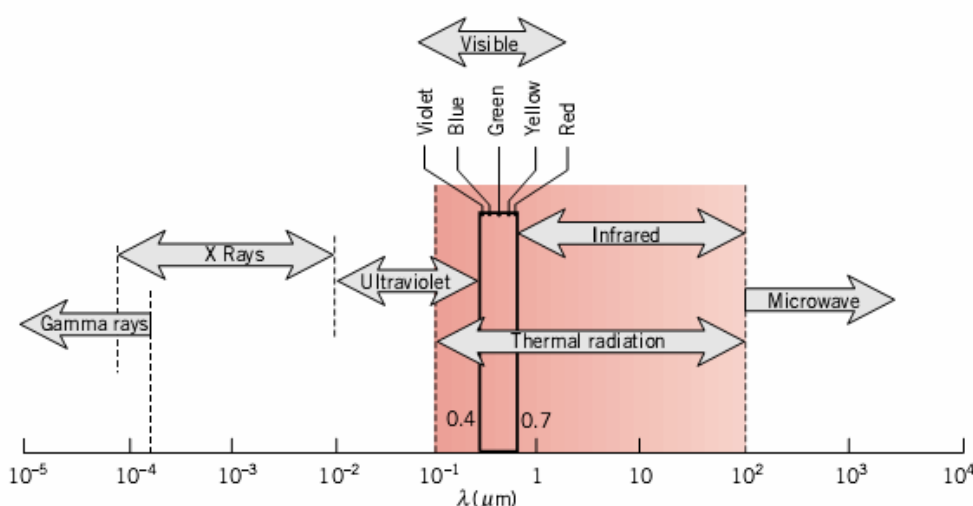

فصل ششم

انتقال حرارت در اثر تشعشع

۶-۱ مکانیزم فیزیکی

انواع مختلف تشعشع الکترومغناطیسی وجود دارد که تشعشع حرارتی فقط یک نمونه از آن است. بدون توجه به انواع تشعشع می‌گوییم که سرعت انتشار آن $3 \times 10^8 \text{ Cm/s}$ است. این سرعت مساوی با حاصلضرب طول موج و فرکانس تشعشع است.



شکل ۶-۱ طیف الکترومغناطیسی

$$C = \lambda \nu \quad \text{طول موج } \lambda \quad \text{فرکانس } \nu \quad \text{سرعت نور } C$$

واحد λ ممکن است سانتیمتر یا انگسترم ($1 \text{ \AA} = 10^{-8} \text{ Cm}$) یا میکرومتر $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$ باشد. یک قسمت طیف (اسپکتروم) الکترومغناطیسی در شکل (۶-۱) نشان داده شده است. تشعشع حرارتی بین محدوده 0.1 تا 0.35 میکرومتر را دارد. در حالیکه نور قابل رؤیت این قسمت در شکل خیلی باریک است و حدودا بین 0.35 تا 0.75 میکرومتر است.

انتشار تشعشع حرارتی بصورت کوانتومی صورت می‌گیرد و هر کوانتم دارای انرژی زیر می‌باشد:

$$E = h \nu \quad (۶-۱)$$

که h ثابت پلانک است و مقدار آن $h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ Js}$ است.

یک تصویر حدودی فیزیک تشعشع ممکن است بوسیله در نظر گرفتن یک کوانتم نظیر یک ذره دارای انرژی، جرم و مومنتم باشد. درست نظیر آنکه برای یک مولکول گاز انجام می‌دهیم. بنابراین در مورد تشعشع باید نظیر یک فوتون گاز که ممکن است از یک جا به جای دیگر برود عمل کنیم. با استفاده از رابطه نسبی بین جرم و انرژی، رابطه جرم و مومنتم ذره می‌تواند به صورت زیر بدست آید:

$$E = mc^2 = h\nu$$

$$m = \frac{h\nu}{c^2}$$

$$\text{مومنتم} = c \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h\nu}{c}$$

اگر تشعشع را نظیر گاز بررسی کنیم اصول کوانتم ترمودینامیک آماری را می‌توان برای بدست آوردن یک معادله برای انرژی مخصوص تشعشع در واحد طول موجود نظیر زیر بدست آورد که k ثابت بولتزمن و مساوی $1.38066 \times 10^{-23} J/mol K$ است. وقتی انرژی مخصوص در تمام طول موج انتگرال گیری شود. انرژی کل جذب یا دفع شده متناسب با درجه حرارت مطلق به توان ۴ می‌باشد.

$$u_{\lambda} = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (۲-۶)$$

$$E_b = \sigma T^{-4} \quad (۳-۶)$$

معادله (۳-۶) را قانون استفان-بولتزمن می‌نامند. E_b انرژی تشعشع در واحد زمان در واحد سطح بوسیله رادیاتور ایده آل و σ ثابت استفان-بولتزمن است که مقدار آن برابر است با:

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} W/m^2 k^4$$

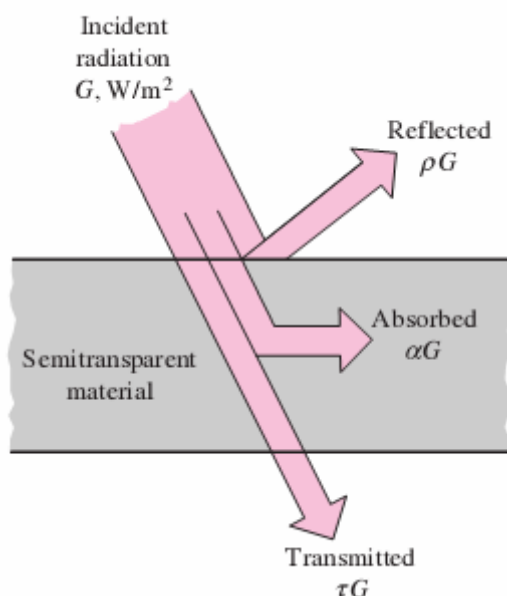
و E_b بر حسب $\frac{W}{m^2}$ و T بر حسب K درجه کلوین است.

