



ساخت و ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت سبز ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف کنف و نانولوله کربنی

وجیهه صادقی پناه¹، محراب مدهوشی^{2*}، تقی طبرسا³، مرتضی ناظریان⁴، ابراهیم نجفی کانی⁵ و زهرا عبدالله نژاد⁶

1- دانشجوی دکتری فرآورده‌های چندسازه چوبی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان

2-استاد، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان

3-استاد، گروه تکنولوژی و مهندسی چوب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی، گرگان

4-دانشیار، گروه سامانه‌های زیستی، تهران، دانشگاه شهید بهشتی، پردیس زبرآب، مازندران

5-دانشیار، دانشکده مهندسی شیعی، نفت و گاز، دانشگاه سمنان

6-گروه مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه کانکتیکات

*گرگان، 49138-15739، madhoushi@gau.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله:
این تحقیق با هدف ساخت و ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی (جذب آب) کامپوزیت سبز ژئوپلیمر تقویت‌شده با الیاف کنف و نانولوله کربنی انجام شد. برای این منظور تأثیر مقدار الیاف کنف، نانولوله کربن و نیز مقدار آب هر کدام در 5 سطح (درصد وزنی) نسبت به ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن و سرباره فولاد بر خواص مکانیکی و فیزیکی کامپوزیت مورد ارزیابی قرار گرفتند. از روش آماری سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی برای انتخاب اختلاطها استفاده شد. بر روی نمونه‌ها، آزمون‌های خمش (مقاومت خمشی، مدول الاستیسیته و چقرمگی شکست)، فشار و جذب آب انجام گردید. همچنین، ریزساختار ژئوپلیمر و کیفیت پراکندگی نانولوله کربن و الیاف کنف در ماتریس کامپوزیت با استفاده از تصاویر FESEM ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که با اضافه کردن مقدار الیاف کنف تا سطح 7.5 درصد مقاومت خمشی، فشاری، چقرمگی شکست و جذب آب افزایش یافتند، در حالی که در مقادیر بالاتر الیاف مقادیر مقاومت مکانیکی روند نزولی داشتند. همچنین حضور نانولوله کربن به‌عنوان تقویت‌کننده، تا سطح 0.6 درصد تأثیر مثبت در افزایش مقادیر مقاومت مکانیکی روند نزولی داشتند. افزایش اندازه منافذ ماده زمینه را با افزایش مقدار نانوالیاف و نانولوله کربن نشان داد. به طور کلی در این تحقیق، با توجه به نتایج آماری، نمونه با ترکیب شرایط اختلاط الیاف کنف 7.5 درصد، نانولوله کربن 0.6 درصد و آب به مقدار 29 درصد به عنوان ترکیب بهینه معرفی می‌گردد.	دریافت: 1401/08/22 پذیرش: 1401/12/13
کلیدواژگان: کامپوزیت، ژئوپلیمر، نانولوله کربن، الیاف کنف، چقرمگی شکست	

Manufacturing and evaluation of mechanical and physical properties of green geopolymer composite reinforced with kenaf fibers and carbon nanotubes

Vajihe Sadeghi Panah¹, Mehrab Madhoushi^{2*}, Taghi Tabarsa², Morteza Nazerian³, Ebrahim Najafi Kani⁴, Zahra Abdollahnejad⁵

1- Ph.D. Student of Wood Composite Products, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

2- Department of Wood Engineering and Technology, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, Iran

3- Associate Professor, Department of Biological Systems Engineering, Shahid Beheshti University, Zirab Campus, Mazandaran, Iran

4- Associate Professor, Faculty of Chemical, Oil and Gas Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

5- Department of Civil and Environmental Engineering, University of Connecticut, Storrs, United States of America

* P.O.B. 49138-15739, Gorgan, Iran, madhoushi@gau.ac.ir

Keywords

Composite,
Geopolymer,
Carbon nanotube,
Kenaf fiber,
Fracture toughness

Abstract

The aim of this study was manufacturing and evaluation of the mechanical and physical (water absorption) of a green geopolymer composite reinforced with kenaf fibers and carbon nanotubes. For this purpose, the effect of amount of kenaf fibers, carbon nanotubes and water each in 5 levels (% wt) compared to metakaolin-based geopolymer and steel slag on the mechanical and physical properties of the composite were evaluated. Response surface method and central composite design were used as statistical method to select the mixtures. Bending tests (bending strength, modulus of elasticity and fracture toughness), compression and water absorption were conducted on the samples. Also, ultrastructure of geopolymer and dispersion quality of carbon nanotubes and kenaf fibers in the composite matrix, was evaluated by FESEM images. The results showed that by increasing the amount of kenaf fibers up to 7.5%, the bending strength, compressive strength, fracture toughness and water absorption increased, whilst at higher amounts of the fibers, the values of mechanical strength decreased. Also, the use of carbon nanotube as a reinforcement up to 0.6%, had a positive effect on increasing the mechanical strengths of the composite. The results of FESEM showed that with increasing the amount of percentage of kenaf fibers, the diameters of pores in matrix highly increased. Generally, in this research according to the statistical results, the sample with the combination of 7.5% kenaf fiber, 0.6% carbon nanotube and 29% water is introduced as the optimal combination

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Sadeghi Panah, V., Madhoushi, M., Tabarsa, T., Nazerian, M., Najafi Kani, E., Abdollahnejad, Z., "Manufacturing and evaluation of mechanical and physical properties of green geopolymer composite reinforced with kenaf fibers and carbon nanotubes," In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 9, No. 3, pp. 2011-2022, 2023. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2023.1972309.1809>

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، توجه به مسائل محیط‌زیستی و استفاده از مصالح ساختمانی سازگار با محیط‌زیست مورد توجه محققان و دولت‌ها قرار گرفته است. به طوری که بسیاری از دولت‌ها مشوق‌ها و حمایت‌های ویژه‌ای برای تولیدکنندگان و مصرف‌کنندگان این مواد اختصاص داده‌اند. به منظور کاهش میزان آلودگی و انرژی مصرفی در فرآیند تولید سیمان پرتلند، نوعی مواد سیمانی تولید شده است که از فعال‌سازی قلیایی یک ماده از جنس سیلیکات آلومینیوم با یک محلول قلیایی ساخته می‌شود. محصول به دست آمده یک ژل سیلیکات آلومینیومی است که تمام خواص سیمان پرتلند را دارا بوده و به آن ژئوپلیمر گفته می‌شود [1]. با توجه به اینکه فعالیت‌های ساخت‌وساز و عملیات ساختمانی در سرتاسر جهان، میلیاردها تن مواد خام را هر ساله مصرف می‌کنند، استفاده از مواد و فرآورده‌های ساختمانی سبز و کمک به حفاظت منابع تجدیدپذیر در سطح بین‌المللی به طور فزاینده‌ای اهمیت پیدا کرده است [2]. صنعت سیمان در مقیاس جهانی برای تولید یک تن مصالح سیمانی تقریباً یک تن CO_2 و سالانه حدود 2.8 میلیارد تن گاز گلخانه‌ای تولید می‌کند که سهمی بیش از هفت درصد تولید سالانه این گازها در سراسر جهان است. به عبارت دیگر، فرآیندهای تولید سیمان انرژی زیاد نیاز دارد و مقدار زیادی CO_2 منتشر می‌کنند که استفاده از آن را به عنوان یک ماده سازگار با محیط‌زیست با چالش‌هایی روبرو می‌کند. از اینرو، ارائه راه‌حل‌ها و تولید موادی که دوست‌دار محیط‌زیست باشند ضروری است. با همین هدف، ژئوپلیمرها که مواد جدید و سبز به‌شمار می‌روند به‌عنوان جایگزینی برای سیمان پرتلند معرفی شده‌اند که مزیت‌های محیط‌زیستی و اقتصادی فراوانی دارند [3]. مواد پوزلانی برای ساخت ژئوپلیمر قیمت پایین‌تری دارند و به دلیل استفاده از ضایعات سایر صنایع در تهیه آن‌ها و همچنین انرژی کمتر در تولید آن‌ها، آلودگی محیط‌زیستی و ردپای اکولوژیکی کمتری را موجب می‌شوند [4]. از مواد معدنی، مواد بازیافتی و ضایعات (صنعتی، کشاورزی و خانگی) برای ترکیب با سیمان پرتلند به عنوان جایگزین بعضی ترکیبات اولیه به منظور تولید سیمان سبز و ایجاد یک اتصال‌دهنده مناسب می‌توان استفاده کرد. خاکستر بادی، سرباره کوره و دود کوره‌های سیلیس، سه نمونه شناخته‌شده از مواد جایگزین سیمان است که در حال حاضر برای تولید سیمان سبز قابل استفاده می‌باشند [5].

1-1- تأثیر نانوذرات بر مقاومت‌های مکانیکی کامپوزیت‌ها

نانوذرات به دلیل سطح ویژه بسیار زیاد خود و فعالیت بالایی که دارند قادرند واکنش‌های مواد معدنی فاقد مواد سیمانی را تحت تأثیر قرار دهند و سبب بهبود واکنش‌های ژئوپلیمریزاسیون گردند [6]. نانوذرات علاوه بر افزایش مقاومت‌های مکانیکی کامپوزیت‌ها، خواص شیمیایی و فیزیکی آن‌ها را نیز بهبود می‌بخشند. نانوذرات با اشکال کروی نظیر نانوآکسید سیلیس، نانوآکسید آلومینیوم، نانوآکسید تیتانیوم، نانوآکسید آهن، نانورس، نانولوله‌های کربنی و نانوفیبرهای کربنی از مواد مؤثری هستند که می‌توانند به عنوان مواد افزودنی اضافه شوند [7]. نانولوله‌های کربنی از جمله نانوذرات آلی هستند که به واسطه خصوصیات مکانیکی قابل توجه خود محبوبیت زیادی پیدا کرده‌اند و همین ویژگی سبب شده است تا محققان برای استفاده از آن‌ها به عنوان تقویت‌کننده در ساختار سیمان و بتن تمایل بیشتری نشان دهند [8].

