



منابع انرژی تجدیدپذیر

دکتر گل محمد خوب بخت

عضو هیأت علمی دانشگاه پیام نور

دکتر محسن سلیمانی

عضو هیأت علمی دانشگاه شهید چمران اهواز

دکتر مصطفی کیانی ده کیانی

عضو هیأت علمی دانشگاه شهید چمران اهواز

امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.

مقام معظم رهبری

در عصر حاضر یکی از شاخصه‌های ارزیابی رشد، توسعه و پیشرفت فرهنگی هر کشوری میزان تولید کتاب، مطالعه و کتاب‌خوانی مردم آن مرز و بوم است. ایران اسلامی نیز از دیرباز تاکنون با داشتن تمدنی چندهزارساله و مراکز متعدد علمی، فرهنگی، کتابخانه‌های معتبر، علما و دانشمندان بزرگ با آثار ارزشمند تاریخی، سرآمد دولت‌ها و ملت‌های دیگر بوده و در عرصه‌ی فرهنگ و تمدن جهانی به‌سان خورشیدی تابناک همچنان می‌درخشد و با فرزندان نیک‌نهاد خویش هنرنمایی می‌کند. چه کسی است که در دنیا با دانشمندان فرزانه و نام‌آور ایرانی همچون ابوعلی سینا، ابوریحان بیرونی، فارابی، خوارزمی و ... همچنین شاعران برجسته‌ای نظیر فردوسی، سعدی، مولوی، حافظ و ... آشنا نباشد و در مقابل عظمت آنها سر تعظیم فرود نیاورد. تمامی این افتخارات ارزشمند، برگرفته از میزان عشق و علاقه فراوان ملت ما به فراگیری علم و دانش از طریق خواندن و مطالعه منابع و کتاب‌های گوناگون است. به شکرانه‌ی الهی، تاریخ و گذشته ما، همیشه درخشان و پر بار است. ولی اکنون در این زمینه در چه جایگاهی قرار داریم؟ آمار و ارقام ارائه‌شده از سوی مجامع و سازمان‌های فرهنگی در مورد سرانه‌ی مطالعه‌ی هر ایرانی، برایمان چندان امیدوارکننده نمی‌باشد و رهبر معظم انقلاب اسلامی نیز از این وضعیت بارها اظهار گله و ناخشنودی نموده‌اند.

کتاب، دروازه‌ای به سوی گستره‌ی دانش و معرفت است و کتاب خوب، یکی از بهترین ابزارهای کمال بشری است. همه‌ی دستاوردهای بشر در سراسر عمر جهان، تا آنجا که قابل کتابت بوده است، در میان دست‌نوشته‌هایی است که انسان‌ها پدید آورده و می‌آورند. در این مجموعه‌ی بی‌نظیر، تعالیم الهی، درس‌های پیامبران به بشر، و همچنین علوم مختلفی است که سعادت بشر بدون آگاهی از آنها امکان‌پذیر نیست. کسی که با دنیای زیبا و زندگی‌بخش کتاب ارتباط ندارد بی‌شک از مهم‌ترین دستاورد انسانی و نیز از بیشترین معارف الهی و بشری محروم است. با این دیدگاه، به‌روشنی می‌توان ارزش و مفهوم رمزی عمیق در این حقیقت تاریخی را دریافت که اولین خطاب خداوند متعال به پیامبر گرامی اسلام (ص) این است که «بخوان!» و در اولین

سوره‌ای که بر آن فرستاده‌ی عظیم‌الشان خداوند، فرود آمده، نام «قلم» به تجلیل یاد شده‌است: «اقْرَأْ وَ رَبُّكَ الْأَكْرَمُ. الَّذِي عَلَّمَ بِالْقَلَمِ» در اهمیت عنصر کتاب برای تکامل جامعه‌ی انسانی، همین بس که تمامی ادیان آسمانی و رجال بزرگ تاریخ بشری، از طریق کتاب جاودانه مانده‌اند.

دانشگاه پیام‌نور با گستره‌ی جغرافیایی ایران‌شمول خود با هدف آموزش برای همه، همه‌جا و همه‌وقت، به‌عنوان دانشگاهی کتاب‌محور در نظام آموزش عالی کشورمان، افتخار دارد جایگاه اندیشه‌سازی و خردورزی بخش عظیمی از جوانان جویای علم این مرز و بوم باشد. تلاش فراوانی در ایام طولانی فعالیت این دانشگاه انجام پذیرفته تا با بهره‌گیری از تجربه‌های گرانقدر استادان و صاحب‌نظران برجسته کشورمان، کتاب‌ها و منابع آموزشی درسی شاخص و خودآموز تولید شود. در آینده هم، این مهم با هدف ارتقای سطح علمی، روزآمدی و توجه بیشتر به نیازهای مخاطبان دانشگاه پیام‌نور با جدیت ادامه خواهد داشت. به‌طور قطع استفاده از نظرات استادان، صاحب‌نظران و دانشجویان محترم، ما را در انجام این وظیفه‌ی مهم و خطیر یاری‌رسان خواهد بود. پیشاپیش از تمامی عزیزانی که با نقد، تصحیح و پیشنهادهای خود ما را در انجام این وظیفه‌ی خطیر یاری می‌رسانند، سپاسگزاری می‌نماییم. لازم است از تمامی اندیشمندانی که تاکنون دانشگاه پیام‌نور را منزلگاه اندیشه‌سازی خود دانسته و ما را در تولید کتاب و محتوای آموزشی درسی یاری نموده‌اند، صمیمانه قدردانی گردد. موفقیت و بهروزی تمامی دانشجویان و دانش‌پژوهان عزیز آرزوی همیشگی ما است.

