فصل دوم
دینامیک ذره

مکانیک کلاسیک نظریه‌ای دینامیکی است که قرن هفدهم میلادی توسط دانشمندانی چون گالیله و نیوتن پیشنهاد شد و در قرون بعدی تکوین یافت و فرمولبندی‌های دیگری نیز از آن پیشنهاد شد. این نظریه به طرز شگفت انگیزی قادر است نحوهٔ تحول دستگاههای مکانیکی که در ابعاد ماکروسکپی آزمایشگاهی و در سرعتهای کم در مقایسه با سرعت نور قرار دارند را پیش بینی کند. مکانیک نیوتنی تنها یک نمونه از نظریه‌های دینامیکی است. فرمولبندی‌های لاگرانژی و هامیلتونی از مکانیک کلاسیک، مکانیک کوانتمی و نظریه میدانهای کوانتمی مثال‌های دیگری از نظریه‌های دینامیکی هستند. در نخستین بخش از این فصل ویژگیهای عام نظریه‌های دینامیکی را بررسی می‌کنیم و در ادامه فصل به بیان ویژگیهای مکانیک نیوتنی به عنوان یک نظریه دینامیکی می‌پردازیم.

۲-۲- نظریه دینامیکی

یک نظریه دینامیکی از رکن های مختلفی درست می شود که به قرار زیر هستند

۱- دستگاه دینامیکی - نخست باید مشخص کرد که نظریه دینامیکی مورد نظر قرار است چه دستگاه فیزیکی را توصیف کند. دستگاه دینامیکی ممکن است یک موجود فیزیکی واقعی و یا یک دستگاه ایده آل ذهنی باشد. ساده ترین دستگاه دینامیکی را "دستگاه بسیط" می نامیم. دستگاههای واقعی فیزیکی معمولاً ترکیب ساده یا پیچیده ای از دستگاههای بسیط هستند.

شناخت دستگاه دینامیکی در فراگیری یک نظریه بسیار مهم است. گاه دشواری درک یک نظریه در به فهمی آن است که اصولاً آن نظریه راجع به چه چیزی صحبت می کند. مثلاً گاهی مشکل درک مکانیک کوانتمی در همین نکته ساده است که دستگاه دینامیکی مورد بحث در مکانیک کوانتمی ذره نیوتنی نیست و چیز دیگری است.

۲- کمیت های دینامیکی - یک دستگاه دینامیکی می تواند در حالتهای مختلف قرار داشته باشد. کار نظریه دینامیکی آن است که معین کند دستگاه چگونه از حالتی به حالت دیگر تحول پیدا می کند. هر حالت دستگاه با مقداری متغیر یا کمیت مشخص می شود که آنها را با f_1 تا f_n نشان می دهیم. تعداد متغیرهای می تواند

محدود یا نامحدود باشد و اگر نامحدود باشد ممکن است شمارش پذیر یا شمارش ناپذیر باشد. متغیرهای دینامیکی کمیت های قابل اندازه گیری هستند و ممکن است هر بعد قید یکی داشته باشند.

۳- نظریه اندازه گیری - در یک نظریه دینامیکی باید گزاره های مشخصی وجود داشته باشد که معلوم کند کمیت های قابل اندازه گیری چه چیزهایی هستند و فرایند اندازه گیری چگونه می تواند به تعیین متغیرهای دینامیکی و یا ترکیب های ریاضی معینی از آنها منتهی شود. فراموش نکنیم که در هیچ یک کمیت ها با شیوه اندازه گیری آنها تعریف می شوند. شیوه اندازه گیری باید فرایندی عملگرایانه باشد. منظور از این گفته آن نیست که لزوماً در آزمایشگاه بشود آن را انجام داد بلکه آن است که پروسه اندازه گیری با گزاره های روشنی که تصور عمل کردن آنها عاری از تناقض و ابهام است توصیف شده باشد.

ممکن است روی یک دستگاه اندازه گیری های متنوعی بتوان تعریف کرد یا انجام داد. در نظریه اندازه گیری باید معلوم کرد که کدام فرایند های اندازه گیری باهم سازگارند. چه کمیتهایی را می توان همزمان اندازه گیری کرد و چه کمیتهایی را نمی توان باهم سنجید. همچنین نظریه اندازه گیری باید مشخص کند که فرایند اندازه گیری چه احتمال های احتمالی ممکن است روی دستگاه ایجاد کند.

پیش از ادامه این بحث لازم است یادآور شویم که برخی از ارکان یک نظریه دینامیکی ممکن است در ابتدا به صراحت مورد بحث واقع نشده باشد، اما به گونه‌ای تلویحی و ضمنی فرض های مشخص و قطعی در مورد آنها در نظر گرفته شده باشد. در ادامه این بحث خواهیم دید که به عنوان مثال در نظریه نیوتن فرض های ناخودآگاهی در مورد نظریه اندازه‌گیری وجود دارد که از ابتدای طرح نظریه گزاره های صریحی در مورد آنها بیان نشده اما با گذر زمان و با مطرح شدن نظریه های رقیب، قیر یکدانها متوجه فرض های ناگفته‌ای که در بطن آن نظریه وجود داشته است شده‌اند.

۴- پارامتر تحول -

فرض مشترک تمام نظریه های دینامیکی این است که متغیرهای دینامیکی به طور پیوسته تغییر می کنند. به عبارت دیگر هر دستگاه فیزیکی با طی کردن یک رونه پیوسته از حالتی به حالت دیگری می رود و باصطلاح پرش نمی کند. این مفهوم در بیان ریاضی به این شکل قابل طرح است که [redacted] کمیتهای دینامیکی f_1 تا f_n را توابعی پیوسته از یک متغیر [redacted] که خودش مقادیر پیوسته ای می گیرد فرض کنیم. به این کمیت پارامتر تحول می گوییم. معمولاً پارامتر تحول را زمان می گیریم و فرض می کنیم متغیرهای دینامیکی هرکدام تابعی پیوسته از زمان هستند. هدف نهایی یک تئوری دینامیکی پیش بینی تحول دستگاه است. به بیان دیگر می خواهیم بدانیم اگر متغیرهای دینامیکی

در شروع، مثلاً در لحظه t_0، مقادیر معین $f_1(t_0)=f_{01}$ تا $f_N(t_0)=f_{0N}$ را داشته باشند، با گذشت زمان و تحت شرایط فیزیکی معین، در لحظه دلخواه t مقادیر $f_1(t)$ تا $f_N(t)$ چه هستند.

