



مکانیک سیالات پیشرفته

(ویراست دوم)

بهار فیروز آبادی



مؤسسه انتشارات علمی
دانشگاه صنعتی شریف

۳۵۵

مکانیک سیالات پیشرفته (در امتداد)

تألیف: دکتر بهار فیروزآبادی (عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شریف)
مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف، تهران

چاپ اول: ۱۳۹۸

شمارگان: ۳۰۰

بها: ۸۵۰۰۰ تومان

حق چاپ برای مؤسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف محفوظ است.

ISBN 978-964-208-228-5

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۲۰۸-۲۲۸-۵

تلفن: ۰۲۱-۶۶۱۶۴۰۷۲-۶۶۱۶۴۰۷۰-۳۱۲

دفتر مرکزی: خیابان آزادی - دانشگاه صنعتی شریف

دفتر فروش: میدان انقلاب - خیابان شهید منیری جاوید (اردیبهشت) - ساختمان بهمن - پلاک ۸۷ - طبقه چهارم - پست ۴۰۲

تلفن: ۶۶۴۰۵۱۳۲-۶۶۹۶۷۸۹۶

فروش اینترنتی: book.sharif.ir

پست الکترونیکی: publishing@sharif.ir

موضوع: سیالات - مکانیک
Fluid-mechanics
موضوع: سیالات - مسائل، تمرین‌ها و غیره (عالی)
موضوع: Fluid mechanics- problems, exercises, etc. (Higher)
شناسه افزوده: دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات علمی
Sharif University of Technology, Institute
of Scientific Publications
رده‌بندی کنگره: TA۳۵۷
رده‌بندی دیویی: ۶۲۰/۱۰۶
شماره کتابشناسی ملی: ۵۹۲۹۲۹۰

سرشناسه: فیروزآبادی، بهار، ۱۳۳۵
عنوان و نام پدیدآور: مکانیک سیالات پیشرفته / تألیف بهار فیروزآبادی
وضعیت ویراسته: [ویراست ۲]
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی شریف، مؤسسه انتشارات علمی، ۱۳۹۸
مشخصات ظاهری: ۵۰۲ ص.، مصور، جدول
شابک: 978-964-208-228-5
وضعیت فهرست‌نویسی: فیا
یادداشت: بخشی از کتاب حاضر قبلاً توسط همین ناشر در سال ۱۳۹۶
به صورت جلدی منتشر شده است.
یادداشت: واژه‌نامه
یادداشت: نمایه

بسم الله الرحمن الرحيم

فهرست مطالب

پیشگفتار

هفت

فصل ۱. اغیاء تانسوری

۱

۲

۵

۵

۱۰

۱۱

۱۵

۱۷

۲۰

۲۴

۲۵

۱- قوانین نشانه‌گذاری اندیسی

۲-۱ چند تانسو حروف

۳-۱ جبر تانورها

۴-۱ چند تعریه

۵-۱ تبدیل تانسورها

۶-۱ بردار دوگانه

۷-۱ مقادیر ویژه و محورهای ویژه

۸-۱ دیفرانسیل تانسورها

مسائل

مراجع

فصل ۲. سینماتیک جریان سیال

۲۷

۲۷

۳۱

۳۴

۳۷

۴۲

۴۴

۴۸

۵۰

۱-۲ محیط پیوسته

۲-۲ مختصات اولری و لاگرانژی

۳-۲ مکانیزم‌های حرکت در سیال

۴-۲ الگوهای موجود در بررسی حرکت سیال

۵-۲ سیرکولاسیون و ورتیسیته

۶-۲ دوران و گرداب

مسائل

مراجع

فصل ۳. معادلات حاکم بر حرکت سیال

۵۱

۵۱

۶۱

۱-۳ خواص سیال

۲-۳ نظریه انتقال رینولدز

۶۵	۳-۳ قوانین بقا
۷۶	۳-۴ معادله مشخصه سیال نیوتنی
۸۰	۳-۵ ضرایب لزجت
۸۳	۳-۶ معادلات ناویر-استوکس
۸۵	۳-۷ معادله انرژی سیال نیوتنی
۸۷	۳-۸ جمع‌بندی دستگاه معادلات حرکت سیال نیوتنی
۸۹	۳-۹ معادلات حاکم در مختصات دورانی
۹۴	۳-۱۰ معادله برنولی
۹۵	۳-۱۱ شرایط مرزی در معادلات حرکت سیال
۱۰۴	مسائل
۱۰۶	مراجع

