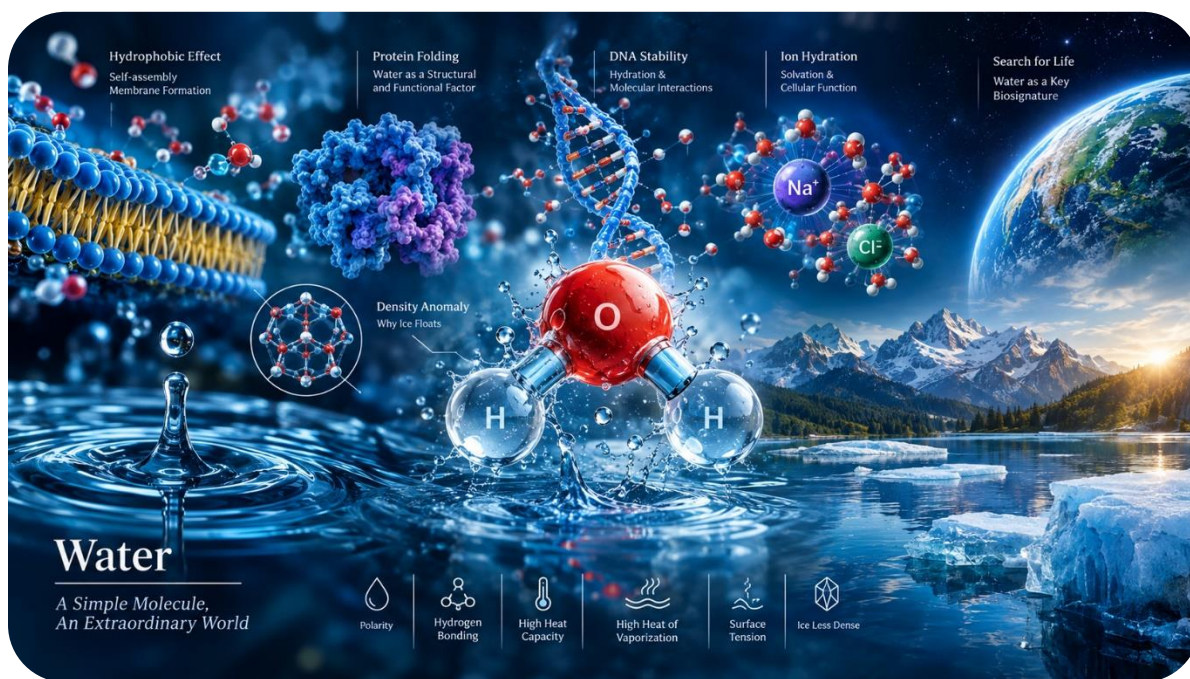




آب، عجیب‌ترین مولکول جهان

از شبکه‌ی پیوند هیدروژنی تا ترمودینامیک حیات

آب احتمالاً یکی از بدفهمیده‌شده‌ترین مواد روی زمین است.

نه به این دلیل که ساختارش ناشناخته است؛ ساختار مولکولی آن مدت‌هاست که به‌خوبی شناخته شده. مسئله این است که سادگی فرمول شیمیایی آب، پیچیدگی رفتار آن را پنهان می‌کند.

H_2O روی کاغذ فقط یک مولکول سه‌اتمی است. اما وقتی تعداد بسیار زیادی از این مولکول‌ها کنار هم قرار می‌گیرند، مجموعه‌ای از خواص جمعی ظاهر می‌شود که برای یک مولکول کوچک، کاملاً غیرعادی است: دمای ذوب و جوش نسبتاً بالا، ظرفیت گرمایی زیاد، ثابت دی‌الکتریک بالا، کشش سطحی قابل توجه، ناهنجاری چگالی و رفتارهای پیچیده‌ی آب‌پوشی.

و این‌ها صرفاً کنجکاو‌های فیزیکی نیستند.

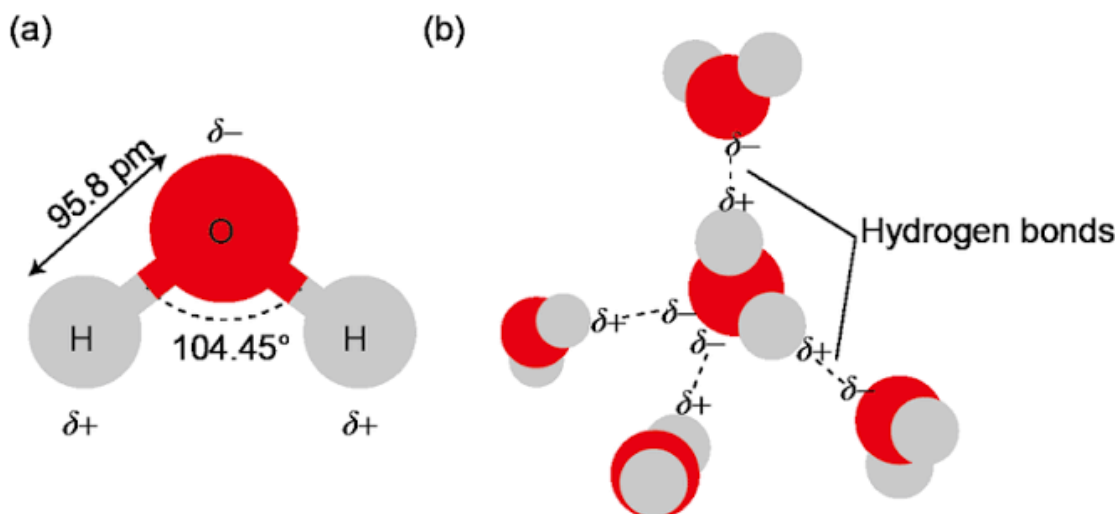
بخش مهمی از زیست‌شناسی مولکولی در واقع فیزیک آب در حضور مولکول‌های زیستی است.

