



اصول مهندسی صنایع غذایی ۱

(رشته علوم و صنایع غذایی)

دکتر وحید محمدپورکاریزکی

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 پربار 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 دستاوردهای 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: «إِقْرَأْ وَرَبُّكَ 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.....	نه
فصل اول. ابعاد و واحدها.....	۱
هدف کلی.....	۱
هدف‌های یادگیری.....	۱
مقدمه.....	۱
۱-۱ ابعاد.....	۲
۲-۱ واحدها.....	۳
۱-۲-۱ سیستم بین‌المللی واحدها (SI).....	۵
۲-۲-۱ نمایش واحدها به کمک پیشوندها.....	۱۴
۳-۱ نمایش اعداد و ارقام.....	۱۶
۱-۳-۱ دقت.....	۱۶
۲-۳-۱ صحت.....	۱۷
۴-۱ تبدیل واحدهای سیستم‌های مختلف به یکدیگر.....	۱۸
۵-۱ سازگاری ابعادی معادلات.....	۲۲
۶-۱ گروه‌ها یا اعداد بدون بعد.....	۲۸
خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل اول.....	۳۲
خودآزمایی تشریحی فصل اول.....	۳۲
فصل دوم. تعاریف و مفاهیم پایه.....	۳۵
هدف کلی.....	۳۵
هدف‌های یادگیری.....	۳۵
مقدمه.....	۳۵
۱-۲ مفاهیم اساسی.....	۳۶
۱-۱-۲ دما (درجه حرارت).....	۳۶

۳۹	۲-۱-۲ فشار
۴۳	۳-۱-۲ چگالی
۴۶	۴-۱-۲ وزن مخصوص
۴۶	۵-۱-۲ تخلخل
۴۸	۶-۱-۲ غلظت
۵۲	۷-۱-۲ گرانروی
۵۸	۸-۱-۲ مقدار رطوبت
۶۲	۹-۱-۲ سطح
۶۳	۱۰-۱-۲ حجم
۶۳	خودآزمایی تشریحی فصل دوم
۶۷	فصل سوم. موازنه جرم
۶۷	هدف کلی
۶۷	هدف‌های یادگیری
۶۷	مقدمه
۶۸	۱-۳ موازنه جرم
۷۱	۲-۳ مفاهیم اساسی
۷۱	۱-۲-۳ سیستم و محیط
۷۳	۲-۲-۳ انواع فرایند
۷۶	۳-۲-۳ نمودار جریان فرایند
۷۷	۳-۳ قانون بقای جرم
۸۶	۴-۳ موازنه جرم در عملیات پیوسته
۸۹	۵-۳ موازنه جرم در فرایندهای ناپیوسته (بچ)
۹۸	۶-۳ موازنه جرم در سیستم‌های دارای جریان برگشتی
۱۰۵	۷-۳ موازنه جرم در سیستم‌های دارای جریان زدایش
۱۰۷	۸-۳ موازنه جرم در سیستم‌های دارای جریان کنارگذر
۱۰۹	۹-۳ موازنه جرم در سیستم‌های همراه با واکنش شیمیایی
۱۱۲	۱۰-۳ موازنه جرم در سیستم‌های ناپایدار
۱۱۶	خودآزمایی تشریحی فصل سوم
۱۱۹	فصل چهارم. ترمودینامیک
۱۱۹	هدف کلی
۱۱۹	هدف‌های یادگیری
۱۱۹	مقدمه
۱۲۱	۱-۴ مفاهیم اساسی
۱۲۱	۱-۱-۴ ترمودینامیک کلاسیک و آماری
۱۲۲	۲-۱-۴ نیرو
۱۲۲	۳-۱-۴ فشار
۱۲۳	۴-۱-۴ کار

