

فیزیک یک

درسنامه مکانیک

ویرایش دوم

www.ketab.ir

فیروز آرش



نویدازان

این اثر، مشمول قانون حمایت مولفان و مصنفان و هنرمندان مصوب ۱۳۴۸ است. هرکس تمام یا قسمتی از این اثر را بدون اجازه ناشر، نشر یا پخش کند، مورد پیگرد قانونی قرار خواهد گرفت

سرشناسه	آرش، فیروز
عنوان و نام پدیدآور	فیزیک یک درسنامه مکانیک / فیروز آرش .
وضعیت ویراست	[ویراست ۲].
مشخصات نشر	تهران: نوپردازان، ۱۳۹۸.
مشخصات ظاهری	۶۱۲ ص.
شابک	978-964-975-302-7
وضعیت فهرست نویسی	فیفا
یادداشت	چاپ قبلی: نوپردازان، ۱۳۹۱ (۸۵ ص.).
یادداشت	کتابنامه.
یادداشت	نمایه.
موضوع	مکانیک -- راهنمای آموزش (عالی)
موضوع	Mechanics -- study and teaching (Higher):
موضوع	فیزیک -- راهنمای آموزش (عالی)
موضوع	physics -- study and teaching (Higher):
موضوع	مکانیک -- مسائل، تمرین ها و غیر (عالی)
موضوع	Mechanics -- Problems, exercises, etc (Higher):
موضوع	فیزیک -- مسائل، تمرین ها و غیر (عالی)
موضوع	physics -- Problems, exercises, etc (Higher):
رده بندی کنگره	QC ۱۲۸:
رده بندی دیویی	۵۳۱/۰۷۶:
شماره کتابشناسی ملی	۶۰۲۵۴۸۷:



فیزیک یک درسنامه مکانیک

www.ketab.ir

تالیف	دکتر فیروز آرش
ناشر	نوپردازان
قطع	رحلی
ویرایش	دوم
نوبت چاپ	اول
تاریخ چاپ	۱۴۰۱
تیراژ	۲۰۰
صفحات	۶۱۲
شابک	۹۷۸-۹۶۴-۹۷۵-۳۰۲-۷
دفتر انتشارات	تهران، خیابان کارگر جنوبی، خیابان لبافی نژاد غربی، پلاک ۲۱۵
تلفن	۶۶۵۶۸۰۹۶ - ۸

۱۹۵۰۰۰ تومان

فروش اینترنتی www.nakketab.com ناک کتاب سایت رسمی فروش کتاب آبیژ، نوپردازان و گهواره کتابیران

مرکز پخش کتابیران: تلفن: ۶۶۴۱۴۴۷۴ - ۶۶۴۱۴۵۱۵ - ۶۶۴۱۱۱۷۳ - ۶۶۴۹۴۴۰۹ www.ketabiran.ir

پیشگفتار ویرایش اول

این کتاب برای دانشجویان سال اول رشته فیزیک نوشته شده است و تدوین درسنامه‌های من در ۲۵ سال تدریس در دانشگاه‌های آمریکا (تمپل، اورگان، ویلامت) و ایران (امیرکبیر، علم و صنعت و تفرش) است.

در سال ۱۳۸۴ دانشگاه تفرش اجازه یافت تا گروه فیزیک راه‌اندازی کند. ریاست گروه به من واگذار شد. در آن هنگام بر آن شدم تا گروهی با معیارهای بالای آموزشی و پژوهشی بسازم. ریاست وقت دانشگاه، آقای دکتر نورپناه، از این اندیشه پشتیبانی کردند. شایسته است که از ایشان سپاسگزاری کنم. آرمان من این بود که فارغ‌التحصیل‌های رشته فیزیک دانشگاه تفرش دانشی درخور بیاموزند و با سربلندی به دانشگاه خود ببالند. برای دست‌یابی به این هدف، ویرایش نخست این کتاب در بهار و تابستان سال ۱۳۸۴ نوشته شد. ویرایش پیش‌رو، هفتمین ویرایش آن است.

