



نسبیت خاص

تالیف:

والریو فارائونی

ترجمه:

پرویز گودرزی - فرامرز رحمانی

سرشناسه:	فارانونی، والریو
عنوان و نام پدیدآور:	Faraoni, Valerio نسبیت خاص / تالیف والریو فارانونی؛ ترجمه پرویز گودرزی، فرامرز رحمانی؛ ویراستار فنی سیدمحسن موسوی خوانساری.
مشخصات نشر:	بروجرد: دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری:	۲۹۷ ص.: مصور.
شابک:	۹۷۸-۶۲۲-۹۸۴۰۶-۳-۴
وضعیت فهرست نویسی:	فیا
یادداشت:	عنوان اصلی: Special relativity, 2013.
یادداشت:	واژه نامه.
موضوع:	نسبیت خاص (فیزیک)
موضوع:	Special relativity (Physics)
شناسه افزوده:	گودرزی، پرویز، ۱۳۵۹-، مترجم
شناسه افزوده:	رحمانی، فرامرز، ۱۳۵۸-، مترجم
شناسه افزوده:	دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)
رده بندی کنگره:	QC۱۷۳ / ۶۵
رده بندی دیویی:	۵۳۰ / ۱۱
شماره کتابشناسی ملی:	۸۴۶۰۵۱۵



نام کتاب "نسبیت خاص"

نویسنده	والریو فارانونی.
مترجم:	دکتر پرویز گودرزی - دکتر فرامرز رحمانی
ویراستار فنی:	دکتر سید محسن موسوی خوانساری.
طراح جلد:	آویژه
تاریخ انتشار:	تابستان - ۱۴۰۰
شمارگان:	۱۰۰۰
شابک:	۹۷۸-۶۲۲-۹۸۴۰۶-۳-۴
ناشر:	انتشارات دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)
نوبت چاپ:	اول
چاپ و صحافی:	آویژه
بها:	۶۰۰,۰۰۰ ریال
مرکز پخش:	کیلومتر ۳ جاده بروجرد - خرم آباد، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی (ره)
تلفن:	۰۶۶-۴۲۴۶۸۳۲۰

مسئولیت صحت مطالب کتاب برعهده نویسندگان است.

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

پیشگفتار نویسنده

کتاب نسبیت خاص بر حسب نیازی نگاشته شد که به یک منبع درسی در سطح متوسط برای درس نسبیت، به ویژه در دانشگاه‌های آمریکای شمالی احساس می‌شد. امروزه کاربردهای تکنولوژیکی نسبیت خاص در زندگی روزمره مثل سیستم جی پی اس، اسکنرهای PET و سایر تجهیزات و ابزار پزشکی به چشم می‌خورد. در بسیاری از دوره‌های درسی کالج‌ها فقط به مقدماتی از نسبیت خاص اشاره می‌شود. این مقدمات در یک دوره فیزیک مدرن ارائه می‌شوند و معمولاً دو فصل را به آن اختصاص می‌دهند. چنین مقدمات کوتاهی برای فیزیکدانان و دانشمندان نیازمند به دوره دانشگاهی مدرن، کافی نیستند. بنابراین این کتاب تعداد کمی از آموزگاران، آن را انکار خواهند کرد. دانشجویان معمولاً جنبه‌های اساسی نسبیت خاص را درک نمی‌کنند و آموزگاران، اغلب آن را به درستی ارائه نمی‌کنند. معمولاً یک چهارم بعدی به جهان به شکل اصطلاحی و محاوره‌ای عنوان می‌شود؛ درحالی‌که از بیان فرمالیسم ریاضی کاربردها و چارنانسورهای لازم برای درک و فرمول‌بندی ایده‌های فیزیکی چشم‌پوشی می‌شود؛ باین‌حال، دومین مورد، پیچیده نیست و برای دانشجویانی که یک دوره درسی جبر خطی را گذرانده‌اند، دست‌یافتنی است. برای بیشتر دانشجویان، درس فیزیک مدرن، تنها یک مقدمه‌ای بر نسبیت خاص است که در کل دوره تحصیلی می‌آموزند و در نتیجه، دانشجویان فیزیک و ریاضی (آنهایی که باید خوب بیاموزند) این موضوع پایه‌ای را از دست می‌دهند. این شکاف علمی، بسیار جدی است؛ زیرا بدون شک نسبیت خاص، یکی از بزرگ‌ترین دستاوردهای فکری بشر، همان چیزی است که دانشجویان به سبب آن وارد رشته فیزیک می‌شوند. از دید حسابگرانه یک آموزگار، نسبیت خاص در مقایسه با نسبیت عام یا فیزیک ذرات، ساده است؛ باین‌حال، بیشتر دانش‌آموزان علوم پایه از این بخش از تحصیلات خود غافل می‌شوند و یک بخش اساسی برنامه درسی فیزیک به دلیل ترس از ریاضیات، قربانی می‌شود. برای دانشجویانی که دوره درسی نسبیت عام را می‌گذرانند، شاید هم بعضی از دانشجویان سطح کارشناسی، این مشکل به سرعت حل می‌شود؛ ولی چنین دانشجویانی اندک‌شماری و دانشکده‌های فیزیک در بسیاری از دانشگاه‌های کوچک، درس نسبیت عام را یا ارائه نمی‌دهند یا به‌طور نامرتب ارائه می‌دهند. این وضعیتی رایج است و معلومات ریاضی دانشجویان سال دوم یا سوم، محدود است. فرمالیسم تانسورها برای مطالعه نسبیت خاص، لازم است و دانشجویان باید در طول این دوره آن را بیاموزند. یکی از مشکلات قاعده‌مندسازی، نبود کتاب درسی مناسب درباره نسبیت خاص در

