

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

الطاهرين  
نبي محمد وآله  
العاقلين  
الحمد لله رب العالمين



# اصول طراحی اپتیکی سیستم‌های مادون قرمز

مترجم:

داود مجیدی

سرشناسه : ریڈل، ماکس . Riedl, Max J.  
 عنوان و نام پدیدآور : اصول طراحی اپتیکی سیستم‌های مادون قرمز / [ماکس ج. ریڈل]؛ مترجم داود مجیدی،  
 مشخصات نشر : تهران : دانشگاه صنعتی مالک اشتر ، ۱۳۸۸.  
 مشخصات ظاهری : [۱۸۳] ص. : مصور، جدول، نمودار.  
 شابک : ۴۶۰۰۰ ریال 978-964-8452-88-4  
 وضعیت فهرست‌نویسی : فیپا  
 یادداشت : عنوان اصلی : c1995 Optical design fundamentals for infrared systems  
 یادداشت : واژه نامه یادداشت: نمایه موضوع : ابزار بینایی -- طرح و ساختمان  
 موضوع: تجهیزات مادون قرمز -- طرح و ساختمان شناسه افزوده : مجیدی، داود، ۱۳۴۸ - ، مترجم  
 شناسه افزوده : دانشگاه صنعتی مالک اشتر  
 رده بندی کنگره: ۱۳۸۸ الف ۶ / ۹ / TS۵۱۴ رده بندی دیویی : ۶۲۱/۳۶۲ شماره کتابخانه ملی : ۱۷۱۸۴۳۵



انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر



دانشگاه صنعتی مالک اشتر  
 مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک

عنوان کتاب : ..... اصول طراحی اپتیکی سیستم‌های مادون قرمز  
 مترجم : ..... داود مجیدی  
 ناشر : ..... انتشارات دانشگاه صنعتی مالک اشتر  
 طرح روی جلد : ..... فریناز عسگری  
 لیتوگرافی ، چاپ و صحافی : ..... فرارنگ  
 صفحه آرایی رایانه‌ای: ..... مهدی ملاتی  
 ویراستار: ..... علی نویدی  
 شمارگان : ..... ۱۰۰۰ جلد  
 نوبت چاپ : ..... اول، بهار ۱۳۸۸  
 قیمت : ..... ۴۶۰۰۰ تومان

ISBN: 978-964-8452-88-4

شابک ۴-۸۸-۸۴۵۲-۹۶۴-۹۷۸

کلیه حقوق چاپ برای ناشر محفوظ است .

نقل مطالب فقط با ذکر مشخصات کامل کتاب و با اشاره به نام ناشر مجاز است .  
 آدرس: تهران، لویزان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مرکز آموزشی، پژوهشی اطلاع‌رسانی،

مدیریت انتشارات. تلفن: ۲۲۹۳۲۸۹۱

## فهرست مطالب

پیشگفتار مترجم.....	أ
درباره‌ی نویسنده.....	ت
پیشگفتار نویسنده.....	ث

### فصل اول: ملاحظات تابش سنجی..... ۱

۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- روابط اپتیکی پایه.....	۲
۱-۳- نسبت سیگنال به نویز.....	۴
۱-۴- معادله‌ی عمومی عملکرد تابش سنجی.....	۶
۱-۵- قوانین تابش حرارتی.....	۶
۱-۵-۱- تابش جسم سیاه و قانون پلانک.....	۷
۱-۵-۲- قانون استفان - بولتسمان.....	۹
۱-۵-۳- قانون جابه‌جایی وین.....	۹
۱-۵-۴- قانون کریشهوف و گسیلمندی.....	۱۰
۱-۶- گذر از میان جو.....	۱۱
۱-۶-۱- ترکیبات ثابت جو خشک.....	۱۲
۱-۶-۲- ترکیبات متغیر.....	۱۲
۱-۶-۳- تقریب (فرض).....	۱۲
۱-۶-۴- آب قابل بارش (تعریف).....	۱۳
۱-۶-۵- رطوبت.....	۱۳
۱-۶-۶- مقدار آب قابل بارش (محاسبه).....	۱۴
۱-۶-۷- گذر جو (محاسبه).....	۱۵
۱-۶-۸- مدل‌های رایانه‌ای.....	۱۷
۱-۷- آشکارسازهای IR نوعی.....	۱۷
۱-۷-۱- آشکارسازهای حرارتی.....	۱۷
۱-۷-۲- آشکارسازهای فوتونی یا کوانتومی.....	۱۸
۱-۷-۳- آشکارسازهای فوتوکنداکتیو.....	۱۸

۱۸	۴-۷-۱- آشکارسازی ویژه و نويز معادل پهناى باند .....
۱۹	۵-۷-۱- پیکربندی های آشکار سازها.....
۲۰	۸-۱- مراجع .....

**فصل دوم: مبانی اپتیک .....**

۲۳	۱-۲- مقدمه .....
۲۴	۲-۲- قانون اسنل و منشور.....
۲۵	۳-۲- گذار از یک منشور به یک عدسی .....
۲۵	۴-۲- تشکیل تصویر.....
۲۶	۵-۲- روابط جسم - تصویر .....
۲۸	۶-۲- روزنه‌بندها، مردمک‌ها و پنجره‌ها.....
۳۰	۷-۲- توان عملیاتی.....
۳۳	۸-۲- انتقال انرژی.....
۳۵	۱-۸-۲- محاسبات سیگنال به نویز.....
۳۶	۹-۲- تغییرات جزئی .....
۳۸	۱۰-۲- بهره‌ی اپتیکی .....
۳۸	۲-۱۰-۱- عدسی های غوطه داده .....
۳۹	۲-۱۰-۲- لوله های نوری .....
۴۱	۲-۱۰-۳- عدسی‌های میدان.....
۴۲	۲-۱۱- میدان دید آرایه‌های استارینگ .....
۴۳	۲-۱۲- مراجع .....

**فصل سوم: ابیراهی‌های مقدماتی .....**

۴۵	۱-۳- مقدمه .....
۴۶	۲-۳- ابیراهی مقدماتی .....
۴۶	۳-۲-۱- ابیراهی کروی .....
۴۷	۳-۲-۲- کُما.....
۴۸	۳-۲-۳- آستیگماتیسم .....
۵۰	۴-۲-۳- انحنای میدان.....

- ۵۱..... ۳-۲-۵- اعوجاج
- ۵۲..... ۳-۲-۶- ابیراهی رنگی محوری
- ۵۲..... ۳-۲-۷- ابیراهی رنگی عرضی
- ۵۳..... ۳-۳- محاسبات ابیراهی های مقدماتی
- ۵۵..... ۳-۳-۱- ابیراهی کروی
- ۵۸..... ۳-۳-۲- کُما
- ۵۹..... ۳-۳-۳- آستیگماتیسم
- ۵۹..... ۳-۳-۴- انحنای میدان
- ۶۰..... ۳-۳-۵- ترکیبی از ابیراهی آستیگماتیسم و انحنای میدان
- ۶۱..... ۳-۳-۶- ابیراهی رنگی محوری
- ۶۳..... ۳-۳-۷- مثال عددی
- ۶۶..... ۳-۴- روش های عمومی در تصحیح ابیراهی
- ۶۷..... ۳-۵- عدسی دوتایی
- ۶۷..... ۳-۵-۱- دو المان با جنس مشابه
- ۶۹..... ۳-۵-۲- سیستم بی رنگ (آکرومات)
- ۷۰..... ۳-۶- دو المان اپتیکی نازک جدا از هم در هوا
- ۷۰..... ۳-۶-۱- شیئی پتزوال
- ۷۱..... ۳-۶-۲- پرتوگسترهای شکستی
- ۷۳..... ۳-۶-۳- سیستم های تله فوتو
- ۷۴..... ۳-۷- سیستم های اپتیکی بازتابی
- ۷۵..... ۳-۷-۱- آینه ی کروی
- ۷۷..... ۳-۷-۲- آینه ی مانژین
- ۷۸..... ۳-۷-۳- پیکربندی دو آینه ای کلاسیک
- ۸۰..... ۳-۷-۴- سیستم کاسگرین دو کره ای
- ۸۴..... ۳-۷-۵- سیستم گریگوری دو کره ای
- ۸۵..... ۳-۷-۶- سیستم شوارتزشیلد، یک حالت بسیار ویژه
- ۸۶..... ۳-۷-۷- پرتو گسترهای بازتابی
- ۸۸..... ۳-۸- حدّ پراش
- ۸۹..... ۳-۹- قدرت تفکیک سیستم های تصویر برداری

