# واحد یادگیری ۶

## بر دانش خود بیفزایید

### ماهیت موجی الکترون و ماهیت ذره‌ای فوتون

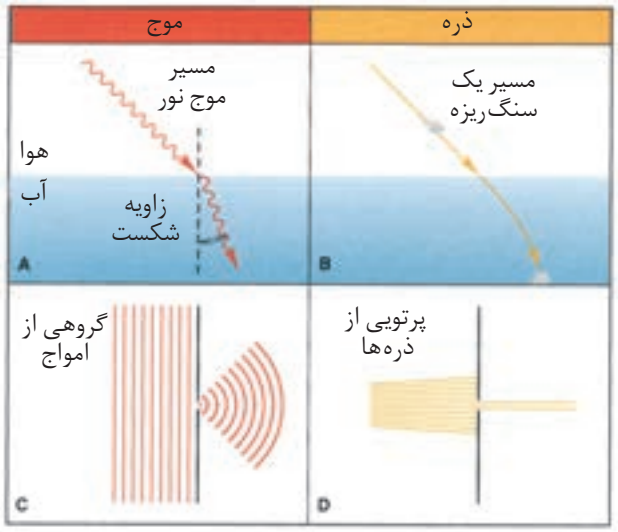
دانشمندان پس از ارائهٔ نظریهٔ بور، هم سردرگم و هم هیجان‌زده شده بودند! آنها از خود می‌پرسیدند چرا انرژی الکترون در اتم هیدروژن کوانتیده است؟ یا به عبارت بهتر، چرا در مدل بور، الکترون مجاز است فقط در فاصله‌های معینی از هسته به‌دور آن بچرخد. به مدت یک دهه، هیچ کس حتی خود بور توضیحی منطقی برای این مسئله نداشت. آن‌چه که تا آن موقع دربارهٔ مسیر حرکت پذیرفته شده بود با مسیر حرکت ذره‌ای مانند الکترون متفاوت بود (شکل ۳۱).

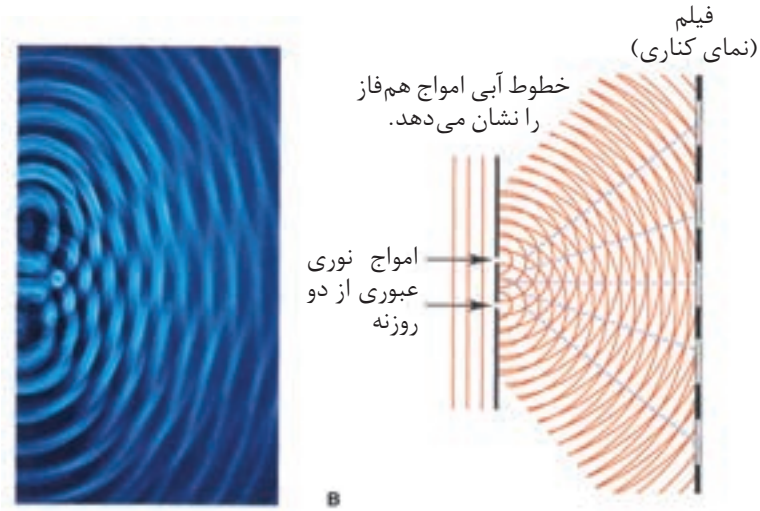
**شکل ۳۱**. مسیر حرکت یک ذره کلاسیکی و ذره‌ای مانند الکترون

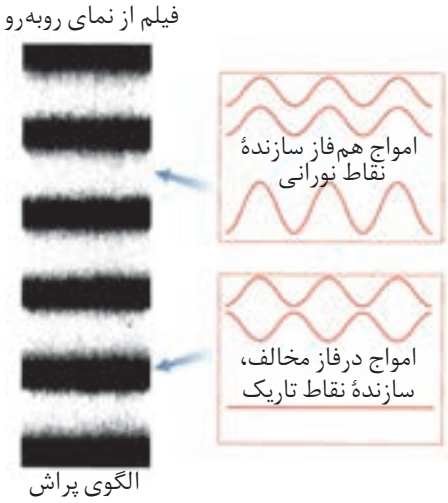
در سال ۱۹۲۴، لوییس دوبروی[1] (۱۹۷۷ـ۱۸۹۲)، فیزیک‌دان فرانسوی، راه حلی برای این معما پیدا کرد. استدلال دوبروی این بود که اگر امواج نوری (یعنی خاصیت موجی نور شکل ۳۱) مانند جریانی از فوتون‌ها عمل کنند، شاید ذره‌هایی مانند الکترون نیز بتوانند خواص موجی داشته باشند. براساس نظر دوبروی، یک الکترون پیرامون هسته مانند یک موج ایستاده رفتار می‌کند. امواج ایستاده را می‌توان با کشیدن یک سیم گیتار ایجاد کرد (شکل ۳۲). چنین امواجی، ایستاده یا ایستا نامیده می‌شوند، زیرا در امتداد سیم حرکت نمی‌کنند. برخی از نقاط اصلاً روی سیم حرکت نمی‌کنند، یعنی دامنهٔ موج در این نقاط صفر است. چنین نقاطی **گره** نامیده می‌شوند. در هریک از دو انتهای سیم یک گره وجود دارد. تعدادی گره نیز ممکن است بین دو سرسیم موجود باشد. هرچه فرکانس ارتعاش بزرگ‌تر باشد، موج ایستاده طول موج کوتاه‌تری دارد و تعداد گره‌ها بیشتر است. همان‌طور که شکل ۳۲ نشان می‌دهد، در هریک از حرکت‌های مجاز سیم، فقط طول موج‌های معینی می‌تواند موجود باشد.

---

۱ ـ L. De Broglie




**شکل۳۲**. خاصیت موجی نور (تداخل امواج، آزمایش یانگ). با ورود دو باریکهٔ نور از دو شکاف به یک اتاق تاریک که دیوار متقابل آن‌ها یک فیلم عکاسی است انتظار می‌رود دو لکه روی صفحهٔ فیلم عکاسی مشاهده شود. اما برخلاف انتظار در این آزمایش مشاهده شده که چندین لکه روی فیلم عکاسی ظاهر شده است. این لکه‌ها ازالگوی تداخل امواجی مانند آب تبعیت می‌کنند و این نشان می‌دهد که نور خاصیت موجی دارد.

دوبروی استدلال کرد که اگر یک الکترون در یک اتم هیدروژن، مانند یک موج ایستاده رفتار کند، طول موج آن باید دقیقاً با محیط مدار الکترون برابر باشد (شکل ۳۳). در غیراین‌صورت، موج در هر مدار، پی‌درپی بخشی از خودش را خنثی می‌کند. در نتیجه، دامنهٔ موج به صفر کاهش می‌یابد و دیگر موجی وجود نخواهد داشت.

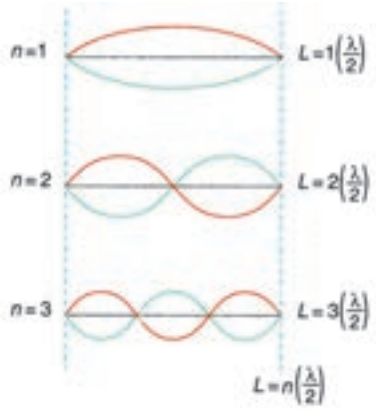
رابطهٔ محیط یک مدار مجاز ($2\pi r$) با طول موج ($\lambda$) الکترون عبارت است از:

$$2\pi r = n\lambda \qquad (۲۸)$$

r شعاع مدار و $\lambda$ طول موج الکترون است و $n = ۱، ۲، ۳، \ldots$. از آن‌جا که n عددی صحیح است، r فقط می‌تواند مقادیر معینی را به ازای افزایش n از ۱ به ۲، به ۳ و ... داشته باشد و از آن‌جا که انرژی الکترون به اندازهٔ مدار (یا مقدار r) بستگی دارد، مقدار انرژی نیز باید کوانتیده باشد.

استدلال دوبروی به این نتیجه‌گیری منجر شد که امواج می‌توانند مانند ذره‌ها رفتار کنند و ذره‌ها نیز می‌توانند خواص موج مانند نشان دهند. دوبروی نتیجه گرفت که خواص موجی و ذره‌ای به‌صورت زیر باهم ارتباط دارند:

$$\lambda = \frac{h}{mv} \qquad (۲۹)$$




**شکل ۳۳**. امواج ایستاده حاصل از کشیدن یک سیم گیتار. هر نقطه نشان‌دهندهٔ یک گره است. طول سیم (l) باید مضرب صحیحی از نصف طول موج ($\lambda$) باشد.

**شکل ۳۴**. آ) مداری که محیط آن با مضرب صحیحی از طول موج برابر است. ب) مداری که محیط آن مضرب صحیحی از طول موج نیست و در نتیجه، فاصلهٔ موج الکترون از آن یکنواخت نیست. چنین مداری غیرمجاز است.

در این رابطه $\lambda$، m و v به ترتیب طول موج مربوط به یک ذرهٔ متحرک، جرم و سرعت آن هستند. این معادله در ابتدا برای نور از مساوی قرار دادن انرژی برحسب رابطهٔ پلانک ($E = h\upsilon$) و انرژی برحسب رابطهٔ اینشتین ($E = mc^2$) به‌دست آمد. براساس معادله دوبروی برای طول موج دوبروی، ماده به‌گونه‌ای رفتار می‌کند که گویی در یک موج حرکت می‌کند. از رابطهٔ دوبروی می‌توان در همهٔ سیستم‌ها استفاده کرد. با این‌حال، فقط در سیستم‌های میکروسکوپی خواص موجی آشکار می‌شود؛ زیرا طول موج با جرم نسبت معکوس دارد و ثابت پلانک که در صورت کسر معادلهٔ «۲۹» ظاهر می‌شود، نیز بسیار کوچک است. بنابراین، اجسام سنگین طول موجی چندین بار کوچک‌تر از ابعاد خود جسم دارند.

دو سال پس از آن‌که دوبروی معادلهٔ خود را ارائه کرد، دانشمندان دیگری توانستند نشان دهند که الکترون‌ها واقعاً خواص موج مانند دارند. آنها یک پرتو الکترونی را از میان قطعهٔ نازکی از ورقهٔ طلا گذراندند و مجموعه‌ای از دایره‌های هم‌مرکز را روی صفحه مشاهده کردند. این طرح مشابه طرحی بود که با استفاده از پرتوهای X (امواج) به‌دست می‌آمد. شکل ۳۵ چنین طرحی را برای آلومینیم نشان می‌دهد.

اگر الکترون‌ها خواصی مشابه انرژی دارند، آیا فوتون‌ها نیز می‌توانند خواص ماده را داشته باشند؟ معادلهٔ دوبروی نشان می‌دهد که می‌توان برای یک فوتون با طول موج معین، اندازه حرکت (p) یعنی حاصل‌ضرب جرم در سرعت را محاسبه کرد. اگر به‌جای v در معادلهٔ ۲۹، سرعت نور (c) قرار داده شود، نتیجه می‌شود:

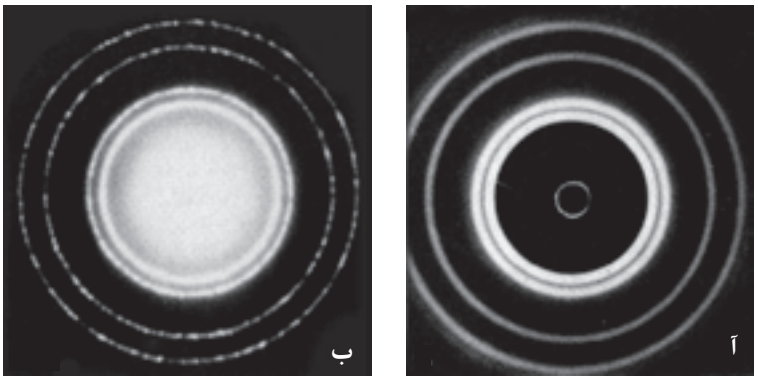
$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{و} \quad \lambda = \frac{h}{mc} = \frac{h}{p} \qquad (۳۰)$$

به رابطهٔ معکوس میان p و $\lambda$ توجه کنید که نشان می‌دهد فوتون‌های با طول موج کوتاه‌تر (انرژی بیشتر) اندازه حرکت بزرگ‌تری دارند. بنابراین، کاهش اندازه حرکت فوتون باید افزایشی در طول موج آن ایجاد کند. در سال ۱۹۲۳، آرتور کامپتون[1] دسته‌ای از فوتون‌های پرتو X را به نمونه‌ای از گرافیت تاباند و مشاهده کرد که طول موج فوتون‌های منعکس‌شده افزایش می‌یابد. این نتیجه به این مفهوم است که فوتون‌ها بخشی از اندازه حرکت خود را به الکترون‌های اتم‌های کربن در گرافیت منتقل کرده‌اند، درست مانند توپ‌های بیلیارد که با برخورد به هم، اندازه حرکت منتقل می‌کنند. در این آزمایش، فوتون‌ها مانند ذره‌هایی دارای اندازه حرکت رفتار کرده‌اند!

این نتایج آرام و قرار را از دانشمندان آن زمان گرفت. آزمایش‌های کلاسیکی نشان

---

۱ ـ A. Compton



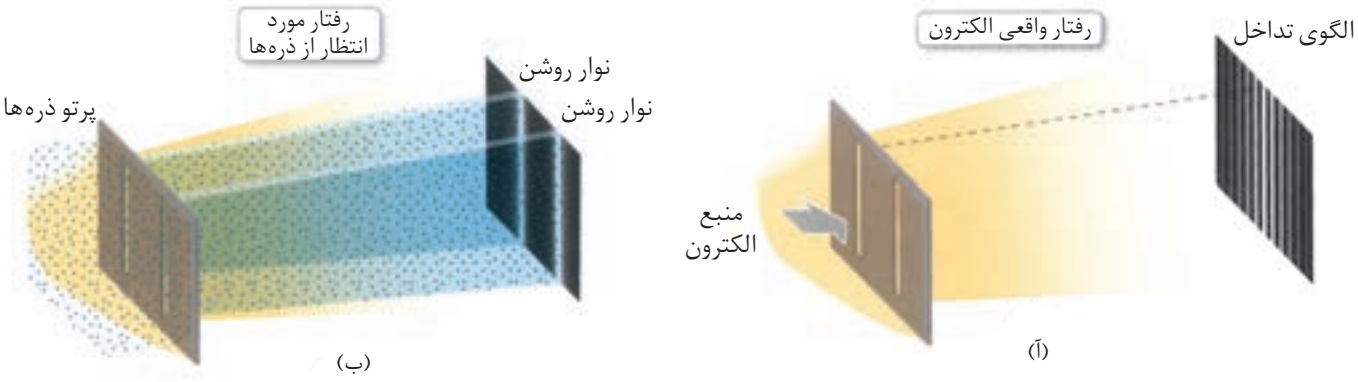

**شکل ۳۵**. مقایسهٔ طرح حاصل از عبور پرتوهای ایکس (آ) با پرتوهای الکترونی (ب) از آلومینیم.

داده بودند که ماده، بیشتر رفتار ذره‌ای و انرژی بیشتر رفتار موجی دارد. اما این مطالعات جدید نشان داد که هر ویژگی مشخصه‌ای که برای توصیف ماده یا انرژی به‌کار می‌رفت، اکنون می‌تواند برای توصیف دیگری نیز به‌کار رود. شکل ۳۵ تناقض‌های مفهومی و تجربی را نشان می‌دهد که منجر به این موقعیت شد. همان‌طور که اغلب در علوم اتفاق می‌افتد، یک مشاهده (آزمایش) نیاز به یک توضیح (نظریه) را برانگیخته است، یا این که دیدگاهی نظری، تبدیل به انگیزه‌ای برای انجام آزمایشی تجربی شده است.

این واقعیت که ماده و انرژی می‌توانند خواص مشابه داشته باشند، در واقع دو روی یک سکه است. در برخی آزمایش‌ها یک روی این سکه و در برخی دیگر روی دیگر آن را می‌بینیم. تمایز بین یک ذره و یک موج فقط در دنیای ماکروسکوپی مفهوم دارد، نه در دنیای اتمی. تمایز بین ماده و انرژی فقط در ذهن ما و تعریف‌های محدود ما وجود دارد و بخشی از ذات طبیعت نیست. ماهیت دوگانهٔ ماده و انرژی به‌صورت دوگانگی موج ـ ذره شناخته شده است.

