

اهمیت آموزش مکانیک کوانتومی در متوسطه دوره دوم و بررسی بدمفهومش دانش آموزان در دوگانگی موج-ذره

سهراب آقایی^۱، محمدرضا قراغانی^۲

پذیرش: ۹۹/۷/۶

دریافت: ۹۹/۴/۲۸

چکیده

با ظهور مکانیک کوانتومی در اوایل قرن بیستم، علم فیزیک دچار دگرگونی عظیمی شد. خواص شگفت انگیزی که در پدیده‌های کوانتومی مشاهده شد، باعث شد که علم کوانتوم در صنعت و پزشکی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گیرد. به گونه‌ای که امروزه پیشرفت در بسیاری از علوم مختلف مدیون ظهور مکانیک کوانتومی است. با توجه به کاربرد علم کوانتوم در حوزه‌های مختلف، آموزش مفاهیم مکانیک کوانتومی که نسبت به مفاهیم کلاسیکی بسیار متفاوت و در برخی موارد غیرقابل پذیرش هستند، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این مقاله ابتدا به بررسی آموزش کوانتوم در کتب درسی متوسطه دوره دوم می‌پردازیم. سپس به عنوان نمونه میزان درک دانش آموزان متوسطه دوره دوم را از مفهوم دوگانگی موج-ذره با طرح چند پرسش بررسی می‌کنیم.

واژه های کلیدی: مکانیک کوانتومی، دوگانگی موج-ذره، متوسطه دوره دوم.

^۱. استادیار گروه علوم پایه، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران، نویسنده مسئول، so_aghaei@sut.ac.ir

^۲. دانشجوی کارشناسی آموزش فیزیک، گروه علوم پایه، دانشگاه فرهنگیان، تهران، ایران.

مقدمه

تا چند سال پیش غیر از محققین حوزه رشته فیزیک و شیمی، هدف بسیاری از افراد دیگر از مطالعه مکانیک کوانتومی، به دلیل تأثیر آن بر اندیشه مدرن و مطالعه بعد فلسفی مکانیک کوانتومی بود. اما اینک افرادی که با تکنولوژی روز سروکار دارند و حتی افرادی که مشغول به تجارت می‌باشند، نیازمند درک فیزیک مدرن هستند (زولمن، ۱۹۹۹). پیشرفت‌های ایجاد شده در تصویربرداری پزشکی، علوم نانو، فیزیک لیزر و نیم رساناها همگی بر پایه پدیده‌های کوانتومی است. همچنین مکانیک کوانتومی پایه و اساس فن‌آوری‌های نوین از جمله رایانه‌های کوانتومی، رمزنگاری کوانتومی و درهم تنیدگی کوانتومی است (کریتنبورگ-لوریسا، پول و همکاران، ۲۰۱۷). لذا تمام دانش‌آموزانی که قصد ادامه تحصیل در بسیاری از رشته‌های مهندسی، پزشکی و علوم پایه را دارند، لازم است تا با مفاهیم اولیه مکانیک کوانتومی آشنایی لازم را داشته باشند و مدت زمان زیادی است که مکانیک کوانتومی بخش مهمی از مباحث فیزیک دانشگاه در بسیاری از رشته‌های مهندسی و علوم پایه را تشکیل می‌دهد. در نتیجه یادگیری و یاددهی مباحث مکانیک کوانتومی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یکی از دلایلی که دانشجویان دوره کارشناسی در مطالعه مباحث کوانتوم دارای مشکل هستند، استفاده از ریاضیات پیشرفته و فرمول‌بندی‌های پیچیده‌ای است که برای درک و تحلیل مکانیک کوانتومی لازم است (جانسون، کراوفورد و فلیچر، ۱۹۹۸). حتی پیچیدگی ریاضیاتی مطالب به گونه‌ای است که در بسیاری از موارد مدرس از پرداختن به مفاهیم اساسی کوانتومی غافل شده و صرفاً به انجام محاسبات ریاضی محض می‌پردازد و فرصتی برای ارائه مفاهیم اولیه باقی نمی‌ماند. نکته دیگری که مکانیک کوانتومی را دشوار نشان می‌دهد تفاوت اساسی مفاهیم فیزیک کوانتوم با فیزیک کلاسیک است. لذا اگر بخواهیم یادگیری مفاهیم کوانتومی برای یادگیرندگان ساده‌تر گردد، همزمان با آموزش مطالب فیزیک کلاسیک در دوران قبل از دانشگاه، باید مفاهیم اولیه مکانیک کوانتومی نیز به دانش‌آموزان، آموزش داده شود.