پروتئین‌ها در آب تا می‌خورند، غشاها در آب خودآرایی می‌کنند، یون‌ها در آب آب‌پوشی می‌شوند، DNA در محیط آبی ساختار خود را حفظ می‌کند و بسیاری از واکنش‌های متابولیکی در یک حلال آبی اتفاق می‌افتند.

به همین دلیل، اگر بخواهیم بفهمیم چرا آب برای حیات این‌قدر مهم است، جمله‌ی «بدن انسان بیشترش آب است» تقریباً هیچ چیز را توضیح نمی‌دهد.

سؤال واقعی این است:

چه ویژگی‌هایی در فیزیک و شیمی آب وجود دارد که آن را به محیطی استثنایی برای سازمان‌یابی ماده‌ی زنده تبدیل کرده‌اند؟



۱. مسئله از یک مولکول قطبی شروع می‌شود

مولکول آب دارای هندسه‌ی خمیده است و زاویه‌ی پیوند H-O-H آن حدود ۱۰۴/۵ درجه است. اکسیژن نیز به دلیل الکترونگاتیویته‌ی بیشتر، چگالی الکترونی پیوندهای O-H را بیشتر به سمت خود می‌کشد.

اما نکته‌ی مهم فقط قطبی بودن پیوند O-H نیست.

به دلیل هندسه‌ی خمیده‌ی مولکول، بردارهای دوقطبی پیوندها یکدیگر را خنثی نمی‌کنند. در نتیجه آب یک گشتاور دوقطبی خالص حدود ۱/۸۵ دبی دارد.

این موضوع به آب اجازه می‌دهد با میدان‌های الکتریکی و با مولکول‌ها و یون‌های باردار به شکل بسیار مؤثری برهم‌کنش کند.

اما یک مرحله‌ی مهم‌تر هم وجود دارد.

آب فقط یک مولکول قطبی نیست؛ یک مولکول قطبی است که می‌تواند شبکه‌ای از پیوندهای هیدروژنی تشکیل دهد.

هر مولکول آب می‌تواند به‌طور بالقوه به چند مولکول دیگر آب متصل شود و یک شبکه‌ی سه‌بعدی پویا ایجاد کند.

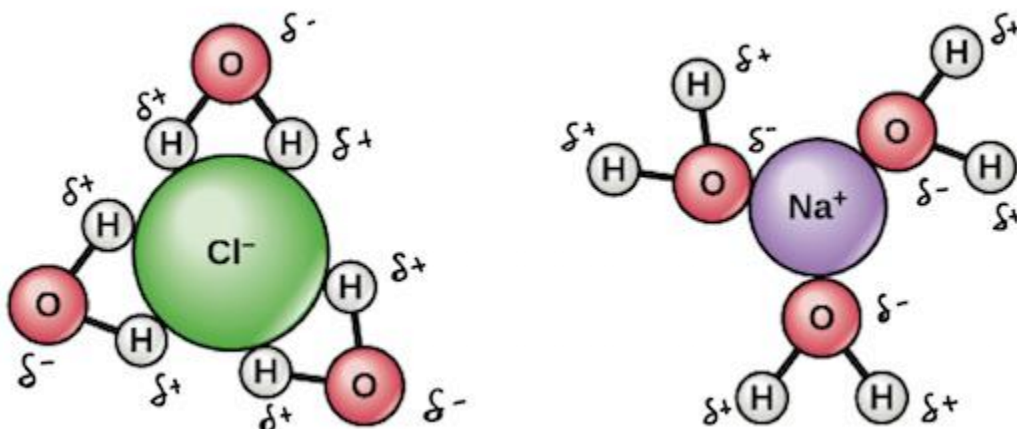
در یخ، این شبکه آرایش نسبتاً منظمی پیدا می‌کند.

در آب مایع، نظم کاملاً از بین نمی‌رود؛ بلکه به شکل مداوم بازآرایی می‌شود.

پیوندها تشکیل می‌شوند، می‌شکنند و دوباره تشکیل می‌شوند.

بنابراین آب مایع را بهتر است نه یک محیط کاملاً بی‌نظم، بلکه یک شبکه‌ی پویا و نوسان‌پذیر از برهم‌کنش‌های مولکولی در نظر بگیریم.

همین تفاوت ظریف، بخش بزرگی از داستان آب است (ACS Publications).



۲. آب یک «حلال» ساده نیست؛ یک محیط فعال است

در توضیحات مقدماتی معمولاً گفته می‌شود آب «حلال جهانی» است.

این عبارت بیش از حد ساده‌سازی شده.

آب همه‌چیز را حل نمی‌کند و رفتار آن نسبت به مواد مختلف به شدت وابسته به ساختار شیمیایی آن ماده است.