دانشگاه پیام‌نور

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	یازده
فصل اول. اصول تبدیل انرژی.....	۱
هدف کلی.....	۱
هدف‌های یادگیری.....	۱
مقدمه.....	۱
۱-۱ انواع کار، گرما، انرژی و واحدهای آن.....	۲
۱-۲ واحدهای انرژی.....	۳
۱-۳ منشأ ترمودینامیک و تاریخچه آن.....	۵
۱-۴ مفاهیم پایه‌ای ترمودینامیک.....	۸
۱-۵ کار، گرما و انرژی.....	۱۱
۱-۵-۱ کار.....	۱۱
۱-۵-۲ گرما.....	۱۲
۱-۵-۳ قرارداد علائم.....	۱۳
۱-۶ قانون اول ترمودینامیک: بقا (توازن) انرژی.....	۱۴
۱-۶-۱ سیستم‌های بسته.....	۱۴
۱-۶-۲ سیستم‌های چرخه‌ای.....	۱۵
۱-۶-۳ سیستم‌های باز.....	۱۷
۱-۷ قانون دوم ترمودینامیک.....	۲۱
۱-۷-۱ کاربردهای قانون دوم ترمودینامیک در سیستم‌ها و فرایندهای تبدیل انرژی.....	۲۳
۱-۸ نیروگاه‌های حرارتی.....	۲۵
۱-۸-۱ چرخه‌های قدرت بخار: چرخه رانکین.....	۲۵
۱-۸-۲ چرخه‌های گازی: چرخه برایتون.....	۲۸

۳۱	 ۱-۸-۳ چرخه‌های پمپ گرما (پمپ حرارتی) و تبرید
۳۴	 ۱-۹-۱ اکسرژی: در دسترس بودن
۳۵	 ۱-۹-۱ منابع انرژی زمین‌گرمایی
۳۷	 ۱-۹-۲ تابش: خورشید به‌عنوان منبع انرژی
۳۷	 خلاصه فصل اول
۴۰	 خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول
۴۳	 منابع
۴۵	 فصل دوم. زیست توده
۴۵	 هدف کلی
۴۵	 هدف‌های یادگیری
۴۵	 مقدمه
۴۸	 ۲-۱ نقش آینده زیست توده
۵۱	 ۲-۲ تولید برق
۵۳	 ۲-۳ فناوری‌های تبدیل انرژی زیست توده و کاربردهای آن
۵۳	 ۲-۳-۱ احتراق
۵۶	 ۲-۳-۲ گازی‌سازی
۵۹	 ۲-۳-۳ هضم بی‌هوازی
۶۰	 ۲-۳-۴ پیرولیز
۶۲	 ۲-۳-۵ زیست سوخت‌ها
۶۷	 ۲-۴ پیاده‌سازی سامانه‌های انرژی زیست توده
۶۷	 ۲-۴-۱ منابع زیست توده
۶۹	 ۲-۴-۲ آثار و مزایای زیست محیطی
۷۳	 ۲-۴-۳ مسائل اقتصادی و تولید
۷۴	 ۲-۵ مطالعه موردی: استفاده از درشت‌جلبک‌ها با هدف انرژی
۷۴	 ۲-۵-۱ مقدمه
۷۵	 ۲-۵-۲ وضعیت موجود صنایع مرتبط با درشت‌جلبک‌ها
۷۶	 ۲-۵-۳ ترکیبات شیمیایی درشت‌جلبک‌ها
۷۸	 ۲-۵-۴ زنجیره عرضه درشت‌جلبک‌ها
۷۸	 ۲-۵-۵ کاشت
۷۹	 ۲-۵-۵-۱ تولید جلبک در هچر
۸۱	 ۲-۵-۵-۲ رشد در مزارع روباز
۸۳	 ۲-۵-۶ روش‌های برداشت
۸۴	 ۲-۵-۷ پیش فراوری
۸۶	 ۲-۵-۸ تولید متان
۸۸	 ۲-۵-۹ تولید اتانول

۹۱	۲-۵-۱۰ مسائل زیست محیطی
۹۲	۲-۵-۱۱ هزینه ها
۹۳	۲-۶ پتانسیل کاربرد زیست توده در ایران
۹۳	۲-۶-۱ بیودیزل
۹۴	۲-۶-۲ اتانول زیستی
۹۴	۲-۶-۳ زیست گاز
۹۵	خلاصه فصل دوم
۹۷	خودآزمایی چهارگزینه ای فصل دوم
۱۰۰	منابع

۱۰۵	فصل سوم. انرژی باد
۱۰۵	هدف کلی
۱۰۵	هدف های یادگیری
۱۰۵	مقدمه
۱۰۶	۳-۱ الگوهای باد
۱۰۸	۳-۱-۱ به کارگیری باد در گذشته
۱۱۰	۳-۱-۲ پتانسیل قدرت باد
۱۱۲	۳-۲ اصول توان بادی
۱۱۲	۳-۲-۱ ویژگی های زمانی و مکانی باد: لایه مرزی و منحنی های وقوع
۱۱۶	۳-۲-۲ توزیع های احتمال سرعت و توان باد
۱۱۷	۳-۲-۳ اصول تولید توان بادی
۱۲۱	۳-۲-۴ بازدهی توربین های واقعی
۱۲۳	۳-۳ سامانه های تولید قدرت: اجزاء توربین های بادی معمول
۱۲۸	۳-۳-۱ توربین های بادی کوچک تر
۱۲۹	۳-۳-۲ دیگر سامانه های توان بادی
۱۳۱	۳-۳-۳ آینده توان بادی
۱۳۳	۳-۴ آثار زیست محیطی
۱۳۴	۳-۵ پتانسیل کاربرد انرژی باد در ایران
۱۳۶	خلاصه فصل سوم
۱۳۷	خودآزمایی چهارگزینه ای فصل سوم
۱۴۰	منابع