به عنوان مثال، براساس مکانیک کوانتومی، ذرات در ابعاد کوانتومی دارای خاصیت دوگانگی موج-ذره هستند که این خاصیت از دیدگاه فیزیک کلاسیک غیر قابل پذیرش است. اگر بخواهیم دانش‌آموزان با مفهوم دوگانگی موج-ذره و به این خاصیت عجیب مکانیک کوانتومی آشنایی داشته باشند، ابتدا باید مفهوم کلاسیکی ذره و موج را به خوبی درک کنند و سپس آزمایش‌هایی که خاصیت دوگانگی را اثبات می‌کنند، معرفی شوند.

در بخش دوم ابتدا اهمیت مباحث مکانیک کوانتومی در برنامه درسی کشورهای پیشرفته جهان را مورد مطالعه قرار می‌دهیم و سپس کتب فیزیک متوسطه دوره دوم را از دیدگاه مباحث فیزیک کلاسیک و فیزیک مدرن بررسی می‌کنیم. در بخش سوم به عنوان نمونه دوگانگی موج-ذره را بحث می‌کنیم و با طرح چند سؤال میزان درک دانش‌آموزان سال یازدهم و دوازدهم تجربی را از خاصیت دوگانگی موج-ذره به چالش می‌کشیم.

بررسی کتب فیزیک متوسطه دوره دوم

از آنجایی که علوم نوین ارتباط تنگاتنگی با مکانیک کوانتومی دارند، برای پیشرفت در بسیاری از حوزه‌ها به ناچار باید با مفاهیم کوانتومی آشنا باشیم. لذا درک مفاهیم مکانیک کوانتومی باید از سنین پایین و قبل از ورود به دانشگاه شروع شود و به همین دلیل است که آموزش مکانیک کوانتومی بخشی از برنامه درسی متوسطه دوره دوم بسیاری از کشورهای پیشرفته از جمله انگلستان، آلمان، ایتالیا، آمریکا، هلند، فرانسه و نروژ قرار گرفته است. به عنوان مثال در کشور آلمان مولر^۱ و ویسنر^۲ یک دوره

^۱ Rainer Muller

^۲ Hartmut Wiesner

مبنتی بر تحقیق بر روی مکانیک کوانتومی ارائه کرده‌اند که در آن مفاهیم کوانتومی در سطح مقدماتی برای دانش‌آموزان آموزش داده می‌شود. در این طرح دانش‌آموزان با استفاده از آزمایشگاه‌های مجازی از همان ابتدا پی می‌برند که چگونه پدیده‌های کوانتومی از تجارب کلاسیکی روزانه ما متفاوت هستند (مولر و ویسز ۲۰۰۱). همچنین روشی برای نمادگذاری دیراک در کوانتوم بدون نیاز به ریاضیات یا پیشینه فیزیکی پیشرفته و توصیف قطبش خطی فوتونها در اندرکنش با کریستال‌های پلاریزه توسط میچلینی^۱ و همکارانش در ایتالیا برای دانش‌آموزان متوسطه دوره دوم ارائه شده است (میچلینی و همکارانش، ۲۰۰۰). نمونه‌های متعدد دیگری در کشورهای مختلف وجود دارد که جهت ارائه مفاهیم کوانتوم برای دانش‌آموزان روشهای متنوعی را ارائه کرده‌اند. در کشور ما متأسفانه تنها منبعی که توسط دانش‌آموزان و معلمان استفاده می‌گردد کتب درسی است.