۹۰	..... ۱۰-۳- مراجع
۹۱	..... فصل چهارم: سطوح اپتیکی ویژه و مولفه‌های آن
۹۲	..... ۱-۴- مقدمه
۹۳	..... ۲-۴- تیغه‌ی تخت - موازی
۹۳	..... ۱-۲-۴- جا به جایی‌ها
۹۵	..... ۲-۲-۴- میکرومتر اپتیکی
۹۶	..... ۳-۲-۴- سهم ابیراهی‌ها
۹۷	..... ۴-۲-۴- ملاحظات کاربردی
۱۰۰	..... ۵-۲-۴- متوازی السطوح کروی
۱۰۲	..... ۶-۲-۴- گوه (منشور نازک)
۱۰۴	..... ۳-۴- مقاطع مخروطی
۱۰۴	..... ۱-۳-۴- روابط ریاضی
۱۰۶	..... ۲-۳-۴- بازتابنده‌های با سطوح مقاطع مخروطی
۱۰۶	..... ۳-۳-۴- عدسی‌ها با سطوح مقاطع مخروطی
۱۰۹	..... ۴-۳-۴- سطوح غیرکروی عمومی (سطوح چرخشی)
۱۱۰	..... ۵-۳-۴- پیکربندی‌های دو آینه‌ای متداول با استفاده از سطوح مقاطع مخروطی
۱۱۰	..... ۶-۳-۴- دو آینه‌ی مقاطع مخروطی با یک تصحیح کننده غیرکروی
۱۱۲	..... ۴-۴- مثال‌های عددی
۱۱۳	..... ۱-۴-۴- اپتیک سیستم‌های با درجه حرارت بالا ( $3-5 \mu m$ )
۱۱۳	..... ۲-۴-۴- اپتیک سیستم‌های با درجه حرارت پایین، طراحی # ۱ ( $8-12 \mu m$ )
۱۱۴	..... ۳-۴-۴- اپتیک سیستم‌های با درجه حرارت پایین، طراحی # ۲ ( $8-12 \mu m$ )
۱۱۵	..... ۴-۴-۴- اپتیک سیستم‌های دمای پایین، طراحی # ۳ ( $8-12 \mu m$ )
۱۱۷	..... ۵-۴-۴- میدان دید لحظه‌ای
۱۱۸	..... ۵-۴-۴- اپتیک (دوتایی) پراش
۱۱۹	..... ۱-۵-۴- یک تک‌المان پراشی ساده
۱۲۱	..... ۲-۵-۴- سیستم بی‌رنگ مختلط
۱۲۳	..... ۳-۵-۴- مثال‌های عددی
۱۲۵	..... ۴-۵-۴- بازده پراش



- ۱۲۸..... ۴-۵-۵- پهنای باند طیفی « مفید»
- ۱۲۸..... ۴-۵-۶- سیستم بی‌رنگ مختلط، جهت تصحیح ابیراهی رنگی و کروی
- ۱۳۰..... ۴-۵-۷- اپتیک دو تایی
- ۱۳۲..... ۴-۶- مراجع

#### فصل پنجم: پوشش های اپتیکی ..... ۱۳۳

- ۱۳۴..... ۵-۱- مقدمه
- ۱۳۵..... ۵-۲- اثرات در سطح یک اِلِمان
- ۱۳۵..... ۵-۳- دو سطح تخت - موازی
- ۱۳۷..... ۵-۴- پوشش های ضد بازتاب
- ۱۴۰..... ۵-۵- پوشش های بازتابی
- ۱۴۱..... ۵-۶- فیلترهای تداخلی نوعی
- ۱۴۳..... ۵-۶-۱- حساسیت زاویه ای فیلترها
- ۱۴۴..... ۵-۶-۲- حساسیت حرارتی فیلترها
- ۱۴۵..... ۵-۷- مراجع

#### فصل ششم: ارزیابی های تصویر ..... ۱۴۷

- ۱۴۸..... ۶-۱- مقدمه
- ۱۴۸..... ۶-۲- اندازه گیری های نقطه‌ی پخشیدگی
- ۱۴۸..... ۶-۲-۱- ماسک دایره‌ای
- ۱۴۹..... ۶-۲-۲- شکاف
- ۱۴۹..... ۶-۲-۳- لبه‌ی چاقو
- ۱۵۱..... ۶-۳- توزیع انرژی
- ۱۵۱..... ۶-۴- تابع انتقال مدولاسیون
- ۱۵۲..... ۶-۴-۱- بررسی اجمالی
- ۱۵۴..... ۶-۴-۲- کنتراست یا توان تفکیک
- ۱۵۸..... ۶-۳-۴- MTF پراش
- ۱۵۹..... ۶-۴-۴- MTF هندسی
- ۱۶۰..... ۶-۴-۵- مثال عددی

۱۶۱	۵-۶- مراجع .....
۱۶۳	پیوست الف .....
۱۶۴	الف-۱- پرتویابی پیرا محوری .....
۱۶۴	الف-۱-۱- معادلات سطح .....
۱۶۸	الف-۲- ابیراهی کروی یک عدسی نازک .....
۱۶۸	الف-۲-۱- استخراج فرمول .....
۱۷۰	الف-۳- سرما بند و حفاظ آن .....
۱۷۰	الف-۳-۱- سرما بند .....
۱۷۱	الف-۳-۲- حفاظ سرما .....
۱۷۲	الف-۴- مراجع .....
۱۷۳	واژنامه‌ی انگلیسی به فارسی .....

## پیشگفتار مترجم

علم اپتیک حدود ۲۴۰۰ سال پیش با نظریه پردازی های اقلیدس و بطلمیوس آغاز گشته و تاکنون همواره در حال دگرگونی بوده است. خوشبختانه، منطقه ی آسیای جنوب غربی، و بویژه ایران، مهد بزرگترین نظریه پردازان این شاخه از علم است که از سرآمدان می توان از ابن سینا<sup>۱</sup> (۹۸۰-۱۰۳۷ میلادی)، ابن هیثم (۹۶۵-۱۰۳۹ میلادی) با شاهکار خود کتاب «المناظر»<sup>۲</sup>، امام فخرالدین رازی (۱۱۵۰-۱۲۱۰ میلادی)، خواجه نصیرالدین طوسی (۱۲۰۱-۱۲۷۴ میلادی) با کتاب «تحریر المناظر»<sup>۳</sup>، قطب الدین شیرازی (۱۲۳۶-۱۳۱۱ میلادی) با کتاب «نهایه الادراک فی درایه الافلاک»<sup>۴</sup> و کمال الدین فارسی (متوفی ۱۳۲۰ میلادی) با کتاب «تنقیح المناظر لذوی الابصار و البصائر»<sup>۴</sup> نام برد. این دانشمندان بر خلاف اسلاف خود برای نخستین بار آزمایش و تجربه را در این حوزه از علم به کار بستند.

هم اکنون به جرئت می توان گفت که اپتیک بالنده ترین شاخه ی فیزیک نظری و کاربردی است. از دهه ی ۱۹۶۰ میلادی پیدایش و گسترش لیزرها، فیبرهای نوری، ردیاب های الکترو اپتیکی، تلسکوپ های پیشرفته و... سبب تجدید حیات این رشته شده است و در این زمینه ها کتاب های گوناگونی با رهیافت های مختلف به چاپ رسیده است.

