

## به نام خدا

### مقدمه مؤلف

بیوفیزیک چیست؟ بهتر است به همین سادگی و صراحت سراغ شناخت این مبحث برویم. اگر قدری پرسش را ساده‌تر کنیم و بپرسیم آیا بیوفیزیک، فیزیک زیستی است یا زیست‌شناسی فیزیکی پاسخ چه خواهد بود؟ بیوفیزیک یک دانش نظری بین رشته‌ای است که مباحث زیستی را از منظر فیزیک مطالعه می‌کند. به بیان روان‌تر بیوفیزیک، زیست‌شناسی فیزیکی است و در آن همان مفاهیم زیست‌شناسی بررسی می‌شود، اما از دید سبب‌شناختی و سبب هر رخدادی حتماً به‌نحوی با فیزیک مرتبط است. دانش زیبایی زیست‌شناسی، جهان زنده را مطالعه می‌کند. بخشی از جهان را که قابلیت رشد و تولید مثل دارد و تکوین و تکامل می‌یابد، به محرک خارجی پاسخ می‌دهد و در برابر شرایط در حال تغییر خارجی، محیطی پایستار در درون خود فراهم می‌آورد، مورد مطالعه و بررسی قرار می‌دهد. زیست‌شناسی از دیدگاه نظم یک استثنا است، زیرا در جهانی که تمام اجزایش به سمت بی‌نظم شدن سیر می‌کند، این قابلیت را دارد که حداقل در دوره‌ای از زندگی، برخلاف تمام اجزای جهان بی‌جان، درخود نظم بیافریند و به‌واسطه این انباشت نظم، الگوهای بدیع و بی‌تکرار خلق کند. تقارن‌های حیرت‌آور، سازوکارها و چرخه‌های دقیق و پیچیده، ساختارهای پراجزا و در عین حال دقیق، همگی ره‌آورد نظم زندگی هستند. زیست‌شناسی قایق کوچکی است که در رود خروشان جهان که توفنده به سمت بی‌نظمی می‌رود، برخلاف جریان این رود راه به سرمنزل نظم می‌برد و واقعاً چه چیزی زیباتر از زندگی است؟ از سویی دیگر فیزیک دانشی است که به اتکا بر روابط دقیق و استوار به تفسیر جهان می‌پردازد. در مشاهده‌های فیزیکی، نکته مهم حفظ بی‌طرفی و عدم سوگیری است. ناظر فیزیکی همواره از خارج سیستم‌ها را به نظاره می‌نشیند و بدون هیچ گرایشی در مورد مقدار و جهت تغییرات اعلام نظر می‌کند و اما بیوفیزیک، دانشی است که با این نگاه بی‌طرف و دقیق فیزیک، زیبایی حیات را می‌نگرد. چه زیباتر از زیست و چه دقیق‌تر از فیزیک! بیوفیزیک، در میان همه علوم دل‌رباترین است! هنگام مطالعه بیوفیزیک ابتدا از بنیادی‌ترین سطوح جهان بی‌جان شروع می‌کنیم. از اتم‌ها و پیوندهایی که آنها را به مولکول تبدیل می‌کنند، از مولکول‌های کوچکی چون آب تا درشت‌مولکول‌های زیستی همچون پروتئین‌ها. پیوندها هستند که ساختار این مولکول‌ها را تعیین می‌کنند و ساختار باعث ایجاد عملکرد می‌شود. در این بخش از بیوفیزیک که بیوفیزیک مولکولی نامیده می‌شود به روابط و متغیرهای مربوط به تشکیل ساختار و انجام عملکرد مولکول‌ها پرداخته می‌شود. در ادامه مباحث، با ترکیب درشت‌مولکول‌هایی از دسته چربی‌ها و پروتئین‌ها، اولین ساختار زیستی، یعنی غشا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. اولین و بنیادی‌ترین چیزی که برای ایجاد حیات مورد نیاز است. در همین بحث غشا، مفاهیمی چون تحریک‌پذیری و انتقال مواد مطرح می‌شود. جالب اینجاست که علاوه بر اینکه خود سلول به‌واسطه تشکیل غشا ایجاد می‌شود، اندامک‌های سلولی نیز ماهیتی غشایی دارند و عملکرد آنها از فتوسنتز در

کلروپلاست گرفته تا تنفس در میتوکندری همه، وابسته به ساختارهای غشایی هستند. در ادامه مباحث کتاب به بیوترمودینامیک می‌پردازیم. مطالعه حیات با ترمودینامیک چقدر واقعی است؟ حیات بسیار پویا است. در هر لحظه تغییر می‌کند و اعداد توصیف کننده‌اش گاه در ذهن ما نمی‌گنجند. واحد فعالیت یک آنزیم چند میلیون بار در ثانیه و سرعت نسبی یک باکتری تاژکدار چند صد هزار برابر طولش در یک ثانیه است؛ اما ما معادلات ساده انگارانه‌ای برای مطالعه حیات داریم و سعی می‌کنیم با ساده کردن شرایط، ثابت در نظر گرفتن بعضی متغیرها، ایجاد قراردادهایی که مثبت یا منفی بودن علامت مقادیر توابع را تعیین می‌کنند و همین طور مقایسه بین دو حالت فرضی ایستا به جوابی کمابیش قابل اتکا برسیم. بیایید از همین آخرین مورد، یعنی مقایسه بین دو حالت ایستا استفاده کنیم. گاه به توابعی که در این وضعیت قابل مطالعه هستند، تابع حالت می‌گوییم و تغییر آنها را بین دو لحظه  $t_1$  و  $t_2$  قیاس می‌کنیم و برای این قیاس از علامت دلتا استفاده می‌کنیم. همه چیز به نظر منطقی می‌آید، ولی سوال اینجاست؛ آیا به صرف بیشتر بودن مقدار دومی از اولی می‌توان گفت که روند این تغییر هم افزایشی بوده است؟ آیا مثبت یا منفی بودن یک دلتا بین دو نقطه همین روند را برای تمامی مسیر نیز تأیید می‌کند؟ آیا تغییر مشاهده شده، تمامی تغییرات نقطه به نقطه در طول مسیر را منعکس می‌کند؟ بدیهاً نه. ولی چاره چیست؟ نمی‌توان به‌خاطر ناقص بودن این محاسبات، به کلی قید محاسبه را زد. اقدام راه‌گشا و البته رندانه دیگر ما، فرض کردن حالت‌های غیرواقعی است که در آن برخی متغیرها ثابت هستند، مثلاً فشار، دما و یا غلظت برخی مواد. چنین حالات فرضی، به نام حالت‌های استاندارد شناخته می‌شوند و البته می‌دانید که هرگز هیچ متغیری مطلقاً ثابت نیست و جهان منتظر نمی‌ماند که ما با روش‌های خود محاسباتمان را به پایان ببریم. حالت استاندارد شیمیایی یکی از این حالت‌ها است که در آن دما برابر ۲۰ درجه سلسیوس ( $20^\circ\text{C}$ )، فشار برابر ده به توان پنج پاسکال ( $10^5\text{ Pa}$ ) و تمامی مواد به‌صورت خالص هستند. البته در واقعیت هرگز چنین وضعیتی برقرار نمی‌شود و محل رخداد تمام این شرایط فقط و فقط روی کاغذ است. اختصاص علامت‌های مثبت و منفی آن هم به‌صورت قراردادی به متغیرها کار دیگری است که محاسبات را ممکن می‌کند. در ترمودینامیک، هرگاه متغیری در یک سیستم افزایش یابد یا به آن وارد شود، علامت مثبت و هنگام کاهش و یا خروج یک پارامتر از سیستم، علامت منفی برایش در نظر می‌گیریم. بدین ترتیب سیستم تبدیل به مبدأ محاسبات ما می‌شود.

با مطالعه بیوفیزیک دید ما به چرایی جهان زنده اطرافمان بیشتر می‌شود جهانی که بخش ناچیزی از آن را شناخته‌ایم. بیوفیزیک آگاهی ما را از دلایل فیزیکی که از زیباترین اتفاق جهان، یعنی زندگی حمایت می‌کند؛ افزایش می‌دهد. شکی نیست که زیباترین اتفاق جهان حیات است. زیرا بر خلاف تمام پدیده‌های توصیف شده در ترمودینامیک که بر اساس قوانین ترمودینامیک، همواره تمایل به از هم‌پاشی و افزایش بی‌نظمی دارند، این حیات است که با صرف انرژی و به‌طور هدفمند، تلاش می‌کند که انرژی را در خود بالاتر ببرد و بر نظم خود بیفزاید. موجودات زنده جزیره‌هایی از نظم در دریای بی‌نظمی هستند که در این درس به بررسی خصوصیت‌های فیزیکی آنها خواهیم پرداخت. امیدواریم که با دیدی که این کتاب به شما می‌دهد، ترغیب شوید تا، بیشتر و عمیق‌تر به مطالعه زیبایی‌های حیات بپردازید.

## پیش گفتار

سپاس خدایی را که به ما این توفیق را عطا فرمود تا بتوانیم قدمی در راه علم و دانش برداریم و به گردآوری اطلاعات ارزشمند این کتاب پردازیم. کتاب حاضر دربرگیرنده مطالبی از دانش بی‌پایان بیوفیزیک با بیانی ساده و روان و شکل‌هایی گویا است. در این کتاب تلاش بر این بوده است که با مطرح کردن مطالب بیوفیزیکی با بیانی رساتر و قابل فهم‌تر، در انتقال این دانش باارزش به جویندگان و علاقمندان علم قدمی برداشته شود. کتاب پیش رو تحت عنوان بیوفیزیک آسان مشتمل بر هفت فصل است. در فصل اول، مقدمه‌ای بر بیوفیزیک بیان شده است. در این فصل مباحث پایه‌ای همچون نیروها و برهم‌کنش‌های بین مولکول‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل دوم به بیوفیزیک مولکولی و به طور ویژه به آب پرداخته شده است و ساختار مولکولی، نیروها و پیوندهایی که توسط این مولکول ایجاد می‌شود، مورد بحث قرار گرفته است. در فصل سوم، بیوفیزیک درشت‌مولکول‌ها بررسی شده است. در این فصل اجزا و ساختارهای اول، دوم، سوم و چهارم پروتئین‌ها، ناقل‌های پروتئینی، سینتیک آنزیمی، اجزا و ساختار نوکلئیک اسیدها مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل چهارم، بیوفیزیک غشا و ساختارهای چرب و پروتئینی آن مورد بحث قرار گرفته است. همچنین مطالبی در مورد بیوالکتریک غشا هم در این فصل بیان شده است. در فصل پنجم بیوفیزیک پرتوی که مشتمل بر مباحث مبانی پرتوژی، روابط پرتوژی و مبانی پرتوگیری است مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل ششم، مباحث بیوترمودینامیک مطرح شده است و قوانین صفرام، اول، دوم و سوم ترمودینامیک مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در فصل هفتم که آخرین فصل این کتاب است، در مورد روش‌های بیوفیزیک بحث شده است. روش‌های متداول مورد استفاده در بیوفیزیک همچون کالریمتری، روش‌های ماکروسکوپی، الکتروفورز، کروماتوگرافی، بلاتینگ، پروتئومیک، طیف سنجی، تشدید رزونانس مغناطیسی، بلورنگاری پرتو ایکس و در نهایت میکروسکوپی بررسی شده است.

