

تاریخچه‌ای از انتقال حرارت

محمود یعقوبی*، خالد کریمی* و مجید ملکی**

* دانشکده مهندسی دانشگاه شیراز ** بخش مهندسی مکانیک دانشگاه ماریلند امریکا

چکیده: یکی از زیرشاخه‌های مهندسی مکانیک و مهندسی شیمی، انتقال حرارت است. کاربرد انتقال گرما به دلیل کاربرد گسترده آن در صنایع مختلف بر مبنای پدیده‌های فیزیکی بسیار مهمی استوار شده که توسط دانشمندان و محققان از قرن شانزدهم به تدریج شناخته و ارائه شده است. دانش پایه و پدیده‌های اصلی علم انتقال حرارت در فاصله سال‌های ۱۹۳۰-۱۸۸۰ مدون شده و کاربردهای عمده آن از سال ۱۹۳۰ تاکنون گسترش یافته است و هر ساله نیز به مراتب بیشتر می‌شود. در این مقاله تلاش شده است تاریخچه مختصری از روند توسعه دانش انتقال گرما و پدیده‌های مرتبط با آن از قرن شانزدهم تا ابتدای نیمه دوم قرن بیستم گردآوری و ارائه شود. این اطلاعات عمدتاً از مرجع چهار اقتباس شده، ولی سعی شده است که از سایر منابع موجود به خصوص دانشنامه بریتانیکا نیز استفاده شود. برای هر یک از پدیده‌های شناسایی شده مرجع جدیدی اضافه شده است تا خوانندگان در صورت علاقه بتوانند پدیده مربوط را به‌طور مفصل در مرجع مربوط پیدا و مطالعه کنند. در انتها به نتایج و فعالیت‌های حاضر در زمینه انتقال حرارت اشاره شده است تا علاقه‌مندان با منابع جدید نیز آشنایی پیدا کنند.

واژه‌های کلیدی: انتقال حرارت، گرما، انرژی، قوانین انتقال گرما.

۱. مقدمه

توسعه علوم مهندسی و گسترش زمینه‌های مختلف آن چنان گسترده است که آموختن آن در هر یک از شاخه‌های مهندسی نه تنها غیرممکن است، بلکه دنبال کردن آن نیز به سادگی امکان پذیر نیست. اگر در گذشته یک دانشمند در همه زمینه‌های فلسفی، پزشکی و نجوم فاضل شناخته می‌شد، امروزه ادعای تسلط حتی در یکی از زیرشاخه‌های یکی از گروه‌های علوم مهندسی مثلاً انتقال حرارت در مهندسی مکانیک غیرممکن است. طبق بررسی‌های انجام شده در چند سال گذشته فقط زیرشاخه‌های اصلی مهندسی مکانیک شامل ۸۳ دسته است [۱] که یکی از آنها مبحث انتقال حرارت است.

سرگذشت علوم حرارتی وابسته به علم ترمودینامیک است [۲]. در ابتدا انتقال حرارت به عنوان مبحثی در فیزیک و سپس در ترمودینامیک مطرح و به تدریج به عنوان یک درس مستقل ارائه شده است. دانش پایه انتقال حرارت به صورت سیستماتیک طی سال‌های ۱۹۳۰-۱۸۸۰ میلادی بنیاد نهاده شده [۳] و کاربرد آنها در زمینه‌های مختلف به‌طور گسترده از سال ۱۹۳۰ تا کنون ادامه داشته است. گسترش زمینه‌های انتقال حرارت آنچنان زیاد شده است که به صورت دروس جداگانه در زمینه‌های جابه‌جایی، هدایت و تشعشع در دوره‌های کارشناسی ارشد و دکترا هر کدام در یک الی ۲ درس ارائه می‌شود.

در این مقاله تلاش شده است تاریخچه‌ای از شروع مطالعات در باره گرما و تدوین پدیده‌های مختلف انتقال حرارت بیان و روند تاریخی آن ارائه شود. توسعه تاریخی تئوری انتقال گرما را می‌توان در مقاله‌ها و مجله‌های تاریخ علوم، فناوری، فیزیک و ریاضی یافت. در سال‌های اخیر، تاریخچه انتقال حرارت مورد توجه بسیار واقع شده و موضوعات مختلف انتقال حرارت، خصوصاً از زمان نیوتن به بعد، مورد بررسی منصل قرار گرفته است [۴].

سرگذشت و گزارش‌های انتقال حرارت اغلب با ذکر اختراع اولین ترمومتر ناتمام هوا توسط گاليله (۱۵۹۷) شروع می‌شود. ظاهراً از گاليله به بعد تا سال ۱۷۵۰ خبری نبوده است تا اینکه در همین سال جوزف بلک^۱ روش رضایت بخشی برای اندازه‌گیری میزان گرما ارائه داد. گاليله

(۱۶۲۴)، بویل^۱ (۱۶۶۴)، هوک^۲ (۱۶۶۵) و^۳ (۱۶۹۰) در مورد اینکه تمام پدیده‌های فیزیک مانند گرما، نور، فعالیت شیمیایی، الکتریسیته و مغناطیس دارای توضیحات مکانیکی هستند، نظرهایی را ارائه داده‌اند. به استثنای توسعه ریاضی گرما بعد از ثبت تئوری فوریه در سال ۱۸۰۷، تاریخ توسعه انتقال حرارت مهندسی تقریباً به بیش از ۱۲۰ سال پیش برمی‌گردد. از نظر توسعه مکانیک، انیشتین (۱۹۳۸) به بررسی یک رفتار غیرمعمول برای بیشتر جنبه‌های اساسی فیزیک در توضیح پدیده‌های حرارتی پرداخت که این موضوع به سرعت نتیجه داد.

مسائل انتقال حرارت و قوانین حاکم بر آنها شامل جریان بخار یا بخار متراکم آب از میان لوله‌ها با صفحه‌ها تاکنون توسط پویسون^۴ در سال ۱۸۳۵، پیکلت^۵ در سال ۱۸۴۱ و تول^۶ در سال ۱۸۶۱ تا به حال مورد بررسی قرار گرفته است. از ابتدای قرن هفدهم تا اواسط قرن نوزدهم مفاهیم اساسی مانند گرما، دما، انرژی، ظرفیت گرمایی، گرمای ویژه، گرمای نهان، انرژی جنبشی و گازها تعریف شدند و قوانین اول و دوم ترمودینامیک به ثبت رسیدند. در این مقاله سعی شده است که نظریات ارائه شده در مورد توسعه انتقال حرارت از زمان نیوتن به بعد تا اواسط نیمه دوم قرن بیستم ذکر شود. برای این منظور، ابتدا به بررسی چگونگی تثبیت ماهیت گرما و مبحث اندازه‌گیری دما پرداخته شده و سپس به پیشرفت مباحث ترمودینامیکی و قوانین حاکم بر آنها اشاره شده است. در ادامه در مورد توسعه انتقال حرارت جابه‌جایی، هدایت و تشعشع بحث شده است. در خاتمه، به توضیح چگونگی پیشرفت تئوری لایه مرزی و مطرح شدن جریانات متلاطم و روش‌های حل آنها پرداخته شده است. خلاصه‌ای از مطالب نیز در نتیجه‌گیری نهایی آمده است.

۲. ماهیت گرما

تشخیص ماهیت واقعی گرما و سپس اندازه‌گیری آن نقش مهمی در توسعه انتقال حرارت در قرن نوزدهم داشت [۵]. ظاهراً بعد از کار گاليله در زمینه گرما و اختراع ترمومتر هوا، کار مهمی در زمینه انتقال حرارت انجام نگرفته است تا اینکه جوزف بلک (۱۷۹۹-۱۷۲۸) چهار تمایز بین گرما و

۱. Boyle

۲. Hook

۳. Huygnes

۴. Poisson

۵. Pecllet

۶. Toule

دما را ارائه کرد و نشان داد که ماده دارای مشخصه "ظرفیت گرما" است که بعدها این تعریف به عبارت "گرمای ویژه" تغییر یافت. همچنین، بلک نشان داد که مقادیر مشخصه گرما در طول تغییر حالت فیزیکی مانند ذوب و تبخیر ناپذیرند و در طول تغییرات معکوس مانند انجماد و چگالش نمایان می‌شود. کشف گرمای نهان بعدها توسط جیمز وات^۱ (۱۸۱۹-۱۷۳۶) در طراحی کندانسور جداساز برای موتور بخار به کار گرفته شد. این اصل در بسیاری از پیشرفت‌های بعدی نقش اساسی داشت. علاوه بر آن، بلک مدهای انتقال حرارت، تشعشع، جابه‌جایی و هدایت را از هم جدا کرد. توضیحات بیشتر در این خصوص در مرجع [۲] آمده است.

بلک در جداسازی مفهوم گرما و دما نقش بزرگی داشت. مفهوم گرما هرچند به صورت یک اصل در آمده بود، ولی هنوز به عنوان یک سیال الاستیک، قابل اندازه‌گیری، غیرقابل تولید و فناپذیر مورد توجه قرار می‌گرفت. این مفهوم را لاوازیه^۲ (۱۷۹۴-۱۷۴۳) کالری^۳ نامید. از نظر مولکولی، دانیل برنولی^۴ (۱۷۸۲-۱۷۰۰) جزو اولین کسانی بود که سعی کرد انرژی گرمایی را در ترم‌های حرکت مولکولی ارائه دهد و در سال ۱۷۳۸، قانون بویل را با این فرض که در دمای ثابت، سرعت متوسط ذرات در گاز ثابت می‌ماند، توضیح داد.

