

## تحلیل رابطه تجربی بین مدول دینامیکی یانگ و ضریب انبساط حرارتی در گرافیت هسته‌ای

سعید فتوره‌چیان، فاطمه اهری هاشمی، شکوفه احمدی  
مرکز تحقیقات هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

### چکیده

بیشتر فناوریهای مختلف و ساخت کاربردهای ویژه گرافیت در انواع صنایع سبب شده است که خواص گوناگونی در گرافیت مورد بررسی قرار گیرد. خواص فیزیکی و مکانیکی گرافیت متأثر از روشهای تولید از جمله قالب‌گیری، برزن‌ریزی<sup>(۱)</sup>، فنردن همفشار<sup>(۲)</sup> است. فرایند تولید عامل ایجاد آرایشهای مختلف دامه های کُک در گرافیت جلد بلوری می‌باشد. ناهمسانگردی<sup>(۳)</sup> خواص فیزیکی در گرافیت نیز به علت شکل‌گیری تک‌بلورها در جهت‌های مختلف شبکه بلوری مشاهده می‌شود. مدول دینامیکی یانگ و ضریب انبساط حرارتی از جمله خواص فیزیکی مهمی هستند که برای تعیین نوع گرافیت هسته‌ای اندازه‌گیری می‌شوند. برای سهولت بررسی کیفیت گرافیت هسته‌ای، روشهای تجربی متعددی در باره نحوه تغییر خواص در گرافیت و ارتباط آنها با یکدیگر ارائه شده است. در این پژوهش، به منظور تعیین رابطه بین مدول دینامیکی یانگ و ضریب انبساط حرارتی در گرافیت هسته‌ای نواح کارهای تجربی مورد بررسی و استفاده قرار گرفته است. واژه‌های کلیدی: کُک نغسی، فرطران زغال‌سنگ، گرافیت هسته‌ای، رآکتور هسته‌ای، ناهمسانگردی، مدول دینامیکی یانگ

## Determination of empirical relation between dynamic Young's modulus and thermal expansion coefficient for nuclear grade graphite

S. Fatoorehchian, F. Ahari Hashemi, Sh. Ahmadi

Nuclear Research Center, AEOI, P.O. Box: 14155-1339, Tehran-Iran

E-mail: SFatooreh@seai.neda.net.ir

### Abstract

A variety of properties for graphite has been considered in parallel to the new industrial growth and special application of graphite. Physical and mechanical properties of graphite are affected by manufacturing process such as molding, extrusion, iso-static press, etc. These make different structure of coke grain in different directions in graphite polycrystalline. In order to estimate the type of nuclear grade graphite two important properties of graphite, dynamic Young's modulus and thermal expansion coefficient, are determined. To estimate the quality of nuclear graphite easily, several procedures and empirical relations have been introduced to show how these factors are related. In this work, experimental results have been used to determine the empirical relation between dynamic Young's modulus and thermal expansion coefficient.

۱- extrusion

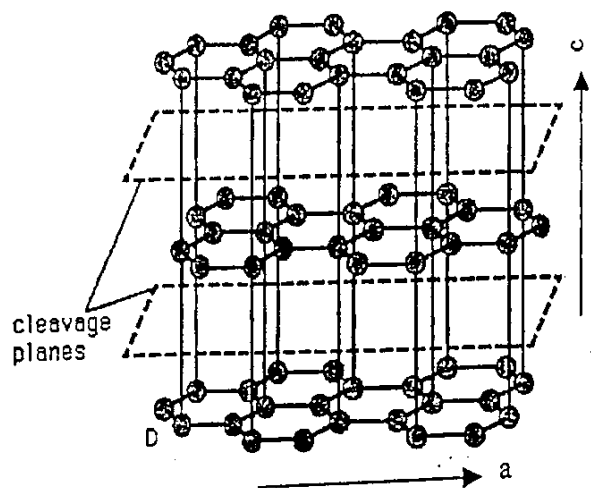
۲- isostatic press

۳- anisotropy

## ۱- مقدمه

گرافیت یکی از مواد ساختاری رآکتورهای هسته‌ای است که کاربرد موفقیت‌آمیز آن در نخستین انواع این رآکتورها سبب گسترش کاربردهایش به صورتهای مختلف در صنایع هسته‌ای شده است. گرافیت در برابر تابش پرتوهای رادیوآکتیو مقاومت مطلوبی نشان می‌دهد و خواص فیزیکی انواع مصنوعی آن به شدت متأثر از نوع مواد اولیه و روشهای تولید آنها می‌باشند. در این میان فرآیند شکل دهی به دلیل کاربرد روشهایی مانند قالب‌گیری، برون‌رانی و فشردن همفشار سبب جهت‌گیریهای متفاوت شبکه بلوری در قطعات گرافیت می‌شود که از اهمیت ویژه‌ای در فرآیند تولید برخوردار است.