سطحی بالاتر از سطح درس فیزیک مدرن است؛ با این حال، کتاب‌های کلاسیکی مانند مقدمه‌ای بر نسبیت خاص نوشته ولفگانگ ریندلر برای دانشجویانی در دسترس است که هنوز آمادگی روبرویی با نسبیت عام را ندارند.

یک مشکل دیگر این است که در یک دوره مقدماتی نسبیت خاص، معمولاً دانشجویان کارشناسی هنوز یک دوره جدی از الکترومغناطیس را نگذرانده‌اند و بر معادلات ماکسول تسلط ندارند؛ بنابراین، در کتاب‌های درسی معمولی از معادلات ماکسول به‌عنوان یک سکوی پرتاب به سوی انتهای نسبیت خاص استفاده می‌کنند که برای دانشجویان در این سطح غیرمؤثر است. در گذشته اگرچه خط فکر تاریخی و رویکرد سنتی آموزشی بر مبنای شروع از الکترومغناطیس و سپس رسیدن به نسبیت خاص بود و درست است که نظریه ماکسول، ظریف‌ترین و آشکارترین فرمول‌بندی خود را در نسبیت خاص می‌یابد، این نیست که الکترومغناطیس آن را به اوج می‌برد (پانولی این نکته را در اوایل بیان کرد). اگرچه نظریه ماکسول یک سکوی پرتاب مفید برای کشف نسبیت بود، نظریه اینشتین از ماهیت چهاربعدی جهان، فضا-زمان و هندسه لورنتسی آن، هم‌ارزی جرم و انرژی، مکانیک اصلاح‌شده و تقارن‌های اساسی این نظریه پرده بر می‌دارد. میدان ماکسول، تنها یکی از شکل‌های ممکن جرم - انرژی است که می‌تواند در فضای مینکوفسکی وجود داشته باشد. این نوع از نگرش، زمانی مشهود می‌شود که شخص یک دوره درسی در نسبیت عام یا فیزیک ذرات گذرانده باشد؛ ولی این با رویکرد کشف نسبیت خاص از طریق الکترومغناطیس عنوان‌شده در بسیاری از کتاب‌های درسی در تضاد است. به نظر می‌رسد یک رویکرد اصل موضوعی (بنداشتی) به نسبیت خاص که بر پایه اصل نسبیت و ثبات سرعت نور باشد، بهترین گزینه است. مفاهیم کلیدی نظریه نسبیت (نسبی بودن هم‌زمانی، اتساع زمان، انقباض طول) به‌راحتی از این دو اصل استخراج می‌شوند و این همان مسیر اصلی است که اینشتین دنبال کرد. یک رویکرد سازنده باید براساس الکترومغناطیس باشد و متوسط دانشجویان کارشناسی در این مرحله هنوز معادلات ماکسول را نسبتاً انتزاعی می‌بینند یا اصلاً ندیده‌اند. هر چند این امکان وجود دارد که تبدیل لورنتس را به‌عنوان تبدیلی که در الکترومغناطیس چارچوب‌های لخت را بدون تغییر به هم ربط می‌دهد، بدون در نظر گرفتن آشکار معادلات ماکسول معرفی کرد. مثالی که یک پدیده الکترومغناطیس ساده را نشان می‌دهد، ارائه خواهد شد و این راهی است که در این کتاب در پیش گرفته خواهد شد. ناوردایی لورنتسی معادلات ماکسول زمانی بررسی می‌شود که دانشجویان آن معادلات آشنا شد.