در بازار ایران کتاب فیزیک عمومی وجود داشت: کتاب «هالیدی-رزنیک» را همه می‌شناسند و به تقریب یک‌تاز دانشگاه‌های ایران است. افزون‌بر آن، کتاب فیزیک دانشگاهی «سی‌ریز، ریمنشکی و یانگ» هم در بازار ایران وجود دارد. برخی با کتاب فیزیک «تیلر» هم آشنا هستند. اینها کتاب‌های خوبی‌اند، دست‌کم برای دانشجویان رشته‌های مهندسی بسنده‌اند. اما به چند دلیل برای دانشجویان رشته فیزیک مناسب نیستند. این کتاب‌ها اساساً برای دانشجویان سال اول آمریکا نوشته شده‌اند؛ دانشجویانی که در دبیرستان چیز زیادی درباره فیزیک و ریاضیات نمی‌آموزند. همین کتاب‌ها در دبیرستان‌های ایتالیا هم تدریس می‌شوند. در مقابل، دانشجویان ورودی در ایران بیشتر موضوع‌های فیزیک سال اول را در دبیرستان دیده یا شنیده‌اند، اگرچه به گمان من آنها را نیاموخته‌اند. برای آزمون ورودی هم بارها آنها را دوره کرده‌اند. بنابراین، تکرار همان مطالب در سطحی که مثلاً «هالیدی» دارد، برای دانشجو خسته‌کننده می‌شود. احساس من آن بود که می‌باید راه‌کاری برای این دشواری جسته می‌شد. متأسفانه، بسیاری از مدرسين ما هم به همین کتاب‌ها خو گرفته‌اند و همان‌ها را تکرار می‌کنند. شاید هم برای اندیشیدن و نوآوری آموزشی مجالی ندارند. شنیده می‌شود که برخی حتی ویرایش خاصی از این کتاب‌ها را توصیه می‌کنند.

درست است که دانشجویان با اصول و قانون‌های فیزیک آشنا می‌شوند و کتاب‌های موجود در بازار از عهده آن برمی‌آیند، اما این کافی نیست. آنچه که در آموزش فیزیک مهم است به دست آوردن شم و توانایی‌هایی است که نشان می‌دهند چگونه از قانون‌ها برای فهمیدن رفتار اجسام می‌توان استفاده کرد. مهم است که بفهمیم قانون‌ها چه می‌گویند و به همان اندازه اهمیت دارد که توانایی‌هایی برای به کار بردنشان در وضعیت‌های متفاوت به دست بیاوریم.

تجربه معلمی به من آموخته است که درس‌های فیزیک عمومی، به‌ویژه مکانیک، دشوارترین درس‌های دوره کارشناسی فیزیک است. مفهوم‌های بنیادی باید در این درس‌ها آموخته شوند و زیربنای استواری را فراهم کنند. با فیزیک عمومی، روش اندیشیدن و عادت به حل کردن مسئله به دانشجو آموخته می‌شود. اگر این کار به درستی انجام گیرد، راه پیش‌رو هموار خواهد شد. بگذارید نمونه‌ای بیاورم: بارها برای من پیش آمده است که از دانشجویی که از دانشنامه دکتری اش دفاع می‌کرد پرسیدم قانون نخست نیوتون به چه درد می‌خورد،

بهرحال این قانون در قانون دوم نیوتون نهفته است. پاسخ‌ها بدون استثنا این بود که «قانون اول نیوتون تعریف چارچوب لخت است» که البته پاسخ درستی است. اما وقتی پرسیدم خب! چارچوب لخت چه چارچوبی است؟ گفته شد چارچوبی است که شتاب ندارد. این پاسخ اگر چه شاید درست باشد، اما گمراه‌کننده است و نشان می‌دهد که دکتر فردا آن را نفهمیده است: شتاب نسبت به چه؟ هیچ‌کس نگفت که چارچوب لخت چارچوبی است که در آن یک ذره نقطه‌ای منزوی شتاب ندارد. روشن است که یک چارچوب می‌تواند نسبت به چارچوب دیگری شتاب داشته باشد، اما یک ذره نقطه‌ای منزوی در آن بدون شتاب باشد. نمونه‌های از این دست فراوانند. من می‌خواستم نوشته‌ای را در دسترس دانشجویانم قرار دهم که آنها را به اندیشیدن وادارد و جزئیات مهم را با روشنگری دربرداشته باشد. شاید در این راه زیاده‌روی هم کرده باشم. اگر چنین است، اصلاً پشیمان نیستم، چون می‌دانم که زمانی ممکن است خواننده‌ای به آن نیاز داشته باشد و می‌داند که در کجا به دنبال آن بگردد.

دلیل دیگر نگارش این درسنامه‌ها، فراوانی حل‌المسئله‌های فیزیک «هالیدی-رزنیک» و بقیه در بازار است. دانشجویان پیش از آنکه کتاب‌های درسی خود را فراهم بکنند، به سراغ حل‌المسئله‌های آن می‌روند. این نگرش بسیار بازدارنده و ویرانگر است. بدون شک، حل کردن مسئله بخش مهم آموزش فیزیک در تمام سطوح آن است. به دو دلیل: ۱. برای حل کردن مسئله دانشجوی باید بیندیشد و فهمیده‌های خود را بیازماید. ۲. دانشجوی با پرداختن به مسئله یاد می‌گیرد که چگونه یک مفهوم عمومی را در شرایط خاص به‌کار ببرد. بنابراین، در این کتاب کوشیدم مسئله‌هایی را گردآوری کنم که اندکی - و نه کاملاً - غیر معمول‌اند و به ناگزیر ممکن است اندکی دشوارتر هم باشند. برای نشان دادن روش حل مسئله، مثال‌های حل شده فراوانی در هر فصل گنجانده شده است. حل کردن و اندیشیدن به مسئله‌های آخر فصل‌ها از اهمیت به سزایی برخوردار است.

