



## بررسی و بهینه‌سازی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های هیبریدی پایه اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن به روش تاگوچی

یاسر رستمیان<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد ساری، دانشگاه آزاد اسلامی، ساری، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۳۰؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۰۲/۱۹؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۳/۲۷

### چکیده

در این مقاله، خواص مکانیکی لمینیت‌های هیبریدی با ترکیبات اپوکسی/الیاف کربن/نانو خاک رس/نانو دی اکسید تیتانیوم و اپوکسی/الیاف کربن/نانو خاک رس/نانو لوله کربنی، در ابتدا بصورت مجزا و نهایتاً بصورت مقایسه‌ای، مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور نمونه‌هایی فاقد ذرات متشکل از اپوکسی و ۱۶ لایه فیبر کربن و همچنین نمونه‌های اپوکسی و فیبر کربن حاوی نانو ذرات که در چهار درصد وزنی مختلف و دو ترکیب (خاک رس / نانو لوله‌های کربنی) و (خاک رس / دی اکسید تیتانیوم) به اپوکسی اضافه گردیده بودند، ساخته و مورد آزمایش قرار گرفتند. از نکات این پژوهش، بررسی آزمایشگاهی و بهینه‌سازی به کمک روش تاگوچی، در جهت کاهش تعداد آزمایش‌ها و کاستن هزینه‌ها و دستیابی به مقاومت کششی و خمشی بهینه در نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده است. نتایج حاصله از این پژوهش نشان داد که نمونه‌های حاوی نانو رس با ۰/۵ درصد وزنی و نانودی اکسید تیتانیوم با ۱ درصد و نانو لوله کربنی با ۰/۵ درصد وزنی، دارای بالاترین مقاومت در نمونه هیبریدی نهایی خواهد بود.

**کلمات کلیدی:** لمینیت‌های هیبریدی؛ نانوخاکرس؛ نانولوله کربنی؛ نانو دی اکسید تیتانیوم؛ کشش؛ خمش.

## Investigation and Optimization of the Mechanical Properties of Epoxy based Hybrid Nano-Composites Reinforced by Carbon-Fiber: Using Taguchi Method

Y. Rostamiyan<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Sari Branch, Islamic Azad University, Sari, Iran.

### Abstract

In this manuscript, the mechanical properties of hybrid laminates with content of Epoxy/Carbon Fiber/clay/TiO<sub>2</sub> and Epoxy/Carbon Fiber/clay/CNT have been investigated separately and comparative. For this purpose, the samples with and without nano particles: (Epoxy/CF) and (Epoxy/CF/Clay/TiO<sub>2</sub>& Epoxy/CF/Clay/CNT) have been fabricated. In this study, in order to decrease the number of experiments, costs and optimum tensile and bending strength, Taguchi as one of experimental design methods is employed. The results showed that the samples with 0.5 wt% of clay, 1 wt% TiO<sub>2</sub> and 0.5 wt% CNT have the highest tensile and bending strength.

**Keywords:** Hybrid Laminates; Nano Clay; Carbon Nanotube; Nano TiO<sub>2</sub>; Tensile; Bending.

## ۱- مقدمه

امروزه از کامپوزیت های پایه اپوکسی به دلیل داشتن وزن کم، شکل پذیری خیلی خوب، مقاومت شیمیایی بالا و چسبندگی خوبشان در صنعت خودرو سازی، هواپیما سازی، مواد ساختمانی، وسایل ورزشی و غیره مورد استفاده قرار می گیرند [۱]؛ اما رزین اپوکسی به دلیل داشتن ضعف در خاصیت مکانیکی اش، استفاده از آن در صنایعی را کم می کند که نیاز به فاکتورهای مکانیکی همچون مقاومت و استحکام دارد [۲].

اپوکسی حاصل از ترکیب رزین و سخت کننده، هیچ حلالی ندارد؛ لذا در برابر خوردگی ناشی از اسیدها و قلیاها و مشتقات نفتی مقاوم است؛ از طرفی یک ترکیب عایق بسیار خوب حرارت و الکتریسیته و یک نارسانای مقاوم است و مناسب برای بکارگیری به عنوان دی الکتریک است. قالب گیری این ترکیب و ساخت اشکال هندسی از آن بسیار به سهولت انجام می شود و به دلیل داشتن چگالی اندکی کمتر از آب، مناسب برای ساخت شناورهای سبک است.

لذا اپوکسی در صنعت کاربردهای گسترده ای از جمله، در زمینه ساخت رنگ ها، چسب ها، کامپوزیت ها، قالب های صنعتی، مصارف دریایی و هوا فضا، سامانه های الکترونیکی و الکتریکی و مصارف خانگی پیدا کرده است؛ اما کاربرد آن در زمینه کامپوزیت ها بسیار متنوع و گسترده است؛ چرا که قابلیت مخلوط شدن با انواع تقویت کننده ها از قبیل، نانو ذرات و میکروذرات، الیاف، فیبرها و... را دارد. عامل تأمین کننده کرنش پذیری در اپوکسی مجموع کرنش پذیری پیوندهای قطبی است؛ از این رو رفتار اپوکسی، مشابه مواد نرم نیست و ظاهراً مشابه مواد ترد به نظر می رسد. پس تغییر شکل حاصل از اعمال کنش، بیشتر الاستیک است؛ لذا اپوکسی نه انعطاف پذیری مواد نرم و نه تصلب مواد ترد را دارد. همین خصوصیتی که کرنش پذیری بالا در عین ترد بودن سبب شده که تقویت کننده هایی از قبیل، نانو ذرات و میکرو ذرات به عملکرد اپوکسی در برابر اعمال کنش های مختلف کمک کنند. یکی از اختلالاتی که در ساختار اپوکسی بوجود می آید، این است که به دلیل نرسیدن هاردنر به مولکول های رزین در برخی نقاط، شبکه مولکولی در این نقاط دچار نابجایی شده، آسیب پذیر می شود. حضور نانو ذرات و میکرو ذرات در رفع نواقص ناشی از نابجایی های شبکه

مولکولی اپوکسی، نیز نقش پر رنگی دارد و سبب می شود از حداکثر ظرفیت تحمل بار و قابلیت کرنش پذیری اجزاء، استفاده شود.

امروزه کامپوزیت های پایه پلیمری در کنار کامپوزیت های پایه فلزی و سرامیکی، بدلیل برخورداری از استحکام بالا در عین چگالی بسیار پایین و خواص شیمیایی مقاوم در برابر آسیب های طبیعی از قبیل، پوسیدگی و خوردگی، از اهمیت فوق العاده ای برخوردار شده است [۳].

لذا در دهه های اخیر تحقیقات بسیار زیادی برای ارتقاء خواص مکانیکی کامپوزیت ها و مخصوصاً کامپوزیت های پایه پلیمری انجام گرفته است. این نکته حائز اهمیت است که علم نانو پنجره جدیدی را پیش روی محققین گشوده است تا به کمک فناوری نانو بتوانند خواص مکانیکی مواد را بیش از پیش ارتقاء بخشند، بدون اینکه از دیگر خصوصیات خوب مواد کاسته شود.

نانوذرات یک گروه از تقویت کننده ها هستند که در انواع و ابعاد مختلفی وجود دارند؛ به عنوان مثال نانو دی اکسید تیتانیوم نانو ذره ای است از دی اکسید تیتانیوم، کروی شکل و با ابعاد حدود ۲۰ تا ۳۰ نانومتر. نانورس نانو ذره ای است از خاک رس، با شکل هندسی صفحه ای و ابعادی حدود ۱۰۸ نانومتر. نانوذرات دیگری از قبیل، دی اکسید آلومینیم، دی اکسید زیرکونیم، نانو فیبرهای کربن و نانو تیوب های کربنی نیز وجود دارند که کاربرد گسترده ای در زمینه تقویت خواص مکانیکی اپوکسی داشته، در صنعت نیز کاربرد فراوان دارند.

لیوو همکارانش نشان [۴] دادند، اضافه کردن ۲ تا ۱۰ درصد وزنی نانو لوله های کربنی به اپوکسی، خواص مکانیکی و مدول الاستیک را بهبود می بخشد. منتظری و همکارانش [۵] نشان دادند که افزودن ۰/۵ درصد وزنی نانو لوله های کربنی چند جداره به درون اپوکسی، استحکام کششی و مدول یانگ را تا حد زیادی بهبود می بخشد. آلوئیو همکارانش [۶] به این نتیجه رسیدند که با افزودن ۴ درصد وزنی نانولوله های کربنی چند جداره به درون ماده زمینه اپوکسی، مدول یانگ افزایش می یابد. فلوریانو همکارانش [۷]، به بررسی تاثیرات افزودن نانو لوله های کربنی به ماده زمینه اپوکسی پرداختند و به این نتیجه رسیدند، افزودن مقدار کمی به اپوکسی خواص مکانیکی آن را تا حد زیادی افزایش

تاگوچی یک روش آماری برای طراحی آزمایش است که برای بهبود کیفیت نتایج و اهدافی همچون، ساده و بهینه کردن نتایج آزمایش در کمترین زمان و با استفاده از کمترین موارد اولیه، مورد استفاده قرار می‌گیرد. طراحی آزمایشات پیشنهاد شده توسط تاگوچی شامل، استفاده از آرایه‌های متعامد در سازماندهی تاثیر پارامترهای فرآیند و سطوحی است که باید تغییر کند. این روش اجازه می‌دهد، بررسی فاکتورهایی که بیشترین تاثیر را روی کیفیت محصول دارند، با کمترین تعداد آزمایشات انجام گیرد؛ تا بدین گونه در زمان و منابع صرفه جویی شود [۱۷، ۱۸].

