

بررسی جذب سطحی در نانوکامپوزیت‌های گرافن / اکسید گرافن - پلیمرهای تقویت شده به روش شبیه‌سازی دینامیک مولکولی واکنشی

گیتی پیشه‌ورز^۱، حمید عرفان‌نیا^{۱*} و اسماعیل زمین‌پیما^۲

۱. دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۲. گروه فیزیک، واحد قزوین، دانشگاه آزاد اسلامی قزوین، قزوین، ایران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۱۱/۲۲ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۳/۲۳)

چکیده- در این پژوهش، میزان جذب سطحی پلیمرهای مزدوج بر گرافن / اکسید گرافن به روش شبیه‌سازی دینامیک مولکولی با میدان نیروی واکنشی مورد تحقیق قرار گرفت. پلیمرها عبارتند از پلی(۳-هگزیل تیوفن) و پلی(فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن. طول و عرض ورقه گرافنی به ترتیب برابر با ۹۵/۱۹۶ آنگستروم و ۵۴/۱۶۴ آنگستروم است. ورقه‌های اکسید گرافن با درصد‌های اکسیدشدگی متفاوت در نظر گرفته شدند. نتایج شبیه‌سازی دینامیک مولکولی میزان جذب سطحی بیشتری را روی ورقه‌های اکسید گرافن نسبت به ورقه گرافن نشان دادند؛ علاوه بر این پلی(فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن میزان جذب سطحی بیشتری از پلی(۳-هگزیل تیوفن) در بررسی با هر دو گروه عاملی هیدروکسی و اپوکسی نشان داده است. همچنین، برخی خواص ساختاری پلیمرها مانند شعاع چرخشی پلیمر و تابع توزیع شعاعی، در محل‌های واکنشی محاسبه شدند.

واژه‌های کلیدی: جذب سطحی، گرافن، اکسید گرافن، پلیمر مزدوج، دینامیک مولکولی، میدان نیروی واکنشی.

A study on the Adsorption of Graphene/Graphene Oxide-reinforced Polymer Nanocomposites using Reactive Molecular Dynamics

G. Pishehvarz¹, H. Erfan-Niya^{1*}, and E. Zaminpayma²

1. Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

2. Department of Physics, Qazvin Branch, Islamic Azad University, Qazvin, Iran.

Abstract: In this work, the amounts of the adsorption of conjugated polymers onto graphene/ graphene oxide were examined by reactive force-field molecular dynamics simulation. The polymers were poly(3-hexylthiophene) (P3HT) and poly(phenothiazine vinylene-polythiophene)(PTZV-PT). The length and width of the graphene sheet were 95.19 Å and 54.16 Å, respectively. The graphene oxide sheets with different oxidation percentages were considered. The molecular dynamics simulation results demonstrated a higher amount of adsorption onto graphene oxide sheets in comparison to graphene; furthermore, poly(phenothiazine vinylene-polythiophene) revealed a larger amount of adsorption in comparison with poly(3-hexylthiophene) in both functionalized groups of hydroxyl and epoxy. Also, some structural properties of polymers, such as radius of gyration of polymer and radial distribution function, were calculated at different reactive sites.

Keywords: Adsorption, Graphene, Graphene oxide, Conjugated polymer, Molecular Dynamics.

*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: herfan@tabrizu.ac.ir

r_0^σ	شعاع تعادلی پیوند سیگما (آنگستروم)	BO'_{ij}	مرتبه پیوند
r_{vdW}	شعاع واندروالس (آنگستروم)	BO_{ij}	مرتبه پیوند تصحیح شده
r_0^π	شعاع تعادلی پیوند پای (آنگستروم)	BO^σ_{ij}	مرتبه پیوند سیگما
$r_0^{\pi\pi}$	شعاع تعادلی پیوند پای دوم (آنگستروم)	BO^π_{ij}	مرتبه پیوند پای اول
V_1	ارتفاع سد اول چرخشی (کیلوکالری/مول)	$BO^{\pi\pi}_{ij}$	مرتبه پیوند پای دوم
V_2	ارتفاع سد دوم چرخشی (کیلوکالری/مول)	D_e	عمق حداقل انرژی پتانسیل (کیلوکالری/مول)
α_{ij}	قطبش پذیری	D_{ij}	انرژی پایه بین جفت اتمی (کیلوکالری/مول)
γ	تصحیح هم‌پوشانی اوربیتالی (آنگستروم)	FG	گرافن عامل دار شده
ε	ثابت انرژی (کیلوکالری/مول)	G	گرافن
η	مقدار سختی سیستم (الکترون ولت)	GO	اکسید گرافن
Θ_o	زاویه تعادلی والانس (°)	$g(r) / RDF$	تابع توزیع شعاعی
Θ_{ijk}	زاویه والانس (°)	P3HT	پلی (۳- هگزیل تیوفن)
χ	مقدار الکترونگاتیوی سیستم (الکترون ولت)	PTZV-PT	پلی (فنونتازین وینیلن)-پلی تیوفن
$\pi-\pi$	برهمکنش پای- پای	R_g	شعاع چرخشی پلیمر (آنگستروم)
		r_{ij}	فاصله بین اتمی (آنگستروم)

۱- مقدمه

کربنی منجر به بهره‌گیری بیشتر از گرافن به‌عنوان ماده‌ای ایده‌آل به‌صورت نانوکامپوزیت پلیمری در تهیه سنسورها، وسایل الکترونیکی و موارد دیگر شده است [۶].

با نگاهی از منظر شیمی سطح به آلوتروپ‌های^۲ کربنی چون نانولوله‌های کربنی و گرافن می‌توان به عدم در دسترس بودن سطح داخلی نانولوله کربنی در برابر پلیمرها در نانوکامپوزیت‌های پلیمری اشاره کرد؛ از این‌رو گرافن از پتانسیل بالاتری در جهت بهبود خواص نانوکامپوزیت‌های پلیمری از جمله خواص الکتریکی برخوردار است [۷]. آنچه که در به‌کارگیری مؤثر گرافن نقش مهمی ایفا خواهد کرد، می‌توان به داشتن فهم بهتری از فیزیک و شیمی سطح گرافن و برهمکنش‌های شیمیایی در فصل مشترک گرافن و پلیمرها اشاره کرد؛ در نتیجه طراحی مناسب سطح گرافن و عامل‌دار کردن آن با مؤثرترین روش و گروه‌های عاملی از مقوله‌هایی است که بایستی به دقت مورد بررسی قرار بگیرد [۸] و با در نظر گیری گروه‌های عاملی مناسب، برهمکنش‌هایی قوی با قدرت

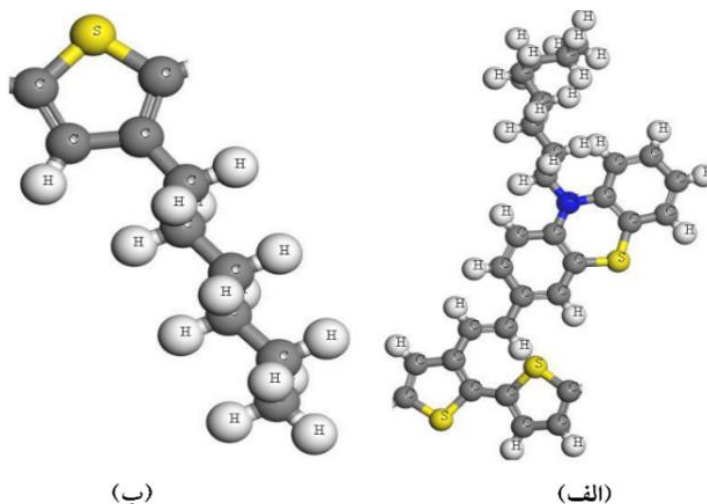
نانولوله‌های کربنی به‌عنوان یکی از دگرشکل‌های کربن از لحاظ خواص مکانیکی و استحکام فوق‌العاده از جایگاه ویژه‌ای برخوردارند [۱]؛ در حالی که برای تولید به صرف هزینه بالایی نیاز دارند [۲] و انحلال‌ناپذیری، ناخالصی و ساختار دسته‌ای و تجمع [۳] آنها از عوامل نامطلوبی هستند که مانع از کارایی مناسب وسایل الکتریکی شده است [۴]؛ اما گرافن به‌عنوان دیگر نانوساختار کربنی دوبعدی با ضخامت لایه‌ای به اندازه یک اتم [۵] خواص برجسته‌ای را از خود نشان داده است. از خواص قابل توجه آن می‌توان به نسبت سطح به حجم بالای آن اشاره کرد [۱] که در مسئله‌های مربوط به خواص سطح و افزایش میزان چسبندگی به منظور انتقال مؤثر بارهای الکتریکی در لایه فعال^۱ سلول‌های خورشیدی پلیمری [۲] و افزایش تأثیرگذار آن در میزان بازدهی می‌توان اشاره کرد؛ از این‌رو خاصیت رسانایی گرمایی [۳]، الکتریکی بالا [۴] و انعطاف‌پذیری مکانیکی [۵] گرافن در مقایسه با نانولوله‌های

بالا میان واحد نانو ساختار کربنی و پلیمرها صورت پذیرد. وجود برهمکنش‌هایی ضعیف میان گرافن و پلیمرها منجر به آن می‌شود که نانورقه‌های گرافنی تمایل به متراکم شدن و شکل توده‌ای به خود گرفتن پیدا کنند، که این خود موجب کاهش شدن بیشتر کارایی نهایی نانوکامپوزیت می‌شود [۹]. بنابراین اصلاح سطح با استفاده از مواد آلی یا معدنی می‌تواند در بهبود خواص سطح مورد بررسی قرار گیرد. اما اکسید گرافن به‌عنوان مشتقی از گرافن مطرح می‌شود که شامل گروه‌های عاملی قطبی متصل شده به‌واسطه پیوند کووالانسی، شامل هیدروکسی و اپوکسی روی سطح گرافن و کربونیل، کربوکسیل روی لبه‌های آن است [۱۰]. در این تحقیق اثر آن در میزان استحکام و چسبندگی نانوکامپوزیت مورد بررسی قرار گرفته است. از جمله عواملی که منجر به ایجاد نانوکامپوزیت‌های تقویت شده پلیمری می‌شود، استفاده از ورقه‌های گرافنی است. تحقیق‌های صورت گرفته عموماً روی نانولوله‌های کربنی بوده است. اما برهمکنش‌هایی چون $\pi-\pi$ بین گرافن و ساختار آروماتیکی مولکول‌های آلی به‌ویژه پلیمرهای مزدوج وجود دارد که می‌تواند بستر مناسبی را جهت ایجاد نانوکامپوزیت‌های پلیمری مستحکم میسر سازد [۱۱ و ۱۲]. از این رو با توجه به نسبت سطح به حجم بیشتر گرافن در مقایسه با نانولوله‌های کربنی و استفاده از فرایند عامل‌دار کردن روی ورقه‌های گرافنی می‌توان از بازدهی بالاتری نسبت به نانوکامپوزیت‌های حاصل از نانولوله‌های کربنی برخوردار بود. البته بایستی در نظر داشت که با عامل‌دار کردن ورقه‌های گرافن نقص‌هایی بر ساختار گرافن وارد شده و در واقع ساختار متناوب شش ضلعی از بین خواهد رفت که منجر به کاهش میزان هدایت گرمایی و الکتریکی نانوکامپوزیت حاصل می‌شود [۱۳]. از این رو، عامل‌دار کردن بایستی در حد مطلوبی صورت بگیرد.

بررسی اثر عامل‌دار کردن از طریق شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مورد مطالعه قرار گرفته است. این بررسی‌ها از سوی ونگ و همکاران [۱۴] که اثر طول صفحه گرافن و عامل‌دار کردن گرافن توسط اکسیژن را با درصد پوشش‌های مختلف

روی نیروی برشی فصل مشترک مورد سنجش قرار دادند، صورت گرفته است. نتایج حاصل از این ارزیابی که بنا به شبیه‌سازی دینامیک مولکولی و با به‌کارگیری میدان نیروی متناسب پلیمری^۳ انجام شد، نشان داد که عامل‌دار کردن تأثیر بسزایی در میزان متغیر مدنظر داشته و با افزایش درصد پوشش، میزان نیروی برشی افزایش یافته و در نهایت در درصد پوششی اکسیژن برابر با هفت درصد، میزان نیروی برشی به حداکثر میزان ممکن و سپس به مقدار ثابتی رسیده است. نیکخواه و همکاران [۱۵] با بررسی اثر گروه‌های عاملی قطبی، غیرقطبی در فصل مشترک پلیمر پلی‌اتیلن روی گرافن مشاهده کردند که تمام گروه‌های عاملی قطبی به‌غیر از گروه غیرقطبی موجب افزایش میزان چسبندگی شده است و از سوی دیگر تأثیر گروه‌های عاملی بر روی دمای گذار شیشه‌ای پلیمر مورد بررسی قرار گرفته است که با افزایش میزان گروه‌های عاملی، به دلیل کاهش میزان تحرک‌پذیری زنجیره پلی‌اتیلنی، مقدار دمای گذار شیشه‌ای پلیمری افزایش داشته است. در تحقیق صورت گرفته از سوی کامپتون و همکاران [۱۶] بر روی خواص مکانیکی از طریق تنظیم پیوندهای هیدروژنی در نانوکامپوزیت حاصل از اکسید گرافن و پلی‌وینیل الکل که با استفاده از میدان نیروی واکنشی^۴ صورت گرفته است، با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته است. در مطالعه‌ای دیگر از سوی اسماعیلی و دشت بیاض [۱۷] با استفاده از شبیه‌سازی دینامیک مولکولی میزان خواص الاستیک نانوکامپوزیت با زمینه فلزی Al-SiC مورد بررسی قرار گرفت که با انطباق بیشتری با نتایج حاصل از مدل سنتی فگت، در مقایسه با روش‌های سنتی میکرومکانیکی همراه بوده است.