امید داریم که حاصل زحمات ما در قالب کتاب بیوفیزیک آسان، راهی روشن و هموار را در زمینه‌های آموزش، تحقیق و پژوهش برای طالبان علم و دانش فراهم کرده باشد. در پایان از هرگونه کاستی احتمالی که در این کتاب وجود دارد عذرخواهی کرده و برای تمام استادان، محققان، دانش پژوهان و دانشجویان عزیز از خداوند متعال طلب توفیق روزافزون می‌نماییم. امید نویسندگان این کتاب بر این است که این اثر بتواند در کنار پاسخ گفتن به پرسش‌های موجود در ذهن شما بر حدت آنها نیز بیفزاید و نه اینکه تنها پاسخی پایستار به آنها بدهد و برای همیشه آنها را در ذهنشان خاموش کند. امید داریم که با لذت از این اثر، از راهنمایی نویسندگان و نقد اثر که بی‌شک کاری بی‌خطا نیست غافل نشوید. همواره با پست الکترونیک به نشانی [DigestedBiophysics@gmail.com](mailto:DigestedBiophysics@gmail.com) و صفحه اینستاگرامی به نام نویسندگان منتظر نظرات ارزشمند و راه‌گشای شما هستیم.

زنده باشید و در زیبایی زندگی تأمل کنید.

تقدیم به

تمامی استادان ارجمندان

و

دانشجویانی که قاعده‌مند فکر می‌کنند

و با سپاس از

خانواده ایمان به دلیل صبر، شکیبایی و همراهی همدلانه شان

# فهرست مطالب

فصل اول - انواع پیوندهای الکترواستاتیک.....	۱
فصل دوم - بیوفیزیک مولکول‌های کوچک (آب).....	۲۳
فصل سوم - درشت‌مولکول‌های زیستی.....	۴۳
فصل چهارم - بیوفیزیک غشا.....	۱۵۹
فصل پنجم - بیوفیزیک پرتویی.....	۲۰۷
فصل ششم - بیوترمودینامیک.....	۲۵۳
فصل هفتم - روش‌های بیوفیزیک.....	۲۷۷

## فصل ۱

## انواع پیوندهای الکترواستاتیک



### مقدمه‌ای بر بیوفیزیک

ماهیت مطلبی که تحت عنوان بیوفیزیک مورد بحث قرار می‌گیرد، چه چیزی می‌تواند باشد؟ ممکن است عنوان بیوفیزیک خیلی ساده به نظر برسد، یعنی تصور بر این باشد که مفهوم آن فیزیک زیستی است. اما از دو دیدگاه می‌توان این دانش را مورد بررسی قرار داد. بیوفیزیک از یک دیدگاه، فیزیک زیستی<sup>۱</sup> و از دیدگاه دیگر زیست‌شناسی فیزیکی<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. فیزیک زیستی، فیزیکی است که به بررسی پدیده‌های زیستی می‌پردازد. مسائل فیزیکی مانند انتقال گرما، انتقال جرم، سرعت، اصطکاک در سیستم‌های زیست‌شناسی بررسی می‌شوند. در واقع سرفصلی تحت عنوان فیزیک زیستی در دانشگاه‌های کشور وجود ندارد. مشابه این رشته در حوزه پزشکی، فیزیک

1- Biological Physics

2- Physical Biology

پزشکی است. در فیزیک پزشکی مباحثی همچون انکسار مورد بحث قرار می‌گیرد مانند انکسار نور که مثلاً به عیوب انکساری چشم و اصلاح آن و مانند آنها می‌پردازد.

بیوفیزیک<sup>۱</sup> مطالعه زیست‌شناسی از منظر فیزیک است. در بیوفیزیک، دلایل فیزیکی پدیده‌های بنیادی، از ابتدای زیست‌شناسی تا پیشرفته‌ترین سطوح آن، یعنی از سطوح مولکولی تا سطوح عملکردی مطالعه می‌شود. بیوفیزیک با دقت به ساختار<sup>۲</sup> سیستم‌های زنده می‌پردازد. منظور از سیستم زنده، مجموعه‌ای از کوچک‌ترین مولکول‌های زیستی تا بالاترین سیستم‌های زیستی، یعنی موجود زنده است که در این میان می‌توان سلول‌ها، درشت‌مولکول‌های زیستی و امثال آنها را جا داد. در بیوفیزیک عملکرد<sup>۳</sup> سیستم، همواره معلول ساختار سیستم است و یک ارتباط دو طرفه بین ساختار و عملکرد سیستم برقرار می‌شود.

اگر یک تعریف کلی در مورد حوزه‌ای از علوم، تحت عنوان علوم پایه<sup>۴</sup> وجود داشته باشد؛ می‌توان برای درک بهتر ارتباط بین این علوم، سه ضلع مثلث را در نظر گرفت (شکل (۱-۱)). سه دانش اصلی بنیادی، یعنی ریاضیات و فیزیک، شیمی، زیست‌شناسی سه وجه این مثلث را تشکیل می‌دهند. ممکن است این سؤال در ذهن ایجاد شود؛ چطور ممکن است ریاضی و فیزیک یک دانش باشند؟ از نظر تعریفی فیزیک، ریاضی عملکردی است و ریاضی، فیزیک روی کاغذ و تئوری است. این سه دانش، دانش‌های بنیادین پایه هستند. می‌توان به این مثلث لایه‌های دیگری را اضافه کرد به‌صورتی که با دور شدن از اضلاع، علوم کاربردی‌تر شوند. به‌عنوان مثال در شیمی، دانشی مانند متالورژی که به بررسی مواد می‌پردازد یا مهندسی‌های شیمی می‌توانند تعدادی از کاربردهای عملیاتی‌تر باشند. به همین ترتیب می‌توان در زیست‌شناسی هم لایه‌هایی اضافه کرد و با افزودن لایه‌ها آن را کاربردی‌تر کرد. مطالعات کاربردی زیست‌شناسی در سطح مولکولی می‌تواند یک درجه کاربردی‌تر برای زیست‌شناسی باشد و یا رشته پزشکی با تمام گرایش‌هایی که دارد می‌تواند از کاربردی‌ترین سطوح زیست‌شناسی باشد. به همین ترتیب می‌توان ریاضی را گسترش داد مثلاً در ریاضی کاربردی<sup>۵</sup> محاسباتی برای درک بهتر مفاهیم وجود دارد. حوزه گسترده‌ای از دانش نیز که تحت عنوان دانش مهندسی<sup>۶</sup> شناخته می‌شود، از کاربردهای ریاضی محسوب می‌شود. گسترش مثلث علوم پایه به سمت کاربرد علوم، یک راه ساده است. اما به نحو دیگری هم می‌توان این مثلث را گسترش داد به‌گونه‌ای که ارتباط بین رشته‌ای، برقرار کردن ارتباط بین این حوزه‌های کاربردی باشد. به‌عنوان مثال می‌توان بین فیزیک و شیمی ارتباط برقرار کرد و در حوزه‌ای به مطالعه این

1- Biophysics

2- Structure

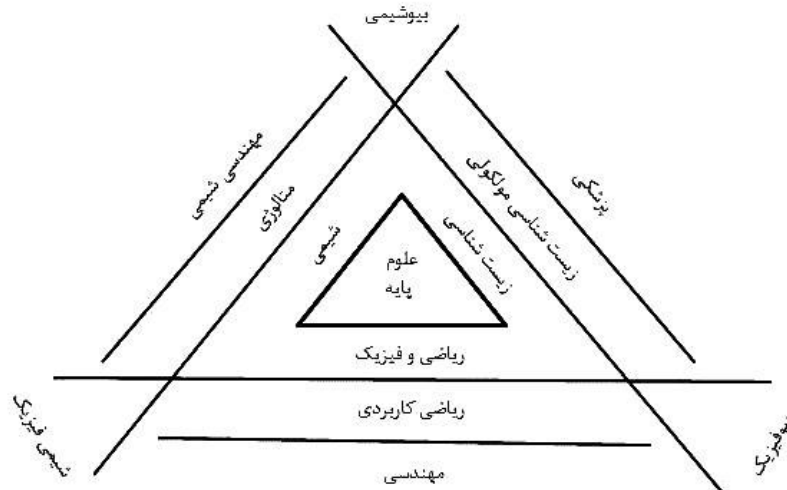
3- Function

4- Basic Sciences

5- Applied Mathematics

6- Engineering

علوم پرداخت که هر دوی اینها را داشته باشد. این قسمت از دانش که هم فیزیک در آن مستتر است هم شیمی و از هر دو حوزه شیمی و فیزیک بهره‌مند است، شیمی فیزیک نامیده می‌شود. همین طور می‌توان حوزه علوم مرتبط با شیمی را به علوم مرتبط با زیست‌شناسی ربط داد و وارد حوزه‌ای از دانش به نام بیوشیمی<sup>۱</sup> شد. بیوفیزیک جایی است که هم از زیست‌شناسی و هم از ریاضی و فیزیک نشانه‌هایی دیده می‌شود. بیوفیزیک شامل بررسی اثرات فیزیک در پدیده‌های زیستی است. بیوشیمی، شیمی فیزیک و بیوفیزیک علمی هستند که در حوزه علوم بین رشته‌ای<sup>۲</sup> قرار می‌گیرند.