## مکانیک کوانتومی و مدل کوانتومی اتم

مطالعات دوبروی نشان داد که بهتر است الکترون‌های یک اتم به‌صورت امواج بررسی شوند (شکل ۳۶) تا همانند ذره‌های کوچکی که در مدارهای دایره‌ای یا بیضی شکل حرکت می‌کنند. اجسام بزرگ مانند توپ گلف یا خودرو از قوانین مکانیک کلاسیک (قوانین نیوتن) تبعیت می‌کنند، اما ذره‌های بسیار کوچک مانند الکترون، اتم و مولکول از این قوانین پیروی نمی‌کنند. برای بررسی ماهیت موجی ماده از نوع دیگری از مکانیک به نام **مکانیک کوانتومی** استفاده می‌شود که توصیف بسیار بهتری برای رفتار ذره‌های بسیار کوچک ارائه می‌دهد. کوانتیده بودن انرژی نتیجه‌ای از آن است.




**شکل ۳۶**. رفتار الکترون

یکی از مشکلات دربارهٔ ماهیت موجی الکترون‌ها، تعیین «موقعیت» الکترون است؛ زیرا نمی‌توان موقعیت دقیق یک موج ـ ذره را در فضا مشخص کرد. اصل عدم قطعیت هایزنبرگ که در سال ۱۹۲۷ توسط ورنر هایزنبرگ[1] (۱۹۰۱ـ۱۹۷۶) مطرح شد، حکمی نظری است که با تمام مشاهده‌های تجربی سازگاری دارد. براساس این اصل، تعیین دقیق اندازه حرکت و موقعیت یک الکترون در یک بعد (یا هر ذرهٔ بسیار کوچک دیگر) به‌طور همزمان ممکن نیست.

$$\Delta x \Delta p_x \geq \frac{h}{۴\pi} \qquad (۳۱)$$

$$\boxed{\hbar = \frac{h}{۲\pi} = ۱/۰۵۴ \times ۱۰^{-۳۴}\ J.s}$$

که $\Delta x$ و $\Delta p_x$ به ترتیب عدم قطعیت‌های مربوط به اندازه‌گیری موقعیت و اندازه حرکت‌اند. معادلهٔ (۳۱) بیان می‌کند که اگر تعیین اندازه حرکت یک ذره دقیق‌تر باشد (یعنی $\Delta p_x$ مقدار کوچکی باشد)، اطلاعات ما از موقعیت آن، دقت کمتری پیدا می‌کند (یعنی $\Delta x$ بزرگ‌تر می‌شود). به‌طور مشابه، اگر موقعیت ذره‌ای دقیق‌تر مشخص باشد، دقت اندازه‌گیری در اندازه حرکت آن کم می‌شود. با به‌کارگیری اصل عدم قطعیت هایزنبرگ در اتم هیدروژن، مشاهده می‌شود که الکترون، هسته را (آن‌طور که بور بیان می‌کرد) در مسیری مشخص و تعریف شده دور نمی‌زند. اگر چنین بود، می‌توانستیم هم موقعیت (از شعاع مدار) و هم اندازه حرکت (از انرژی جنبشی آن) الکترون را به‌طور دقیق و همزمان تعیین کنیم. البته این، اصل عدم قطعیت را نقض می‌کند.

بدون شک، مدل بور نقش مهمی در درک ما از اتم‌ها دارد و این اعتقاد بور که انرژی یک الکترون در اتم کوانتیده است کاملاً درست است، اما این نظریه توصیف کاملی از رفتار

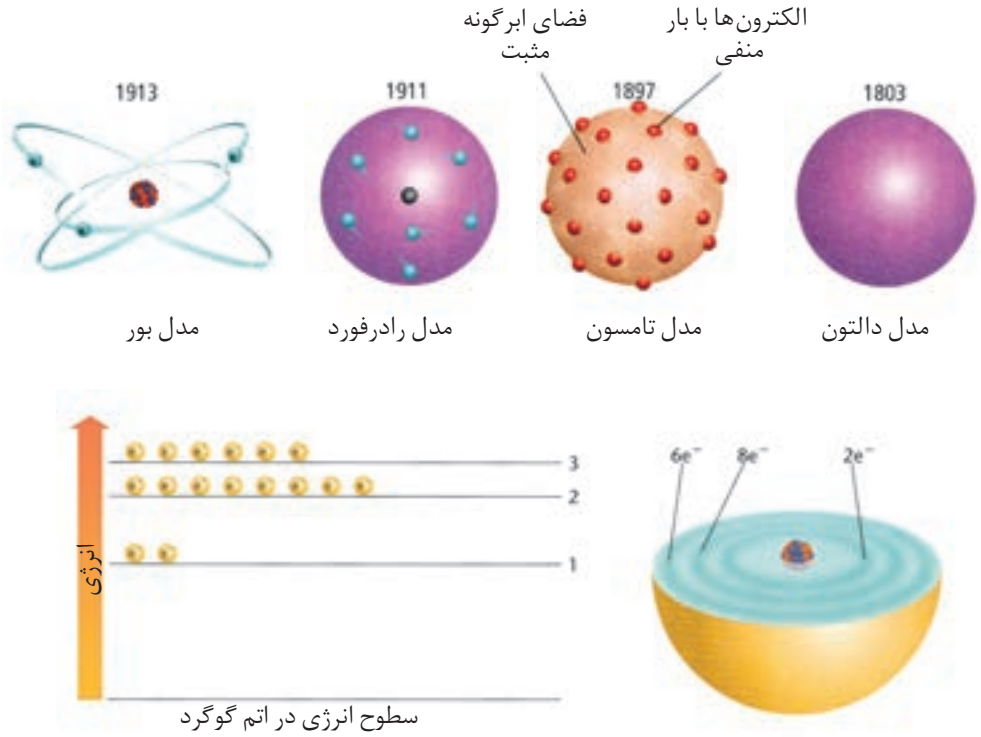
۱ ـ V. Heisenberg

الکترون در اتم‌ها ارائه نمی‌دهد. در سال ۱۹۲۶، اروین شرودینگر[1] (۱۹۶۱ـ۱۸۸۷)، فیزیکدان اتریشی، با استفاده از روش ریاضی پیچیده‌ای، معادله‌ای را (مشابه با قوانین حرکت نیوتن برای اجسام ماکروسکوپی) فرمول‌بندی کرد. در این معادله، هم رفتار ذره‌ای (برحسب جرم، m) و هم رفتار موجی (برحسب یک تابع موج، ψ که به موقعیت سیستم در فضا بستگی دارد) درنظر گرفته شده است.

$$-\frac{h^2}{8\pi^2 m}\left[\frac{\partial^2\psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\psi}{\partial z^2}\right]+V\psi=E\psi \qquad (۳۲)$$

هریک از پاسخ‌های معادلهٔ شرودینگر (یعنی هر حالت انرژی یک اتم) به یک تابع موج معین وابسته است که یک **اوربیتال اتمی** نیز نامیده می‌شود. گفتنی است واژهٔ اوربیتال در مدل مکانیک کوانتومی، هیچ شباهتی به یک مدار در مدل بور ندارد. در مدل بور یک مدار را مسیر حرکت یک الکترون به‌دور هسته درنظر می‌گیرند، در حالی که یک اوربیتال، تابعی ریاضی است که هیچ مفهوم فیزیکی آشکاری ندارد.

بر اساس مطالب ارائه شده تا کنون، سیر تکاملی مدل‌های اتمی همانند شکل ۳۷ است.




**شکل ۳۷**. خلاصه‌ای از نظریه‌هایی که نظریهٔ کلاسیکی را به نظریهٔ کوانتومی رساند. مدل‌های ارائه شده برای هرکدام از این نظریه‌ها نیز نشان داده شده است.

---

۱ ـ E. Schrodinger

الگوی زیر روند و سیر تکامل نظریهٔ کلاسیک برای ماده و انرژی را تا رسیدن به نظریهٔ کوانتومی نشان می‌دهد.

**نظریهٔ کلاسیکی**

| **ماده** | **انرژی** |
|---|---|
| دارای ذره | پیوسته |
| جرم‌دار | موج‌مانند |

از آن‌جا که **ماده** ناپیوسته و ذره‌ای است،
شاید **انرژی** هم ناپیوسته و ذره‌ای باشد.

| **مشاهده** | **نظریه** |
|---|---|
| تابش جسم سیاه | پلانک: انرژی کوانتیده است؛ فقط مقادیر معینی مجاز است. |
| اثر فوتوالکتریک | اینشتین: نور رفتار ذره‌ای دارد (فوتون‌ها). |
| طیف‌های خطی اتمی | بور: انرژی اتم‌ها کوانتیده است؛ هنگام تغییر مدار الکترون، فوتون آزاد می‌شود. |

از آن‌جا که **انرژی** موج مانند است،
شاید **ماده** هم موج‌مانند باشد.

| **مشاهده:** | **نظریه:** |
|---|---|
| پراش الکترون با بلور فلزی | دوبروی: تمام مواد به‌صورت موج حرکت می‌کنند. انرژی اتم به سبب حرکت موجی الکترون‌ها کوانتیده است. |

از آن‌جا که **ماده** جرم دارد،
شاید **انرژی** هم جرم داشته باشد.

| **مشاهده:** | **نظریه:** |
|---|---|
| افزایش طول موج فوتون (کاهش اندازه حرکت) پس از برخورد با الکترون (کامپتون) | اینشتین/دوبروی: جرم و انرژی هم‌ارزند: ذره‌ها طول موج و فوتون‌ها نیز اندازه حرکت دارند. |

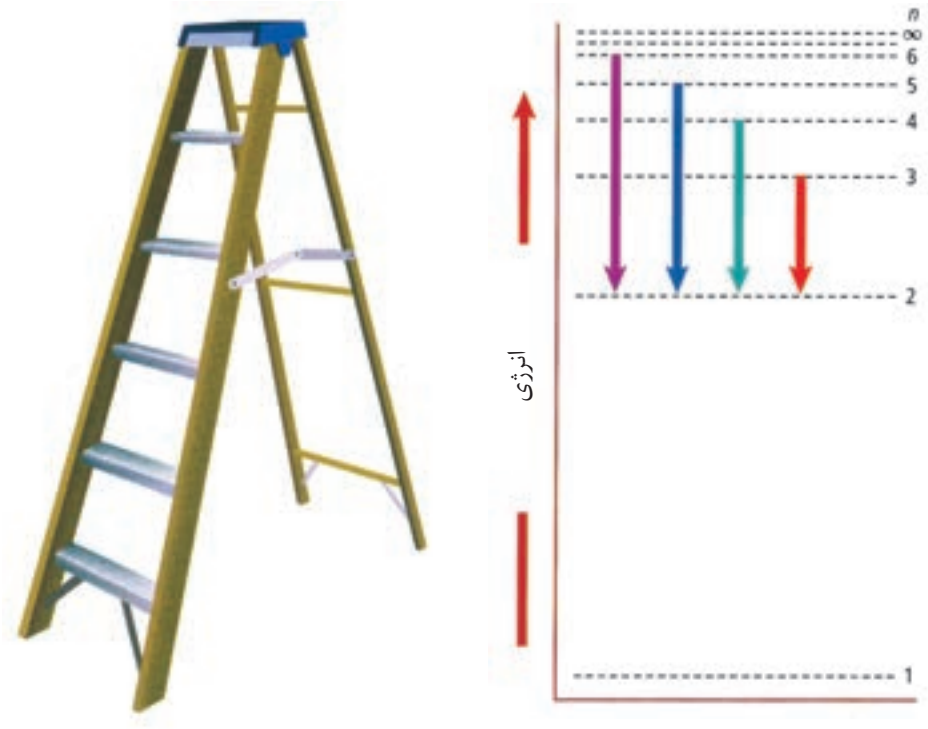
**نظریهٔ کوانتومی**

**انرژی ⟷ ماده**

ذره‌ای، جرم‌دار، موج‌مانند

الکترون روی هر تراز دارای مقدار مشخصی انرژی است و بین ترازها نمی‌تواند قرار گیرد (شکل ۳۷) و می‌تواند با جذب انرژی به ترازهای بالاتر جهش کند یا با نشر انرژی به ترازهای پایین‌تر منتقل شود (شکل ۳۸).

خرمن گندم از دور به‌صورت توده‌ای زردرنگ و زیبا است. دیدن آن از نزدیک دانه‌های جدا از هم را نشان می‌دهد. پیوستگی تودهٔ ماده در نگاه ماکروسکوپی و کوانتیده بودن آن در نگاه میکروسکوپی با این مثال قابل توصیف است.




**شکل ۳۸**. انرژی الکترون کوانتومی است.

شکل ۳۹ روند جذب و نشر انرژی هنگام جابه جایی الکترون در اتم بر اساس مدل کوانتومی را نشان می‌دهد.

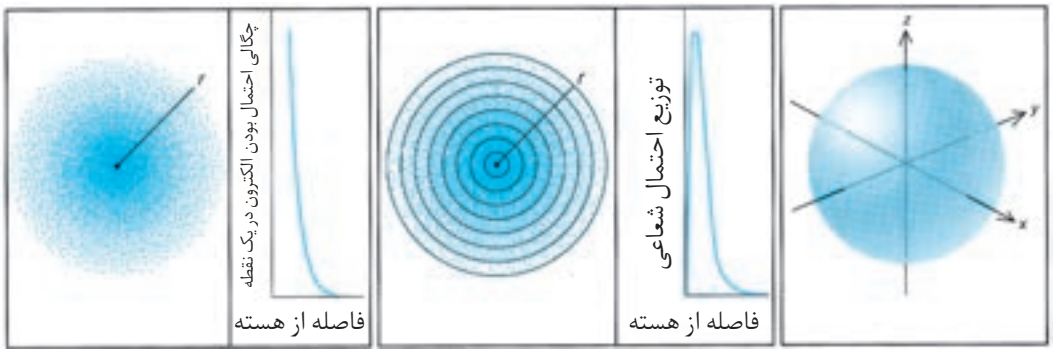
**شکل ۳۹**. در نتیجهٔ جابه‌جایی الکترون، انرژی جذب یا نشر می‌شود.

براساس اصل عدم قطعیت، تعیین موقعیت و اندازه حرکت دقیق الکترون در هر لحظه ممکن نیست. با این حال، می‌توان توضیح داد که الکترون احتمالاً کجاست؛ در چه محلی بیشترین احتمال برای حضور یک الکترون وجود دارد یا الکترون کجا وقت بیشتری را سپری می‌کند. با آن‌که تابع موج (اوربیتال اتمی) هیچ مفهوم فیزیکی مستقیمی ندارد، مربع تابع موج ($\psi^2$) با چگالی احتمال (معیاری از احتمال یافتن الکترون در یک حجم بسیار کوچک با شرایط ویژه از اتم) برابر است ($\psi$ می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی داشته باشد، اما $\psi^2$ همیشه مثبت بوده و برای مقداری که یک احتمال را نشان می‌دهد، قابل انتظار است). برای یک تراز انرژی معین، می‌توان این احتمال را با یک نمودار چگالی احتمال الکترونی یا به‌طور خلاصه نمودار چگالی الکترونی نمایش داد. در شکل ۴۰ـ آ، مقدار $\psi^2$ برای یک حجم معین به‌صورت چگالی معینی از نقاط نشان داده شده است. هرچه چگالی نقاط بیشتر باشد، احتمال یافتن الکترون در آن حجم بالاتر است.

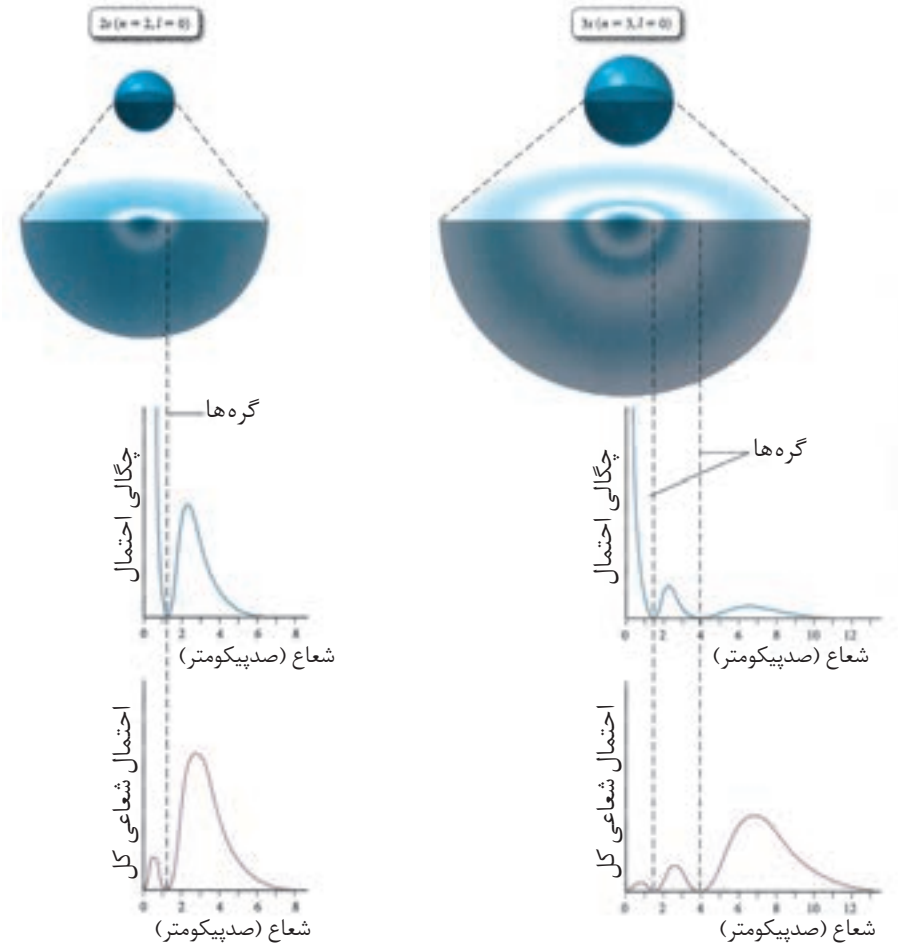
نمودارهای چگالی الکترونی گاهی نمایش‌های «**ابر الکترونی**» نامیده می‌شوند. اگر بتوانیم عکسی با نوردهی طولانی از الکترون در حرکت موجی اطراف هسته بگیریم، به‌صورت «ابر»ی از موقعیت‌های الکترونی ظاهر می‌شود. ابر الکترونی تصویری ذهنی از الکترون است که به سرعت با زمان تغییر موقعیت می‌دهد؛ این به آن مفهوم نیست که یک الکترون ابری پراکنده از بار است. توجه کنید که چگالی احتمال الکترونی با افزایش فاصله از هسته (r) در امتداد یک خط، کاهش می‌یابد. همین مفهوم در نمودار $\psi^2$ برحسب r در شکل ۴۰ـ ب نیز به‌طور گرافیکی نشان داده شده است. توجه شود که به دلیل ضخامت خط رسم شده، نمودار روی محور قرار گرفته است، اما در واقع احتمال این که یک الکترون از هسته دور باشد، بسیار کم، اما غیرصفر است.