در بررسی آزمایشگاهی انجام شده از سوی چوندر و همکاران [۱۸] در مورد ساخت نانوکامپوزیت اکسید گرافن به‌همراه پلی (۳-هگزیل تیوفن)، مشاهده شد که با شکل‌گیری کامپوزیت حاصل، میزان رسانایی نسبت به پلیمر به تنهایی، افزایش چشم‌گیری داشته است؛ از این رو، با بررسی فاز بین‌سطحی، می‌توان خواص الکتریکی کامپوزیت‌ها را نیز مورد تنظیم قرار داد. بنابراین با بررسی فاز بین‌سطحی در این کار، میزان جذب سطحی نانو ساختارهای کربنی و پلیمرهای مزدوج



شکل ۱- ساختار مونومری: الف) پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن ب) پلی (۳- هگزیل تیوفن) [۱۹]

جدول ۱- مشخصات ورقه‌های گرافنی مورد مطالعه

نسبت کربن به اکسیژن	تعداد هیدروکسی	تعداد اپوکسی	تعداد کربوکسیل	تعداد کربونیل
۵	۲۸۸	۷۲	۲۲	۹
۱۰	۱۳۲	۳۳	۱۶	۹
۱۵	۷۶	۱۹	۱۸	۷
۲۰	۶۰	۱۵	۱۱	۶

و عامل‌دار کردن با گروه‌های عاملی، در نرم‌افزار متریالز استودیو^۵ مورد رسم قرار گرفته است.

ورقه اکسید گرافن ابتدا با میزان نسبت کربن به اکسیژن برابر با ۱۰ در نظر گرفته شده است و برای بررسی تأثیر درصد اکسیداسیون بر میزان جذب سطحی نسبت کربن به اکسیژن را کاهش داده و به مقدار پنج و در نسبت‌های بالاتر از ۱۰ به میزان ۱۵ و ۲۰ تغییر داده شده است، که مشخصات ورقه‌های اکسید گرافن در جدول (۱) درج شده است. برای بررسی دقیق‌تر میزان تأثیر گروه‌های عاملی اکسید گرافن در میزان چسبندگی (فیزیکی)، ساختارهایی با گروه‌های عاملی یکسان در نظر گرفته شده است؛ به‌گونه‌ای که ورقه گرافنی با میزان درصد پوششی ۱۰، ۱۵، ۲۵ و ۵۰ با گروه‌های عاملی هیدروکسی و اپوکسی عامل‌دار شده‌اند و بررسی در مورد گروه‌های عاملی کربونیل و کربوکسیل روی لبه ورقه گرافنی، با تعداد برابر صورت گرفته است. عامل‌دار کردن ورقه‌های گرافنی

چون پلی (۳- هگزیل تیوفن) و پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن، مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفته است.

۲- روش حل مسئله

۲-۱- مدل محاسباتی

مدل محاسباتی در این تحقیق از قرارگیری هریک از دو پلیمر مزدوج پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن (شکل ۱- الف) [۱۹] و پلی (۳- هگزیل تیوفن) (شکل ۱- ب) [۲۰] در فاصله نه آنگستروم از ورقه گرافن و ورقه‌های اکسید گرافن حاصل شده‌اند.

به‌دلیل آنکه شرط برابری تعداد اتم‌های پلی (۳- هگزیل تیوفن) و پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن برای مقایسه مناسب جذب سطحی برقرار باشد، ساختارهایی به‌ترتیب برابر با ۱۲۷ و ۱۲۸ اتم در نظر گرفته شده است. ورقه گرافنی با ابعاد طول و عرضی به‌ترتیب برابر با ۹،۵۱۹۶ نانومتر و ۵،۴۱۶۴ نانومتر

جدول ۲- پارامترهای میدان نیروی واکنشی برای تعیین مرتبه پیوند و انرژی کشش پیوندی سیستم در نظر گرفته شده

P _{bo,۶}	P _{bo,۵}	P _{bo,۴}	P _{bo,۳}	P _{bo,۲}	P _{bo,۱}	P _{be,۲}	P _{be,۱}	D _e	پیوندها
۰/۳۲۱۷	-۰/۷۸۱۶	۱/۰۰۰۰	۸/۶۷۳۳	۱/۰۰۰۰	۵/۹۷۲۴	-۰/۱۹۴	۰/۲۱۷۶	۱۴۵/۴۰۷۰	C-C
۰/۵۹۶۹	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۸/۵۴۴۵	۱/۰۰۰۰	-۰/۴۴۲۱	۱۶۷/۱۷۵۲	C-H
۰/۳۷۹۶	-۰/۱۶۹۶	۱/۰۰۰۰	۷/۴۳۹۶	۰/۰۰۰۰	۵/۰۶۳۷	-۰/۲۶۶۰	۰/۳۶	۱۷۱/۰۴۷	C-O
۰/۲۴۱۵	-۰/۱۳۷۰	۱/۰۰۰۰	۷/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۵/۴۹۸۰	-۰/۳۱۶۱	۰/۰۴۲	۱۳۴/۹۹۹۲	C-N
۰/۹۱۴۳	۰/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۵/۹۴۵۱	۱/۰۰۰۰	-۰/۴۲۰۱	۲۱۶/۶۰۱۸	H-O
۰/۶۰۰۰	-۰/۵۲۱۱	۱/۰۰۰۰	۸/۱۱۷۵	۱/۰۰۰۰	۵/۶۷۳۱	-۰/۲۳۹۸	۰/۱۰۳۵	۱۲۸/۹۹۴۲	C-S

که وابسته به فاصله میان دو اتم است، سهم پیوندهای سیگما، پای- پای دوم لحاظ می‌شود. بایستی در نظر داشت که مرتبه‌های پیوند در هر گام زمانی مورد محاسبه دوباره قرار می‌گیرند. در رابطه (۲) پارامترهای P_{bo,۱}، P_{bo,۲}، P_{bo,۳}، P_{bo,۴}، P_{bo,۵} و P_{bo,۶} به ترتیب نشان‌دهنده مرتبه‌های پیوند سیگما، پیوند پای اول و پیوند پای دوم است. مقادیر این پارامترها در جدول (۲) آورده شده است. به این ترتیب، مقدار انرژی پیوندی با محاسبه مقدار BO_{ij}' به‌عنوان مرتبه پیوند اصلاح شده، طبق رابطه (۳) محاسبه می‌شود. مقادیر مربوط به P_{bo,۱}، D_e و P_{bo,۲} در جدول (۲) مشخص شده‌اند.

$$BO_{ij}' = BO_{ij}^{\sigma} + BO_{ij}^{\pi} + BO_{ij}^{\pi\pi} = \exp\left[p_{bo,1} \cdot \left(\frac{r_{ij}}{r_0^{\sigma}}\right)^{P_{bo,2}}\right] + \exp\left[p_{bo,2} \cdot \left(\frac{r_{ij}}{r_0^{\pi}}\right)^{P_{bo,3}}\right] + \exp\left[p_{bo,3} \cdot \left(\frac{r_{ij}}{r_0^{\pi\pi}}\right)^{P_{bo,4}}\right] \quad (2)$$

$$E_{bond} = D_e \cdot BO_{ij}' \cdot \exp\left[p_{be,1} \left(1 - (BO_{ij}')^{P_{be,2}}\right)\right] \quad (3)$$

رابطه (۴) مقدار انرژی زاویه والانس ناشی از انحراف زاویه Θ_{ijk} را از زاویه تعادلی Θ_0 تعیین می‌کند که پارامتر Δ_j برای اتم‌ها به‌عنوان تفاوت میان مرتبه پیوند کل در اطراف اتم و تعداد الکترون پیوندی والانس تعریف می‌شود. زاویه تعادلی Θ_0 برای Θ_{ijk} ، وابسته به مجموع مرتبه‌های پیوند π اطراف اتم مرکزی j و تغییرهای زاویه‌ای آن است. مقادیر پارامتری برای تعیین انرژی زاویه‌ای والانس در جدول (۳) مشخص شده است. مقادیر $f_1(BO_{jk})$ و $f_1(\Delta_{ij})$ در رابطه (۴) بر اساس

با استفاده از الگوهای درج شده توسط بوخالوو و همکاران [۲۱] که به‌عنوان ساختارهای پایدار اکسید گرافنی (با در نظرگیری گروه‌های عاملی هیدروکسی به‌همراه اپوکسی روی ورقه گرافنی و هر یک از گروه‌های عاملی هیدروکسی و اپوکسی به‌صورت مجزا مورد محاسبه قرار گرفته‌اند)، به‌صورت پشت و رو در ساختارهای مربوطه لحاظ شده‌اند.

۲-۲- روش حل روابط و شبیه‌سازی دینامیک مولکولی

مدل‌سازی برهمکنش‌ها در این تحقیق از طریق میدان نیروی واکنشی [۲۲] صورت گرفته است که در واقع میدان نیروی غیرپیوندی بوده و تشخیص پیوندها برحسب فاصله بین دو اتم در ساختار مربوطه، برطبق ضریب‌های کوانتومی که در میدان نیروی لحاظ شده است، صورت می‌گیرد. از این‌رو نیروی پتانسیل در نظر گرفته شده از نوع پتانسیل‌های عمومی وابسته به مرتبه پیوند^۶ است. انرژی سیستم به‌صورت مجموعی از انرژی‌های معین است که صورت کلی آن در رابطه (۱) آورده شده است. هر یک از جمله‌های مربوط به برهمکنش‌های درون‌مولکولی به‌ترتیب به کشش پیوندی^۷ و خمش زاویه‌ای^۸ در میان سه اتم و انرژی زاویه پیچشی^۹، و اندروالسی^{۱۰} و کولومبیک^{۱۱} اشاره خواهند داشت که ثوابت مؤثر در توابع برهمکنشی متناظر در ادامه ذکر شده‌اند [۲۳].

$$E_{system} = E_{bond} + E_{val} + E_{tors} + E_{Hbond} + E_{vdWaal} + E_{Coulomb} \quad (1)$$

با تعریف پارامتر BO_{ij}'، به‌عنوان مرتبه پیوند بین یک جفت اتم

جدول ۳- پارامترهای میدان نیروی واکنشی برای تعیین انرژی خمش- زاویه‌ای سیستم در نظر گرفته شده

$P_{val,r}$	$P_{val,r}$	$P_{val,r}$ (رادیان) ^{-۲}	$P_{val,r}$ (کیلوکالری بر مول)	Θ_o (درجه)	زاویه‌های والانس
۱/۰۴۰۰	۰/۱۶۷۶	۲/۱۸۸۴	۱۳/۶۳۳۸	۷۰/۰۲۶۵	C-C-C
۱/۰۴۰۰	۰/۱۱۵۳	۸/۴۳۲۶	۱۰/۳۵۴۴	۶۹/۱۷۸۶	C-C-H
۱/۰۴۰۰	۰/۱۳۶۷	۲/۹۲۹۴	۱۱/۸۶۲۹	۷۴/۶۰۲۰	H-C-H
۱/۱۸۸۰	۱/۱۱۲۷	۳/۵۲۴۴	۱۶/۷۱۰۵	۷۲/۹۵۸۸	C-C-O
۱/۱۸۸۰	۱/۱۱۲۷	۲/۱۴۸۷	۴۵/۰۰۰۰	۸۰/۰۷۰۸	O-C-O
۱/۱۸۸۰	۱/۱۱۲۷	۱/۲۲۴۲	۴۵/۰۰۰۰	۶۱/۵۰۵۵	C-C-N
۱/۰۵۰۰	۰/۰۷۵۵	۳/۸۲۱۲	۱۳/۶۴۰۳	۶۶/۶۱۵۰	H-C-O
۱/۰۵۰۰	۰/۰۷۵۵	۳/۱۴۴۹	۱۶/۳۵۷۵	۶۸/۹۶۳۲	H-C-N
۱/۰۷۸۳	۰/۶۱۴۲	۰/۷۰۶۷	۴۵/۰۰۰۰	۷۹/۱۰۹۱	C-O-C
۱/۰۵۰۰	۰/۱۲۱۸	۱/۳۱۳۶	۴۴/۷۲۲۶	۷۸/۱۵۳۳	C-O-H
۱/۰۵۰۰	۱/۶۷۷۷	۱/۵۹۲۳	۲۲/۹۸۹۱	۶۶/۱۴۷۷	C-N-C
۱/۰۴۰۰	۰/۰۵۵۹	۱/۸۷۸۷	۲۵/۰۵۶۰	۷۴/۹۳۹۷	C-C-S
۱/۰۴۰۰	۰/۰۵۵۹	۲/۰۹۰۳	۳۶/۹۹۵۱	۸۶/۹۵۲۱	C-S-C
۱/۰۴۰۰	۰/۰۰۰۰	۱/۸۷۸۷	۲۵/۰۵۶۰	۷۴/۹۳۹۷	H-C-S

در جدول، بیانگر آن است که هر کدام از اتم‌های موجود در سیستم می‌تواند در نظر گرفته شود.

$$E_{tors} = f_r(BO_{ij}, BO_{jk}, BO_{kl}) \cdot \sin \Theta_{ijk} \cdot \sin \Theta_{jkl} \times \left[\frac{1}{V} \cdot V_i \cdot \exp \left\{ p_{tor} \cdot (BO_{jk} - 1 + f_r(\Delta_i, \Delta_k)) \right\} \right]^2 \times (1 - 2 \cos \omega_{ijkl}) + \frac{1}{V} \cdot V_j \cdot (1 + \cos^3 \omega_{ijkl}) \quad (5)$$

$$f_r(BO_{ij}, BO_{jk}, BO_{kl}) = \left[1 - \exp(BO_{ij}) \right] \cdot \left[1 - \exp(BO_{jk}) \right] \times \left[1 - \exp(BO_{kl}) \right] \quad (الف-۵)$$

$$f_r(\Delta_j, \Delta_k) = \frac{2 + \exp(-\Delta_j - \Delta_k)}{1 + \exp(-\Delta_j - \Delta_k) + \exp(-\Delta_j + \Delta_k)} \quad (ب-۵)$$

