

Theoretical study of interaction between aspirine drug and Al-soped graphene nanostructure toward designing of suitable nanocarrier for drug delivery

Sara Farshad¹, Masoud Darvish Ganji²

¹ Student, Department of Nanochemistry, Faculty of Pharmaceutical Chemistry, Tehran Medical Sciences, Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Associate Professor, Department of Chemistry, Qaemshahr Branch, Islamic Azad University, Qaemshahr, Iran

Abstract

Background: In recent years, the unique physical and chemical properties of carbon nanostructures has led to many advancements in various fields, including chemistry and pharmaceuticals. Graphene is one of the carbon nanostructures which have attracted significant attention from researchers in adsorption and release of various drugs. Due to the high surface area of graphene, it can be used as a biological carrier in drug delivery. In this study, the interaction of aspirin with a graphene sheet doped with aluminum (graphene-aluminum) and possibility of stable complex formation between them were investigated using the theoretical study.

Materials and methods: The performance of carbon nanostructures for adsorption of aspirin on graphene-aluminum was evaluated using quantum computation. The calculations were performed using density functional theory modified with dispersion forces (DFT-D) and basic functions by using of ORCA software.

Results: Adsorption energy and electronic structure of aspirin /graphene-aluminum system were calculated. The measured adsorption energy and bond distance were -53.08 (kcal/mol) and 1.888 Å, respectively. The distribution of electron charge also indicated the continuity of electron clouds between drugs and nanostructure.

Conclusion: The results showed that a strong bond formed between aspirin and graphene-aluminum and the complex formed in the aqueous medium was thermodynamically stable. Regarding the possibility of stable complex formation, graphene-aluminum was expected to be suitable nanocarrier for delivery of aspirin to target cells.

Keywords: Drug delivery, Aspirin, Graphene doped with aluminum, Energy adsorption, Density functional theory.

Cited as: Farshad S, Darvish Ganji M. Theoretical study of interaction between aspirine drug and Al-soped graphene nanostructure toward designing of suitable nanocarrier for drug delivery. Medical Science Journal of Islamic Azad University, Tehran Medical Branch 2020; 30(2): 141-154.

Correspondence to: Masoud Darvish Ganji

Tel: +98 9111137150

E-mail: Ganji_md@yahoo.com

ORCID ID: 0000-0001-8003-9682

Received: 6 Apr 2019; **Accepted:** 16 Jun 2019

مطالعه نظری برهمکنش بین داروی آسپیرین و نانوساختار گرافنی آلانئیده با
آلومینیم برای طراحی نانوحامل مناسب برای رسانش داروسارا فرشاد^۱، مسعود درویش گنجی^۲^۱دانشجو، دانشکده شیمی دارویی علوم پزشکی تهران، دانشگاه آزاد اسلامی تهران، ایران
^۲دانشیار دانشکده شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد قائم‌شهر، قائم‌شهر، ایران

چکیده

سابقه و هدف: خواص منحصر به فرد فیزیکی و شیمیایی نانوساختارهای کربنی در سال‌های اخیر باعث پیشرفت‌های زیادی در زمینه‌های گوناگون از جمله شیمی و داروسازی شده است. گرافن یکی از نانوساختارهای کربنی است که در جذب و رهایش موثر داروهای گوناگون مورد توجه محققان قرار گرفته است. با توجه به سطح مقطع بالای گرافن می‌توان از آن به عنوان حامل زیستی در رسانش دارویی استفاده کرد. در این پژوهش، با استفاده از مطالعه نظری، برهمکنش داروی آسپیرین با صفحه گرافنی آلانئیده با آلومینیوم (گرافن-آلومینیوم) و امکان تشکیل کمپلکس پایدار بین آنها بررسی شد.

روش بررسی: عملکرد نانوساختارهای کربنی برای جذب آسپیرین روی گرافن-آلومینیوم با استفاده از محاسبات کوانتومی مورد ارزیابی قرار گرفت. محاسبات با روش نظریه تابعی چگالی اصلاح شده با نیروهای پراکندگی (DFT-D) و توابع پایه TZVP و با استفاده از نرم افزار ارکا انجام شد.

یافته‌ها: انرژی جذب و ساختار الکترونیکی سیستم آسپیرین/گرافن-آلومینیوم محاسبه شد. انرژی جذب برابر با ۵۳/۰۸- (کیلوکالری بر مول)، و فاصله پیوندی ۱/۸۸۸ آنگستروم اندازه گیری شد. توزیع بار الکترونی نیز نشان دهنده پیوستگی ابرهای الکترونی بین دارو و نانوساختار بود.

نتیجه‌گیری: نتایج به دست آمده نشان داد پیوند محکمی بین آسپیرین و گرافن-آلومینیوم برقرار شده و کمپلکس تشکیل شده در محیط آبی از نظر ترمودینامیکی پایدار است. با توجه به امکان تشکیل کمپلکس پایدار پیش بینی می‌شود گرافن-آلومینیوم نانوحامل مناسبی برای رسانش آسپیرین به سلول‌های هدف باشد.

واژگان کلیدی: رسانش دارو، آسپیرین، گرافن آلانئیده با آلومینیوم، انرژی جذب، نظریه تابعی چگالی.

مقدمه

نانوفناوری پزشکی (Nanomedicine) علم نظریه‌ها، رویکردها، دستگاه‌ها و ابزارها در مقیاس نانو است که نانوساختارهای ویژه به منظور شناخت، پیشگیری و درمان بیماری‌ها از طریق شناسایی،

ترمیم و بازسازی بافت‌های زیستی آسیب دیده در سطوح ملکولی است. با توجه به پیشرفت‌های زیاد در علم و فناوری سنتی پزشکی طی یک قرن گذشته، همچنان محدودیت‌های بسیاری در شناخت و درمان بنیادی بیماری‌ها و در ابزار شناسایی آنها وجود دارد. هدف فناوری نانو در پزشکی، ارائه امکانات آسیب شناسی و درمان آنها در مقیاس‌های بنیادی ملکولی و یا حتی ریزملکولی است (۱، ۲).

نانوفناوری (Nano Technology) در حیطه داروسازی دارای کاربردهای اساسی است و هدف اصلی آن، طراحی داروهای

آدرس نویسنده مسئول: ایران، قائم‌شهر، دانشگاه آزاد اسلامی، مسعود درویش گنجی

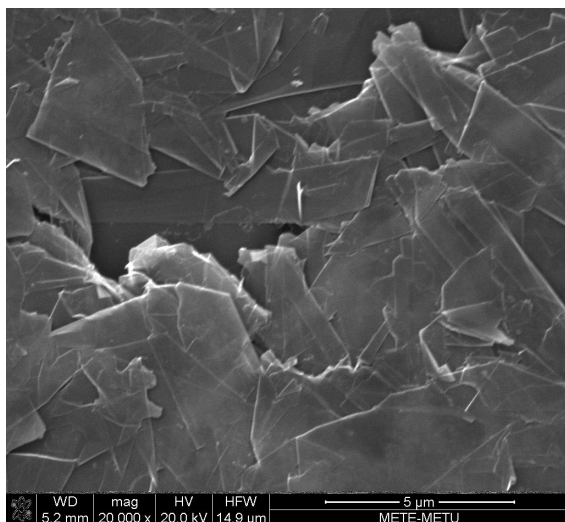
(email: Ganji_md@yahoo.com)

ORCID ID: 0000-0001-8003-9682

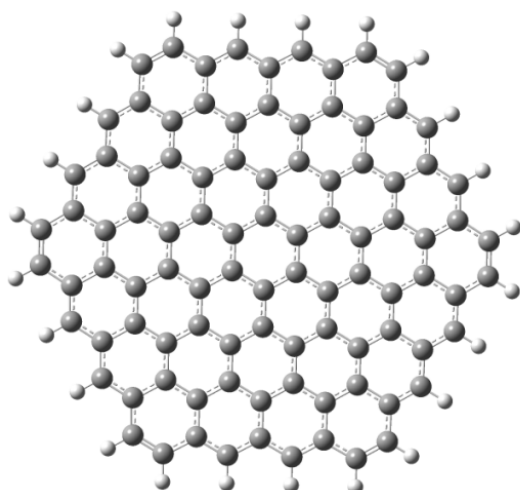
تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۸/۳/۲۶

فرآیندها مولکول‌های آلی با خصلت دارویی روی صفحات گرافن قرار می‌گیرند.



شکل ۱. ساختار لایه‌ای گرافن با میکروسکوپ الکترونی روبشی



شکل ۲. ساختار مولکولی گرافن (کرونن-مانند)

ساختار گرافن، صفحه‌ای شامل ۹۶ اتم کربن که انتهای صفحه گرافنی با اتم‌های هیدروژن بسته شده‌اند، انتخاب شد. این ساختار حلقه مانند به ساختار کرونن-مانند (Coronene-Like) مشهور است. تصویری از صفحه گرافنی در شکل ۲ نشان داده شده است. کشف گرافن، یک دستاورد قابل توجه در زمینه نانومواد کربنی جدید، باعث شده است از سال ۲۰۰۴ به دلیل خواص منحصر به فردش در زمینه استفاده از کاربردهای زیست پزشکی این مواد در سراسر جهان شود. ساختار مسطح دو بعدی، سطح بزرگ، پایداری شیمیایی، ثبات مکانیکی و زیست سازگاری خوب گرافن،

هوشمند و هدف گیر بر پایه بیمار محور و بیماری محور است. این داروها دارای قدرت عمل کنندگی مشخصی هستند و قابلیت درک محیط آسیب دیده در بافت و تصمیم گیری در مورد چگونگی نحوه انتقال خود و مقدار مورد نیاز (Dose) و اجتناب از ایجاد حساسیت و اثرگذاری جانبی هستند. این نوع داروها قبل از رها سازی خود در بافت مورد نظر، توانایی تشخیص مقدار مورد نیاز از دارو را داشته و در صورتی که شرایط لازم برای رها سازی خود را مشاهده نکنند، فعال سازی آنها انجام نمی‌شود. ویژگی اصلی چنین داروهایی پیش بینی دقیق عملکرد آنها است که این ویژگی بسیار مهم در داروهای غیرهوشمند فعلی وجود ندارد (۳، ۴).

