

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



انتشارات
۷۸۱

مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو

دکتر احسان روحی گل خطمی
عضو هیئت علمی دانشگاه فردوسی مشهد

سرشناسه:	روحی گل خطمی، احسان، ۱۳۶۱-
عنوان و نام پدیدآور:	مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو/ احسان روحی گل خطمی؛ ویراستار هانیه اسدپور فعال مشهد.
مشخصات نشر:	مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۳۹۹.
مشخصات ظاهری:	۲۳۲ ص. : مصور، جدول، نمودار.
فروست:	انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۷۸۱.
شابک:	ISBN: 978-964-386-474-3
وضعیت فهرست نویسی:	فیپا.
یادداشت:	کتابنامه. نمایه.
موضوع:	سیالات -- مکانیک
موضوع:	نانوسیالات
شناسه افزوده:	دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده بندی کنگره:	TA۳۵۷
رده بندی دیویی:	۶۲۰/۱۰۶
شماره کتابشناسی ملی:	۷۴۳۰۶۰۵
Fluid mechanics	
Nanofluids	

مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو

پدیدآورنده: دکتر احسان روحی گل خطمی
ویراستار ادبی: هانیه اسدپور فعال مشهد
مشخصات: وزیری، ۲۰۰ نسخه، چاپ اول، زمستان ۱۳۹۹
چاپ و صحافی: چاپخانه دقت
بها: ۴۳۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.



انتشارات
۷۸۱

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶ - ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)
مؤسسه کتابیران: تهران، خیابان کارگر جنوبی، خیابان لبافی نژاد، بین خیابان فروردین و اردیبهشت،
شماره ۲۳۸، تلفن: ۶۶۴۹۴۴۰۹ - ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)
مؤسسه دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شماره ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ - ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

<http://press.um.ac.ir>

Email: press@um.ac.ir

تقدیم به همسر

تقدیم به پدر و مادر

press.um.ac.ir

press.um.ac.ir

فهرست مطالب

پیشگفتار.....	۹
فصل ۱. مفاهیم جریان‌های میکرو و نانو.....	۱۱
۱-۱ مقدمه.....	۱۱
۱-۱-۱ واحدهای متداول اندازه‌گیری طول.....	۱۲
۲-۱ فناوری‌های میکرونانو.....	۱۲
۳-۱ مفاهیم بنیادین سیال.....	۱۹
۴-۱ ویژگی‌های جریان سیال در ابعاد میکرونانو.....	۲۳
۱-۴-۱ نیروهای سطحی و حجمی.....	۲۳
۲-۴-۱ شرط شکست فرضیه پیوستگی.....	۲۴
۵-۱ مفهوم رقیق‌شدگی جریان.....	۲۶
۱-۵-۱ تئوری جنبشی گازها و استوانه برخورد.....	۲۸
۶-۱ رژیم‌های جریان‌های گازی برحسب عدد نودسن.....	۳۳
۷-۱ پدیده‌های فیزیکی خاص جریان‌های میکرونانو.....	۴۰
۱-۷-۱ انتقال سرما.....	۴۰
۲-۷-۱ تناقض نودسن (کمینه نودسن).....	۴۲
۳-۷-۱ انحراف توزیع فشار از توزیع خطی.....	۴۵
۴-۷-۱ انحراف عدد پوازی.....	۴۶
۵-۷-۱ قطبی شدن دما حول کره در جریان هم‌دما.....	۴۷
۸-۱ جمع‌بندی فصل اول.....	۴۸
تمرین‌های فصل اول.....	۴۸
مراجع فصل اول.....	۵۱
فصل ۲. مفاهیم بنیادی جریان‌های گازی در میکروکانال‌ها.....	۵۳
۱-۲ مقدمه.....	۵۳
۲-۲ قوانین بقا در جریان تراکم‌پذیر.....	۵۴