همچنین مطالعات نشان می‌دهد این نانومواد می‌توانند سبب بهبود خواص مکانیکی سایر محصولات غیرسیمانی شوند که به عنوان اتصال‌دهنده و ماتریس برای اتصال ذرات در کامپوزیت‌ها استفاده می‌شوند [9]. دلیل این موضوع، تشکیل شبکه در مناطق بین فازی و پراکندگی نانولوله‌های کربنی و فازهای

میانی اطراف آن است که بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها تأثیرگذار است [10]. به طور کلی نانولوله‌های کربنی چند جداره قادرند مدول الاستیک، مقاومت فشاری و چقرمگی شکست در مواد ژئوپلیمری بر پایه خاکستر بادی را افزایش دهند [11].

1-2- تأثیر الیاف طبیعی و مصنوعی بر کامپوزیت‌ها

الیاف با مدول الاستیسیته بالا نه تنها مقاومت فشاری کامپوزیت‌ها را حفظ می‌کنند، بلکه با انتقال و توزیع یکنواخت تنش، تنش‌های متمرکز داخلی اعمال‌شده در جهات مختلف را کاهش می‌دهند. بنابراین، از تمرکز تنش و شکستگی‌های ناحیه‌ای جلوگیری می‌کنند [12]. نتایج بررسی انجام‌شده بر روی مقاومت به ضربه کامپوزیت‌های ژئوپلیمر تقویت‌شده با الیاف پنبه نشان داد که افزودن الیاف پنبه (از 3.6 تا 8.3 درصد) در ماتریس ژئوپلیمر، سبب افزایش مقاومت و مدول الاستیسیته خمشی و چقرمگی شکست گردید [13]. میکروالیاف کربنی نیز سبب بهبود ریزساختاری و خواص مکانیکی ژئوپلیمری در دماهای بالا می‌شوند. تحقیقات نشان داده است افزودن این الیاف به مقدار 15 درصد وزنی، در ماتریس ژئوپلیمرهای مبنی بر متاکوئولن، سبب شد تا ماده بتواند مقاومت فشاری خود در حدود 23.13 مگاپاسکال تحت دماهای 400 تا 800 درجه سانتی‌گراد را به طور نسبی حفظ کند و کاهش کمی داشته باشد [14].

1-3- چقرمگی شکست کامپوزیت‌های ژئوپلیمری

مطالعه پدیده شکست و مقاومت مواد و کامپوزیت‌ها به ترک‌خوردگی، یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در شناخت مقدار نیروی لازم برای گسیختگی آن‌ها می‌باشد. مطالعه چقرمگی شکست و افزایش مقادیر آن می‌تواند منتهی به ساخت کامپوزیت‌ها و مواد ساختمانی بسیار مقاوم و پایدار در برابر عوامل محیطی مثل زلزله، طوفان، گرد باد و ... شود [15].

در این تحقیق پس از بررسی منابع مختلف مشخص شد که ژئوپلیمرها علیرغم مزایای بسیار، دارای محدودیت‌های خاصی نسبت به سیمان پرتلند معمولی هستند. به‌عنوان نمونه، ژئوپلیمرها به دلیل ساختار درونی خاص خود، در مقایسه با سیمان پرتلند معمولی، شکننده‌تر هستند و دچار شکست بیشتری می‌شوند. بنابراین، بهبود خواص شکنندگی، عملکرد و دوام ژئوپلیمرها برای کاربردهای عملی بسیار ضروری است. از این‌رو، در این تحقیق استفاده از الیاف کنف و نانولوله کربن در جهت بهبود عملکرد و مقاومت‌های مکانیکی کامپوزیت‌های ژئوپلیمر مورد بررسی قرار گرفت. شایان ذکر است در حالی که کارهای تحقیقاتی قبلی روی الیاف طبیعی دیگر در طیف وسیعی انجام شده بود، تحقیقی در مورد استفاده از الیاف کنف به همراه نانولوله کربن به عنوان تقویت‌کننده این نوع کامپوزیت‌ها منتشر نشده است.

2- مواد و روش‌ها**2-1- مواد اولیه**

الیاف کنف: الیاف کنف مورد استفاده از نوع الیاف وارداتی بود. الیاف قبل از استفاده توسط آسیاب مکانیکی خرد شدند و سپس طول و قطر آن‌ها به وسیله میکروسکوپ اندازه‌گیری گردید که به ترتیب برابر با 1.21 میلی‌متر و 22.1 میکرومتر بود.

نانولوله کربن چند دیواره: این نانومواد با استفاده از کاتالیزور Co-MgO در پژوهشگاه صنعت نفت ایران سنتز و تهیه شد.

متاکائولن: پودر کائولن از شرکت خاک چینی ایران (شهرستان مرند) تهیه گردید و سپس به مدت 4 ساعت در یک کوره الکتریکی با دمای 750 درجه

29	2.5	0.6	4
32	10	0.3	5
29	7.5	1.2	6
26	5	0.9	7
29	7.5	0.6	8
23	7.5	0.6	9
29	7.5	0	10
29	7.5	0.6	11
26	5	0.3	12
26	10	0.9	13
29	7.5	0.6	14
29	7.5	0.6	15
32	10	0.9	16
35	7.5	0.6	17
29	7.5	0.6	18
26	10	0.3	19
29	7.5	0.6	20

سانتی‌گراد تحت عملیات حرارتی قرار گرفت تا سنتز متاکائولن صورت بگیرد. در جدول 1، مشخصات خاک متاکائولن (گزارش شده توسط شرکت سازنده) ارائه شده است.

سرباره فولاد¹: از شرکت سیمان سپاهان (اصفهان) تهیه گردید. آنالیز شیمیایی این سرباره توسط فلورسانس اشعه ایکس² انجام و نتایج در جدول 1 ارائه شده است.

فعال‌کننده‌های قلیایی: از سیلیکات سدیم مایع به‌عنوان فعال‌کننده قلیایی به‌منظور فعال‌سازی اتصال‌دهنده خشک سرباره فولاد استفاده شد. سیلیکات سدیم تجاری با چگالی 1.57 گرم بر سانتی‌متر مکعب از شرکت سیلیکات گستر سپاهان (اصفهان) به صورت محلول تهیه گردید. ترکیب شیمیایی فعال‌کننده شامل 32.4 SiO_2 درصد، $13.9 \text{ Na}_2\text{O}$ درصد، H_2O (53.1 درصد) و نسبت مولی $(\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O})$ 2.5 بود. همچنین، از هیدروکسید سدیم با خلوص 98 درصد تهیه شده از شرکت مرک آلمان استفاده شد.

جدول 3 متغیرهای تحقیق در طرح مرکب مرکزی (کامپوزیت‌های ژئوپلیمری سبز)
Table 3 Research variables in the central composite design (Green geopolymer composites)

متغیرها	نماد	سطوح متغیرها				
		+2	+1	0	-1	-2
الیاف کنف (%)	A	12.5	10	7.5	5	2.5
نانولوله کربن (%)	B	1.05	0.9	0.6	0.3	0.15
آب (%)	C	36	32	29	26	23

2-2- ساخت کامپوزیت‌های ژئوپلیمر

برای این منظور در ماتریسی از مواد ژئوپلیمری (جدول 2) از سه متغیر هر کدام در پنج سطح شامل الیاف کنف (2.5، 5، 7.5، 10 و 12.5 درصد وزنی)، نانولوله کربن (صفر، 0.3، 0.6، 0.9 و 1.2 درصد) و آب (23، 26، 29، 32 و 35 درصد) با استفاده از روش سطح پاسخ³ و طرح مرکب مرکزی⁴ استفاده شد. روش سطح پاسخ، یک روش ریاضی و آماری است که هدف نهایی آن، بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر یک محصول است و می‌توان برای تولید محصولات مختلف سیمانی، ژئوپلیمری و مواد دیگر با ترکیبات بهینه و خاصیت کنترل‌شده استفاده کرد [16]. طرح کلی ساخت کامپوزیت‌ها در جدول 3 نشان داده شده است.

جدول 1 درصد وزنی ویژگی‌های شیمیایی مواد اولیه استفاده شده (منبع: شرکت سازنده)

Table 1 Weight percent of the chemical characteristics of the raw materials (Ref: manufacturerer company)

سرباره	متاکائولن	
0.42	0.97	Na ₂ O
53.1	2.56	Fe ₂ O ₃
-	0.36	TiO ₂
32.39	0.66	CaO
0.47	4.68	KO ₂
2.28	1.36	SO ₃
-	0.15	P ₂ O ₃
32.09	64.51	Si ₂ O
14.15	22.87	AL ₂ O ₃
8.75	0.67	MgO

جدول 2 درصد وزنی الیاف کنف، نانولوله کربن و آب در بلوک‌های مختلف

Table 2 Weight percent of kenaf fibers, carbon nanotubes and water in different blocks

بلوک	نانولوله کربن (درصد)	الیاف کنف (درصد)	آب (درصد)
1	0.9	5	32
2	0.6	12.5	29
3	0.3	5	32

برای ساخت نمونه‌ها، پیش‌ماده‌ها (شامل متاکائولن و سرباره) بعد از توزین اولیه، توسط همزن مکانیکی با هم مخلوط شدند. سپس الیاف کنف به ترکیب بدست‌آمده افزوده شد و سطح آن‌ها با مواد زمینه‌ای خشک به‌طور کامل پوشانده شد و ترکیب همسان و یکنواختی حاصل گردید. در مرحله بعد فعال‌سازهای قلیایی که از 24 ساعت قبل آماده و دو ساعت قبل از ساخت نمونه با هم ترکیب شده بودند، به مواد زمینه‌ای خشک اضافه گردیدند. نانولوله کربنی قبل از مرحله اولتراسونیک به مدت 24 ساعت در دمای اتاق با سرعت 850 دور در دقیقه توسط همزن مکانیکی با آب و صمغ عربی (به منظور پراکنش یکنواخت نانولوله کربنی) آماده شد، هر چند هیدروکسید سدیم در افزایش انحلال و ثبات حلال و محلول نانولوله کربن مؤثر بود. این محلول قبل از اختلاط با فعال‌سازها، مجدداً با همزن اولتراسونیک به مدت 30 دقیقه با دوره 5 ثانیه ترکیب‌شدن و ۳ ثانیه استراحت آماده گردید.