۱۴۱	فصل چهارم. انرژی برگرفته از آب
۱۴۱	هدف کلی
۱۴۱	هدف های یادگیری

مقدمه.....	۱۴۱
۱-۴ توان آبی و تاریخیچه استفاده از آب به عنوان منبع انرژی.....	۱۴۱
۱-۴-۱ نیروی آبی: منبع مهم تولید برق.....	۱۴۲
ایتاپو: بزرگترین نیروگاه برق آبی دنیا.....	۱۴۴
پروژه تری جورج.....	۱۴۶
۱-۴-۲ سدها و سدهای انحرافی.....	۱۴۹
۱-۴-۳ هد و جریان.....	۱۵۰
۱-۴-۴ توربین ها.....	۱۵۲
۱-۴-۵ نیروی آبی در مقیاس کوچک.....	۱۵۵
۱-۴-۶ نگرانی های زیست محیطی.....	۱۵۷
۱-۴-۷ هزینه ها.....	۱۵۸
۲-۴ تولید انرژی از اقیانوس.....	۱۵۹
۱-۲-۴ انرژی باد آفشور.....	۱۶۱
۲-۲-۴ انرژی جزرومد.....	۱۶۲
۳-۲-۴ انرژی جریان اقیانوسی.....	۱۷۰
۴-۲-۴ انرژی امواج.....	۱۷۱
۱-۴-۲-۴ مکانیک و توان موج.....	۱۷۲
۲-۴-۲-۴ سامانه های بهره برداری از قدرت موج.....	۱۷۴
۵-۲-۴ تبدیل انرژی گرمایی اقیانوس.....	۱۷۷
۶-۲-۴ انرژی اسمزی.....	۱۷۸
خلاصه فصل چهارم.....	۱۸۱
خودآزمایی چهارگزینه ای فصل چهار.....	۱۸۲
منابع.....	۱۸۴
فصل پنجم. انرژی خورشیدی.....	۱۸۵
هدف کلی.....	۱۸۵
هدف های یادگیری.....	۱۸۵
مقدمه.....	۱۸۵
۱-۵ مکانیک خورشید- زمین و تابش خورشیدی.....	۱۸۷
۲-۵ طیف و تابش خورشیدی روی سطح زمین.....	۱۸۸
۱-۲-۵ قدرت خورشیدی متوسط سالانه: پتانسیل انرژی خورشیدی.....	۱۹۳
۳-۵ انرژی حرارتی خورشیدی.....	۱۹۵
۱-۳-۵ چرخه های قدرت.....	۱۹۶
۲-۳-۵ منعکس کننده های خورشید و هلیوستات ها.....	۱۹۸
۳-۳-۵ تولید آب گرم برای استفاده محلی.....	۱۹۹
۴-۳-۵ گرمایش، سرمایش و تهویه با استفاده از انرژی خورشیدی.....	۲۰۲

۲۰۵	۵-۳-۵ اجاق خورشیدی
۲۰۶	۴-۵ نیروگاه‌های متمرکز خورشیدی
۲۰۶	۱-۴-۱ ناودانی سهمی
۲۰۹	۱-۴-۲ جمع‌کننده‌های بشقابی سهمی
۲۱۰	۵-۵ دودکش‌ها یا برج‌های خورشیدی
۲۱۱	۵-۵-۱ برج‌های قدرت
۲۱۴	۵-۶ تلفات انرژی و فعالیت نیروگاه‌های گرمایی
۲۱۷	۵-۷ سامانه‌های فوتوولتاییک
۲۱۸	۵-۷-۱ تسخیر بازار به وسیلهٔ سیلیکون
۲۲۰	۵-۷-۲ دیگر فناوری‌های فوتوولتاییک
۲۲۷	۵-۸ ذخیرهٔ برق
۲۲۹	۵-۹ اقتصاد و محیط‌زیست
۲۳۰	۵-۱۰ پتانسیل انرژی خورشیدی در ایران
۲۳۰	خلاصهٔ فصل پنجم
۲۳۳	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۲۳۷	منابع
۲۳۹	فصل ششم. انرژی زمین‌گرمایی
۲۳۹	هدف کلی
۲۳۹	هدف‌های یادگیری
۲۳۹	مقدمه
۲۴۰	۶-۱ تاریخچه و قدمت استفاده از انرژی زمین‌گرمایی
۲۴۴	۶-۱-۱ منابع زمین‌گرمایی
۲۴۷	۶-۲ نیروگاه‌های زمین‌گرمایی
۲۴۷	۶-۲-۱ واحدهای بخار خشک
۲۴۹	۶-۲-۲ واحدهای سینگل فلاشینگ
۲۵۰	۶-۲-۳ واحدهای زمین‌گرمایی دوفلاشه
۲۵۲	۶-۲-۴ فرایندهای چندقلاشه: یک مثال تئوری مفید
۲۵۵	۶-۲-۵ واحدهای دوتایی
۲۵۸	۶-۲-۶ نیروگاه‌های هیبریدی زمین‌گرمایی - سوخت فسیلی
۲۵۹	۶-۳ اثر ناخالصی‌های سیال زمین‌گرمایی
۲۶۵	۶-۴ سامانهٔ خنک‌کننده
۲۶۷	۶-۵ گرمایش منطقه‌ای با استفاده از زمین‌گرمایی: مثالی از ذخیرهٔ اکسرژی و مزایای زیست‌محیطی
۲۶۹	۶-۶ آثار زیست‌محیطی
۲۷۱	۶-۷ پتانسیل انرژی زمین‌گرمایی در ایران

۲۷۲	 خلاصه فصل ششم
۲۷۳	 خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل ششم
۲۷۶	 منابع
۲۷۹	 پاسخنامه خودآزمایی‌های چهارگزینه‌ای

پیشگفتار

با وجود اینکه منابع انرژی مرسوم وابسته به نفت، زغال سنگ و گاز طبیعی، محرک های بسیار مؤثری در رشد اقتصادی اند، اما در عین حال برای محیط زیست و سلامتی بشر مضرند. افزون بر این، با توجه به اثرهای الیگوپلی^۱ در تولید و توزیع، این منابع تمایل به چرخه در طبیعت دارند.

