به نام خداوند جان و خرد

انتشارات
۷۸۱

مکانیک سیّالات در ابعاد میکرو و نانو

ویرایش دوم، شامل یادگیری ماشین

برای دریافت تصاویر رنگی، به پروفایل کتاب در تارنمای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد به نشانی زیر مراجعه فرمایید:

press.um.ac.ir

دکتر احسان روحی گل‌خطمی
استاد دانشگاه ماساچوست امهرست

سرشناسه: روحی گل‌خطمی، احسان، ۱۳۶۱-
عنوان و نام پدیدآور: مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو (ویراست ۲)/ احسان روحی‌گل‌خطمی؛ ویراستار ادبی هانیه اسدپور فعال مشهد.
مشخصات نشر: مشهد: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات، ۱۴۰۴.
مشخصات ظاهری: ۳۸۶ ص.
فروست: انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد؛ ۷۸۱.
شابک: ISBN: 978-964-386-666-2
وضعیت فهرست‌نویسی: فیپا.
یادداشت: کتابنامه. نمایه.
یادداشت: چاپ دوم.
موضوع: سیالات -- مکانیک — Fluid mechanics
موضوع: نانوسیالات — Nanofluids
شناسه افزوده: دانشگاه فردوسی مشهد، انتشارات.
رده‌بندی کنگره: TA۳۵۷
رده‌بندی دیویی: ۶۲۰/۱۰۶
شماره کتابشناسی ملی: ۱۰۳۰۹۵۱۱

مکانیک سیّالات در ابعاد میکرو و نانو (ویرایش دوم، شامل یادگیری ماشین)

پدیدآورنده: دکتر احسان روحی گل‌خطمی
ویراستار ادبی: هانیه اسدپور فعال مشهد
مشخصات: وزیری، ۱۰۰ نسخه، چاپ دوم، پاییز ۱۴۰۴ (اوّل، ۱۳۹۹)
چاپ و صحافی: همیار
بها : ۴/۵۰۰/۰۰۰ ریال
حق چاپ برای انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد محفوظ است.

مراکز پخش:

فروشگاه و نمایشگاه کتاب پردیس: مشهد، میدان آزادی، دانشگاه فردوسی مشهد، جنب سلف یاس
تلفن: ۳۸۸۰۲۶۶۶- ۳۸۸۳۳۷۲۷ (۰۵۱)

مؤسّسهٔ کتابیران: تهران، میدان انقلاب، خیابان کارگر جنوبی، بین روانمهر و وحید نظری، بن‌بست گشتاسب، پلاک ۸ تلفن: ۶۶۴۸۴۷۱۵ (۰۲۱)

مؤسّسهٔ دانشیران: تهران، خیابان انقلاب، خیابان منیری جاوید (اردیبهشت) نبش خیابان نظری، شمارهٔ ۱۴۲
تلفکس: ۶۶۴۰۰۲۲۰ – ۶۶۴۰۰۱۴۴ (۰۲۱)

http://press.um.ac.ir Email: press@um.ac.ir

انتشارات
۷۸۱

تقدیم به همسرم

تقدیم به پدر و مادرم

فهرست مطالب

پیشگفتار ویراست دوم ۱
پیشگفتار ویراست اول ۳

فصل ۱. مفاهیم جریان‌های میکرو و نانو ۵
۱-۱ مقدّمه ۵
۱-۱-۱ واحدهای متداول اندازه‌گیری طول ۶
۱-۲ فنّاوری‌های میکرونانو ۹
۱-۳ مفاهیم بنیادین سیّال ۱۴
۱-۴ ویژگی‌های جریان سیّال در ابعاد میکرونانو ۱۷
۱-۴-۱ نیروهای سطحی و حجمی ۱۷
۱-۴-۲ شرط شکست فرضیهٔ پیوستگی ۱۸
۱-۵ مفهوم رقیق‌شدگی جریان ۲۰
۱-۵-۱ تئوری جنبشی گازها و استوانهٔ برخورد ۲۲
۱-۶ رژیم‌های جریان‌های گازی برحسب عدد نودسن ۲۷
۱-۷ پدیده‌های فیزیکی خاص جریان‌های میکرونانو ۳۳
۱-۷-۱ انتقال سرما ۳۳
۱-۷-۲ تناقض نودسن (کمینهٔ نودسن) ۳۵
۱-۷-۳ انحراف توزیع فشار از توزیع خطّی ۳۸
۱-۷-۴ انحراف عدد پوازی ۳۹
۱-۷-۵ قطبی شدن دما حول کره در جریان هم‌دما ۴۰
۱-۸ جمع‌بندی فصل اوّل ۴۰
تمرین‌های فصل اوّل ۴۱
مراجع فصل اوّل ۴۴

فصل ۲. مفاهیم بنیادی جریان‌های گازی در میکروکانال‌ها ۴۵
۲-۱ مقدّمه ۴۵
۲-۲ قوانین بقا در جریان تراکم‌پذیر ۴۶
۲-۳ تنش در معادلات ناویر- استوکس برای جریان تراکم‌پذیر ۴۸
۲-۳-۱ ضرایب تبادل ممنتم مماسی و انرژی با سطح ۵۱
۲-۳-۲ لایهٔ نودسن ۵۴
۲-۴ شرایط مرزی لغزش سرعت و پرش دما ۵۷
۲-۵ دقت سرعت لغزشی و ضریب لغزش ۶۴
۲-۶ لغزش سرعت و پرش دما روی دیواره‌های آینه‌ای ۶۸
۲-۷ لزجت مؤثر ۶۹
۲-۸ اثبات رابطهٔ سرعت لغزشی ۷۰
۲-۹ بسط اغتشاشی میدان سرعت ۷۲
۲-۱۰ لغزش سرعت و پرش دما از دیدگاه کنارد ۷۵
۲-۱۱ اثبات رابطهٔ پرش دما ۷۷
۲-۱۲ محاسبهٔ سرعت لغزشی در شکل برداری ۷۸
۲-۱۳ روابط نوین برای لغزش سرعت و پرش دما ۷۹
۲-۱۴ مدل لغزش سرعت مرتبه دوم بهبودیافته با اصلاح غیرصفحه‌ای ۸۲
۲-۱۴-۱ جریان گاز در میکروکانال صفحه‌ای ۸۲
۲-۱۴-۲ جریان گاز در میکروکانال غیرصفحه‌ای با برآمدگی‌های مثلثی ۸۴
۲-۱۴-۳ جریان تیلور—کوئت بین دو استوانه متحدالمرکز ۸۵
۲-۱۴-۴ جریان گاز بر روی یک استوانه ۸۷
۲-۱۴-۵ جریان لغزش گاز و انتقال حرارت بر روی استوانه ۸۹
۲-۱۵ جمع‌بندی فصل دوم ۹۱
ضمیمهٔ ۱- روابط تانسوری ۹۱
ضمیمهٔ ۲- ضرب دیادیک دو بردار ۹۳
توسعهٔ ضرب دیادیک ۹۴
کلّیت‌بخشی ۹۴

ضمیمهٔ ۳- معادلات جریان خطّی‌شده-اندکی رقیق‌شده ۹۵
تمرین‌های فصل دوم ۹۷
مراجع فصل دوم ۹۷

فصل ۳. جریان رانده‌شده با گرادیان فشار ۹۹
۳-۱ جریان‌های رانده‌شده توسط اختلاف فشار ۹۹
۳-۱-۱ مقدّمه و معادلات حاکم ۹۹
۳-۱-۲ حل تحلیلی میدان سرعت ۱۰۲
۳-۱-۳ حل تحلیلی دبی و توزیع فشار ۱۰۳
۳-۱-۴ بحث درمورد شرط مرزی لغزش سرعت مرتبهٔ دوم ۱۰۷
۳-۲ مدل یکپارچهٔ سرعت ۱۰۸
۳-۳ ارزیابی دقت توزیع سرعت ۱۱۴
۳-۴ تغییرات سرعت با عدد نودسن ۱۱۸
۳-۵ دبی جرمی در جریان پوایزی برحسب عدد نودسن ۱۱۸
۳-۶ فشار و دما در جریان پوایزی تراکم‌پذیر ۱۲۰
۳-۷ اصلاح طول پویش آزاد مولکولی در مجاورت دیواره ۱۲۱
۳-۸ نتایج به‌دست‌آمده از اعمال طول پویش آزاد مولکولی اصلاح‌شده ۱۲۳
۳-۹ انتقال حرارت در جریان پوایزی ۱۲۴
۳-۱۰ رفتار گاز کنار دیواره ۱۲۷
۳-۱۱ نتایج تجربی برای نیم‌رخ سرعت در رژیم لغزشی ۱۲۸
۳-۱۲ جریان در میکروپله‌ها ۱۲۸
۳-۱۲-۱ انتقال سرما ۱۲۹
۳-۱۲-۲ اثرات عدد نودسن ۱۳۳
۳-۱۲-۳ راه‌حل تحلیلی ۱۳۷
۳-۱۲-۳-۱ رژیم آزاد مولکولی ۱۳۸
۳-۱۲-۳-۲ دیواره‌های انعکاس پخشی ۱۳۹

۳-۱۲-۳-۳ دیواره‌های انعکاس آینه‌ای ۱۴۳
۳-۱۲-۳-۴ نتایج برای رژیم آزاد مولکولی ۱۴۴
۳-۱۲-۳-۵ اثر برخوردهای مولکولی ۱۴۸
۳-۱۳ میکروکانال‌های متخلخل ۱۵۱
۳-۱۳-۱ تخلخل‌ها ۱۵۲
۳-۱۳-۲ دبی جرمی ۱۵۳
۳-۱۳-۳ نفوذپذیری ۱۵۳
۳-۱۳-۴ توزیع سرعت ۱۵۷
۳-۱۳-۵ پیچیدگی مسیر ۱۵۷
۳-۱۴ جمع‌بندی فصل سوم ۱۵۸
تمرین‌های فصل سوم ۱۶۰
ضمیمه ۱۶۲
مراجع فصل سوم ۱۶۳

فصل ۴. جریان‌های رانده‌شده با گرادیان/ اختلاف دما در میکروهندسه‌ها ۱۶۵
۴-۱ جریان خزش گرمایی ۱۶۵
۴-۱-۱ شرح فیزیکی جریان خزش حرارتی ۱۶۹
۴-۱-۲ خزش حرارتی در عدد نودسن صفر ۱۷۲
۴-۱-۳ خزش حرارتی در عدد نودسن بی‌نهایت ۱۷۲
۴-۱-۴ تحلیل معادلات جریان خزش حرارتی ۱۷۳
۴-۲ خزش حرارتی معکوس ۱۷۵
۴-۳ جریان تنش حرارتی لغزشی ۱۷۶
۴-۳-۱ مکانیسم ایجاد جریان تنش حرارتی لغزشی ۱۷۷
۴-۳-۲ تنش حرارتی از دیدگاه کوگان ۱۷۹
۴-۴ جریان تنش حرارتی غیرخطّی ۱۸۰
۴-۵ جریان لبهٔ گرمایی ۱۸۲
۴-۵-۱ کمپرسور لبهٔ گرمایی ۱۸۳

۴-۶ جریان رادیومتریک ۱۸۵
۴-۶-۱ نیروی رادیومتریک ۱۸۶
۴-۶-۲ محاسبهٔ نیرو در پره‌های رادیومتریک در شرایط مختلف ۱۸۹
۴-۶-۲-۱ حالت اوّل $o(\lambda) \approx o(L)$ ۱۹۱
۴-۶-۲-۲ حالت دوم $d<\lambda<L$ ۱۹۲
۴-۶-۲-۳ حالت سوم $(\lambda<L\ ,\ \lambda<d)$ ۱۹۲
۴-۶-۳ میکروپمپ رادیومتریک ۱۹۳
۴-۶-۳-۱ معرفی ۱۹۳
۴-۶-۳-۲ خطوط سرعت جریان در اعداد نودسن مختلف ۱۹۵
۴-۶-۳-۳ نیروی افقی ۱۹۷
۴-۶-۳-۴ تأثیر ارتفاع دندانه ۱۹۸
۴-۶-۴ هندسه‌های نوین برای میکروپمپ رادیومتریک ۲۰۰
۴-۶-۴-۱ مکانیسم جریان ۲۰۴
۴-۷ مقایسهٔ قدرت جریان‌های حرارتی مختلف ۲۰۴
۴-۸ جداسازی مخلوط گازها با پمپ‌های رادیومتریک ۲۰۵
۴-۹ جریان استوکس ۲۰۶
۴-۹-۱ بیان‌های دیگر معادلهٔ استوکس ۲۰۷
۴-۹-۲ استخراج معادلهٔ $\nabla 4\Psi=0$ ۲۱۰
۴-۹-۳ گردابهٔ مافت ۲۱۰
۴-۹-۴ تشکیل گردابه در پمپ رادیومتریک ۲۱۵
۴-۱۰ ترموفوریسس ۲۱۷
۴-۱۱ جدایش ذرات با استفاده از اختلاف در ضرایب تبادل ممنتم سطح (جریان لبه‌ای حرارتی) ۲۱۷
۴-۱۲ جریان‌های رقیق‌شدهٔ حرارتی ناشی از جسم لوزی‌شکل با گرمادهی جزئی در یک کانال ۲۲۲
۴-۱۲-۱ مکانیسم جریان ۲۲۳
۴-۱۲-۲ وابستگی جریان به ضریب تبادل ممنتم ۲۲۴
۴-۱۲-۳ اثر پارامترهای مختلف بر دبی جرمی ۲۲۶
۴-۱۳ معادلات SNIT (SLOW NON-ISOTHERMAL THERMAL) برای جریان تنش حرارتی غیرخطی ۲۲۷

۴-۱۳-۱ هندسه ۲۲۹
۴-۱۳-۲ خطوط جریان و کانتورهای دما در کاویتی مربعی (حالت ۱)..... ۲۲۹
۴-۱۳-۳ خطوط جریان و کانتورهای دما در خم مستطیلی (حالت 2)..... ۲۳۲
۴-۱۴ مروری بر پمپ‌های نودسنی [۳]..... ۲۳۳
۴-۱۴-۱ پمپ نودسنی با جریان لغزش حرارتی (TCF)..... ۲۳۳
۴-۱۴-۲ پمپ نودسنی با جریان لبه‌ای حرارتی (TEF)..... ۲۳۹
۴-۱۴-۳ پمپ نودسنی با جریان رادیومتریک (RF)..... ۲۴۱
۴-۱۵ جمع‌بندی فصل چهارم..... ۲۴۷
تمرین‌های فصل چهارم..... ۲۴۷
مراجع فصل چهارم ۲۵۴

فصل ۵. جریان کوئت و جریان فوریه ۲۵۹
۵-۱ جریان کوئت..... ۲۵۹
۵-۲ طول لغزش (LS)..... ۲۶۳
۵-۳ حل جریان کوئت تراکم‌پذیر همراه با معادلهٔ انرژی ۲۶۴
۵-۴ تنش برشی در جریان کوئت ۲۶۶
۵-۵ رفتار جریان کوئت در مجاورت دیواره..... ۲۶۷
۵-۶ پیش‌بینی جریان کوئت با معادلات NCCR..... ۲۶۸
۵-۷ جریان کوئت نوسانی ۲۷۰
۵-۸ جریان کوئت استوانه‌ای..... ۲۷۴
۵-۹ جریان فوریه ۲۷۹
۵-۹-۱ مقایسهٔ پیش‌بینی تحلیلی فوریه با حل DSMC..... ۲۸۱
۵-۱۰ جریان دائمی یک‌بعدی بین دو صفحه موازی در رژیم آزاد مولکولی..... ۲۸۳
۵-۱۱ جریان در کاویتی ناشی از حرکت درپوش..... ۲۸۵
۵-۱۱-۱ رفتار شار حرارتی ۲۸۶
۵-۱۲ جمع‌بندی فصل پنجم..... ۲۹۱
تمرین‌های فصل پنجم..... ۲۹۲

ضمیمهٔ ۱: خطّی‌سازی معادلات اویلر ۲۹۶
ضمیمهٔ ۲: جزئیات استخراج جریان آزاد مولکولی برای جریان فوریه ۲۹۸
مراجع فصل پنجم ۳۰۸

فصل ۶. کاربرد یادگیری ماشین در تحلیل جریان‌های میکرونانو ۳۱۱
۶-۱ مقدمه ۳۱۲
۶-۲ معماری شبکهٔ عصبی عمیق DNN ۳۱۴
۶-۲-۱ مسیر پردازش در شبکهٔ عصبی عمیق DNN ۳۱۵
۶-۳ معماری شبکهٔ عملگر عمیق (DEEPONET) ۳۱۵
۶-۳-۱ مسیر پردازش در شبکهٔ شاخه‌ای ۳۱۶
۶-۳-۲ مسیر پردازش در شبکهٔ تنه‌ای ۳۱۶
۶-۳-۳ نقطه ادغام و شبکهٔ نهایی (HEAD) ۳۱۷
۶-۴ محاسبهٔ عدم‌قطعیت در شبکه‌های عصبی ۳۱۷
۶-۵ شبکهٔ عصبی عمیق برای پیش‌بینی پروفایل موج ضربه‌ای ۳۱۸
۶-۵-۱ موج ضربه‌ای در گاز تک اتمی ۳۱۸
۶-۵-۱-۱ شبکهٔ عصبی بهینه‌سازی‌شده برای برون‌یابی موج ضربه‌ای ۳۱۹
۶-۵-۲ موج ضربه‌ای در گاز دواتمی ۳۲۱
۶-۵-۳ موج ضربه‌ای در گاز چنداتمی ۳۲۴
۶-۵-۳-۱ پیش‌بینی نمایه چگالی ۳۲۶
۶-۵-۳-۲ پیش‌بینی ویژگی‌های میدان جریان ۳۲۹
۶-۶ شبکهٔ عصبی مبتنی بر طراحی متخصصان (MOE) ۳۳۴
۶-۶-۱ مسیر پردازش در شبکهٔ متخصصان ۳۳۴
۶-۶-۲ مسیر پردازش در شبکهٔ دروازه‌ای ۳۳۴
۶-۶-۳ نقطه ادغام و شبکهٔ نهایی سر ۳۳۴
۶-۷ شبکهٔ عصبی عمیق برای پیش‌بینی جریان کویتی ۳۳۵
۶-۷-۱ رگرسیون فرایند گاوسی برای پیش‌بینی گردش جریان ۳۳۹
۶-۸ مسئله رهایش گاز به حالت تعادل ۳۳۹

۶-۸-۱ شبکهٔ عصبی مبتنی بر فیزیک (PINN) برای توزیع ماکسول–بولتزمن ۳۴۲
۶-۸-۲ مسئله رهایش به تعادل بر اساس مدل BGK ۳۴۳
۶-۹ شبکهٔ عصبی برای جریان ماوراصوت رقیق‌شده روی استوانه ۳۴۵
۶-۱۰ تحلیل جریان رقیق در میکروپله ۳۵۰
۶-۱۰-۱ تغییر پارامتر عدد نودسن ۳۵۱
۶-۱۰-۲ تغییر پارامتر هندسی ارتفاع پله ۳۵۸
۶-۱۰-۳ مقایسه توابع زیان ۳۵۸
۶-۱۰-۳-۱ تکنیک زیان ناحیه‌ای (Zonal Loss) ۳۵۹
۶-۱۰-۳-۲ تابع زیان میانگین مربعات خطا (MSE) ۳۶۰
۶-۱۰-۳-۳ تابع زیان میانگین مربعات خطای وزندهی‌شده مبتنی بر گرادیان (GMSE) ۳۶۰
۶-۱۰-۴ تحلیل خطای کمّی ۳۶۳
۶-۱۱ جمع بندی فصل ششم ۳۶۳
مراجع فصل ششم ۳۶۴

نمایه ۳۶۷

پیشگفتار ویراست دوم

خداوند منان را شاکرم که این فرصت را در اختیار بنده قرار داد که ویراست دوم کتاب مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و نانو را بعد از گذشت حدود ۵ سال از تدوین ویرایش اول برای انتشار در اختیار انتشارات دانشگاه سابقم، دانشگاه فردوسی مشهد، قرار دهم. در مردادماه ۱۴۰۴، کتاب انگلیسی بنده تحت عنوان «پیشرفت‌ها در روش شبیه‌سازی مستقیم مونت کارلو: از جریان میکرو-نانو تا جریان‌های رقیق شده» توسط انتشارات معتبر اسپرینگر-شعبه سنگاپور- منتشر شد. با توجه به اینکه ممکن است دسترسی به این کتاب در داخل کشور دشوار باشد و همچنین ضرورت انتشار یک مرجع فارسی به‌روز در زمینهٔ جریان‌های میکرو-نانو و همچنین اطلاع‌رسانی انتشارات دانشگاه فردوسی مشهد که موجودی چاپ اول کتاب به اتمام رسیده است، تصمیم بر آن شد که ویرایش دوم کتاب حاضر در اسرع وقت براساس دستاوردهای جدید مؤلف و دیگر محققان در این زمینه تهیه و در اختیار ناشر قرار بگیرد.

ویرایش دوم شامل اضافات متعددی نسبت به نسخهٔ قدیم است. در فصل دوم، معادلات نوین لغزش سرعت و نتایج آن‌ها ارائه شده است. در فصل سوم، جریان در میکرو-پله و میکروکانال‌های متخلخل، که مورد اخیر کاربرد فراوانی در استخراج گازهای شیل دارد، اضافه شده است. شیل‌ها، سنگ‌های رسوبی ریزدانه‌ای هستند که می‌توانند غنی از نفت یا گاز طبیعی باشند. در فصل چهارم پدیدهٔ ترموفوریسس، جداسازی ذرات گاز با استفاده از اختلاف در ضرایب تبادل ممنتم سطح و مولکول (جریان لبه حرارتی)، جریان‌های رقیق‌شدهٔ حرارتی ناشی از جسم لوزی‌شکل با گرمادهی جزئی در یک کانال، معادلات جریان آرام غیرهم‌دما (snit) برای جریان تنش حرارتی غیرخطی و مروری بر پمپ‌های نودسن اضافه شده است و این فصل کاملا به‌روزرسانی و تکمیل شده است. در فصل پنجم، جریان دائمی یک بعدی بین دو صفحهٔ موازی در رژیم مولکولی آزاد و بررسی جریان در کاویتی (حفره) ناشی از حرکت درپوش اضافه شده است. مهمترین و اساسی‌ترین تغییر در این ویرایش، افزودن فصل ششم با عنوان «کاربرد یادگیری ماشین در جریان‌های میکرو و نانو» است. این فصل حتی در کتاب انگلیسی مؤلف نیز وجود ندارد و خلاصه‌ای از مقالات اخیر وی در این زمینهٔ نوظهور است (مقالاتی که در نشریات سال ۲۰۲۶ منتشر شده‌اند). در چندین سال اخیر، یادگیری ماشین در زمینه‌های مختلف علمی به صورت گسترده‌ای استفاده شده است و ضرورت آشنایی مخاطب فارسی زبان با این علم نوظهور به شدت احساس می‌شود. به همین دلیل، نویسنده یک فصل کامل را به این مبحث اختصاص داده است که بدون شک در مراجع فارسی و حتی انگلیسی نمونه آن

بی‌نظیر است.

مؤلف از سرکار خانم دکتر فهمیه ابراهیم‌زاده که در تدوین مطالب و ترجمهٔ از زبان انگلیسی مراجع برای استفاده در ویرایش دوم نقش به‌سزایی داشته‌اند سپاسگزار است. مؤلف همچنین اعلام می‌دارد که کل مبلغ حق‌الزحمهٔ این ویرایش به خیریهٔ محبان‌الرضا (علیه السلام) مشهد اهدا شده است که در زمینهٔ حمایت از کودکان بی‌سرپرست و خانواده‌های نیازمند فعالیت دارد.

مؤلف امیدوار است ویرایش دوم این کتاب مورد توجه مخاطبان فارسی زبان قرار بگیرد. در صورت داشتن هرگونه نظر، پیشنهاد یا انتقاد در مورد این کتاب لطفا از طریق نشانی پست الکتریک roohie@umass.edu با اینجانب در ارتباط باشید.

احسان روحی گل‌خطمی
استاد دانشکده مهندسی مکانیک و صنایع
دانشگاه ماساچوست امهرست
پاییز ۱۴۰۴

پیشگفتار ویراست اول

با توجه به توسعهٔ کاربردهای سیستم‌های میکرو/نانو- الکترو- مکانیکی (MEMS/NEMS) در کاربردهای تجاری و در تحقیقات علمی و ضرورت مطالعهٔ رفتار و کاربردهای جریان سیّال در هندسه‌های کوچک، از اواخر دههٔ ۸۰ قرن گذشتهٔ میلادی، بررسی جریان سیّالات در ابعاد میکرو و نانو توجهات زیادی را به خود جلب کرد. در چند دههٔ اخیر، تحقیقات درزمینهٔ جریان‌های میکرو- نانو توسعهٔ زیادی یافته و دستاوردهای جدیدی حاصل شده است که عمدهٔ این دستاوردها در مقالات منتشر شده‌اند. البته کتاب‌های محدودی درزمینهٔ مکانیک سیّالات ابعاد میکرو نیز منتشر شده‌اند که ازجمله معروف‌ترین آن‌ها کتاب *جریان شاره‌ها در مقیاس میکرو و نانو: مبانی و شبیه‌سازی* تألیف کارنیاداکیس، بسکوک و آلورو است که ترجمهٔ فارسی آن به‌تازگی منتشر شده است.