۱۲۶	۴-۱-۵ انرژی
۱۲۸	۴-۱-۶ انرژی داخلی
۱۲۹	۴-۱-۷ اصل بقای انرژی
۱۲۹	۴-۱-۸ آنتالپی
۱۳۰	۴-۲ قانون صفرم ترمودینامیک
۱۳۰	۴-۳ قانون اول ترمودینامیک
۱۳۳	۴-۳-۱ قانون اول ترمودینامیک برای سیستم‌های بسته
۱۳۴	۴-۳-۲ قانون اول ترمودینامیک برای سیستم‌های باز در حالت پایدار
۱۳۷	۴-۴ مفهوم تعادل ترمودینامیکی
۱۳۹	۴-۵ مفهوم برگشت‌پذیری و برگشت ناپذیری یک فرایند
۱۳۹	۴-۶ ظرفیت گرمایی
۱۴۱	۴-۷ معادلات حالت
۱۴۲	۴-۷-۱ معادله حالت گاز ایده‌آل
۱۴۳	۴-۷-۲ معادله حالت ویریال
۱۴۳	۴-۷-۳ معادلات حالت درجهٔ سوم
۱۴۴	۴-۸ فرایندهای ترمودینامیکی
۱۴۴	۴-۸-۱ فرایند حجم ثابت
۱۴۵	۴-۸-۲ فرایند فشار ثابت
۱۴۶	۴-۸-۳ فرایند دما ثابت
۱۴۷	۴-۸-۴ فرایند آدیاباتیک
۱۵۱	۴-۸-۵ فرایند پلی‌تروپیک بازگشت‌پذیر
۱۵۱	۴-۹ قانون دوم ترمودینامیک
۱۵۲	۴-۹-۱ آنتروپی و قانون دوم ترمودینامیک
۱۵۵	۴-۹-۲ ماشین گرمایی
۱۵۷	۴-۹-۳ یخچال
۱۵۹	۴-۹-۴ ماشین گرمایی کارنو
۱۶۱	۴-۹-۵ یخچال کارنو
۱۶۲	۴-۱۰ نمودار فاز
۱۶۸	۴-۱۰-۱ خواص ترمودینامیکی مخلوط بخار - مایع
۱۶۹	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم
۱۷۱	فصل پنجم. موازنهٔ انرژی
۱۷۱	هدف کلی
۱۷۱	هدف‌های یادگیری
۱۷۱	مقدمه
۱۷۳	۵-۱ مفاهیم اساسی
۱۷۴	۵-۱-۱ خاصیت
۱۷۵	۵-۱-۲ حالت
۱۷۵	۵-۱-۳ گرما یا حرارت

۱۷۶	۴-۱-۵ گرمای محسوس
۱۸۱	۵-۱-۵ گرما یا حرارت نهان
۱۸۴	۶-۱-۵ مفهوم و محاسبات آنتالپی
۱۹۶	۲-۵ موازنه انرژی
۱۹۷	۱-۲-۵ موازنه انرژی در سیستم‌های باز
۲۰۸	۲-۲-۵ موازنه انرژی در سیستم‌های بسته
۲۱۲	۳-۲-۵ موازنه انرژی مکانیکی و مفهوم کارایی و فرایند ایده‌آل
۲۱۳	۴-۲-۵ کاربرد موازنه انرژی در سیستم‌های همراه با واکنش
۲۱۵	۵-۲-۵ موازنه همزمان جرم و انرژی
۲۱۸	خودآزمایی چهارگزینه‌ای فصل پنجم
۲۱۸	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم
۲۲۱	فصل ششم. سایکرومتری
۲۲۱	هدف کلی
۲۲۱	هدف‌های یادگیری
۲۲۱	مقدمه
۲۲۲	۱-۶ سایکرومتری
۲۲۳	۲-۶ مفاهیم اساسی
۲۲۳	۱-۲-۶ قانون گاز ایده‌آل برای مخلوط هوا- بخار آب
۲۲۴	۲-۲-۶ فشار بخار
۲۲۶	۳-۲-۶ رطوبت نسبی
۲۲۷	۴-۲-۶ رطوبت مطلق یا نسبت رطوبت
۲۲۹	۵-۲-۶ حجم مخصوص
۲۳۱	۶-۲-۶ دمای شبنم
۲۳۲	۷-۲-۶ دمای حباب خشک
۲۳۲	۸-۲-۶ دمای حباب مرطوب
۲۳۴	۹-۲-۶ آنتالپی
۲۳۴	۳-۶ نمودار سایکرومتری
۲۳۵	۱-۳-۶ ساختار یک نمودار سایکرومتری
۲۴۰	۲-۳-۶ کاربردهای نمودار سایکرومتری
۲۵۵	خودآزمایی تشریحی فصل ششم
۲۵۷	پیوست‌ها
۲۷۱	منابع و مراجع

پیشگفتار

آنچه امروزه بیش از پیش تولید موفقیت‌آمیز در صنعت غذا را رقم می‌زند، توجه روزافزون به بخش تحقیق و توسعه است؛ بخشی که بر پایه دانش مهندسی بنا نهاده شده‌است. آگاهی از اصول اولیه مهندسی صنایع غذایی به منظور تولید محصولی با کیفیت و ایمن از ضروریات دنیای امروز است.