رابطه (۶) وابستگی انرژی پیوندهای هیدروژنی به مرتبه پیوند را در میدان نیروی برهمکنشی به کار گرفته شده، نشان می‌دهد. در جدول (۵) مقادیر مربوط به p_{hb} ، p_{hb} ، p_{hb} ، r_{hb}^0 تعیین انرژی پیوندهای هیدروژنی E_{Hbond} نشان داده شده است.

$$E_{Hbond} = p_{hb} \cdot \left[1 - \exp(p_{hb} \cdot BO_{XH}) \right] \times \exp \left[p_{hb} \cdot \left(\frac{r_{hb}^0}{r_{HZ}} + \frac{r_{HZ}}{r_{hb}^0} - 2 \right) \right] \cdot \sin^2 \left(\frac{\Theta_{XHZ}}{2} \right) \quad (6)$$

رابطه (۴- الف) و (۴- ب) مورد محاسبه قرار می‌گیرند. پارامتر $f_1(BO_{ij})$ سهم انرژی والانس را که به آزادی در طی از هم گسیخته شدن پیوند ناپدید می‌شود، لحاظ می‌کند و نیز با در نظرگیری $f_r(\Delta_j)$ ، تأثیر کئوردیناسیون اضافی و کاهش کئوردیناسیون در اتم مرکزی، بر انرژی زاویه‌ای والانس در نظر گرفته می‌شود:

$$E_{val} = f_1(BO_{ij}) \cdot f_1(BO_{jk}) \cdot f_r(\Delta_j) \times \left\{ p_{val} - p_{val} \exp \left[-p_{val} (\Theta_o(BO) - \Theta_{ijk}) \right] \right\} \quad (۴)$$

$$f_1(BO_{ij}) = 1 - \exp(-BO_{ij}^{p_{val}}) \quad (الف-۴)$$

$$f_r(\Delta_j) = \frac{2 + \exp(\Delta_j)}{1 + \exp(\Delta_j) + \exp(-p_{val} \cdot \Delta_j)} \quad (ب-۴)$$

رابطه (۵) مقدار انرژی پیچشی را به عنوان تابعی از مرتبه پیوند مشخص می‌سازد و پارامتر Δ به عنوان پارامتر تأثیرگذار، اثر کئوردیناسیون اضافی و کاهش یافته کئوردیناسیون اتم را اعمال می‌کند. مقادیر $f_r(\Delta_j, \Delta_k)$ و $f_r(BO_{ij}, BO_{jk}, BO_{kl})$ به ترتیب با توجه به روابط (۵- الف) و (۵- ب) مشخص می‌شوند. مقادیر ثوابت تابع پیچشی در جدول (۴) ذکر شده است که اتم نامشخص در برخی از زوایای پیچشی تعریف شده

جدول ۴- پارامترهای میدان نیروی واکنشی برای تعیین انرژی پیچشی سیستم در نظر گرفته شده

P_{tor}	V_p (کیلوکالری بر مول)	V_1 (کیلوکالری بر مول)	زاویه‌های پیچشی
-۴/۶۲۲۰	۰/۱۸۱۱	۲۳/۲۱۶۸	C-C-C-C
-۵/۷۱۰۶	۰/۳۵۹۰	۴۵/۷۹۸۴	C-C-C-H
-۵/۱۷۲۵	۰/۳۴۸۶	۴۴/۶۴۴۵	H-C-C-H
۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	X-C-H-X
-۳/۰۱۸۱	۰/۵۵۹۰	۱۶/۷۳۴۴	X-C-O-X
-۴/۴۴۱۴	۰/۳۸۵۵	۶۶/۲۰۳۶	X-C-N-X
-۲۴/۲۵۶۸	۰/۰۰۰۰	۰/۹۳۰۵	X-C-C-X
-۲/۱۷۱۱	۰/۰۳۶۵	۳۰/۳۴۳۵	X-C-S-X

جدول ۵- پارامترهای میدان نیروی واکنشی برای تعیین انرژی برهمکنش‌های پیوند هیدروژنی

P_{hbr}	P_{hb}	P_{hb1}	I_{hb}^0	اتم‌های پیوند هیدروژنی
۱/۷۲۹۵	۳/۵۰۰۰	-۶/۶۸۱۳	۲/۰۴۳۱	O-H-O
۱/۷۲۹۵	۳/۵۰۰۰	-۱۰/۹۵۸۱	۱/۶۷۴	O-H-N
۱/۷۲۹۵	۳/۵۰۰۰	-۹/۶۴۶۵	۱/۴۸۸۹	N-H-O
۱/۷۲۹۵	۳/۵۰۰۰	-۸/۰۰۷۴	۱/۸۳۲۴	N-H-N
۱/۷۲۹۵	۳/۵۰۰۰	-۳/۹۵۴۷	۲/۶۶۴۴	O-H-S
۱/۷۲۹۵	۳/۵۰۰۰	-۵/۷۰۳۸	۴/۰۴۷۶	N-H-S
۱/۷۲۹۵	۳/۵۰۰۰	-۴/۵۷۹۰	۲/۱۱۲۶	S-H-O
۱/۷۲۹۵	۳/۵۰۰۰	-۵/۷۰۳۸	۲/۲۰۶۶	S-H-N
۱/۷۲۹۵	۳/۵۰۰۰	-۴/۰۰۰۰	۱/۹۴۶۱	S-H-S

است و بارهای اتمی با استفاده از متد تعادلی الکترون محاسبه می‌شوند. مقادیر اولیه برای روش تعادلی الکترون، پارامترهای η (eV)، χ (eV) و γ (Å) بوده که در جدول (۷) نشان داده شده‌اند.

$$E_{Coulomb} = C \cdot \frac{q_i \cdot q_j}{[r_{ij}^3 + \left(\frac{\gamma}{\gamma_{ij}}\right)^3]^{1/3}} \quad (۸)$$

شبیه‌سازی دینامیک مولکولی مربوطه تحت کد لمپس^{۱۴} و با قرارگیری ساختارهای پلیمری در فاصله نه آنگستروم از گرافن و اکسید گرافن، با میزان شعاع قطع برابر ۱۲ آنگستروم [۱۵] صورت گرفته است؛ که مقدار شعاع قطع نسبت به فاصله میان پلیمر و نانوساختارهای کربنی (به‌عنوان فیزیک مسئله)، بیشتر در نظر گرفته شده است. در همه شبیه‌سازی‌ها به مدت ۷۰ پیکوثانیه از هنگرد کانونی^{۱۵} و از ترموستات نوز-هورر^{۱۶} برای

برهمکنش‌های واندروالس با استفاده از معادله پتانسیلی مورس تصحیح شده^{۱۲} رابطه (۷) مورد محاسبه قرار گرفته‌اند. در این رابطه با تعریف پارامتری با عنوان برهمکنش محافظت شده^{۱۳} که از رابطه (۷-الف) محاسبه می‌شود، از وجود دافعه‌های بسیار بالایی در میان اتم‌های متصل (برهمکنش ۱-۲) و اتم‌های سهم در زاویه والانس (برهمکنش ۱-۳)، جلوگیری شده است. مقادیر D_{ij} به‌عنوان ترم انرژی پایه از یک جفت اتمی، r_{vdw} به‌عنوان شعاع واندروالسی هستند. مقادیر این پارامترها و دیگر پارامترهای مورد نیاز برای محاسبه انرژی واندروالس در جدول (۶) مشخص شده است.

$$f_{\Delta}(r_{ij}) = \left[r_{ij}^{p_{vdw1}} + \left(\frac{1}{\gamma_w}\right)^{p_{vdw1}} \right]^{-1} \quad (۷)$$

محاسبه انرژی کولومبیک با استفاده از رابطه (۸) صورت گرفته

جدول ۶- پارامترهای میدان نیروی واکنشی برای تعیین انرژی برهمکنش‌های وان دروالسی

نوع اتم	D_{ij} (کیلوکالری بر مول)	r_{vdW} (آنگستروم)	ϵ (کیلوکالری بر مول)	α_{ij}	γ_w	P_{vdW}
C	۰/۱۸۱۸	۱/۸۸۵۷	۰/۸۷۱۲	۹/۵۹۲۸	۲/۰۷۸۴	۱/۵۵۹۱
H	۰/۰۶۰۰	۱/۶۰۳۰	۰/۷۶۲۵	۹/۳۹۵۱	۴/۴۱۸۷	۱/۵۵۹۱
O	۰/۰۸۸	۱/۹۷۴۱	۱/۰۸۰۴	۱۰/۲۱۹	۷/۷۷۱۹	۱/۵۵۹۱
N	۰/۱۳۷۶	۱/۹۳۲۴	۰/۸۵۹۶	۱۰/۰۶۷	۷/۸۴۳۱	۱/۵۵۹۱
S	۰/۲۰۹۹	۲/۰۶۷۷	۱/۰۳۳۶	۹/۹۵۷۵	۴/۹۰۵۵	۱/۵۵۹۱

جدول ۷- پارامترهای میدان نیروی واکنشی برای تعیین انرژی برهمکنش‌های کولومبیک

نوع اتم	η (الکترون ولت)	χ (الکترون ولت)	γ (آنگستروم)
C	۶/۹۲۳۵	۵/۷۲۵۴	۰/۸۷۱۲
H	۹/۸۸۳۲	۳/۸۱۹۶	۰/۷۶۲۵
O	۷/۸۳۸۶	۸۵۰۰	۱/۰۸۰۴
N	۶/۳۴۰۴	۶/۸۴۱۸	۰/۸۵۹۶
S	۸/۲۵۴۵	۶/۵۰۰	۱/۰۳۳۶

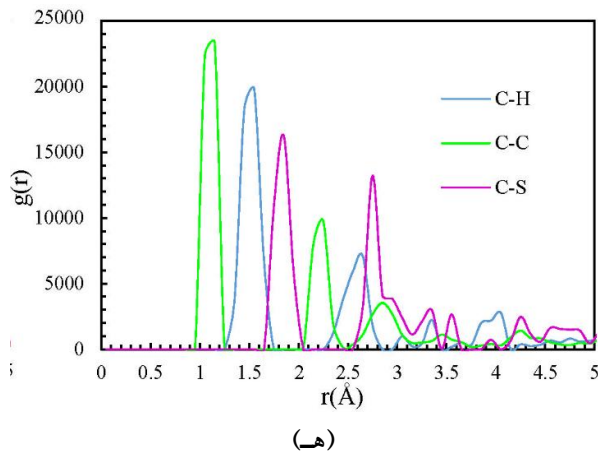
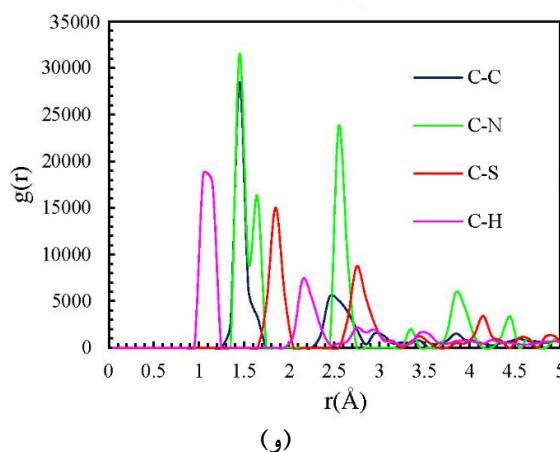
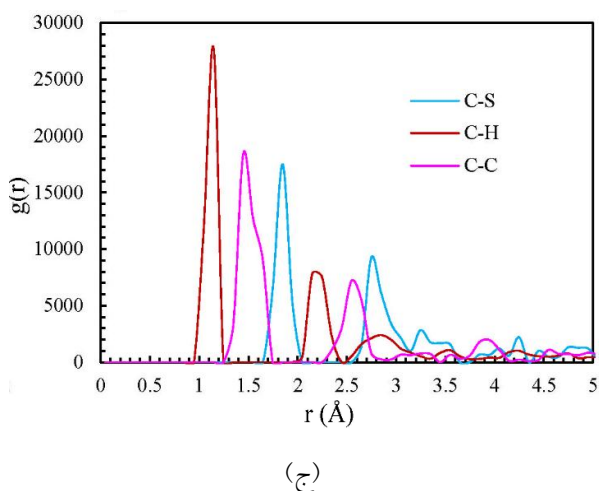
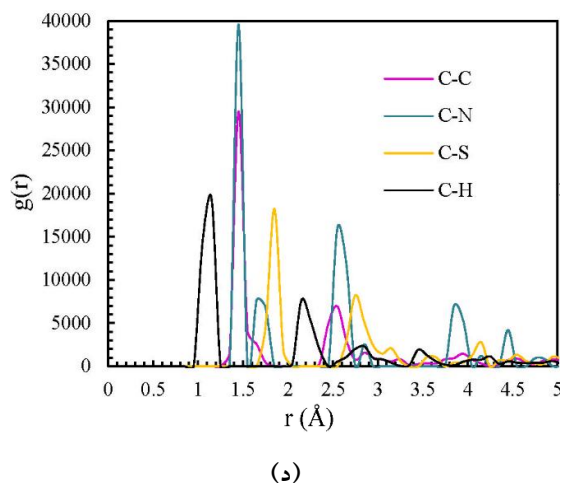
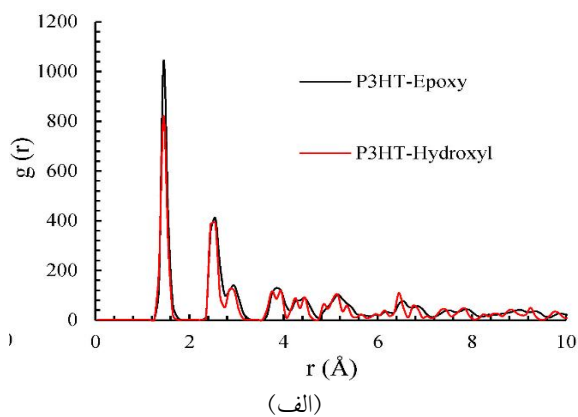
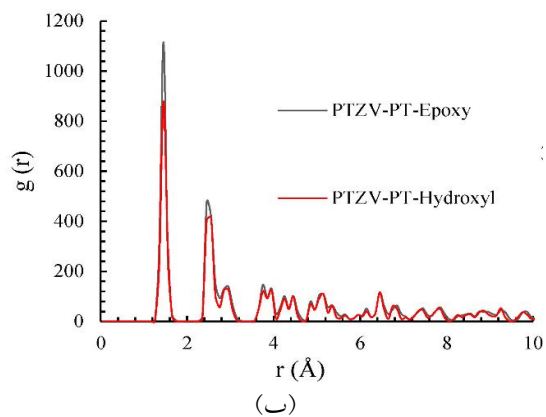
۳-۲-۳- اعتبارسنجی

