بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مکانیک

بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر مقدار انتقال حرارت تابشی و جابجایی در سیستم گرمایش رادیاتور

استاد راهنما

دکترمصطفی رحیمی

توسط

عباس نجف‌زاده خسروشاهی

دانشگاه محقق اردبیلی

زمستان ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مکانیک

بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر مقدار انتقال حرارت تابشی و جابجایی در سیستم گرمایش رادیاتور

استاد راهنما

دکترمصطفی رحیمی

توسط

عباس نجف‌زاده خسروشاهی

دانشگاه محقق اردبیلی

زمستان ۱۳۸۹

تقدیم

به پدر و مادر عزیزم به پاس
مهربانی‌ها، فداکاری‌ها، مراقبت‌ها
و تلاش‌های خستگی ناپذیرشان در راه موفقیتم.

با تشکر از استاد گرانقدر، جناب دکتر مصطفی رحیمی که با راهنمایی‌ها و نظرات خود در مورد نحوه انجام آزمایشات و همچنین ایجاد شرایط کاری مناسب در طی کلیه مراحل انجام این پروژه، اینجانب را در انجام این مهم یاری کردند.

نام خانوادگی دانشجو: نجف‌زاده خسروشاهی **نام: عباس**
عنوان پایان نامه: بررسی تاثیر پارامترهای مختلف بر مقدار انتقال حرارت تابشی و جابجایی در سیستم گرمایش رادیاتور
استاد راهنما: دکتر مصطفی رحیمی
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** تبدیل انرژی **دانشگاه:** محقق اردبیلی **دانشکده:** فنی ومهندسی **تاریخ فارغ التحصیلی**: ۸۹/۱۱/۰۳ **تعداد صفحه:** ۸۰

واژه‌های کلیدی:
رادیاتور، بخاری گازسوز، تشعشع خالص، آسایش حرارتی

چکیده:
رادیاتورها و بخاریهای گازسوز پر کاربردترین تجهیزات گرمایشی در ساختمانهای عمومی و منازل می‌باشد. در این تحقیق نرخ انتقال حرارت تابشی سطح به همراه انتقال حرارت هدایتی و جابجایی طبیعی در یک اتاقک مدل که توسط سیستم گرمایش با رادیاتور و با بخاری گازسوز گرم می شود، به روش تجربی و تئوری مورد ارزیابی قرار گرفته است. برای این منظور اتاقکی با ابعاد ۲/۴×۲/۴×۲/۴ متر مکعب ساخته شد و پس از عایقکاری و نصب سیستم گرمایش برای این اتاقک، آزمایشات و اندازه گیری های لازم انجام شد. از روش تشعشع خالص برای محاسبه تبادل انتقال حرارت تابشی بین سطوح اتاقک استفاده گردید. این روش از فرضیات سطوح مات، دیفیوز و خاکستری و همچنین فرض محیط غیر موثر در تابش و شار تابشی و دمای یکنواخت سطوح المان ها استفاده می کند. ضرایب دید در تابش با استفاده از روابط تاثیر متقابل و انتگرال گیری عددی در مختصات اتاقک مدل بدست می آیند. در این روش به دمای سطوح داخلی و خارجی اتاقک جهت تعیین انتقال حرارت تابشی نیاز است که برای این کار از تعداد زیادی ترموکوپل به همراه دیتالاگر برای ثبت دماهای داخلی اتاقک و همچنین از یک ترمومتر لیزری جهت اندازه گیری دمای سطوح خارجی اتاقک استفاده شده است. در روش تشعشع خالص، ضرایب دید و همینطور دماهای اندازه گیری شده، برای تعیین انتقال حرارت تابشی لازم است. محاسبات ضرایب دید در محیط برنامه نویسی فرترن انجام شد. به این ترتیب با استفاده از روش تشعشع خالص، مقدار انتقال حرارت تابشی محاسبه شده و با کمک قانون انتقال حرارت هدایتی (قانون فوریه)، نرخ انتقال حرارت هدایتی نیز محاسبه و در نهایت مقدار انتقال حرارت جابجایی نیز تعیین گردیده است. نتایج نشان داد که در سیستم گرمایش با رادیاتور در حدود ۳۵ درصد از انتقال حرارت از رادیاتور و در سیستم گرمایش با بخاری گازسوز نیز در حدود ۳۵ درصد از انتقال حرارت بصورت انتقال حرارت تابشی است. انتقال حرارت به دیواره‌های جانبی و سقف در هر دو سیستم گرمایش عمدتاً بر اساس جابجایی است، ولی انتقال حرارت به کف از طریق تابش صورت می‌گیرد.