برای یک یون مانند Na^+ ، مولکول‌های آب به دلیل دوقطبی خود جهت‌گیری مشخصی پیدا می‌کنند. اکسیژن نسبتاً منفی مولکول آب به سمت یون مثبت قرار می‌گیرد و مجموعه‌ای از مولکول‌های آب، یک **پوسته‌ی آب‌پوشی** یا **hydration shell** در اطراف یون ایجاد می‌کنند.

در مورد یون‌های منفی، جهت‌گیری مولکول‌ها برعکس می‌شود.

این آب‌پوشی صرفاً یک تصویر زیبا از مولکول‌ها نیست؛ انرژی آزاد، تحرک و رفتار شیمیایی یون را تغییر می‌دهد.

در یک سلول، یون‌ها در خلأ حرکت نمی‌کنند.

آن‌ها در محیطی متراکم از مولکول‌های آب حرکت می‌کنند و دائماً با حلال برهم‌کنش دارند.

بنابراین وقتی درباره‌ی رفتار Na^+ ، K^+ ، Ca^{2+} یا Mg^{2+} صحبت می‌کنیم، در واقع باید هم‌زمان **یون و محیط آبی اطراف آن** را در نظر بگیریم.

این یکی از تفاوت‌های مهم بین نگاه ساده‌ی «ماده در آب» و نگاه مولکولی به محلول است.

۳. ثابت دی‌الکتریک بالا؛ چرا آب برای یون‌ها محیطی ویژه است؟

یکی از ویژگی‌های بنیادی آب، **ثابت دی‌الکتریک نسبتاً بالای آن** است.

این ویژگی باعث می‌شود برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی بین بارها در آب نسبت به خلأ به شدت تضعیف شوند.

اگر دو یون با بار مخالف را در نظر بگیریم، انرژی برهم‌کنش کولنی آن‌ها به محیط اطرافشان وابسته است. در یک محیط با گذردهی الکتریکی بالا، این برهم‌کنش مؤثر کاهش پیدا می‌کند.

نتیجه این است که آب می‌تواند جدایی و پایدارسازی یون‌ها را بسیار آسان‌تر از محیط‌هایی با ثابت دی‌الکتریک پایین انجام دهد.

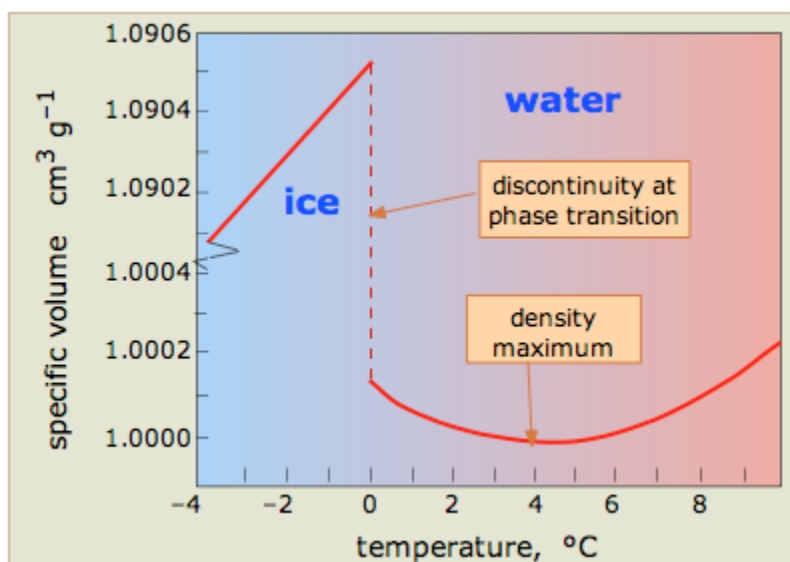
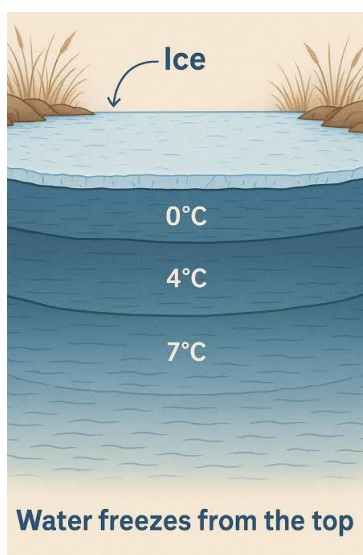
به همین دلیل نمک‌هایی که در حالت جامد دارای شبکه‌ی یونی پایدار هستند، می‌توانند در آب تفکیک و آب‌پوشی شوند. از دید زیست‌شناسی، این ویژگی اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد.

بخش قابل توجهی از شیمی سلول بر پایه‌ی یون‌ها و مولکول‌های باردار انجام می‌شود.

انتقال یون‌ها، برقراری شیب‌های الکتروشیمیایی، فعالیت آنزیم‌ها و بسیاری از فرایندهای سلولی به رفتار بارها در یک محیط آبی وابسته‌اند.

پس آب فقط «جایی که یون‌ها در آن شناورند» نیست.

آب میدان الکتریکی اطراف آن‌ها را تغییر می‌دهد.



۴. یکی از بزرگ‌ترین استثنای طبیعت: چگالی آب

حالا به یکی از معروف‌ترین ناهنجاری‌های آب برسیم.

