

فرآیندهای نوین در مهندسی مواد

ma.iaumajlesi.ac.ir

بررسی رفتار مکانیکی نانوکامپوزیت پلی کاپرولاکتون - فلئوئورآپاتیت در مهندسی بافت استخوان با استفاده از

تئوری های میکرومکانیکی

مقاله پژوهشی

مجتبی مؤمنی^۱، کامران امینی^{۱*}، علی حیدری^{۱*}، محمد خدائی^۲

۱- گروه مهندسی مکانیک، واحد خمینی شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، خمینی شهر، ایران.

۲- گروه مهندسی مواد، دانشکده فنی گلیپایگان، گلیپایگان، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران.

* ali_heidari@iau.ac.ir, kamini@iau.ac.ir

چکیده	اطلاعات مقاله
در سال های اخیر استفاده از نانو کامپوزیت های پلیمری-سرامیکی برای ترمیم بافت های آسیب دیده استخوانی افزایش یافته است. از آنجایی که به دست آوردن خواص مکانیکی این گونه داربست ها با استفاده از روش های آزمایشگاهی بسیار زمان بر و پرهزینه است، استفاده از روش های تحلیلی و عددی به عنوان روش کمکی پیشنهاد شده است. در این تحقیق خواص مکانیکی نانوکامپوزیت زمینه پلی-کاپرولاکتون پر شده با ذرات نانو - فلئوئورآپاتیت با روش تحلیلی مورد بررسی قرار گرفته است. نانوکامپوزیت پلی کاپرولاکتون با (۱۰، ۲۰، ۳۰ درصد وزنی) فلئوئورآپاتیت تولید شده و برای بررسی خواص مکانیکی تحت آزمون کشش قرار گرفتند. نتایج آزمون کشش نشان داد، مدول یانگ برای نمونه خالص ۲۱۵ مگاپاسکال و برای نمونه های کامپوزیتی (۱۰، ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی) به ترتیب ۵۴۰، ۶۰۰ و ۵۸۰ مگاپاسکال به دست آمد. در نتیجه با افزایش درصد نانو پودر فلئوئورآپاتیت، مدول یانگ نانوکامپوزیت ها نسبت به نمونه پلیمری خالص افزایش چشمگیری داشت. مقایسه روابط تئوری پیش بینی مدول الاستیک با نتایج تجربی نشان داد که تئوری های قانون مخلوط ها، موری - تاناکا، دیوی، راماکریشنان - آرونچالام اختلاف بسیار زیادی در مقایسه با نتایج تجربی داشتند اما مدل هالپین - سای با اختلاف ۱۳ درصدی نزدیک ترین نتایج را دارد.	دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۳ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹ کلید واژگان: نانو کامپوزیت خواص مکانیکی فلئوئورآپاتیت پلی کاپرولاکتون مدول یانگ

Investigating the Mechanical Behavior of Polycaprolactone-Fluoroapatite Nanocomposite in Bone Tissue Engineering Using Micromechanical Theories

Mojtaba Momeni¹, Kamran Amini^{1*}, Ali Heidari^{1*}, Mohammad Khodaei²

1. Department of Mechanical Engineering, Kho.C., Islamic Azad University, Khomeinishahr, Iran.

2. Materials Engineering Group, Golpayegan College of Engineering, Isfahan University of Technology, Golpayegan, Iran.

* kamini@iau.ac.ir, ali_heidari@iau.ac.ir

Article Information

Original Research Paper

Doi:

Keywords:

Nanocomposite

Mechanical properties

Fluoroapatite

Poly-caprolactone

Young's modulus

Abstract

In recent years, the use of polymer-ceramic nanocomposites to repair damaged bone tissues has increased. Since obtaining the mechanical properties of such scaffolds using laboratory methods is very time-consuming and expensive, the use of analytical and numerical methods is suggested as an auxiliary method. In this research, the mechanical properties of poly-caprolactone nanocomposite filled with nano-fluoroapatite particles have been investigated by analytical method. A tensile test was conducted on a poly-caprolactone nanocomposite containing fluoroapatite at (10, 20, and 30% wt) in order to examine its mechanical properties. The tensile test results revealed that the pure sample's Young's modulus was 215 MPa, while the composite samples (10, 20 and 30% wt) had respective values of 540, 600 and 580 MPa. As a result, by increasing the percentage of fluoroapatite nanopowder, the Young's modulus of nanocomposites significantly increased compared to the pure polymer sample. Comparison of the relations between the prediction theory of elastic modulus and the experimental results showed that the theories of Rule of Mixtures, Mori-Tanaka, Dewey, Ramakrishnan and Arunachalam had a very large difference compared to the experimental results, but the Halpin-Tsai model was the closest with a difference of 13%. It has the results.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Mojtaba Momeni, Kamran Amini, Ali Heidari, Mohammad Khodaei, Investigating the Mechanical Behavior of Polycaprolactone-Fluoroapatite Nanocomposite in Bone Tissue Engineering Using Micromechanical Theories, New Process in Material Engineering, 2025, 19(3), 77-87.

۱- مقدمه

در طول دو دهه گذشته، نانو کامپوزیت‌های پلیمری به سرعت مورد توجه قرار گرفتند و محققان را در سراسر جهان به خود جذب کردند. تحقیقات اخیر در حال انجام روی نانو کامپوزیت‌های پلیمری نشان می‌دهد که این دسته از مواد می‌توانند بهبود قابل توجهی در مقایسه با کامپوزیت‌های معمولی ایجاد کنند [۱].

نانو کامپوزیت‌ها نوعی از مواد کامپوزیتی هستند که در ساختار آنها فاز زمینه با ریزساختارهایی در ابعاد نانو تقویت شده است [۲]. نانو کامپوزیت‌ها از استحکام مکانیکی بالا و وزن نسبتاً کم برخوردار هستند و مقاومت حرارتی و الکتریکی بالایی دارند. امروزه این مواد به علت خواص بهینه‌ای که دارند، در صنایع مختلف از قبیل هوافضا، ساختمانی، بسته‌بندی، خودروسازی، پزشکی و غیره به طور چشمگیری مورد استفاده قرار می‌گیرند [۳]. بسته به نوع ماده زمینه و همچنین نانوذراتی که به عنوان تقویت کننده یا پرکننده به آن افزوده می‌شود، نانو کامپوزیت‌ها به انواع مختلف همچون نانو کامپوزیت‌های پایه پلیمری، نانو کامپوزیت‌های پایه سرامیکی و نانو کامپوزیت‌های پایه فلزی طبقه‌بندی می‌گردند. ماتریس پلیمری به خوبی نانوذرات تقویت کننده را در خود جای می‌دهد و می‌تواند نیروهای اعمال شده به کامپوزیت را به شکل یکنواخت بر روی تمام اجزا منتقل کند [۴].