۱۰۹	فصل ۴. دینامیک گرداب
۱۰۹	۴-۱ تعریف ورتیسیت
۱۱۱	۴-۲ معادله انتقال ورتیسیت
۱۱۶	۴-۳ تولید ورتیسیت روی جدار جامد
۱۲۱	۴-۴ معادله ورتیسیت در جریان غیرلزج
۱۲۳	۴-۵ نظریه کلوین
۱۲۶	۴-۶ برهم‌کنش گرداب‌ها
۱۳۴	۴-۷ گرداب‌ها در اطراف بال هواپیما
۱۳۹	مسائل
۱۴۲	مراجع

۱۴۵	فصل ۵. جریان پتانسیل دوبعدی یا صفحه‌ای
۱۴۷	۵-۱ تابع جریان و تابع پتانسیل
۱۵۲	۵-۲ کاربرد اعداد مختلط در جریان پتانسیل
۱۵۵	۵-۳ جریان‌های ساده
۱۶۱	۵-۴ جریان‌های ترکیبی
۱۷۶	۵-۵ جریان در گوشه
۱۷۸	۵-۶ روش تصویر
۱۸۳	۵-۷ قوانین اننگرال بلازیوس
۱۸۶	۵-۸ تبدیل همدیس
۱۹۰	۵-۹ نظریه ایرفویل‌ها و شرط کوتا
۲۰۰	مسائل
۲۰۹	مراجع

فصل ۶. جریان پتانسیل سه بعدی و متقارن محوری

- ۲۱۱ ۱-۶ معادله لاپلاس
۲۱۲ ۲-۶ حل معادله لاپلاس
۲۱۴ ۳-۶ جریان های ساده
۲۱۶ ۴-۶ جریان اطراف دماغه گرد
۲۲۰ ۵-۶ جریان اطراف کره
۲۲۴ ۶-۶ چشمه یا توزیع خطی
۲۲۵ ۷-۶ کره در میدان جریان یک چشمه
۲۲۷ ۸-۶ انرژی جنبشی
۲۲۸ ۹-۶ جرم افزوده
۲۳۰ ۱۰-۶ جرم افزوده در حرکت اجسام شتابدار
۲۳۲ مسائل
۲۳۵ مراجع
۲۳۹

فصل ۷. امواج سطحی

- ۲۴۱ ۱-۷ واژه شناسی امواج
۲۴۲ ۲-۷ موج سطحی
۲۴۵ ۳-۷ اثر کشش سطحی
۲۵۲ ۴-۷ تغییرات سرعت و فشار در موج سطحی
۲۵۵ ۵-۷ مسیر حرکت ذرات سیال در عبور موج
۲۵۷ ۶-۷ امواج ایستا
۲۶۱ ۷-۷ موج گرانشی در یک ظرف محدود
۲۶۴ ۸-۷ موج داخلی در فصل مشترک دو لایه مایع
۲۶۷ مسائل
۲۷۳ مراجع
۲۷۸

فصل ۸. حل های دقیق معادله ناویر-استوکس

- ۲۷۹ ۱-۸ جریان های موازی
۲۸۰ ۲-۸ کاربرد جریان های موازی
۲۹۶ ۳-۸ جریان های ناپایا
۳۰۳ ۴-۸ جریان های مکشی / دمشی
۳۲۳ ۵-۸ جریان های ژئوفیزیکی (جریان اِکمن)
۳۳۱ ۶-۸ حل دقیق معادلات با استفاده از روش تشابه
۳۳۵