شاید بتوان تاریخ علم فیزیک را به بازه‌هایی تقسیم کرد. بازه‌هایی که نگاه علمی و جهان بینی علمی در آن متفاوت از هم هستند. البته این نوع دسته‌بندی‌ها می‌تواند بسیار متفاوت و متنوع باشد. هر کس با هر نوع دیدگاه بدون شک یکی از دسته بندی‌هایی که در تاریخ علم فیزیک لحاظ می‌کند دسته بندی مرسوم به دوگانه فیزیک کلاسیک (نیوتونی) و فیزیک مدرن است. در این بخش کتاب‌های درسی فیزیک سه پایه را از این نظر که محتوای آنها چه قدر متعلق به فیزیک کلاسیک و چه قدر متعلق به فیزیک نوین است بررسی می‌کنیم.

فصول فیزیک دهم: فیزیک و اندازه‌گیری، ویژگی‌های فیزیکی مواد، کار و انرژی و توان، دما و گرما، ترمودینامیک است که با بررسی تمام محتوای فصل‌ها صد در صد مطالب متعلق به فیزیک کلاسیک است.

فصول فیزیک یازدهم: الکتریسته ساکن، جریان الکتریکی و مدار جریان مستقیم، مغناطیس، القای الکترومغناطیس و جریان متناوب که تمام فصول باز متعلق به فیزیک کلاسیک است

فصول فیزیک دوازدهم: حرکت بر خط راست، دینامیک و حرکت دایره‌ای، نوسان و موج، برهمکنش‌های موج، آشنایی با فیزیک اتمی، آشنایی با فیزیک هسته‌ای،

فصل‌های نام برده بر اساس محتوای کتاب درسی رشته ریاضی و فیزیک است که بیشتر از محتوای کتاب‌های درسی فیزیک رشته علوم تجربی است. از آنجایی که امروزه در بسیاری از رشته‌های مهندسی و دانشگاهی که با فیزیک سر و کار دارند ما به مباحث فیزیک مدرن نیازمندیم در حالی که توجه به فیزیک مدرن در کتاب‌های درسی فیزیک دبیرستان بسیار کم است به گونه‌ای که تنها سه فصل از سه کتاب دهم و یازدهم و دوازدهم به فیزیک نوین در رشته ریاضی و تقریباً دو فصل در رشته تجربی به مباحث فیزیک نوین مرتبط است.

یکی از مهم‌ترین و پر بحث‌ترین مباحث در فیزیک نوین بحث نور و ماهیت نور بوده که سهم بسیار عظیمی در تحول فیزیک کلاسیک به فیزیک نوین را بر عهده داشته است. اگر بخواهیم به فصول و بخش‌هایی از کتاب‌های دهم و یازدهم و دوازدهم که درباره نور و ماهیت نور سخن گفته‌اند صرفاً به دو فصل از کتاب فیزیک رشته تجربی و سه فصل از کتاب رشته ریاضی بر می‌خوریم که محتوای مرتبط به ماهیت نور را در خود جای داده‌اند.

دوگانگی موج-ذره

برای نخستین بار نیوتن در سال ۱۶۶۶ با مشاهده طیف رنگ‌های مختلف ایجاد شده از تجزیه نور فرضیه ذره‌ای بودن نور را مطرح کرد و پدیده‌های فیزیکی مانند سایه، تابش، بازتابش و شکست نور را با این فرض توجیه نمود. اما دانشمند سرشناس هلندی

