



مکانیک سیالات (۱)

(رشته مهندسی مکانیک)

دکتر امیدرضا محمدی پور دکتر سیدعلی میربزرگی

«امروزه کتاب‌خوانی و علم‌آموزی، نه تنها یک وظیفه‌ی ملی، که یک واجب دینی است.»^۱

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.

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

۱. پیام مقام معظم رهبری به مناسبت آغاز هفته کتاب ۷۲/۱۰/۴

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

یازده

پیشگفتار

۱

فصل اول: مفاهیم اساسی

۱

هدف کلی

۱

هدف‌های یادگیری

۱

مقدمه

۲

۱-۱ محیط پیوسته

۵

۲-۱ سیال

۷

۱-۲-۱ گاز و مایع

۷

۳-۱ ابعاد و آحاد

۱۰

۱-۳-۱ اصل همگنی ابعادی

۱۱

۲-۳-۱ پیشنوندها

۱۲

۳-۳-۱ تبدیل واحد

۱۴

۴-۱ خواص سیال

۱۴

۵-۱ چگالی

۱۴

۱-۵-۱ چگالی جرمی

۱۵

۲-۵-۱ وزن مخصوص

۱۵

۳-۵-۱ چگالی نسبی

۱۵

۴-۵-۱ حجم مخصوص

۱۶

۶-۱ لزجت (ویسکوزیته)

۱۹

۱-۶-۱ لزجت سینماتیکی

۲۰

۲-۶-۱ شرط عدم لغزش

۲۲

۳-۶-۱ اثر تغییرات دما بر لزجت

۲۳

۴-۶-۱ سیالات غیرنیوتنی

۲۵	۷-۱ کشش سطحی
۲۶	۱-۷-۱ موینگی
۲۸	۸-۱ گاز ایده آل
۲۸	۹-۱ خواص مرتبط با انرژی سیال
۲۸	۱-۹-۱ انرژی داخلی
۲۹	۲-۹-۱ آنتالپی
۲۹	۳-۹-۱ گرمای ویژه سیال
۲۹	۱۰-۱ مدول حجمی
۳۲	۱۱-۱ فشار بخار
۳۳	۱-۱۱-۱ کاویتاسیون
۳۳	خلاصه فصل اول
۳۴	مسائل حل شده
۴۰	خودآزمایی تشریحی فصل اول
۴۳	فصل دوم: استاتیک سیال
۴۳	هدف کلی
۴۳	هدف‌های یادگیری
۴۳	مقدمه
۴۴	۱-۲ فشار
۴۶	۲-۲ تغییرات فشار در یک نقطه
۴۸	۳-۲ معادله عمومی تغییرات فشار
۵۰	۴-۲ تغییرات فشار در سیال ساکن
۵۱	۱-۴-۲ تغییرات فشار در سیال تراکم‌ناپذیر
۵۶	۲-۴-۲ تغییرات فشار در سیال تراکم‌پذیر
۵۷	۳-۴-۲ تغییرات فشار در تروپوسفر
۵۸	۴-۴-۲ تغییرات فشار در لایه‌های زیرین استراتوسفر
۵۹	۵-۲ اندازه‌گیری فشار
۶۰	۱-۵-۲ پیزومتر
۶۰	۲-۵-۲ بارومتر
۶۲	۳-۵-۲ مانومتر
۶۵	۴-۵-۲ فشارسنج بوردن
۶۶	۶-۲ نیروی فشاری وارد بر سطوح مسطح
۶۷	۱-۶-۲ نیروی فشاری وارد بر سطح مسطح در توزیع یکنواخت فشار
۶۸	۲-۶-۲ نیروی فشاری وارد بر سطح مسطح در توزیع فشار هیدرواستاتیک
۷۳	۷-۲ نیروی فشار وارد بر سطوح منحنی
۷۸	۸-۲ شناوری
۸۲	۹-۲ پایداری

۸۳	۲-۹-۱ پایداری اجسام غوطه‌ور در سیال
۸۴	۲-۹-۲ پایداری اجسام شناور
۸۸	۲-۱۰ شرایط تعادل نسبی
۸۹	۲-۱۰-۱ حرکت خطی شتابدار
۹۳	۲-۱۰-۲ حرکت دورانی با سرعت زاویه‌ای ثابت
۹۶	خلاصه فصل دوم
۹۶	مسائل حل شده
۱۰۲	خودآزمایی تشریحی فصل دوم
۱۰۵	فصل سوم: سینماتیک و دینامیک جریان
۱۰۵	هدف کلی
۱۰۵	هدف‌های یادگیری
۱۰۵	مقدمه
۱۰۶	۳-۱ دیدگاه لاگرانژی و اوپلری
۱۰۹	۳-۲ نمایش جریان
۱۱۱	۳-۳ طبقه‌بندی جریان‌های سیال
۱۱۳	۳-۴ شتاب
۱۱۶	۳-۵ حجم کنترل و سیستم
۱۱۷	۳-۶ دبی و سرعت متوسط
۱۱۹	۳-۷ قضیه انتقال رینولدز
۱۲۳	۳-۸ بقای جرم
۱۲۶	۳-۹ بقای ممنتوم خطی
۱۳۳	۳-۱۰ بقای ممنتوم زاویه‌ای
۱۳۶	۳-۱۱ بقای انرژی
۱۳۹	۳-۱۲ معادله اوپلر و رابطه برنولی
۱۴۵	خلاصه فصل سوم
۱۴۵	مسائل حل شده
۱۵۴	خودآزمایی تشریحی فصل سوم
۱۵۹	فصل چهارم: تشابه و تحلیل ابعادی
۱۵۹	هدف کلی
۱۵۹	هدف‌های یادگیری
۱۵۹	مقدمه
۱۶۰	۴-۱ تشابه فیزیکی و انواع آن
۱۶۱	۴-۱-۱ تشابه هندسی
۱۶۱	۴-۱-۲ تشابه سینماتیکی
۱۶۱	۴-۱-۳ تشابه دینامیکی