برخی فصل‌های این کتاب (مانند فصل آخر و بخش‌هایی از برخی فصل‌ها) مانند مسیرهای حرکت سیاره‌ها و اثباتشان در فصل ۷) شاید برای دانشجوی ورودی چندان آسان نباشد و مجالی هم برای تدریس‌شان نباشد. می‌توان آنها را تدریس نکرد. برای کامل بودن کتاب به‌رحال این موضوع‌ها در آن گنجانده شده است. علاقمندان می‌توانند با آنها کلنجار بروند.

موضوع‌های این کتاب نو نیستند و نمی‌توانند هم باشند، همه آنها را در جاهای دیگر، کتاب‌های متفاوت می‌توان یافت. در این کتاب هر از گاهی برداشت‌های خودم را در اینجا و آنجا گنجانده‌ام. در نگارش این کتاب از افراد و کتاب‌های زیادی یاری گرفته‌ام. به‌ویژه، درسنامه‌های هاوارد جورجی (Howard Georgi) و دیوید مورین از دانشگاه هاروارد بسیار راه‌گشا بودند. این دو، با گشاده‌رویی برخی مطالب را در اختیار من قرار دادند. به مکاتبه‌هایم با حوصله پاسخ دادند، راهنماهای ارزنده‌ای بودند. از هر دو سپاسگزارم. جورجی به من آموخت که چگونه می‌توان بدون آزدن دانشجوی، او را به چالش فراخواند و به اندیشیدن واداشت و موضوعی را که وقتش فرا رسیده است، با چه دقتی بیان کرد. ریز کامل‌تر منابعی که برای نگارش این کتاب استفاده کردم در جای خود آورده شده است.

در آغاز قصد من این بود که همکارهای دیگرم در دانشگاه تفرش به من بپیوندند تا بتوانیم یک دوره کامل فیزیک عمومی دانشگاهی تدوین کنیم. متأسفانه این بلندپروازی من برآورده نشد و دست تنها ماندم. کتاب حاضر بخش مکانیک است. الکتریسیته و مغناطیس، موج و نسبیت خاص و مکانیک تحلیلی هم نوشته شده‌اند که امیدوارم در آینده بتوانم در دسترس دانشجویان فیزیک و همکاران دانشگاهی‌ام قرار دهم. تا آن روز.

از همکارهای زیادی باید سپاسگزاری کنم که در نگارش این کتاب به گونه‌های مختلف مرا یاری کردند. پیش از همه از دانشجویان ورودی سال ۱۳۸۴ دانشگاه تفرش سپاسگزارم که انگیزه نخستین نگارش آن بودند. از آقای دکتر نورپناه، ریاست وقت دانشگاه تفرش تشکر می‌کنم که هر امکانی را خواستم در اختیار من قرار دادند و بدون پشتیبانی ایشان این رویای آرماتی من هرگز مجال خودنمایی نمی‌یافت. از دوست دانشمندم، آقای دکتر محمد خرمی بسیار سپاسگزارم که با گشاده‌رویی پذیرفت تا متن را با دقتی ستودنی بخواند و پیش‌نهادهای فراوان خود را در اختیار من قرار دهد. از آقای دکتر روح‌الله عقدایی به پاس زحمت و وقتشان برای بازخوانی و پیشنهادهای شان تشکر می‌کنم. وام‌دار آقای دکتر حمیدرضا سپنجی هستم که همواره نه تنها مشوق همیشگی من بود، بلکه پذیرفت تا این نوشته را در

دانشگاه شهید بهشتی به عنوان کتاب درسی خود برگزینند و به این ترتیب، آزمونی (به جز تدریس خود من در دانشگاه تفرش) برای اندازه گیری مناسب بودن آن فراهم آورند. از آقای دکتر وحید کریمی پور به پاس تشویق هایشان سپاسگزارم و امیدوارم مجالی بیابند و انتقادهای و پیشنهادهایشان را سرانجام در اختیار من قرار دهند. از دوست خوبم دکتر محمدرضا کلاهچی، به پاس بازخوانی بخش هایی از این نوشته و پیشنهادهایش بسیار ممنونم. همه مسئله های آخر فصل ها حل شده اند و همکاری که این کتاب را برای تدریس برگزینند، می توانند نسخه ای از آنها را از نگارنده بخواهند.

فیروز آرش
دانشگاه تفرش

پیشگفتار ویرایش دوم

خوشحالم که ویرایش دوم کتاب «فیزیک یک» را در دسترس همکارهای دانشگاهی و دانشجویایی قرار می‌دهم که آموزش دادن و «آموختن» را پاس می‌دارند و به آن ارج می‌گذارند.