با کمی دقت می توان دریافت که در واقع زمان مفهومی اضافه بر پارامتر تحول ندارد. زمان را از تحول می توان درک کرد و به آن مفهوم داد. بدون فرض وجود دستگاههای فیزیکی در حال تحول، زمان قابل تعریف نیست و نمی توان با شیوه‌ای عملگرایانه نحوهٔ اندازه‌گیری آن را تعریف کرد. بگذارید مرور مختصری کنیم بر چگونگی تعریف بازه‌های زمانی و نحوهٔ اندازه‌گیری آنها، تا بحث فوق روشن‌تر شود. فرض کنید می خواهیم بازهٔ زمانی بین دو رویداد معین A و B را تعیین کنیم. برای این کار یک سری رویداد معین تکرار شونده را در نظر می گیریم و تعداد دفعات تکرار آن را بین دو رویداد A و B می شماریم. این رویداد تکرار شونده مثلاً می تواند نوسان یک آونگ به طول معین باشد. بنابر این عملاً سنجش زمان یعنی مقایسه دو تحول، یکی تحول دستگاهی که از حالت A به حالت B رفته است و دیگری تحولی که شروع و انتهای آن مربوط به طی شدن دفعات معینی از نوسان آونگ است.

نکتهٔ دیگر حایز اهمیت آن است که یک نظریه دینامیکی متضمن هر دو گونه وجود متغیرهای دینامیکی $f_1(t)$ تا $f_N(t)$ است، اما ممکن است این متغیرها لزوماً و به طور مستقیم قابل اندازه‌گیری نباشند. نظریه اندازه‌گیری که قبلاً از آن یاد کردیم معلوم می کند که چه چیزی از دستگاه را می شود

اندازه گیری کرد. کمیتهایی که در یک سنجش یا اندازه گیری قابل تعیین هستند را مشاهده پذیر فیزیکی می نامیم. نظریه اندازه گیری مشخص می کند که در یک پیگیرنده‌ی مشخص از دستگاه در لحظه t حاصل سنجش مشاهده پذیرهای فیزیکی چیست.

۵- محیط و برهم کنش -

مجموعه عواملی فیزیکی که می توانند بر روی متغیرهای دینامیکی یک دستگاه اثر بگذارند و آنها را تغییر دهند، محیط می نامیم و این اثرگذاری را نیز برهم کنش می گوییم. عوامل محیطی لزوماً در کنار دستگاه یا در نزدیکی آن نیستند، ممکن است عواملی در فاصله دور نیز با دستگاه برهم کنش کنند. تا جایی که برهم کنش قابل اغماض نباشد آن عوامل را جزو محیط دستگاه می گیریم. معمولاً عوامل محیطی نیز خود با تعدادی متغیر دینامیکی توصیف می شوند، که آنها را $F_1(t)$ تا $F_k(t)$ می نامیم.

گاه یک دستگاه مرکب داریم که از تعدادی دستگاه بسیط تشکیل شده است. در این صورت هر بار یک دستگاه بسیط را در نظر می گیریم و سایر دستگاههای بسیط موجود در دستگاه مرکب را محیط به شمار می آوریم. سپس این کار را برای همه دستگاههای بسیط تشکیل دهنده دستگاه مرکب تکرار می کنیم. چنین دستگاهی را که از مجموعه‌ای از عوامل تأثیرگذار بر یکدیگر تشکیل شده یک دستگاه جفت شده می نامیم. در یک دستگاه جفت شده دینامیک اجزاء منفصل از هم را می توان جداگانه حل و بررسی کرد و

باید دینامیک دستگاه را باهم حل کرد.

ممکن است در محیط دستگاه مورد نظر عواملی وجود داشته باشد که دینامیک آنها از قبل برای ما معلوم است و هدف تعیین آنها نیست. مثلاً متغیرهای دینامیکی $F_1(t)$ تا $F_k(t)$ برای ما مشخص اند. در این حالت این متغیرها را خارجی می نامیم و با داشتن آنها سعی می کنیم تحول دستگاه مورد نظر خود را به دست آوریم.

۶- دستگاه آزاد.

قبل از آن که ببینیم نحوه برهم کنش عوامل محیط با دستگاه فیزیکی ما چگونه است، ابتدا باید نحوهٔ تحول دستگاه را در حالت "آزاد" توصیف کنیم. یعنی نظریه‌ای ارائه کنیم که در آن دستگاه منزوی و عاری از هرگونه برهم کنش با محیط توصیف شده باشد و تابعیت متغیرهای دینامیکی آن از پارامتر تحول (t, n) معلوم باشد.