انرژی های تجدیدپذیر، توانایی بالایی در تأمین تقاضای انرژی جهانی دارند. این منابع انرژی، از قبیل زیست توده، انرژی بادی، خورشیدی، برق آبی و زمین گرمایی^۲، به دلیل استفاده از منابع موجود معمول و بومی، می توانند هدف های پایداری انرژی را فراهم کنند. مرحله گذار به سوی سامانه های مبتنی بر منابع انرژی تجدیدپذیر، در سی سال گذشته به خوبی طی شده است. در همین رابطه، هم زمان با افزایش نوسانات قیمت نفت و گاز طبیعی، هزینه های مربوط به انرژی بادی و خورشیدی، کاهش قابل توجهی داشته است. در واقع، جریان قیمت سوخت های فسیلی با انرژی تجدیدپذیر و هزینه های اجتماعی با هزینه های زیست محیطی، در جهت مخالف هم بوده است. افزون بر این، سازوکارهای اقتصادی و سیاستی مورد نیاز برای حمایت از بازارهای پایدار سامانه های انرژی تجدیدپذیر نیز به سرعت در حال تکامل اند. بسیار روشن است که رژیم جدید انرژی تجدیدپذیر و تا حدودی سامانه های مبتنی بر گاز طبیعی، بازار آتی بخش انرژی را فرا گیرد و برعکس، منابع وابسته به زغال سنگ و نفت، از دور خارج شوند. بازارهای

1. Oligopoly
2. Geothermal

سرمایه‌گذاری، بر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر و سایر انرژی‌های نو، متمرکز شده‌اند که این موضوع، نویددهندهٔ این واقعیت است که سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، از نظر اقتصادی کاملاً رقابتی‌اند.

به‌علاوه، اغلب سامانه‌های انرژی تجدیدپذیر، دارای الگوهای غیرمتمرکز و کوچک‌مقیاس‌اند که دراصل، به توزیع متناسب برق، تولید هم‌زمان (تولید ترکیبی بخار و برق) و کاهش نگرانی‌های مرتبط با محیط‌زیست و مسئلهٔ هزینه- سرمایه منجر می‌شوند. سامانه‌های تجدیدپذیر مبتنی بر آرایه‌های فوتوولتاییک^۱، آسیاب بادی (توربین بادی)، زیست‌توده و نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک، به‌عنوان جایگزین مناسب نیروگاه‌های متمرکز سنتی تولید برق، می‌توانند با هزینهٔ تولیدی کمتر، به تولید انبوه انرژی بپردازند. این سامانه‌ها می‌توانند تا حد زیادی آثار زیست‌محیطی را کاهش دهند و همچنین به‌پراکنده کردن آثار متمرکز بزرگ‌تر که در برخی موارد، جدی‌ترین پدیده‌آورنده آلودگی هوای پیرامون نیروگاه، باران اسیدی و تغییرات آب‌وهوایی جهانی‌اند، کمک‌کنند.

در حال حاضر، منابع انرژی تجدیدپذیر حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد تقاضای انرژی کل جهان را عرضه می‌کنند. بیشترین سهم این عرضه را زیست‌تودهٔ سنتی و در کشورهای در حال توسعهٔ آفریقایی، آسیایی و آمریکای لاتین نیز، اغلب سوخت چوب مورد استفاده در پخت‌وپز و گرمایش، تشکیل می‌دهد. نیروگاه‌های برق‌آبی بزرگ‌مقیاس نیز نزدیک به ۲۰ درصد عرضهٔ برق دنیا را به‌خود اختصاص داده‌اند. در حال حاضر حدود دو درصد از این عرضهٔ انرژی، به‌منابع انرژی تجدیدپذیر جدید (انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی زیستی نوین، انرژی زمین‌گرمایی و نیروگاه‌های برق‌آبی کوچک) اختصاص دارد. سناریوهای زیادی، پتانسیل انرژی‌های تجدیدپذیر از عرضه انرژی جهانی را بررسی کرده و نشان داده‌اند که این منابع، در نیمهٔ دوم قرن ۲۱، با روند رشد کنونی و با سیاست‌های توسعه‌ای مناسب، قابلیت رشد تا تأمین ۵۰ درصد از عرضهٔ انرژی جهانی را دارا هستند.

مهر ۱۳۹۶

محسن سلیمانی، استادیار دانشگاه شهید چمران اهواز

گل محمد خوب‌بخت، استادیار دانشگاه پیام نور

مصطفی کیانی ده‌کیانی، استادیار دانشگاه شهید چمران اهواز

فصل اول

اصول تبدیل انرژی

هدف کلی

هدف از این فصل آشنایی با مبانی کار، گرما، انرژی، قوانین ترمودینامیک و به کارگیری این قوانین در سامانه‌های تبدیل انرژی است.

هدف‌های یادگیری

دانشجو در این فصل با موارد زیر آشنا می‌شود:

۱. مفاهیم انرژی، کار و گرما و واحدهای آنها.
۲. قوانین اول و دوم ترمودینامیک، انواع سامانه‌های ترمودینامیک و کاربردهای آنها.
۳. انواع چرخه‌های قدرت و مفهوم اکسرژی.
۴. به کارگیری قوانین ترمودینامیک در سامانه‌های تولید انرژی تجدیدپذیر.