کاربردهای گسترده ی اپتیک و ادوات طراحی شده بر اساس آن، از امور روزمره ی زندگی نظیر آینه تا امور فضایی و نظامی همانند تلسکوپ ها و سنجنده های تصویربردار در بازه های طیفی مرئی تا مادون قرمز را در بر می گیرد.

۱. ابن سینا در «مقاله سوم از فن ششم طبیعیات شفا» نظریه ی نوینی در ارتباط با نور ارائه می نماید. او بر این عقیده بود که سرعت نور به مراتب بیش از سرعت صوت است، اما بی نهایت نیست. ابوریحان بیرونی (۹۷۳-۱۰۴۱ میلادی) نیز در این مورد همین نظر را ارائه کرده است.
۲. در این کتاب برای نخستین بار ۸ قانون در زمینه ی اپتیک هندسی ارائه شده است که همگی هم اکنون نیز از اعتبار علمی برخوردار هستند. ابن هیثم بر این عقیده بود که نور از همه نقاط منبع در امتداد خط مستقیم منتشر می گردد. او در حقیقت کسی است که افقی نوین در علم اپتیک بازنمود و سبب شد که این علم از زیر سیطره هندسه خارج گردد.
۳. در این کتاب قطب الدین شیرازی تحلیل جامعی از رنگین کمان کرده و آن را نتیجه ی بازتابش داخلی نور خورشید بر قطرات کوچک آب می داند. هم چنین او برای نخستین بار به حرکت موجی نور اشاره کرده است.
۴. کمال الدین فارسی ۳۵۰ سال پیش از نیوتون علت رنگین بودن رنگین کمان را ناشی از شکست متفاوت رنگ های آن بیان کرده است.

تمامی خواص نور بر حسب آزمایش‌هایی که به کشف آن خواص انجامیده و با روش‌هایی که آنها را تشریح می‌کنند، توصیف می‌شود. بر این اساس آنها را می‌توان به صورت زیر طبقه‌بندی نمود: ۱- اپتیک هندسی ۲- اپتیک موجی ۳- اپتیک کوانتومی.

موضوع کتابی که پیش رو دارید در ارتباط با طراحی سیستم‌های اپتیکی نظیر دوربین‌های تصویربرداری و تلسکوپ‌ها در بازه طیفی مادون قرمز است. در حال حاضر، طراحی اپتیک بسیار وابسته به رایانه است و برنامه‌های قدرتمندی جهت طراحی نوشته شده است. اما برخی اوقات این برنامه‌ها مانع از درک ملموس معیارهای طراحی می‌شوند و همانند یک جعبه سیاه عمل می‌کنند. در این کتاب نویسنده سعی کرده است که این جنبه ملموس در طراحی را برای طراحان ارایه نماید.

تا پیش از این در کشور در رابطه با تکنیک‌های طراحی سیستم‌های مادون قرمز کتابی منتشر نشده بود. از این جهت مترجم اقدام به ترجمه‌ی این کتاب که از انتشارات انجمن مهندسان ادوات عکس‌برداری آمریکا<sup>۱</sup> است، نمود. امیدوارم ترجمه‌ی این کتاب که به قلم یکی از متخصصان این حوزه از علم و فناوری تالیف شده است، گامی هر چند کوچک جهت پیشرفت‌های بزرگ در کشور باشد و پژوهشگران و دانشجویان با این شاخه از علم اپتیک آشنایی ژرف‌تری بیابند و همانند گذشتگان پُر افتخار خود بتوانند منشاء خدمات ارزشمندی برای کشور و جامعه جهانی باشند.

در این جا می‌بایست از مدیران و همکاران عزیز خود در مجتمع دانشگاهی برق و الکترونیک که بنده را در انتشار این اثر یاری دادند، و همچنین از آقای علی برادران کاظمیان به سبب کمک‌های بی‌شایبه خود در امر هماهنگی و چاپ این کتاب صمیمانه تشکر و سپاسگزاری نمایم. در پایان از تمامی صاحب‌نظران و متخصصان درخواست می‌شود تا مترجم را از نظرات ارزنده خود بی‌نصیب نگذارند.<sup>۲</sup>

داود مجیدی

تهران، ۱۳۸۸

1. Society of Photographic Instrumentation Engineers (SPIE)

۲. آدرس پست الکترونیکی مترجم: [d.majidi@Lycos.com](mailto:d.majidi@Lycos.com)

درباره‌ی نویسنده

ماکس جی. ریدل در کمپین آلمان متولد و در انستیتوی ریاضی مکانیک آن شهر تحصیل نمود. او دیپلم مهندسی (F.H.) خود را در رشته‌ی مکانیک دقیق و اپتیک از آکادمی فنی مونیخ دریافت کرد.

نویسنده سال‌ها در حوزه‌ی ریاضی و ادوات اپتیکی کار کرده است و چندین ثبت اختراع (پتنت) در زمینه‌ی مکانیک، اپتیک و الکترواپتیک دارد. ایشان مقالات بسیاری در رابطه با طراحی عدسی و ادوات اپتیکی پراشی الماسی برای کاربردهای طیف مادون قرمز ارائه و منتشر نموده و مدرس دوره‌های کوتاه مدت در این موضوعات نیز است. هم‌چنین او عضو انجمن اپتیک آمریکا و انجمن مهندسان ادوات عکس‌برداری (SPIE) است.

## پیشگفتار نویسنده

در این کتاب در نظر است که رهیافتی پایه‌ای جهت طراحی اپتیکی سیستم‌های مادون قرمز فراهم شود. این کتاب برای مهندسان سیستم که تخصص آنها خارج از حوزه اپتیک می‌باشد، تالیف شده است. مطالب ارائه شده را می‌توان به طور مستقیم جهت طراحی اولیه سیستم اپتیکی به منظور ارزیابی پیکربندی‌های مختلف به کار برد. هم چنین این کتاب مرجع مناسبی برای هدایت نیازمندی‌ها و انتظارات یک طراح تجربی عدسی است.

در دهه‌ی گذشته، در زمینه‌ی طراحی عدسی تاکید بر استفاده از رایانه بوده است. برنامه‌های قدرتمندی جهت طراحی عدسی توسعه داده شده و رهیافت‌های نوینی برای حل بهتر چالش‌های طراحی اپتیکی پیدا شده است. متأسفانه فرآیند استفاده از رایانه جهت انجام محاسبات مورد نیاز، بیشتر به طراحی اتوماتیک عدسی رهنمون می‌شود. اما جهت دستیابی به یک سیستم اپتیکی قابل درک، یکی از چالش‌ها مسئله‌ی ساخت است، به طوری که الزامات مرتبط با هزینه و موارد فنی دیگر برآورده شود. پیکربندی اولیه بایستی شانس انطباق با این ملزومات را داشته باشد. برنامه‌های بهینه‌سازی تنها جهت یافتن بهترین پاسخ قابل دسترس از شرایط موجود است. بنا براین مهم است که از نقطه‌ی درستی شروع کنیم. مشخص سازی این نقطه - نقطه‌ی آغازی امیدبخش - یکی از اهداف تدوین این کتاب است.

طراحی عدسی‌ها برای ناحیه مادون قرمز قدری ساده‌تر از کار در ناحیه طیف مرئی است؛ زیرا طول موج‌ها بلندتر، ضریب شکست بیشتر مواد عدسی بالاتر و پراش نسبی آنها کم‌تر است. این موارد منجر به ابیراهی‌های اولیه کوچک‌تر می‌گردد. به طور معمول محاسبات مرتبه‌ی سوم ابیراهی برای پیش‌بینی انتظارات کارایی مناسب است، حتی اگر جهت سادگی سیستم مجموعه‌ای از عدسی‌های نازک (عدسی‌هایی با ضخامت صفر) در نظر گرفته شود. این واقعیت که حد پراش در ناحیه‌ی مادون قرمز ده تا بیست مرتبه‌ی بزرگتر از ناحیه‌ی مرئی است بر مفید بودن اعمال نظریه ابیراهی مرتبه‌ی سوم افزوده می‌شود.