فهرست ..... صفحه

فصل اول: مقدمه و مروری بر تحقیقات گذشته ۱

مقدمه ۲

۱-۱- مزایای انتقال حرارت به طریق تابش نسبت به جابجایی در سیستمهای گرمایشی ۵

۱-۲- انواع انتقال گرما ۷

۱-۲-۱- انتقال گرما به طریق هدایت ۷

۱-۲-۲- انتقال گرما به طریق جابجایی ۹

۱-۲-۳- انتقال گرما به طریق تابش ۱۱
۱-۳- مروری بر مطالعات انجام شده ۱۳
۱-۴- تعریف و ضرورت تحقیق حاضر ۱۵

فصل دوم: مدل تجربی و مراحل انجام آزمایشات ۱۷

مقدمه ۱۸
۲-۱- مراحل ساخت و تکمیل اتاقک ۱۸
۲-۱-۱- ساخت اتاقک مدل ۱۸
۲-۱-۲- عایق بندی اتاقک ۱۸
۲-۱-۳- یکنواخت سازی اتاقک ۱۹
۲-۲- سیستمهای گرمایشی ۱۹
۲-۲-۱- رادیاتور برقی ۱۹
۲-۲-۲- بخاری گازسوز ۲۰
۲-۳- المان بندی اتاقک ۲۱
۲-۳-۱- نصب ترموکوپل‌ها ۲۴
۲-۴- وسایل اندازه‌گیری ۲۴
۲-۴-۱- اندازه گیری دما ۲۵
۲-۴-۲- اندازه‌گیری توان رادیاتور برقی ۲۶
۲-۴-۳- اندازه‌گیری توان بخاری گازسوز ۲۶
۲-۵- نحوه‌ی انجام آزمایش ۲۷
۲-۶- تعیین ضریب هدایت حرارتی دیواره ها ۲۷
۲-۷- روش تابش خالص ۳۰
۲-۷-۱- تعیین ضرایب دید ۳۳
۲-۷-۲-مراحل حل معادلات ۳۸
۲-۷-۳- محاسبه هدایت و جابجایی ۳۹

فصل سوم: نتایج ۴۱
مقدمه ۴۲
۳-۱- نتایج مربوط به سیستم گرمایش رادیاتور ۴۲
۳-۱-۱- کانتور دمایی دیواره های داخلی و خارجی ۴۲
۳-۱-۲- توزیع دمای هوای داخل اتاقک ۴۸
۳-۱-۳- نرخ انتقال حرارت هدایتی دیواره‌ها ۴۹
۳-۱-۴- توزیع دمای سطح رادیاتور ۵۱
۳-۱-۵- نرخ انتقال حرارت هدایتی، تابشی و جابجایی ۵۳
۳-۲- نتایج مربوط به سیستم گرمایش بخاری گازسوز ۵۸
۳-۲-۱- کانتور دمایی دیواره های داخلی و خارجی ۵۸
۳-۲-۲- توزیع دمای هوای داخل اتاقک ۶۲
۳-۲-۳- نرخ انتقال حرارت هدایتی دیواره‌ها ۶۲
۳-۲-۴- توزیع دمای سطح بخاری گازسوز ۶۵
۳-۲-۵- نرخ انتقال حرارت هدایتی، تابشی و جابجایی ۶۷
۳-۳- مقایسه سیستم‌های گرمایش رادیاتور و بخاری گازسوز ۷۰
۳-۳-۱- مقایسه توزیع دمای هوای داخل اتاق دو سیستم ۷۱
۳-۳-۲- مقایسه انتقال حرارت تابشی دو سیستم ۷۲
۳-۴- بحث در میزان خطاها ۷۳

فصل چهارم: نتایج تحقیق و پیشنهادات ۷۴
۴-۱- نتایج تحقیق ۷۵
۴-۲- پیشنهادات برای کارهای آتی ۷۶