در تحلیل ترمودینامیکی، انرژی مخصوص متناسب است با انرژی تشعشع شده از یک سطح در واحد زمان و واحد سطح.

اندیس b برای E مبین رنگ جسم سیاه است که همه انرژی را منتقل می‌کند و همچنین یک جسم سیاه همه انرژی را می‌گیرد و لذا E_b را قدرت تشعشع یک جسم سیاه می‌نامند.

در اینجا باید توجه داشت که سیاهی سطح تشعشع حرارتی می‌تواند فریب دهنده باشد. یک سطح سیاه به چشم سیاه می‌آید در صورتی که برای تشعشع حرارتی سیاه بررسی نمی‌شود. در حالیکه برف و یخ کاملاً روشن بنظر می‌رسند ولی برای طول موج بلند حرارتی سیاه بررسی می‌شوند. خیلی از رنگهای سفید اصولاً برای طول موج بلند تشعشع سیاه بحساب می‌آیند.

۲-۶ خواص تشعشع



شکل ۲-۶ طرح نشان دهنده اثرات تشعشع بر خورد کننده

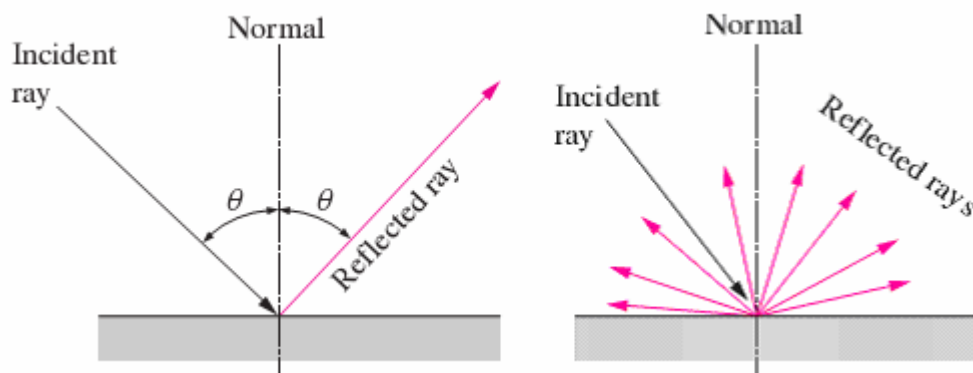
وقتی انرژی تشعشع به یک سطح ماده بر خورد میکند بخشی از آن منعکس می‌شود و بخشی از آن جذب می‌شود و مابقی از آن منتقل می‌گردد. شکل (۲-۶) که ρ را ضریب انعکاس α را ضریب جذب و τ را ضریب انتقال می‌نامیم لذا:

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

بیشتر اجسام تشعشع را منتقل نمی‌کنند، بطوریکه برای بیشتر مسایل از کار بررسی ضریب انتقال تشعشع می‌توان صرفه نظر کرد. لذا داریم:

$$\rho + \alpha = 1$$

وقتی که تشعشع به جسمی بر خورد کند دو نمونه انعکاس وجود دارد. اگر زاویه تابش مساوی زاویه انعکاس باشد انعکاس را آینه ای و اگر انعکاس پس از تشعشع در جهات مختلف صورت گیرد آنرا پراکنده می‌گویند. این دو انعکاس در شکل (۲-۶) نشان داده شده اند.

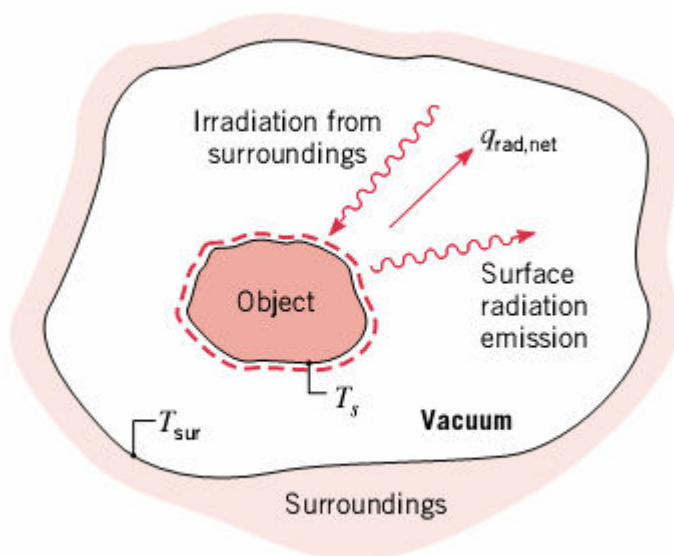


شکل ۶-۳ بیانگر انعکاس آینه‌ای و پخشی

هیچ نوع سطحی دقیقا آینه‌ای یا پراکنده نمی‌باشد. یک آینه معمولی برای نور قابل رؤیت ممکن است انعکاس آینه‌ای باشد اما برای موج تشعشع حرارتی چنین نیست و چه بسا اینکه سطح معمولی برای حالت پراکنده خیلی مناسبتر از یک سطح کاملا صیقلی باشد. همچنین یک سطح صیقلی شده برای حالت آینه‌ای از سطح زبر بهتر است. و لذا مساله سطح اجسام برای تشعشع یک بخش قابل بررسی و تحقیق است.

قدرت انتقال یا تشعشع یک جسم با E تعریف میشود، که انرژی جذب شده بوسیله جسم در واحد سطح در واحد زمان است. برای بررسی قدرت انتشار و جذب آزمایش زیر را انجام میدهیم:

فرض کنید یک جسم کاملا سیاه محصور موجود است نتیجتا همه انرژی آمده به طرف خود را جذب می‌کند. نظیر شکل (۴-۶) این سطح محصور همچنین بر حسب قانون تشعشع T^4 عمل می‌کند. فرض کنیم جریان تشعشع که به سطحی محدود میرسد q_i باشد. اکنون فرض کنید اگر درون این جسم یک جسم محدود دیگر قرار داده شود و اجازه دهیم که آن جسم تا درجه حرارت معادل جسم اولیه برسد. در حالت تعادل انرژی جذب شده باید با انرژی منتشر شده برابر باشد، در غیر این صورت یک انتقال انرژی بطرف جسم یا از جسم خواهد بود که درجه حرارت جسم را پایین یا بالا می‌برد.



