



فیزیک پایه ۳

(رشته فیزیک)

دکتر سیدعلی هاشمی زاده عقداء

حسین گلنارکار

علیرضا گوشه

بسم الله الرحمن الرحيم

پیشگفتار ناشر

کتاب‌های دانشگاه پیام نور حسب مورد و با توجه به شرایط مختلف یک درس در یک یا چند رشته دانشگاهی، به صورت کتاب درسی، متن آزمایشگاهی، فرادرسی، و کمک‌درسی چاپ می‌شوند.

کتاب درسی ثمره کوشش‌های علمی صاحب اثر است که براساس نیازهای درسی دانشجویان و سرفصل‌های مصوب تهیه و پس از داوری علمی، طراحی آموزشی، و ویرایش علمی در گروه‌های علمی و آموزشی، به چاپ می‌رسد. پس از چاپ ویرایش اول اثر، با نظرخواهی‌ها و داوری علمی مجدد و با دریافت نظرهای اصلاحی و متناسب با پیشرفت علوم و فناوری، صاحب اثر در کتاب تجدیدنظر می‌کند و ویرایش جدید کتاب با اعمال ویرایش زبانی و صوری جدید چاپ می‌شود.

متن آزمایشگاهی (م) راهنمایی است که دانشجویان با استفاده از آن و کمک استاد، کارهای عملی و آزمایشگاهی را انجام می‌دهند.

کتاب‌های فرادرسی (ف) و **کمک‌درسی** (ک) به منظور غنی‌تر کردن منابع درسی دانشگاهی تهیه و بر روی لوح فشرده تکثیر می‌شوند و یا در وبگاه دانشگاه قرار می‌گیرند.

مدیریت تولید محتوا و تجهیزات آموزشی

فهرست

۱	فصل ۱۴ - نوسانات و امواج
۱	آنچه فرا خواهیم گرفت
۲	۱-۱۴ حرکت هماهنگ ساده
۶	۱-۱-۱۴ شرایط اولیه
۸	۱-۱۴-۲ مکان، سرعت و شتاب
۱۰	۱-۱۴-۳ دوره تناوب و بسامد
۱۸	۱-۱۴-۴ ارتباط حرکت هماهنگ ساده با حرکت دایره‌ای
۱۹	۱-۱۴-۲ حرکت آونگی
۲۱	۱-۱۴-۲ دوره تناوب و بسامد یک آونگ
۲۴	۱-۱۴-۳ کار و انرژی در نوسان‌های هماهنگ
۲۴	۱-۱۴-۳ جرم متصل به فنر
۲۴	۱-۱۴-۳ انرژی یک آونگ
۲۷	۱-۱۴-۴ حرکت هماهنگ میرا
۳۱	۱-۱۴-۴ میرایی کوچک
۳۶	۱-۱۴-۴ میرایی بزرگ
۳۸	۱-۱۴-۴ میرایی بحرانی
۴۱	۱-۱۴-۴ اتلاف انرژی در نوسانات میرا
۴۵	۱-۱۴-۵ حرکت هماهنگ واداشته و تشدید
۵۱	۱-۱۴-۶ فضای فاز
۵۳	۱-۱۴-۷ آشوب
۵۷	تمرین حل مسئله
۶۴	سؤالات چند گزینه‌ای
۶۷	پرسش‌ها
۷۰	مسائل

۸۵	فصل ۱۵ - امواج
۸۵	آنچه فرا خواهیم گرفت
۸۷	۱-۱۵ حرکت موج
۸۹	۲-۱۵ نوسانات جفت شده
۹۱	۱-۲-۱۵ امواج عرضی و طولی
۹۲	۳-۱۵ توصیف ریاضی امواج
۹۳	۱-۳-۱۵ دوره تناوب، طول موج و سرعت
۹۵	۲-۳-۱۵ شکل موج سینوسی، عدد موج و فاز
۹۷	۴-۱۵ به دست آوردن معادله موج
۹۹	۱-۴-۱۵ جواب‌های معادله موج
۱۰۱	۲-۴-۱۵ امواج روی یک تار
۱۰۳	۳-۴-۱۵ بازتاب امواج
۱۰۵	۵-۱۵ امواج در فضای دو و سه بعدی
۱۰۵	۱-۵-۱۵ امواج کروی
۱۰۷	۲-۵-۱۵ امواج تخت
۱۰۸	۳-۵-۱۵ امواج سطحی
۱۱۰	۴-۵-۱۵ امواج لرزه‌ای
۱۱۲	۶-۱۵ انرژی، توان و شدت موج
۱۱۳	۱-۶-۱۵ انرژی یک موج
۱۱۴	۲-۶-۱۵ توان و شدت یک موج
۱۱۹	۷-۱۵ اصل برهم نهی و تداخل
۱۲۱	۱-۷-۱۵ تداخل امواج
۱۲۳	۸-۱۵ امواج ایستاده و تشدید
۱۲۵	۱-۸-۱۵ امواج ایستاده روی یک تار
۱۳۲	۹-۱۵ تحقیق پیرامون امواج
۱۳۸	تمرین حل مسئله
۱۴۳	سؤالات چند گزینه‌ای
۱۴۵	پرسش‌ها
۱۴۶	مسائل

۱۵۷	فصل ۱۶ - صوت
۱۵۷	آنچه فرا خواهیم گرفت
۱۵۸	۱-۱۶ امواج فشاری طولی
۱۶۰	۱-۱-۱۶ سرعت صوت
۱۶۶	۲-۱-۱۶ بازتاب صوت
۱۶۸	۲-۱۶ شدت صوت
۱۶۹	۱-۲-۱۶ شدت نسبی و گستره دینامیکی
۱۷۳	۲-۲-۱۶ حدود شنوایی انسان