شکل ۱-۱ ارتباط بین علوم مختلف

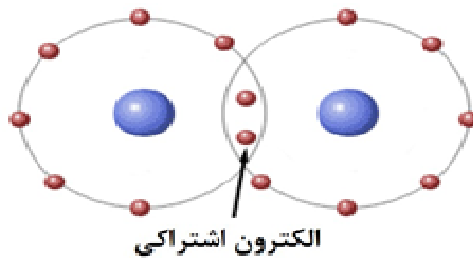
## انواع پیوندها

اولین چیزی که به‌عنوان واحد حیات (سلول یا یاخته) باید مورد بررسی قرار گیرد، مجموعه‌ای از ساختارهای سلولی است که این ساختارها خود، دربرگیرنده مولکول‌ها هستند. این مولکول‌ها در حوزه عمل زیست‌شناسی به دو دسته مولکول‌های کوچک و مولکول‌های بزرگ طبقه‌بندی می‌شوند. در زیست‌شناسی به این مولکول‌ها درشت‌مولکول‌های زیستی<sup>۳</sup> می‌گویند. اصلی‌ترین سؤالی که در اینجا مطرح می‌شود این است؛ یک مولکول چگونه به وجود می‌آید؟ در حالی که ممکن است تعداد این اتم‌ها خیلی زیاد باشد، چگونه از پیوستن دو یا چند اتم به یکدیگر یک مولکول درست می‌شود؟ این سؤال‌ها با موضوع بسیار ساده‌ای تحت عنوان پیوند، پاسخ داده

1- Biochemistry  
2- Interdisciplinary  
3- Biomacromolecules

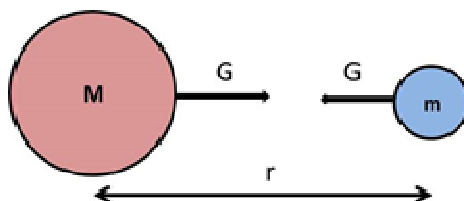


می‌شوند. اساساً دو دسته پیوند وجود دارد: پیوندهای شیمیایی و پیوندهای فیزیکی. تعریف پیوند فیزیکی و پیوند شیمیایی و تفاوت بین آنها، به‌سادگی تفاوت علم شیمی و علم فیزیک است. در مطالعه یک پدیده؛ چه زمانی گفته می‌شود که آن پدیده از دیدگاه شیمیایی بررسی خواهد شد؟ هنگامی که اتفاقی تحت عنوان تبادل الکترون وجود داشته باشد، یعنی زمانی که یک اتم الکترونی را بدهد و اتم دیگر الکترونی را بپذیرد، یک اتفاق شیمیایی خواهد افتاد و این اتفاق یک پیوند شیمیایی ایجاد خواهد کرد. این پیوند شیمیایی تحت عنوان پیوند کووالان<sup>۱</sup> شناخته می‌شود (شکل (۱-۲)). در کلمه کووالان، والان به معنای ظرفیت است و کووالان، یعنی هم‌ظرفیتی. در ساختار پیوند کووالانی که بین دو عنصر وجود دارد، هر عنصر الکترون خود را در جایگاه مشترکی با عنصر دیگر به اشتراک می‌گذارد و از این‌رو پیوند کووالان یا پیوند هم‌ظرفیتی بین آنها ایجاد می‌شود.



شکل ۱-۲ پیوند کووالان

پیوند فیزیکی، پیوندی است که هیچ تبادل الکترونی در آن صورت نمی‌گیرد. از این‌رو این سؤال مطرح می‌شود؛ چگونه دو عنصر بدون تبادل الکترون کنار هم قرار می‌گیرند و پیوند فیزیکی ایجاد می‌کنند؟ در بسیاری از منابع نام این پیوندهای فیزیکی، پیوندهای الکترواستاتیک است. "استاتیک"، یعنی ایستاده و "الکترو" نگاه را به الکترون‌ها معطوف می‌کند، یعنی پیوندی که در آن الکترون‌ها از جای خود حرکت نمی‌کنند و در جای خود ایستاده‌اند. چه دلیلی وجود دارد که دو ماده بدون تبادل الکترون با یکدیگر وارد پیوندی شوند که از این به بعد پیوند الکترواستاتیک نامیده می‌شود؟ باید برای توجیه رخداد پیوند الکترواستاتیک، به دنبال دلیل جذب این دو سیستم مانند جذب دو اتم به یکدیگر بود. برای درک بهتر اینکه این جاذبه از چه نوعی است باید با انواع جاذبه آشنا شد. چند نوع جاذبه در اطراف خود سراغ دارید؟ بدیهی است اولین جاذبه‌ای که به ذهن می‌رسد، جاذبه‌ای است که تحت عنوان جاذبه گرانشی (شکل (۱-۳)) معرفی شده است.



شکل ۱-۳ جاذبه گرانشی بین دو جسم

جاذبه گرانشی که بیشتر اوقات با  $G$  نمایش داده می‌شود، برابر با مقدار نیرویی که بین دو جسم وجود دارد، است. این نیرو با مربع فاصله بین دو جسم ( $r$ ) رابطه عکس دارد (رابطه ۱-۱). بنابراین هر چقدر فاصله بیشتر باشد، بزرگی جاذبه کمتر می‌شود. در صورت کسر، جرم دو ذره در هم ضرب می‌شود اما چرا یک جرم با  $m$  کوچک و جرم دیگر با  $M$  بزرگ نشان داده می‌شود؟ به‌خاطر اینکه همواره در مواردی که نیروهای جاذبه به‌طور محسوس احساس می‌شوند، جرم یکی از این دو عضو که به یکدیگر جذب می‌شوند، خیلی کوچک و جرم دیگری خیلی بزرگ است. ساده‌ترین مثال آن انسان است که با جرم کمابیش کوچک در برابر جرم بسیار بزرگی به نام زمین با ثابت گرانش  $9/8$  متر بر مجذور ثانیه ( $g$ ) و فاصله مشخص، جذب زمین می‌شود.

$$G = g \frac{m \times M}{r^2} \quad (1-1)$$

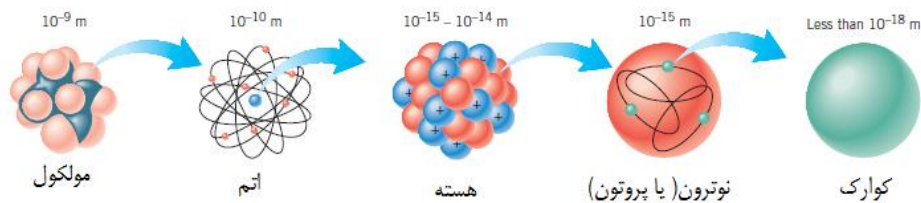
آیا این جاذبه گرانشی می‌تواند جاذبه‌ای باشد که دلیل برقراری پیوندهای الکترواستاتیک است؟ آیا این جاذبه گرانشی می‌تواند دلیلی برای به هم نزدیک شدن و در کنار هم ماندن دو اتم خیلی کوچک باشد؟ بدیهاً جواب منفی است. جاذبه گرانشی یکی از انواع جاذبه است ولی عامل ایجاد پیوند الکترواستاتیک نیست.

جاذبه دیگری که می‌توان در مورد آن صحبت کرد، جاذبه‌ای تحت عنوان جاذبه هسته‌ای است. جاذبه هسته‌ای، جاذبه‌ای است که حدوداً در فاصله‌های کوچک‌تر از  $10^{-24}$  متر خود را نشان می‌دهد. گاهی اوقات از این فاصله‌ها به نام یوکتومتر<sup>۱</sup> یاد می‌شود. آیا جاذبه هسته‌ای می‌تواند دلیل نزدیک شدن دو اتم به یکدیگر باشد؟ لازم است به مقدار فاصله  $10^{-24}$  متر در جاذبه هسته‌ای توجه کنید. ممکن نیست در هیچ جای کائنات فاصله بین دو ذره به این حد ناچیز برسد، مگر در بین ذره‌های بنیادی سازنده هسته اتم، مانند پروتون‌ها، نوترون‌ها و دیگر کوارک‌ها. کوارک<sup>۲</sup> (شکل (۱-۴)) یک ذره بنیادی و یکی از اجزای پایه‌ای تشکیل‌دهنده ماده است. کوارک‌ها با هم ترکیب می‌شوند تا ذره‌های مرکبی را پدید آورند که پایدارترین آنها، پروتون‌ها و

1 - Yoktometre

2- Quark

نوترون‌ها در نظر گرفته می‌شوند. پروتون‌ها و نوترون‌ها از اجزای تشکیل‌دهنده هسته اتم هستند. این جاذبه در داخل هسته اتم وجود دارد، به همین دلیل تحت عنوان جاذبه هسته‌ای نام‌گذاری شده است. اما این بحث درباره نزدیک شدن دو اتم در پیوند الکترواستاتیک است. فاصله بین دو اتم میلیاردها میلیارد بار بزرگ‌تر از فاصله فرمیونی ذره‌های سازنده داخل هسته است. پس باید درباره جاذبه هسته‌ای هم این موضوع را یادآور شد که این جاذبه نمی‌تواند عامل برقراری پیوند الکترواستاتیک باشد.