ناهمسانگردی نتیجه مستقیم ساختار لایه‌ای بلور گرافیت است که به عنوان اختلاف در توزیع خواص در جهت های مختلف نمونه‌برداری از قطعات تبیین می‌شود. علت این اختلاف وجود پیوند قوی کژوالانسی C-C بر روی لایه‌ها (هم جهت با بردار a، در شبکه بلوری، موازی با لایه‌ها) و پیوند ضعیف واندروالسی بین لایه‌ها (هم جهت با بردار c در شبکه بلوری، عمود بر لایه‌ها) است. ساختار بلوری گرافیت در شکل ۱ نشان داده شده است [۱]. لایه‌ای بودن شبکه بلوری، خواص فیزیکی گرافیت را تحت تأثیر قرار داده و موجب ایجاد ناهمسانگردی در این خواص می‌شود. ناهمسانگردی خواص گرافیت و تأثیر نوع مواد اولیه و فرآیندهای تولید در ایجاد آن به لحاظ کاربردی دارای اهمیت است.



شکل ۱- ساختار بلوری گرافیت نشان‌دهنده جهت‌های a و c [۱]

مدول دینامیکی یانگ و ضریب انبساط حرارتی گرافیت، کمیت‌های مکانیکی و حرارتی ناهمسانگردی هستند که مقادیر آنها تحت تأثیر میزان نابجایی‌ها در شبکه بلوری آن است. تغییرات این دو کمیت در یک جهت مشخص بلوری عکس یکدیگرند، یعنی در مقایسه مقادیر این دو خاصیت در جهات a و c شبکه بلوری، مدول دینامیکی یانگ در جهت a دارای مقدار بزرگتری است در حالیکه در همین جهت ضریب انبساط حرارتی مقدار کمتری دارد. این خواص به عنوان پارامترهای اصلی در کاربردهای هسته‌ای گرافیت مطرح بوده و تعیین آنها از اهمیت قابل توجهی برخوردار است. در این پژوهش علاوه بر تعیین ویژگیهای پیش‌گفته رابطه‌ای نیمه‌تجربی (تحلیلی - تجربی) بین این دو کمیت مکانیکی و حرارتی عرضه می‌گردد. همچنین با استفاده از این رابطه پارامتر جدیدی، به صورت حاصلضرب مدول یانگ E در ضریب انبساط حرارتی  $\alpha$  (یعنی  $E\alpha$ ) تعریف می‌شود که مستقل از جهت‌های بلورشناختی است. این رابطه تجربی علاوه بر مورد کاربردش در گرافیت‌های هسته‌ای، قابلیت استفاده در انواع دیگر گرافیت را نیز دارد.

## ۲- تحلیل رابطه تجربی

انبساط حرارتی در مواد گرافیتی متأثر از سه عامل زیر است:

۱- تعامل نوسانات حرارتی اتم‌های شبکه بلوری،

۲- خواص کشسانی تک‌بلورهای گرافیت،

۳- اتصال بین تک‌بلورها و ذراتی که این تک‌بلورها را در

برمی‌گیرند.

ضریب انبساط حرارتی مواد بلوری را می‌توان از رابطه (۱) حساب کرد:

$$\alpha_{(hkl)} = \frac{(\Delta a/a)_{(hkl)}}{\Delta T} \quad (1)$$

$(\Delta a/a)$ : تغییرات واحد طول در جهت مورد نظر در اثر

حرارت،  $\Delta T$ : تغییر درجه حرارت و (hkl): اندیسه‌های میلر شبکه

بلوری است.

چون نوع پیوندها در ساختار بلوری گرافیت متفاوتند، ضریب انبساط حرارتی در جهت  $a$  کمتر از جهت  $c$  می‌باشد. این ضریب برای گرافیت‌های تجاری در محدوده  $2 \times 10^{-6}$  تا  $5 \times 10^{-6}$  بر درجه سلسیوس است؛ به‌طور مثال برای یک نمونه در جهت  $a$ :  $1.7 \times 10^{-6} / ^\circ C$  و در جهت  $c$ :  $4.3 \times 10^{-6} / ^\circ C$  داده شده است. در تک‌بلورهای گرافیت، خاصیت انبساط حرارتی مانند بسیاری از خواص دیگر ناهمسانگرد است به طوری که در جهت  $a$  به علت وجود نیروهای پیوندی قوی کووالانسی تغییر اندکی در ابعاد گرافیت در اثر تغییر درجه حرارت ایجاد می‌شود. در صورتی که وجود نیروهای ضعیف واندروالسی در جهت  $c$  سبب افزایش ضریب انبساط حرارتی در این جهت می‌گردد. وجود نقصهای بلوری ساختاری مانند تخلخل و ترک که معمولاً از سرد شدن ناگهانی قطعات گرافیت پس از فرآیندهای حرارتی حاصل می‌شوند نیز بر این ضریب مؤثرند. بررسیها نشان می‌دهند که ضریب انبساط حرارتی گرافیت به‌طور غیریکنواخت تغییر می‌کند و تغییرات آن با درجه حرارت خطی نیست [۳].