آب در حدود ۴ درجه‌ی سانتی‌گراد بیشترین چگالی خود را دارد.

این جمله ساده است، اما پشت آن رقابت بین دو اثر متفاوت قرار دارد.

از یک طرف، کاهش دما معمولاً باعث کاهش حرکت حرارتی و نزدیک‌تر شدن مولکول‌ها می‌شود.

از طرف دیگر، تقویت آرایش‌های ناشی از پیوند هیدروژنی می‌تواند ساختارهایی با هندسه‌ی بازتر ایجاد کند.

در آب سرد، این دو اثر با هم رقابت می‌کنند.

در نتیجه آب برخلاف بسیاری از مواد، هنگام سرد شدن تا ۴ درجه متراکم‌تر می‌شود، اما با سرد شدن بیشتر، دوباره منبسط می‌شود.

در یخ این اثر حتی شدیدتر است.

شبکه‌ی نسبتاً باز پیوندهای هیدروژنی در ساختار یخ باعث می‌شود حجم بیشتری نسبت به آب مایع اشغال شود.

بنابراین:

یخ چگالی کمتری از آب مایع دارد.

این ناهنجاری چگالی یکی از ویژگی‌های کلاسیک آب است که به ساختار شبکه‌ای پیوند هیدروژنی مرتبط می‌شود (ACS Publications).

۵. یک تغییر در مقیاس آنگستروم، پیامدهایی در مقیاس اکوسیستم دارد

شناور ماندن یخ شاید در نگاه اول صرفاً یک ویژگی فیزیکی جالب باشد.

اما پیامد آن بسیار بزرگ‌تر است.

وقتی سطح یک دریاچه یخ می‌زند، یخ روی سطح باقی می‌ماند و لایه‌ای ایجاد می‌کند که انتقال گرما را نسبت به آب آزاد محدود می‌کند.

در نتیجه، تمام توده‌ی آب لزوماً هم‌زمان منجمد نمی‌شود.

این موضوع برای اکوسیستم‌های آب شیرین در مناطق سرد اهمیت زیادی دارد.

اینجا یک نمونه‌ی زیبا از ارتباط مقیاس‌ها داریم:

یک ویژگی در هندسه‌ی مولکولی آب →

تغییر در چگالی ماده →

تغییر در رفتار حرارتی یک دریاچه →

و در نهایت، اثر بر زیست‌پذیری یک اکوسیستم.

این همان جایی است که فیزیک ماده‌ی چگال و زیست‌شناسی محیطی به هم می‌رسند.

۶. آب و مسئله‌ای که زیست‌شناسی را ساخته: اثر آب‌گریزی

شاید مهم‌ترین ارتباط آب با حیات نه در یخ و نه در ظرفیت گرمایی، بلکه در رفتار آن با مولکول‌های غیرقطبی باشد.

مواد غیرقطبی معمولاً در آب حلالیت کمی دارند.

اما توضیح اینکه چرا روغن و آب با هم مخلوط نمی‌شوند با جمله‌ی «آب، روغن را دوست ندارد» تمام نمی‌شود.

برای فهم دقیق‌تر، باید به ترمودینامیک نگاه کنیم.

مولکول آب تمایل دارد شبکه‌ی پیوند هیدروژنی خودش را حفظ کند.

وقتی یک گروه غیرقطبی وارد آب می‌شود، نمی‌تواند در این شبکه به شکلی مشابه یک مولکول قطبی شرکت کند.

در نتیجه، ساختار و دینامیک آب اطراف آن تغییر می‌کند.

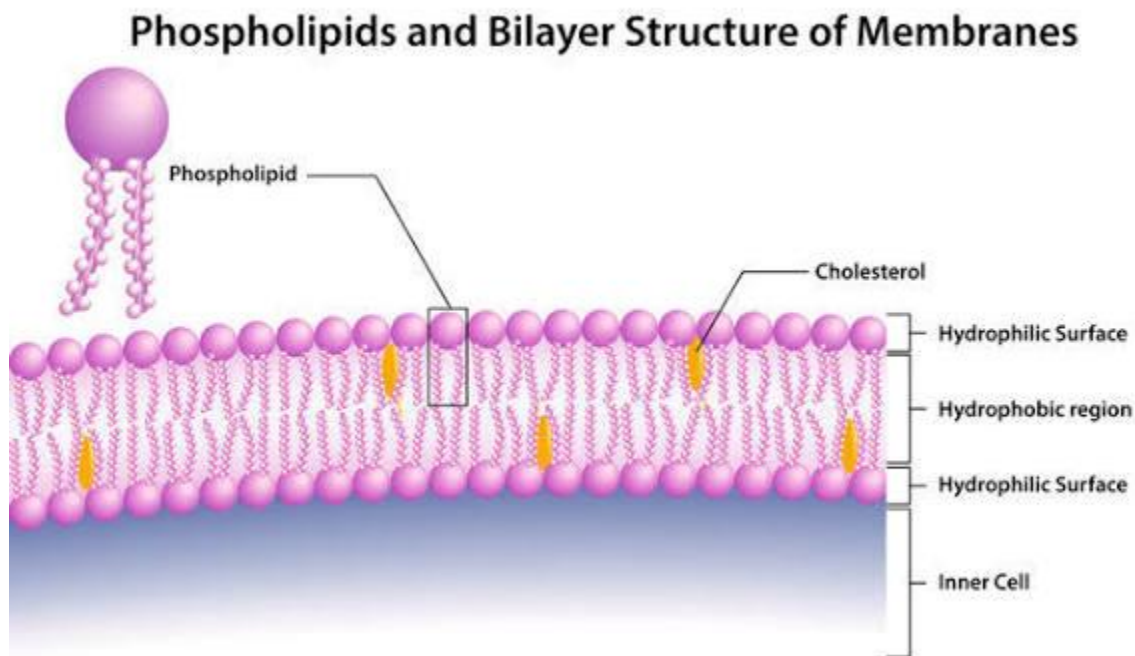
از اینجا مفهومی بسیار مهم وارد می‌شود:

اثر هیدروفوبیک.