در ادامه ترکیب نهایی آماده شده از همه مواد با یک همزن مکانیکی به مدت 20 دقیقه با دور بالا مخلوط گردید. پس از دستیابی به ترکیبی یکنواخت، مخلوط در درون قالب‌های 30×30 سانتی‌متر ریخته و با یک کاردک پلاستیکی سطح قالب صاف و در داخل پرس قرار داده شدند. نمونه‌ها به مدت 24 ساعت تحت پرس سرد با فشار 40 بار قرار گرفتند. سپس به منظور جلوگیری از ایجاد انحنای در سطح، نمونه‌ها به مدت 72 ساعت بین گیره‌های دستی و داخل کیسه‌های پلاستیکی (به‌منظور جلوگیری از تبادل سریع رطوبتی نمونه‌ها با محیط اطراف) قرار داده شدند. در ادامه نمونه‌ها تا تکمیل دوره انعقاد 28 روزه، در دمای محیط آزمایشگاه (با دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد) خشک شدند. در نهایت نمونه‌ها به اندازه‌های مورد نیاز برای انجام آزمایش‌ها براساس استانداردها برش داده شدند.

³ RSM: Response surface method

⁴ CCD: Central composite design

¹ GGBFS: Ground-granulated blast-furnace slag

² XRF: X-ray fluorescence

3-2- آزمون خمش

آزمون خمش برای اندازه‌گیری مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها با استفاده از دستگاه Comtech موجود در آزمایشگاه مکانیک چوب دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان انجام شد (شکل 1). نمونه‌ها مطابق با استاندارد EN 310 به ابعاد $120 \times 20 \times 10$ میلی‌متر تهیه شدند و نرخ بارگذاری 0.5 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب شد. مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نمونه‌ها به ترتیب با استفاده از روابط 1 و 2 محاسبه گردید [17].

$$MOR = \frac{3P_u l}{2bh^2} \quad (1)$$

$$MOE = \frac{P_{pl} l^3}{4bh^3 \delta} \quad (2)$$

که در آن MOR مقاومت خمشی (پاسکال)، P_u بار حداکثر (نیوتون)، l طول دهانه (متر)، b نمونه (متر)، h ضخامت نمونه (متر)، MOE مدول الاستیسیته (پاسکال)، P_{pl} بار حد تناسب (نیوتون)، δ خیز (تغییر مکان افقی) نمونه (متر) می‌باشد.

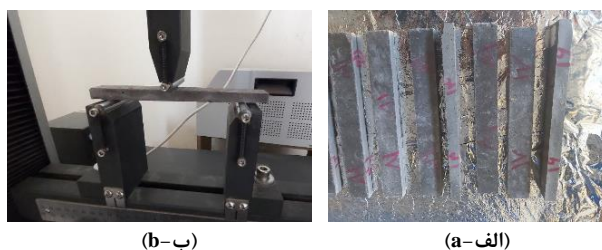


Fig. 1 (a) Samples prepared for flexural test and (b) samples in flexural testing

شکل 1 (الف) نمونه‌های آماده شده برای آزمون خمش (ب) نمونه در آزمون خمش

4-2- اندازه‌گیری مقاومت فشاری

نمونه‌های مورد نظر برای این منظور در ابعاد 2×4 سانتی‌متر تهیه شدند و در 3 تکرار برای هر طرح اختلاط مورد آزمون قرار گرفتند (شکل 2). نرخ بارگذاری 2 میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد. مقاومت فشاری نمونه‌های آزمونی براساس استاندارد ASTM C109 و با استفاده از رابطه 1 تعیین گردید [18].

$$P_u = \frac{F_{max}}{A} \quad (3)$$

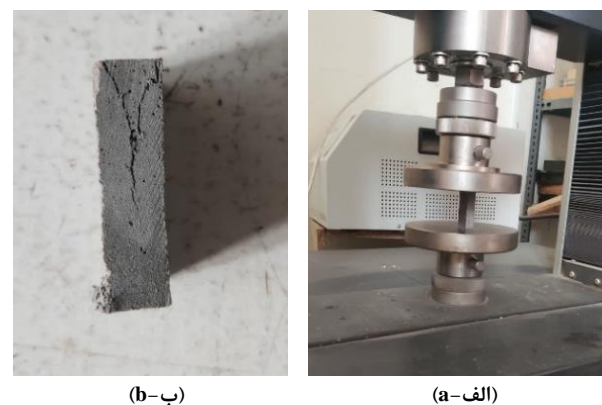


Fig. 2 (a) Compression testing and (b) the sample after the test

شکل 2 (الف) آزمون مقاومت فشاری و (ب) نمونه پس از آزمون

که در آن P_u مقاومت فشاری (پاسکال)، F_{max} بار حداکثر (نیوتون) و A سطح مقطع نمونه تحت بارگذاری (مترمربع) می‌باشد.

5-2- اندازه‌گیری چقرمگی شکست¹

چقرمگی به میزان مقاومت مواد در مقابل شکست بر اثر اعمال تنش گفته می‌شود. برای اندازه‌گیری چقرمگی، نمونه‌ها مانند نمونه‌های خمشی به ابعاد $160 \times 20 \times 10$ میلی‌متر (و طول دهانه ۱۲۰ میلی‌متر) تهیه و یک ترک با نسبت طول به عرض ($0.4 a/W$) با استفاده از یک تیغه الماس 0.4 میلی‌متری در وسط دهانه ایجاد شد. نرخ بارگذاری 0.5 میلی‌متر بر دقیقه انتخاب گردید و محاسبه چقرمگی شکست با استفاده از روابط 4 و 5 انجام شد [13].

$$K_{IC} = \frac{P_m S}{WD^{3/2}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = \frac{3\left(\frac{a}{W}\right)^{1/2} \left[1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \times \left(2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \frac{a^2}{W^2}\right)\right]}{2\left(1 + 2\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \quad (5)$$

در این روابط K_{IC} میزان چقرمگی شکست (پاسکال بر مترمربع)، P_m بار حداکثر (نیوتون)، S طول نمونه (متر)، W عرض نمونه (متر)، D ضخامت نمونه (متر)، $f\left(\frac{a}{W}\right)$ ضریب تصحیح هندسی و a طول ترک اولیه (متر) می‌باشد.

6-2- جذب آب 24 و 48 ساعت

کامپوزیت‌های حاوی الیاف طبیعی به دلیل ماهیت آب‌دوست بودن ذاتی الیاف، رطوبت جذب می‌کنند و ثبات ابعادی آن‌ها دستخوش تغییر می‌شود. در این تحقیق مقدار جذب آب توسط کامپوزیت‌ها به‌عنوان مهم‌ترین خاص فیزیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. برای این آزمون، مطابق استاندارد DIN-EN 317 مقدار جذب آب در نمونه‌هایی به ابعاد 10×10 میلی‌متر بعد از 24 و 48 ساعت غوطه‌وری در آب تعیین شدند. برای این منظور در ابتدا وزن خشک نمونه‌ها تعیین و سپس در داخل آب مقطر با دمای محیط 20 ± 3 درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند. توزین نمونه‌ها با استفاده از ترازوی دیجیتالی با دقت 0.01 گرم انجام و برای تعیین میزان جذب آب از رابطه 6 استفاده شد [17].

$$W = \frac{(M_w - M_o)}{M_o} \times 100 \quad (6)$$

که در آن W مقدار جذب آب (درصد) بعد از زمان غوطه‌وری، M_w وزن تر نمونه (کیلوگرم) و M_o وزن خشک نمونه (کیلوگرم) می‌باشد.

7-2- ویژگی‌های مورفولوژیکی (ریخت‌شناسی)

برای مطالعه خصوصیات ریخت‌شناسی از میکروسکوپ الکترونی روبشی گسیل میدان² مدل MIRA3 TESCAN-XMU مستقر در پژوهشگاه متالورژی رازی تهران استفاده گردید. ابتدا نمونه‌ها در ابعاد 1×1 سانتی‌متر از محل شکست تهیه و سپس به مدت 24 ساعت در درجه حرارت 65 درجه سانتی‌گراد خشک شدند. در نهایت نمونه‌ها به مدت 10 دقیقه توسط دستگاه متالایزر با طلا پوشش‌دهی و در ولتاژ 15 کیلوولت و بزرگ‌نمایی 100 تا 200³ بررسی شدند.

² FESEM: Field emission scanning electron microscope

¹ Fracture toughness

2.4	10.43	2084	9.16	5
3.5	8.25	4152	16.98	6
3.2	7.54	7.3998	15.05	7
2.55	9.2	2767	13.26	8
3.25	8.5	3895	14.2	9
2.85	6.93	2095	9.43	10
2.03	14.63	2295	10.8	11
1.98	7.14	7.2306	11.6	12
4.11	6.93	2655	11.7	13
2.5	7.36	3474	13.72	14
2.44	10.85	2139	10.96	15
2.15	11.64	2110	10.63	16
3.49	5.15	2695	11.56	17
3.75	8.25	3894	14	18
3.6	10	3940	16.02	19
3.65	9.5	3968	15.9	20

8-2- روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی تعیین مقادیر

در این مطالعه، برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی با توجه به متغیرهای مستقل و سطوح بکاررفته از روش سطح پاسخ و طرح مرکب مرکزی برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی پاسخ‌های اندازه‌گیری شده استفاده گردید. از روش سطح پاسخ می‌توان برای تولید محصولات مختلف سیمانی، ژئوپلیمری و مواد دیگر با ترکیبات بهینه و خاصیت کنترل‌شده استفاده کرد. در این تحقیق علاوه بر تأثیر مستقل هر پارامتر، اثر متقابل متغیرها بر پاسخ‌های اندازه‌گیری شده مشخص شد. در این تحقیق، جهت دستیابی به مقادیر بهینه ساخت کامپوزیت، برای سه متغیر مقدار الیاف کنف، مقدار نانولوله کربنی و مقدار آب در پنج سطح، جدول ترکیبی شرایط ساخت مطابق روش آماری سطح پاسخ (جدول 3) تعریف شد.

3- نتایج و بحث

مقادیر پاسخ‌های مقاومت‌های مکانیکی و مقدار جذب آب به ترتیب در جداول 4 و 5 برای هر اختلاط ارائه شده است.