^۱ Marisa Michelini

به نام هویگنس^۱ که هم عصر با نیوتن بود، اعتقادی به ذره‌ای بودن نور نداشت و برای توجیه پدیده‌هایی مثل تداخل، نور را موج در نظر گرفت. پس از کشف تابش فرسرخ توسط هرشل^۲ و تابش فرابنفش توسط ریتر^۳، دانشمندان احتمال دادند که نور می‌تواند دارای طیف گسترده‌ای باشد. در سال ۱۸۰۱ یانگ با انجام آزمایش دو شکافی، به صورت تجربی موجی بودن نور را اثبات کرد و در سال ۱۸۱۴ فرنل^۴ پراش نور از یک روزنه کوچک را در تأیید نتیجه آزمایش یانگ، با استفاده از روابط ریاضی فرمول‌بندی کرد. نظریه کلاسیک امواج الکترومغناطیسی توسط ماکسول بر پایه چهار معادله که به معادلات ماکسول مشهور هستند، بنا نهاده شد که الکتریسته، مغناطیس و نور را برای اولین بار در کنار هم به عنوان جلوه‌هایی از یک پدیده گردآوری کرد. این نظریه نور را به صورت موج الکترومغناطیسی در نظر گرفت که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی عمود بر هستند که دامنه آنها به صورت هم‌فاز نوسان می‌کنند (جوادی، ۱۳۹۷).

نظریه موجی بودن نور و اینکه نور مرئی بخشی از طیف امواج الکترومغناطیسی است تا اوایل قرن بیستم کاملاً پذیرفته شده بود و دانشمندان به دنبال توجیه تمام پدیده‌های فیزیکی بر اساس معادلات ماکسول برای امواج الکترومغناطیسی و معادلات نیوتن برای ذرات بودند. تابش جسم سیاه و فوتوالکتریک از جمله پدیده‌هایی بودند که توسط این نظریه‌های که اینک به فیزیک کلاسیک مشهور هستند، قابل توجیه نبودند. پلانک انرژی منتقل شده در داخل کاواک جسم سیاه را به صورت بسته‌هایی به نام کوانتوم‌های انرژی در نظر گرفت که دارای مقدار ثابتی هستند و فقط به طول موج نور بستگی دارند. وی با این فرض به تمام ابهامات موجود در تابش جسم سیاه پاسخ داد و با این کار مسیر جدیدی به نام فیزیک کوانتوم را در علم فیزیک ایجاد کرد. سپس انیشتین در سال ۱۹۰۵ ابهامات مربوط به پدیده فوتوالکتریک را برطرف کرد. انیشتین اثبات کرد که نور ذره است و هر یک از ذرات را فوتون نامگذاری کرد. همانگونه که می‌دانیم یکی از مشخصه‌های ذرات داشتن تکانه است، لذا اگر نور را به صورت ذره در نظر بگیریم باید برای هر یک از فوتون‌ها، بتوانیم تکانه مشخصی تعریف کرده و قوانین پایستگی تکانه نیز برای آن برقرار باشد. کامپتون با طرح آزمایشی پایستگی تکانه برای هر یک از فوتون‌ها را به طور تجربی اثبات کرد و نشان داد که نور به صورت جریانی از ذرات است.

اینک دو آزمایش معتبر با دو نتیجه متفاوت حاصل شده است. یکی از آزمایشها (آزمایش یانگ) با قطعیت کامل نشان می‌دهد که نور موج است و آزمایش کامپتون و توجیه انیشتین برای پدیده فوتوالکتریک صراحتاً نشان می‌دهند که نور ذره است. پس نتیجه‌ای که باید گرفت این است که نور هم موج است و هم ذره.

