جریان شاره‌ها در مقیاس میکرو و نانو

مبانی و شبیه سازی

پدیدآورندگان

جرج ام کارنیاداکیس

علی بسکوک

نارایان آر. آلورو

برگردانندگان

ابراهیم شیرانی

استاد دانشکده مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی اصفهان

امیر هوشمند

کارشناس ارشد مهندسی مکانیک

دانشگاه صنعتی اصفهان

www.ketab.ir

دانشگاه صنعتی اصفهان
مرکز نشر

شماره کتاب ۱۳۸ گروه فنی مهندسی ۵۳

جریان شاره‌ها در مقیاس میکرو و نانو: مبانی و شبیه سازی

پدیدآورندگان	:	جرج. ام کارنیاداکیس، علی بسکوک، نارایان آر. آلورو
برگردانندگان	:	ابراهیم شیرانی، امیر هوشمند
ویراستار ادبی	:	آتوسا سعادتی
صفحه آرا	:	زهرا نصر اصفهانی
طراح جلد	:	مرضیه خردمند
لیتوگرافی، چاپ و صحافی	:	چاپخانه دانشگاه صنعتی اصفهان
ناشر	:	مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان
چاپ دوم	:	زمستان ۱۳۹۶
شمارگان	:	۵۰۰ جلد
شابک	:	۹۷۸-۹۶۴-۸۴۷۶-۹۶-۵
قیمت	:	۲۰۰۰۰۰ ریال

سرشناسه	:	کارنیاداکیس، جورج، ۱۹۵۹ - م. Karniadakis, George
عنوان و نام پدیدآور	:	جریان شاره‌ها در مقیاس میکرو و نانو : مبانی و شبیه سازی
مشخصات نشر	:	اصفهان دانشگاه صنعتی اصفهان، مرکز نشر، ۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری	:	چهارده، ۳۸۰ص.: مصور، جدول، نمودار
فروست	:	دانشگاه صنعتی اصفهان. مرکز نشر؛ ۱۳۸. گروه فنی مهندسی؛ ۵۳.
شابک	:	978-964-8476-96-5
وضعیت فهرست‌نویسی	:	فیپای مختصر
یادداشت	:	فهرست‌نویسی کامل این اثر در نشانی: http://opac.nlai.ir قابل دسترسی است
یادداشت	:	عنوان اصلی:
		Microflows and Nanoflows Fundamentals and Simulation
شناسه افزوده	:	بسکوک، علی، ۱۹۶۶ - م.
شناسه افزوده	:	Beşkök, Ali
شناسه افزوده	:	آلورو، نارایانا راثو
شناسه افزوده	:	Aluru, Narayana Rao
شناسه افزوده	:	شیرانی، ابراهیم، ۱۳۲۲- ، مترجم
شناسه افزوده	:	هوشمند، امیر،۱۳۶۷-، مترجم
شناسه افزوده	:	دانشگاه صنعتی اصفهان. مرکز نشر
شماره کتابشناسی ملی	:	۳۸۷۱۸۹۱

حق چاپ برای مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان محفوظ است.

اصفهان: دانشگاه صنعتی اصفهان ـ مرکز نشر ـ کدپستی ۸۴۱۵۶-۸۳۱۱۱ تلفن: ۱۰-۳۳۹۱۲۵۰۹ (۰۳۱) دورنگار: ۳۳۹۱۲۵۵۲ (۰۳۱)
برای خرید اینترنتی کلیه کتاب‌های منتشره مرکز نشر می‌توانید به وبگاه http://publication.iut.ac.ir مراجعه و یا

www.ketab.ir

۵۰۱۳۱۸۴

مقدمه از چی مینگ هو

جریان سیال از کانال‌های کوچک با توجه به اهمیتی که در مباحث بیوشیمیایی، سیستم‌های آزمایشگاه بر تراشه و نیز فناوری ساخت سیستم‌های میکروالکترومکانیکی دارد، عنوان پژوهشی جالب توجه، علی‌الخصوص از سال‌های حدود ۱۹۸۰ به بعد شده است. این کتاب خلاصه‌ای مفهومی از به کارگیری ابزارهای محاسباتی (فصول ۱۴ تا ۱۸) را برای توصیف جریان سیال در هیئت‌های با مقیاس میکرو و نانو را ارائه می‌کند. اگرچه بسیاری از مباحث بنیادی که در این نوع جریان‌ها حاکم هستند را در جریان‌های معمول ماکرو مشاهده نمی‌کنیم، اما مقیاس طول جریان نسبت به مقیاس طول مولکولی به گونه‌ای بزرگتر است که می‌توان همچنان در اغلب موارد از فرضیه محیط پیوسته بهره‌مند شد (فصل اول). البته عدد رینولدز در این موارد به دلیل مقیاس طولی کوچک بسیار کمتر از واحد است، که این امر گرادیان‌های سرعت بالایی را به همراه خواهد داشت. به عنوان مثال یک نرخ برش $10^{5}\,sec^{-1}$ شرط عملکردی غیرمعمول نیست و لذا نیروهای لزجی بالا متداول بوده، که در نتیجه آن صدها یا هزاران ψ افت فشار هیدردینامیکی در عرض یک شبکه کانالی اتفاق می‌افتد. متعاقباً طراحی میکروپمپ‌هایی با ارتفاع فشاری مورد نیاز بدون ایجاد مشکلات گرمایی، کاری آسان نخواهد بود. نیروهای الکتروسینتیکی یا کشش سطحی (فصول ۷ و ۸) به عنوان جایگزین‌هایی برای جابه‌جایی ذرات خاص یا کل جریان استفاده می‌شوند. هم‌چنین میرایی لزجی بالا شانس هرگونه ناپایداری هیدرودینامیکی را از بین می‌برد، که این موضوع برای یک اختلاط مؤثر بسیار ضروری است. اختلاط در تجهیزات میکرو نیز غالباً در قابلیت‌های سیستم حائز اهمیت است (فصل ۹). بکارگیری نیروی الکتروسینتیکی برای دستیابی به اختلاط هرچه مغشوش‌تر، یک موضوع پژوهشی منحصر به فرد و جالب توجه است. در این موارد خواص بحرانی همچون ثوابت دی‌الکتریک، بیش از لزجت در محاسبه بازده انتقال اهمیت دارند.

پیشگامان ملی نانو که برای نخستین بار در امریکا (*www.nano.gov*) بنای فعالیت را گذاشتند و پس از آن در بسیاری کشورهای دیگر آغاز به کار کردند، محدوده مقیاس طولی مسائل روز را از میکرون به نانومتر تغییر دادند. جریان در این رژیم‌ها بنای سرپیچی از

www.ketab.ir

فرضیات اساسی در مکانیک محیط‌های پیوسته را می‌گذارد (فصل ۱). اثر مولکول‌های درون حجم جریان از مولکول‌های حاشیه جریان در مرز جامد، تفکیک می‌شود (فصل ۱۰). این موضوع برای جریان در هیئت‌های بسیار کوچک بحث‌برانگیز می‌شود. تعیین مرز بین فرض پیوسته یا ناپیوسته بودن جریان، همچنان مستلزم بررسی بوده و تأثیر عمیق آن بر درک رفتار سیال در مقیاس کوچک یا طراحی سیستم، اجتناب‌ناپذیر است.

نسبت اندازه کانال به مولکول تنها پارامتر ارزیابی فرض پیوسته بودن نیست. به عنوان مثال در کاربردهای بیولوژیکی، با مولکول‌هایی با تغییرات شدید ترکیبی، بارهای الکتریکی و ساختار قطبی مواجه هستیم. این متغیرها چگونگی حصول شرط فرض پیوسته را تنها براساس نسبت ابعاد به چالش می‌کشند (فصل ۱۱). هنگامی که یک جریان سیال نیوتونی پیوسته در نظر گرفته می‌شود، آثار مولکولی با معادلات مرسوم مکانیک سیالات تعریف می‌شوند. تعاملات بین مولکولی سیال با یک ثابت فیزیکی که لزجت نام دارد، تصریح می‌شوند. شرط عدم لغزش تعامل بین مولکول‌های سیال و سطح جامد را بیان می‌دارد. هردو مفهوم لزجت و شرط عدم لغزش، با توجه به شکست فرض پیوسته بودن، می‌توانند به نتایج دیگری بیانجامد (فصل‌های ۲ و ۱۰).

در رژیم نانوجریان، مولکول‌های زیاد در نزدیکی دیوار از دیواره قرار ندارند. لذا حرکت حجمی جریان به طور قابل ملاحظه‌ای تحت تأثیر نیروهای پتانسیل تولید شده توسط مولکول‌های نزدیک سطح جامد قرار می‌گیرد. در نزدیکی سطح، مولکول‌های سیال آزادانه در جریان نیستند. در فاصله‌ای به اندازه چند لایه مولکولی سیال از سطح، جریان ثوابت فیزیکی بسیار متفاوتی نسبت به حجم جریان دارد. آثار سطح تنها در بعد نانو حائز اهمیت نیست (فصل ۱۰)، بلکه در تجهیزات میکروسیالاتی نیز، عملکرد وسایل (به عنوان مثال رسوب سطح) وابسته به مشخصات سطح است. غالباً در این تجهیزات زمان بیشتری برای پرداختن به خواص سطح صرف می‌شود، تا طراحی و ساخت دستگاه. به عنوان نتیجه‌ای از درک محدود ما از رفتار سیالاتی نانوکانال‌ها (فصل‌های ۱۰ تا ۱۳)، بسیاری از فرایندهای سیستمی فناوری امروزی دشوار، ناقص و پرزحمت هستند. رساندن یا متوقف کردن یک حجم پیکولیتری از سیال به موقعیتی خاص با دقت بالا همچون فرایندهای دیگر نظیر اختلاط ذرات نانویی یا میکرونی در یک سیال با غلظت یونی بالا، همچنان ماموریت‌های چالش‌برانگیز عملی را در این زمینه رقم می‌زند. با توسعه درک مفاهیم تعاملات سیال در دنیای نانو، بسیاری از رازها و مسائل و چالش‌هایی که دانشمندان را متوجه خود ساخته‌اند، قابل تحلیل خواهند شد.

چی مینگ هو

www.ketab.ir

پیشگفتار نویسندگان

در سال‌های حدود ۱۹۹۰ آزمایش جریان در میکروکانال‌ها که توسط گروه اچ. باو و جی. زمل در دانشگاه پنسیلوانیا انجام شد، نتایج جالب و فریبنده‌ای را برای جریان گازها و مایعات افشا کرد، به گونه‌ای که اشتیاق و هیجان زیادی را برای مطالعه جریان‌های با عدد رینولدز پایین و در مقیاس میکرو، ایجاد نمود. یک واقعه تأثیرگذار دیگر که تقریباً همزمان با مورد اول رخ داد، ساخت اولین میکروکانال با حسگرهای مجتمع فشار توسط گروه سم. ام. هو (*UCLA*) و وای. سی. تای (کالتک) بود. هنگام بررسی نتایج تجربی حاصل در دانشگاه پنسیلوانیا، مبنی بر اختلاف کلی جریان میکرو با جریان‌های متعارف، اندازه‌گیری جریان گاز با حسگرهای فشار و سپس حسگرهای دما نیز رفتار نویر جریان در ابعاد میکرو که با تئوری آشنای محیط پیوسته قابل توجیه نبود را بیان می‌کرد. در هندسه‌های میکرونی، جریان برای مایعات، دانه‌ای (ذره‌ای) و برای گازها رقیق بوده و دیوارها اصطلاحاً "متحرک" محسوب می‌شوند. به علاوه ممکن است سایر پدیده‌ها همچون خزش گرمایی، الکتروسینتیک، گرمایش لزجی، نفوذ غیرعادی و حتی آثار کوانتومی و شیمیایی نیز اهمیت یابند. به عنوان مهم‌ترین عامل، جنس دیواره و کیفیت سطح آن نقش مهمی را در تبادل انرژی و مومنتوم ایفا می‌کند. ممکن است این بحث نیز پیش آید که دست کم برای گازها، موقعیت شبیه به جریان فضایی کم‌فشار در ارتفاعات بالا است که به طور گسترده‌ای از بیش از ۴۰ سال پیش مطالعه شده‌اند. در حقیقت، در رژیم جریان خاصی از اعداد نادسن چنین است. اگرچه غالب جریان‌های گاز در ابعاد میکرو در اعداد رینولدز و ماخ پایین وقوع می‌یابند و این امر در تضاد با جریان همتای فضایی آنهاست. به علاوه اغلب هندسه‌های میکرونی دارای نسبت منظر بسیار بزرگی هستند و این امر مدل‌سازی عدد آنها را با چالش‌های بیشتری مواجه می‌کند، اما در عین حال فرصت‌هایی را برای دست‌یابی به نتایج شبه‌تحلیلی فراهم می‌نماید. برای مایعات چنین شباهتی وجود ندارد و دینامیک آنها در هندسه‌های میکرونی محدود، به ویژه در محدوده زیرمیکرونی بسیار پیچیده‌تر است. اصلی‌ترین وجوه افتراق بین مکانیک سیالات در ابعاد میکرو و ماکرو را می‌توان در چهار زمینه کلی زیر ارائه کرد:

www.ketab.ir

- آثار غیرپیوسته بودن جریان
- آثار سطحی حاکم بر مسأله
- آثار عدد رینولدز پایین و
- آثار چندمقیاسه و چند فیزیکه

برخی از این آثار را می‌توان با اصلاحات نسبتاً ساده‌ای از روندهای استاندارد عددی در دینامیک محاسباتی شاره‌ها، شبیه‌سازی نمود. البته سایر آثار مستلزم روش‌های جدید شبیه‌سازی بر مبنای الگوریتم‌های چندمقیاسه هستند که برای دامنه‌های ماکرو استفاده نمی‌شوند. برای جریان گاز در ابعاد میکرو، آثار تراکم‌پذیری حائز اهمیت بسزایی است، زیرا گرادیان‌های چگالی نسبتاً بزرگ می‌باشد، اگرچه عدد ماخ نوعاً مقدار کمی است. براساس مرتبه رقت، نیاز به اعمال تصحیحاتی بر مرزهای یا هر جای دیگری از دامنه مسأله وجود دارد. افزایش آثار رقت منجر به مدل‌های متشکله برای تانسور تنش و بردار شار گرمایی در معادلات ناویر- استوکس را ناتوان کند. از دیگر سوی، کار با معادله بولتزمن یا دینامیک مولکولی قانون نیوتن به طور مستقیم برای هندسه‌های پیچیده میکرونی از لحاظ محاسباتی گران‌قیمت است. همین نتیجه برای مایعات نیز صحت دارد، چون شبیه‌سازی اتمی بر مبنای قانون نیوتن برای هر اتم، محدود به احجام کوچک است. بنابراین نیازمند بکارگیری روش‌های میانه یا تلفیقی اتمی- پیوسته برای جریان گاز و مایع در ابعاد میکرو هستیم تا به طور مؤثر با انحرافات از شرایط محیط پیوسته کنار آمده و یک ارتباط بین مسأله با ابعاد با دامنه بزرگ ایجاد کنیم. به عنوان مهم‌ترین مسأله ، جریان میکرو زمانی که کنش‌های همزمان الکتریکی، مکانیکی، گرمایی و دیگر دامنه‌ها را دربر دارد اتفاق می‌افتد. این امر در عوض دلالت بر الزام بکارگیری الگوریتم‌های سریع، قابل انعطاف و مقیاس‌پذیر در ابعاد پایین، برای میسر کردن شبیه‌سازی کامل سیستمی دارد، همان‌گونه که در شبیه‌سازی *VLSI* در سال ۱۹۸۰ بدان دست پیدا کردند.

پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه گسترش کاربردهای سیالاتی میکرونی و نانویی و در بحث کاربردهای آنها همچون سطوح میانی و شبیه‌سازی این جریان‌ها حاصل شده است، چنان‌که در جلد قبلی این کتاب (۲۰۰۱) نیز قابل ملاحظه بود. بنابراین برآن شدیم که وظیفه "ارزشمند" به روز رسانی این کتاب را برای شمول گسترش‌های نوین مزبور انجام دهیم.

کتاب حاضر محدوده مقیاس‌های آنگستروم تا میکرون (و بیشتر) را تحت پوشش قرار می‌دهد، در حالی که جلد نخست گستره یکصد نانومتر تا میکرون (و بیشتر) را تحت بررسی داشت. همچنان بر مفاهیم پایه‌ای تأکید داریم، در حالی که تلفیق آن را با نتایج شبه‌تحلیلی،

www.ketab.ir

آزمایشگاهی و عددی ارائه کرده و ارتباط آنها را با مدل‌سازی و تحلیل تجهیزات خاص واکاوی می‌نماییم. دو نویسنده نخست کتاب حاضر (*GK* و *AB*) از همکاری نویسنده جدید در این جلد، پروفسور ان آلورو، بسیار خرسند هستند؛ ایشان سهم منحصر به فردی را در امکان ارائه مطالب جدید در این جلد داشتند. هم‌چنین از انتشارات اشپرینگر و به ویژه ویراستار ارشد ریاضی دکتر آجی دوسانژ که این فرصت را به ما دادند تشکر می‌کنیم.

اکثر توسعه‌های نوین در خلال فصول ۷ تا ۱۸ هستند، که موارد جدیدی را شامل می‌گردند. به علاوه سایر فصول (۱ تا ۶) نیز اصلاح شده و در بخی موارد قسمت‌های جدیدی مطرح شده است. موارد مطروحه را به سه طبقه موضوعی اصلی تقسیم می‌کنیم:

۱- جریان گاز (فصول ۲ تا ۶)
۲- جریان مایع (فصول ۷ تا ۱۳)
۳- فنون شبیه‌سازی (فصل‌های ۱۴ تا ۱۸)

دسته آخر شامل دو فصل (۱۷ و ۱۸) است که به مدل‌سازی و شبیه‌سازی در ابعاد پایین می‌پردازد، به علاوه مدل‌سازی پدیده‌های جریان گاز و مایع نیز بررسی می‌گردد. تمامی موارد مشروح در این کتاب را می‌توان طی دو نیمسال یا یک دوره تحصیلات تکمیلی ارائه کرد. هم‌چنین برخی فصل‌های منتخب را می‌توان به عنوان یک دوره کوتاه یا در دوره کارشناسی به خدمت گرفت. در ادامه یک شمای کلی مختصر از موارد بحث شده در هر فصل را ارائه می‌کنیم.

در فصل اول اهم مفاهیم و تجهیزات مورد بحث در فصول بعدی را به صورت مختصر بیان می‌کنیم. بنا به ضرورت بیان تاریخچه موضوع، آن را با چند نمونه از سیستم‌های میکرو الکترومکانیکی (*MEMS*) آغاز کرده و سپس به بحث درخصوص برخی مفاهیم بنیادی از قبیل شکست قوانین متشکله، رژیم‌های جدید جریان و مشکلات و مسائل پیش روی برای مدل‌سازی سیستم‌های سیالاتی میکرونی و نانویی می‌پردازیم. هم‌چنین مسأله شبیه‌سازی کامل سیستمی برای سیستم‌های میکرو را مطرح کرده و مفهوم مدل‌سازی ماکرو را ارائه می‌کنیم.

در فصل دوم، ابتدا معادلات اساسی دینامیک سیالات را برای جریان تراکم‌پذیر و تراکم‌ناپذیر ارائه کرده و سپس بدون بعد کردن این معادلات را به بحث و بررسی می‌نشینیم. متعاقباً معادلات تراکم‌پذیر ناویر- استوکس را ملاحظه می‌کنیم و یک شرط مرزی کلی برای سرعت لغزش آن استخراج می‌نماییم. اعتبار این مدل در فصول بعدی ارزیابی می‌شود.

در فصل سوم، جریان گاز برش- محرک را با هدف مدل‌سازی چند عضو از اجزای سیستم‌های میکرو مطالعه می‌کنیم. به منظور رفع مشکل عدم تفهیم صحیح فیزیک جریان در

www.ketab.ir

هندسه‌های پیچیده مهندسی، چند جریان نمونه از قبیل جریان کوئت خطی و نوسانی در رژیم‌های لغزش، گذار و آزاد مولکولی و هم‌چنین جریان برش-محرک در میکروحفرات و میکروشیارها را بررسی می‌کنیم.

در فصل چهارم، جریان فشار محرک گاز در رژیم جریان لغزشی، گذار و آزاد مولکولی را ارائه می‌کنیم. در رژیم لغزش، ابتدا نتایج شبیه‌سازی براساس حل معادلات تراکم‌پذیر ناویر- استوکس با مدل‌های مختلف لغزش را که در فصل دوم ارائه شده‌اند، ارزیابی و اثبات اعتبار می‌کنیم. به علاوه دقت تئوری فانوی یک‌بعدی برای جریان در میکروکانال‌ها را ارزیابی کرده و با مطالعه آثار زبری و جریان ورودی می‌پردازیم. در رژیم گذار و آزاد مولکولی جهت پیش‌بینی نیم‌رخ سرعت و دبی جرمی برای جریان در لوله‌ها و مجراها، یک مدل متحد را ارائه می‌نماییم.

در فصل پنجم، انتقال حرارت در جریان گاز با ابعاد میکرو را بررسی می‌کنیم. در بخش نخست بر آثار خزش حرارتی (پدیده انتشار) که ممکن است با گرادیان مماسی بر سطحشان اهمیت یابد تمرکز می‌کنیم. هم‌چنین به مطالعه جریان‌های با محرک دما پرداخته و اعتبار معادله رسانش گرما را در محدوده عدد نادسن صفر تحقیق می‌کنیم. در بخش‌های دوم و سوم به آثار ترکیبی خزش گرمایی، رسانش حرارتی و لغزش دمایی در جریان فشار، نیرو و برش-محرک خواهیم پرداخت.

در فصل ششم جریان گاز رقیق در کاربردهایی غیر از میکروکانال‌های ساده را ملاحظه می‌کنیم. در بخش نخست، تئوری روانکاری و کاربرد آن را در خصوص مسائل یاتاقان لغزشی و فیلم فشرده ارائه می‌نماییم. در بخش‌های دوم و سوم، جریان‌های جدایش یافته در هندسه داخلی و خارجی برای رژیم جریان لغزشی را به منظور تعیین میزان اعتبار مدل‌های لغزشی بر مبنای فرض محیط پیوسته تحت شرایط جدایی، بررسی می‌کنیم. در بخش چهارم نتایج تئوری و عددی را برای جریان استوکس عبوری از روی یک کُره شامل آثار رقیق ارائه می‌نماییم. در بخش پنجم، ارائه خلاصه نتایج مهم جریان گاز از درون میکروفیلترها که جهت جداسازی و شناسایی ذرات شیمیایی و بیولوژیکی درون هوا کاربرد دارد، می‌پردازیم. در بخش پایانی جریان رقیق با سرعت بالا از درون میکرونازل‌ها را بررسی می‌کنیم که برای کنترل حرکت میکروماهواره‌ها استفاده می‌شود.

در فصل هفتم، مفاهیم بنیادی و روابط ریاضی کنترل و پمپاژ جریان میکرو با استفاده از آثار الکتروسینتیکی (که به هیچگونه اجزاء متحرک نیازمند نیست) را بیان می‌کنیم. در این فصل انتقال الکترواوسموتیک و الکتروفورتیک را با جزئیات تمام، هم برای جریان پایا و هم جریان‌های متناوب زمانی تحت پوشش قرار داده و به بحث بر روی مدل‌های ساده جریان

www.ketab.ir

نزدیک دیواره می‌پردازیم. هم‌چنین دی‌الکتروفورسیس را مطرح می‌کنیم که به وسیله آن قادر به جداسازی و شناسایی ذرات هم‌اندازه براساس قطبیت آنها هستیم.

در فصل هشتم، جریان با محرک کشش سطحی و پدیده موئینگی را برای مرطوب‌سازی و گسترش فیلم نازک مایع و قطرات ملاحظه می‌کنیم. در خصوص رسش میکروسیالاتی بر سطوح باز، مرطوب‌سازی الکتریکی و گرماموئینگی در خلال دی‌الکتروفورسیس برای حرکت جریان پیوسته و منقطع سیال به کار گرفته می‌شوند. این یک روش جدید با عملکرد تیر و مواد رسانای نوری در مورد مرطوب‌سازی الکتریکی قلمداد می‌گردد. چنین مسیرهای تعریف شده الکتریکی و شیمیایی را می‌توان با استفاده از آرایه‌های قابل آدرس‌دهی الکترونیکی (که به پتانسیل الکتریکی، دما یا تیرهای لیزری پاسخ می‌دهند) از لحاظ دینامیکی بازآرایی کرده و جهت، زمان و سرعت قطرات سیال را کنترل نمود. علاوه بر زمینه‌های پیش‌گفته، به مطالعه انتقال حباب در موئینه‌ها با استفاده از نتایج کلاسیک تئوری و جدیدترین نتایج تئوری و آزمایشگاهی در مورد جریان الکتروسینتیکی می‌پردازیم.

از جناب پروفسور چرچیل که درخواست ما را مبنی بر تهیه مقدمه برای کتاب را پذیرفتند، بسیار سپاسگزاریم. از تمامی همکاران در کشورهای مختلف که به ما اجازه استفاده از نتایج کارهای خود در کتاب قبلی و نسخه حاضر را دادند، متشکریم. هم‌چنین از خانم مادلین بروستر از دانشگاه براون به خاطر همکاری ایشان در زمینه‌های مختلف کتاب ممنونیم و از دانشجویان خود که ما را در تهیه کتاب یاری رساندند، به ویژه واسیلیوس سیمونودیس، پرادیپکومار باهوکودومبی و آلریک چاترجی بسیار سپاسگزاریم. علی بسکوک به دانشجویان خود، آی. احمد، پی. باهوکودومبی، پروفسور پی. دوتا، دکتر جی. هام، اچ. جی. کیم، اس. کومار، دکتر جی. اچ. پارک و پروفسور سی. سرت تقدیم سپاس و تشکر می‌کند. نویسنده آخر (نارایان آلورو) از تمامی دانشجویانش به ویژه چالرجی، دی، جوزف و کالر که اجازه اقتباس از نتایج کار پایان‌نامه آنها به وی داده شده، قدردانی می‌کند. هم‌چنین این نویسنده از کسب فرصت همکاری و همراهی با پروفسور کارنیاداکیس و بسکوک در انجام این کتاب اظهار خرسندی و افتخار فراوان می‌نماید. نارایان آلورو هم‌چنین از پروفسور داتون (استنفورد)، هس (*UIUC*)، کارنیاداکیس (براون)، لاو (استنفورد)، پینسکی (استنفورد)، سنتوریا (*MIT*) و وایت (*MIT*) که مشوقین و مشاورین وی در این مسیر بوده‌اند کمال تشکر و امتنان را دارد.

نویسنده نخست (*GK*) از تمامی اعضای خانواده‌اش برای حمایت آنها در طول انجام این تکاپوی علمی- پژوهشی سپاسگزار است. نویسنده دوم (*AB*) از اعضای خانواده‌اش کارولین، سارا و سینان به خاطر عشق و شکیبایی و حمایت مستمر آنها قدردانی می‌کند. به علاوه علی بسکوک کار خود را به یاد و خاطره پدر و مادر خویش گونگور و ستین بسکوک اعطا

www.ketab.ir

می‌نماید. در پایان، نارایان آلورو خود را عمیقاً مرهون تمامی اعضای خانواده خویش، به خصوص والدین صبورش سوباس و کریشنا آلورو، برادرش راوی، همسرش رادیکا و دختر مهربانش نها به خاطر پشتیبانی، عشق و دلگرمی آنها می‌داند.

جرج ام. کارنیاداکیس پروویدنس، راد آیلند، امریکا
علی بسکوک دانشگاه تگزاس، امریکا
نارایان آر. آلورو دانشگاه ایلینویز، امریکا

www.ketab.ir