مجله آموزش مهندسی ایران، شماره ۱، جلد ۳، ص. ۴۴-۹

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 پدیدهای فیزیکی بسیار مهمی استوار شده که توسط دانشمندان و محققان از قرن شانزدهم به تدریج شناخته و ارائه شده است. دانش پایه و پدیدهای 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 به‌خصوص 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 امکان‌پذیر 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 به‌عنوان 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 تاکنون 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 هرکدام در یک الی ۲ درس ارائه می‌شود.

در این مقاله تلاش شده است تاریخچه‌ای از شروع مطالعات در بارهٔ 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، فنّاوری، 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 گالیله (۱۵۹۷) شروع می‌شود. ظاهراً از گالیله 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. گالیله

---

۱. Joseph Black

(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 اندازه گیری 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 نتیجه گیری نهایی آمده است.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

۲. ماهیت گرما

تشخیص ماهیت واقعی گرما و سپس اندازه گیری آن نقش مهمی در توسعه انتقال حرارت در قرن نوزدهم داشت [۵]. ظاهراً بعد از کار گالیله 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. Peclet
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 تبخیرناپذیرند 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، قابل‌اندازه‌گیری، غیرقابل تولید و فناناپذیر 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 به‌دست 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. Lavaisier
۳. Calorique
۴. Danile Bernoulli
۵. Bobert Boyle
۶. Maxwel
۷. Benjamin Thempson

اصطکاک توپ نشان داد که می‌توان گرمای پایان‌ناپذیری 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 گرم‌کننده مغناطیسی - الکتریسیته را توضیح می‌داد، 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 الکتریسیته به عنوان قانون ژول (قانون الکتریکی) شناخته شده است. ضریب $\left(\frac{\mathrm{mkg}}{\mathrm{cal}}\right)$۴۲۵ که به‌دست آمد، برای معادل کار مکانیکی به گرما تا مدت‌ها بهترین و دقیق‌ترین مقدار به‌دست 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 مایرر[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 می‌شود. در سال ۱۷۰۱، نیوتن (۱۷۲۷-۱۶۲۴) مقاله‌ای در بارهٔ 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 سردشدن جسم داغ با اختلاف دما میان جسم و محیط اطراف آن متناسب است. این مفهوم، مهم‌ترین 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 جیوه‌ای را در سال ۱۷۱۴ اختراع و مقیاس دمایی فارنهایت را ایجاد کرد. این مقیاس هنوز هم در آمریکا به صورت معمول استفاده می‌شود. 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 ۲۷۳/۱۵C- استفاده می‌کرد که واحد این مقیاس به عنوان کلوین شناخته شد. هر درجه کلوین برابر [۱] (۲۷۳/۱۶) 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 دمای 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 ۴۵۹/۶۷F- 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]. سدی کارنوت [۳] (۱۸۳۱-۱۷۶۱) که خود نیز در ابتدای پیوستگی انرژی نقش مهمی داشت، در سال ۱۸۲۴ نشان داد که گرما و کار شرایط برگشت‌پذیر دارند [۶] و نیز بازده موتور برگشت‌پذیر به دمای منبع گرمایی بستگی دارد. کار کارنو در مدت زندگی‌اش کمتر مورد توجه قرار گرفت. در سال‌های ۱۸۵۰-۱۸۳۰ 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] (۱۸۹۴-۱۸۲۱) 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] (۱۷۱۵-۱۶۵۰) طراحی شد و در همان زمان پمپ‌های آبی برای کار در معادن زغال سنگ توسط ساوری [۶] (۱۷۱۵-۱۶۵۰) و نیوکومن [۷] (۱۷۲۹-۱۶۶۳) ساخته شد.

---

۱. William Thompson
۲. Rankine
۳. Sadi Carnot
۴. Helmholtz
۵. Papin
۶. Savery
۷. New Comen

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

دستاورد کارنو توسط کولیوس [۱] و لرد کلوین 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 کلوین از قانون دوم ترمودینامیک، دمای صفر مطلق را به‌دست آورد. هلمولت در سال ۱۸۲۲، مفهوم "انرژی آزاد" [۵] را معرفی کرد. سلسیوس نیز مفهوم انتروپی را در سال ۱۸۶۵ معرفی کرد.