احتمال کلی یافتن الکترون در هر فاصلهٔ r از هسته کمیت مهمی است. برای یافتن این احتمال به‌طور ذهنی فضای اطراف هسته را به لایه‌های کروی نازک و هم‌مرکز (مانند لایه‌های یک پیاز) تقسیم (در شکل ۴۰ـ پ به‌صورت سطح مقطع‌هایی نشان داده شده‌اند) و بررسی می‌کنیم تا بدانیم بیشترین احتمال برای یافتن الکترون در کدام لایهٔ کروی وجود دارد. این نمودارها بررسی مجموع مقادیر $\psi^2$ درون هر لایهٔ کروی است. کاهش شدید چگالی الکترونی با فاصله (در شکل ۴۰ـ ب) اثر مهمی دارد. در نزدیکی هسته، سرعت افزایش حجم در لایه بیشتر از سرعت کاهش چگالی احتمالی آن است. در نتیجه، احتمال کلی یافتن الکترون در لایهٔ دوم بیشتر از لایهٔ اول است. با این حال، چگالی الکترونی به‌قدری شدید کاهش می‌یابد که این اثر در فاصله‌های بزرگ‌تر زود از بین می‌رود. بنابراین، در فاصله‌های بزرگ‌تر با این که حجم لایه‌ها همچنان در حال افزایش است، احتمال کلی

هر لایه به تدریج کم می‌شود. به دلیل این اثرهای متضاد، کاهش چگالی احتمال الکترونی و افزایش حجم لایه، احتمال کلی در فاصله‌ای معین از هسته، یک پیک نشان می‌دهد. شکل ۴۰ـ ت این اثر را به صورت یک نمودار *توزیع احتمال شعاعی* نشان می‌دهد.




(آ) (ب) (پ) (ت) (ث)




**شکل ۴۰**. ج) چگالی احتمال الکترونی در اتم هیدروژن (حالت پایه و برانگیخته)

قلهٔ توزیع احتمال شعاعی برای اتم H در حالت پایه در فاصلهٔ $۰/۵۲۹A^{\circ}$ یا $۵/۲۹ \times ۱۰^{-۱۱}m$ از هسته ظاهر می‌شود و با شعاع بور که برای نزدیک‌ترین مدار به هسته به‌دست آمده، برابر است (شکل ۴۰ـ ج). بنابراین، حداقل برای حالت پایه، مدل شرودینگر پیش‌بینی می‌کند که الکترون بیشترین زمان خود را در همان فاصله‌ای از هسته سپری می‌کند که براساس پیش‌بینی بور تمام زمان خود را در آن می‌گذراند. تفاوت بین واژه‌های «بیشترین» و «تمام» منعکس‌کنندهٔ عدم قطعیت در موقعیت الکترون در مدل شرودینگر در مقایسه با مدل بور است.

تا چه فاصله‌ای از هسته می‌توان الکترونی پیدا کرد؟ یا به‌طور معادل «اندازهٔ اتم چقدر است؟» از شکل ۴۰ـ ب به یاد آورید که احتمال یافتن الکترون در فاصله‌ای دور از هسته صفر نیست. بنابراین، نمی‌توان حجم معینی به اتم نسبت داد. با این‌حال، اتم‌ها اغلب با یک احتمال ۹۰٪ نمایش داده می شوند، مانند آن‌چه در شکل ۴۰ـ ث نشان داده شده است. شکل ۴۰ـ ث حجمی را نشان می‌دهد که الکترون اتم هیدروژن ۹۰٪ از وقت خود را درون آن سپری می‌کند.

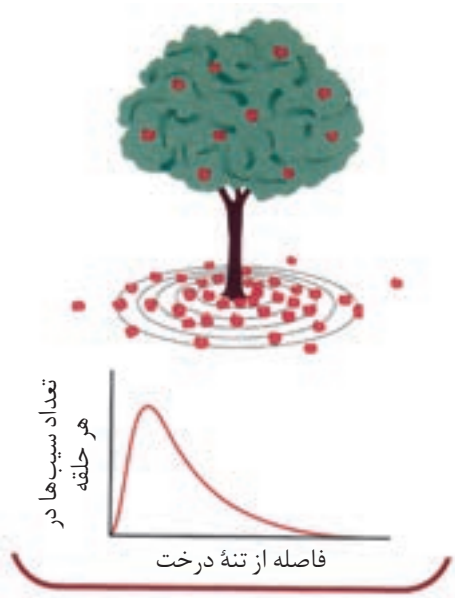
**پاسخ «فکر کنید» صفحه ۲۰**

آ) الکترون‌هایی که از هسته دورتر بوده و انرژی کمتری برای کندن آنها هزینه می‌شود. این الکترون‌ها، دو الکترون موجود در لایهٔ ظرفیت اتم Mg یعنی الکترون‌های موجود در $n = ۳$ هستند.

ب) با جدا کردن متوالی الکترون‌ها از اتم منیزیم به تدریج شعاع آن کمتر و همچنین جاذبهٔ هسته روی الکترون‌های باقیمانده بیشتر می‌شود. از این رو، انرژی‌های یونش متوالی به تدریج افزایش می‌یابد.

پ) تغییر شدید در انرژی‌های یونش هنگام جدا کردن الکترون‌های شمارهٔ ۳ و ۱۱ رخ می‌دهد که دلیل آن تغییر در عدد کوانتومی اصلی (n) و جدا شدن ناگهانی الکترون از یک تراز نزدیک‌تر نسبت به هسته است.

ت) نمودار نشان می‌دهد که جدا کردن الکترون‌ها از اتم $_{۱۲}Mg$، سه گروه مجزا تشکیل داده است. از این‌رو می‌توان هریک از این الکترون‌ها را مربوط به یک لایهٔ الکترونی دانست.




**شکل ۴۱**. نموداری از «تعداد سیب‌های درون یک حلقه» در فاصلهٔ خاصی از درخت یک پیک نشان می‌دهد که مشابه با شکل ۴۰ـ پ است.

توزیع احتمال شعاعی سیب‌ها تشبیهی است که می‌تواند روشن کند چرا نمودار توزیع احتمال شعاعی یک پیک نشان می‌دهد و سپس سقوط می‌کند. سیب‌هایی را درنظر بگیرید که از درخت سیب پایین افتاده‌اند؛ چگالی سیب‌ها نزدیک تنهٔ درخت بزرگ‌تر است و با افزایش فاصله از تنهٔ درخت کمتر می‌شود. زمین اطراف درخت را به حلقه‌های هم‌مرکز به فاصلهٔ یک قدم تقسیم می‌کنیم و سیب‌های درون هر حلقه را جمع می‌زنیم. چگالی سیب‌ها در اولین حلقه دارای بیشترین مقدار است، اما حلقهٔ دوم به دلیل افزایش شعاع دایره مساحت بزرگ‌تری دارد و بنابراین شامل تعداد کلی بیشتری سیب است. با دور شدن از تنهٔ درخت حلقه‌ها مساحت بیشتری دارند اما چگالی سیب‌ها در آنها کمتر است؛ بنابراین تعداد کل سیب‌ها کم می‌شود.

# واحد یادگیری ۷

**هدف‌های آموزشی**

انتظار می‌رود دانش‌آموز در پایان این واحد یادگیری:

۱ـ با نماد مربوط به عددهای کوانتومی اصلی، اوربیتالی و مغناطیسی آشنا شود.

۲ـ معنی و مفهوم عددهای کوانتومی اصلی و فرعی را بداند.

۳ـ مهارت تعیین عددهای کوانتومی n و l یک الکترون مشخص را کسب و درخود تقویت کند.

۴ـ مهارت تعیین اوربیتال و زیر لایه از روی عددهای کوانتومی n و l را در خود تقویت کند.

**ارزشیابی تشخیصی**

۱ـ در پیرامون هستهٔ اتم حداکثر چند لایهٔ الکترونی مشاهده می‌شود؟

۲ـ برای مشخص کردن سطح انرژی لایه‌های الکترونی از کدام عدد کوانتومی استفاده می‌شود؟

۳ـ آیا همهٔ الکترون‌های یک لایه، در یک زیرلایه قرار دارند؟

## روش تدریس پیشنهادی: کاوشگری هدایت شده

به معلم گرامی توصیه می‌شود کد پستی مدرسه را روی تابلوی کلاس بنویسد و از دانش‌آموزان بخواهد که معنی هریک از عددهای به‌کار رفته در کدپستی را توضیح دهند.

معلم پاسخ دانش‌آموزان را می‌شنود اما درستی یا نادرستی آنها را بررسی نمی‌کند.

سپس توضیح مناسب و کافی دربارهٔ کدپستی را به‌صورت زیر ارائه می‌دهد.

| | | | |
|---|---|---|---|
| ۴۳۳۲۵ | ۱۸۸ | ۸ | ۸ |
| واحد مسکونی | ناحیه | منطقه | حوزه |

در ادامه موضوع درس جدید یعنی عددهای کوانتومی و ارتباط آنها را با موقعیت الکترون در اتم مطرح کنید و کاربرگ صفحهٔ بعد را که قبلاً تکثیر کرده‌اید در اختیار گروه‌ها قرار دهید و از آنها بخواهید در گروه خود آن را مطالعه و تکمیل کنند. به گروه‌ها وقت کافی بدهید و در حین انجام فعالیت توسط گروه‌ها بر کار آنها نظارت کنید و بدون این که مستقیماً جواب سؤال‌ها را به آنها بگویید، در صورت لزوم آنها را راهنمایی کنید.

**کاربرگ کلاسی (گروهی ـ فردی)** **صفحه ۱**

**نام و نام خانوادگی (نام اعضا):**

**موضوع درس:** **تاریخ:**

**داده‌ها:** همان‌طور که می‌دانید بور در مدل سیاره‌ای خود پیشنهاد کرد که الکترون‌ها در مدارهای دایره‌ای معینی قرار دارند. درسال ۱۹۲۶ اروین شرودینگر بر مبنای رفتار دوگانهٔ الکترون (رفتار ذره‌ای و موجی) و با تأکید بر رفتار موجی، مدل کوانتومی اتم را پیشنهاد داد. در این مدل به‌جای محدود کردن الکترون در یک مدار دایره‌ای شکل، از لایه‌های الکترونی استفاده می‌شود. هر لایهٔ الکترونی از چند زیرلایه تشکیل شده است که خود حاوی اوربیتال است. برای درک بهتر لایه، زیرلایه و اوربیتال، از عددهای کوانتومی n، l و $m_l$ استفاده می‌شود. مفهوم و گسترهٔ تغییر هریک از این عددها را در جدول زیر مشاهده می‌کنید:

| نام عدد کوانتومی | نماد | گسترهٔ تغییرات (مقدار) | مفهوم |
|---|---|---|---|
| عدد کوانتومی اصلی | n | ۱,۲,۳,۴,۵,۶,۷ | مشخص‌کنندهٔ سطح انرژی لایه‌های الکترونی است. هرچه n بزرگتر باشد فاصلهٔ الکترون از هسته بیشتر و انرژی آن بیشتر است. |
| عدد کوانتومی اوربیتالی | l | از ۰ تا n-۱ | مشخص کنندهٔ نوع زیرلایه‌ها است. |
| عدد کوانتومی مغناطیسی | $m_l$ | از l- تا l+ | مشخص‌کنندهٔ جهت‌گیری اوربیتال‌های یک زیرلایه در فضای اطراف هستهٔ اتم است. |

**پرسش ۱ـ** با توجه به داده‌های بالا، جدول زیر را کامل کنید.

| شمارهٔ لایهٔ اصلی | مقادیر ممکن برای l |
|---|---|
| n = ۱ | |
| n = ۲ | |
| n = ۳ | |
| n = ۴ | |

**کاربرگ کلاسی (گروهی ـ فردی)** **صفحه ۲**

**نام و نام خانوادگی (نام اعضا):**

**موضوع درس:** **تاریخ:**

**داده‌ها:** زیر لایه‌ها براساس مقدار عدد کوانتومی اوربیتالی (l) به‌صورت زیرنمادگذاری می‌شوند:

| مقدار عدد کوانتومی اوربیتالی | ۰ | ۱ | ۲ | ۳ |
|---|---|---|---|---|
| نوع زیرلایه | s | p | d | f |

**پرسش ۲ـ** با توجه به اطلاعاتی که تاکنون کسب کرده‌اید، نوع زیر لایه‌های هریک از لایه‌های اصلی اول تا چهارم را (مانند نمونهٔ حل شده) در جدول زیر مشخص کنید.

| تعداد زیرلایه | نماد نوشتاری زیرلایه | نوع زیرلایه | l | n |
|---|---|---|---|---|
| | ..... | | | n = ۱ |
| ۲ | ۲s<br>۲p | s<br>p | l = ۰<br>l = ۱ | n = ۲ |
| | .....<br>.....<br>..... | | | n = ۳ |
| | .....<br>۴p<br>۴d<br>..... | | | n = ۴ |

**کاربرگ کلاسی (گروهی ـ فردی)** **صفحه ۳**

**نام و نام خانوادگی (نام اعضا):**

**موضوع درس:** **تاریخ:**

**پرسش ۳ـ** فکر می‌کنید در لایهٔ اصلی پنجم چند زیرلایه وجود داشته باشد؟

**داده‌ها:** هر زیر لایه از چند اوربیتال تشکیل شده است، به‌طوری که تعداد اوربیتال هر زیرلایه برابر با (۲l + ۱) است و در هر اوربیتال حداکثر دو الکترون می‌تواند قرار گیرد.

**مثال:**

| حداکثر تعداد الکترون ۲(۲l + ۱) | تعداد اوربیتال‌ها (۲l + ۱) | l | زیرلایه |
|---|---|---|---|
| ۶ | ۳ | ۱ | p |

**پرسش ۴ـ** با توجه به اطلاعاتی که تاکنون کسب کرده‌اید، جدول زیر را کامل کنید.

| حداکثر تعداد الکترون | تعداد اوربیتال | $m_l$ | l | n | زیرلایه |
|---|---|---|---|---|---|
| ۲ | ۱ | ۰ | ۰ | ۲ | ۲s |
| ..... | ۳ | ۱- و ۰ و ۱+ | ۱ | ..... | ۲p |
| ۶ | ..... | ..... | ..... | ..... | ۳p |
| ..... | ۱ | ..... | ۰ | ۴ | ..... |
| ۱۰ | ..... | ۲+و۱+ و ۰ و ۱- و ۲- | ..... | ۳ | ..... |
| ..... | ۵ | ..... | ۲ | ..... | ۴d |

**پرسش ۵ـ** هریک از نمادهای زیر را به یکی از خانه‌های نشان داده شده، وصل کنید.

| | | |
|---|---|---|
| جهت فضای اوربیتالی را که الکترون در آن قرار دارد، نشان می‌دهد. | نشان می‌دهد که الکترون در کدام زیرلایه یا اوربیتال قرار دارد. | نشان می‌دهد که الکترون در کدام لایه اصلی قرار دارد. |

| | | |
|---|---|---|
| l | $m_l$ | n |

پس از تمام شدن فعالیت دانش‌آموزان، کاربرگ‌ها را جمع‌آوری کنید و از نمایندهٔ یکی از گروه‌ها بخواهید پای تابلو بیاید و پاسخ‌های گروه خود را ارائه کند. سرانجام پاسخ‌های ارائه شده را بررسی و ارزیابی کرده، پاسخ‌های صحیح را مشخص کنید، درضمن نمرهٔ هریک از گروه‌ها را به‌عنوان نمرهٔ ارزشیابی مستمر منظور کنید.

