

مبانی مکانیک شاره‌ها

نیوتنی و نانیوتنی
علی نجفی

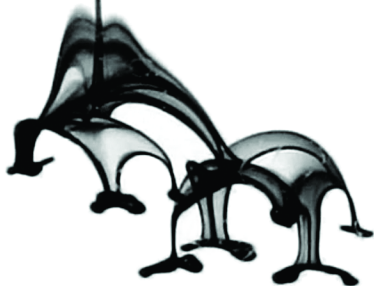
مبانی مکانیک شاره‌ها

Fundamentals of Fluid Mechanics

Newtonian and Non-Newtonian

Ali Najafi

شرح روی جلد: فصل مشترک دو شاره، زمانی که شاره‌ی بالایی چگال‌تر باشد، پایدار نمانده و فرومی‌باشد. این پدیده به ناپایداری ریلی-تیلور مشهور است. جزئیات این مسأله به همراه فیزیک دیگر ناپایداری‌های هیدرودینامیکی در فصل هشتم کتاب بررسی شده است.



بسم الله الرحمن الرحيم

مبانی مکانیک شاره‌ها

نیوتنی و نانیوتنی

علی نجفی

عضو هیأت علمی دانشگاه زنجان

انتشارات دانشگاه زنجان

۱۳۹۳

سرشناسه	: نجفی، علی، ۱۳۵۴ -
عنوان و نام پدیدآور	: مبانی مکانیک شاره‌ها: نیوتنی و نانیوتنی / علی نجفی؛ ویراستار کیوان آقابابایی سامانی.
مشخصات نشر	: زنجان: دانشگاه زنجان، ۱۳۹۳
مشخصات ظاهری	: ر، ۲۳۹ ص.
شابک	: 978-964-8885-60-6 ۱۶۴۰۰۰ ریال
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
یادداشت	: واژه‌نامه.
یادداشت	: کتابنامه: ص. ۲۲۸-۲۲۵.
موضوع	: سیالات -- مکانیک
موضوع	: سیالات غیر نیوتنی
شناسه افزوده	: آقابابایی سامان، کیوان ، ۱۳۵۱ -
رده بندی کنگره	: ۱۳۹۳ م۳ن/۲/۱۴۵/۱۴۵ QC
رده بندی دیویی	: ۵۳۲/۰۵
شماره کتابشناسی ملی	: ۳۷۲۱۶۴۲



دانشگاه زنجان

مبانی مکانیک شاره‌ها، نیوتنی و نانیوتنی

علی نجفی (عضو هیئت علمی دانشگاه زنجان)

ویراستار: کیوان آقابابایی سامانی (عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی اصفهان)

طرح جلد: لیلا فلاحت پیشه

نوبت چاپ: اول سال چاپ: ۱۳۹۳

شمارگان: ۱۱۰۰ نسخه قیمت: ۱۶۴۰۰۰ ریال

نشانی: زنجان، کیلومتر ۶ جاده تبریز، دانشگاه زنجان - صندوق پستی ۳۱۳

تلفن: ۰۲۴-۳۳۰۵۲۶۴۱ -۰۲۴ دورنگار: ۰۲۴-۳۲۲۸۳۰۷۷

مراکز پخش:

دانشگاه زنجان، روبروی سلف مرکزی، جهاد دانشگاهی زنجان تلفن: ۳۳۰۵۲۲۳۶

کتابیران ۱: خیابان انقلاب، بین خیابان فروردین و خیابان فخر رازی، روبروی دانشگاه تهران

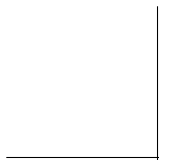
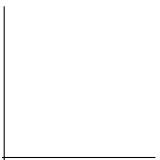
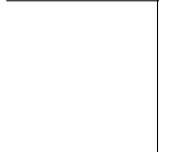
مجتمع فرهنگی فروزنده، طبقه همکف، واحد ۳۱۶ تلفن تماس: ۴-۶۶۹۵۲۹۳۳

کتابیران ۲: خیابان انقلاب، بین خیابان فروردین و خیابان فخر رازی، روبروی دانشگاه تهران

مجتمع فرهنگی فروزنده، طبقه همکف، واحد ۳۱۹ تلفن تماس: ۶۶۹۵۳۴۶۲

شابک: ۶-۶۰-۸۸۸۵-۹۶۴-۹۷۸ ISBN:978-964-8885-60-6

تقدیم به همسر



پیش‌گفتار

مکانیک محیط‌های پیوسته و مکانیک شاره‌ها، بخش مهمی از فیزیک کلاسیک را تشکیل می‌دهند. درک سازوکارهای فیزیکی در بسیاری از پدیده‌های روزمره، احتیاج به دانش مکانیک شاره‌ها دارد. شاید بتوان پیدایش و شروع توجه به پدیده‌های شارشی را به اندازه‌ی قدمت بشر دانست. انسان نخستین، همواره به حرکت آب و پرواز پرندگان در هوا می‌اندیشیده است. ارشمیدس و لئوناردو داوینچی از قدیمی‌ترین افراد مؤثر در علم شاره‌ها هستند. ارشمیدس، ریاضی‌دان نامی یونان، حدود ۲۵۰ سال پیش از میلاد، توجه زیادی به شاره‌ها داشت. او قوانین مربوط به شناور بودن را کشف کرد. داوینچی نیز ۵۰۰ سال قبل، در کتاب خود سعی زیادی در ایجاد شهود واقعی برای خطوط جریانی شاره‌ها کرده است. وی قوانین پایستگی جرم را برای شاره‌های تراکم‌ناپذیر به درستی به دست آورده است [۲۴، ۴۴]. برنولی، تورپیچلی، تیلور و رینولدز از دیگر افرادی هستند که تأثیر فراوانی در گسترش و توسعه‌ی مبانی مکانیک شاره‌ها داشته‌اند.

با وجود قدیمی بودن دانش شاره‌ها، هنوز جنبه‌های مختلفی از آن به‌روز و فیزیکدانان فراوانی درگیر مسائل آن هستند. دانش شاره‌ها در علم و به‌طور شاخص در فیزیکِ روز، جایگاه برجسته‌ای دارد. جدا از سابقه‌ی تاریخی و کاربردی که مکانیک شاره‌ها در مسائل روزمره‌ی صنعتی مثل جریانه‌های درون لوله‌ها، حرکت شناسی اجسام پرنده و شناور (هواپیما و کشتی و...)، حرکت شناسی

شاره‌های پشت سد، توربین‌ها و موتورهای گرمایی و دیگر مسائل از این نوع دارد، بسیاری از مسائل دیگر نیز هستند که توجه بنیادی به مکانیک شاره‌ها را لازم دارند. در اینجا به برخی از مواردی که ارتباط مستقیمی با دانش شاره‌ها دارند، اشاره می‌کنیم.

هواشناسی و اقلیم‌شناسی از مهم‌ترین شاخه‌هایی هستند که کاربرد وسیعی از مکانیک شاره‌ها را نیاز دارند. برای پیش‌بینی‌های کوتاه مدت، میان مدت و بلند مدت شرایط هوایی، لازم است تا دینامیک جفت شده‌ی جو و اقیانوس‌ها بررسی شود. غیرخطی بودن معادلات تحولی شاره‌ها (معادله‌ی ناویه-استوکس) و البته بزرگ بودن سیستم اقلیم، دلایل اساسی برای پیچیده بودن این مسائل هستند. مسأله‌ی تلاطم به عنوان یکی از سخت‌ترین مسائل فیزیک کلاسیک، از بین چند مسأله‌ی انگشت‌شماری که هنوز حل نشده‌اند، در پدیده‌های جوی نمود اساسی دارد. سعی در یافتن جوابهای دقیق یا روش‌های عددی با کارایی بیشتر، از چالش‌های اساسی در مطالعه‌ی مسأله‌ی تحول اقلیم است.