در سال ۱۸۷۰، بولتزمن [۲] (۱۹۰۶-۱۸۴۴) مجموعه‌ای از مقالات در بارهٔ 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 به‌دست 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] (۱۹۴۷-۱۸۵۸) 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] (۱۹۲۶-۱۸۵۳)، برنده جایزه نوبل در فیزیک در سال ۱۹۱۳، تابع ترمودینامیکی انتالپی را معرفی کرد که گیبس [۳] (۱۹۰۳-۱۸۳۹) 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] (۱۹۴۱-۱۸۶۴)، 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، (۱۸۲۰-۱۷۶۸) 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.

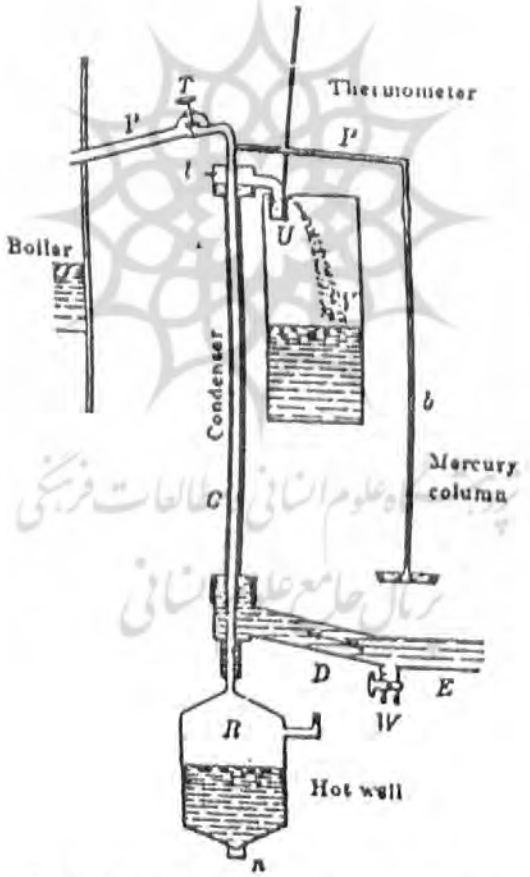
این برای اولین بار بود که از اصول ریاضی در مطالعه انتقال گرما استفاده شده بود. کار فوریه به عنوان مدلی برای آنالیز گرما و الکتریسیته مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به این واقعیت که در آن زمان هنوز مفهوم واقعی گرما یک مجهول بود، کارهای فوریه که معادلات اساسی هدایت گرما بودند، نشان از نبوغ بالای او داشت. 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]، برُت[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 سرمایش نیوتن در سال ۱۷۰۱ و تئوری ریاضی فوریه در هدایت گرما در سال ۱۸۲۱ به‌شمار 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 اندازه گیری کرد. ضریب هدایت گرمایی آب برای اولین بار در سال ۱۸۳۹ تعیین شد. ضریب هدایت گازها تا سال ۱۸۶۰ اندازه گیری 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 ترکیب کننده 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 تغییرشکل 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
۲. Poisson
۳. Stefan
۴. Josef Stefan
۵. Franz Neumann
۶. Horschel
۷. Pictet de Soussare
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. لودویک 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 یا درجه‌های مختلف دقت را کاچی [۳] در سال ۱۸۲۸، پواسون در سال ۱۸۲۹ و سانیت - 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.

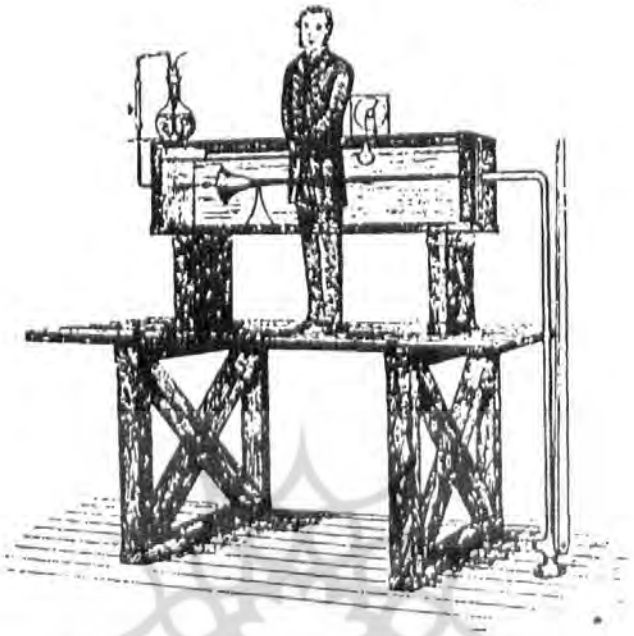
گراتز [۴] (۱۸۸۵) یک حل تحلیلی با استفاده از سری‌های بینهایت تئوری Sturmliouville برای ناحیه ورودی در مسائل انتقال حرارت آرام با دمای دیواره ثابت و جریان توسعه یافته آرام در ناحیه ورودی لوله را ارائه داد. کار گراتز اولین حل تحلیلی در مسائل انتقال حرارت علمی شامل سرمایش و گرمایش جریان سیال در لوله بود. این مسئله که به مسئله گراتز مشهور شد [۸]، از اهمیت زیادی برخوردار است و نقطه شروع در اندازه گیری 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] (۱۹۱۲-۱۸۴۲) 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. داول و جکسون[۱] کارهای او را در ۱۹۷۰ مورد تجدید نظر قرار دادند. گفتنی 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. Bckmann