۱۶۲	۲-۴ نسبت‌های نیرویی در تشابه دینامیکی
۱۶۴	۱-۲-۴ جریان‌های متأثر از نیروهای ناشی از لزجت
۱۶۵	۲-۲-۴ جریان‌های متأثر از نیروهای ناشی از جاذبه گرانشی
۱۶۶	۳-۲-۴ جریان‌های متأثر از نیروی ناشی از تراکم‌پذیری
۱۶۹	۳-۴ تحلیل ابعادی
۱۷۱	۴-۴ تئوری Π باکینگهام
۱۷۵	خلاصه فصل چهارم
۱۷۵	مسائل حل‌شده
۱۷۸	خودآزمایی تشریحی فصل چهارم
۱۷۹	فصل پنجم: تحلیل دیفرانسیلی جریان
۱۷۹	هدف کلی
۱۷۹	هدف‌های یادگیری
۱۷۹	مقدمه
۱۸۱	۱-۵ بررسی سینماتیکی یک المان از سیال
۱۸۲	۱-۱-۵ جابه‌جایی و تغییرشکل خطی
۱۸۴	۲-۱-۵ چرخش و تغییرشکل زاویه‌ای
۱۸۷	۲-۵ بقای جرم
۱۹۲	۱-۲-۵ تابع جریان
۱۹۵	۳-۵ بقای ممنتوم خطی
۱۹۸	۴-۵ جریان غیرلزج
۲۰۱	۱-۴-۵ جریان غیرلزج و غیرچرخشی
۲۰۲	۲-۴-۵ پتانسیل سرعت
۲۰۹	۵-۵ جریان سیال تراکم‌ناپذیر نیوتنی
۲۱۵	خلاصه فصل پنجم
۲۱۵	مسائل حل‌شده
۲۲۰	خودآزمایی تشریحی فصل پنجم
۲۲۳	فصل ششم: جریان در لوله‌ها و کانال‌ها
۲۲۳	هدف کلی
۲۲۳	هدف‌های یادگیری
۲۲۳	مقدمه
۲۲۴	۱-۶ جریان توسعه‌یافته و دائمی درون لوله و مجرا
۲۳۱	۲-۶ تلفات اصلی انرژی (تلفات اصطکاکی)
۲۳۳	۱-۲-۶ ضریب اصطکاک در جریان آرام
۲۳۷	۲-۲-۶ ضریب اصطکاک در جریان آشفته
۲۴۱	۳-۶ تلفات فرعی (موضعی) انرژی و تحلیل جریان سیال در یک مجرای منفرد

۲۴۶	۱-۳-۶ هد پمپ و هد توربین
۲۴۸	۲-۳-۶ روش حل مسئله
۲۵۳	۴-۶ تحلیل شبکه‌های لوله‌کشی
۲۵۶	۵-۶ انتخاب پمپ در طراحی سیستم‌های انتقال سیال
۲۶۳	۶-۶ کاویتاسیون در پمپ‌ها
۲۶۵	۷-۶ روابط تشابه در پمپ‌ها
۲۶۶	خلاصه فصل ششم
۲۶۷	مسائل حل شده
۲۷۳	خودآزمایی تشریحی فصل ششم
۲۷۷	پیوست
۲۸۵	منابع

تقدیم می‌کنیم:

به پدران و مادران مهربانمان

به همسران عزیز و فداکارمان

به فرزندان دلبندمان

به پاس زحمات و حمایت‌های بی‌دریغشان

پیشگفتار

علم مکانیک به عنوان یکی از زیرمجموعه های علم فیزیک می تواند علت طیف وسیعی از رخدادهای علمی را توصیف کند. رخدادهایی که می توانند تأثیرات مثبت یا منفی قابل ملاحظه ای بر شرایط زندگی ما داشته باشند. به عبارت دیگر علم مکانیک این فرصت را فراهم آورده است تا با درک علل وقوع یک رخداد و پیش بینی وقایع مرتبط با آن، تمهیدات لازم برای کنترل اثرات آن به درستی اخذ شود و در نهایت در راستای بهبود شرایط زندگی بشر امروز گام برداشت. لازمه دستیابی به چنین دانشی، درک چگونگی رفتار ماده در مواجهه با نیروهای مکانیکی است که همان هدف و موضوع اصلی در علم مکانیک است. از آنجایی که حالت جامد یا سیال بودن ماده، در روش تحلیل آن تأثیر بسزایی دارد، اغلب این علم را در دو شاخه به ظاهر مجزا یعنی مکانیک جامدات و مکانیک سیالات (مایع و گاز) دنبال می کنند. بدین ترتیب مکانیک سیالات علمی است که به تعامل سیال ساکن یا متحرک (جریان) با محیط اطراف خود (به عنوان مرز) می پردازد. کتاب پیش رو برای آشنایی دانشجویان، مهندسين و علاقه مندان به اصول و مفاهيم پایه در مکانیک سیالات، با تمرکز ویژه بر خودخوان بودن محتوی، نگارش شده است. اگرچه در تدوین کتاب سعی شده است تا تمامی مطالب به زبان ساده و با پرهیز از پیچیدگی های غیر ضروری ارائه شود، با این وجود آشنایی مقدماتی خواننده با اصول پایه در درس استاتیک و ریاضیات می تواند نقش بسزایی در درک بهتر مطالب داشته باشد. مطالب این کتاب در شش فصل گردآوری شده است که موضوعات مورد بررسی در آن به شرح ذیل است:

در فصل اول با عنوان «مفاهیم اساسی»، سیال و ماهیت آن معرفی می‌شود و براساس آن بستری برای مدل‌سازی ریاضی سیال به عنوان یک محیط پیوسته فراهم می‌آید که چارچوب کلی این کتاب را پی‌ریزی می‌کند. از این منظر فصل اول را می‌توان زیربنا و پایه این کتاب قلمداد کرد که مطالعه و درک کامل آن، خواننده را در فهم هرچه بیشتر مکانیک سیالات یاری می‌رساند.

در فصل دوم با عنوان «استاتیک سیال»، رفتار یک سیال ساکن بررسی می‌شود. سکون سیال یا عدم حرکت لایه‌های سیال نسبت به هم، حالت ویژه‌ای از تنش را در سیال ایجاد خواهد کرد که منجر به تعریف «فشار» می‌شود. پس از معرفی مفهوم فشار، چگونگی تغییرات آن در هر نقطه از سیال ساکن و متحرک مورد بررسی قرار می‌گیرد. معادله عمومی حاکم بر تغییرات فشار استخراج شده و برای حالت خاصی از حرکت سیال تعمیم داده می‌شود.

فصل سوم با عنوان «سینماتیک و دینامیک جریان» نقطه شروع تحلیل دینامیکی جریان (سیال در حرکت) خواهد بود. در این فصل سعی می‌شود بدون پرداختن به جزئیات جریان، اثرات کلی یا انتگرالی آن با تکیه بر اعمال قوانین بقای جرم، ممنتوم خطی، ممنتوم زاویه‌ای و انرژی ارائه شود.

باید توجه کرد که در دنیای واقعی همیشه تعداد مسائلی که می‌توان برای آن‌ها حل تحلیلی ارائه کرد، محدود است. بنابراین در مسائلی که نمی‌توان از تحلیل ریاضی برای کسب نتایج استفاده کرد، لازم است از سایر روش‌ها، به‌طور مثال انجام آزمایش، برای رسیدن به نتایج مورد نیاز بهره برد. برخلاف ماهیت عملی آزمایش‌ها، می‌توان یک بحث تحلیلی در رابطه با طرح‌ریزی هدفمند آزمایش‌ها و ارائه فشرده داده‌ها انجام داد. فصل چهارم با عنوان «تشابه و تحلیل ابعادی» به این موضوع اختصاص یافته است.

در فصل پنجم با عنوان «تحلیل دیفرانسیلی جریان» سطح تحلیل‌ها از آنچه که در فصل سوم معرفی شده است عمیق‌تر می‌شود به‌طوری‌که که جزئیات جریان را نیز در برمی‌گیرد. به عبارت دیگر در این فصل، معادلات دیفرانسیلی حاکم بر رفتار دینامیکی سیال استخراج شده و با اتخاذ فرض‌های ساده‌کننده و مهم، در موارد بسیار خاص آماده حل می‌شوند.

در نهایت در فصل ششم با عنوان «جریان در لوله‌ها و کانال‌ها» به یکی از کاربردی‌ترین مباحث مکانیک سیالات یعنی انتقال سیال در لوله‌ها و کانال‌ها و راهکاری عملی آن پرداخته

می‌شود. به عبارت دیگر در این فصل از کلیه روش‌های تحلیل جریان که در فصول قبل معرفی شده‌اند، برای تحلیل یک مسئله مهم یعنی جریان داخلی استفاده می‌شود.