از طرف دیگر، در دو دهه‌ی اخیر و به‌همراه توجه بیشتری که به شاخه‌ی ماده‌ی چگال نرم صورت گرفته، احتیاج به دانش شاره‌ها بیشتر احساس می‌شود. شاره‌های پلیمری صنعتی و زیستی، بلورهای مایع، شاره‌ی درون سلولی و خون از مهم‌ترین مثال‌های مسائل ماده‌ی چگال نرم هستند. کشف بلورهای مایع و خواص منحصر به فرد اپتیکی و شارشی که آنها دارند، باعث شده تا استقبال فراوانی از آنها در صنعت شود. خواص شارشی بیشتر این شاره‌ها با رفتارهای نیوتنی سازگار نیست. در شاره‌های نیوتنی ارتباط خطی بین تنش و نرخ برش وجود دارد، در صورتی که در شاره‌های پلیمری، ارتباط خطی ساده‌ای بین تنش و نرخ برش وجود ندارد. به این سبب، به این نوع شاره‌های پیچیده، شاره‌های نانیوتنی نیز گفته می‌شود. مطالعه‌ی رفتارهای نانیوتنی به دو صورت ریزمقیاس و بزرگ مقیاس صورت می‌گیرد. در این کتاب مختصری از مبانی پدیده‌شناختی و برخی از ساده‌ترین مدل‌های ریزمقیاس برای شاره‌های نانیوتنی را ارائه می‌کنیم.

مثال دیگری برای کاربرد مکانیک شاره‌ها، فیزیک زمین و شناخت حرکت لایه‌های آن است که در مقیاسهای زمانی میلیون سال انجام می‌گیرد. زمین‌شناسان با مطالعه‌ی مدل‌های نظری مبتنی بر مکانیک شاره‌ها که برای تحول زمین ارائه کرده‌اند، سعی می‌کنند تا تصویر درستی از پدیده‌هایی مثل زلزله و آتش‌فشان ارائه کنند. کشف مخازن نفتی و ارائه راهکارهای استخراجی با کارایی بیشتر، حوزه‌ای دیگر از علم زمین است که در آن سعی می‌شود تا حرکت‌شناسی شاره‌ها در محیط‌های

چ پیش‌گفتار

متخلخل صورت گیرد. در کیهان‌شناسی و فیزیک سماوی از مکانیک شاره‌ها برای بررسی تحول کهکشانها استفاده می‌شود. در آنجا مجموعه‌ی کهکشانها به عنوان شاره‌ای تراکم پذیر در نظر گرفته می‌شود. علاوه بر این، در مقیاس‌هایی کوچکتر از کهکشان، درون ستاره‌ها نیز از مکانیک شاره‌ها استفاده‌ی فراوانی می‌شود. به عنوان مثال فیزیک خورشید را در نظر بگیرید. شاره‌ای پیچیده که خواص مغناطیسی نیز دارد، پیوسته و در طی میلیون‌ها سال متحول می‌شود. هنوز تصویر واضحی از فیزیک لکه‌های خورشیدی، ساختار شراره‌های تاج خورشید و بسیاری دیگر از پدیده‌های مرتبط با خورشید در اختیار نداریم. این ادعای مهم که بسیاری از پدیده‌های خورشیدی از نوع ناپایداری‌های شارشی هستند، احتیاج به بررسی‌های بیشتری دارد.

با وجود اهمیت مکانیک شاره‌ها، عموماً دانشجویان رشته‌ی فیزیک، دانش مناسبی از این شاخه کسب نمی‌کنند. این ادعا که بی‌توجهی به مکانیک شاره‌ها، یکی از ضعف‌های اساسی در دوره‌های آموزشی دانشجویان فیزیک است، خیلی دور از حقیقت نیست. البته در برنامه‌ی آموزشی دوره‌ی کارشناسی، علاوه بر مطالب پراکنده‌ای که در دروس پایه در مورد برخی جنبه‌های شاره‌ها وجود دارد، درس اختیاری مکانیک شاره‌ها نیز گنجانده شده است، ولی به دلایل مختلفی، توجه مناسبی به این درس صورت نمی‌گیرد. اختیاری بودن درس و نبود منبع مناسبی به زبان فارسی، از دلایل این بی‌توجهی، از طرف دانشجویان و هم از جانب مدرسین است. کتابهای بسیاری با عنوان مکانیک شاره‌ها یا موارد مرتبط به آن به زبان فارسی ترجمه یا تألیف شده است که برای دانشجویان رشته‌های مهندسی کاربرد دارند. این نوع کتابها برای دانشجویان فیزیک مناسب نیستند. از طرفی این کتابها طوری طراحی شده‌اند که در یک دوره‌ی آموزشی ۲ تا ۳ نیم‌سال، اصول اساسی دانش شاره‌ها را به دانشجو می‌آموزند. برای دانشجوی فیزیک، حتی اگر درس شاره‌ها الزامی نیز شود، منطقی نیست که زمان آموزش آن را تا ۳ نیم‌سال گسترش داد. علاوه بر این، در کتاب‌های مهندسی جنبه‌های کاربردی و مثالهای عددی مربوط به مسائل خاصی از پدیده‌های صنعتی، بسیار پررنگ تر از مبانی فیزیکی دینامیک شاره‌ها ارائه می‌شوند.

دلایل برشمرده در بالا، بخشی از انگیزه‌های تألیف این کتاب را نشان می‌دهند. هدف این کتاب پرداختن به تمامی موضوعات مکانیک شاره نیست. ارائه‌ی مبانی فیزیکی دانش شاره‌ها اولیت اصلی این کتاب است. به عنوان نمونه، دو مسأله‌ی بسیار مهم دینامیک شاره‌های تراکم پذیر و بحث تلاطم، در این کتاب بررسی نشده است. ساختار این کتاب به این صورت است که ابتدا به برخی

مطالب استاندارد که لازمه‌ی هر کتاب مکانیک شاره‌ها است، اشاره می‌شود. تعاریف مربوط به شاره، تنش، و شکسانی، شارش‌های پایستار و معادلات حرکتی شاره‌های اتلافی (معادلات ناویه-استوکس) و بحث مربوط به ناپایداری‌ها در این دسته قرار می‌گیرند. سپس به برخی مطالب خاص تر مثل پدیده‌های مرتبط با فصل مشترک دو شاره، شارش‌ها در مقیاس طولی میکرونی و شارش‌های نانیوتنی پرداخته می‌شود. در هر بخش سعی می‌شود مبانی اصلی بیان شود. از برخی مثالها نیز برای توسعه‌ی مبانی استفاده می‌شود. در تعدادی از مثالها، تأکیدی روی ارائه‌ی جوابهای دقیق ریاضی نیست و ممکن است از جنبه‌های تقریبی نیز استفاده شود. برای یک دوره‌ی آموزشی مقدماتی می‌توان از فصل‌های ۵، ۷، ۸ و ۹ صرف‌نظر کرد. مباحث این فصول برای دوره‌های آموزشی پیشرفته‌تر در مقاطع تحصیلات تکمیلی توصیه می‌شود. به خواننده‌ی علاقه‌مند توصیه می‌کنم حتماً برای مطالعه‌ی بیشتر به کتاب مکانیک شاره‌ها تالیف لاندائو و لیفشیتز، مراجعه کند [۱]. مبانی فیزیکی شاره‌های نیوتنی، در این کتاب با دقت و وسواس ریاضی بررسی شده است. دو کتاب بسیار زیبا تالیف گویون و فییر، علاوه بر ارائه‌ی مبانی شاره‌ها، بسیاری از موضوعات روزمره را با دیدگاه شهودی‌تر بررسی کرده‌اند [۴، ۵].