مقدمه

منابع انرژی فسیلی که در حال حاضر، معمول‌ترین منابع انرژی مصرفی به‌شمار می‌آیند، منابع محدودی‌اند. این محدودیت در کنار مسائل زیست‌محیطی، امنیت انرژی و موارد دیگر، نیاز به منابع جایگزین و تجدیدپذیر انرژی را ضروری می‌کند. انرژی‌های تجدیدپذیر به‌انواعی از انرژی گفته می‌شود که بازتولید آنها در افق زمانی کوتاهی (در مقایسه با هزاران یا حتی میلیون‌ها سال مورد نیاز برای تولید منابع فسیلی) صورت می‌پذیرد. به زبان ساده، قابلیت انجام کار را انرژی گویند. در مبحث انرژی و به‌طبع انرژی‌های تجدیدپذیر، مفاهیمی همانند نیرو، کار، توان، انرژی، قوانین ترمودینامیک،

سیستم ترمودینامیکی، چرخه، بازده و ... مسائل اساسی و پایه‌ای هستند. این فصل به تفصیل به این مفاهیم می‌پردازد.

۱-۱ انواع کار، گرما، انرژی و واحدهای آن

با توجه به نظریه مکانیک نیوتنی، کار، حاصل ضرب اسکالر (عددی) نیرو در فاصله، در طول یک دوره زمانی است. توان، کار در واحد زمان است. در زمانی که نیرو متغیر باشد، کار با استفاده از انتگرالی که توصیف‌کننده حرکت نیرو بین دو نقطه a و b است، به دست می‌آید. کار و توان، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$W = \int_a^b \vec{F} \cdot d\vec{x} \text{ و } \dot{W} = \vec{F} \cdot \frac{d\vec{x}}{dt} = \vec{F} \cdot \vec{V} \quad (1-1)$$

توان، کمیتی اسکالر و نتیجه اثر یک نیرو با سرعت مشخص در یک فاصله است. برای تولید یا مصرف توان در یک موتور، قسمتی از اجزاء آن باید حرکت کند. این حرکت، اغلب به صورت دورانی است و به وسیله جعبه دنده به حرکت خطی تبدیل می‌شود.

همه موتورهای تولیدشده به دست بشر، مصرف‌کننده منابع انرژی و تولیدکننده توان اند. برای مثال، موتورهای احتراق داخلی، بنزین یا گازوئیل را مصرف و کار را تولید می‌کنند. انرژی، مفهومی بسیار گسترده است و به صورت پتانسیل انجام کار مفید، به کمک مواد و سامانه‌ها تعریف می‌شود. گرما یا انرژی حرارتی، شکلی از انرژی است که از مواد با دمای بالاتر به مواد با دمای پایین‌تر منتقل می‌شود. این انرژی اغلب به واسطه احتراق سوخت‌ها که به عنوان منبع انرژی شناخته می‌شوند، تولید می‌شود. سامانه‌های مهندسی مختلفی از قبیل نیروگاه‌ها و موتورهای احتراق داخلی، گرما را به کار تبدیل می‌کنند. انواع دیگری از انرژی که در کاربردهای مهندسی و کارهای روزانه کاربرد دارند عبارت‌اند از:

- انرژی پتانسیل ماده در سطح مرتفع‌تر (mgz)
- انرژی جنبشی ماده ($\frac{1}{2} m |\vec{V}|^2$) که با سرعت $\vec{V}$ حرکت می‌کند.
- انرژی شیمیایی (ΔG) موادی همانند زغال‌سنگ و هیدروکربن‌ها
- انرژی کشسان ($Vm\sigma\epsilon$) یک ماده جامد تحت تنش (فشار یا کشش) با حجم V و کرنش ϵ .

- انرژی الکتریکی (qV) شارژ q با اختلاف ولتاژ (اختلاف پتانسیل) V .
 - انرژی مغناطیسی (HM) یک کمیت مغناطیسی M در میدان مغناطیسی با شدت H .
 - انرژی موج ($\frac{1}{2}Ap\alpha^2$) امواج در سطح A با دامنه α .
 - انرژی هسته‌ای (mc^2) که برابر با جرم m است.
 - انرژی سطح (γA) سیالات با کشش سطحی γ و سطح A .
- از محتوی انرژی مواد مختلف، به‌منظور تولید کار و انجام کارها و فعالیت‌های مختلف استفاده می‌شود. هنگام انجام این فعالیت‌ها، انواع مختلف انرژی، تبدیل می‌شوند و کار تولید می‌کنند. تبدیل انرژی، از قوانین ترمودینامیک پیروی می‌کند.

۲-۱ واحدهای انرژی

واحدهای انرژی، از انرژی جنبشی الکترون تنهایی که در فرایند جفت «الکترون-حفره» در سلول فوتوولتائیک تولید می‌شود تا توان خالص تولیدشده در نیروگاه هسته‌ای بزرگ، گسترده‌اند. اگرچه کار، گرما و انرژی، مفاهیم متفاوتی‌اند، اما با واحدهای یکسانی اندازه‌گیری می‌شوند. واحد انرژی در سامانه بین‌المللی یکاها (SI^1)، ژول (J) است و به‌صورت کار انجام‌گرفته به‌واسطه نیروی ثابت یک نیوتنی (N)، در فاصله یک متری، تعریف می‌شود. همچنین زمانی که یک کولومب^۲ (کولن) (1 Cb) از درون تفاوت پتانسیل الکتریکی یک ولتی عبور می‌کند، یک ژول انرژی ایجاد می‌شود. ضرایب ژول، همانند دیگر واحدهای SI ، همانند جدول ۱-۱، تعریف می‌شوند.