این کتاب که بر مبنای آخرین سرفصل پیشنهادی وزارت علوم تدوین شده‌است، در قالب ۶ فصل به تبیین اصول مهندسی صنایع غذایی می‌پردازد. هدف کلی از ارائه این درس، آمادگی دانشجویان برای طراحی و بهینه‌سازی فرایندهای صنایع غذایی است. در فصل اول، به معرفی ابعاد و احاد کمیت‌های مورد استفاده در علوم مهندسی پرداخته شده‌است. هدف این فصل، آشنایی با احاد و ابعاد پارامترهای مختلفی است که طی فصل‌های آتی مورد استفاده قرار خواهند گرفت. فصل دوم با ارائه تعاریف و مفاهیم پایه، راه را برای درک بهتر مطالب ارائه‌شده در فصل‌های بعد هموار می‌سازد. هدف از فصل دوم، معرفی مفاهیم پایه و آشنایی با تعاریف کاربردی مورد استفاده در صنعت غذا است. اساس فصل سوم را قانون بقای جرم تشکیل می‌دهد. استفاده از این قانون برای حل مسائل عملی مختلف و ارائه مثال‌های کاربردی، از ویژگی‌های این فصل است. ایجاد توانمندی در دانشجویان صنایع غذایی جهت حل مسائل مختلف موازنه جرم، از هدف‌های اصلی این فصل است. در فصل چهارم به بررسی مفاهیم، اصول و قوانین بنیادی ترمودینامیک پرداخته شده‌است. هدف از ارائه این فصل، تسلط به مباحث و مفاهیم ترمودینامیکی مختلفی است که در یک فرایند صنایع غذایی رخ می‌دهد. در فصل پنجم نیز آشنایی با قانون بقای انرژی صورت می‌گیرد و با مثال‌های مختلف این

فصل، مفهوم انرژی و اهمیت آن شرح داده می‌شود. هدف از این فصل، ایجاد توانمندی در دانشجویان صنایع غذایی جهت حل مسائل مختلف موازنه انرژی است. فصل پایانی یعنی ششم نیز به معرفی یکی از مفاهیم پرکاربرد در صنعت غذا به نام سایکرومتری اختصاص داده شده است. در این فصل نیز، درک هر چه بهتر مفهوم سایکرومتری و نحوه استفاده از آن در مسائل صنایع غذایی از جمله هدف‌های اصلی خواهد بود. تلاش بسیاری شده است تا این کتاب به‌طور سلیس و روان، مفاهیم موردنیاز را بازگو کند. بدین‌منظور دقت و حساسیت خاصی در استفاده از منابع، نحوه ارائه مطالب، رسم شکل‌ها و حتی تهیه جداول پیوست صورت گرفته است. با این همه، خطاها و کاستی‌هایی به‌کار انجام شده، راه یافته است که از نگاه تیزبین اساتید گرانقدر و دانشجویان ارجمند پنهان نخواهد ماند.

به قول سعدی شیرین سخن؛ «متکلم را تا کسی عیب نگیرد، سخنش صلاح نپذیرد». پس خاضعانه در انتظار نظرات اصلاحی دوستان عزیز هستم.

دکتر وحید محمدپور کاریزکی
استادیار گروه مهندسی شیمی
دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین قوچان

فصل اول

ابعاد و آحاد

هدف کلی

هدف کلی از ارائه این فصل، آشنایی با آحاد و ابعاد پارامترهای مختلفی است که طی فصل‌های آتی مورد استفاده قرار خواهند گرفت.

هدف‌های یادگیری

از جمله مهم‌ترین هدف‌های یادگیری این فصل نیز می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. آشنایی با مفهوم ابعاد و آحاد پارامترهای مختلف
۲. تشخیص آحاد اصلی، فرعی و تکمیلی در سیستم بین‌المللی آحاد
۳. تبیین دو مفهوم دقت و صحت، ضمن نمایش اعداد و ارقام مختلف
۴. توانایی تبدیل آحاد سیستم‌های مختلف به یکدیگر
۵. آشنایی با گروه‌ها و اعداد بدون بعد

مقدمه

هیچ رشته مهندسی را نمی‌توان پیدا کرد که در آن، حضور اعداد و ارقام ریاضی، معادلات و محاسبات مختلف دیده نشود. نکته مهم و در واقع تفاوت اصلی محاسبات ریاضی در رشته‌های مهندسی با علوم ریاضی محض، معنادار بودن اعداد است. به عنوان مثال، در فصل سوم از همین کتاب، معادله ساده $8 = 7 + 3 - 2$ می‌تواند بیانگر ورود دو جریان جرمی سه و هفت کیلوگرمی و خروج جریان جرمی دو کیلوگرمی از یک مخزن باشد.

بنابراین درک ماهیت واقعی یک عدد و به عبارتی بیان کیفی و کمی یک مفهوم فیزیکی از اهمیت به سزایی برخوردار است. به عنوان نمونه دما یکی از مفاهیم فیزیکی است که احساس می شود و قابل اندازه گیری است. طول نیز قابل اندازه گیری و مشاهده است. هر مفهوم دیگر فیزیکی را که قابل اندازه گیری و مشاهده باشد، می توان به صورت کیفی با یک بُعد^۱ تعریف کرد. مقدار کمی یا اندازه هر بعد را نیز می توان توسط یک واحد^۲ بیان کرد. به عنوان مثال، دما بُعدی است که توسط واحدهای مختلفی همچون سانتی گراد، فارنهایت، کلوین و... گزارش می شود. در این فصل ابعاد و آحاد مفاهیم فیزیکی مورد بررسی قرار می گیرند.