منابع ۷۷

مقدمه

با توجه به روند رو به رشد جمعیت جهان، عواملی نظیر نیاز به آسایش، حرکت و ارتباطات، ساز و کارها و فناوری‌هایی که پاسخگوی خواسته‌های این جمعیت رو به افـزایش باشـد، تقاضـای روزافـزون انـرژی و انگیزه‌های تامین این تقاضا را به دنبال دارد. از سوی دیگر، مصـرف پرشـتاب و بـی رویـه انـرژی و اثـرات مخرب زیست محیطی آن و وابستگی شدید زندگی بشر به منابع انرژی و همچنین آگـاهی از محـدودیت منابع انرژی در دنیا، دولت‌مردان و محققان را به تلاش در جهت یافتن راه‌کارهـایی بـرای مهـار مصـرف و بالابردن بهره‌وری انرژی و دستیابی به انرژی‌های نو واداشته است و باعث شده است که امروزه به موضـوع استفاده بهینه از منابع انرژی توجه بیشتری شود. منظور از بهینه سازی مصرف انـرژی، انتخـاب الگوهـا و اتخاذ و بکارگیری روش‌ها و سیاست‌هایی در جهت مصرف درست انرژی است، کـه از نقطـه نظـر اقتصـاد ملی مطلوب باشد و استمرار وجود و دوام انرژی و ادامه حیات و حرکت را تضمین کند. در ایـن چـارچوب تعیین سهم انرژی در سبد انرژی هر جامعه با توجه به امکانات درازمدت آن جامعه، همچنـین بکـارگیری پربازده‌ترین شیوه استفاده از آن‌ها که متضمن کاهش تخریب منابع انرژی باشد و نیز کاهش تاثیرات سوء ناشی از استفاده ناصحیح از انرژی بر عوامل دیگر حیات و محیط زیست، نه تنها متضمن استمرار حیات و توسعه پایدار جامعه است، بلکه منجر به بقاء انرژی برای همگان و نسل‌های آتـی و مـانعی بـرای تولیـد و گسترش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از مصرف نادرست انرژی خواهد بـود. بـدون تردیـد در چنـین شرایطی هر اقدامی در راستای ارتقاء رشد و فرهنگ مصرف بهینه انرژی، گامی در جهت حفظ سرمایه‌ها و ذخائر ملی است که فرد فردمان در هر حرفه و تخصصی، مسئول و موظف به حفظ و حراسـت از آن بـرای نسل‌های آتی هستیم.

با توجه به این نکته که بخش اعظمی از مصرف سالیانه انرژی در کشور مربـوط بـه بخـش سـاختمان است، لذا شناسـایی راهکـارهـای لازم در جهـت کـاهش مصـرف انـرژی در سـاختمان و بهبـود بـازدهی

سیستم‌های گرمایش و سرمایش ساختمان‌ها از اهمیت بسزایی برخوردار است. ایجاد محیطی سالم و مطبوع برای زندگی در فصول مختلف سال از دیر زمان مورد توجه بشر بوده است. یکی از دستاوردهای مهم علوم و تکنولوژی جدید، استفاده از سیستم‌های تهویه مطبوع جهت تامین آسایش حرارتی است. پیشرفت‌های علمی و تکنولوژی‌های جدید منجر به این شد که انسان بیشتر وقت خود را در محیط‌های بسته مانند منازل مسکونی، ادارات، کارخانجات و وسایل حمل و نقل بگذراند. لذا هر روز بر لزوم استفاده از سیستم‌های گرمایش و سرمایشی جهت ایجاد محیطی سالم و مطبوع در این محیط‌های بسته افزوده شد. در این میان آن‌چه را که در هر شرایطی نباید از نظر دور داشت، رعایت کامل مسائل فنی و اقتصادی است، بطوریکه با سرمایه‌گذاری هرچه کمتر و با توجه به وضعیت اقلیمی محل و سایر عوامل موثر بتوان شرایط سالم و مطبوع را در ساختمان فراهم نمود. با آغاز بحث صرفه جویی در مصرف انرژی، پیشرفت-های زیادی در این خصوص بوجود آمد. مثلا عایقکاری ساختمان‌ها متحول گردید. اما مشکلاتی از جمله کاهش کیفیت هوای داخل هم بوجود آمد. در حقیقت صرفه جویی در مصرف انرژی با ساختمان‌هایی با هوای آلوده معنی شد. بحث صرفه جویی در مصرف انرژی و آسایش حرارتی اغلب در تضاد با یکدیگر عمل می‌کنند. به عبارت دیگر معمولا بهبود شرایط آسایش حرارتی در ساختمان‌ها با افزایش مصرف انرژی همراه است و بالعکس. لذا لازم است عملکرد سیستم‌های تهویه مطبوع از نظر مصرف انرژی، آسایش حرارتی، شرایط اقلیمی و آب و هوای محل و غیره مورد بررسی قرار گیرد. بررسی‌ها و تحقیقات انجام شده در زمینه آسایش حرارتی، با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی ایران و فرهنگ و آداب و رسوم منطقه‌ای، بیانگر این نکته است که در ایران نیاز به سیستم‌های گرمایشی به مراتب بیشتر از سیستم‌های سرمایشی است (امیدوار،۱۳۸۳).