آرایه‌ها در طرح‌های تاگوچی به وسیله شماری از پارامترها و سطوح مختلف انتخاب می‌شوند. آنالیز واریانس روی داده‌های جمع آوری شده از طراحی آزمایشات به روش تاگوچی می‌تواند در انتخاب پارامترهای جدید برای بهینه‌سازی عملکرد مورد استفاده قرار گیرد. اطلاعات بدست آمده از آرایه‌ها می‌تواند به وسیله ترسیم اطلاعات ویا تحلیل جبری، مورد تحلیل قرار گیرد. میر محسنی و همکاران [۱۹]، با استفاده از روش تاگوچی به بررسی اثر نانوس و ذرات ترموپلاست در رزیناپوکسی پرداختند و اثر هم افزایی آن‌ها را در استحکام کششی و ضربه بررسی کردند.

هدف از انجام این تحقیق، بررسی و بهینه‌سازی مقاومت مکانیکی چندلایه‌های اپوکسی/الیاف کربن/نانو خاک رس/دی اکسید تیتانیوم-نانو لوله کربنیه کمک الگوی تاگوچی و با انجام آزمون‌های کشش و خمش است.

## ۲- تجربی

### ۲-۱- مواد اولیه

چندلایه‌ای که در این پروژه ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است، دارای ۱۶ لایه با زوایا و ترکیبات متفاوت است. برای ساخت نمونه‌ها از مواد به شرح زیر استفاده شده است:

جهت ساخت ماده زمینه از رزین اپوکسی (اپون ۸۲۸) شرکت شل و عامل پخت سیکلو آلیفاتیک پلی آمین با نسبت ترکیب ۲۳ به ۱۰۰ استفاده شده است. الیاف کربن مدل T700-12K شرکت تورای (Toray) و تک جهته است. نانو لوله‌های کربنی، دی اکسید تیتانیوم و خاک رس از شرکت تکنان (Tecnan) اسپانیا تهیه و خریداری شده‌اند.

می‌دهد. ژو و همکارانش [۸] نشان دادند که افزودن ۳ درصد وزنی از نانو لوله‌های کربنی، ۱۹ درصد مدول یانگ را بهبود می‌بخشد. همچنین محققان دیگری از جمله ایواهوری [۹]، شامید [۱۰]، دین [۱۱]، سیدیکویی [۱۲] و تیمرم [۴] نشان دادند، افزودن مقدار کمی از نانو لوله‌های کربنی به درون اپوکسی حد نهایی فشار و خمش را بین ۱۲ تا ۳۶ درصد افزایش می‌دهد؛ ولی اپوکسی به خاطر شبکه مولکولی سه بعدی خود، مقاومت بسیار پایینی در مقابل ضربه و رشد ترک دارد؛ این موضوع باعث کاهش استفاده این مواد مخصوصاً در شرایط بارگذاری گردیده است [۱۴، ۱۵]. در دهه گذشته تحقیقات زیادی برای بالا بردن مقاومت این ماده در برابر رشد ترک صورت گرفته است. در سال‌های اخیر تلفیق فاز پرکننده میکرو پلاستیکو یا انواع مختلف پلیمرهای ترموپلاستیک، باعث افزایش مقاومت اپوکسی در برابر رشد ترک و ضربه گردیده است. سلطان و همکارانش [۱۶]، از میکرو ذرات پلاستیک به عنوان پرکننده اپوکسی استفاده کردند و دریافتند مقاومت در مقابل ضربه تا حد زیادی افزایش یافت. آنها از میکرو ذرات پلاستیکی از نوع کربوکسیلید ترمیناتید آکریلونیتریل برای افزایش مقاومت در برابر ضربه اپوکسی از نوع دی گیدیسیدیل اتر بیسفنول A استفاده کردند و مشاهده کردند که مقدار انرژی شکست تا حد قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است.

در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، فاکتورهای بسیاری دخیل هستند و هرکدام تاثیر خاص دارند؛ اما چگونگی بکارگیری فاکتورها می‌تواند تابع روش‌های مختلفی باشند که از آن جمله می‌توان به بهینه سازی توسط هوش مصنوعی و بهینه سازی، روش تاگوچی و یا سایر روش‌ها اشاره کرد. به دلیل اینکه انجام آزمایش همواره دارای هزینه و زمان زیادی است مخصوصاً اگر تعداد آزمایش‌ها زیاد باشد، لذا باید روش موثری برای کاهش این مقادیر در نظر گرفته شود، البته بدون اینکه لطمه‌ای به نتایج و همچنین کیفیت آزمایش وارد سازد. از این رو به کمک طراحی آزمایش می‌توان به این هدف نائل گردید. یکی از اهداف طراحی آزمایش ایناست که با تغییراتی آگاهانه در متغیرهای ورودی فرآیند، بتوان تغییرات خروجی را مشاهده و شناسایی کرد. روش‌های مختلفی برای طراحی آزمایش وجود دارد.

## ۲-۲- آماده سازی نمونه ها

به منظور آماده سازی نمونه های مورد نیاز آزمایش ابتدا الیاف کربن در اندازه های مورد نیاز و طبق استاندارد مربوطه در چهار جهت گیری ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه به کمک شابلون برش زده شد. هر نمونه لمینیت دارای ۱۶ لایه از الیاف کربن بوده است. بعد از برش تعداد مورد نیاز از الیاف کربن، نوبت به آماده سازی ماده زمینه یا ماتریس است؛ همچنین، ذرات نانو با ۴ درصد وزنی متفاوت طبق الگوی تاگوچی به اپوکسی اضافه گردیدند.

جدول ۱ مقادیر وزنی نانوذرات و نیز جهت گیری الیاف را نشان می دهد.

## جدول ۱- معرفی سطوح و پارامترهای ورودی طبق الگوی تاگوچی

Factors	Levels			
	1	2	3	4
fiber orientation (deg.)	0	30	60	90
Clay content ( wt.%)	0.5	1.5	2.5	3.5
Cnt content ( wt.%)	0.5	1	1.5	2
TiO <sub>2</sub> content ( wt.%)	1	2	3	4

به منظور اختلاط کامل نانو ذرات در اپوکسی، مخلوط مورد نظر توسط همزن مکانیکی با دور ۲۰۰۰ دور در دقیقه و به مدت ۲ ساعت به طور کامل آماده شده، سپس در مرحله بعد به منظور همگن سازی نمونه و جلوگیری از باز شدن صفحات لایه های اتمی، ماتریس را به مدت ۸ دقیقه درون دستگاه اولتراسونیک هموژنایزر قرار می دهیم.

برای ساخت نمونه اولیه و خالص بدون نانو مواد، ۱۶ لایه به اندازه استاندارد مورد نظر را وزن کرده، دقیقاً به همان اندازه رزین و هاردنر را باهم ترکیب می کنیم. اضافه کردن هاردنر به رزین اپوکسی طبق دستور العمل شرکت تولید کننده رزین اپوکسی به صورت زیر است:  
"به ازای هر ۱۰۰ گرم اپوکسی، باید ۲۳ گرم هاردنر اضافه کنیم."

## حالت اول - نمونه خالص

ترکیبات این نمونه بدون مواد نانویاست و فقط از رزین اپوکسی و هاردنر استفاده می شود. برای ساخت این نمونه ها نیازی به الگوی تاگوچی نمی باشد؛ زیرا مقادیر ترکیب این دو ماده از طرف شرکت سازنده اپوکسی اعلام شده است.

## حالت دوم - نمونه های حاوی نانو ذرات

همانطور که در فصل قبل اشاره شد، برای طراحی آمایش و ساخت ترکیب شیمیایی از الگوی تاگوچی استفاده می کنیم. برای این منظور از نرم افزار Minitab کمک می گیریم. در این نرم افزار در ابتدا بر اساس تعداد فاکتورها، آرایه مناسب را مطابق جدول ۲ مشخص می کنیم.

## جدول ۲- الگوی تاگوچی

Experimental no.	Factor levels		
	A <sup>a</sup>	B <sup>b</sup>	C <sup>c</sup>
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	1	4	4
5	2	1	2
6	2	2	1
7	2	3	4
8	2	4	3
9	3	1	3
10	3	2	4
11	3	3	1
12	3	4	2
13	4	1	4
14	4	2	3
15	4	3	2
16	4	4	1

A=fiber orientation  
B=Clay content  
C= CNT/TiO<sub>2</sub> content

پس از آماده شدن ماتریس و برش الیاف، حال نوبت به لایه چینی لمینیت ها می رسد.