روبرت بویل^۵ (۱۶۹۱-۱۶۲۷) آزمایش‌های مختلفی را با استفاده از پمپ هوا انجام داد و به این واقعیت پی برد که آب گرم در فشار پایین می‌جوشد. بنابراین، با قانون بویل می‌توان توضیح خیلی مناسبی از مفهوم گرما در حالت افزایش حرکت ذره‌های کوچک گاز ارائه داد. تئوری جنبشی گازها تا سال ۱۸۵۰ هیچ‌گونه پیشرفتی نداشت. در سال ۱۸۵۹، ماکسول^۶ (۱۸۷۹-۱۸۳۱) مفهوم برنولی را روشن ساخت و قانون توزیع سرعت‌ها را به دست آورد و برای سرعت گازها با استفاده از مفهوم فاصله آزاد میانگین توضیحاتی داد. در سال ۱۷۸۹، بنجامین تامسون^۷ (۱۸۱۴-۱۷۳۵) تحقیقات خود را در زمینه منبع گرما که با اصطکاک تحریک می‌شود، ارائه داد. او نشان داد که گرما نمی‌تواند جزء ماده باشد و باید نوعی حرکت باشد. آزمایش‌های او با تولید

۱. James Watt

۲. Lavoisier

۳. Calorique

۴. Danile Bernoulli

۵. Robert Boyle

۶. Maxwel

۷. Benjamin Thempson

اصطکاک توپ نشان داد که می توان گرمای پایان ناپذیری را تولید کرد. ژول^۱ (۱۸۸۹-۱۸۱۸) در سال ۱۸۴۰ کارهای آزمایشگاهی بزرگی انجام داد. او در مقاله مشهور خود در سال ۱۸۴۳ که اثرهای گرم کننده مغناطیسی - الکتریسته را توضیح می داد، به طور واضح رابطه میان کار و گرما و معادل مکانیک گرما را نیز ارائه داد. این معادل به عنوان "معادل ژول" شناخته شد. کار ژول در تولید گرما به وسیله جریان الکتریسته به عنوان قانون ژول (قانون الکتریکی) شناخته شده است. ضریب $(\frac{mkg}{cal})$ ۴۲۵ که به دست آمد، برای معادل کار مکانیکی به گرما تا مدت ها بهترین و دقیق ترین مقدار به دست آمده بود. بعد از تعیین و اثبات رابطه کار مکانیک و گرما توسط ژول، گرما مکرراً به صورت شکلی از انرژی معرفی شد. کار ژول موقعیتی آزمایشگاهی محکم و ثابتی را برای پیوستگی انرژی فراهم کرد. در سال ۱۸۴۲ نیز مایر^۲ (۱۸۷۸-۱۸۱۴) معادله گرما و کار را اثبات کرد. کار او ابتدا ناچیز شمرده شد، ولی بیست سال بعد اهمیت کار او در انگلیس آشکار شد.

۳. اندازه گیری دما

اختراع اولین ترمومتر به گالیله نسبت داده می شود. در سال ۱۷۰۱، نیوتن (۱۷۲۷-۱۶۲۴) مقاله ای در باره گرما منتشر کرد داد که مرجعی برای قانون سرمایش نیوتن شد [۴]. نیوتن از یک ترمومتر روغنی با مقیاس معقول استفاده کرد. در این ترمومتر، دمای انجماد آب صفر و دمای بدن انسان ۱۲ در نظر گرفته شده بود. نیوتن فرض کرد که برای فواصل کوچک دمایی، نرخ سرد شدن جسم داغ با اختلاف دما میان جسم و محیط اطراف آن متناسب است. این مفهوم، مهم ترین تعریف ضریب انتقال حرارت بود. تا اوایل قرن هجدهم حدود ۳۵ مقیاس مختلف دمایی اختراع شد. فیزیکدان آلمانی، فارنهایت^۳ (۱۷۳۶-۱۶۸۶)، ترمومتر الکلی را در سال ۱۷۰۹ و ترمومتر جیوه ای را در سال ۱۷۱۴ اختراع و مقیاس دمایی فارنهایت را ایجاد کرد. این مقیاس هنوز هم در آمریکا به صورت معمول استفاده می شود. اساس این مقیاس روی ۳۲ برای نقطه انجماد آب و ۲۱۲ برای نقطه جوش است که فاصله بین آن دو به ۱۸۰ قسمت مساوی تقسیم شده است.

اولین مقیاس سانتیگراد را منجم سوئدی، سلسیوس^۴ (۱۷۴۴-۱۷۰۱)، در سال ۱۷۴۲ کشف

۱. Joule

۲. Moyrer

۳. Fahrenheit

۴. Celsius

کرد. این مقیاس به افتخار او در سال ۱۹۴۸ به سلسیوس تغییر اسم یافت. در سال ۱۸۴۸، فیزیکدان انگلیسی، ویلیام تامسون^۱، (بعد از کلوین) سیستمی را پیشنهاد کرد که از درجه سلسیوس ولی با راه حل صفر مطلق $273/15C$ - استفاده می‌کرد که واحد این مقیاس به عنوان کلوین شناخته شد. هر درجه کلوین برابر^۱ $(273/16)$ نقطه سه گانه (تعادل در سه فاز گاز، مایع و جامد) آب خالص تعریف شده است [۶]. صفر مطلق دمایی است که مولکول‌های یک ماده کمترین مقدار انرژی را دارند. چون در مقیاس کلوین و مقیاس سلسیوس اختلاف دمایی نقاط ذوب و جوش آب ۱۰۰ درجه است، بنابراین یک درجه کلوین برابر با یک درجه سلسیوس می‌باشد. در همان سال‌ها، مقیاس دیگری با راه حل صفر مطلق $459/67F$ - توسط رانکین^۲ ارائه و مقیاس دمایی رانکین نامیده شد.

۴. مفاهیم ترمودینامیک

با شناخت ماهیت واقعی گرما، دانشمندان مسیر مشخصی را در علم انتقال حرارت پیدا کردند [۴]. سده‌ی کارنوت^۳ (۱۷۶۱-۱۸۳۱) که خود نیز در ابقای پیوستگی انرژی نقش مهمی داشت، در سال ۱۸۲۴ نشان داد که گرما و کار شرایط برگشت پذیر دارند [۶] و نیز بازده موتور برگشت پذیر به دمایی منبع گرمایی بستگی دارد. کار کارنو در مدت زندگی‌اش کمتر مورد توجه قرار گرفت. در سال‌های ۱۸۳۰-۱۸۵۰ که پیوستگی انرژی مورد بحث دانشمندان بود، وات موتور بخار را توسعه داد و نیاز به روشی برای مقایسه موتورها به تعیین عملکرد یک موتور به عنوان نسبت کار خروجی به مصرف سوخت انجامید. در سال ۱۸۴۸، هلمولتز^۴ (۱۸۲۱-۱۸۹۴) اساس پیوستگی جرم را به صورت عمومی در مقاله‌اش توضیح داد. وی در مقاله‌اش اشاره کرده است که اولین موتور بخار در سال ۱۶۸۷ توسط پاپین^۵ (۱۶۵۰-۱۷۱۵) طراحی شد و در همان زمان پمپ‌های آبی برای کار در معادن زغال سنگ توسط ساوری^۶ (۱۶۵۰-۱۷۱۵) و نیوکومن^۷ (۱۶۶۳-۱۷۲۹) ساخته شد.

۱. William Thompson

۲. Rankine

۳. Sadi Carnot

۴. Helmholtz

۵. Papin

۶. Savery

۷. New Comen

ژول نیز با همکاری لرد کلونین اولین شرح کامل و واضح مفهوم انرژی را در سال ۱۸۷۴ ارائه داد.

دستاورد کارنو توسط کولیوس^۱ و لرد کلونین گسترش یافت. آن دو، بیانیه کلاسیک قانون دوم ترمودینامیک را به ترتیب در سال‌های ۱۸۵۰ و ۱۸۵۱ انتشار دادند. با کارهای این دو دانشمند تا سال ۱۸۶۵ پایه ترمودینامیک کلاسیک به طور ثابت و محکم در دو قانون اول و دوم ترمودینامیک فرمولبندی شد. همچنین، لرد کلونین از قانون دوم ترمودینامیک، دمای صفر مطلق را به دست آورد. هلمولت در سال ۱۸۲۲، مفهوم "انرژی آزاد" [۵] را معرفی کرد. سلیوس نیز مفهوم انتروپی را در سال ۱۸۶۵ معرفی کرد.

در سال ۱۸۷۰، بولتزمن^۲ (۱۸۴۴-۱۹۰۶) مجموعه‌ای از مقالات در باره قانون دوم ترمودینامیک را منتشر کرد و این مقالات مربوط به مبادله انرژی می‌شدند که از قوانین مکانیکی و تئوری احتمالات [۷] در مورد حرکت اتم‌ها در آنها استفاده شده بود. او نشان داد که قانون دوم ضرورتاً آماری می‌باشد و چون تعادل پایدارترین حالت یک سیستم است، پس در نهایت به حالت تعادل ترمودینامیکی می‌رسند. همچنین، بولتزمن کار ماکسول در تئوری جنبشی گازها را در سال ۱۸۷۷ گسترش داد و انتروپی را در ترم‌های احتمال، تعریفی دوباره کرد. وی قانون عمومی توزیع انرژی [۸] در میان قسمت‌های مجزای یک سیستم را در یک دمای مخصوص کشف کرد که این قانون به قانون ماکسول - بولتزمن مشهور شد. این قانون بیان می‌کند که مقدار میانگین انرژی که حرکت یک اتم در جهات مختلف دارد، یکسان است. او یک معادله برای تغییر توزیع انرژی در میان اتم‌های مجموعه‌های اتمی به دست آورد که پایه مکانیک آماری را تشکیل داد. بزرگ‌ترین موفقیت بولتزمن در توسعه مکانیک آماری بود. او نشان داد که چگونه خواص اتم‌ها (همانند جرم، وزن و ساختار) و خواص قابلیت ماده (مانند ولزجت (گرانروی))، ضریب هدایت و ضریب پخش را تعیین می‌کنند. در سال ۱۹۰۰، ماکس پلانک^۳ (۱۸۵۸-۱۹۴۷) مفهوم کوانتوم انرژی [۷] را ارائه داد و بررسی در مورد ترمودینامیک توسط باس^۴، انشتین^۵، فرمی^۶ و

۱. Colius

۲. Boltzmann

۳. Max Planck

۴. Bose

۵. Enestein

۶. Fermi

دیراک^۱ شروع شد.