در هر فصل سه مجموعه سؤال گنجانده شده است. در مجموعه «مثال»ها، حل مسائل به‌طور کامل و با ذکر جزئیات تشریح شده است و در انتها تا حد امکان سعی شده تا در رابطه با نتایج مثال، بحث‌های مختصر اما کلیدی صورت پذیرد. از این‌رو مطالعه تمامی مثال‌ها به عنوان ادامه و مکمل مباحث درس ضروری است. در مجموعه «مسائل حل شده» با پرهیز از جزئیات اضافی، مسیر حل مسائل مشخص شده است تا خواننده با مطالعه آن، به مهارت حل مسئله دست یابد. در نهایت در مجموعه «خودآزمایی» بدون پرداختن به مسیر حل، تنها جواب آخر مسائل ذکر شده است تا آزمونی برای سنجش آموخته‌های خواننده باشد. لازم به ذکر است، در بعضی از مباحث، مطالب تکمیلی به صورت پاورقی در متن گنجانده شده است که مطالعه آن به دانشجویان علاقه‌مند توصیه می‌شود.

از آنجایی که اعتقاد داریم کتاب حاضر عاری از اشتباه نیست، ممنون و سپاسگزار خواهیم بود اگر اساتید محترم و دانشجویان گرامی اشتباهات کتاب را به صورت کتبی به ما یادآور شوند تا در رفع آن بکوشیم. در پایان لازم می‌دانیم مراتب تشکر خود را از جناب آقای دکتر شیبانی که در ویرایش کتاب همکاری صمیمانه‌ای داشتند و ما را از رهنمودهای خود بهره‌مند کردند، اعلام کنیم.

با تشکر

سیدعلی میربزرگی

samirbozorgi@birjand.ac.ir

امیدرضا محمدی‌پور

o.mohammadipour@pnu.ac.ir

فصل اول

مفاهیم اساسی

هدف کلی

آشنایی با مفاهیم پایه در مکانیک سیالات.

هدف‌های یادگیری

پس از مطالعه این فصل موارد ذیل فراگرفته می‌شود:

- تعریف سیال و بیان تفاوت‌های آن با جسم جامد
- تشریح کامل فرض محیط پیوسته
- بیان ابعاد متغیرهای فیزیکی
- توصیف خواص مهم سیال همچون چگالی، لزجت، کشش سطحی
- بیان تفاوت میان سیالات تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر، نیوتنی و غیرنیوتنی، مایعات و گازها

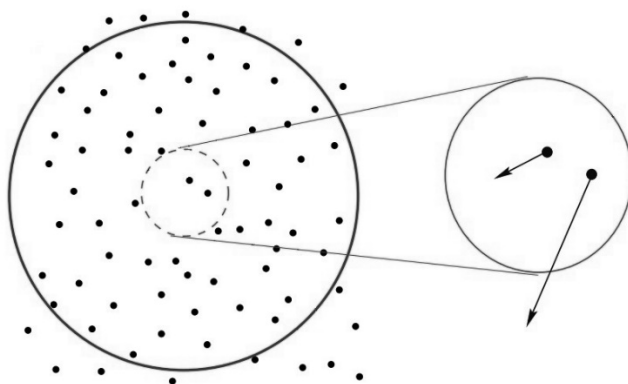
مقدمه

تصور کنید در یک عصر پاییزی درحال قدم‌زدن در یک فضای سبز هستید. زمانی که گام برمی‌دارید یک سیال به‌نام هوا را می‌شکافید و از میان آن عبور می‌کنید، سیالی که در همان حال آن را تنفس می‌کنید. در هر دم و بازدم، در حدود ۵۰۰ میلی‌لیتر هوا از طریق نای وارد ریه‌های شما می‌شود. سیال دیگری (خون)، اکسیژن موجود در هوای نای را به تمام سلول‌های بدن می‌رساند. در حدود ۵ لیتر از این سیال حیاتی در شبکه‌ای منظم از رگ‌های خونی به‌طول تقریبی ۱۰۰۰۰۰ کیلومتر در بدن شما جریان دارد. بیش از ۷۵ درصد وزن