نانو ساختارهای کربنی به دلیل دارا بودن خواص منحصر به فرد مانند استحکام مکانیکی بالا، رسانایی الکتریکی و حرارتی زیاد، خصوصیات جالب نوری و سطحی یکی از مورد توجه ترین مواد در بررسی و تحقیقات دانشمندان علوم مختلف در سالهای اخیر بوده است (۵). این نانوساختارها با توجه به خواص سطح ویژه بالا، ساختار مسطح دوبعدی، تجمع π - π و برهمکنش‌های آبریز آن، پایداری شیمیایی و سازگاری با سلول‌های زنده امکان بارگذاری دارو (Drug Loading) به میزان بالایی را داشته و در صورت اصلاح مناسب می‌تواند به عنوان یک گزینه بسیار عالی برای رهایش داروها مورد استفاده قرار گیرد.

گرافن یکی از جدیدترین اعضای این خانواده برشی تک لایه از گرافیت است که در آن لایه‌های کربن در حلقه‌های شش عضوی لانه زنبوری در دو بعد چیده شده‌اند (۶). ساختار لایه‌ای گرافن با میکروسکوپ الکترونی روبشی یا (SEM: Scanning Electron Microscope) در شکل ۱ نشان داده شده است که بیانگر نانویی بودن ساختار مورد نظر دارد.

تحقیقات اخیر بیان کننده پتانسیل‌های گرافن برای کاربردهای گوناگون زیست پزشکی است. گرافن در مقایسه با دیگر آلوتروپ-های کربن، مانند نانولوله‌های کربنی (CNTs) مزایای متعددی با کاربردهای مختلف دارد؛ از جمله آنها، حسگرهای زیستی (۷) (مثل DNA)، آنتی بادی‌ها (۸)، ساکاریدها (۹)، ترکیبات معدنی (۱۰)، مولکول‌های دارویی (۱۱، ۱۲) و تعیین ترکیبات چند جزئی (۱۳) و رسانش دارو که به دلیل سمیت پایین و سازگاری بهتر، مورد توجه قرار دارد (۱۴). به دلیل سطح ویژه بالا (۱۵)، نسبت بارگذاری دارو از نانو مواد گرافنی به طور قابل توجهی بالاتر از سایر سیستم‌های دارو رسانی است (۱۶، ۱۷). گرافن آلاییده (Doped Graphene) از موثرترین مواد جاذب سطحی است و یکی از کاربرد های مهم این جاذب، بررسی میزان جذب و رهایش داروهای خاص در فرایندهای رسانش دارویی است. طی این

نوید بخش کاربرد های آن در سیستم های رسانش دارویی (DDSs: Drug Delivery Systems) است.

کربن یکی از فراوان ترین عناصر در طبیعت است. اتم های کربن می توانند شبکه های پیچیده ای را تشکیل دهند که اساس وجود حیات است. کربن ماده منحصر به فردی است که می تواند در اشکال متفاوتی از محدوده صفر بعدی (0-D) تا سه بعدی (3-D) وجود داشته باشد.

علاوه بر این، آلوتروپ های (Allotropes) کربن خواص متفاوتی، از سخت (الماس) تا نرم (گرافیت)، از عایق (الماس) به نیمه رسانا (گرافیت) و رسانا (گرافن)، و از جاذب نور (گرافیت) تا شفاف (الماس) را می توانند داشته باشند. گرافن و آلوتروپ های خاص آن به دلیل ساختار و هندسه منحصر به فردشان دارای خواص فیزیکوشیمیایی برجسته ای، از جمله استحکام شکست بالا و مدول ینگ، قابلیت الکتریکی و هدایت حرارتی عالی، تحرک سریع حمل بار، سطح ویژه بالا و سازگاری خوب زیستی و در نتیجه به طور گسترده ای در علوم پزشکی و بیوتکنولوژی، از جمله سنسورهای زیستی حساس، سیستم های رسانش دارویی و تکنیک های تصویربرداری فلورسنت مادون قرمز نزدیک (NIR: Near Infrared) هستند (۱۸).

آلوتروپ های کربن، ساختار و خواص مختلفی دارند، اما یک ساختار معمول دو بعدی (2-D) به نام گرافن را به اشتراک می گذارند که برای اولین بار در سال ۲۰۰۴ تهیه شد (۱۹). گرافن می تواند تبدیل به ساختارهای کروی (فولرن [Fullerene]) - صفر بعدی، ساختارهای لوله ای (نانو لوله های کربنی - یک بعدی) یا ساختارهای لایه ای (گرافیت - سه بعدی) شود (۲۰).

کریستال دو بعدی حالت آزاد گرافن از حلقه های شش اتمی در یک شبکه لانه زنبوری به ضخامت یک اتم تشکیل شده است؛ بنابراین گرافن می تواند به عنوان یک ابرمولکول آروماتیک مسطح عمل کند که منجر به چند ویژگی منحصر به فرد می شود.

در ساختار گرافن هر اتم کربن به سه اتم کربن دیگر متصل می شود. طول پیوند C=C برابر با $1/24 \text{ \AA}$ و زاویه پیوند 120° درجه است. هر اتم کربن به شکل سه پیوند σ است که از طریق سه اوربیتال هیبریدی sp^2 با سه اتم کربن تشکیل می شود؛ بقیه اوربیتال های p سیستم های مزدوجی هستند که با دیگر اتم های کربن به هم متصل شده اند. در این سیستم مزدوج، هر اتم کربن یک الکترون p را فراهم می کند. به این ترتیب، اسکلت کربن گرافن از پیوندهای σ با جفت ابر الکترونی بالا و اسکلت پایین ساخته شده است.

یکی از کاربردهای جالب گرافن و اکسید گرافن استفاده از آنها در فرآیندهای رسانش دارویی و عامل دار کردن آنها به وسیله داروها است. طی این فرآیندها مولکول های آلی با خصلت دارویی روی صفحات گرافن قرار می گیرند. برای انجام این فرایند وجود دو فاکتور مهم در نانو ساختارهای گرافن ضروری است. فاکتور اول برهمکنش کوالانسی یا غیرکوالانسی گرافن با مولکول های آلی و فاکتور دوم خصلت آبدوستی آن است که باعث پخش آسان آن در آب یا مایعات زیستی می شود. ایجاد خصلت آبدوستی در صفحات اکسید گرافن با حضور گروه های کربوکسیلات و هیدروکسیلات روی سطح آن صورت می گیرد، ولی در مورد صفحات گرافن، ابتدا باید به وسیله گروه های آبدوست یا پلیمرها عامل دار شود و سپس در فرآیندهای تثبیت و انتقال دارو به کار گرفته شود. به طور معمول، برهمکنش های غیرکوالانسی در تثبیت و انتقال مولکول های دارو در سطح گرافن بر برهمکنش های کوالانسی ترجیح داده می شود، زیرا اگر دارو به وسیله برهمکنش غیر کوالانسی بر سطح گرافن قرار گیرد، جدا شدن آن در مرحله خارج سازی دارو به آسانی صورت می گیرد.

استیل سالیسیلیک اسید (ASA: acetylsalicylic acid) با فرمول مولکولی $C_9H_8O_4$ که به عنوان آسپیرین (Aspirin) شناخته می شود، به علت اثرات شناخته شده آن در کاهش تب و تسکین درد یکی از داروهایی است که به طور گسترده در جهان استفاده می شود. آسپیرین برای کمک به جلوگیری از حملات قلبی، سکنه مغزی، تشکیل لخته خون و سرکوب پروستاگلندین (Prostaglandin) با توجه به اثر ضد پلاکتی آن در کاهش تجمع پلاکتی و مهار تشکیل ترومبوس (Thrombus) استفاده می شود (۲۱). همچنین آسپیرین دارای خاصیت ضد سرطانی است (۲۲) و اثر پیشگیرانه در سکنه مغزی دارد (۲۳). با وجود این آثار خوب، هشدار داده شده است که چنین دارویی بدون نسخه ممکن است دارای عوارض جانبی باشد و در نتیجه افراد باید از مصرف بیش از حد این دارو اجتناب کنند. از آنجا که آسپیرین دارای یک اثر در لایه پوشاننده معده است توصیه می شود که افراد مبتلا به اختلالات معده و روده (Gastroenteric) مثل گاستریت و زخم معده توصیه های پزشکی قبل از استفاده از آسپیرین را مطلع باشند. هنگامی که آسپیرین با الکل مصرف شود، ممکن است خونریزی معده حتی در افراد سالم نیز رخ دهد. بنابراین، اندازه گیری مقدار مولکول ASA در محلول و یا در بدن انسان بسیار مهم است (۲۴). ساختار مولکولی آسپیرین در شکل ۳ نشان داده شده است.