3-1- مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته

نتایج آنالیز واریانس برای مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته به ترتیب در جداول 6 و 7 ارائه شده است. بر اساس این جداول، نتایج سطح پاسخ مشتق‌شده از لحاظ آماری کافی هستند و می‌توان از آن‌ها برای پیش‌بینی مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته نزدیک به نتایج تجربی در بازه اطمینان 93 درصد استفاده کرد. همچنین ضرایب همبستگی چندگانه (ضریب تبیین پیش‌بینی شده) مدل‌های سطح پاسخ به دست آمده نشان‌دهنده یک خطای آزمایشی کوچک و برازش مناسب مدل‌های پیش‌بینی‌شده با داده‌های تجربی است.

شکل 3 اثر متغیرهای مورد بررسی بر مقاومت خمشی کامپوزیت‌های سبز ژئوپلیمری را نشان می‌دهد. مطابق نتایج به دست آمده، مقدار الیاف کنف پارامتری مهم بر مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته کامپوزیت‌های ژئوپلیمری است و افزایش مقدار آن تا حد متوسط 7.5 درصد باعث بهبود ویژگی خمشی آن‌ها شده است که این موضوع به علت پیوند شیمیایی و فیزیکی بین الیاف کنف و ماده زمینه است. به طور کلی، کاربرد الیاف طبیعی در کامپوزیت‌های ژئوپلیمری سبب افزایش استحکام آن‌ها می‌شود [12, 13].

همچنین، افزایش بیش از حد الیاف کنف که با جذب آب بیشتر همراه خواهد بود باعث کاهش مقاومت خمشی می‌شود. بیشترین مقدار مقاومت خمشی (16.98 مگاپاسکال) مربوط به طرح اختلاط با مقدار الیاف 7.5 درصد، نانولوله کربن 0.6 درصد و آب 29 درصد بود. در همین ارتباط، کمترین مقدار مقاومت خمشی (5.53 مگاپاسکال) مربوط به کامپوزیت‌های با 2.5 درصد الیاف کنف بود. با افزایش درصد الیاف کنف بالاتر از 7.5 درصد مقاومت خمشی هم تا حدودی کاهش داشت [13].

جدول 4 نتایج طرح آماری سطح پاسخ خواص مکانیکی

Table 4 The results of the response surface statistical design of the mechanical properties

بلوک	MOR (MPa)	MOE (MPa)	K _{IC} (MPa/m ^{3/2})	Pu (MPa)
1	16.25	4120	9.85	3.3
2	5.53	933	13	2.32
3	13.46	3272	9.06	3.75
4	9.96	2836	6.18	1.9

¹ Saafi

جدول 5 نتایج طرح آماری سطح پاسخ جذب آب

Table 5 The results of the response surface statistical design of the water response absorption

بلوک	جذب آب 24 ساعت (%)	جذب آب 48 ساعت (%)
1	16.3	17
2	12.75	14.83
3	17.76	17.96
4	18.99	19.63
5	17.01	17.29
6	17.85	18.2
7	18.6	19.2
8	13.25	14.32
9	15.89	17.98
10	13.04	15.36
11	12.06	13.08
12	18.14	18.96
13	19.57	20.08
14	17.91	18.33
15	19.37	19.6
16	17.12	18.85
17	20	20.1
18	18	18.05
19	17.8	18
20	16.25	17.95

با توجه به نتایج می‌توان عنوان کرد که نانولوله کربن در درصد‌های متوسط 0.6 و پایین‌تر از توزیع یکنواختی برخوردار بوده‌اند که حضورشان به عنوان فاز تقویت‌کننده بین الیاف کنف و ژئوپلیمر موجب افزایش مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته کامپوزیت‌ها گردید. وجود نانومواد از طریق تسریع در ژئوپلیمریزاسیون، کاهش قلیائیت سیستم و افزایش زل ژئوپلیمر تأثیر مثبت در مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته دارند [11].

به‌علاوه، با افزایش نانولوله کربن بیشتر از 0.6 درصد مقاومت خمشی کاهش یافته است که علت آن را می‌توان عدم توزیع یکنواخت و مناسب نانولوله کربن در اثر تجمع و ایجاد کلوخگی در درصد‌های بالاتر عنوان کرد. در درصد‌های بالاتر، ذرات نانولوله کربن به علت نیروهای واندروالسی بین خود و همچنین نسبت سطح به حجم بالا، تمایل به جذب یکدیگر و تجمع زیاد دارند که در نتیجه پراکنش یکنواخت و جداسازی آن‌ها از یکدیگر به سختی انجام می‌شود [19]. واضح است که پراکنش مناسب نانولوله‌ها در ژئوپلیمرها، می‌تواند یکی از چالش‌های اصلی در ساخت کامپوزیت ژئوپلیمری باشد. نتایج کسب شده این تحقیق با یافته‌های سافی¹ و همکاران (2013) مطابقت دارد [19].

جدول 6 آناليز واريانس اثر عوامل متغير بر مقاومت خمشي

Table 6 Analysis of variance of the effect of variable factors on the bending strength

منبع تغييرات	درجه آزادي	مجموع مربعات	ميانگين مربعات	مقدار F	P	تفاوت
مدل	9	292.63	32.51	74.08	< 0.0001	**
B- الياف كنف	1	118.19	118.19	269.29	< 0.0001	**
C- آب	1	8.82	8.82	20.1	0.0001	**
AB	1	16.20	16.20	36.92	< 0.0001	**
BC	1	2.93	2.93	6.67	0.0138	*
A ²	1	77.83	77.83	177.32	< 0.0001	**
B ²	1	130.35	130.35	269.99	< 0.0001	**
C ²	1	28.68	28.68	65.33	< 0.0001	**
باقيمانده	38	16.68	0.44			
ضعف برازش	5	3.13	0.63	1.53	0.2084	ns
خطاي خالص	33	13.54	0.41			

ضريب تبیین (R²): 0.94، انحراف معيار: 5.62

** معنی دار در سطح 1 درصد، * معنی دار در سطح 5 درصد، ns عدم معنی داری

جدول 7 آناليز واريانس تأثیر عوامل متغير بر مدول الاستيسيته

Table 7 Analysis of variance of the effect of variable factors on the modulus of elasticity

منبع تغييرات	درجه آزادي	مجموع مربعات	ميانگين مربعات	مقدار F	P	تفاوت
مدل	9	2.870E+007	3.189E+006	56.59	< 0.0001	**
A- نانولوله كربن	1	1.341E+006	1.341E+006	23.79	< 0.0001	**
B- الياف كنف	1	1.292E+007	1.292E+007	229.25	< 0.0001	**
C- آب	1	9.154E+005	9.154E+005	16.25	0.0003	**
AB	1	1.141E+006	1.141E+006	20.24	< 0.0001	**
BC	1	2.935E+005	2.935E+005	5.21	0.0282	*
A ²	1	4.887E+006	4.887E+006	86.72	< 0.0001	**
B ²	1	1.163E+007	1.163E+007	206.45	< 0.0001	**
C ²	1	4.526E+006	4.526E+006	80.33	< 0.0001	**
باقيمانده	38	2.141E+006	56347.81			
ضعف برازش	5	5.511E+005	1.102E+005	2.29	0.0685	ns
خطاي خالص	33	1.590E+006	48184.30			

ضريب تبیین (R²): 0.93، انحراف معيار: 237.38

** معنی دار در سطح 1 درصد، * معنی دار در سطح 5 درصد، ns عدم معنی داری

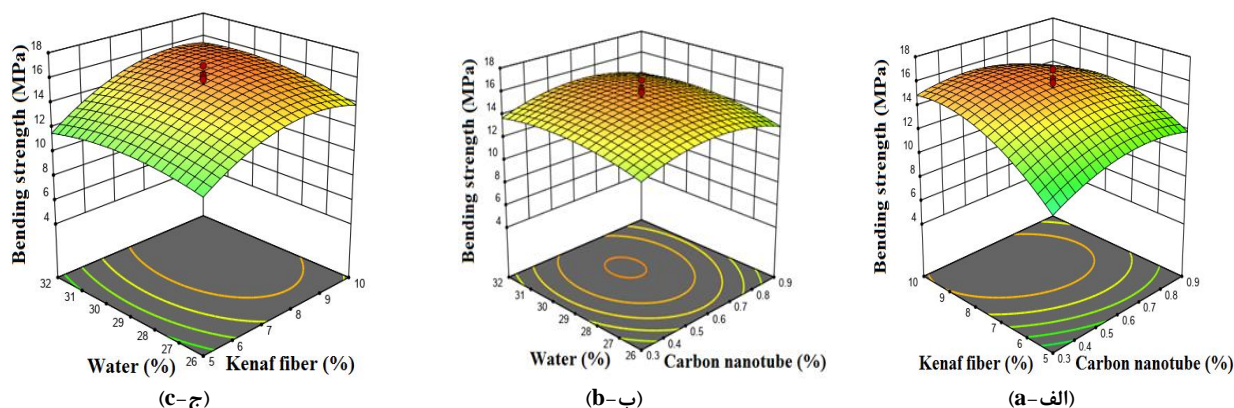


Fig. 3 The intraction of variable factors on the bending strength of geopolymer, (a) kenaf fibers × carbon nanotubes, (b) water × carbon nanotubes and (c) carbon nanotubes × water

شكل 3 اثر متقابل عوامل بر مقاومت خمشی ژئوپليمر، (الف) الياف كنف × نانولوله كربن، (ب) آب × نانولوله كربن و (پ) نانولوله كربن × آب