۱-۱ ابعاد

همان طور که اشاره شد، بیان کیفی یک مفهوم فیزیکی با بُعد صورت می گیرد. ابعاد اصلی که مستقل از یکدیگر هستند، عبارت اند از: طول، جرم، زمان، دما، جریان الکتریکی، مقدار ماده و شدت روشنایی.

سؤال اصلی که در اینجا مطرح می شود این است که آیا تمام مفاهیم فیزیکی دارای یکی از این ۷ بُعد ارائه شده هستند؟ پاسخ منفی است. ابعاد بسیاری وجود دارد که بسیار هم متداول و پرکاربرد هستند؛ ولیکن جزو هفت بُعد مستقل فوق نیستند. یکی از این ابعاد، سطح است. مساحت یک شکل را می توان چنین نوشت:

$$^2(\text{طول}) = \text{طول} \times \text{طول} = \text{سطح}$$

یا حجم یک قطعه را می توان به صورت زیر ارائه کرد:

$$^3(\text{طول}) = \text{طول} \times \text{طول} \times \text{طول} = \text{سطح} \times \text{طول} = \text{حجم}$$

سطح یا حجم نیز بیان کیفی یک مفهوم فیزیکی است که قابل مشاهده و اندازه گیری است و بُعد نامیده می شود. اما همان طور که نشان داده شد، بُعد ارائه شده برای سطح یا حجم، مستقل از هفت بُعد اصلی نبوده، بلکه برحسب بُعد یا ابعاد اصلی به دست آمده است. در چنین حالتی گویند سطح یا حجم، دارای بُعد فرعی است. بُعد فرعی از ترکیب یک یا چند بُعد اصلی حاصل می شود. در مثالی دیگر می توان به بُعد سرعت اشاره کرد. پیمودن طول مشخصی در یک زمان معین؛ مفهوم فیزیکی دیگری

1. Dimension

2. Unit

است که بُعد سرعت را برای آن تعریف کرده‌اند:

$$\text{سرعت} = \frac{\text{طول}}{\text{زمان}}$$

شتاب نیز، بُعد دیگری است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{شتاب} = \frac{\text{سرعت}}{\text{زمان}} = \frac{\text{طول/زمان}}{\text{زمان}} = \frac{\text{طول}}{(\text{زمان})^2}$$

بنابراین همان‌طور که مشاهده می‌شود، از روی ابعاد اصلی می‌توان ابعاد بسیار زیاد دیگری را تعریف کرد. در مجموع، ابعاد فرعی مورد استفاده در علوم مختلف بسیار متنوع بوده و اشاره به تمام موارد خارج از سرفصل این کتاب می‌باشد. فرهنگ یکاهای اندازه‌گیری که در مراجع انتهایی کتاب عنوان شده‌است، صدها بُعد فرعی مختلف را گردآوری و ارائه کرده است.

۱-۲ آحاد

برای هر یک از ابعاد اصلی، یک مقدار کمی نیز می‌توان در نظر گرفت که به نام «واحد» شناخته می‌شود. اصولاً بیان یک مفهوم فیزیکی بدون واحد، درک درستی از آن مفهوم نخواهد داد. به عنوان مثال اگر گفته شود فاصله تهران - مشهد دارای بُعد طول است، اما مقدار کمی آن گزارش نشود، در نتیجه فاصله مذکور به درستی درک نشده است. مالک یک کارخانه رب گوجه‌فرنگی را در نظر گرفته که نیاز خود را برای خرید گوجه‌فرنگی فقط با بُعد جرم اعلام داشته و میزان کمی را بیان نکرده است. در این صورت آیا فرایند خرید با اختلال مواجه خواهد شد؟!

در فرایند پاستوریزاسیون شیر، از مدیر اتاق کنترل خواسته شده‌است تا دمای فرایند را تنظیم کند. آیا همین خواسته برای انجام درست فرایند کفایت می‌کند یا مقدار و واحد دما نیز مورد نیاز است؟

در تمام مثال‌های فوق بیان مقدار کمی یعنی واحد هر یک از ابعاد، جهت درک مسئله ضروری و بعضاً حیاتی است. در مثال فاصله دو شهر، بیان کمی واحد می‌تواند چنین باشد:

«طول مسیر بین دو شهر تهران - مشهد ۱۰۰۰ کیلومتر است.»

خرید گوجه‌فرنگی سالیانه توسط مالک کارخانه رب می‌تواند چنین بیان شود:

«جرم گوجه‌فرنگی مورد نیاز کارخانه ۱۰۰۰۰ کیلوگرم یا ۱۰ تن است.»

مدیر اتاق کنترل با بیان زیر، قادر به تنظیم دمای فرایند پاستوریزاسیون خواهد بود:

«دمای پاستوریزاسیون شیر بین ۹۰ تا ۱۰۰ درجه سانتی گراد تنظیم شود.»