مواد و روشها

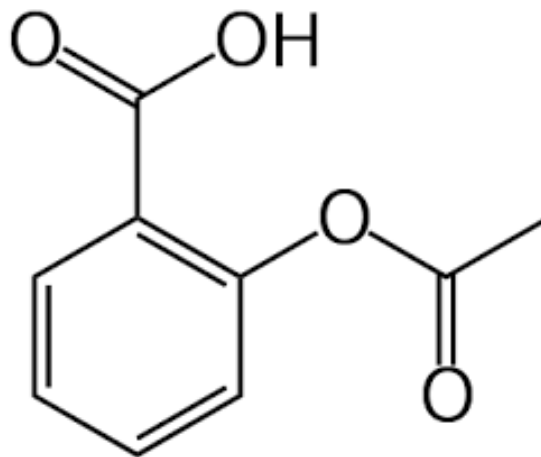
شیمی محاسباتی شاخه‌ای از دانش شیمی است که از مفاهیم فیزیکی و روش‌های ریاضی برای توجیه و تفسیر پدیده‌های شیمی استفاده می‌کند. در واقع در این رشته، مسائل شیمی به کمک رایانه انجام می‌شود و از رایانه برای پیش بینی ساختار مولکولی، خواص مولکولی و واکنش‌های شیمیایی استفاده می‌شود. نتایج حاصل از شیمی محاسباتی معمولاً مکمل اطلاعات حاصل از آزمایش‌های شیمیایی است و در برخی موارد نیز می‌تواند به پیش بینی پدیده‌های مشاهده نشده شیمیایی منجر شود. بنابراین شیمی محاسباتی با قرار گرفتن در کنار شیمی آزمایشگاهی می‌تواند در یافتن موضوعات جدید شیمی با شیمی تجربی رقابت کند.

شیمی محاسباتی شامل مدل سازی مولکولی، طراحی مولکول و روش‌های محاسباتی به کمک رایانه است. همچنین از این رشته در طراحی داروها، کاتالیزورها و مواد در مقیاس نو استفاده می‌شود.

مطالعات محاسباتی می‌تواند نقطه شروعی برای سنتزهای آزمایشگاهی باشد و یا به عنوان یک روش کمکی در بررسی داده های تجربی مثل موقعیت نوارهای طیف سنجی مورد استفاده قرار گیرد. با استفاده از روش‌های محاسباتی، امکان وجود مولکول‌های ناشناخته و یا مکانیزم واکنش‌هایی که امکان مطالعه آزمایشگاهی آنها وجود ندارد، را می‌توان مورد بررسی قرار داد (۲۷، ۲۸).

در پروژه‌های محاسباتی با انجام مدل سازی مدت زمان اجرای محاسبات کاهش می‌یابد. محاسبات شیمی کوانتومی (Quantum Chemical Calculations) ابزار قدرتمندی برای درک جزئیات از واکنش‌های شیمیایی است. در کنار دیگر اطلاعات، ساختار هندسی مولکولی (Molecular Geometry) و انرژی صورتبندی های (Conformations) مختلف، به درک بهتر واکنش‌های فصل مشترک کمک می‌کند (۲۹). روش نظریه تابعی چگالی (DFT: Density Functional Theory) یکی از روش‌های قدرتمند و مطرح در محاسبات کوانتومی است (۳۰). این روش کوانتومی، به طور گسترده‌ای در مدل سازی ساختارهای سطحی واکنش استفاده می‌شود. ابتدا ساختارهای مولکولی مورد نظر مدل سازی شده و سپس بهینه سازی ساختارها جهت رسیدن به انرژی کمینه صورت می‌گیرد و انرژی سیستم‌های مورد نظر محاسبه می‌شوند.

محاسبات نظریه تابعی چگالی در این طرح، با بهره گیری از نرم افزار آرکا (Orca) انجام شد. نرم افزار آرکا، یک برنامه ساختار الکترونی است. فایل اجرایی آرکا برای انواع سیستم عامل‌ها و به



شکل ۳. ساختار مولکولی آسپرین

در ساختار گرافن، هر اتم کربن با سه اتم کربن دیگر پیوند دارد و در واقع اتم کربن از یکی از ظرفیت‌های خود استفاده نمی‌کند و یکی از الکترون‌های آزاد آن باقی می‌ماند که پیوندی برقرار نمی‌کند. این ظرفیت خالی که در واقع یک الکترون اضافی است می‌تواند به صورت خارج از صفحه‌ای با دیگر اتم‌ها تشکیل پیوند دهد. این اوربیتال خالی مکان مناسبی برای پیوند با گروه‌های عاملی و همچنین اکسیژن است.

داروی آسپرین با فرمول مولکولی $C_9H_8O_4$ و با داشتن اتم‌های اکسیژن و هیدروژن و همچنین حلقه آروماتیک در ساختار خود تمایل به برقراری برهمکنش قوی با صفحه گرافن را دارد. جهت واکنش پذیری بیشتر صفحه گرافن، این ساختار با فلز آلومینیوم آلاییده شده است.

این دارو در حضور رطوبت و یا آب به اسید سالیسیلیک و اسید استیک هیدرولیز می‌شود (۲۵). همچنین امروزه در حوزه داروسازی توجه ویژه‌ای به پایداری داروها در حضور مواد افزودنی جامد می‌شود (۲۶). اثر مواد افزودنی در پایداری آسپرین به طور گسترده‌ای مورد مطالعه قرار گرفته است. جذب یک مولکول بر روی یک سطح مرحله اول از هر واکنش است که توسط سطح کاتالیز صورت می‌گیرد. ژئومتری جذب (Adsorption Geometry) به منظور درک جزئیات چنین واکنشی بسیار مهم است.

در این طرح با استفاده از محاسبات کوانتومی، فرایند جذب آسپرین توسط نانوساختارهای گرافنی که شامل گرافن آلاییده با فلز آلومینیوم است، در مقیاس مولکولی مورد بررسی قرار گرفت. به علاوه، انرژی جذب محاسبه شده و قدرت جذب و همچنین ظرفیت جذب آسپرین توسط نانوساختارهای مورد نظر بررسی شد.

صورت رایگان در دسترس کاربران دانشگاهی است. این نرم افزار، ابزاری آسان، انعطاف‌پذیر، و کارآمد جهت استفاده در شیمی کوانتومی با تاکید خاص بر خواص طیفی مولکول‌های لایه باز است. این سیستم دارای طیف گسترده‌ای از روش‌های استاندارد شیمی کوانتومی مانند روش نیمه تجربی برای نظریه تابعیت چگالی به تک و چند مرجع مربوط به روش آغازین است. همچنین می‌تواند اثرات محیطی و نسبیتی را نیز در محاسبات لحاظ کند (۳۱). آرکا، به عنوان یک ابزار قدرتمند برای بهینه سازی هندسی و همچنین پیشگویی پارامترهای طیفی توسعه پیدا کرده است. این نرم افزار با توجه به ویژگی‌های متعدد از جمله سرعت بالای حل الگوریتم‌ها و استفاده از پردازشگرهای موازی، می‌تواند داده‌های محاسباتی را که با نتایج تجربی مطابقت دارد ارائه کند. از سوی دیگر، عدم نیاز به خرید کپی رایت برای گزارش مقالات علمی از دیگر مزایای استفاده از این نرم افزار است.

برای بهینه سازی ساختارها جهت رسیدن به انرژی کمینه از تقریب گرادیان تعمیم یافته (GGA) و تابعی revPBE و مجموعه پایه TZVP استفاده شد. انرژی جذب با استفاده از روش تصحیح خطای برهم نهی مجموعه پایه محاسبه شده و بر اساس آن پایداری ساختارها بررسی شد و پایدارترین حالت مشخص شد. روش‌های مولیکن و چلپ جهت آنالیز فرآیند انتقال بار نیز به کار گرفته شد. پارامترهای ساختار مولکولی و انرژی جذب کمپلکس‌های مربوطه در محیط آبی مورد بررسی قرار گرفت. برای مدل سازی از نرم افزارهای Arguslab، Mercury و Hyperchem برای طراحی نانو ساختار گرافن آلانید با آلومینیوم و مولکول آسپیرین استفاده شد.

نظریه تابع چگالی الکترونی نظریه‌ای در چارچوب مکانیک کوانتومی برای بررسی ساختار الکترونی مواد در سیستم‌های بس ذره‌ای است. در این نظریه، با معرفی تابعی عمومی انرژی و وردش گیری از آن، ویژگی‌های الکترونی ماده (در اینجا چگالی الکترون) به دست می‌آید. نظریه تابعی چگالی از محبوب‌ترین و فراگیرترین روش‌ها در فیزیک حالت جامد و مکانیک کوانتومی و شیمی کوانتومی است. در این روش که در آن چگالی الکترونی کل مولکول مد نظر است، محاسبه خواص مولکولی مبتنی بر نظریه تابعی چگالی الکترونی است. در دهه ۱۹۹۰ معرفی نسخه‌های کار آمدی از نظریه تابعی چگالی الکترونی شیمی محاسباتی را به طرز بنیادی تغییر داد. در حال حاضر مطالعه محاسباتی سیستم‌های آلی و ترکیبات آلی رسانا با اندازه متوسط در اختیار روش‌های DFT است. روش‌های نظریه تابعی چگالی الکترونی بر اساس قضیه ای بنا نهاده شده که توسط هوهنبرگ

(Hohenberg) و کوهن (kohn) عنوان شد. این قضیه بیان می‌کند که انرژی دقیق برای حالت پایه را با انرژی مرتبط می‌سازد (۳۲). این بدان معنی است که نظریه تابعی چگالی حاوی کلیه اطلاعات لازم درباره همبستگی الکترون هاست. ابداع تقریب‌های سودمند برای نظریه تابعی چگالی، روش DFT را به روشی پر قدرت و پر طرفدار تبدیل کرده است.