اشکال و اندازه‌های مختلف نقایص استخوانی ناشی از تروما، تومور و عفونت‌ها باید با مواد مناسب برای ارتقای ترمیم استخوان استفاده شوند. رایج‌ترین جایگزین‌های استخوانی که در کلینیک استفاده می‌شود، اتوگرافت، آلوگرافت، پلیمرهایی مانند پلی کاپرولاکتون (PCL) و سرامیک‌هایی مانند فلوئورآپاتیت متراکم و متخلخل (FA)، سرامیک فسفات‌تری کلسیم و سرامیک بیوگلاس است [۵].

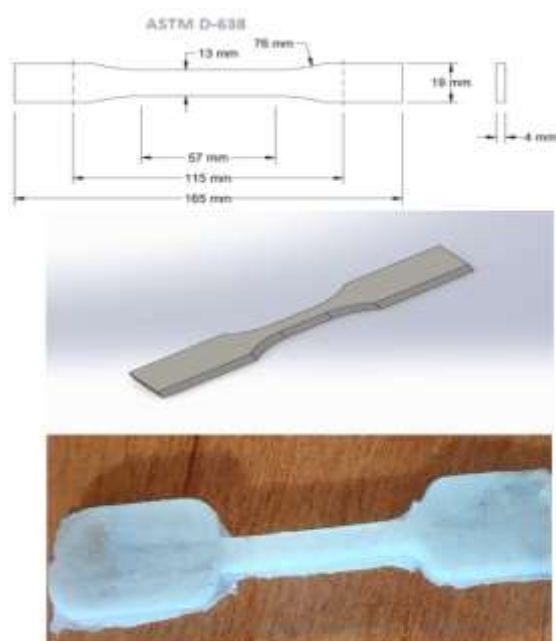
از نظر بالینی، سرامیک‌های زیست فعال بیشتر مورد استفاده و بررسی قرار می‌گیرند و بارزترین نمونه آن فلوئورآپاتیت (FA)

است [۷]. از آنجا که این سرامیک اجازه می‌دهد تا استخوان-زایی رخ دهد، تماس استخوانی و حتی پیوند با استخوان میزبان را فراهم می‌کند [۸]. با این حال، چه به صورت بلوک یا دانه‌ای استفاده شود، فلوئورآپاتیت خالص نمی‌تواند در بدن انسان تجزیه شود. در مورد فرم بلوک، میزان شکست بالای سرامیک فلوئورآپاتیت بیشتر مانع کاربردهای بالینی آن می‌شود؛ بنابراین اخیراً توجه زیادی بر روی کامپوزیت‌های فلوئورآپاتیت/پلیمر، به ویژه آنهایی که حاوی پلیمرهای زیست تخریب پذیر هستند، متمرکز شده است [۹، ۱۰]. قطعات پلیمری متابولیزه و دفع می‌شوند و اجزای سرامیکی در بدن جذب می‌شوند. شکنندگی سرامیک‌های فلوئورآپاتیت نیز با اختلاط با پلیمرهای آلی سخت بهبود می‌یابد.

اولین بار در سال ۱۹۹۴ آجایان و همکاران^۱ هم‌راستا کردن نانوذرات درون زمینه پلیمری را مورد بررسی قرار دادند. آنها از روش برش دادن به منظور قرار دادن نانو الیاف در جهت‌های موازی درون ماده پلیمری بهره بردند. در نتیجه خواص مکانیکی بالای نانو الیاف به طور قابل ملاحظه‌ای به زمینه پلیمری منتقل گردید و ماده پلیمری خواص غیر ایزوتروپیک را از خود بروز داد [۸]. یو و همکارانش^۲ در سال ۲۰۰۰ استحکام کششی نانولوله‌های کربنی تک مقیاسی را از ۱۳ تا ۵۲ گیگا پاسکال به دست آورد و مقاومت کششی نانولوله‌های کربنی چند مقیاسی جداگانه را در محدوده ۱۱ تا ۶۳ گیگا پاسکال گزارش کرد. دینامیک مولکولی و محاسبات مکانیک مولکولی نیز استحکام کششی بالایی نانولوله‌های کربنی را پیش‌بینی می‌کرد که بسیار بالاتر از الیاف کربن و فولادها بود [۹].

آقاداتی و همکارانش^۳ در سال ۲۰۱۷ مدل‌سازی چند مقیاسی برای محاسبه مدول یانگ نانولوله‌های کربنی (CNT) تقویت شده نانو کامپوزیت‌های مبتنی بر اپوکسی را معرفی کردند. این محققین از دینامیک مولکولی برای ساخت مدل‌های نانو کامپوزیت متشکل از ساختار شبکه‌ای از رزین اپوکسی به عنوان ماده ماتریس و CNT به عنوان تقویت کننده در مقیاس

ذره تقویت کننده استفاده شده است. در مطالعه قبلی محققان، نانو ذرات بودن اثبات شده است [۱۴]. برای ساختن فیلم های نانوکامپوزیتی PCL/nFA با درصدهای وزنی متفاوت و پودر نانوفلورآپاتیت (با ترکیب شیمیایی $(Ca_{10}(PO_4)_6F_2)$) جهت تولید نانو کامپوزیت های PCL/nFA از طریق حل در کلروفرم تهیه شدند. با توجه به شکل (۱) پس از ساخت نمونه استاندارد آزمون کشش طبق استاندارد ASTM-D638، مدول یانگ نمونه های کامپوزیتی با دستگاه SANTAM_STM50 اندازه گیری شد. نرخ سرعت کشش 10 mm/min و انجام آزمون در دمای ۲۵ درجه سانتی گراد انجام شده است. تعداد ۴ آزمون برای هر نمونه انجام شده است و میانگین مقادیر به دست آمده گزارش شده است.



شکل (۱): نمونه آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM-D638.