طول، جرم و دما در بیان‌های اخیر، همان ابعاد اصلی معرفی شده در بخش قبل هستند. اما کیلومتر، کیلوگرم، تُن و سانتی گراد، واحدهای مرتبط با هر یک از این ابعاد هستند که جهت بیان کمی مفاهیم فیزیکی به کار رفته‌اند. برای بیان واحد یک بعد، سیستم‌های مختلفی تعریف شده که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

- **سیستم انگلیسی:** این سیستم برای بیان واحدها در صنایع مختلف پایه‌ریزی شد و آحاد تعریف شده در آن هنوز هم متداول است.
 - **سیستم متریک^۱:** از این سیستم نیز استفاده‌های صنعتی و علمی به عمل آمده است.
 - **سیستم مهندسی آمریکایی:** بسیاری از صنایع شیمیایی، غذایی و دارویی در آمریکا از این سیستم استفاده می‌کنند.
 - **سیستم بین‌المللی آحاد^۲ (SI):** اگر چه هر واحدی در یک سیستم را می‌توان به مقدار مناسب در سیستم دیگر تبدیل کرد، ولیکن به دلیل وجود تعاریف مختلف در سیستم‌های فوق، در سال ۱۹۶۰ سیستمی یکپارچه و بین‌المللی در کنفرانس اوزان و اندازه‌گیری پیشنهاد شد که جهت استفاده در علوم و صنایع مختلف و برای کاربردی جهانی و سراسری متداول شد. این سیستم بین‌المللی به اختصار سیستم SI نام گرفته است.
- در این سیستم به عنوان مثال بُعد دما را با واحد کلوین (K) نمایش می‌دهند، درحالی‌که واحد دما در سیستم متریک، سانتی گراد (°C) است. سیستم انگلیسی و مهندسی آمریکایی، واحد فارنهایت (°F) را برای دما پیشنهاد کرده‌اند. در مورد نحوه تبدیل این واحدها به یکدیگر در بخش‌های بعد توضیح داده خواهد شد، اما در این بخش تفاوت واحدهای مرتبط با چند بُعد پرکاربرد در چهار سیستم مختلف ارائه می‌شود (جدول ۱-۱).

۵ ابعاد و آحاد

جدول ۱-۱. واحدهای ابعاد چند مفهوم فیزیکی در سیستم‌های اندازه‌گیری مختلف

بُعد						مورد استفاده	سیستم اندازه‌گیری آحاد
انرژی	نیرو	دما	زمان	جرم	طول		
BTU	Poundal	F	s	lb _m	Ft	علمی	انگلیسی
BTU	lb _f	F	s	Slug	Ft	صنعتی	
BTU	lb _f	F	s	lb _m	Ft	صنایع ایالات متحده آمریکا	مهندسی آمریکایی
cal	dyne	C	s	g	Cm	علمی	متریک
J	Kg _f	C	s	Kg	M	صنعتی	
J	N	K	s	Kg	M	جهانی	بین‌المللی (SI)

در این کتاب نیز آحاد سیستم بین‌المللی SI با توجه به همگانی‌بودن آن مورد توجه بیشتری قرار گرفته و در ادامه، جزئیات دیگری از این سیستم ارائه خواهد شد.

۱-۲-۱ سیستم بین‌المللی آحاد (SI)

آحاد مورد استفاده در این سیستم در سه بخش قرار می‌گیرند: آحاد اصلی، آحاد فرعی و آحاد تکمیلی

- **آحاد اصلی:** همان‌طور که در معرفی بُعد یک مفهوم فیزیکی توضیح داده شد، هفت بُعد اصلی داریم که بُعد دیگر مفاهیم فیزیکی را می‌توان با توجه به ابعاد اصلی تعیین کرد. در مورد آحاد نیز چنین است. یعنی یک سری آحاد اصلی داریم که به کمک آن‌ها می‌توان دیگر آحاد را تعریف کرد. به‌عنوان مثال وقتی واحد طول را با متر معرفی می‌کنیم، واحد سطح عبارت است از:

مترمربع یا $(\text{متر})^2 = (\text{متر}) \times (\text{متر}) = (\text{واحد طول}) \times (\text{واحد طول}) = \text{واحد سطح}$

همان‌طور که در جدول ۱-۱ نیز نشان داده شد، نماد^۱ m برای واحد طول (یعنی متر) به‌کار رفته است؛ پس می‌توان واحد سطح را برحسب نماد m چنین نوشت:

مترمربع یا $m^2 = (m) \times (m) = \text{واحد سطح}$

آحاد و نمادهای مورد استفاده برای ابعاد اصلی (هفت بُعد طول، جرم، زمان، دما، جریان الکتریکی^۲، مقدار ماده^۱ و شدت روشنایی^۲) در جدول ۱-۲ ارائه شده است.