در فراهم آوردن این کتاب، برخی از دانشجویان تحصیلات تکمیلی که در آزمایشگاه شاره‌های پیچیده‌ی دانشگاه زنجان فعالیت داشتند، به من کمک کرده‌اند. از آقایان سعید ملایی، رسول کرمی، مهران عرفانی‌فام و خانم‌ها رقیه شیری و مهرناز ضرغام و دیگر دانشجویان تحصیلات تکمیلی فعال در آزمایشگاه، تشکر فراوان می‌کنم. برای اطلاع از آخرین تغییرات کتاب می‌توانید به صفحه‌ی الکترونیکی زیر مراجعه کنید:

www.znu.ac.ir/data/members/najafi_ali/fm.html.

علی نجفی

دانشگاه زنجان، پائیز ۹۳

فهرست مطالب

ث	پیش‌گفتار
۳	۱ مقدمات ریاضی
۳	۱.۱ دستگاه مختصات
۴	۲.۱ دوران
۶	۳.۱ اسکالر، بردار و تانسور
۷	۴.۱ عملگرهای دیفرانسیلی
۱۲	پرسش‌ها
۱۵	۲ مقدمات فیزیکی
۱۵	۱.۲ میدان سرعت شاره
۱۸	۲.۲ خطوط میدان
۲۳	۳.۲ نیرو در محیط‌های پیوسته
۲۷	۴.۲ شاره
۳۴	پرسش‌ها

۳۷	۳	شارش پایستار
۳۸	۱.۳	قانون پایستگی جرم
۴۲	۲.۳	معادله‌ی اوایلر
۴۶	۳.۳	فشار با شیب عرضی
۵۱	۴.۳	معادله‌ی برنولی
۵۴	۵.۳	شارش پتانسیل
۶۳	۶.۳	شارش اطراف کره
۶۸	۷.۳	استوانه‌ی چرخان و نیروی مگنوس
۷۲		پرسش‌ها
۷۷	۴	شارش اتلافی
۷۷	۱.۴	وشکسانی
۸۴	۲.۴	جریان لایه‌ای
۸۹	۳.۴	شارش کنار صفحه‌ی لرزان
۹۲	۴.۴	معادله‌ی استوکس
۱۰۰		پرسش‌ها
۱۰۵	۵	شارش نالخت
۱۰۶	۱.۵	معادله‌ی استوکس
۱۱۱	۲.۵	برهمکنش هیدرودینامیکی
۱۱۳	۳.۵	شناگرهای ریز مقیاس
۱۲۰		پرسش‌ها
۱۲۳	۶	مرز مشترک شاره‌ها
۱۲۳	۱.۶	کشش سطحی
۱۲۸	۲.۶	قانون یانگ-لاپلاس
۱۳۴	۳.۶	ترکندگی
۱۳۷	۴.۶	قطره روی سطح جامد

ذ فهرست مطالب

۱۴۲	۵.۶ امواج مرزی
۱۴۹	۶.۶ اثر مارانگونی
۱۵۳	پرسش‌ها

۷ تحلیل ابعادی

۱۵۵	۱.۷ کره‌ی افتان
۱۵۸	۲.۷ پخش
۱۶۳	۳.۷ اعداد بدون بعد
۱۶۶	۴.۷ آزمایش سرنگ
۱۶۸	۵.۷ سرعت انقباض باریکه‌ی عسل
۱۷۰	۶.۷ دینامیک قطره
۱۷۳	پرسش‌ها

۸ ناپایداری‌ها

۱۷۵	۱.۸ مقدمه
۱۷۹	۲.۸ ناپایداری ریلی-پلاتو
۱۸۲	۳.۸ ناپایداری ریلی-تیلور
۱۸۵	پرسش‌ها

۹ شارش نانیوتنی

۱۸۷	۱.۹ ناهمسانگردی ریزمقیاس
۱۸۹	۲.۹ تنش و کرنش
۱۹۵	۳.۹ شارش وشکسان-کشسان
۱۹۷	۴.۹ مدل ریزمقیاس
۲۰۲	۵.۹ رئولوژی شارهِ پلیمری
۲۰۵	پرسش‌ها

آ مقدمه‌ای بر نرم‌افزار COMSOL

۲۰۷

ر فهرست مطالب

منابع

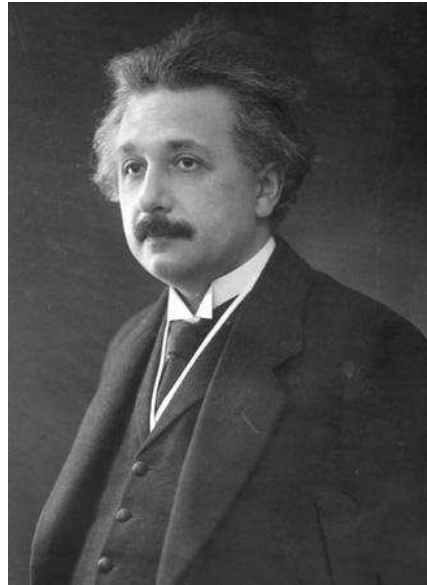
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی

نمایه

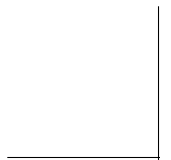
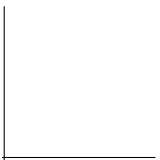
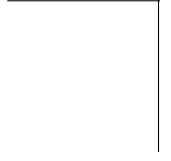
۲۲۵

۲۲۹

۲۳۵



آلبرت انیشتین (۱۸۷۹-۱۹۵۵) فیزیک‌دان زاده‌ی آلمان، اثر گذارترین دانشمند قرن بیستم است. ۴ مقاله‌ی مهم منتشر شده توسط انیشتین در سال ۱۹۰۵ که به سال اعجاز انیشتین معروف شد، پایه‌های علمی فیزیک نوین را متحول کرد. توصیف اثر فوتوالکتریک که به‌خاطر آن جایزه‌ی نوبل فیزیک سال ۱۹۲۰ را برد، توسعه‌ی ریاضیات نظریه‌ی نسبیت خاص و اثبات ارتباط اینرسی با محتوای انرژی اجرام، موضوع سه تا از این مقالات بود. مقاله‌ی چهارم توصیف ریزمقیاس حرکت براونی است. در این مقاله، انیشتین با بررسی حرکت اجسام ریز معلق در شاره‌ها، اولین تأیید تجربی برای وجود اتم‌ها را ارائه کرد و عدد آووگادرو را نیز محاسبه کرد. شرکت در توسعه‌ی نظریه‌ی مکانیک کوانتومی، پایه‌گذاری نظریه‌های نسبیت عام و کیهان‌شناسی به نام انیشتین ثبت شده‌اند. آرزوی انیشتین ارائه‌ی نظریه‌ی همه‌چیز بود.



۱

مقدمات ریاضی

در این فصل و پیش از پرداختن به فیزیک شاره‌ها، برخی از مقدمات ریاضی مورد نیاز را مرور می‌کنیم. دستگاه مختصات، مفاهیم اسکالر، بردار، تانسور و عملگرهای دیفرانسیلی از جمله ابزارهای مورد نیاز در مطالعه سیستم‌های فیزیکی هستند. خواننده لازم است آشنایی کاملی با این ابزار داشته باشد.