بعد از این که هاردنر را به مخلوط اضافه کردیم، می بایستی سریعاً عملیات لایه چینی انجام شود. برای این منظور ابتدا سطح صافی را انتخاب کرده، با واکس مخصوص چرب می کنیم تا لایه اول الیاف کربن به سطح نچسبد. بعد از چرب کردن سطح توسط واکس، لایه اول را روی آن قرار داده، روی لایه را با مخلوط مورد نظر توسط یک قلم مو آغشته می کنیم. سپس نوبت قرار دادن لایه دوم است. لایه چینی ها طبق الگوی لمینیت های متقارن معکوس است (شکل ۱). هر بار که لایه ای را می چینیم باید آن را با غلتک، حباب های موجود در آن خارج می کنیم. تمام مراحل لایه گذاری به همین صورت تا لایه ۱۶ام انجام می شود. سپس آنها را چند ساعت در دمای محیط رها می کنیم تا به مرحله پخت برسیم.

دستگاه آزمایش یونیورسال STM-150 استفاده شده است (شکل ۲).

### ۲-۳-۲- آزمایش خمش

به منظور بررسی میزان مقاومت نمونه‌های ساخته شده در برابر نیروهای وارده آنها را تحت آزمون خمش سه نقطه‌ای قرار می‌دهیم. استاندارد این آزمون، ASTM D790 بوده است. برای این آزمون هم از دستگاه آزمایش سنتام STM-150 استفاده شده است (شکل ۳).

### ۳- نتایج و بحث

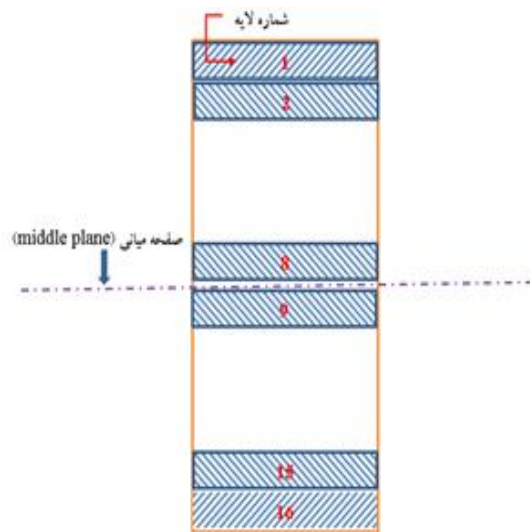
در این قسمت، نتایج حاصل از آزمون‌های مکانیکی مربوط به جهت‌گیری‌های مختلف الیاف کربن و نیز درصد اختلاط‌های مختلف نانو ذرات به عنوان تقویت‌کننده‌های فاز میکرو بر اساس آرایه داده شده، به کمک روش تاگوچی مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱- بررسی نتایج آزمون کشش

نتیجه‌ای که خروجی دستگاه است، محاسبه مقدار نیروی وارده بر نمونه به جایابی دو فک است. در گام بعد می‌توان از رابطه فوق نیرو را به تنش و جایابی را به کرنش تبدیل کرد. آنچه به طور معمول در علوم مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرد، منحنی تنش در برابر کرنش است.



شکل ۲- نمونه در حال انجام آزمایش کشش در دستگاه یونیورسال



شکل ۱- نمونه لایه چینی یک لمینیت ۱۶ لایه متقارن معکوس

### ۲-۲-۱- مرحله پخت نمونه‌ها

بعد از انجام مراحل فوق و ساخت نمونه اولیه نوبت به پخت آنها می‌رسد. برای این منظور، نمونه‌ها را درون آون قرار می‌دهیم و در بازه زمانی هشت ساعت و ۴ دمای مختلف نمونه‌ها پخته می‌شوند. دماها عبارتند از: ۱۰۰ درجه - ۱۵۰ درجه - ۲۰۰ درجه و ۴۰۰ درجه سانتیگراد. دو ساعت ابتدایی با دمای ۱۰۰ درجه و ۲ ساعت دوم با دمای ۱۵۰ درجه، ۲ ساعت بعدی با دمای ۲۰۰ درجه و دو ساعت آخر هم با دمای ۴۰۰ درجه عمل پخت انجام می‌گیرد.

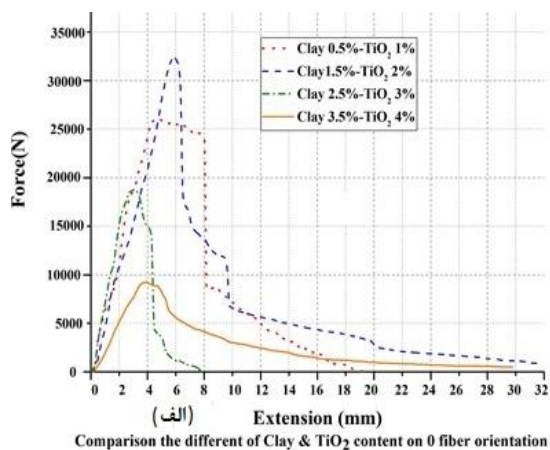
### ۲-۳-۲- آزمون‌ها

#### ۲-۳-۲-۱- آزمایش کشش

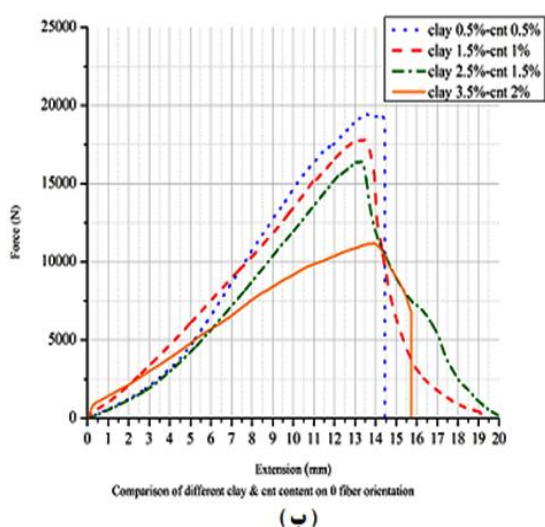
نمونه‌های ساخته شده مورد آزمون کشش مطابق استاندارد ASTM D3039 قرار گرفتند؛ در این آزمون ابتدا نمونه‌های دو فازی (الیاف کربن و اپوکسی)، سپس نمونه‌های سه فازی (اپوکسی، الیاف کربن، نانو خاک رس / نانو دی اکسید تیتانیوم / نانو لوله کربنی) و پس از آن نمونه‌های چهار فازی (اپوکسی، الیاف کربنی، نانو خاک رس، نانو دی اکسید تیتانیوم / نانو لوله کربنی) تحت آزمایش قرار گرفتند و نتایج آنها با هم مقایسه گردیدند. برای انجام آزمون کشش از

با توجه به شکل ۵، بیشترین تاثیر اختلاط نانو ذرات برای نانو رس ۰/۵ درصد و نانو تیتانیوم ۲ درصد و برای نانو لوله کربنی ۱ درصد است.

همچنین برای مشخص شدن اثر هم افزایی نانوذرات دی اکسید تیتانیوم و خاک رس، از کانتور پلات شکل ۶ استفاده شده است. با توجه به شکل می توان دریافت بهترین بازه طراحی برای تیتانیوم در بازه ۱/۶ تا ۲/۴ درصد وزنی و برای خاک رس بین ۰/۵ تا ۰/۸ است؛ در نتیجه با افزودن مقادیر مربوطه از نانوذرات می توان به اثر هم افزایی در ترکیب مورد نظر دست یافت.



شکل ۳- آزمون خمش سه نقطه‌ای



شکل ۴- نمودار نیرو-جابجایی آزمون کشش سیستم چهار تایی الف) ترکیب دی اکسید تیتانیوم و ب) ترکیب نانو لوله کربنی

### ۳-۱-۱- نمودار آزمون کشش برای سطوح چهارگانه اول

در شکل ۴-الف و شکل ۴-ب چهار سطح صفر درجه با درصد های مختلف وزنی برای دو گروه ترکیبی نشان داده شده است.

همانطور که در شکل ۴ نشان داده شد، بیشترین تأثیر نانو ذرات مربوط به سطح یک و درصد وزنی برای نانو رس ۰/۵ درصد و نانو دی اکسید تیتانیوم ۱ درصد و نانو لوله کربنی ۰/۵ درصد بوده است.

### ۳-۱-۲- نمودار آزمون کشش برای سطوح چهارگانه دوم

در شکل ۵ چهار سطح ۳۰ درجه با درصد های مختلف وزنی برای دو گروه ترکیبی نشان داده شده است .



برای بررسی تاثیر استفاده همزمان از نانو ذرات لوله‌های کربنی و خاک رس نیز، از نمودار شکل ۷ استفاده شده است. در این شکل دو ناحیه که اثر هم افزایی رخ داده است، به خوبی مشهود است. با توجه به شکل می‌توان دریافت، بهترین بازه طراحی برای CNT در بازه ۰/۵ تا ۱/۵ در صد وزنی و برای خاک رس بین ۰/۵ تا ۱/۲ است.