بررسی نتایج تحقیقات انجام شده به منظور مقایسه ضریب انبساط حرارتی و ناهمسانگردی در گرافیت‌های تک‌بلور و چندبلور نشان می‌دهد که گرافیت چندبلور دارای ضریب انبساط حرارتی و ناهمسانگردی کمتری است [۴]. علت این اختلاف را می‌توان جبران شدن مقدار بالای ضریب انبساط حرارتی در جهت  $c$  به توسط مقدار پایین آن در جهت  $a$ ، در این نوع گرافیت دانست؛ نتیجه‌ای که از جهت‌گیری دانه‌های کُک در فرآیند شکل‌گیری حاصل می‌شود. بطور کلی ضریب انبساط حرارتی گرافیت بستگی زیادی به نوع مواد اولیه و فرآیندهای تولید دارد و می‌توان آنرا بر حسب موارد نیاز بهبود بخشید.

استفاده از فرآیند چگال سازی یا اشباع قطعات پخته شده با مواد کربن دار مانند قیر حاصل از قطران زغال سنگ باعث بالا رفتن

این ضریب به مقدار اندک در جهت  $c$  می‌شود که به افزایش حجمی منافذ بسته نسبت داده می‌شود [۵]. با اندازه گیری ضریب انبساط حرارتی می‌توان مقادیر متوسط آنرا بین درجه حرارت اتاق و دمای مورد نظر با اضافه کردن مقادیر ثابتی بر طبق جدول ۱ بدست آورد [۳].

یکی از راههای شناخت ساختار بلوری گرافیت تعیین مدول دینامیکی یانگ است که علاوه بر آن در بررسی نوع تخلخل و ابعاد حفره‌ها نیز کاربرد دارد. برای اندازه گیری این مدول از روشهای زیر استفاده می‌شود [۶]:

- روش رزونانس خمشی،

- روش انتشار امواج فراصوت (اولتراسونیک).

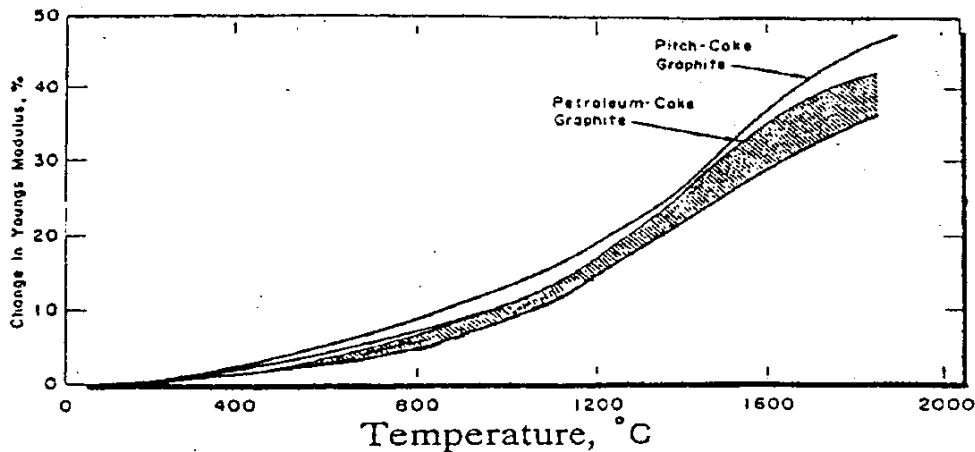
با استفاده از قانون هوک و محاسبه شیب منحنی تنش- کرنش نیز می‌توان مدول یانگ را حساب کرد؛ در این صورت آن را مدول استاتیکی یانگ نامیده‌اند [۱]. مدول دینامیکی یانگ در گرافیت تحت تاثیر عواملی مانند دمای آزمایش و چگالی نمونه‌ها قرار دارد. تحقیقات انجام گرفته نشان می‌دهند که در محدوده دمایی صفر تا  $2000$  درجه سلسیوس اثر دما بر آن به خوبی مشهود است و به طوری که در شکل ۲ مشاهده می‌شود. با افزایش دما مدول یانگ نیز افزایش می‌یابد. در مورد گرافیت هسته‌ای، بیشترین مقدار این افزایش حدود  $40$  درصد است [۳].