جدول ۱-۱. ضرایب و پیشوندهای مرسوم بین‌المللی یکاها

پیشوند	ضریب	پیشوند	ضریب
zepto-Joule (zJ)	$10^{-21}J$	yocto-Joule (yJ)	$10^{-24}J$
femto-Joule (fJ)	$10^{-15}J$	atto-Joule (aJ)	$10^{-18}J$
nano-Joule (nJ)	$10^{-9}J$	pico-Joule (pJ)	$10^{-12}J$
mili-Joule (mJ)	$10^{-3}J$	micro-Joule (μJ)	$10^{-6}J$
mega-Joule (MJ)	10^6J	kilo-Joule (kJ)	10^3J
tera-Joule (TJ)	$10^{12}J$	giga-Joule (GJ)	10^9J
exa-Joule (EJ)	$10^{18}J$	peta-Joule (PJ)	$10^{15}J$
yotta-Joule (YJ)	$10^{24}J$	zetta-Joule (ZJ)	$10^{21}J$

1. International System of Units (French: System International Dunites)

2. Coulomb

قابل توجه است که همه این پیشوندها، برای دیگر واحدهای SI نیز کاربرد دارند. همچنین پیشوندهای کوچکتر از یک، با حروف کوچک و پیشوندهای نشان‌دهنده ضرایب بزرگتر از یک (به‌جز کیلو)، با حروف بزرگ نمایش داده می‌شوند. واحد توان در SI، وات (W) است. وقتی مقداری انرژی، یک ژول کار را در زمان یک ثانیه تولید کند، یک وات توان تولید کرده است. پیشوندهای وات، همانند پیشوند همه واحدهای SI شبیه به جدول ۱-۱ است.

واحدهای انرژی در سامانه‌های دیگر نیز هنوز پرکاربردند. از قبیل:

- واحد انرژی در سامانه c.g.s، ارگ (erg) بوده که برابر با 10^{-7} ژول است.
- واحد BTU در سامانه انگلیسی، به‌طور گسترده‌ای به‌کار می‌رود. این واحد برابر با 1.055 kJ است. یک BTU، انرژی مورد نیاز برای گرم کردن یک پوند آب از دمای $14/5$ فارنهایت، به $15/5$ فارنهایت است.
- واحد بزرگتر در سامانه انگلیسی، ترم (Therm) است که برابر است با 10^5 BTU یا $1.055 \times 10^8 \text{ J}$.
- یک کالری برابر است با $4/184 \text{ J}$.
- کواد (Q^2) یک واحد به نسبت بزرگ انرژی و برابر با 10^{15} BTU و یا حدود 10^{18} J است.
- برای مقادیر بسیار کوچک انرژی (اغلب مرتبط با هسته یا اتم) از الکترون‌ولت (eV) استفاده می‌شود. یک الکترون‌ولت برابر با پتانسیل انرژی به دست آمده به وسیله یک الکترون، در زمان عبور از اختلاف پتانسیل الکتریکی یک ولت است. از آنجا که بار الکتریکی یک الکترون، $1/6 \times 10^{-19}$ کولن است، یک الکترون‌ولت، $1/6 \times 10^{-19} \text{ J}$ به دست می‌آید.

سومین نوع واحدهای انرژی، محتوای انرژی سوخت‌هاست. چون ترکیب شیمیایی و محتوای انرژی سوخت‌ها، همانند سوخت خام شیرین تکرزاس شرقی یا سوخت خام عربستان سعودی، به‌طور وسیعی به موقعیت جغرافیایی منطقه استخراج شده وابسته است، این واحدها با توجه به قراردادهای بین‌المللی تعیین شده‌اند. در بین این واحدها، معادل‌های SI آن‌ها عبارت‌اند از:

- یک تن معادل زغال سنگ (۱ tce) برابر با $2/931 \times 10^{10} \text{ J}$

- یک بشکه نفت (1 bbl) برابر با $6/119 \times 10^9$ J
- یک فوت مکعب گاز طبیعی (scf)، اندازه‌گیری شده در فشار و دمای استاندارد (یک اتمسفر و ۲۵ درجه سلسیوس) برابر با $1/072 \times 10^6$ J است که اغلب با 10^6 J تخمین زده می‌شود.

۱-۳ منشأ ترمودینامیک و تاریخچه آن

توسعه موضوع ترمودینامیک، واکنش عقلانی به پیشرفت فناوریانه بود که انقلاب صنعتی را در اواسط قرن هجدهم به دنبال داشت. جامعه علمی و مهندسی قرن نوزدهم، به دنبال اختراع موتور بخار که تبدیل انرژی شیمیایی به مکانیکی با استفاده از گرما را به اثبات رساند، مبحث ترمودینامیک را برای درک و بهینه‌سازی فرایند تبدیل انرژی و با هدف طراحی بهتر موتورهای بخار، توسعه داد.

در قرن هجدهم، تعریف دانشمندان از مفاهیم کار، گرما و انرژی، با تعاریف امروزی تفاوت داشت. در اصل، کار به حرکت گفته می‌شد و گرما و حرکت، درکل متفاوت بودند. اغلب قرون هفدهم و هجدهم را «عصر اصل آتش»^۱ می‌نامند، زیرا جامعه علمی اعتقاد داشت گرما شکلی از انرژی نیست، بلکه سیال بی‌وزنی است. وقتی این سیال بی‌وزن از پیکره جسمی به جسم دیگر منتقل می‌شد، جسم اول را سرد و جسم دوم را گرم می‌کرد. بنابراین جهت انتقال، یا جریان حرارت ایجاد شد. در منابع علمی و مهندسی کنونی، هنوز یادآورهای از عصر اصل آتش دیده می‌شود. انتقال حرارت، اغلب به صورت جریان گرما توصیف می‌شود و پتانسیل یک ماده در ذخیره انرژی گرمایی (انرژی درونی یا آنتالپی)، به تمثیل از ظرفیت یک کیلوگرم از یک مایع در نگهداری گرما، ظرفیت گرمایی ویژه (در حجم ثابت یا فشار ثابت) نامیده می‌شود.

