۱۳۸۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

انتقال حرارت در جریان سیال فوق بحرانی

www.ketab.ir

نویسندگان:
مهدی محسنی
استادیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قم
مجید بازارگان
دانشیار دانشکدهٔ مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

شماره ۵۰۹

سرشناسه: محسنی، مهدی، ۱۳۵۸-
عنوان و نام پدیدآور: انتقال حرارت در جریان سیال فوق بحرانی/ نویسندگان مهدی محسنی، مجید بازارگان.
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، انتشارات، ۱۴۰۰.
مشخصات ظاهری: ۱۴۸ص.
فروست: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی؛ شماره ۵۰۹.
شابک: 978-622-6655-89-7
وضعیت فهرست نویسی: فیپا

موضوع: سیالات فوق بحرانی /Supercritical fluids
موضوع: گرما -- انتقال /Heat -- Transmission
شناسه افزوده: بازارگان، مجید، ۱۳۴۰-
رده‌بندی کنگره:TP۱۵۶
رده‌بندی دیویی: ۶۶۴/۰۷
شماره کتابشناسی ملی: ۸۷۶۵۴۴۱

ناشر: دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی press.kntu.ac.ir

عنوان: انتقال حرارت در جریان سیال فوق بحرانی
مؤلفان: دکتر مهدی محسنی و دکتر مجید بازارگان
نوبت چاپ: اول
تاریخ انتشار: اسفند ۱۴۰۰
شمارگان: ۲۰۰ جلد
ویرایش: ویراستار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
چاپ: سعید
صحافی: گرنامی
قیمت: ۶۷۰۰۰ تومان

تمام حقوق برای ناشر محفوظ است

خیابان میرداماد غربی- شماره ۴۷۰- انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - تلفن: ۸۸۸۸۱۰۵۲
میدان ونک - خیابان ولی‌عصر(عج) - بالاتر از چهارراه میرداماد - شماره ۲۶۲۶- مرکز پخش و فروش انتشارات
تلفن: ۸۸۷۷۲۲۷۷ رایانامه: press@kntu.ac.ir - تارنما (فروش برخط): press.kntu.ac.ir

www.ketab.ir

پیش‌گفتار

جریان سیال فوق بحرانی، هم از جنبهٔ عملی و هم از لحاظ نظری جالب توجه است. نرخ بسیار بالای انتقال جرم و حرارت در سیال فوق بحرانی، دلیل اصلی جذابیت آن در کاربردهای صنعتی است. از منظر تحلیلی نیز، تغییرات شدید خواص ترموفیزیکی در ناحیهٔ فوق بحرانی، جریان سیال را به مثالی تمام‌عیار از یک مسألهٔ خواص متغیر بدل کرده که حل معادلات و پیش‌بینی توزیع سرعت و دما را در این جریان بسیار ارزشمند می‌سازد.

با وجود گذشت ده‌ها سال از مطالعهٔ جریان سیال فوق بحرانی، پژوهش دربارهٔ این پدیدهٔ فیزیکی پیچیده همچنان ادامه دارد. در دههٔ ۱۹۵۰ میلادی برای اولین بار، افزایش چشمگیر نرخ انتقال حرارت در حالت فوق بحرانی سیال در نتایج پژوهشگران پدیدار گشت. عدم همخوانی و پراکندگی مشاهدات اولیه به حدی بود که دست‌یابی به یک توضیح فیزیکی جامع و قانع‌کننده برای افزایش فوق‌العادهٔ انتقال حرارت در سیال فوق بحرانی را ناممکن می‌ساخت. پیچیدگی موضوع وقتی بیشتر شد که برخلاف اکثر مشاهدات که افزایش شدید نرخ انتقال حرارت را گواهی می‌داد، در برخی آزمایش‌ها روند افزایش نرخ انتقال حرارت با اختلالی ناگهانی روبرو می‌شد که هیچ توجیهی برای آن وجود نداشت. تمایز بین این دو رفتار متضاد جریان سیال فوق بحرانی در دستور کار پژوهشگران قرار گرفت. بیش از دو دههٔ طول کشید تا تشخیص دقیق شرایطی که منجر به افزایش انتقال حرارت در جریان سیال فوق بحرانی می‌شود، میسر گردد. این امر می‌توانست دلیل ناسازگاری بسیاری از نتایج آزمایشگاهی را روشن سازد و برای اینکه چرا در برخی موارد افزایش شدید نرخ انتقال حرارت ثبت شده و در برخی دیگر چنین چیزی رخ نداده است توضیح قابل قبولی ارائه کند. سپس، نزدیک به دو دههٔ دیگر زمان لازم بود تا به رفع ابهام از پدیدهٔ اخلال در انتقال حرارت جریان سیال فوق بحرانی و توجیه کیفی آن منجر شود. به موازات این تلاش‌ها، افزودن دقت محاسبات کمّی انتقال حرارت در رژیم‌های مختلف جریان سیال فوق بحرانی، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. هرچند تاکنون نتایج درخور توجهی به‌دست آمده، اما ابهامات و تضادهایی هم وجود دارد که همچنان، پیش‌بینی رفتار سیال فوق بحرانی را با توجه به تغییرات وسیع متغیرهای پرشمار این جریان، دشوار می‌سازد.