شکل ۶-۴ الگوی مورد استفاده در استنتاج قانون کرشوف

در حالت تعادل میتوان نوشت:

$$EA = q_i A \alpha \quad (۵-۶)$$

اینک اگر جسم درون فضای محدود را با یک جسم هم اندازه و هم شکل ولی سیاه رنگ عوض کنیم و اجازه دهیم در همان درجه حرارت به تعادل برسد رابطه آن میشود:

$$E_b A = q_i A \quad \rho = 0 \rightarrow \alpha = 1 \quad (۶-۶)$$

چون که ضریب جذب جسم سیاه یک است، اگر معادله (۵-۶) را به (۶-۶) تقسیم کنیم می‌شود:

$$\frac{E}{E_b} = \alpha$$

و همچنین میدانیم که نسبت قدرت انتشار یک جسم به قدرت انتشار جسم سیاه در همان درجه حرارت برابر با ضریب جذب جسم است. این نسبت را نسبت انتشار جسم می‌نامند:

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b} \quad (۷-۶)$$

$$\varepsilon = \alpha \quad (۸-۶)$$

معادله (۸-۶) را مشخصه کرشوف می‌نامند. این دو ضریب جذب و انتشار را خواص جسم می‌نامند یعنی آنها نماینده کل رفتار جسم در تمام طول موج‌ها هستند.

۳-۶ جسم خاکستری

جسم معمولی کمتر انرژی منتقل میکند تا جسم سیاه که این در عمل اندازه گیری شده است. در عمل ضریب انتشار جسم با درجه حرارت و طول موج تشعشع تغییر می کند.

جسم خاکستری جسمی است که در آن ضریب پخش تکرنگ ϵ_λ مستقل از طول موج باشد. ضریب پخش تکرنگ عبارتست از نسبت توان پخش تکرنگی یک جسم به توان پخش تکرنگی جسم سیاه در همان طول موج و درجه حرارت.

$$\epsilon_\lambda = \frac{E_\lambda}{E_{b\lambda}}$$

کل ضریب انتشار یک جسم با ضریب انتشار ت رنگ آن ارتباط دارد و باید توجه داشت:

$$E = \int_0^\infty \epsilon_\lambda E_{b\lambda} d\lambda \quad \text{و} \quad E_b = \int_0^\infty E_{b\lambda} d\lambda = \sigma T^4$$

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} = \frac{\int_0^\infty \epsilon_{b\lambda} d\lambda}{\sigma T^4} \quad (۹-۶)$$

که $E_{b\lambda}$ همان قدرت یک جسم سیاه در واحد طول موج است. اگر شرایط جسم خاکستری اعمال شود $\epsilon_\lambda = \text{constnt}$ و معادله به صورت زیر تقلیل می یابد:

$$\epsilon = \epsilon_\lambda \quad (۱۰-۶)$$

ضریب انتشار اجسام مختلف بطور وسیعی با طول موج ، درجه حرارت و شرایط سطح فرق می کند. روابط تابعی برای $E_{b\lambda}$ بوسیله پلانک بدست آمده که در آن مسئله ایده کوانتم برای انرژی الکترومغناطیس مطرح شده است.

بدست آوردن رابطه از طریق ترمودینامیک آماری بیشتر رایج است و $E_{b\lambda}$ وابسته با جرم مخصوص انرژی معادله (۱۱-۶) است. از طریق

$$E_{b\lambda} = \frac{u \lambda^c}{4} \quad (۱۱-۶)$$

λ - طول موج بر حسب میکرومتر

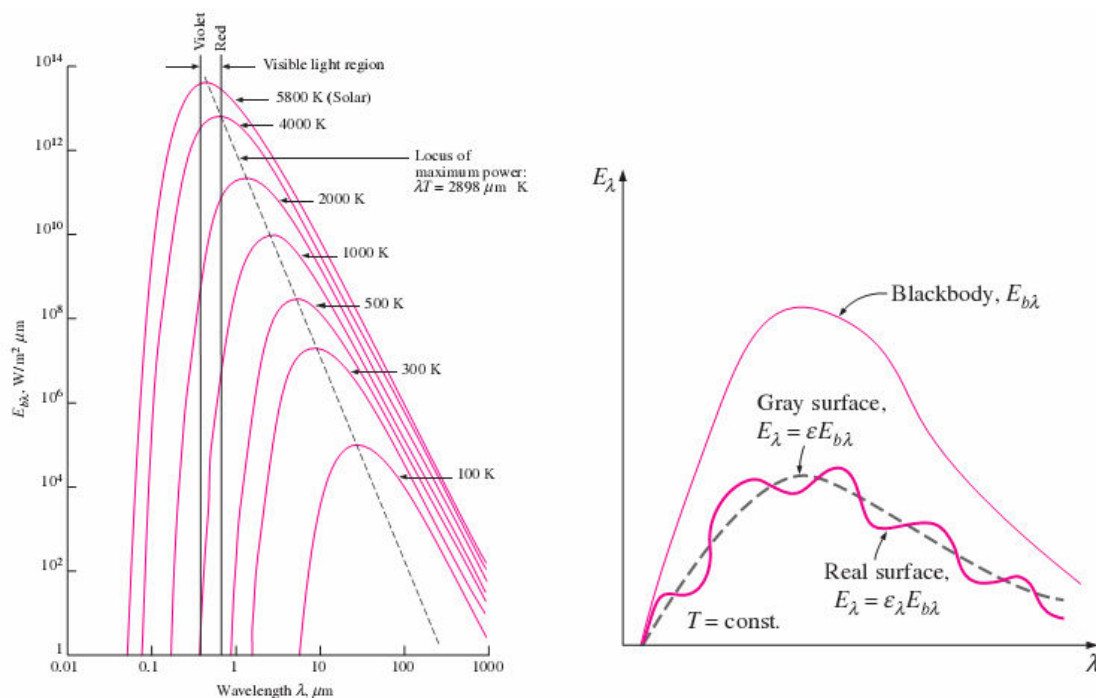
T - درجه حرارت بر حسب کلوین

$$E_{b\lambda} = \frac{c_1 \lambda^{-5}}{e^{c_2/\lambda T} - 1} \quad (۱۲-۶)$$

جائیکه:

$$C_1 = 3.743 \times 10^8 \text{ W}\mu\text{m}^4 / \text{m}^2$$

$$C_2 = 1.4387 \times 10^4 \mu\text{mK}$$



(الف) توان پخش سیاه به صورت تابعی از درجه حرارت و طول موج

(ب) مقایسه توان پخش اجسام سیاه و اجسام خاکستری ایده آل

شکل ۶-۵

در شکل (۶-۵-الف) نمودار $E_{b\lambda}$ تابعی از درجه حرارت و طول موج نشان داده شده است. توجه داشته باشید که برای درجه حرارت‌های بزرگتر قله منحنی به طول موج‌های کوتاه‌تر انتقال می‌یابد. در منحنی‌های تشعشع، این نقاط حداکثر طبق قانون جابجایی وین با یکدیگر مرتبط می‌شوند:

$$\lambda_{\max} T = 2897.6 \mu\text{mK} \quad (۱۳-۶)$$

در شکل (۶-۵-ب) تشعشع نسبی برای یک جسم سیاه در درجه حرارت 3000°F و همچنین مطابق آن برای جسم خاکستری ایده آل با ضریب انتشار 0.6 نشان داده شده است. همچنین رفتار تقریبی سطح واقعی نشان داده شده که ممکن است بطور چشمگیری با یک جسم ایده آل سیاه یا خاکستری فرق کند. برای تحلیل سطح‌ها معمولاً آنها را بعنوان جسم خاکستری در نظر می‌گیرند که ضریب انتشار آنها را بصورت میانگین حساب می‌کنند. تغییر نقطه ماکزیمم در منحنی تشعشع بیانگر تغییر رنگ بعلت گرم شدن جسم

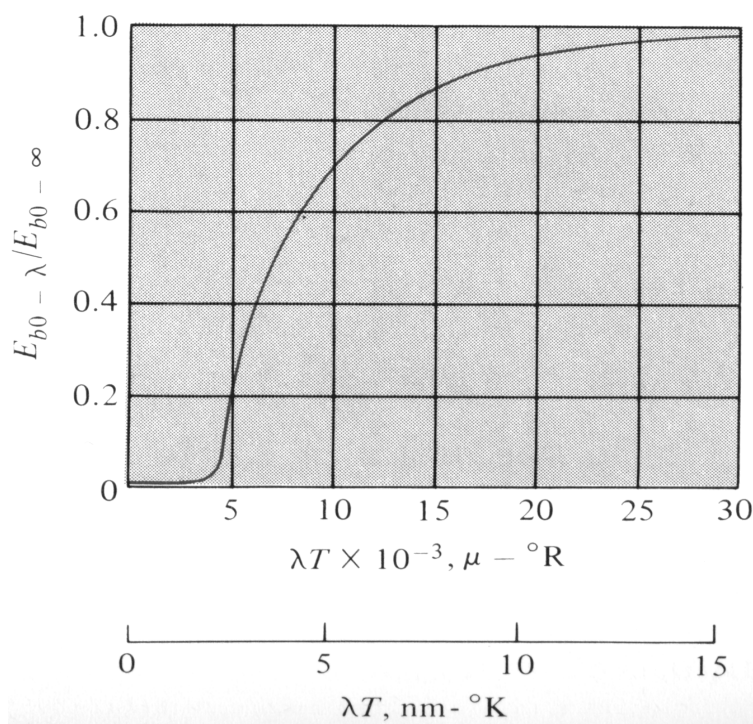
است، چون محدوده نور قابل رؤیت بین 0.3 تا 0.7 میکرومتر است فقط یک بخش کوچک از انرژی تشعشع در درجات حرارت پایین قابل مشاهده است. هرچه جسم گرم تر می گردد ماکزیمم شدت به طول موج کوتاهتر تغییر می یابد.

اولین نشانه، نور قابل رؤیت در درجه حرارت رنگهای قرمز تیره است. با زیاد تر شدن درجه حرارت رنگ سیاه به قرمز روشن تغییر می نماید و بعد به نور زرد و نهایتاً سفید می شود. جسم نیز در درجه حرارت بالاتر روشن تر است، زیرا مقدار بیش تری از تشعشع در محدوده نور قابل رؤیت است. اغلب نیازمندیم که مقدار انرژی تشعشع شده از یک جسم سیاه در یک محدوده طول موج معین را بدانیم. آن بخش از انرژی کل که بین 0 و λ تشعشع شده برابر است با :

$$\frac{E_{b0-\lambda}}{E_{b0-\infty}} = \frac{\int_0^{\lambda} E_{b\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} E_{b\lambda} d\lambda} \quad (۱۴-۶)$$

معادله (۱۴-۶) را می توان با تقسیم بر T^5 بصورت زیر نوشت:

$$\frac{E_{b\lambda}}{T^5} = \frac{C_1}{(\lambda T)^5 (e^{c_2/\lambda T} - 1)} \quad (۱۵-۶)$$