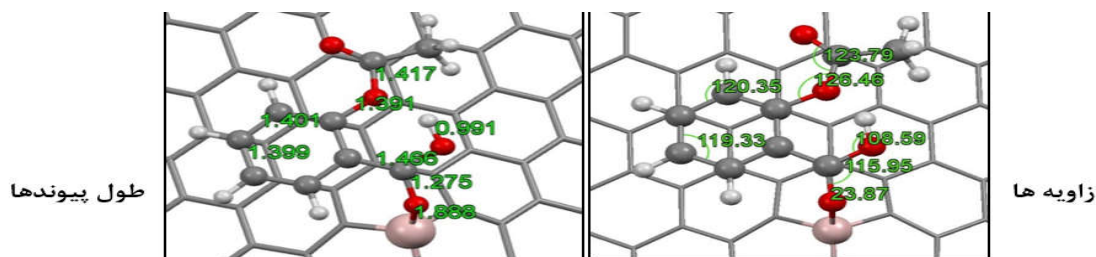
روش‌های DFT به دلیل در نظر گرفتن اثرات بستگی الکترونی مورد توجه قرار گرفته‌اند. این حقیقت که الکترون‌ها در یک سیستم مولکولی تحت تاثیر حرکات یکدیگر قرار می‌گیرند، محاسبات هارتری فاک این اثر را فقط در یک مقدار میانگین در نظر می‌گیرند، این تقریب موجب می‌شود که نتایج هارتری فاک از صحت کمتری برخوردار باشند.

در روش‌های محاسباتی، محاسبات با انتخاب مجموعه‌های پایه (Basis Set) آغاز می‌شود و برای انجام محاسبات و دستیابی به نتایج دقیق انتخاب یک مجموعه پایه مناسب بسیار مهم و ضروری است. مجموعه‌های پایه، مجموعه‌ای از توابع هستند که برای توصیف شکل اوربیتال‌ها در اتم‌ها به کار می‌روند و معمولاً ترکیب خطی از توابع مربوط به اوربیتال‌های اتمی مستقر در اتم‌ها هستند که با ضرایب مختلف بیان می‌شوند. با انتخاب مجموعه‌های پایه بزرگ‌تر، اوربیتال‌ها می‌توانند به صورت دقیق‌تری توصیف شوند، زیرا این مجموعه‌های پایه محدودیت‌های کمتری بر مکان الکترون در فضا دارند. مجموعه‌های پایه با توجه به تعداد و نوع توابع به کار رفته در آنها تقسیم بندی می‌شوند.

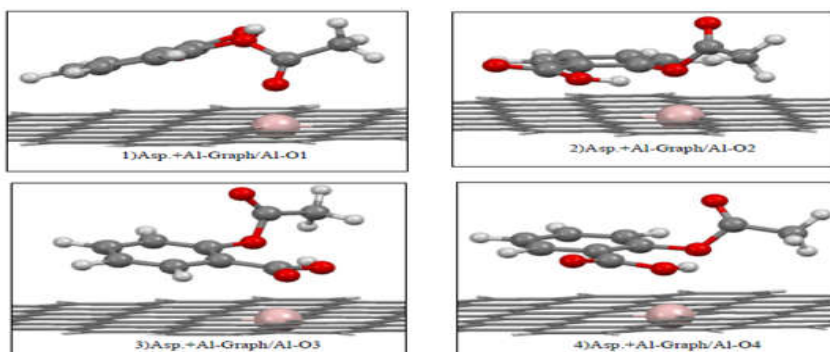
در بهینه سازی (Optimization)، ساختارهای مولکولی مدل سازی شده با استفاده از روش‌های مختلف محاسبه نیروهای بین اتمی بهینه می‌شود، به نحوی که اتم‌ها در فاصله‌ای نسبت به هم قرار گیرند تا مینیمم انرژی پتانسیل سیستم‌های مولکولی (بیشترین جاذبه و کمترین دافعه) به دست آید. به این فرایند، بهینه سازی ساختار مولکولی گویند.

جذب (Adsorption) یا بر جذبش یا برآشامش) فرآیندی است که اتم‌ها یا مولکول‌های موجود در یک مایع یا گاز در تماس با یک سطح جامد است. چنین جذبی را نیروی چسبندگی و همدوسی انجام می‌دهد. پیشوند "بر" در واژه برآشامش (جذب) روی (سطح) جسم رخ می‌دهد. برآشامش شامل نیروهای سست برد بلند مانند نیروهای واندروالسی و با نیروهای نیرومند کوتاه برد مانند کوالانسی، یونی و فلزی است.

HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital) و LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) به ترتیب کلمات اختصاری برای بالاترین اوربیتال مولکولی اشغال شده و پایین‌ترین



شکل ۴. ساختار بهینه شده صفحه گرافن آلانید با آلومینیوم



شکل ۵. پیکربندی های اولیه قرارگیری آسپیرین بر روی صفحه گرافن - آلومینیوم

این گپ نیستند. الکترون‌هایی که ترازهای پایین گپ را اشغال می‌کنند، "الکترون‌های باند ظرفیت" و الکترون‌های تراز بالای گپ، "الکترون‌های باند رسانش" نامیده می‌شوند. بر هم کنش‌های لایه ظرفیتی با هسته و لایه‌های پر شده میانی نیز بر قطبش پذیری الکترون‌های لایه ظرفیت، تأثیر می‌گذارد. قطبش پذیری را می‌توان برحسب سختی و نرمی توصیف کرد. یک اتم یا یون نسبتاً بزرگ، با بار هسته‌ای مؤثر کوچک، نسبتاً به سهولت توسط یک بار خارجی، دچار انحراف (قطبش) می‌شود و نرم نامیده می‌شود.

توزیع الکترونی فشرده تر حاصل از یک بار هسته‌ای خالص بیشتر و غریب‌تری کمتر، سختی نامیده می‌شود. نظریه اسید و باز، و سختی و نرمی که توسط پیرسون معرفی شد (۳۴)، به طور گسترده‌ای در روند های تغییرات واکنش پذیری کیفی به کار رفته است و به لحاظ نظری توجیه شده است. برای یون‌ها و مولکول‌های چند اتمی، سختی و نرمی ارتباط تنگاتنگ با انرژی‌های HOMO و LUMO دارند. هرچه شکاف بین HOMO-LUMO، بیشتر باشد سختی بیشتر است. به لحاظ عددی، سختی تقریباً برابر با نصف شکاف انرژی است. به طور کلی، واکنش پذیری شیمیایی با کاهش انرژی های LUMO و افزایش انرژی‌های HOMO بالا می‌رود. این بدان معناست که گونه‌های شیمیایی نرم‌تر، یعنی آنها که شکاف HOMO-LUMO کوچک‌تر دارند، از گونه‌های سخت‌تر واکنش پذیرترند (۳۵).

اوربیتال مولکولی اشغال نشده هستند. اختلاف انرژی بین HOMO و LUMO، شکاف بین HOMO-LUMO نامیده می‌شود. گاهی اوقات HOMO-LUMO را اوربیتال مرزی می‌گویند (۳۳). به طور تقریبی، سطح HOMO مربوط به نیمه هادی‌های آلی است که باند ظرفیتی است که به نیمه هادی‌های معدنی و نقاط کوانتومی مربوط می‌شود. قیاس مشترکی نیز بین سطح LUMO و باند هدایت وجود دارد.

در حیطه پیوند ظرفیتی، ساختار از طریق اثرات استخلافی یا واکنش پذیری در ارتباط است. اثرات رزونانسی و قطبی بر توزیع الکترونی و پایداری واکنش دهنده‌ها، حالت‌های گذار و واسطه‌ها دارند، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در نظریه اوربیتال مولکولی، واکنش پذیری به انرژی نسبی و شکل اوربیتال‌های دخیل در تبدیل واکنش دهنده‌ها به محصولات ربط داده می‌شود. واکنش هایی که می‌توانند از طریق واسطه‌ها و حالت‌های گذار با پایداری کمتر رخ دهند، مطلوب‌تر بوده و سریع‌تر پیش می‌روند.

همان طور که می‌دانیم به علت تشابه بارالکتریکی، بیش از دو الکترون نمی‌توانند در یک تراز انرژی قرار بگیرند؛ همچنین ترازهای انرژی بسیار نزدیک به هم هستند، آنقدر نزدیک که به صورت یک بازه پیوسته توصیف می‌شوند. یعنی تفاوت انرژی دو تراز مجاور در حد صفر است. اما در اندازه‌های کوچک‌تر از ده نانومتر، بین ترازها یک "گپ" وجود دارد. به طوری که الکترون‌ها مجاز به داشتن انرژی در

یافته‌ها

برهمکنش داروی آسپیرین با گرافن-آلومینیوم

در این پژوهش برهمکنش بین داروی آسپیرین با صفحه گرافن-آلومینیوم مورد بررسی قرار گرفت. از آنجایی که صفحات گرافن، به لحاظ شیمیایی صفحاتی خنثی هستند و واکنش پذیری اندکی در برابر ملکول‌های مختلف دارند، قرار دادن یک فلز نظیر آلومینیوم بر روی این صفحه، واکنش پذیری شیمیایی و خواص گرافن را به شدت تحت تاثیر قرار خواهد داد. از این روی در این قسمت، ابتدا یک اتم کربن از صفحه گرافن، با یک اتم آلومینیوم جایگزین شده و ساختار جدید، بهینه سازی شد. ساختار بهینه شده در شکل ۴ نشان داده شده است.