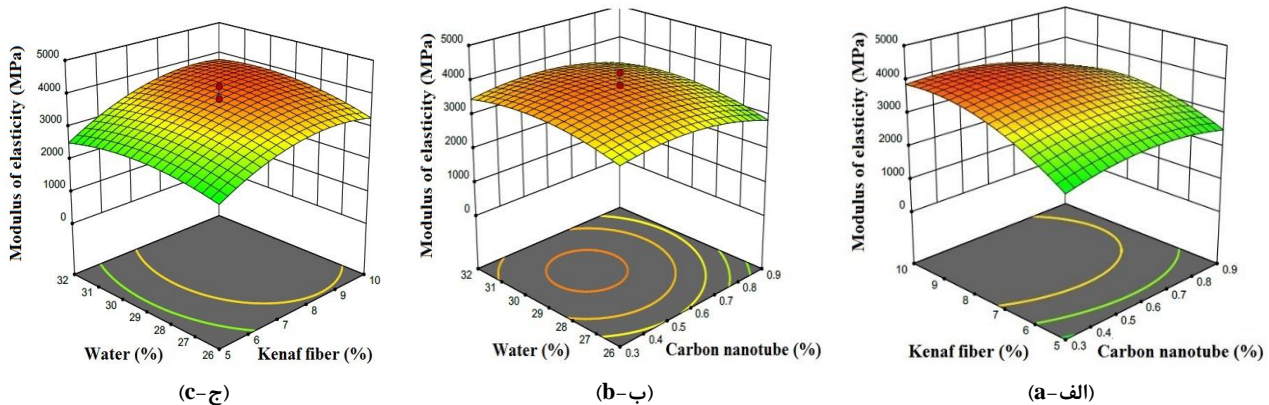


Fig. 4 The interaction of variable factors on the modulus of elasticity of geopolymer, (a) kenaf fibers × carbon nanotube and (c) carbon nanotube × percentage of water

شکل 4 اثر متقابل عوامل متغیر بر مدول الاستیسیته ژئوپلیمر (الف) درصد الیاف × نانولوله کربن، (ب) درصد آب × نانولوله کربن و (ج) نانولوله کربن × آب

مقاومت فشاری بالاتر نمونه‌ها در اثر حضور نانولوله کربنی را می‌توان به کاهش ریزترک‌ها در ماتریس کامپوزیت‌های ژئوپلیمری مرتبط دانست. علاوه بر این، افزایش نانولوله کربنی به علت خاصیت پرکنندگی می‌تواند میزان تخلخل را کاهش داده و متقابلاً باعث افزایش مقاومت فشاری کامپوزیت‌ها شود. همچنین کاهش مقاومت فشاری در اثر افزایش مقدار الیاف احتمالاً می‌تواند به دلیل آسیاب کردن و خرد شدن الیاف و کاهش ضریب لاغری آن‌ها باشد که نقش خود در تقویت و انتقال تنش‌های فشاری را نمی‌توانند به خوبی ایفا کنند. علاوه بر آن، با افزایش درصد الیاف میزان جذب آب افزایش می‌یابد که به نوبه خود سبب افزایش اندازه منافذ و تخلخل در کامپوزیت و در نهایت کاهش مقاومت فشاری خواهد شد. [20]. همچنین، با توجه به واکنش بین نانولوله کربن و اجزای ژئوپلیمرها، پس از تشکیل ترک در ماده زمینه، نانولوله کربن همانند پل عمل می‌کند و مانع از رشد و گسترش میکروتراک‌ها در ماده زمینه می‌شود که در نتیجه سبب افزایش مقاومت فشاری می‌گردد [21].

3-3- چقرمگی شکست

چقرمگی شکست با اندازه‌گیری ضریب شدت تنش و انرژی شکست تعیین می‌شود. مطابق جدول آنالیز واریانس، تأثیر همه عوامل متغیر بر این خاصیت مکانیکی معنی‌دار هستند (جدول 9). اثر مقدار الیاف کنف و نانولوله کربنی به همراه مقدار آب بر چقرمگی ژئوپلیمر در شکل 6 ارائه شده است. الیاف کنف و نانولوله کربنی نقش مهمی در افزایش چقرمگی نمونه‌ها از طریق عملکرد جذب انرژی مانند گسیختگی الیاف و جداسازی اتصال الیاف-ماده زمینه دارند. چقرمگی شکست در کامپوزیت‌های حاوی الیاف کنف 2.5 درصد کمترین مقدار (1.9 مگاپاسکال بر مترمربع) و در کامپوزیت‌های با الیاف 7.5 درصد الیاف کنف بیشترین مقدار (4.11 مگاپاسکال بر مترمربع) اندازه‌گیری شد.

باتوجه به نتایج طرح آماری سطح پاسخ در جدول 4 میزان چقرمگی شکست ژئوپلیمر حاوی نانولوله کربن در مقایسه با نمونه‌های بدون نانولوله کربنی حداقل افزایش دو برابری مقاومت فشاری را نشان دادند به طوری که برای نمونه‌های بدون نانولوله، چقرمگی 6.18 مگاپاسکال بود در حالی که نمونه‌ها با 0.6 درصد نانولوله کربن چقرمگی 14.63 مگاپاسکال را نشان دادند. دلیل این افزایش قابل توجه در چقرمگی شکست را می‌توان پل زدن، کاهش ترک‌ها و متراکم ساختن بیشتر ساختار توسط نانولوله کربنی بیان کرد.

همچنین، مقاومت خمشی با افزایش مقدار آب تا 29 درصد افزایش؛ اما در مقادیر بالاتر آن سیر نزولی داشت. علت این موضوع را می‌توان باقی ماندن آب آزاد در کامپوزیت نهایی دانست که بعد از حذف آن و ایجاد تخلخل، سبب افت مقاومت می‌شود.

در کامپوزیت‌های سبز ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف طبیعی، الیاف به‌عنوان تقویت‌کننده عمل می‌کنند به طوری که هنگام تنش با انتقال و توزیع یکنواخت تنش، تنش‌های متمرکز داخلی اعمال شده در جهت‌های مختلف را کاهش می‌دهند. بنابراین، از تمرکز تنش و شکستگی‌های محلی جلوگیری کرده و باعث افزایش مقاومت خمشی و مدول الاستیسیته می‌شود. استفاده از الیاف باعث افزایش انعطاف‌پذیری کامپوزیت‌ها نیز می‌شود [13].

شکل 4 اثر متغیرهای مورد بررسی بر مدول الاستیسیته ژئوپلیمر را نشان می‌دهد. مشابه مقاومت خمشی، مقدار الیاف کنف عاملی مهم بر مدول الاستیسیته است. کم‌ترین مقدار مدول الاستیسیته مربوط به نمونه‌های با الیاف کنف 2.5 درصد بود و افزایش مقدار آن تا 7.5 درصد باعث بهبود ویژگی شکنندگی و مقاومت به شکست ژئوپلیمرها گردید. مطابق نتایج، افزایش بیش از حد الیاف کنف که با جذب آب بیشتر همراه خواهد بود باعث کاهش مدول الاستیسیته می‌شود. بیش‌ترین مقدار مدول الاستیسیته (4152 مگاپاسکال) مربوط به طرح اختلاط با مقدار الیاف 7.5 درصد، نانولوله کربن 0.6 درصد و آب 29 درصد بود. با توجه به جدول 6 مقدار F به‌دست آمده برای نانولوله کربن در مقایسه با الیاف کنف مقدار کمتری است، بنابراین می‌توان گفت تأثیر نانولوله کربن بر مدول الاستیسیته نسبت به الیاف کنف کمتر بوده است. این نتایج با یافته‌های قبلی مطابقت دارد که با حضور الیاف طبیعی مقاومت، انعطاف‌پذیری و سختی کامپوزیت ژئوپلیمری تا حد زیادی افزایش نشان داده است [12].

3-2- مقاومت فشاری

مطابق شکل 5 که اثر عوامل متغیر بر مقاومت فشاری کامپوزیت‌های ژئوپلیمری را نشان می‌دهد، مقاومت فشاری با افزایش نانولوله کربن تا 0.9 درصد و کاهش مقدار الیاف کنف تا 2.5 به‌طور قابل توجهی بهبود یافت. به طوری که، این مقاومت با افزایش نانولوله کربنی تا 0.9 درصد به مقدار 14.63 مگاپاسکال و در مقابل با افزایش الیاف کنف تا مقدار 6.93 مگاپاسکال کاهش یافت. همان‌طور که در جدول آنالیز واریانس مشاهده می‌شود، تأثیر همه عوامل متغیر بر مقاومت فشاری معنی‌دار هستند. تأثیر الیاف کنف با توجه به مقدار F حاصل شده در جدول 8 بیشتر از دو متغیر دیگر است.

جدول 8 آنالیز واریانس اثر عوامل متغیر بر مقاومت فشاری

Table 8 Variance analysis of the effect of variable factors on the compressive strength

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	تفاوت
مدل	9	299.40	33.27	73.46	> 0.0001	***A
A- نانولوله کربن	1	57.75	57.75	127.52	> 0.0001	**
B- الیاف کنف	1	139.84	139.84	308.79	> 0.0001	**
C- آب	1	11.09	11.09	24.48	> 0.0001	**
AB	1	34.54	34.54	76.26	> 0.0001	**
AC	1	39.19	39.19	86.54	> 0.0001	**
BC	1	7.92	7.92	17.50	> 0.0001	**
باقیمانده	38	17.21	0.45			
ضعف برازش	5	4.17	0.83	2.11	0.0885	ns
خطای خالص	33	13.04	0.40			

ضریب تبیین (R²): 0.94، انحراف معیار: 0.67

** معنی‌دار در سطح 1 درصد، ns عدم معنی‌داری

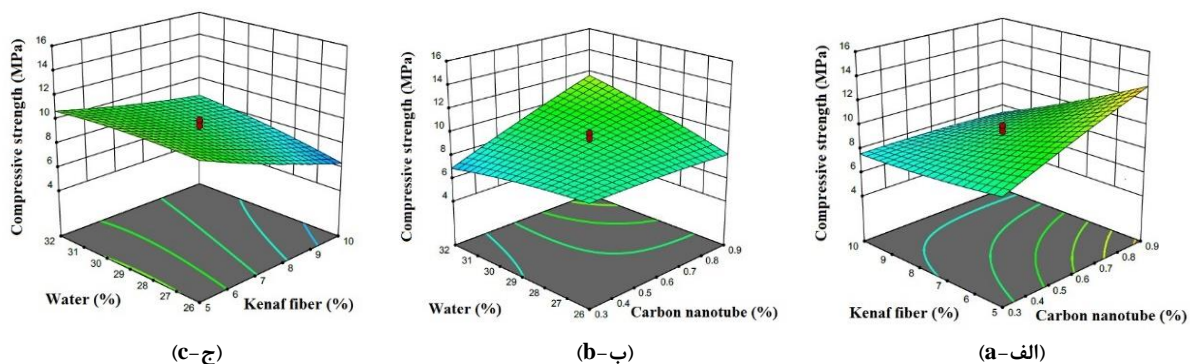


Fig. 5 The interaction effect of variable factors on the compressive strength of geopolymer, (a) kenaf fibers × carbon nanotube, (b) water × carbon nanotube and (c) carbon nanotube × water

شکل 5 اثر عوامل متغیر بر مقاومت فشاری ژئوپلیمر، (الف) الیاف کنف × نانولوله کربن، (ب) آب × نانولوله کربن و (پ) نانولوله کربن × درصد آب

دادند و چقرمگی شکست به ترتیب 38٪، 40٪ و 45٪ بهبود یافت. در همین ارتباط، انرژی شکست به ترتیب 83٪، 72٪ و 74٪ افزایش نشان داد. او تأکید می‌کند که نانوالیاف کربن منجر به متراکم شدن ریزساختار می‌شود [21].