۷- معادلات حرکت

پس از آنکه مشخص شد دستگاه در حالت آزاد چگونه تحول می کند باید ببینیم انحراف از حالت آزاد چگونه رخ می دهد. به بیان دیگر باید ببینیم عوامل محیطی چگونه بر اثر برهم کنش خود متغیرهای دینامیکی دستگاه را تغییر می دهند. این کار توسط معادلات ریاضی خاصی بیان می شود که در آن نحوهٔ تغییرات متغیرهای دینامیکی را برحسب پارامترهای دستگاه و عوامل محیطی بیان می کند. به این معادلات، معادلات حرکت دستگاه می گوییم. از آنجا که معادلات حرکت با تغییرات متغیرهای

دینامیکی سر و کار دارد، از نوع معادلات دیفرانسیل خواهد بود. بنابراین نهایتاً پس از توصیف کاملی از برهم کنش ها مجموعه‌ای از معادلات دیفرانسیل خواهیم داشت که مشتقات متغیرهای دینامیکی نسبت به پارامتر تحول را به یکدیگر و متغیرهای خارجی مرتبط می کند. چنانچه می دانیم معادلات دیفرانسیل به شرط داشتن مقادیر اولیه کمیتهای فیزیکی، یعنی با اطلاع از شرایط اولیه دستگاه به حل یکتایی خواهند رسید که فیزیک دستگاه را در تمام زمانهای بعدی به ما می دهد.

روشن است که یک نظریه دینامیکی باید به لحاظ ریاضی سازگار و کافی باشد، به این معنی که معادلات حرکت باید مجموعه‌ای از معادلات سازگار و نابه‌یی باشند که با شرایط اولیه معین به حل های فیزیکی یکتا و مشخص و [redacted] قابل قبول (به لحاظ ریاضی) برسند. به این لحاظ هر نظریه دینامیکی علی الاصول "تعین گرا" ست، یعنی آینده دستگاه را به طور قطعی تعیین می کند. روی کلمه علی الاصول تاکید می کنیم. این اصطلاحی است که در فیزیک زیاد به آن برخورد می کنیم. منظور از اینکه دستگاه را علی الاصول می توان به گونه‌ای تعین گرا یا نه مشخص کرد آن است که نظریه تعیین متغیرهای دینامیکی ذاتی اش را به شناس و اتفاق وانمی گذارد. با یک سری معین از کمیتهای دینامیکی و آهنگ تغییرات آنها در ابتدای حرکت می توان آنها را در انتهای تعیین کرد. هیچ منع نظری روی آنها نیست. مثلاً در نظریه گازها برای حرکت مولکول های یک گاز که تعداد آنها از مرتبه 10^{24} است

علی الاصول می‌توان با داشتن مکان و سرعت اولیه همه مولکول‌ها مکان و سرعت آنها را در هر لحظه دیگر تعیین کرد. اما این کار فقط علی الاصول قابل انجام است. در عمل با هیچ ابزاری نمی‌شود مکان و سرعت اولیه یا نهایی مولکول‌ها را سنجید. آنچه امکان سنجش آن وجود دارد کمیت‌های دیگری است که برحسب متغیرهای دینامیکی قابل بیان است. به عنوان مثال میانگین انرژی یا تکانه ذرات را می‌توان اندازه‌گیری کرد. این همان بخش حساسی است که نظریه اندازه‌گیری در مورد آن صحبت می‌کند.

ممکن است خواننده‌ای که چیزهایی درباره مکانیک کوانتمی شنیده باشد تصور کند که این نظریه غیر تعیین‌گرا است و فقط می‌تواند در مورد احتمال کمیت‌ها صحبت کند. واقع امر آن است که در مکانیک کوانتمی متغیرهای دینامیکی با متغیرهای متناظر با دینامیک نیوتنی تفاوت دارد. مکانیک کوانتمی برای متغیرهای دینامیکی خودش نظریه‌ای تعیین‌گرا است که شامل معادلات حرکت ریاضی سازگار و روشنی است که با حل آنها می‌توان از یک شرایط اولیه معین، متغیرهای دستگاه را در هر لحظه دلخواه تعیین کرد. مفاهیم احتمالاتی در جایی ظاهر می‌شوند که بخواهیم کمیت‌های کلاسیک را از روی متغیرهای دینامیکی نظریه مکانیک کوانتمی تعیین کنیم. این قبیل مطالب مضمون نظریه اندازه‌گیری در چارچوب مکانیک کوانتمی است.

۲-۳- مکانیک نیوتنی به عنوان یک نظریه دینامیکی -

در این بخش مکانیک نیوتنی را به صورت مثالی از یک نظریه دینامیکی در نظر می‌گیریم و ارکان نظریه را در آن بازشناسی می‌کنیم.

دستگاه بسیط دینامیکی در این نظریه ذره نام دارد. ذره مفهومی فیزیکی در ازای مفهوم ریاضی نقطه است. دستگاه مرکب دینامیکی از مجموعه‌ای از ذرات تشکیل می‌شود. متغیرهای دینامیکی این دستگاه محتویات ذره در فضای سه بعدی است، که تابعی از پارامتر تحول زمان هستند. یعنی دستگاه بسیط تک ذره‌ای با سه متغیر دینامیکی $x(t)$، $y(t)$ و $z(t)$ توصیف می‌شود. چنانکه به عنوان مثال از محتویات کروی استفاده کنیم به جای این سه متغیر $r(t)$، $\theta(t)$ و $\varphi(t)$ دستگاه را توصیف خواهند کرد.

نظریه اندازه‌گیری در چارچوب مکانیک نیوتنی شامل گزاره‌های بدیهی است که با درک شهودی ما از پدیده‌های ماکروسکپی سازگار است. بنابر نظریه نیوتن هیچ منع نظری برای تعیین x، y و z در هر لحظه دلخواه از زمان با هر دقت ممکن وجود ندارد. علی‌الاصول، یعنی بدون آنکه نظریه محدودیتی داشته باشد، می‌شود $x(t)$، $y(t)$ و $z(t)$ یعنی محتویات ذره در لحظه t_1 و نیز $x(t_2)$، $y(t_2)$، $z(t_2)$ را با هر دقت دلخواه تعیین کرد حتی اگر لحظات t_1 و t_2 بسیار به هم نزدیک باشند. منظور از کلمه علی‌الاصول آن است که ممکن است در مقام عمل محدودیتهای ابزار اندازه‌گیری دقت‌های ما را محدود کند، اما می‌توان امیدوار بود که با بهبود ابزار اندازه‌گیری عدم دقت ما در تعیین متغیرهای دینامیکی بدون

محدودیت کاهش یابد. چنانکه بعدها خواهید دید، نظریه مکانیک کوانتمی در همین گام با مکانیک کلاسیک تفاوت دارد. در مکانیک کوانتمی سنجش مکان یک ذره میکروسکپی، مثل الکترون، مستلزم انجام برهم کنشی با آن است که سرعت آن را به طور غیرقابل کنترلی تغییر می دهد. بنابراین اگر به عنوان مثال مختصه x ذره را در لحظهٔ t با دقت بسیار زیادی تعیین کردیم، عدم قطعیت بسیار زیادی در سرعت آن ایجاد کرده ایم که در نتیجهٔ آن مختصه x ذره در زمان t+Δt به شدت نامعین است.