۱۷۶	۱۶-۳ تداخل صوت
۱۷۸	۱۶-۳-۱ ضربان
۱۸۰	۱۶-۳-۲ حذف فعال نوفه
۱۸۱	۱۶-۴ اثر دوپلر
۱۸۶	۱۶-۴-۱ اثر دوپلر در فضای دو و سه بعدی
۱۹۰	۱۶-۴-۲ کاربردهای اثر دوپلر
۱۹۲	۱۶-۴-۳ مخروط مآخ
۱۹۷	۱۶-۵ تشدید و موسیقی
۱۹۷	۱۶-۵-۱ آهنگ‌ها
۱۹۹	۱۶-۵-۲ لوله‌های نیمه باز و باز
۲۰۷	تمرین حل مسئله
۲۱۳	سؤالات چند گزینه‌ای
۲۱۶	پرسش‌ها
۲۱۸	مسائل

۲۳۱	فصل ۱۷ - دما
۲۳۱	آنچه فرا خواهیم گرفت
۲۳۳	۱۷-۱ تعریف دما
۲۳۴	۱۷-۱-۱ مقیاس‌های دمایی
۲۳۷	۱۷-۲ گستره‌های دمایی
۲۴۱	۱۷-۲-۱ تحقیق در مرز دمای پایین
۲۴۴	۱۷-۲-۲ تحقیق در مرز دمای بالا
۲۴۵	۱۷-۳ اندازه‌گیری دما
۲۴۶	۱۷-۴ انبساط گرمایی
۲۴۷	۱۷-۴-۱ انبساط خطی
۲۵۴	۱۷-۴-۲ انبساط سطحی
۲۵۹	۱۷-۴-۳ انبساط حجمی
۲۶۲	۱۷-۵ دمای سطح زمین
۲۶۷	۱۷-۶ دمای جهان
۲۷۰	تمرین حل مسئله
۲۷۳	سؤالات چند گزینه‌ای
۲۷۵	پرسش‌ها
۲۷۷	مسائل

۲۸۹	فصل ۱۸ - گرما و قانون اول ترمودینامیک
۲۸۹	آنچه فرا خواهیم گرفت
۲۹۱	۱۸-۱ تعریف گرما
۲۹۳	۱۸-۲ معادل مکانیکی گرما

۲۹۵	۳-۱۸ گرما و کار
۳۰۱	۴-۱۸ قانون اول ترمودینامیک
۳۰۴	۵-۱۸ قانون اول برای فرایندهای خاص
۳۰۵	۱-۵-۱۸ فرایندهای بی دررو
۳۰۵	۲-۵-۱۸ فرایندهای حجم ثابت
۳۰۶	۳-۵-۱۸ فرایندهای مسیر بسته
۳۰۶	۴-۵-۱۸ انبساط آزاد
۳۰۷	۵-۵-۱۸ فرایندهای فشار ثابت
۳۰۸	۶-۵-۱۸ فرایندهای ثابت دما
۳۰۸	۶-۱۸ گرمای ویژه جامدات و سیالات
۳۱۱	۱-۶-۱۸ کالری سنجی
۳۱۴	۷-۱۸ گرمای نهان و گذارهای فاز
۳۲۱	۸-۱۸ روش‌های انتقال انرژی گرمایی
۳۲۲	۱-۸-۱۸ رسانش
۳۲۹	۲-۸-۱۸ همرفت
۳۳۴	۳-۸-۱۸ تابش
۳۳۸	۹-۱۸ گرم شدن جهان
۳۴۱	۱۰-۱۸ گرما در رایانه ها
۳۴۴	تمرین حل مسئله
۳۴۸	سؤالات چندگزینه‌ای
۳۵۰	پرسش‌ها
۳۵۲	مسائل

۳۶۵	فصل ۱۹ - گازهای کامل
۳۶۵	آنچه فرا خواهیم گرفت
۳۶۷	۱-۱۹ قوانین تجربی گازها
۳۶۸	۱-۱-۱۹ قانون بویل
۳۶۹	۲-۱-۱۹ قانون چارلز
۳۷۰	۳-۱-۱۹ قانون گای-لوساک
۳۷۱	۴-۱-۱۹ قانون آووگادرو
۳۷۲	۲-۱۹ قانون گاز کامل
۳۸۲	۱-۲-۱۹ کار انجام شده توسط یک گاز کامل در دمای ثابت
۳۸۳	۲-۲-۱۹ قانون دالتون
۳۸۵	۳-۱۹ قضیه همپاری
۳۹۲	۴-۱۹ گرمای ویژه یک گاز کامل
۳۹۲	۱-۴-۱۹ گرمای ویژه در حجم ثابت
۳۹۴	۲-۴-۱۹ گرمای ویژه در فشار ثابت
۳۹۵	۳-۴-۱۹ درجات آزادی

۳۹۹	۱۹-۴-۴ نسبت گرماهای ویژه
۴۰۰	۱۹-۵ فرایندهای بی دررو برای یک گاز کامل
۴۰۷	۱۹-۵-۱ کار انجام شده توسط یک گاز کامل در یک فرایند بی دررو
۴۰۸	۱۹-۶ نظریه جنبشی گازها
۴۰۸	۱۹-۶-۱ توزیع تندی ماکسول
۴۱۳	۱۹-۶-۲ توزیع انرژی جنبشی ماکسول
۴۱۷	۱۹-۶-۳ مسیر آزاد میانگین
۴۲۴	تمرین حل مسئله
۴۲۹	سؤالات چند گزینه‌ای
۴۳۱	پرسش‌ها
۴۳۴	مسائل

۴۴۵	فصل ۲۰ - قانون دوم ترمودینامیک
۴۴۵	آنچه فرا خواهیم گرفت
۴۴۷	۲۰-۱ فرایندهای برگشت پذیر و برگشت ناپذیر
۴۵۰	۲۰-۱-۱ زمان بازگشت پوانکاره
۴۵۱	۲۰-۲ ماشین‌ها و یخچال‌ها
۴۵۵	۲۰-۳ ماشین‌های آرمانی
۴۵۶	۲۰-۳-۱ چرخه کارنو
۴۶۴	۲۰-۴ ماشین‌های واقعی و بازده آنها
۴۶۴	۲۰-۴-۱ چرخه اتو
۴۷۳	۲۰-۴-۲ چرخه دیزل
۴۷۵	۲۰-۴-۳ خودروهای هیبریدی
۴۷۶	۲۰-۴-۴ بازده و بحران انرژی
۴۷۸	۲۰-۵ قانون دوم ترمودینامیک
۴۸۳	۲۰-۶ آنتروپی
۴۸۹	۲۰-۷ تفسیر میکروسکوپی آنتروپی
۴۹۴	۲۰-۷-۱ مرگ آنتروپی
۴۹۸	تمرین حل مسئله
۵۰۶	سؤالات چند گزینه‌ای
۵۰۸	پرسش‌ها
۵۱۰	مسائل