3-4- جذب آب پس از 24 و 48 ساعت

نتایج آنالیز واریانس نشان می‌دهد اثر عوامل متغیر بر مقدار جذب آب ژئوپلیمر، پس از 24 و 48 ساعت غوطه‌وری در آب معنی‌دار است (جدول 10). شکل 7 و 8 اثر متغیرهای مورد بررسی بر مقدار جذب آب را به ترتیب پس از 24 ساعت و 48 ساعت غوطه‌وری نشان می‌دهد. نتایج نشان داد با افزایش مقدار الیاف کنف، مقدار جذب آب پس از 24 و 48 ساعت (شکل 7 و 8 بخش پ- C) افزایش داشته است. علت آن را می‌توان به حضور سلولز و همی‌سلولزهای موجود در الیاف طبیعی نسبت داد.

مقدار آب نقش مهمی در خواص ژئوپلیمر تولیدشده با فعال‌سازهای قلیایی دارد. زیرا آب باعث حل شدن آلومینوسیلیکات، هیدرولیز Al³⁺ و Si⁴⁺ و افزایش تراکم زیاد مواد قابل انحلال می‌شود. با این حال، مقدار بیش از حد آب در فرآیند ژئوپلیمریزاسیون به دلیل افزایش حجم و اندازه منافذ در ساختار ژئوپلیمر، قدرت مکانیکی مواد را کاهش می‌دهد [22].

پراکنش الیاف کنف در ماتریس ژئوپلیمر تأثیر قابل‌توجهی بر خواص مخلوط تازه، به‌ویژه بر روی کارایی دارد و افزودن 10 و 12.5 درصد وزنی الیاف کنف منجر به کاهش استحکام ماتریس شد. به علت خاصیت هیدروفیل بودن الیاف، گرانیوی مخلوط در درصدهای بالای الیاف کنف کاهش می‌یابد و باعث می‌شود که سطح الیاف به‌طور کامل با ماده زمینه پوشانده نشوند که این مسئله با توجه به مشاهدات تجربی با افزایش مقدار آب جبران می‌شود. افزایش محتوای آب برای غلبه بر چنین مشکلی ممکن است منجر به اثرات نامطلوب دیگری مانند افزایش تخلخل و ریزترک شود. این محدودیت‌ها منجر به کاهش پیوند در سطح مشترک الیاف-ماده زمینه می‌شود که در نتیجه سبب انتقال بیشتر تنش به ماده زمینه می‌شود. به‌طور خلاصه، همانگونه مطالعات قبلی نیز نشان داد افزایش در خواص مکانیکی و مقاومت به شکست کامپوزیت‌های ژئوپلیمری را می‌توان در الیاف طبیعی به دست آورد [13]. وجود نانولوله کربن به علت تأثیر در تسریع ژئوپلیمریزاسیون، کاهش قلیائیت سیستم و افزایش ژل ژئوپلیمر تأثیر مثبت در چقرمگی دارد.

آکونو¹ (2020) به بررسی خاصیت شکست ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولین تقویت‌شده با 0.1، 0.2 و 0.5 درصد وزنی نانوالیاف کربنی پرداخت. نتایج تحقیق وی نشان داد که نانوالیاف کربنی مقاومت در برابر شکست را افزایش

¹ Akono

جدول 9 آنالیز واریانس اثر عوامل متغیر بر چقرمگی شکست

Table 9 Analysis of variance on the variable factors on the fracture toughness

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	مقدار F	P	تفاوت
مدل	9	22.14	2.46	98.28	> 0.0001	**
A- نانولوله کربن	1	0.44	0.44	17.38	> 0.0002	**
B- الیاف کنف	1	9.43	9.43	376.52	> 0.0001	**
C- آب	1	1.11	1.11	44.23	> 0.0001	**
AB	1	2.55	2.55	102.05	> 0.0001	**
AC	1	0.38	0.38	15.08	> 0.0004	**
BC	1	0.15	0.15	5.82	< 0.0208	*
A ²	1	5.32	5.32	212.52	> 0.0001	**
B ²	1	0.25	0.25	10.08	> 0.0030	**
C ²	1	4.63	4.63	184.77	> 0.0001	**
باقیمانده	38	0.95	0.025			
ضعف برازش	5	0.083	0.017	0.63	0.6785	ns
خطای خالص	33	0.87	0.026			

ضریب تبیین 0.958، انحراف معیار 5.66

** معنی‌دار در سطح 1 درصد، * معنی‌دار در سطح 5 درصد، ns عدم معنی‌داری

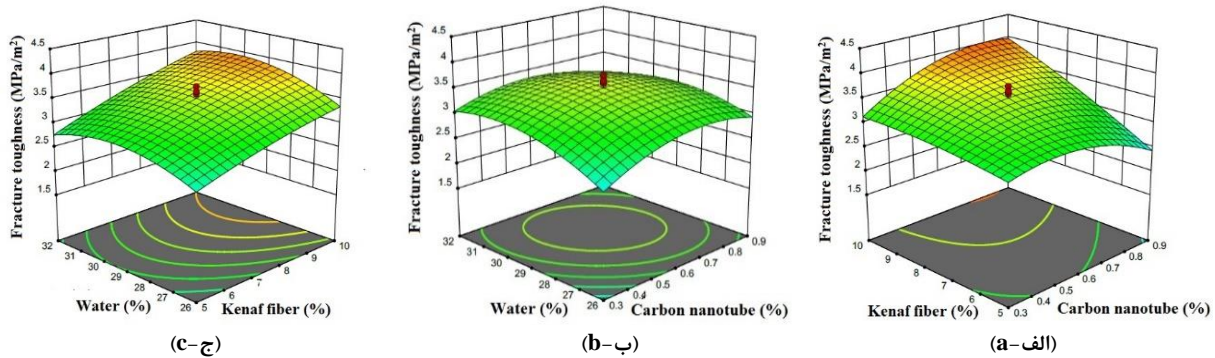


Fig. 6 The interaction of variable factors on the fracture toughness of geopolymer, (A) kenaf fibers × carbon nanotube, (B) × water × carbon nanotube and (C) carbon nanotube × water

شکل 6 اثر عوامل متغیر بر چقرمگی شکست ژئوپلیمر، (الف) الیاف کنف × نانولوله کربن، (ب) آب × نانولوله کربن، و (پ) نانولوله کربن × آب

جدول 10 آنالیز واریانس اثر عوامل متغیر بر جذب آب 24 و 48 ساعت

Table 10 Variance analysis of the effect of variable factors on water absorption of 24 and 48 hour

منبع تغییرات	درجه آزادی		مجموع مربعات		میانگین مربعات		مقدار F		P	
	48	24	48	24	48	24	48	24	48	24
مدل	9	9	216.9	303.86	24.1	33.76	164.39	103.07	< 0.0001	< 0.0001
B- الیاف کنف	1	1	92.32	154.19	92.32	154.19	629.76	470.74	< 0.0001	< 0.0001
C- آب	1	1	61.81	77.90	61.81	77.9	421.63	237.83	< 0.0001	< 0.0001
AB	1	1	17.19	1.70	17.19	1.7	117.24	5.19	< 0.0001	< 0.0284
AC	1	1	6.07	6.07	6.07	6.07	18.53	18.53	0.0001	0.0001
BC	1	1	15.47	20.85	15.47	20.85	105.54	63.66	< 0.0001	< 0.0001
A ²	1	1	9.24	14.11	9.24	14.11	63.03	43.06	< 0.0001	< 0.0001
B ²	1	1	1.10	2.17	1.10	2.17	7.49	6.62	0.0049	0.0141
C ²	1	1	4.47	5.17	4.47	5.17	30.46	15.8	< 0.0001	0.0003
باقیمانده	38	38	5.57	12.45	0.15	0.33				
ضعف برازش	5	5	1.40	3.07	0.28	0.61	2.21	2.16	0.0772	0.0822
خطای خالص	33	33	4.18	9.37	0.13	0.28				

24 ساعته: ضریب تبیین: 0.96، انحراف معیار: 0.57

48 ساعته: ضریب تبیین: 0.975، انحراف معیار: 0.38

** معنی‌دار در سطح 1 درصد، * معنی‌دار در سطح 5 درصد، ns عدم تفاوت معنی‌داری

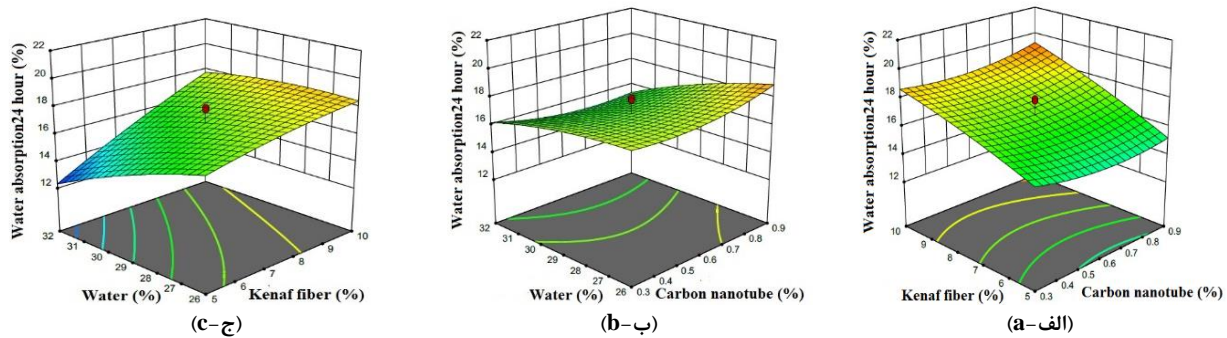


Fig. 7 The interaction of variable factors on water absorption of geopolymer after 24 hour immersion, (a) kenaf fibers × carbon nanotube, (b) water × carbon nanotube and (c) carbon nanotube × water