شکل ۴-۱ از مولکول تا کوارک

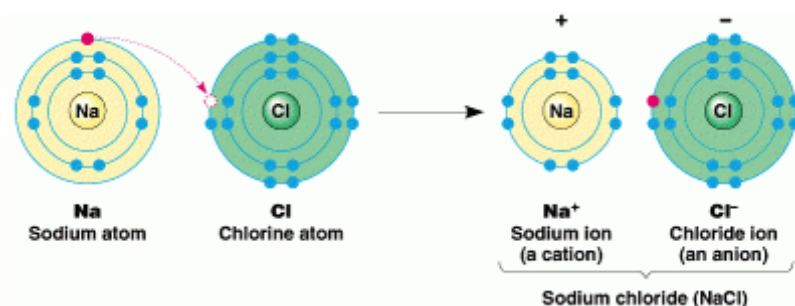
پاسخ سؤال مطرح شده سومین نوع جاذبه است. جاذبه‌ای که نام آن هم دقیقاً مشابه پیوند مورد بحث، یعنی جاذبه الکترواستاتیک است. معمولاً این جاذبه با  $E$  نشان داده شده و به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$E = \frac{Kq_1q_2}{r^2} \quad (1-2)$$

در این رابطه  $K$  یک ثابت است که متأثر از فاکتورهای زیادی مثل ثابت دی‌الکتریک محیط و عوامل دیگر است.  $q_1$  و  $q_2$  بارهای الکتریکی و  $r$  فاصله بین دو بار الکتریکی است. جاذبه الکترواستاتیک می‌تواند علت برقراری پیوند فیزیکی یا همان پیوند الکترواستاتیک باشد. اما سؤال این است؛ چه ذره‌هایی در این پیوند الکترواستاتیک شرکت می‌کنند؟ ذره‌هایی که بعد از این به آنها عملگرهای پیوندهای الکترواستاتیک<sup>۱</sup> گفته می‌شود. اولین ذره‌هایی که در این پیوند شرکت می‌کنند ذره‌های باردار<sup>۲</sup> هستند (شکل (۵-۱)). این ذره‌ها، ذره‌هایی هستند که حداقل یک الکترون داده یا گرفته باشند. یک ذره باردار، باری دارد که عددی صحیح بزرگ‌تر یا کوچک‌تر از یک است. به صورت قراردادی، اگر الکترونی به ذره داده شود بار آن منفی یک و اگر الکترونی از آن گرفته شود بار آن مثبت یک می‌شود. پارامتر فیزیکی که برای ذره باردار در نظر گرفته می‌شود ( $C$ ) است. پیوند الکترواستاتیکی که بین این ذره‌های باردار با تبادل الکترون ایجاد می‌شود، موسوم به پیوند یونی است.

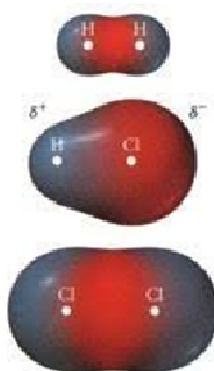
1- Interactors

2- Charge



شکل ۵-۱ ایجاد پیوند الکترواستاتیک (یونی) بین ذره‌های باردار سدیم و کلرید

دومین دسته از ذره‌هایی که ممکن است در پیوندهای الکترواستاتیک شرکت کنند، ذره‌هایی هستند که به آنها دوقطبی<sup>۱</sup> گفته می‌شود. پارامتر فیزیکی ذره‌های دوقطبی، پولاریته یا قطبیت<sup>۲</sup> (P) است. قطبیت چیست؟ هر مولکول فضایی در اطراف خود دارد، که احتمال حضور الکترون‌ها در آن فضا بیشتر است. این فضا، ابر الکترونی نامیده می‌شود. مادامی که توزیع این ابر الکترونی بر اساس محورهای مختلف، یک توزیع متقارن باشد ترکیب دوقطبی نیست اما ممکن است به دلیل استقرار یک اتم الکترونگاتیو در یک سمت این ترکیب، شکل ابر الکترونی از الگوی متقارنی که دارد خارج شود و به یک شکل نامتقارن درآید (شکل ۶-۱)، یعنی ابر الکترونی به یک سمت کشیده شود. هر چقدر این به هم ریختگی بار، که در یک سمت بار منفی به دلیل حضور الکترون و در سمت دیگر بار مثبت به خاطر عدم حضور الکترون است، بیشتر باشد ترکیب دوقطبی تر است.



شکل ۶-۱ توزیع متقارن ابر الکترونی در اطراف مولکول‌های هیدروژن و کلر. توزیع نامتقارن ابر الکترونی در اطراف مولکول هیدروژن کلرید

1- Dipole  
2- Polarity

به عبارت ساده‌تر می‌توان گفت پولاریته یا قطبیت یک ترکیب دوقطبی از پارامتری به نام ممان دوقطبی<sup>۱</sup> ( $\mu$ ) تبعیت می‌کند که برابر است با

$$\mu = q \times d \quad (1-3)$$

در این رابطه،  $q$  بزرگی بارهای از هم جدا شده و  $d$  فاصله بین بارها است. تعبیر خیلی ساده‌ای که می‌توان برای ممان دوقطبی داشت این است که گفته شود ممان دوقطبی خیلی شبیه دلتنگی است. دو موجودی که یکدیگر را دوست دارند هر چقدر بیشتر از یکدیگر دور شوند، یعنی فاصله ( $d$ ) بزرگ‌تری بین آنها حادث شود، دلتنگ‌تر می‌شوند و هر چقدر علاقه‌ای ( $q$ ) که بین آن دو است بیشتر باشد باز هم دلتنگ‌تر می‌شوند. پس یک  $q$  بزرگ، یعنی بارهایی که از هم جدا شده‌اند و یک  $d$  بزرگ، یعنی یک فاصله زیاد، منجر به درست شدن ممان دوقطبی بالای ترکیب می‌شود. بنابراین ترکیبی که ممان دوقطبی بالا دارد، قطبیت بالایی خواهد داشت. پارامتر فیزیکی دیگری که یک ترکیب دوقطبی دارد ولی ترکیب باردار ندارد، پارامتری به نام زاویه ( $\theta$ ) است. چرا برای ترکیب باردار زاویه در نظر گرفته نمی‌شود؟ به دلیل اینکه هندسه ترکیب باردار یک هندسه کروی است و برای کره، مفهومی تحت عنوان زاویه وجود ندارد. در حالی که در ترکیب دوقطبی این موضوع مطرح است؛ آیا ترکیب دوقطبی از سر مثبت به یک ترکیب دیگر نزدیک می‌شود یا از سر منفی؟ (شکل ۱-۶)) همین باعث می‌شود که برای ترکیب دوقطبی زاویه در نظر گرفته شود.

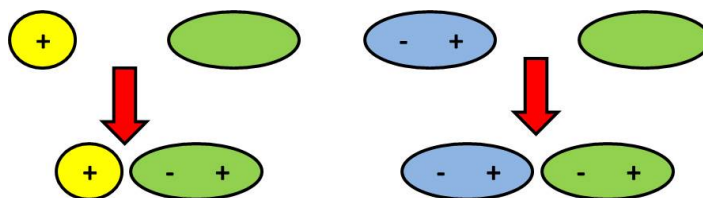
دسته سوم ترکیباتی که در حوزه ترکیبات الکترواستاتیک می‌توان نام برد، ترکیباتی تحت عنوان دوقطبی القایی<sup>۲</sup> هستند. این ترکیبات ذاتاً القاپذیر هستند اما به‌خودی‌خود دوقطبی نیستند. به عبارت ساده‌تر دوقطبی‌های القایی ترکیباتی هستند که ابر الکترونی آنها به‌طور متقارن توزیع شده، اما این قابلیت را دارند که با یک تحریک، مثلاً نزدیک شدن یک ترکیب فعال الکتریکی دیگر که می‌تواند دوقطبی یا باردار باشد، تقارن ابر الکترونی خود را از دست بدهند و در لحظات تحریک، رفتاری شبیه یک ترکیب دوقطبی داشته باشند (شکل ۱-۷)). به این ترکیبات، دوقطبی‌های القایی گفته می‌شود. دوقطبی‌های القایی وقتی القا شوند مانند یک ترکیب دوقطبی، قطبیت یا پولاریته ( $P$ ) و زاویه ( $\theta$ ) خواهند داشت. لازم به ذکر است که به شرط اول کار، یعنی وقتی که القا شوند، باید توجه کرد چون قبل از القا شدن پارامتر دیگری تحت عنوان القاپذیری یا قطبش‌پذیری<sup>۳</sup> ( $\alpha$ ) باید تعریف شود. در ضمن ممکن است هر ترکیب قطبش‌پذیری به‌راحتی ترکیب دیگر القا نشود. به عبارت دیگر، بعضی‌ها قطبش‌پذیری بالا و بعضی‌ها قطبش‌پذیری پایین دارند. چیزی که بدیهی است، این است که مقدار عددی قطبش‌پذیری، عددی بین صفر و یک است. هر چقدر مقدار

1 - Dipole momentum

2- Induced dipole

3- Polarizability

قطبش‌پذیری بالاتر باشد، یعنی به یک نزدیک‌تر شود، رفتار ترکیب دوقطبی القایی شبیه رفتار یک دوقطبی عادی می‌شود. اگر مقدار قطبش‌پذیری برابر یک شود در این صورت فقط قطبیت و زاویه مشاهده می‌شود، یعنی ترکیب دوقطبی می‌شود. اما اگر قطبش‌پذیری کوچک‌تر از یک باشد، ترکیب ثانویه برای القا کردن ترکیب مقابل باید انرژی صرف کند. پس به زبان ساده‌تر برای ترکیبات باردار فقط بار (q)، برای ترکیبات دوقطبی قطبیت (P) و زاویه (θ) و برای ترکیبات دوقطبی القایی قطبش‌پذیری (α)، قطبیت (P) و زاویه (θ) در نظر گرفته می‌شود. لازم به ذکر است که واژه‌های قطبش‌پذیری و قطبیت که برای ترکیباتی با قابلیت دوقطبی القایی به کار می‌رود مفاهیم متفاوتی دارند.