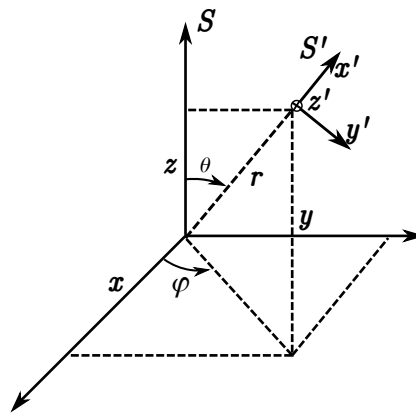
۱.۱ دستگاه مختصات

دستگاه مختصات، ابزار ریاضی لازم برای نشان دادن مکان نقاط مختلف فضا است. دستگاه‌های مختصات را به صورت‌های مختلفی می‌توان ساخت. دستگاه‌های مختصات دکارتی و قطبی-کروی مهم‌ترین و متداول‌ترین دستگاه‌های مورد استفاده در فیزیک هستند. در شکل ۱.۱، مکان نقطه‌ی دلخواه M در دو دستگاه مختصات دکارتی و قطبی کروی نشان داده شده است. سه عدد x ، y و z در دستگاه دکارتی و سه عدد r ، θ و ϕ در دستگاه قطبی-کروی، به صورت یکتا مکان نقطه‌ی M در فضا را مشخص می‌کنند. دستگاه‌های مختلف معمولاً با توجه به تقارنهای موجود در مسأله انتخاب شده و استفاده می‌شوند. این انتخاب طوری صورت می‌گیرد که روابط ریاضی مربوط به هر مسأله شکل ساده‌تری داشته باشند. بین دستگاه‌های دکارتی و قطبی-کروی روابط تبدیلی زیر برقرار

است:

$$\begin{aligned} x &= r \sin \theta \cos \phi, \\ y &= r \sin \theta \sin \phi, \\ z &= r \cos \theta. \end{aligned} \quad (1.1)$$

دستگاه‌های مختصات استوانه‌ای، دوقطبی و بیضوی از دیگر مثالهای مهم هستند که در شرایطی ممکن است استفاده از آنها لازم شود. به خواننده‌ی علاقه‌مند توصیه می‌شود برای بدست آوردن توصیف کاملی از دستگاه‌های مختصات به مراجع ریاضی مراجعه کند [۴۹].



شکل ۱.۱ دستگاه مختصات دکارتی و دستگاه مختصات قطبی-کروی.

۲.۱ دوران

دوران مهم‌ترین تبدیل دستگاه مختصات است. اجازه دهید بحث را با یک مثال ساده شروع کنیم. مطابق شکل ۲.۱ دوران دستگاه مختصات دو بعدی را در نظر بگیرید. دستگاه مختصات دکارتی S با یک دوران به اندازه‌ی زاویه‌ی γ به دستگاه مختصات S' تبدیل می‌شود. با روابط هندسی ساده، مختصات یک نقطه‌ی دلخواه ثابت (M) ، در دو دستگاه به صورت زیر به هم مربوط می‌شوند:

$$\begin{aligned} x' &= x \cos \gamma + y \sin \gamma, \\ y' &= -x \sin \gamma + y \cos \gamma. \end{aligned} \quad (2.1)$$

پرسش‌ها

- ۱.۷ عدد رینولدز و عدد ماخ را برای حرکت هواپیما، ماهی و باکتری برآورد کنید.
- ۲.۷ یک آونگ از وزنه‌ای به جرم m ساخته شده است. با استفاده از تحلیل ابعادی، دوره‌ی نوسانهای کوچک این آونگ را بدست آورید.
- ۳.۷ معادله‌ی دیفرانسیل زیر را در نظر بگیرید:

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla)\mathbf{u} = \eta \nabla^2 \mathbf{u} - \nabla p$$

که در آن \mathbf{u} میدان سرعت و p میدان فشار درون شاره و η وشکسانی شاره است. فرض کنید سرعت مشخصه‌ی مسأله U و طول مشخصه L و زمان مشخصه هم برابر با τ باشد. معادله‌ی دیفرانسیل بالا را بصورت بدون بعد بنویسید.

- ۴.۷ یک صفحه‌ی صلب را در نظر بگیرید که با ضخامت h از شاره‌ای به وشکسانی η تر شده است. اکنون ای صفحه را به حالت عمودی قرار می‌دهیم. لایه‌ی شاره شروع به جاری شدن می‌کند تا سطح صفحه کاملاً خشک شود. با استدلال‌های ابعادی در مورد فرآیند خشک شدن صفحه بحث کنید. این مسأله در انتهای فصل چهار بررسی شده است.

- ۵.۷ صفحه‌ای را در نظر بگیرید که بصورت عمودی و با سرعت ثابت v از سطح آزاد یک مایع وشکسان خارج می‌شود. این صفحه مقداری از شاره را همراه خود به بالا می‌کشد. با استدلال‌های ابعادی در مورد ضخامت لایه‌ی مایع چسبیده به صفحه بحث کنید. این مسأله توسط لنداؤ و لویچ مطرح شده است [۲۵، ۲۶].



یوسف ثبوتی زاده‌ی سال ۱۳۱۱ خورشیدی در خانواده‌ای فرهنگی در شهر زنجان است. وی پس از اتمام تحصیلات مقدماتی خود در زادگاهش، در سال ۱۳۲۹ به دلیل علاقه به فیزیک، این رشته را برای ادامه تحصیل در دانشگاه تهران انتخاب کرد. وی موفق شد که درجه کارشناسی ارشد را از دانشگاه تورنتو دریافت کند. پس از آن به دانشگاه شیکاگو راه یافت و به تحصیل اختر فیزیک پرداخت. او در سال ۱۳۴۲ مدرک دکتری تخصصی خود را در این رشته دریافت کرد و برای تدریس با سمت استادیاری به دانشگاه نیوکاسل در انگلستان رفت. دکتر ثبوتی پس از مدتی به ایران بازگشت و چندی بعد با سمت دانشیاری در دانشگاه شیراز به کار مشغول شد. توسعه‌ی مکانیک کوانتومی در فضای فاز، مگنتو هیدرودینامیک خورشید و گرانش از موضوعات تخصصی کار ایشان است. پایه‌گذاری دوره‌های کارشناسی ارشد در دانشگاه شیراز از جمله دیگر خدمات دکتر ثبوتی در دوران فعالیت در دانشگاه شیراز است. طرح تاسیس رصدخانه‌ی ابوریحان بیرونی شیراز در سال ۱۳۵۱ و پایه‌گذاری مرکز تحصیلات تکمیلی در علوم پایه زنجان در سال ۱۳۷۰، همکاری در ایجاد انجمن نجوم ایران در سال ۱۳۷۵ و تاسیس پژوهشگاه تغییر اقلیم و گرمایش زمین از جمله‌ی خدمات ایشان است. ایشان در سال ۲۰۰۰ میلادی به دلیل فعالیت‌های مستمر علمی به دریافت مدال ویژه آکادمی علوم جهان سوم مفتخر شده‌است.



ناپایداری‌ها

سامانه‌های شاره‌ای در شرایط مختلفی ناپایدار شده و پدیده‌های جالب توجه‌ای را بوجود می‌آورند. لیوانی را تصور کنید که با آب پر کرده و در آن را با ورقه‌ای پوشانده‌اید. حالا در شرایطی که همچنان در آن پوشیده است آن را ناگهان وارونه کرده و سپس ورقه را بر دارید. با یک محاسبه‌ی ساده درمی‌یابید که نیروی ناشی از فشار هوا خیلی بیشتر از نیروی وزن است. ولی چرا آب سریعاً فرو می‌ریزد؟ بیرون ریختن آب از لیوان وارونه، قطره قطره شدن آب خروجی از شیر سماور، چکه کردن لایه‌ی رنگ از سقف و امواج سطحی آب که به سبب جریان باد ایجاد می‌شوند، از مثالهای مشهور ناپایداری در سامانه‌های شارشی هستند [۱۹]. در این فصل با معرفی مفهوم ناپایداری، دو نمونه‌ی مهم از ناپایداری‌ها یعنی ناپایداری ریلی-تیلور و ناپایداری ریلی-پلاتو را با جزئیات ریاضی بررسی می‌کنیم.

۱.۸ مقدمه

انرژی پتانسیل در سامانه‌های مکانیکی کمک می‌کند تا تصویر ساده‌ای از ناپایداری در این سامانه‌ها ارائه شود. به عنوان یک نمونه‌ی ساده، شکل ۱.۸ را در نظر بگیرید. تویی که روی قله یا درون دره‌ی پتانسیل قرار گرفته، در هر دو مورد می‌تواند در حالت تعادل باشد. ولی وضعیت توپ روی قله‌ی



شکل ۱.۸ موقعیت‌های تعادلی مختلف یک توپ. شکل سمت راست (چپ)، یک موقعیت پایدار (ناپایدار) را برای توپ کروی شکل نشان می‌دهد. پایداری یا ناپایداری حالت توپ را با بررسی پاسخ توپ به اختلال‌های خارجی بی‌نهایت کوچک می‌توان فهمید.