افزایش مدول دینامیکی یانگ با افزایش چگالی نیز توسط کارهای تجربی بسیار به اثبات رسیده است. در شکل ۳ نمونه‌ای از این ارتباط نشان داده شده است [۷]. انبساط حرارتی غیر یکنواخت گرافیت در جهت‌های  $a$  و  $c$  شبکه بلوری سبب ایجاد ترک در ساختار بلوری آن می‌شود. از طرف دیگر ترکهای حاصل از سرد شدن قطعات پس از فرآیند

جدول ۱- مقادیر ثابت برای محاسبه ضریب انبساط حرارتی در دماهای مختلف [۳]

درجه حرارت نهایی $^{\circ}C$	۲۵۰۰	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۱۰۰۰	۹۰۰	۸۰۰	۷۰۰	۶۰۰	۵۰۰	۴۰۰	۳۰۰	۲۰۰	۱۰۰
مقادیر ثابت $(10^{-7} / ^{\circ}C)$	۲۵/۲	۲۱/۲	۱۷/۲	۱۳/۲	۱۲/۳	۱۱/۴	۱۰/۴	۹/۲	۷/۷	۶/۰	۴/۰	۲/۰	۰

\* مقادیر ثابت که باید به ضریب انبساط حرارتی اندازه گیری شده در دماهای  $20$  تا  $100$  درجه سلسیوس اضافه شوند.



شکل ۲- وابستگی مدول دینامیکی یانگ گرافیت به درجه حرارت [۳]

و پی گیری فرآیندهایی مانند خرد کردن، دانه بندی، اختلاط، شکل دهی با استفاده از روش قالب گیری، پخت، چگال سازی و گرافیتی کردن استفاده شده است. برای انجام آزمون های مورد نظر، از هر قطعه گرافیت دو نمونه در جهت عمودی (موازی با جهت a در شبکه بلوری) و چهار نمونه موازی با جهت فشار (موازی با جهت c) تهیه شده است.

۳-۱- اندازه گیری ضریب انبساط حرارتی: دستگاه مورد استفاده در این آزمایش انبساط سنج است که براساس انقباض نمونه در ازت مایع با دمای حدود  $196^{\circ}\text{C}$  - (VK) انجام گرفته است. در این روش تغییرات طول نمونه بین دماهای اتاق و ازت مایع اندازه گیری شده است. مدت توقف هر نمونه در ازت مایع دست کم ۱۵ دقیقه بوده و در هر مرحله اندازه گیری، سیستم به وسیله پنج نمونه استاندارد سنجه بندی شده و آزمایش برای هر نمونه ۳ بار تکرار و میانگین تغییرات طول نمونه برای محاسبه  $\alpha$  ضریب انبساط حرارتی، در رابطه ۲ بکار رفته است:

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L_0(T_0 - T)} + C \quad (2)$$

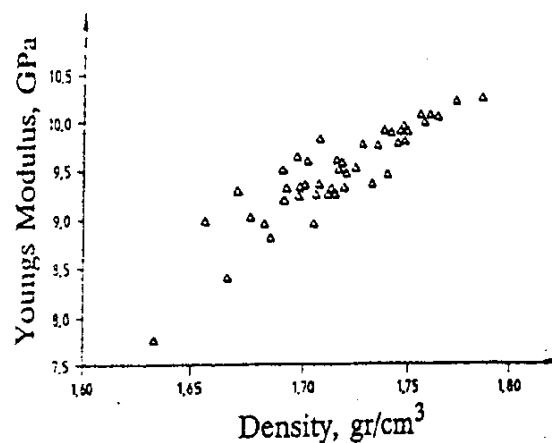
که در آن:

$\Delta L$ : متوسط تغییر طول اندازه گیری شده (cm)

گرافیتی کردن<sup>(۴)</sup> نیز سبب کاهش چگالی شده و به تبعیت از آن مدول دینامیکی یانگ در اثر افزایش نقصهای ساختاری (حفره ها و ترکها) نقصان خواهد یافت.