کتاب حاضر، علاوه بر آنکه وضعیت کنونی دانش ما از انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان سیال فوق بحرانی و مبانی نظری آن را تبیین می‌کند، تلاش دارد به پژوهشگران در امر مدل‌سازی عددی این پدیدهٔ پیچیده مدد رساند و مهارت‌های لازم در این زمینه را توسعه بخشد. یکی از عواملی که انگیزهٔ مولفان را در پدید آوردن اثر کنونی مضاعف ساخت، عدم وجود مرجعی به زبان فارسی در این حوزه است. در منابع انگلیسی زبان نیز به کمتر کتابی برخورد می‌کنیم که به گستردگی کتاب موجود به صورت تخصصی روی جنبهٔ انتقال حرارتی جریان سیال فوق بحرانی تمرکز کرده باشد. فصل اول این کتاب، به معرفی سیال فوق بحرانی، ویژگی‌ها و کاربردهای آن در صنایع گوناگون می‌پردازد. توضیح رژیم‌های مختلف انتقال حرارت در سیال فوق بحرانی از منظر فیزیک جریان، محور اصلی مطالب فصل دوم است. در این فصل توضیح نسبتاً جامعی از عوامل مختلف که منجر به بهبود یا تضعیف انتقال حرارت در شرایط فوق بحرانی می‌شوند، ارائه شده است. در فصل سوم خواننده با

www.ketab.ir

پیشگفتار

معادلات حاکم بر مدل‌سازی جریان سیال فوق بحرانی و روش حل آنها آشنا می‌شود. یکی از موارد مهم در شبیه‌سازی عددی، انتخاب مدل توربولانس است. اهمیت این موضوع در فصل چهارم نشان داده می‌شود. همچنین برخی پارامترهای مورد نیاز برای اصلاح مدل‌های آشفته رینولدز پایین موجود معرفی می‌گردد و دستاوردهایی که از این رهگذر در فهم مسألهٔ انتقال حرارت جابه‌جایی در سیال فوق بحرانی حاصل شده و مقایسهٔ آن با داده‌های آزمایشگاهی ارائه می‌شود. فصل پنجم که فصل پایانی کتاب هم است، جنبهٔ کاربردی بیشتری برای مهندسان و پژوهشگران می‌تواند داشته باشد و در آن به مدل‌سازی عددی جریان سیال فوق بحرانی با استفاده از کدهای تجاری پرداخته شده است. به طور خاص کد فلوئنت مورد بررسی قرار خواهد گرفت و توضیحاتی در خصوص نحوهٔ استفاده از آن ثبت می‌شود.

امیدواریم این کتاب که متکی به تجربهٔ طولانی و پژوهش ممتد نویسندگان آن در موضوع انتقال حرارت جابه‌جایی به سیالات فوق بحرانی است، برای پژوهشگرانی که با پیش‌زمینهٔ مهندسی مکانیک سیالات، فیزیک حرارت، مهندسی هوافضا، مهندسی شیمی، مهندسی هسته‌ای و صنایع غذایی پیرامون انتقال حرارت در سیال فوق بحرانی فعالیت می‌نمایند، مفید واقع شود. علاوه بر استادان و دانشمندان، این کتاب برای دانشجویان سال آخر کارشناسی مهندسی و دانشجویان مقاطع تحصیلات تکمیلی که در پروژه، پایان‌نامه و رسالهٔ خود با انتقال حرارت در جریان سیال فوق بحرانی روبرو هستند، می‌تواند راهگشا باشد. نظرات ارزشمند و پیشنهادهای سازندهٔ خوانندگان محترم، بی‌گمان در بهبود کیفیت کتاب و همچنین رفع اشکال‌های احتمالی آن تأثیر شایسته خواهد داشت و پیشاپیش مورد قدردانی مؤلفان است.