۳۴۶

۷-۸ جریان‌های خزشی

۳۶۴

مسائل

۳۷۶

مراجع

۳۷۷

فصل ۹. جریان لایه مرزی لایه‌ای

۳۷۸

۹ ۱ لایه مرزی صفحه تخت

۳۹۵

۹-۲ جریان لایه مرزی اطراف اجسام ضخیم

۳۹۹

۹-۳ حل فالکنر-اسکن

۴۰۸

۹ ۴ معادله انتگرالی مومنتوم در حضور گرادیان فشار

۴۱۰

۹-۵ روش نفوذی کارمن - پل‌هاوزن

۴۲۰

۹-۶ جریان‌های برشی آزاد

۴۳۴

۹-۷ لایه مرزی با تقریب مجری

۴۳۹

۹ ۸ لایه مرزی سه‌بعدی

۴۴۵

مسائل

۴۴۸

مراجع

۴۵۱

فصل ۱۰. پایداری هیدرودینامیکی

۴۵۴

۱۰-۱ روش مدهای نرمال

۴۵۷

۱۰-۲ ناپایداری کلونین-هلمهولتز

۴۶۳

۱۰-۳ ناپایداری گرمایی رایلی-بنارد

۴۶۹

۱۰-۴ جریان چرخشی و ناپایداری گریز از مرکز، ناپایداری تیلور

۴۷۵

۱۰-۵ پایداری جریان‌های برشی موازی، معادله آر-سامرفلد

۴۸۰

۱۰ ۶ حل‌های عددی معادله آر-سامرفلد

۴۸۶

۱۰-۷ گذار جریان از لایه‌ای به معشوش

۴۸۸

مسائل

۴۹۰

مراجع

۴۹۱

واژه‌نامه

۴۹۳

فهرست راهنما

پیشگفتار

این کتاب حاصل تدریس درس‌های مکانیک سیالات پیشرفته و جریان لزج در ۲۰ سال گذشته در دانشگاه صنعتی شریف است. اگرچه کتاب حاوی ریاضیات پیچیده و متنوعی است ولی تلاش شده تا با ذکر مثال‌ها و مسائل واقعی از حالت نظری صرف خارج و به فضاهای واقعی و رویدادهای عملی و کاربردی مکانیک سیالات سوق داده شود.

مکانیک سیالات به نوعی است که زمینه‌های بسیار متنوعی را پوشش می‌دهد و نمی‌توان همه آنها را در یک کتاب بیان کرد. به همین دلیل این کتاب بیشتر بر سیال تراکم‌ناپذیر متمرکز شده است.

کتاب حاضر در ده فصل نوشته شده است. فصل اول به عنوان مقدمه و یادآوری دربارهٔ ریاضیات تانسوری است. فصل دوم سینماتیک حرکت سیال را بدون توجه به عامل به وجودآورندهٔ آن ارائه کرده است. فصل سوم معادلات بقای جرم، موم، و انرژی را بیان کرده و تلاش شده تا تمام معادلات به صورت کلی استخراج شود. سپس حالت‌های ویژهٔ هر معادله و شرایط مرزی آنها توضیح داده شده است. فصل چهارم به بررسی دینامیک گریز، اصطکاک، گرداب و ورتیسیت از جمله مسائل پررمز و راز مکانیک سیالات هستند و به عنوان مثال حرکت ماهی‌ها و پرندگان در طبیعت را به خوبی می‌توان به کمک آنها تحلیل کرد. علاوه بر آن، در جریان‌های آب و هوایی نقش قابل ملاحظه‌ای دارند. به همین دلیل در فصل چهارم، با تئوری‌های سیال و تصفیه‌های کیفی به توضیح آنها پرداخته شده است. فصل پنجم و ششم به جریان پتانسیل دوبعدی و سه بعدی اختصاص دارد و تئوری‌های هر کدام بیان شده است. علاوه بر آن، کاربردهای آنها نیز در تبیین «میرویی برای» ایرفویل‌ها آورده شده است. فصل هفتم با استفاده از تئوری جریان پتانسیل، امواج سطحی را تجزیه و تحلیل می‌کند.