### ۳- روش کار

در این کار پژوهشی، نمونه های گرافیت مورد آزمایش، به شکل استوانه هایی به قطر ۶ میلیمتر و به ارتفاع ۴۰ میلیمتر بوده اند که از قطعات گرافیت ساخته شده در کارگاه پروژه تهیه شده اند. برای ساخت این قطعات در کارگاه، که استوانه هایی به قطر ۴۰ میلیمتر و ارتفاع حدود ۶۰ میلیمتر بودند، از مواد اولیه مختلف



شکل ۳- تغییرات مدول دینامیکی یانگ گرافیت با چگالی [۷]

۴- graphitization



L: طول اولیه نمونه در درجه حرارت اتاق (cm)

T: دمای اتاق (K)

T: دمای ازت مایع (K)

C: عدد ثابت برابر با  $10^{-7} \times 0.54$  که به عنوان ضریب

تصحیح انبساط اجزاء سیستم مورد استفاده قرار گرفته است.

۳-۲- اندازه گیری مدول دینامیکی یانگ: برای اندازه گیری این مدول در نمونه های گرافیت، از امواج فراصوت استفاده شده است. در این حالت زمان عبور موج فراصوت (t) از درون نمونه ای با طول مشخص L اندازه گیری شده و سرعت انتشار موج از رابطه  $L/t = c$  محاسبه می شود. با مشخص بودن چگالی نمونه، مدول دینامیکی یانگ از رابطه ۳ بدست می آید.

$$E = \rho \cdot c^2 = \rho \cdot (L/t)^2 \quad (3)$$

E: مدول دینامیکی یانگ (Pa)

$\rho$ : چگالی نمونه ( $\text{kg/m}^3$ )

c: سرعت انتشار موج فراصوت در نمونه (m/s)

t: زمان انتشار موج (s)

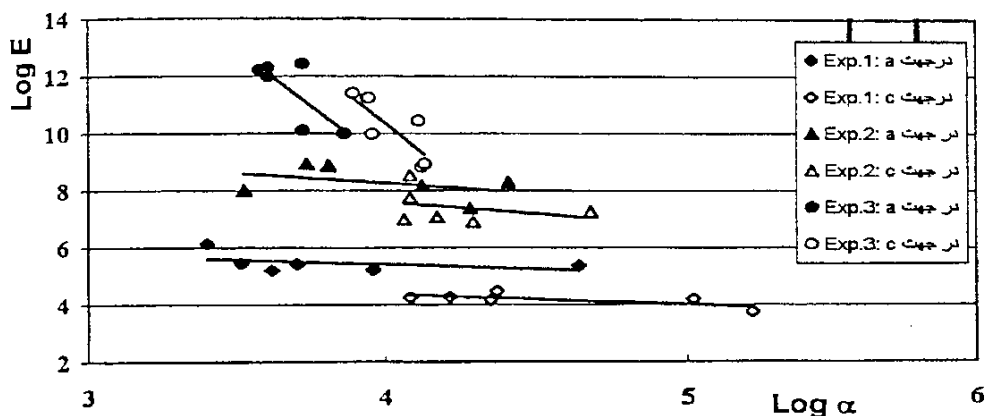
L: طول نمونه (m)

۳-۳- نتایج اندازه گیری: سه دسته از گرافیت های ساخته شده با توجه به بررسی های انجام گرفته برای این پژوهش انتخاب شده اند. که هر دسته مشتمل بر شش قطعه بوده است و برای تعیین خواص هر قطعه، چهار نمونه در جهت c (موازی با جهت فشار شکل گیری) و دو نمونه در جهت a (عمود بر جهت فشار شکل گیری) بلور گرافیت تهیه شده و آزمایش های لازم بر روی آنها به عمل آمده است. جدول ۲ نتایج حاصل را که شامل چگالی، ضریب انبساط حرارتی و مدول دینامیکی یانگ این قطعات است نشان می دهد. در ستون آخر نیز حاصلضرب  $E \cdot \alpha$  عرضه شده است. مواد اولیه و فرآیندهای بکار رفته در ساخت دسته ها یکسان بوده و تنها تفاوت آنها این است که در ساخت دسته های Exp.2 و Exp.3 به ترتیب از یک بار و دو بار اشباع کردن با قیر قطران زغال سنگ استفاده شده و دسته Exp.1 بدون چگال سازی تهیه شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل برای قطعات ساخته شده