۲-۲- روش ها

برای تخمین مدول یانگ ماتریس PCL تقویت شده با ذرات nFA معادله های میکرومکانیکی مختلفی ارائه شده است. روش هایی که به طور عمومی در این باره استفاده می شوند، قانون اختلاط، مدل های هالپین-سای^۶، موری-تاناکا^۷، دیوی^۸

نانو استفاده کردند. در محاسبات چند مقیاسی، انواع مختلفی از روش های میکرومکانیکی مورد بررسی قرار گرفت و فرمول هالپین-سای به دلیل پیش بینی های واقعی تر انتخاب شد [۱۱]. دنگ و همکارانش^۴ در پژوهش خود خواص مکانیکی نانو کامپوزیت پلی لاکتیک اسید/هیدروکسی آپاتیت را به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار دادند. ایشان نشان داد، مدول کششی با بارگذاری برای نانو کامپوزیت های PLA/d-HAP با اضافه کردن HAP افزایش می یابد. همچنین برای پیش بینی مدول یانگ مقادیر محاسبه شده بر اساس معادلات هالپین-سای، تطابق بسیار خوبی با نتایج تجربی را نشان می دهند [۱۲]. مؤمنی و همکارانش^۵ در سال ۱۴۰۱ در پژوهش خود داربست های نانو کامپوزیت (PCL/FA) تهیه شده با پرینتر سه بعدی روش مدلسازی لایه نشانی مذاب (FDM) را به صورت تجربی و شبیه سازی بررسی کردند. ایشان در نتایج خود نشان دادند که نتایج تجربی و شبیه سازی آزمون فشار در مقایسه با خواص مکانیکی استخوان فک مناسب است [۱۳].

در این پژوهش نانوکامپوزیت پلی کاپرولاکتون/نانوفلورآپاتیت (PCL/FA) تهیه شده و خواص کششی آن مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از نتایج آزمون کشش برای اولین بار برای مواد نانوکامپوزیت PCL/FA مقایسه پیش-بینی روابط تئوری قانون اختلاط اصلاح شده، موری-تاناکا، دیوی، راماکریشن-آروناچالام هالپین-سای بر روی پلی-کاپرولاکتون خالص و اضافه کردن نانوذرات فلوئورآپاتیت به زمینه با درصدهای (۱۰، ۲۰ و ۳۰٪) انجام شده است. در پایان بهترین تئوری که نزدیک به نتایج تجربی باشد، معرفی خواهد شد.

۲. مواد و روش ها

۲-۱- مواد

در این پژوهش از پلی کاپرولاکتون (PCL800C-Esun) و $(Mw=80000 \text{ g/mol})$ به عنوان ماتریس کامپوزیت و پودر نانوفلورآپاتیت با ترکیب شیمیایی $(Ca_{10}(PO_4)_6F_2)$ به عنوان

محققین از معادلات (۳) استفاده شد [۲۰].

(۳)

$$\begin{aligned} \bar{k} &= k_0 + \frac{c_1(k_1 - k_0) * (3k_0 + 4\mu_0)}{3k_0 + 4\mu_0 + 3 * (1 - c_1) * (k_1 - k_0)} \\ \bar{\mu} &= \mu_0 \\ &+ \frac{5c_1\mu_0(\mu_1 - \mu_0) * (3k_0 + 4\mu_0)}{5\mu_0 * (3k_0 - 4\mu_0) + 6 * (1 - c_1) * (\mu_1 - \mu_0) * (k_0 - 2\mu_0)} \\ \bar{E} &= \frac{9 * \bar{k} * \bar{\mu}}{(3 * \bar{k} + \bar{\mu})} \end{aligned}$$

۲-۲-۴- روش دیوی و راماکریشنان - آرونچالام

راماکریشنان و آرونچالام مدلی را برای محاسبه مدول یانگ مواد متخلخل پیشنهاد کردند که از دقت مناسبی برای تخلخل-های کمتر از ۴۰٪ برخوردار است. این مدل حالت خاصی از فرمول بندی ارائه شده برای مواد کامپوزیتی دوفازی نیست و صرفاً برای شبیه سازی مواد متخلخل ارائه شده است. در مطالعه-ای که ایمانی و همکارانش برای تخمین مدول یانگ از مدل دیوی و راماکریشنان - آرونچالام برای داربست های متخلخل نانوکامپوزیتی از رابطه (۴) و (۵) ارائه دادند. ایشان در مطالعه خود به این نتیجه رسیدند که مدل دیوی در مقایسه با آزمون تجربی نسبت به سایر مدل های دیگر از نتایج بهتری برخوردار بود.

$$\frac{E_p}{E_s} = 1 - \xi \phi \quad (4)$$

$$\xi = \frac{(1 - \nu)(27 + 15\nu)}{(2(7 - 5\nu))}$$

$$\begin{aligned} \frac{E_p}{E_s} &= \frac{(1 - \phi)^2}{(1 + \chi\phi)} \\ \chi &= 2 - 3\nu \end{aligned} \quad (5)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمون کشش تجربی

نتایج آزمون کشش برای PCL خالص و نانوکامپوزیت های PCL/FA به صورت منحنی تنش- کرنش در شکل (۱) نشان داده شده است. PCL یک ماده پلیمری دارای انعطاف پذیری بسیار بالایی می باشد. ترکیب کردن PCL با FA باعث ایجاد سه

و راماکریشنان - آرونچالام^۹ هستند. قانون اختلاط یکی از روش های اولیه برای مدلسازی خواص مکانیکی کامپوزیت ها شامل تقویت کننده و ماتریس است؛ اما این تئوری فقط فاز تقویت کننده های هم جهت و پیوسته را در ماتریس در نظر می-گیرد. با توجه به این مسئله قانون اختلاط با استفاده از نظریه کامپوزیت های تقویت شده با نانو ذرات اصلاح شد. نحوه جهت گیری نانوذرات درون ماتریس بر مدول نانوکامپوزیت اثر دارد. جهت گیری نامنظم ذرات درون ماتریس باعث کاهش مدول یانگ می شود [۱۵].

$$\begin{aligned} E_c &= V_f \cdot E_f + E_m \cdot V_m \\ E_c &= \eta_0 \cdot V_f \cdot E_f + E_m \cdot V_m \end{aligned} \quad (1)$$