این اثر صرفاً یک نیروی ساده‌ی «دافعه‌ی آب و چربی» نیست.

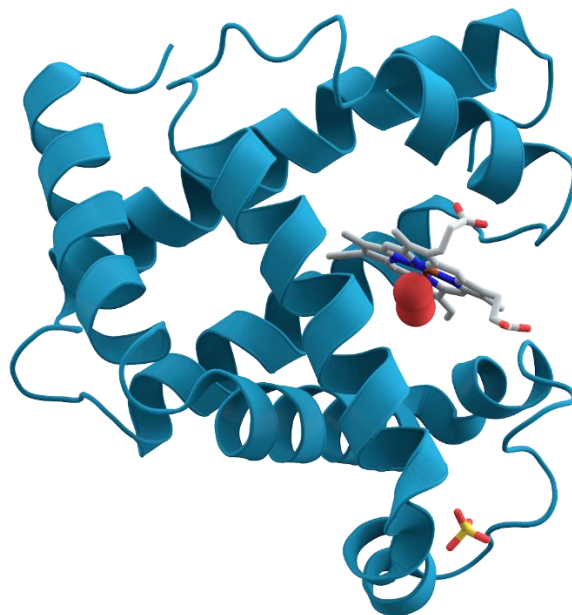
در واقع نتیجه‌ی پیچیده‌ای از تغییرات انرژی و آنتروپی در سیستم آب و حل‌شونده است.

به همین دلیل هم توضیح مدرن اثر هیدروفوبیک صرفاً با یک جمله‌ی ساده ممکن نیست و هنوز جزئیات آن در سامانه‌های مختلف موضوع پژوهش است (PubMed Central (PMC)).



۷. چرا اثر هیدروفوبیک برای سلول حیاتی است؟

یکی از مهم‌ترین نتایج اثر هیدروفوبیک، **خودآرایی مولکول‌های آمفی‌پاتیک** در آب است. فسفولیپیدها یک سر قطبی و یک بخش غیرقطبی دارند. وقتی چنین مولکول‌هایی در آب قرار می‌گیرند، آرایش‌هایی شکل می‌دهند که بخش‌های آب‌گریز را از تماس گسترده با آب دور می‌کند. این فرایند یکی از پایه‌های تشکیل دولایه‌ی لیپیدی است. و دولایه‌ی لیپیدی همان ساختاری است که بخش مهمی از معماری غشای سلول را می‌سازد. بنابراین غشای سلول را می‌توان فقط یک ساختار زیستی ندید. از دید فیزیک شیمی، غشا نمونه‌ای از **خودآرایی ماده در پاسخ به محیط آبی** است. یعنی آب در اینجا فقط یک حلال نیست که غشا درون آن قرار گرفته باشد. آب یکی از عواملی است که شرایط لازم برای شکل‌گیری غشا را ایجاد می‌کند.



۸. پروتئین‌ها در خلأ تا نمی‌خورند

یک پروتئین را می‌توان به صورت زنجیره‌ای از اسیدهای آمینه در نظر گرفت.

اما عملکرد پروتئین به شدت به ساختار سه‌بعدی آن وابسته است.

این ساختار چگونه شکل می‌گیرد؟

پاسخ ساده‌ای وجود ندارد.

پیوندهای هیدروژنی، برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی، نیروهای واندروالس، بسته‌بندی زنجیره‌های جانبی و اثرات حلال همگی دخیل‌اند.

اما آب نقش ویژه‌ای دارد.

بخش‌های غیرقطبی زنجیره تمایل دارند سطح تماس خود با آب را کاهش دهند. در نتیجه، دفن شدن گروه‌های آب‌گریز در بخش داخلی پروتئین می‌تواند به پایداری حالت تاخورده کمک کند.

با این حال، یک نکته‌ی ظریف وجود دارد:

نباید اثر هیدروفوبیک را به شکل یک «نیروی واحد» تصور کنیم که پروتئین را مثل آهنربا جمع می‌کند.

پایداری پروتئین حاصل توازن پیچیده‌ای از انرژی پروتئین، آب و برهم‌کنش‌های پروتئین-آب است.

حتی پژوهش‌های جدیدتر تأکید می‌کنند که آب را نمی‌توان صرفاً یک حلال منفعل در مسئله‌ی تاخوردگی پروتئین در نظر گرفت ([PubMed Central \(PMC\)](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/)).

۹. نکته‌ی ظریف‌تر: آب حتی به «اشتباه نکردن» پروتئین‌ها کمک می‌کند

یکی از برداشت‌های جذاب از نقش آب در زیست‌شناسی این است که آب فقط به پروتئین اجازه نمی‌دهد تا بخورد؛ بلکه بر **چشم‌انداز انرژی** آن هم اثر می‌گذارد.