۴. Pohlhousen

۵. Prandtl

در سال ۱۹۳۵، دریدن[۱] مروری بر جنبه‌های اساسی آیرودینامیک سرمایش 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 جریانات 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. Fitzgeralkd
۷. Rucker
۸. Jeans
۹. Lord Rayleigh

مربوط قبلاً به طور وسیعی توسط لرد کلوین (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 سردشدن 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.

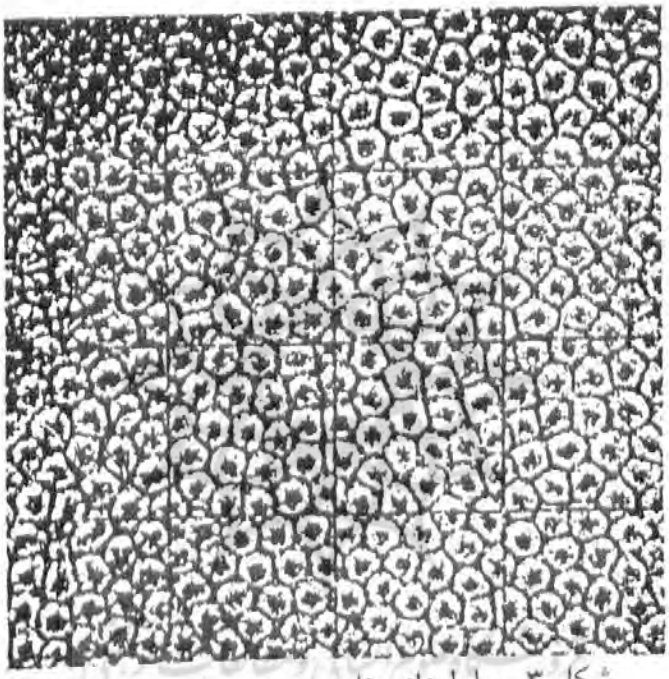
در سال ۱۹۰۰، بنارد[۴] مشاهدات آزمایشگاهی خود را در زمینه لایه افقی سیال به عنوان سلول‌های بنارد [۸] انجام داد (شکل ۳). کارهای او به دلیل شروع مجموعه‌ای از کارهای آزمایشگاهی و تحلیلی در زمینه مسائل ناپایدار هیدرودینامیکی که از نیروهای حجمی مختلف مانند شناوری، نیروهای گریز از مرکز و کریولیس[۵] ناشی می‌شود، تأثیر خیلی زیادی داشت.

رایلیگ (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 به‌دست آوردند. ظاهراً هیچ مطالعه منظمی در پدیده‌های متلاطم قبل از کار رینولدز در سال ۱۸۷۴ که تشابه نزدیک میان انتقال ممنتوم 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] به‌دست 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

پرتال جامع علوم انسانی

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 ممنتوم متلاطم، بارها به وسیله پراندل[۳] (۱۹۱۰)، تیلور[۴] (۱۹۱۴)، ون کارمان[۵] (۱۹۳۹) و دیگران