۵۲۱	فصل ۳۲ - نورشناخت هندسی
۵۲۱	آنچه فرا خواهیم گرفت
۵۲۳	۳۲-۱ پرتوهای نور و سایه‌ها
۵۲۸	۳۲-۲ بازتاب و آینه‌های تخت
۵۳۱	۳۲-۲-۱ تصویر تشکیل شده توسط یک آینه تخت

۵۳۸	۳-۳۲ آینه‌های خمیده
۵۳۸	۱-۳-۳۲ آینه‌های کروی همگرا
۵۴۵	۲-۳-۳۲ آینه‌های کروی واگرا
۵۵۱	۳-۳-۳۲ ابیراهی کروی
۵۵۴	۴-۳-۳۲ آینه‌های سهموی
۵۵۶	۵-۳-۳۲ سهمی‌های چرخشی
۵۵۸	۴-۳۲ شکست و قانون اسنل
۵۶۳	۱-۴-۳۲ اصل فرما
۵۷۰	۲-۴-۳۲ بازتاب داخلی کلی
۵۷۲	۳-۴-۳۲ تارهای نوری
۵۷۷	۴-۴-۳۲ سراب‌ها
۵۷۸	۵-۴-۳۲ پاشندگی رنگی
۵۸۲	۶-۴-۳۲ قطبش بوسیله بازتاب
۵۸۶	تمرین حل مسئله
۵۸۶	سؤالات چند گزینه‌ای
۵۸۷	سؤالات
۵۹۲	مسائل

۶۰۱	فصل ۳۳ - عدسی‌ها و وسایل اپتیکی
۶۰۱	آنچه فراخواهیم گرفت
۶۰۳	۱-۳۳ عدسی‌ها
۶۰۹	۱-۱-۳۳ عدسی‌های همگرا
۶۱۳	۱-۱-۳۳ عدسی‌های واگرا
۶۱۹	۲-۳۳ ذره‌بین
۶۲۲	۳-۳۳ سیستم‌های متشکل از دو یا چند عنصر اپتیکی
۶۳۰	۴-۳۳ چشم انسان
۶۳۳	۱-۴-۳۳ عدسی‌های (لنزهای) تماسی
۶۳۵	۲-۴-۳۳ جراحی لیزیک (LASIK)
۶۳۷	۵-۳۳ دوربین
۶۴۵	۶-۳۳ میکروسکوپ
۶۴۷	۷-۳۳ تلسکوپ
۶۴۷	۱-۷-۳۳ تلسکوپ شکستی
۶۵۰	۲-۷-۳۳ تلسکوپ بازتابی
۶۵۳	۳-۷-۳۳ تلسکوپ فضایی هابل
۶۵۵	۴-۷-۳۳ تلسکوپ فضایی جیمز وب
۶۵۶	۵-۷-۳۳ رصدخانه پرتو x چاندرا
۶۵۷	۸-۳۳ انبرک‌های لیزری
۶۶۲	تمرین حل مسئله

۶۷۱	سؤالات چند گزینه‌ای
۶۷۳	پرسش‌ها
۶۷۷	مسائل
۶۹۳	فصل ۳۴ - نورشناخت موجی
۶۹۳	آنچه فراخواهیم گرفت
۶۹۵	۳۴-۱ امواج نوری
۷۰۱	۳۴-۲ تداخل
۷۰۵	۳۴-۳ تداخل دوشکافی
۷۱۳	۳۴-۴ تداخل پوسه‌ی نازک و حلقه‌های نیوتن
۷۲۱	۳۴-۵ تداخل سنج
۷۲۵	۳۴-۶ پراش
۷۲۷	۳۴-۷ پراش تک-شکاف
۷۳۵	۳۴-۸ پراش توسط یک روزنه دایره‌ای
۷۳۹	۳۴-۹ پراش دو-شکاف
۷۴۱	۳۴-۱۰ توری‌ها
۷۵۴	۳۴-۱۱ پراش پرتو X و ساختار بلوری
۷۶۱	تمرین حل مسئله
۷۶۷	سؤالات چند گزینه‌ای
۷۶۹	پرسش‌ها
۷۷۱	مسائل

پیش‌گفتار مؤلفان

فیزیک، علمی روبه پیشرفت، زنده و با چالش ذهنی و مسائل پژوهشی بی‌شمار در زمینه موضوعات مختلف از بزرگ‌ترین کهکشان‌ها تا کوچک‌ترین ذرات زیراتمی می‌باشد. فیزیکدانان تلاش می‌کنند تا درک، نظم، ثبات و توانایی پیش‌بینی را به جهان ما عرضه کنند و به تلاش خود در آینده‌ای مهیج ادامه می‌دهند. باین حال، وقتی بیشتر کتاب‌های فیزیک مقدماتی را ورق می‌زنیم، درمی‌یابیم که داستان دیگری بازگو می‌شود. فیزیک به گونه یک علم کامل که عمده‌ترین پیشرفت‌های آن در عصر نیوتن یا شاید در اوایل قرن بیستم اتفاق افتاده است ترسیم می‌شود و تنها در آخر کتاب‌های استاندارد "فیزیک جدید" مطرح می‌شود که اغلب کشفیات مربوط به دهه‌های ۱۹۶۰ را شامل می‌شود.