پارامتر تحول در مکانیک نیوتنی زمان است. این کمیت مستقل از ناظر است و کمیتی جهان شمول است که همه ناظرها بر آن توافق دارند. آهنگ کارکردن ساعت ها مستقل از حرکت آنهاست و ناظرهای مختلف می توانند با ارسال علائمی با سرعت نامتناهی ساعتهای خود را باهم همزمان کنند. این مفاهیم در نظریه نسبیت دستخوش بازنگری می شود و خواهیم دید که محدودیت در سرعت ارسال علامتها از یک ناظر به ناظر دیگر باعث می شود هر ناظر اندازه گیری زمان مختص خودش را داشته باشد. در واقع همان طور که گفتیم اندازه گیری زمان محصول مقایسه تحول ها با یکدیگر است و چون هر ناظر توصیف خودش را از حرکت دستگاهها دارد، ممکن است سنجش های زمان از ناظری به ناظر دیگر متفاوت باشد. از این

حیث طبیعی به نظر می رسد که زمان پدیده ای مطلق نباشد و دیدگاه نسبیت به شهود منطقی انسان نزدیکتر باشد. به بیان دیگر مکانیک نیوتنی فرض می کند سیری از زمان وجود دارد که رویدادهای دنیای فیزیکی در لحظات مختلف آن واقع می شوند. تصور ناگفته فیزیک نیوتنی آن است که جهان دارای ساعتی فراگیر است که همه ناظرها مستقل از نحوه حرکت خود به اطلاعات آن دسترسی دارند.

مفهوم دیگری نیز در بطن مکانیک نیوتنی نهفته است که معمولاً در چارچوب این نظریه به صراحت ذکر نمی شود و آن فرض فضای مطلق نیوتنی است. بگذارید به این سئوال بپردازیم که آن دستگاه مختصاتی که مکان ذره نسبت به آن سنجیده می شود چیست؟ ساده ترین راه تصور از یک دستگاه مختصات آن است که آن را به یک جسم خاص متصل بگیریم. مثلاً می توانیم دستگاه مختصات وصل به زمین را در نظر بگیریم. اما در بحث ۱-۵ دیدیم که ناظرهای مختلف در اندازه گیری مکان، سرعت، شتاب و سایر مشخصات دینامیکی ذره با هم توافق ندارند. چه دلیلی دارد که دستگاه مختصات وصل به زمین برتر از مثلاً دستگاه مختصات وصل به ماه یا خورشید باشد. زمانی تصور می شد زمین مرکز عالم است و همه چیز نسبت به آن می چرخد. گالیله و نیوتن با این تصور خرافی

ستیز کردند و نتیجه آن شد که زمین و سیارات حول خورشید می چرخند؟
پس آیا خورشید مرکز عالم است و پایه دستگاه مختصات نیوتنی را
منطبق بر آن گرفت؟ پاسخ منفی است. امروز اطلاعات
بسیار دقیق تری از رصد ستارگان و کهکشان ها داریم و نیک می دانیم
که هر آنچه در جهان می بینیم تخته سنگی شناور در کیهان است
و هیچ ساحل آرامی در جهان نمی توانیم یافت. با محاسبات ساده
ریاضی می توانیم ارتباط های سازنده ای بین کمیتهای دینامیکی
دوره از دیدِ ناظرهای مختلف به دست آوریم، اما به راستی مشاهدات
کدام ناظر را پایه برای بیان قوانین حرکت ملاک قرار داد؟
فرض ضمنی و ناگفته مهم مکانیک نیوتنی آن است که یک
دستگاه مطلق نیوتنی وجود دارد که به مثابه یک ظرف عظیم جهانی
آن تخته سنگ های شناور را در خود جای داده است. اما ما که
در گوشه ای از دنیا بر یکی از این تخته سنگ ها، به نام زمین، سوار یم
چگونه می توانیم نشانه ای از دستگاه مطلق نیوتنی بیابیم و حرکت تخته
سنگ خود نسبت به آن را تعیین کنیم تا از طریق تصحیح مشاهدات
خود، یعنی حذف و جبران آثار ناشی از حرکت زمین نسبت به دستگاه
مطلق نیوتنی، اطلاعات ناب مربوط به حرکت اجسام از دیدِ ناظر
مطلق نیوتنی را به دست آوریم. هیچ نشانه امید بخشی برای

دسترسی به فضای مطلق نیوتنی و تبیین حرکت زمین نسبت به آن وجود ندارد. در واقع هیچ روش آزمایشگاهی برای کشف دستگاه مطلق وجود ندارد. درست به همین دلیل است که برخی از فیزیکدانهای بعد از نیوتن به این نتیجه رسیدند که به کلی از آن دست بکشند. اما نهایتاً به دلایل بسیاری از جمله در مقاصد مهندسی مربوط به حرکت ماهواره ها، موقعیت یابی حرکت هواپیماها و امثال این امور ناگزیریم تصحیحات ناشی از حرکت زمین را به حساب آوریم. به این منظور برای کلیه مقاصد عملی می توان دستگاه مختصات وصل به ستارگان دور دست را به عنوان کاندیدایی که با تقریب خوبی مشابه دستگاه مطلق نیوتنی است در نظر گرفت. این یک فرض مؤثر و مفید اما تقریبی است. در واقع فرض می کنیم به دلیل فاصله بسیار زیاد، هرگونه حرکت احتمالی آنها از دید ناظر ساکن نسبت به دستگاه مطلق نیوتنی در محل زمین قابل چشمپوشی است.