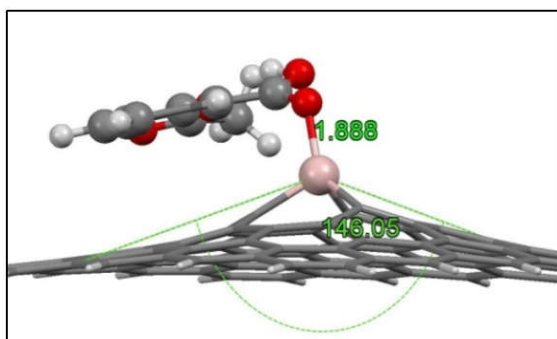
به منظور یافتن مناسب‌ترین حالت جای‌گیری ملکول آسپیرین نسبت به صفحه گرافن حاوی آلومینیوم، پیکربندی‌های اولیه مختلفی به عنوان حالت‌های اولیه مدل‌سازی شده و تحت بهینه سازی ساختاری کامل قرار گرفت. پیکربندی‌های اولیه، شامل حالت‌های مختلفی از جای‌گیری ملکول آسپیرین بر روی اتم آلومینیوم موجود در صفحه گرافن از طریق اتم‌های مختلف اکسیژن است (اکسیژن شماره ۱ تا اکسیژن شماره ۴). پیکربندی‌های اولیه در شکل ۵ نشان داده شده است.

جدول ۱. انرژی جذب و فاصله تعادلی در برهمکنش آسپیرین با صفحه گرافن-آلومینیوم

فاصله تعادلی (Å)	انرژی جذب (eV)	نوع پیکربندی
۱/۸۹۰	-۱/۹۸۳	Al-O1
۱/۹۹۹	-۱/۵۶۲	Al-O2
۱/۸۸۸	-۲/۳۰۲	Al-O3
۱/۹۹۱	-۱/۷۷۴	Al-O4

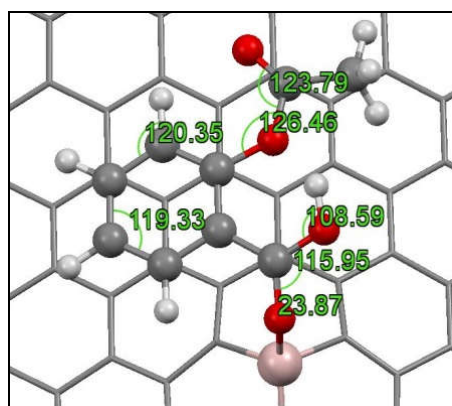
پس از بهینه سازی ساختاری کامل و انجام محاسبات مربوط به انرژی جذب که نتایج آن در جدول ۱ درج شده است، مشخص شد که پیکربندی شماره ۳ منفی‌ترین انرژی جذب را داشته و به عنوان پایدارترین حالت به لحاظ انرژی انتخاب می‌شود. در این پیکربندی، بین اکسیژن شماره ۳ مجاور اتم کربن حاوی گروه هیدروکسیل در آسپیرین با اتم آلومینیوم موجود در صفحه گرافن، جاذبه برقرار شده است. انرژی جذب حالت ذکر شده که پایدارترین حالت است، در حدود $-۲/۳۰۲$ الکترون-ولت ($-۵۶/۰۸۴$ کیلوکالری بر مول) محاسبه شد. فاصله تعادلی نیز برابر با ۱/۹۹۱

آنگستروم بود. همچنین به علت برهمکنش میان این دو ملکول، زاویه صفحه گرافن-آلومینیوم از ۱۸۰ درجه به ۱۴۶ درجه تغییر یافت (شکل ۶).

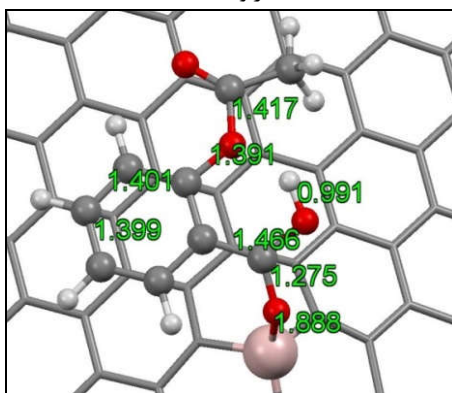


شکل ۶. ساختار تعادلی نهایی آسپیرین روی صفحه گرافن-آلومینیوم (نمای جانبی)

پارامترهای ساختاری مانند طول پیوند و زوایای پیوند پس از جذب در ملکول آسپیرین در شکل ۷ نشان داده شده است.

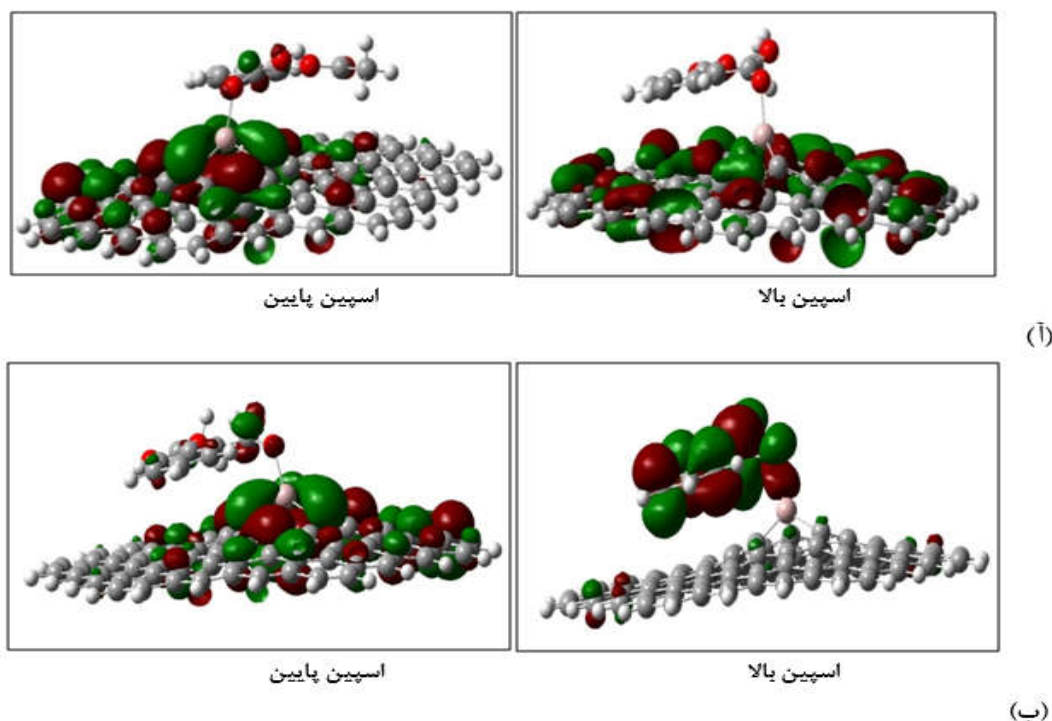


زاویه‌ها



طول پیوندها

شکل ۷- زوایا و طول پیوندهای آسپیرین روی صفحه گرافن-آلومینیوم پس از جذب (نمای بالا)



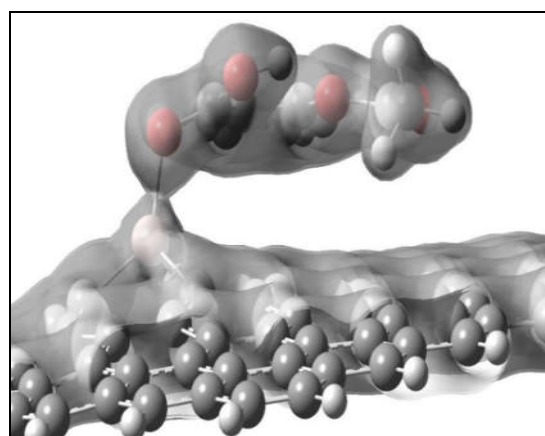
شکل ۸. تصویر اوربیتالهای مولکولی (آ) هومو و (ب) لومو در حالت‌های اسپین بالا و پایین برای سیستم آسپیرین/گرافن-آلومینیوم

مقدار 0.459 الکترون از آسپیرین به سطح گرافن آلاییده با آلومینیوم منتقل شده است. جهت اطمینان بیشتر آنالیز انتقال بار چلپ که دارای دقت بالاتری است نیز محاسبه شد که این میزان برابر با 0.270 الکترون است. در ادامه سطوح انرژی اوربیتالهای هومو و لومو در حالت‌های اسپین بالا و اسپین پایین محاسبه شد که مقادیر آن در جدول ۲ گزارش شده است.

تصاویر هومو-لومو به دست آمده در حالت‌های اسپین بالا و پایین در شکل ۸ نشان داده شده است. آنالیز توزیع دانسیته بار نیز محاسبه شد و تصویر آن در شکل ۹ قابل مشاهده است.