شکل ۶-۶ بخشی از تشعشع جسم سیاه در فاصله طول موج

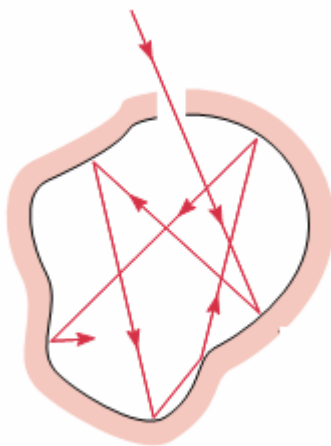
اینک برای یک درجه حرارت معین، انتگرال معادله (۶-۱۴) را می‌توان بصورت تابعی از متغیر فقط λT در آورد و نتیجه به صورت جدولی می‌تواند ثبت شود (توسط دانکل). این نسبت در معادله (۶-۱۴) در شکل (۶-۶) داده شده است. اگر انرژی تشعشع خارج شده بین طول موج‌های λ_1 و λ_2 متناسب باشد:

$$E_{b_{\lambda_1-\lambda_2}} = E_{b_{0-\infty}} \left(\frac{E_{b_{0-\lambda_2}}}{E_{b_{0-\infty}}} - \frac{E_{b_{0-\lambda_1}}}{E_{b_{0-\infty}}} \right) \quad (۶-۱۶)$$

که $E_{b_{0-\infty}}$ مقدار تشعشع پخش شده در همه طول موج‌هاست.

$$E_{b_{0-\infty}} = \sigma T^4 \quad (۶-۱۷)$$

و بوسیله انتگرال‌گیری فرمول توزیع پلانک (۶-۱۲) در همه طول موج‌ها بدست آمده است.



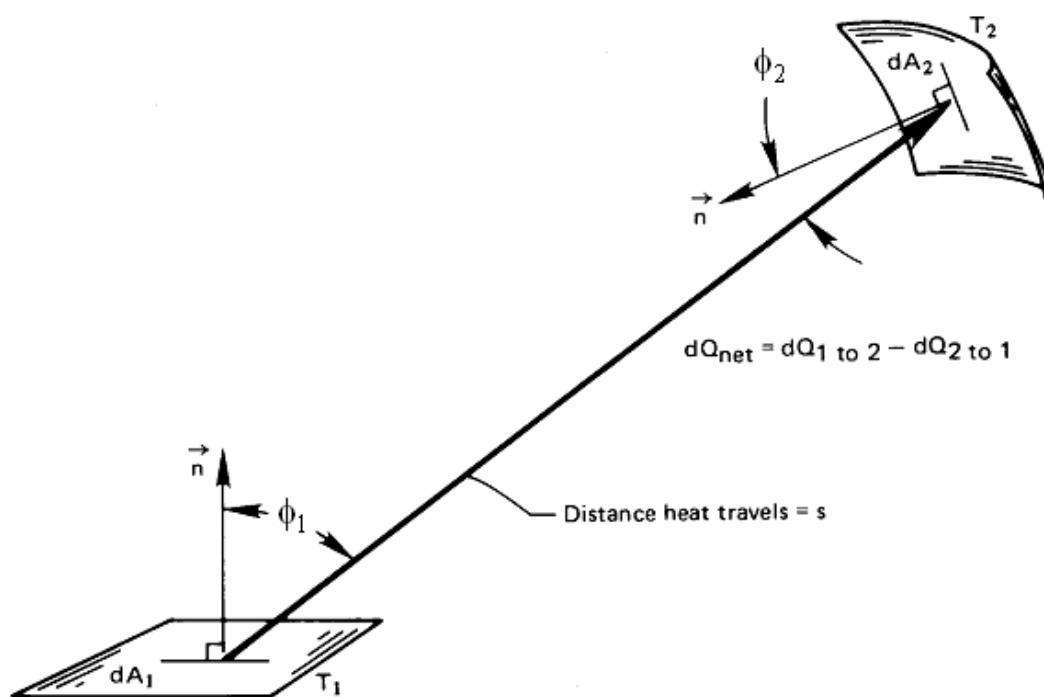
شکل ۶-۷ روش ساخت یک محفظه سیاه

اگر یک جسم مطابق شکل (۶-۷) در نظر بگیریم بطوریکه دهانه آن در مقابل خود جسم خیلی کوچک باشد. حال اگر یک اشعه انرژی به داخل این جسم وارد شود انعکاسات این اشعه مجدداً باید به جسم برخورد کرده و بالاخره در هر برخورد مقداری از اشعه جذب می‌شود و در نتیجه می‌توان گفت که تمام اشعه برخوردی جذب بدنه شده است این جسم می‌تواند همانطور که مانند یک جسم تشعشعات را جذب می‌نماید در انتشار مانند یک جسم سیاه عمل کند.

۴-۶ ضریب شکل تشعشع

دو سطح سیاه A_1 و A_2 نشان داده شده در شکل (۶-۸) را در نظر بگیرید. می‌خواهیم عبارتی کلی برای انرژی مبادله شده بین این سطوح وقتی درجه حرارت‌هایشان متفاوت است بیابیم. مسئله اساسی این است که مقدار انرژی که یک سطح را ترک می‌کند و به سطح دیگر می‌رسد را تعیین کنیم. برای حل این مساله ضرایب شکل تشعشعی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

- F_{1-2} = بخشی از انرژی که سطح ۱ را ترک می‌کند و به سطح ۲ می‌رسد.
- F_{2-1} = بخشی از انرژی که سطح ۲ را ترک می‌کند و به سطح ۱ می‌رسد.
- F_{m-n} = بخشی از انرژی که سطح m را ترک می‌کند و به سطح n می‌رسد.