پس از اثبات دوگانگی موج-ذره برای نور، این سؤال مطرح شد که آیا ذراتی مانند الکترون که تا کنون ذره در نظر گرفته می‌شدند نیز می‌توانند خاصیت دوگانگی داشته باشند؟ در نتیجه دوبروی فرض کرد که برای هر ذره‌ای که دارای تکانه باشد، می‌توان طول موجی در نظر گرفت. برای اثبات فرضیه دوبروی، دیویسون و گرمر پرتوی از الکترون را به سمت یک بلور شلیک کردند و با مطالعه الکترون‌های بازتاب شده از لایه‌های مختلف بلور، به نتیجه‌ای مشابه نتیجه آزمایش دو شکافی یانگ رسیدند و مشاهده کردند که الکترون‌ها خاصیت موجی از خود نشان داده و طول موج آنها با تقریب بسیار بالایی برابر طول موج دوبروی است. پس علاوه بر اینکه نور می‌تواند خاصیت دوگانگی موج-ذره داشته باشد، الکترون و در حالت کلی تمام ذرات در ابعاد کوانتومی نیز می‌توانند خاصیت دوگانگی از خود نشان دهند.

^۱ Christiaan Huygens

^۲ Frederick William Herschel

^۳ Johann Wilhelm Ritter

^۴ Augustin-Jean Fresnel

خاصیت دوگانگی موج-ذره یکی از عجیب‌ترین خواصی است که علم فیزیک نوین با آن روبروست. زیرا خاصیت موجی و خاصیت ذره‌ای کاملاً متفاوت از یکدیگر هستند. وقتی چیزی خاصیت ذره‌ای دارد، یعنی دارای مشخصه‌هایی چون جرم، مکان و تکانه است. ذره در یک زمان مشخص، در یک نقطه مشخصی از فضا قرار می‌گیرد و دارای تکانه مخصوصی است که مقدار انرژی جنبشی آن را تعیین می‌کند. برای انتقال انرژی از یک نقطه به نقطه دیگر، ذره مکان خود را تغییر داده و انرژی را حمل می‌کند. ولی موج دارای مشخصه‌هایی مانند طول موج است و در فضا پخش می‌شود. موج مکان مشخصی ندارد و به کمک ذرات تشکیل دهنده محیط انتشار یا نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در محیط، انرژی را از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل می‌کند.

با توجه به فیزیک کلاسیک، اگر مفهوم ذره و موج را به درستی درک کرده باشیم، پذیرفتن دوگانگی موج-ذره ساده نخواهد بود. همانگونه که نیلز بور بیان می‌کند: «هر کسی که از نظریه کوانتوم شو که نشود، یعنی آن را نفهمیده است». در نتیجه قاعدتاً یکی از مباحث چالشی در تدریس فیزیک، مطرح کردن دوگانگی موج-ذره برای دانش‌آموزان و دانشجویان خواهد بود. در ادامه با مطرح کردن چند پرسش از دانش‌آموزان متوسطه دوره دوم، می‌خواهیم میزان درک آنها از مفاهیم اولیه ذره، موج و همچنین دوگانگی موج و ذره را بررسی کنیم. برای این منظور سؤالات زیر از ۸۱ نفر از دانش‌آموزان سال یازدهم و دوازدهم تجربی و ریاضی پرسیده می‌شود که سؤالات پرسیده شده عبارتند از:

۱- موج چیست؟

الف) به مجموعه ذرات موج می‌گوییم.

ب) آشفتگی در فضا را موج می‌گوییم.

ج) ماهیتی از ماده که پدیده تداخل و پراش برای آن اتفاق می‌افتد.

د) موج همان انرژی است.

۲- ذره چیست؟

الف) ماهیتی از ماده که مکان آن قابل شناسایی است.

ب) در مدل‌سازی تمامی اجسام را ذره در نظر می‌گیریم.

ج) کوچکترین قسمت هر ماده

د) همه موارد

۳- الکترون موج است یا ذره؟

الف) موج (ب) ذره (۳) هم موج و هم ذره (۴) هیچ کدام

۴- نور موج است یا ذره؟

الف) موج (ب) ذره (۳) هم موج و هم ذره (۴) هیچ کدام

۵- تفاوت موج و ذره کدام یک از گزینه‌های زیر است؟

الف) موج می‌تواند از اجسام عبور کند اما ذره نه (ب) ذرات مواد سازنده امواج هستند.