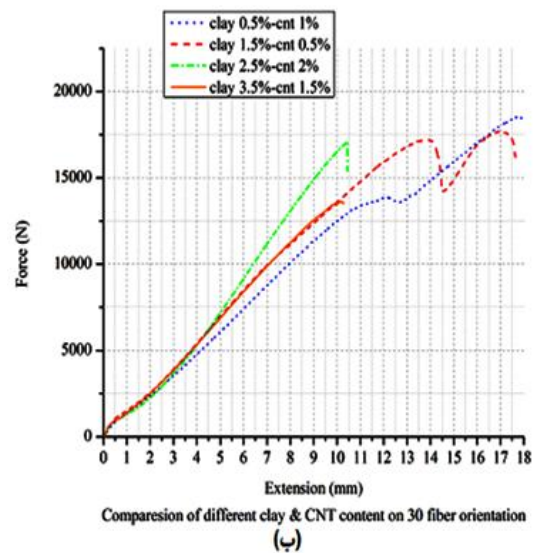
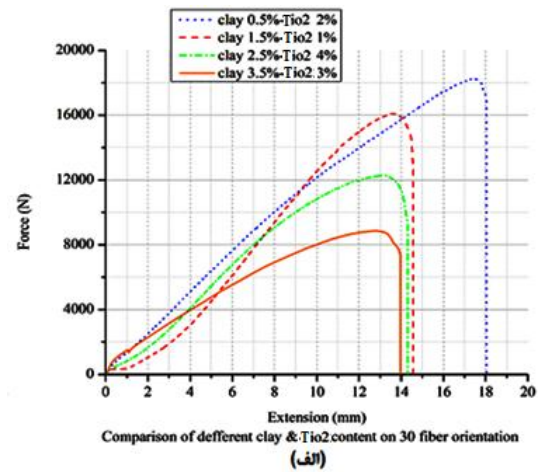
### ۳-۱-۳- نمودار آزمون کشش برای سطوح چهارگانه

سوم

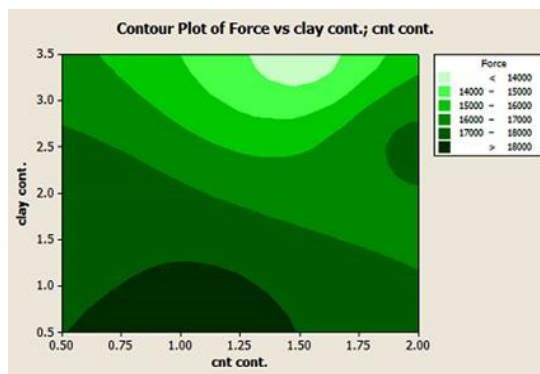
در شکل ۸ چهار سطح ۶۰ درجه برای گروه‌های ترکیبی چهارتایی، مورد مقایسه قرار گرفت.

در شکل ۸ بیشترین تاثیر نانو ذرات مربوط به سطح نه و درصد وزنی برای نانو رس ۰/۵ درصد و نانو دی اکسید تیتانیوم ۳ درصد و برای نانو لوله کربنی ۱/۵ درصد است. در شکل ۹ و ۱۰ نمودارهای تاثیر نانو ذرات و همچنین نمودار کانتور پلات به جهت نشان دادن بهتر نتیجه قرار داده شده است و مشخص شده که تاثیر درصد نانو ذرات به چه ترتیب است.

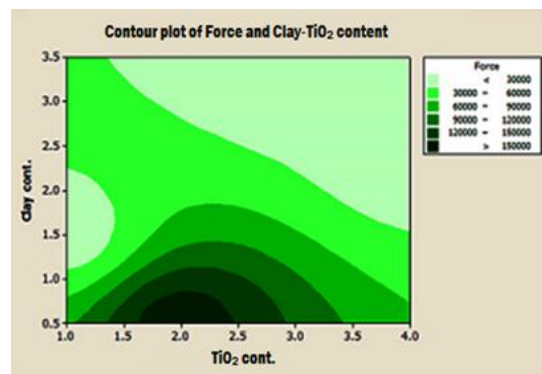
همانطوری که در شکل ۹ مشاهده می‌شود، میزان تاثیر نانو رس با میزان ۰/۵ درصد وزنی در سطح صفر درجه دارای بهترین وضعیت بوده، نانو دی اکسید تیتانیوم با ۳ درصد وزنی دارای بالاترین میزان مقاومت در سطح شش بوده است که تصویر کانتورپلات نیز، این مساله را تائید می نماید، همچنین با توجه به شکل ۱۰ نیز، نانو رس با ۰/۵ درصد وزنی و نانو لوله کربنی با ۱/۵ درصد وزنی، دارای بیشترین مقاومت کششی در سطح نه است.



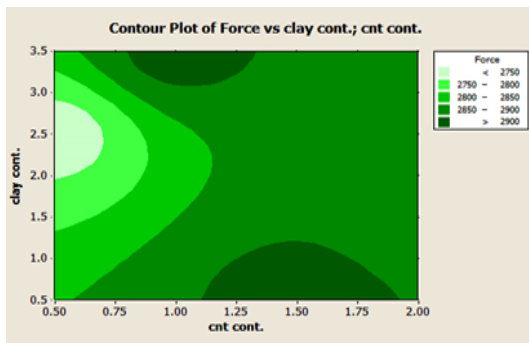
شکل ۵- نمودار نیرو-جابجایی آزمون کشش سیستم چهارتایی (الف) ترکیب تیتانیوم و (ب) ترکیب نانو لوله کربنی



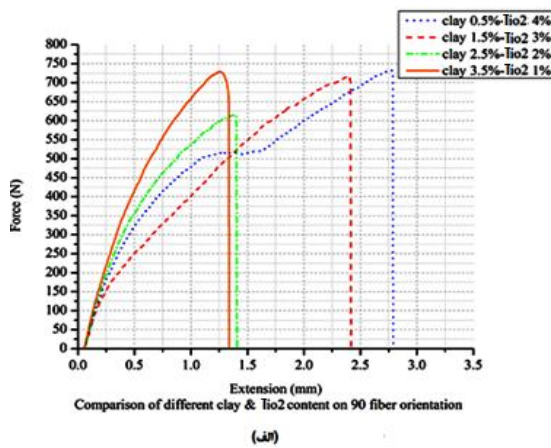
شکل ۷- کانتور پلات ۲ بعدی خاک رس و CNT (لمینیت ۳۰°)



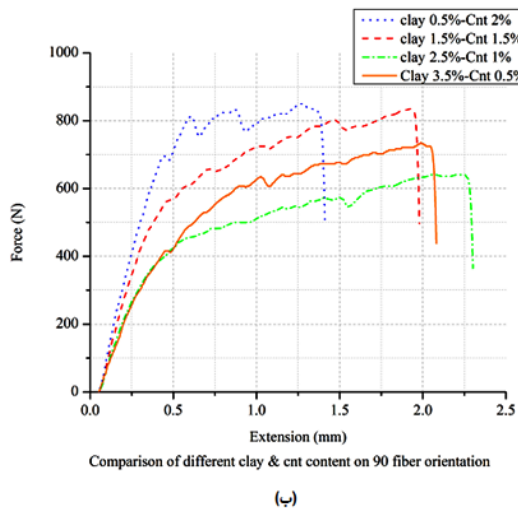
شکل ۶- کانتور پلات ۲ بعدی خاک رس و دی اکسید تیتانیوم (لمینیت ۳۰°)



شکل ۱۰- کانتورپلات خاک رس و نانولوله کربنی (لمینیت ۶۰°)



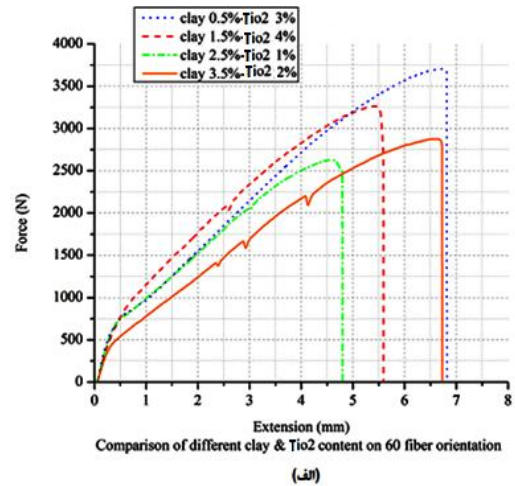
(الف)



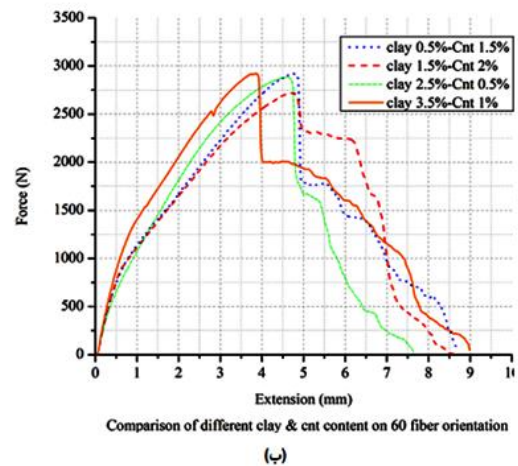
(ب)

شکل ۱۱- نمودار نیرو-جابجایی آزمون کشش سیستم چهارتایی الف) ترکیب تیتانیوم و ب) ترکیب نانولوله کربنی

۳-۱-۴- نمودار آزمون کشش برای چهار سطح پایانی در شکل‌های ۱۱-الف و ب سطح‌های ۹۰ درجه با درصد‌های وزنی متفاوت برای دو گروه ترکیبی نشان داده شده است.