در بازه‌ی زمانی کوتاه بین نخستین ویرایش و ویرایش کنونی کتاب «فیزیک یک» تغییرهای زیادی در آموزش دانشگاهی پدید آمده است. این تغییرها شایسته‌ی ارزیابی و بازنگری جدی‌اند. آنها نقش اصلی دانشگاه را که پروراندن شهروندان اندیشه‌ورز و مسئول است، با چالش روبرو کرده‌اند. به بهانه‌ی «مهارت اندوزی»، تولید ثروت و تضمین شغلی، ارزش‌های دانشگاهی، مانند پرسش‌گری، نوآوری علمی، کاوشگری و یافتن مفهوم‌های نو، رنگ باخته‌اند. بخش چشم‌گیری از دانشجویایی که به دانشگاه فرستاده می‌شوند، آمادگی لازم را برای آموزش دانشگاهی ندارند. شرایط به وجود آمده، شور تدریس و آموزش را از همکارهای دانشگاهی ستانده است. نتیجه‌ی این پدیده‌های ناخوشایند، سطحی‌نگری، وقت‌گزینی و مدرک‌گرایی شده است. در این میان، دانشجویایی هستند که شوق آموزش دارند و آمادگی پرورش خلاقیت و اندیشه‌ورزی در آنها فراهم است. این گروه از دانشجوها که به راستی شایسته‌ی دانشگاه‌اند، بیشترین آسیب را از شرایط موجود می‌بینند. آنها سرخورده می‌شوند و انگیزه‌هایشان فروکش می‌کند، کنجکاوی‌شان برآورده نمی‌شود. کلاس‌های درسی چالشی پیش رویشان نمی‌گذارد و خیلی زود، حتی شور شرکت در کلاس‌های درسی را از دست می‌دهند. همکارهای من در بزرگ‌ترین و به نام‌ترین دانشگاه‌ها می‌گویند که در آغاز نیم‌سال، کلاس‌های فیزیک پایه با بیش از ۱۰۰ نفر تشکیل می‌شود و در میانه‌ی همان نیم‌سال تعداد دانشجویهای حاضر در کلاس، گاهی به ۴۰ درصد هم نمی‌رسد. چرا چنین شده است؟ در کجا راه کج رفته‌ایم؟ آموزش مهم‌ترین وظیفه‌ی دانشگاه است. در واقع، دانشگاه تنها نهادی است که وجودش را وام‌دار آموزش است. به نام پژوهش جدا از آموزش یا هر چیز دیگر، نمی‌توان از این وظیفه‌ی شانه خالی کرد. اما چه گونه آموزشی؟ آموزشی که دانشجو را برای آینده آماده می‌کند. به او می‌آموزد که در برابر ناشناخته‌های فردا چگونه واکنش نشان دهد. این، نیازمند تمرین کردن و چیره‌دست شدن در اندیشه‌ورزی و پیش‌بینی رویدادهایی است که می‌توانند پدید آیند.

فیزیک یک با چنین نگاهی به «یادگرفتن» و «فهمیدن» نوشته شده است و می‌کوشد که درکی روشن و ژرف از بنیادهای فیزیک نیوتونی در دست‌رس دانشجو قرار دهد تا در پایان یک دوره‌ی آموزش فیزیک پایه، دانشجو دریابد که تمامی این درس بر پایه‌ی سه تعریف و سه اصل (یا قانون) استوار است. همه‌ی دشواری‌ها و زیبایی‌های درس فیزیک پایه ۱ (در واقع، مکانیک نیوتونی) را با شناختی درست از اندرونه‌ی این سه تعریف و سه اصل می‌توان توصیف کرد.

خواننده‌های کتاب را دانشجویایی پنداشته‌ام که شور آموختن و جسارت پرسش‌گری دارند. امیدوارم با پیش‌رفت در خواندن آن، از زیبایی‌های آموختن و فهمیدن لذت ببرند. هم‌زمان، این کتاب می‌خواهد به دانشجو بیاموزد که هیچ گزاره و ادعایی را بدون پشتوانه‌ی استدلال و منطق نپذیرد.

در ویرایش پیش رو تغییرهای چندی داده شده‌اند: برخی مفهوم‌ها بازنویسی شده‌اند و کوشیده شده است که از روشنگری بیشتری برخوردار باشند. بیشترین و اساسی‌ترین تغییرها در فصل‌های ۱ و ۳ و ۹ داده شده‌اند. در فصل یک، چند بخش و تعداد

زیادی مثال افزوده شده است. بخش تحلیل ابعادی و یکاها بازنویسی شده است. بر مثال‌های تکمیلی و مسئله‌ها افزوده شده است. در فصل ۳، افزون بر پالایش متن، بخش ۱۲-۳ را افزودم تا شیوه‌ی آزمون درستی پاسخ‌ها را با استفاده از ابزار استدلال بیاموزم. در فصل ۹، معادله‌ی زنجیر و مسایل مربوط به آن را از متن جدا کردم و در یک پیوست جداگانه گنجاندم. گمانم بر این است که با این کار از سنگینی متن اصلی کاسته می‌شود و این بحث به موضوعی اختیاری تبدیل می‌شود.