یک پروتئین می‌تواند تعداد بسیار زیادی حالت فضایی بالقوه داشته باشد.

اما فقط تعداد محدودی از آن‌ها ساختارهای عملکردی مناسب هستند.

اگر تمام برهم‌کنش‌ها به یک اندازه مطلوب بودند، پروتئین ممکن بود در حالت‌های نادرست زیادی گیر کند.

برهم‌کنش‌های پروتئین با آب بخشی از این چشم‌انداز انرژی را شکل می‌دهند.

به بیان ساده‌تر، آب در تعیین اینکه کدام آرایش‌های مولکولی پایدارتر یا ناپایدارتر باشند، نقش دارد.

حتی برخی بررسی‌ها نشان داده‌اند که حالت‌های بازشده بسیاری از پروتئین‌ها در آب الزاماً مثل یک زنجیره‌ی فروپاشیده و فشرده رفتار نمی‌کنند؛ یعنی رابطه‌ی «اثر هیدروفوبیک = جمع شدن ساده‌ی زنجیره» بیش از حد ساده‌سازی شده است. ([PubMed Central \(PMC\)](#))

این همان جایی است که شیمی فیزیک به یکی از مسائل مرکزی زیست‌شناسی مولکولی یعنی **تاخوردگی پروتئین** وارد می‌شود.

۱۰. آب فقط اطراف پروتئین نیست؛ بخشی از ساختار عملکردی آن است

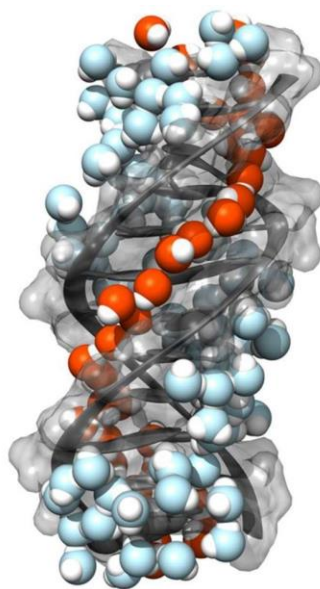
در برخی پروتئین‌ها، مولکول‌های آب در حفره‌ها یا محل‌های اتصال قرار می‌گیرند و حتی می‌توانند در برهم‌کنش بین یک پروتئین و لیگاند نقش داشته باشند.

بنابراین ساختار یک پروتئین را همیشه نمی‌توان به شکل «پروتئین + فضای خالی اطراف آن» تصور کرد.

گاهی آب بخشی از معماری مولکولی سامانه است.

در واقع، در مرز پروتئین و آب، مولکول‌های آب می‌توانند رفتار متفاوتی نسبت به آب حجمی داشته باشند؛ جهت‌گیری، تحرک و زمان ماند آن‌ها می‌تواند تحت تأثیر سطح پروتئین قرار بگیرد.

این موضوع در روش‌هایی مانند طیف‌سنجی NMR، پراکندگی نوترون و شبیه‌سازی‌های دینامیک مولکولی مورد مطالعه قرار گرفته است ([PubMed Central \(PMC\)](#)).



۱۱. DNA. هم یک مولکول «خشک» نیست

وقتی تصویر مارییچ دوگانه‌ی DNA را می‌بینیم، ممکن است ناخودآگاه آن را به صورت یک ساختار مستقل تصور کنیم. اما DNA در محیط آبی وجود دارد.

ستون فسفاتی DNA بار منفی دارد و اطراف آن شبکه‌ای از یون‌ها و مولکول‌های آب شکل می‌گیرد.

این محیط آب‌پوشی می‌تواند روی ساختار، پایداری و برهم‌کنش DNA با پروتئین‌ها اثر بگذارد.

حتی پیوندهای هیدروژنی بین بازهای مکمل نیز در محیطی آبی اتفاق می‌افتند.

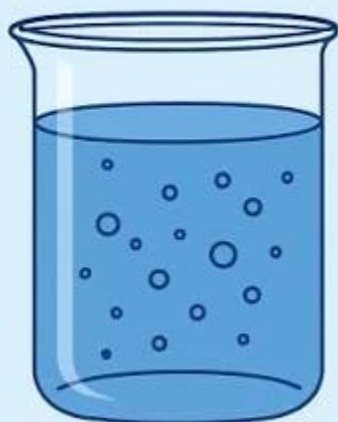
بنابراین ساختار DNA نتیجه‌ی مجموعه‌ای از نیروهاست:

- پیوندهای هیدروژنی
- برهم‌کنش‌های π - π و stacking بین بازها
- برهم‌کنش‌های الکترواستاتیکی
- یون‌های مقابل
- و آب‌پوشی

به همین دلیل، توضیح ساختار DNA صرفاً با A با T و G با C جفت می‌شود» توضیح کاملی نیست.

آن فقط بخش کوچکی از داستان است.

SPECIFIC HEAT CAPACITY OF WATER



Specific Heat Capacity

$$c = 4,18 \text{ J/(g} \cdot ^\circ\text{C)}$$

The amount of heat required to raise the temperature of 1 gram of a substance by 1 degree Celsius.