اونس^۲ (۱۸۵۳-۱۹۲۶)، برنده جایزه نوبل در فیزیک در سال ۱۹۱۳، تابع ترمودینامیکی انتالپی را معرفی کرد که گیبس^۳ (۱۸۳۹-۱۹۰۳) مؤسس ترمودینامیک شیمیایی، با استفاده از تعریف انتالپی آزاد، تابع گیبس را تعریف کرد. در ضمن، پدیده‌های "فوق هدایتی" نزدیکی دمای صفر مطلق توسط اونس کشف شد. در سال ۱۹۰۶، نرنست^۴ (۱۸۶۴-۱۹۴۱)، برنده جایزه نوبل در شیمی، تئوری در گرما را ارائه داد که در حال حاضر به قانون سوم ترمودینامیک مشهور است. با توجه به مطالب مذکور کاملاً واضح است که پایه‌های مؤثر ساختار فیزیک کلاسیک انتقال حرارت و ترمودینامیک در طول نیمه دوم قرن نوزدهم بنا شد.

۵. انتقال حرارت

اظهارات اولیه در مورد قانون انتقال حرارت در جامدات توسط نیوتن در سال ۱۶۹۰ انجام گرفته است، ولی بیشتر کارهای ریاضی در انتقال حرارت توسط ریاضیدان فرانسوی، فوریه، (۱۷۶۸-۱۸۲۰) انتشار یافته است [۴]. فوریه در سال ۱۸۰۷ مقاله‌ای منتشر کرد که یک توصیف دقیق ریاضی از نرخ هدایت گرما به صورت زیر در آن ارائه شده بود:

$$C \frac{d\theta}{dt} = k \left(\frac{d^2\theta}{dx^2} + \frac{d^2\theta}{dy^2} + \frac{d^2\theta}{dz^2} \right) - C \left(\frac{d}{dx} (u\theta) + \frac{d}{dy} (v\theta) + \frac{d}{dz} (w\theta) \right)$$

در این عبارت، k ضریب رسانایی گرما، C گرمای ویژه و u ، v و w مؤلفه‌های سرعت هستند. این برای اولین بار بود که از اصول ریاضی در مطالعه انتقال گرما استفاده شده بود. کار فوریه به عنوان مدلی برای آنالیز گرما و الکتریسیته مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این واقعیت که در آن زمان هنوز مفهوم واقعی گرما یک مجهول بود، کارهای فوریه که معادلات اساسی هدایت گرما بودند، نشان از نبوغ بالای او داشت. فوریه به طور واضح، سه خاصیت مربوط به گرما و ظرفیت گرمایی، هدایت گرمایی در داخل جرم و مبادله حرارت در طول جسم را مشخص کرد. در قرن

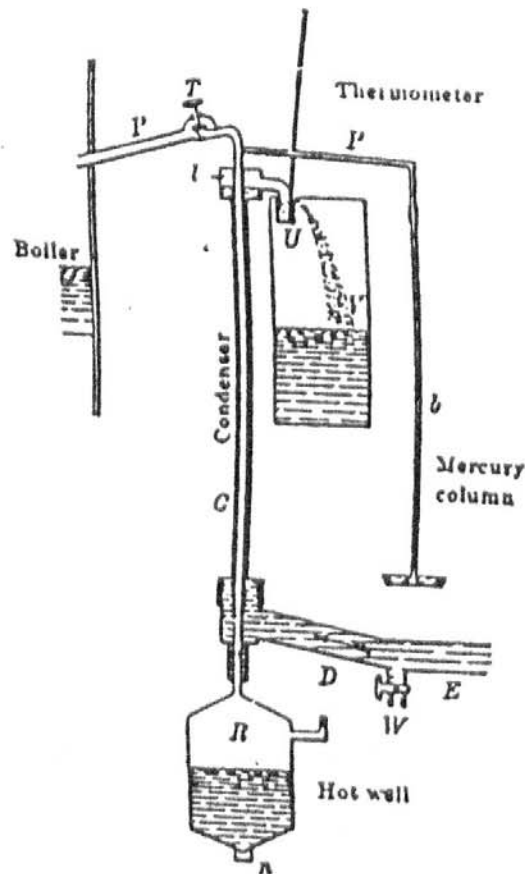
۱. Dirac

۲. Onnes

۳. Gibbs

۴. Nernst

نوزدهم، آنالیز فوریه در مکانیک نور، الکتریسیته و صدا به کار برده شد و کار او مقدمه‌ای برای کار کلوین و ماکسول شد. کارهای فوریه توسط لامبرت^۱، برت^۲ و لاپلاس^۳ بعداً توسعه و ادامه یافت. بعد از ارائه رفتار ریاضی گرما توسط فوریه، ژول با آزمایش‌های خود این واقعیت را آشکار ساخت که تمام پدیده‌های طبیعی گرما یا آنالیز ریاضی قابل بیان نیستند. وقتی که ژول کار آزمایشگاهی خود را شروع کرد، مطالعه ماهیت گرما در موقعیتی بود که توسط رامفورد^۴ انجام شده بود. کار ژول با وسایل آزمایشگاهی و کار آنالیزی فوریه، اساس مطالعه انتقال حرارت هستند. آزمایش‌های ژول در تراکم سطح بخار در داخل یک لوله عمودی یک اینچی (شکل ۱)، مطالعه‌ای مهم بعد از قانون سرمایه‌ی نیوتن در سال ۱۷۰۱ و تئوری ریاضی فوریه در هدایت گرما در سال ۱۸۲۱ به شمار می‌رود.



شکل ۱ دستگاه لوله تقطیر ژول (۱۸۶۱)

۱. Lambert

۲. Brot

۳. Laplace

۴. Rumford

بایوت^۱، فیزیکدان فرانسوی (۱۸۶۲-۱۷۷۴)، جریان گرمای تعریف شده توسط فوریه را در سال ۱۸۱۶ اندازه‌گیری کرد. ضریب هدایت گرمایی آب برای اولین بار در سال ۱۸۳۹ تعیین شد. ضریب هدایت گازها تا سال ۱۸۶۰ اندازه‌گیری نشده بود. پواسون^۲ (۱۸۴۰-۱۷۸۱) تعدادی از مسائل هدایت گرمایی را حل کرد و کار او در سال ۱۸۳۵ منتشر شد.

لرد کلوین تامسون در یک مجموعه از آزمایش‌ها از سال ۱۸۵۲ تا ۱۸۵۶ با ژول همکاری کرد. تامسون اشاره می‌کند که معادلات فوریه برای حرکت گرما از میان یک جسم می‌تواند برای حل مسائل در جاذبه‌های الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد. تامسون به طور واضح اهمیت آنالیز بر مبنای تئوری (ریاضی فوریه) و مشاهدات تجربی (کار ژول) را به عنوان ابزارهای دقیق نشان داد. عقیده تامسون این بود که تمام پدیده‌هایی که نیرو ایجاد می‌کنند مانند الکتریسیته، مغناطیس و گرما، نتیجه حرکت نامرئی مواد هستند. اصرار وی بر این عقیده، در نهایت او را در جهت مخالف با مسیر اصلی علم قرار داد. موقعیت تامسون به عنوان یک ترکیب‌کننده تئوری‌ها در مورد انرژی، او را در فیزیک قرن نوزدهم در موقعیت یکسان با اسحاق نیوتن در فیزیک قرن هفدهم یا آلبرت انیشتین در فیزیک قرن بیستم قرار داد.

مهم‌ترین مرحله مسائل توجه به نقطه انتقال تغییر ماده از یک فاز به فاز دیگر با تولید و جذب گرماست که در این رابطه مسئله تغییر شکل یخ مسئله استفان^۳ [۹]، که توسط فیزیکدان اتریشی، جوزف استفان^۴ (۱۸۹۳-۱۸۳۵)، گفته شده بود، در سال ۱۸۹۱ توسط فرانز نیومن^۵ حل شد.

در سال ۱۸۰۱، هورشل^۶ (۱۸۲۲-۱۷۳۸) وجود اثر گرمایی مادون قرمز را کشف و آن را با "تشعشع گرم‌کننده" ذکر کرد. در سال ۱۸۰۳، پیکتت دسوسار^۷ نشان داد که اشعه‌های مادون قرمز همانند نور مرئی تجزیه می‌شوند. بعد از این کشف، مطالعه تشعشع گرمایی به مطالعه کلی خواص گرمایی تشعشع مبدل شد.

گوستار رابرت کیرشهف^۸، فیزیکدان آلمانی (۱۸۸۷-۱۸۲۴)، همراه با شیمیدان، رابرت

۱. Biot

۳. Stefan

۵. Franz Neumann

۷. Pictet de Soussare

۲. Poisson

۴. Josef Stefan

۶. Herschel

۸. Gustar Robert Kirchhoff

بانسن^۱، تئوری آنالیز طیف رنگ‌های مرئی را بنا نهادند که تکنیکی برای آنالیز شیمیایی به وسیله آنالیز نور انتشار یافته توسط یک ماده داغ به‌شمار می‌رود. همچنین، وی از این تئوری برای تعیین ترکیب نور استفاده کرد. او در سال ۱۸۵۹، قانون انتشار خود؛ یعنی توان صدور و قابلیت جذب را ارائه داد.

استفان اتریشی در سال ۱۸۷۹، رابطه میان انرژی تشعشع و جسم سیاه و توان چهارم دمای آن را به‌دست آورد که به قانون استفان - بولتزمن مشهور است. لودویگ بولتزمن اساس ریاضی قانون تشعشع [۱۰] را در سال ۱۸۸۴ بنا نهاد. البته، این همان مطالعه تشعشع بود که ماکس پلانک در زمینه کوانتوم به آن رسیده بود. پلانک فرمول مشهور خود را برای چگالی تشعشع به عنوان تابعی از فرکانس و دما به‌دست آورد که می‌توانست ثابت بولتزمن و کوانتوم فعال خود را به‌دست آورد. بر اساس تشابه ظاهری با تئوری الاستیسیته و ایده‌های کاملاً فرضی مولکولی با نیروهای دافعه، ناویر^۲ (۱۸۳۶-۱۷۸۵) موفق شد معادلات دیفرانسیلی حرکت سیالات لزج (گرانرو) را در سال ۱۸۲۷ به‌دست آورد. علاوه بر ناویر، الحاق ترم‌های اصطکاک داخلی با درجه‌های مختلف دقت را کاجی^۳ در سال ۱۸۲۸، پواسون در سال ۱۸۲۹ و ساینٹ - ونانت^۴ در سال ۱۸۴۳ انجام دادند. از طرف دیگر، استوکس^۵ (۱۹۰۳-۱۸۱۹) نیز معادلات اساسی را با تأثیر اصطکاک داخلی بر اساس مکانیک محیط‌های پیوسته به‌دست آورد و در مقاله‌ای در سال ۱۸۴۵ انتشار داد. پواسون در سال ۱۸۳۱، قبل از استوکس به این معادلات نزدیک شده بود. بیان مدرن معادلات ناویر - استوکس [۱۱] بر اساس دستاوردهای استوکس بود. طی سال‌های گذشته ۷۰ حل دقیق از معادلات ناویر - استوکس شناخته شده است [۴]. در مورد معادله انرژی، Drew (۱۹۳۱) اشاره می‌کند که فوریه در سال ۱۸۲۲، معادله هدایت عمومی را داخل محیط متحرک به‌دست آورد که آن را معادله دیفرانسیل فوریه - پواسون گویند. همچنین، وی اشاره می‌کند که شواهد گویای این هستند که فوریه معادله انرژی را به‌دست آورده است، ولی انتشار آن پس از مرگ وی در سال ۱۸۳۰ انجام گرفته است.