انگیزه ما از نوشتن این کتاب، تغییر این نوع شیوه نگارش، با ارائه فیزیک معاصر به شیوه مهیج در کتاب است. فیزیک علم محرک و پویا است که همواره در لبه کشفیات جدید و کاربردهایی که زندگی را تغییر می‌دهند قرار دارد. برای اینکه به دانشجویان کمک کنیم تا این موضوع را حس کنند، لازم می‌بینیم که داستان کامل و مهیج این علم را بالحاظ مناسب فیزیک معاصر در درس یکساله فیزیک مبتنی بر حسابان بیان کنیم. حتی در همان نیمسال اول تحصیلی فرصت‌های زیادی برای گنجاندن نتایج جدید این علم در زمینه دینامیک غیرخطی، آشوب، پیچیدگی و پژوهش در فیزیک انرژی بالا در برنامه تحصیلی مقدماتی وجود دارد، از آنجایی که ما در پژوهش‌های مربوط به این زمینه‌ها فعال هستیم می‌دانیم که می‌توان این نتایج را به دانشجویان سال اول ارائه داد.

همکاران ما در سایر زمینه‌ها مانند زیست‌شناسی و شیمی قبلاً پژوهش‌های معاصر رشته خود را به کتابهای درسی افزوده‌اند و به اهمیت تأثیرات اساسی این پژوهش‌ها بر رشته تحصیلی آنها آگاهند. لحاظ پژوهش‌های معاصر در دانشجویان این احساس را به وجود می‌آورد که زیست‌شناسی و شیمی "داغ"ترین زمینه‌های پژوهش را دارند، از طرف دیگر پایه‌های فیزیک دارای زمینه‌های مستحکم‌تری است و پیشرفت‌های جدید در آن فریبنده و مهیج است و ما باید راهی بیابیم تا دانشجویان را در این دستاوردهای جدید فیزیک سهیم سازیم.

معتقدیم که صحبت از موضوع‌های گسترده انرژی می‌تواند نظر دانشجویان را به خود معطوف دارد. اصول مربوط به منابع انرژی (فسیلی، تجدیدپذیر، هسته‌ای و نظایر آن)، بازده انرژی، منابع جایگزین و آثار محیطی منابع مختلف انرژی (گرم شدن جهان) در فیزیک مقدماتی می‌تواند مورد بحث قرار گیرد.

بحث در مورد انرژی می‌تواند بیش از هر موضوع دیگری علاقه دانشجویان را برانگیزد به همین علت جنبه‌های مختلف آن را در کتاب مطرح کرده‌ایم. گذشته از آشنا کردن دانشجویان با جهان مهیج فیزیک، آنها از کسب توانایی حل مسئله و تفکر منطقی درباره یک وضعیت سود زیادی خواهند برد. فیزیک بر پایه نظریه‌هایی که بنیاد همه علوم است نهاده شده است با اعتراف به این موضوع، یک روش حل مسئله مفیدی سر راه دانشجو قرار داده‌ایم که در سرتاسر کتاب به کار رفته است. این روش حل مسئله دارای یک الگوی چندمرحله‌ای است که ما نویسندگان کتاب با دانشجویان در کلاس‌های درس توسعه داده‌ایم.

با در نظر داشتن همه این مفاهیم در ذهن و علاقه ما به نوشتن یک کتاب درسی جذاب، چیزی خلق کرده‌ایم که امیدواریم وسیله‌ای برای خلاق کردن دانشجویان باشد و آنها را برای درس‌های بعد در رشته تحصیلشان بهتر آماده کند. در این راه از نظریات بیش از ۳۰۰ متخصص از جمله هیئت مشاوران، همکاران، بازیکنندگان دستنوشته‌ها در این کار عظیم بهره برده‌ایم و نظریات خود را با حدود ۴۰۰۰ دانشجوی دانشگاه دولتی میشیگان در کلاس‌های فیزیک مقدماتی مطرح و آزموده‌ایم. از همه آنها تشکر می‌کنیم.

ولفگانگ باور و گری د. وستفال

پیش‌گفتار مترجمین

بعد از گذشت سالها، هنوز کتاب‌های قدیمی فیزیک برای دانشجویان رشته فیزیک سراسر کشور تدریس می‌شوند یا اینکه همان مطالب قدیمی بدون به روز شدن در چاپ دیگری منتشر می‌شوند. عمده کتاب‌هایی که از سوی اساتید و مدیران دانشگاه‌ها برای دروس فیزیک پایه معرفی می‌گردند، کتاب‌هایی هستند که از کنار مسائل فیزیک به‌طور بسیار ساده و مختصر عبور کرده‌اند و همواره فرض دانشگاه‌ها بر ارائه ساده‌تر مطالب بوده است به‌طوری که دانشجو در هنگام مطالعه درس، یک نوع تکراری بودن و یکنواختی را تجربه کرده و احساس می‌کند که در محیط دبیرستان تحصیل می‌کند و خبری از مثال‌های جدید در آنها نیست و بنابراین در برابر مسائل فیزیکی واقعی خود را فردی ضعیف می‌پندارد. در نتیجه جذابیت خاصی که می‌دانیم در دروس فیزیک پایه وجود دارد تا حدود زیادی از بین خواهد رفت. از طرف دیگر اساتید نیز با تدریس چنین کتاب‌هایی، به نوعی با همین شیوه قدیمی تدریس، خو گرفته‌اند و خود را موظف به دانستن و تدریس مطالب جدید مربوط به مطالب درسی نمی‌دانند. شاید این امر نتیجه این فکر نادرست باشد که اصول اولیه دانش فیزیک ثابت هستند و بنابراین نیازی به ارائه منابع جدید وجود ندارد. حال آنکه حقیقت امر چیز دیگری است و دانش و فن‌آوری با شتاب زیادی در حال حرکت هستند. حاصل کار این می‌شود که دانشجویانی که از کتب قدیمی دروس پایه فیزیک برای گذراندن واحدهای درسی خود استفاده کرده‌اند، با موضوعات امروزی بیگانه هستند و کمتر دارای طرز فکر خلاق و مهندسی هستند. هنگامی که دانشجوی رشته فیزیک فقط به‌صورت روابط فیزیکی محض و حل

مسائل صرفاً نظری و با قراردادن مقادیر عددی در فرمولها دروس را می‌گذرانند، در پایان تحصیلات متأسفانه فقط دروس او شاید گذرانده شده باشند، اما چنین دانشجویی دارای تفکر مهندسی و عملیاتی نمی‌باشد.