پتانسیل ناپایدار و در دره‌ی پتانسیل پایدار است. در صورتی که با اعمال نیروهای خارجی کوچک قطع آن، توپ به مکان اولیه‌ی خود برگردد، حالت فیزیکی توپ نسبت به نیروهای مختل‌کننده‌ی خارجی پایدار است. ولی اگر با اعمال نیروهای اختلالی به توپ و قطع آن، توپ به جای اولیه بازنگردد، وضعیت توپ ناپایدار است. البته در عمل همیشه نیروهایی وجود دارند که نقش اختلال را ایفا می‌کنند. جریانهای هوایی بسیار کوچک، لرزش‌های کوچک و حتی نیروهای افت‌وخیزی ناشی از حرکت‌های همیشگی مولکولی، نیروهای اختلالی هستند.

در سامانه‌های پیچیده‌تر مثل شاره‌ها، درک ناپایداری بر پایه‌ی پتانسیل، اندکی سخت‌تر ولی امکان پذیر است. در واقع انواع مختلف انرژی آزاد که در ترمودینامیک تعریف می‌شود، ابزاری برای تشخیص نقاط تعادلی سامانه‌ها و پایداری آنها هستند. در شیمی بسته به شرایط انجام واکنش‌ها، انرژی آزاد گیبس، هلمهولتز یا آنتالپی، نشان دهنده‌ی پایداری یا ناپایداری سامانه واکنش‌های شیمیایی هستند. رویکرد مورد نظر ما در این کتاب محاسبه‌ی انرژی آزاد نیست. رهیافت ساده‌تری که در این کتاب استفاده می‌کنیم، برپایه‌ی پاسخ سامانه به اختلال‌های بی‌نهایت کوچک خارجی خواهد بود. با اعمال یک اختلال خارجی به سامانه، تمایل سامانه در تضعیف یا تقویت تغییرات ایجاد شده را مطالعه می‌کنیم. سامانه‌ی ناپایدار تغییرات ایجاد شده را تشدید می‌کند. رشد تغییرات، سامانه‌ی ناپایدار را از حالت اولیه دور می‌کند.

در این فصل، ابتدا به معرفی چند نمونه‌ی مهم از ناپایداری‌ها در سامانه‌های شارشی می‌پردازیم. سپس در قسمت‌های بعدی دو مورد از ناپایداری‌ها را با جزئیات بیشتری بررسی می‌کنیم.

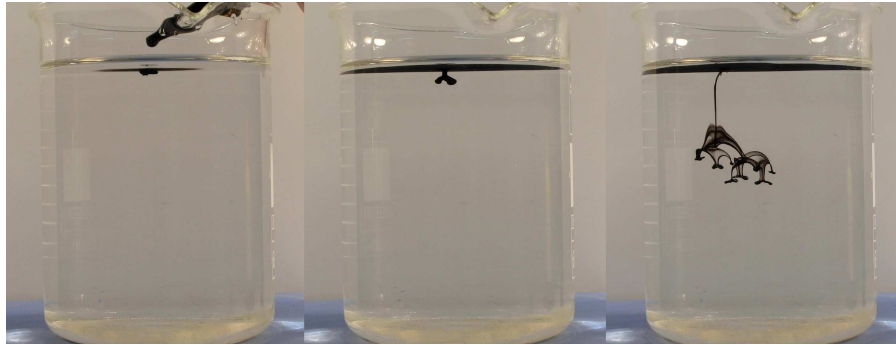
ناپایداری ریلی- پلاتو

باریکه‌ای استوانه‌ای شکل از یک شاره را در نظر بگیرید که درون شاره‌ی دیگر جریان دارد. آب خروجی از یک لوله با مقطع دایره‌ای که در هوا جریان دارد مثالی از این وضعیت است. بسته به شرایط مسأله، این سامانه همیشه نمی‌تواند پایدار بماند. ناپایداری در اینجا باعث قطره قطره شدن باریکه‌ی شاره می‌شود. این ناپایداری به شرایط مسأله بستگی دارد. پارامتر تعیین کننده، نسبت طول به قطر استوانه است. باریکه‌های بلند زودتر ناپایدار می‌شوند. در این سامانه انرژی کشش سطحی که به فصل مشترک دو شاره نسبت داده می‌شود، عامل اساسی در ناپایدار شدن است. کشش سطحی تمایل به کاستن اندازه‌ی سطح فصل مشترک دارد. در این صورت اگر اختلال خارجی اندازه‌ی سطح را در فصل مشترک کم کند، سامانه ناپایدار می‌شود.

مثال بارز آب خروجی از شیر سماور را در نظر بگیرید. اگر سعی کنیم تا ارتفاع ستون آب خروجی را بیشتر کنیم، پدیده‌ی قطره قطره شدن را بوضوح می‌بینیم. در چاپگرهای جوهر افشان از این ناپایداری استفاده‌ی مفید می‌شود. در این چاپگرها ستون جوهر خروجی از یک نازل را طوری طراحی می‌کنند تا یک سامانه یکنواخت از قطرات ریز جوهر برای چاپ کردن بدست آید.

ناپایداری ریلی- تیلور

دو شاره با چگالی مختلف را در نظر بگیرید که با یک مرز مشترک افقی در تماس با یکدیگر قرار دارند. این دو شاره با هم ترکیب نمی‌شوند. اکنون فرض کنید که شاره‌ی بالاتر (شاره‌ی رویی) دارای چگالی بیشتری باشد. این وضعیت یک حالت تعادلی است ولی نمی‌تواند پایدار بماند. در واقع با کوچکترین اختلالی در مرز مشترک، قسمت کوچکی از شاره چگال‌تر به پایین حرکت کرده که انرژی سامانه کم‌تر می‌شود. این اختلال تقویت شده و شاره‌ی چگال‌تر کاملاً به پایین می‌آید. لیوان آب وارونه شده مثال مهمی از این ناپایداری است. در مورد سقف آغشته به رنگ هم وضعیت به همین صورت است. رنگ که از هوا چگال‌تر است در بالا قرار دارد. این وضعیت پایدار نیست و رنگ شروع به چکه کردن می‌کند. چکه کردن رنگ آنقدر ادامه می‌یابد تا لایه‌ی رنگ باقی مانده آنقدر نازک شود تا کشش سطحی رنگ و سقف غالب شده و سامانه را پایدار کند. در قسمت‌های دیگر فیزیک هم ردپای قوی از ناپایداری ریلی تیلور را می‌توان مشاهده کرد. شکل خاص سحابی خرچنگ، پدیده‌ی وارونگی هوا و ناپایداری‌های داخل راکتورهای هسته‌ای در ارتباط مستقیمی با



شکل ۲.۸ یک مثال زیبا از ناپایداری ریلی-تیلور. از سمت چپ یک قطره جوهر به روی آب افزوده می‌شود. در لحظه‌ی ابتدایی، جوهر که اندکی از آب چگال‌تر است، روی آب قرار می‌گیرد. به سرعت سامانه ناپایدار شده و جوهر درون آب وارد می‌شود. ترکیب شیمیایی جوهر اجازه می‌دهد تا در آب حل شود. ولی دقت کنید که حل شدن و پدیده‌ی پخش جوهر در آب در زمانهای طولانی‌تر مشاهده می‌شود. تصاویر با یک دوربین سریع و توسط آقای سعید ملایی، کارشناس ارشد فیزیک، در آزمایشگاه شاره‌های پیچیده‌ی دانشگاه زنجان بدست آمده است.

این ناپایداری هستند. در شکل ۲.۸، نتیجه‌ی یک آزمایش تجربی که منجر به ناپایداری ریلی-تیلور می‌شود را می‌بینید.