در بیشتر موارد پرداخت عدسی های مادون قرمز و آینه ها، با تراشکاری الماس تک نقطه ای انجام می شود. به همین دلیل، با این روش سطوح ناکروی و پراشی بیشتر از سطوح کروی که نیاز به تصحیح ابیراهی زیادی دارند، ساخته می شوند. در این کتاب سطوح ناکروی و پراشی به طور مشروح مورد بررسی قرار گرفته اند و همچنین چندین مثال عددی از آنها ارائه شده است.

در سراسر این کتاب تاکید بر جنبه های کاربردی است. این موضوع توسط تقریب های زیادی که منجر به پاسخ های مفیدی - به ویژه در طی مراحل پیشنهاد پروژه (پروپوزال) هنگامی که زمان و منابع محدود است - می شود، بازتاب یافته است. مواد بسیاری بررسی گشته اما جزئیات آنها به صورت محدودی بیان شده است. امید است آن چه که در این جا ارائه شده است، برای مراحل پیش طراحی سیستم های مادون قرمز ارزشمند باشد، و حتی محرکی نیز جهت کاوش ژرف تر در مقالات موجود در این حوزه می باشد.

موضوعات ارائه شده در این کتاب گردآوری نکات سمینارهای داخلی مهندسی است که بتدریج به یک ساختار رسمی تر به عنوان بخشی از برنامه ی دوره ی کوتاه مدت SPIE، رهنمون گشت.

بیشتر آن چه که در این کتاب آمده مبتنی بر همکاری طولانی مدت کاری و شخصی با وارن جی. اسمیت<sup>۱</sup>، که همراه با دونالد سی. اوشی<sup>۲</sup> دست نوشته های مرا مرور کردند، و لاول ل. باسکینز<sup>۳</sup> است. سپاسگزاری ویژه خود را از آنها جهت کمک های شایان شان ابراز می دارم، نظرات و پیشنهادات ایشان سهم بسیاری در بهبود کیفی این کتاب داشته است.

ماکس جی. ریدل

اکتبر ۱۹۹۵

---

1. Warren J. Smith  
2. Donald C. O' Shea  
3. Lowell L. Baskins





فصل اول

ملاحظات تابش سنجی

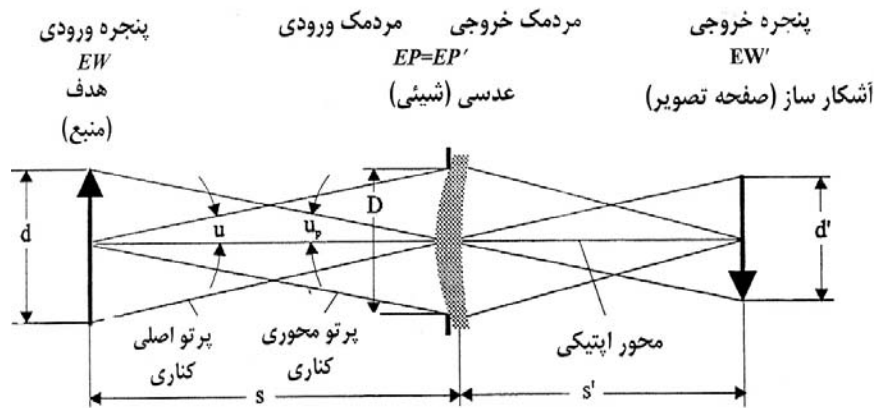
## ۱-۱- مقدمه

بخش اول با شناسایی عناصر پایه‌ای در یک سیستم اپتیکی، آغاز می‌شود: منبع یا هدف، روزنه‌بند<sup>۱</sup>، میدان بند<sup>۲</sup>، صفحه تصویر، مردمک ورودی و خروجی<sup>۳</sup>، پنجره‌های ورودی و خروجی. این عناصر و تعاریف تابش‌سنجی لازم، برای تحلیل معادله‌ی عمومی عملکرد تابش‌سنجی [معادله‌ی (۷-۱)] مطرح می‌شود. این معادله بر پایه‌ی عوامل موثر در سیگنال آشکارسازی شده در یک سیستم اپتیکی است: قوانین تابش حرارتی که عبور از میان جو را توصیف می‌نمایند، اپتیک سیستم و در نهایت پاسخ آشکارساز. برای بررسی یک سیستم اپتیکی و سیگنال آشکار شده توسط آن سیستم، ابتدا قوانین عبور تابش حرارتی از میان جو و سیستم اپتیکی مورد نظر و سرانجام پاسخ آشکارساز را مورد بررسی قرار می‌دهیم. این مفاهیم به ترتیب مورد بررسی قرار می‌گیرند؛ البته، بجز عامل سوم که در نهایت با جزئیات بیشتری بررسی می‌شود؛ زیرا در برگیرنده‌ی موضوع اصلی این کتاب است.

## ۱-۲- روابط اپتیکی پایه

یک پرتو محوری<sup>۴</sup> از نقطه محوری جسم می‌تابد و از میان عدسی‌ها عبور کرده و به صفحه‌ی تصویر می‌رسد. یک پرتو محوری که از لبه‌ی روزنه‌بند می‌گذرد پرتو محوری کناری نامیده می‌شود. پرتو اصلی که پرتو مهم<sup>۵</sup> نیز شناخته می‌شود یک پرتو مایل از نقطه‌ی خارج محور جسم است که از مرکز روزنه‌بند عبور می‌کند. پرتو اصلی کناری از لبه‌ی جسم شروع و از مرکز روزنه‌بند و لبه‌ی میدان بند عبور می‌کند. همان گونه که در فصل (۳) بیان خواهد شد، این دو پرتو کناری فقط جهت محاسبه‌ی مقدماتی ابیراهی مرتبه‌ی سوم مورد نیاز هستند. همان گونه که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است،  $u$  و  $u_p$  زوایایی هستند که توسط پرتو محوری و پرتو اصلی نسبت به محور اپتیکی تشکیل می‌شوند.

- 
1. Aperture stop
  2. Field stop
  3. Entrance and exit pupils
  4. Axial ray
  5. Chief ray



شکل ۱-۱- روابط پایه‌ی اپتیک تصویری.

روزنه‌بند گشودگی فیزیکی سیستم اپتیکی است که اندازه‌ی مخروط انرژی محوری<sup>۱</sup> از جسم را محدود می‌نماید. تصویر روزنه‌بند در فضای جسم را مردمک ورودی و تصویر روزنه‌بند در فضای تصویر را مردمک خروجی می‌نامند. در سیستم‌های عدسی، فضای جسم سمت چپ سطح عدسی نخست بوده و فضای تصویر سمت راست سطح عدسی آخری است. گشودگی‌ای که زاویه  $u_p$  پرتو اصلی را محدود می‌کند میدان‌بند نامیده می‌شود. به تصویر آن در فضای جسم، پنجره‌ی ورودی و در فضای تصویر، پنجره‌ی خروجی گفته می‌شود. در شکل (۱-۱)،  $D$  اندازه‌ی روزنه بند و  $d'$  اندازه‌ی میدان‌بند است. هم‌چنین شکل (۱-۱) نشان می‌دهد جسمی که در فاصله‌ی  $s$  سمت چپ عدسی قرار داده شده است تصویرش در فاصله‌ی  $s'$  سمت راست عدسی تشکیل می‌شود. در بسیاری از حالت‌ها، جسم (هدف) را می‌توان در بی‌نهایت تصور نمود. در نتیجه، تصویر در صفحه کانونی عدسی تشکیل می‌شود. زاویه‌ی پرتو محوری  $u$ ، صفر خواهد شد و فاصله‌ی تصویر  $s'$  برابر با فاصله‌ی کانونی  $f$  می‌گردد. به نسبت فاصله‌ی کانونی و قطر مردمک ورودی، روزنه‌ی نسبی<sup>۲</sup> یا عدد  $f$  ( $f/\#$ ) گفته می‌شود.