اولین شخصی که سیستم گرمایش آبگرم مرکزی را ابداع نمود تریواله سوئدی در سال ۱۷۱۶ میلادی بود. در سال ۱۷۷۰ جیمزوات برای اولین بار از رادیاتورهای چند تکه که با بخار آب، گرم می‌شد برای گرمایش استفاده نمود. این سیستم گرمایی تکامل جدی یافت تا آن که در سال ۱۸۳۱، پرکنیز سیستم کامل گرمایش با آب گرم را که مجهز به مخزن انبساط بود را به نام خود به ثبت رساند. کاملترین سیستم گرمایش آب گرم که شباهت زیادی با سیستم های متداول امروزی نیز دارد در سال ۱۸۳۳ توسط مهندس انگلیسی به نام پالکو ابداع گردید. از سال ۱۹۵۰ که پمپهای آبگردان وارد سیستم های گرمایشی گردید، رویکرد عمومی مردم به استفاده از شوفاژ به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافت(دوره تاسیسات، جلد۲، گرمایش).

رادیاتورها و بخاریهای گازسوز پر کاربردترین تجهیزات گرمایشی در ساختمانهای عمومی و منازل می-باشد. فرض می‌کنیم اتاقی داریم که سیستم گرمایش آن یک رادیاتور است. انتقال حرارت در این اتاق به دو شیوه جابجایی طبیعی و تابش صورت می‌گیرد. یک حساب سر انگشتی نشان می‌دهد که معمولاً رادیاتورها ۳۰ درصد گرمای خود را از طریق تابش و مابقی آن‌را از طریق جابجایی به هوای اتاق پس می-دهد(دوره تاسیسات، جلد۲، گرمایش). هر کدام از این شیوه‌های انتقال حرارت محاسن و معایبی دارند.

در انتقال حرارت به طریقه جابجایی در ابتدا هوای اطراف رادیاتور گرم می‌شود. سپس در اثر گرم شدن، چگالی آن کاهش یافته و به سمت بالا حرکت می‌کند. لذا در این نوع انتقال حرارت همواره گرادیان دمای نامطلوب وجود دارد. که یک عیب محسوب می‌شود. در حقیقت در این شیوه انتقال حرارت به جای اینکه افراد و اجسام گرم شوند هوا گرم می‌شود. از دیگر معایب این شیوه، جابجایی گرد و غبار به همراه هوا می‌باشد. که در مدت زمان طولانی باعث تیره‌تر شدن دیوارهای بالای رادیاتور می‌شود. همچنین گرد و غبار در هوا برای تنفس افرادی که نسبت به این مواد حساسیت دارند، مضر است.

انتقال حرارت به شیوه تابش این عیوب را ندارد. و دلیل آن این است که در این شیوه افراد و سطوح اجسام گرم می‌شوند. لذا اثری از گرادیان دمایی نامطلوب نیست. در نتیجه در سیستمهای گرمایش هر چقدر سهم تابش افزایش یابد، درجه آسایش نیز بیشتر می‌شود. در حقیقت مولفه‌ی تابش در سیستم-های گرمایشی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. و در سیستم‌های گرمایش متداول و سنتی مانند بخاری، بیشتر انتقال حرارت از طریق جابجایی و گرم کردن هوا صورت می‌گیرد و چون هوای گرم، سبک شده و به سمت بالا حرکت می‌کند، همواره با تجمع حرارت در نزدیک سقف، یعنی جایی که هیچ استفاده‌ای از آن نمی‌کنیم، مواجه هستیم. درواقع در این نوع از سیستم‌های گرمایشی باید آنقدر فضای بالای سر را گرم کنیم تا مقداری از حرارت آن به پایین منتقل شود.