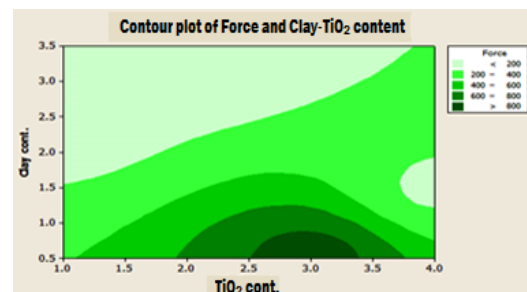


(الف)



(ب)

شکل ۸- نمودار نیرو-جابجایی آزمون کشش سیستم چهارتایی الف) ترکیب تیتانیوم و ب) ترکیب نانولوله کربنی



شکل ۹- کانتور پلات ۲ بعدی خاک رس و تیتانیوم (لمینیت ۶۰°)



درصد تاثیر هر یک از متغیرها بدین ترتیب است که الیاف ۴۰/۳٪، نانو لوله کربنی ۱/۸۶٪ و نانو خاک رس ۰/۶۴٪ است. مقدار R-Sq که برابر ۹۵/۵٪ است، نشان از میزان نزدیکی نتیجه پیش بینی شده با نتیجه آزمایشگاهی دارد.

### ۳-۱-۵-۲- آنالیز واریانس نمونه‌های حاوی TiO<sub>2</sub>

در جدول ۴ بیشترین تاثیر باز هم مربوط به زاویه الیاف بوده، بعد از آن درصد نانو دی اکسید تیتانیوم و نانو رس در انتها جای گرفت. درصد تاثیر هر یک از متغیرها بدین ترتیب است که الیاف ۳۹/۷٪، نانو لوله کربنی ۱/۴۸٪ و نانو خاک رس ۱/۱۰٪ است. مقدار R-Sq که برابر ۹۱/۰٪ است، نشان از میزان نزدیکی نتیجه پیش بینی شده با نتیجه آزمایشگاهی دارد.

در شکل ۱۲ نمودار احتمال پراکندگی مربوط به دو نانو ذره دی اکسید تیتانیوم و لوله کربنی نشان داده شده است که میزان نزدیکی نقاط به خط مرجع، حاکی از معتبر بودن نتایج است.

در نمودار نشان داده شده برای هر دو گروه، بازهم بهترین درصد وزنی برای نانو رس ۰/۵ درصد و برای تیتانیوم ۴ درصد و مقدار نانو لوله کربنی ۲ درصد بوده است.

### ۳-۱-۵- آنالیز واریانس کشش

#### ۳-۱-۵-۱- آنالیز واریانس نمونه های حاوی نانو لوله کربنی

جدول ۳ نتایج آنالیز واریانس آزمون کشش نمونه‌های حاوی نانولوله کربنی را نشان می‌دهد. با توجه به نتایج بدست آمده از آزمایش‌ها، تفسیر جدول ۵ بدین گونه خواهد بود که اگر مقدار P-Value از ۰/۰۵ کمتر باشد، میزان تاثیر آن متغیر بسیار بالاست و اگر از ۰/۰۵ بیشتر باشد، میزان تاثیر کمتر بوده، اما برای اعداد خارج از این محدوده به نسبت فاصله مقداریشان از ۰/۰۵ میزان موثر بودن را نشان خواهد داد. با توجه به جدول ۳، زاویه الیاف بیشترین تاثیر را روی مقاومت کششی لمینیت خواهد داشت و بعد از آن نیز به ترتیب، بیشترین تأثیرات متعلق به نانو لوله کربنیو نانو رس است.

جدول ۳- آنالیز واریانس آزمون کشش

Source	D <sup>۱</sup> f	Seq SS <sup>۲</sup>	Adj SS	Adj MS	F	P <sup>۳</sup> Value
CF	3	234.17	234.17	78.042	40.30	0.000
Clay Contet	3	3.709	3.709	1.236	0.64	0.617
CNT Contet	3	10.824	10.824	3.608	1.86	0.237
Residual Error	6	11.618	11.618	1.936		
Total	15	260.8				

R-Sq = 95.5%

جدول ۴- آنالیز واریانس آزمون کشش

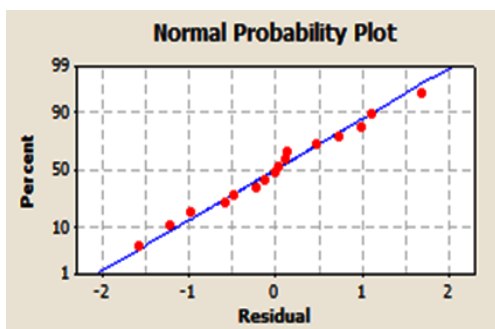
Source	Df	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	PValue
Degree	3	224.089	219.089	72.6	39.7	0.031
Clay Content	3	2.847	2.847	1.083	1.10	0.421
TiO2Contet	3	9.551	9.551	4.295	1.48	0.31
Residual Error	6	11.031	11.031	2.701		
Total	15	247.518				

R-Sq=91.0%

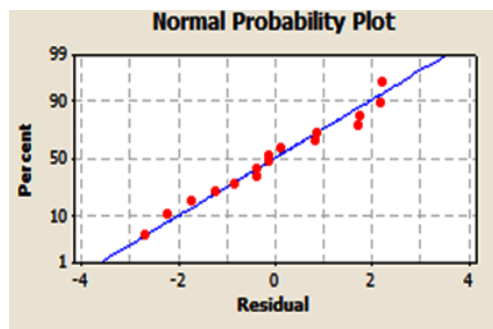
<sup>1</sup> Degree of Freeness

<sup>2</sup> Sum of Squares

<sup>3</sup> Probability



(ب)



(الف)

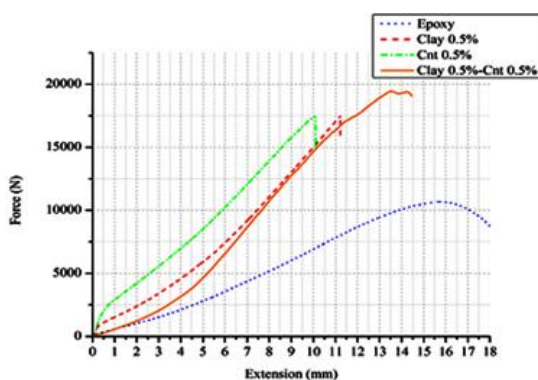
شکل ۱۲- نمودار احتمال پراکندگی (الف) لمینیت دی اکسید تیتانیوم و (ب) لمینیت لوله کربنی

الیاف صفر درجه ، نانو رس ۰/۵ درصد وزنی، نانو دی اکسید تیتانیوم ۱ درصد و نانو کربن ۰/۵ درصد وزنی.

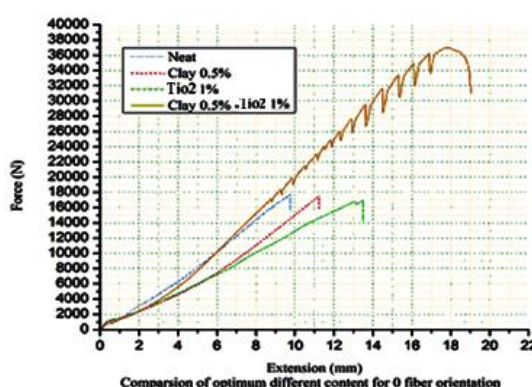
### ۳-۲-۲- نمودار آزمون خمش برای چهار سطح دوم

سطوح دوم دارای زاویه ۳۰ درجه به صورت ارتوتروپ می‌باشند که نتیجه آزمایش آنها برای هر دو گروه از نمونه‌ها در شکل ۱۵ نشان داده شده است.

در این نمودار نتایج کمی متفاوت از سایر نمودارها بوده است، یعنی تاثیر نانو دی اکسید تیتانیوم در دو سطح پنج و شش بسیار به هم نزدیک بوده است، ولی مقدار پنج، نتیجه مقاوم‌تری را نشان داد؛ یعنی با ۰/۵ درصد نانو رس و ۲ درصد نانو دی اکسید تیتانیوم و برای لمینیت‌های نانو لوله کربنی در سطح شش نتیجه بهتری داشتیم.



(ب)



(الف)

شکل ۱۳- نمودار نیرو-جابجایی آزمون کشش مقایسه مدل بهینه با بهترین نتایج بدست آمده

(الف) ترکیب TiO<sub>2</sub> و (ب) ترکیب CNT

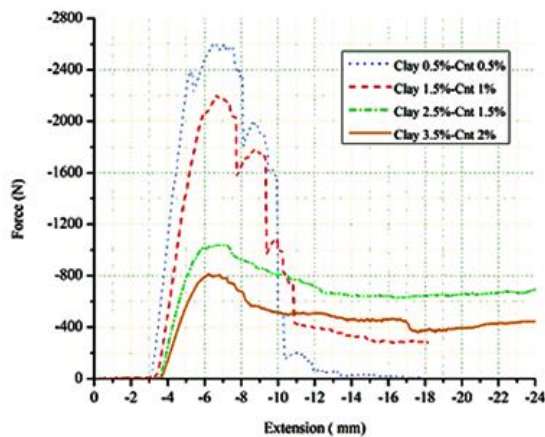
### ۳-۱-۶- بهینه‌سازی و مقایسه سطح‌ها

پس از بهینه‌سازی با استفاده از تاگوچی، بهترین نتیجه بدست آمده را با نتایج بهینه که مطابق با نتایج حاصله بودند مقایسه نمودیم؛ یعنی در ابتدا ترکیب الیاف کربن با اپوکسی ، سپس الیاف کربن / اپوکسی / نانو رس، پس از آن الیاف کربن / اپوکسی / نانو دی اکسید تیتانیوم الیاف کربن / اپوکسی / نانو لوله کربنی با بهترین نتیجه مقایسه شد. شکل ۱۳، نشان دهنده آن است.