به سبب پیش‌زمینه موجود در رابطه با گرما به عنوان سیال بی‌وزن، ایجاد تعادل کار- گرما و توسعه قانون اول ترمودینامیک، مسیر دشواری را طی کرد. شاید «بنجامین تامسون»^۲ اولین دانشمندی بود که تبدیل کار به گرما را با تعبیر امروزی آن به طور تجربی، ثابت و پیرو آن، پایه‌های آنچه را که امروزه به عنوان قانون اول ترمودینامیک

شناخته می‌شود، طرح‌ریزی کرد. «کلنل تامسون»^۱، شخصی آمریکایی بود که به دلیل حمایت از نیروهای بریتانیایی در جنگ استقلال آمریکا، مجبور به ترک آمریکاشد و به خدمت «دوک»^۲، آخرین پادشاه «باواریا»^۳ درآمد. تامسون به سبب تلاش فراوان در خدمت‌رسانی به پادشاه باواریا در جنگ‌های اول ناپلئون، به مقام کنت رامفورد مونیخ^۴ دست یافت. او یک نمایش عمومی برای تولید گرما از اصطکاک، ترتیب داد و تبدیل حرکت به گرما را به عموم مردم اثبات کرد. در سال ۱۷۹۹ میلادی، او با استفاده از کمربندهای اصطکاکی، قدرت چهار اسب را با گرداندن آن‌ها در مسیری دایره‌ای، به منظور گرم کردن آب در ظرفی فلزی، به گرما تبدیل کرد و این آزمایش را تا جوشیدن آب ادامه داد. آزمایش کنت رامفورد، اولین آزمایش ثبت شده در مبحث تبدیل کار یا حرکت به گرما در یک آزمایش کنترل شده است. از آنجا که آزمایش‌های او برای عموم مردم و بدون هیچ گونه اندازه‌گیری و محاسبه‌ای انجام می‌شد و حتی نمایش‌های تجربی او نیز با هیچ تحلیل ابتدایی همراه نبود، جامعه علمی آن زمان، او را شخصی دغل و حقه‌باز نامید. به همین دلیل، آزمایش‌های او تا حد زیادی به وسیله دانشمندان اصلی اوایل قرن نوزدهم نادیده انگاشته شد.

تبدیل انرژی شیمیایی ذخیره شده در غذاها به حرکت (یا کار)، به وسیله یک فیزیکدان «آلزاسی»^۵ (ناحیه‌ای در فرانسه)، به نام دکتر «رابرت میر»^۶ ثبت شده است. این فیزیکدان که دامپزشک نیز بود، متوجه شد که خون ملوانان اروپایی، رنگ قرمز روشن تری نسبت به رنگ خون افراد بومی دارد. او این اختلاف را به دلیل تولید هموگلوبین بیشتر در اندام‌های این ملوانان تشخیص داد. هموگلوبین به عنوان غذای ماهیچه‌ها، اکسیژن را به آنان حمل می‌کند و حرکت و در نتیجه آن، کار و توان مکانیکی تولید می‌کند. براساس مشاهدات او در سال ۱۸۲۲ م، تئوری تبدیل انرژی شیمیایی غذا به ترکیبات شیمیایی جاری در خون و در نهایت، تولید نیروی ماهیچه‌ای رواج یافت. در واقع او تعادل انرژی شیمیایی و توانایی تولید کار را ابداع کرد که در حال حاضر یکی از سنگ بناهای تئوری نوین ترمودینامیک است. جای تأسف است که بنیان‌گذاران جامعه

1. Colonel Thomson

2. Duke

3. Bavaria

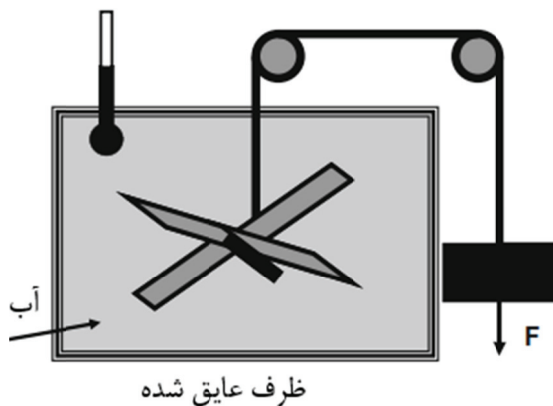
4. Count Rumford of Munich

5. Alsatian

6. Robert Meyer

علمی اوایل قرن نوزدهم، درگیر نظریه اصل آتش بودند و به شدت با نظریه دکتر میر مخالفت کردند و این وضع، باعث خودکشی دکترمیرشد.

«توماس پرسکات ژول»^۱ استاد دانشگاه منچستر بود که در سال ۱۸۴۸ با طراحی آزمایش مشخصی برای اثبات تعادل کار- گرما، از نظر علمی بسیار مشهور شد. دستگاه آزمایش مورد استفاده، به صورت طرحواره در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. ظرف دربسته و کاملاً عایق، حاوی وزن مشخصی آب، همراه با یک دماسنج و یک چرخ چاه در داخل آن است. چرخ چاه، با مکانیزمی که با وزنه رو به پایینی به حرکت درمی آید رانده می شود. انرژی وزنه در حال سقوط، به وسیله اصطکاک درون آب، پراکنده می شود. ژول ثابت کرد توان مکانیکی ایجاد شده به کمک وزنه در حال سقوط، باعث افزایش دمای آب شده است و بنابراین، انرژی مکانیکی به گرما تبدیل می شود و گرمای حاصله، باعث افزایش دما خواهد شد. آزمایش و اندازه گیری های بسیار دقیق ژول، افزون بر اثبات تعادل کار- گرما کمک کرد تا شاخص تبدیل یک کالری به $4/184$ واحد انرژی که اکنون به ژول معروف است، با دقت بالا اندازه گیری شود.