به تقریب، در همه‌ی فصل‌های کتاب بر تعداد مثال‌های تکمیلی و مسئله‌ها افزوده شده است. به‌ویژه، در مثال‌های تکمیلی تازه کوشیده‌ام از نمونه‌هایی استفاده کنم که به تحلیل شرایطی می‌پردازند که دانشجو در زندگی روزانه با آنها آشنا است. دوستانی پیشنهاد کرده بودند که بخش «آزمون‌های کوتاه چند گزینه‌ای» را از انتهای فصل‌ها حذف کنم. این همکارها می‌گفتند که آنها یادآور رنج و سختی‌های دوران آمادگی برای آزمون‌های ورودی (کنکور) اند. نگاه من به آنها دیگرگونه است. آنها برای آزمون «فهم» مفهوم‌ها و تیزتر کردن ششم دانشجو در کتاب گنجانده شده‌اند. برای پاسخگویی به این همکارها، در ویرایش دوم، بخش ۱۲-۳ را با عنوان «چرا نه؟» گنجاندم تا نشان دهم که چگونه می‌توان با استدلال و آموزه‌های خود، از درستی درک فیزیکی اطمینان یافت. در ویرایش دوم کتاب، برخی پویانمایی‌های ساده هم گنجانده شده‌اند تا مشاهده‌ی رفتار وضعیت فیزیکی سامانه را آسان کنم. این پویانمایی‌ها برنامه‌های کوتاه کامپیوتری‌اند که در نرم‌افزار Mathematica نوشته شده‌اند. اگرچه دوست داشتم برای بسیاری از مسئله‌ها این کار را انجام دهم، اما از زیاده‌روی در آن پرهیز و خود را به چند نمونه محدود کردم. به گمان من، همراه کردن نمایش‌های پویانما با درس لازم است تا دانشجو رفتار واقعی سامانه‌ی فیزیکی را ببیند و آن را «لمس» کند. لازمه‌ی آن، آموزش هم‌زمان برنامه‌نویسی کامپیوتری و فیزیک پایه است تا دانشجو بتواند شرایط مسئله را تغییر دهد و وضعیت‌های گوناگون را بررسی کند. متأسفانه آموزش هم‌زمان فیزیک و کامپیوتر در دانشگاه‌های ما به سختی یافت می‌شود و اگر هم وجود داشته باشد، چندان جدی برگزار نمی‌شود و شانه به شانه‌ی درس فیزیک پایه پیش نمی‌رود.

همکارها و دانشجویهای زیادی، از دور و نزدیک، تماس گرفته‌اند و به کتاب «فیزیک یک» واکنش‌های دلگرم‌کننده نشان داده‌اند؛ از همه‌ی آنان، به ویژه دانشجویانی که مرا تنها با کتاب‌هایم می‌شناسند، سپاسگزارم. همین واکنش‌هاست که شور نوشتن و آموزش فیزیک را در من زنده نگه می‌دارد.

پس از انتشار ویرایش نخست کتاب، همکارهای زیادی تماس گرفتند و با حرف‌های بسیار دلگرم‌کننده‌شان به نقد آن پرداختند. سخت است که کسی را از قلم نیندازم و از همه‌ی آنان نام ببرم و سپاسگزاری خود را پیشکش کنم. با این حال، مایلم، به ویژه، از دکتر حمیدرضا سپنجی (دانشگاه شهید بهشتی)، دکتر سامان مقیمی عراقی (دانشگاه صنعتی شریف)، دکتر محمدرضا اجتهادی (دانشگاه صنعتی شریف)، دکتر محمدرضا رحیمی تبار (دانشگاه صنعتی شریف)، دکتر حمیدرضا مشفق (دانشگاه تهران)، دکتر محمد راستی ویس (دانشگاه رازی)، خانم دکتر فاطمه تقوی شهری (دانشگاه فردوسی) و دکتر محمد واحدی (دانشگاه علم و صنعت ایران) سپاسگزاری کنم که افزون بر شناساندن کتاب فیزیک یک به دیگر همکارها و دانشجویها، نقدها و نکته‌هایشان را با من درمیان گذاشتند. بی‌شک، بدون پشتیبانی همسرم، نازک، در طول این سال‌ها، این نوشته سرانجام نمی‌یافت. سپاس خالی از او بسیار اندک است، اما این تنها چیزی است که در توان من است.

از آقای قارلقی، مدیر داخلی نشر نوپردازان، سپاسگزارم که سخت‌گیری‌های مرا همیشه با بزرگ منشی و خوشرویی پذیرا بودند. خانم تقی‌خانی و خانم میرفخرایی طراحی و حروفچینی این کتاب را انجام داده‌اند از ایشان و دیگر دست‌اندرکاران نشر نوپردازان سپاسگزارم.