۱. Robert Bunsen

۲. Navier

۳. Cauchy

۴. Saint-Venant

۵. Stokes

اوبربک^۱ (۱۸۷۹) در معادلات عمومی بحث کرد و راه‌حل‌هایی برای بعضی از حالات خاص به‌دست آورد. وی حل تحلیلی تقریبی جابه‌جایی مایع میان دو پوسته کروی هم‌مرکز را به‌دست آورد که در دماهای ثابت متفاوت بودند. اولین آنالیز مناسب در شناوری در طول سطح عمودی هم‌دما را لورنز^۲ (۱۸۸۱) انجام داد. نتایج لورنز اهمیت زیادی داشت و کار او مقدمه‌ای برای آنالیز لایه مرزی توسط اشمیت^۳ (۱۹۳۰) در نیم قرن بعد شد.

گراتز^۴ (۱۸۸۵) یک حل تحلیلی با استفاده از سری‌های بینهایت تئوری Sturmliouville برای ناحیه ورودی در مسائل انتقال حرارت آرام با دمای دیواره ثابت و جریان توسعه یافته آرام در ناحیه ورودی لوله را ارائه داد. کار گراتز اولین حل تحلیلی در مسائل انتقال حرارت علمی شامل سرمایش و گرمایش جریان سیال در لوله بود. این مسئله که به مسئله گراتز مشهور شد [۸]، از اهمیت زیادی برخوردار است و نقطه شروع در اندازه‌گیری ضریب هدایت گرمایی سیالات شد و شروع کار پروندپ^۵ نیز در سال ۱۹۰۴ برای مفهوم لایه مرزی از همین نقطه بود. همچنین گراتز، یک معادله ریاضی برای هدایت گرمایی سیال جاری در داخل لوله استوانه‌ای (جریان قالبی Plug Flow) را یافت و حلی بر اساس ترم‌های توابع بسل^۶ به‌دست آورد. مقاله کلاسیک گراتز در زمینه مسائل ناحیه ورودی گرمایی (مسئله گراتز) که در سال ۱۸۸۳ و ۱۸۸۵ ارائه شد، مقدمه کار Nusselt در ۲۵ سال بعد شد.

استانتون^۷ (۱۸۷۹) نیز به صورت آزمایشی اثر سرعت جریان بر انتقال حرارت در جریان آب در لوله‌ها را مورد مطالعه قرار داد. رینولدز^۸ (۱۸۴۲-۱۹۱۲) نیز کارهای زیادی را شامل تقسیم جریانات (جریان‌های آرام و متلاطم) با اعداد رینولدز، به‌دست آوردن معادلات دیفرانسیلی اساسی جریان متلاطم بر اساس میانگین زمانی تلاطم، شرح انتقال حرارت متلاطم (تشابه رینولدز، ۱۸۷۴)، اثر هوا در تراکم بخار (۱۸۷۳) و غیره انجام داد. دستگاه آزمایش جریان رینولدز در

۱. Oberbeck

۲. Lorenz

۳. Shemidt

۴. Greatz

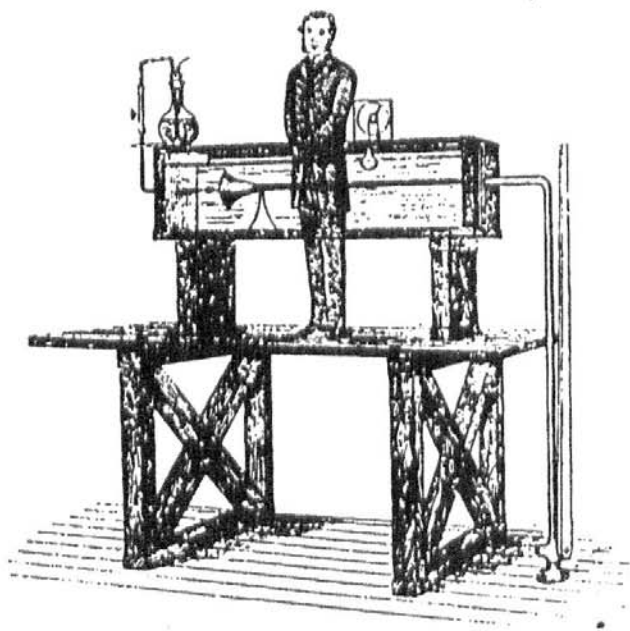
۵. Prondtp

۶. Function Bessel

۷. Stanton

۸. Reynolds

شکل (۲) نشان داده شده است. داوول و جکسون^۱ کارهای او را در ۱۹۷۰ مورد تجدید نظر قرار دادند. گنتنی است که در نیمه دوم قرن نوزدهم مطالعه روش‌های ریاضی فیزیک به اوج خود رسید و مشاهدات آزمایشگاهی مهمی انجام شد و مقاله‌های مهمی در انتقال حرارت جابه‌جایی منتشر شد.



شکل ۲ دستگاه آزمایش رینولدز برای مشاهده حرکت سیال

Boussinesq [۱۹] که به دلیل تقریبات Boussinesq مشهور است، برای اولین بار در سال ۱۹۰۱، به طور کامل سرد شدن جسم داغ توسط جریان آرام سیال را مورد بررسی قرار داد. او تعدادی از مسائل حالت خاص شامل نوارها و استوانه‌ها را حل کرد. راسل^۲ (۱۹۱۰) نیز حل تحلیلی تعدادی مسئله حالت خاص جابه‌جایی اجباری را ارائه داد. پیشرفت‌های بیشتر در حل معادلات ناویر-توکس توسط اشمیت، بکمن^۳ و پلوسن^۴ در سال ۱۹۳۰ حاصل شد، هنگامی که آنها از تئوری لایه مرزی مسائل جریان آزاد، که توسط پراندل^۵ در سال ۱۹۰۴ ارائه شده بود، استفاده کردند.

۱. Dowell & Jackson

۲. Russel

۳. Beckmann

۴. Pohlhausen

۵. Prandtl

در سال ۱۹۳۵، دریدن^۱ مروری بر جنبه‌های اساسی آیرودینامیک سرمایه‌های بحرانی (انتقال حرارت جابه‌جایی) را ارائه داد. او اشاره می‌کند که هیچ‌کدام از جنبه‌های تحلیلی یا آزمایشی آنقدر توسعه نیافته‌اند که بتوان با فرضیات اساسی کم، یک حل منطقی ارائه داد و با حل‌های ساده ریاضی در مسائل داده شده پیشرفتی ایجاد کرد. مسئله گراتز و آثار گوناگون آن توسط محققان زیادی مورد بررسی قرار گرفت، ولی حالت شرایط مرزی دیواره شار ثابت را فقط سیگل^۲، اسپارو^۳ و هالمن^۴، آن‌هم در سال ۱۹۵۸ مورد بحث قرار دادند. در اواسط قرن بیستم، مقالات مربوط به انتقال حرارت که در سال‌های قبل نوشته شده بود، مورد تجدید نظر قرار گرفت و بسیاری از پدیده‌های انتقال حرارت به‌طور مشخص تعریف شد و معادلات مهم توسعه یافت. در همین مدت، کاربردهای تئوری لایه مرزی در مسائل انتقال حرارت جابه‌جایی در جریان‌های آرام و متلاطم گسترش یافت و مقالات زیادی در زمینه انتقال حرارت منتشر شد. در سال ۱۹۵۰، پیشرفت‌های چشمگیری در انتقال حرارت دوفازی (جوش و چگالش) انجام گرفت و حل‌های عددی با استفاده از کامپیوتر شروع شد.

۶. تشابه دینامیکی و جریان متلاطم

مفهوم تشابه دینامیکی را ابتدا نیوتن بیان کرده است. فوریه ابتدا مفهوم هندسی ابعاد با کمیت‌های فیزیک در هدایت گرمای گذرا را به کار برد که به عنوان پایه گذار آنالیز ابعادی [۸] شناخته می‌شود. این ایده که توسط فوریه تنظیم شد، در اواخر قرن نوزدهم با موفقیت بزرگی توسط رینولدز (۱۸۸۴)، لوگ^۵ (۱۸۸۱)، فیتزجرالد^۶ (۱۸۸۹)، روکر^۷ (۱۸۸۹)، جینز^۸ (۱۹۵۰)، لرد ریلیگ^۹ (۱۹۱۵ و ۱۹۹۴) و بسیاری دیگر به کار برده شد [۴].

مفهوم تشابه میان مسائل فیزیک مختلف بر اساس معادلات دیفرانسیل جزئی و شرایط مرزی

۱. Dryden

۲. Siegel

۳. Sparrow

۴. Hallman

۵. Lodge

۶. Fitzgerald

۷. Rucker

۸. Jeans

۹. Lord Rayleigh

مربوط قبلاً به طور وسیعی توسط لرد کلونین (۱۸۲۴) مورد استفاده قرار گرفته بود. Nusselt (۱۹۱۰) مقاله‌ای با عنوان "انتقال در لوله‌ها" را منتشر کرد که از تئوری تشابه نسبت به میدان انتقال حرارت استفاده کرده بود و نتایج آن نسبت به کارهای آزمایشگاهی از دقت کافی برخوردار بود. تا آن هنگام، تئوری تشابه فقط در هیدرولیک استفاده می‌شد. بعدها وی تئوری خود را برای انواع دیگر مباحث انتقال حرارت مثل سرد شدن لوله‌های افقی در هوای آرام به کار برد. همچنین، وی در سال ۱۹۱۵ پارامترهای فیزیکی بدون بعد را برای مسائل جابه‌جایی آزاد و اجباری در مقاله‌ای با عنوان "قانون اساسی انتقال حرارت" مشخص کرد [۴]. جالب است بدانیم که در سال ۱۹۳۰، بدگر^۱ و مونارد^۲ تئوری نوسلت^۳ در مورد تراکم بخار را در آمریکا معرفی کردند که خیلی مورد توجه قرار گرفت. کار نوسلت بعد از سال ۱۹۲۳، تحت تأثیر کارهای آزمایشگاهی پدیده‌های تراکم قرار گرفت.

در سال ۱۹۰۰، بنارد^۴ مشاهدات آزمایشگاهی خود را در زمینه لایه افقی سیال به عنوان سلول‌های بنارد [۸] انجام داد (شکل ۳). کارهای او به دلیل شروع مجموعه‌ای از کارهای آزمایشگاهی و تحلیلی در زمینه مسائل ناپایدار هیدرودینامیکی که از نیروهای حجمی مختلف مانند شناوری، نیروهای گریز از مرکز و کریولیس^۵ ناشی می‌شود، تأثیر خیلی زیادی داشت. رابلیگ (۱۹۱۵) قابلیت‌های به کارگیری اساس تشابه در مسائل جابه‌جایی را نشان داد. از جمله افراد دیگری که در زمینه گروه‌های بدون بعد تحقیق کرده‌اند، می‌توان آلوس^۶ (۱۹۶۳) و بوچر^۷ (۱۹۵۹) از انگلستان، هانمان^۸ (۱۹۵۹) از آلمان و الپرین^۹ از روسیه را نام برد. پوتلز^{۱۰} اسامی ۲۱۰ گروه بدون بعد را در کتاب خود در سال ۱۹۶۷ ذکر کرده است [۴]. در سال ۱۹۵۵، مارکو^{۱۱} و هان^{۱۲} حل دقیق مسائل جابه‌جایی آزاد آرام برای کانال‌های چهارگوش را توسط تشابه

۱. Badger

۲. Monard

۳. Nusselt

۴. Benard

۵. Coriolis

۶. Alves

۷. Boucher

۸. Hahnemann

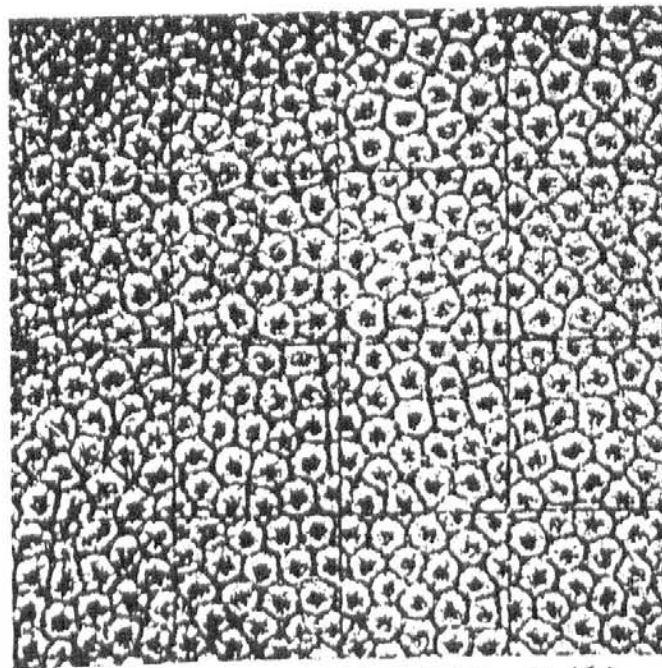
۹. Elperin

۱۰. Potlez

۱۱. Marco

۱۲. Han

ریاضی با مسائلی در تئوری صفحه نازک به دست آوردند. ظاهراً هیچ مطالعه منظمی در پدیده‌های متلاطم قبل از کار رینولدز در سال ۱۸۷۴ که تشابه نزدیک میان انتقال ممتوم و حرارت در جریان متلاطم را نشان داد، انجام نشده است. در همان سال‌ها، رینولدز اساس تئوری ریاضی برای جریان متلاطم توسعه یافته را با استفاده از نشان دادن تنش‌های برشی در ترم‌های نوسانات سرعت^۱ به دست آورد. او همچنین، مشاهدات تحلیلی در تعیین مقیاسی در معیار تلاطم را انجام داد. کارهای رینولدز به واسطه مقایسه کامل تئوری با آزمایش در دینامیک سیالات، به طور واضح از کارهای دیگر مهندسان در زمینه فیزیک مشخص است.



شکل ۳ سلول‌های بنارد بین دو صفحه موازی

پراندل^۲ (۱۹۲۵) نظریه طول مختلط [۸] را که یک محرک مهم برای آنالیز لایه مرزی متلاطم در سال‌های بعدی بود، گسترش داد (شکل ۴). تشابه رینولدز میان انتقال حرارت و ممتوم متلاطم، بارها به وسیله پراندل^۳ (۱۹۱۰)، تیلور^۴ (۱۹۱۴)، ون کارمان^۵ (۱۹۳۹) و دیگران

۱. Fluntuation

۲. Prandtl

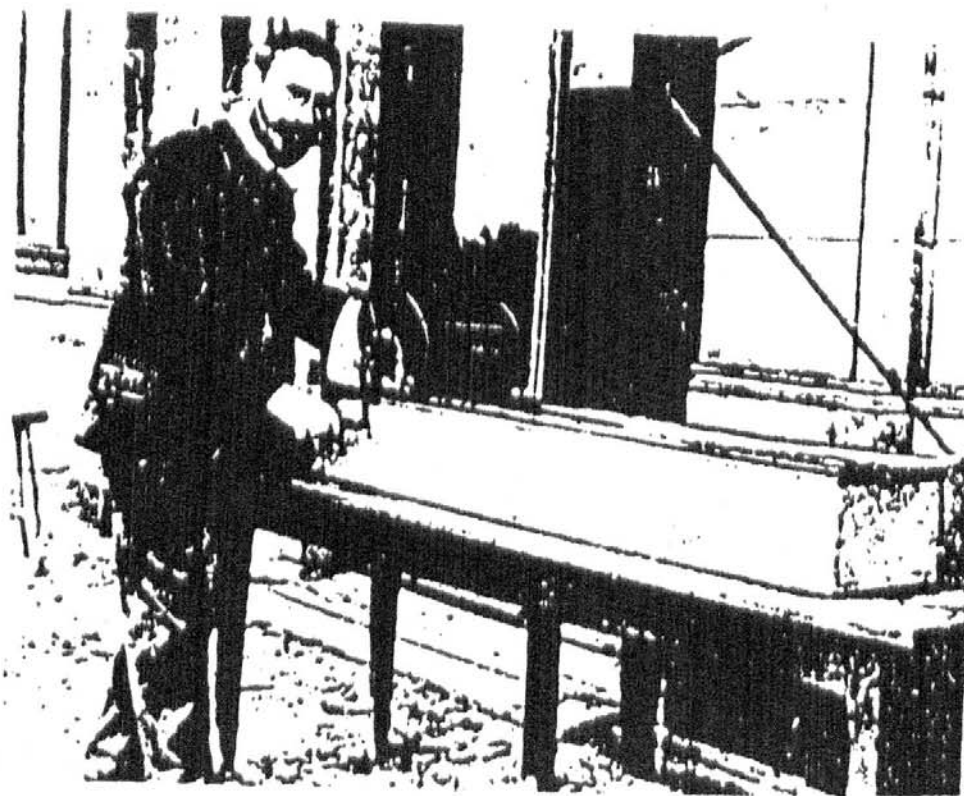
۳. Prandtl

۴. Taylor

۵. Von Karman

توضیح و بسط داده شد. جالب است بدانیم که اولین مطالعه منطقی پدیده‌های جریان متلاطم را بوسینک^۱ انجام داد، اما تحقیق فعال در این مورد بعد از کارهای رینولدز و پراندل شروع شد. کلاین^۲ و همکارانش (۱۹۵۹، ۱۹۶۷) ساختار مربوط به زیر لایه لزج را به وسیله مطالعه مصور جریان آشکار کردند. کار آنها به طور واضح، عصر جدیدی را در تعیین ساختار مرتبط با جریان برشی متلاطم بعد از مطالعات آمار و منطقی پدیده‌ها به وجود آورد که در اصل با اندازه‌گیری سیم‌های داغ در لایه مرزی متلاطم آشکار می‌شدند.

اکیرت^۳ (۱۹۸۱) اظهار می‌کند دونفری که در پیشرفت آشنایی ما با جریان سیالات سهم عمده‌ای دارند، رینولدز و در ناحیه انتقال به متلاطم و پراندل در لایه‌های مرزی هستند که از طریق مصور کردن جریان با وسایل ساده شکل‌های (۵) و (۶) باعث این پیشرفت شدند [۳].