ناپایداری کلونین-هلمهولتز

سامانه شارشی متشکل از دوفاز که در فصل مشترک آن اختلاف سرعت وجود دارد، ناپایدار می‌شود. موج‌های تولید شده در فصل مشترک علامتی از ناپایدار شدن سامانه است. دولایه از شاره‌هایی که اختلاف چگالی اندکی با هم دارند را درون ظرف بزرگی بریزید. اگر ظرف را اندکی خم کنید جریان‌های دو شاره روی هم تولید می‌شود. اگر از دیواره‌های شفاف ظرف به فصل مشترک نگاه کنید، ناپایداری را بصورت موج‌هایی می‌بینید. موج‌های ایجاد شده روی سطح آب ساکن که در مجاورت وزش باد قرار دارد، نشان از ناپایداری دارند. اگر سرعت باد از حد مشخصی بزرگتر شود، سامانه ناپایدار می‌شود. آستانه‌ی ناپایداری به مشخصات سامانه مثل چگالی، و شکسانی و کشش سطحی بستگی دارد.



شکل ۳.۸ ناپایداری ریلی-پلاتو برای یک استوانه‌ی باریک از روغن سیلیکون درون آب. روغن سیلیکون استفاده شده دارای شکسانی سینماتیکی $\eta/\rho = 30000$ سانتی استوکس است. از سمت چپ، وضعیت باریکه نشان داده شده است. با گذشت زمان این باریکه فرو می‌پاشد [۵۲].

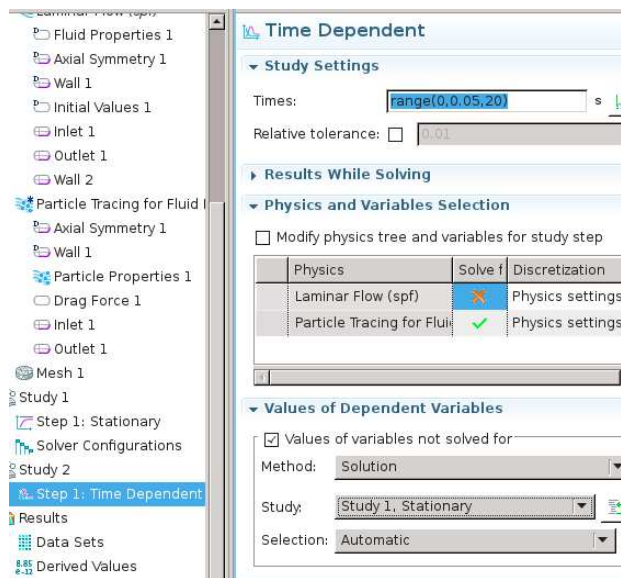
ناپایداری ریلی-بنارد

یک لایه‌ی نازک شاره را در نظر بگیرید که بین دو صفحه‌ی موازی و افقی قرار دارد. اگر دو صفحه هم‌دما باشند، پس از مدتی شاره به حالت تعادل ایستا می‌رسد. حال اگر صفحه‌ی پایین را کمی گرمتر کنیم چه اتفاقی می‌افتد؟ رسانندگی حرارتی، بدون اینکه جریان خالصی از شاره برقرار شود، انرژی گرمایی را از صفحه‌ی پایینی به صفحه‌ی بالایی انتقال می‌دهد. در این صورت یک اختلاف دمای خطی نیز درون شاره ایجاد می‌شود. در برخی شرایط، وابسته به اندازه‌ی اختلاف دمایی و ضخامت شاره، حالت ایستای بالا ناپایدار می‌شود. در این صورت جریان خالصی از شاره‌ی نزدیک صفحه‌ی گرم که چگالی کمتری دارد به سمت بالا ایجاد می‌شود. ناپایداری با ایجاد سلول‌های همرفتی همراه است که بصورت منظم کنار هم قرار می‌گیرند. در نواحی مرکزی هر سلول جریان روبه‌بالا و در لبه‌ها، جریان روبه پایین برقرار است. ممکن است این طرح‌های منظم را در دانه‌های ریز چای درون لیوان که در حالت سر شدن است، دیده باشید. طرح‌های منظم نمک یا رسوبات در کف دریاچه‌ها و حوضچه‌هایی که آب آنها خشک شده است، مثال معروف دیگری از سلول‌های بنارد هستند.

۲.۸ ناپایداری ریلی-پلاتو

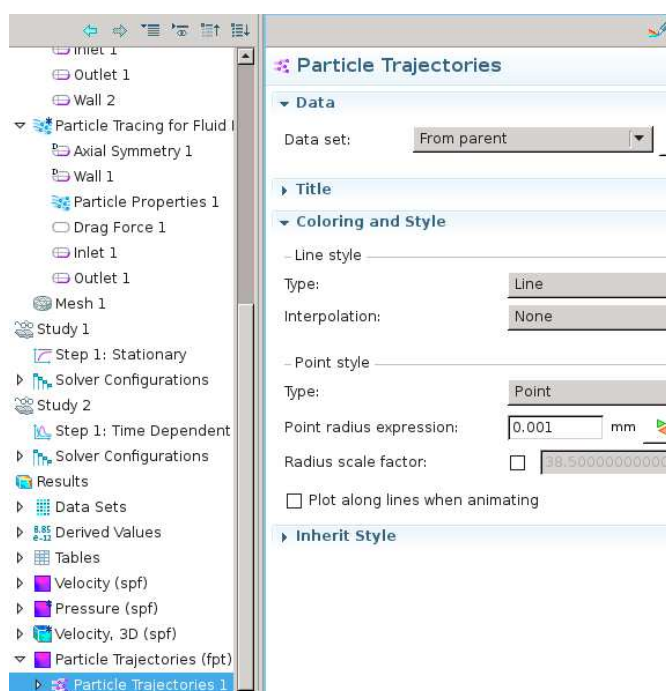
آب خروجی از شیر سماور در شرایطی بصورت قطره قطره و ناپیوسته خارج می‌شود. ظاهراً نرخ

برای اینکه مسیر ذرات بدست آید به قسمت Step 1: Time Dependent از Study2 بروید (شکل آ.۱۹). در قسمت Study Setting گزینه‌ی Time را مطابق شکل تغییر دهید. در قسمت Physics and Variable Selection فقط قسمت Particle Tracing را تیک بزنید. در واقع چون قبلاً مسأله‌ی شارش حل شده دیگر لازم به حل نیست. قسمت Values of Dependent Variables را هم مطابق شکل زیر تغییر دهید.

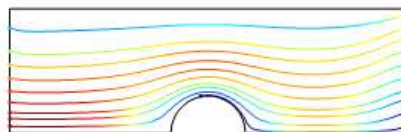


شکل آ.۱۹

برای اجرای برنامه، مطابق شکل ۲۰.آ، روی Study2 کلیک راست و Compute را انتخاب کنید و صبر کنید تا مسأله حل شود و مسیرها بدست آیند. برای نمایش مسیرهای ذرات در قسمت Particle Trajectories مطابق شکل، قسمت Line Style را در حالت Line قرار دهید و روی Plot کلیک کنید. مسیرهای ذرات در شکل ۲۱.آ نمایش داده شده است. چون مسأله‌ی حل شده دینامیکی بود می‌توانید مسیرها را بصورت انیمیشن هم رسم کنید.