۱۲. چرا آب گرما را متفاوت از بسیاری از مایعات مدیریت می‌کند؟

ظرفیت گرمایی ویژه‌ی آب نسبتاً بالاست.

در سطح مولکولی، بخشی از انرژی وارد شده صرف تغییر انرژی حرکتی مولکول‌ها و بخشی صرف تغییر شبکه‌ی برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی می‌شود.

به همین دلیل آب می‌تواند مقدار زیادی انرژی حرارتی دریافت کند بدون اینکه دمایش به همان نسبت سریع تغییر کند.

در مقیاس اقیانوس، این ویژگی به ذخیره و انتقال انرژی در سیستم اقلیمی زمین کمک می‌کند.

در مقیاس زیستی هم وجود مقدار زیادی آب در بدن، یکی از عواملی است که به پایداری حرارتی کمک می‌کند.

اما اهمیت این ویژگی فقط در «خنک شدن بدن» خلاصه نمی‌شود.

آب به عنوان یک مخزن حرارتی، یکی از اجزای مهم دینامیک انرژی در زیست‌کره است.

۱۳. تبخیر؛ جایی که ترمودینامیک به فیزیولوژی می‌رسد

برای تبدیل آب مایع به بخار باید انرژی لازم برای غلبه بر برهم‌کنش‌های بین‌مولکولی تأمین شود.

به همین دلیل **آنتالپی تبخیر آب** نسبتاً بالاست.

این ویژگی پایه‌ی فیزیکی یکی از ساده‌ترین سیستم‌های خنک‌کننده‌ی زیستی است:

تعریق.

وقتی مولکول‌های آب از سطح پوست تبخیر می‌شوند، انرژی لازم برای این تغییر فاز از محیط گرفته می‌شود.

اما همین اصل در مقیاس سیاره‌ای هم اتفاق می‌افتد.

تبخیر از سطح اقیانوس‌ها انرژی را از سطح زمین می‌گیرد و این انرژی همراه با بخار آب به جو منتقل می‌شود. وقتی بخار متراکم می‌شود و ابر و بارش شکل می‌گیرد، انرژی نهان دوباره آزاد می‌شود. بنابراین چرخه‌ی آب در واقع فقط چرخه‌ی جرم نیست. **چرخه‌ی انتقال انرژی هم هست.**

۱۴. آب و انرژی آزاد گیبس

اگر بخواهیم بحث را یک مرحله جدی‌تر کنیم، باید به کمیتی برسیم که تقریباً در تمام این داستان حضور دارد:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S$$

یعنی تغییر انرژی آزاد گیبس.

در دما و فشار ثابت، فرایندی که از نظر ترمودینامیکی مطلوب باشد، تمایل دارد در جهتی پیش برود که انرژی آزاد گیبس کاهش پیدا کند.

این معادله به ما یادآوری می‌کند که نمی‌توانیم رفتار آب را فقط با «انرژی پیوندها» توضیح دهیم.

گاهی یک فرایند از نظر آنتالپی مطلوب نیست، اما تغییر آنتروپی می‌تواند آن را مطلوب کند.

گاهی برعکس.

اثر هیدروفوبیک نمونه‌ی فوق‌العاده‌ای از همین مسئله است.

نزدیک شدن دو گروه غیرقطبی در آب می‌تواند از نظر آنتروپی حلال سودمند باشد، چون بخشی از سازمان‌یافتگی تحمیل‌شده به آب اطراف گروه‌های آب‌گریز کاهش پیدا می‌کند.

بنابراین وقتی پروتئین تا می‌خورد، غشا خودآرایی می‌کند یا دو گروه غیرقطبی کنار هم قرار می‌گیرند، داستان فقط «جذب شدن مولکول‌ها» نیست.

ترمودینامیک در حال انتخاب بین تعداد عظیمی از حالت‌های ممکن است.

۱۵. آب؛ مرز بین نظم و بی‌نظمی

شاید بتوان یکی از جذاب‌ترین ویژگی‌های آب را این‌طور توصیف کرد:

آب نه کاملاً منظم است و نه کاملاً بی‌نظم.

یخ ساختار نسبتاً منظمی دارد.

بخار آزادی مولکولی بسیار بیشتری دارد.

آب مایع در میان این دو قرار گرفته؛ شبکه‌ای از پیوندهای هیدروژنی که دائماً در حال بازآرایی است.

این پویایی اهمیت زیادی دارد.

اگر برهم‌کنش‌ها بیش از حد ضعیف بودند، آب نمی‌توانست بسیاری از ساختارها و فرایندهای زیستی را پشتیبانی کند.

اگر شبکه بیش از حد پایدار و صلب بود، بسیاری از فرایندهای انتقالی و واکنش‌های مولکولی با مشکل روبه‌رو می‌شدند.

آب در یک منطقه‌ی فیزیکی بسیار جالب قرار دارد:

به اندازه‌ای برهم‌کنش دارد که ساختار ایجاد کند و به اندازه‌ای متحرک است که تغییر و واکنش امکان‌پذیر بماند.

این نگاه به آب، بسیار عمیق‌تر از تعریف ساده‌ی «حلال زندگی» است.

۱۶. آیا آب واقعاً «شرط لازم» برای هر نوع زندگی است؟

اینجا باید محتاط باشیم.