شکل ۷-۱۱ ایجاد دوقطبی القایی در مولکولی با قابلیت قطبش‌پذیری توسط یک مولکول باردار یا دوقطبی دیگر

به زبان ساده‌تر در بین ترکیبات مختلف فقط سه دسته ترکیب، یعنی باردارها، دوقطبی‌ها و نهایتاً دوقطبی‌های القایی حاضر هستند در پیوندهای الکترواستاتیک شرکت کنند. پس اگر قرار باشد پیوندی بین این ترکیبات ایجاد شود، یکی از این شش نوع پیوندی است که معرفی می‌شود: پیوند بین دو بار (CC)، پیوند بین دو دوقطبی (DD)، پیوند بین دو دوقطبی القایی (IDID)، پیوند بین یک بار و یک دوقطبی (CD)، پیوند بین یک دوقطبی و یک دوقطبی القایی (DID)، و نهایتاً پیوند بین یک بار و یک دوقطبی القایی (CID). اینها شش پیوند کلاسیک الکترواستاتیک هستند. پس لازم است که این شش پیوندی که در آنها تبادل الکترون وجود ندارد یک به یک معرفی شوند و در مورد استحکام آنها بحث شود. شاید بهتر باشد که در همین جا پیوندهایی که مطرح شده به ترتیب استحکام آنها بررسی شوند. هر چقدر پیوندی محکم‌تر باشد رتبه بالاتری به آن داده می‌شود. همین ابتدای کار محکم‌ترین پیوند بار-بار (CC) خواهد بود. پیوندی که در آن هر دو عضو پیونددهنده، یعنی هر دو عملگر، بار است و بار فقط q دارد. استحکام این پیوند که تحت عنوان انرژی پیوند خوانده می‌شود برابر است با:

$$E = \frac{\epsilon q_1 q_2}{r} \quad (۱-۴)$$

در این رابطه  $E$  انرژی پتانسیل پیوند،  $q_1$  و  $q_2$  بارهای الکتریکی،  $r$  فاصله بین دو بار الکتریکی و  $\epsilon$  یک مقدار ثابت است. این رابطه نشان می‌دهد که انرژی پتانسیل پیوند بار-بار با توان اول فاصله بین دو بار ارتباط عکس دارد.

در بین پنج پیوند باقی‌مانده کدام قوی‌تر است؟ پیوند بار-دوقطبی (CD) چون حداقل یک طرف پیوند، یک بار و طرف دیگر آن یک دوقطبی است. از آنجایی که عملگر دوم دوقطبی است و یک ترکیب دوقطبی، قطبیت (P) و زاویه ( $\theta$ ) دارد، از این رو باید در رابطه (۵-۱) هر دو عامل قطبیت و زاویه را وارد کرد. زاویه را با یک تابع کسینوسی می‌توان در رابطه اعمال کرد. استحکام این پیوند بار-دوقطبی (CD) که با انرژی پیوند (E) نشان داده می‌شود برابر است با:

$$E = \frac{\epsilon q_1 P_2 \cos \theta}{r^2} \quad (1-5)$$

در این رابطه فاصله خود را با توان دو نشان می‌دهد که این به معنای حساسیت بیشتر است. در رابطه (۴-۱) که مربوط به پیوند بار-بار (CC) یا همان پیوند یونی (پیوند بین دو ذره باردار مثل  $Na^+$  و  $Cl^-$ ) است، دو برابر شدن فاصله استحکام پیوند را  $\frac{1}{4}$  برابر سست‌تر می‌کند ولی دو برابر شدن فاصله در پیوند بار-دوقطبی (CD) استحکام پیوند را  $\frac{1}{4}$  برابر سست‌تر می‌کند.

پیوند بعدی از چهار پیوند باقی‌مانده کدام است؟ می‌توان پیوند دوقطبی-دوقطبی (DD) یا پیوند بار-دوقطبی القایی (CID) را در نظر گرفت. از آنجایی که یکی از عملگرهای پیوند دهنده در پیوند بار-دوقطبی القایی، دوقطبی القایی است و در نتیجه دوقطبی القایی قطبش‌پذیری القایی ( $\alpha$ ) دارد و ممکن است این قطبش‌پذیری از لحاظ عددی بسیار کوچک باشد، بنابراین نمی‌توان آن را در رتبه سوم پیوند قرار داد. رتبه سوم به پیوند دوقطبی-دوقطبی (DD) داده می‌شود که در آن هر دو عملگر پیونددهنده، دوقطبی هستند و هیچ شرط ابتدایی برای تشکیل پیوند ندارند. انرژی این پیوند برابر است با:

$$E = \frac{\epsilon P_1 P_2 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^2}{r^3} \quad (1-6)$$

چون هر دو عملگر قطبی هستند و زاویه ( $\theta$ ) دارند پس برای نشان دادن زاویه برای هر دو عملگر قطبی از تابعی تحت عنوان تابع زاویه‌ای استفاده می‌شود تا هر دو مولکول زاویه خود را نشان دهند. این بار هم حساسیت پیوند دوقطبی-دوقطبی نسبت به فاصله از پیوندهای قبلی بیشتر است.

پیوندهای باقی‌مانده را می‌توان بسیار ساده‌تر رتبه‌بندی کرد زیرا هر سه پیوند، عملگر دوقطبی القایی (ID) را دارند با این تفاوت که یکی بار قوی (CID)، یکی دوقطبی نسبتاً قوی (DID) و

یکی دوقطبی القایی (IDID) را نیز دارد. پس رتبه چهارم، پیوند بار- دوقطبی القایی (CID) خواهد بود. استحکام این پیوند از لحاظ انرژیایی برابر خواهد بود با:

$$E = \frac{\epsilon q_1 \alpha_2 P_2 \cos \theta}{r^4} \quad (1-7)$$

در این رابطه برای بار از  $q$  و برای دوقطبی القایی از قطبیت ( $P$ )، قطبش‌پذیری ( $\alpha$ ) و زاویه ( $\theta$ ) استفاده می‌شود.

رتبه پنجم پیوند دوقطبی-دوقطبی القایی (DID) خواهد بود. از آنجایی که هر دو عملگر دوقطبی هستند، در رابطه انرژی پیوند برای هر دو، قطبیت ( $P$ ) و زاویه ( $\theta$ ) در نظر گرفته می‌شود اما در مورد عملگر دوقطبی القایی، قطبش‌پذیری ( $\alpha$ ) نیز به کار برده می‌شود.

$$E = \frac{\epsilon P_1 P_2 \alpha_2 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^2}{r^5} \quad (1-8)$$

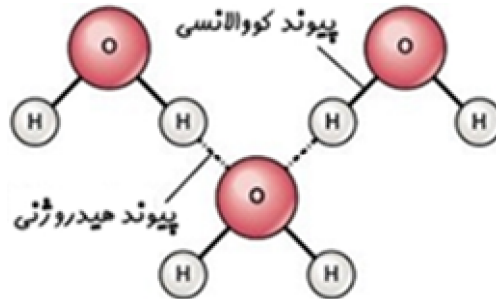
رتبه ششم که سست‌ترین پیوند الکترواستاتیک است، پیوند دوقطبی القایی- دوقطبی القایی (IDID) است. در رابطه انرژی پیوند چون هر دو عملگر دوقطبی القایی هستند برای هر دو، قطبیت ( $P$ )، قطبش‌پذیری ( $\alpha$ ) و زاویه ( $\theta$ ) استفاده می‌شود.

$$E = \frac{\epsilon P_1 P_2 \alpha_1 \alpha_2 (\cos \theta_1 + \cos \theta_2)^2}{r^6} \quad (1-9)$$

در بین این پیوندها، پیوند بار- بار (CC) محکم‌ترین پیوند و پیوند دوقطبی القایی- دوقطبی القایی (IDID) سست‌ترین پیوند الکترواستاتیک است. پیوندهای شش‌گانه‌ای که در اینجا نام برده شد، به ترتیب بار- بار، بار- دوقطبی، دوقطبی- دوقطبی، بار- دوقطبی القایی، دوقطبی- دوقطبی القایی و نهایتاً دوقطبی القایی- دوقطبی القایی به‌عنوان پیوندهای کلاسیک الکترواستاتیک شناخته می‌شوند.

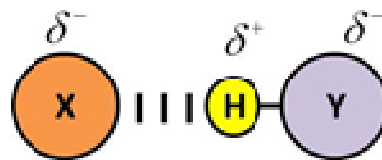
باید بدانیم که پیوند هیدروژنی، پیوندی از گروه پیوندهای دوقطبی- دوقطبی است. این پیوند در بین بسیاری از مولکول‌ها به خصوص مولکول‌های زیستی دیده می‌شود. اما پیوند هیدروژنی چه پیوندی است؟ آیا پیوند هیدروژنی پیوندی است که داخل خود هیدروژن دارد؟ مثلاً آیا پیوند  $H_2O$  یک پیوند هیدروژنی است؟ خیر، در  $H_2O$  دو پیوند کووالان بین اکسیژن و هر یک از هیدروژن‌ها وجود دارد (شکل (۱-۸)) و اصلاً در داخل مولکول پیوند فیزیکی دیده نمی‌شود.





شکل ۸-۱ پیوندهای کووالانسی و هیدروژنی در مولکول آب

برقراری پیوند هیدروژنی شرایط خاصی دارد. اگر در یک مولکول زیستی یک اتم الکترونگاتیو (X) وجود داشته باشد، این اتم الکترونگاتیو به دلیل ماهیت الکترون دوستی که دارد ابر الکترونی را به سمت خود می کشد. بنابراین فراوانی ابر الکترونی یا جزئی بار منفی ایجاد می کند. از سوی دیگر، مولکول دیگری نیز در محیط وجود دارد که در ساختمان خود اتم الکترونگاتیو (Y) دارد ولی به این اتم الکترونگاتیو یک هیدروژن متصل است. به اتم Y اتم الکترونگاتیو ثانویه گفته می شود. این اتم الکترونگاتیو ثانویه هم ابر الکترونی را روی خودش جمع می کند، یعنی از همه مولکول ابر الکترونی را می گیرد و روی خودش جمع می کند. پس هیدروژن به عنوان یکی از اتم های این مولکول که تحت تأثیر رفتار الکترون دوستی شدید اتم الکترونگاتیو Y قرار دارد، الکترون ها را از دست می دهد و دارای جزئی بار مثبت می شود. هیدروژن اگر در فاصله مناسبی از اتم الکترونگاتیو X قرار بگیرد، یک جاذبه الکترواستاتیک بین آنها برقرار می شود که بیش تر اوقات این جاذبه را با سه خط موازی نمایش می دهند و آن را پیوند هیدروژنی می نامند (شکل ۹-۱). شدت الکترونگاتیو بودن X و Y یکی از عواملی است که استحکام پیوند هیدروژنی را تحت تأثیر قرار می دهد. به عبارت دیگر، هر چقدر X الکترونگاتیوتر باشد ابر الکترونی بزرگ تری را روی خودش جمع می کند و بنابراین بار منفی جزئی بیشتر می شود.