این کتاب که در سال ۲۰۱۰ میلادی انتشار یافته است از جمله کتابهای استاندارد، به روز، و برتر جهان در زمینه فیزیک پایه به شمار می‌رود. در هر فصل کتاب با بهره‌گیری از مسائل عملی، و به روز مربوط به مطالب درسی مربوطه، به بررسی موضوعات و پدیده‌های واقعی پرداخته و از آخرین اخبار و دستاوردهای علمی در زمینه مربوط به هر فصل استفاده می‌شود.

در فرایند آموزش حتی به نکات ظریف روانشناسی نیز کاملاً دقت شده است: نویسندگان با بیان عباراتی نظیر "آنچه فرا خواهیم گرفت" همواره خود را در کنار خواننده می‌داند و در نتیجه خواننده در همه جای کتاب مؤلف را در کنار خود احساس می‌کند.

در ابتدای هر فصل رئوس مطالب مربوطه بیان می‌شود و بنابراین دانشجو از همان ابتدا می‌داند که هدف از مطالعه آن فصل یادگیری چه مطالبی است. در تمام متن کتاب همواره از شکل‌های رنگی و با کیفیت عالی استفاده شده است که گام مؤثری در فرایند یادگیری محسوب می‌گردد. در حین مطالعه دانشجو با "کار در کلاس" و "فرصت خودآزمایی"هایی مواجه می‌شود تا به راحتی میزان یادگیری خود را بیازماید.

مسائل حل شده به گونه‌ای ارائه شده‌اند که مانند بسیاری از حل‌المسائل‌ها بلافاصله به حل مسائل پرداخته نمی‌شود. در عوض پس از صورت مسئله عبارات "فکر کنید" و "پس از آن" تحقیق کنید" و مراحل دیگر، مورد استفاده قرار می‌گیرد تا به دانشجو آموزش دهد که قبل از اینکه روابط را بنویسد باید قبل از هر چیز نسبت به مسئله فکر کنید.

در پایان هر فصل روابط و علائم جدید مربوطه به صورت جداگانه فهرست شده‌اند تا برای مطالعات بعدی دسترسی سریع به روابط میسر باشد.

به راحتی توصیف کتاب حاضر قطعاً در قالب این پیش‌گفتار نخواهد گنجید. فقط یک خواننده دقیق خواهد توانست پس از مطالعه عمیق کتاب نظر خود را در برابر چنین شاهکاری ارائه نماید. دانشجویان با مطالعه و بررسی مسائل زیبا و بی‌نظیر مطرح شده در

این کتاب، با اشتیاق وصف‌ناپذیری به یادگیری مسائل فیزیکی به روز دنیا روی خواهند آورد. مسائلی که درتقابل با کتاب‌های فیزیک پایه قدیمی، دیگر نه تنها رنگ و بوی کهنگی نمی‌دهد، بلکه دانشجو را با مسائل به روز جهان آشنا می‌سازد. به‌عنوان نمونه:

در کتاب‌های فیزیک پایه ۳ قبلی، دانشجو موضوع عدسی‌ها و آینه‌ها را مطالعه می‌کند، اما از تلسکوپ‌های امروزی مانند تلسکوپ فضایی هابل، و عدسی‌ها و آینه‌های به‌کاررفته در آن و نوع مأموریت‌هایی که برای آن انجام شده و خواهد شد، کوچکترین اطلاعاتی ندارد.

در کتاب‌های فیزیک ۳ قبلی، دانشجو موضوع گرما را مطالعه می‌کند اما از فاکتورهای مهندسی به‌کاررفته در بحث عایق کاری گرمایی (مانند فاکتور R) اطلاعی ندارد و بنابراین هیچ ایده‌ای در زمینه صرفه جویی در مصرف انرژی از طریق فاکتور R ندارد.

این دو مثال نمونه کوچکی از صدها نمونه دیگر است که فقط با مطالعه این کتاب می‌توان به درستی آنها را درک نمود. این نمونه‌ها نشان می‌دهند که کتاب‌هایی مانند فیزیک پایه ۳ واقعاً نیاز به نوشتن و ارتقای سطح کیفی دارند و بنابراین مطابق تصمیم مدیریت محترم گروه فیزیک بر آن شدیم تا از کتابی به حق برتر برای آموزش این درس در کلیه مراکز و واحدهای دانشگاه پیام‌نور استفاده نماییم.

ترجمه کتاب با سعی زیاد و دقت فراوان به انجام رسیده است به‌طوری که تک تک واژگان به‌کاررفته با تأمل زیاد و تسلط کامل مترجمین بر مطالب درسی به‌کار رفته‌اند. به هر حال خوانندگان محترم در صورت داشتن هرگونه نظر، یا وجود اشکال ما را یاری خواهند فرمود.

مدیریت محترم گروه فیزیک دانشگاه پیام‌نور مصمم است تا تحولی بنیادی و عظیم را در زمینه آموزش دروس پایه فیزیک ایجاد نماید. امید است که در این راستا و با شروع از کتاب‌های فیزیک پایه بتوانیم علاقه زیادی برای یادگیری دروس فیزیک توسط دانشجویان ایجاد نماییم و گامی هرچند کوچک در راه اعتلای نظام آموزشی کشور مقدس خود برداریم.