۱-۱- مزایای انتقال حرارت به طریق تابش نسبت به جابجایی در سیستمهای گرمایشی

با توجه به اینکه بیشترین تبادل حرارت بدن با محیط خارج از طریق تابش انجام می‌شود، لذا در این بخش به بررسی مزایا و معایب انتقال حرارت به طریق تابش و جابجایی میپردازیم. بر اساس تحقیقات انجام شده از جمله (مقیمان، ۱۳۸۵)، مزایای مهم انتقال حرارت به شیوه تابش عبارتند از:

۱- فراهم آوردن بهترین شرایط تبادل حرارت: تحقیقات نشان داده است که بر خلاف نظر عمومی، تابش بیشترین نقش را در گرمایش و سرمایش پوست بدن دارد. انتقال حرارت از طریق تابش به خاطر خاصیت ذاتی خود قادر به گرم نمودن یکنواخت محیط بوده و معمولاً احساس آرامش را در دماهای پایین‌تری فراهم می‌آورد. بر اساس تعریف اشره[1] بهترین سیستم تهویه مطبوع سیستمی است که شخص احساس سرد یا گرم شدن به صورت قابل ملاحظه‌ای نداشته باشد. این حالت فقط توسط سیستم تابشی امکان‌پذیر است. زیرا چنانچه گفته شد میزان تبادل حرارت بدن از طریق تابش بیشتر از سایر روش‌ها است. بنابراین در هر فصل سرما و گرما چنانچه سطوح داخلی اتاق در دمای مطلوب قرار گیرد، راحتی مطلوبی بدون وابستگی زیاد به دمای هوای اتاق،حاصل می‌شود. با مقایسه پروفیل-های دمای بدست آمده در امتداد ارتفاع اتاق هنگام سیستم‌های مختلف گرمایش شامل تابش از کف، تابش از سقف، سیستم رادیاتور و استفاده از بخاری و نیز حالت ایده‌آل مشاهده شده‌است که سیستم-های تابشی شرایطی بسیار نزدیک به حالت ایده‌آل فراهم می‌کنند. مقایسه پروفیل‌های دمایی حاصل از این چهار روش نشان می‌دهد که بهترین حالت به وسیله سیستم تابش از کف و بدترین شرایط در گرمایش با بخاری به دست می‌آید.

۲- روش تابش، احساس گرمای بیشتری در دمای پایین‌تر اتاق فراهم می‌کند. که این امر به نوبه خود باعث صرفه جویی در مصرف انرژی می‌شود.

۳- در کارخانه‌ها دمای کمتر هوا احساس تازه بودن هوا را افزایش می‌دهد، و اعتقاد بر این است که در این شرایط تولید محصول افزایش پیدا می‌کند.

۴- جابجایی و جریان هوا در اتاق به حداقل می رسد. عدم حرکت هوا، پخش گرد وغبار وآلودگی‌های میکروبی را به حداقل میرساند. این موضوع در مکان‌های عمومی مانند مدارس و سالن اجتماعات و نیز فضاهایی که بایستی عاری از گرد و غبار باشد، مهم است.

۵- در سیستمهای گرمایشی هر چقدر میزان تابش نسبت به جابجایی بیشتر باشد دمای اتاق در مقایسه با سایر سیستم‌ها پایین‌تر است، بنابراین اتلاف انرژی به علت هدایت و نفوذ هوا از درزها و شکاف‌های اطراف درب و پنجره‌ها کمتر است.

مقدار انرژی تابشی مبادله شده در سیستم‌ها بستگی به عوامل زیر در اجسام صادر کننده و دریافت کننده دارد:

1 - ASHRAE

۱. دما

۲. ضریب جذب

۳. ضریب صدور (انعکاس)

۴. ضریب شکل

در سال‌های اخیر طراحان سیستم‌های تهویه مطبوع برای استفاده موثر از این پدیده تبادل گرما، روش-های جدیدی را ابداع نموده و در این زمینه پیشرفت‌های قابل توجهی به دست آمده است. سیستم‌های گرمایش و سرمایش تابشی با مشخصاتی مانند داشتن سطح وسیع و دمای سطح پایین توانسته‌اند طعم مطبوع گرمایش را توسط تابش به انسان‌ها حتی در خانه‌هایشان و دور از آفتاب بچشانند. امروزه این سیستم‌ها از محبوب‌ترین روش‌های گرمایش در اروپا می‌باشد و طرفداران زیادی نیز در آمریکای شمالی پیدا کرده است. کارایی این سیستم‌ها نه تنها از نظر تامین شرایط آسایش طبیعی بلکه از نظر مسائل اقتصادی، فنی و حتی روانشناسی برای ایجاد آرامش و آسایش به اثبات رسیده است. ایجاد شرایط آسایش حرارتی مطلوب و مصرف کم انرژی باعث شده است که استفاده از سیستم‌های گرمایش تابشی روز به روز بیشتر مورد توجه قرار گیرد.

۱-۲- انواع انتقال گرما

بطور کلی گرما به سه طریق هدایت، جابجایی و تابش انتقال می‌یابد که در ادامه توضیحاتی در مورد این سه نوع انتقال گرما داده می‌شود.