1. Symbol
2. Electrical Current

جدول ۱-۲. آحاد و نمادهای ابعاد اصلی در سیستم اندازه گیری SI

نماد	واحد	بُعد
m	متر	طول
Kg	کیلوگرم	جرم
s	ثانیه	زمان
K	کلوین	دما
A	آمپر	جریان الکتریکی
mol	مول	مقدار ماده
cd	کندل	شدت روشنایی

برای هر یک از واحدهای اصلی و مستقل ارائه شده در جدول ۱-۲، تعریف استاندارد وجود دارد که به شرح زیر است:

- **تعریف متر به عنوان واحد طول:** نماد استاندارد برای نمایش متر، m می باشد. طولی معادل با $\frac{1650763}{73}$ برابر طول موج اندازه گیری شده در خلاء که به واسطه انتقال الکترون بین لایه های $2p_1$ و $5d_5$ اتم کریپتون ۸۶ تابیده شده است را یک متر می نامند. البته تعریف قدیمی تر که اکنون منسوخ شده، مسافتی است که نور در خلاء در مدت کسر $\frac{1}{299792458}$ از یک ثانیه طی می کند.
- **تعریف کیلوگرم به عنوان واحد جرم:** یک نمونه استاندارد بین المللی است که توسط اداره اوزان و مقادیر در موزه سور فرانسه قرار داده شده و به عنوان یک کیلوگرم شناخته می شود. قطعه مذکور استوانه ای از جنس آلیاژ پلاتین - ایریدیوم است. نماد Kg برای نمایش کیلوگرم استفاده می شود.
- **تعریف ثانیه به عنوان واحد زمان:** تا قبل از سال ۱۹۶۷، یک ثانیه براساس کسر $\frac{1}{31556925.9747}$ از سال ۱۹۰۰ در فاصله ما بین دو «اعتدال بهاری» تعریف شده بود. در سال ۱۹۶۷ استاندارد جدیدی برای یک ثانیه در نظر گرفته شد که برابر با مدت زمان 9192631770 بار تناوب از ارتعاش اتم سزیوم ۱۳۳ است. امروزه به این تعریف برای یک ثانیه، «ثانیه اتمی» نیز می گویند. ثانیه را با نماد s نشان می دهند.
- **تعریف کلوین به عنوان واحد دما:** یک کلوین برابر است با کسر $\frac{1}{273.16}$ از دمای ترمودینامیکی نقطه سه گانه^۳ آب. نماد کلوین K است.

1. Substance Amount
2. Luminous Intensity
3. Triple Point

ابعاد و واحدها ۷

- **تعریف آمپر به عنوان واحد جریان الکتریکی:** اگر دو رسانای مستقیم موازی با طول بسیار زیاد و سطح مقطع بسیار اندک را به فاصله یک متر از یکدیگر و در خلاء قرار دهند و در آنها جریان الکتریکی ثابتی برقرار شود، نیرویی بر هم وارد می‌کنند. یک آمپر، جریانی است که نیرویی معادل 2×10^{-7} نیوتن بر متر را ایجاد می‌کند. همچنین می‌توان گفت یک آمپر تقریباً برابر است با شار الکترونی به میزان 6.2419×10^{18} الکترون بر ثانیه. از نماد A برای نمایش آمپر استفاده می‌شود.

- **تعریف مول به عنوان واحد مقدار ماده:** یک مول ماده، مقداری از ماده در نظر گرفته می‌شود که تعداد عناصر تشکیل دهنده آن (شامل اتم، مولکول یا یون و...) معادل تعداد اتم‌های ۱۲ گرم از کربن ۱۲ (C_{12}) باشد. mol نمادی است که برای تعریف مول به کار رفته است.

- **تعریف کاندلا^۱ به عنوان واحد شدت روشنایی:** یک کاندلا که با نماد cd شناخته می‌شود برابر با شدت روشنایی کسر $\frac{1}{680}$ از یک مترمربع جسمی سیاه در جهت عمودی (در دمای نقطه انجماد و فشار ۱۰۱۳۲۵ نیوتن بر مترمربع) است.

• **آحاد فرعی:** تعداد آحاد فرعی قابل تعریف بسیار زیاد است؛ چرا که هر واحد فرعی از ضرب یا تقسیم دو یا تعدادی از واحدهای اصلی به دست می‌آید. به واحد سطح در بخش قبل اشاره شد که عبارت بود از:

$$m^2 \Rightarrow \text{مترمربع یا } (متر)^2 = \text{واحد سطح}$$

در مورد واحد حجم نیز می‌توان از واحد طول یعنی متر استفاده کرد:

$$m^3 \Rightarrow \text{مترمکعب یا } (متر)^3 = (\text{واحد طول}) = \text{واحد حجم}$$