شکل ۹-۱ پیوند هیدروژنی

از طرفی هم هر چقدر  $Y$  الکترونگاتیوتر باشد، از هیدروژن بیشتر الکترون می‌گیرد، در نتیجه هیدروژن دارای جزئی بار مثبت بیشتری می‌شود و جاذبه‌ای که بین این دو برقرار خواهد شد، جاذبه شدیدتری خواهد بود. ولی فقط میزان الکترونگاتیویته  $X$  و  $Y$  تعیین‌کننده استحکام یک پیوند هیدروژنی نیست.

چرا بین  $X$  و  $Y$  با الکترونگاتیویته مشخص، ممکن است چند نوع پیوند هیدروژنی برقرار شود؟ زیرا دو فاکتور مهم فاصله و زاویه برای پیوند هیدروژنی وجود دارد. فاصله بهینه، فاصله‌ای است که در آن، هیدروژن از اتم  $X$  تقریباً برابر یک پیوند استاندارد کووالان فاصله داشته باشد. هر چقدر این فاصله بیشتر شود فاصله نامطلوب‌تر خواهد بود. زاویه خوب، زاویه‌ای است که در آن اتم‌های  $XHY$  در یک راستا باشند، یعنی زاویه بین آنها تقریباً برابر با  $180^\circ$  درجه باشد. هر چقدر خمش در این رابطه اتفاق بیفتد، یعنی راستای اتم‌های  $XHY$  خم شود، زاویه نامطلوب‌تر می‌شود.

اتم  $Y$  که الکترونگاتیو است و به هیدروژن متصل است، دهنده هیدروژن<sup>۱</sup> و اتم الکترونگاتیو  $X$  که با هیدروژن متصل به اتم  $Y$  پیوند هیدروژنی برقرار می‌کند پذیرنده هیدروژن<sup>۲</sup> نامیده می‌شود. دو فاکتور زاویه و فاصله برای برقراری پیوند هیدروژنی لازم هستند. از این‌رو چهار نوع پیوند هیدروژنی را می‌توان تعریف کرد (جدول (۱-۱)). فاصله‌هایی که می‌توانند منجر به پیوند شوند به دو دسته فاصله‌های خوب و بد طبقه‌بندی می‌شوند: فاصله‌های بد، فاصله‌های نسبتاً خوب هستند. به همین دلیل اسم آنها را بد می‌گذارند اما منجر به برقراری پیوند هیدروژنی می‌شوند. زاویه‌ها هم به همین ترتیب به دو دسته خوب و بد تقسیم می‌شوند. بر اساس زاویه و فاصله می‌توان پیش‌بینی کرد که پیوند هیدروژنی با زاویه و فاصله مطلوب، پیوند هیدروژنی نوع اول و پیوند هیدروژنی با زاویه و فاصله نامطلوب، پیوند هیدروژنی نوع چهارم است.

شاید این سؤال مطرح شود؛ اگر نه فاصله مناسب است و نه زاویه، چرا این پیوند باید تشکیل شود؟ در اینجا پیوند تشکیل می‌شود ولی نه به شکل خیلی خوب. زیرا زاویه و فاصله الزاماً بد نیستند، فقط خیلی مطلوب نیستند. در این میان قاعده‌تاً انواع دوم و سوم یکی دارای زاویه خوب و فاصله بد و دیگری دارای فاصله خوب و زاویه بد است. اگر رابطه استحکامی بین این پیوندها برقرار باشد، یعنی پیوند نوع اول از پیوند نوع دوم، پیوند نوع دوم از پیوند نوع سوم و پیوند نوع سوم از پیوند نوع چهارم مستحکم‌تر باشد، کدام یک رتبه دوم را کسب می‌کند؟ آنکه فاصله بد دارد و زاویه خوب یا آنکه فاصله خوب دارد و زاویه بد؟ پیوندی که فاصله آن کمابیش خوب است اما زاویه خیلی خوبی ندارد، محکم‌تر از پیوندی است که زاویه آن خوب است اما فاصله‌اش خوب نیست. این موضوع به راحتی قابل بحث است. فرض کنید دهنده هیدروژن و پذیرنده هیدروژن دقیقاً زاویه  $180^\circ$

1- H Donor

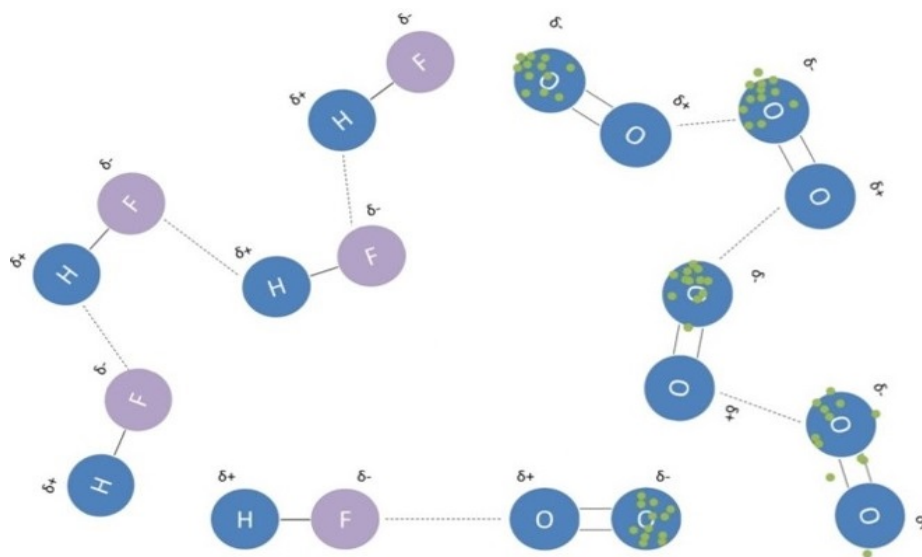
2- H Acceptor

درجه داشته باشند ولی فاصله آنها از هم آنقدر زیاد باشد که اصلاً جاذبه‌ای بین آنها برقرار نشود. این چه پیوندی است و چطور می‌تواند تشکیل شود؟ پس بین زاویه و فاصله، چیزی که اهمیت بیشتری دارد، فاصله است و پیوندی که فاصله آن تأمین می‌شود ولی زاویه تمام و کمال تأمین نمی‌شود، رتبه دوم را می‌گیرد. برعکس، پیوندی که زاویه آن خوب است اما فاصله خیلی خوبی ندارد رتبه سوم را کسب می‌کند.

جدول ۱-۱ انواع پیوند هیدروژنی

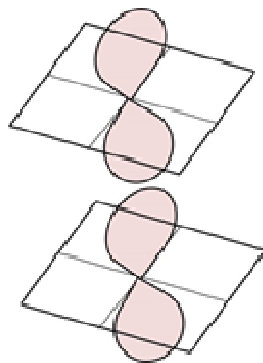
رتبه‌بندی استحکام پیوند	انواع پیوند هیدروژنی
۱	زاویه و فاصله مطلوب
۲	زاویه نامطلوب و فاصله مطلوب
۳	زاویه مطلوب و فاصله نامطلوب
۴	زاویه و فاصله نامطلوب

پیوند واندروالس (شکل ۱۰-۱) یکی از رایج‌ترین پیوندها است که در سیستم‌های زیستی حرف زیادی برای گفتن دارد. این پیوند در گروه پیوندهای دوقطبی القایی - دوقطبی القایی قرار می‌گیرد. پیوند واندروالس به دلیل داشتن شرط‌های زیادی برای تشکیل شدن، یکی از سخت‌ترین پیوندهای الکترواستاتیک است.



شکل ۱۰-۱ پیوند هیدروژنی میان مولکول‌های HF و پیوند واندروالس میان مولکول‌های HF و O<sub>2</sub>.

شرط اول برای برقراری پیوند واندروالس این است که پیوند باید حتماً یک پیوند بین مولکولی باشد. به عبارت دیگر، دو عملگر این پیوند باید ماهیتاً مولکول‌های مجزایی باشند. البته استثنائی هم وجود دارد، وقتی مولکول خیلی بزرگ باشد (شبيه یک مولکول DNA) ممکن است این پیوند بین قسمت‌هایی از این مولکول هم برقرار شود. شرط دوم برای برقراری این پیوند بین مولکولی، یعنی پیوند واندروالس، داشتن ساختاری صفحه‌ای برای مولکول‌هایی است که می‌خواهند این پیوند را شکل دهند، یعنی باید دقیقاً مثل یک برگه کاغذ، یک الگوی مسطح<sup>۱</sup> داشته باشند. شرط سوم این است که باید این مولکول‌های صفحه‌ای شکل، اربیتال مولکولی خارج صفحه‌ای داشته باشند. بلاخره در شرط چهارم، دو مولکولی که می‌خواهند با هم پیوند دهند باید در زاویه و فاصله مناسبی نسبت به هم قرار بگیرند تا در این فاصله و زاویه مناسب اربیتال‌های مولکولی آنها با یکدیگر هم‌پوشانی داشته باشند (شکل (۱۱-۱)).

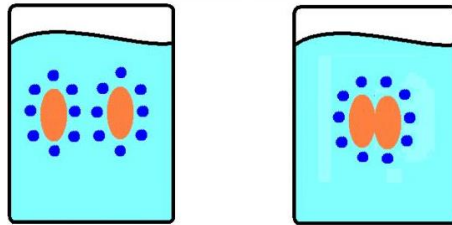


شکل ۱۱-۱ اربیتال مولکولی خارج صفحه‌ای در مولکول‌های صفحه‌ای

در اینجا این سؤال مطرح می‌شود؛ اربیتال کجا است؟ اربیتال جایی است که ابر الکترونی مولکول قرار دارد. وقتی که این دو مولکول به هم نزدیک می‌شوند ابرهای الکترونی مولکول‌ها، یعنی این دو اربیتال به یکدیگر راه پیدا می‌کنند. به زبان ساده‌تر، الکترون‌هایی که در این فضا حضور دارند می‌توانند آزادانه‌تر حرکت کنند و این افزایش آزادی، به معنای افزایش پایداری و تشکیل پیوند است. به محض اینکه این دو فاکتور زاویه و فاصله از بین بروند، پیوند واندروالس هم از بین می‌رود. به همین دلیل پیوند واندروالس یکی از سست‌ترین پیوندهایی است که امکان دارد بین دو مولکول برقرار شود. اما رابطه دیگری هم به نام میان‌کنش آبگریز<sup>۲</sup> یا هیدروفوب بین ذره‌ها وجود دارد که تحت عنوان پیوند از آن یاد نمی‌کنند (شکل (۱۲-۱)).