1. Axial energy cone
2. Relative aperture

۱-۳ - نسبت سیگنال به نویز<sup>۱</sup>

چندین روش ارزیابی عملکرد یک سیستم کامل نظیر  $MRT$ <sup>۲</sup> (کمینه دمای قابل تفکیک) و  $MDT$ <sup>۳</sup> (کمینه دمای قابل آشکارسازی) وجود دارد. به دلیل آن که موضوع این کتاب بخش اپتیکی یک سیستم مادون قرمز است، بحث خود را فقط به معیار نسبت سیگنال به نویز ( $S/N$ ) محدود می‌کنیم. در ساده‌ترین شکل، نسبت سیگنال به نویز به صورت زیر بیان می‌شود:

$$S/N = \frac{P}{NEP} \quad (1-1)$$

که  $P$ ، توان تابشی دریافت شده توسط آشکارساز بر حسب وات است. توان معادل نویز،  $NEP$ ، اندازه‌ی کمینه سیگنالی است که نسبت سیگنال به نویز واحد را نتیجه می‌دهد. توان را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه نمود:

$$P = \frac{EP \times EW}{S^2} N = \frac{EP' \times EW'}{S'^2} N \quad (2-1)$$

که  $EP$  و  $EW$  مساحت مردمک ورودی و پنجره ورودی بر حسب  $cm^2$  و  $s$  فاصله‌ی بین پنجره‌ی ورودی از مردمک ورودی بر حسب  $cm$  است.  $N$  تابندگی منبع و بر حسب  $Watts\ cm^{-2}\ Ster^{-1}$  سنجیده می‌شود. نماد پرایم مربوط به سمت تصویر سیستم است.  $EP'$  و  $EW'$  مردمک خروجی و پنجره‌ی خروجی بوده و  $s'$  فاصله بین این دو است.

در این عبارت بنیادی،  $N$  در هر دو رابطه وجود دارد و این نشان دهنده آن است که هیچ گونه کاهش تابشی ناشی از اتلاف تراگسیل<sup>۴</sup> یا عوامل دیگر در نظر گرفته نشده است.

نکته مهم در معادله‌ی (۲-۱) وجود ناوردایی است که انتخاب تعیین انتقال توان از سمت جسم (سمت هدف) یا سمت تصویر (سمت آشکارساز) را امکان‌پذیر می‌سازد.

- 
1. Signal - to- noise ratio
  2. Minimum Resolvable Temperature(MRT)
  3. Minimum detectable Temperature (MDT)
  4. transmission

هنگامی که جسم در بی نهایت قرار دارد، تصویر در صفحه ی کانونی تشکیل می شود. در این حالت، مساحت مردمک خروجی  $D^2\pi/4$  و  $s'$  برابر با  $f$  است. بنابر این، عبارت بخش تصویر معادله ی (۲-۱) به صورت زیر بهینه می گردد:

$$P = \frac{(D^2\pi/4)d'^2}{f^2} N \quad (۳-۱)$$

که  $d'$  اندازه خطی آشکارساز مربعی است. آشکارساز پنجره ی خروجی است. توان تابشی بر حسب وات بر سانتی متر مربع از یک منبع نفوذ تخت<sup>۱</sup> درون یک نیم کره گسیل تابشی،  $W$  نامیده می شود. رابطه ی بین گسیل تابشی و تابندگی به صورت  $N = \frac{W}{\pi}$  است. با جایگزینی این رابطه و  $(f/\#)$  به جای  $\frac{f}{D}$  معادله ی (۳-۱) را به صورت زیر باز می نویسیم:

$$P = \frac{d'^2}{4(f/\#)^2} W \quad (۴-۱)$$

توان معادل نویز،  $NEP$  تابعی از اندازه آشکارساز  $d'$ ، پهنای باند الکتریکی  $\Delta f$  استفاده شده در اندازه گیری و عدد شایستگی آشکارساز  $D^*$  است.  $D^*$  با بُعد تا حدی نامعمول  $cm Hz^{1/2} W^{-1}$  سنجیده می شود.  $D^*$  پارامتر سنجش عملکرد آشکارساز تحت شرایط استاندارد بوده و جهت مقایسه با آشکارسازهای دیگر مورد استفاده قرار می گیرد.

$$NEP = \frac{d'\sqrt{\Delta f}}{D^*} \quad (۵-۱)$$

با جایگذاری معادلات (۴-۱) و (۵-۱) در معادله ی (۱-۱) نتیجه می شود:

$$\frac{S}{N} = \frac{D^* d' W}{4(f/\#)^2 \sqrt{\Delta f}} \quad (۶-۱)$$

این عبارت ساده تأثیر بسیار زیاد سیستم اپتیک انتخابی را نشان می دهد.  $\frac{S}{N}$  متناسب با وارون مربع روزنه ی نسبی،  $(f/\#)$  است. این بدان معنی است که  $\frac{S}{N}$  یک

1. Flat diffuse source
2. Figure of merit

سیستم IR با شیئی  $f/1$  چهار برابر بهتر از یک سیستم با  $f/2$  است. متأسفانه همان‌گونه که در فصل سوم خواهیم دید، عدسی سریع‌تر ( $f/\#$  کم) دارای ابیراهی بزرگ‌تری است.

### ۴-۱- معادله‌ی عمومی عملکرد تابش سنجی

معادله (۶-۱) را جهت نشان دادن شار انرژی تابشی از منبع (هدف) به آشکارساز می‌توان به صورت زیر بسط داد:

[ بهره‌ی آشکارساز ] × [ عملکرد اپتیکی ] × [ عبور جوئی ] × [ توان زمینه - توان منبع ] = نسبت سیگنال به نویز  
یا

$$\frac{S}{N} = \left[ W_T \varepsilon_T - W_B \varepsilon_B \right] [\tau_A] \left[ \frac{\tau_o d'}{4(f/\#)^2} \right] \left[ \frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}} \right] \quad (7-1)$$

۴. آشکارساز ۳. اپتیک ۲. محیط ۱. زمینه و منبع

در معادله‌ی (۷-۱)،  $d'$  در بخش براکت اپتیک آمده است. گرچه  $d'$  اندازه‌ی خطی آشکارساز مربعی است؛ اندازه‌ی میدان بند و پنجره‌ی خروجی نیز است. معادله مبتنی بر این فرض است که تصویر هدف بزرگ‌تر از آشکارساز است، یعنی تابش رسیده از هدف تمامی سطح آشکارساز را در بر می‌گیرد. اکنون براکت‌های این عبارت ساده را بررسی خواهیم کرد. به دلیل تأکیدمان بر روی بخش اپتیک، براکت سوم بعداً بحث خواهد شد.

### ۵-۱- قوانین تابش حرارتی

$$\frac{S}{N} = [W_T \varepsilon_T - W_B \varepsilon_B] [t_A] \left[ \frac{t_o d'}{4(f/\#)^2} \right] \left[ \frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}} \right]$$

در نخستین براکت معادله‌ی (۷-۱)،  $W$  گسیل تابشی بر حسب وات بر سانتی‌متر مربع در پهنای باند طیفی مورد نظر است.  $\varepsilon$  گسیلندگی نامیده می‌شود. در مورد

معنای آن به زودی گفت‌وگو خواهد شد.  $\epsilon$  بدون بعد است. اندیس های  $T$  و  $B$  به ترتیب به هدف و زمینه اشاره می‌کنند. تابش زمینه تابشی است که از پیرامون هدف رسیده است. مقدار موثر یا خالص گسیلندگی، تابش اختلاف بین تابش هدف و زمینه است. این بدان معناست که باید اختلاف تابشی مثبت یا منفی جهت آشکارسازی یا تفکیک هدف (جسم) وجود داشته باشد.