به عنوان مثالی دیگر می‌توان واحد سرعت را چنین تعریف کرد:

$$\text{واحد سرعت} = \frac{\text{واحد طول}}{\text{واحد زمان}} = \frac{\text{متر}}{\text{ثانیه}} \Rightarrow \frac{m}{s}$$

بنابراین واحد شتاب نیز به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{m}{s^2} \Rightarrow \frac{\text{متر}}{\text{ثانیه}^2} = \frac{\text{واحد طول}}{(\text{واحد زمان})^2} = \frac{\text{واحد زمان/طول}}{\text{واحد زمان}} = \frac{\text{واحد سرعت}}{\text{واحد زمان}}$$

همان‌طور که در مثال‌های فوق اشاره شد، از ترکیب واحدهای اصلی با یکدیگر می‌توان واحد جدیدی را تعریف کرد که به واحد فرعی موسوم است. اگرچه از ترکیب دلخواه آحاد اصلی، می‌توان واحدهای دیگری را معرفی کرد، ولیکن باید توجه داشت که واحد فرعی جدید، مفید و قابل استفاده باشد. به‌عنوان مثال واحد فرعی دلخواه زیر را در نظر بگیرید:

$$\frac{m^{20}}{s^3 A^{45}} \Rightarrow \frac{(mتر)^{20}}{(آمپر)^3 (ثانیه)^{45}} = \frac{(واحد طول)^{20}}{(واحد جریان الکتریکی)^3 (واحد زمان)^{45}} = \text{یک واحد جدید}$$

واحد $\frac{m^{20}}{s^3 A^{45}}$ نیز به‌عنوان یک واحد فرعی شناخته می‌شود، اما بدون کاربرد و غیرقابل استفاده است. در صورتی که واحدهای مساحت، حجم، سرعت و شتاب که در بالا معرفی شد، بسیار مفید و پرکاربردند. جدول ۱-۳ چند نمونه از آحاد فرعی متداول را که برحسب آحاد اصلی تعریف شده‌است، نشان می‌دهد.

جدول ۱-۳. چند نمونه از آحاد فرعی متداول در سیستم اندازه‌گیری SI

نماد	واحد	بعد
m^2	m^2 (متر) یا مترمربع	سطح
m^3	m^3 (متر) یا مترمکعب	حجم
$\frac{m}{s}$	متر بر ثانیه	سرعت
$\frac{m}{s^2}$	متر بر مجذور ثانیه	شتاب
$\frac{Kg}{m^3}$	کیلوگرم بر مترمکعب	چگالی ^۱
$\frac{mol}{m^3}$	مول بر مترمکعب	غلظت
$\frac{m^3}{Kg}$	مترمکعب بر کیلوگرم	حجم مخصوص ^۲
$\frac{m^2}{s}$	مترمربع بر ثانیه	گرانروی سینماتیک ^۳

البته آحاد فرعی دیگری نیز داریم که اگر چه برحسب آحاد اصلی تعریف می‌شوند، ولیکن نام ویژه‌ای نیز به آن‌ها اختصاص داده شده‌است. در ادامه، تعاریف مربوط به برخی از این آحاد فرعی ارائه می‌شود؛ ضمن اینکه جدول ۱-۴ موارد متداول و پرکاربرد را نشان می‌دهد.

1. Density
2. Specific Volume
3. Kinematic Viscosity

ابعاد و آحاد ۹

- **تعریف نیوتن به عنوان واحد نیرو:** یک نیوتن که با نماد N نمایش داده می شود، نیرویی است که باعث می شود تا جسمی به جرم یک کیلوگرم، شتابی برابر یک متر بر مجذور ثانیه بیابد. نیرو را می توان برحسب جرم و شتاب چنین نوشت:

$$\text{شتاب} \times \text{جرم} = \text{نیرو}$$

که واحد نیرو برابر است با:

$$\text{Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = (\text{واحد شتاب}) \times (\text{واحد جرم}) = \text{واحد نیرو}$$

بنابراین نیوتن همان $\text{Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ است که به عنوان واحد نیرو در نظر گرفته می شود.

- **تعریف ژول به عنوان واحد کار و انرژی:** اگر نیرویی معادل یک نیوتن (یا یک کیلوگرم. متر بر مجذور ثانیه) بر جسمی وارد شود و آن را به میزان یک متر در جهت اعمال نیرو جابه جا کند، کاری معادل یک ژول انجام شده است. کار برابر است با:

$$\text{طول} \times \text{نیرو} = \text{کار}$$

بنابراین واحد کار عبارت است از:

$$\text{Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \times \text{m} = \text{Kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = (\text{واحد نیرو}) \times (\text{واحد طول}) = \text{واحد کار}$$

یا می توان به جای $\text{Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ از نیوتن (N) استفاده کرد:

$$N \cdot m = \text{واحد کار}$$

در اینجا ژول که با نماد J نشان داده می شود، همان $\text{Kg} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$ یا $N \cdot m$ است که به عنوان واحد کار تعریف می شود.