سپس مطالب را جمع‌بندی کرده، از یکی از دانش‌آموزان بخواهید صفحه‌های ۲۱ تا ۲۳ کتاب درسی را روخوانی کند و بقیه به دقت گوش دهند.

در پایان از دانش‌آموزان بخواهید پرسش‌های زیر را پاسخ دهند.

۱ـ اعداد کوانتومی n، l و $m_l$ را برای اوربیتال ۴s مشخص کنید.

۲ـ عددهای کوانتومی n، l و $m_l$ را برای الکترونی که در اوربیتال‌های ۳d، ۳p و ۱s قرار دارد را مشخص کنید.

۳ـ عددهای کوانتومی هریک از الکترون‌های زیر را مشخص کنید:

آ) الکترونی که در لایه اصلی سوم و اوربیتال p قرار دارد.

ب) الکترونی که در لایه اصلی دوم و زیرلایه s قرار دارد.

# واحد یادگیری ۸

## عدد کوانتومی اسپین ـ آرایش الکترونی

### روش تدریس پیشنهادی: مطالعه و بحث گروهی

به معلم گرامی توصیه می‌شود چند آهنربای تخت با خود به کلاس بیاورد و آنها را بین گروه‌ها تقسیم کند. از دانش‌آموزان بخواهد که آهنرباها را در جهت‌های مختلف به هم نزدیک یا از هم دور کنند. سپس این پرسش را مطرح کند که اگر قطب‌های ناهمنام آهنرباها را با سرعت از کنار هم عبور دهند، چه اتفاقی می‌افتد؟

سپس از دانش‌آموزان بخواهد مطالب صفحه ۲۳ و ۲۴ کتاب درسی را در گروه خود مطالعه کند و در مورد آن باهم بحث و تبادل‌نظر کنند و سپس کار برگ صفحهٔ بعد را که قبلاً تکثیر کرده است در اختیار آنها قرار دهد تا آن را بررسی و کامل کنند.

**هدف‌های آموزشی**

انتظار می‌رود دانش‌آموز در پایان این واحد یادگیری:

۱ـ با مفهوم حرکت اسپینی الکترون آشنا شود.

۲ـ نماد عدد کوانتومی مغناطیسی اسپین را بشناسد و عددهای مربوط به آن را بداند.

۳ـ با اصل طرد پائولی آشنا شود.

۴ـ مهارت رسم آرایش الکترونی نموداری را کسب و در خود تقویت کند.

**ارزشیابی تشخیصی**

۱ـ اعدادکوانتومی l، n و $m_l$ را برای هریک از الکترون‌های زیر مشخص کنید:

آ) الکترونی که در زیرلایه $3p^1$ قرار دارد.

ب) الکترونی که در زیرلایه $4s^1$ قرار دارد.

۲ـ چگونه دو الکترون با بار الکتریکی همنام در یک اوربیتال کنار هم قرار می‌گیرند؟

**کاربرگ کلاسی (گروهی ـ فردی)** **صفحه ۱**

**نام و نام خانوادگی (نام اعضا):**

**موضوع درس:** **تاریخ:**

۱ـ منظور از حرکت اسپینی الکترون چیست؟

۲ـ نماد نسبت داده شده به حرکت اسپینی الکترون چیست؟

۳ـ مقادیر عدد کوانتومی اسپین برای هر الکترون چه اعدادی می‌تواند باشد؟

۴ـ اگر الکترونی در زیرلایهٔ ۳s قرار داشته باشد و $m_s$ آن $+\frac{۱}{۲}$ باشد، شیوهٔ نمایش نموداری آن چگونه است؟

۵ـ مفهوم اصل طرد پائولی را توضیح دهید.

۶ـ چگونه دو الکترون در اوربیتال ۱s در کنار هم قرار می‌گیرند، با وجود این که دافعهٔ الکتریکی دارند؟

۷ـ با ذکر دلیل، موارد نادرست را در هریک از آرایش‌های الکترونی زیر مشخص کنید:

| نماد شیمیایی عنصر | آرایش الکترونی نوشتاری | آرایش الکترونی نموداری | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | ۱s | ۲s | ۲p | ۳s | ۳p |
| $_{۳}Li$ | $۱s^{۲}/۲s^{۱}$ | ↑↓ | ↑ | | | |
| $_{۴}Be$ | $۱s^{۲}/۲s^{۲}$ | ↑↓ | ↓↓ | | | |
| $_{۱۲}Mg$ | $۱s^{۲}/۲s^{۲},۲p^{۶}/۳s^{۲}$ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ ↑↓ ↑↓ | ↑↑ | |
| $_{۵}B$ | $۱s^{۲}/۲s^{۲},۲p^{۱}$ | ↑↓ | ↑↓ | ↓ | | |
| $_{۱۱}Na$ | $۱s^{۲}/۲s^{۲},۲p^{۶}/۳s^{۱}$ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ ↑↓ ↑↓ | ↑ | |
| $_{۱۳}Al$ | $۱s^{۲}/۲s^{۲},۲p^{۶}/۳s^{۲},۳p^{۱}$ | ↑↓ | ↑↓ | ↑↓ ↑↓ ↑↓ | ↑↓ | ↑ |

۸ـ با توجه به داده‌های جدول، آرایش الکترونی نوشتاری و نموداری عنصر $_{۱۷}Cl$ را بنویسید.

سپس از نمایندهٔ یکی از گروه‌ها بخواهید که پاسخ گروه خود دربارهٔ پرسش‌های کاربرگ را بیان کند و گروه‌های دیگر در مورد درستی یا نادرستی آن نظر دهند. سعی کنید بحث را مدیریت کنید و جواب نهایی را تأیید کنید؛ همچنین با بررسی کاربرگ‌ها امتیاز کارگروهی را به عنوان ارزشیابی مستمر ثبت کنید.

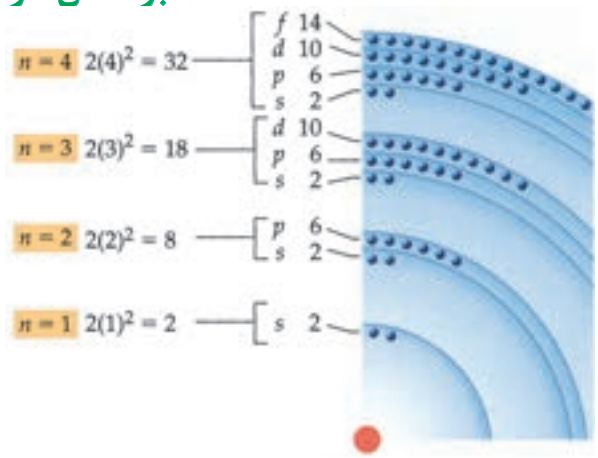
## بر دانش خود بیفزایید

$$\begin{cases} l = ۰ \quad ,۱ \quad , \quad ۲ \quad , \quad ۳ \\ m_l = ۰ ,-۱,۰,+۱ \quad -۲,-۱,۰,+۱,+۲ \quad -۳,-۲,-۱,۰,+۱,+۲,+۳ \end{cases}$$

$$\begin{cases} l = ۰ \quad ,۱ \quad , \quad ۲ \\ m_l = ۰ ,-۱,۰,+۱ \quad -۲,-۱,۰,+۱,+۲ \end{cases}$$

$$\begin{cases} l = ۰ \quad ,۱ \\ m_l = ۰ ,-۱,۰,+۱ \end{cases}$$

$$\begin{cases} l = ۰ \\ m_l = ۰ \end{cases}$$




**شکل ۴۲**. با توجه به n و l تعداد الکترون‌ها در هر لایه و زیرلایه مشخص می‌شود.

**جدول۴**. تعداد الکترون‌هایی که در لایه‌ها و زیرلایه‌ها جای می‌گیرند.

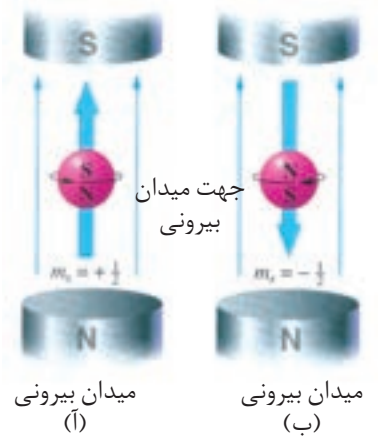
| لایهٔ الکترونی | نوع و تعداد زیرلایه‌های موجود (=n) | تعداد اوربیتال‌های موجود (=۲l+۱) | تعداد الکترون‌های ممکن در زیر لایه‌ها | حداکثر الکترون‌ها برای لایه nام (=۲n²) |
|---|---|---|---|---|
| ۴ | s<br>p<br>d<br>f | ۱<br>۳<br>۵<br>۷ | ۲<br>۶<br>۱۰<br>۱۴ | ۳۲ |
| ۵ | s<br>p<br>d<br>f<br>g* | ۱<br>۳<br>۵<br>۷<br>۹ | ۲<br>۶<br>۱۰<br>۱۴<br>۱۸ | ۵۰ |
| ۶ | s<br>p<br>d<br>f<br>g*<br>h* | ۱<br>۳<br>۵<br>۷<br>۹<br>۱۱ | ۲<br>۶<br>۱۰<br>۱۴<br>۱۸<br>۲۲ | ۷۲ |
| ۷ | s | ۱ | ۲ | |

* زیر لایه‌های g و h در اتم‌های حالت پایه، فاقد الکترون هستند.

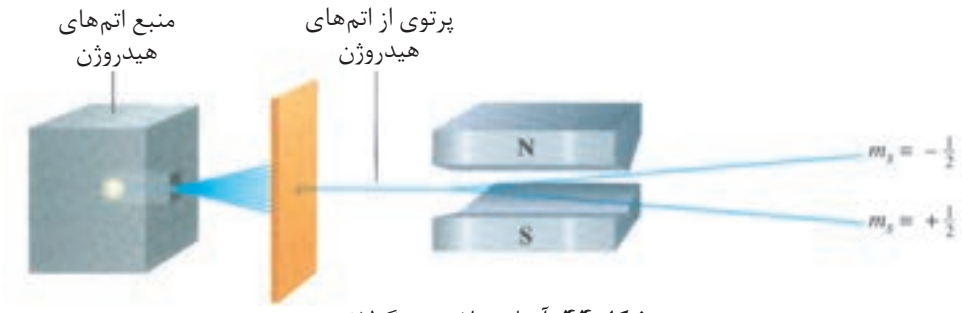
بررسی طیف‌های نشری اتم‌های هیدروژن و سدیم نشان داد که خطوط موجود در این طیف‌ها را می‌توان با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی شکافت. تنها راهی که فیزیک‌دانان برای توجیه این نتایج پیدا کردند، آن بود که فرض کنند الکترون‌ها مانند آهن‌رباهای بسیار کوچک عمل می‌کنند. اگر فرض شود که الکترون‌ها (مانند کرهٔ زمین) به دور محور خود حرکت

وضعی دارند، خواص مغناطیسی آنها را می‌توان توجیه کرد. بنابر نظریهٔ الکترومغناطیسی، بار الکتریکی‌ای که به دور خود می‌چرخد، میدان مغناطیسی‌ای به‌وجود می‌آورد که همین حرکت سبب می‌شود الکترون مانند یک آهنربا عمل کند. شکل ۴۳ دو حرکت وضعی (اسپین) ممکن را برای یک الکترون نشان می‌دهد، که یکی ساعتگرد و دیگری پادساعتگرد است. برای منظور کردن اسپین الکترون، لازم است که یک عدد کوانتومی چهارم نیز وارد شود که عدد کوانتومی اسپین الکترون ($m_s$) نام دارد و دارای مقدار $+\frac{۱}{۲}$ یا $-\frac{۱}{۲}$ است.

در سال ۱۹۲۴، اوتواشترن[۱] (۱۹۶۹ـ۱۸۸۸) و والتر گرلاخ[۲] (۱۹۷۹ـ۱۸۸۹)، دو فیزیک‌دان آلمانی، با آزمایشی وجود اسپین الکترون را اثبات کردند. شکل ۴۴ آرایش تجربی مورد استفادهٔ آنها را نشان می‌دهد. یک پرتو از اتم‌های گازی تولید شده در یک کورهٔ داغ را از یک میدان مغناطیسی ناهمگن عبور می‌دهند. برهم‌کنش بین یک الکترون و میدان مغناطیسی سبب می‌شود که اتم از مسیر مستقیم‌الخط خود منحرف شود. از آن‌جا که اسپین کاملاً تصادفی است، اسپین الکترون‌های نیمی از اتم‌ها در یک جهت و اسپین الکترون‌های نیمی دیگر از اتم‌ها در جهت دیگر است. این دو گروه در دو جهت متضاد منحرف می‌شوند. بنابراین، دو لکه با شدت مساوی روی صفحهٔ آشکارساز مشاهده می‌شود.




**شکل ۴۳**. حرکت اسپین آ) پادساعتگرد ($-\frac{۱}{۲}$) و ب) ساعتگرد ($+\frac{۱}{۲}$) یک الکترون. برای نشان دادن جهت اسپین از فلش‌های رو به بالا و پایین استفاده می‌شود.




**شکل ۴۴**. آزمایش اشترن ـ گرلاخ

۱ ـ O. Estern

۲ ـ W. Gerlach

## شکل اوربیتال‌های اتمی

هر زیر لایه در اتم هیدروژن متشکل از مجموعه‌ای از اوربیتال‌ها با شکل‌های مخصوص است. اوربیتال‌های اتم‌های دیگر نیز شکل مشابهی دارند. به طور کلی، شکل یک اوربیتال را شکل بخش زاویه‌ای تابع موج آن تعیین می‌کند. تابع موج اوربیتال‌ها از حل معادلهٔ شرودینگر به‌دست می‌آید. در جدول ۵ و ۶ برخی از توابع موج به‌دست آمده برای اوربیتال‌های اتم هیدروژن آورده شده است. تابع موج هر اوربیتال ($\psi$) حاصل‌ضرب یک بخش شعاعی (که فقط به فاصلهٔ آن تا مبدأ بستگی دارد) و یک بخش زاویه‌ای (که فقط به $\theta$ و $\phi$ بستگی دارد) است:

$$\psi_{n,l,m_l}(r,\theta,\phi) = R_{n,l}(r) \times Y_{l,m_l}(\theta,\phi) \qquad (۳۳)$$

جدول ۵ بخش شعاعی و جدول ۶ بخش زاویه‌ای توابع موج اوربیتال‌های اتم هیدروژن را نشان می‌دهد.