فهرست مطالب

فصل ۱	فرض‌های بنیادی فیزیک کلاسیک: حرکت	۱
۱-۱	فضا و زمان	۱
۱-۲	اصل نسبیت و چارچوب لخت	۱
۱-۳	دستگاه‌های مختصات	۵
۱-۳-۱	مختصات کارتری	۷
۱-۴	حرکت در یک بُعد	۷
۱-۴-۱	مکان، بازه زمان، جابه‌جایی	۷
۱-۴-۲	سرعت	۸
۱-۴-۳	شتاب	۱۰
۱-۵	حرکت با شتاب ثابت در یک بُعد	۱۲
۱-۶	بردارهای مکان، سرعت و شتاب: حالت عمومی	۱۹
۱-۷	سرعت و شتاب زاویه‌ای	۲۳
۱-۸	رابطه میان کمیت‌های زاویه‌ای و خطی	۲۶
۱-۹	حرکت دایره‌ای یکنواخت	۲۷
۱-۱۰	سرعت و شتاب نسبی	۳۲
۱-۱۱	یک‌ها و تحلیل ابعادی	۳۵
	مثال‌های تکمیلی	۴۳
	مسئله‌ها	۴۶
	حل مثال‌های تکمیلی	۵۱
	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای	۵۸
فصل ۲	بردارها و پیش‌نیازهای ریاضی	۶۳
۲-۱	پیشگفتار	۶۳
۲-۲	بردارها	۶۳
۲-۳	جبر بردارها	۶۴
۲-۴	مؤلفه‌های بردار	۶۷

۷۲	۲-۵ مشتق
۷۴	۲-۶ عملگر ∇
۷۵	۲-۷ دیورژانس
۷۶	۲-۸ کرل یا تاو
۷۷	۲-۹ مشتق بردار
۷۹	۲-۱۰ حرکت در مختصات قطبی
۸۰	۲-۱۱ سرعت در مختصات قطبی
۸۴	۲-۱۲ شتاب در مختصات قطبی
۸۵	۲-۱۳ شیوه‌های تقریب ریاضی
۹۱	مسئله‌ها
۹۲	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۳ قانون‌های نیوتون ۹۵

۹۵	۳-۱ قانون نخست نیوتون
۹۶	۳-۲ قانون دوم نیوتون - جرم و نیرو
۹۸	۳-۳ قانون سوم نیوتن - کنش و واکنش
۱۰۲	۳-۴ مفهوم جرم و نیرو
۱۰۴	۳-۵ نیروهای خارجی
۱۰۵	۳-۶ ترازمندی نیروها
۱۰۶	۳-۷ ریسمان کشیده
۱۰۸	۳-۸ سطح هموار
۱۱۰	۳-۹ سطح ناهموار - نیروی اصطکاک
۱۱۴	۳-۱۰ اصطکاک جنبشی
۱۱۹	۳-۱۱ نگاهی ژرف به قانون‌های نیوتون، بازخوانی $F = ma$ و $F = \frac{dp}{dt}$
۱۱۹	۳-۱۱-۱ قانون‌های نیوتون و اندرونه آنها
۱۲۲	۳-۱۱-۲ به کار بردن قانون‌های نیوتون: نمودار آزاد جسم
۱۲۷	۳-۱۱-۳ $F = ma$ یا $F = \frac{dp}{dt}$ کدام یک؟
۱۲۹	۳-۱۲ چرا نه؟ شرایط حدی: آزمون درستی پاسخ
۱۳۳	پیوست: روش عمومی حل مسئله‌های ماشین آتوود
۱۳۹	مثال‌های تکمیلی
۱۴۱	مسئله‌ها
۱۴۸	حل مثال‌های تکمیلی
۱۵۳	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۴ حرکت در یک و در دو بُعد ۱۶۱

۱۶۱	۴-۱ حل چندمعادله دیفرانسیل
۱۶۶	۴-۲ حرکت پرتابی
۱۷۳	۴-۳ حرکت در حضور نیروی پَسار
۱۷۵	۴-۴ نیروی پَسار خطی
۱۷۷	۴-۴-۱ حرکت افقی با نیروی پَسار خطی
۱۷۸	۴-۴-۲ حرکت قائم با نیروی پَسار خطی
۱۸۱	۴-۵ مسیر و بُرد در محیط پَسار خطی
۱۸۳	۴-۶ نیروی پَسار از مرتبه دوم سرعت
۱۸۴	۴-۶-۱ حرکت افقی با پَسار از مرتبه دوم سرعت
۱۸۵	۴-۶-۲ حرکت قائم در حضور نیروی پَسار مرتبه دو سرعت
۱۸۶	۴-۶-۳ حرکت افقی و عمودی با نیروی پَسار مرتبه دو سرعت
۱۸۷	۴-۷ حرکت در صفحه: مختصات قطبی، نگاهی دوباره
۱۹۰	مثال‌های تکمیلی
۱۹۲	مسئله‌ها
۱۹۸	حل مثال‌های تکمیلی
۲۰۷	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۵ پایداری انرژی و تکانه ۲۰۹