۵۶	۳-۲ تنش در معادلات ناویر-استوکس برای جریان تراکم‌پذیر
۵۹	۳-۲-۱ ضرایب تبادل ممنتیم مماسی و انرژی با سطح
۶۲	۳-۲-۲ لایه نودسن
۶۵	۴-۲ شرایط مرزی لغزش سرعت و پرش دما
۷۲	۵-۲ دقت سرعت لغزشی و ضریب لغزش
۷۶	۶-۲ لغزش سرعت و پرش دما روی دیواره‌های آینه‌ای
۷۷	۷-۲ لزجت مؤثر
۷۹	۸-۲ اثبات رابطه سرعت لغزشی
۸۱	۹-۲ بسط اغتشاشی میدان سرعت
۸۴	۱۰-۲ لغزش سرعت و پرش دما از دیدگاه کنارد
۸۵	۱۱-۲ اثبات رابطه پرش دما
۸۷	۱۲-۲ محاسبه سرعت لغزشی در شکل برداری
۸۸	۱۳-۲ روابط نوین برای لغزش سرعت و پرش دما
۹۱	۱۴-۲ جمع‌بندی فصل دوم
۹۱	ضمیمه ۱- روابط تانسوری
۹۳	ضمیمه ۲- ضرب دیادیک دو بردار
۹۵	ضمیمه ۳- معادلات جریان خطی شده-اندکی رقیق شده
۹۶	تمرین‌های فصل دوم
۹۷	مراجع فصل دوم

۹۹	فصل ۳. جریان رانده‌شده با گرادیان فشار
۹۹	۳-۱ جریان‌های رانده‌شده توسط اختلاف فشار
۹۹	۳-۱-۱ مقدمه و معادلات حاکم
۱۰۲	۳-۱-۲ حل تحلیلی میدان سرعت
۱۰۳	۳-۱-۳ حل تحلیلی دبی و توزیع فشار
۱۰۷	۳-۱-۴ بحث در مورد شرط مرزی لغزش سرعت مرتبه دوم
۱۰۸	۳-۲ مدل یکپارچه سرعت
۱۱۶	۳-۳ ارزیابی دقت توزیع سرعت
۱۱۸	۴-۳ تغییرات سرعت با عدد نودسن
۱۱۸	۵-۳ دبی جرمی در جریان پوایزی برحسب عدد نودسن
۱۲۰	۶-۳ فشار و دما در جریان پوایزی تراکم‌پذیر
۱۲۱	۷-۳ اصلاح طول پویش آزاد مولکولی در مجاورت دیواره

۱۲۴	۸-۳ نتایج به دست آمده از اعمال طول پویش آزاد مولکولی اصلاح شده
۱۲۵	۹-۳ انتقال حرارت در جریان پوایی
۱۲۸	۱۰-۳ رفتار گاز کنار دیواره
۱۲۹	۱۱-۳ نتایج تجربی برای نیم رخ سرعت در رژیم لغزشی
۱۲۹	۱۲-۳ جمع بندی فصل سوم
۱۳۰	تمرین های فصل سوم
۱۳۲	ضمیمه
۱۳۳	مراجع فصل سوم

۱۳۵	فصل ۴. جریان های رانده شده با گرادیان / اختلاف دما در میکروهندسه ها
۱۳۵	۱-۴ جریان های گرمایی
۱۳۵	۲-۴ جریان خزش گرمایی
۱۳۹	۱-۲-۴ شرح فیزیکی جریان خزش حرارتی
۱۴۲	۲-۲-۴ خزش حرارتی در عدد نودسن صفر
۱۴۲	۳-۲-۴ خزش حرارتی در عدد نودسن بی نهایت
۱۴۳	۴-۲-۴ تحلیل معادلات جریان خزش حرارتی
۱۴۵	۳-۴ خزش حرارتی معکوس
۱۴۶	۴-۴ جریان تنش حرارتی لغزشی
۱۴۸	۱-۴-۴ مکانیسم ایجاد جریان تنش حرارتی لغزشی
۱۴۹	۲-۴-۴ تنش حرارتی از دیدگاه کوگان
۱۵۰	۵-۴ جریان تنش حرارتی غیرخطی
۱۵۲	۶-۴ جریان لبه گرمایی
۱۵۴	۱-۶-۴ کمپرسور لبه گرمایی
۱۵۵	۷-۴ جریان رادیومتریکی
۱۵۶	۱-۷-۴ نیروی رادیومتریکی
۱۶۰	۲-۷-۴ محاسبه نیرو در پره های رادیومتریکی در شرایط مختلف
۱۶۳	۳-۷-۴ میکرو پمپ رادیومتریکی
۱۷۱	۴-۷-۴ هندسه های نوین برای میکروپمپ رادیومتریکی
۱۷۵	۸-۴ مقایسه قدرت جریان های حرارتی مختلف
۱۷۵	۹-۴ جداسازی مخلوط گازها با پمپ های رادیومتریکی
۱۷۸	۱۰-۴ جریان استوکس
۱۷۹	۱-۱۰-۴ بیان های دیگر معادله استوکس