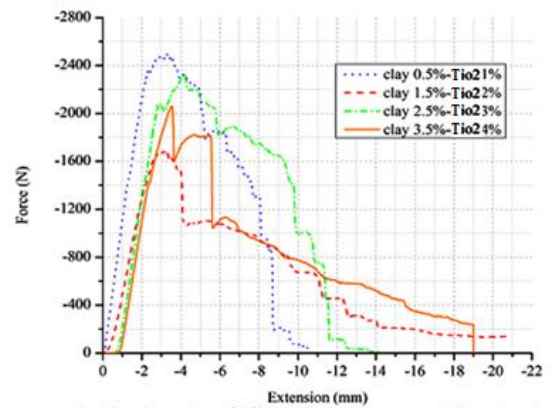
### ۳-۲-۲- بررسی نتایج آزمون خمش

#### ۳-۲-۱- نمودار آزمون خمش برای چهار سطح اول

همانگونه که در شکل نشان داده شده است، بهترین نتیجه مربوط به سطح یک برای هر دو ترکیب است؛ یعنی با زاویه

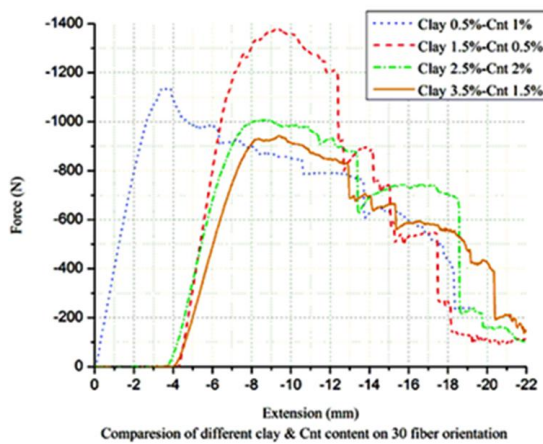


(ب)

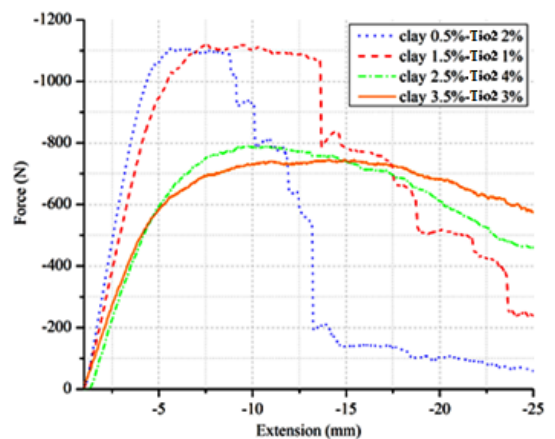


(الف)

شکل ۱۴- نمودار نیرو-جابجایی آزمون خمش سه نقطه‌ای الف) ترکیب دی اکسید تیتانیوم و ب) ترکیب نانو لوله کربنی



(ب)



(الف)

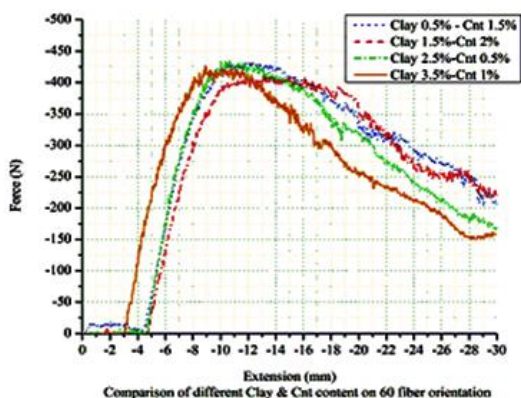
شکل ۱۵- نمودار نیرو-جابجایی آزمایش خمش سه نقطه‌ای الف) ترکیب دی اکسید تیتانیوم و ب) ترکیب نانو لوله کربنی

۳-۲-۳- مقایسه سطوح با در نظر گرفتن نانو رس با ۰/۵ درصد وزنی

همانند آزمون کشش، در این مرحله نیز نانو رس را ثابت در نظر گرفته، سایر فاکتورهای متغیر را با هم مورد بررسی قرار دادیم. در شکل ۱۸ این نمودار به تصویر کشیده شده است و همانند آزمون کشش، مقاوم‌ترین زاویه در میان سایر زوایا زاویه صفر درجه، بهترین درصد وزنی برای نانو رس ۰/۵، برای نانو لوله کربنی ۰/۵ و برای دی اکسید تیتانیوم ۱ است.

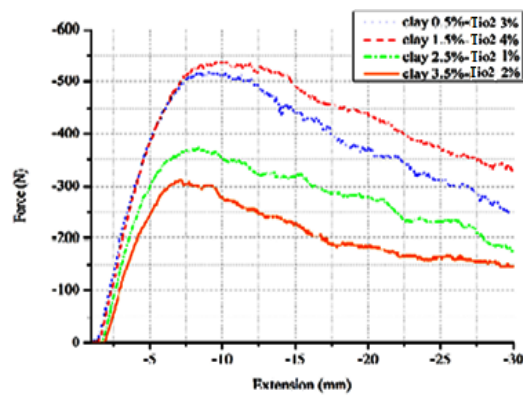
۳-۲-۳- نمودار آزمون خمش برای چهار سطح سوم در شکل ۱۶ مقادیر نیرو برای زاویه ۶۰ درجه مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۴- نمودار آزمون خمش برای چهار سطح چهارم سطح چهارم دارای زاویه ۹۰ درجه است که دارای ضعیف‌ترین میزان مقاومت در بین سایر سطوح است. در شکل ۱۷، نمودارهای لازم داده شده است.



Comparison of different Clay & Cnt content on 60 fiber orientation

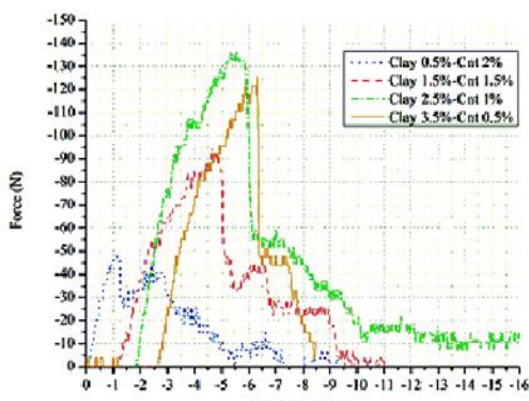
(ب)



Bending-Comparison of different clay & TiO2 content on 60 fiber orientation

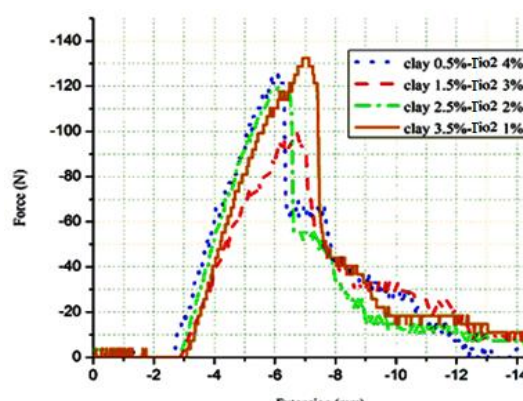
(الف)

شکل ۱۶- نمودار نیرو-جابجایی آزمون خمش سه نقطه‌ای (الف) ترکیب تیتانیوم و (ب) ترکیب نانو لوله کربنی



Comparison of different Clay & Cnt content on 90 fiber orientation.