شما از یک سیال (آب) تشکیل شده است. ۲۰۰۰ متر بالاتر از شما تبدیل حالت آب در آسمان قطرات باران را به وجود می‌آورد. قطراتی که تحت تأثیر نیروی گرانش مسیر خود را از میان هوا می‌شکافد تا به زمین برسد. برخورد قطرات باران به زمین، موجی از تغییرات فشار را به پیرامون خود ارسال می‌کند. این موج در هوا (سیال) منتشر شده و در گوش شما به عنوان یک «صدا» احساس می‌شود. قطرات باران در زمین فرو می‌روند و از طریق ریشه درختان جذب می‌شوند. آب جذب شده به کمک یک شبکه از آوندهای چوبی برخلاف نیروی جاذبه زمین به سمت بالا حرکت می‌کند تا به شاخ و برگ درخت منتقل شود. این توصیف را می‌توان به همین صورت گسترش داد اما مطمئناً تاکنون به هدف اصلی این بحث پی برده‌اید: زندگی ما به قدری با سیالات درهم آمیخته است که تصور وجود حیات بدون آن امکان‌پذیر نیست. در این فصل شما با سیال و مفاهیم اساسی مرتبط با آن آشنا خواهید شد. این فصل درحقیقت مقدمه‌ای در جهت شناخت، پیش‌بینی و درک صحیح رفتار سیال است. به عبارت دیگر این فصل اولین گام در مسیر شناخت مکانیک سیالات تلقی می‌شود. مکانیک قدیمی‌ترین شاخه علم فیزیک است که به بررسی رفتار مواد مختلف تحت تأثیر بارگذاری‌های متفاوت می‌پردازد. با توجه به ماهیت ماده شاخه‌های متفاوتی از علم مکانیک تعریف می‌شود. اگر مجموعه تمامی مایعات و گازها، سیال نامیده شود، مکانیک سیالات علمی است که به بررسی رفتار سیال ساکن (استاتیک سیال) و یا سیال متحرک (دینامیک سیال) می‌پردازد. این فصل با معرفی یک مدل (یک تقریب) از ماده آغاز شده و به دنبال آن به تفاوت‌های اساسی میان جامد و سیال (مایعات و گازها) می‌پردازد. پس از تفکیک سیال به مایع (تراکم‌ناپذیر) و گاز (تراکم‌پذیر)، ابزار لازم جهت تحلیل عددی سیال (ابعاد و آحاد) معرفی می‌شود. در نهایت برخی از مهم‌ترین خواص سیال معرفی می‌شوند.

۱-۱ محیط پیوسته

اولین قدم در تحلیل یک مسئله، مدل‌سازی آن است. سیال همانند هر ماده دیگری، از مجموعه عظیمی از مولکول‌ها تشکیل شده است که در حال حرکت و برخورد دائمی هستند.

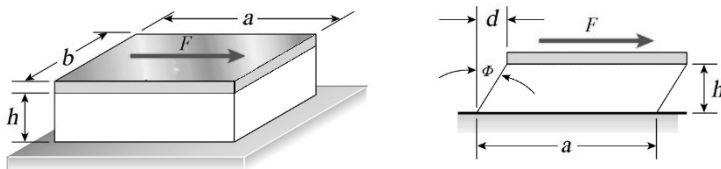


شکل ۱-۱. حجم انتخابی در بررسی سیال

مدل‌سازی این مجموعه عظیم مولکولی حتی باتوجه به سخت‌افزارهای امروزی نیز کاری بسیار زمان‌بر و پرهزینه است که جز در مواردی محدود (همانند گازهای رقیق)، کاربرد مهندسی دیگری ندارد. راهکار جایگزین در مدل‌سازی سیال، تقریب آن به صورت یک محیط پیوسته است. در بخش بعدی سیال به تفصیل تعریف خواهد شد، اما تا آن زمان سیال را به عنوان یک حالت از ماده، دربرگیرنده مایعات و گازها در نظر گرفته می‌شود. در فرض محیط پیوسته، سیال نه به عنوان مجموعه‌ای از مولکول‌ها، بلکه به صورت یک محیط انعطاف‌پذیر تلقی می‌شود که خصوصیات آن به کمک توابع پیوسته مکانی و زمانی قابل توصیف است. به عبارت دیگر فرض محیط پیوسته، رفتار ماکروسکوپی سیال (رفتار قابل رؤیت سیال) را مستقل از جزئیات میکروسکوپی (جزئیات مولکولی) آن تعریف می‌کند. در چنین شرایطی تحلیل جریان می‌تواند فارغ از جزئیات مولکولی سیال و با حجم محاسباتی به مراتب کمتر از مدل‌سازی انبوه مولکول‌ها، صورت پذیرد.

مانند هر فرضیه دیگری، اعتبار فرض محیط پیوسته نیز شرایط خاص مربوط به خود را می‌طلبد. در این فرضیه، خواص سیال مستقل از جزئیات میکروسکوپی آن تعریف می‌شود، بنابراین کوچک‌ترین حجم مورد بررسی در تحلیل می‌بایست دارای تعداد کافی از ذرات باشد تا این استقلال حفظ شود. به طور مثال اگر در تحلیل یک سیال، حجم مورد بررسی مطابق شکل ۱-۱، تنها حاوی دو مولکول باشد، هر لحظه این امر محتمل است که یکی از مولکول‌ها باتوجه به حرکت دائمی مولکول‌ها از حجم مورد نظر خارج شود. با خروج یک مولکول، ۵۰٪ جرم مورد بررسی، از حوزه تحلیل خارج می‌شود که تأثیر بسزایی