۲-۲-۲- روش هالپین-سای

معادلات روش هالپین-سای برای مدت طولانی برای پیش-بینی خواص کامپوزیت های تقویت شده با فیبر کوتاه استفاده شده است. این معادلات در ابتدا برای کامپوزیت های فیبر بلند توسعه یافتند [۱۹]. روابط هالپین-سای برای تخمین مدول یانگ مواد مرکب PCL/nFA در پژوهش حاضر به صورت معادله (۲) بیان شده است [۲۰]:

$$\begin{aligned} \frac{\bar{P}}{P_m} &= \frac{1 + \zeta * \eta * \phi}{1 - \eta * \phi} \\ \eta &= \frac{\frac{p_f}{p_f} - 1}{\frac{p_f}{p_f} + \zeta} \\ \zeta &= \frac{7 - 5 * v_m}{8 - 10 * v_m} \end{aligned} \quad (2)$$

۲-۲-۳- روش موری- تاناکا

روابط موری-تاناکا برای محاسبه مدول یانگ یک ماده مرکب ذره ای با ذرات کروی که به صورت یکنواخت در زمینه توزیع شده اند به صورت زیر بیان شده اند. در تعیین خواص مکانیکی مدول الاستیک کامپوزیت PCL تقویت شده با نانو ذرات nFA با توزیع ذرات به صورت تصادفی با توجه به مقالات سایر

کامپوزیت PCL/30nFA به دلیل آگلومره شدن ذرات در ماتریس نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی دیگر کاهش پیدا کرده است.

در جداول (۱) و (۲) خواص مکانیکی مواد PCL و نانو کامپوزیت‌های برای تخمین مدول الاستیک PCL/nFA به صورت کامل آمده است.

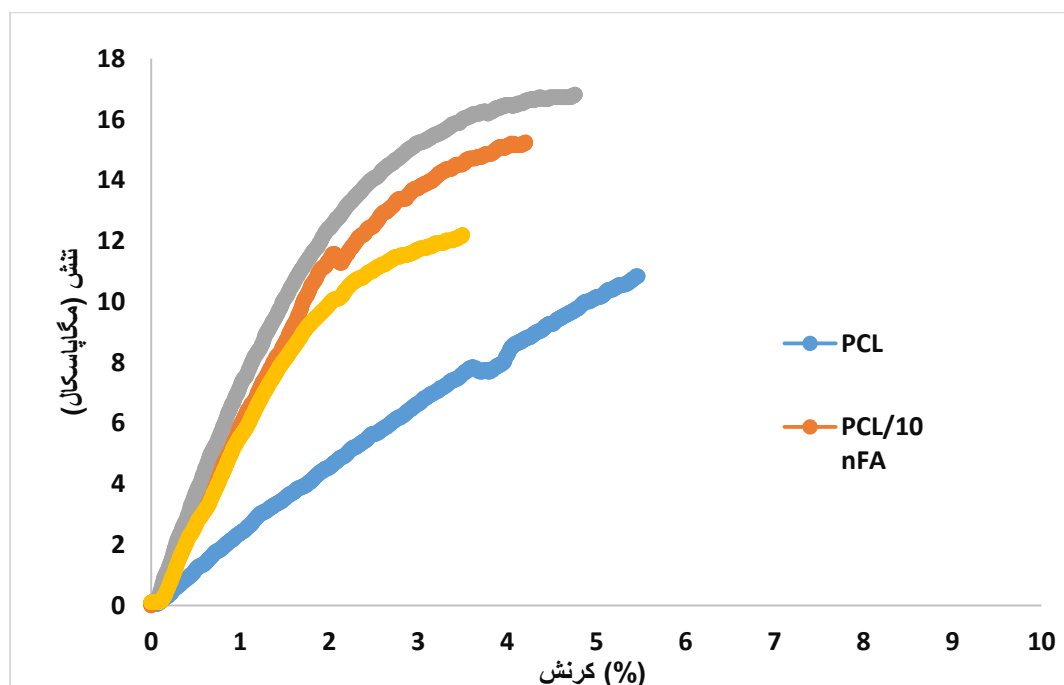
تغییر اصلی در مقایسه با PCL خالص می‌شود: افزایش استحکام تسلیم، کاهش درصد ازدیاد طول و افزایش مدول یانگ که در (جدول ۱) مشاهده می‌شود. با توجه به نتایج مشاهده شده نمونه-ی PCL/20FA نسبت به بقیه نمونه‌ها از مدول یانگ بهتری برخوردار است. مدول یانگ PCL/20FA نیز نسبت به PCL خالص ۱۷۹ درصد افزایش داشته است. همان‌طور که در نتایج آزمون کشش تجربی نشان داده شده، مدول یانگ نانو

جدول (۱): خواص مکانیکی مستخرج از نمودار تنش- کرنش برای PCL و نانو کامپوزیت‌های تهیه شده.

مواد	کسر حجمی فیبر (V_f)	کسر حجمی ماتریس (V_m)	مدول الاستیک ماتریس (GPa)	مدول الاستیک فیبر (GPa)	مدول کامپوزیت تجربی (GPa)	استحکام کششی (GPa)
PCL	-	۱	۰/۲۱۵	-	-	۰/۰۱۲
nFA	۰	-	-	۱۲۰	-	-
PCL/10 nFA	۰/۰۳۱	۰/۹۶۹	-	-	۰/۵۴	۰/۰۱۴
PCL/20 nFA	۰/۰۶۳	۰/۹۳۷	-	-	۰/۶۰	۰/۰۱۶
PCL/30 nFA	۰/۰۹۵	۰/۹۰۵	-	-	۰/۴۸	۰/۰۱۱

جدول (۲): خواص مواد PCL و nFA خالص [۲۱-۲۲].