سری ساخت	شماره قطعه	چگالی ( $\text{gr/cm}^3$ )		ضریب انبساط حرارتی ( $10^{-6}/\text{K}$ )		مدول دینامیکی یانگ (GPa)		$E \cdot \alpha \cdot 10^{-3} \text{ Pa/K}$	
		a	c	a	c	a	c	a	c
Exp.1 (I0)	۱	۱.۴۲۳	۱.۵۲۸	۴.۳۷	۳.۴۳	۴.۴۶	۶.۱۲	۱۹.۴۹	۲۰.۹۹
	۲	۱.۵۴۰	۱.۵۳۸	۵.۲	۳.۹۶	۴.۱۸	۵.۲۲	۲۰.۹۸	۲۰.۶۷
	۳	۱.۵۵۶	۱.۵۰۱	۴.۲۱	۳.۷۲	۴.۲۵	۵.۴۲	۱۷.۸۹	۲۰.۱۶
	۴	۱.۵۶۵	۱.۵۴۸	۴.۳۵	۳.۶۴	۴.۱۴	۵.۲۰	۱۸.۰۱	۱۸.۹۳
	۵	۱.۵۱۵	۱.۵۵۲	۴.۰۸	۳.۵۴	۴.۲۳	۴.۸۳	۱۷.۲۶	۱۷.۱۰
	۶	۱.۵۴۶	۱.۵۵۳	۵.۲۲	۴.۶۵	۴.۷۴	۵.۳۵	۲۴.۷۴	۲۴.۸۸
Exp.2 (I1)	۱	۱.۶۷۶	۱.۶۶۸	۴.۰۸	۳.۷۵	۷.۷۵	۸.۹۴	۳۱.۶۲	۳۳.۵۲
	۲	۱.۶۸۱	۱.۶۹۴	۴.۰۸	۳.۸۲	۸.۵۲	۸.۸۶	۳۴.۷۶	۳۳.۸۵
	۳	۱.۶۹۵	۱.۶۹۱	۴.۶۹	۴.۴۱	۷.۲۵	۸.۳۰	۳۴.۰۰	۳۶.۶۰
	۴	۱.۶۶۸	۱.۶۸۱	۴.۲۹	۴.۲۸	۶.۸۹	۷.۳۸	۲۹.۵۶	۳۱.۵۹
	۵	۱.۶۷۵	۱.۶۷۱	۴.۱۷	۴.۱۲	۷.۰۶	۸.۱۷	۲۹.۴۴	۳۳.۶۶
	۶	۱.۶۵۴	۱.۶۵۸	۴.۰۶	۳.۵۵	۶.۹۸	۸.۰۰	۲۸.۳۴	۲۸.۴۰
Exp.3 (I2)	۱	۱.۷۵۰	۱.۷۷۷	۳.۹۰	۳.۷۴	۱۱.۳۹	۱۲.۴۲	۴۴.۴۲	۴۶.۴۶
	۲	۱.۷۸۸	۱.۷۶۶	۳.۹۵	۳.۶۰	۱۱.۲۳	۱۲.۲۱	۴۴.۳۶	۴۳.۹۶
	۳	۱.۷۶۳	۱.۷۷۷	۴.۱۱	۳.۶۳	۱۰.۴۳	۱۲.۲۸	۴۲.۸۷	۴۴.۵۸
	۴	۱.۷۴۸	۱.۷۷۵	۳.۹۶	۳.۶۳	۹.۹۷	۱۱.۹۷	۳۹.۴۸	۴۳.۲۵
	۵	۱.۷۴۰	۱.۷۶۰	۴.۱۲	۳.۷۴	۸.۸۰	۱۰.۱۰	۳۶.۲۶	۳۷.۷۷
	۶	۱.۷۵۰	۱.۸۲۰	۴.۱۳	۳.۸۷	۸.۹۲	۹.۹۹	۳۶.۸۴	۳۸.۶۶

۸- نشان دهنده دفعات چگال سازی است.



شکل ۴- تغییرات LogE برحسب Log $\alpha$  برای قطعات ساخته شده

تقریباً ثابت می ماند.

#### ۴- یافته ها و نتیجه گیری

برای مقایسه نتایج حاصل از نمونه های گرافیت ساخته شده با نمونه های گرافیت هسته ای، دو نمونه از این نوع گرافیت مربوط به آمریکا و یک نمونه فرانسوی انتخاب و اطلاعات مورد نظر در جدول ۳ عرضه شده است. علاوه بر این ضریب ناهمسانگردی که خارج قسمت ضریب انبساط حرارتی در جهت c به جهت a است، همچنین حاصلضرب  $E\alpha$  در این جدول مندرج است. برای تحلیل یافته ها، منحنی تغییرات LogE برحسب  $\text{Log}\alpha$  برای میانگین نتایج نمونه های انتخاب شده نیز در شکل ۵ رسم شده است.