### ۱-۵-۱- تابش جسم سیاه و قانون پلانک

یک جسم سیاه به عنوان یک تابشگر کامل که همه‌ی تابش فرودی را جذب می‌کند، تعریف می‌شود. ماکس پلانک (۱۹۴۷-۱۸۵۸) در جستجوی خود برای یافتن رابطه‌ای بین تابش گسیلی از یک جسم سیاه به صورت تابعی از دما و طول موج؛ معادله‌ای را که اکنون شهرت بسیار دارد و بعدها به نام خود او نامیده شد، ارائه نمود. تلاش های او سبب پایه‌گذاری نظریه کوانتوم شد که در سال ۱۹۱۸ به خاطر آن جایزه نوبل را دریافت نمود.

او در ۱۹ اکتبر سال ۱۹۰۰ نخستین گزارش خودش را که مبتنی بر کار تجربی بود، منتشر کرد [۲]. در ۱۴ دسامبر - تنها دو ماه بعد - او محاسبه‌ی نظری معادله‌ای را که منحنی تابش جسم سیاه را توصیف می‌کند، ارائه نمود [۳].

$$W = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[ e^{C_2 / \lambda T} - 1 \right]} \quad (۸-۱)$$

که  $W_\lambda =$  گسیلندگی تابش طیفی ( $Wcm^{-2}\mu m^{-1}$ )؛

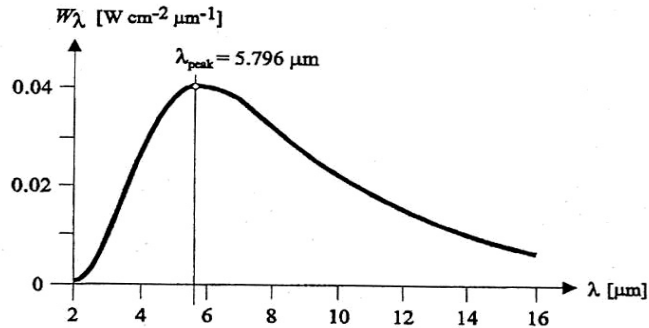
$T =$  دمای جسم ( $K$ )؛

$C_1 = 3.7418 \times 10^{-16} Wcm^{-2}\mu m^4$ ؛

$C_2 = 1.4388 \mu K$  و

$e =$  پایه‌ی لگاریتم نپرین (۲/۷۱۸.....).

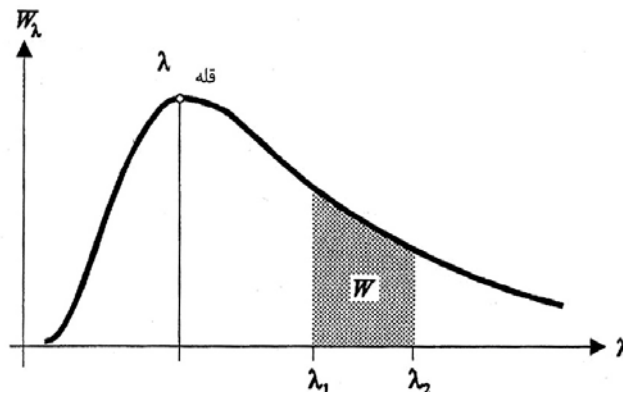
همان گونه که مشاهده می‌شود، معادله‌ی (۱-۹) وابستگی زیادی به طول موج دارد و هنگامی که  $\lambda = 0, \infty$  است،  $W_\lambda$  به سمت صفر میل می‌کند. در شکل (۱-۲) منحنی پلانک برای یک جسم سیاه با دمای  $500 K$  نشان داده شده است.



شکل ۱-۲- منحنی پلانک برای یک منبع جسم سیاه با  $T = 500 \text{ K}$ .

برای تعیین گسیلندگی تابشی در کل باند طیفی از زیر منحنی پلانک بین بازه‌های  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  انتگرال می‌گیریم. مثالی از باند طیفی انتخابی در شکل (۱-۳) نشان داده شده است.

$$W = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda d\lambda \quad (9-1)$$



شکل ۱-۳- تابش طیفی در یک باند طیفی ویژه.

برای انتگرال‌گیری می‌توان از جداول موجود یا خط‌کش‌های محاسبه‌ای ویژه استفاده نمود [۴]. یک راه بسیار مناسب، استفاده از قاعده‌ی سیمپسون<sup>۱</sup> با کمک یک ماشین حساب است. برای این منظور از رابطه‌ی زیر استفاده می‌کنیم:

1. Simpson



$$W \cong \sum_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda} \Delta \lambda \quad (10-1)$$

برای جمع روی نواحی مادون قرمز با طول موج میانی<sup>۱</sup> (MWIR) و بلند<sup>۲</sup> (LWIR)  $\mu m$  (۵-۱۲ و ۸-۱۲) استفاده از  $0.1$  یا  $0.05$   $\Delta \lambda$  مناسب است. هم‌چنین به‌خاطر داشته باشید که اگر باند طیفی نسبتاً باریک باشد،  $W \approx W_{\lambda} \Delta \lambda$  می‌شود.

### ۱-۵-۲ - قانون استفان - بولتسمان

ژوزف استفان<sup>۳</sup> (۱۸۹۳-۱۸۳۵) و لودویگ بولتسمان<sup>۴</sup> (۱۹۰۶-۱۸۴۴) هر یک به‌طور مستقل و به‌صورت تجربی دریافته‌اند که کل تابش گسیلی از یک جسم سیاه (مساحت زیر منحنی پلانک) برابر است با:

$$W_{TOTAL} = \sigma T^4 \quad (11-1)$$

$$T = \text{که } \sigma = 5.6696 \times 10^{-12} \text{ (} W cm^{-2} K^{-4} \text{) و } (K) \text{ دمای منبع}$$

### ۱-۵-۳ - قانون جابه‌جایی وین

هنگامی که یک جسم سیاه تابش می‌کند، رابطه‌ی ساده و جالبی بین قله موج و دما وجود دارد. ویلهلم کارل ورنر اوتو فریتز وین<sup>۵</sup> (۱۹۲۸-۱۸۶۴) - برنده‌ی جایزه نوبل سال ۱۹۱۱ - این رفتار جسم سیاه را کشف نمود [معادله‌ی (۱-۱۲)]. این قانون بیان می‌کند که حاصل‌ضرب قله‌ی موج و دمای منبع ثابت است، و این بدین معناست که قله‌ی تابش با افزایش دما به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر منتقل می‌شود. شکل (۱-۴) جابه‌جایی قله‌ی طول موج را نشان می‌دهد.

$$\lambda_p T = 2897.8 \quad (\mu m K) \quad (12-1)$$

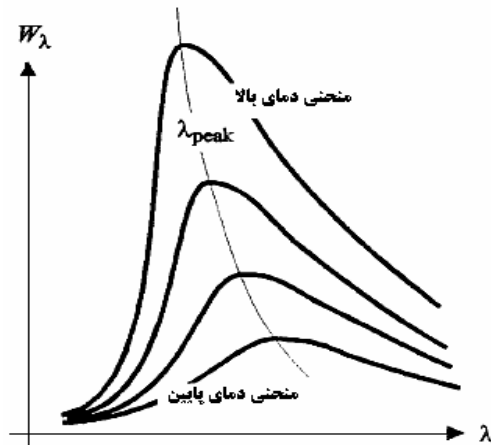
با استفاده از قانون پلانک، گسیلندگی تابش طیفی در قله طول موج برابر است با:

1. Mid- Wavelength InfraRed (MWIR)
2. Long-Wavelength InfraRed (LWIR)
3. Josef Stefan
4. Ludwig Boltzmann
5. Wilhelm Carl Werner Otto Fritz Wien

$$W_{\lambda \max} = 1.288 \times 10^{-15} T^5 \text{ (Wcm}^{-2}\mu\text{m}^{-1}\text{)} \quad (1-13)$$

### ۱-۵-۴- قانون کیرشهوف و گسیلمندی

در سال ۱۸۶۰ گوستاو رابرت کیرشهوف (۱۸۸۷-۱۸۲۴) اظهار داشت « در تعادل حرارتی توان تابشی یک جسم باید برابر با توان جذب شده توسط آن باشد.» این امر سبب می‌گردد که اگر جسمی ۱۰۰ درصد تابش فرودی را جذب نماید، بایستی ۱۰۰٪ آن را نیز بازتاباند. همان گونه که پیش از این بیان شد، این تعریف یک تابشگر جسم سیاه است. بیشتر منابع تابشی جسم سیاه نیستند، به طوری که مقداری از انرژی فرودی بر روی آنها ممکن است بازتابیده یا گذر نماید.