شکل ۶-۸

نشان دهنده اجزا مساحت مورد استفاده در استنتاج ضریب شکل تشعشعی

ضریب دید:

ضریب زاویه‌ای و ضریب هیأت نام‌های دیگر ضریب شکل تشعشع هستند. مقدار انرژی که سطح ۱ را ترک می‌کند و به سطح ۲ می‌رسد برابر است با:

$$E_{b1} A_1 F_{12}$$

چون سطوح سیاه هستند ، تمام تشعشع های تابش شده جذب خواهند شد و مقدار انرژی مبادله شده برابر خواهد بود با :

$$E_{b1}A_1F_{12} - E_{b2}A_2F_{21} = Q_{1-2}$$

اگر درجه حرارت هر دو سطح برابر باشد ، هیچگونه تبادل حرارت وجود نخواهد داشت یعنی $Q_{1-2} = 0$ است. همچنین برای $T_1 = T_2$ داریم:

$$E_{b1} = E_{b2}$$

بنابراین:

$$A_1F_{12} = A_2F_{21} \quad (۱۸-۶)$$

پس مقدار خالص تبادل حرارت برابر است با:

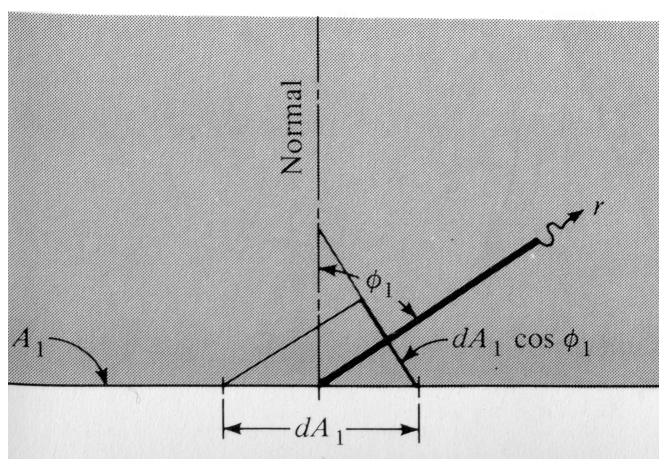
$$Q_{1-2} = A_1F_{12}(E_{b1} - E_{b2}) = A_2F_{21}(E_{b1} - E_{b2}) \quad (۱۹-۶)$$

معادله (۶-۱۸) را رابطه تقابل گویند و در حالت کلی برای سطوح دلخواه m و n می توان آنرا به شکل زیر نوشت:

$$A_iF_{ij} = A_jF_{ji}$$

اگر چه رابطه فوق برای سطح سیاه به دست آمد ولی مادامی که تشعشع پخشی مورد بحث است می توان برای سایر سطوح نیز استفاده کرد. اکنون در صدد هستیم یک رابطه کلی برای F_{12} بیابیم. بدین منظور جزءهای سطح dA_1 و dA_2 در شکل (۶-۸) را در نظر بگیرید. زوایای ϕ_1, ϕ_2 زاویه بین خط قائم بر سطح و خط کشیده شده بین جزءهای سطحی (r) است. تصویر dA_1 ، روی خط بین مرکز عبارتست از:

$$dA_1 \cos \phi_1$$



شکل ۶-۹ نمای قائم مساحت نشان داده شده در شکل ۶-۸

این مطلب را در نمای قائم نشان داده شده در شکل (۶-۹) می‌توان به وضوح مشاهده کرد. فرض می‌کنیم سطوح پخشی باشند. یعنی شدت تشعشع در تمام جهات یکسان است. شدت تشعشع عبارتست از تشعشع منتشر شده در واحد سطح و واحد زاویه دید در یک جهت معین. بنابراین برای به دست آوردن مقدار انرژی منتشر شده از جزء سطح dA_1 در یک جهت معلوم، باید شدت تشعشع را در تصویر dA_1 در جهت مورد نظر ضرب کرد. بنابراین مقدار انرژی که سطح dA_1 را در جهت زاویه ϕ_1 ترک می‌کند برابر است با:

$$I_b dA_1 \cos \phi_1 \quad (\text{الف})$$

که I_b شدت تشعشع جسم سیاه است. تشعشع دریافت شده از همان جزء سطح dA_n که در فاصله r از A_1 قرار دارد عبارتست از:

$$I_b dA_1 \cos \phi_1 \frac{dA_n}{r^2} \quad (\text{ب})$$

که dA_n عمود بر بردار شعاعی است. کمیت $\frac{dA_n}{r^2}$ را زاویه فضایی ایجاد شده توسط dA_n می‌باشد. با انتگرال گیری از رابطه (ب) روی نیمکره بنا شده در سطح dA_1 می‌توان شدت تشعشع را بر حسب توان پخش بدست آورد. در سیستم مختصات کروی مشابه شکل (۶-۱۰) داریم:

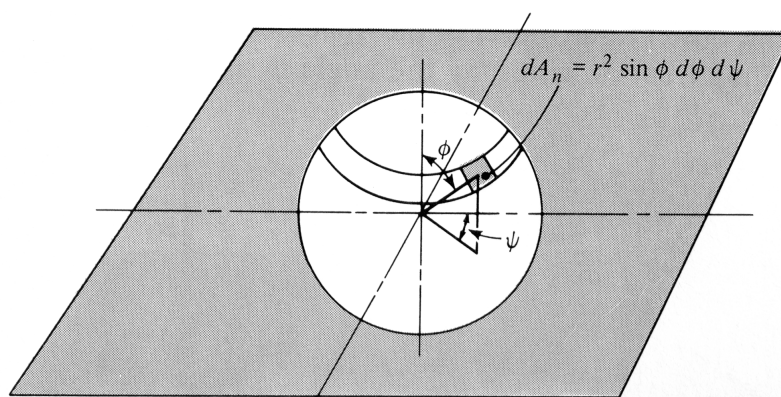
$$dA_n = r^2 \sin \psi \, d\psi \, d\phi$$

$$E_b dA_1 = I_b \cdot dA_1 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \sin \phi \cdot \cos \phi \cdot d\phi \, d\psi = \pi I_b dA_1$$

بنابراین:

$$E_b = \pi I_b$$

(۶-۲۰)



شکل ۶-۱۰ سیستم مختصات کروی مورد استفاده در استنتاج ضریب شکل تشعشعی

اکنون به مسئله تبادل انرژی نشان داده شده در شکل (۶-۸) باز می‌گردیم. جزء سطح dA_n برابر است با:

$$dA_n = \cos \phi_2 \cdot dA_2$$

بنابراین مقدار انرژی که سطح dA_1 را ترک می‌کند و به سطح dA_2 می‌رسد، عبارتست از:

$$dq_{1-2} = E_{b1} \cdot \cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2 \frac{dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

به همین ترتیب داریم:

$$dq_{2-1} = E_{b2} \cdot \cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2 \frac{dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

انرژی خالص تبادلی بین dA_1 و dA_2 عبارتست از:

$$dq_{net1-2} = (E_{b1} - E_{b2}) \cdot \cos \phi_1 \cdot \cos \phi_2 \frac{dA_1 dA_2}{\pi r^2} \quad (۶-۲۱)$$

طبق معادله (۶-۱۹) مقدار انتگرال فوق برابر $A_1 F_{12}$ یا $A_2 F_{21}$ است. برای محاسبه انتگرال باید وضعیت هندسی A_1 و A_2 مشخص باشد. مسئله را برای یک نمونه ساده مقدماتی حل می‌کنیم و سپس نتایج حاصل را به صورت معادله و ترسیم جهت هندسه‌های پیچیده‌تر ارائه خواهیم کرد.

مطابق شکل (۶-۱۱) تشعشع انجام شده از سطح کوچک dA_1 به دیسک مسطح A_2 را در نظر بگیرید. جزء سطح dA_2 را به صورت یک حلقه دایره‌ای به شعاع x انتخاب می‌کنیم بنابراین:

$$dA_2 = 2\pi x dx$$

با توجه به اینکه $\phi_1 = \phi_2$ می‌باشد و اعمال مقدار بدست آمده برای q_{net1-2} ، با انتگرال گیری روی سطح A_2 داریم:

$$dA_1 \cdot F_{dA1-A2} = dA_1 \int_{A2} \cos^2 \phi_1 \frac{2\pi x}{\pi r^2} dx$$

با جایگذاری مقادیر زیر:

$$\cos \phi_1 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}} \quad r = \sqrt{R^2 + x^2}$$

داریم:

$$dA_1 \cdot F_{dA1-A2} = dA_1 \int_0^{D/2} \frac{2R^2 x dx}{(R^2 + x^2)^2}$$

پس از انتگرال گیری خواهیم داشت:

$$dA_1 \cdot F_{dA1-A2} = dA_1 \frac{D^2}{4R^2 + D^2}$$

بنابراین:

$$F_{dA1-A2} = \frac{D^2}{4R^2 + D^2} \quad (۶-۲۲)$$

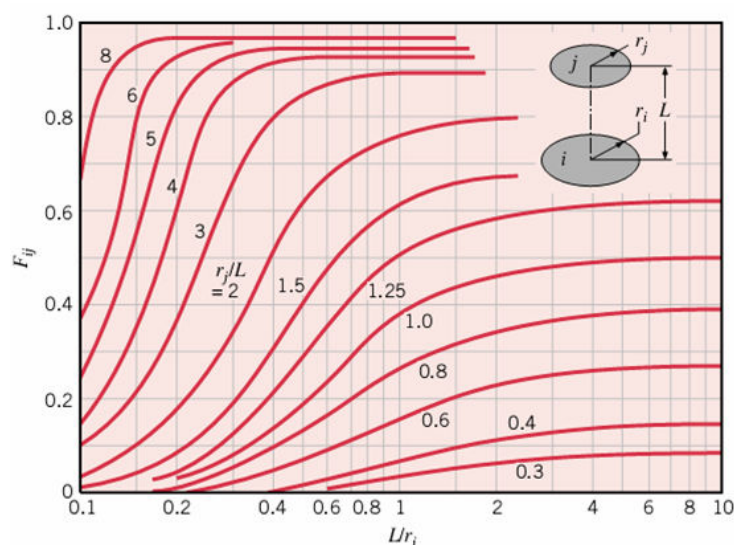
۵-۶ رفتار سطح واقعی

سطوح واقعی برای مثال کاملاً پخش نمی‌کنند، و ازین رو شدت تشعشع آنها در تمام جهات ثابت نمی‌باشد. مشخصه‌های انتشار جهت برای چند نوع از سطوح در شکل (۶-۱۱) تا (۶-۱۳) نشان داده شده است.

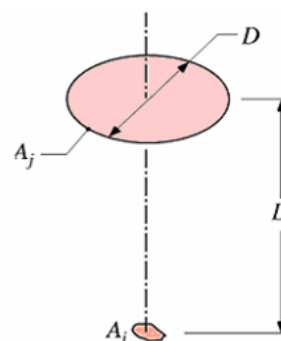
قابلیت جذب و قابلیت انعکاس تشعشع حرارتی از سطوح واقعی نه تنها تابعی از سطح خود جسم می‌باشد، بلکه همچنین بستگی به محیط نیز دارند. این خواص بستگی به جهت و طول موج تشعشع دارند. قابلیت جذب کل به صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\alpha = \frac{\int_0^{\infty} \alpha_k \sum_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \alpha_{\lambda} \sum_{\lambda} d\lambda}$$

جائیکه λ طول موج و \sum_{λ} مقدار تشعشع روی یک سطح در واحد زمان، در واحد سطح و در طول موج واحد می‌باشند. برای جسم خاکستری $\epsilon_{\lambda} = \epsilon = \text{const}$ و برای تشعشع نور تکرنگ، طبق رابطه کریشهف $\epsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda}$ ، پس برای جسم خاکستری $\epsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} = \text{const}$