برای بدست آوردن رابطه تجربی بین E و  $\alpha$  ابتدا منحنی تغییرات LogE برحسب  $\text{Log}\alpha$  برای نمونه ها رسم شده است (شکل ۴). یافته های زیر از این منحنی قابل استنتاج است:

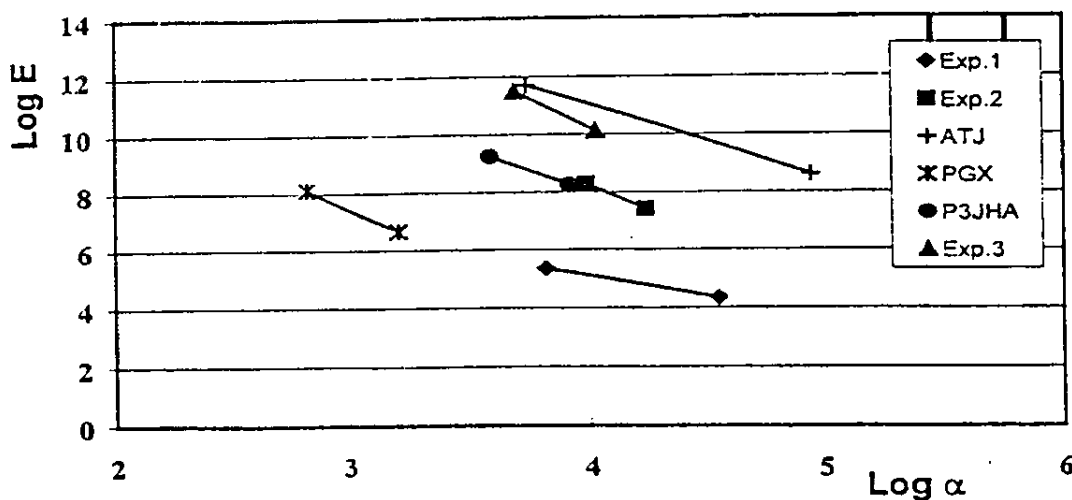
الف) تغییرات  $\alpha$  و E در نمونه ها عکس هم بوده است به طوری که با افزایش  $\alpha$  مقدار E کاهش می یابد.

ب) برای هر یک از نمونه ها شیب خطی که از نقاط مربوط به نتایج آزمایشها در جهات مختلف (a و c) می گذرد تقریباً یکسان است.

ج) افزایش چگالی اثر مستقیم بر مقدار E و اثر معکوس بر  $E\alpha$  داشته است، اما تغییرات به گونه ای است که حاصلضرب  $E\alpha$

جدول ۳- مقایسه نتایج نمونه های ساخته شده با انواع گرافیتی هسته ای

$E\alpha$ $10^3 \text{ Pa}\cdot\text{K}$	ضریب ناهمسانگردی	مدول دینامیکی بانگ E, GPa	ضریب انبساط حرارتی $\alpha, \mu\text{K}^{-1}$	جهت نمونه برداری	چگالی gr/cm <sup>3</sup>	تولیدکننده	نوع گرافیت
$19.73 \pm 2.80$	1/19	$4.33 \pm 0.23$	$4.54 \pm 0.46$	جهت c	$1.53 \pm 0.04$	نمونه آزمایشی (ایران)	Exp.1
$20.46 \pm 2.05$		$5.36 \pm 0.43$	$3.82 \pm 0.44$	جهت a			
$21.29 \pm 2.13$	1/16	$7.41 \pm 0.63$	$4.23 \pm 0.24$	جهت c	$1.68 \pm 0.01$	نمونه آزمایشی (ایران)	Exp.2
$22.94 \pm 2.74$		$8.27 \pm 0.58$	$3.99 \pm 0.22$	جهت a			
$23.70 \pm 2.99$	1/19	$10.12 \pm 1.11$	$4.028 \pm 0.103$	جهت c	$1.77 \pm 0.02$	نمونه آزمایشی (ایران)	Exp.3
$22.78 \pm 2.47$		$11.49 \pm 1.13$	$3.702 \pm 0.102$	جهت a			
$22.15 \pm 0.7$	1/22	$8.60 \pm 0.14$	4/95	جهت c	$1.78 \pm 0.01$	UCC (آمریکا)	ATJ
$21.8 \pm 1.7$		$11.70 \pm 0.44$	3.75	جهت a			
$21.4 \pm 0.4$	1/15	$6.65 \pm 0.12$	3.22	جهت c	$1.73 \pm 0.01$	UCC (آمریکا)	PGX
$22.8 \pm 0.4$		$8.10 \pm 0.12$	2.81	جهت a			
$22.4 \pm 2.6$	1/19	$8.26 \pm 0.91$	3.92	جهت c	$1.73 \pm 0.01$	PUK (فرانسه)	P <sub>3</sub> JHA
$23.3 \pm 1.0$		$9.25 \pm 0.271$	3.60	جهت a			