- **تعریف وات به عنوان واحد توان:** یک وات را توانی نامند که منجر به تولید یک ژول انرژی در مدت یک ثانیه می شود. نماد W برای نمایش وات به کار می رود. طبق تعریف توان برابر است با:

$$\text{توان} = \frac{\text{کار}}{\text{زمان}}$$

پس می توان واحد توان را چنین تعیین کرد:

$$\text{توان} = \frac{\text{واحد کار}}{\text{واحد زمان}} = \frac{\text{Kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}{\text{s}} = \text{Kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$$

یا می توان به جای $\text{Kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$ از J (واحد کار) استفاده کرد:

$$\text{واحد توان} = \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

در اینجا واحد وات (W) همان $\text{Kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$ یا $\frac{\text{J}}{\text{s}}$ است که به عنوان واحد توان معرفی شد.

- **تعریف پاسکال به عنوان واحد فشار:** فشار یک پاسکال معادل نیرویی به اندازه یک نیوتن است که بر سطحی به مساحت یک مترمربع وارد آمده است. فشار، طبق رابطه زیر تعریف می شود:

$$\text{فشار} = \frac{\text{نیرو}}{\text{سطح}}$$

در مورد واحد فشار می توان نوشت:

$$\text{توان} = \frac{\text{واحد نیرو}}{\text{واحد سطح}} = \frac{\text{Kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}{\text{m}^2} = \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$$

یا می توان به جای $\text{Kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ از نیوتن (N) استفاده کرد:

$$\text{واحد فشار} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

واحد فشار یعنی پاسکال که با نماد Pa نشان داده می شود، همان $\frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}$ یا $\frac{\text{N}}{\text{m}^2}$

است.

تذکر: در کتاب ها و مراجع گوناگون، ممکن است شیوه های مختلفی برای نمایش آحاد به کار رفته باشد. به عنوان مثال، نمایش واحد فشار با تمام شکل های زیر صحیح است:

$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2}, \text{N} / \text{m}^2, \text{Nm}^{-2}, \frac{\text{Kg}}{\text{m} \cdot \text{s}^2}, \text{Kg} / \text{m} / \text{s}^2, \text{Kg} \text{m}^{-1} \text{s}^{-2}, \text{Kg} / (\text{m} \cdot \text{s}^2)$$

- تعریف درجه سلسیوس یا سانتی گراد به عنوان دمای سلسیوس: هر درجه سلسیوس، ۲۷۳/۱۵ درجه از دمای کلوین کمتر است. رابطه کلوین و درجه سلسیوس به صورت زیر است:

$$۲۷۳/۱۵ - \text{دمای کلوین} = \text{دمای سلسیوس}$$

با توجه به اینکه در یک رابطه جمع و تفریق، فقط اعداد با واحدهای یکسان می توانند قرار بگیرند، بنابراین واحد اصلی دمای سلسیوس همان کلوین (K) است. واحد فرعی آن با (°C) نمایش داده می شود.

مثال ۱-۱. شیوه های مختلفی را که می توان برای نمایش واحد توان به کار برد، ارائه کنید:

واحد توان یعنی وات (W) بر مبنای آحاد اصلی $\text{Kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}$ یا به صورت $\frac{\text{J}}{\text{s}}$ تعریف شد که با شیوه های زیر قابل ارائه است:

$$\text{Kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^3}, \text{Kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3, \text{Kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3}, \frac{\text{J}}{\text{s}}, \text{J} / \text{s}, \text{Js}^{-1}$$

علاوه بر واحدهای فرعی که در این بخش ارائه شد، واحدهای فرعی دیگری وجود دارد که از ترکیب آحاد فرعی فوق با آحاد اصلی به دست می آید. در ادامه چند نمونه از این آحاد معرفی می شوند.

- **گرانروی دینامیک^۱ یا مطلق^۲:** پاسکال به عنوان واحد فرعی و ثانیه به عنوان واحد اصلی معرفی شده است. حاصل ضرب این دو یعنی Pa. s (پاسکال ثانیه)، به عنوان واحد گرانروی دینامیک در نظر گرفته می شود. گرانروی به مفهوم مقاومت یک مایع در برابر تنش برشی وارده است.

- **کشش سطحی^۳:** واحد فرعی نیرو با نیوتن معرفی شد؛ ضمن اینکه متر هم به عنوان یک واحد اصلی شناخته شده است. تقسیم این دو بر هم، یعنی N/m (نیوتن بر متر) واحد کشش سطحی خواهد بود. کشش سطحی یک ویژگی مهم از مایعات است که سبب می شود لایه بیرونی آنها همچون یک ورقه کشسان عمل کند. به عنوان یک مثال مشهور، می توان به ربایش دو سطح مایع به سمت یکدیگر اشاره کرد؛ مانند

1. Dynamic Viscosity
2. Absolute Viscosity
3. Surface Tension