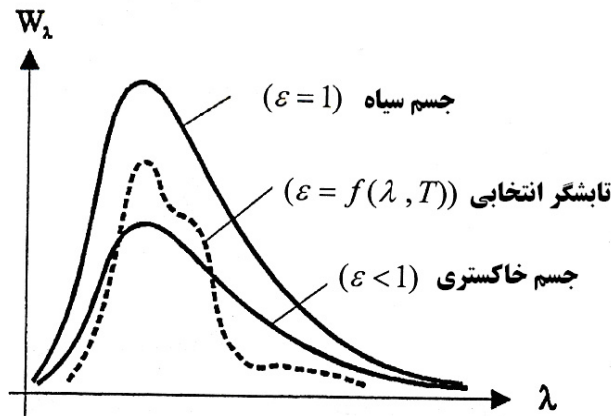
شکل ۱-۴- قانون جابه‌جایی وین.

نسبت گسیلندگی تابشی چنین منابعی،  $W'$  و گسیلندگی تابشی یک جسم سیاه،  $W$  در همان دما گسیلمندی منبع  $\epsilon$  نامیده می‌شود.

$$\epsilon = W' / W \quad (1-14)$$

همان گونه که در شکل (۱-۵) نشان داده شده است، بر اساس این رابطه انواع مختلف منابع تابشی را می‌توان طبقه‌بندی نمود. در این شکل، منحنی جسم سیاه با  $\epsilon = 1$  منحنی پلانک است. منحنی برای یک جسم خاکستری متناسب با منحنی

پلانک برای تمامی طول موجها است. گسیلندگی تابش طیفی برای یک تابشگر انتخابی نه تنها نسبت به دما، بلکه نسبت به طول موج نیز تغییر می کند.



شکل ۱-۵- گسیلندگی تابش طیفی برای سه تابشگر مختلف.

### ۱-۶ - گذر از میان جو

$$S / N = [W_T \epsilon_T - W_B \epsilon_B] \left[ t_A \left[ \frac{t_o d'}{4(f/\#)^2} \right] \left[ \frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}} \right] \right]$$

براکت دوم معادله ی (۷-۱) گذر انرژی تابشی از میان جو را نشان می دهد. ارزیابی تمامی عواملی که می تواند بر گذر تأثیر بگذارد موضوع بسیار پیچیده ای است. کارهای بسیاری توسط پژوهشگران در طی سالها برای مدل سازی تضعیف ناشی از گازهای جو انجام شده است. بسیاری از متغیرها، نظیر تغییرات در دما، فشار گازها، اشکال، اندازه ها و ترکیبات شیمیایی ذرات معلق و شیب مسیر نوری، پیشگویی گذر IR از میان جو را بی نهایت مشکل می سازد.

در این جا، هدف ما ذکر این نکته است: هنگامی که سیستم IR تحت بررسی در مسیری طولانی در نظر گرفته شود، آنگاه اثرات جذب جو می ممکن است موثر باشد. بسته به کاربرد، یک بررسی سطحی ممکن است کافی باشد. در برخی موارد، تحلیل بیشتری مورد نیاز خواهد بود.

### ۱-۶-۱- ترکیبات ثابت جو خشک

غلظت نسبی گازهای موجود در جو تقریباً ثابت است، بنابراین این عناصر ثابت جو نامیده می‌شوند. جدول (۱-۱) این عناصر را مشخص می‌کند و مشخصه‌های جذب آنها را در طیف ماون قرمز نشان می‌دهد.

### ۱-۶-۲- ترکیبات متغیر

دو ترکیب اصلی در جو که با دما و ارتفاع تغییر می‌کنند از ن و بخار آب است. از آن جایی که بیشینه غلظت از ن در ارتفاع بالا بین ۱۰ و ۳۰ کیلومتر از سطح زمین قرار دارد، بنابراین این می‌توانیم از اثرات آن چشم پوشی کرده و بیان کنیم که: بخار آب سبب بیشترین جذب در ناحیه  $IR$  در سطح دریا می‌شود.

### ۱-۶-۳- تقریب (فرض)

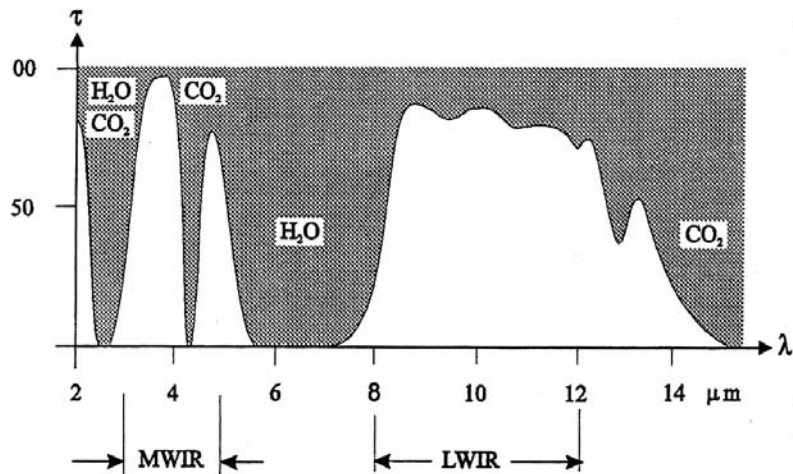
نزدیک سطح دریا، می‌توان فرض کرد که گذر از میان جو زمین تنها تحت تأثیر، اثرات جذب دی اکسید کربن و بخار آب است. این مسئله را می‌توان به صورت زیر عنوان نمود:

$$\tau_{atoms} = \tau_{Co_2} \times \tau_{H_2O} \quad (15-1)$$

جدول ۱-۱- اجزای ثابت جو خشک [۶].

ترکیب	فرمول شیمیایی	درصد موجود در حجم	جذب بین ۱۵-۲ $\mu m$
نیتروژن	$N_2$	۷۸/۰۸۴	ندارد
اکسیژن	$O_2$	۲۰/۹۴۶	ندارد
آرگون	$A$	۰/۹۳۴	ندارد
دی اکسید کربن	$Co_2$	۰/۰۳۲	دارد
نئون	$Ne$	$1/818 \times 10^{-3}$	ندارد
هلیوم	$He$	$5/24 \times 10^{-4}$	ندارد
متان	$CH_4$	$2/0 \times 10^{-4}$	دارد
کریپتون	$Kr$	$1/14 \times 10^{-4}$	ندارد
دی اکسید نیتروژن	$N_2O$	$5/0 \times 10^{-5}$	دارد
هیدروژن	$H_2$	$5/0 \times 10^{-5}$	ندارد
گزنون	$Xe$	$9/5 \times 10^{-5}$	ندارد
منواکسید کربن	$Co$	$7/5 \times 10^{-6}$	دارد

در این جا  $H_2O$  نمایانگر بخار آبی است که چگالی آن با دما و رطوبت تغییر می کند. شکل (۶-۱) نواحی طول موج مادون قرمزی را که گذر از آنها تحت تأثیر وجود بخار آب و دی اکسید کربن است را نشان می دهد.