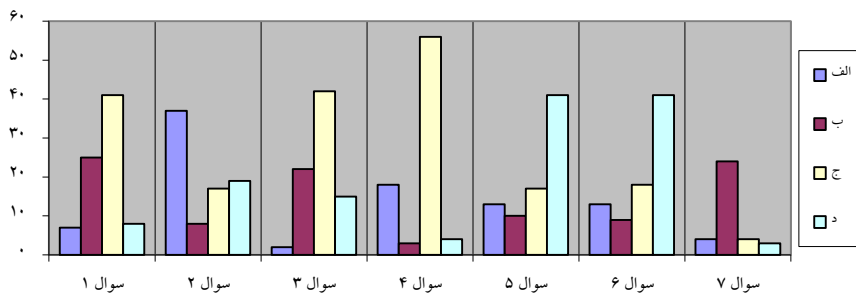
ج) موج انرژی را منتقل می‌کند اما ذره نه (د) ذره دارای مکان مشخص هست

ولی موج نه

۶- آزمایش فوتوالکتریک چه چیزی را اثبات می‌کند؟

- الف) تابش نور به صفحه فلزی باعث خروج الکترون از صفحه می‌شود. (ب) در اجسام الکترون وجود دارد.
 ج) نور خاصیت موجی دارد. (د) نور خاصیت ذره‌ای دارد.
 ۷- آزمایش یانگ چه چیزی را مشخص می‌کند؟
 الف) نور خاصیت ذره‌ای دارد. (ب) نور خاصیت موجی دارد.
 ج) نور هم خاصیت موجی و هم خاصیت ذره‌ای دارد. (د) نور می‌تواند پخش شود.

لازم به ذکر است که برای پیشگیری از پراکندگی پاسخ‌های ارائه شده، سوالات به صورت چند گزینه‌ای طرح شد تا بررسی آنها ساده‌تر گردد. همچنین سوالات در فرم آنلاین گوگل داک طراحی و از طریق گروه‌های دانش‌آموزی در پیام رسان واتساپ در اختیار دانش‌آموزان قرار گرفت. پاسخ‌های دریافت شده از دانش‌آموزان مطابق نمودار ۱ است.



نمودار ۱: پاسخ‌های دریافت شده از ۸۱ نفر از دانش‌آموزان سال یازدهم و دوازدهم متوسطه دوره دوم

هدف از سؤال ۱ و ۲، ارائه تعریف اولیه و مفهومی برای ذره و موج و بررسی تفاوت این دو ماهیت است. پاسخ صحیح مدنظر ما برای سؤال ۱ گزینه «ج» و برای سؤال ۲ گزینه «الف» بود که کمتر از نیمی از دانش‌آموزان به این سؤالات پاسخ صحیح داده‌اند. در سؤال ۳ و ۴ ماهیت الکترون و نور نسبت به اینکه موج هستند یا ذره سؤال شده است که در اینجا نیز تعداد دانش‌آموزانی که خاصیت دوگانگی را برای نور قائل هستند بیشتر از کسانی است که این خاصیت را برای الکترون قائل باشند. همانگونه که می‌دانیم موج و ذره دو خاصیت کاملاً متمایز هستند و در نظر گرفتن خاصیت دوگانگی برای الکترون یا نور باید یکی از سؤالات بحث برانگیز می‌بود که مشاهده می‌کنیم اینگونه نبوده و با اینکه نیمی از دانش‌آموزان اعتقاد به دوگانگی داشته‌اند ولی در مورد علت این دوگانگی و عجیب بودن این خاصیت هیچ نظری ارائه نشد و به نوعی این دوگانگی را به سادگی پذیرفته‌اند. نتیجه این بررسی را می‌توان اثباتی بر جمله نیلز بور در نظر گرفت که دانش‌آموزان به دلیل عدم درک درست از مفاهیم اولیه موج و ذره، خاصیت دوگانگی را به راحتی برای الکترون و نور می‌پذیرند. برای بررسی این موضوع، سؤال ۵ را مطرح کردیم که در این سؤال نیز پاسخ مد نظر ما گزینه ۴ بود تا تفاوت موج و ذره و عجیب بودن دوگانگی را نشان دهیم. با توجه به پاسخ‌های ارائه شده مشاهده می‌شود که بیش از نیمی از دانش‌آموزان به تفاوت اصلی موج و ذره پی نبرده‌اند. یکی از مهمترین آزمایش‌هایی که به طور تجربی ذره‌ای بودن نور را اثبات می‌کند، آزمایش فوتوالکتریک هست که برای این سؤال نیز ۴۱ نفر پاسخ صحیح داده‌اند. آزمایش یانگ موجی بودن نور را نشان می‌دهد که به دلیل حذف این مبحث از کتاب درسی، مشارکت کمتری در این سؤال داشته و اکثریت پاسخ دهندگان گزینه صحیح را انتخاب کرده‌اند.