1- Planar

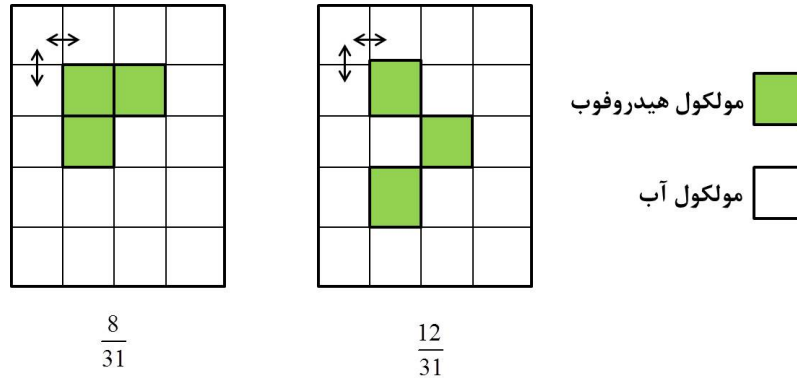
2- Hydrophobic interaction



شکل ۱۲-۱ میان کنش آبگریز

تا به حال هر چه تحت عنوان پیوند گفته شد، گویای تمایل دو عملگر پیوند نسبت به هم بود. اما میان کنش آبگریز ارتباط بین دو مولکول آبگریز است و علت برقراری این ارتباط تمایل این دو مولکول نیست بلکه چون آب در سیستم هیچ تمایلی برای برقراری ارتباط با این مولکول‌های آبگریز ندارد، آنها را در جایگاهی قرار می‌دهد که بیشترین فاصله را با آب داشته باشند. اگر تعداد مولکول‌های آبگریز در یک سیستم آبی زیاد باشد لاجرم این ترکیبات آبگریز مجبور هستند در کنار هم قرار بگیرند. برای توصیف این اتفاق از یک الگوی بسیار ساده ماتریسی استفاده می‌شود (شکل ۱۳-۱)).

در این ماتریس ساده، محور عمودی به پنج قسمت و محور افقی به چهار قسمت تقسیم شده است. فرض کنید هر کدام از این مربع‌ها که در شکل ایجاد شده‌اند، یک جایگاه برای هر مولکول در سیستم باشند. به‌طور کلی، چند ارتباط بین این مربع‌ها یا جایگاه‌ها می‌توان دید؟ در مجموع بین این جایگاه‌ها ۳۱ ارتباط وجود دارد. اگر سه مولکول آبگریز به سیستم اضافه شود که در شکل (۱۳-۱) با رنگ تیره مشخص شده است، چند شانس از کل ۳۱ شانس که برای ارتباط بین مولکول‌های آب وجود داشت، از سیستم گرفته شده است؟ در سمت چپ شکل ۱۳-۱ که مولکول‌های آبگریز به هم چسبیده هستند؛ هشت شانس از ۳۱ شانس ارتباط بین مولکول‌های آب گرفته شده است. در سمت راست شکل ۱۳-۱ این سه مولکول آبگریز در یک چیدمان متفاوت و به‌صورت جدا از هم قرار گرفته‌اند. در این حالت ۱۲ شانس از ۳۱ شانس ارتباط بین مولکول‌های آب از دست رفته است. حالا آب، قرار گرفتن در کدام یک از این حالت‌ها را ترجیح می‌دهد؟ اینکه شانس پیوند بین مولکول‌های خود را بیشتر از دست بدهد یا کمتر؟ مسلماً ترجیح بر این است که در یک سیستم آبی، مولکول‌های آبگریز به‌صورت مجتمع در کنار هم قرار بگیرند. هر چه این مجتمع شدن و فشردگی بیشتر باشد، احتمال اینکه مولکول‌های آب شانس ارتباط بین مولکول‌های خود را از دست بدهند کمتر است.



شکل ۱۳-۱ ماتریسی برای مطالعه ارتباط بین مولکول‌های آب و مولکول‌های آبگریز

حال این سؤال مطرح می‌شود؛ آیا این سه ترکیب آبگریز که با این هندسه در کنار هم قرار گرفته‌اند، با هم پیوند آبگریز تشکیل داده‌اند؟ بدیهاً خیر. کلمه پیوند وقتی استفاده می‌شود که دو جزء با یکدیگر جاذبه‌ای داشته باشند. اینجا پیوند تشکیل نشده، بلکه تنها در کنار هم نشستن ترکیبات آبگریز آن هم فقط به خاطر نفرت آب از آنها اتفاق افتاده است. البته میان کنش‌های آبگریز نقش بسیار مهمی در ساختارهای زیستی دارند که می‌توان به شکل‌گیری ساختارهای غشائی و ساختارهای سه بعدی بسیاری از ترکیبات مثل پروتئین‌ها اشاره کرد. این ارتباطات آبگریز نقش بسیار مؤثری را ایفا می‌کنند ولی نکته‌ای که وجود دارد این است که استفاده کردن از لفظ پیوند برای آنها درست نیست، زیرا هیچ جاذبه‌ای بین آنها وجود ندارد.

جدول ۲-۱ رتبه‌بندی استحکام انواع پیوندهای فیزیکی کلاسیک

رتبه‌بندی استحکام پیوندهای فیزیکی	انواع پیوندهای فیزیکی
۱	بار-بار
۲	بار-دوقطبی
۳	دوقطبی-دوقطبی
۴	بار-دوقطبی القایی
۵	دوقطبی-دوقطبی القایی
۶	دوقطبی القایی-دوقطبی القایی

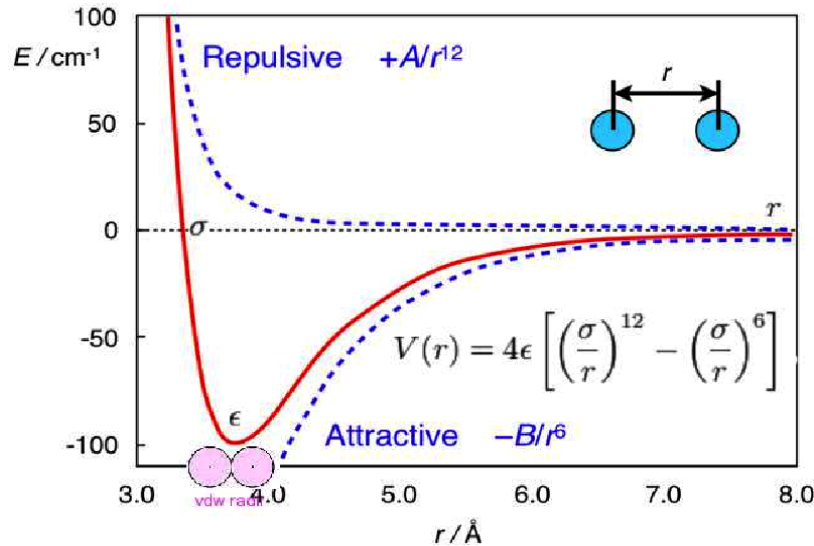
حالا که در مورد میان کنش‌های آبگریز و انواع پیوندهای الکترواستاتیک بحث شد، لازم است که در مورد ارتباط بین دو ذره الکترواستاتیکی که می‌خواهند به یکدیگر نزدیک شوند، صحبت شود. برای توصیف این موضوع رسم یک نمودار خیلی ساده مورد نیاز است. نموداری که در محور عمودی آن انرژی بین دو ذره (E) و در محور افقی آن فاصله بین دو ذره (r) نشان داده شده باشد (شکل (۱-۱۴)).

وقتی دو ذره که یکی از آنها به طور فرضی در نقطه صفر و دیگری در فاصله بی‌نهایت از آن قرار گرفته، به یکدیگر نزدیک شوند، یعنی از بی‌نهایت به صفر؛ انرژی بین آن دو ذره چطور تغییر می‌کند؟ رابطه بین دو ذره از لحاظ انرژیایی همواره جاذبه نیست بلکه این رفتار یا از جنس جاذبه<sup>۱</sup> یا از جنس دافعه<sup>۲</sup> است. وقتی این دو ذره از فاصله دور به یکدیگر نزدیک می‌شوند، انرژی لازم برای نزدیک کردن آنها انرژی ثابتی است. این انرژی کاملاً موازی با محور افقی پیش می‌رود و تغییری در انرژی دیده نمی‌شود. چون انرژی که صرف می‌شود تا این فاصله را کم کند و دو ذره را به هم نزدیک کند برابر با انرژی جرم ذره‌ها است. اما از یک جایی به بعد کم‌کم نزدیک شدن ذره‌ها سخت و سخت‌تر می‌شود زیرا از یک نقطه‌ای به بعد فاصله‌ای تحت عنوان شعاع دافعه وجود دارد که دو ذره یکدیگر را در آن شعاع دفع می‌کنند. به عبارت دیگر، وقتی دو ذره می‌خواهند به یکدیگر نزدیک شوند نسبت به هم دافعه دارند. همچنین ممکن است دو ذره نسبت به یکدیگر رفتار جاذبه داشته باشند، یعنی وقتی دو ذره به هم نزدیک می‌شوند یکدیگر را جذب می‌کنند. البته این جذب در فاصله‌های دور خود را نشان نمی‌دهد. همان طور که در نمودار نشان داده شده است، با نزدیک شدن ذره‌ها کم‌کم انرژی به صفر نزدیک می‌شود زیرا از یک نقطه به بعد که شعاع جاذبه نامیده می‌شود دو ذره شروع به جذب یکدیگر می‌کنند. مقدار عددی شعاع جاذبه همواره بزرگ‌تر از شعاع دافعه است و از یک منطقه به بعد انرژی لازم برای انتقال این دو ذره به فاصله‌های نزدیک‌تر از قبل، به صفر گرایش پیدا می‌کند. دلیل این پدیده این است که دو ذره جاذب هستند و از یک نقطه به بعد خودشان یکدیگر را جذب می‌کنند مانند دو قطب آهن‌ربا با بار مخالف که وقتی از یک فاصله‌ای به یکدیگر نزدیک‌تر شوند خودشان به سمت یکدیگر کشیده می‌شوند. واقعیت این است که ذره‌ها یا رفتار جاذبه دارند یا رفتار دافعه و چون مشخص نیست که دو ذره عملاً کدام یک از این دو رفتار را نشان می‌دهند، بنابراین یک نمودار ترکیبی مورد نیاز است. باید بین این دو نقطه جاذبه و دافعه برآیند گرفته شود، یعنی لازم است مقدار این دو انرژی با هم جمع شود و بر دو تقسیم شود و به همین ترتیب برای تمام نقاط ادامه پیدا کند. نهایتاً با به هم وصل کردن نقطه‌های برآیند (منحنی با خط پیوسته)، نموداری تشکیل می‌شود که بیشتر اوقات از آن تحت عنوان نمودار لئونارد جونز یاد می‌شود.