صحت مقدار طول پیوند بر اساس نمودارهای تابع توزیع شعاعی حاصل از به‌کارگیری میدان نیروی مورد استفاده در مطالعه شبیه‌سازی، به صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی اشاره خواهد داشت. در این تحقیق نیز مطابق شکل (۲- الف و ۲- ب) طول پیوند کربن-کربن در ساختار گرافن عامل‌دار شده با هیدروکسی و اپوکسی (اولین پیک حاصل) را تقریباً برابر با ۱/۴۵ آنگستروم نشان می‌دهد که به مقدار حاصل بر مبنای تابع چگالی شبه پتانسیل^{۱۸} و تحت کد سیستم^{۱۹}، نزدیک است [۲۱]. بر اساس شکل (۲- ج، د، ه و ۲- و) مقدار طول پیوندهای مختلف در دو پلیمر در نانوکامپوزیت‌های مختلف به ترتیب در مورد پلی (۳- هگزیل تیوفن) و گرافن عامل‌دار شده با اپوکسی ۱۵ درصد، پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن و گرافن عامل‌دار شده با اپوکسی ۱۵ درصد، پلی (۳- هگزیل تیوفن) و گرافن عامل‌دار شده با هیدروکسی ۲۵ درصد و پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن و گرافن عامل‌دار شده با هیدروکسی ۲۵ درصد نیز مورد بررسی قرار گرفت. مقدار طول

ثابت نگه‌داشتن دمای سیستم در ۳۰۰ کلوین استفاده شده است. معادلات حرکت با استفاده از الگوریتم ورله^{۱۷} مورد انتگرال‌گیری قرار گرفته و گام زمانی که برای تمام شبیه‌سازی‌ها در نظر گرفته شده است برابر با ۰/۱ فمتوثانیه است [۲۴ و ۲۵]. در نهایت پس از شبیه‌سازی به مدت ۶۵ پیکوثانیه و ایجاد حالت تعادل، با انجام چسبندگی (فیزیکی) پلیمرها روی ورقه‌های گرافنی و اکسید گرافن، به مدت پنج پیکوثانیه و در وقفه‌های ۰/۰۱ پیکوثانیه، برهمکنش‌های انرژی مورد ثبت قرار گرفته است. این برهمکنش‌ها از نوع غیرکووالانسی بوده که منجر به جذب سطحی شده‌اند و میزان انرژی چسبش (فیزیکی) میان نانوساختارهای کربنی و پلیمرها از رابطه (۹) حاصل شده است:

$$E_{\text{Interaction}} = E_{\text{Total}} - E_{\text{Carbon nanostructure}} - E_{\text{Polymer}} \quad (9)$$

که در آن E_{Total} ، $E_{\text{Carbon nanostructure}}$ و E_{Polymer} به ترتیب انرژی پتانسیل نانوکامپوزیت حاصل، انرژی پتانسیل نانوساختار کربنی و انرژی پتانسیل پلیمر هستند. گزارش مقادیر منفی بیانگر ایجاد جذب سطحی خواهد بود.



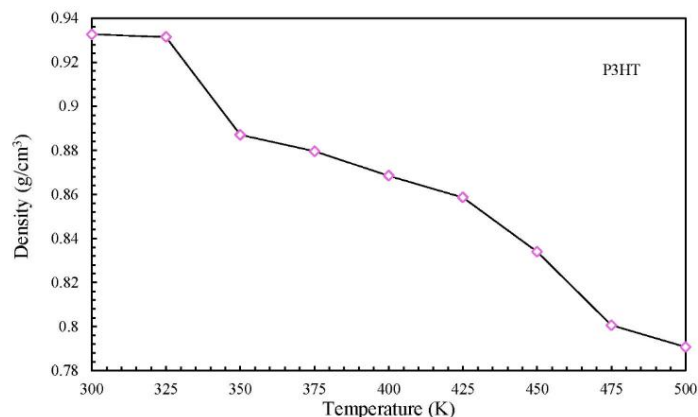
شکل ۲- نمودار تابع توزیع شعاعی کربن- کربن برای گرافن عامل دار شده با اپوکسی و هیدروکسی در نانوکامپوزیت‌های:
 الف) پلی (۳- هگزیل تیوفن)، ب) پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن، ج) د، ه) و و) نمودار تابع توزیع شعاعی جفت اتم‌های مشخص به ترتیب
 در ساختارهای نانوکامپوزیت‌های پلی (۳- هگزیل تیوفن) و گرافن عامل دار شده با اپوکسی ۱۵ درصد،
 پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن و گرافن عامل دار شده با اپوکسی ۱۵ درصد، پلی (۳- هگزیل تیوفن) و گرافن عامل دار شده
 با هیدروکسی ۲۵ درصد و پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن با گرافن عامل دار شده با هیدروکسی ۲۵ درصد (رنگی در نسخه الکترونیکی)

باند‌هایی برابر با $1/43$ آنگستروم (کربن-کربن)، $1/8$ آنگستروم (کربن-سولفور) و $1/05$ آنگستروم (کربن-هیدروژن) و $1/4$ آنگستروم (کربن-نیترژن) در مورد مشتقات پلی‌تیوفنی در نظر گرفته شده در این کار از جمله پلی (۳-هگزیل تیوفن) و پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن با نتایجی برابر با $1/446$ آنگستروم (کربن-کربن)، و $1/1$ آنگستروم (کربن-هیدروژن) حاصل از کار تجربی [۲۶] در مورد پلی (۳-هگزیل تیوفن) انطباق خوبی داشته و به‌طور مشابه در مورد پلیمر پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن نیز منطبق بر کار شبیه‌سازی دیگر برابر با $1/39$ آنگستروم (کربن-کربن)، $1/41$ آنگستروم (کربن-نیترژن) و $1/77$ آنگستروم (کربن-سولفور) بوده است [۲۷].

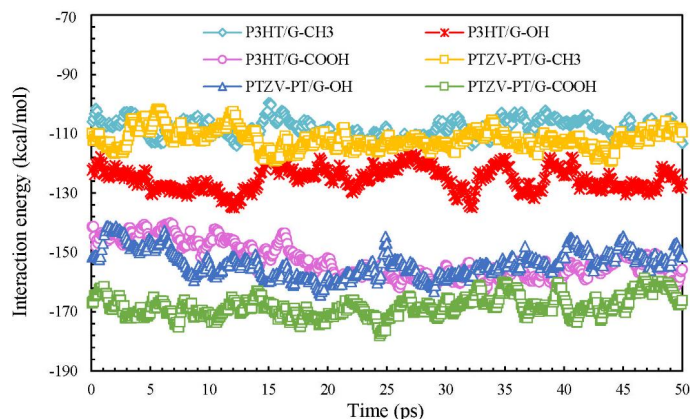
از جمله آنالیزهای بسیار دقیق دیگر انجام شده به‌منظور افزایش اعتبار نتایج حاصل از این کار، می‌توان به مقدار دمای شیشه‌ای محاسبه شده با استفاده از میدان نیروی واکنشی به‌کارگرفته شده در این کار، در مورد پلیمر پلی (۳-هگزیل تیوفن) اشاره کرد و مقایسه‌ای که با میزان دمای تجربی شیشه‌ای پلیمر پلی (۳-هگزیل تیوفن) انجام شده است. در شبیه‌سازی انجام گرفته 30 زنجیره تک مونومری درون جعبه شبیه‌سازی بسیار بزرگی قرار داده شد. سپس به مدت 200 پیکوثانیه سیستم را در دمای 300 کلوین و فشار یک اتمسفر به‌حالت تعادل رسانده و در مرحله بعد دمای سیستم را در بازه‌های دمایی 25 کلوین از دمای 300 کلوین با استفاده از هنگرد هم‌دمای هم‌فشار 20 به دمای 500 کلوین رسانده و مدت زمان هر مرحله برابر با 50 پیکوثانیه بوده است. در شکل (۳) مقدار تغییرات چگالی برحسب دما در فشار یک اتمسفر رسم شده است. مقدار چگالی محاسبه شده در دمای 300 کلوین و فشار یک اتمسفر با استفاده از میدان نیروی مورد استفاده در این کار، برابر با 0.9345 گرم بر سانتی‌متر مکعب بوده است که به مقدار تجربی آن یعنی 0.936 گرم بر سانتی‌متر مکعب [۲۸] بسیار نزدیک است. در شکل (۳)، یک شکستگی در بازه دمایی $350-325$ کلوین مشاهده شد که برابر با دمای شیشه‌ای شدن پلیمر

است و مقدار دمای شیشه‌ای تجربی پلیمر پلی (۳-هگزیل تیوفن) برابر با 340 کلوین [۲۹] است که منطبق با تخمین دمای شیشه‌ای حاصل از شبیه‌سازی انجام گرفته با استفاده از میدان نیروی واکنشی به‌کار گرفته شده، است و بر اعتبار نتایج حاصل از این کار می‌افزاید.

در کارهای شبیه‌سازی دینامیک مولکولی پیشین نیز با به‌کارگیری این میدان نیروی واکنشی، خواص مکانیکی نانوکامپوزیت گرافن و پلیمر پلی تیوفن به‌خوبی و با دقت بالایی محاسبه شده‌اند [۳۰]. در بررسی دیگر با در نظرگیری گروه‌های عاملی کربوکسیل، هیدروکسی و متیل با درصد پوشش یکسان و برابر با پنج درصد روی ورقه گرافنی و اندازه‌گیری میزان جذب سطحی نانوکامپوزیت‌های پلیمری در نظر گرفته شده، بررسی مقایسه‌ای در مورد مقدار انرژی جذب سطحی شکل (۴) صورت گرفت. میزان انرژی برهمکنش در مورد پلیمرهای پلی (۳-هگزیل تیوفن) و ورقه‌های گرافنی عامل‌دار شده به‌وسیله کربوکسیل پنج درصد، هیدروکسی پنج درصد و متیل پنج درصد به‌ترتیب برابر با $152/867$ ، $125/17$ و $108/024$ کیلوکالری بر مول بوده است. در حالی که میزان انرژی برهمکنش در مورد پلیمر پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن با کربوکسیل پنج درصد، هیدروکسی پنج درصد و متیل پنج درصد به‌ترتیب برابر با $168/116$ ، $153/477$ و $111/854$ کیلوکالری بر مول حاصل شد. از این‌رو، به نتایجی کاملاً مشابه با کار نیکخواه و همکاران [۱۵] مبنی بر افزایش جذب سطحی پلیمر در اثر جایگزین کردن گروه‌های عاملی متیل به‌ترتیب با گروه‌های عاملی هیدروکسی و کربوکسیل انجامید که به اعتبار نتایج این کار می‌افزاید. آنچه که نیکخواه و همکاران به‌عنوان عامل مؤثری در افزایش میزان چسبندگی پلیمرها بر روی ورقه گرافنی عامل‌دار شده ذکر کرده‌اند ساختار پلیمری و نیز میزان الکترونگاتیوی گروه‌های عاملی است که گروه‌های عاملی کربوکسیل با الکترونگاتیویته بالاتر نسبت به هیدروکسی موجب افزایش جذب سطحی بیشتر پلیمر و متیل با پایین‌ترین الکترونگاتیوی، از میزان برهمکنش‌ها می‌کاهد. بنابراین،



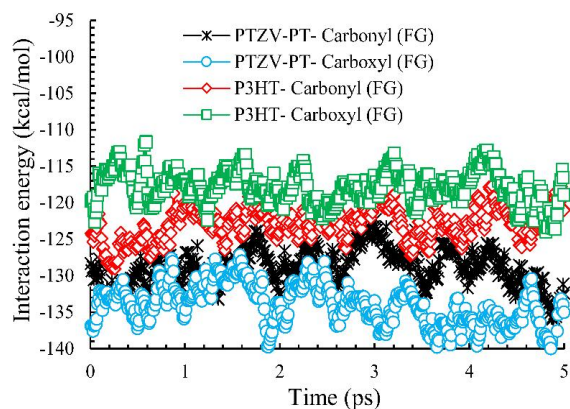
شکل ۳- نمودار تغییرات چگالی پلیمر پلی (۳- هگزیل تیوفن) بر حسب دما



شکل ۴- نمودار انرژی برهمکنش پلیمرهای پلی (۳- هگزیل تیوفن)، پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن و گرافن عامل دار شده با هیدروکسی پنج درصد، متیل پنج درصد و کربوکسیل پنج درصد (رنگی در نسخه الکترونیکی)

گرافن (مبنای اصلی این مقاله نیز است) به طور موفقیت آمیزی مورد استفاده قرار گرفته است و توافق خوبی با مکانیک کوانتوم و نتایج آزمایشگاهی نشان داده است [۳۲ و ۳۳]. از سوی دیگر کلوچی و همکاران [۳۴] نیز جهت ارزیابی برهمکنش‌های کووالانسی و غیرکووالانسی در سیستم اکسید گرافن و ساختارهای آروماتیکی دیگر از این میدان نیروی واکنشی استفاده کرده که با نتایج آزمایشگاهی مطابقت داشته‌اند. این میدان نیروی واکنشی در کارهای تحقیقاتی دیگر در جهت ارزیابی استحکام کامپوزیت‌های اکسید گرافن در حضور آب به کار گرفته شده است که به خوبی قادر به ارزیابی انواع پیوندهای بین مولکولی (مانند هیدروژنی، π - π و ...) با نتایج