شکل ۲۰.آ



شکل ۲۱.آ

منابع

- برای مبانی مکانیک شاره‌ها، منابع و مراجع متعددی به زبان انگلیسی موجود است. از بین منابع مختلف، مراجعه به منابع زیر توصیه می‌شود:
- [1] L. D. Landau, and E. M. Lifshitz, *Fluid dynamics*, (Butterworth-Heinemann 1995).
- [2] G. K. Batchelor, *An introduction to fluid dynamics*, (Cambridge university press, New York 2000).
- [3] C. Pozrikidis, *Introduction to theoretical and computational fluid dynamics*, (Oxford university press 2011).
- منابع زیر، بیشتر با دیدگاه شهودی‌تری به مکانیک شاره‌ها پرداخته‌اند:
- [4] E. Guyon, J. P. Hulin, L. Petit, and C. D. Matescu, *Physical hydrodynamics*, (Oxford university Press 2001).
- [5] T. E. Faber, *Fluid dynamics for physicists*, (Cambridge university press 1995).
- [6] D. J. Tritton, *Physical fluid dynamics*, (Oxford university press, London 2007).
- برای مطالعه‌ی مکانیک شاره‌ها در شرایط بی‌اینرسی، ریزشارش و هیدرودینامیک ریزشناگرها، مراجعه به منابع زیر توصیه می‌شود:
- [7] J. Happel, H. Brenner, *Low Reynolds number hydrodynamics*, (Martinus Nijhoff publishers, the Netherlands 1983).
- [8] A. Najafi, R. Golestanian, *Simple swimmer at low Reynolds number: Three linked spheres*, Phys. Rev. E **69**, 062901 (2004).
- [9] H. Bruus, *Theoretical microfluidics*, (Oxford university press, Oxford 2008).

- برای مطالعه‌ی پدیده‌های فیزیکی در فصل مشترک شماره‌ها، استفاده از مراجع زیر توصیه می‌شود:
- [10] S. A. Safran, *Statistical thermodynamics of surfaces, interfaces, and membranes*, (Westview press, 2003).
- [11] P. G. de Gennes, *Wetting: statics and dynamics*, Rev. Mod. Phys. **57**, 827 (1985).
- [12] P. G. de Gennes, *Soft interfaces*, (Cambridge university press, New York 1997).
- شماره‌های نانووتنی، از دیدگاه پدیده شناختی و ریزمقیاس در منابع زیر بررسی شده‌اند:
- [13] R. B. Bird, R. C. Armstrong, O. Hassager, *Dynamics of polymeric liquids*, (John Wiley and Sons, York 1987).
- [14] G. Astarita, G. Marrucci, *Principles of non-newtonian fluid mechanics*, (McGraw-Hill, Maidenhead 1974).
- [15] H. A. Barnes, J. F. Hutton, and K. Walters, *An introduction to rheology*, (Elsevier science publishers, 1989).
- دیگر مراجع استفاده شده در متن:
- [16] A. Bennett, *Lagrangian fluid dynamics*, (Cambridge University Press, Cambridge 2006).
- [17] H. C. Berg, *E. coli in motion*, (Springer-Verlag, New York 2004).
- [18] D. Bonn, J. Eggers, J. Indekeu, J. Meunier, and E. Rolley, *Wetting and spreading*, Rev. Mod. Phys. **81**, 739 (2009).
- [19] F. Charru, *Hydrodynamic Instabilities, Volume 37 of Cambridge Texts in Applied Mathematics*, (Cambridge University Press, Cambridge 2011).
- [20] P. G. de Gennes, *Scaling concepts in polymer physics*, (Cornell university press, Cornell 1979).
- [21] P. G. de Gennes, *Scaling theory of polymer adsorption*, Journal de Physique **37**(12), 1445 (1976).
- [22] P. G. de Gennes, F. B. Wyard, D. Quéré, *Cappillary and wetting phenomena: drops, bubbles, pearls, waves*, (Sprenger, New York 2002).
- [23] J. K. G. Dhont, *An Introduction to Dynamics of Colloids*, (Elsevier, Amsterdam 1996).
- [24] M. Gad-el-hak, *Fluid mechanics from the beginning to the third millennium*, Int. J. Eng. **14**(3), 177 (1998).
- [25] R. Golestanian, and R. Elie, *Relaxation of a moving contact line and the Landau-Levich effect* Euro. Phys. Lett. **55**(2), 228 (2001).
- [26] L. Landau, and B. Levich, Acta Physicochim. USSR **17**, 42 (1942).
- [27] L. D. Landau, and E. M. Lifshitz. *Statistical physics, part I. Course of theoretical physics* (Addison-wesley, 1969).
- [28] H. L. Langhaar, *Dimensional analysis and theory of models*, (John Wiley and sons, New York 1951).

- [29] E. Lauga, M. P. Brenner, and H. A. Stone, in *Handbook of Experimental Fluid Dynamics*, edited by J. Foss, C. Tropea, and A. Yarin (Springer, New York 2007), Chap. 19, p. 1219.
- [30] A. Najafi, S. H. Raad, R. Yousefi, *Self-propulsion in a low-Reynolds-number fluid confined by two walls of a microchannel*, Phys. Rev. E **88**, 045001 (2013).
- [31] A. Najafi, R. Zargar, *Two-sphere low-Reynolds-number propeller*, Phys. Rev. E **81**, 067301 (2010).
- [32] A. Najafi, *Hydrodynamics of a microhunter: A chemotactic scenario*, Phys. Rev. E **83**, 060902(R) (2011).
- [33] A. Najafi, R. Golestanian, *Coherent Hydrodynamic Coupling for Stochastic Swimmers*, Eur. Phys. Lett. **90**, 68003 (2010).
- [34] J. Oldroyd, *On the Formulation of Rheological Equations of State*, Proc. R. Soc. London A, **200**(1063), 523 (1950).
- [35] A. R. Piriz, O. D. Cortazar, and J. J. Lopez Cela, *The Rayleigh-Taylor instability*, Am. J. Phys. **74**(12), 1095 (2006).
- [36] C. Pozrikidis, *Boundary Integral and Singularity Methods for Linearized Viscous Flow*, (Cambridge University Press, Cambridge 1992).
- [37] L. E. Reichl, *A Modern course in statistical physics*, (Wiley-VCH verlag GmbH, Weinheim 2009).
- [38] J. Rotne and S. Prager, *Variational Treatment of Hydrodynamic Interaction in Polymers*, J. Chem. Phys. **50**, 4831 (1969).
- [39] R. E. Salvino and R. D. Puff, *Microscopic theory of surface tension*, Phys. Rev. B **34**, 6351 (1986).
- [40] F. Scheck, *Mechanics: From Newton's Laws to Deterministic Chaos*, (Springer-Verlag, Berlin 2010).
- [41] R. Shiri, A. Najafi, and M. Habibi, *Sampling moire technique and the dynamics of a spreading droplet on a solid surface*, Measurement Science and Technology **25**(3), 035305 (2014).
- [42] J. W. Strutt, and Lord Rayleigh, *On the instability of jets*, Proc. London Math. Soc. **10**, 4 (1878).
- [43] L. H. Tanner, *The spreading of silicone oil drops on horizontal surfaces*, Journal of Physics D: Applied Physics **12**(9) 1473 (1979).
- [44] G. A. Tokaty, *A history and philosophy of fluid mechanics*, (Courier Dover Publications, 1994).
- [45] K. Weissenberg, *A continuum theory of rheological phenomena*, Nature **159**(4035), 310 (1947).
- [46] B. R. White and J. C. Schulz, *Magnus effect in saltation*, Journal of Fluid Mechanics **81**, 497 (1977).

- [47] A. L. Yarin, *Drop impact dynamics: splashing, spreading, receding, bouncing*, Annu. Rev. Fluid Mech. **38**, 159 (2006).
- [48] R. Zargar, A. Najafi, M. F. Miri, *Three-sphere low-Reynolds-number swimmer near a wall*, Phys. Rev. E **80**, 026308 (2009).
- [۴۹] ج. آرفکن، روشهای ریاضی در فیزیک، جلد ۱ و جلد ۲، (مرکز نشر دانشگاهی، تهران ۱۳۷۱).
- [۵۰] ر. شیرینی، دینامیک یک قطره روی سطوح جامد، (پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان ۱۳۹۱).
- [۵۱] م. ضرغام، بررسی امواج سطحی روی شاره‌های غیر نیوتنی با روشهای ایتیکی، (پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان ۱۳۹۲).
- [۵۲] ر. کرمی، مطالعه‌ی تجربی و نظری انقباض استوانه‌ی باریک وشکسان در حضور کشش سطحی، (پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه علوم پایه‌ی پیشرفته ۱۳۹۰).