۱-۲-۱- انتقال گرما به طریق هدایت

تجربه نشان داده است که در صورت وجود گرادیان دما در جسم، انتقال گرمایی از ناحیه‌ی دما بالا به ناحیه‌ی دما پایین وجود دارد. می‌گوییم انرژی به طریق هدایت انتقال یافته و آهنگ انتقال گرما به ازای واحد مساحت متناسب است با گرادیان دمای عمودی است:

$$\frac{q}{A} \approx \frac{\partial T}{\partial x} \qquad (۱-۱)$$

با جایگزینی ثابت تناسب داریم:

$$q = -KA\frac{\partial T}{\partial x} \qquad (۱-۲)$$

که در آن:

q= آهنگ انتقال گرما

$\frac{\partial T}{\partial x}$= گرادیان دما در جهت جریان گرما

K= ضریب هدایت گرمایی ماده می‌باشد.

علامت منفی برای صدق قانون دوم ترمودینامیک است؛ بدین معنی که انتقال حرارت در جهت کاهش دما صورت می‌گیرد. معادله‌ی (۱-۲) را به یاد ریاضی-فیزیک دان فرانسوی، ژوزف فوریه، که در بررسی تحلیلی انتقال گرمای هدایتی سهم بزرگی دارد قانون فوریه‌ی هدایت گرما می‌نامند. از نظر اهمیت باید گفت که معادله‌ی (۱-۲) معادله‌ی معرف ضریب هدایت گرماست و در دستگاه واحدی که جریان گرما بر حسب وات بیان می‌شود واحد k وات بر متر درجه‌ی سانتی‌گراد است. ضریب هدایت گرمایی مواد مختلف با استفاده از اندازه‌گیری های تجربی تعیین می‌گردد. می‌توان ضریب هدایت گرمایی را بیانگر سرعت جریان گرما در ماده‌ی مشخص دانست.

با به کارگیری معادله (۱-۲) برای دیواره‌ی تخت و انتگرال گیری از آن، با فرض ثابت بودن ضریب هدایت گرمایی داریم:

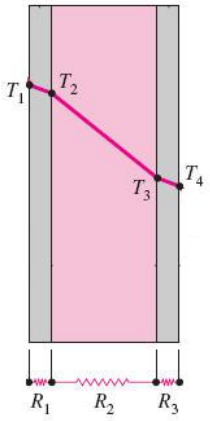
$$q = -\frac{kA}{\Delta x}(T_2 - T_1) \qquad (۳-۱)$$

برای دیواره‌های چند لایه، مثلا سه لایه (شکل۱-۱)، با توجه به تفاوت ضریب هدایت گرمایی در مصالح مختلف جریان گرما چنین می‌شود:

$$q = -k_A A\frac{T_2 - T_1}{\Delta x_A} = -k_B A\frac{T_3 - T_2}{\Delta x_B} = -k_C A\frac{T_4 - T_3}{\Delta x_C} \qquad (۴-۱)$$

توجه داریم که باید جریان گرما در کل مقاطع یکسان باشد. با حل همزمان این سه معادله، جریان گرما چنین است:

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\Delta x_A}{k_A A} + \frac{\Delta x_B}{k_B A} + \frac{\Delta x_C}{k_C A}} \qquad (۵-۱)$$



شکل(۱-۱): دیواره سه لایه

مسئله‌ی انتقال حرارت رسانایی تشابه کاملی با قانون اهم در مدار الکتریکی دارد. به طوری کـه، آهنـگ انتقال گرما را می‌توان به عنوان شدت جریان، و ترکیب ضریب هدایت گرمایی، ضخامت مصالح و مساحت را مقاومتی در مقابل این جریان فرض کرد (هولمن، ۱۳۸۱).