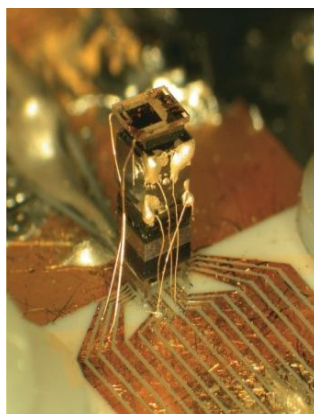
دکتر هاشمی‌زاده - گوشه - گلنارکار

فصل ۱۴

نوسانات و امواج



(الف)



(ب)

شکل ۱۴-۱ نوسانات هماهنگ برای اندازه‌گیری زمان به کار می‌رود (الف)
تصویر لحظه به لحظه از یک ساعت پاندولی قدیمی (ب) کوچک‌ترین ساعت
اتمی دنیا از مؤسسه ملی استانداردها و فن آوری، که اتمهای سزیم در آن ۹/۲
بیلیون نوسان در هر ثانیه انجام می‌دهند. این ساعت باندازه یک دانه برنج است
و دقت آن یک در ده بیلیون یا کمتر از یک ثانیه در هر سیصد سال می‌باشد.

آنچه فرا خواهیم گرفت

- نیروی فنر سبب یک نوسان سینوسی نسبت به زمان می‌شود که آن را حرکت هماهنگ ساده می‌نامیم.
- برای آونگ‌ها که تحت زوایای کوچک نوسان می‌کند می‌توان قانون نیرو و نوسان زمانی مشابه جسم متصل به فنر یافت.

- حرکت هماهنگ ساده تصویر حرکت دایره‌ای یکنواخت در امتداد یکی از دو محور مختصات قائم با مبداء مرکز دایره است.
 - در صورت وجود میرایی دامنه، نوسانات به صورت نمایی با زمان کاهش می‌یابند. و اگر نیروی میرایی قوی باشد ممکن است هیچ نوسانی روی ندهد.
 - اگر یک نوسانگر را با نیروی محرک دوره‌ای خارجی به حرکت واداریم نوسانگر در اثر این نیروی محرک با بسامد این نیرو نوسان می‌کند و دامنه نوسان آن در نزدیکی تندی زاویه‌ای تشدید بیشینه می‌شود.
 - منحنی سرعت نسبت به مکان حرکت یک نوسانگر نامیرا بیضی و نوسانگر میرا مارپیچ است.
 - یک نوسانگر میرا و واداشته می‌تواند حرکت آشوبناکی را نمایش دهد که در آن مسیر حرکت به طور محسوسی به شرایط اولیه بستگی دارد.
- حتی هنگامیکه جسمی به ظاهر کاملاً در حال سکون است، اتم‌ها و مولکول‌های آن به سرعت در حال ارتعاش هستند. گاهی از این ارتعاشات می‌توان استفاده نمود، بعنوان مثال اتم‌ها در یک بلور کوارتز در صورت اعمال یک میدان الکتریکی تناوبی با یک بسامد بسیار پایا ارتعاش می‌کنند. از این ارتعاش برای اندازه‌گیری زمان در ساعت‌های دارای بلور کوارتز و ساعت‌های مچی استفاده می‌شود. ارتعاشات اتم‌های سزیم در ساعت‌های اتمی به کار می‌رود (شکل ۱۴-۱).
- در این فصل، حرکت نوسانی را بررسی می‌کنیم. بیشتر جاها، فنرها و نوسانگرها را در نظر خواهیم گرفت، اما اینها فقط ساده‌ترین مثال‌ها در نوسانگرها هستند. در بخش‌های بعدی کتاب انواع دیگر سیستم‌های ارتعاشی را مطالعه می‌کنیم که به منظور تحلیل حرکتشان، آنها را با فنرها و آونگ‌ها شبیه‌سازی می‌کنیم. در این فصل مفهوم تشدید را نیز بررسی خواهیم کرد که یکی از ویژگی‌های مهم سیستم‌های نوسانی، از سطح اتمی تا پلها و آسمان‌خراش‌ها، می‌باشد. در فصل‌های ۱۵ و ۱۶ مفاهیم نوسانات را برای تحلیل ماهیت امواج و صوت به کار می‌بریم.

۱۴-۱ حرکت هماهنگ ساده

هر حرکتی که در بازه‌های زمانی مساوی تکرار شود حرکت تناوبی نامیده می‌شود که

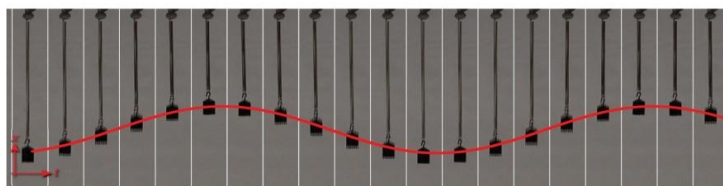
در علوم مهندسی و زندگی روزمره حائز اهمیت است. به عنوان مثال های رایج از اجسام دارای حرکت تناوبی می توان حرکت برف پاکن یک اتومبیل و رقاصک ساعت قدیمی را نام برد. حرکت تناوبی در جریان متناوبی که شبکه برق شهرهای مدرن را تغذیه می کند، ارتعاشات اتمی مولکول ها و سیستم گردش خون و ضربان قلب خود شما نیز وجود دارد.

حرکت هماهنگ ساده نوع خاصی از حرکت تکراری است که توسط یک نوسانگر یا جرم متصل به یک فنر نمایش داده می شود. در فصل ۵ نیروی فنر را معرفی کردیم که توسط قانون هوک بیان می شود: نیروی فنر متناسب با جابه جایی فنر از وضعیت تعادل است. نیروی فنر یک نیروی برگرداننده است که همواره به سمت وضعیت تعادل بوده و بنابراین در جهت خلاف بردار جابه جایی است:

$$F_x = -kx$$

ثابت تناسب k را ثابت فنر می نامند.

در فصل های قبل بارها با نیروی فنر برخورد کردیم. دلیل اصلی اینکه چرا نیروهایی که وابستگی خطی به جابه جایی دارند، اهمیت زیادی در بسیاری از شاخه های فیزیک دارند، در بخش ۶-۴ مورد تأکید قرار گرفت. و دیدیم که برای یک سیستم در حال تعادل، یک جابه جایی کوچک از وضعیت تعادل منجر به نیروی شبه فنی با وابستگی خطی به جابه جایی از وضعیت تعادل می شود.