۲۰۹	۵-۱ قانون‌های پایداری
۲۰۹	۵-۱-۱ پایداری انرژی در یک بُعد
۲۱۴	۵-۱-۲ نیروهای پایستار
۲۱۵	۵-۱-۳ کار و انرژی پتانسیل
۲۱۷	۵-۲ حرکت در همسایگی نقطهٔ ترازمندی؛ نوسانگر هماهنگ
۲۲۱	۵-۲-۱ پاسخ معادلهٔ نوسانگر هماهنگ
۲۲۵	۵-۳ پایداری انرژی در سه بُعد
۲۲۵	۵-۳-۱ قانون پایداری انرژی در یک بُعد: چند مثال
۲۳۲	۵-۳-۲ پایداری انرژی در سه بُعد
۲۳۲	۵-۳-۳ نیروهای پایستار در سه بُعد
۲۳۶	۵-۴ تکانه
۲۳۶	۵-۴-۱ پایداری تکانه
۲۳۹	۵-۴-۲ پایداری تکانه در سامانه‌های بس ذره‌ای
۲۴۰	۵-۴-۳ حرکت موشک

۲۴۶	پیوست: پایداری انرژی و نیروهای پایستار در سه بُعد-بیانی دیگر
۲۵۰	مثال‌های تکمیلی
۲۵۳	مسئله‌ها
۲۶۳	حل مثال‌های تکمیلی
۲۷۵	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۶ حرکت نوسانی ۲۸۳

۲۸۳	۶-۱ معادله‌های دیفرانسیل خطی
۲۸۶	۶-۲ نوسانگر هماهنگ ساده
۲۸۹	۶-۳ نوسانگر میرا
۲۹۱	۶-۳-۱ تند میرایی
۲۹۲	۶-۳-۲ کند میرایی
۲۹۳	۶-۳-۳ میرایی بحرانی
۲۹۷	۶-۴ حرکت نوسانی واداشته و میرا
۳۰۲	۶-۵-۱ تشدید
۳۰۳	۶-۵-۲ فاز ϕ
۳۰۴	۶-۶ نوسانگرهای جفت شده
۳۱۲	مثال‌های تکمیلی
۳۱۳	مسئله‌ها
۳۱۶	حل مثال‌های تکمیلی
۳۲۰	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۷ گرانش، نیروهای مرکزی و قانون‌های کپلر ۳۲۵

۳۲۵	۷-۱ نیروهای مرکزی
۳۲۵	۷-۲ گرانش
۳۳۲	۷-۳ نیروهای کشندی
۳۳۰	۷-۳-۱ نیروی کشندی افقی
۳۳۲	۷-۳-۲ نیروی کشندی عمودی
۳۳۳	۷-۳-۳ حالت عمومی
۳۳۵	۷-۴ گشتاور: تکانه زاویه‌ای
۳۳۷	۷-۵ نیروهای مرکزی: پایداری تکانه زاویه‌ای
۳۴۱	۷-۶ پتانسیل مؤثر
۳۴۱	۷-۶-۱ نوسانگر هماهنگ همسانگرد

۳۴۴	۷-۶-۲ قانون‌های پایستگی و پتانسیل مؤثر
۳۴۷	۷-۷ گرایش؛ قانون‌های کیپلر
۳۴۸	۷-۷-۱ یافتن $r(t)$ و $\theta(t)$
۳۵۵	۷-۷-۲ مدارها
۳۵۶	۷-۷-۳ اثبات شکل مدارها
۳۶۰	۷-۷-۴ قانون‌های کیپلر
۳۶۲	مثال‌های تکمیلی
۳۶۲	مسئله‌ها
۳۶۷	حل مثال‌های تکمیلی
۳۶۸	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۸ سامانه دو جسمی؛ برخورد

۳۷۱	۸-۱ مختصات مرکز جرم و مختصات نسبی
۳۷۳	۸-۲-۱ چارچوب مرکز جرم
۳۷۶	۸-۲-۲ انرژی جنبشی
۳۷۸	۸-۳ برخورد
۳۷۸	۸-۳-۱ برخورد کشسان در یک بُعد
۳۸۰	۸-۳-۲ برخورد کشسان در دو بُعد
۳۸۲	۸-۴ فرایندهای ناکشسان ذاتی
۳۸۵	مثال‌های تکمیلی
۳۸۶	مسئله‌ها
۳۸۸	حل مثال‌های تکمیلی
۳۹۴	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۹ ایستایی‌شناسی جسم سخت