---

1- Attraction

2- Repulsion

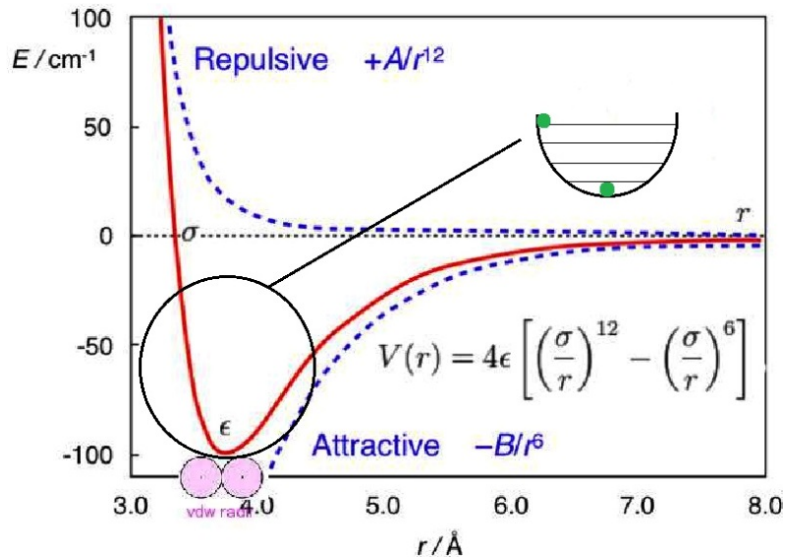


شکل ۱-۱۴ نمودار لئونارد جونز

نمودار لئونارد جونز صرف نظر از جاذب یا دافع بودن دو ذره از طریق ترکیب نمودار جاذبه و نمودار دافعه درست می‌شود. نکات بسیار زیادی در این نمودار موجود است، اول از همه اینکه می‌توان انرژی دو ذره را بر اساس فاصله بین دو ذره به دست آورد. دوم اینکه در فاصله‌های طولانی مقدار عددی انرژی چه جاذبه باشد و چه دافعه، ثابت است. سوم اینکه در یک نقطه از این جاذبه یک مینیمم وجود دارد، یعنی فاصله‌ای که در آن انرژی به حداقل می‌رسد. به این فاصله که انرژی در آن به حداقل می‌رسد  $I_0$  یا شعاع حداقل گفته می‌شود. از آنجایی که هر سیستم فیزیکی تمایل به داشتن حداقل انرژی دارد، احتمال اینکه دو ذره‌ای که در اینجا سیستم را می‌سازند نسبت به یکدیگر در فاصله  $I_0$  قرار بگیرند، بیش از همه است چون در این فاصله حداقل انرژی را دارند. در بخش با انحنای زیاد از نمودار لئونارد جونز یک الگوی بسیار جالب دیده می‌شود که تحت عنوان چاه پتانسیل شرودینگر (شکل (۱۵-۱)) از آن یاد می‌شود. این الگو بخشی از نمودار لئونارد جونز است و مانند آن در حالت افقی فاصله و در حالت عمودی انرژی را بررسی می‌کند.

بهترین توصیف برای چاه پتانسیل شرودینگر که بیان کننده تبدیل انرژی پتانسیل بین دو ذره است، استقرار یک گوی درون یک کاسه است. یک گوی در لبه‌های یک کاسه، بیشترین انرژی و در قعر کاسه کمترین انرژی را به شکل انرژی پتانسیل در خود دارد. اگر یک کاسه فرضی و یک گوی در درون آن وجود داشته باشد، احتمال حضور گوی در کدام یک از نقطه‌های داخل کاسه بیشتر است؟ بدون شک، جواب قعر کاسه است.





شکل ۱۵-۱ نمودار لئونارد جونز و چاه پتانسیل شرودینگر

نمودار لئونارد جونز و چاه پتانسیل شرودینگر با توصیف کردن سطوح انرژیایی متفاوت، احتمال رخداد انرژیایی یک سیستم را به دست می‌دهند. به‌عنوان مثال یک الکترون ممکن است در لایه‌های مختلف یا زیرلایه‌های مختلف باشد. این الکترون ممکن است دوران خود را دورتر یا نزدیک‌تر از هسته انجام دهد. چاه پتانسیل شرودینگر نشان می‌دهد که چطور وقتی الکترون از مدار اصلی که کمترین انرژی را دارد، دورتر و یا نزدیک‌تر قرار می‌گیرد، ناپایدارتر می‌شود (و البته انرژی درونی آن باعث افزایش انرژی جنبشی، افزایش پیدا می‌کند، به نقاطی که در چاه پتانسیل شرودینگر، (یا همان بخش انحنایافته و کاسه‌ای شکل نمودار لئونارد جونز) رو به روی هم هستند و یکی از آنها در فاصله دورتر و دیگری در فاصله نزدیک‌تری قرار دارد، نقاط هم انرژی می‌گویند. شکلی که نمودار لئونارد جونز می‌تواند داشته باشد، یعنی متقارن باشد یا نه، باعث تقسیم‌بندی‌های بسیار جذابی می‌شود که از رفتار انرژیایی سیستمی که در حال بررسی است، حکایت می‌کند. بر اساس اصل عدم قطعیت هایزنبرگ هرگز نمی‌توان با اطمینان گفت که گوی در این کاسه در چه نقطه‌ای قرار گرفته است. ولی کمابیش می‌توان مطمئن شد که چون همواره کم‌انرژی‌ترین حالت مورد نظر است، در نقطه کم‌انرژی، یعنی در نقطه  $r_0$  قرار دارد. نموداری که نشان داده شد (شکل ۱۴-۱)، نموداری است که برای تمام روابطی که درباره آنها صحبت شد مثل میان‌کنش‌های آگریز با فاصله‌ای که ممکن است ذره‌ها داشته باشند، پیوندهای واندروالس با فاصله‌ای که ممکن است مولکول‌ها داشته باشند، پیوندهای هیدروژنی با فاصله‌ای که عملگر الکترونگاتیو پذیرنده هیدروژن با هیدروژن عملگر دهنده هیدروژن می‌تواند داشته باشد و نهایتاً هر شش پیوند کلاسیک

الکترواستاتیک می‌تواند برقرار باشد. رابطه ایجادکننده نمودار لئونارد جونز بنیادی‌ترین رابطه در برقراری پیوندهای الکترواستاتیک است و اهمیت فاصله را در برابر انرژی که همواره به دنبال استحصال انرژی کمتر است، نشان می‌دهد. با همین پیوندهاست که شاکله ارتباطات فیزیکی مولکولها و اتمها با هم برقرار می‌شود. ارتباطات و برهمکنش‌هایی که در سطح مولکولی رخ داده‌ای زیستی را شکل می‌دهند. با توجه به اهمیت آب بعنوان بستر حیات و واکنش‌ها و اندرکنش‌های زیستی در فصل بعد به بررسی رخ دادهای مولکولی بیوفیزیکی در سطح آب خواهیم پرداخت.

## منابع

1. Kensal E. van Holde, W. Curtis Johnson, P. Shing Ho; “**Principles of physical biochemistry**”; Pearson Education, Inc, 2006, 1998.
  2. Peter L. Privalov; “**Microcalorimetry of macromolecules the physical basis of biological structures**”; a John Wiley & Sons, Inc; 2012.
  3. Walter Hoppe, Wolfgang Lohmann, Hubert Markl, Hubert Ziegler; “**Biophysics**”; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 1982.
  4. C.R. Cantor and P.R. Schimmel;” **Biophysical Chemistry**” W.H. Freeman 6 Co., San Francisco; 1980.
  5. Alan Cooper; “**Biophysical chemistry**” Royal society of chemistry; 2004.
  6. Bengt Nolting.; “**Protein folding kinetics, biophysical methods**”; 2<sup>nd</sup> Edition; Springer-Verlag Berlin Heidelberg; 2006.
  7. G.C. Barret; “**Chemistry and biochemistry of amino acids**”; Chapman & Hall, New York; 1985.
  8. G.C. Barret; D.T. Elmore; “**Amino acids and peptides**”; Cambridge University Press; 1998.
  9. David L. Nelson, Michael M. Cox “**Lehninger Principles of Biochemistry**”; 6<sup>th</sup> Edition; W. H. Freeman and company; 2013.
  10. R. Cotterill; “**Biophysics an introduction**”; John Wiley & Sons LTD, u.k.; 2002.
  11. Alpen, Edward L. **Radiation biophysics**. Academic press, 1997.
۱۲. بیژن رنجبر، حسین نادری منش، خسرو خلیفه؛ «مبانی بیوفیزیک، بیوفیزیک پروتئین‌ها اسیدهای نوکلئیک و طیف‌سنجی»؛ انتشارات دانشگاه تربیت مدرس؛ ۱۳۸۹.
۱۳. مصطفی رضایی طاویرانی، رضا یوسفی، بیژن رنجبر، حسین نادری منش؛ «بیوفیزیک»؛ انتشارات سنجش و سنجش تکمیلی؛ ۱۳۸۵.