www.ketab.ir

مجید بازارگان- مهدی محسنی

زمستان ۱۴۰۰

فهرست عناوین

فصل اول: سیال فوق بحرانی، ویژگی‌ها و کاربردها ۱
۱-۱ کاربردهای سیال فوق بحرانی ۲
۱-۱-۱ نیروگاه‌های حرارتی با بویلرهای فوق بحرانی ۲
۱-۱-۲ خنک‌کاری راکتور هسته‌ای با آب فوق بحرانی ۲
۱-۱-۳ مبردهای فوق بحرانی در سیستم‌های تهویه مطبوع ۴
۱-۱-۴ سیال فوق بحرانی، حلاّل ترکیبات آلی ۴
۱-۱-۵ سیال فوق بحرانی و محیط زیست ۵
۱-۱-۵ تولید نانوذرات با استفاده از سیال فوق بحرانی ۶
۱-۲ سیال فوق بحرانی چیست؟ ۷
۱-۲-۱ دمای شبه بحرانی ۸
۱-۲-۲ خواص ترمودینامیکی و انتقالی سیال فوق بحرانی ۱۰
۱-۳ انتقال حرارت جابه‌جایی در سیال فوق بحرانی ۱۲
۱-۳-۱ تفاوت با پدیدهٔ جوشش ۱۳
۱-۴ افت فشار اصطکاکی ۱۴
۱-۵ ضرورت شناخت بهتر پدیدهٔ انتقال حرارت در سیال فوق بحرانی ۱۵
۱-۶ مراجع ۱۶
فصل دوم: ویژگی‌های انتقال حرارت جابه‌جایی در سیال فوق بحرانی ۱۷
۲-۱ رژیم بهبود انتقال حرارت ۱۸
۲-۱-۱ بهره‌گیری از آنتالپی حجمی سیال برای نمایش نتایج ۱۹
۲-۱-۲ عوامل مؤثر در افزایش نرخ انتقال حرارت ۲۰
۲-۲ رژیم اخلال انتقال حرارت ۲۲
۲-۲-۱ مکانیزم‌های مانع انتقال حرارت ۲۳
۲-۲-۲ شتاب موضعی جریان ناشی از گرادیان چگالی سیال ۲۴
۲-۲-۳ نقش پررنگ نیروی شناوری ۲۴
۲-۳ شار حرارتی بحرانی ۲۵
۲-۴ اهمیت راستای جریان سیال فوق بحرانی ۲۸
۲-۴-۱ تفاوت جریان‌های عمودی و افقی ۲۸
۲-۴-۲ تأثیر جهت جریان در لوله‌های عمودی ۳۱
۲-۵ نقش تغییرات هریک از خواص ترموفیزیکی سیال ۳۳
۲-۵-۱ اثر ظرفیت گرمایی ویژه ۳۳

www.ketab.ir

۲-۵-۲ اثر ویسکوزیتهٔ آشفته بر ضریب انتقال حرارت ۳۸
۲-۵-۳ برجستگی تحولات در ناحیهٔ بافر لایه مرزی ۴۳
۲-۶ روابط نیمه تجربی برای محاسبهٔ ضریب انتقال حرارت ۴۹
۲-۷ جریان آرام ۵۱
۲-۸ مراجع ۵۴
فصل سوم: شبیه‌سازی عددی جریان سیال فوق بحرانی ۵۷
۳-۱ معادلات حاکم بر جریان ۵۸
۳-۲ اهمیت ترم‌های مختلف در معادلهٔ انرژی ۵۹
۳-۳ مدل کردن جریان آشفته ۶۱
۳-۳-۱ توابع دیواره و مدل‌های رینولدز پایین ۶۳
۳-۳-۲ تابع استهلاک ۶۶
۳-۳-۳ اثر تغییرات چگالی بر معادلهٔ k-ε ۶۸
۳-۴ عدد پرانتل آشفته ۶۹
۳-۴-۱ معرفی یک رابطه برای عدد پرانتل آشفته ۷۴
۳-۵ شرایط مرزی و روش حل عددی معادلات ۷۶
۳-۶ مراجع ۸۰
فصل چهارم: عملکرد مدل‌های توربولانس ۸۲
۴-۱ مقایسهٔ عملکرد برخی مدل‌های توربولانس ۸۳
۴-۲ استفاده از یک مدل توربولانس غیر ایزوتروپیک ۸۹
۴-۳ نمایش دو بعدی ۹۱
۴-۴ یک مدل توربولانس اصلاح شده ۹۳
۴-۵ مراجع ۱۰۱
فصل پنجم: مدل‌سازی با استفاده از نرم‌افزارهای تجاری ۱۰۲
۵-۱ مشخصات حل‌های نرم‌افزاری ۱۰۳
۵-۲ استفاده از کد تجاری فلوئنت ۱۰۷
۵-۳ مدل گاز واقعی NIST ۱۰۸
۵-۴ دو نمونه حل نرم‌افزاری ۱۰۹
۵-۵ مراجع ۱۱۳
پیوست الف: خواص ترموفیزیکی آب فوق بحرانی ۱۱۵
پیوست ب: خواص ترموفیزیکی دی‌اکسیدکربن فوق بحرانی ۱۲۷
پیوست ج: فهرست علائم ۱۳۶

www.ketab.ir