وقتی می‌گوییم «زندگی بدون آب ممکن نیست»، در واقع درباره‌ی **حیات شناخته‌شده** صحبت می‌کنیم.

تمام نمونه‌های شناخته‌شده‌ی حیات زمینی به آب وابسته‌اند.

اما از نظر علمی هنوز نمی‌توانیم با قطعیت بگوییم هر شکل ممکن از حیات در جهان باید دقیقاً به آب وابسته باشد.

ممکن است در آینده شیمی‌های دیگری کشف شوند که از حلال‌های متفاوت استفاده می‌کنند.

اما آب یک مزیت بزرگ دارد:

در بازه‌ای نسبتاً گسترده از شرایط، می‌تواند همزمان ویژگی‌های مناسب برای انتقال جرم، واکنش شیمیایی، پایداری یون‌ها و تشکیل ساختارهای پیچیده را فراهم کند.

به همین دلیل در اخترزیست‌شناسی، جست‌وجوی آب مایع یک نقطه‌ی شروع منطقی است، نه یک اثبات قطعی وجود حیات.

۱۷. شاید آب «بهترین» حلال نباشد؛ اما برای زندگی زمینی یک حلال استثنایی است

گاهی گفته می‌شود آب «بهترین حلال جهان» است.

از نظر علمی، این عبارت دقیق نیست.

بهترین حلال برای چه ماده‌ای؟

برای چه واکنشی؟

در چه دما و فشاری؟

برای چه نوع شیمی؟

مفهوم «بهترین حلال» بدون مشخص کردن مسئله معنای دقیقی ندارد.

آنچه می‌توان گفت این است که آب ترکیبی بسیار خاص از ویژگی‌ها دارد:

قطبیت بالا + شبکه‌ی پیوند هیدروژنی + توانایی آب‌پوشی یون‌ها + ظرفیت گرمایی بالا + رفتار غیرعادی در انجماد + اثرات پیچیده‌ی آب‌گریزی.

این مجموعه برای شیمی حیات زمینی بسیار مناسب از آب درآمده است.

۱۸. راز اصلی آب، یک ویژگی منفرد نیست

اگر بخواهیم تمام این مقاله را به یک نکته تقلیل دهیم، شاید این باشد:
هیچ کدام از ویژگی های آب به تنهایی توضیح نمی دهند که چرا حیات به آن وابسته است.

نه قطبیت به تنهایی.

نه پیوند هیدروژنی.

نه ظرفیت گرمایی.

نه اثر هیدروفوبیک.

نه ثابت دی الکتریک.

نه ناهنجاری چگالی.

اهمیت آب از برهم کنش همه ی این ویژگی ها ناشی می شود.

آب یک نمونه ی فوق العاده از یک سیستم پیچیده است که در آن رفتار جمعی مولکول های ساده، خواصی در مقیاس های بزرگ تر ایجاد می کند.

از یک مولکول سه اتمی می رسمیم به یک شبکه ی مولکولی.

از شبکه ی مولکولی می رسمیم به خواص ترمودینامیکی.

از خواص ترمودینامیکی می رسمیم به سازمان یابی مولکول های زیستی.

و از آنجا، به سلول و در نهایت به حیات.

پایان؛ وقتی H_2O دیگر فقط H_2O نیست

در کتاب های شیمی، آب را با یک فرمول کوتاه معرفی می کنند:



دو هیدروژن و یک اکسیژن.

اما این فرمول، تقریباً هیچ چیزی درباره ی پیچیدگی رفتاری آب به ما نمی گوید.

برای فهم آب باید از فرمول عبور کنیم و وارد دنیای برهم کنش ها شویم:

الکترون ها.

دوقطبی ها.

پیوندهای هیدروژنی.

آب پوشی.

انرژی آزاد.

آنتروپی.

اثر هیدروفوبیک.

شبکه‌های پویا.

و در نهایت، خودآرایی ماده.

در این نگاه، آب دیگر یک مایع شفاف و بی‌خاصیت نیست که صرفاً درون سلول‌ها جریان دارد.

آب بخشی از معماری فیزیکی حیات است.

پروتئین در آب تا می‌خورد.

غشا در آب خودآرایی می‌کند.

یون در آب پایدار می‌شود.

DNA در آب ساختار می‌گیرد.

واکنش‌های شیمیایی در آب انجام می‌شوند.

و سلول، این واحد بنیادی حیات، در نهایت در یک محیط آبی زندگی می‌کند.

شاید به همین دلیل باشد که یکی از جالب‌ترین پرسش‌ها درباره‌ی آب این نیست که:

«چرا بدن ما به آب نیاز دارد؟»

بلکه این است:

چطور قوانین فیزیک و شیمی به یک مولکول سه‌اتمی اجازه داده‌اند محیطی بسازد که در آن ماده بتواند از شیمی ساده

عبور کند و به چیزی به پیچیدگی حیات برسد؟

پاسخ کامل این سؤال هنوز تمام نشده.

و شاید جذابیت واقعی آب هم همین باشد.

هرچه بیشتر آن را می‌شناسیم، کمتر شبیه یک ماده‌ی ساده به نظر می‌رسد.

در نهایت، پشت فرمول ساده‌ی H_2O ، فقط یک مولکول نیست؛

یک شبکه‌ی پویا از برهم‌کنش‌هاست که بخش بزرگی از شیمی جهان زنده در آن اتفاق می‌افتد.