۳۹۷	۹-۱ مرکز جرم سامانه ذرات
۳۹۹	۹-۲ مرکز جرم جسم سخت
۴۰۴	۹-۳ ترازمندی جسم سخت؛ نیروهای خارجی و داخلی
۴۰۵	۹-۴ گشتاور نیرو و شرایط عمومی ترازمندی جسم سخت
۴۱۱	۹-۵ نیروهای واکنش در پیوندگاه‌های هموار و ناهموار
۴۱۴	۹-۶ اصل کار مجازی
۴۱۹	۹-۷ پایداری ترازمندی
۴۲۴	۹-۸ پیوست: ایستایی‌شناسی ریسمان معلق

۴۲۴	۹-۸-۱ پل معلق
۴۲۵	۹-۸-۲ زنجیر سنگین
۴۲۹	۹-۸-۳ محاسبه پارامتر زنجیر
۴۲۹	۹-۸-۴ مقدار تقریبی پارامتر C برای زنجیر کشیده شده
۴۳۱	۹-۸-۵ زنجیر سهمی
۴۳۲	مثال‌های تکمیلی
۴۳۴	مسئله‌ها
۴۳۹	حل مثال‌های تکمیلی
۴۴۵	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۱۰ حرکت جسم سخت: گشتاور لختی و تکانه زاویه‌ای ۴۴۹

۴۴۹	۱۰-۱ انرژی جنبشی چرخشی
۴۵۲	۱۰-۲ محاسبه گشتاور لختی جسم سخت
۴۵۸	۱۰-۳ قضیه محورها موازی
۴۶۱	۱۰-۴ قضیه محورها متعامد
۴۶۲	۱۰-۵ شگردی زیبا-روش میان‌بر
۴۶۷	۱۰-۶ گشتاور و تکانه زاویه‌ای
۴۶۷	۱۰-۶-۱ گشتاور
۴۶۸	۱۰-۶-۲ تکانه زاویه‌ای
۴۶۹	۱۰-۶-۳ چرخش حول محور z
۴۷۰	۱۰-۶-۴ حرکت عمومی در صفحه $x-y$
۴۷۲	۱۰-۶-۵ اجسام غیرتخت
۴۷۳	مثال‌های تکمیلی
۴۷۳	مسئله‌ها
۴۷۵	حل مثال‌های تکمیلی
۴۷۶	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۱۱ دینامیک چرخش ۴۷۹

۴۷۹	۱۱-۱ دینامیک چرخشی ($\vec{L}$ ثابت)
۴۷۹	۱۱-۱-۱ جرم نقطه‌ای، مبدأ ثابت
۴۸۳	۱۱-۱-۲ جسم بعدادار، مبدأ ثابت
۴۸۵	۱۱-۱-۳ جسم با بعد، مبدأ متحرک
۴۸۷	۱۱-۲ رابطه بین گشتاور و شتاب زاویه‌ای

۴۹۳	۱۱-۳ پایستگی تکانه زاویه‌ای
۴۹۷	۱۱-۴ کار و انرژی در حرکت چرخشی
۴۹۷	۱۱-۴-۱ کار در حرکت چرخشی
۴۹۸	۱۱-۴-۲ قضیه کار-انرژی در حرکت چرخشی
۵۰۰	۱۱-۵ غلتش
۵۰۹	۱۱-۶ غلتش همراه با لغزش
۵۱۴	۱۱-۷ برخورد و ضربه
۵۱۴	۱۱-۷-۱ برخورد
۵۱۸	۱۱-۷-۲ ضربه چرخشی
۵۱۹	۱۱-۸ ژيروسکوپ
۵۲۱	۱۱-۹ نکاتی پیرامون نقش نیروی اصطکاک در حرکت غلتشی بدون لغزش
۵۲۵	مثال‌های تکمیلی
۵۲۸	مسئله‌ها
۵۳۶	حل مثال‌های تکمیلی
۵۴۶	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

فصل ۱۲ چارچوب‌های شتاب‌دار و حرکت‌های مقید ۵۵۳

۵۵۳	۱۲-۱ حرکت ذره در چارچوب شتاب‌دار
۵۵۵	۱۲-۲ چارچوب‌های شتاب‌دار و درستی قانون‌های نیوتون
۵۵۷	۱۲-۳ چارچوب‌های چرخان: سرعت زاویه‌ای، آهنگ تغییر بردار
۵۶۰	۱۲-۴ شتاب؛ گرانش ظاهری
۵۶۳	۱۲-۵ نیروی کوریولیس
۵۷۱	مثال‌های تکمیلی
۵۷۱	مسئله‌ها
۵۷۳	حل مثال‌های تکمیلی
۵۷۴	آزمون‌های کوتاه چندگزینه‌ای

پاسخ مسئله‌های پایان فصل‌ها ۵۷۵

منابع ۵۸۹

نمایه ۵۹۱