در مرحله خواص مولکولی کمپلکس در حالت‌های اسپین بالا و اسپین پایین شامل سختی (η) و نرمی (S) بررسی شد و برای مقایسه، مقادیر خواص مولکولی آسپیرین خالص نیز محاسبه شد که نتایج آن در جدول ۳ نشان داده شده است. اکنون فرایند بهینه سازی شده را برای پایدارترین سیستم در فاز گازی انجام داده و پایداری سیستم را بر مبنای انرژی کل به دست آمده بررسی می‌کنیم. پس از بهینه سازی کامل سیستم آسپیرین-گرافن آلاییده با آلومینیوم در فاز گازی و با حذف اثر حلال، تغییرات انرژی جذب برابر 2387 الکترون-ولت به دست آمد. در حالی که انرژی جذب سیستم با اثر حلال (2302 الکترون-ولت) است.

از شکل بدست آمده مشاهده می‌شود پیوند $C=O$ نزدیک اتم آلومینیوم در ساختار آسپیرین بعد از فرایند جذب بر روی آلومینیوم از 1.220 به 1.275 آنگستروم افزایش طول داشته است. همچنین پیوند $C-C$ متصل به گروه کربونیل در ساختار آسپیرین، بعد از جذب دارو بر روی فلز آلومینیوم از 1.503 به 1.466 آنگستروم کاهش طول داشته است.



شکل ۹. تصویر توزیع دانسیته بار برای سیستم آسپیرین-گرافن آلاییده با آلومینیوم

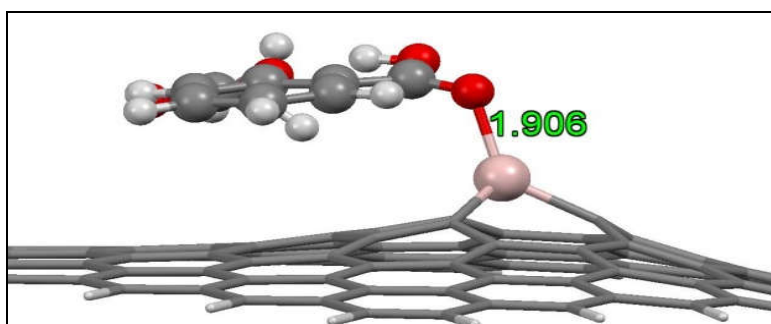
برای بررسی میزان قدرت جذب میان دو گونه، آنالیز بار مولیکن بعد از فرایند جذب انجام شد و نتایج نشان داد

جدول ۲. انرژی هومو- لومو در حالت اسپین بالا و پایین برای سیستم آسپیرین روی گرافن- آلومینیوم

انرژی لومو (eV)	انرژی لومو (eV) اسپین بالا	انرژی هومو (eV) اسپین پایین	انرژی هومو (eV) اسپین بالا	نوع پیکربندی
-۳/۹۶۶	-۳/۱۵۴	-۴/۴۲۴	-۴/۱۸۸	O1-Al
-۴/۰۱۸	-۳/۱۳۴	-۴/۴۴۰	-۴/۲۳۶	O2-Al
-۳/۹۵۶	-۳/۳۶۳	-۴/۴۱۳	-۴/۱۷۹	O3-Al
-۳/۹۹۲	-۳/۴۱۲	-۴/۴۴۲	-۴/۲۱۹	O4-Al

جدول ۳. خواص مولکولی و گپ انرژی برای پایدارترین سیستم آسپیرین و گرافن-آلومینیوم در حالت اسپین بالا و پایین

آسپیرین-گرافن آلاییده با آلومینیوم (در حالت اسپین پایین)	آسپیرین-گرافن آلاییده با آلومینیوم (در حالت اسپین بالا)	آسپیرین	مقادیر خواص مولکولی
۰/۲۲۸	۰/۴۰۸	۱/۹۹۸	η (eV)
۲/۱۸۸	۱/۲۲۴	۰/۲۵۰	S (eV)
۰/۴۵۶	۰/۸۱۶	۳/۹۹۶	گپ انرژی (eV)



شکل ۱۰. ساختار تعادلی نهایی آسپیرین روی گرافن آلاییده با آلومینیوم در فاز گازی

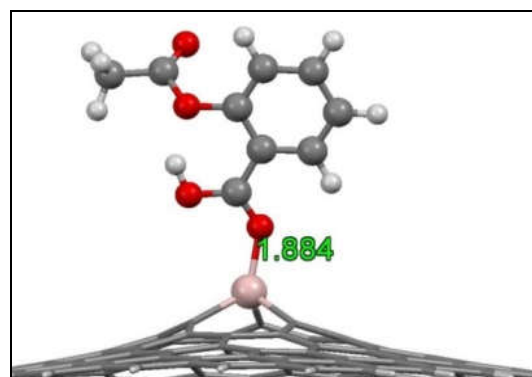
همچنین فاصله پیوندی از ۱/۸۸۸ با اثر حلال به ۱/۹۰۶ آنگستروم در فاز گازی افزایش یافت (شکل ۱۰).

به دست آمد. فاصله پیوندی از ۱/۸۸۸ آنگستروم به ۱/۸۸۴ آنگستروم کاهش یافت (شکل ۱۱).

بحث

امروزه نانوساختارهای کربنی به عنوان حامل‌های نانویی با داشتن اندازه کوچک، نسبت سطح به حجم بزرگ، داشتن گروه‌های عاملی (فعال)، خواص سطح ویژه بالا، تجمع π - π برهم کنش‌های آگریز، سازگاری با سلولهای زنده و همچنین برهمکنش مناسب این ترکیبات با ملکولهای دارویی در سیستم‌های جدید رسانش دارویی بسیار مورد توجه هستند.

در سال ۲۰۱۶ Lee و همکارانش مطالعه ابتدا به ساکن (Ab Initio) جذب آسپیرین روی نانو لوله کربنی و نانو لوله‌های کربن نیتريد (CNNT: Carbon Nitride Nano Tube) را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش با استفاده از نظریه تابعی چگالی، خواص جذب استیل سالیسیلیک اسید یا آسپیرین بر روی CNT و CNNT مبتنی بر تریازین (Triazine) بررسی شد و نتایج نشان داد مولکول آسپیرین پیوندهای قوی‌تری با



شکل ۱۱. ساختار تعادلی نهایی آسپیرین روی گرافن-آلومینیوم با حذف نیروهای واندروالس

جهت بررسی اثر نیروهای واندروالس، بهینه سازی برای پایدارترین ساختار در عدم حضور تصحیحات مربوط به نیروهای واندروالسی انجام شد. انرژی جذب آسپیرین بر روی صفحه گرافن آلاییده با آلومینیوم در این شرایط، معادل ۱/۵۵۶- الکترون-ولت

برای همه اشکال (پیکر بندی) جذب شناخته شده است. چهار پیکر بندی پایدار برای تعامل مولکول آسپرین با نانوقفسه B12N12 با انرژی های جذبی در محدوده ۱۰/۱- تا ۳۷/۷- کیلوکالری بر مول به دست آمده است.

در سطح $M06-2X / 6-31 + G^{**}$ نتایج به وضوح نشان می دهد که آلومینیوم داپ شده از B12N12 تمایل به افزایش انرژی جذب و پایداری ترمودینامیکی از مولکول آسپرین روی این نانوقفسه دارد.

با توجه به محاسبات DFT وابسته به زمان، می توان تغییر مکان های λ_{max} را به سمت طول موج های بلندتر (انتقال به قرمز) برآورد کرد. اثرات حلال نیز تاثیر مهمی در محاسبات طیف جذبی الکترونیکی کمپلکسهای AS-B12N12 دارد (۳۷).

در سال ۲۰۱۲ توسط Datt و همکارانش مطالعه تجربی و محاسباتی از بارگذاری و رهایش آسپرین از روی ژئولیت HY (Zeolite) مورد بررسی قرار گرفت. طبق این پژوهش داروی ضد التهابی، آسپرین، به سه میزبان ژئولیت HY با نسبت های ۵، ۳۰، و ۶۰ از سیلیس به آلومینیوم (SiO_2/Al_2O_3) بارگذاری می شود. میزان بارگذاری آسپرین در نمونه ژئولیت HY توسط آنالیز حرارتی با افزایش نسبت SiO_2 / Al_2O_3 از ۱۰۶ به ۷۸، به ۶۹ میلی گرم آسپرین/ژئولیت کاهش پیدا می کند. اندازه گیری ناحیه سطح و حجم منافذ، با استفاده از آزمایش های جذب و واجذب نیتروژن نشان داد که آسپرین به سطح داخلی منافذ از این مواد پر شده بود.

محاسبات کوانتومی در هر دو روش هارتری فاک ($Hartree-fock$) و سطوح DFT به منظور درک ماهیت از تعاملات بین مولکولی بین ژئولیت میزبان و آسپرین انجام شده است. رهایش آسپرین از HY وابسته به آب گریزی ژئولیت میزبان با ژئولیت های بیشتر آبگریز (بالتر از SiO_2/Al_2O_3) است که رهایش آسپرین به آسانی صورت نمی گیرد (۳۸).