این کتاب در فصل‌های یک و دو، بحث را در یک سطح مقدماتی آغاز می‌کند. همه مفاهیم پایداری را شامس می‌شود که به‌طور معمول در سطح دانشگاهی عنوان می‌شوند؛ مانند تبدیلات لورنتس. سپس در فصل سوم، دانشجویان با دیدگاه جهان چهاربعدی از طریق این نکته آشنا می‌کند که تبدیلات لورنتس فضا و زمان را درهم می‌آمیزد. علاوه بر این، ما از نمودارهای فضا-زمانی در این بخش از کتاب برای تجسم بخشی به بحث‌های مربوطه استفاده می‌کنیم. پس از این مقدمات، فصل چهارم مربوط به بخشی است که در دوره‌های درسی سطح پایین‌تر از آن اجتناب می‌شود؛ در این بخش، فرمالیسم تانسورها بیان می‌شود. تجربه من در طی تدریس نسبیت خاص در کانادا می‌گوید وقتی دانشجویان متقاعد شود زمان و مکان مخلوط می‌شوند، برای درک جهان چهاربعدی انگیزه می‌گیرد و یکبار که این را شرح دهد، خواهد دید تا چه اندازه ساده است و ترس از تانسورها بی‌اساس است. فصل پنجم، مفاهیم اساسی علیت را معرفی می‌کند که معمولاً در دوره‌های درسی فیزیک مدرن به همراه جزئیات کاربرد عام تانسورها در فضای مینکوفسکی نادیده انگاشته می‌شوند. در ادامه، فصل ششم درباره مکانیک نسبیتی ذرات نقطه‌ای، چارنگانه، چارنیرو، هم‌ارزی بین جرم و انرژی و پاره‌ای از کاربردها بحث می‌کند. فصل هفتم، نور شناخت نسبیتی را شرح می‌دهد و هر زمان که ممکن باشد، به‌منظور درک و به‌خاطر سپاری، از شباهت حرکت بین ذرات جرم‌دار و بدون جرم استفاده می‌کند. ماده در فضای مینکوفسکی در فصل نهم بحث می‌شود. در اینجا تانسور انرژی - تکانه یک توزیع جرم - انرژی پیوسته و

بسیارگی هموردای آن معرفی می‌شوند و شرایط مختلف انرژی به‌طور پهنه ارائه می‌شود. اندازه حرکت زاویه‌ای به‌اختصار بحث می‌شود. این بخش با بحث‌هایی درباره میدان اسکالر، سیال کامل و میدان ماکسول دنبال می‌شود. بنابر دلایل آموزشی، بهتر است در دستگاه مختصات دکارتی کار شود. تمام موضوعات عنوان شده (به‌جز فرمالیسم تانسورها که تا حدی کلی است) به این دستگاه مختصات محدود می‌شوند. این محدودیت، معرفی ایده‌ها و مفاهیم نسبت خاص را ساده می‌سازد؛ ولی بسیار محدودکننده است.

پس در فصل دهم به مختصات عام، مشتق‌گیری هموردا و ژئودزی (با تأکید بر مهارت‌های محاسباتی به‌جای ثابت‌های دشوار) و فرمول‌بندی مجدد موارد پیشین، در دستگاه مختصات عام از طریق روابط هموردا می‌پردازد. در صورت کمبود وقت در طول دوره درسی می‌توان از این فصل گذر کرد.

ریاضیات اساسی برای مطالعه نسبت خاص، نسبتاً ساده است: مقداری حسابان و جبر خطی. مشکلات واقعی، مفهومی‌اند نه ریاضیاتی. دانشجوی تازه‌کار با حس فیزیکی خود می‌جنگد که از شهود روزانه‌اش در سرعت‌های پایین نسبت گرفته و با نتایج نسبت خاص در تعارض است. ریاضیات، ابزاری است که به درک ما کمک می‌کند و با ممنوعیت آن در ورود به دوره‌های درسی باعث می‌شود درک سطح پایینی از نظریه به وجود آید. بهتر است جایی برای آن در طول دوره درسی در نظر گرفته شود. اگر به جای رفتن به عمق، به بحث‌های مبهم پرداخته شود، قطعاً نمی‌توان مفاهیم اصلی نسبت را انتقال داد.