۱۸۰	۲-۱۰-۴ استخراج معادله $\nabla^4 \psi = 0$
۱۸۱	۳-۱۰-۴ گردابه مافت
۱۸۶	۴-۱۰-۴ تشکیل گردابه در پمپ رادیومتریکی
۱۸۹	۱۱-۴ جمع بندی فصل چهارم
۱۸۹	تمرین های فصل چهارم
۱۹۵	مراجع فصل چهارم
۱۹۷	فصل ۵. جریان کوئت و جریان فوریه
۱۹۷	۱-۵ جریان کوئت
۲۰۱	۲-۵ طول لغزش (LS)
۲۰۲	۳-۵ حل جریان کوئت تراکم ناپذیر همراه با معادله انرژی
۲۰۳	۴-۵ تنش برشی در جریان کوئت
۲۰۵	۵-۵ رفتار جریان کوئت در مجاورت دیواره
۲۰۶	۶-۵ جریان کوئت نوسانی
۲۱۰	۷-۵ جریان کوئت استوانه ای
۲۱۵	۸-۵ جریان فوریه
۲۱۸	۱-۸-۵ مقایسه پیش بینی تحلیلی فوریه با حل DSMC
۲۱۹	۹-۵ جمع بندی فصل پنجم
۲۱۹	تمرین های فصل پنجم
۲۲۴	ضمیمه: خطی سازی معادلات اوایلر
۲۲۶	مراجع فصل پنجم
۲۲۷	نمایه

پیشگفتار

با توجه به توسعه کاربردهای سیستم‌های میکرو/نانو-الکترو-مکانیکی (MEMS/NEMS) در کاربردهای تجاری و در تحقیقات علمی و ضرورت مطالعه رفتار و کاربردهای جریان سیال در هندسه‌های کوچک، از اواخر دهه ۸۰ قرن گذشته میلادی، بررسی جریان سیالات در ابعاد میکرو و نانو توجهات زیادی را به خود جلب کرد. در چند دهه اخیر، تحقیقات در زمینه جریان‌های میکرو-نانو توسعه زیادی یافته و دستاوردهای جدیدی حاصل شده است که عمده این دستاوردها در مقالات منتشر شده‌اند. البته کتاب‌های محدودی در زمینه مکانیک سیالات ابعاد میکرو نیز منتشر شده‌اند که از جمله معروف‌ترین آن‌ها کتاب جریان‌های شاردها در مقیاس میکرو و نانو: مبانی و شبیه‌سازی تألیف کارنیاداکیس، بسکوک و آلورو است که ترجمه فارسی آن به تازگی منتشر شده است.