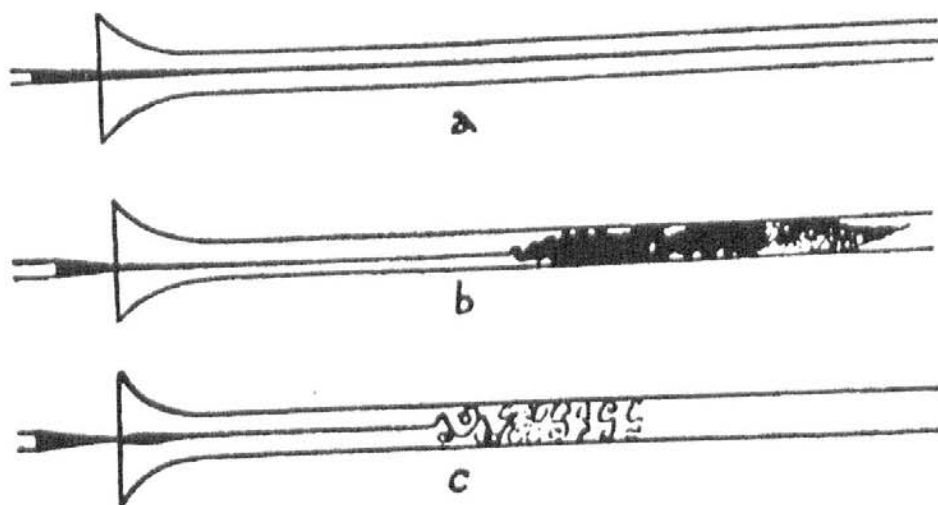


شکل ۴ کانال آب آزمایشی پراندل

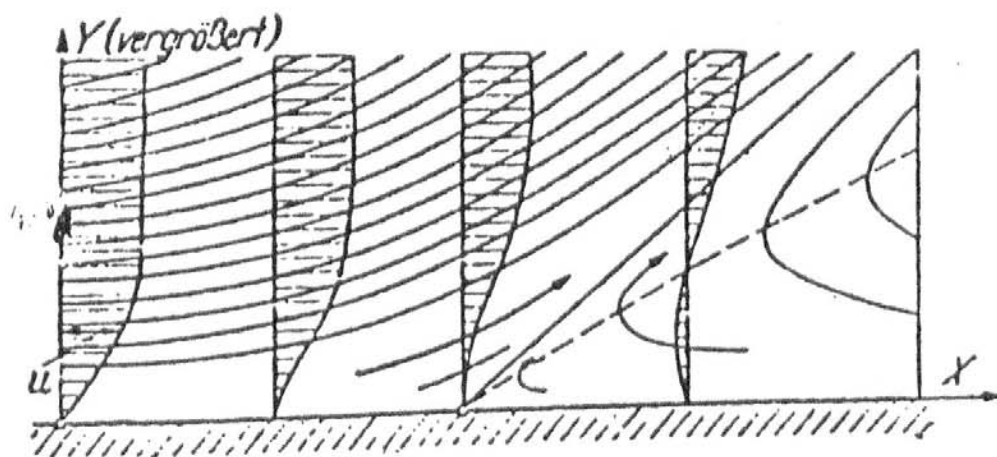
۱. Boussineq

۲. Kline

۳. Eckert



شکل ۵ تصاویر کشیده شده توسط رینولدز



شکل ۶ جریان ترسیم شده از پراندل پیرامون جدایی جریان در لایه مرزی

۷. کاربرد تئوری لایه مرزی

پراندل مفهوم لایه مرزی در مکانیک سیالات را در مقاله کلاسیک خود معرفی کرد [۳]. کار پراندل به طور مؤثری توافقی‌های مشاهده شده در هیدرولیک آزمایشگاهی و هیدرودینامیک تحلیلی را زودتر از قرن بیستم مشخص کرد و اثر لزجت نزدیک سطح جامد را که توسط دوبات^۱

(۱۷۸۶) و استوکس کشف شده بود، ثابت کرد. پراندل را می توان پایه گذار مکانیک سیالات امروزی نام نهاد. اکرت و جاکوب^۱ تئوری لایه مرزی را باعث ایجاد تحولی عظیم در مطالعات تحلیل انتقال حرارت جابه جایی در جریانات متلاطم و آرام در قرن بیستم دانسته اند. کار پراندل در تئوری بال ها که شبیه به کار فیزیکدان انگلیسی لانچستر^۲ بود، اما هر کدام به طور مستقل انجام شده بودند، فرایند جریان هواروی بال های هواپیما را توضیح می داد. این کار به اسم تئوری بال لانچستر - پراندل شناخته شده است. با این پدیده کار پراندل اساس موضوع آیرودینامیک شد.

جالب است بدانیم که کاربردهای تئوری لایه مرزی فقط بعد از انتشار کتاب پراندل و کارهای دیگر او و کار تولمین^۳ (۱۹۳۱) در مکانیک سیالات لزج [۱۱] در تئوری آیرودینامیک تسریع یافت. بعد از ارائه مقدمه مفهوم لایه مرزی توسط پراندل در سال ۱۹۴۰، بلازیوس^۴ (۱۹۰۸-۱۹۰۷) آن را در جریان آرام روی یک سطح مسطح در جابه جایی اجباری آرام روی صفحه مسطح با دمای دیواره یکنواخت و جابه جایی آزاد آرام روی صفحه مسطح عمودی با دمای ثابت به کار برد. شروع حل های تحلیلی مسائل جریان بلازیوس [۸] و جابه جایی اجباری آرام با متغیر تشابه $\eta = y \left(\frac{u_\infty}{\nu x} \right)^{1/2}$ انجام گرفت [۱۲]. مفهوم لزجت گردابه را بوسینک معرفی کرد، ولی ساینٹ ونانت^۵ (۱۸۴۳) ایده اولیه آن را داده بود. در سال ۱۹۱۰، پراندل مفهوم لایه مرزی را برای انتقال حرارت جابه جایی به کار برد و در باره رابطه میان مقاومت سیال و انتقال حرارت بحث کرد. در سال ۱۹۲۵، پراندل بدون آگاهی از کار تیلور (۱۹۱۵)، مفهوم طول مختلط را معرفی کرد و حل تقریبی مسئله لایه مرزی متلاطم کاملاً توسعه یافته علمی شد.

در سال ۱۹۲۱، کارمن^۶ یک روش تقریبی برای معادله انتگرالی ممنتوم لایه مرزی پیشنهاد کرد. همچنین، پولاسن^۷ (۱۹۲۱) روشی برای توسعه آنالیز لایه مرزی در یک استوانه را به کار برد. این روش بعداً ابزاری قوی در آنالیز معادلات لایه مرزی روی مسائل جابه جایی گرما شد.

۱. Jacob

۲. Lanchester

۳. Tollmien

۴. Blasius

۵. Saint-venant

۶. Karman

۷. Pohlhausen

آنالیز لایه مرزی را اسپارا^۱ و همکارانش (۱۹۶۱، ۱۹۵۱) و دیگران برای مسائل چگالش لایه‌ای مورد استفاده قرار دادند و همچنین توسط اسپارا (۱۹۴۱)، برامل^۲ (۱۹۵۰) و دیگران برای مسائل جوش لایه‌ای مورد استفاده قرار گرفت. بعد از مقاله کلاسیک پولاسن (۱۹۲۱)، اشمیت و بکمن (۱۹۳۰)، تئوری لایه مرزی برای مسائل جابه‌جایی طبیعی را ساندرز^۳، النباس^۴، اوستراچ^۵ و اسپارو در فاصله زمانی ۱۹۳۰-۱۹۶۰ به کار گرفتند. اکرت (۱۹۵۰) اشاره می‌کند که احتمالاً کروجیلینز^۶ (۱۹۳۶) اولین کسی بوده که برای محاسبات انتقال گرما از معادله انتگرالی جریان - گرما استفاده کرده است. در اواسط قرن بیستم از مفهوم لایه مرزی پراندل به طور وسیعی در پیشرفت تحقیقات انتقال جرم و گرما استفاده شد.

۸. تفسیر نهایی

تئوری ریاضی هدایت گرما در جامدات بعد از به دست آوردن موفقیت آمیز معادله اساسی در سال ۱۸۰۷ و توسعه سری‌های فوریه توسط فوریه تثبیت شد. این بخش از مطالعه هدایت گرما تا اواخر قرن نوزدهم کاملاً توسعه یافت. معادله انرژی سیال در حال حرکت را فوریه (۱۸۲۰) و پواسون (۱۸۳۵) به دست آوردند، ولی هیچ‌کدام حلی برای آن ارائه ندادند. معادلات ناویر - استوکس برای سیالات لزج در سال ۱۸۴۵، بعد از کارهای ناویر (۱۸۲۳)، کاچی (۱۸۲۸)، پویدون^۷ (۱۸۳۱) ساینٹ - ونانت (۱۸۴۳) و استوکس (۱۸۴۵) به ثبت رسید. اوبربک^۸ (۱۸۷۹) در باره معادلات کلی بحث کرد و برای حالات خاص حل‌هایی ارائه داد. لورنز^۹ (۱۸۸۱) یک حل تقریبی برای سرد شدن صفحه عمودی دما ثابت در هوا به دست آورد. گراتز حل تحلیلی در ترم‌های توابع بسل را برای جریان قالبی^{۱۰} به دست آورد و نیز یک مجموعه حل برای جریان کاملاً بی حرکت ثابت را برای جابه‌جایی در یک لوله استوانه‌ای با دمای دیواره ثابت به دست آورد. مطالعه جریان متلاطم

۱. Sparrow

۳. Saunders

۵. Ostrach

۷. Poidon

۹. Lorenz

۲. Bromle

۴. Elenbaas

۶. Kroujilines

۸. Oberbeck

۱۰. Plug

در مکانیک سیالات را اوسبورن رینولدز در سال ۱۸۸۰ شروع کرد و مفهوم لایه مرزی توسط پراندل در سال ۱۹۰۴ معرفی شد. بعد از مجموعه کارهای کلاسیک ناسلت^۱ در قرن بیستم، میدان انتقال حرارت جابه‌جایی به‌طور کامل تثبیت شد. خلاصه تاریخچه انتقال حرارت به ترتیب زمان در پیوست "الف" آمده است.