مطابق نمودار انرژی برهمکنش بر حسب زمان در مورد نانوکامپوزیت‌های اشاره شده در شکل (۴)، کاملاً منطبق با توالی افزایشی ذکر شده توسط نیکخواه و همکاران بوده است و حداکثر و حداقل میزان برهمکنش‌ها به ترتیب مربوط به زمانی است که ورقه گرافنی با گروه عاملی کربوکسیل و متیل عامل دار شده باشد؛ با توجه به آنکه توالی مقدار انرژی برهمکنش ذکر شده در مورد گروه‌های عاملی کربوکسیل، هیدروکسی و متیل، کاملاً منطبق با روند مقدار الکترونگاتیوی محاسبه شده بر مبنای روش برتس^{۲۱} در مورد گروه‌های عاملی ذکر شده به ترتیب برابر با ۲/۸۰، ۲/۶۸ و ۲/۲۸ بوده است [۳۱]. از این میدان نیروی واکنشی در ارزیابی ساختاری اکسید



شکل ۵- نمودار ارزیابی انرژی برهمکنش برحسب زمان برای نانوکامپوزیت‌های ورقه گرافن عامل‌دار شده (با کربوکسیل و کربونیل به‌طور جداگانه)/ پلیمر در طی پنج پیکوثانیه نهایی در ۳۰۰ درجه کلون (رنگی در نسخه الکترونیکی)

پس از آن با برهمکنش‌های $\pi-\pi$ روی ورقه گرافنی، حرکت به سوی سطح گرافن صورت گرفته است و ضمن قرارداشتن روی ورقه گرافنی (برهمکنش‌های $\pi-\pi$)، برهمکنش‌های لحظه‌ای با گروه‌های عاملی در لبه دیگر با گروه‌های عاملی کربوکسیل و کربونیل رخ می‌دهد؛ در مورد گروه‌های عاملی کربوکسیل با برهمکنش‌های الکترواستاتیکی [۳۷ و ۳۸] روبه‌رو بوده که میان واحدهای قطبی $\text{COO}^- \text{H}^+$ و پلیمرها رخ خواهد داد و اما در مورد گروه عاملی کربونیل نیز با اعمال نیروهای واندروالسی، برهمکنش‌های متفاوتی در مورد هر دو پلیمر مشاهده شد.

تصویرهایی از نحوه برهمکنش با گروه‌های عاملی کربوکسیل و کربونیل که بر لبه‌های ورقه گرافنی قرار گرفته‌اند و پلیمر پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی‌تیوفن در شکل‌های (۶- الف، ب، ج و د) در ابتدا و انتهای زمان شبیه‌سازی آورده شده است.

در مورد گروه‌های عاملی اپوکسی و هیدروکسی که روی ورقه گرافنی قرار گرفته‌اند، نتایج حاصل از برهمکنش میان پلی (۳- هگزیل تیوفن) با گرافن و اکسید گرافن در شکل‌های (۷- الف، ب و ج) قابل مشاهده است.

میزان برهمکنش با گرافن کمتر از ورقه‌های اکسید گرافن با نسبت‌های مختلف اکسایشی بوده و تا حدی با افزایش درصد

آزمایشگاهی بوده است [۱۶ و ۳۵] و همچنین با به‌کارگیری این میدان نیرو در حضور آب و مولکول‌هایی آلی نتایجی مطابق با مقادیر آزمایشگاهی حاصل شده است [۳۶]. مواردی چون انطباق نتایج حاصل از این شبیه‌سازی دینامیک مولکولی صورت گرفته با نتایج آزمایشگاهی مورد مشاهده قرار خواهد گرفت.

۳- نتایج و بحث

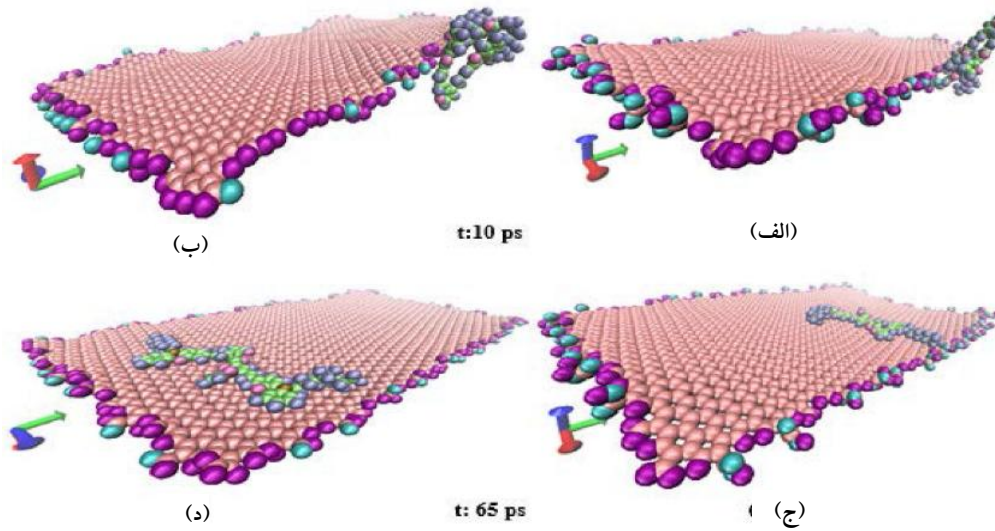
۳-۱- انرژی پتانسیل

انرژی پتانسیل مربوط به نانوکامپوزیت‌های هر دو پلیمر در نانوکامپوزیت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت که نشان‌دهنده آن بوده که پس از چند پیکوثانیه به حالت تعادلی رسیده است.

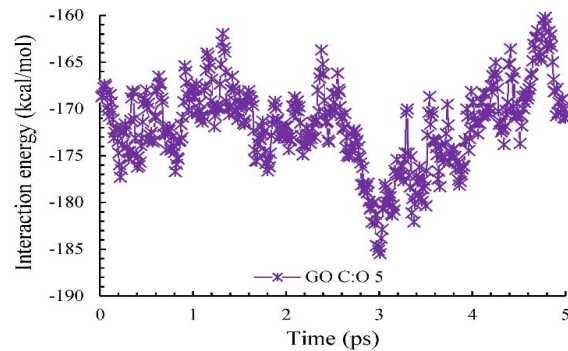
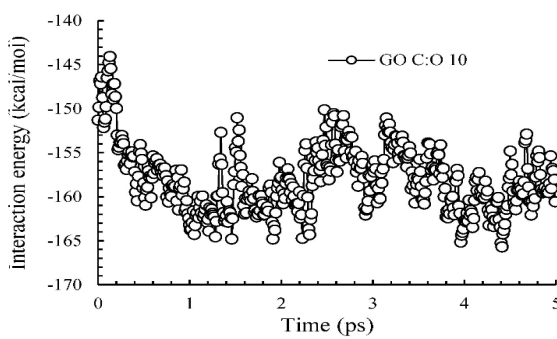
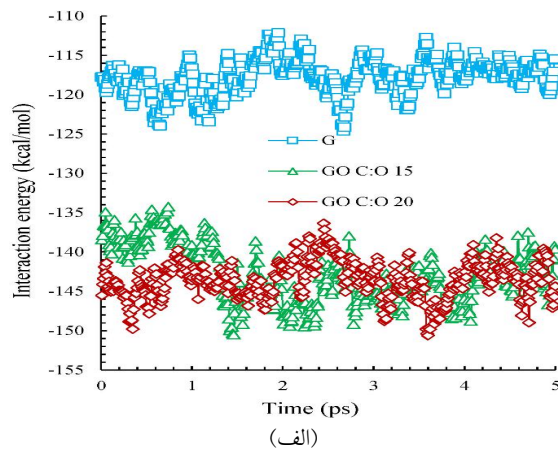
۳-۲- انرژی برهمکنش

۳-۲-۱- انرژی برهمکنش و زمان

انرژی برهمکنش حاصل از قرارگیری جداگانه گروه‌های عاملی کربوکسیل و کربونیل در لبه‌های ورقه‌های گرافن در شکل (۵) آورده شده است. برهمکنش واندروالسی ضعیفی میان گروه‌های کربوکسیل و کربونیل عمدتاً در چند پیکوثانیه اولیه از سوی زنجیره آلکیلی در مورد هر پلیمر مشاهده شد،



شکل ۶- تصویرهای برهمکنش پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن در لحظه ۱۰ پیکوثانیه با گروه‌های عاملی: الف) کربوکسیل، ب) کربونیل روی لبه ورقه گرافن و در لحظه ۶۵ پیکوثانیه با گروه‌های عاملی، ج) کربوکسیل و د) کربونیل



شکل ۷- نمودار ارزیابی انرژی برحسب زمان برای نانوکامپوزیت‌های گرافن و ورقه اکسید گرافن: الف) با نسبت‌های کربن به اکسیژن ۱۵، ۲۰، ب) با نسبت کربن به اکسیژن ۵ و ج) (با نسبت کربن به اکسیژن ۱۰) / پلی (۳- هگزیل تیوفن) در ۳۰۰ درجه کلوین (رنگی در نسخه الکترونیکی)

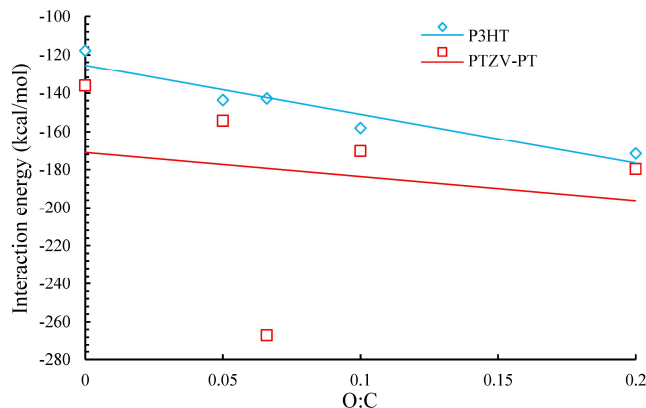
اکسیداسیون بر میزان چسبندگی فیزیکی افزوده شده است. مقدار متوسط انرژی برهمکنش پلی (۳-هگزیل تیوفن) با گرافن و ورقه‌های اکسید گرافن با نسبت کربن به اکسیژن برابر با ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب برابر با ۱۱۷/۷۷۶، ۱۷۱/۵۱۲، ۱۴۲/۸۷ و ۱۴۳/۵۸۹ کیلوکالری بر مول بوده است.

با به‌کارگیری ورقه گرافنی، میزان جذب سطحی پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن برابر با ۱۳۶/۱۳۶ (کیلوکالری بر مول) بوده است. اما مقادیر حاصل در مورد اکسید گرافن با نسبت‌های مختلف، در نسبت کربن به اکسیژن برابر ۱۵ با مقدار متوسط ۲۶۶/۹۷۱ (کیلوکالری بر مول) بیشترین میزان را به خود اختصاص داده و کمترین مقدار متعلق به نسبت برابر ۲۰ به میزان ۱۵۴/۳۸۳ (کیلوکالری بر مول) است؛ ولی در نسبت‌های بالاتر اکسیداسیون و برابر با ۵ و ۱۰، به ترتیب به میزان ۱۷۹/۶۵۳ (کیلوکالری بر مول) و ۱۷۰/۲۹۷ (کیلوکالری بر مول) حاصل شده که مقادیری نزدیک به هم هستند. افزایش میزان برهمکنش‌ها در اکسیدگرافن با نسبت اکسیژن به کربن برابر با ۰/۰۶۵، با مقدار شعاع چرخشی پلیمر پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن بر روی ورقه‌های اکسیدگرافن در نظر گرفته شده نیز کاملاً متناسب است. مقدار شعاع چرخشی پلیمر روی ورقه‌های اکسیدگرافن با نسبت‌های ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ به ترتیب برابر با ۷/۸۱، ۸/۶۰، ۸/۶۱ و ۷/۵۶ است که نشان‌دهنده انبساط پلیمر در نسبت اکسیژن به کربن برابر با ۰/۰۶۵ و ۰/۱ در مقایسه با ورقه‌های دیگر اکسیدگرافن در نظر گرفته شده، بوده است. در نسبت کربن به اکسیژن برابر با پنج که از بیشترین میزان اکسایش برخوردار بوده و در پایین‌ترین نسبت اکسیداسیون، پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن کمترین میزان شعاع چرخشی را به خود اختصاص داده‌اند که نشان از انقباض پلیمر و کاهش میزان جذب سطحی داشته است. در مقایسه میان دو نسبت کربن به اکسیژن برابر با ۱۰ و ۱۵، می‌توان انحراف غیرعادی در مقدار انرژی برهمکنش پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن با