---

۱. Fluntuation

۲. Prandtl

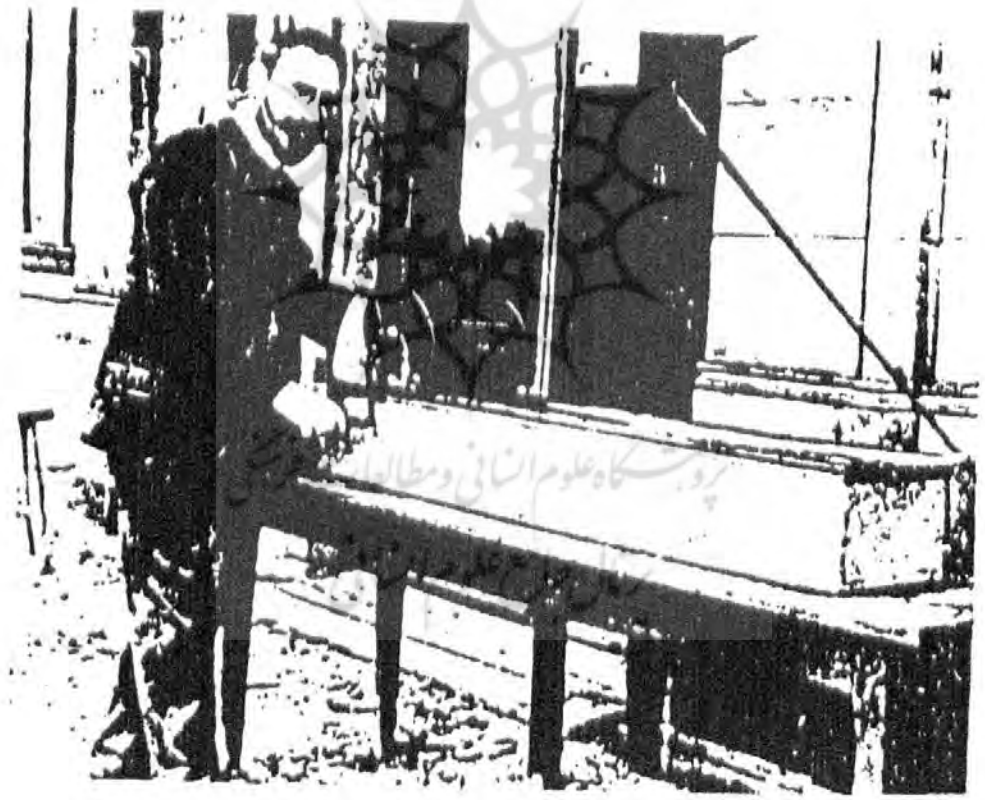
۳. Prandtl

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 به‌وجود آورد که در اصل با اندازه گیری سیم‌های داغ در لایه مرزی متلاطم آشکار می‌شدند.

اکِرت [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 شکل های (۵) و (۶) باعث این پیشرفت شدند [۳].