هدف از تدوین کتاب حاضر، به‌عنوان اوّلین کتاب فارسی تألیفی در این شاخه، آشنایی دانشجویان و محققان با مبحث مکانیک سیّالات در ابعاد میکرو و نانو است. این کتاب به‌طور خلاصه و مفهومی به بررسی جریان سیّال در ابعاد میکرو و نانو و اختلافات آن با جریان در ابعاد ماکرو می‌پردازد. کتاب حاضر می‌تواند به‌عنوان مرجعی برای درس مکانیک سیّالات در ابعاد میکرو و نانو که از دروس مصوّب جدید وزارت علوم برای دانشجویان تحصیلات تکمیلی رشته‌های مهندسی مکانیک و مهندسی هوافضاست درنظر گرفته شود. کتاب حاضر در پنج فصل تدوین شده است و سعی شده تا مباحث بنیادین و به‌روز موضوع در آن لحاظ شود. در فصل اوّل کتاب به بررسی مفاهیم پایه، تعاریف، کاربردها و تمایزات جریان‌های در ابعاد میکرو و نانو با جریان‌های متداول پرداخته می‌شود. فصل دوم به تعریف لایهٔ نودسن و بررسی کلّیات شرایط مرزی لغزش سرعت و پرش دما و استخراج روابط مربوط می‌پردازد. تمرکز فصل سوم بر جریان‌های رانده‌شده توسط فشار (جریان پوایزی) در ابعاد میکرو و در شرایط رقیق‌شده است. فصل چهارم به جریان‌های حرارتی (جریان‌های ایجادشده به‌دلیل 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 موردبررسی و اختلاف بین جریان‌های میکرو با جریان‌های ماکرو مورددقت قرار گیرد.

در تألیف این کتاب، از مراجع معتبر مانند اثر نام‌برده از کارنیاداکیس و همکاران، کتاب *دینامیک گاز مولکولی* اثر سونه، جزوهٔ 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 اثبات‌ها که در کتاب کارنیاداکیس و همکاران فقط به‌صورت نتیجهٔ نهایی ارائه‌شده، با جزئیات کامل و دقیق آورده شده است. همچنین دستاوردها و نتایج جدیدی که در کتاب کارنیاداکیس و همکاران (انتشار در سال 2005 میلادی) گزارش نشده نیز آورده شده است. تلاش شده است توضیحات فیزیکی بسیار غنی برای جریان‌های حرارتی ارائه شود که بخش عمده‌ای 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 درزمینهٔ مدل‌سازی جریان‌های میکرونانو داشته و تاکنون بیش از ۵۰ مقالهٔ علمی معتبر درزمینهٔ جریان‌های میکرونانو تدوین کرده است. تجربهٔ مؤلف در بیان مطالب علمی به زبان ساده به‌همراه ارائهٔ توضیحات مناسب به‌هدف گویا شدن متن در تألیف این کتاب اعمال شده است. سعی شده است تمرین‌های متنوع و کاملی در انتهای هر فصل استفاده شود که مجموعه‌ای از تمرین‌ها و سؤالات امتحانی است که در سال‌های 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 نقطه‌ضعف قابل‌ملاحظه‌ای است.

از تمامی دانشجویان درس مکانیک سیّالات در ابعاد میکرو و نانو که در تهیهٔ این کتاب، اعم از تایپ و تدوین فصول تا اشکال‌یابی، تهیهٔ شکل‌ها و روان کردن متن درطی چند سال گذشته زحمات بسیاری را متحمّل شدند بسیار سپاسگزارم. به‌صورت خاص از آقایان مهندس علی لطفیان، مهندس محمد صالحی‌فر، مهندس وحید شهابی، مهندس رضا عرب‌پور، مهندس عدنان محمدی و مهندس نفیسه جمعه‌زاده به‌خاطر سهم شایسته‌ای که در تدوین این کتاب برعهده داشتند، تقدیر و سپاسگزاری می‌شود. بدون‌شک، تدوین این کتاب بدون زحمات این عزیزان و دیگر دانشجویان این‌جانب میسّر نبود. درنهایت از تمامی خوانندگان عزیز درخواست می‌کنم هرگونه اشکال یا پیشنهاد برای بهبود کار را ازطریق ایمیل e.roohi@um.ac.ir به مؤلف اطلاع دهند.

احسان روحی گل‌خطمی
دانشیار گروه مهندسی مکانیک دانشگاه فردوسی مشهد
زمستان ۱۳۹۹