composites by injection moulding. *Composite structures*, 92, 1416-1422. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2009.11.017>.
- Ohama, Y. (1997). Recent progress in concrete-polymer composites. *Advanced Cement Based Materials*, 5, 31-40. [https://doi.org/10.1016/S1065-7355\(96\)00005-3](https://doi.org/10.1016/S1065-7355(96)00005-3).
- Peining, Z. Nair, A. S. Shengyuan, Y. Ramakrishna, S. (2011). TiO₂-MWCNT rice grain-shaped nanocomposites—synthesis, characterization and photocatalysis. *Materials research bulletin*, 46, 588-595. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2010.12.025>
- Peng, S. Li, L. Lee, J.K.Y. Tian, L. Srinivasan, M. Adams, S. Ramakrishna, S. (2016). Electrospun carbon nanofibers and their hybrid composites as advanced materials for energy conversion and storage *Nano Energy*, 22, 361-395. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.02.001>.
- Rahman, M.M. Akhtarul Islam, M. (2022). Application of epoxy resins in building materials: progress and prospects. *Polymer Bulletin*, 79: 1949-1975. <https://doi.org/10.1007/s00289-021-03577-1>
- Rashid A.B, Haque M., Islam S.M.M, K.M. Labib R.U. (2024). Nanotechnology-enhanced fiber-reinforced polymer composites: Recent advancements on processing techniques and applications. *Heliyon*, 10 (2): e24692. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e24692>
- Reis, J. Ferreira, A. (2004). Assessment of fracture properties of epoxy polymer concrete reinforced with short carbon and glass fibers. *Construction and Building Materials*, 18, 523-528. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2004.04.010>.
- Reis, J.M.L.d. Jurumenh, M.A.G. (2011). Experimental investigation on the effects of recycled aggregate on fracture behavior of polymer concrete. *Materials Research*, 14, 326-330. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.052>.

- Sikandar, M. A. Mubeen, G. Baloch, Z. El-barbary, A. Hamad, M. (2023). Comparative study on the performance of photochromic cement, epoxy, and polyester mortars. *Journal of Building Engineering*, 70, 106394. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2023.106394>.
- Sosoi, G. Barbuta, M. Serbanoiu, A.A. Babor, D. Burlacu, A. (2018). Wastes as aggregate substitution in polymer concrete. *Procedia Manufacturing*, 22, 347-351. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.052>.
- Toufigh, V. Toufigh, V. Saadatmanesh, H. Ahmari, S. Kabiri, E. (2019). Behavior of polymer concrete beam/pile confined with CFRP sleeves. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26, 333-340. <https://doi.org/10.1080/15376494.2017.1387323>
- Vorob'eva, A.I. (2010). Equipment and techniques for carbon nanotube research. *Physics-Uspekhi*, 53, 257.
- Yang, Y. Qiu, S. Cui, W. Zhao, Q. Cheng, X. Li, RKY. Mai, Y-W. (2009). A facile method to fabricate silica-coated carbon nanotubes and silica nanotubes from carbon nanotubes templates. *Journal of materials science*, 44: 4539-4545. <https://doi.org/10.1007/s10853-009-3687-1>.