**جدول ۵**. بخش شعاعی تابع موج اوربیتال‌های اتم هیدروژن

| | n | l | $R_{n,l}(r)$ |
|---|---|---|---|
| ۱s | ۱ | ۰ | $e^{-r/a_0}$ |
| ۲s | ۲ | ۰ | $\left(2-\frac{r}{a_0}\right)e^{-r/2a_0}$ |
| ۲p | ۲ | ۱ | $\frac{r}{a_0}e^{-r/2a_0}$ |
| ۳s | ۳ | ۰ | $\left(27-18\frac{r}{a_0}+2\left(\frac{r}{a_0}\right)^2\right)e^{-r/3a_0}$ |
| ۳p | ۳ | ۱ | $\left(\frac{r}{a_0}\right)\left(6-\frac{r}{a_0}\right)e^{-r/3a_0}$ |
| ۳d | ۳ | ۲ | $\left(\frac{r}{a_0}\right)^2 e^{-r/3a_0}$ |

**جدول ۶**. بخش زاویه‌ای تابع موج اوربیتال‌های اتم هیدروژن

| l | $m_l$ | $Y(l,m_l)$ |
|---|---|---|
| ۰ | ۰ | $\frac{۱}{۲\sqrt{\pi}}$ |
| ۱ | ۰ | $\frac{۱}{۲}\sqrt{\frac{۳}{\pi}}\cos\theta$ |
| ۱ | ±۱ | $\mp\frac{۱}{۲}\sqrt{\frac{۳}{۲\pi}}\sin\theta e^{\pm i\phi}$ |
| ۲ | ۰ | $\frac{۱}{۴}\sqrt{\frac{۵}{\pi}}(۳\cos^۲\theta-۱)$ |
| ۲ | ±۱ | $\mp\frac{۱}{۲}\sqrt{\frac{۱۵}{۲\pi}}\sin\theta\cos\theta e^{\pm i\phi}$ |
| ۲ | ±۲ | $\frac{۱}{۴}\sqrt{\frac{۱۵}{۲\pi}}\sin^۲\theta e^{\pm ۲i\phi}$ |
| ۳ | ۰ | $\frac{۱}{۴}\sqrt{\frac{۷}{\pi}}(۵\cos^۲\theta-۳\cos\theta)$ |
| ۳ | ±۱ | $\mp\frac{۱}{۸}\sqrt{\frac{۲۱}{\pi}}\sin\theta(۵\cos^۲\theta-۱)e^{\pm i\phi}$ |
| ۳ | ±۲ | $\frac{۱}{۴}\sqrt{\frac{۱۰۵}{\pi}}\sin^۲\theta\cos\theta\, e^{\pm ۲i\phi}$ |
| ۳ | ±۳ | $\mp\frac{۱}{۸}\sqrt{\frac{۳۵}{\pi}}\sin^۳\theta\, e^{\pm ۳i\phi}$ |

تابع هر اوربیتال از حاصل‌ضرب بخش‌های شعاعی و زاویه‌ای مربوطه به‌دست می‌آید. در جدول ۶ ملاحظه می‌شود که بخش زاویه‌ای برخی اوربیتال‌ها دارای عدد موهومی ($i=\sqrt{-۱}$) است که از نظر فیزیکی قابل قبول نیست. برای حذف عدد موهومی، توابع موج با lهای یکسان و mهای متفاوت با هم ترکیب خطی می‌شوند. به‌عنوان نمونه، از ترکیب خطی توابع موج $m_l=+۱$ و $m_l=-۱$ مربوط به $l=۱$ یا همان زیر لایهٔ p، دو تابع موج جدید به دست می‌آید که یکی مؤلفهٔ x اوربیتال p و دیگری مؤلفهٔ

y اوربیتال p خواهد بود:

$$\psi_{2p_x} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{2p_{+1}} + \psi_{2p_{-1}}) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \underbrace{r\sin\theta\cos\phi}_{x} e^{-r/2} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} x e^{-r/2} \quad (۳۴)$$

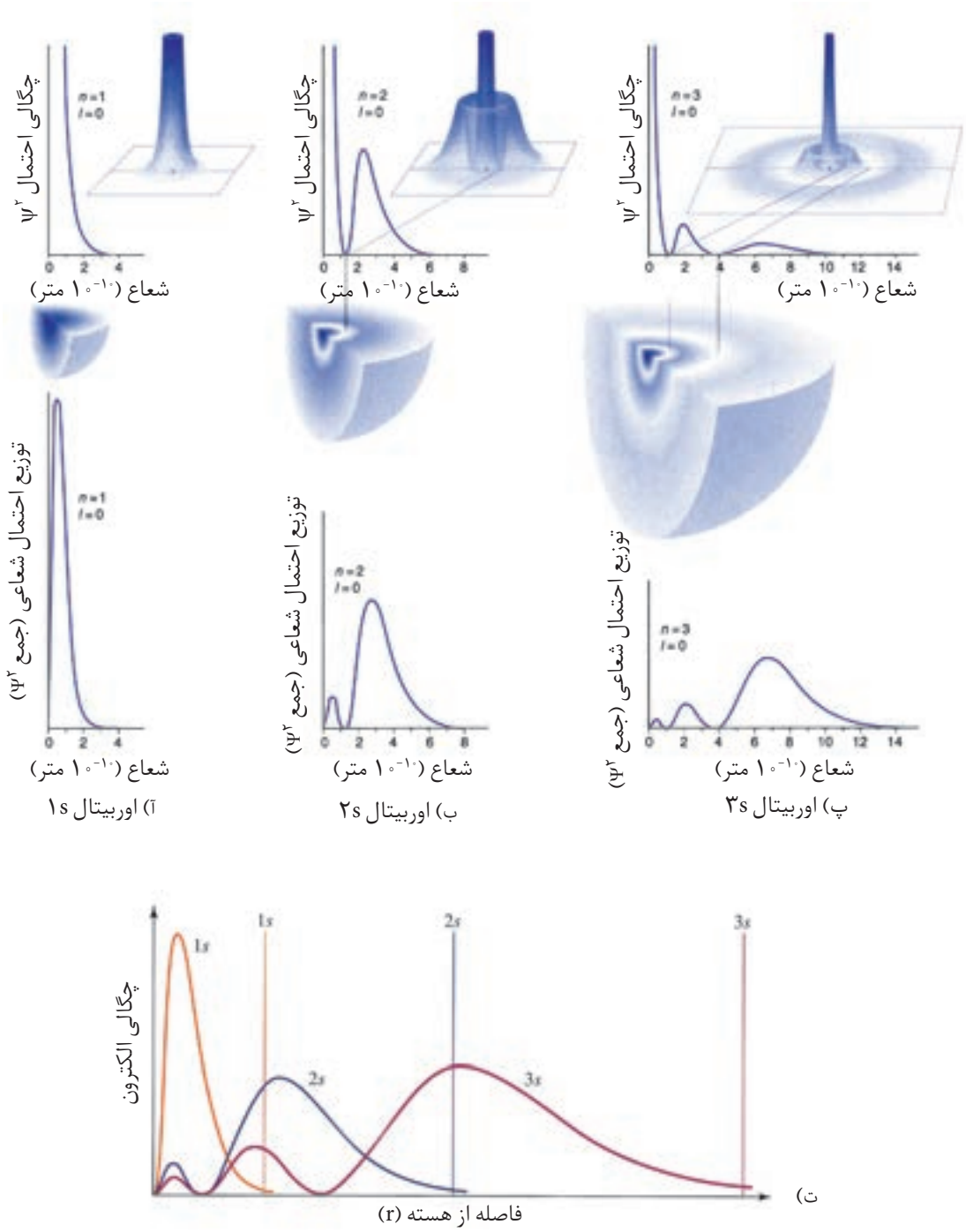
$$\psi_{2p_y} = \frac{1}{i\sqrt{2}}(\psi_{2p_{+1}} - \psi_{2p_{-1}}) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \underbrace{r\sin\theta\sin\phi}_{y} e^{-r/2} = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} y e^{-r/2} \quad (۳۵)$$

توجه شود که در این‌جا علت نام‌گذاری مؤلفهٔ x و مؤلفهٔ y فقط تشابه با مؤلفه‌های x و y مختصات قطبی است ($x=r\sin\theta\cos\phi$ و $y=r\sin\theta\sin\phi$).

**اوربیتال s (sharp)**: یک اوربیتال با $l=0$ و کروی شکل است که هسته در مرکز این کره قرار دارد. در حالت پایهٔ اتم H، الکترون در اوربیتال 1s قرار دارد و چگالی احتمال الکترونی در هسته بیشترین مقدار را دارد. شکل ۴۵ـ آ (بالا) این واقعیت را نشان می‌دهد. تیره‌ترین قسمت از یک چهارم کره مربوط به ابر الکترونی (وسط) در هسته است. از سوی دیگر، نمودار توزیع احتمال شعاعی (پایین) که نشان‌دهندهٔ احتمال یافتن الکترون است، بیشترین مقدار خود را در فاصله‌ای کمی دورتر از هسته نشان می‌دهد. هر دو نمودار به‌صورت ملایم با افزایش فاصله افت می‌کنند.

اوربیتال 2s (شکل ۴۵ـ ب) دو ناحیه با چگالی الکترونی بالاتر دارد. تابع احتمال شعاعی (پایین) برای ناحیهٔ دورتر، بزرگتر از ناحیهٔ نزدیکتر است زیرا مجموع $\psi^2$ اوربیتال روی حجم بسیار بزرگتری محاسبه شده است. بین دو ناحیه یک گرهٔ شعاعی (ناحیه‌ای لایه مانند که در آن احتمال به صفر افت می‌کند) وجود دارد (در یک گره، مشابه با صفر شدن دامنهٔ یک موج، $\psi^2 = 0$ است). از آن‌جا که اوربیتال 2s از 1s بزرگتر است، یک الکترون در اوربیتال 2s زمان بیشتری را در فاصله‌های دور از هسته نسبت به الکترونی در اوربیتال 1s سپری می‌کند.

اوربیتال 3s که در شکل ۴۵ـپ نشان داده شده است، سه ناحیه با چگالی الکترونی بالا و دو گره دارد. در این‌جا نیز بیشترین احتمال شعاعی در بزرگترین فاصله از هسته وجود دارد؛ زیرا مجموع $\psi^2$ اوربیتال روی حجم بزرگتری محاسبه شده است. این الگوی افزایش تعداد گره‌ها و احتمال بالاتر، در فاصله‌های بزرگتر برای اوربیتال‌های s با مقادیر n بزرگتر نیز ادامه می‌یابد. یک اوربیتال s شکل کروی دارد؛ بنابراین فقط می‌تواند یک جهت‌گیری و یک مقدار از عدد کوانتومی مغناطیسی داشته باشد ($m_l = 0$).



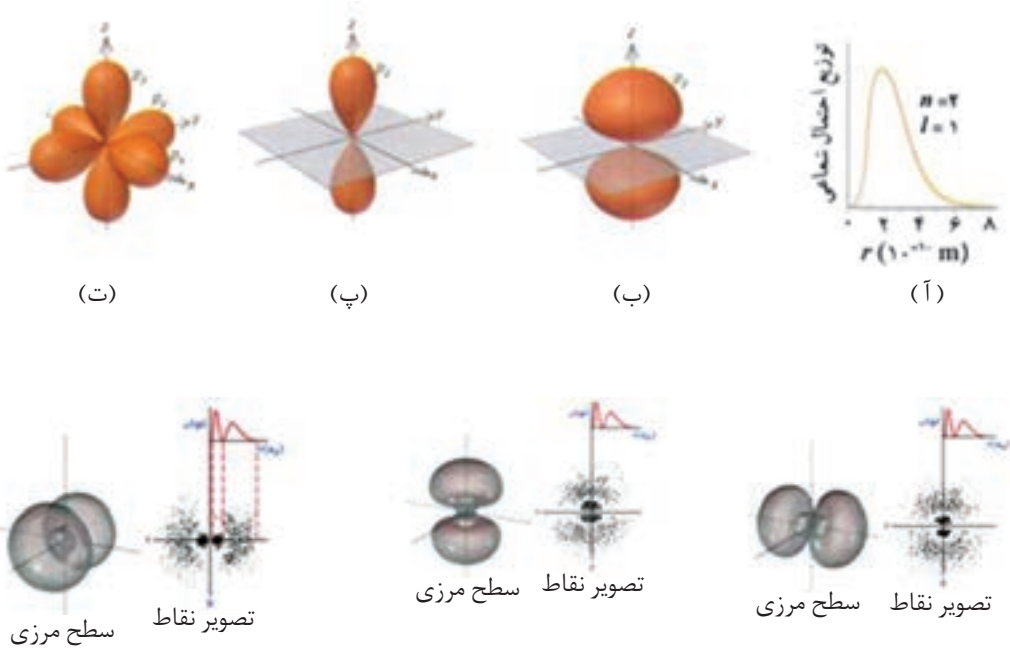

**شکل ۴۵**. اوربیتال‌های ۱s، ۲s و ۳s و دانسیته الکترونی آنها

**اوربیتال p (principal)**: یک اوربیتال با $l=1$ دو ناحیه (لب) با احتمال بالا دارد که در دو طرف هسته قرار دارند بنابراین، همان طور که در شکل ۴۶ مشاهده می‌شود، هسته در صفحهٔ گرهی این اوربیتال دمبلی شکل قرار می‌گیرد. شکل دقیق با احتمال ٪۹۰ برای این اوربیتال‌ها مشابه با شکل ۴۶ـ ب است، اما معمولاً این اوربیتال‌ها را مانند شکل ۴۶ـپ نشان می‌دهند. حداکثر مقدار l برابر با $n-1$ است؛ بنابراین فقط لایه‌های با $n=2$ و بالاتر می‌توانند اوربیتال p داشته باشند. در نتیجه، کم انرژی‌ترین اوربیتال p (نزدیک‌ترین به هسته)، اوربیتال ۲p است. باید به خاطر داشت که یک اوربیتال p شامل هر دو لب است و الکترون زمانی مساوی را در هر یک از این لب‌ها می‌گذراند. اوربیتال ۳p از اوربیتال ۲p بزرگتر، اوربیتال ۴p از ۳p بزرگتر و ... است.

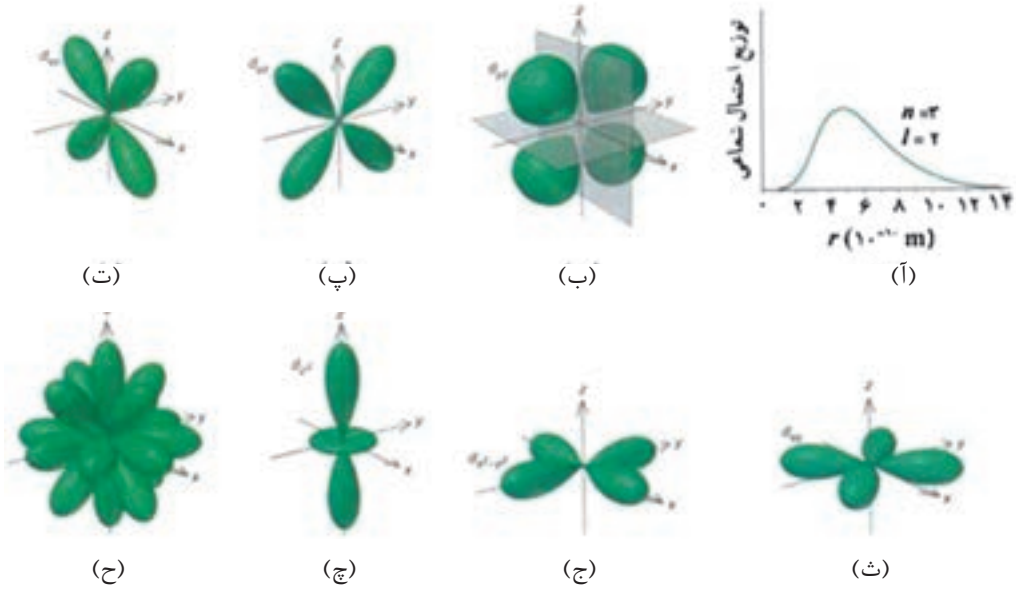
نمودار توزیع احتمال شعاعی (شکل ۴۶ـ آ) برای اوربیتال ۲p یک پیک نشان می‌دهد. موقعیت این پیک نسبت به هسته تقریباً مشابه با پیک بزرگتر اوربیتال ۲s است (شکل ۴۵ـ ب). اوربیتال p، برخلاف اوربیتال s دارای جهت‌گیری ویژه‌ای در فضاست. مقدار $l=1$ دارای سه مقدار ممکن از $m_l$ بوده و سه اوربیتال p را نشان می‌دهند که دو به‌دو بر هم عمودند. این سه اوربیتال از نظر اندازه، شکل و انرژی یکسان‌اند و فقط از نظر جهت‌گیری تفاوت دارند. برای سادگی، اوربیتال‌های p را با سه محور عمود بر هم x، y و z مرتبط می‌کنیم (اما لزوماً ارتباطی بین این سه محور و مقدار $m_l$ وجود ندارد). اوربیتال $p_x$ در امتداد محور x، اوربیتال $p_y$ در امتداد محور y و اوربیتال $p_z$ در امتداد محور z قرار می‌گیرد، به‌طوری که شکل کلی سه اوربیتال p تقریباً کروی است (شکل ۴۶ـ ت). برای نمونه در آرایش $_{13}Al$، برای الکترون در اوربیتال ۳p، $m_l$ را نمی‌توان مشخص کرد.

**اوربیتال d (diffuse)**: یک اوربیتال با $l=2$ اوربیتال d نام دارد. پنج مقدار ممکن برای $m_l$ یا پنج جهت‌گیری برای این اوربیتال وجود دارد که در شکل ۴۷ نشان داده شده‌اند. نمودار توزیع احتمال شعاعی این اوربیتال‌ها در شکل ۴۷ـ آ، یک پیک در فاصلهٔ حدود $5A^{\circ}$ از هسته دارد. چهار تا از اوربیتال‌های d چهار لب (مشابه برگ شبدر) دارند که از دو صفحهٔ گرهی عمود بر هم تشکیل شده‌اند و هسته در محل تقاطع لب‌ها قرار دارد. سه تا از این اوربیتال‌ها در صفحات عمود بر هم xy، xz و yz قرار می‌گیرند، به‌طوری که لب‌های آنها بین محورها می‌باشد. این اوربیتال‌ها $d_{xy}$، $d_{xz}$ و $d_{yz}$ نامیده می‌شوند (شکل‌های ۴۷ـ پ تا ث). اوربیتال چهار لبی چهارم که اوربیتال $d_{x^2-y^2}$ نام دارد، نیز در صفحهٔ xy قرار دارد، با این تفاوت که لب‌های آن روی محورها قرار می‌گیرند (شکل ۴۷ـ ج). البته شکل دقیق با احتمال ٪۹۰ اوربیتال $d_{yz}$ (و سه اوربیتال دیگر) مانند شکل ۴۷ـ ب است. اوربیتال d پنجم یا $d_{z^2}$ شکلی متفاوت دارد. این اوربیتال از دو لب اصلی

تشکیل شده که روی محور z قرار دارند و یک ناحیهٔ دونات مانند نیز به دور مرکز آن حلقه زده است (شکل ۴۷ـ چ). الکترونی که در هر یک از این اوربیتال‌ها قرار گیرد، احتمالی برابر برای حضور در هر یک از لب‌ها دارد. در شکل ۴۷ـ ح مجموعه‌ای از هر پنج اوربیتال 3d نمایش داده شده است که شکلی تقریباً کروی دارد.