نتیجه گیری

مکانیک کوانتومی برای همیشه دیدگاه فیزیکدانان نسبت به جهان را تغییر داده است. در آغاز قرن بیستم، با ظهور نسبیت و مکانیک کوانتومی، یک چارچوب کاملاً جدید برای فیزیک ایجاد شد. نسبیت دیدگاه ما را در مورد فضا و زمان تغییر داد و مکانیک کوانتومی نامشخص بودن، احتمالات و غیرقطعی بودن را در فیزیک ایجاد کرد. با پیشرفت تکنولوژی پدیده‌های کوانتومی در صنعت و پزشکی مورد استفاده قرار گرفت و دنیای کنونی نسبت به دنیای قبل از ظهور کوانتوم به طور کامل تغییر داد. اکنون برای مشارکت در پیشرفت، درک مفاهیم کوانتومی یکی از ملزوماتی است که باید مورد توجه قرار گیرد. مطالعه مکانیک کوانتومی در دوره متوسطه در کشورهای پیشرفته مورد بررسی قرار گرفت و سپس با بررسی برنامه درسی کشورمان مشاهده کردیم که فیزیک نوین و مخصوصاً مکانیک کوانتومی به شدت مغفول واقع شده است.

یکی از پدیده‌های کوانتومی که باعث تعجب بسیاری از دانشمندان شده است پدیده دوگانگی موج-ذره برای ذرات در ابعاد کوانتومی است. با طرح چند پرسش، اطلاعات دانش‌آموزان سال یازدهم و دوازدهم در این زمینه مورد سنجش قرار گرفت و مشاهده شد که علاوه بر مفاهیم کوانتومی، در تعاریف کلاسیکی موج و ذره در بیش از نیمی از شرکت کنندگان بدمفهوم عمیقی وجود دارد. همچنین مشاهده شد که پدیده دوگانگی برای الکترون و فوتون توسط تعدادی از دانش‌آموزان به سادگی و بدون هیچ ابهامی مورد پذیرش قرار گرفته است که این نیز دلیل بر عدم درک صحیح این خاصیت کوانتومی ذرات است. با توجه به بررسی که در متن کتب فیزیک متوسطه دوره دوم انجام گرفته بود، نتایج بدست آمده کاملاً قابل پیش‌بینی بود. لازم به ذکر است که عدم درک مفاهیم کوانتومی نه تنها در بین دانش‌آموزان، در بین اکثر دانشجویان فیزیک و حتی بخش اعظمی از معلمان فیزیک مشهود است.