در نتایج تحلیل خواهد داشت. بنابراین نمی‌توان ادعا کرد که نتایج چنین تحلیلی مستقل از رفتار میکروسکوپی سیال است. اما اگر حجم موردبررسی بزرگ‌تر انتخاب شود، خروج و ورود یک یا چند مولکول تأثیر کمتری بر نتایج کلی خواهد داشت. علاوه‌براین با افزایش حجم موردبررسی، احتمال اینکه تعداد مولکول‌ها در این حجم ثابت باقی بماند (خروج یک مولکول با ورود مولکول دیگری همراه باشد)، افزایش خواهد یافت. بنابراین با بزرگ‌تر شدن حجم موردبررسی، اثرپذیری نتایج از رفتار میکروسکوپی کاهش می‌یابد. به‌همین‌صورت در فرض محیط پیوسته نیز کوچک‌ترین حجم موردبررسی می‌بایست دارای تعداد کافی از مولکول (به‌طورمثال یک میلیون مولکول) باشد تا خواص موردبررسی سیال، مستقل از جزئیات مولکولی قلمداد شود. حجمی که دربرگیرنده حداقل یک میلیون مولکول است، در مایعاتی همچون آب، در حدود 10^{-13} میلی‌مترمکعب (مکعبی با ابعاد کوچک‌تر از 10^{-4} میلی‌متر در هر ضلع) خواهد بود. این بدان‌معنی است که با مدل محیط پیوسته (آنچه در این کتاب می‌آموزید)، نمی‌توان حجمی کوچک‌تر از 10^{-13} میلی‌مترمکعب از آب را بررسی کرد. کوچک‌ترین حجم مجاز برای گازها کمی بزرگ‌تر است. یک مول از گاز ایده‌آل در فشار ۱ اتمسفر و دمای ۲۰ درجه سلسیوس حجمی برابر با ۲۴/۰۵ لیتر خواهد داشت. باتوجه به عدد آووگادرو، حجمی که حاوی حداقل یک میلیون مولکول از گاز ایده‌آل باشد در حدود 10^{-10} میلی‌مترمکعب (مکعبی با ابعاد کوچک‌تر از 10^{-3} میلی‌متر در هر ضلع)^۱ است. از آنجایی‌که در اغلب مسائل مهندسی، ابعادی بسیار بزرگ‌تر از این مقادیر موردنظر هستند، فرض محیط پیوسته که در سرتاسر کتاب از آن استفاده شده است، پاسخگوی طیف وسیعی از مسائل خواهد بود.



شکل ۲-۱. عکس‌العمل یک قطعه لاستیکی در مقابل نیروی برشی

۱. معیار دقیق‌تر در تعیین حوزه اعتبار فرض محیط پیوسته، عدد نادسن (Kn) است. عدد نادسن (Kn) به‌صورت نسبت طول پویس آزاد مولکول‌ها (λ) (فاصله‌ای که یک مولکول بین دو برخورد پیاپی طی می‌کند) به‌طول مشخصه مسئله موردبررسی (L)، تعریف می‌شود ($Kn = \lambda / L$). اگر عدد نادسن در مسئله موردبررسی به‌طورقابل ملاحظه‌ای کوچک‌تر از ۱ باشد ($Kn \ll 1$) باشد فرض محیط پیوسته در آن مسئله معتبر است.

۱-۲ سیال

در غالب فعاليت‌های مهندسی سه حالت (فاز) متفاوت از ماده شامل جامد، مایع و گاز مدنظر است.^۱ با وجود اینکه دو فاز گاز و مایع تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر دارند، اما از جهاتی نیز با یکدیگر مشترک هستند. مهم‌ترین وجه اشتراک این دو فاز که آن‌ها را از جامدات متمایز می‌کند، عدم توانایی آن‌ها در تحمل نیروهای برشی است. پیش از پرداختن به ادامه بحث، لازم است تصویر روشنی از نیروی برشی در ذهن داشته باشید. نیروی برشی، نیرویی است که به موازات سطح اعمال می‌شود. فرض شود که قرار است یک کیک با لایه‌ای از خامه پوشیده شود. نیرویی که از طرف کارد شیرینی‌پزی بر خامه اعمال می‌شود، یک نیروی برشی خواهد بود، چرا که در امتداد سطح خامه اعمال می‌شود. یک جسم جامد در مقابل نیروی برشی، یک تغییر شکل ثابت را تجربه می‌کند. به طور مثال قطعه‌ای از لاستیک را در نظر بگیرید که مطابق شکل ۱-۲ به دو صفحه صلب متصل شده است. با اعمال نیروی F در راستایی موازی با صفحه صلب، لاستیک تحت تأثیر نیروی برشی تغییر شکل می‌دهد. این تغییر شکل را می‌توان به کمک زاویه Φ بین حالت ابتدایی و انتهایی لبه لاستیک اندازه‌گیری کرد (شکل ۱-۲). زاویه Φ ، معیاری از تغییر شکل برشی است که کرنش برشی^۲ نام دارد. میزان کرنش برشی در جسم جامد تابع ساختار مولکولی ماده بوده و وابسته به خواص آن است. در یک جسم جامد مادامی که نیروی برشی ثابت باشد، کرنش برشی نیز ثابت خواهد ماند. این رفتار جامد را می‌توان به عنوان مقاومت آن در مقابل نیروی برشی تعبیر کرد. در نقطه مقابل، مایع و گاز در مقابل نیروی برشی چنین مقاومتی از خود نشان نمی‌دهند. اگر یک نیروی برشی بر مایع یا گاز اعمال شود، کرنش برشی حاصل (زاویه Φ) ثابت نبوده، با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