تئوری لایه مرزی در آنالیز ریاضی مسائل انتقال حرارت جابه‌جایی به‌طور وسیعی به‌کار گرفته شد. جالب است گفته شود که به نوشته دادلی^۲ (۱۹۰۹)، از سال ۱۶۹۰ تا سال ۱۹۰۹ حدود ۵۰۰ مقاله تکنیکی اساسی در انتقال حرارت منتشر شده است، در حالی که اکرت (۱۹۵۹) بیان می‌کند که در حدود سال‌های ۱۹۵۹ به‌طور متوسط سالانه ۱۰۰۰ مقاله در انتقال جرم و گرما انتشار یافته است. علاوه بر آن، اکرت و همکارانش در چندین دهه گذشته مقالاتی را که در زمینه انتقال حرارت چاپ و منتشر شده است، بطور سیستماتیک هر ساله در زیرگروه‌های متنوعی در مجله *International Journal of Heat and Mass Transfer* مورد نقد و بررسی قرار می‌دهند. کارهای بزرگ پروفسور اکرت در زمینه انتقال حرارت در فاصله سال‌های ۱۹۳۰-۱۹۶۰ انتقال حرارت کاربردی را در تمام زمینه‌های انتقال حرارت گسترش داد. بعد از کارهای اولیه رینولدز، پراندل، تیلور و ون کارمن، انتقال حرارت متلاطم توسط محققان بسیاری مورد بررسی قرار گرفت و به‌خوبی جای خود را محکم کرد. شایان ذکر است که اولین کنفرانس بین‌المللی انتقال جرم و حرارت در سال ۱۹۵۱ در لندن برگزار شد. دومین و سومین کنفرانس نیز در لندن به ترتیب در سال‌های ۱۹۶۱ و ۱۹۶۶ برگزار شدند. بعد از ۱۹۶۹، این کنفرانس هر چهار سال یک‌بار برگزار می‌شود. ظاهراً رشد سریع مقاله‌های انتقال حرارت در زمینه انتقال حرارت و جرم در مجله بین‌المللی انتقال حرارت و جرم در سال ۱۹۵۸ و در مجله *ASME* در سال ۱۹۵۹ شروع شده است. گفتنی است که مؤسسه مکانیک سیالات و انتقال حرارت در سال ۱۹۵۰ در آمریکا تأسیس شد. امروزه، مجلاتی که در زمینه انتقال حرارت و جرم فعالیت انتشاراتی در جهان دارند، بسیار گسترده شده و در حدود ۸۰ مجله ذکر شده است. همچنین، آخرین دسته‌بندی زمینه‌های انتقال حرارت که در مجله بین‌المللی انتقال حرارت و جرم آمده است، به شرح "پیوست ب" می‌باشد. این تحقیقات هر ساله با رشد مضاعفی ادامه دارد و افق‌های جدیدی برای کار و مطالعه

برای بهینه‌سازی، افزایش یا کاهش انتقال حرارت در اجسام گشوده می‌شود.

مراجع

۱. محمود یعقوبی، "شاخه و گروه‌ها در مهندسی مکانیک"، مجله انجمن مهندسان مکانیک ایران، ۱۳۷۷.
۲. محمود یعقوبی، "منهوم و کاربرد واژه حرارت در علوم مهندسی"، مجله آموزش مهندسی ایران، شماره ۳، سال اول، پاییز ۱۳۷۸، ص ۴۹.
3. E.F.G. Eckert, Pioneering Contributions to Our Knowledge in Convective Heat Transfer (Hundered years of heat transfer research), 8D-HT-137, American Society of Mechanical Engineering, Heat Transfer Devison, 1980.
4. K.C. Cheng and T. Fujii, Review and some observation on the historical development of heat transfer from Newton to Eckert - 1700-1960, Dept. of Mech. Eng. University of Alberta Conada & Inst. of Advanced Material Study, Kyushu University, Japan.
5. R.B. Bird, W.F. Stewart and E.N. Lightfoot, Transfer phenomena, Wiley, New York, 1960.
6. G.J. Van Wylen and R.E. Sonntag, Fundamental of classical thermodynamics, John Wiley & Sons, 1978.
7. K. Ward, Thermodynamics, McGraw-Hill, 1977.
8. E.R.G. Eckert and R.M. Drake, Analysis of Heat and Mans Transfer, McGraw-Hill, 1972.
9. L.C. Burmeister, Convective Heat Transfer, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1994.
10. R. Seigle and J.R. Howell, Thermal Radiation Heat Transfer, 2nd ed., McGraw-Hill, NewYork, 1981.

11. F.M. White, *Viscous Fluid Flow*, McGraw-Hill, 1974.
12. H. Schlichting, *Boundary Layer Theory*, 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1968.

(تاریخ دریافت مقاله: ۱۰/۱۱/۷۹)

پیوست «الف»

جدول اسامی و اختراعات در تاریخچه انتقال حرارت

سال	اسم و اختراع
۱۵۹۷	دماسنج هوایی گاليله
۱۶۰۹	Sanctorius، اولین دماسنج طبی
۱۶۲۰	Drebbel، دماسنج الکلی
۱۶۴۳	Torricelli، اندازه گیری فشار خلاء
	Kircher، دماسنج جیوه‌ای
۱۶۴۸	Pascal، اندازه گیری تغییرات فشار با ارتفاع
۱۶۶۰	Boyle، قانون بویل (تغییرات همدای گاز)
۱۶۸۷	Newton، قانون ویسکوزیته
۱۷۰۱	قانون سرمایه‌ی نیوتن
۱۷۰۲	Amontons، تغییر حجم ثابت گاز
۱۷۰۳	Amontons، مبنای جوش آب به عنوان مبنای ثابت دماسنجی
۱۷۱۴	Fahrenheit، مقیاس دماسنجی، انبساط جیوه، مایع متراکم آب و نقاط ثابت آن
۱۷۴۲	Celsius، مقیاس سانتیگراد، دستورالعمل کالیبره کردن
۱۷۵۶	Leidenfrost، جوش
	Black، جداسازی مفاهیم گرما، دما، گرماسنجی، گرمای نهان، جداسازی سه پدیده انتقال حرارت (تشنه‌شع، جابه‌جایی و هدایت)
۱۷۵۷	Euler، معادله حرکت برای جریان بدون اصطکاک
۱۷۶۱	Black، گرمای نهان ذوب یخ
۱۷۷۴	Laviisier، تولید احتراق، اصل آتش
۱۷۸۰	تئوری برنولی
۱۷۸۳	

۱۷۸۷	قانون چارلز
۱۷۹۸	Rumford، تبدیل کار اصطکاکی به گرما
۱۸۰۲	Gay-lussac، انبساط آزاد گاز (آزمایش)
۱۸۰۳	Dalton، قانون فشار جزئی، تئوری اتمی شیمی
۱۸۱۱	قانون هدایت گرمایی فوریه
۱۸۱۲	Avogadro، تئوری مولکولی
۱۸۱۸	Fourier، تئوری هدایت گرمایی
۱۸۲۲	Dulong-Petit، قانون گرمای مولکولی
	معادله ناویر - استوکس
۱۸۲۴	Fourier، تئوری تحلیلی گرما
۱۸۲۴	سیکل کارنو
۱۸۳۳	تابع بسل
۱۸۳۴	Fourier، معادله انرژی برای سیال در حال حرکت
۱۸۳۵	Clapeyron، معادله حالت برای گاز کامل
۱۸۲۴	Poisson، اندازه گیری توزیع غیریکنواخت دما در دیوار
۱۸۴۳	Mayer، قانون بقای انرژی
۱۸۴۵	Joule، معادل مکانیکی گرما (اندازه گیری)
۱۸۴۷	Stokes، معادلات اساسی برای سیالات ویسکوز
۱۸۴۸	Helmholtz، فرمولبندی قانون بقای انرژی
۱۸۵۰	Kelvin، مفهوم دمای مطلق
۱۸۵۱	Clausius، قانون دمای ترمودینامیک
۱۸۵۸-۱۸۶۰	سیکل رانکین
۱۸۵۹	قانون Poiseuille
۱۸۶۱	قانون تشعشع Kirchhoff
۱۸۶۵	Joule، آزمایش چگالش
	Clausius، اساس افزایش انتروپی

- ۱۸۶۹ Andrews، کشف دما و فشار بحرانی
- ۱۸۷۳ Vonder Waals، معادله حالت
- ۱۸۷۵ Maxwell و Boltzmann، تئوری مولکولی گرمای ویژه
- ۱۸۷۵ Grashof، معادله برای تبادل گرما
- ۱۸۷۷ Boltzmann، پایه آماری قانون دوم ترمودینامیک
- ۱۸۷۹ قانون استفان
- ۱۸۷۹ عدد رینولدز
- ۱۸۷۹ Oberbeck، کاربرد معادله استوکس برای جابه‌جایی طبیعی
- ۱۸۸۱ Lorenz، آنالیز تحلیلی جابه‌جایی آزاد
- ۱۸۸۲ Helmholtz، مفهوم انرژی آزاد
- ۱۸۸۳ Londolt-Bornstein، جدول ثابت‌های شیمیایی و فیزیکی
- ۱۸۸۳ Reynolds، انتقال از جریان آرام به متلاطم (آزمایش)
- ۱۸۸۳ مسئله ورودی Greatz
- ۱۸۸۵ Boltzmann، اثبات تحلیلی قانون استفان
- ۱۸۸۵ Greatz، مسئله ورود دمایی (مسئله دوم گراتز)
- ۱۸۹۰ جریان Couette
- ۱۸۹۳ Wien، قانون جابه‌جایی تشعشع گرمایی
- ۱۸۹۴ Reynolds، معادله برای جریان متلاطم
- ۱۹۰۰ Planck، تئوری کوانتوم
- ۱۹۰۲ Gibbs، مکانیک آماری
- ۱۹۰۴ Prandtl، تئوری لایه مرزی
- ۱۹۰۶ Nernst، قانون سوم ترمودینامیک
- ۱۹۰۸ جریان Blasius
- ۱۹۱۵ Nusselt، قانون اساسی انتقال حرارت
- ۱۹۱۶ Nusselt، تئوری چگالش لایه‌ای
- ۱۹۲۱ Pohlhausen، جابه‌جایی اجباری آرام روی یک صفحه مسطح

- ۱۹۲۱ Grober که از اعداد بدون بعد استفاده کرده بود (Gr, Pe, Re و غیره)
- ۱۹۲۵ Heisenberg، مکانیک کوانتوم
- ۱۹۲۹ اولین جداول و اشکال خواص بخار - لندن
- ۱۹۳۱ Onsager، تئوری برگشت ناپذیری
- ۱۹۳۲ McAdams، انتقال گرما
- ۱۹۳۴ NuKiyama، منحنی جوش
- ۱۹۳۸ ASME، شاخه انتقال حرارت
- ۱۹۴۹ Jakob، انتقال حرارت جلد ۱ و ۲
- ۱۹۵۹ مجله ASME انتقال حرارت
- ۱۹۶۰ مجله بین‌المللی انتقال حرارت و جرم

پیوست «ب»

زمینه‌های مختلف در انتقال حرارت

1. CONDUCTION

(هدایت)