پارامترها	PCL	nFA
ضریب پواسون ماتریس (ν_m)	۰/۳۸	-
ضریب پواسون فیبر (ν_f)	-	۰/۲۶
دانسیته (ρ) (Kg/cm^3)	۱/۱۴۵	۳/۱۵
مدول برشی (GPa)	۰/۰۷۷	۴۷/۶۱۹



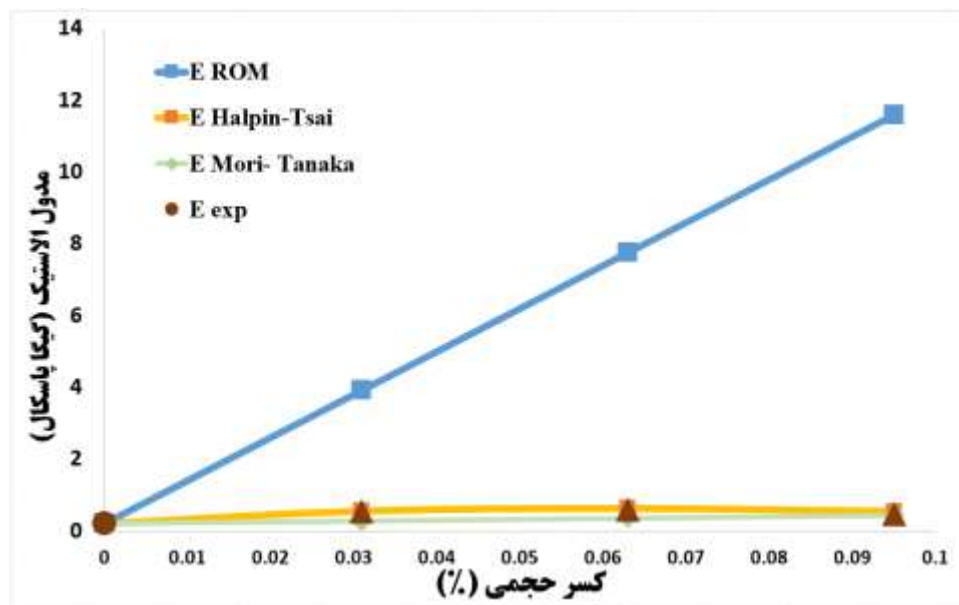
شکل (۱): نمودار تنش-کرنش آزمون کشش بر روی PCL خالص و نانو کامپوزیت آن با درصدهای مختلف FA.

۳-۲- مقایسه نتایج مدل‌های میکرومکانیک برای

محاسبه مدول الاستیک نانوکامپوزیت PCL/nFA

در نمودار شکل (۲) بین نتایج تجربی حاصل از آزمون تجربی

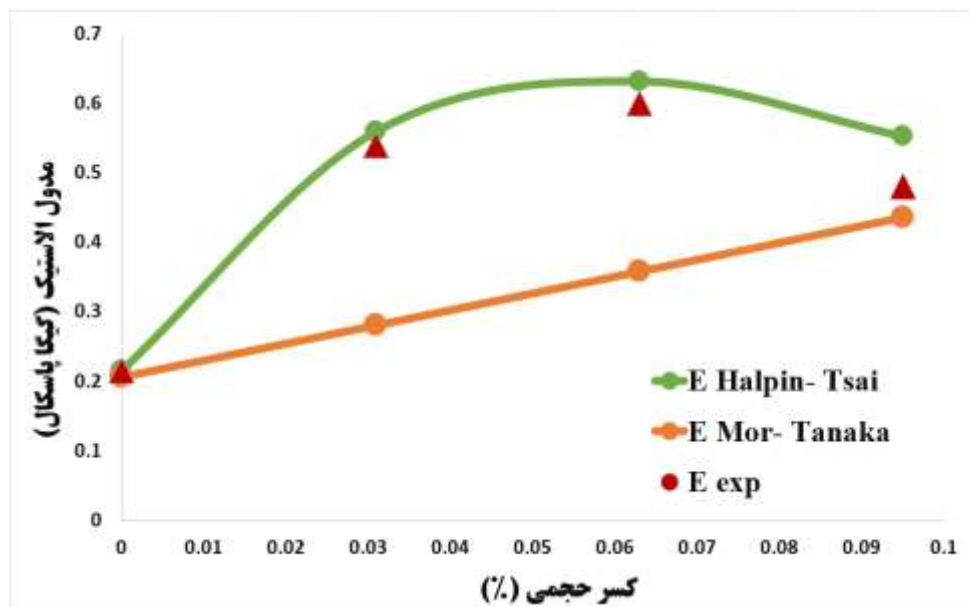
کشش و نتایج حاصل از تخمین مدول ینگ با استفاده از مدل-های قانون اختلاط (ROM)، هالپین-سای و موری-تاناکا با روابط آمده انجام شده است.



شکل (۲): نمودار مقایسه تغییرات مدول الاستیک تجربی برای PCL/nFA با روابط تئوری قانون اختلاط، هالپین-سای و موری تاناکا.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود قانون اختلاط اختلاف بسیار زیادی با روابط تجربی و تئوری هالپین-سای و موری-تاناکا دارد. متداول‌ترین راه برای مدلسازی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های شامل تقویت‌کننده و ماتریس، قانون

اختلاط است؛ اما این مدل فقط جهت گیری هم‌جهت و پیوسته فاز تقویت‌کننده را در کامپوزیت در نظر می‌گیرد. در ادامه در نمودار شکل (۳) منحنی قانون اختلاط حذف شده تا تغییرات به‌خوبی قابل مشاهده باشد.



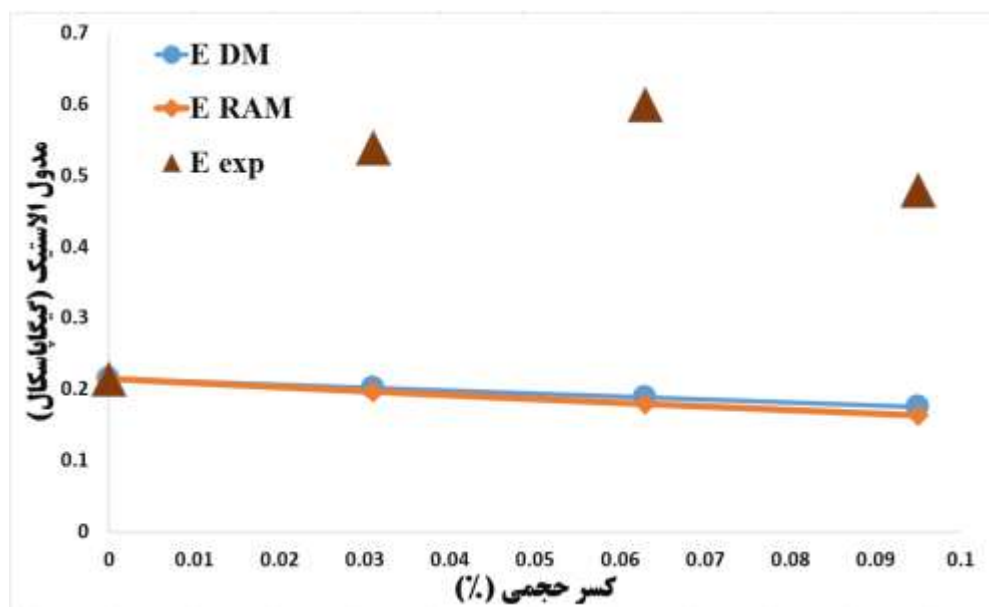
شکل (۳): نمودار مقایسه تغییرات مدول الاستیک تجربی برای PCL/nFA با روابط تئوری هالپین-سای و موری-تاناکا.