شکل 7 اثر عوامل متغیر بر مقدار جذب آب ژئوپلیمر پس از 24 ساعت غوطه‌وری، (الف) الیاف کنف × نانولوله کربن، (ب) آب × نانولوله کربن و (پ) نانولوله کربن × آب

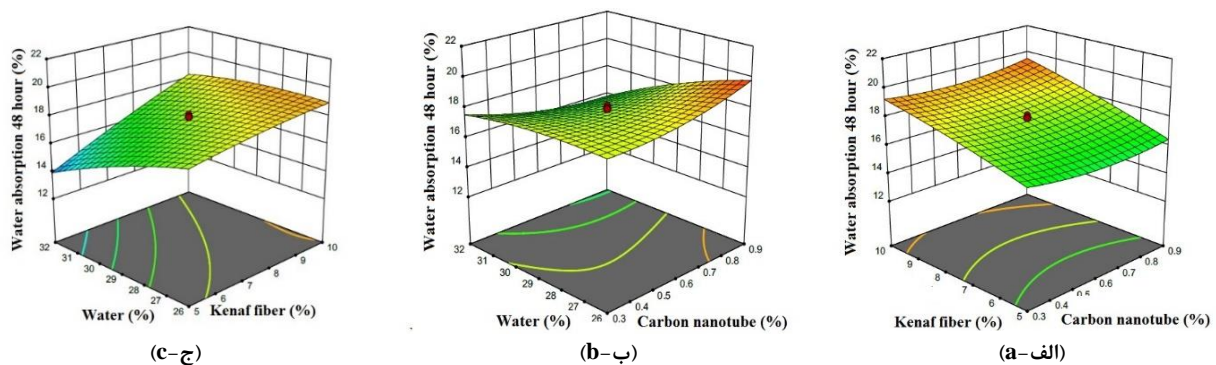


Fig. 8 The interaction of variable factors on water absorption of geopolymer after 48 hour immersion, (a) kenaf fibers × carbon nanotube, (b) water × carbon nanotube and (c) carbon nanotube × water

شکل 8 اثر عوامل متغیر بر مقدار جذب آب ژئوپلیمر پس از 48 ساعت غوطه‌وری، (الف) الیاف کنف × نانولوله کربن، (ب) آب × نانولوله کربن و (پ) نانولوله کربن × آب

بررسی شکل 9 و جدول 11 نشان داد با افزایش درصد الیاف کنف و با 0.6 درصد وزنی نانولوله کربن، قطر منافذ ماده زمینه ژئوپلیمری به شدت افزایش یافت. افزایش اندازه منافذ درشت، به دلیل افزایش ویسکوزیته خمیر اولیه کامپوزیت است [11]. با توجه به نتایج کسب شده ممکن است با افزایش ویسکوزیته حتی پس از استفاده از روش های اختلاط پیشرفته همچنان حضور ماکرو منافذ افزایش یابد. در همین ارتباط، با افزایش درصد الیاف قطر منافذ و تعداد منافذ به علت جذب بیشتر آب افزایش یافته است (شکل 9 پ-ج).

همچنین، همان‌طور که مشاهده می‌شود نانولوله های کربن با مکانیسم پل زدن منجر به کاهش عرض ترک و در نهایت کاهش شکست می‌شود (شکل 9 پ-ج تا شکل 9 ث-ه). مکانیسم های پل زدن در نانوکامپوزیت های ژئوپلیمری تقویت شده با میکروالیاف کربن و نانولوله های کربنی چند جداره در مطالعات قبلی نیز گزارش و مورد تایید واقع شده است [21]

جدول 11 میانگین قطر (میکرومتر) منافذ نمونه های مختلف ژئوپلیمری

Table 10 Pore diameter average of different geopolymer samples

نمونه	الف-ا	ب-ب	پ-ج	ت-د	ث-ه
میانگین	65.68	92.09	95.78	258.01	54.87
انحراف معیار	20.46	29.22	13.98	157.89	29.75

نتایج نشان داد که مقدار جذب آب کامپوزیت‌ها در درصدهای بالاتر الیاف کنف، ابتدا بطور قابل توجهی افزایش را نشان داد. اما بعد از مدت زمانی مشخص این تغییرات چشمگیر نخواهد بود به عبارت دیگر این کامپوزیت‌ها مقدار معینی جذب آب دارند. پس از آن درصد جذب تغییر قابل قبولی نخواهد کرد. که اعداد موجود در جدول (4) نتایج طرح آماری سطح پاسخ برای بازه های 24 و 48 ساعت نیز همین مطلب را تایید میکند. بنابراین، تغییر در مقدار الیاف کنف بیشترین تأثیر را در میزان جذب آب در بازه های زمانی مختلف از خود نشان داده است. میزان جذب آب همچنین، کمی با افزایش مقدار نانولوله کربن در کامپوزیت‌ها به دلیل ویژگی های آبدوستی و قطبی بودن نانولوله کربن افزایش یافت.

3-5- نتایج میکروسکوپ الکترونی روبشی

به منظور تشخیص نقش تقویت کنندگی نانولوله های کربنی و توزیع الیاف کنف مطالعه سطح شکست نمونه ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی میدانی (FESEM) صورت گرفت. تصویر بدست آمده از ژئوپلیمر خالص (شکل 9 الف-ا) یک ریزساختار متخلخل همگن و سه بعدی را نشان می‌دهد که در ترکیب با نانولوله کربن، تجمع نانومواد در بخش هایی از ماده زمینه مشاهده می‌شود (شکل 9 ب-ب تا شکل 9 ث-ه). همچنین، مشاهده می‌شود که قطر منافذ (تخلخل) موجود در زمینه ژئوپلیمر در ترکیب با الیاف کنف و نانولوله کربن تا نسبت های بهینه از نظر خواص مقاومتی افزایش یافته است. (شکل 9 ب-ب تا شکل 9 ت-د). میانگین قطر منافذ اندازه گیری شده در جدول 11 آورده شده است.

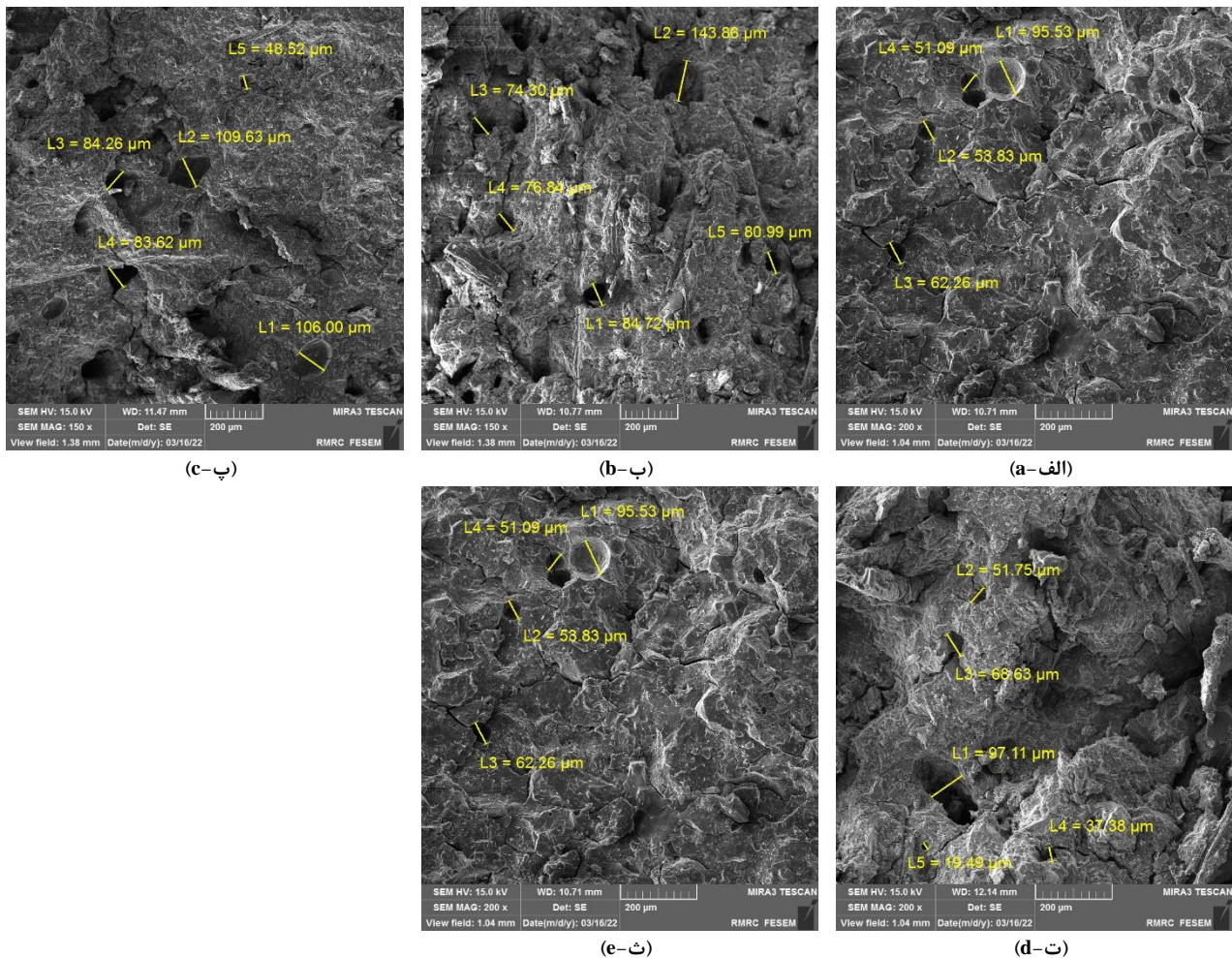


Fig. 9 FESEM images of (a) primary geopolymer sample, and geopolymer made with (b) carbon nanotube 0% + kenaf fibre 7.5% + water 29%, (c) carbon nanotube 0.6% + kenaf fibre 7.5% + water 29%, (d) carbon nanotube 1.2% + kenaf fibre 7.5% + water 29%, (e) carbon nanotube 0.6% + kenaf fibre 12.5% + water 29