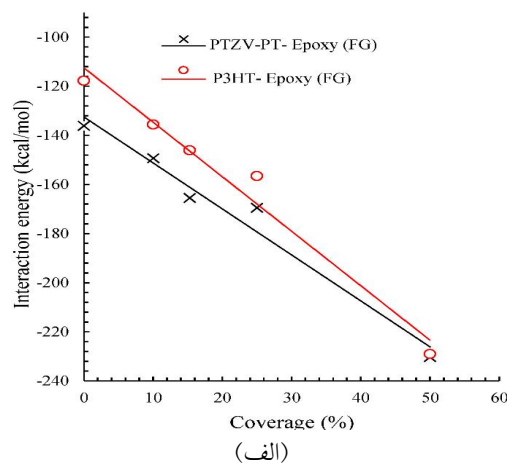
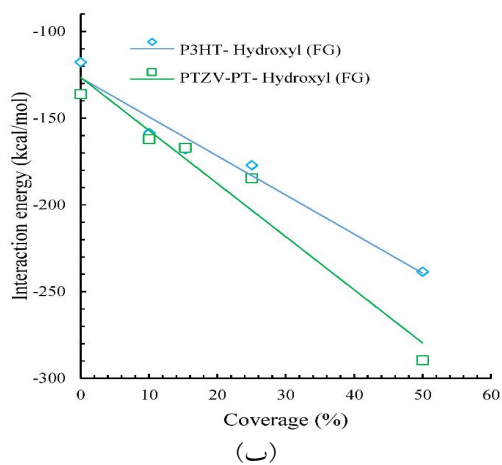
اکسیدگرافن در نسبت اکسیژن به کربن برابر با ۰/۰۶۵ (کربن به اکسیژن برابر با ۱۵) را به دلیل آن دانست که طبق مشاهده، در این نسبت اکسایشی متناسب با تعداد گروه‌های عاملی و نحوه تراکم آنها، پلیمر با انجام حداکثر برهمکنش $\pi-\pi$ به برهمکنش با گروه‌های عاملی روی ورقه اکسیدگرافن نیز پرداخته است. عدم قرارگیری حلقه‌های تیوفنی به صورت مسطح روی ورقه گرافنی و عدم حداکثر برهمکنش $\pi-\pi$ در نسبت‌های بالایی از درصد اکسایش ورقه گرافنی، عامل مطلوبی نبوده است. برهمکنش‌های متفاوت حلقه تیوفنی و فنوتیازین با ورقه گرافنی به علت افزایش تراکم گروه‌های عاملی با چرخش و زاویه‌دار شدن و عدم مسطح بودن قرارگیری پلیمر همراه بوده است. اثر زاویه‌دار بودن حلقه تیوفنی و اثر جهت‌گیری تک حلقه تیوفنی روی ورقه گرافنی و نانولوله گرافنی توسط دنیز و همکاران [۳۹] مورد بررسی قرار گرفته که این جهت‌گیری‌های مختلف، در مقدار میزان جذب سطحی، نتایج متفاوتی را نشان داده‌اند. بنابراین در نسبت اکسیژن به کربن برابر با ۰/۰۶۵ که با حداکثر برهمکنش‌های $\pi-\pi$ در اثر جهت‌گیری مناسب از سوی حلقه تیوفنی و فنوتیازین روی ورقه گرافنی همراه بوده، به برهمکنش با گروه‌های عاملی روی ورقه گرافنی پرداخته است. بنابراین نشان داده شده که لزوماً افزایش گروه‌های عاملی روی ورقه گرافنی منجر به افزایش جذب سطحی نمی‌شود؛ از این رو، نحوه توزیع گروه‌های عاملی و تعداد گروه‌های عاملی را می‌توان از عوامل بسیار مؤثر در میزان جذب سطحی دانست.

۳-۲-۲- انرژی برهمکنش و درصد اکسیداسیون

با توجه به شکل (۸) با تغییر در میزان درصد اکسیداسیون، پلیمر پلی (۳-هگزیل تیوفن) بنا به شیب نمودار نسبت به پلیمر پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن تغییر محسوس‌تری را نشان داده است اما بیشترین میزان برهمکنش متعلق به پلیمر پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن بوده است.



شکل ۸- نمودار ارزیابی انرژی برهمکنش برحسب نسبت اکسیژن به کربن برای نانوکامپوزیت‌های ورقه اکسید گرافن / پلیمر در ۳۰۰ درجه کلوین



شکل ۹- نمودار ارزیابی انرژی برهمکنش برحسب درصد پوشش اپوکسی و هیدروکسی برای نانوکامپوزیت‌های گرافن عامل‌دار شده: (الف) با اپوکسی و (ب) هیدروکسی به‌طور جداگانه / پلیمر در ۳۰۰ درجه کلوین

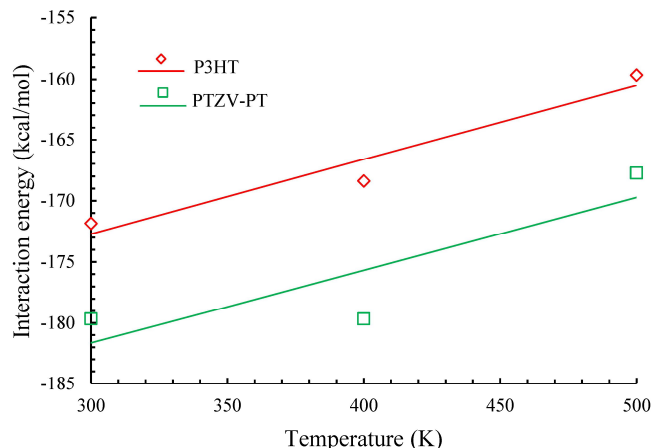
نمودار، کمی بیشتر از تأثیر گروه اپوکسی در مورد پلیمر دیگر در مقایسه با برهمکنش پلیمرها با گرافن بوده است. بر اساس شکل (۹-الف)، میزان برهمکنش گروه عاملی اپوکسی با پلیمر پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن بیشتر بوده است. شکل (۹-ب) نشان می‌دهد که میزان تأثیر گروه عاملی هیدروکسی بر پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن بیش از پلی (۳-هگزیل تیوفن) بوده است.

۳-۲-۴- رابطه دما و انرژی برهمکنش

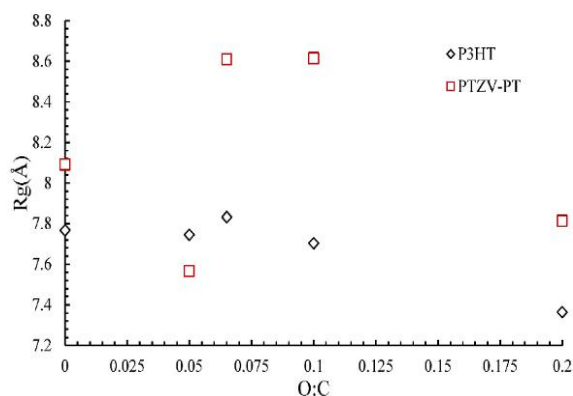
اثر تغییر دما در بازه ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه کلوین بر میزان انرژی

۳-۲-۳- انرژی برهمکنش و درصد پوشش

انرژی برهمکنش در مورد گروه‌های عاملی هیدروکسی و اپوکسی به‌صورت جداگانه مورد مقایسه قرار گرفته است و عامل اصلی ایجاد چسبندگی فیزیکی در مورد هریک از پلیمرها مورد ارزیابی واقع شده است. با توجه به شکل (۹-الف و ۹-ب) می‌توان به‌ترتیب میزان مؤثر بودن گروه عاملی اپوکسی و گروه عاملی هیدروکسی را در مورد جذب سطحی هر دو پلیمر مشاهده کرد؛ در بررسی گروه عاملی اپوکسی مطابق شکل (۹-الف) می‌توان دریافت که میزان تأثیر گروه عاملی اپوکسی روی پلی (۳-هگزیل تیوفن) بنا به شیب



شکل ۱۰- نمودار ارزیابی انرژی برهمکنش برحسب دما برای نانوکامپوزیت‌های ورقه اکسید گرافن (با نسبت کربن به اکسیژن پنج) / پلیمر



شکل ۱۱- نمودار ارزیابی شعاع چرخشی پلیمرها برحسب نسبت اکسیژن به کربن برای نانوکامپوزیت‌های ورقه گرافن و اکسید گرافن / پلیمر در ۳۰۰ درجه کلوین

شعاع چرخش پلیمری استفاده می‌شود. میزان این کمیت از رابطه (۱۰) مورد محاسبه قرار می‌گیرد:

$$R_g = \left(\frac{1}{N} \left\langle \sum_{i=1}^N (r_i - r_{cm})^2 \right\rangle \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

که در آن r_i بردار موقعیت هر اتم در زنجیره مولکولی و r_{cm} بردار مرکز جرم کل زنجیره مولکولی و R_g میزان شعاع چرخش پلیمری را نشان می‌دهد.

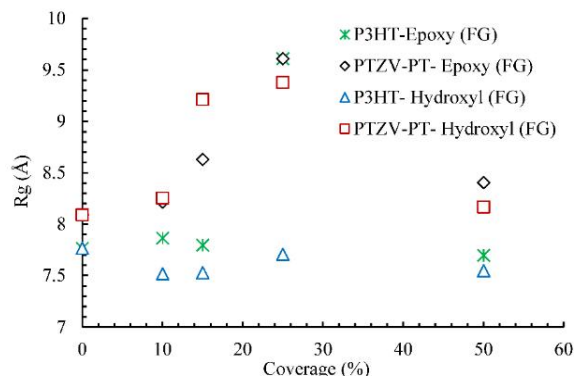
با در نظرگیری شعاع چرخشی پلیمر، با توجه به شکل (۱۱) می‌توان مشاهده کرد که میزان شعاع چرخشی پلیمر نوسان زیادی در برابر افزایش گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار از خود نشان داده است.

برهمکنش در شکل (۱۰) نشان داده شده است. در مورد هر دو نانوکامپوزیت مشاهده می‌شود که میزان انرژی برهمکنش کاهش یافته است. با افزایش دما میزان تحرک زنجیره پلیمری افزایش خواهد یافت، این امر منجر به کاهش میزان جذب سطحی شد. در صورتی که در دماهای پایین‌تر به دلیل ثابت ماندن زنجیره پلیمری و کاهش میزان تحرک آن، برهمکنش بیشتری را در پی خواهد داشت که این اثر با نتایج آزمایشگاهی منطبق بوده است [۴۰].

۳-۳- شعاع چرخشی پلیمر

۳-۳-۱- شعاع چرخشی پلیمر و نسبت اکسیداسیون

برای توصیف میزان فشردگی و ابعاد زنجیری پلیمر از کمیت



شکل ۱۲- نمودار ارزیابی شعاع چرخشی پلیمرها برحسب درصد پوشش گروه‌های عاملی هیدروکسی و اپوکسی برای نانوکامپوزیت‌های ورقه گرافن (دارای اپوکسی و هیدروکسی به‌طور جداگانه)/ پلیمر در ۳۰۰ درجه کلوین

از این‌رو در این تحقیق احتمال حضور اتم‌های مدنظر به‌دلیل برهمکنش‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است [۱۵].

محل پیک‌های موجود در نمودارهای تابع توزیع شعاعی برحسب فاصله در شناسایی این برهمکنش‌ها مؤثر خواهد بود، که وجود پیک‌هایی عمدتاً در فاصله‌های دو تا سه آنگستروم به برهمکنش‌های واندروالسی اشاره داشته و با کاهش فاصله در کمتر از دو آنگستروم بر افزایش شدت برهمکنش‌ها دلالت دارد [۴۱]. وجود پیک‌ها تا فاصله شش آنگستروم نشان‌دهنده آمورفی بودن ساختار است و از شدت برهمکنش‌های بین‌مولکولی کاسته شده است [۴۲].

نتایج حاصل از شبیه‌سازی برهمکنش گروه‌های عاملی هیدروکسی و اپوکسی مطابق با نتایج حاصل از کار آزمایشگاهی چوندر و همکاران [۱۸] در مورد پلی (۳-هگزیل تیوفن) است که اشاره به برهمکنش‌های الکترون‌دهی لحظه‌ای از نوع برهمکنش‌های واندروالسی دارد که با پیک‌ها در نمودارهای تابع توزیع شعاعی در فاصله ۰/۶-۰/۲ نانومتر مطابقت داشته است. این پیک‌ها در نمودارهای تابع توزیع شعاعی در مورد ساختارهای در نظر گرفته شده در (شکل ۱۳-الف، ۱۳-ب، ۱۳-ج و ۱۳-د) مشخص شده‌اند. در مورد پلی (فنوتیازین وینیل)- پلی تیوفن با توجه به وجود زنجیره جانبی با قدرت آروماتیکی بیشتر در هر واحد مونومری نسبت به پلی (۳-هگزیل تیوفن)، افزایش میزان برهمکنش‌ها به‌واسطه

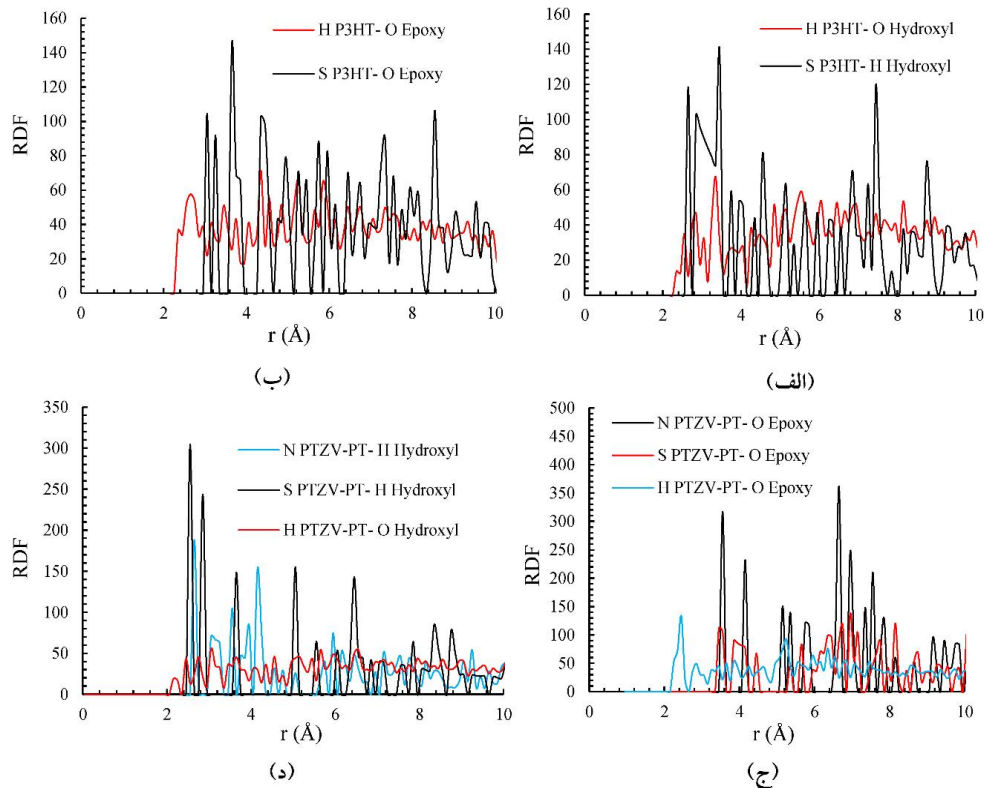
۳-۲-۳- شعاع چرخشی پلیمر و درصد پوشش دهی با گروه عاملی هیدروکسی و اپوکسی

با توجه به شکل (۱۲) می‌توان مشاهده کرد که پلیمر پلی (۳-هگزیل تیوفن) در برهمکنش با اپوکسی میزان نوسان‌های شعاع چرخشی کمتری در مقایسه با هیدروکسی داشته است که می‌تواند نشان‌دهنده چسبندگی فیزیکی یکنواخت‌تری باشد و عدم تغییر بالای مقدار شعاع چرخشی پلیمر پلی (۳-هگزیل تیوفن) نسبت به ساختار پلی (فنوتیازین وینیل)- پلی تیوفن می‌تواند نشان‌دهنده انبساط بیشتر پلی (فنوتیازین وینیل)- پلی تیوفن بر روی ورقه گرافنی عامل‌دار باشد، زیرا میزان سایتهای فعال‌تر بیشتری به‌منظور برهمکنش‌های با گروه‌های عاملی داشته است و منجر به افزایش مقدار شعاع چرخشی پلیمر شده است. در واقع انقباض بیشتر پلیمر پلی (۳-هگزیل تیوفن) نشان‌دهنده میزان صلبی بودن بیشتر ساختار آن است.