شکل ۱-۱. طرحواره آزمایش ژول [۳]

سادی کارنو^۲ را کاشف قانون دوم ترمودینامیک، که اصل محوری تبدیل کار- گرماست، می دانند. او با انتشار یادداشتی کوتاه، «در نیروی محرکه حرارتی...» در سال ۱۸۲۴

م. تصریح کرد که برای تبدیل مقدار معینی گرما به کار، محدودیت وجود دارد. دانشجوی او، «کلاپیرون»^۱، چندین تفسیر روی کار کارننوشست و روی محدودیت‌های تبدیل گرما به کار تأکید کرد. دانشمندان دیگری از جمله «رادولف کلاسیوس»^۲، «ویلیام تامپسون»^۳ و «ماکس پلانک»^۴، تبعات و پیامدهای قانون دوم را روی فرایندهای تبدیل انرژی و ویژگی آن‌تروپی، توسعه دادند. شایان توجه است آنچه اکنون قانون دوم ترمودینامیک نامیده می‌شود، قبل از قانون اول، فرمول‌بندی و پذیرفته شده بود. به این دلیل که در وهله نخست، قانون دوم با عقاید قدیمی و ریشه‌داری مانند آنچه قانون اول با آن روبه‌رو بود، از جمله «گرما به عنوان سیال بی‌وزن»، مواجه نبود و دیگر اینکه دانشمندانی این اصل را اعلام کردند (کارنو، کلاسیوس و...) که با ویژگی‌هایی همچون کار دقیق، اندازه‌گیری دقیق علمی و اعتبار علمی بالا شناخته شده بودند.

۴-۱ مفاهیم پایه‌ای ترمودینامیک

مفهوم سیستم ترمودینامیک^۵ (به‌طور ساده‌تر، سیستم)، بر پایه درک تئوری ترمودینامیک قرار دارد. سیستم ترمودینامیک، دارای مرز است و به‌خارج از مرز، محیط^۶ گفته می‌شود. محیط به‌قسمتی از جهان^۸ گفته می‌شود که از تغییرات سیستم ترمودینامیک، اثر می‌پذیرد. سیستم‌های ترمودینامیک، سیستم‌های بسته یا بازند. این دو نوع سیستم در شکل ۱-۲ به‌تصویر کشیده شده‌اند. سیستم‌های بسته، حاوی تعداد مولکول‌های ثابتی‌اند، در حالی که سیستم‌های باز، دارای دهانه‌های ورودی و خروجی‌اند که به‌واسطه آن‌ها، ماده وارد و خارج می‌شود. اگر مقدار ماده ورودی و خروجی سیستم با هم برابر باشد، سیستم باز پایدار و در غیر این صورت، ناپایدار است. هر دو سیستم باز و بسته، کار و گرما را دریافت یا عرضه می‌کنند. در سیستم بسته، کار و گرمای کل، W و Q مورد توجه است، در حالی که در سیستم‌های باز، محاسبات براساس نرخ کار و گرمای آنی $\dot{W}$ و $\dot{Q}$ و همچنین نرخ جریان ماده ورودی و خروجی، انجام می‌شود.

1. Clapeyron

2. Rudolf Clausius

3. William Thompson

4. Max Plank

5. Thermodynamic System

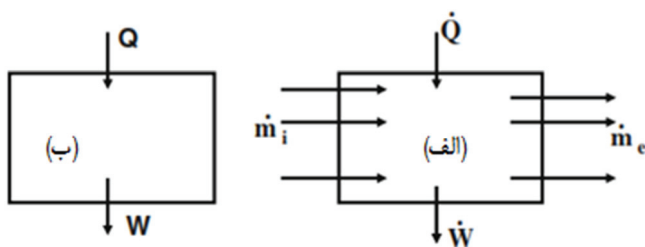
6. Boundary

7. Surroundings

8. Universe

اکثر ماشین‌های مبدل انرژی، جزء سیستم‌های بازند، مانند پمپ‌ها، بویلرها، توربین‌ها، کمپرسورها، نازل‌ها و مبدل‌های حرارتی. در شرایط کاری معمول، همه این وسایل به‌عنوان سیستم‌های ترمودینامیکی باز و در حالت پایدار کار می‌کنند. سیلندرهای همراه پیستون‌ها، مثالی معمول از سیستم‌های بسته‌اند.

همه خصوصیات سیستم‌های ترمودینامیکی، متغیرهای قابل اندازه‌گیری مرتبط با سیستم‌اند. دما، فشار، حجم، آنتالپی، آنترپی، رسانایی الکتریکی و لزجت، مثال‌های معمول از خصوصیات ترمودینامیکی‌اند. وقتی خصوصیات یک سیستم، با زمان تغییر نمی‌کند، گفته می‌شود که سیستم در تعادل ترمودینامیک است. خصوصیات ترمودینامیکی سیستم در حال تعادل، به‌وسیله محاسبه با معادلات حالت^۱ یا محاسبه با جداول ترمودینامیکی، قابل دستیابی است. در مواد همگن (موادی که فقط یک ترکیب مولکولی دارند)، دو خصوصیت مستقل برای تعیین سایر خصوصیات، کافی است. معادلات حالت، معادلات جبری‌اند که یک خصوصیت را برحسب دو خصوصیت قابل اندازه‌گیری دیگر ارائه می‌دهند. برای مثال در معادله حالت یک گاز ایده‌آل، $PV=RT$. وقتی یک معادله ساده برای تعیین دقیق خصوصیات کافی نباشد، این خصوصیات به‌وسیله محاسبات عددی و با استفاده از جداول ترمودینامیکی محاسبه می‌شوند. چنین جداولی برای آب/بخار، مبردها و دیگر مواد مورد استفاده معمول، در کتاب‌های استاندارد ترمودینامیکی وجود دارند.



شکل ۱-۲. سیستم‌های ترمودینامیکی باز (الف) و بسته (ب) [۳]

حالت، مفهوم اساسی ترمودینامیک است و به‌سادگی، به‌صورت مجموعه‌ای از خصوصیات تعریف می‌شود. زمانی که خصوصیات تغییر می‌کنند، حالت سیستم تغییر