Contact conduction and contact resistance	هدایت در تماس و مقاومت در تماس
Layered, composite and/or with anisotropic media	مواد مرکب و لایه‌های غیرمتجانس
Thermal waves, laser/pulse heating	موج گرمایی، لیزری و حرارت دهی سریع
Conduction in fins, tubes and solids	هدایت در پره‌ها، لوله‌ها و اجسام
Mathematical models, analysis techniques and simulations	مدل‌های ریاضی، روش‌های تحلیل و مشابه سازی
Experimental and/or comparative studies	آزمایش‌ها و مطالعات مقایسه‌ای
Thermal/thermal-mechanical problems	مسائل گرمایی
Inverse problems, analysis and design studies	مسائل معکوس، مطالعات طراحی و تحلیلی
Conductions/convection, flow effects	اثر جریان در هدایت و جابه‌جایی
Solidification, change of phase, crystals	انجماد، تغییر فاز و کریستال‌ها
Microelectronic heat transfer	انتقال حرارت خردالکترونیکی
Materials processing	فرایند مواد
Miscellaneous studies	مطالعات متنفرقه

2. BOUNDARY LAYERS AND EXTERNAL FLOWS

(لایه‌های مرزی و جریان‌های بیرونی)

External effects	اثرهای خارجی
Geometric effects	اثرهای هندسی

Compressibility and high - speed flow effects	جریان‌های قابل تراکم و سرعت‌های زیاد
Analysis and modeling	آنالیز و مدل‌سازی
Unsteady effects	اثرهای ناپایداری
Films and inter facial effects	لایه‌های نازک و اثرهای متقابل آنها
Effect of fluid type or fluid properties	اثر نوع سیال و خواص سیال
Flow with combustion and reaction	جریان با احتراق و واکنش
Measurement techniques	روش‌های اندازه‌گیری

3. CHANNEL FLOW

(جریان در کانال‌ها)

Straight-walled ducts	کانال با دیوار مستقیم
Irregular geometries	هندسه‌های غیرمتداول
Entrance effects	اثرهای ناحیه ورودی
Fins and profiles ducts	پره‌ها و کانال‌ها
Duct flow with secondary motion	جریان در کانال‌ها با حرکت‌های ثانویه
Oscillatory and pulsatile flow	جریان‌های نوسانی و ضربه‌ای
Two-component duct flows	جریان‌های دوبعدی در کانال‌ها
Non-Newtonian duct flow	جریان‌های غیرنیوتن
Miscellaneous duct flows	مطالب متفرقه در کانال‌ها

4. FLOW WITH SEPARATED REGIONS

(جریان با ناحیه‌های جدایی)

5. HEAT TRANSFER IN POROUS MEDIA

(انتقال حرارت در مواد متخلخل)

Property determination	تعیین خواص
------------------------	------------

External flow and heat transfer
Packed beds
Porous layers and enclosures
Couples heat and mass transfer
Miscellaneous studies

انتقال حرارت در جریان‌های بیرونی
انباشته شده
لایه‌ها و محفظه‌های متخلخل
ترکیب انتقال حرارت و جرم
مطالعات متفرقه

6. EXPERIMENTAL TECHNIQUES AND INSTRUMENTATION

(تکنیک‌های اندازه‌گیری و ابزار)

Heat transfer measurements
Temperature measurements
Velocity measurements
Thermophysical properties
Miscellaneous methods

اندازه‌گیری انتقال حرارت
اندازه‌گیری دما
اندازه‌گیری سرعت
خواص گرمایی فیزیکی
موضوعات متفرقه

7. CONVECTION FROM ROTATING SURFACES

(جابه‌جایی از سطوح دوار)

Rotating disks
Rotating channels
Enclosures
Cylinders, spheres, bodies of revolution
Miscellaneous

دیسک‌های دوار
کانال‌های دوار
محفظة‌ها
استوانه‌ها، کره‌ها و اجسام مدور
متفرقه

8. COMBINED HEAT AND MASS TRANSFER

(ترکیب انتقال حرارت و جرم)

Ablation - transportation
Film cooling

تصعید و انتقال
سرمایش لایه‌ای

Submerged and free jet cooling	جت‌های آزاد و داخل سیال
Liquid jets	جت‌های مایع
Drying	خشک‌کن‌ها
Miscellaneous	متنفرقه

9. CHANGE OF PHASE - BOILING

(تغییر فاز و جوشش)

Droplet and film evaporation	تبخیر لایه‌ای و قطره‌ای
Bubble characteristics and boiling incipience	خصوصیات حباب و آغاز جوشش
Pool boiling	جوشش استخری
Flow boiling	جوشش همراه با جریان

10. CHANGE OF PHASE - CONDENSATION

(تغییر فاز و تقطیر)

Surface geometry and material effects	اثر هندسه سطح و خواص مواد
Global geometry and thermal boundary condition effect	اثر هندسه جامع و اثر لایه گرما
Modelling and analysis techniques	تکنیک‌های مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل
Free surface condensation	تقطیر با سطح آزاد
Binary mixtures	مخلوط‌های دوتایی

11. CHANGE OF PHASE - FREEZING AND MELTING

(تغییر فاز و ذوب و انجماد)

Melting and freeaing of spheres, cylinders and slabs	ذوب و انجماد کره، استوانه و محفظه
Stefan problem	مسئله استفان

Ice formation in porous materials including soils and foods

تشکیل یخ در مواد متخلخل از جمله خاک و غذا

غذا

Food

خاک، برف و یخ دریا

Soil, snow and seawater ice

متفرقه

Miscellaneous

ذوب تماسی

Contact melting

ذوب و جریان مواد مذاب

Melting and melt flows

Powders, film, emulsions and particles in a melt

پودرها، لایه، درهمی و ذرات در محیط مذاب

Crusible melts

ذوب منشوری

Glass melting and formation

ذوب و تشکیل شیشه

Welding

جوشکاری

Enclosures

محفظه‌ها

Nuclear reactors

راکتورهای هسته‌ای

Energy storage

مخازن انرژی

Miscellaneous

متفرقه

Mushy zone - dendritic growth

نواحی

Metal solidification

انجماد فلزات

Crystal growth from melt

رشد کریستال‌ها در ماده ذوب

Casting

ریخته‌گری

Splat cooling

سرمايش پاششی

Miscellaneous

متفرقه

12. RADIATIVE HEAT TRANSFER

(انتقال حرارت تشعشع)

Influence of geometry

اثر شکل و هندسه

Participating media	محیط‌ها
Radiation combined with convection, conduction, or mass transfer	ترکیب تشعشع با جابه‌جایی هدایت و انتقال جرم
Intensely irradiated materials	مواد با قدرت تشعشع بالا
Experimental methods and properties	روش‌های تجربی و خواص
Miscellaneous	متفرقه

13. NUMERICAL METHODS

(روش‌های عددی)

Conduction	هدایت
Phase change	تغییر فاز (حالت)
Convection and diffusion	جابه‌جایی و پخش
Radiation	تشعشع
Solution of flow equations	حل معادلات جریان
Other studies	سایر مطالعات

14. TRANSPORT PROPERTIES

(ویژگی‌های انتقال)

Thermal conductivity and thermal diffusivity	ضریب هدایت و ضریب پخش گرما
Thermodynamic data	داده‌های ترمودینامیکی

15. HEAT TRANSFER APPLICATION - HEAT EXCHANGERS AND HEAT PIPES

(کاربردهای انتقال حرارت مبدل‌ها و لوله‌های حرارتی)

Thermosyphons	ترموسیپون
Heat exchangers	مبدل‌های حرارتی

Design	طراحی
Direct contact exchangers	مبدل‌های حرارتی
Enhancement	موضوعات افزایش انتقال حرارت
Fouling/Deposits/surface effects	رسوب، نشست، اثرهای سطح
Reactors-chemical/nuclear	راکتورهای شیمیایی و هسته‌ای
Thermosyphons (heat pipes)	ترموسیفون (لوله‌های گرمایی)

16. HEAT TRANSFER APPLICATIONS - GENERAL

(حالت‌های عمومی کاربرد انتقال حرارت)

Aerospace	هوافضا
Bioengineering	مهندسی حیاتی
Digital data processing	داده‌پردازی دیجیتال
Energy	انرژی
Environment	محیط
Manufacturing	ساخت و تولید
Processing	فرایندها

17. SOLAR ENERGY

(انرژی خورشیدی)

Buildings	ساختمان‌ها
Non-concentrating collectors	کلکتورهای غیرمتمرکز
Concentrating collectors and systems	سیستم‌ها و کلکتورهای متمرکزکننده
Radiation characteristics and related effects	خصوصیات تشعشع و اثرهای مربوط
Water and space heating	گرمایش آب و هوا
Space cooling and refrigeration	سرمایش هوا و تبرید
Stills	آب شیرین‌کن‌ها

Storage	ذخیره‌سازی
Ponds	استخرهای خورشیدی
Cooking and drying	پخت و پز و خشک کردن
Solar chemistry	شیمی خورشیدی

18. PLASMA HEAT TRANSFER AND MAGNETOHYDRODYNAMICS

(انتقال حرارت در پلاسما و هیدرودینامیک مغناطیسی)

Plasma modeling and diagnostics	مدلسازی پلاسما و بررسی آن
Plasma-particle interaction	پلاسما و تداخل ذرات
Laser-Plasma interaction	تداخل لیزر و پلاسما
Specific plasma applications	کاربردهای ویژه پلاسما
Magnetohydrodynamics	هیدرولیک مغناطیسی

19. NATURAL CONVECTION - INTERNAL FLOWS

(جابه‌جایی طبیعی برای جریان‌های داخلی)

Fundamental studies	مطالعات پایه‌ای
Heat generating fluids	سیال‌های گرمازا
Thermocapillary convection	جابه‌جایی گرما با خصوصیات لوله مویی
Enclosure heat transfer	انتقال حرارت در محفظه‌ها
Vertical duct flows	جریان در کانال‌های عمودی
Horizontal cylinders and annuli	استوانه‌های افقی و لوله‌های هم‌مرکز
Mixed convection	جابه‌جایی ترکیبی
Complex geometries	هندسه‌های پیچیده
Fires	آتش
Miscellaneous topics	موضوعات متفرقه

20. NATURAL CONVECTION - EXTERNAL FLOWS

(جابه‌جایی طبیعی برای جریان‌های خارجی)

Vertical flat plate

سطوح عمودی

Horizontal and inclined plates

سطوح افقی و شیب دار

Cylinder and sphere

استوانه و کره

Buoyant plumes

پلوم‌های شناور

Mixed convection

جابه‌جایی ترکیبی

Miscellaneous

متفرقه