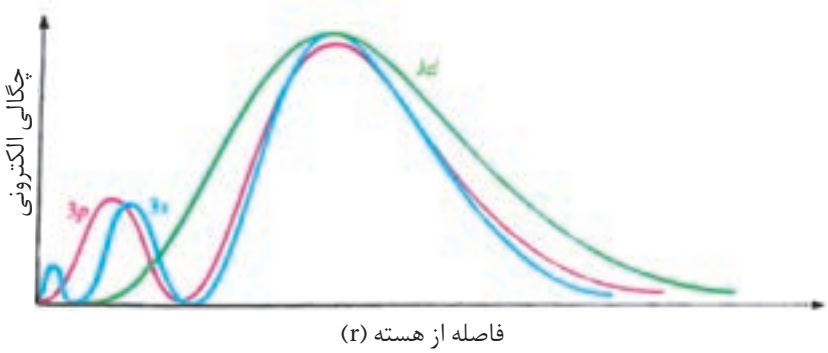

**شکل ۴۶**. اوربیتال‌های 2p و 3p




**شکل ۴۷**. اوربیتال‌های 3d

همان‌طور که در مورد اوربیتال‌های p نیز گفته شد، علامت‌گذاری اوربیتال‌های d براساس محورها، ارتباطی با مقادیر $m_l$ ندارد. مطابق قواعد اعداد کوانتومی، یک اوربیتال d (با l=۲) باید عدد کوانتومی اصلی n=۳ یا بالاتر داشته باشد. در مورد اوربیتال‌های d نیز با افزایش عدد کوانتومی اصلی، اوربیتال تا فاصلهٔ دورتری از هسته گسترش می‌یابد.

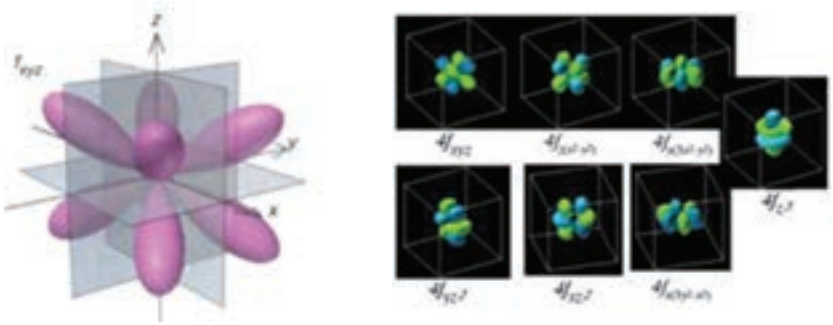
در شکل ۴۸ چگالی الکترونی اوربیتال‌های لایهٔ سوم نشان داده شده است. به تعداد گره‌ها و قدرت نفوذ آنها توجه شود.




**شکل ۴۸**. دانسیتهٔ الکترونی اوربیتال‌های لایهٔ سوم

## اوربیتال‌های با مقادیر l بزرگتر

اوربیتال‌های با l=۳ اوربیتال‌های f هستند و باید یک عدد کوانتومی اصلی حداقل برابر با n=۴ داشته باشند. هفت اوربیتال f وجود دارد (۲l+۱=۷) که هر یک شکلی پیچیده و چندلبی دارند. شکل ۴۹ این اوربیتال‌ها را نشان می‌دهد. اوربیتال‌های با l=۴ اوربیتال‌های g هستند،اما از آن‌جا که در تشکیل پیوندهای شیمیایی هیچ نقشی ندارند، به آنها نمی‌پردازیم. با استفاده از برنامه‌های رایانه‌ای می‌توان شکل هر اوربیتال را به صورت سه‌بعدی دید.

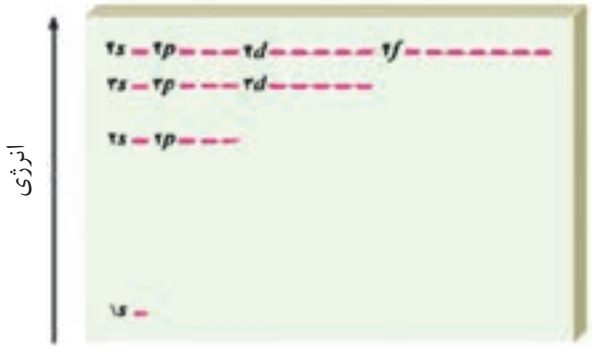


**شکل ۴۹**. اوربیتال $4f_{xyz}$ که هشت لب و سه صفحهٔ گرهی دارد.

## ترازهای انرژی اتم هیدروژن

حالت انرژی اتم هیدروژن و گونه‌های تک الکترونی فقط به عدد کوانتومی اصلی n بستگی دارد. الکترونی که در اوربیتالی با یک مقدار بزرگ‌تر از n قرار می‌گیرد، به‌طور میانگین زمان خود را در فاصلهٔ دورتری از هسته می‌گذراند، بنابراین پرانرژی‌تر است. حالت انرژی اتم‌های غیر از هیدروژن، هم به n و هم به l زیرلایه‌های اشغال شده بستگی دارد (شکل ۵۰. ب). بنابراین، فقط در مورد اتم H تمام چهار اوربیتال مربوط به n=۲ (یکی ۲s و سه‌تا ۲p) انرژی یکسانی دارند و تمام نُه اوربیتال n=۳ (یکی ۳s، سه تا ۳p و پنج‌تا ۳d) نیز انرژی یکسانی دارند (شکل ۵۰. آ):

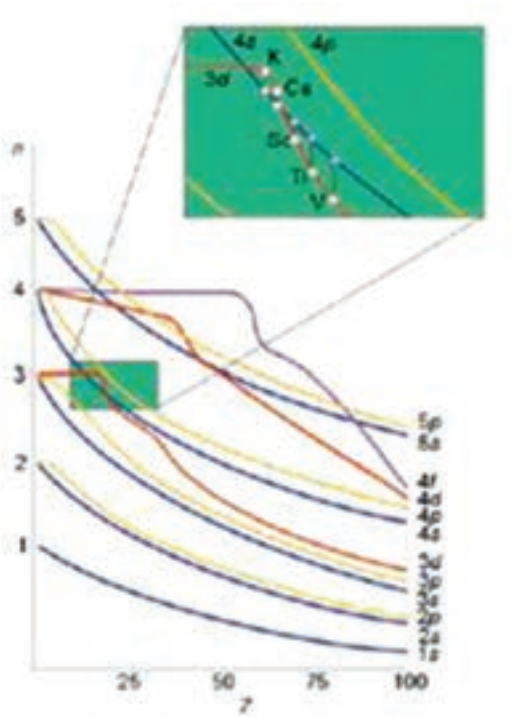
$$1s<2s=2p<3s=3p=3d<4s=4p=4d=4f<\ldots$$




**شکل ۵۰. آ.** ترازهای انرژی در اتم هیدروژن

**شکل ۵۰. ب.** ترازهای انرژی اوربیتالی در یک اتم چند الکترونی. تراز انرژی به هر دو مقدار n و l بستگی دارد.

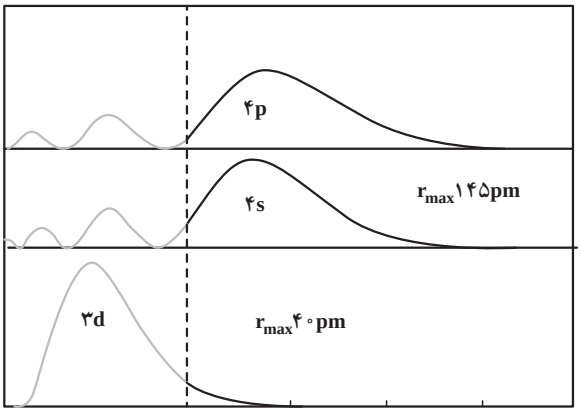
برای اتم‌های چند الکترونی، ترازهای انرژی آرایش پیچیده‌تری دارند. تراز انرژی ۳d در این اتم‌ها بسیار به تراز انرژی ۴s نزدیک است. با این حال، انرژی کل یک اتم نه تنها به مجموع انرژی‌های اوربیتالی، بلکه به انرژی دافعهٔ بین الکترون‌های موجود در این اوربیتال‌ها نیز بستگی دارد (هر اوربیتال می‌تواند دو الکترون در خود جای دهد). نتیجه می‌شود که اگر زیرلایهٔ ۴s قبل از زیرلایهٔ ۳d پر شود، انرژی کل یک اتم پایین‌تر می‌آید. شکل ۵۰.ب ترتیب پر شدن اوربیتال‌های اتمی را در یک اتم چند الکترونی نشان می‌دهد. باید توجه داشت که همیشه ترتیب پر شدن اوربیتال‌ها از قاعدهٔ آفبا تبعیت نمی‌کند، زیرا این‌که الکترون در چه اوربیتالی قرار بگیرد، به انرژی اوربیتال‌ها بستگی دارد. بنابراین، هر عملی که ترتیب انرژی اوربیتال‌ها را به‌هم زند، در شیوهٔ پرشدن آنها به‌وسیلهٔ الکترون‌ها نیز تأثیر دارد. در شکل ۵۱ انرژی نسبی اوربیتال‌ها با افزایش عدد اتمی نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که برای برخی عنصرها، ترتیب انرژی‌ها نسبت به قاعدهٔ آفبا به هم می‌خورد.




**شکل ۵۱**. انرژی نسبی اوربیتال‌ها در اتم‌های مختلف

به عنوان نمونه، مشخص شده است که انرژی اوربیتال ۴s از اوربیتال ۳d کمتر است؛ بنابراین ۴s آسان‌تر از ۳d پر می‌شود. باید توجه داشت با افزایش عدد کوانتومی l، انرژی اوربیتال نیز زیاد می‌شود. اوربیتال‌های با l بزرگتر، دارای تعداد گره‌های بیشتری هستند. همچنین اوربیتال‌های با l بزرگتر قدرت نفوذ کمتری دارند؛ زیرا احتمال کمتری برای حضور الکترون‌های آنها در نزدیکی هسته وجود دارد. از آن‌جا که اوربیتال ۴s انرژی بسیار کمتری از اوربیتال ۳d و نیز دانسیتهٔ قابل توجهی در نزدیکی هسته دارد، ابتدا اوربیتال ۴s پر می‌شود.

در شکل ۵۲، تابع توزیع شعاعی اوربیتال ۴s با ۳d و ۴p مقایسه شده است. مشخص است که ۴s تا نزدیکی هسته نفوذ کرده و دانسیتهٔ قابل توجهی دارد و جاذبهٔ قابل توجهی از هسته به آن می‌رسد. بنابراین انرژی کمتری نسبت به ۳d خواهد داشت و زودتر پر می‌شود.




**شکل ۵۲**. تابع توزیع شعاعی اوربیتال‌های ۴s، ۳d و ۴p

# واحد یادگیری ۹

**هدف‌های آموزشی**

انتظار می‌رود دانش‌آموز در پایان این واحد یادگیری:

۱ـ با مفهوم انرژی نخستین یونش آشنا شود.

۲ـ با توجه به انرژی‌های یونش متوالی یک اتم، به لایه‌ای بودن اتم پی ببرد.

۳ـ با نوشتن معادلهٔ انرژی نخستین یونش آشنا شود.

۴ـ مهارت یافتن آرایش الکترونی از روی نمودار انرژی یونش یک اتم را کسب و در خود تقویت کند.

**ارزشیابی تشخیصی**

۱ـ مدل اتمی بور را با رسم شکل نشان دهید.

۲ـ مفهوم یونش را با توجه به مدل اتمی بور توضیح دهید.

۳ـ اگر اتمی ۱۱ الکترون داشته باشد، آیا برای کندن همهٔ الکترون‌ها انرژی یکسانی باید صرف شود؟

۴ـ برای جدا کردن الکترون از لایهٔ اول انرژی بیشتری لازم است یا لایهٔ سوم؟ چرا؟

## روش تدریس پیشنهادی: کاوشگری هدایت شده

به معلم گرامی توصیه می‌شود یک پیاز که از قطر به دو نیم شده را به کلاس ببرید. سپس با معرفی عنوان بحث جدید، به دانش‌آموزان بگویید که می‌خواهیم در مورد مدلی پیشرفته از اتم صحبت کنیم. با طرح چند پرسش شفاهی کوتاه از دانش‌آموزان ترازهای انرژی بور را مرور کنید. آنگاه با نشان دادن پیاز به دانش‌آموزان و جدا کردن یکی از لایه‌های نازک (پوستهٔ شفاف) از این آنالوژی برای توصیف مدارهای بور استفاده کنید. آنگاه لایه‌های کلفت‌تر را به آنها نشان دهید و توضیح دهید که در مدل کوانتومی به‌جای ترازهای انرژی، فضایی برای حرکت الکترون تعریف می‌کنیم. در اینجا به واژهٔ «اوربیتال» اشاره کنید. حال با نشان دادن مجدد لایه‌های کلفت پیاز، به ضرورت وجود طول، عرض و ارتفاع برای هر فضای سه بُعدی اشاره کنید و دانش‌آموزان را به ضرورت معرفی اوربیتال توسط سه مولفهٔ n و l و ml که اعداد کوانتومی مشخصهٔ هر الکترون هستند، هدایت کنید. توضیح دهید که در ادامه به معرفی این سه عدد می‌پردازیم اما این جلسه، اولین عدد کوانتومی یعنی n را که عدد کوانتومی اصلی است، شناسایی می‌کنیم و رابطهٔ آن با انرژی نخستین یونش را بررسی می‌کنیم.

توصیه می‌شود کمی در مورد جاذبهٔ هسته بر الکترون و نیاز به صرف انرژی برای کندن الکترون از اتم صحبت کنید.

سپس با نشان دادن آنالوژی پیاز به رابطهٔ بین نزدیکی الکترون به هسته و افزایش جاذبهٔ هسته بر الکترون اشاره کنید.

حال از فراگیران بپرسید: «اگر اتمی ۱۱ الکترون داشته باشد، معنای انرژی نخستین یونش چیست؟»

دانش‌آموزان را به سمت مفهوم انرژی لازم برای جدا کردن نخستین الکترون هدایت کنید. سپس از آنها بپرسید: به نظر شما «این الکترون از دورترین لایه از هسته جدا می‌شود یا از نزدیکترین لایه؟» می‌توانید آنالوژی پیاز را نشان داده و با تکمیل پاسخ فراگیران، انرژی نخستین یونش را برای کندن سُست‌ترین الکترون با آوردن معادلهٔ واکنش تعریف کنید. سپس معادلهٔ نخستین یونش را برای یک اتم بنویسید و نماد $IE_1$ را برای نخستین یونش و $IE_2$ و $IE_3$ و ... را معرفی کنید.

حال از دانش‌آموزان بپرسد اگر اتمی ۱۱ الکترون داشته باشد، برای جدا کردن تمام الکترون‌ها در چند مرحله باید انرژی به آن داده شود؟ آنها را با نماد IE نشان داده و

برحسب مقدار مرتب کنید.

$(IE_1, IE_2, \ldots, IE_{11})$

اطلاعات را روی تابلو ثبت کنید.

حال کار برگ زیر را که شامل نمودار، مقادیر انرژی یونش و پرسش‌ها است، در اختیار دانش‌آموزان قرار دهید تا آنها خود با بررسی نمودار، به مفهوم موردنظر دست یابند.