در هر فصل، بخشی به مسائل و تمرین‌ها اختصاص داده شده است. این تمرین‌ها یک بخش اصلی از کتاب درسی را تشکیل می‌دهند که از دانشجو خواسته می‌شود آنها را حل کند. راه‌حل‌های تمرین‌های انتخابی و نیز پاسخ‌های عددی به برخی دیگر، در آخر کتاب آمده‌اند.

برای اهداف آموزشی، در فرمول‌ها سرعت نور به شکل c نوشته شد و تنها در نمودارهای فضا زمانی، برابر با واحد، در نظر گرفته و چند مرحله ساده‌سازی در محاسبات برای درک بهتر وارد شد. ما از درک منسوخ‌شده جرم سکون، جرم دینامیکی، جرم طولی و جرم عرضی عنوان شده در کتاب‌های درسی قدیمی دوری می‌ورزیم. بخش‌های منسوخ‌شده با ستارک (*) اختیاری‌اند و می‌توان از آنها بدون به خطر افتادن درک مطالب چشم‌پوشی کرد. تمرین‌های مربوط به بخش‌های اختیاری نیز با ستارک مشخص شده‌اند.

شتربروک، تابستان ۲۰۱۳

والریو فارائونی

فهرست مطالب

ت	.....	پیشگفتار نویسنده
خ	.....	پیشگفتار مترجمان
ذ	.....	بمادها
۱۷	.....	فصل اول: بنیان‌های نسبیت خاص
۱۷	.....	۱-۱) مقدمه
۱۸	.....	۱-۲) اصول نسبیت
۲۱	.....	۱-۳) گروه‌ها: گروه گالیله (*)
۲۳	.....	۱-۴) قانون گالیله‌ای در جمع سرعت‌ها
۲۴	.....	۱-۵) درس‌هایی از الکترو مغناطیس
۲۶	.....	۱-۵-۱) اثر
۲۶	.....	۱-۵-۲) آزمایش مایکلسون - مورلی
۲۹	.....	۱-۶) اصول موضوعه نسبیت خاص
۳۱	.....	۱-۶-۱) نقش سرعت نور
۳۲	.....	۱-۷) نتایج اصول موضوعه
۳۲	.....	۱-۷-۱) نسبیت هم‌زمانی
۳۳	.....	۱-۷-۲) اتساع زمان
۳۸	.....	۱-۷-۳) پارادوکس دوقلو
۳۹	.....	۱-۷-۴) انقباض طول
۴۱	.....	۱-۷-۴-۱) پارادوکس ماشین درون گاراژ

۴۲	۱-۸) نتیجه‌گیری.....
۴۳	مراجع.....
۴۵	فصل دوم: تبدیلات لورنتس.....
۴۵	۲-۱) مقدمه.....
۴۵	۲-۲) تبدیلات لورنتس.....
۴۷	۲-۳) به دست آوردن تبدیلات لورنتس.....
۴۹	۲-۴) ویژگی‌های ریاضی تبدیلات لورنتس.....
۵۱	۲-۵) حد سرعت مطلق و علیت.....
۵۵	۲-۶) انقباض طول نتیجه‌ای از تبدیلات لورنتس.....
۵۶	۲-۷) اتساع زمان نتیجه‌ای از تبدیلات لورنتس.....
۵۷	۲-۸) تبدیلات سرعت و شتاب در نسبیت خاص.....
۵۹	۲-۸-۱) سرعت نسبی دو ذره.....
۶۱	۲-۸-۲) قانون تبدیل نسبیتی شتاب‌ها.....
۶۲	۲-۹) نمایش ماتریسی تبدیلات لورنتس.....
۶۳	۲-۱۰) گروه لورنتس.....
۶۶	۲-۱۱) تبدیل لورنتس به عنوان دورانی با زاویه موهومی و زمان موهومی.....
۶۸	۲-۱۲) سیستم جی‌پی‌اس GPS.....
۷۰	۲-۱۳) نتیجه‌گیری.....
۷۲	مراجع.....
۷۳	فصل سوم: جهان چهاربعدی.....
۷۳	۳-۱) مقدمه.....
۷۴	۳-۲) جهان چهاربعدی.....
۷۷	۳-۳) نمودارهای فضا-زمان.....
۸۳	۳-۴) نتیجه‌گیری.....
۸۴	مراجع.....
۸۵	فصل چهارم: فرمالیسم تانسورها.....
۸۵	۴-۱) مقدمه.....
۸۵	۴-۲) بردارها و تانسورها.....
۸۸	۴-۲-۱) تبدیلات مختصات.....
۸۹	۴-۲-۲) قرارداد اینشتین.....
۹۰	۴-۳) بردارهای پادوردا و هموردا.....