۱-۲-۲- انتقال گرما به طریق جابجایی

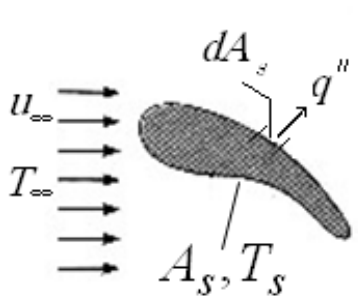
شیوه انتقال گرمای جابجایی از دو مکانیزم تشکیل می‌شود. علاوه بر حرکت تصادفی مولکولی (پخـش)، انرژی بر اثر حرکت کپه‌ای (ماکروسکوپیک) سیال نیز منتقل می‌شود. انتقال گرمای جابجایی را بر حسـب ماهیت جریان می‌توان رده بندی کرد. وقتی جریان توسط وسایل خارجی از قبیل فن، پمـپ یـا بـادهـای اتمسفریک به وجود آید جابجایی اجباری داریم. در مقابل در جریان آزاد (یا طبیعی) جریان بر اثـر نیـرو-های شناوری به وجود می‌آید؛ این نیروها از اختلاف چگالی ناشی از تغییرات دما در سیال به وجـود مـی-آیند. به این صورت که دمای هوایی که با نقاط گرم تماس دارد افزایش می‌یابد و از این رو چگالی آن کـم می‌شود. چون این هوا از هوای محیط سبک‌تر است، نیروهای شناوری حرکتی عمودی را ایجاد مـی‌کننـد که به موجب آن هوای گرم بالا می‌رود و جریان هوای سردتر محیط جایگزین آن می‌شود.

شکل (۱-۲) سیالی با سرعت u_∞ و دمای T_∞ را نشان می‌دهد که روی سطحی با شـکل اختیـاری و بـا مساحت A_s جریان دارد. فرض می‌شود که سطح در دمای یکنواخت T_s است، به طـوری کـه $T_s \neq T_\infty$، در این صورت انتقال حرارت جابجایی روی می‌دهد. شار گرمای محلی q'' را به صورت زیر می‌تـوان بیـان کرد:

$$q'' = h(T_s - T_\infty) \qquad (۱-۶)$$

که در آن:

h، ضریب جابجایی محلی می‌باشد.



شکل(۱-۲): انتقال حرارت جابجایی محلی سطح با شکل اختیاری

به علت تغییر شرایط جریان از یک نقطه به نقطه دیگر، q'' و h در امتداد سطح تغییر می‌کنند. آهنگ کل انتقال حرارت q را با انتگرال گیری شار محلی روی تمام سطح می‌توان به دست آورد:

$$q = \int_{A_s} q'' \, dA_s = (T_s - T_\infty) \int_{A_s} h \, dA_s \qquad (۱-۷)$$

با تعریف ضریب جابجایی متوسط $\bar{h}$ برای تمام سطح آهنگ انتقال حرارت کل را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

$$q = \bar{h} A_s (T_s - T_\infty) \qquad (۱-۸)$$

با مساوی قرار دادن معادله‌های (۱-۷) و (۱-۸) نتیجه می‌شود که ضرایب جابجایی متوسط و محلی دارای رابطه‌ی زیر هستند:

$$\bar{h} = \frac{1}{A_s} \int_{A_s} h \, dA \qquad (۱-۹)$$

شار محلی یا آهنگ انتقال حرارت کل در هر مسئله جابجایی در درجه‌ی اول اهمیت است. این کمیت-ها را از معادله‌های، (۱-۶) و (۱-۸) می‌توان به دست آورد، و برای این منظور باید از ضرایب جابجایی محلی و متوسط اطلاعاتی داشته باشیم. به این دلیل است که تعیین این ضرایب به عنوان مسئله جابه-جایی تلقی می‌شود، که مسئله‌ی ساده ای هم نیست، زیرا این ضرایب علاوه بر وابستگی به چند پارامتر سیال، از قبیل چگالی، ویسکوزیته، رسانندگی گرمایی و گرمای ویژه، به هندسه‌ی سطح و شرایط جریان نیز وابسته هستند.

چون سرعت‌های جریان در جابجایی آزاد معمولا خیلی کوچکتر از سرعت‌ها در جابه‌جایی اجباری هستند، آهنگ انتقال جابه‌جایی نیز کمتر است. لذا شاید اهمیت کمتری برای فرایندهای جابجایی آزاد قائل باشیم. ولی، باید دانست در بسیاری از سیستم‌ها با انتقال گرمای ترکیبی، جابه‌جایی آزاد بیشترین مقاومت را در برابر انتقال گرما بروز می‌دهد و نقش مهمی در طراحی یا عملکرد سیستم دارد. به علاوه، اگر بخواهیم آهنگ انتقال گرما یا هزینه‌ی کار کرد به حداقل برسد، اغلب، جابجایی آزاد را بر جابجایی واداشته ترجیح می‌دهیم.

جابجایی آزاد کاربردهای فراوانی دارد. این فرآیند بر انتقال گرما از لوله‌ها و خطوط انتقال، و همچنین از وسایل الکترونیکی مختلف شدیداً تاثیر می‌گذارد. جابجایی آزاد در انتقال گرما از گرم‌کن‌های الکتریکی یا از رادیاتورها به هوای اتاق و در دفع گرما از کویل دستگاه تبرید به هوای اطراف اهمیت دارد (هولمن، ۱۳۸۱).