**کاربرگ کلاسی (گروهی ـ فردی)** **صفحه ۱**

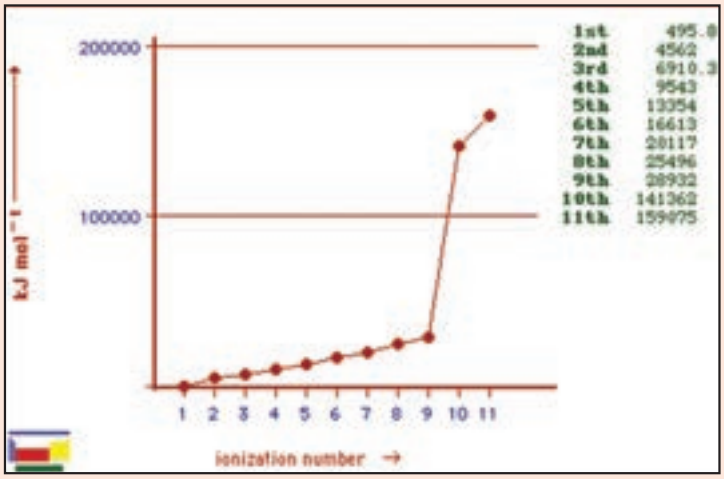
**نام و نام خانوادگی (نام اعضا):**

**موضوع درس:** **تاریخ:**

۱ـ آیا برای کندن هر الکترون از اتم به انرژی یکسانی نیاز است؟

۲ـ جدا کردن اولین الکترون (شمارهٔ ۱) انرژی بیشتری نیاز دارد یا الکترون شمارهٔ ۱۱؟

۳ـ نمادهای $IE_1$،$IE_2$ ، ... تا $IE_{11}$ را برروی نقطه‌های نمودار بنویسید. با جدا شدن یک الکترون، برای کندن الکترون بعدی به انرژی بیشتری نیاز است یا انرژی کمتری؟




۴ـ به‌طور کلی با کندن هر الکترون مقدار انرژی یونش کم می‌شود یا زیاد؟ با گذاشتن علامت > یا < رابطهٔ زیر را کامل کنید.

$IE_1 \ , \ IE_2 \ , \ IE_3 \ , \ldots \ , \ IE_{11}$

۵ـ اگر با توجه به نمودار و مقادیر انرژی یونش بخواهیم الکترون‌ها را دسته‌بندی کنیم، چند دسته الکترون در نمودار می‌توان جدا کرد؟

۶ـ آیا افزایش مقدار انرژی یونش یکنواخت است؟

۷ـ در چه قسمت‌هایی اختلاف زیاد (جهش بزرگ) در انرژی یونش دیده می‌شود؟

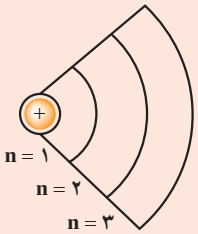
۸ـ در هر دسته چند الکترون وجود دارد؟

۹ـ به نظر شما کدام دسته به هسته نزدیکتر است؟ چرا؟

۱۰ـ به نظر شما کدام دسته از هسته دورتر است؟ چرا؟

۱۱ـ اگر هر دسته از الکترون‌ها در یک لایه قرار بگیرند، این اتم، چند لایهٔ الکترونی دارد؟

۱۲ـ تعداد الکترون‌های هر لایه را در شکل بنویسید.




۱۳ـ اگر n عدد کوانتوم اصلی باشد، در آرایش الکترونی یک اتم، n نشان‌دهندهٔ چیست؟

۱۴ـ آیا بین تعداد جهش‌های بزرگ و تعداد لایه‌های اصلی رابطه‌ای وجود دارد؟

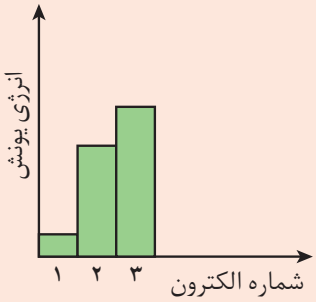
۱۵ـ یک عبارت توصیفی بنویسید که اصطلاح‌های زیر در آن به‌کار رفته باشد:

عدد کوانتوم اصلی، فاصله از هسته، انرژی یونش، الکترون

به دانش‌آموزان زمان کافی بدهید تا کاربرگ را بررسی کنند و به پرسش‌ها پاسخ دهند. سپس به کمک دانش‌آموزان پرسش‌ها را بررسی کنید و مطالب درسی را جمع‌بندی نمایید.

حال از فراگیران بخواهید دو فعالیت زیر را انجام دهند:

۱ـ با توجه به نمودار ستونی انرژی یونش لیتیم ($_{۳}Li$) به پرسش‌ها پاسخ دهید.




آ) این اتم دارای چند لایهٔ الکترونی است؟

ب) چند جهش بزرگ در انرژی‌های یونش آن دیده می‌شود؟

پ) برای اتم لیتیم یک ساختار اتمی پیشنهاد کنید.

۲ـ فکر کنید صفحه ۲۰ کتاب درسی را بررسی کنید.

## بر دانش خود بیفزایید

در اوایل قرن نوزدهم، فیزیکدانان برای درک ساختار اتم‌ها و مولکول‌ها تلاش‌های بسیاری انجام دادند. این تلاش‌ها به دیدگاهی منجر شد که اتم را متشکل از هسته‌ای شامل پروتون‌ها و نوترون‌ها می‌دانست و الکترون‌ها در فاصلهٔ مشخصی از آن حرکت می‌کنند. این توصیف اساساً درست است، اما به هیچ‌وجه کامل نیست زیرا با استفاده از آن فقط برخی از خواص ماکروسکوپی مولکول‌ها توجیه‌پذیر است. در مقابل، توجیه پایداری مولکول‌ها و منشأ نیروهایی که آنها را در کنار هم نگه می‌دارد، با استفاده از این مدل ممکن نیست. زمان زیادی طول کشید تا دانشمندان متوجه شدند (و زمان بیشتری طول کشید تا بپذیرند) که قوانین فیزیکی حاکم بر اتم‌ها و مولکول‌ها متفاوت با اجسام بزرگتر است.

سال ۱۹۰۰، نقطهٔ آغاز این ایده‌های جدید بود. در آن زمان، ماکس پلانک[1] (۱۹۴۷ـ۱۸۵۸)، فیزیک‌دان آلمانی، هنگام بررسی داده‌های مربوط به تابش نشر شده از مواد جامدگرم شده تا دماهای گوناگون ، متوجه شد که اتم‌ها و مولکول‌ها تابش‌هایی نشر می‌کنند که انرژی آنها فقط مقادیر ناپیوستهٔ معینی دارد. او آنها را **کوانتا** نامید. فیزیک‌دانان همیشه فرض می‌کردند که انرژی پیوسته است و در یک فرایند تابش هر مقدار دلخواهی از انرژ ی می‌تواند آزاد شود. نظریهٔ کوانتومی پلانک تمام این فرضیه‌ها را به هم ریخت و انبوهی از پژوهش‌ها که پس از نظریهٔ پلانک صورت گرفت، باعث شد دیدگاه ما از طبیعت برای همیشه تغییر کند.

## تابش الکترومغناطیسی: ماهیت موجی نور

برای درک نظریهٔ کوانتومی پلانک ابتدا باید دربارهٔ ماهیت امواج اطلاعاتی داشته باشیم. ویژگی اصلی یک موج، ماهیت تکرارشوندهٔ آن است. یک موج با طول، ارتفاع و نیز تعداد طول موج‌هایی مشخص می‌شود که در واحد زمان از یک نقطه عبور می کنند (شکل ۵۳). طول موج ($\lambda$) فاصلهٔ بین هر دو قله یا هردو درّهٔ پی‌درپی در یک موج است. فرکانس $\nu$ برابر است با تعداد امواجی که در واحد زمان از نقطهٔ معینی عبور می کند. فاصلهٔ عمودی بین مرکز موج و هر نقطه حداکثر یا حداقل آن **دامنهٔ موج** نام دارد.

خاصیت مهم دیگر امواج، سرعت آنهاست. سرعت یک موج به نوع موج و ماهیت محیطی بستگی دارد که موج در آن حرکت می کند (مثلاً، هوا، آب یا خلأ). سرعت (u) یک موج برابر با حاصل‌ضرب طول موج در فرکانس آن است:

$$u=\lambda\nu \qquad (۳۶)$$

---

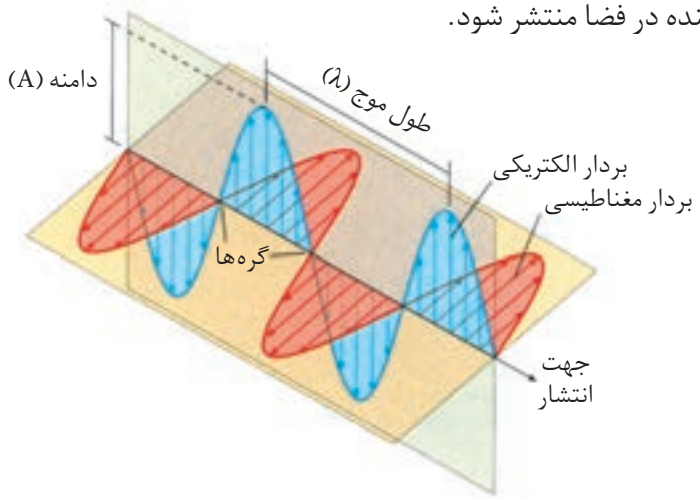
۱ ـ M.Plank

(آ) (ب)

**شکل ۵۳**. آ) طول موج و دامنهٔ یک موج، ب) دو موج با طول موج و فرکانس مختلف و دامنهٔ یکسان. در موج بالایی، طول موج سه برابر موج پایینی و فرکانس یک سوم موج پایینی است.

در این رابطه، طول موج برحسب واحدهای طول (مانند متر، سانتی‌متر یا نانومتر) و فرکانس برحسب واحد معکوس زمان ($s^{-1}$) بیان می‌شود. واحد هرتز که اغلب برای بیان فرکانس به‌کار می‌رود هم‌ارز با دور برثانیه ($s^{-1}$) است ($1\,Hz = 1\,s^{-1}$).

انواع مختلفی از امواج مانند امواج آب، امواج صوتی و امواج نوری وجود دارند. در سال ۱۸۷۳، ماکسول نور مرئی را متشکل از امواج الکترومغناطیسی دانست. براساس نظریهٔ ماکسول یک موج الکترومغناطیسی یک مؤلفهٔ میدان الکتریکی و یک مؤلفهٔ میدان مغناطیسی دارد. این دو مؤلفه طول موج و فرکانس یکسان و بنابراین سرعت یکسان دارند، اما در صفحه‌های عمود بر هم منتشر می‌شوند (شکل ۵۴). اهمیت نظریهٔ ماکسول در این است که توصیفی ریاضی برای رفتار عمومی نور ارائه می‌دهد. به‌ویژه، این مدل توضیح می‌دهد که چگونه انرژی تابشی می‌تواند به صورت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی نوسان‌کننده در فضا منتشر شود.

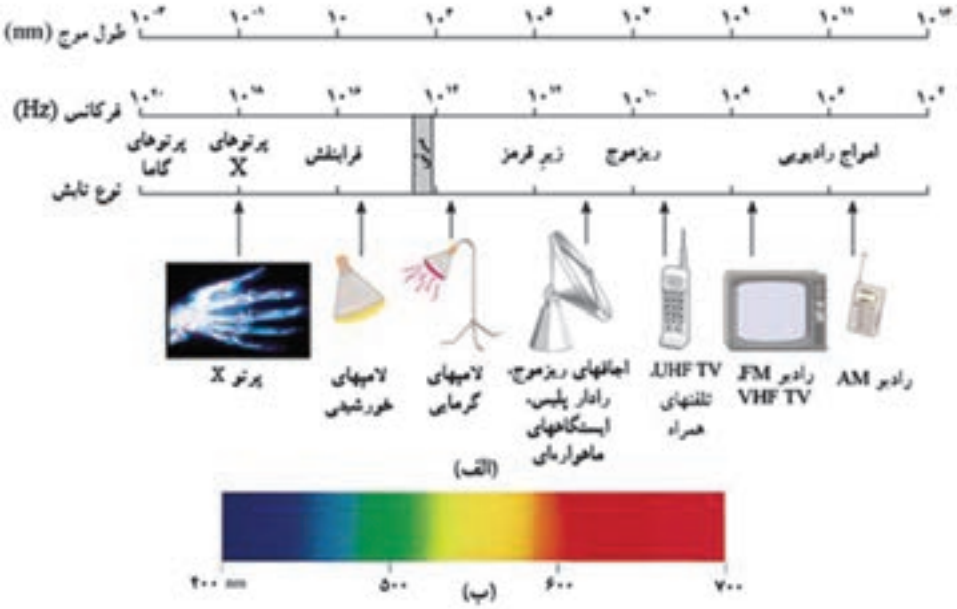



**شکل ۵۴**. مؤلفه‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی موج

تابش الکترومغناطیسی، نشر و انتقال انرژی به شکل امواج الکترومغناطیسی است. امواج الکترومغناطیسی با سرعت تقریبی $3/00 \times 10^{8}$ متر بر ثانیه در خلأ منتشر می‌شوند. این سرعت در محیط‌های دیگر تغییر می‌کند، اما تغییر آن شدید نیست. به‌طور قراردادی از علامت c برای نشان

دادن سرعت امواج الکترومغناطیسی استفاده می‌شود و برای سادگی نام سرعت نور برای آن به کار می‌رود. طول موج (λ) امواج الکترومغناطیسی اغلب بر حسب نانومتر (nm) بیان می‌شود.

شکل ۵۵ انواع مختلفی از تابش الکترومغناطیسی را نشان می‌دهد که از نظر طول موج و فرکانس (ν) با هم اختلاف دارند. امواج رادیویی با طول موج بزرگ از آنتن‌های بزرگ مانند آنتن‌های ایستگاه‌های رادیویی نشر می‌شوند. نور مرئی که طول موج‌های کوتاه‌تری را شامل می‌شود، از حرکت الکترون‌ها در اتم‌ها و مولکول‌ها نشأت می‌گیرد. کوتاه‌ترین امواج، که بیشترین فرکانس را دارند، امواج گاما (γ) هستند که از تغییر درون هستهٔ اتم‌ها ناشی می‌شوند. خواهیم دید، امواجی پر انرژی‌ترند که فرکانس بیشتری دارند. بنابراین، تابش فرابنفش، پرتوهای X و پرتوهای γ تابش‌هایی پرانرژی‌اند.




**شکل ۵۵** آ) انواع تابش الکترومغناطیسی، ب) محدودهٔ نور مرئی بین طول موج ۴۰۰nm (بنفش) و ۷۰۰nm (قرمز)

**نظریهٔ کوانتومی پلانک: ماهیت ذره‌ای نور**: هنگامی که به مواد جامد گرما داده می‌شود، تابش‌های الکترومغناطیسی با گسترهٔ وسیعی از طول موج‌ها را از خود نشر می‌کنند. مثلاً، هنگامی که جامدی تا حدود ۱۰۰۰K گرم شود، نور قرمز نشر می‌کند (مانند زغال گداخته). هنگامی که دما به ۱۵۰۰K می‌رسد، نور نشر شده روشن‌تر و رنگ آن نارنجی می‌شود (مانند المنت الکتریکی). در دماهای بالاتر از ۲۰۰۰K نور روشن‌تر و سفیدتر می‌شود (مانند رشتهٔ درون لامپ تنگستن). این تغییر در طول موج نور نشر شده هنگام گرما دادن به یک جامد، با عنوان تابش جسم سیاه شناخته شده است.

مطالعاتی که در اواخر قرن نوزده دربارهٔ تابش جسم سیاه انجام گرفت، نشان داد که مقدار انرژی تابشی نشر شده از جسمی که تا دمای معینی گرما داده شده به‌طول موج آن بستگی دارد. تلاش‌هایی که برای توجیه این وابستگی برحسب نظریه‌های اثبات شدهٔ امواج و قوانین ترمودینامیکی صورت گرفت، تنها با موفقیتی نسبی همراه بود. یک نظریه در توجیه بخش با طول موج کوتاه موفق بود، اما در بخش مربوط به طول موج‌های بلندتر شکست می‌خورد. نظریهٔ دیگری بخش طول موج بلند را توجیه می‌کرد، اما در توجیه بخش طول موج کوتاه ناتوان بود. به‌نظر می‌رسید که قوانین فیزیک کلاسیکی محدودیت‌های جدی دارد.

پلانک با استفاده از فرضیه‌ای کاملاً دور از مفاهیم پذیرفته شدهٔ زمان خود، توانست این مسئله را حل کند. در فیزیک کلاسیک فرض می‌شد که اتم‌ها و مولکول‌ها می‌توانند هر مقدار دلخواه از انرژی تابش را نشر (یا جذب) کنند، اما پلانک گفت که اتم‌ها و مولکول‌ها فقط مقادیر معینی از انرژی (مانند بسته‌هایی کوچک) را نشر یا جذب می‌کنند. پلانک برای کوچک‌ترین مقدار انرژی که می‌تواند به شکل تابش الکترومغناطیسی نشر (یا جذب) شود، از نام **کوانتوم** استفاده کرد. انرژی (E) یک کوانتوم از آن برابر است با:

$$E=h\nu=hc/\lambda \qquad (۳۷)$$

h ثابت پلانک نام دارد و ν، فرکانس تابش است. مقدار ثابت پلانک برابر با $۶/۶۲۶۰۷۵۵\times۱۰^{-۳۴}$ Js است.