شکل ۱۴-۲ تصاویر متوالی ویدئویی یک وزنه آویزان از فنر که دارای حرکت هماهنگ ساده است. یک دستگاه مختصات و نمودار مکان بر حسب زمان جرم متصل به فنر در تصویر نشان داده شده است.

حال موقعیتی را در نظر می گیریم که در آن جسمی به جرم m به فنی متصل شده است و نسبت به وضعیت تعادل خود کشیده یا فشرده شده است. هنگامی که جسم رها شود، به صورت رفت و برگشت نوسان می کند. این حرکت را **حرکت هماهنگ ساده**

(SHM)^۱ می‌نامند، و هرگاه نیروی بازگرداننده متناسب با جابه‌جایی باشد این حرکت روی می‌دهد. (آنگونه که اشاره کردیم، یک نیروی بازگرداننده خطی در همه سیستم‌های نزدیک به نقطه تعادل پایدار وجود دارد و بنابراین حرکت هماهنگ ساده در بسیاری از سیستم‌های فیزیکی دیده می‌شود) شکل ۱۴-۲ فریم‌هایی از یک نوار ویدئویی مربوط به نوسان عمودی یک وزنه متصل به یک فنر را نشان می‌دهد. محور عمودی نشان‌دهنده محور x و محور افقی، زمان را نشان می‌دهد بطوریکه فاصله فریم‌های مجاور از یکدیگر 0.068 است. منحنی قرمز رنگ که از میان این رشته موقعیت‌های وزنه عبور می‌کند، یک تابع سینوسی است.

بانگرشی که از شکل ۱۴-۲ به دست می‌آید، می‌توان این نوع حرکت را به‌طور ریاضی بیان نمود. با قانون نیروی فنر، $F_x = -kx$ ، شروع می‌کنیم و قانون دوم نیوتن $F_x = ma$ را به کار می‌بریم. در این صورت داریم:

$$ma = -kx$$

می‌دانیم که شتاب مشتق دوم مکان نسبت به زمان است: $a = d^2x/dt^2$. با جایگزین کردن این عبارت بجای a در معادله فوق که از قانون دوم نیوتن به دست آمد، داریم:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -kx$$

یا:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = 0 \quad (14-1)$$

معادله ۱۴-۱ هم شامل مکان x ، و هم مشتق دوم آن نسبت به زمان است و هردوی آنها تابعی از زمان t هستند. این نوع معادله را معادله دیفرانسیلی می‌نامند. جواب این معادله دیفرانسیل خاص، حرکت هماهنگ ساده را به‌طور ریاضی بیان می‌کند.

فرصت خودآزمایی

نشان دهید که $x(t) = A \sin(\omega_0 t + \theta_0)$ جواب معادله ۱۴-۱ است.

از منحنی شکل ۱۴-۲ ملاحظه می‌شود که جواب معادله دیفرانسیل باید یک تابع سینوسی یا کسینوسی باشد. ببینیم آیا تابع ذیل جواب مناسبی خواهد بود:

$$x = A \sin(\omega_0 t)$$

ثابت‌های A و ω_0 را به ترتیب دامنه نوسان و تندی زاویه‌ای می‌نامند. دامنه عبارتست از جابه‌جایی بیشینه از وضعیت تعادل. در این تابع سینوسی A می‌تواند از نظر ریاضی هر مقداری داشته باشد. با این حال از نظر فیزیکی دامنه نمی‌تواند تا هر مقدار دلخواهی بزرگ باشد، زیرا در این صورت فنر بیش از حد کشیده خواهد شد. از سوی دیگر، خواهیم دید تمام مقادیر ω_0 به جواب منجر نمی‌شود. دوبار نسبت به زمان از تابع $x = A \sin(\omega_0 t)$ مشتق می‌گیریم:

$$\frac{dx}{dt} = \omega_0 A \cos(\omega_0 t) \Rightarrow$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} = -\omega_0^2 A \sin(\omega_0 t)$$

با قراردادن این نتیجه و عبارت سینوسی x در معادله ۱۴-۱ داریم:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{k}{m}x = -\omega_0^2 A \sin(\omega_0 t) + \frac{k}{m} A \sin(\omega_0 t) = 0$$

این شرط در صورتی برقرار است که $\omega_0^2 = k/m$ باشد یا:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

بنابراین جواب معتبری برای معادله دیفرانسیل (معادله ۱۴-۱) یافته‌ایم. با همین روش می‌توان نشان داد که تابع کسینوسی نیز با دامنه دلخواه و با همان تندی زاویه‌ای قبلی یک جواب معادله است. بنابراین جواب کامل با ثابت‌های B و C عبارت است از:

$$x(t) = B \sin(\omega_0 t) + C \cos(\omega_0 t) \text{ و } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (۱۴-۲)$$

واحد ω_0 ، رادیان بر ثانیه (rad/s) است. هنگام به‌کار بردن معادله ۱۴-۲، عبارت $\omega_0 t$ باید برحسب رادیان بیان شود نه درجه. در اینجا شکل مفید دیگری از معادله ۱۴-۲ را بیان می‌کنیم:

$$x(t) = A \sin(\omega_0 t + \theta_0) \text{ و } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (۳-۱۴)$$

این شکل معادله به شما اجازه می‌دهد تا، ساده‌تر حرکت سینوسی را بررسی کنیم. به جای داشتن دو دامنه در توابع سینوسی و کسینوسی، معادله ۳-۱۴ دارای یک دامنه و زاویه فاز θ_0 است. این دو ثابت به وسیله معادلات زیر به ثابت‌های B و C در معادله ۲-۱۴ مربوط می‌شوند:

$$A = \sqrt{B^2 + C^2} \quad (۴-۱۴)$$

و

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left[\frac{C}{B} \right] \quad (۵-۱۴)$$

۱-۱-۱۴ شرایط اولیه

مقادیر ثابت B و C (دامنه‌های توابع سینوسی و کسینوسی در معادله ۲-۱۴) را چگونه تعیین کنیم؟ پاسخ این است که نیاز به دو گونه اطلاعات داریم، که معمولاً به شکل مکان اولیه $x_0 = x(t=0)$ و سرعت اولیه، $v_0 = v(t=0) = (dx/dt)|_{t=0}$ داده می‌شوند. مثال زیر این موضوع را نشان می‌دهد.