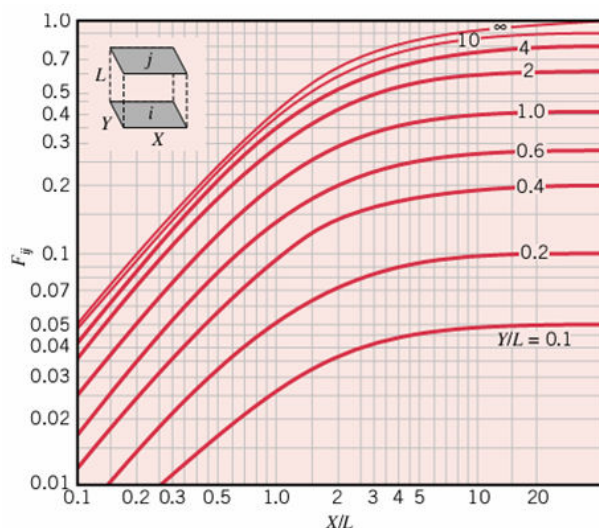
شکل ۶-۱۲



$$F_{ij} = \frac{D^2}{D^2 + 4L^2}$$

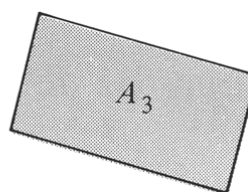
$$(A_i \ll A_j)$$

شکل ۶-۱۱



شکل ۶-۱۳

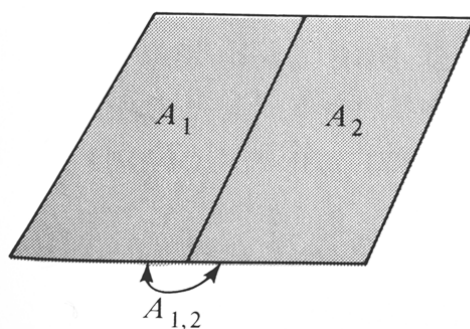
۶-۶ روابط بین ضریب شکل



$$F_{3-1,2} = F_{3-1} + F_{3-2}$$

$$A_3 F_{3-1,2} = A_3 F_{3-1} + A_3 F_{3-2}$$

$$A_{1,2} F_{1,2-3} = A_1 F_{1-3} + A_2 F_{2-3}$$



شکل ۶-۱۴ طرح نشان دهنده برخی روابط بین ضرایب شکل

با توجه به شکل (۶-۱۴) ضریب شکل برای تشعشع از A_3 به سطح مرکب $A_{1,2}$ بصورت زیر می باشد.

$$F_{3-1,2} = F_{3-1} + F_{3-2}$$

یعنی ضریب شکل کل عبارتست از مجموع بخش های آن. رابطه فوق را بصورت زیر می توان نوشت:

$$A_3 F_{3-1,2} = A_3 F_{3-1} + A_3 F_{3-2}$$

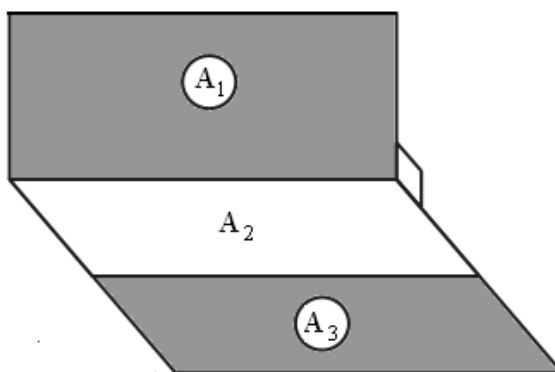
همچنین داریم:

$$A_3 F_{3-1,2} = A_{1,2} F_{1,2-3}$$

$$A_3 F_{3-1} = A_1 F_{1-3}$$

$$A_3 F_{3-2} = A_2 F_{2-3}$$

$$A_{1,2} F_{1,2-3} = A_1 F_{1-3} + A_2 F_{2-3}$$



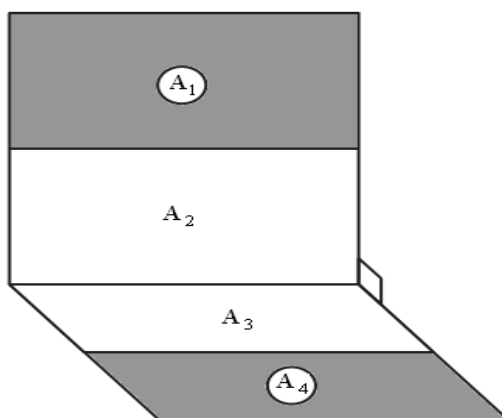
شکل ۶-۱۵

برای شکل (۶-۱۵) رابطه بین ضرایب شکل‌ها عبارتست از :

$$F_{1-3} + F_{1-2} = F_{1,2-3}$$

(الف)

ضمناً F_{1-2} و $F_{1,2-3}$ از منحنی‌های قبل به دست می‌آید. در نتیجه اگر ابعاد معلوم باشد F_{1-3} به آسانی محاسبه می‌شود.



شکل ۶-۱۶

برای شکل (۶-۱۶) رابطه بین ضرایب شکل عبارتست از:

$$A_2 + F_{1-3,4} A_1 = F_{1,2-3,4} A_{1,2} F_{2-3,4}$$

(ب)

$$A_1 F_{1-3,4} = A_1 F_{1-4} + A_1 F_{1-3}$$

(ج)

اگر $A_1 F_1$ را از (ب) حساب کنیم و در (ج) بگذاریم و بعد نتیجه را در (الف) قرار دهیم و انتگرال گیری کنیم می شود:

$$A_{1,2} F_{1,2-3} = A_1 F_{1-3} + A_2 F_{2-3}$$

پس:

$$A_{1,2} F_{1,2-3,4} = A_{1,2} F_{1,2-3} - A_2 F_{2-3} + A_1 F_{1-4} + A_2 F_{2-3,4}$$

در رابطه اخیر تمام ضرایب شکل غیر از F_{1-4} ، از جداول به دست می آیند.

$$F_{1-4} = \frac{1}{A_1} (A_{1,2} F_{1,2-3,4} + A_2 F_{2-3,4} - A_{1,2} F_{1,2-3} - A_2 F_{2-3,4})$$

$$F_{11} = F_{22} = F_{33} = 0$$

$$\sum_{j=1}^n F_{ij} = 1.0$$

F_{ij} عبارتست از کسری از انرژی کل که سطح i را ترک می کند و به سمت سطح j حرکت می کند. بنابراین برای سه سطح غیر بسته داریم :

$$F_{11} = F_{22} = F_{33} = 1$$