انرژی یک دسته پرتو دارای N فوتون، برابر با $E=Nh\nu$ است.

براساس نظریهٔ کوانتومی، انرژی همیشه به‌صورت مضربی از hν نشر می‌شود؛ برای نمونه ۱/۶۷hν معنا ندارد.در زمانی که پلانک نظریهٔ خود را ارائه داد، نتوانست توضیح دهد که چرا انرژی باید به این صورت کوانتیده باشد. با این حال، با استفاده از این نظریه توجیه داده‌های تجربی مربوط به نشر مواد جامد در هر محدودهٔ از طول موج امکان‌پذیر شد.

**تمرین**: برای افزایش دمای ۱۰۰ گرم آب از ۲۵°C تا ۴۵°C، چه تعداد فوتون با طول موج ۲۵۰nm لازم است؟

$E=m\,c\,\Delta T=۲۰\times۱۰۰\times۴/۱۸۴=۸۳۶۰J$ و $E=Nh\nu$

$$N=\frac{E}{h\nu}=\frac{۸۳۶۰J}{۶/۶۲۵\times۱۰^{-۳۴}Js\times\frac{۳\times۱۰^{۸}m/s}{۲۵۰\times۱۰^{-۹}m}}=۱/۰۵\times۱۰^{۲۲}$$

## اثر فوتو الکتریک

در سال ۱۹۰۵، تنها پنج سال پس از ارائهٔ نظریهٔ کوانتومی پلانک، آلبرت اینشتین[۱] (۱۸۷۹ـ۱۹۵۵) از این نظریه برای حل مسئلهٔ دیگری که فیزیک کلاسیکی در توجیه آن ناتوان بود (پدیدهٔ فوتوالکتریک)، استفاده کرد. فوتوالکتریک پدیده‌ای است که در آن الکترون‌ها از سطح برخی فلزها خارج می‌شوند که در معرض نوری با یک حداقل فرکانس خاص قرار داده شده‌اند. این حداقل فرکانس، فرکانس آستانه نام دارد (شکل ۵۶). تعداد الکترون‌های خارج شده به شدت (یا روشنی) نور وابسته است، اما انرژی این الکترون‌ها ارتباطی به شدت نور ندارد. افزون بر آن، پایین‌تر از فرکانس آستانه، هیچ الکترونی حتی با افزایش شدت نور خارج نمی‌شود.

پدیدهٔ فوتوالکتریک را نمی‌توان براساس خاصیت موجی نور توضیح داد. بنابراین، اینشتین از فرضیه‌ای کاملاً غیرعادی استفاده کرد. او فرض کرد که یک پرتو نور در واقع جریانی از ذره‌ها است. این ذره‌های نوری، امروزه **فوتون** نامیده می‌شوند. با استفاده از نظریهٔ کوانتومی پلانک به منزلهٔ نقطهٔ شروع، اینشتین برای تابش نتیجه‌گیری کرد که هر فوتون باید دارای انرژی E باشد که مقدار آن از $E=h\nu$ به‌دست می‌آید.

الکترون‌ها با نیروهای جاذبه‌ای در بلور یک فلز نگه داشته شده‌اند. بنابراین، جدا کردن آنها از فلز، نیازمند نوری با فرکانس به اندازهٔ کافی بالا (متناظر با انرژی بالا) است تا بتواند الکترون‌ها را آزاد کند. تاباندن یک پرتو نور به سطح فلز را می‌توان به پرتاب دسته‌ای از ذره‌ها (فوتون‌ها) به اتم‌های فلز تشبیه کرد. اگر فرکانس فوتون‌ها به‌گونه‌ای باشد که $h\nu$ دقیقاً با انرژی‌ای که الکترون‌ها را در فلز نگه داشته برابر باشد، در آن صورت انرژی نور برای کندن الکترون‌ها از جامد کافی است. اگر از نوری با فرکانس بالاتر استفاده شود، نه تنها الکترون‌ها جدا می‌شوند، بلکه انرژی جنبشی آنها نیز افزایش می‌یابد. این وضعیت را می‌توان در معادلهٔ زیر خلاصه کرد:

$$h\nu=KE+BE \qquad (۳۸)$$

که در آن KE انرژی جنبشی الکترون خارج شده و BE انرژی الکترون در فلز است. معادلهٔ بالا را می‌توان به‌صورت زیر نوشت:

$$KE=h\nu-BE \qquad (۳۹)$$

که نشان می‌دهد هرچه فوتون پرانرژی‌تر باشد (یا فرکانس بزرگتری داشته باشد)، انرژی جنبشی الکترون خارج‌شده بیشتر است.

اکنون دو پرتو نور با فرکانس برابر (و بزرگتر از فرکانس آستانه)، اما با شدت‌های

---

۱ ـ A. Einstein

مختلف را درنظر بگیرید. نوری که شدت بیشتری دارد، محتوی تعداد بیشتری از فوتون است. بنابراین، تعداد الکترون‌های بیشتری را از فلز خارج می‌کند و شدت جریان مشاهده شده، بیشتر است. افزایش شدت نور به افزایش تعداد الکترون‌های خارج‌شده از فلز منجر می‌شود، اما افزایش فرکانس نور، انرژی جنبشی این الکترون‌ها را افزایش می‌دهد.

نظریهٔ اینشتین، دانشمندان را با مسئله‌ای دشوار مواجه کرد. از یک سو، نظریهٔ ذره‌ای نور توجیه رضایت‌بخشی برای پدیدهٔ فوتوالکتریک ارائه می‌داد، اما از سوی دیگر با رفتارهای موجی شناخته شدهٔ نور در تضاد بود. تنها راه حل این مسئله، پذیرفتن هر دو خاصیت موجی و ذره‌ای برای نور است. نور ممکن است بسته به شرایط مورد آزمایش، به‌صورت موج یا ذره عمل کند. این مفهوم به کلی با آن‌چه فیزیک‌دانان دربارهٔ ماده و نور می‌دانستند، در تضاد بود. به همین دلیل مدت زمان زیادی طول کشید تا پذیرفته شود.

# واحد یادگیری ۱۰

## روش تدریس پیشنهادی (الگوی دریافت مفهوم)

پیشنهاد می‌شود که عنوان درس را روی تابلو بنویسید.

تقسیم‌بندی عنصرها به دسته‌های s، p و d

سپس کارت‌هایی را که قبلاً تهیه و تکثیر کرده‌اید، در اختیار گروه‌ها قرار دهید و از آنها بخواهید با بررسی کارت‌ها، عنصرهای موردنظر را براساس ویژگی‌های مشترک دسته‌بندی کنند و در سه دستهٔ s، p و d بنویسند. (۳۶ عنصر را بین گروه‌ها طوری تقسیم کنید که هر گروه ۳ دسته عنصر داشته باشد).

هنگام فعالیت گروه‌ها بر کار آنها نظارت کنید و در صورت نیاز آنها را راهنمایی کنید. سپس از یکی از گروه‌ها بخواهید که نحوهٔ دسته‌بندی خود را برای کلاس توضیح دهد و سایر گروه‌ها دربارهٔ درستی پاسخ، بحث و گفت‌وگو کنند. در ادامه جواب‌های درست را تأیید و جواب‌های نادرست را اصلاح کنید. گروه‌ها نیز پس از این بحث و بررسی پاسخ‌های خود را اصلاح کنند.

در پایان تصویری از جدول تناوبی که فقط شامل نماد عنصرهاست (و آن را قبلاً روی برگهٔ $A_3$ تکثیر کرده‌اید یا از دانش‌آموزی خواسته‌اید تا آن را روی مقوا طراحی کند) روی تابلو نصب کنید و از یکی از دانش‌آموزان بخواهید که روی جدول عنصرهای دستهٔ s را زرد، دستهٔ p را سبز روشن و دستهٔ d را آبی، رنگ‌آمیزی کند (شما می‌توانید رنگ‌های دیگری انتخاب کنید). سپس شمارهٔ گروه عنصرها را روی جدول مشخص کنید و تعداد الکترون‌های لایهٔ ظرفیت هر گروه را نیز بالای جدول بنویسید.

در پایان از آنها بخواهید قواعدی، برای نحوهٔ تعیین شمارهٔ گروه، تعداد الکترون‌های لایهٔ ظرفیت و دستهٔ عنصرها کشف کنند (بیان کنند). توجه کنید به کمک گفت‌وگو و تبادل نظر، قواعد زیر باید کشف شود.

۱ـ در عنصرهای دستهٔ s:

تعداد الکترون‌های اوربیتال s = تعداد الکترون‌های لایهٔ ظرفیت

۲ـ در عنصرهای دستهٔ p:

مجموع الکترون‌های اوربیتال s و p= تعداد الکترون‌های لایهٔ ظرفیت

۳ـ در عنصرهای دستهٔ d:

مجموع الکترون‌های s و d قبل از آن = تعداد الکترون‌های ظرفیت

**هدف‌های آموزشی**

انتظار می‌رود دانش‌آموز در پایان این واحد یادگیری،

۱ـ با روش تعیین عناصر دستهٔ s و تعریف و جایگاه آنها در جدول آشنا شود.

۲ـ با روش تعیین عناصر دستهٔ p و تعریف و جایگاه آنها در جدول آشنا شود.

۳ـ با روش تعیین عناصر دستهٔ d و تعریف و جایگاه آنها در جدول آشنا شود.

۴ـ با معنا و مفهوم الکترون‌های ظرفیت آشنا شود.

۵ـ مهارت تعیین تعداد الکترون‌های ظرفیت یک عنصر را کسب و در خود تقویت کند.

۶ـ مکان عناصر دستهٔ s و p و d را روی جدول تناوبی نشان دهد.

**ارزشیابی تشخیصی**

آرایش الکترونی اتم‌های زیر را رسم کنید و به پرسش‌ها پاسخ دهید.

$_{۴}B$

$_{۱۵}P$

$_{۲۵}Mn$

آ) هر یک از عنصرهای فوق چند لایهٔ الکترونی دارند؟

ب) بزرگترین عدد کوانتوم اصلی در آرایش الکترونی عنصرهای بالا چند است؟

پ) تعداد الکترون ظرفیت (الکترون‌های آخرین لایهٔ الکترونی) را برای سه عنصر فوق تعیین کنید.

۴ـ در عنصرهای دستهٔ s و d :

تعداد الکترون‌های لایهٔ ظرفیت = شمارهٔ گروه

۵ـ در عنصرهای دستهٔ p:

۱۰ + تعداد الکترون‌های لایهٔ ظرفیت = شمارهٔ گروه

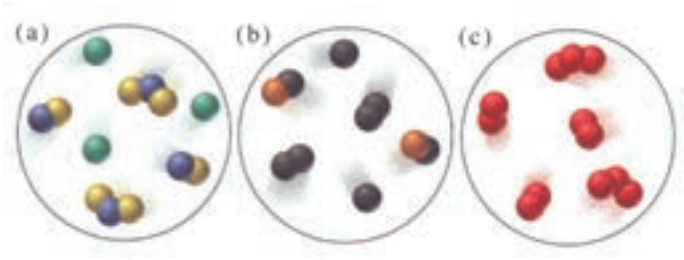
## خودارزشیابی

۱ـ به کمک نمودارهای دایره‌ای داده شده به پرسش‌ها پاسخ دهید.

آ) کدام عنصر جزء سازنده‌های اصلی هر سه است؟

ب) تنوع عنصرهای سازنده در کدام یک بیشتر است؟ چرا؟

۲ـ در شکل‌های زیر هر ذره نشان‌دهندهٔ نسبت مولی آن ماده در ظرف است. به کمک شکل‌ها به پرسش‌ها پاسخ دهید.



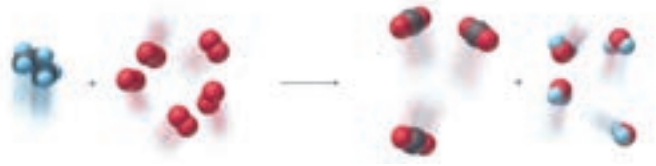

آ) کدام شکل، قانون نسبت‌های معین را نشان می‌دهد؟

ب) کدام یک شکل‌های گوناگون مولکولی یک عنصر را نشان می‌دهد؟

پ) برای کدام یک می‌توان یک معادلهٔ موازنه شده (بر پایهٔ قانون پایستگی جرم) نوشت؟ توضیح دهید.

۳ـ بر پایهٔ شکل صفحه بعد، کدام فرض‌های مدل اتمی دالتون را می‌توان نتیجه گرفت؟ آنها را بنویسید.

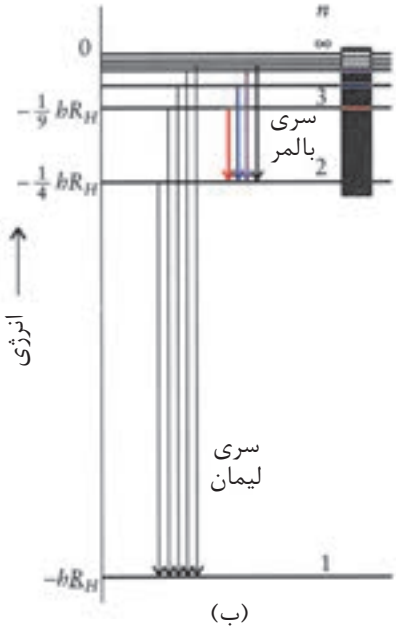
چهار مولکول آب + سه مولکول کربن‌دی‌اکسید ⟶ پنج مولکول اکسیژن + یک مولکول پروپان



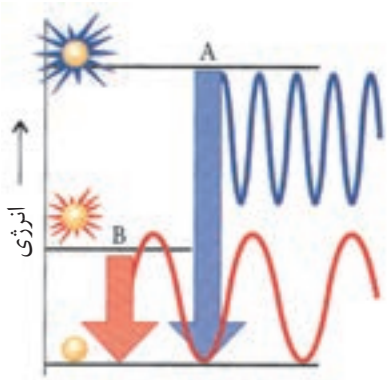
۴ـ با انتقال الکترون در اتم هیدروژن از n=۴ به n=۲، فوتون با چه فرکانسی نشر می‌شود؟

$R_H$=۲/۱۷۹×۱۰$^{-۱۸}$ J، h=۶/۶۲×۱۰$^{-۳۴}$ J.s، c=۳×۱۰$^{۸}$ m.s$^{-۱}$

۵ـ هر یک از شکل‌های زیر را تفسیر کنید.




(ب)

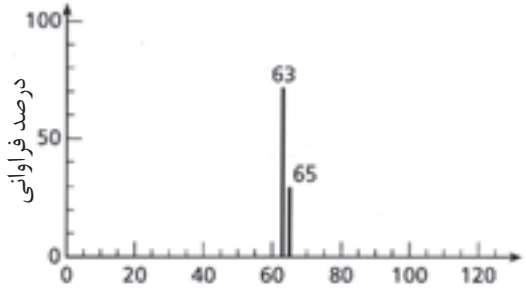



(آ)

۶ـ به کمک طیف جرمی مس به پرسش‌ها پاسخ دهید.

آ) مس چند ایزوتوپ دارد؟ چرا؟

ب) جرم اتمی میانگین مس را گزارش کنید.




نسبت جرم به بار

۷ـ آ) انرژی یونش اتم هیدروژن را برحسب کیلوژول بر مول گزارش کنید.

ب) اگر اتم هیدروژن،انرژی فوتونی با طول موج ۱۲۸۱nm را جذب کند، الکترون آن به کدام تراز برانگیخته می‌شود؟

پ) پلاسما حالتی از ماده است که در آن ذره‌های مثبت و الکترون‌ها به حالت گازی وجود دارند. در پلاسمای جیوه، یون $Hg^{۸۰+}$ وجود دارد. انرژی لازم برای یونش آخرین الکترون اتم جیوه را برحسب کیلوژول بر مول گزارش کنید.

E: انرژی یونش برحسب ژول بر اتم

$$E = -۲/۱۸\times۱۰^{-۱۸}(\frac{Z^۲}{n^۲})$$

۸ـ رنگ و طول موج نشر شده حاصل از انتقال الکترون از n=۵ به n=۲ را به‌دست آورید.

$$R_H=۱/۰۹۶۷۷۶\times۱۰^{-۷}m^{-۱}\ ,\ \frac{۱}{\lambda}=R_H(\frac{۱}{n_۱^۲}-\frac{۱}{n_۲^۲})$$

۹ـ فنجانی ۵۰g آب دارد. برای افزایش دمای آن از ۲۸°C تا ۹۸°C به ۷۰K × ۵۰g × ۴/۱۸ $Jg^{-۱}K^{-۱}$ گرما نیاز است. اگر بخواهیم این گرما را از امواج میکروویو تأمین کنیم، به چند فوتون نیاز داریم؟

$\lambda=۱/۵\times۱۰^{-۲}m\ ,\ h=۶/۶۲\times۱۰^{-۳۴}\ J.s$