پژوهش از دو مدل دیوی و راماکریشنان - آروناچالام با توجه به معادلات (۴ و ۵) استفاده شد [۲۲].

مدل دیوی یک رابطه خطی برای محاسبه مدول یانگ مواد متخلخل پیشنهاد داده است. همچنین راماکریشنان - آروناچالام مدلی را برای محاسبه مدول یانگ مواد متخلخل پیشنهاد کردند که از دقت مناسبی برای تخلخل‌های کمتر از ۴۰٪ برخوردار است. در معادله (۵)، ϕ کسر حجمی، γ ضریب پواسون در نظر گرفته شد. با جایگذاری پارامترهای این پژوهش در معادلات دیوی و راماکریشنان - آروناچالام در مقایسه با نتایج تجربی مدول الاستیک نمودار شکل (۴) به دست آمد.

با توجه به شکل (۳) تغییرات مدول الاستیک تجربی فاصله‌ی نزدیکی با روابط تئوری هالپین-سای دارد. همچنین در نمودار شکل (۳) منحنی تئوری هالپین-سای به خوبی اثر آگلومره شدن را نشان داده است؛ اما منحنی موری-تاناکا به صورت خط صاف می‌باشد که از اعتبار خوبی برخوردار نیست.

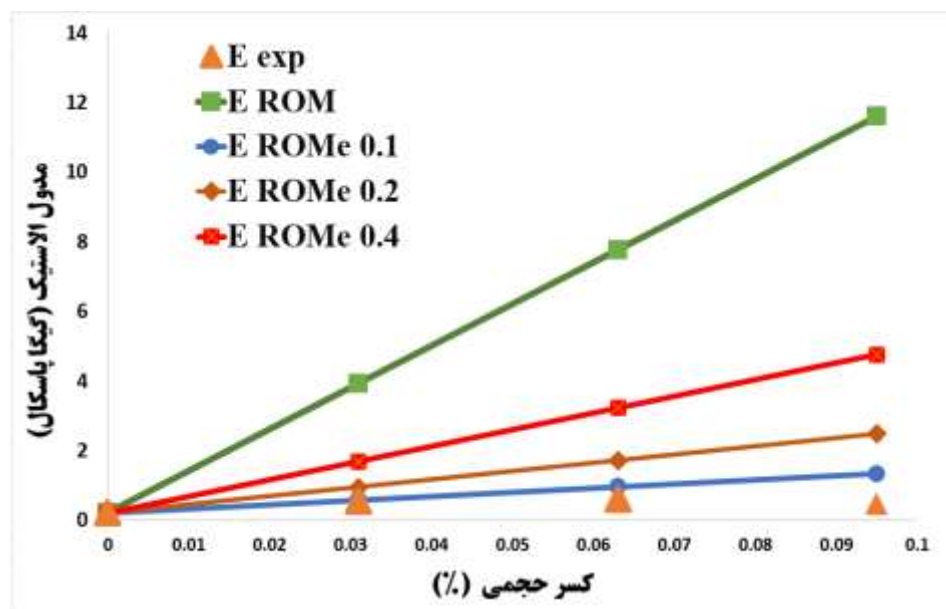
در مقاله‌ای دیگر ایمانی و همکارانش^{۱۱} با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی خواص مکانیکی داربست‌های پلیمری نانو کامپوزیتی را بررسی کردند. در نتایجشان مدل دیوی از بالاترین دقت در مقایسه با نتایج سایر مدل‌ها برخوردار بود. در این



شکل (۴): نمودار مقایسه تغییرات مدول الاستیک تجربی برای PCL/nFA با روابط تئوری دیوی و راماکریشنان - آروناچالام.

نانوذرات در ماتریس به شکل سه بعدی و نامنظم باشد مقدار η_0 برابر با $0/1$ ، $0/2$ و $0/4$ باشد. در نتیجه با جایگزینی در معادله (۱) منحنی‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.

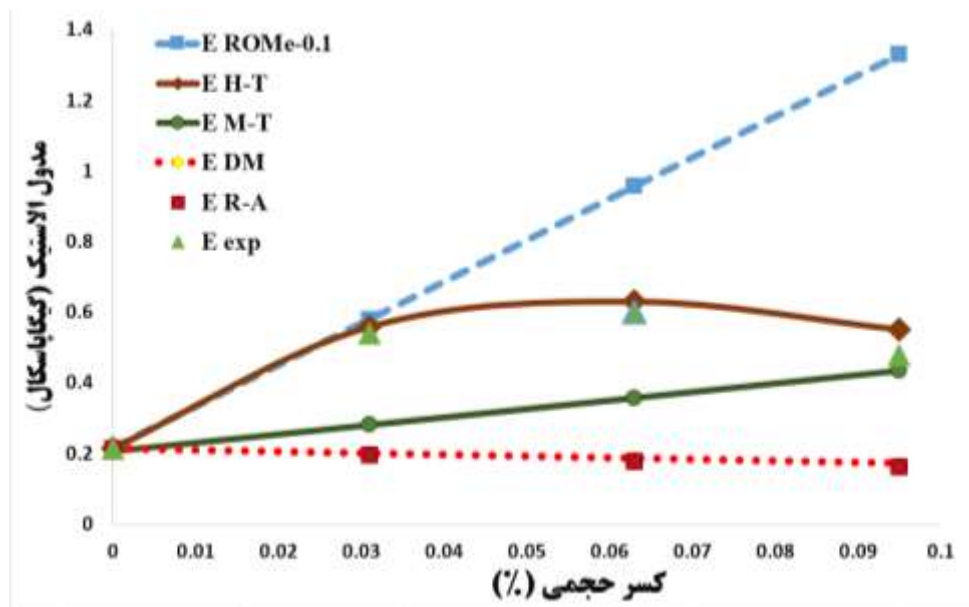
در نمودار شکل (۵) منحنی قانون اختلاط با دیگر تئوری‌ها و نتایج تجربی اختلاف بسیار زیادی داشت. به همین دلیل از تئوری قانون اختلاط اصلاح شده استفاده شد [۲۳]. با استفاده از تحقیقات سایر محققین فرض بر این شد که اگر پراکنش



شکل (۵): نمودار مقایسه تغییرات مدول الاستیک تجربی برای PCL/nFA با روابط تئوری قانون اختلاط اصلاح شده.