۹۵	۴-۴-۱) تقارن‌های تانسوری
۹۶	۴-۵) جبر تانسوری
۹۸	۴-۶) میدان‌های تانسوری
۱۰۱	۴-۷) توصیف مستقل از اندیس تانسورها
۱۰۶	۴-۸) تانسور متریک
۱۰۷	۴-۸-۱) متریک معکوس (متریک وارون)
۱۱۰	۴-۸-۲) دترمینان متریک
۱۱۰	۴-۹) نماد لوی - چویتا و تانسورهای چگالی
۱۱۳	۴-۹-۱) خواص نماد لوی چویتا در چهار بعد
۱۱۴	۴-۹-۲) عنصر حجم
۱۱۵	۴-۱۰) نتیجه‌گیری
۱۱۸	مراجع
۱۱۹	فصل پنجم: تانسورها در فضا زمان مینکوفسکی
۱۱۹	۵-۱) مقدمه
۱۱۹	۵-۲) بردارها و تانسورها در فضا زمان مینکوفسکی
۱۲۰	۵-۳) متریک مینکوفسکی
۱۲۴	۵-۴) ضرب اسکالر و اندازه بردار در فضا زمان مینکوفسکی
۱۲۷	۵-۵) بالا و پایین بردن اندیس‌ها در تانسور
۱۲۸	۵-۵-۱) کارکردن با تانسورها در فضا زمان مینکوفسکی
۱۲۹	۵-۶) ماهیت عینی جابر بردارها
۱۳۴	۵-۷) ابرسطح‌ها
۱۳۶	۵-۷) قضیه گاوس
۱۳۷	۵-۷) نتیجه‌گیری
۱۴۲	مراجع
۱۴۳	فصل ششم: مکانیک نسبیتی
۱۴۳	۶-۱) مقدمه
۱۴۴	۶-۱-۱) ذرات جرم‌دار
۱۴۷	۶-۲) دینامیک نسبیتی ذرات جرم‌دار
۱۴۹	۶-۲-۱) انرژی نسبیتی
۱۵۱	۶-۲-۲) خلق و فنای ذرات (آفرینش و نابودی ذرات)
۱۵۳	۶-۲-۳) توموگرافی (برش‌نگاری) گسیل پوزیترون (*)
۱۵۳	۶-۳) نیروی نسبیتی

۱۵۳	۶-۳-۱) چارنیروی نسبیتی
۱۵۴	۶-۳-۲) سه نیروی نسبیتی
۱۵۶	۶-۳-۳) انرژی جنبشی نسبیتی
۱۵۸	۶-۳-۴) حرکت با شتاب ثابت (افق ریندلر)
۱۶۲	۶-۳-۵) شتاب‌دهنده‌های ذرات
۱۶۴	۶-۴) تکانه زاویه‌ای یک ذره
۱۶۵	۶-۵) سیستم‌های ذرات
۱۶۶	۶-۶) پایستگی جرم - انرژی
۱۶۸	۶-۶-۱) هم‌جوشی هسته‌ای
۱۶۹	۶-۶-۲) شکافت هسته‌ای
۱۷۰	۶-۷) نتیجه‌گیری
۱۷۲	مراجع
۱۷۳	فصل هفتم: نورشناخت نسبیتی
۱۷۳	۷-۱) مقدمه
۱۷۳	۷-۲) نورشناخت نسبیتی: پرتوهای پوچ
۱۷۷	۷-۳) اثر کشندی
۱۷۷	۷-۴) اثر دوپلر
۱۸۰	۷-۵) ابیراهی (ابیراهی - کج‌روی)
۱۸۳	۷-۶) پرتودهی نسبیتی
۱۸۵	۷-۶-۱) تصویربرداری نوری در سینکروترون (*)
۱۸۶	۷-۷) نمود عینی اجسام گسترده
۱۸۸	۷-۸) نتیجه‌گیری
۱۸۹	مراجع
۱۹۱	فصل هشتم: اندازه‌گیری در فضای مینکوفسکی
۱۹۱	۸-۱) مقدمه
۱۹۱	۸-۲) اندازه‌گیری انرژی ذره توسط یک ناظر
۱۹۲	۸-۳) اندازه‌گیری بسامد توسط یک ناظر
۱۹۳	۸-۴) یک نسخه نظام‌مندتر برای اندازه‌گیری
۱۹۵	۸-۵) تجزیه $3+1$
۱۹۷	۸-۶) نتیجه‌گیری
۱۹۹	فصل نهم: ماده در فضای مینکوفسکی