۱-۲-۳- انتقال گرما به طریق تابش

بر خلاف سازوکارهای هدایت و جابجایی که شامل انتقال انرژی در جسم مادی است، گرما می‌تواند در ناحیه‌ای که خلأ کامل است نیز انتقال یابد. این حالت از انتقال گرما به تابش معروف است.

ملاحظات ترمودینامیکی نشان می‌دهد که یک تابنده گرمایی ایده‌آل یا جسم سیاه، انرژی را با آهنگی متناسب با توان چهارم دمای مطلق جسم و متناسب با مساحت آن گسیل می‌دارد. بنابراین:

$$q_{rad} = \sigma A T^4 \qquad (۱-۱۰)$$

که در آن σ ثابت استفان بولتزمن می‌باشد.

معادله (۱-۱۰) به قانون استفان بولتزمن تابش گرمایی معروف است و تنها در مورد اجسام سیاه به کار می‌رود. این معادله فقط برای تابش گرمایی معتبر است. مبادله‌ی تابشی خالص بین دو سطح متناسب با اختلاف دمای مطلق به توان چهار است، یعنی:

$$\frac{q_{net}}{A} \propto \sigma.\left(T_1^4 - T_2^4\right) \qquad (۱-۱۱)$$

جسم سیاه جسمی است که طبق قانون T^4 انرژی می‌تابد. زیرا سطوح سیاه، رفتاری شبیه قطعه‌ی فلزی که با زغال سیاه شده باشد دارد. سطوح دیگر، مثل سطح براق یا صفحه‌ی فلزی صیقلی، به اندازه‌ی جسم سیاه انرژی نمی‌تابد؛ گرچه باز هم تابش کلی گسیل شده توسط این اجسام از قانون تناسب $T_۲^4$ پیروی می‌کند. برای سطوح خاکستری، که تعریف این سطوح در ادامه مشخص می‌شود، ضریب دیگری را

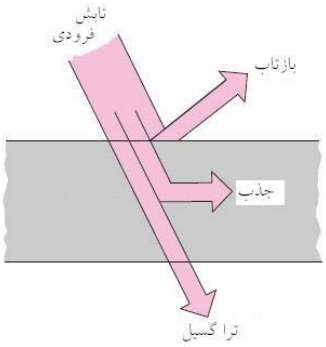
در معادله‌ی (۱-۱۱) وارد می‌کنیم که به ضریب گسیل ε معروف بوده، تابش سطح خاکستری را با تابش سطح سیاه مرتبط می‌سازد.

وقتی انرژی تابیده به سطحی مادی اصابت می‌کند، بخشی از تابش مطابق شکل (۱-۳) باز می‌تابد، بخشی جذب و بخش از آن تراگسیل می‌شود، ضریب بازتاب ρ را به صورت کسری که باز تابیده، ضریب جذب α را به صورت کسری که جذب شده و ضریب تراگسیل τ را به صورت کسری که تراگسیل شده تعریف می‌کنند. بنابراین:

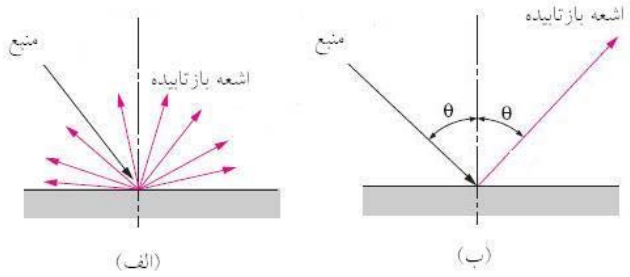
$$\rho+\alpha+\tau=1 \qquad (۱۲-۱)$$

اغلب اجسام صلب تابش را ترا گسیل نکرده، از این رو در بسیاری از مسائل کاربردی می‌توان ضریب تراگسیل را برابر صفر گرفت. پس:

$$\rho+\alpha=1 \qquad (۱۳-۱)$$



شکل (۱-۳): طرح نشان دهنده آثار تابش فرودی



شکل (۱-۴): (الف) بازتاب پخشنده (ب) بازتاب آیینه‌ای

وقتی تابش به سطحی برخورد می‌کند، دو نوع پدیده‌ی بازتاب را می‌توان مشاهده کرد. چنانچه زاویه‌ی برخورد برابر زاویه‌ی بازتاب باشد، بازتاب را آیینه‌ای می‌نامند. و اگر پرتو برخوردی، پس از بازتاب در تمام