عباسی و همکارانش ژئومتري جذب مولکول آسپرین در سطح هیدروکسیله (001) α کوآرتز با استفاده از محاسبات DFT را بررسی کردند. ژئومتري جذب بهینه سازی شده نشان می دهد که هر دو، مولکول جذب شده و بستر (لایه) به شدت تغییر شکل داده اند. پیوند هیدروژنی قوی بین آسپرین و سطح هیدروکسیل، منجر به شکستن پیوندهای اصلی هیدروکسیل-هیدروکسیل هیدروژنی جدید در سطح هیدروکسیله α (001) کوآرتز به نظر می رسد که به طور قابل توجهی متفاوت از آنهایی که در سطح تمیز است می باشد. انرژی جذب ۱/۱۱ ولت است که نشان

CNNT با انرژی جذبی ۰/۶۷ الکترون-ولت نسبت به CNT با ۰/۵۱ الکترون-ولت دارد. انرژی جذب قوی تر در CNNT به واکنش پذیری بالای اتم های نیتروژن خود با پیوند الکترونی بالا می توان نسبت داد. CNNT ممان های دوقطبی الکترونیکی موضعی دارد، که باعث توزیع مجدد بار قوی در جذب سطحی مولکول آسپرین روی CNNT نسبت به CNT می شود. تاثیر یک میدان الکترونیکی خارجی در خواص جذبی آسپرین در این نانولوله ها را با تبدلات در ساختار الکترونیکی، چگالی جزئی و توزیع بار نشان می دهد که میدان الکترونیکی اعمال شده در طول یک جهت خاص، مولکول آسپرین را وادار می کند که در ناحیه ای با فاصله از CNNT می تواند کاربردهای بالقوه آسپرین را بروز دهد (۲۴).

در تحقیقات دیگری که توسط عباسی و همکارانش در سال ۲۰۱۶ صورت پذیرفت، محاسبات اصول اولیه به منظور بررسی برهمکنش مولکول آسپرین با نانوذرات TiO_2 آناز (Anatase) آلاییده (داپ شده) با نیتروژن با استفاده از روش DFT به منظور بهره برداری کامل از قابلیت های زیست حسگری از ذرات TiO_2 انجام شد (۳۶). این مطالعه، به طور عمده جذب مولکول آسپرین را روی پنج برابر کوئوردیناسیون سایت اتم تیتانیوم از نانوذرات TiO_2 به دلیل واکنش بیشتر از این سایت در مقایسه با سایت های دیگر نشان می دهد. سیستم های کمپلکس متشکل از مولکول آسپرین که جهت گیری آنها به سمت نانوذرات بدون اتم داپ شده و نیتروژن داپ شده اند ژئومتري آسان تری دارند. نتایج به دست آمده شامل پارامترهای ساختاری از قبیل طول باند و انرژی سیستم ها است. ساختار الکترونی و تغییرات آن ناشی از فرایند جذب، از جمله چگالی حالت ها، اوربیتال های مولکولی و آنالیز انتقال بار مولیکن (Mulliken Charge Transfer Analysis) مورد مطالعه قرار گرفته است و نشان می دهد که جذب مولکول آسپرین روی نانوذرات TiO_2 داپ شده با نیتروژن انرژی مطلوب تری از جذب نانوذراتی که داپ نشده هستند دارد. به طور نظری و با درک کلی روی برهمکنش نانوذرات TiO_2 با مولکول آسپرین می تواند زمینه هایی برای برنامه های کاربردی در مدل سازی حامل های نانوپزشکی کارآمد، حسگرهای زیستی و اهداف دارورسانی فراهم کند.

در سال ۲۰۱۷ پژوهش دیگری توسط وصالی و همکارانش، برهمکنش یک مولکول آسپرین با سطح خارجی فولرن بور نیتريد (B12N12) مانند نانوقفسه (Nanocage) با استفاده از محاسبات نظریه تابعی چگالی مورد بررسی قرار داد. هندسه تعادلی، خواص الکترونی، انرژی جذب و پایداری ترمودینامیکی

می‌دهد واکنش آسپیرین با کوارتز یک واکنش شیمیایی گرمازا است (۳۹).

گنجی و همکارانش با استفاده از محاسبات تابعی چگالی، برهمکنش بین آمینواسید و نانو لوله کربنی را مورد بررسی قرار دادند. محاسبات نشان داد که گلايسين زويتريونيك (Zwitterionic) نسبت به گلايسين غيريوني به طرز قوی‌تری با سطح نانو لوله پیوند برقرار می‌کند. نتایج نشان داد زمانی که جذب گلايسين زويتريونيك روی سطح نانو لوله صورت می‌گیرد پیوند کربن-کربن در گلايسين شکسته و مولکول CO_2 آزاد می‌شود (۴۰).

در این پژوهش که هدف جذب موثر آسپیرین روی نانوساختار گرافنی بود ۴ نوع پیکربندی مختلف برهمکنش بین دارو با صفحه گرافنی آلاییده با آلومینیوم در نظر گرفته شد و مشخص شد پیکربندی (پیکربندی شماره ۳) که در آن، اکسیژن مجاور اتم کربنی حاوی گروه هیدروکسیل با اتم آلومینیوم ایجاد پیوند کرده و با داشتن منفی ترین انرژی جذب، پایدارترین حالت است. نتایج حاصل از محاسبات انرژی جذب آسپیرین بر روی صفحه گرافن آلاییده با آلومینیوم بیانگر جذب شیمیایی است و برقراری پیوند شیمیایی بین این دو ماده باعث افزایش انرژی جذب شده است. این انرژی جذب در مقایسه با انرژی‌های جذب در محدوده جذب فیزیکی، بسیار بیشتر است و از نوع جذب شیمیایی به شمار می‌آید.

مقایسه ساختار کمپلکس در حالت‌های قبل و بعد از جذب بر روی آلومینیوم به وضوح نشان می‌دهد که ساختار آسپیرین پس از جذب بر روی اتم آلومینیوم دچار تغییرات چشمگیری در ناحیه جذب می‌شود. پس از جذب آسپیرین بر روی گرافن آلاییده با آلومینیوم، اتم آلومینیوم به سمت خارج از صفحه گرافن، جهت گیری می‌کند و از بالای سطح به سمت بیرون، برآمده می‌شود که علت اصلی این برآمدگی سطح گرافن و اتم آلومینیوم، اولاً تغییر هیبریداسیون پیوند کربن-کربن در ناحیه حاوی آلومینیوم است و ثانیاً واکنش پذیری بسیار بالای آلومینیوم در مقایسه با اتم کربن، منجر به به دست آمدن چنین ساختاری می‌شود.

مقایسه پارامترهای ساختاری، مانند طول پیوند و زوایای پیوند، در مولکول آسپیرین در حالت‌های قبل و بعد از جذب بر روی آلومینیوم نشان می‌دهد که زاویه گرافن آلاییده با آلومینیوم نسبت به سطح مسطح گرافن تغییری ندارد. همچنین طول پیوند آلومینیوم با اتم‌های کربن مجاور افزایش یافته درحالی که در زوایا، تغییر محسوسی ایجاد نمی‌شود. مقایسه این تغییرات در ساختار دارو در مرحله ی قبل و بعد از

جذب، نشان دهنده وجود یک برهمکنش قوی بین این دو ملکول است. قابل ذکر است که این جذب قوی، سبب شکستن پیوندهای (هیدرولیز) داروی آسپیرین نمی‌شود و ساختار مولکولی آن را تخریب نمی‌کند.

داده‌های مربوط به میزان آنالیز بار بین دو ملکول بعد از فرآیند جذب نشان می‌دهد که مقدار 0.459 الکترون از سطح آسپیرین به سطح گرافن-آلومینیوم منتقل می‌شود. آنالیز اوربیتال مولکولی (هومو-لومو) نشان می‌دهد اوربیتال‌های مولکولی هومو در هر دو حالت اسپین بالا و اسپین پایین روی سطح گرافن-آلومینیوم است. همچنین اوربیتال‌های مولکولی لومو در حالت اسپین بالا روی مولکول آسپیرین و در حالت اسپین پایین بیشتر روی صفحه گرافن قرار می‌گیرند.

توزیع بار الکترونی در ساختار آسپیرین و صفحه گرافن-آلومینیوم نشان می‌دهد توزیع بار الکترونی در ساختار آسپیرین و صفحه گرافن آلاییده با آلومینیوم دارای پیوستگی است که این امر دلالت بر وجود برهمکنش شیمیایی و همچنین انتقال زیاد الکترون بین این دو مولکول است.

در نتایج حاصل از محاسبات خواص مولکولی نیز مشاهده می‌شود که با افزایش نرمی و کاهش سختی و گپ انرژی برای سیستم آسپیرین/گرافن-آلومینیوم در مقایسه با آسپیرین خالص، برهمکنش بین آسپیرین و گرافن-آلومینیوم افزایش می‌یابد. نرمی بیشتر کمپلکس سبب واکنش پذیری بیشتر آن نسبت به داروی آسپیرین خالص می‌شود و در نتیجه دارای خاصیت بارگذاری (Loading) مناسب‌تری برای عملکرد دارویی است.

پس از بهینه سازی کامل سیستم آسپیرین-گرافن آلاییده با آلومینیوم در فاز گازی و با حذف اثر حلال، تغییرات انرژی جذب برابر $2/387$ الکترون-ولت است که در مقایسه با انرژی جذب سیستم با اثر حلال ($2/302$ الکترون-ولت) تغییر قابل توجهی ندارد. در این حالت فاصله پیوندی با اثر حلال در فاز گازی افزایش یافته است. در نتیجه با حذف اثر حلال تغییر چشمگیری در فرایند و انرژی جذب صورت نمی‌گیرد.