۳-۴- تابع توزیع شعاعی و برهمکنش‌های بین‌مولکولی

با توجه به تابع توزیع شعاعی و رابطه (۱۲) می‌توان احتمال وجود تعداد اتم‌های توزیع شده در فاصله r در پوسته کروی شکل به ضخامت Δr از اتم مرکزی مدنظر را مورد محاسبه قرار داد:

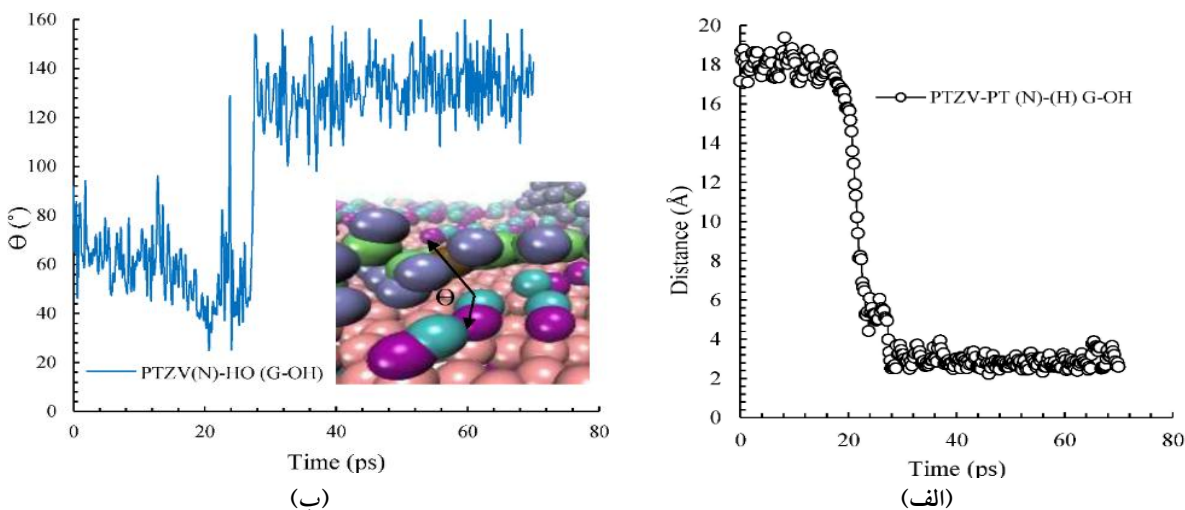
$$g(r) = n(r) / (\rho \frac{4}{3} \pi r^3 \Delta r) \quad (12)$$



شکل ۱۳- پروفایل تابع توزیع شعاعی در محل‌های برهمکنش‌های پلیمر پلی (۳- هگزایل تیوفن): (الف) اپوکسی، (ب) هیدروکسی بر روی ورقه گرافن و پروفایل تابع توزیع شعاعی در محل‌های برهمکنش پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن، (ج) هیدروکسی و (د) اپوکسی در دمای ۳۰۰ درجه کلونین (رنگی در نسخه الکترونیکی)

بیش از ۱۱۰ درجه افزایش باید [۱۱]. بر اساس شکل (۱۴)- (الف) فاصله میان نیتروژن و هیدروژن در گروه‌های عاملی هیدروکسیل به فاصله ای کمتر از سه آنگستروم در فاصله زمانی ۳۰ تا ۷۰ پیکوثانیه رسیده است و مطابق شکل (۱۴-ب) زاویه $N \cdots H \cdots O$ از مقدار ۱۱۰ افزایش یافته است که نشان می‌دهد برهمکنش‌های پیوندهای هیدروژنی با افزایش درصد پوشش هیدروکسی، رخ داده است. ایجاد پیوندهای هیدروژنی میان پلی (فنوتیازین وینیل)- پلی تیوفن (وجود گروه آمین آروماتیکی در فنوتیازین [۴۳]) با گروه عاملی هیدروکسی بر میزان جذب سطحی بیشتر افزوده است. مطلوب بودن گروه‌های عاملی هیدروکسی به‌ویژه در مورد پلیمر پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن (شکل ۹-ب) که در بخش (۳-۲-۳) مورد نتیجه‌گیری

برهمکنش‌های از نوع $\pi-\pi$ الکترون‌دهی لحظه‌ای و هیدروژنی مشاهده است. وجود پیک‌هایی مطلوب با شدت بیشتر در فاصله‌ای کمتر از سه آنگستروم در شکل (۱۳-ج و ۱۳-د) در مورد پلیمر پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن به‌واسطه برهمکنش با گروه‌های عاملی اپوکسی و هیدروکسی است. با توجه به شکل (۱۴) ایجاد پیوندهای هیدروژنی میان اتم نیتروژن در زنجیره جانبی پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن و گروه‌های عاملی هیدروکسی مورد بررسی قرار گرفت. تعریف پیوندهای هیدروژنی در شبیه‌سازی دینامیک مولکولی بر اساس حاصل شدن دو معیار ارزیابی می‌شود که عبارتند از: فاصله میان اتم گیرنده هیدروژن و هیدروژن کمتر از سه آنگستروم و زاویه میان اتم گیرنده هیدروژن و هیدروژن و اتم دهنده هیدروژن به

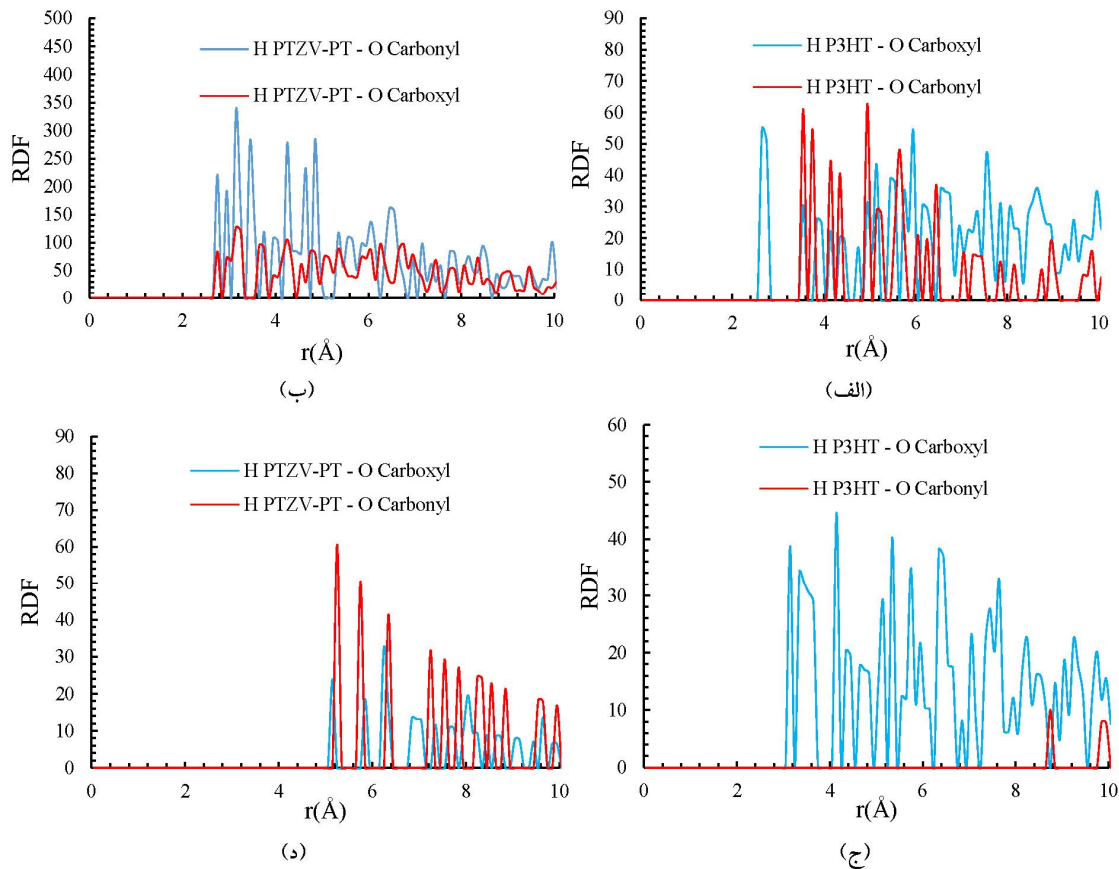


شکل ۱۴- الف) پروفایل تغییرات فاصله میان هیدروژن و نیتروژن، ب) پروفایل تغییرات زاویه چرخشی در $N-H-O$ میان پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن و گروه‌های عاملی هیدروکسی روی ورقه گرافنی در دمای 300° درجه کلونین (گوی‌های آبی کم رنگ و بنفش به ترتیب اتم‌های هیدروژن (هیدروکسی)، اکسیژن و نیلی متالیک، زیتونی، سبز رنگ به ترتیب اتم‌های هیدروژن، کربن و نیتروژن در پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن را نشان می‌دهند) (رنگی در نسخه الکترونیکی)

برهمکنش‌های ضعیفی از سوی زنجیره پلیمری با گروه‌های عاملی در لبه دیگر قابل مشاهده است. با توجه به شکل (۱۵-ج) در مقایسه با شکل (۱۵-د) مشاهده می‌شود که برهمکنش‌های پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن با گروه‌های عاملی کربوکسیل در لبه دیگر در زمان انتهایی نسبت به کربونیل و برهمکنش‌های پلیمر پلی (۳- هگزیل تیوفن) و گروه‌های عاملی (کربوکسیل و کربونیل) بیشتر بوده است. این اثر با بیشتر بودن برهمکنش‌های نشان داده شده در شکل (۵) در مورد پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن و گروه‌های عاملی کربوکسیل در مجموع با برهمکنش‌های $\pi-\pi$ بر روی صفحه گرافن، در مقایسه با پلیمر دیگر مطابقت دارد.

با توجه به مقادیر ثابت انرژی (ε) (مؤثر در میزان برهمکنش‌های واندروالسی)، نتیجه حاصل از برهمکنش بیشتر پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن با ورقه گرافنی نسبت به پلی (۳- هگزیل تیوفن)، به دلیل وجود اتم گوگرد در زنجیره جانبی ساختار پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن است که دارای ثابت انرژی (عمق چاه پتانسیلی) برابر با $1/0.336$ کیلوکالری بر مول

قرار گرفت به دلیل اثر پیوندهای هیدروژنی به‌ویژه در درصد‌های بالای پوشش از گروه عاملی هیدروکسی و در دسترس قرار گرفتن گروه عاملی هیدروکسی در برابر آمین گروه‌های فنوتیازین است. برهمکنش‌ها در مورد هیدروژن (پلیمر) و اکسیژن (گروه‌های عاملی کربوکسیل و کربونیل) با توجه به نمودارهای تابع توزیع شعاعی در زمان‌های ابتدایی و انتهایی شبیه‌سازی بررسی شده‌اند. با توجه به شکل (۱۵-الف و ۱۵-ب) و ارتفاع و محل پیک‌های حاصل در زمان ابتدایی شبیه‌سازی (۱۰ پیکوثانیه)؛ به ترتیب در مورد پلی (۳- هگزیل تیوفن) و پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن می‌توان به نحوه متفاوت برهمکنش‌ها پی برد. برهمکنش‌های پلیمرها در لحظه‌های انتهایی (۶۵ پیکوثانیه) به ترتیب در مورد پلی (۳- هگزیل تیوفن) و پلی (فنوتیازین وینیلن)- پلی تیوفن در شکل (۱۵-ج و ۱۵-د) نیز نشان داده شده است. مطابق مشاهده به دلیل حرکت پلیمرها، پس از برهمکنش‌های کمی با گروه‌های عاملی (کربوکسیل و کربونیل) در لبه ورقه گرافنی و شروع برهمکنش‌ها بر سطح ورقه گرافنی از میزان پیک‌ها کاسته شده است و



شکل ۱۵- پروفایل تابع توزیع شعاعی در محل‌های برهمکنش: الف) پلی (۳-هگزیل تیوفن) و زمان ۱۰ پیکوثانیه، ب) پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن و زمان ۱۰ پیکوثانیه، ج) پلی (۳-هگزیل تیوفن) و زمان ۶۵ پیکوثانیه و د) پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن و زمان ۶۵ پیکوثانیه به‌طور جداگانه با گروه‌های عاملی کربوکسیل و کربونیل در لبه‌های ورقه گرافن در ۳۰۰ درجه کلون (رنگی در نسخه الکترونیکی)

پلی (۳-هگزیل تیوفن) و پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن روی ورقه گرافنی و ورقه‌های اکسید گرافن، میزان انرژی برهمکنش بیشتری در برابر با اکسید گرافن به دلیل اثر گروه‌های عاملی مورد نتیجه‌گیری قرار گرفت. افزایش میزان سطح تماس با به‌کارگیری گروه‌های عاملی و در نتیجه افزایش برهمکنش‌های واندروالسی در برابر گروه‌های عاملی اپوکسی و هیدروکسی و همچنین برهمکنش‌های الکترواستاتیکی (در برابر گروه‌های عاملی کربوکسیل) و نیز پیوندهای هیدروژنی در مورد پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن) که به آن اشاره شد، افزون بر برهمکنش‌های π - π ، منجر به افزایش میزان جذب سطحی روی اکسید گرافن شده است. آنچه که نقش تعیین کننده‌ای در میزان

بوده که در مقایسه با مقدار این کمیت در مورد کربن و برابر با ۸۷۱۲/ کیلوکالری بر مول، افزایش مقدار انرژی برهمکنش‌های واندروالسی را موجب می‌شود که با نتایج حاصل از شبیه‌سازی منطبق است.

