# فهرست مطالب


**پیش‌گفتار** ..... ۱۱

**فصل ۱** ..... **بی‌تقارنی طبیعت** ..... ۱۷

شناسایی انرژی ..... ۲۰

قوانین ترمودینامیک ..... ۲۵

انقلاب‌های بی‌تقارنی ..... ۲۹

شناسایی بی‌تقارنی ..... ۳۳

**فصل ۲** ..... **نشانه‌های دگرگونی** ..... ۴۳

ماهیت گرما و کار ..... ۴۳

دانه‌های دگرگونی ..... ۴۵

به سوی تباهی ..... ۵۰

اِنتروپی ..... ۵۳

اندازه‌گیری انتروپی ..... ۵۸

محوشدن کیفیت ..... ۶۲

سقف‌های کارایی ..... ۶۴

شکافتن پوسته ..... ۶۸

**فصل ۳** ..... **فروغلتیدن در آشوب** ..... ۷۱

درون انرژی ..... ۷۲

دما ..... ۸۴

جهت دگرگونی طبیعی ..... ۸۷

فرایندهای طبیعی ..... ۹۴

**فصل ۴** **شمارش آشوب** ۹۷
دیوِ بولتسمان ۹۸
قفس دیو ۱۰۶
آشوب، همدوسی، و تباهی ۱۱۱
**فصل ۵** **توان آشوب** ۱۱۷
کارنو زیر میکروسکوپ ۱۱۸
موتور استرلینگ ۱۲۵
درونسوزی ۱۳۳
توان توربین ۱۴۲
پیش به سوی همدوسی ۱۴۷
**فصل ۶** **تبدیل‌های آشوب** ۱۴۹
تبدیل‌های شیمیایی ۱۵۰
سوزاندن آهن ۱۵۵
خنک‌شدن در نقش گرم‌شدن ۱۶۲
سرعت دورریزی ۱۷۱
آشوب و نظم ۱۷۵
فصل **۷** **توان‌های دما** ۱۷۷
حیات عادی ۱۷۹
به دست‌آوردن سرما ۱۸۰
نخستین کاستن از توان ۱۹۰
دومین کاستن از توان ۱۹۵
کاستن از توان پایینی ۱۹۸
توان‌های داغ‌تر ۲۰۶

داغ‌تر از بی‌نهایت ..... ۲۰۸
به سوی حیات ..... ۲۱۷
**فصل ۸ آشوب سازنده** ۲۱۹
پدیدارشدن ساختار ظریف ..... ۲۲۰
پروتئین‌ها ..... ۲۲۴
انرژی آزاد ..... ۲۳۰
واکنش‌های غیر طبیعی حیات ..... ۲۴۰
الکتروشیمی حیات ..... ۲۴۴
**فصل ۹ الگوهای آشوب** ۲۵۱
ساختار ..... ۲۵۲
ساختارهای ناپدیدشونده ..... ۲۵۵
پدیدارشدن پیچیدگی ..... ۲۶۴
تقدیس موتور بخار ..... ۲۷۱
**پیوست ۱ یکاها** ۲۷۵
**پیوست ۲ روابط رسمی** ۲۷۸
ترمودینامیک ..... ۲۷۸
دما ..... ۲۸۳
**پیوست ۳ منابع** ۲۸۵

# پیش‌گفتار

هیچ قسمتی از علم به اندازه‌ی قانون دوم ترمودینامیک در آزادسازی روح آدمی سهم نداشته، و در عین حال کم‌تر بخشی از علم به این اندازه مبهم مانده است. سخن گفتن از قانون دوم همانا و به ذهن رسیدن موتورهای بخار بزرگ، ریاضیات عالی، و انتروپی به دشواری قابل فهم همان. اگر آزمون باسوادی سی. پی. اسنو را پیش بکشیم که در آن ندانستن قانون دوم هم‌ارز با نخواندن آثار شکسپیر فرض شده است، افراد زیادی سربلند بیرون نخواهند آمد.