دست آمد. نمودار شکل (۶) مقایسه تغییرات مدول الاستیک مدل‌های قانون اختلاط اصلاح شده، هالپین-سای، موری-تاناکا، دیوی و راماکریشنان - آروناچالام را نشان داده است [۲۴].

با توجه به نمودار شکل (۵) هنگامی که η_0 برابر ۰/۱ بود منحنی به نتایج تجربی بسیار نزدیک بود. در نمونه‌های PCL خالص و نانوکامپوزیت PCL/10nFA نقاط منحنی بر روی هم قرار گرفت. از طرفی دیگر برای نمونه کامپوزیتی PCL/20nFA اختلاف بین نتایج تجربی و تئوری ۳۶ درصد بود. برای نمونه نانوکامپوزیتی PCL/30nFA اختلاف حدوداً ۶۰ درصد به



شکل (۶): مقایسه تغییرات مدول الاستیک مدل‌های قانون اختلاط اصلاح شده، هالپین-سای، موری-تاناکا، دیوی و راماکریشنان - آروناچالام.

درصد وزنی کاهش پیدا کرده است. میزان درصد اختلاف بین نتایج تجربی و هالپین-سای حدوداً ۱۲ درصد به دست آمد. پیش‌بینی روابط موری-تاناکا نشان داد که نمودار از نمونه خالص تا نمونه نانو کامپوزیتی ۳۰ درصد وزنی به سمت بالا به صورت خط صاف حرکت کرده است. میزان درصد اختلاف بین نتایج تجربی و موری-تاناکا حدوداً ۴۵ درصد بود. در پیش‌بینی روابط دیوی و راماکریشنان-آروناچالام هر دو منحنی نتایجشان بسیار نزدیک بود ولی تفاوتی که با دیگر روابط داشت خط منحنی به سمت پایین حرکت کرده و اختلاف بسیاری با نتایج تجربی و مدل‌های دیگر داشت. نتایج این دو مدل میزان اختلافشان با نتایج تجربی حدوداً ۶۵ درصد می‌باشد [۲۵-۲۶].

همان‌گونه که در مدل‌های قانون اختلاط، دیوی، راماکریشنان-آروناچالام، هالپین-سای و موری تاناکا نشان داده شده است پیش‌بینی مدول الاستیک نانوکامپوزیت PCL/nFA تابع درصد حجمی پرکننده است. نتایج تجربی نشان دادند که مدول الاستیک در ۲۰ درصد کسر وزنی بیشترین مقدار را دارد. پیش-بینی روابط قانون اختلاط اصلاح شده نشان داد که نمودار از نمونه خالص به صورت خط صاف به سمت بالا حرکت کرده است. در این روش نمونه خالص و ۱۰ درصد وزنی بسیار به نتایج تجربی نزدیک است ولی در نمونه ۲۰ و ۳۰ درصد وزنی اختلاف بین نتایج حدوداً ۳۵ درصد بود. پیش‌بینی روابط مدل هالپین-سای نشان داد که منحنی مدول الاستیک تا نانو کامپوزیت با ۲۰ درصد وزنی افزایش یافته و سپس برای ۳۰

with carbon nanotubes", International Journal of Mechanical Sciences, vol. 107, pp. 69-79, 2016.

[4] C. Liang, H. Qiu, Y. Zhang, Y. Liu & J. Gu, "External field-assisted techniques for polymer matrix composites with electromagnetic interference shielding: a review", Science Bulletin, vol. 68, no. 17, pp. 1938-1953, 2023.

[5] X. Gao, G. Jiang, L. Ruan, Y. Sun, K. E. Yunusov, Y. Jing, & S. O. Solomevich, "Electrospun porcine acellular dermal matrix and polycaprolactone composite nanofibrous scaffolds for accelerating wound healing," Fibers and Polymers, vol. 24, no. 2, pp. 589-601, 2023.

[7] K. M. Superb & P. V. Sabeel, "Polyhydroxyalkanoate (PHA)/Inorganic Phase Composites for Tissue Engineering Applications", Biomacromolecules, vol. 7, no. 8, pp. 1-10, 2006.

[8] P. Ajayan, O. Stéphan, C. Colliex & D. Trauth, "Aligned Carbon Nanotube Arrays Formed by Cutting a Polymer Resin-Nanotube Composite", Science, vol. 265, pp. 1212-1214, 1994.

[9] M. F. Yu, B. S. Files, S. Arepalli & R. S. Ruoff, "Tensile Loading of Ropes of Single Wall Carbon Nanotubes and Their Mechanical Properties", Physics Review, vol. 84, pp. 5552-5555, 2000.

[10] M. F. Yu, O. Lourie, M. J. Dyer, K. Moloni, T. F. Kelly & R. S. Ruoff, "Strength and breaking mechanism of multiwalled carbon nanotubes under tensile load", Science, vol. 287, no. 5453, pp. 637-640, 2000.

[11] F. Aghadavoudi, H. Golestanian & Y. Tadi Beni, "Investigating the effects of CNT aspect ratio and agglomeration on elastic constants of crosslinked polymer nanocomposite using multiscale modeling", Polymer Composites, vol. 39, no.12, pp.4513-4523, 2018.

[12] X. Deng, J. Hao, C. Wang., "Preparation and mechanical properties of nanocomposites of poly (D, L-lactide) with Ca-deficient hydroxyapatite nanocrystals", Biomaterials, vol.22, no.21, pp. 2867-2873, 2001.

[13] M. Momeni, K. Amini, A. Heidari & M. Khodaei, "Three-Dimensional Printing of a Polycaprolactone-Fluorapatite Nanocomposite Scaffold and Simulation of Its Mechanical Properties", Journal of Isfahan Dental School, vol.18, no. 4, 2022.