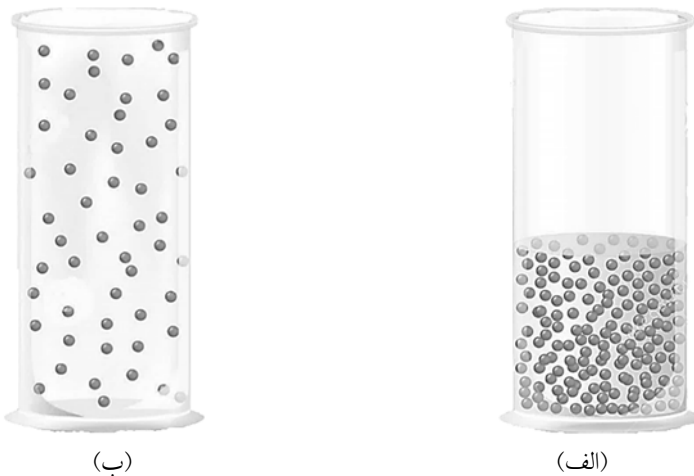
باتوجه به رفتار ماده در مقابل نیروی برشی، ماده را می‌توان به دو دسته جامد و سیال تقسیم کرد. در این تقسیم‌بندی، سیال ماده‌ای است که در مقابل نیروی برشی تغییر شکل داده و مادامی که این نیرو وجود داشته باشد به تغییر شکل خود ادامه می‌دهد. این تغییر شکل مداوم، موجب می‌شود تا جریانی از سیال تحت تأثیر نیروی برشی به وجود آید. در مکانیک

۱. دو فاز دیگر از ماده در دماهای بسیار بالا و بسیار پایین وجود دارند که به ترتیب پلاسما و چگالش بوز - انیشتین نامیده می‌شوند، اما در اکثر مسائل مهندسی، ماده در یکی از سه حالت جامد، مایع و گاز قرار دارد.

2. Shear Strain

برای برقراری ارتباط میان تغییر شکل و نیرو، عموماً از اندازه نیرو به طور مستقیم استفاده نمی‌شود، چراکه در این حالت بزرگی یا کوچکی نیرو مبهم است. یک نیروی مشخص می‌تواند برای یک جسم باتوجه به ابعاد آن، کوچک و یا بزرگ قلمداد شود. برای رفع این ابهام، معمولاً از نیرو به ازای واحد سطح استفاده می‌شود. نیرو به ازای واحد سطح، تنش^۱ نامیده می‌شود. به طور مثال در شکل ۱-۲، قطعه لاستیکی تحت تأثیر یک تنش برشی (تنش ناشی از نیروی برشی) به میزان $\tau = F/(a \cdot b)$ قرار گرفته است. به این ترتیب تعریف سیال را می‌توان به شکل زیر اصلاح کرد: یک سیال ماده‌ای است که تحت تأثیر تنش برشی، هرچقدر اندک، به طور پیوسته تغییر شکل می‌دهد.^۲

نتیجه‌ای که از این تعریف به دست می‌آید این است که در یک سیال ساکن، تنش برشی و یا در حقیقت نیروی برشی مؤثری وجود ندارد. در چنین شرایطی تمام نیروهای مؤثر بر سیال می‌بایست عمود بر سطح اثر خود باشند. تنش ناشی از این نوع نیرو، فشار نام دارد که در فصل دوم به تفصیل مورد بحث قرار می‌گیرد.



شکل ۱-۳. رفتار سیال در یک ظرف (الف) مایع (ب) گاز

1. Stress

۲. عکس العمل ماده در مقابل تنش برشی، اگرچه معیار روشنی برای تفکیک سیال از جامد است، اما معیار زمان در ارزیابی ثابت بودن یا نبودن زاویه کرنش برشی می‌تواند ابهاماتی به همراه داشته باشد. به طور مثال برخی از جامدات همانند فلزات می‌توانند تحت تأثیر تنش‌های بزرگ، تغییر شکل‌های کند اما مداومی را تجربه کنند که از آن به عنوان خزش یاد می‌شود؛ و یا آسفالت و بعضی از پلاستیک‌ها اگرچه در کوتاه مدت می‌توانند تنش برشی را با یک تغییر شکل الاستیکی تحمل کنند، اما در دراز مدت رفتاری همچون سیال از خود نشان می‌دهند. این دسته از موارد خارج از بحث این کتاب قرار دارد. بنابراین در طول متن هرجا به سیال اشاره شده منظور ماده‌ای است که به روشنی قادر به تحمل تنش برشی نباشد.