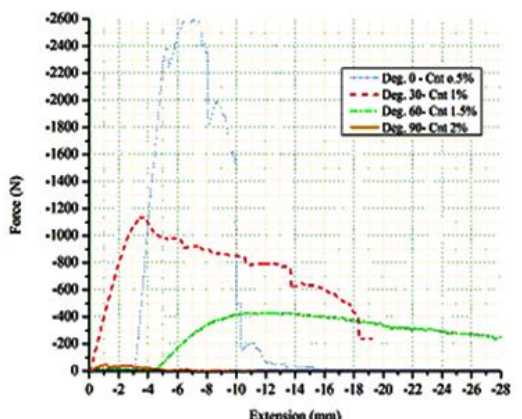
(ب)



Bending - Comparison of different clay & TiO2 content on 90 fiber orientation

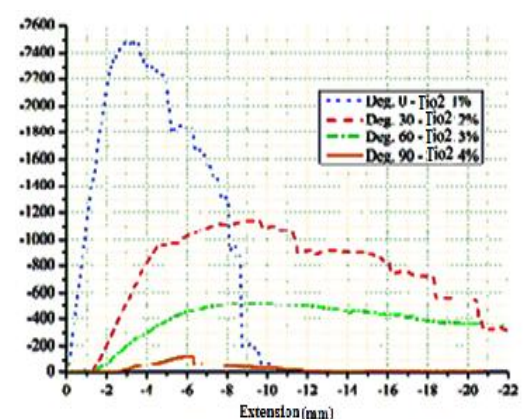
(الف)

شکل ۱۷- نمودار نیرو-جابجایی آزمون خمش سه نقطه‌ای (الف) ترکیب تیتانیوم و (ب) ترکیب نانو لوله کربنی



Comparison by 0.5% Clay content for different fiber orientations and cnt contents

(ب)



Comparison by 0.5% clay content for different orientation and TiO2 Cnontents

(الف)

شکل ۱۸- نمودار نیرو-جابجایی آزمون خمش سه نقطه‌ای (الف) ترکیب دی اکسید تیتانیوم و (ب) ترکیب نانو لوله کربنی



۳-۲-۶- آنالیز واریانس خمش

۳-۲-۶-۱- آنالیز واریانس نانو لوله کربنی

در جدول ۶، آنالیز واریانس مربوط به آزمون خمش برای ۱۶ سطح برای نانولوله‌های کربنی نشان داده شده است. همانگونه که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، بیشترین تاثیر در خمش مربوط به زاویه الیاف بوده، اما تاثیر نانو رس بالاتر از نانو لوله کربنی گردیده است (در مقایسه با کشش). درصد تاثیر هر یک از متغیرها بدین ترتیب است که زاویه الیاف ۶۵/۰۸٪، نانو لوله رس ۳/۷۲٪ و نانو دی اکسید تیتانیوم ۲/۴۵٪ است. مقدار R-Sq که برابر ۹۷/۳٪ است، نشان از دقیق بودن نتیجه پیش بینی شده با نتیجه آزمایشگاهی دارد.

۳-۲-۶-۲- آنالیز واریانس نانو  $TiO_2$

در جدول ۷ آنالیز سطح مربوط به نانو دی اکسید تیتانیوم نشان داده شده است. همانگونه که در جدول فوق مشاهده می‌شود، بیشترین تاثیر باز هم مربوط به زاویه الیاف بوده، اما در خمش تاثیر نانو رس بالاتر از نانو لوله کربنی گردیده است. درصد تاثیر هر یک از متغیرها بدین ترتیب است که زاویه الیاف ۶۳/۴۸٪، نانو لوله رس ۰/۹٪ و نانو دی اکسید تیتانیوم ۰/۷۲٪ است. مقدار R-Sq که برابر ۹۷/۰٪ است، نشان از میزان نزدیکی نتیجه پیش بینی شده با نتیجه آزمایشگاهی دارد. در شکل ۱۹، نمودار احتمال پراکندگی مربوط به نمونه‌های ساخته شده مربوط به آزمون خمش است که میزان پراکندگی در اینلمینیت‌ها نیز در حداقل ممکن خود قرار دارد.

جدول ۶- آنالیز واریانس مربوط به خمش (CNT)

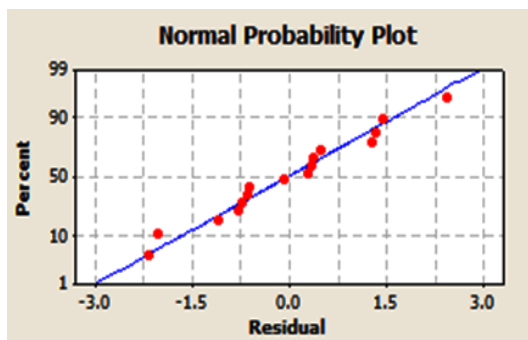
Source	Df	Seq SS	Adj SS	Adj MS	PValue
Degree	3	778.12	778.12	259.374	0.000
Clay Content	3	29.31	29.31	9.77	0.161
CNT Contet	3	44.53	44.53	14.843	0.08
Residual Error	6	23.91	23.91	3.986	
Total	15	1010.31			

R-Sq=97.3%

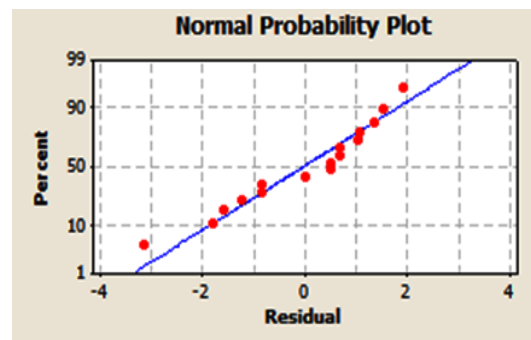
جدول ۷- آنالیز واریانس مربوط به خمش (دی اکسید تیتانیوم)

Source	Df	Seq SS	Adj SS	Adj MS	PValue
Degree	3	955.78	955.78	318.593	0.000
Clay Contet	3	13.61	13.61	4.538	0.492
TiO <sub>2</sub> Contet	3	10.61	10.61	3.602	0.577
Residual Error	6	10.81	10.81	5.019	
Total	15	1010.31			

R-Sq=97.0%



(ب)



(الف)

شکل ۱۹- نمودار احتمال پراکندگی (الف) نانو دی اکسید تیتانیوم و (ب) نانو لوله کربنی



#### ۴- نتیجه گیری

شایان ذکر است که نانو ذرات به تنهایی عاملی برای افزایش مقاومت مکانیکی کامپوزیت‌ها نمی‌باشند، بلکه می‌توانند تنش‌های وارده بر آن را تا حدودی پراکنده کنند و از اعمال تنش به یک نقطه جلوگیری کنند و البته این حالت برای درصد‌های وزنی خاصی از نانو ذرات اتفاق می‌افتد؛ یعنی اگر مقدار آن خیلی کم یا خیلی زیاد باشد، ممکن است حتی تاثیر منفی داشته باشد. در ادامه به بررسی نقش نانو ذرات استفاده شده در این پژوهش می‌پردازیم.

#### ۴-۱- تاثیر نانولوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی دارای خواص استحکامی بسیار بالا می‌باشند، از جمله مدول یانگ بسیار بالا و استحکام کششی خوب و از طرف دیگر به خاطر کربنی بودنشان دارای وزن بسیار کم و پایداری بالا هستند. این نانو ذره به خاطر ساختار شیمیایی ویژه می‌تواند با اضافه شدن به پلیمرها پیوندهای محکمی از جنس واندروالسی با آنها برقرار کند. اضافه کردن مقدار کمی از این نانو ذره، تاثیر بسیار زیادی در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها دارد. نانولوله استفاده شده در این مقاله، از نوع چند جهته است. این گونه از نانو لوله‌های کربنی از چندین لایه‌های استوانه ای متحدالمرکز تشکیل شده‌اند. هنگامی که این نانو ذرات به ترکیب کامپوزیت اضافه می‌شوند، کربن با انتشار جمعی در ماتریس و حول الیاف، زنجیره‌ای محکم در فصل مشترک الیاف/ماتریس تشکیل می‌دهد. این زنجیره‌ها وظیفه توزیع فشار و پخش تنش‌های ناشی از نیروی فشاری در میان الیاف را دارند. این عمل باعث توزیع بهتر فشار و در نتیجه بالا بردن آستانه تحمل کامپوزیت می‌شود. البته این روند فقط برای مقادیر و درصد وزنی خاصی از گرافن صورت می‌گیرد که در این تحقیق، حداکثر تا یک درصد وزنی این حالت اتفاق افتاد و در اکثر مواقع نیز اینگونه است. در مقدار وزنی یک درصد، ماتریس اپوکسی به حد اشباع خود می‌رسد و بعد از آن شکل خوشه‌ای اتم را به خود می‌گیرد. این حالت خوشه‌ای شدن اتم‌های ماتریس می‌تواند عامل کاهش مقاومت مکانیکی کامپوزیت بشود. تصویر میکروسکوپ الکترونی ۲۰، نحوه قرارگیری نانولوله‌های کربنی در اپوکسی را نشان می‌دهد.

#### ۴-۲- تاثیر نانو $TiO_2$

اضافه کردن نانو دی اکسید تیتانیوم به ماتریس اپوکسی، باعث بهبود مقاومت خمشی و تا حدی کشش می‌شود. نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم هنگامی که با پلیمر مخلوط می‌شود، به خاطر اینکه به صورت پودر می‌باشند، به عنوان یک پرکننده عمل کرده، باعث ایجاد سطحی صاف‌تر می‌شوند و در نتیجه مقاومت خمشی را تا حدودی افزایش می‌دهد. حضور دی اکسید تیتانیوم در مقادیر وزنی بیشتر از ۱ درصد در ماتریس پلیمر به علت ساختار کریستالی اش باعث ایجاد ناهم‌انگهی و ناهم‌واری در سطح و بستر ماتریس می‌شود و از محصور شدن زنجیره مولکولی ماتریس اپوکسی جلوگیری می‌کند. این خاصیت باعث می‌شود تا زنجیره ماتریس انعطاف پذیری کمتری پیدا کند و در نتیجه باعث کاهش چقرمگی کامپوزیت بشود.