هدف از تدوین کتاب حاضر، به عنوان اولین کتاب فارسی تألیفی در این شاخه، آشنایی دانشجویان و محققان با مبحث مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو است. این کتاب به طور خلاصه و مفهومی به بررسی جریان سیال در ابعاد میکرو و نانو و اختلافات آن با جریان در ابعاد ماکرو می‌پردازد. کتاب حاضر می‌تواند به عنوان مرجعی برای درس مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو که از دروس مصوب جدید وزارت علوم برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی رشته‌های مهندسی مکانیک و مهندسی هوافضا است در نظر گرفته شود. کتاب حاضر در پنج فصل تدوین شده است و سعی شده تا مباحث بنیادین و به روز موضوع در آن لحاظ شود. در فصل اول کتاب به بررسی مفاهیم پایه، تعاریف، کاربردها و تمایزات جریان‌های در ابعاد میکرو و نانو با جریان‌های متداول پرداخته می‌شود. فصل دوم به تعریف لایه نودسن و بررسی کلیات شرایط مرزی لغزش سرعت و پرش دما و استخراج روابط مربوط می‌پردازد. تمرکز فصل سوم بر جریان‌های رانده شده توسط فشار (جریان پوایزی) در ابعاد میکرو و در شرایط رقیق شده است. فصل چهارم به جریان‌های حرارتی (جریان‌های ایجاد شده به دلیل وجود گرادیان یا توزیع دما در میدان) می‌پردازد. تمرکز فصل پنجم بر جریان کوئت و جریان فوریه در ابعاد میکرونانو است. در هر فصل سعی شده تا کاربردهای علمی و عملی جریان‌های مورد بررسی و اختلاف بین جریان‌های میکرو با جریان‌های ماکرو مورد دقت قرار گیرد.

در تألیف این کتاب، از مراجع معتبر مانند اثر نام‌برده از کارنیاداکیس و همکاران، کتاب دینامیک گاز مولکولی اثر سونه، جزوه مؤلف در تدریس این درس در پنج سال متوالی و دیگر دستاوردهای علمی

مؤلف و همچنین مقالات و جزوات محققان معروف این زمینه مانند پرفسور جیسون ریس، پرفسور استفان استفانف و پرفسور استفن کولین استفاده شده است. در کتاب حاضر بسیاری از اثبات ها که در کتاب کارنیاداکیس و همکاران فقط به صورت نتیجه نهایی ارائه شده، با جزئیات کامل و دقیق آورده شده است. همچنین دستاوردها و نتایج جدیدی که در کتاب کارنیاداکیس و همکاران (انتشار در سال ۲۰۰۵ میلادی) گزارش نشده نیز آورده شده است. تلاش شده است توضیحات فیزیکی بسیار غنی برای جریان های حرارتی ارائه شود که بخش عمده ای از این مباحث، حاصل مباحثات شخصی مؤلف و پرفسور کازو آوکی، استاد پیشکسوت دانشگاه کیوتوی ژاپن، است.

لازم به ذکر است که مؤلف بیش از پانزده سال تجربه و سابقه در زمینه مدل سازی جریان های میکرونانو داشته و تاکنون بیش از ۵۰ مقاله علمی معتبر در زمینه جریان های میکرونانو تدوین کرده است. تجربه مؤلف در بیان مطالب علمی به زبان ساده به همراه ارائه توضیحات مناسب به هدف گویا شدن متن در تألیف این کتاب اعمال شده است. سعی شده است تمرین های متنوع و کاملی در انتهای هر فصل استفاده شود که مجموعه ای از تمرین ها و سؤالات امتحانی است که در سال های گذشته توسط مؤلف طراحی شده و یا در مراجع ارائه شده است. لازم به ذکر است که مرجع کارنیاداکیس و همکاران، فاقد تمرین بوده که برای یک کتاب درسی نقطه ضعف قابل ملاحظه ای است.

از تمامی دانشجویان درس مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو که در تهیه این کتاب، اعم از تایپ و تدوین فصول تا اشکال یابی، تهیه شکل ها و روان کردن متن در طی چند سال گذشته زحمات بسیاری را متحمل شدند بسیار سپاسگزارم. به صورت خاص از آقایان مهندس علی لطفیان، مهندس محمد صالحی فر، مهندس وحید شهابی، مهندس رضا عرب پور، مهندس عدنان محمدی و مهندس نفیسه جمعه زاده به خاطر سهم شایسته ای که در تدوین این کتاب برعهده داشتند، تقدیر و سپاسگزاری می شود. بدون شک، تدوین این کتاب بدون زحمات این عزیزان و دیگر دانشجویان این جانب میسر نبود. در نهایت از تمامی خوانندگان عزیز درخواست می کنم هرگونه اشکال یا پیشنهاد برای بهبود کار را از طریق ایمیل e.roohi@um.ac.ir به مؤلف اطلاع دهند.

احسان روحی گل خطمی

دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد

زمستان ۱۳۹۹