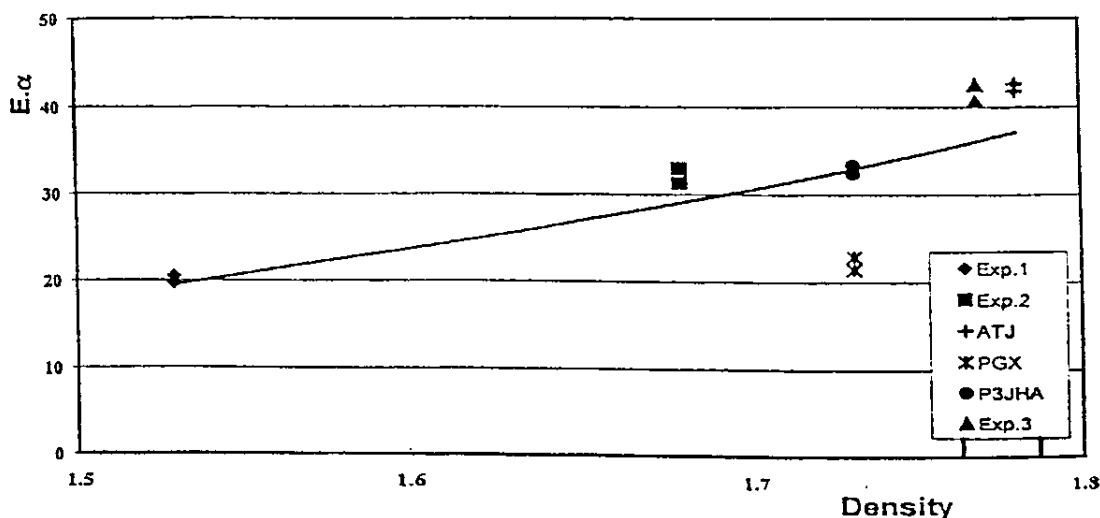


شکل ۵- تغییرات Log E بر حسب Log alpha برای متوسط نتایج

بودن بلور گرافیت را نشان می دهد نیز استفاده کرد. قبلاً نیز بیان شد که با افزایش چگالی گرافیت، E افزایش و alpha کاهش می یابد، اما میزان تاثیر این افزایش در مدول دینامیکی یا ننگ بیشتر از ضریب انبساط حرارتی است، در نتیجه مقدار حاصلضرب E.alpha برای دسته های مختلف با افزایش چگالی روند صعودی را نشان می دهد. دامنه کاربرد رابطه  $E.alpha = ct$  بستگی به تعیین مقدار ثابت در انواع گرافیت ها دارد. با تعیین آن برای یک نوع خاص گرافیت می توان تنها با انجام دادن یک آزمایش و تعیین یکی از خواص، خاصیت دیگر را از راه محاسبه بدست آورد.

چنانکه مشاهده می شود، روند تغییرات برای تمام دسته ها تقریباً یکسان است و این موضوع صحت یافته های قبلی را تایید می نماید. در نتیجه می توان رابطه تجربی  $E.alpha = ct$  را در جهت های مختلف و برای گرافیت های گوناگون، به ویژه نوع هسته ای آنها بکاربرد. به طوری که از جدول ۳ نیز استنباط می شود مقادیر بدست آمده برای دو جهت ۱ و ۲ تقریباً یکسان بوده و خطای انحراف از میانگین نیز کمتر از ۱۰ درصد است.

نکته مورد توجه دیگر، به طوری که مشاهده می شود این است که با افزایش چگالی حاصلضرب  $E.alpha$  نیز افزایش می یابد (شکل ۶). برای توضیح این مسأله می توان از شکل ۱ که لایه ای



شکل ۶- تغییرات حاصلضرب E.alpha بر حسب چگالی قطعات



## References

1. N.C. Paiti, "Static and dynamic investigation on phillips petroleum," Report No.1-107-05- 745-21, Texas, USA (Document from internet), (1990).
2. K. Othmer, "Encyclopedia of chemical technology," John Wiley & Sons, vol.4 (1986).
3. R.E. Nightingale, "Nuclear graphite," Academic Press, (1962).
- 4 L.M. Currie. "The production and properties of graphite for reactors," Proceeding of the first united nation international confrence on the peaceful use of atomic energy, Geneva, 1955, vol.8, UN, NewYork, (1959).
5. Y.S. Touloukian, "Thermo-physical properties of matter," A comprehensies compilation of data, vol.13 (1970).
6. A. Wolfenden. "Dymamic Young's modulus measurments in metallic materials," Journal of Testing & Evaluation, Jan, (1989).
7. W. Delle, K. Koizlik, H. Nickel, "Graphitic materials for use in nuclear reactors," Part 2, Karl thiemig AG, Munchen, (1983).