در محاسبات انرژی جذب حاصل از حذف نیروهای واندروالسی نیز مشاهده می‌شود که در این حالت آسپیرین با انرژی کمتری با صفحه گرافن-آلومینیوم برهمکنش می‌کند و مقایسه آن با انرژی جذب سیستم در حضور نیروی واندروالسی تغییر قابل توجهی را نشان می‌دهد. فاصله پیوندی نیز تغییرات زیادی ندارد. اما حلقه آروماتیک آسپیرین از حالت موازی به حالت عمودی جهت گیری کرده و از صفحه گرافن دور شده

است که نشان دهنده تاثیر قابل توجه نیروهای واندروالسی در برهمکنش آسپیرین با صفحه گرافن آلاییده با آلومینیوم است. بنابر نتایج به دست آمده از محاسبات کوانتومی، نانوساختار گرافنی آلاییده با اتم آلومینیوم با استفاده از محاسبات

کوانتومی در حالتی که پیوند بین اکسیژن آسپیرین مجاور اتم کربن حاوی گروه هیدروکسیل که با اتم آلومینیوم ایجاد شده است، مناسبترین ساختار برای جذب موثر آسپیرین است.

REFERENCES

1. Shin C, Chase GG, Reneker DH. Recycled expanded polystyrene nanofibers applied in filter media. *Colloids Surf* 2005;262:211-215.
2. Fan W, Zhang R, Teo BK, Aradi B, Frauenheim T. Prediction of energetically optimal single-walled carbon nanotubes for hydrogen physisorption. *Appl Phys Lett* 2009;95:013116.
3. Yang W, Moghaddam MJ, Taylor S, Bojarski B, Wieczorek L, Herrmann J, et al. Single-walled carbon nanotubes with DNA recognition. *Chem Phys Lett* 2007;443:169-72.
4. Mohr S, Pochet P, Amsler M, Schaefer B, Sadeghi A, Genovese L, et al. Boron aggregation in the ground states of boron-carbon fullerenes. *Phys Rev B Condens Matter* 2014;89:041404.
5. Nicholas R. J, Mainwood A, Eaves L. Introduction. Carbon-based electronics: fundamentals and device applications. *Colloids Surf* 2007;12: 22-29.
6. Brodie BC. On the atomic weight of graphite. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 1859, 149: 249-259.
7. Jahanbani Sh, Benvidi A. A novel electrochemical DNA biosensor based on a modified magnetic bar carbon paste electrode with Fe₃O₄NPs-reduced graphene oxide/PANHS nanocomposite. *Mater Sci Eng* 2016, 68: 1-8.
8. Hasanzadeh M, Shadjou N, Mokhtarzadeh A, Ramezani M. Two dimension (2-D) graphene-based nanomaterials as signal amplification elements in electrochemical microfluidic immune-devices: Recent advances. *Mater Sci Eng* 2016; 68: 482-493.
9. Wu W, Yu B, Wu H, Wang S, Xia Q, Ding Y. Synthesis of tremella-like CoS and its application in sensing of hydrogen peroxide and glucose. *Mater Sci Eng* 2017; 70: 430-437.
10. Mutyala S, Mathiyarasu J. A reagentless non-enzymatic hydrogen peroxide sensor presented using electrochemically reduced graphene oxide modified glassy carbon electrode. *Mater Sci Eng* 2016; 69: 398-406.
11. Wang D, Xu F, Hu J, Lin M. Phytic acid/graphene oxide nanocomposites modified electrode for electrochemical sensing of dopamine. *Mater Sci Eng* 2017; 71: 1086-89.
12. Daneshvar L, Rounaghi G. H, Es' hagh Z, Chamsaz M, Tarahomi S. Fabrication a new modified electrochemical sensor based on Au-Pd bimetallic nanoparticle decorated graphene for citalopram determination. *Mater Sci Eng* 2016; 69: 653-660.
13. Zhang D, Li L, Ma W, Chen X, Zhang Y. Electrodeposited reduced graphene oxide incorporating polymerization of l-lysine on electrode surface and its application in simultaneous electrochemical determination of ascorbic acid, dopamine and uric acid. *Mater Sci Eng* 2017; 70: 241-249.
14. Mendes RG, Bachmatiuk A, Büchner B, Cuniberti G, Rummeli MH. Carbon nanostructures as multi-functional drug delivery platforms. *J Mater Chem B* 2013; 1: 401-428.
15. Zhu Y, Murali S, Cai W, Li X, Suk JW, Potts JR, et al. Graphene and graphene oxide: synthesis, properties, and applications. *Adv Mater* 2010; 22: 3906-3924.
16. Zhang Y, Ali SF, Dervishi E, Xu Y, Li Z, Casciano D, et al. Cytotoxicity effects of graphene and single-wall carbon nanotubes in neural phaeochromocytoma-derived PC12 cells. *ACS Nano* 2010;4:3181-86.
17. Davis ME, Shin DM. Nanoparticle therapeutics: an emerging treatment modality for cancer. *Nat Rev Drug Discov* 2008;7:771-82.
18. Zhang Q, Wu Z, Li N, Pu Y, Wang B, Zhang T, et al. Advanced review of graphene-based nanomaterials in drug delivery systems: Synthesis, modification, toxicity and application. *Mater Sci Eng* 2017;12: 48-52.
19. Novoselov KS, Geim AK, Morozov SV, Jiang D, Zhang Y, Dubonos SV, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science* 2004;306:666-9.
20. Geim AK, Novoselov KS. The rise of graphene. *Nat Mater* 2007;6:183-91.
21. Cheng TO. The history of aspirin. *Tex Heart Inst J* 2007; 34: 392-95.

22. Ferreira SH, Moncada S, Vane JR. Prostaglandins and the mechanism of analgesia produced by aspirin-like drugs. *Br J Pharmacol* 197; 49: 86-97.
23. Lewis Jr HD, Davis JW, Archibald DG, Steinke WE, Smitherman TC, Doherty III JE, et al. Protective effects of aspirin against acute myocardial infarction and death in men with unstable angina: results of a Veterans Administration Cooperative Study. *N Engl J Med* 1983; 309: 396-403.
24. Lee Y, Kwon DG, Kim G, Kwon YK. Ab initio study of aspirin adsorption on single-walled carbon and carbon nitride nanotubes. *Phys Chem Chem Phys* 2017; 19: 8076-8081.
25. Carstensen JT, Attarchi F, Hou XP. Decomposition of aspirin in the solid state in the presence of limited amounts of moisture. *J Pharm Sci* 1985; 74: 741-745.
26. Al-Gohary OM, Al-Gamal SS, Hammad A, Molokhia AM. Effect of storage on tableted microencapsulated aspirin granules. *Int J Pharm* 1989; 55: 47-52.
27. Baughman RH, Zakhidov AA, De Heer WA. Carbon nanotubes--the route toward applications. *Science* 2002;297:787-92.
28. Pop E, Mann D, Wang Q, Goodson K, Dai H. Thermal conductance of an individual single-wall carbon nanotube above room temperature. *Nano Lett* 2006;6:96-100.
29. Delgado JM, Rodes A, Orts JM. B3LYP and in situ ATR-SEIRAS study of the infrared behavior and bonding mode of adsorbed acetate anions on silver thin-film electrodes. *J Phys Chem C* 2007;111:14476-83.
30. Parr RG. Density functional theory of atoms and molecules. In: Fukui K, Pullman B, Editors. *Horizons of quantum chemistry*. Dordrecht: Académie Internationale Des Sciences Moléculaires Quantiques / International Academy of Quantum Molecular Science; 1980.
31. Ajima K, Yudasaka M, Murakami T, Maigné A, Shiba K, Iijima S. Carbon nanohorns as anticancer drug carriers. *Mol Pharm* 2005; 2: 475-480.
32. Hohenberg P, Kohn W. Inhomogeneous electron gas. *Phys Rev* 1964;136:B864.
33. Thorsten S, Rudolf J. How relevant are S=O and P=O double bonds for the description of the acid molecules H₂SO₃, H₂SO₄, and H₃PO₄, respectively. *Mol Mod Ann* 2000;6:282-288.
34. Pearson, Ralph G, Jon Songstad. "Application of the principle of hard and soft acids and bases to organic chemistry." *J Am Chem Soc* 1967; 89: 1827-36.
35. Pearson RG. The principle of maximum hardness. *Acc Chem Res* 1993; 26: 250-255.
36. Abbasi A, Jahanbin Sardroodi J. A First-principles study of the interaction of aspirin with nitrogen-doped TiO₂ anatase nanoparticles. *Nanomed Res J* 2016;1:69-78.
37. Vessally E, Esrafil MD, Nurazar R, Nematollahi P, Bekhradnia A. A DFT study on electronic and optical properties of aspirin-functionalized B₁₂N₁₂ fullerene-like nanocluster. *Str Chem* 2017;28:735-48.
38. Datt A, Fields D, Larsen SC. An experimental and computational study of the loading and release of aspirin from zeolite HY. *J Phys Chem C* 2012;116:21382-90.
39. Abbasi A, Nadimi E, Plänitz P, Radehaus C. Density functional study of the adsorption of aspirin on the hydroxylated (001) α -quartz surface. *Science* 2009;603:2502-6.
40. Ganji M. Density functional theory based treatment of amino acids adsorption on single-walled carbon nanotubes. *Diam Relat Mater* 2009;18:662-8.