اگر بخواهیم مفهوم دوگانگی موج-ذره در ابعاد کوانتومی را برای دانش‌آموزان یا دانشجویان بیان کنیم ابتدا باید به صورت دقیق تفاوت و تشابه این دو تعریف در حد کلاسیک را مشخص نماییم. وقتی از ماهیت موجی چیزی صحبت می‌شود یعنی آن شیء در کل فضا منتشر می‌شود و محل خاصی را برای آن نمی‌توان متصور شد و به بیان ریاضی خطای اندازه‌گیری مکان آن بی‌نهایت است. در حالی که ذره در یک نقطه مشخصی از فضا جایگزیده شده است و با قطعیت کامل می‌توان مکان آن را مشخص نمود. ذره و موج هر دو انرژی را از یک نقطه به نقطه دیگر منتقل می‌کنند. ذره با جابجایی از یک نقطه مشخص به یک نقطه مشخص دیگر، انرژی را منتقل می‌کند در حالی برای امواج اینگونه نیست. در امواج مکانیکی انرژی منتقل می‌شود و ذرات صرفاً با دست به دست کردن انرژی به انتقال آن کمک می‌کنند و ذرات تشکیل دهنده محیط در ابعاد ماکروسکوپی جابجا نمی‌شوند. در امواج الکترومغناطیسی نیز نوسان میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هست که باعث انتقال انرژی می‌شود. برای درک مفهوم انتقال انرژی توسط موج و ذره انجام آزمایشی ساده زیر در کلاس درس پیشنهاد می‌گردد

دو تن از دانش‌آموزان را انتخاب می‌کنیم و در دو گوشه کلاس می‌ایستند. هر یک از دانش‌آموزان دو طرف نخ را به طرف خود می‌کشند. یکی از دانش‌آموزان تپی در طول نخ ایجاد کرده و به سمت دانش‌آموز بعدی گسیل می‌کند. وقتی این تپ به دانش‌آموز می‌رسد، به دست دانش‌آموز انرژی وارد کرده و دانش‌آموز به وضوح انرژی‌ای که توسط موج به دستش منتقل می‌شود را احساس می‌کند. حال دانش‌آموز دوم سنگ‌ریزه‌ای که در دست دارد را به طرف دانش‌آموز اول پرتاب می‌کند. با برخورد سنگ‌ریزه، دانش‌آموز اول نیز به صورت کاملاً عینی دریافت انرژی ارسال شده از دانش‌آموز دوم را احساس می‌کند. در حالت اول موج و در حالت دوم ذره، کاری مشابه ولی با ماهیتی کاملاً متفاوت انجام دادند. همچنین استفاده از نرم افزارهای شبیه‌ساز پدیده‌های کوانتومی یکی از روش‌های مؤثر دیگری است که دانش‌آموزان را با مفاهیم اولیه و کلیدی کوانتوم آشنا

می‌سازد. از جمله این نرم‌افزارها می‌توان به نرم‌افزار PhET اشاره کرد که با شبیه‌سازی بسیاری از مفاهیم اصلی کمک شایانی در درک این مفاهیم می‌کند.

منابع

۱. Zollmann D Eds, ۱۹۹۹, Research on Teaching and Learning Quantum Mechanics, papers presented at Annual meetings NARST, published at www.phys.ksu.edu/perg/papers/narst/.
۲. K. Krijtenburg-Lewerissa, H. J. Pol, A. Brinkman, W. R. van Joolingen, Insights into teaching quantum mechanics in secondary and lower undergraduate education, *Physical Review Physics Education Research*, ۳, ۰۱۰۱۰۹ (۲۰۱۷)
۳. I. D. Johnston, K. Crawford, and P. R. Fletcher, Student difficulties in learning quantum mechanics, *Int. J. Sci. Educ.* ۲۰, ۴۲۷ (۱۹۹۸).
۴. R. Müller and H. Wiesner, Teaching quantum mechanics on an introductory level, *Am. J. Phys.* ۷۰, ۲۰۰ (۲۰۰۲).
۵. M. Michelini, R. Ragazzon, L. Santi, and A. Stefanel, Proposal for quantum physics in secondary school, *Phys. Educ.* ۳۵, ۴۰۶ (۲۰۰۰).
۶. <https://phet.colorado.edu/>