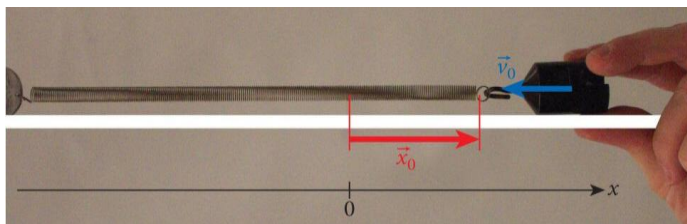
فرصت خودآزمایی

نشان دهید که $A \sin(\omega_0 t + \phi_0) = B \sin(\omega_0 t) + C \cos(\omega_0 t)$ روابط بین ثابت‌ها به وسیله معادلات ۴-۱۴ و ۵-۱۴ داده شده است.

مثال ۱-۱۴ شرایط اولیه

مسئله ۱

انتهای فنری با ثابت فنر $K = ۵۶/۰۰ \text{ N/m}$ به وزنه‌ای به جرم $۱/۰۰ \text{ kg}$ متصل شده است (شکل ۳-۱۴). وزنه به اندازه $۵/۵ \text{ cm}$ از وضعیت تعادل خود کشیده شده و سپس با سرعت اولیه $-۰/۳۲ \text{ m/s}$ هل داده می‌شود. معادله حرکت نوسان ایجاد شده بنویسید؟



شکل ۱۴-۳ وزنه متصل به فنر، بردار سرعت و مکان اولیه در شکل نشان داده شده است.

جواب ۱

معادله عمومی حرکت برای این وضعیت، معادله ۱۴-۲، مربوط به حرکت هماهنگ ساده است:

$$x(t) = B \sin(\omega_0 t) + C \cos(\omega_0 t), \text{ با } \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

از داده‌های معلوم در صورت مسئله، می‌توان تندی زاویه‌ای را محاسبه نمود:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{56.0 \text{ N/m}}{1.00 \text{ kg}}} = 7.48 \text{ s}^{-1}$$

اکنون باید مقادیر B و C را تعیین کنیم.

مشتق اول معادله عمومی حرکت را حساب می‌کنیم:

$$x(t) = B \sin(\omega_0 t) + C \cos(\omega_0 t)$$

$$\Rightarrow v(t) = \omega_0 B \cos(\omega_0 t) - \omega_0 C \sin(\omega_0 t)$$

در زمان $t = 0$ ، $\sin(0) = 0$ و $\cos(0) = 1$ است بنابراین معادلات تبدیل

می‌شوند به:

$$x_0 = x(t = 0) = C$$

$$v_0 = v(t = 0) = \omega_0 B$$

شرایط اولیه $x_0 = 0.055 \text{ m}$ و سرعت $v_0 = -0.32 \text{ m/s}$ داده شده است. بنابراین داریم:

$$B = -0.43 \text{ m} \text{ و } C = x_0 = 0.055 \text{ m}$$

مسئله ۲. دامنه این نوسان چقدر است؟ زاویه فاز چقدر است؟

جواب ۲. با مقادیر ثابت‌های B و C ، می‌توانیم دامنه A را از معادله ۱۴-۴

حساب کنیم.

$$A = \sqrt{B^2 + C^2} = \sqrt{(0.043\text{m})^2 + (0.055\text{m})^2} = 0.070\text{ m}$$

بنابراین، دامنه این نوسان $7/0\text{ cm}$ است. توجه کنید که به دلیل غیرصفر بودن سرعت اولیه، دامنه برابر با $5/5\text{ cm}$ (مقدار افزایش طول اولیه فنر) نیست. زاویه فاز با استفاده از معادله $14-5$ پیدا می‌کنیم:

$$\theta_0 = \tan^{-1} \left[\frac{C}{B} \right] = \tan^{-1} \left[-\frac{0.055}{0.043} \right] = -0.907\text{ rad}$$

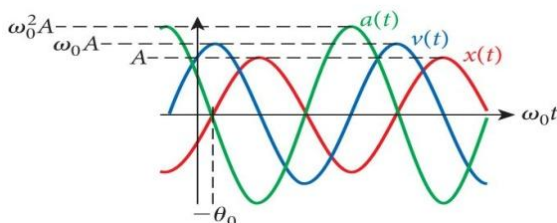
این زاویه فاز برحسب درجه برابر $\theta_0 = -52.0^\circ$ است.

۱۴-۱-۲ مکان، سرعت و شتاب

دوباره نگاهی به روابط مکان، سرعت و شتاب می‌اندازیم. این روابط به شکلی که حرکت نوسانی را برحسب دامنه A و زاویه فاز θ_0 توصیف می‌کند، عبارتند از:

$$\begin{aligned} x(t) &= A \sin(\omega_0 t + \theta_0) \\ v(t) &= \omega_0 A \cos(\omega_0 t + \theta_0) \\ a(t) &= -\omega_0^2 A \sin(\omega_0 t + \theta_0) \end{aligned} \quad (14-6)$$

در اینجا سرعت و شتاب با گرفتن مشتقات زمانی متوالی از بردار مکان به دست می‌آیند. در این معادلات بردارهای سرعت و شتاب همان زاویه فاز بردار مکان را که با θ_0 مشخص می‌شود دارند، اما آنها یک زاویه فاز اضافی $\pi/2$ (برای سرعت) و یک زاویه فاز π (برای شتاب) دارند، که به ترتیب متناظر با اختلاف فاز بین توابع سینوسی و کسینوسی و بین توابع سینوسی و منهای سینوسی می‌باشد.



شکل ۱۴-۴ نمودار مکان، سرعت و شتاب برای حرکت هماهنگ ساده برحسب تابعی از زمان