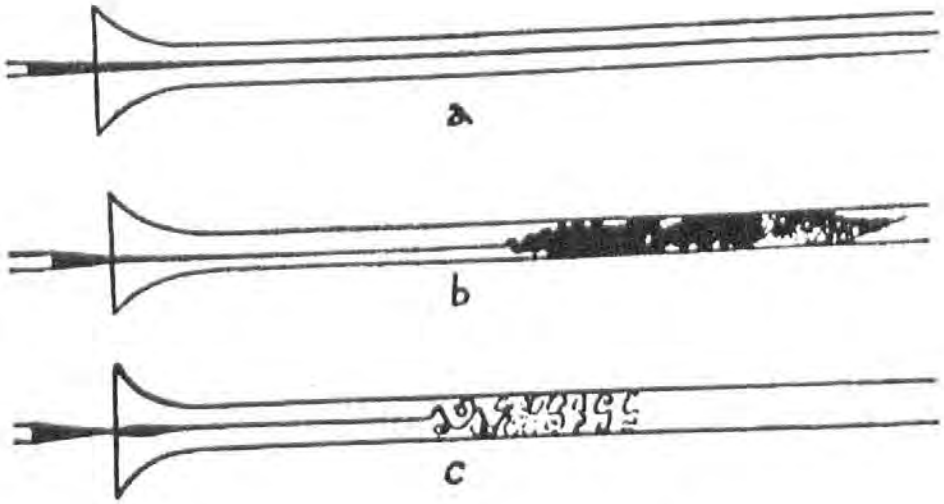


شکل ۴ کانال آب آزمایشی پراندل

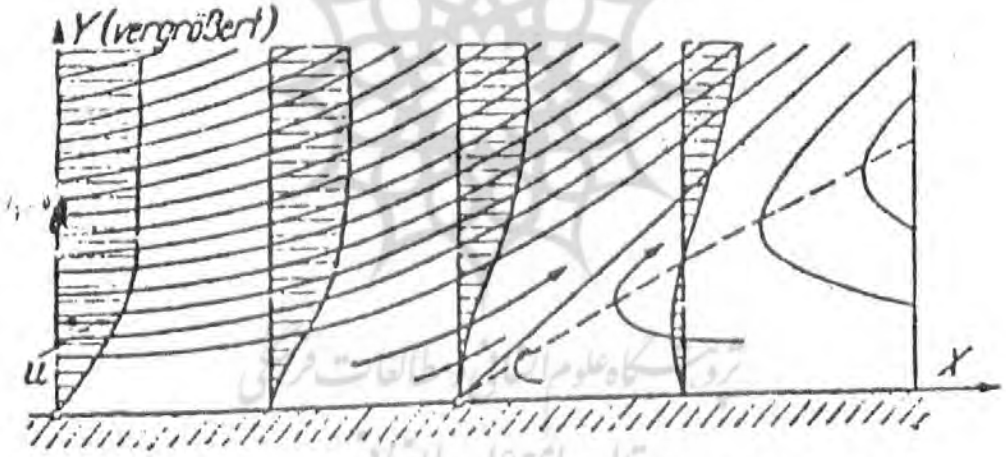
۱. Boussineq

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 توافق‌های 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]

۱. DuBuat

(۱۷۸۶) و استوکس کشف شده بود، ثابت کرد. پراندل را می‌توان پایه‌گذار مکانیک سیالات امروزی نام نهاد. اکرت و جاکوب[۱] تئوری لایه مرزی را باعث ایجاد تحولی عظیم در مطالعات تحلیل انتقال حرارت جابه‌جایی در جریانات متلاطم و آرام در قرن بیستم دانسته‌اند.

کار پراندل در تئوری بال‌ها که شبیه به کار فیزیکدان انگلیسی لانچستر[۲] بود، اما هر کدام به طور مستقل انجام شده بودند، فرایند جریان هوا روی بال‌های هواپیما را توضیح می‌داد. 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 جابه‌جایی اجباری آرام روی صفحه مسطح با دمای دیواره یکنواخت و جابه‌جایی آزاد آرام روی صفحه مسطح عمودی با دمای ثابت به کار برد. شروع حل‌های تحلیلی مسائل جریان بلازیوس [۸] و جابه‌جایی اجباری آرام با متغییر تشابه $\eta=y(\frac{u_\infty}{vx})^{1/2}$ انجام گرفت [۱۲]. مفهوم لزجت گردابه را بوسینک معرفی کرد، ولی ساینت ونانت[۵] (۱۸۴۳) ایده اولیه آن را داده بود. در سال ۱۹۱۰، پراندل مفهوم لایه مرزی را برای انتقال حرارت جابه‌جایی به کار برد و در بارهٔ 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 جابه‌جایی گرما شد.

---

۱. Jacob
۲. Lanchestor
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 ۱۹۶۰-۱۹۳۰ 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 به‌دست 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) به‌دست 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) ساینت - ونانت (۱۸۴۳) و استوکس (۱۸۴۵) به ثبت رسید. اوبربک[۸] (۱۸۷۹) در بارهٔ معادلات کلی بحث کرد و برای حالات خاص حل‌هایی ارائه داد. لورنز[۹] (۱۸۸۱) یک حل تقریبی برای سردشدن صفحه عمودی دما ثابت در هوا به‌دست آورد. گراتز حل تحلیلی در ترم‌های توابع بسل را برای جریان قالبی[۱۰] به‌دست آورد و نیز یک مجموعه حل برای جریان کاملاً بی‌حرکت ثابت را برای جابه‌جایی در یک لوله استوانه‌ای با دمای دیواره ثابت به‌دست آورد. مطالعه جریان متلاطم

---

۱. Sparraw
۲. Bromle
۳. Saunders
۴. Elenbaas
۵. Ostrach
۶. Kroujilines
۷. Poidon
۸. Oberbeck
۹. Lorenz
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 به کار 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 به طور 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 زیر گروه‌های 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 ۱۹۶۰-۱۹۳۰ 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

---

۱. Nusselt

۲. Dadly

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، "مفهوم 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 Devision, 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, Viscouo Fluid Flow, McGraw-Hill, 1974.
12. H. Schlichtling, Boundary Layer Theory, 6th ed., McGraw-Hill, New York, 1968.