فصل هشتم نمونه‌هایی از ساده‌سازی و حل معادله ناویر-استوکس را بیان کرده و اثرات لزجت را در معادلات حرکت سیال لحاظ می‌کند. این معادلات چنان پیچیده‌اند که هنوز وجود جواب آنها ثابت نشده است. در سال ۲۰۰۰ مؤسسه ریاضیات کلی در آمریکا، هفت مسئله حل‌نشده جهانی هزاره سوم را ارائه کرد که یکی از آنها وجود جواب برای معادله ناویر-استوکس بود. برای حل هر کدام از این هفت مسئله ریاضی، یک میلیون دلار جایزه تعیین شده که در طول ۱۹ سال گذشته فقط یکی از آن هفت مسئله حل شده است. ولی معادله ناویر-استوکس همچنان حل‌نشده باقی مانده است.

اگرچه در این کتاب به پیچیدگی‌های ریاضی معادله ناویر-استوکس پرداخته نمی‌شود، اما از منظر کاربردی تلاش شده حلی برای آن در مسائل مکانیک سیالات بیابیم.

فصل نهم درباره لایه مرزی و استخراج معادلات آن از معادلات ناویر-استوکس و روش‌های حل آنهاست. فصل پایانی کتاب به پایداری خطی اختصاص دارد. پایداری هیدرودینامیکی در سیالات، موضوعی بسیار پیچیده است که عمدتاً با بررسی‌های تجربی، ویژگی‌های آن بیان می‌شود. اما با تئوری ساده‌ای که در این فصل بیان شده، می‌توان تا حدودی دریچه‌ای به سوی شناخت ایجاد اغتشاش در سیال، گشود. اگر جریان کاملاً معشوش شد آنگاه در کتاب‌هایی که به موضوع آشفتگی در سیال اختصاص دارد می‌توان بحث را دنبال کرد.

ذکر این نکته لازم است که پیشتر کتابی با عنوان مکانیک سیالات پیشرفته، جلد اول تألیف نموده‌ام که به جریان لزج اختصاص دارد. در نظر داشتم که در جلد دوم فقط به جریان پتانسیل بپردازم. اما توصیه شد که این کتاب مستقل باشد تا بتوان به صورت عمومی از آن استفاده کرد. برای تألیف این اثر از کتاب و مقالات متعددی استفاده شده که در مراجع به آنها اشاره شده است و برای انتقال مفهوم واقعی پدیده‌های سیالاتی به دانشجویان، از فیلم‌های موجود در این زمینه نیز استفاده کرده‌ام. در طی سال‌های تألیف کتاب، سؤالات دانشجویان پس از هر کلاس درس، راهگشای خوبی برای توضیح بهتر مطالب بوده است.

همان‌طور که خوانندگان محترم کتاب می‌دانند، اصطلاحات تخصصی ویژه‌ای در مکانیک سیالات وجود دارد که فقط در حیطه این علم قابل تعریف است و برای آنها در زبان فارسی معادل‌سازی نشده است. در بسیاری از کتاب‌های تألیفی و یا ترجمه، این اصطلاحات را فارسی‌نویسی می‌شوند. در این کتاب تلاش شده برای اصطلاحات تخصصی از معادل‌های مناسب فارسی استفاده شود. باین حال کلماتی هم وجود دارند که به دلیل نداشتن معادل‌های مناسب، فقط فارسی‌نویسی شده‌اند. امید است گروه‌های تخصصی واژه‌گزینی فرهنگستان زبان ایران بتوانند معادل‌هایی را برای این اصطلاحات انتخاب کنند. در پایان از خوانندگان محترم درخواست می‌کنم پیشنهادها و نظرات اصلاحی خود را درباره کتاب از طریق نشانی firoozabadi@sharif.edu به اطلاع مؤلف برسانند تا در چاپ‌های بعدی اعمال شود.

بهار فیروزآبادی

۱۳۹۸