دستگاه آزاد در مکانیک نیوتنی زره ای عاری از برهم کنش است و ~~[illegible]~~ بنا به قانون اول نیوتن سرعت ثابت دارد. ذره در برهم کنش با محیط شتابدار است و اصطلاحاً می گوییم تحت اثر نیروی معینی از طرف محیط قرار دارد. توصیف کامل برهم کنش ذره با محیط در چارچوب مکانیک نیوتنی مستلزم مرور کوتاهی بر قوانین نیوتن است که در قسمت بعد خواهیم دید.

فصل چهارم: مکانیک نیوتنی سه عنصر اساسی دخالت دارند: قوانین حرکت، قوانین نیرو و بردار

۱- قوانین حرکت:

قانون های سه گانه نیوتن برای راهنمایی آشنا است. قانون اول حاکی از آن است که حرکت طبیعی اجسام حرکت بدون شتاب است. این توصیف، البته از دیدگاه یک ناظر لخت است. به بیان دیگر قانون اول نیوتن یک ناظر لخت را توصیف می کند. در اینجا ناظر لخت ناظری فرضی می شود که به جسم عاری از هرگونه برهم کنش شتاب صفر نسبت می دهد. البته چنین جسمی را نمی توان در آزمایشگاه مورد بررسی قرار داد. تنها می توان چنین جسمی را در فضای تهی از اجسام دیگر تصور کرد.

قانون دوم حاکی از آن است که از دید ناظر لخت وقتی که جسمی تحت تأثیر برهم کنش سایر اجسام واقع شده شتاب می گیرد. به بیان دیگر هرچه شتاب جسم بیشتر باشد برهم کنش قوی تر است. همچنین شتاب کمیتی برداری است. بنابراین طبیعی است که کمیتی برداری بیانگر برهم کنش روی جسم باشد. این کمیت را نیروی نامیم. به ازای یک نیروی معین اجسام مختلف شتاب های مختلفی می گیرند. بنابراین خاصیتی برای اجسام به بیانگر واکنش جسم به نیروی اعمال شده باشد. این خاصیت را با کمیتی به نام جرم توصیف می کنیم. به ازای یک نیروی معین

هرچه شتاب بزرگتر باشد می گوییم جرم جسم کمتر است. به این ترتیب شتاب ایجاد شده در یک جسم معین براثر برهم کنش با جسم خاص دیگر با نیروی برهم کنش متناسب و با جرم جسم نسبت عکس دارد به این ترتیب رابطه معروف $F=ma$ نتیجه می شود.

ظاهر به نظر می رسد مجموعه ای از فرض ها و تعاریف ما را به این رابطه رسانده است. اما در واقع اینکه این فرمولبندی به درد کار می کند حاکی از [redacted] آن است که قانون دوم نیوتن به راستی یک قانون طبیعت است. ضمن آنکه این قانون تمام راستای درست و پایه در کنار سایر گزاره ها و قوانین مرتبط با فرمولبندی نیوتنی دیده شود.

یک می دهد؟ اساسی که به جرم معنای بیش از یک تعریف صرف می دهد آن است که این کمیت ذاتی جسم است و به نوع برهم کنش آن با اجسام دیگر مربوط نیست. به بیان دیگر هر جسم در هر آزمایش فیزیکی همواره جرم یکسانی از خود نشان می دهد.

گزاره غیربدیهی دیگر که [redacted] به قانون دوم معنایی فراتر از تعاریف می دهد آن است که اگر جسم معین همزمان با چند جسم برهم کنش داشته باشد، نیروهای مختلفی که به آن وارد می شوند با هم جمع برداری می شوند. فرض کنید جسم ۱ با اجسام ۲ و ۳ برهم کنش کند. در یک شرایط معین به لحاظ مکان و سرعت اجسام برهم کننده نیرویی که جسم ۲ به جسم ۱ وارد می کند مستقل

از نیروی است که جسم ۲ بر جسم ۱ وارد می کند و برعکس. به عبارت دیگر برهم کنش های طبیعت را می توان با نیروهای دوجسمی توصیف کرد. به این ترتیب شتاب جسم از تقسیم حاصل جمع برداری نیروهای وارد بر جسم بر جرم آن به دست می آید:

$$m\vec{a} = \sum_i \vec{F}_i \qquad (1)$$

و بالاخره قانون سوم نیوتن یک قانون اساسی طبیعت را در مورد ماهیت برهم کنش اجسام بیان می دارد. بنا به این قانون نیروی که هر دو جسم به هم وارد می کنند مساوی یکدیگر و در جهات مخالف است. در بیان اولیه این قانون فرض می شد که اجسام به طور مستقیم و فوری به طور لحظه ای با هم برهم کنش دارند. این بیان در آزمایشهای معمولی با اجسام ماکروسکپی و در حد سرعتهای کم با تقریب بسیار خوبی درست است. چنانچه می دانیم برای دستگاهی از ذرات قانون سوم نیوتن مستقیماً به قانون پایستگی تکانه خطی منجر می شود و در واقع این دو قانون بیانهای متناوبی از یک حقیقت اند.

در یک نگاه بنیادی تر برهم کنش ذرات با یکدیگر از طریق میدانهاست. به عنوان مثال نیروی بین دو بار الکتریکی از طریق میدان الکتریکی که هر کدام از آنها در محل دیگری تولید می کنند مبادله می شود. در این دیدگاه اگر بارها حرکت داشته باشند

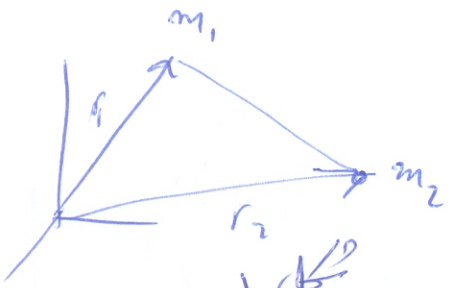
دیگر نمی‌تواند به طور لحظه‌ای موقعیت یکدیگر را درک کنند. هر ذره میدان الکترومغناطیسی تولید می‌کند، میدان در فضا منتشر می‌شود و ذره دیگر در هر لحظه تنها میدان الکترومغناطیسی را در محل خود حس می‌کند. به این ترتیب دیگر نمی‌توان به گزاره‌ای فیزیکی در مورد تکانه خطی ذرات اکتفا کرد. در اینجا قانون پایستگی تکانه خطی تنها برای مجموعهٔ ذرات و میدانها صادق است.

۲- قوانین نیرو

همانطور که گفته شد قوانین حرکت نیوتن به تنهایی نمی‌توانند به توصیفی کمی درباره حرکت اجسام منجر شوند. برای استفاده از قانون نیوتن در رابطه (۱) باید قوانین دیگر برهم‌کنش‌های F_i ناشی از برهم‌کنش جسم مورد نظر با سایر اجسام به اضافه آن را بیان کنیم. ساده‌ترین برهم‌کنش‌ها را جسم معین وارد می‌کند. به عبارت دیگر برهم‌کنش اجسام با یکدیگر به حالتی که در آنها "فعل و انفعال" به کار رفته است قابل توصیف است. مثلاً می‌گوییم جسم A به جسم B نیروی F_{AB} را وارد می‌کند که به طور معین به پارامترهای فیزیکی در جسم و محیط اطراف و به ویژه به پیکربندی آنها در فضا بستگی دارد. گزاره‌های با "فعل مجهول" در مورد نیروهایی که به یک جسم معین وارد می‌شود، ممکن است درست نباشند.

۲-۱- نیروی گرانش

نیوتن خود یک از قوانین اساسی نیرو را بیان کرد. وی با استناد از قوانین کپلر در حرکت سیارات به دور خورشید به فرض مشخصی در مورد نیروی گرانش بین آنها دست یافت رسید با تعمیم هوشمندانه آن به تمام اجسام عالم قانون گرانش عمومی خود را پیشنهاد داد. بنا به این قانون هر دو جسم در عالم با نیروی متناسب با عکس مجذور فاصله در امتداد خطی که آنها را به هم وصل می کند یکدیگر را جذب می کنند. شدت این جاذبه به خاصیت فیزیکی معینی در اجسام بستگی دارد که می گوییم آن را بار گرانشی بنامیم. منبع نیوتن در تشخیص این نکته این بود که بار گرانشی با همان کمیت جرم که در رابطه (۱) تعریف شده است متناسب است. اگر جرم m_1 در مکان $\vec{r}_1$ و جرم m_2 در مکان $\vec{r}_2$ باشد برای (شکل ۱) برای نیروی وارد به m_1 می توان گفت:



شکل ۱

$$\vec{F}_1 = -G\frac{m_1 m_2}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|^3}(\vec{r}_1 - \vec{r}_2) \qquad (۲)$$

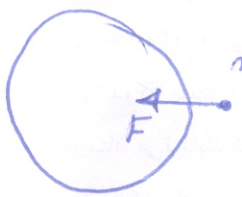
این که بار گرانشی با جرم متناسب است، مشاهده بسیار مهمی است. به عنوان مثال این امر باعث می شود تمام اجسام بر اثر نیروی گرانش زمین با شتاب یکسانی در یک محل معین سقوط کنند.

قانون نیروی که در رابطه (۲) بیان کردیم یک قانون بنیادی طبیعت است. قوانین نیروی بنیادی طبیعت را تنها می‌توان برای ذرات سازنده‌ٔ طبیعت به سادگی بیان کرد. دستگاه‌های مرکب از تعداد بسیار زیادی ذره تشکیل شده‌اند. برهم‌کنش اجسام ماکروسکوپی با یکدیگر حاصل جمع‌زنی تعداد به مراتب بیشتری از برهم‌کنش دو به دوی ذرات تشکیل‌دهنده‌ٔ آنهاست. در برخی موارد می‌توان با استفاده از تقریب‌های مناسب حاصل این جمع‌زنی را بیان کرد. به عنوان مثال نیروی گرانش ناشی از یک تودهٔ کروی عظیم جرم در راستای شعاع است و اندازهٔ نواصل کرهٔ جرم در تماس با شعاع کره در سطح آن و برای هر جسمی به جرم m با رابطه

$$\vec{F}=m\vec{g} \qquad (۳)$$

بیان می‌شود که در آن $\vec{g}$ شتاب گرانش نام دارد و مقدار آن در سطح کره‌ای به شعاع R و جرم M برابر است با

$$g=\frac{GM}{R^2} \qquad (۴)$$



۲-۲- نیروهای بنیادی

اما کار همیشه به این سادگی نیست. در طبیعت به جز گرانش سه برهم‌کنش بنیادی دیگر میان ذرات سازنده ماکروسکوپی

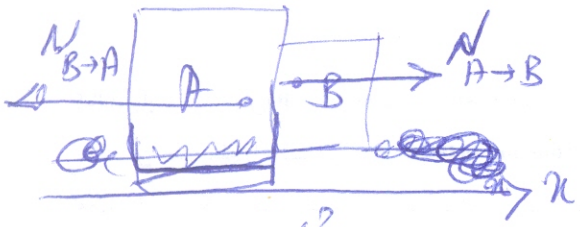
جهان شناخته شده است: برهم کنش الکترومغناطیسی، برهم کنش ضعیف و برهم کنش قوی. برهم کنش های ضعیف و قوی در ابعاد هسته ای و کوچکتر از آن قابل ملاحظه است. عمدهٔ پدیده هایی که در برهم کنش های اجسام ماکروسکپی دیده می شود ناشی از برهم کنش های الکترومغناطیسی است. ساختارهای اتمی، مولکولی، بلوری و تمام تجلیات این ساختارها در دنیای روزمره از برهم کنش الکترومغناطیسی نتیجه می شوند. البته درک مستقیم فیزیک پدیده های ماکروسکپی از طریق جمع زنی و متوسط گیری برهم کنش های میکروسکپی کار آسانی و عملی نیست. این وظیفه خطیری است که مکانیک آماری به عهده دارد و در مدارد محدودی با موفقیت همراه بوده است.

در مسائل مکانیک کلاسیک با نیروهایی برخورد می کنیم که برای آنها قوانین تجربی ماکروسکپی به کار می بریم که از آن جمله اند نیروهای کشسانی و اصطکاک. منشأ میکروسکپی این نیروها نیز برهم کنش های الکترومغناطیسی هستند ولی امکان آنکه قوانین نیروی مربوط به آنها را از قوانین بنیادی نیرو به دست آوریم عملاً وجود ندارد و اصولاً نیازی هم به چنین کاری نیست. مهمترین مواردی که در مسایل با آنها برخورد می کنیم از این قرار هستند:

۲-۳- نیروی عمودی سطح:

هر دو جسم که با هم در تماس باشند علی الاصول می کوشند در امتداد عمود بر سطح تماس یکدیگر را دفع کنند. در مورد این نیرو دو چیز روشن است، یکی امتداد نیرو که عمود بر سطح تماس است و دیگری لحظه آن که طوری است که [illegible] دو جسم می خواهند

یکدیگر را برانند. در شکل ۲ فرض
کنید سطح تماس اجسام A و B عمود بر
محور x و جسم B سمت راست
جسم A (سمت +x) قرار داشته باشد.



شکل (۲)

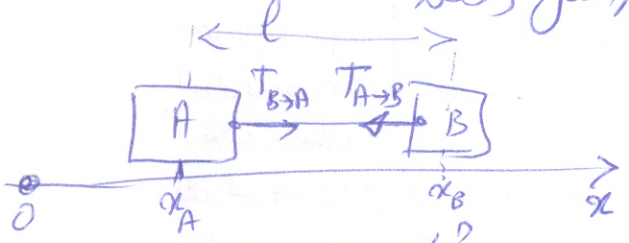
در این صورت نیروی عمودی سطح که A بر B وارد می‌کند، در امتداد محور x و در جهت منفی ($N_{A\to B}$) است.
طبق قانون سوم نیوتن جسم B نیز بر A نیروی $N_{B\to A}$ را وارد می‌کند که
برابری و خلاف جهت $N_{A\to B}$ است. چنانچه هیچ اتصال دیگری بین
A و B به غیر از تماس سطحی برقرار نباشد $N_{A\to B}$ هرگز نمی‌تواند
در جهت منفی محور x باشد. این حال معنایی است که با بیان
عامیانه به این شکل بیان کردیم که A و B یکدیگر را می‌رانند. حل
این مسئله با یک قفل و لوله (مثل اسباب بازی خودروها)
به هم متصل بودند امکان آنکه نیروی $N_{A\to B}$ در هر دو جهت باشد
وجود داشت.

آنچه در مورد نیروی عمودی سطح روشن شد مقدار آن است.
این نیرو از جنس نیروهای قیدی است که مقدار آنها از حل مسئله
به دست می‌آید. در این مورد در بخش‌های بعدی بیشتر خواهیم گفت.
اگر [illegible] دقیق صحبت کنیم نیروی عمودی سطح از جنس
نیروهای کشسانی است که به واسطه تغییر شکل اندک سطح اجسام
به وجود می‌آید. برای اجسام صلب فرض می‌کنیم این تغییر شکل آن‌قدر
کوچک است که در مقابل جابه‌جایی‌های اجسام و ابعاد آنها قابل

چشم پوشی است. به همین دلیل نمی توانیم مقدار نیروی عمودی سطح را از روی اندازه تغییر شکل آنها در مسئله به حساب آوریم.

۲-۴- نیروی کشش نخ:

اگر دو جسم با نخ به یکدیگر وصل شده باشند، هنگامی که نخ در حالت کشیده شده، باشد می تواند نیروی در امتداد نخ بین دو جسم مبادله کند. جهت این نیرو کششی است، یعنی دو جسم با نخ می توانند یکدیگر را بکشند. آنها با نخ نمی توانند هم را هل دهند.



شکل ۳

در شکل ۳ نخی که دو جسم A و B را به هم وصل کرده در حالت کشیده شده و به موازات محور x است.

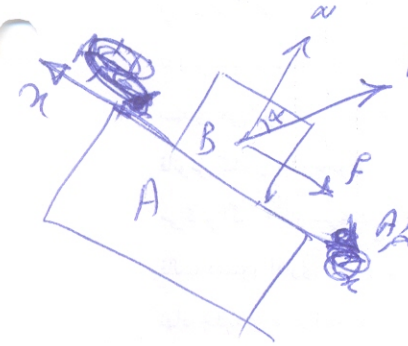
نیروهای $T_{A\to B}$ و $T_{B\to A}$ به ترتیب در جهت $(-x)$ و $(+x)$ دو جسم را به سمت هم می کشند و طبق قانون سوم نیوتن مقدار آنها برابر است. در اینجا جرم نخ را ناچیز فرض کرده ایم. اگر نخ جرم دار باشد علاوه بر آنکه نیروی وزن آن را باید به حساب آورد، نیروهای دو سمت آن را نیز نمی توان برابر دانست و باید برای هر جزء نخ قانون حرکت نیوتن را جداگانه به کار برد.

نیروی کشش نخ نیز از نوع نیروهای قیدی است و مقدار آن از حل مسئله به دست می آید. این نیرو نیز ناشی از کشسانی نخ است، اما معمولاً مقدار تغییر طول ناشی از کشسانی در مقابل طول نخ و ابعاد

مسئله به قدری ناچیز است که از آن چشم می‌پوشیم. به عبارت دیگر نمی‌توانیم اثر این نیرو را در مسئله با به حساب آوردن تغییر طول فنر با یک رابطهٔ کمّی بیان کنیم. در مورد قیدی بودن این نیرو نیز در بخش بعد توضیح خواهیم داد.

۲-۵- اصطکاک: یا می‌توانند بلغزند،

اجسام جامدی که بر روی هم می‌لغزند باهم اصطکاک دارند.



(شکل ٤)

به طور کلی هر دو جسم جامدی که با هم در تماس باشند، مثل اجسام A و B در شکل ٤، می‌توانند علاوه بر نیروی عمودی سطح N، نیروی f به مماس سطح تماس را نیز به هم وارد کنند، که آنرا اصطکاک می‌نامیم. در حالتی که دو جسم روی هم بلغزند اصطکاک (f_k) را جنبشی و در حالتی که نسبت به هم ساکن باشند آن را ایستایی (f_s) می‌نامیم. منظور از ساکن یا متحرک بودن هر جسم نسبت به دیدِ یک ناظر دیگر ساکن یا متحرک باشند. منظور آن است که به عنوان مثال از دید ناظر متصل به جسم A، جسم B حرکت دارد یا نه. اگر مثلاً ناظر واصل به A شده، گفته که جسم B در امتداد محور x در حال لغزش روی جسم A است آنگاه نیروی اصطکاک وارد شده از A به B، مطابق شکل ٤، در خلاف جهت این حرکت است. مقدار این نیرو تنها بستگی به اندازهٔ سرعت حرکت نسبی دو جسم دارد و نیز از اندازهٔ سطح، یا کم و زیادی تماس مستقل است. تجربه

نشان می‌دهد که اندازهٔ f_k یا اندازهٔ نیروی عمودی سطح، N، متناسب است به طوری که برای اغلب مسائل عملی می‌توان از قانون نیروی تجربی

$$f_k = \mu_k N \qquad (5)$$

استفاده کرد که در آن μ_k ضریب اصطکاک جنبشی نام دارد. رابطه (5) یک قانون بنیادی طبیعت نیست و اعتبار آن کاملاً تجربی و موردی است. این رابطه، رابطه‌ای بین اندازهٔ دو نیرو است که در مورد طبیعت آنها قبلاً توضیح داده شد. بنابراین رابطه نیروی f_k را در شکل ۴ داریم:

$$tg\alpha = \mu_k \qquad (6)$$

لازم به ذکر است که نیروی اصطکاک جنبشی به رابطهٔ طبیعت آن یک نیروی رابطه به سرعت است.

چنانچه اجسام B و A در شکل ۴ نسبت به هم ساکن باشند (هرچند هر دوی آنها نسبت به یک ناظر دیگر در حال حرکت باشند) علی‌الاصول لازم است برهم‌کنش سطحی آنها شامل مؤلفه‌ای موازی سطح باشد تا از لغزش آنها بر روی یکدیگر جلوگیری کند. این نیروها اصطکاک ایستایی f_s است. برخلاف اصطکاک ایستایی که برای آن یک رابطه ارائه کردیم (رابطه 5) برای نیروی اصطکاک ایستایی نمی‌توانیم یک رابطه ارائه کنیم. به بیان دیگر f_s یک نیروی قیدی است که مقدار آن باید از حل مسئله به دست آید. تنها نیرویی که از قبل برای این نیروها می‌دانیم ذکر کنیم آن است که باید به موازات سطح تماس دو جسم باشد، اما جهتی راجع به سوی آن نیز نمی‌توان

از قبل تانوی اعمال کرده. به عنوان مثال اگر سطح تماس اجسام A و B در شکل ۴ صفحه xy باشد و این دو جسم در حرکت پیچیده‌ای شرکت داشته باشند f_s در صفحه xy است اما مقدار و جهت آن ممکن است هر چه باشد تا دو جسم بر روی هم سُر نخورند.

با این وجود ممکن است اعمال این قید که دو جسم روی هم سر نمی‌خورند در مواردی مستلزم نیروی نسبتاً بزرگی در امتداد سطح تماس باشد، که نیروی اصطکاک ایستایی را وادار به تأمین کنندهٔ آن باشد. به عبارت دیگر برای نیروی اصطکاک ایستایی یک مقدار بیشینه وجود دارد که عبور از آن عملاً ممکن نیست. این مقدار بیشینه نیز ~~[illegible]~~ بنا به تجربه معمولاً به نیروی عمودی سطح بستگی دارد و آن را می‌توان برابر با N گرفت که μ_s ضریب اصطکاک ایستایی نام دارد. بنابراین نیروی اصطکاک ایستایی عملاً در نامساوی

$$f_s \leq \mu_s N \qquad (۷)$$

صدق می‌کند. اما نباید فراموش کرد که یک نامساوی ارزش محاسباتی یک تساوی را ندارد. در عمل رابطه (۷) را باید ابتدائاً در حل یک مسئله مکانیک نادیده گرفت و از سایر داده‌های مسئله و قوانین فیزیک به تعداد کافی معادلات لازم برای حل مسئله فراهم کرد. سپس اصطکاک ایستایی و نیروی عمودی سطح را که هر دو قیدی گسسته از حل مسئله به دست آورد و نهایتاً نامساوی (۷) را تحقیق کرد. این نامساوی بیانگر آن است که اگر ساکن مانند اجسام A و B