۱-۲-۱ گاز و مایع

سیال نامیدن گازها و مایعات در مکانیک سیالات به معنای نادیده گرفتن تفاوت‌های این دو فاز از ماده نیست. گازها و مایعات تفاوت‌های قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر دارند که ریشه در ساختار مولکولی آن‌ها دارد. در گازها فواصل مولکولی به قدری زیاد است که نیروهای بین مولکولی در آن‌ها جز در موارد برخورد دو مولکول، ناچیز هستند. در نقطه مقابل نیروهای بین مولکولی در مایعات به گونه‌ای است که به سختی می‌توان آن‌ها را متراکم کرد. درحقیقت در بسیاری از مسائل مهندسی، مایعات به عنوان سیالات تراکم ناپذیر تلقی می‌شوند. بنابراین یک مقدار مشخص از مایع، مستقل از شکل ظرف نگه‌دارنده خود، حجم ثابتی را اشغال می‌کند و اگر همانند شکل ۱-۳ (الف)، حجم ظرف بزرگ‌تر از حجم مایع باشد، مایع در مرز خود تشکیل یک سطح آزاد خواهد داد. گازها اما به طور قابل ملاحظه‌ای راحت‌تر متراکم می‌شوند. یک مقدار مشخص از گاز دارای حجم ثابتی نبوده، بدون تشکیل سطح آزاد تمامی فضای ظرف را اشغال می‌کند (شکل ۱-۳ ب).

جدول ۱-۱. نام و نماد ابعاد اصلی

نماد	بعد
M	جرم
L	طول
T	زمان
θ	درجه حرارت
C	مقدار نور
N	مقدار ماده
I	جریان الکتریکی

۱-۳ ابعاد و واحدها

تحلیل سیال، نیازمند یکسری تعاریف از کمیات فیزیکی مرتبط با سیال است که تحت عنوان خواص سیال شناخته می‌شود. در بخش‌های بعدی چند مورد از خواص سیال معرفی خواهند شد؛ اما این معرفی نیازمند یک ابزار است. ابزاری که بتواند یک معیار کمی و قابل اندازه‌گیری از خواص سیال را فراهم آورد.

آنچه یک متغیر فیزیکی را از نظر کمی ارائه می‌دهد، بُعد^۱ نامیده می‌شود. هر بُعد تنها زمانی قابل‌سنجش خواهد بود که بتواند در غالب اعداد ارائه شود. واحد^۲، مقیاسی است که به هر بُعد کمی، یک عدد نسبت می‌دهد. به‌طورمثال فرض شود قرار است دو فرد با یکدیگر مقایسه شوند. برای مقایسه نیاز به یک وجه قیاس است. باید تعیین شود که این مقایسه می‌بایست از چه منظری صورت پذیرد؟ پاسخ به این سؤال بُعد را مشخص می‌کند. به‌طورمثال دو نفر را می‌توان از منظر جرم مقایسه کرد. برای ارزیابی و مقایسه این بُعد (جرم) در دو نفر، نیاز به اعداد معنادار خواهد بود. وزن نفر اول ۷۷ کیلوگرم و وزن نفر دوم ۵۵ کیلوگرم است. آنچه اعداد ۷۷ و ۵۵ را معنادار می‌کند، واژه «کیلوگرم» است که یک واحد برای بُعد جرم تلقی می‌شود. اگرچه متغیرهای فیزیکی بسیار زیادی وجود دارند، با این وجود تنها تعداد محدودی بُعد به‌عنوان بُعد اصلی تعریف شده است. لیست ابعاد اصلی به‌همراه نماد آن‌ها در جدول ۱-۱ ذکر شده است. ابعاد مربوط به سایر متغیرهای فیزیکی، ابعاد فرعی نامیده می‌شوند. ابعاد فرعی را می‌توان به کمک روابط ریاضی و قوانین فیزیک بر مبنای ابعاد اصلی تعریف کرد. به‌طورمثال برای تعیین بُعد نیرو می‌توان از قانون دوم نیوتن استفاده کرد. (لازم به ذکر است شتاب یک بعدی فرعی است که به‌صورت LT^{-2} بر مبنای ابعاد اصلی طول و زمان تعریف می‌شود).

$$[F] = [ma] = [m][a] = MLT^{-2} \quad (1-1)$$

در رابطه فوق علامت «[]» نشان‌دهنده بُعد بوده و به‌صورت «بعد» خوانده می‌شود. دقت داشته باشید که معادل نهایی یک بُعد فرعی برحسب ابعاد اصلی داخل کروشه [] قرار نمی‌گیرد. در بعضی از متون به‌جای جرم، نیرو به‌عنوان بُعد اصلی گزارش شده است. در چنین شرایطی جرم، یک بُعد فرعی تلقی می‌شود و به‌صورت زیر برحسب ابعاد اصلی بیان می‌شود. (نیرو به‌عنوان بُعد اصلی دارای نماد F است).

$$[m] = \frac{[F]}{[a]} = FL^{-1}T^2 \quad (2-1)$$

از آنجایی که در مکانیک سیالات با معادلات جبری، دیفرانسیلی و انتگرالی متعددی مواجه می‌شوید، تعیین ابعاد کمیات مختلف می‌تواند در بعضی از موارد ددرساز باشد.