#### ۴-۳- تاثیر نانو ذرات خاک رُس

نانو ذرت خاک رس بعد از ترکیب با ماتریس پلیمر، در امتداد ماتریس توزیع و پخش می‌شوند؛ در نتیجه، ذرات نانو خاک رس توسط زنجیره پلیمر گیر انداخته می‌شوند و قفل می‌گردند. در واقع نانو ذرات خاک رس، باعث استحکام فصل مشترک ماتریس/الیاف کربن می‌شوند. این خاصیت باعث می‌شود تا حدی ماده مرکب پلیمری خاصیت تردی و در عین حال استحکام بیشتری پیدا کند. در شکل ۲۱، این زنجیره نمایش داده شده است.

#### ۴-۴- تاثیر زاویه الیاف کربن بر میزان مقاومت

##### مکانیکی کامپوزیت

در تمام نمونه‌ها حالتی که دارای زاویه الیاف صفر درجه بود، نتایج بهینه حاصل شد. این رفتار را می‌توان اینگونه تفسیر کرد که چون جهت اعمال نیروی کششی در این حالت با جهت الیاف یکسان و همسو است؛ در نتیجه مدول یانگ متاثر از الیاف است و پارامترهای دیگر تاثیر ناچیزی دارند. در حالتی که جهت اعمال نیرو و الیاف یکسان باشد، نیروها در تمام الیاف‌ها تقسیم شده و لمینیت می‌تواند نیروی بیشتری را تحمل کند. در حالت بارگذاری خمشی چون جهت‌گیری الیاف صفر درجه با راستای بروز کرنش محوری یکسان است؛ در نتیجه مقاومت خوبی از خود نشان می‌دهد.

سازه ایجاد می‌شود و مقاومت لمینیت در برابر نیروی خمشی بسیار کم می‌شود.

در حالت کلی بهترین میزان درصد وزنی برای هر نانو ذره به ترتیب، نانو خاک رس ۵/۰٪، نانو لوله کربنی ۵/۰٪ و نانو دی اکسید تیتانیوم ۱ درصد بوده است؛ اما میزان تاثیر نانو ذرات در آزمایش‌ها متفاوت بود، در آزمون کشش میزان تاثیر نانو خاک رس طبق تحلیل آنالیز واریانس نسبت به دو نانو ذره دیگر، تاثیر کمتری را داشته است.

در آزمون خمش نیز نانو رس دارای تاثیر گذاری بیشتری نسبت به نانو لوله کربنی و نانو دی اکسید تیتانیوم بوده است.

### ۵- مراجع

[۱] احمدی ومکانی س، نصرتی ه، طهرانی دهکردی م (۱۳۹۴) تاثیر میزان خمش بر افت استحکام در کامپوزیت های خالص و هیبرید تقویت شده با الیاف ترد و انعطاف پذیر. *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شماره‌ها* ۱۸-۱۱: ۶(۱).

[2] Azadi R, Rostamiyan Y (2015) Experimental and analytical study of buckling strength of new quaternary hybrid nanocomposite using Taguchi method for optimization. *Constr Build Mater* 88: 212-224.

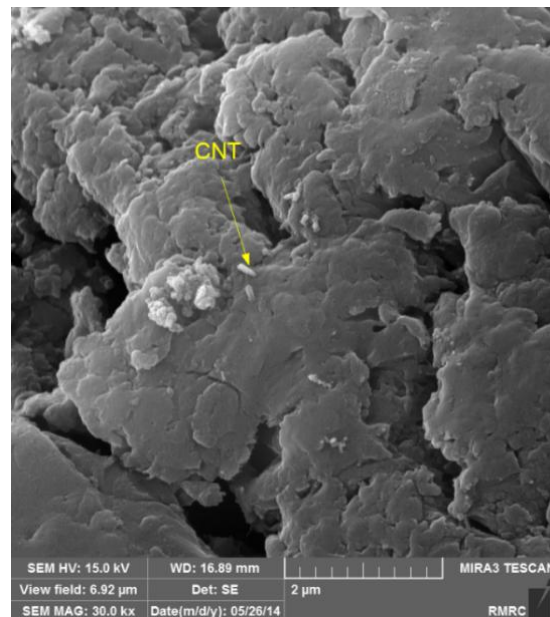
[3] Rostamiyan Y, Fereidoon AB, Hamed Mashhadzadeh A, Khalili MA (2013) Augmenting epoxy toughness by combination of both thermoplastic and nanolayered materials and using artificial intelligence techniques for modeling and optimization. *J Polym Res* 20 (6): 1-11.

[4] Liao Y-H M-TO, Liang Z, Zhang C, Wang B (2004) Investigation of the dispersion process of SWNTs/SC-15 epoxy resin nanocomposites. *Mater Sci Eng A* 175-181

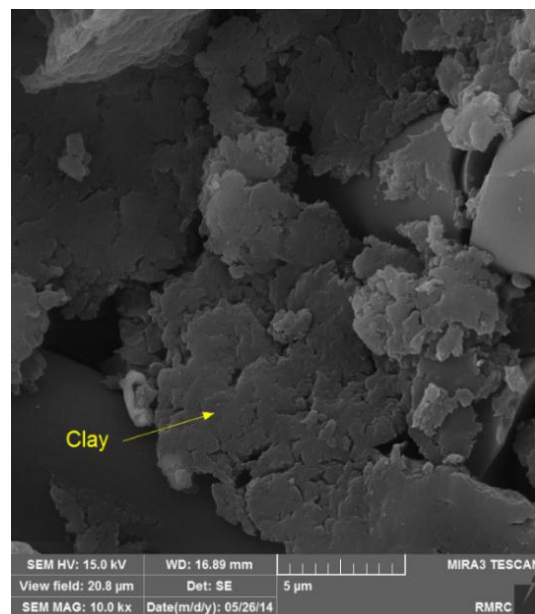
[5] Montazeri AKA, Javadpour J, Tcharkhtchi A (2010) Viscoelastic properties of multi-walled carbon nanotube/epoxy composites using two different curing cycles. *Mater Des* 31(7): 3383-3388

[6] Allaoui ABS, Cheng HM, Bai JB (2002) Mechanical and electrical properties of a MWNT/epoxy composite. *Compos Sci Technol* 62(15): 1993-1998

[7] Gojny FH, Wichmann MHG, Fiedler B, Bauhofer W, Schulte K (2005) Influence of nano-modification on the mechanical and electrical properties of conventional fibre-reinforced composites. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 36 (11): 1525-1535.



شکل ۲۰- عکس SEM از CNT



شکل ۲۱- عکس SEM از نانو ذرات خاک رس

در نمونه لمینیت‌های دارای زاویه الیاف ۹۰ درجه، همواره بدترین نتایج بدست آمده است. این رفتار می‌تواند بدلیل این امر باشد که در این وضعیت جهت اعمال نیرو بر راستای الیاف کاملاً عمود است؛ در نتیجه بیشترین تنش در

- microcracking of carbon fiber/epoxy composites. *Compos Sci Technol* 62(9): 1249-1258
- [14] Uda N, Ono K, Kunoo K (2009) Compression fatigue failure of CFRP laminates with impact damage. *Compos Sci Technol* 69(14): 2308-2314.
- [15] Gómez-delRío T, Rodríguez J, Pearson RA (2014) Compressive properties of nanoparticle modified epoxy resin at different strain rates. *Compos Part B: Eng* 57(0):173-179.
- [16] Sultan JN MF (1973) Effect of rubber particle size on deformation mechanisms in glassy epoxy. *Polym Eng Sci* 13(1): 29-34
- [17] Tanyildizi H, Şahin M (2015) Application of Taguchi method for optimization of concrete strengthened with polymer after high temperature. *Constr Build Mater* 79(0): 97-103.
- [18] Gu F, Hall P, Miles NJ, Ding Q, Wu T (2014) Improvement of mechanical properties of recycled plastic blends via optimizing processing parameters using the Taguchi method and principal component analysis. *Mater Des* 62:189-198.
- [20] Mirmohseni A, Zavareh S (2011) Modeling and optimization of a new impact-toughened epoxy nanocomposite using response surface methodology. *J Polym Res* 18 (4): 509-517.
- [8] Zhou Y PF, Rangari VK, Jeelani S (2006) Fabrication and evaluation of carbon nano fiber filled carbon/epoxy composite. *Mater Sci Eng A* 426(1-2): 221-228
- [9] Iwahori Y IS, Sumizawa T, Ishikawa T (2005) Mechanical properties improvements in two-phase and three-phase composites using carbon nano-fiber dispersed resin. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 36 (10):1430-1439
- [10] Shahid NVR, Barron AR (2005) Chemically functionalized alumina nanoparticle effect on carbon fiber/epoxy composites. *Compos Sci Technol* 65 (14):2250-2258
- [11] Dean DOA, Richmond S, Nyairo E (2006) Multiscale fiber-reinforced nanocomposites: Synthesis, processing and properties. *Compos Sci Technol* 66 (13): 2135-2142.
- [12] Siddiqui NAWR, Kim J-K, Leung CCK, Munir A (2007) Mode I interlaminar fracture behavior and mechanical properties of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix. *Compos Part A Appl Sci Manuf* 38 (2): 449-460.
- [13] Timmerman JF HB, Seferis JC. (2002) Nanoclay reinforcement effects on the cryogenic