واژه‌نامه فارسی به انگلیسی

Surface waves	امواج مرزی
Flexible	انعطاف پذیر
E.coli	ای‌کولای
ب	
Brownian	براونی
Shear-thinning	برش-روان
Shear-thickening	برش-وشکسان
Macroscopic	بزرگ‌مقیاس
Dimension	بُعد
Liquid crystal	بلور مایع
پ	
Diffusion	پخش
Phenomenological	پدیده‌شناختی

Peclet پکله

ت

Stream function تابع جریان

Flagellum تاژک

Curl تاو

Dimensional analysis تحلیل ابعادی

In-compressible تراکم‌ناپذیر

Transpose ترانهاده

Wetting ترکنندگی

Symmetry تقارن

Stress تنش

Shear Stress تنش برشی

چ

Sink چاهک

Source چشمه

خ

Streamline خط جریان

Streakline خط رنگ

Pathline خط مسیر

ر

Dispersion relation رابطه‌ی پاشندگی

Rank رتبه

Trace رد

Approach رهیافت

Microfluidic ریزشارش

Microscopic ریزمقیاس
Rayleigh–Bennard ریلی–بنارد
Reynolds رینولدز
Rheology رئولوژی

ز

Contact angle زاویه‌ی تماس
Chain زنجیره

س

Mechanism سازوکار
System سامانه
Kinematic سینماتیک

ش

Poiseuille flow شارش پوازوی
Couette flow شارش کوئت
Fluid شاره
Boundary Condition شرط مرزی
Intuitive شهودی
Gradient شیب

ط

Capillary length طول موینگی

ع

Operator عملگر

ف

Froude فرود

Surfactant فعال سطحی

ق

Frame قاب

ک

Worm like کرم مانند

Strain کرنش

Surface tension کشش سطحی

Kelvin-Voigt کلوین-وایت

Colloid کلوئید

گ

Vortex گردشار

Random walk گشت تصادفی

ل

Laminar لایه‌ای

Inertia لختی

م

Mach ماخ

Spiral مارپیچ

Steadiness مانایی

Crumpled مچاله شده

Continues media محیط پیوسته

Interface مرز مشترک

Cilium مژک

Langevin equation معادله‌ی لانژون

Capillary مویبگی
Field میدان

ن

Instability ناپایداری
Non-Newtonian نانیوتنی
Navier-Stokes ناویه-استوکس
Anisotropy ناهمسانگردی
Strain rate نرخ کرنش
Scalar نرده‌ای
Kinetic theory نظریه‌ی جنبشی
Nematic نماتیک
Stochastic force نیروی تصادفی
Point force نیروی نقطه‌ای

و

Divergence واگرایی
Variation وردش
Visco-elastic وشکسان-کشسان
Viscosity وشکسانی
Viscometer وشکسانی سنج

نمایه

ب	ا
باکتری‌ها، ۱۱۶	اثر مارانگونی، ۱۴۹
بدون تاو، ۵۴	اثر وایزنبرگ، ۱۹۱
بردار، ۶	اجزا محدود، ۲۰۷
برهمکنش هیدرودینامیکی، ۱۱۱	آزمایش باریکه‌ی عسل، ۱۶۸
بسط برحسب چند قطبیه‌ها، ۱۰۹	آزمایش دو صفحه، ۷۷
پ	آزمایش سرنگ، ۱۶۶
پایستگی جرم، ۳۸	استوانه‌ی چرخان، ۶۸
پخش، ۱۵۸	اسکالر، ۶
پراش، ۱۴۹	اعداد بدون بعد، ۱۵۵، ۱۶۳
ت	افت وخیز، ۱۵۹
تابع پاسخ، ۲۰۴	امواج، ۱۴۲
تابع جریان، ۳۹	انحراف از معیار، ۱۹۹
تابع همبستگی، ۱۶۲	انحنا، ۱۳۲

چند قطبیهها، ۱۰۹
 چهارقطبی نیرو، ۱۱۹

ح

حباب صابون، ۱۳۰
 حرکت براونی، ۱۶۲
 حل عددی، ۲۰۷

خ

خط جریان، ۱۸، ۵۲
 خط رنگ، ۲۱
 خط مسیر، ۲۰
 خطوط جریان اطراف کره، ۶۴، ۹۶
 خطوط میدان، ۱۸

د

دستگاه استوانه‌ای، ۸۳
 دستگاه دکارتی، ۳، ۸۳
 دستگاه قطبی-کروی، ۳
 دستگاه مختصات، ۳

دوران، ۴

دوقطبی نیرو، ۱۰۸
 دینامیک قطره، ۱۷۰
 دیورژانس، ۹

ر

رابطه‌ی پاشندگی، ۱۴۵، ۱۴۷
 روش اویلر، ۱۶
 روش تجربی، ۱۴۸

تاژک، ۱۱۶

تانسور، ۶، ۷

تانسور اُسین، ۱۱۲

تانسور تنش، ۲۶، ۷۹

تانسور لوی چپویتا، ۱۲

تبدیل پاریتته، ۹۴

تبدیلات گالیلته‌ای، ۱۷

تحلیل ابعادی، ۱۵۵

تراکم ناپذیر، ۳۹

ترکندگی، ۱۳۴

ترمودینامیک، ۱۵۹

تعادل، ۱۷۵

تعبیر شهودی چرخش، ۲۱

تقارن، ۲۶

تنش، ۲۴، ۱۸۹

تنش برشی، ۲۹

تنش پلیمرها، ۲۰۰

تنش عمودی، ۲۷

ج

جرم موثر، ۶۸

جریان لایه‌ای، ۸۴

جسم شناور، ۴۵، ۵۱

چ

چاه، ۵۷

چرخش، ۹، ۱۰، ۲۱

چشمه، ۵۷

- روش لاگرانژ، ۱۶
 ریزشارش، ۸۲، ۱۰۵
 ریزموجودات، ۱۱۶
 رئولوژی، ۱۸۹، ۲۰۲
- ز
 زمان مشخصه، ۱۹۷
- س
 سطح شیبدار، ۸۷
 سطوح خمیده، ۱۳۲
 سینماتیک شاره‌ها، ۱۵
- ش
 شارش اتلافی، ۷۷
 شارش اولیری، ۳۷
 شارش بدون لختی، ۱۰۵
 شارش برشی، ۲۹، ۲۰۲
 شارش برشی تناوبی، ۲۰۴
 شارش پایستار، ۳۷
 شارش پتانسیل، ۳۷، ۵۴
 شارش پوآزوی، ۸۶
 شارش کوئت، ۸۶
 شاره، ۱۵، ۲۷
 شاره نیوتنی، ۷۹
 شاره‌ی پلیمری، ۱۹۷
 شاره‌ی ساکن، ۴۴
 شاره‌ی وشکسان-کشسان، ۲۰۴
- شرط مرزی، ۸۲
 شناگر سه-کره‌ای، ۱۱۷
 شناگرها، ۱۱۳
 شیب، ۸
- ص
 صفحه‌ی لرزان، ۸۹
- ض
 ضریب اصطکاک، ۱۵۶
 ضریب پخش، ۱۶۱
- ط
 طول موئینگی، ۱۳۷
- ع
 عدد رینولدز، ۱۵۷، ۱۶۴، ۱۶۷، ۱۶۸
 عدد فرود، ۱۶۴
 عدد ماخ، ۱۶۵، ۱۶۷
 عدد موئینگی، ۱۶۵
- غ
 غیر خطی، ۳۳
- ف
 فشار، ۲۷، ۴۲
 فعال سطحی، ۱۲۶
- ق
 قانون استوکس، ۹۸، ۱۱۰، ۱۵۸