در این کتاب امید من بر آن است که در جهت پرده برداشتن از کارکرد این قانون، و نشان‌دادن گستره‌ی کاربردهای آن، گامی بردارم. بحث را با موتورهای بخار، و مشاهدات دقیق دانشمندان اولیه آغاز می‌کنم، و آن را با بررسی فرایندهای حیات به پایان می‌برم. با نگرش به فرمولبندی کلاسیکی این قانون به بررسی مکانیسم آن می‌پردازیم. پس از پایان این مبحث در می‌یابیم که درک آن تا چه حد آسان، و کاربردهای آن تا چه حد گسترده است. راستش را بخواهید، تفسیر قانون دوم بر حسب رفتار مولکول‌ها نه تنها سر راست است (و به نظر من درک آن از قانون اول که همان پایستگی انرژی باشد بسیار ساده‌تر)، بلکه بسیار توانمندتر هم هست. خواهیم دید که بینشی که این قانون فراهم می‌کند، به ما اجازه می‌دهد که به ورای ترمودینامیک کلاسیک برویم، تا به فهم تمام فرایندهایی که زیربنای غنای جهان را می‌سازند دست یابیم.

یک ویژگی این رهیافت آن است که موتور بخار را، که دانش ما از قانون دوم نشأت گرفته از آن است، به عنوان وسیله‌ای نشان می‌دهد که

به آشکارترین شیوه برگشت‌ناپذیری اساسی جهان را مدلسازی می‌کند. از آن‌جا که موتور بخار دربرگیرنده‌ی ویژگی اصلی تمام دگرگونی در شیوه‌ای بسیار ساده است، فیزیکدانان سده‌ی نوزدهم توانستد غبار فنی پیرامون این موتور را پراکنده سازند، و به اصول دگرگونی در تمامی شکل‌هایش دست یابند. سپس با بینش حاصل، دست‌یابی به مثال‌های ظریف هرچه بیش‌تری که در آن‌ها سادگی در لفافه‌ای پیچیده شده بود، و بعد گشودن آن لفافه و مشاهده‌ی دوباره‌ی سادگی، امکان‌پذیر شد. بدین ترتیب می‌توانیم رویدادهای زیست‌شناختی را به فرایندهایی مرتبط کنیم که در سادگی محض توسط موتور بخار نشان داده شدند. ما به این سفر، از موتور بخار تا مرز آگاهی خواهیم رفت.

یکی از دشواری‌های پرداختن به ترمودینامیک، و به ویژه قانون دوم، خواه به شکل کلاسیک خواه به شکل آماری، آن است که این موضوع از ذاتی ریاضی برخوردار است. در صفحات آتی کوشیده‌ام که از ریاضیات بپرهیزم، و هرچند مواردی نادر وجود دارد که در پرداختن به نکته‌ای ویژه باید معادله‌ای مطرح شود، پیش زمینه‌ی علمی بسیار اندکی را فرض کرده‌ام. بدین ترتیب این شیوه، به غیر از چند مورد اندک، باید برای خواننده‌ی علاقه‌مند، با هر مقدار عدم آمادگی علمی، خوشایند باشد. از دارنده‌ی اطلاعات علمی به دلیل آهنگ آهسته‌ی پیشروی در مواردی چند، پوزش می‌خواهم، اما امیدوارم که حتا چنین خواننده‌ای در دیگر مراحل متن با نگاهی تازه از آن‌چه که در جهان می‌گذرد، پاداش خود را دریافت دارد.

آگاهم که در مطلبی که عرضه می‌دارم جا افتادگی عمده‌ای وجود دارد: به عمد ارجاع به ارتباط بین *نظریه‌ی اطلاعات* و انتروپی را کنار گذاشته‌ام. از یک سو موافقم که اصول و ریاضیات نظریه‌ی اطلاعات را می‌توان تا حد زیادی به فرمولبندی ترمودینامیک و توصیف محتوای آن منتسب کرد. از دیگر سو، به نظرم این خطر وجود دارد که چنین کاری به ایجاد این دید منجر شود که انتروپی نیازمند وجود نوعی باشنده‌ی آگاهِ قادر به «اطلاعات» داشتن یا تا حدی «ناآگاه» بودن است. بنابراین تا رسیدن به این خیال که انتروپی کاملا در ذهن ماست، و

لذا جنبه‌ای است از بیننده، فاصله‌ای نمی‌ماند. من برای چنین پریشان‌گویی‌هایی وقت نمی‌گذارم و می‌کوشم که از چنین عقاید متافیزیکی دوری جویم. به همین دلیل هرگونه بحثی در ارتباط با همانندی‌های بین نظریه‌ی اطلاعات و ترمودینامیک را کنار گذاشته‌ام.

ساختار بحث به این قرار است. از مشاهدات مربوط به موتور بخار (فصل ۱)، می‌بینیم که از ترمودینامیک اولیه عصاره‌ی قانون دوم پدیدار می‌شود (فصل ۲). سپس به دل ماده می‌رویم (فصل ۳)، و می‌بینیم که در سطح رفتار ذرات، قانون دوم از فرمولبندی ساده و بسیار ثمربخشی برخوردار است. سپس (در فصل ٤) به کند و کاو دامنه‌ای می‌پردازیم که این بینش کیفی را می‌توان به صورت کمّی بیان کرد، و این همان جایی است که سر و کله‌ی اندکی ریاضیات پیدا می‌شود (ولی برای بقیه‌ی مطالب کتاب حیاتی نیست). با دست‌یافتن به ایده‌های زیربنایی، به موتور بخار و فرزندان آن باز می‌گردیم (فصل ۵) و می‌بینیم که چگونه گرما را به کار می‌گیرند. با توضیح‌دادن تولید کار، به تولید ماده بازمی‌گردیم (فصل ٦) و می‌بینیم که ایده‌های نهفته در فیزیک به کار شیمی نیز می‌آیند. ایده‌ای که آرام آرام در این متن شکل می‌گیرد، ایده‌ی *ساختار* است. هنگامی که به نقشی که قانون دوم در فیزیک و شیمی ساده ایفا می‌کند پی‌بردیم، می‌بینیم که چگونه نظم ساختاری را می‌توان به شیوه‌های گوناگون برقرار ساخت: با دگرگونی فیزیکی، به ویژه سردکردن (فصل ۷) و با دگرگونی شیمیایی (فصل ۸). در فصل ۸ همچنین خواهیم دید که چگونه قانون دوم مسئول پدیدارشدن شکل‌های منظم ظریفی است که مشخصه‌ی حیات به شمار می‌روند. سپس سرانجام (فصل ۹) نگاهی به عقب می‌اندازیم تا ببینیم تا چه حد پیش رفته‌ایم، تا به درکی از نسخه‌ای ژرف از ایده‌ی «ساختار» دست یابیم، و ببینیم چگونه این نکته از قاعده‌ی قانون دوم سر بر می‌آورد. پیوست‌هایی هم در انتها آورده شده‌اند: یکمی برای توصیف یکاهای انرژی و برخی اطلاعات مرتبط؛ دومی برای گشت و گذاری سریع در ترمودینامیک رسمی واقع در پس زمینه‌ی بحث.

علاقه‌ی من به قانون دوم سر دراز دارد، ولی دو جلسه در انسجام

بخشیدن به این اندیشه‌ها یاری رساند. یکمی توسط الکساندرا کورن‌هاوزر در یوگوسلاوی {سابق}، و دومی توسط جرج مارکس در مجارستان ترتیب داده شد. مکس ویتبی از BBC شامه‌ی مرا نسبت به اهمیت برخی از بازی‌هایی که انجام می‌دهیم تیز کرد. الکساندرا مک‌درموت و جان رولینگسن از دانشگاه آکسفورد و فیلیپ موریسن از MIT وقت زیادی را صرف ارائه‌ی توضیحات دقیق و یاری‌رسان کردند. آیدن کِلی برای این که مطمئن شود که من دریافته‌ام که او آن‌چه را می‌خواستم بگویم فهمیده از جان و دل مایه گذاشت. من از همگی‌آنان سپاس‌گزارم.

پی. دابلیو. اتکینز
آکسفورد، انگلستان
ژانویه ۱۹۸٤

قانون دوم زمان‌بردار نیست، و من تمایل دارم بیندیشم که *قانون دوم* نیز زمان‌بردار نیست. ولی با به دست آمدن این فرصت، تنظیمات اندکی را برای این چاپ با جلد مقوایی انجام دادم. برخی از موارد را به روز کرده‌ام، برای وضوح بیش‌تر در برخی تصاویر و توضیحات آن‌ها تغییراتی داده‌ام، و چند عکس را برای بهبود بخشیدن به نمای متن جایگزین کرده‌ام. همچنین بخش خواندنی‌های بیش‌تر را، با آوردن تعدادی متن فعلی و کلاسیک، مورد بازبینی اساسی قرار داده‌ام. برنامه‌های BASIC در پیوست‌ها را، که در ۱۹۸٤ جلوتر از زمان خود به نظر می‌آمدند ولی اکنون دیگر به درد موزه می‌خورند، حذف کرده‌ام. مضمون کتاب ـ توانایی آفرینندگی خارق‌العاده‌ی واپاشی به بی‌نظمی ـ دست نخورده مانده است، و به همان اندازه انگیزه‌ی ارائه ـ توصیف موضوع پراهمیتی با ذات ریاضی توسط نوشتار و عکس.

پی. دابلیو. اتکینز
آکسفورد، انگلستان
ژانویه ۱۹۹٤

# ۱
# بی‌تقارنی طبیعت

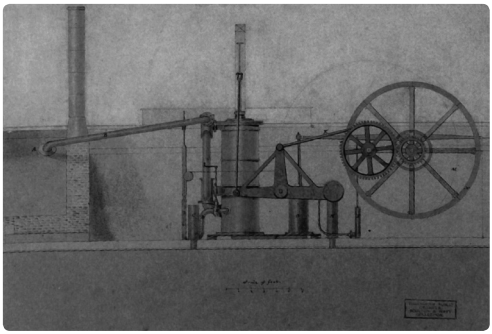
جنگ و موتور بخار[1] دست در دست هم شالوده‌ای را پی‌ریختند که به یکی از ظریف‌ترین مفاهیم تبدیل شد. سادی کارنو، پسر وزیر جنگ دوران ناپلئون و عموی یکی از روسای بعدی جمهوری فرانسه، در ۱۸۱٤ در حومه‌ی پاریس جنگید. در آشفتگی پس از جنگ، او به این باور رسید که یکی از دلایل شکست فرانسه، عقب‌ماندگی صنعتی است. چگونگی استفاده‌ی انگلستان و فرانسه از بخار نمونه‌ی بارز این تفاوت بود. او دریافت که کنارگذاردن موتور بخار انگلستان، قلب نیروی نظامیش را از کار می‌اندازد. زغال‌سنگش بر باد می‌رود، زیرا دیگر نمی‌شود معادن را تلمبه زد. آهنش بر باد می‌رود، زیرا، با کمبود منابع چوب، زغال‌سنگ برای ساخت آهن ضروری است. بنابراین، زرّادخانه‌اش بر باد می‌رود.

نیکلا لئونارد سادی کارنو
(۱۷۹۶ تا ۱۸۳۲)

۱. به جای واژه‌ی معمول ماشین بخار برای Steam Engine از موتور بخار استفاده می‌کنم. چون در این بحث با خود موتور سروکار داریم ـ م.

ولی کارنو همچنین پی‌برد هر کس که دارای نیروی بخار کارامد باشد نه تنها ارباب صنعتی و نظامی جهان، بلکه سردمدار انقلابی اجتماعی خواهد بود به مراتب جهان‌شمول‌تر از آن‌چه که فرانسه به تازگی از سر گذرانده بود. کارنو نیروی بخار را به چشم موتوری جهان‌شمول می‌دید. این موتور به دلیل اقتصاد بزرگ‌ترش چارپایان را کنار خواهد گذاشت، و به دلیل اعتمادپذیری و کنترل‌پذیریش جایگزین باد و آب خواهد شد. کارنو دریافت که این موتور جهان‌شمول افق‌های اجتماعی و اقتصادی آدمی را گسترش و آن را به جهان تازه‌ای از دستاوردها سوق خواهد داد. امروزه از دید بسیاری از افراد، موتورهای بخار اولیه، آن غول‌های پردردسر ساخته‌شده از آهن و چوب، تنها نمادهایی لَخت‌اند از بدبختی و تهیدستی، نماد جامعه‌ی صنعتی نوپا. در واقع آن لویاتان‌های خاکی اثبات کردند که بال‌های آرمان‌های آدمی‌زاد هستند.

کارنو شخصی دوراندیش و تحلیلگری تیزبین برای انجام بهبودهای لازم در موتور بخار بود (مانند پدرش که تحلیلگری دقیق برای ماشین‌های مکانیکی به شمار می‌رفت)، ولی هرگز به ذهنش خطور نمی‌کرد که مطالعات با انگیزه‌ی فنی او، به چه انقلاب *اندیشمندانه‌ای* خواهد انجامید. در کشف این‌که در تبدیل گرما به کار ناکارایی ذاتی وجود دارد، او مکانیسمی اندیشمندانه را به کار انداخت که یک سده و نیم بعد تمامی فعالیت‌های علمی را در خود متمرکز کرد.



یکی از نخستین موتورهای بخار. تجزیه و تحلیل آن به ایده‌هایی انجامید که ما در این کتاب بدان‌ها می‌پردازیم.

در وارسی کارایی موتور بخار و تعیین محدودیت‌های آن، کارنو ناخودآگاه نگرش تازه‌ای را نسبت به تمام دگرگونی، نسبت به تبدیل انرژی نهفته در زغال‌سنگ به کوششی مکانیکی، و حتا نسبت به گشوده‌شدن یک برگ ایجاد کرد. علاوه بر آن وی دانشی را بنا نهاد که به ورای فیزیک به ظاهرانتزاعی نیوتون پا گذاشت، دانشی که می‌تواند هم با انتزاعات تک ذره و هم با واقعیت موتورها سروکار داشته باشد. تمامی این‌ها گستره‌ی مباحث این کتاب را دربر می‌گیرد: ما از دنیای به ظاهر خشن موتورهای صنعتی ابتدایی، به سفری تا جهان ظریف و صیقل‌خورده‌ی لذت‌بردن از زیبایی می‌رویم، و در آخر پی‌می‌بریم که این‌ها یکی هستند.

کار کارنو (که به طور خلاصه در کتاب *Refléxions sur la puissance motrice du feu* {*ملاحظاتی درباره‌ی توان موتور بخار*} او در ۱۸۲٤ انتشار یافت) بر اساس پنداری نادرست بود؛ ولی با این حال زیربنای موضوع مورد بحث ما را بنا نهاد. کارنو پیرو این نظریه‌ی متداول در آن دوران بود که گرما را نوعی سیال بی‌جرم یا *کالُریک* در نظر می‌گرفت. وی تصور کرد که عملکرد موتور بخار بسیار شبیه به آسیاب است، که در آن کالریک از دیگ بخار به چگالنده جریان می‌یابد، و چرخ‌های صنعت را با جریان‌یافتن خود به حرکت در می‌آورد، درست مانند آب که جریان پیدا می‌کند و آسیاب را می‌چرخاند. درست همان طور که کمیت آب با جریان‌یافتن از درون آسیاب، در مدتی که کار انجام می‌دهد، تغییر نمی‌کند، (در نگاه کارنو) کمیت کالریک نیز در مدت انجام دادن کار تغییر نمی‌کند. یعنی کارنو تحلیل خود را بر پایه‌ی این فرض گذاشت که کمیت گرما *پایسته* می‌ماند، و کار به این دلیل توسط موتور ایجاد می‌شود که سیال از مخزنی داغ و از نظر گرمایی «بالا»، به آبریزی سرد و از نظر گرمایی «پایین» سرازیر می‌گردد.

کوشش عقلانی لازم برای بیرون کشیدن حقیقت از درون این پندار نادرست باید به انتظار نسل دیگری از اندیشه‌ورزان می‌نشست. در میان نسلی که در حدود ۱۸۲۰ زاده شدند، سه نفر بودند که این چالش را پی گرفتند و به آشفتگی سامان دادند.

## شناسایی انرژی

نخستین نفر از این سه، جی. پی. ژول {جول} در ۱۸۱۸ زاده شد. ژول پسر آبجوسازی منچستری بود. ثروت و نیز کارگاه‌های آبجوسازی، این فرصت را به وی داد که پیگیر علایق خود باشد.

یکی از آن‌ها، کشف مضمونی عمومی و یگانه‌بخش بود که بتواند تمامی پدیده‌های در آن هنگام هیجان‌انگیز علمی، از جمله الکتریسیته، الکتروشیمی، و فرایندهای موجود در گرما و مکانیک را توضیح دهد. آزمایش‌های محتاطانه‌ی وی، که در دهه‌ی ۱۸٤۰ انجام شد، تایید کرد که گرما پایسته *نیست*. ژول با اندازه‌گیری‌های بیش از پیش دقیق نشان داد که کار می‌تواند *به طور کمّی* به گرما تبدیل شود. این به زایش مفهوم *هم‌ارزی مکانیکیِ گرما* انجامید، یعنی این‌که کار و گرما متقابلا تبدیل‌پذیرند، و گرما ماده‌ای همچون آب نیست. چنین چیزی به مدرکی تجربی برای برانداختن مبنای نتیجه‌گیری‌ها تبدیل شد، ولی نه خود نتیجه‌گیری‌ها، که یک نسل پیش کارنو بدان‌ها دست‌یافته بود. اکنون زمان آن فرارسیده بود که نظریه‌پردازان پا به گود بگذارند و پرده از ماهیت گرما بردارند.

ویلیام تامسن در ۱۸۲٤ در بلفاست زاده شد، در ۱۸۳۲ به گلاسگو رفت، و در ده سالگی وارد دانشگاه شد، او از قبل توان اندیشه‌ورزی خود را که در سرتاسر زندگی مشخصه‌ی وی بود نشان داد. گرچه او در آغاز نظریه‌پرداز بود، قابلیت عملی زیادی نیز داشت. راستش را بخواهید، ثروت او از استعدادی

جیمز پرسکات ژول
(۱۸۱۸ تا ۱۸۸۹)