همچنین با توجه به مطالب ذکرشده در بخش (۲-۳) (اعتبارسنجی) و نمودارهای تابع توزیع شعاعی حاصل در توافق با نتایج آزمایشگاهی، منجر به آن شده که نتایج حاصل از این کار بر مبنای میدان نیروی واکنشی قابل استناد باشد.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، با بررسی میزان جذب سطحی دو پلیمر مزدوج

شعاع چرخشی پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن نسبت به پلی (۳-هگزیل تیوفن) روی گرافن نشان‌دهنده ساختار گسترده‌تر آن است، که با آزمون اکسید گرافن میزان افت و خیزهای بزرگ‌تری در مقادیر شعاع چرخشی پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن مشاهده شد. از سوی دیگر در مورد پلی (۳-هگزیل تیوفن)، ساختار صلبی آن و فشردگی بیشتر، نشان از انجام برهمکنش‌ها در شعاع محدودتری داشت. در مرحله نهایی نیز با استفاده از آنالیز تابع توزیع شعاعی نوع و محل وقوع این برهمکنش‌ها مورد شناسایی قرار گرفته شد.

برهمکنش‌ها داشته است، در واقع ساختار خاص هر پلیمر است که این عامل، در بزرگی مقادیر انرژی برهمکنش حاصل از پلی (فنوتیازین وینیلن) - پلی تیوفن در برابر سایر گروه‌های عاملی مورد آزمون مشاهده شد؛ زیرا دارای زنجیره جانبی با میزان آروماتیسیت بالا و مستحکم ناشی از اتصال حلقه‌های فنوتیازین، حلقه تیوفنی و گروه وینیلنی است و نسبت به پلیمر رسانای پلی (۳-هگزیل تیوفن)، با گستردگی بیشتری به انجام برهمکنش با سایت‌های فعال روی ورقه‌های گرافن و اکسید گرافن پرداخته است. مقادیر بزرگ‌تر درج شده به‌عنوان میزان

واژه‌نامه

1. active layer	8. angle bending	(LAMMPS)
2. allotrope	9. torsion	15. canonical ensemble (NVT)
3. polymer consistent force field (PCFF)	10. van der Waals	16. Nosé-Hoover thermostat
4. Reactive force fields (ReaxFF)	11. coulombic	17. Verlet
5. material studio	12. corrected Morse potential	18. pseudopotential density functional
6. bond order	13. shielded interaction	19. SIESTA
7. bond stretching	14. large-scale atomic/molecular massively parallel simulator	20. isothermal-isobaric ensemble
		21. Bratsch

مراجع

- Kim, H., Abdala, A. A., and Macosko, C. W., "Graphene / polymer Nanocomposites", *Macromolecules*, Vol. 43, pp. 6515-6530, 2010.
- Chirvase, D., Chirvase, D., Parisi, J., Hummelen, J. C., and Dyakonov, V., "Influence of Nanomorphology on the Photovoltaic Action of Polymer-fullerene Composites", *Nanotechnology*, Vol. 15, p. 1317, 2004.
- Rusanov, A., "Thermodynamics of Graphene", *Surface Science Reports*, Vol. 69, pp. 296-324, 2014.
- Nika, D. L., and Balandin, A. A., "Two-dimensional Phonon Transport in Graphene", *Journal of Physics: Condensed Matter*, Vol. 24, p. 233203, 2012.
- Jiang, J. -W., Wang, J.- S., and Li, B., "Young's Modulus of Graphene: a Molecular Dynamics Study", *Physical Review B*, Vol. 80, p. 113405, 2009.
- Du, J., and Cheng, H. M., "The Fabrication, Properties, and uses of Graphene/polymer Composites", *Macromolecular Chemistry and Physics*, Vol. 213, pp. 1060-1077, 2012.
- Liu, Z., Liu, Q., Huang, Y., Ma, Y., Yin, S., Zhang, X., Sun, W., and Chen, Y., "Organic Photovoltaic Devices Based on a Novel Acceptor Material: Graphene", *Advanced Materials*, Vol. 20, pp. 3924-3930, 2008.
- Dreyer, D. R., Park, S., Bielawski, C. W., and Ruoff, R. S., "The Chemistry of Graphene Oxide", *Chemical Society Reviews*, Vol. 39, pp. 228-240, 2010.
- Fang, M., Wang, K., Lu, H., Yang, Y., and Nutt, S., "Covalent Polymer Functionalization of Graphene Nanosheets and Mechanical Properties of Composites", *Journal of Materials Chemistry*, Vol. 19, pp. 7098-7105, 2009.
- Chua, C. K., and Pumera, M., "Covalent Chemistry on Graphene", *Chemical Society Reviews*, Vol. 42, pp. 3222-3233, 2013.
- Xu, L., and Yang, X., "Molecular Dynamics Simulation of Adsorption of Pyrene-polyethylene Glycol Onto Graphene", *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 418, pp. 66-73, 2014.
- Bkakri, R., Kusmartseva, O. E., Kusmartsev, F., Song, M., and Bouazizi, A "Degree of Phase Separation Effects on the Charge Transfer Properties of P3HT: Graphene Nanocomposites", *Journal of Luminescence*, Vol. 161, pp. 264-270, 2015.
- Teng, C. -C., Ma, C.-C. M., Lu, C.-H., Yang, S.-Y., Lee, S.-H., Hsiao, M.-C., Yen, M.-Y., Chiou, K.-C., and Lee, T.-M., "Thermal Conductivity and Structure of Non-covalent Functionalized Graphene/epoxy Composites", *Carbon*, Vol. 49, pp. 5107-5116, 2011.

14. Wang, M., Lai, Z. B., Galpaya, D., Yan, C., Hu, N., and Zhou, L., "Atomistic Simulation of Surface Functionalization on the Interfacial Properties of Graphene-polymer Nanocomposites", *Journal of Applied Physics*, Vol. 115, p. 123520, 2014.
15. Nikkhah, S. J., Moghbeli, M., and Hashemianzadeh, S., "Investigation of the Interface Between Polyethylene and Functionalized Graphene: A Computer Simulation Study", *Current Applied Physics*, Vol. 15, pp. 1188-1199, 2015.
16. Compton, O. C., Cranford, S. W., Putz, K. W., An, Z., Brinson, L. C., Buehler, M. J., and Nguyen, S. T., "Tuning the Mechanical Properties of Graphene Oxide Paper and Its Associated Polymer Nanocomposites by Controlling Cooperative Intersheet Hydrogen Bonding", *Acs Nano*, Vol. 6, pp. 2008-2019, 2012.
17. Esmaeili, R., and Dashtbayazi, M. R., "Simulation of Mechanical Properties of Al-SiC Nanocomposite using Molecular Dynamics Method", *Journal of Advanced Materials in Engineering (Esteghlal)*, Vol. 32, No. 2, pp. 43-54, 2013.
18. Chunder, A., Liu, J., and Zhai, L., "Reduced Graphene Oxide/Poly (3-hexylthiophene) Supramolecular Composites", *Macromolecular Rapid Communications*, Vol. 31, pp. 380-384, 2010.
19. Kim, Y., and Lim, E., "Development of Polymer Acceptors for Organic Photovoltaic Cells", *Polymers*, Vol. 6, pp. 382-407, 2014.
20. Bell, J. T., and Mola, G. T., "Improved Charge Transport in P3HT: PCBM Bulk Heterojunction PV Cell under Ambient Environment", *Physica B: Condensed Matter*, Vol. 437, pp. 63-66, 2014.
21. Boukhalov, D. W., and Katsnelson, M. I., "Modeling of Graphite Oxide", *Journal of the American Chemical Society*, Vol. 130, pp. 10697-10701, 2008.
22. Mattsson, T. R., Lane, J. M. D., Cochrane, K. R., Desjarlais, M. P., Thompson, A. P., Pierce, F., and Grest, G. S. "First-principles and Classical Molecular Dynamics Simulation of Shocked Polymers", *Physical Review B*, Vol. 81, p. 054103, 2010.
23. Tongyan, P., Yang, L., and Zhaoyang, W., "Development of an atomistic-based chemophysical environment for modelling asphalt oxidation", *Polymer degradation and stability*, Vol. 97, pp. 2331-2339, 2012.
24. Liu, F., et al., "Investigation of Interfacial Mechanical Properties of Graphene-polymer Nanocomposites", *Molecular Simulation*, Vol. 42, pp. 1165-1170, 2016.
25. Bu, H., Chen, Y., Zou, M., Yi, H., Bi, K., and Ni, Z., "Atomistic Simulations of Mechanical Properties of Graphene Nanoribbons", *Physics Letters A*, Vol. 373, pp. 3359-3362, 2009.
26. Chen, S. A., and Ni, J. M., "Structure/properties of Conjugated Conductive Polymers. 1. Neutral poly (3-alkylthiophene) s", *Macromolecules*, Vol. 25, pp. 6081-6089, 1992.
27. Yang, L., Feng, J. -K., and Ren, A. -M., "Theoretical Study on Electronic Structure and Optical Properties of Phenothiazine-containing Conjugated Oligomers and Polymers", *The Journal of Organic Chemistry*, Vol. 70, pp. 5987-5996, 2005.
28. Huang, D. M., Faller, R., Do, K., and Moulé, A. J., "Coarse-grained Computer Simulations of Polymer/fullerene Bulk Heterojunctions for Organic Photovoltaic Applications", *Journal of Chemical Theory and Computation*, Vol. 6, pp. 526-537, 2009.
29. Yazawa, K., Inoue, Y., Yamamoto, T., and Asakawa, N., "Twist Glass Transition in Regioregulated Poly (3-alkylthiophene)", *Physical Review B*, Vol. 74, p. 094204, 2006.
30. Nayebe, P., and Zaminpayma, E., "A Molecular Dynamic Simulation Study of Mechanical Properties of Graphene-polythiophene Composite with Reax Force Field", *Physics Letters A*, Vol. 380, pp. 628-633, 2016.
31. Bratsch, S. G., "A Group Electronegativity Method with Pauling Units". *Journal of Chemical Education*, Vol. 62, p. 101, 1985.
32. Bagri, A., Mattevi, C., Acik, M., Chabal, Y. J., Chhowalla, M., and Shenoy, V. B., "Structural Evolution During the Reduction of Chemically Derived Graphene Oxide", *Nature Chemistry*, Vol. 2, pp. 581-587, 2010.
33. Abolfath, R. M., and Cho, K., "Computational Studies for Reduced Graphene Oxide in Hydrogen-rich Environment", *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 116, pp. 1820-1827, 2012.
34. Coluci, V. R., Martinez, D. S. f. T., Honorio, J. G., de Faria, A. i. F., Morales, D. A., Skaf, M. S., Alves, O. L., and Umbuzeiro, G. A. "Noncovalent Interaction with Graphene Oxide: the Crucial Role of Oxidative Debris", *The Journal of Physical Chemistry C*, Vol. 118, pp. 2187-2193, 2014.
35. Medhekar, N. V., Ramasubramaniam, A., Ruoff, R. S., and Shenoy, V. B., "Hydrogen Bond Networks in Graphene Oxide Composite Paper: Structure and Mechanical Properties", *Acs Nano*, Vol. 4, pp. 2300-2306, 2010.
36. Abolfath, R. M., Van Duin, A., and Brabec, T., "Reactive Molecular Dynamics Study on the First Steps of DNA Damage by Free Hydroxyl Radicals", *The Journal of Physical Chemistry A*, Vol. 115, pp. 11045-11049, 2011.
37. Terrones, M., Martín, O., González, M., Pozuelo, J., Serrano, B., Cabanelas, J. C., Vega-Díaz, S. M., and Baselga, J., "Interphases in Graphene Polymer-based Nanocomposites: Achievements and Challenges", *Advanced Materials*, Vol. 23, pp. 5302-5310, 2011.
38. Bourlinos, A. B., Gournis, D., Petridis, D., Szabó, T., Szeri, A., and Dékány, I. "Graphite Oxide: Chemical Reduction to Graphite and Surface Modification with

- Primary Aliphatic Amines and Amino Acids”, *Langmuir*, Vol. 19, pp. 6050-6055, 2003.
39. Denis, P. A., and Iribarne, F., “Thiophene Adsorption on Single wall Carbon Nanotubes and Graphene”, *Journal of Molecular Structure: THEOCHEM*, Vol. 957, pp. 114-119, 2010.
40. Wu, C. and Xu, W., “Atomistic Molecular Simulations of Structure and Dynamics of Crosslinked Epoxy Resin”, *Polymer*, Vol. 48, pp. 5802-5812, 2007.
41. Batsanov, S., “Van der Waals Radii of Elements”, *Inorganic Materials*, Vol. 37, pp. 871-885, 2001.
42. Mohammadi, M. and Davoodi, J., “The Glass Transition Temperature of PMMA: A Molecular Dynamics Study and Comparison of Various Determination Methods”, *European Polymer Journal*, Vol. 91, pp. 121-133, 2017.
43. González-Rodríguez, D., and Schenning, A. P., “Hydrogen-bonded Supramolecular π -functional Materials”, *Chemistry of Materials*, Vol. 23, pp. 310-325, 2010.
41. Batsanov, S., “Van der Waals Radii of Elements”,