شکل 9 تصاویر FESEM از نمونه (الف) ژئوپلیمر اولیه، و ژئوپلیمر ساخته با (ب) نانولوله کربن 0% + الیاف کنف 7.5% + آب 29%، (پ) نانولوله کربن 0.6% + الیاف کنف 7.5% + آب 29%، (ت) نانولوله کربن 1.2% + الیاف کنف 7.5% + آب 29%، (ث) نانولوله کربن 0.6% + الیاف کنف 12.5% + آب 29%

4- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مقاومت مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سبب ژئوپلیمری مبتنی بر سرپاره و متاکائولن تقویت‌شده با نانوالیاف کربن و الیاف کنف بررسی گردید. نتایج نشان داد که الیاف کنف و نانولوله کربن می‌تواند به عنوان تقویت‌کننده در بهبود خواص کامپوزیت‌های ژئوپلیمری استفاده شوند. افزایش مقدار الیاف کنف (تا 7.5 درصد) استحکام خمشی، مدول الاستیسته و چقرمگی شکست کامپوزیت‌ها را افزایش داد، اما افزایش بیشتر مقدار آن سبب کاهش خواص مکانیکی گردید. دلیل این افت کیفیت می‌تواند مربوط به تشکیل بیشتر منافذ و افزایش اندازه آن‌ها (مشاهده شده در تصاویر (FESEM)، پراکنش غیریکنواخت و تجمع توده‌های الیاف در ماده زمینه باشد. با توجه به اینکه الیاف کنف از نوع الیاف بلند است، احتمالاً در استفاده از سایر انواع الیاف طبیعی انتظار نتایج متفاوتی می‌رود که نیاز به تحقیقات تکمیلی بعدی است. همچنین، مقاومت خمشی کامپوزیت‌های ژئوپلیمری با افزایش مقدار نانولوله‌های کربنی (تا 0.6 درصد) افزایش یافت که علت آن به پراکندگی مناسب نانولوله‌های کربنی در ماتریس کامپوزیت و تضعیف نیروهای واندروالسی

نسبت داده می‌شود. پراکندگی نانساختارهای کربنی در کامپوزیت‌های پلیمری هنوز یکی از چالش‌های اصلی به دلیل نیروهای واندروالس است که باعث ایجاد تراکم و تجمع می‌شود [19]. با این حال، نویسندگان تاکنون نتوانستند درباره اثر نانولوله‌های کربنی و غلظت پراکنده آن‌ها بر خواص مکانیکی و فیزیکی نانوکامپوزیت‌های ژئوپلیمر مبتنی بر متاکائولن و سرپاره به گزارشی دست پیدا کنند.

نتایج تصاویر FESEM نشان داد افزایش نانولوله کربنی (تا 0.6 درصد) قطر منافذ (تخلخل) افزایش یافت. به عبارت دیگر، با افزایش قطر منافذ قابلیت جذب انرژی ناشی از بارگذاری‌های مکانیکی توسط ماده زمینه و به تبع آن کامپوزیت افزایش می‌یابد و در نتیجه نانولوله کربنی می‌تواند مقاومت خمشی، مقاومت فشاری و چقرمگی ماده را افزایش دهد. همچنین، با توجه به نتایج مقاومت‌ها، الیاف کنف توانست به عنوان تقویت‌کننده عمل کند. به طوری که هنگام اعمال تنش با انتقال و توزیع آن، تنش‌های متمرکز داخلی اعمال شده در جهت‌های مختلف را کاهش داد، در نتیجه با کاهش تمرکز تنش و کاهش شکستگی‌های محلی باعث افزایش مقاومت خمشی و مدول الاستیسته شدند.

Research on the Use of Cellulosic Fibres, Their Fibre Fabric Reinforced Cementitious, Geo-Polymer and Polymer Composites in Civil Engineering”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 92, pp. 94-132, 2016.

- [12] Siddique, R., Khatib, J., and Kaur, I. “Use of Recycled Plastic in Concrete: A review”, *Waste Management*, Vol. 28, No. 1, pp. 1835-1852, 2008.
- [13] Alomayri, T., Shaikh, F. U. A., and Low, I. M. “Synthesis and Characterization of Mechanical Properties of Cotton Fiber-Reinforced Geopolymer Composites”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 60, pp. 36-42, 2014.
- [14] Behera, P., Baheti, V., Militky, J., and Naeem, S. “Microstructure and Mechanical Properties of Carbon Microfiber Reinforced Geopolymers at Elevated Temperatures” *Construction and Building Materials*, Vol. 160, pp. 733-743, 2018.
- [15] Ritchie, R. O. and Liu, D. “Introduction to Fracture Mechanics”, Elsevier, pp. 81-99, Oxford, 2021.
- [16] Anderson, M. J., and Whitcomb, P. J., “RSM Simplified: Optimizing Processes Using Response Surface Methods for Design of Experiments”, Second ed, Taylor & Francis, Boca Raton, 2016.
- [17] Wood-based panels. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength, British Standards Institution, (BS) EN: 310, 1993.
- [18] Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars, Annual Book of ASTM Standard, C109/C109M-02, 2002.
- [19] Saafi, M., Andrew, K., Tang, P. L., McGhon, D., Taylor, S., Rahman, M., Yang, Sh., and Zhou, X., “Multifunctional Properties of Carbon Nanotube/Fly Ash Geopolymeric Nanocomposites”, *Construction and Building Materials*, Vol. 49, pp. 46-55, 2013.
- [20] Orouji, M., Zahrai, S. M., and Najaf, E., “Effect of Glass Powder and Polypropylene Fibers on Compressive and Flexural Strengths, Toughness and Ductility of Concrete: An environmental approach”, *Structures*, Vol. 33, pp. 4616-4628, 2021.
- [21] Akono, A. “Fracture Behavior of Metakaolin-Based Geopolymer Reinforced with Carbon Nanofibers”, *International Journal of Ceramic Engineering and Science*, Vol. 2, No. 5, pp. 234-242, 2020.
- [22] Okada, K., Ooyama, A., Isobe, T., Kameshima, Y., Nakajima, A., and MacKenzie, K. J. D., “Water Retention Properties of Porous Geopolymers for Use in Cooling Applications”, *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 29, No. 10, pp. 1917-1923, 2009.

میزان جذب آب نیز تا حدودی با افزایش مقدار نانولوله کربن به دلیل ویژگی‌های آبدوستی و قطبی بودن نانولوله کربن افزایش یافت.

کاربردهای احتمالی این کامپوزیت‌های ژئوپلیمری تقویت‌شده با الیاف کف ممکن است شامل انواع خاصی از سقف‌ها و برخی کاربردهای داخلی در صنعت ساخت و ساز باشد.

5- سپاسگزاری

مقاله حاضر بخشی از نتایج طرح تحقیقاتی مصوب صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور به شماره 98002545 می‌باشد که بدین وسیله از این مرکز و همچنین از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه گرگان تشکر و قدردانی می‌گردد.

6- مراجع

- [1] Zhang, P., Wang, K., Wang, J., Guo, J., Hu, S., and Ling, Y., “Mechanical Properties and Prediction of Fracture Parameters of Geopolymer/Alkali-Activated Mortar Modified with PVA Fiber and Nano-SiO₂”, *Ceramics International*, Vol. 46, No. 12, pp. 20027-20037, 2020.
- [2] Kioupis, D., Tsvivilis, S., and Kakali, G., “Development of Green Building Materials Through Alkali Activation of Industrial Wastes and By-Products”, *Materials Today: Proceedings*, Vol. 5, No. 14, pp. 27329-27336, 2018.
- [3] Kilani, A., Fapohunda, C., Adeleke, O., and Metiboba, C., “Evaluating the Effects of Agricultural Wastes on Concrete and Composite Mechanical Properties”, *Research on Engineering Structures and Materials*, Vol. 8, No. 2, pp. 307-336, 2022.
- [4] Altwair, N. M., and Kabir, S., “Green Concrete Structures by Replacing Cement with Pozzolanic Materials to Reduce Greenhouse Gas Emissions for Sustainable Environment”, In 6th International Engineering and Construction Conference, Cairo, Egypt, 269-279, 2010.
- [5] Imbabi, M. S., Carrigan, C., and McKenna, S., “Trends and Developments in Green Cement and Concrete Technology”, *International Journal of Sustainable Built Environment*, Vol. 1, No. 2, pp. 194-216, 2012.
- [6] Xu, Z., Huang, Z., Liu, C., Deng, H., Deng, X., Hui, D., and Bai, Z., “Research Progress on Key Problems of Nanomaterials-Modified Geopolymer Concrete”, *Nanotechnology Reviews*, Vol. 10, No. 1, pp. 779-792, 2021.
- [7] Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J. G., Wang, C. M., and Duan, W. H., “Nano Reinforced Cement and Concrete Composites and New Perspective from Graphene Oxide”, *Construction and Building materials*, Vol. 73, pp. 113-124, 2014.
- [8] Bazrkar, H., Lork, A., and 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.
- [9] Ghafari, F., Bozorgi, M. H., and Salari, M., “Applications of Nanotechnology in Construction: A Short Review”, *Advances in Applied NanoBio-Technologies*, Vol. 3, No. 1, pp. 82-86, 2022.
- [10] Zare, Y., and Rhee, K. Y. “Expression of Normal Stress Difference and Relaxation Modulus for Ternary Nanocomposites Containing Biodegradable Polymers and Carbon Nanotubes by Storage and Loss Modulus Data”, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 158, pp. 162-168, 2019.
- [11] Yan, L., Kasal, B., and Huang, L. “A Review of Recent