(تاریخ دریافت مقاله: ۷۹/۱۱/۱۰)

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

پیوست «الف»

جدول اسامی و اختراعات در تاریخچه انتقال حرارت

اسم و اختراع	سال
دماسنج هوایی گالیله	۱۵۹۷
Sanctorius، اولین دماسنج طبی	۱۶۰۹
Drebbel، دماسنج الکلی	۱۶۲۰
Torricelli، اندازه گیری فشار خلاء	۱۶۴۳
Kircher، دماسنج جیوه‌ای	
Pascal، اندازه گیری تغییرات فشار با ارتفاع	۱۶۴۸
Boyle، قانون بویل (تغییرات همدای گاز)	۱۶۶۰
Newton، قانون ویسکوزیته	۱۶۸۷
قانون سرمایش نیوتن	۱۷۰۱
Amontons، تغییر حجم ثابت گاز	۱۷۰۲
Amontons، مبنای جوش آب به عنوان مبنای ثابت دماسنجی	۱۷۰۳
Fahrenheit، مقیاس دماسنجی، انبساط جیوه، مایع متراکم آب و نقاط ثابت آن	۱۷۱۴
Celsius، مقیاس سانتیگراد، دستورالعمل کالیبره کردن	۱۷۴۲
Leidenfrost، جوش	۱۷۵۶
Black، جداسازی مفاهم گرما، دما، گرماسنجی، گرمای نهان، جداسازی سه پدیده انتقال حرارت (تشعشع، 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 برتولی	۱۷۸۳

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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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/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، تغییرفاز و کریستال‌ها
Microelectronic heat transfer	انتقال حرارت خردالکترونیک
Materials processing	فرایند مواد
Miscellaneous studies	مطالعات متفرقه

2. BOUNDARY LAYERS AND EXTERNAL FLOWS

(لایه‌های مرزی و جریان‌های بیرونی)

External effects	اثرهای خارجی
Geometric effects	اثرهای هندسی

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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 اندازه گیری

3. CHANNEL FLOW

(جریان در کانال‌ها)

Straight-walled ducts	کانال با دیوار مستقیم
Irregular geometries	هندسه‌های غیرمتداول
Entrance effects	اثرهای ناحیه ورودی
Finnes 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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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	انتقال حرارت در جریان‌های بیرونی
Packed beds	انباشته شده
Porous layers and enclosures	لایه‌ها و محفظه‌های متخلخل
Couples heat and mass transfer	ترکیب انتقال حرارت و جرم
Miscellaneous studies	مطالعات متفرقه

6. EXPERIMENTAL TECHINIQUES AND INSTRUMENTATION

(تکنیک‌های اندازه گیری و ابزار)

Heat transfer measurments	اندازه گیری انتقال حرارت
Temperature measurements	اندازه گیری دما
Velocity measurments	اندازه گیری سرعت
Thermophysical properties	خواص گرمایی فیزیکی
Miscellaneous methods	موضوعات متفرقه

7. CONVECTION FROM ROTATING SURFACES

(جابه‌جایی از سطوح دوار)

Rotating disks	دیسک‌های دوار
Rotating channels	کانال‌های دوار
Enclosures	محفظه‌ها
Cyclinders, spheres, bodies of revolution	استوانه‌ها، کره‌ها و اجسام مدور
Miscellaneous	متفرقه

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

8. COMBINED HEAT AND MASS TRANSFER

(ترکیب انتقال حرارت و جرم)

Ablation - transportation	تصعید و انتقال
Film cooling	سرمایش لایه‌ای

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

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. CHAGNE 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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

Ice formation in porous materials including soils and foods

تشکیل یخ در مواد متخلخل از جمله خاک و غذا

Food

غذا

Soil, snow and seawater ice

خاک، برف و یخ دریا

Miscellaneous

متفرقه

Contact melting

ذوب تماسی

Melting and melt flows

ذوب و جریان مواد مذاب

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

Matal solidification

انجماد فلزات

Crystal growth from melt

رشد کریستال‌ها در ماده ذوب

Casting

ریخته گری

Splat cooling

سرمایش پاششی

Miscellaneous

متفرقه

12. RADIATIVE HEAT TRANSFER

(انتقال حرارت تشعشع)

Influence of geometry

اثر شکل و هندسه

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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 eauations — حل معادلات جریان

Other studies — سایر مطالعات

14. TRANSPORT PROPERTIES

(ویژگی‌های انتقال)

Thermal conductivity and thermal diffustivity — 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 — ترموسیفون

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)

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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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 MAGNETOHYDORYNAMICS

(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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

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

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی