

هیدرودینامیک

ویژه دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی شیمی و نفت
مهندسی عمران، مهندسی کشاورزی و مهندسی مکانیک

تألیف:

دکتر محمدرضا جمعی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران

دانشگاه صنعتی اصفهان

دکتر عبدالرضا کبیری سامانی

دانشیار دانشکده مهندسی عمران

دانشگاه صنعتی اصفهان

مهندس محمدجواد اعرابی

دانش آموخته‌ی کارشناسی ارشد

دانشگاه صنعتی اصفهان

سرشناسه	: چمنی، محمدرضا، ۱۳۳۷
عنوان و نام پدیدآور	: هیدرودینامیک / تألیف: محمدرضا چمنی، عبدالرضا کبیری سامانی، محمدجواد اعرابی
مشخصات نشر	: اصفهان: انتشارات ارکان دانش، ۱۳۹۱.
مشخصات ظاهری	: ۲۳۶ ص.: جدول، نمودار.
شابک	: 978-600-287-013-1
وضعیت فهرست‌نویسی	: فیپا
موضوع	: هیدرودینامیک.
شناسه افزوده	: کبیری سامانی، عبدالرضا، ۱۳۵۶-
شناسه افزوده	: اعرابی، محمدجواد، ۱۳۶۴-
رده‌بندی کتبه	: ۱۳۹۱ هـ ۸/ج ۱۷۱/TC
رده‌بندی دیوینی	: ۵۳۲/۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۰۹۴۸۹۰



انتشارات ارکان دانش

نام کتاب	: هیدرودینامیک
مؤلفین	: دکتر محمدرضا چمنی، دکتر عبدالرضا کبیری سامانی، مهندس محمدجواد اعرابی
ناشر	: انتشارات ارکان دانش
نوبت چاپ	: چاپ اول - بهار ۱۳۹۲
شمارگان	: ۱۰۰۰ جلد
طراحی جلد	: مهندس سها گل‌افشار - نسرین مخاری
لیتوگرافی	: طاهّا
چاپ متن	: پارسا
چاپ جلد	: کنکاش
صحافی	: پیمان‌گستر
قطع و شمارش صفحات	: وزیری، صفحه ۲۳۶
بها	: ۸۵۰۰۰ ریال

ISBN: 978-600-287-013-1

شابک: ۰۱۳-۰۲۸۷-۶۰۰-۹۷۸

اصفهان: خیابان شیخ بهایی، چهارراه سرتیپ، کوی شهید مهرداد انصاری (سرتیپ)، نرسیده به طالقانی، پلاک ۹۲.
تلفن: ۲۳۴۱۳۳۹، نمابر: ۲۳۴۱۳۳۹، مرکز فروش: ۲۳۵۶۸۵۸، صندوق پستی ۳۳۱-۸۱۶۵۵
۲۳۵۶۸۵۹

«کلیه حقوق این اثر مطابق با قانون حقوق مؤلفان و مصنفان محفوظ و متعلق به مؤلفین انتشارات ارکان دانش می‌باشد و هرگونه چاپ و انتشار به هر شکل بدون کسب اجازه کتبی از ناشر ممنوع و پیگرد قانونی دارد.»

به نام خدا

پیشگفتار

علم هیدرودینامیک زیرشاخه‌ای از مکانیک سیالات است که به مطالعه‌ی رفتار آب (هیدرو) در حال حرکت (دینامیک) می‌پردازد. اگرچه محتوای این کتاب برای تدریس در دوره‌های کارشناسی ارشد عمران-گرایش‌های آب، سازه‌های دریایی، مهندسی سواحل و سازه‌های هیدرولیکی و مهندسی کشاورزی-گرایش مهندسی آب تنظیم شده است، اما مقداری از مطالب آن نیز قابل استفاده در دوره‌های دکترای مهندسی همان رشته‌ها است. علاوه بر این، مطالب این کتاب می‌تواند برای رشته‌های دیگر از قبیل مهندسی شیمی، مهندسی شیمی-مخازن هیدروکربوری، مهندسی مکانیک، مهندسی معماری کشتی و مهندسی مواد استفاده شود. تلاش زیادی صورت گرفته است تا مطالب کتاب به صورت آسان و قابل فهم و با دقت کافی ارائه شود و از رویکردهای محض ریاضی در ارائه‌ی مطالب خودداری شده است.

کتاب شامل شش فصل است. در فصل ۱، مختصری از مطالب درس مکانیک سیالات دوره‌ی کارشناسی ارائه شده است. در فصل ۲، رابطه‌های دیفرانسیلی حرکت سیال تراکم‌ناپذیر بسط داده شده است. در این فصل، رابطه‌های بقای جرم (رابطه‌ی پیوستگی) در دو دیدگاه اولری و لاگرانژی بیان شده است و رابطه‌ی اندازه حرکت (رابطه‌ی ناویر-استوکس) به چندین روش اثبات شده است. در فصل ۳ جریان آرام، در فصل ۴ جریان آشفته، در فصل ۵ جریان سیال ایده‌آل و در فصل ۶ لایه مرزی آرام پرداخته شده است. مطالب کتاب در دو رنگ (سیاه و خاکستری) چاپ شده است. در نگارش کتاب از آخرین مراجع روز استفاده شده است. واژه‌های مهم و اسامی دانشمندان با رنگ خاکستری درون متن مشخص گردیده‌اند و در زیرنویس کتاب، معادل انگلیسی آنها آورده شده است. بعضی از مطالب این کتاب مربوط به دستاوردهای نویسندگان کتاب است که در فصل ۵ به صورت مثال و یا مسأله ارائه شده است. سعی شده است تا مثال‌های هر فصل به اندازه‌ای باشند که در فهم اصول نظری کمک کند و حتی الامکان کاربردی باشند. در انتهای هر مبحث فصل، شماره مسایلی که در ارتباط با این فصل است در کنار آن در کادر خاکستری رنگ نگاشته شده است. جواب‌های سؤال‌های زوج مسایل در زیر صورت مسایل داده شده است. از سؤالات منتخب آزمون کارشناسی ارشد در سال‌های گذشته برای فهم بیشتر مطالب در مثال‌ها و مسایل کتاب استفاده شده است. برای مثال، نماد **مثال ۴ - ۲، م‌ش، ۸۳** معرف مثال ۲ از فصل ۴ است

و در آزمون کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی شیمی در سال ۸۳ ارایه شده است. نمادهای م‌ش‌ه مربوط به رشته‌ی مهندسی شیمی - مخازن هیدروکربوری، م‌ع مربوط به رشته‌ی مهندسی عمران، م‌ک مربوط به رشته‌ی مهندسی کشاورزی، م‌م‌ک مربوط به رشته‌ی مهندسی معماری کشتی و م‌م مربوط به رشته‌ی مهندسی مکانیک است.

در اینجا لازم می‌دانیم از کلیه‌ی کسانی که ما را در نگارش این اثر یاری داده‌اند، تشکر نماییم. از دانشجویان مقاطع تحصیلات تکمیلی خانم‌ها و آقایان؛ مهندس زهره احمدی، سارا باقری، علی صیادی، مرضیه علیزاده، زهرا منعمیان، نیلوفر مهین‌پرور و الهام نصیری به‌خاطر ویراستاری و بازبینی دقیق متن، از خانم مهندس فاطمه فرشی به‌خاطر تهیه‌ی قسمتی از مطالب فصل ۵ و از پرسنل محترم نشر ارکان دانش به ویژه آقای مهندس محمد ترابی‌ان به‌خاطر چاپ و انتشار کتاب و سرکار خانم مختاری که تنظیمات نهایی جلد را به عهده گرفتند صمیمانه تشکر می‌شود.

در این سال‌ها، همیشه کار با دانشجویان لذت‌بخش بوده و اصولاً انگیزه‌ی نگارش این کتاب از همان کلاس‌های درس شروع شده است. همه‌ی ما خاطرات خوبی از معلمان خود داشته‌ایم و خواهیم داشت. همیشه اعتقاد داریم که در حال یادگیری هستیم و این موضوع به‌خوبی روشن است که تدریس در کلاس درس، سهم به‌سزایی در این زمینه دارد. در خاتمه، دو بیت زیر از شاعر معروف سعدی که نشان‌دهنده‌ی غایت هرکاری است، آورده شده است.

که هستی را نمی‌بینم بقایی
کند در حق درویشان دعایی

غرض نقشی است کز ما باز ماند
مگر صاحب‌دلی روزی ز رحمت

محمد رضا چمنی

عبدالرضا کبیری

سید محمد جواد اعرابی

۳۹۲

تفهرست مطالب

پیشگفتار هفت

فصل ۱: اصول مقدماتی ۱

۱-۱ مفهوم لزجت ۲

۲-۱ دیدگاه‌های اولیه و لاگرانژی ۳

۳-۱ حجم کنترل ۵

۴-۱ رابطه‌های انتگرالی جریان ۶

۴-۱-۱ رابطه‌ی پیوستگی (بقای جرم) ۶

۴-۱-۲ رابطه‌ی اندازه حرکت ۷

۴-۱-۳ رابطه‌ی انرژی ۸

۵-۱ حرکت و تغییر شکل المان ۹

۵-۱-۱ نرخ انتقال ۱۰

۵-۱-۲ نرخ چرخش ۱۰

۵-۱-۳ نرخ کرنش محوری ۱۲

۵-۱-۴ نرخ کرنش برشی ۱۲

۵-۱-۵ فرم ماتریسی روابط انتقال و تغییر شکل ۱۳

۵-۱-۶ ورتیسبه و دوران ۱۴

۶-۱ مسایل ۱۶

فصل ۲: رابطه‌های جریان سیال ۲۳

۱-۲ رابطه‌ی پیوستگی ۲۴

۱-۲-۱ اثبات رابطه با استفاده از حجم کنترل کوچک ۲۴

۱-۲-۲ اثبات رابطه با استفاده از نظریه‌ی دایورجنس ۲۵

۲-۲ رابطه‌ی پیوستگی در دیدگاه لاگرانژی ۲۶

۳-۲ رابطه‌ی اندازه حرکت ۲۸

۴-۲ رابطه‌ی ناویر-استوکس ۳۲

۵-۲ مسایل ۴۰

فصل ۳: جریان آرام	۴۳
۱-۳ جریان موازی پایدار	۴۸
۱-۱-۳ جریان کوئت	۴۸
۲-۱-۳ جریان در مجرای مستطیلی	۵۱
۳-۱-۳ جریان کاملاً توسعه یافته در لوله	۵۳
۲-۳ جریان دوبعدی پایدار	۵۶
۱-۲-۳ جریان عبوری از یک صفحه‌ی متخلخل	۵۶
۲-۲-۳ جریان در اطراف نقطه‌ی ایستایی	۵۷
۳-۳ جریان موازی ناپایدار	۶۰
۱-۳-۳ جریان کوئت ناپایدار	۶۰
۲-۳-۳ مسأله‌ی اول استوکس	۶۳
۳-۳-۳ مسأله‌ی دوم استوکس	۶۵
۴-۳ مسایل	۶۸
فصل ۴: جریان آشفته	۷۷
۱-۴ پایداری جریان آرام	۷۸
۲-۴ شروع جریان آشفته - جریان انتقالی	۷۸
۳-۴ رابطه‌ی پیوستگی	۷۹
۴-۴ رابطه‌ی رینولدز	۸۱
۵-۴ جریان آشفته در لوله	۸۵
۱-۵-۴ اثبات رابطه	۸۵
۲-۵-۴ توزیع سرعت	۸۸
۳-۵-۴ سرعت متوسط	۹۷
۴-۵-۴ تنش برشی	۹۷
۶-۴ جریان آشفته در کانال باز	۱۰۲
۱-۶-۴ اثبات رابطه	۱۰۲
۲-۶-۴ توزیع سرعت	۱۰۳
۳-۶-۴ سرعت متوسط و تنش برشی	۱۰۴
۷-۴ اصلاح رابطه‌ی توزیع سرعت	۱۰۷
۸-۴ مسایل	۱۱۰

۱۱۵	فصل ۵: جریان سیال ایده آل
۱۱۶	۱-۵ رابطه‌ی اویلر
۱۱۶	۱-۱-۵ رابطه‌ی اویلر در دیدگاه اویلری
۱۱۷	۲-۱-۵ رابطه‌ی اویلر در دیدگاه لاگرانژی
۱۱۸	۲-۵ تابع جریان
۱۲۰	۳-۵ تابع پتانسیل
۱۲۱	۴-۵ رابطه‌ی برنولی
۱۲۲	۵-۵ کاربرد توابع تحلیلی در مسایل جریان سیال ایده آل
۱۲۳	۱-۵-۵ تبدیلات همبسی
۱۲۴	۲-۵-۵ ویژگی‌های توابع مختلط
۱۲۶	۳-۵-۵ تبدیل شوارتز-کریستوفل
۱۲۸	۴-۵-۵ سرعت در صفحه‌ی مختلط
۱۲۹	۶-۵ جریان پتانسیل دوبعدی
۱۲۹	۱-۶-۵ جریان‌های پتانسیل ساده‌ی دوبعدی
۱۳۳	۲-۶-۵ جریان‌های پتانسیل مرکب دوبعدی
۱۴۶	۷-۵ جریان پتانسیل سه‌بعدی
۱۴۶	۱-۷-۵ تابع جریان استوکس
۱۴۹	۲-۷-۵ تابع پتانسیل سه‌بعدی
۱۵۰	۳-۷-۵ الگوهای استاندارد جریان
۱۶۰	۸-۵ مسایل
۱۷۱	فصل ۶: لایه‌ی مرزی آرام
۱۷۲	۱-۶ مفهوم لایه‌ی مرزی
۱۷۳	۲-۶ متغیرهای لایه‌ی مرزی
۱۷۵	۳-۶ رابطه‌ی لایه‌ی مرزی پرتدل برای صفحه‌ی تخت
۱۷۸	۴-۶ راه‌حل بلاسیوس برای صفحه‌ی تخت
۱۸۵	۵-۶ رابطه‌ی فالکنر-اسکن برای لایه‌ی مرزی آرام
۱۸۵	۱-۵-۶ اشتقاق رابطه
۱۸۷	۲-۵-۶ جریان بر روی صفحه‌ی تخت بدون گرادین فشار (رابطه‌ی بلاسیوس)
۱۸۷	۳-۵-۶ جریان در اطراف گوه

۱۹۲	 ۴-۵-۶ جریان در اطراف نقطه‌ی ایستایی
۱۹۲	 ۵-۵-۶ جریان در کانال همگرا
۱۹۵	 ۶-۶ رابطه‌ی انتگرالی اندازه حرکت و ن کارمن
۱۹۵	 ۱-۶-۶ اشتقاق رابطه
۱۹۶	 ۲-۶-۶ روش توییت
۱۹۹	 ۳-۶-۶ رابطه‌ی انتگرالی اندازه حرکت کارمن برای صفحه‌ی تخت
۲۰۲	 ۷-۶ جریان انتقالی، تأثیر گرادیان فشار و جدایی جریان
۲۰۶	 ۸-۶ مسایل
۲۱۵	 مراجع
۲۱۷	 واژه‌نامه‌ی انگلیسی به فارسی

فصل ۱

اصول مقدماتی

- ۱-۱ مفهوم لزجت ۲ ۴-۱ رابطه‌های انتگرالی جریان ۶
- ۲-۱ دیدگاه‌های اولیه و لاگرانژی ۳ ۵-۱ حرکت و تغییر شکل المان ۹
- ۳-۱ حجم کنترل ۵ ۶-۱ مسایل ۱۶

به‌طور کلی می‌توان گفت که مکانیک سیالات علمی است که در آن به مطالعه‌ی رفتار سیال پرداخته می‌شود. همان‌طور که از تعریف سیال برمی‌آید، سیال همیشه تمایل به حرکت دارد. تنش‌های برشی و یا فشاری باعث حرکت سیال می‌شوند.

ابتدای این فصل اختصاص به ارایه مفهوم لزجت دارد و در ادامه دیدگاه‌های اولیه و لاگرانژی در تحلیل مسایل به‌صورت مختصر آمده است. سپس مفهوم حجم کنترل برای تحلیل حرکت سیال بیان شده و معادلات اساسی حرکت سیال در فرم انتگرالی بیان می‌گردد. این معادلات شامل رابطه‌ی پیوستگی (بقای جرم)، رابطه‌ی اندازه حرکت و رابطه‌ی انرژی است. سپس، مفاهیمی از سینماتیک سیال شامل تغییر مکان، چرخش و دوران بیان می‌شود. در بیشتر حالت‌های بررسی در این فصل، سیال تراکم‌ناپذیر مورد توجه قرار گرفته است.

۱-۱ مفهوم لزجت

هنگامی که دو سطح جامد نسبت به همدیگر شروع به حرکت کنند، نیروی اصطکاک در سطح تماس در خلاف جهت حرکت به وجود می آید. برای مثال، برای حرکت کردن میزی بر روی زمین، بایستی نیرویی بر میز وارد کرد که بیشتر از نیروی اصطکاک بین پایه‌های میز و زمین است. زمانی که سیال بر روی سطح جامد حرکت می‌کند و یا دو لایه‌ی سیال در کنار یکدیگر حرکت می‌کنند، شرایط مشابهی نیز ایجاد می‌شود. حرکت اجسام در هوا به مراتب آسان‌تر از حرکت در آب و روغن است. آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سقوط یک توپ شیشه‌ای درون استوانه‌ای که با روغن پر شده است، بسیار کندتر از حرکت آن در آب است. به نظر می‌رسد که خاصیتی از سیال وجود دارد که معروف مقاومت سیال در برابر جریان یافتن و یا سیال بودن است. این خاصیت از سیال، لزجت^۱ نامیده می‌شود.

به منظور یافتن رابطی برای لزجت در جریان آرام، لایه‌ای از سیال را در بین دو صفحه با فاصله‌ی L در نظر بگیرید، شکل (۱-۱). در این حالت چنانچه نیروی ثابت (F) به صفحه‌ی بالایی وارد شود و در عین حال، صفحه‌ی پایینی ثابت نگاه داشته شود، صفحه‌ی بالایی با سرعت ثابت و برابر V به صورت پیوسته به حرکت در می‌آید. سیال در تماس با لایه‌ی بالایی به صفحه چسبیده (بنابر اصل عدم لغزش^۲) و با همان سرعت صفحه‌ی بالایی حرکت می‌کند و در نتیجه، تنش برشی اعمالی به لایه‌ی سیال برابر $\tau = F/A$ است که A سطح تماس بین صفحه و سیال است. با توجه به اصل عدم لغزش سیال، سرعت سیال در تماس با صفحه‌ی پایینی برابر با سرعت صفحه پایینی یعنی صفر است. در جریان پایدار و آرام، سرعت سیال بین دو صفحه به صورت خطی بین دو مقدار صفر و V تغییر می‌کند. بنابراین، توزیع سرعت و گرادیان سرعت به صورت زیر به دست می‌آید:

$$u(y) = \frac{y}{L}V \quad ; \quad \frac{du}{dy} = \frac{V}{L} \quad (1-1)$$

که در آن y فاصله‌ی عمودی از صفحه‌ی پایینی است. در بازه‌ی زمانی dt ، صفحه‌ی بالایی به حرکت درآمده و نقطه‌ی N به اندازه‌ی $N dt = da$ در امتداد صفحه حرکت کرده تا به نقطه‌ی N' می‌رسد. لذا، ذرات سیال در امتداد خط MN به اندازه‌ی $d\beta$ می‌چرخند. تغییر مکان زاویه‌ای یا کرنش المان MN و از آنجا نرخ کرنش در اثر تنش برشی τ ، از رابطه‌ی زیر به دست می‌آید:

$$d\beta \approx \tan(d\beta) = \frac{du}{L} = \frac{V dt}{L} = \frac{du}{dy} dt \quad ; \quad \frac{d\beta}{dt} = \frac{du}{dy} \quad (2-1)$$

رابطه‌ی (۲-۱) نشان می‌دهد که نرخ کرنش برشی المان سیال، معادل گرادیان سرعت (du/dy) است. به علاوه، مطالعات آزمایشگاهی نشان می‌دهد که برای سیالات در جریان آرام، نرخ کرنش (گرادیان سرعت) با تنش برشی τ متناسب است. بنابراین، رابطه‌ی (۲-۱) به صورت زیر درمی‌آید:

$$\tau \propto \frac{d\beta}{dt} \quad ; \quad \tau \propto \frac{du}{dy} \quad (3-1)$$