با توجه به نتایج به دست آمده از معادلات مدل های قانون اختلاط، دیوی، راماکریشنان-آروناچالام، هالپین-سای و موری-تاناکا نشان داد، مدل هالپین-سای بسیار نتایج نزدیکی با نتایج تجربی داشت. پس می توان گفت که برای پیش بینی بین نتایج مدول الاستیک بهترین رابطه مدل هالپین-سای می باشد.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش نانوکامپوزیت پلی کاپرولاکتون/نانوفلوئورآپاتیت تهیه گردید و خواص کششی آن مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایش کشش نشان داد که در بین نمونه های نانوکامپوزیتی، نمونه حاوی ۱۰ و ۲۰ درصد کسر وزنی نانوفلوئورآپاتیت نسبت به بقیه نمونه ها مدول یانگ بالاتری داشتند. مقایسه پیش بینی روابط تئوری قانون اختلاط اصلاح شده و موری-تاناکا نشان دادند که منحنی از نمونه خالص به صورت خط صاف با اضافه شدن نانوذرات به ماتریس با درصدهای (۱۰، ۲۰ و ۳۰٪) به سمت بالا حرکت کرده است؛ اما مدل های دیوی، راماکریشنان-آروناچالام به صورت خط صاف به سمت پایین حرکت کرده است. منحنی هالپین-سای برخلاف دیگر تئوری ها همانند نتایج تجربی به صورت کمان شکل بود. مقایسه روابط تئوری پیش بینی مدول الاستیک با نتایج تجربی نشان داد که مدل هالپین-سای با اختلاف ۱۳ درصدی نزدیک ترین نتایج را دارد. پس می تواند گزینه ی خوبی برای پیش بینی مدول الاستیک نانو کامپوزیت PCL/nFA باشد.

۱۰- منابع

- [1] H. Dodiuk, ed., "Handbook of thermoset plastics", William Andrew, 2021.
- [2] A. Trofimov, B. Drach & I. Sevostianov, "Effective elastic properties of composites with particles of polyhedral shapes", International Journal of Solids and Structures, vol. 120, pp. 157-170, 2017.
- [3] M. Nasihatgozar, V. Daghigh, M. Eskandari, K. Nikbin & A. Simoneau, "Buckling analysis of piezoelectric cylindrical composite panels reinforced

polycaprolactone-hydroxyapatite porous scaffolds created by porogen-based solid freeform fabrication method", Journal of applied biomaterials & functional materials, vol. 12, no. 3, pp. 145-154, 2014.

[23] A. R. Ghasemi, M. M. Mohamadi & Moradi, "MInvestigation of mechanical and thermal properties of polymer composite reinforced by multi walled carbon Nanotube for reduction of residual stress", Iranian Journal of polymer science and technology, vol. 27, no. 3, pp. 213-230, 2014.

[24] M. Neghabi & M. Safarabadi, "Investigating effect of Nano-additives orientations on buckling strength of polymeric Nanocomposite plates reinforced by CNT and Nanoclay", Journal of Science and Technology of Composites, vol. 8, no. 2, pp. 1590-1602, 2021.

[25] S. M. Imani, S. M. Rabiee, A. Moazami Goudarzi & M. Dardel, "Investigation of the mechanical properties of the porous scaffolds used in bone tissue engineering by means of micromechanical modeling", Modares Mechanical Engineering, vol. 17, no. 9, pp. 397-408, 2017.

[۲۶] ت. احمدی، ا. منشی، و. ا. مرتضوی، م. ح. فتحی و ب. هاشمی بنی، "ساخت و مشخصه‌یابی غشای پلی کاپرولاکتون فومارات-ژلاتین الکترورسی شده برای کاربرد بازسازی هدایت شده‌ی بافت پریدنتال"، فرآیندهای نوین در مهندسی مواد، سال ۳، شماره ۹، صفحه ۷۹-۹۲، ۱۳۹۴.

۶- پی‌نوشت

- [1] Ajayan et al
- [2] Yu et al
- [3] Aghadavoudi et al
- [4] Deng et al
- [5] Momeni et al
- [6] Halpin-Tsai
- [7] Mori-Tanaka
- [8] Dewey Model (DM)
- [9] Ramakrishnan and Arunachalam Model (RAM)
- [10] Rule of Mixture
- [11] Imani et al

[14] M. Momeni, K. Amini, A. Heidari & M. Khodaei, "Evaluation the properties of polycaprolactone/fluorapatite nano-biocomposite", Journal of Bionic Engineering, vol. 19, no. 1, pp. 179-187, 2022.

[15] G. Kalaprasad, K. Joseph, S. Thomas & C. Pavithran, "Theoretical modelling of tensile properties of short sisal fibre-reinforced low-density polyethylene composites", Journal of materials science, vol. 32, pp. 4261-4267, 1997.

[16] S. Rana, R. Alagirusamy & M. Joshi, "Development of carbon nanofibre incorporated three phase carbon/epoxy composites with enhanced mechanical", electrical and thermal properties," Composites part a: applied science and manufacturing, vol. 42, no. 5, pp. 439-445, 2011.

[17] G. Kalaprasad, K. Joseph, S. Thomas & C. Pavithran, "Theoretical modelling of tensile properties of short sisal fibre-reinforced low-density polyethylene composites", Journal of materials science, vol. 32, pp. 4261-4267, 1997.

[18] F. Vilaseca, A. Valadez-Gonzalez, P. J. Herrera-Franco, M. A. Pelach, J. P. Lopez & P. Mutje, "Biocomposites from Abaca Strands and Polypropylene. Part I: Evaluation of the Tensile Properties", Bioresource Technol, vol. 101, pp. 387-395, 2010.

[19] C. L. Tucker III & E. Liang, "Stiffness predictions for unidirectional short-fiber composites: Review and evaluation", Composites science and technology, vol. 59, no. 5, pp. 655-671, 1999.

[۲۰] م. ر. دشت‌بیاض و ح. شاهر جیبیان، "تهیه و بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت اپوکسی-آلومینا"، مجله علمی-پژوهشی نانو مواد، سال ۶، شماره ۱۷، صفحه ۱۹-۳۲، ۱۳۹۳.

[21] J. B. Bates, "Fourier transform spectroscopy", Computers & Mathematics with Applications, vol. 4, no. 2, pp. 73-84, 1978.

[22] L. Lu, Q. Zhang, D. M. Wootton, R. Chiou, D. Li, B. Lu & J. Zhou, "Mechanical study of