شکل ۶-۱- پنجره های طیفی در مادون قرمز.

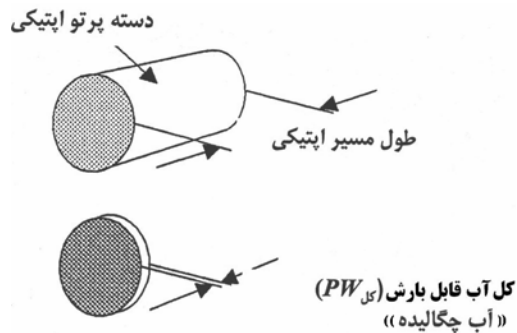
#### ۱-۶-۴- آب قابل بارش<sup>۱</sup> (تعریف)

مقدار بخار آب موجود در مسیر اپتیکی، آب قابل بارش نامیده می شود. به خاطر داشته باشید که منظور از کلمه بخار، آب در شکل گازی است. آب قابل بارش (شکل (۷-۱)) به صورت عمق لایه ای از آب تعریف می شود، اگر همهی بخار آب در امتداد خط دید در یک محفظه با همان سطح مقطع یکسان با دسته پرتوی اپتیکی، چگالیده شده باشد.

#### ۱-۶-۵- رطوبت

محاسبه مقدار کل آب قابل بارش در امتداد خط دید یک سیستم اپتیکی، شامل رطوبت نسبی است. اجازه دهید چند رابطه کلی در ارتباط با رطوبت بیان کنیم و سپس آنها را با یک مثال به کار می بریم.

1. Precipitable Water



شکل ۱-۷- مفهومی آب قابل بارش.

### رطوبت مطلق [ $AH (gm^{-3})$ ]

$AH(t)$  جرم بخار آب در واحد حجم جو در دمای  $t$  بر حسب  $^{\circ}C$  است و  $AH_{Sat}(t)$  بیشینه مقدار بخار آبی است که در دمای  $t$  توسط جو قابل نگهداری است. این شرط حالت اشباع نامیده می شود.

### رطوبت نسبی ( $RH$ )

رطوبت نسبی به بیان ساده نسبت بین جرم بخار آب بر واحد حجم موجود در هوا و جرم بخار آب در هوای اشباع در همان دما است. یعنی:

$$RH = \frac{AH(t)}{AH_{sat}(t)} \quad (16-1)$$

### ۱-۶-۶- مقدار آب قابل بارش (محاسبه)

مقدار آب قابل بارش بر حسب میلی متر بر یک متر از مسیر سنجیده می شود و به وسیله رابطه زیر محاسبه می شود:

$$pw = 10^{-3} AH(t) = 10^{-3} AH_{sat}(t) \times RH(mm/m) \quad (17-1)$$

برای رطوبت در حالت اشباع از تقریب زیر در بازه دمای  $0^{\circ}$  تا  $35^{\circ}C$ ،  $(95^{\circ}F)$  تا  $32^{\circ}$  استفاده می شود:

$$AH_{sat} \cong 5.071962 e^{0.059688 t} \quad (g/m^3) \quad (18-1)$$

درستی این تقریب در بازه دمای مذکور بهتر از ۰.۵٪ است.

معادله (۱۸-۱) را می توان برای یک مسیر اپتیکی یک کیلومتری به صورت زیر نوشت:

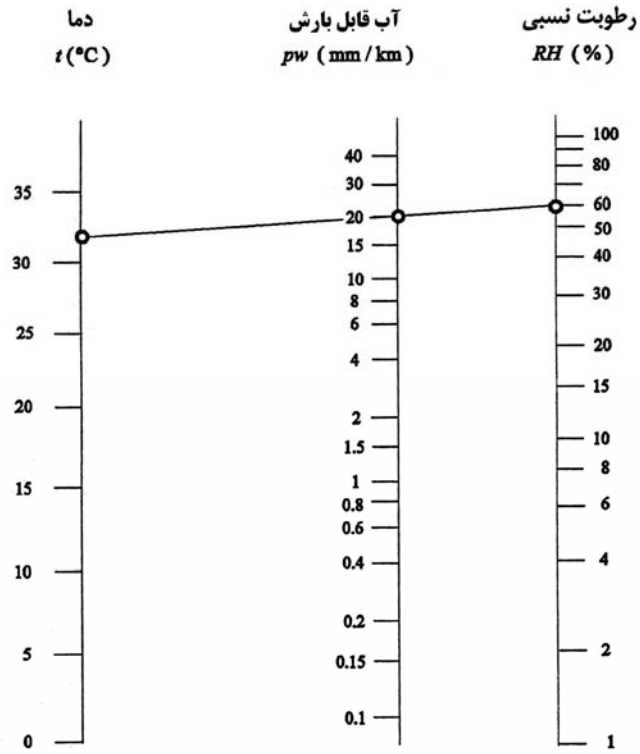
$$pw \cong 5.072 e^{0.0597 t} \times RH(mm/km) \quad (19-1)$$

نوموگرام<sup>۱</sup> نشان داده شده در شکل (۸-۱) بر پایه این رابطه است. در مثال نشان داده شده در شکل (۸-۱)، جوّی با ۶۰٪ رطوبت نسبی در دمای ۳۲°C، حاوی  $20 \text{ mm/Km}$  آب قابل بارش است.

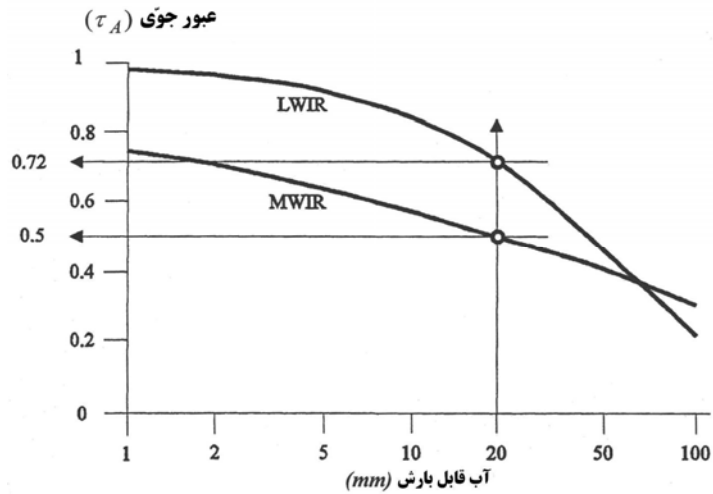
### ۱-۶-۷- گذر جوّی (محاسبه)

معادله (۱۵-۱) بیانگر این معناست که کل گذر از میان جوّ در شرایط ویژه را می توان به صورت حاصل ضرب مولفه های گذر دی اکسید کربن و بخار آب تقریب زد. ارزیابی اثرات پهنای باندهای طیفی مختلف، تغییر طول مسیره ها و آب قابل بارش حتی با رابطه ی ساده ی خودمان، مستلزم استفاده از جداولی نظیر جداول ارایه شده در مرجع [۶] است، می باشد. به عنوان مثال جهت تعیین گذر کل در ناحیه (۳-۵  $\mu m$ ) MWIR با مراجعه به شکل (۸-۱) درمی یابیم که میانگین گذر  $CO_2$  با استفاده از جداول مرجع [۶] برای طول مسیر  $1 \text{ Km}$  برابر با  $\tau_{CO_2} = 0.848$  بوده و میانگین گذر برای  $20 \text{ mm}$  آب قابل بارش برابر با  $\tau_{H_2O} = 0.591$  است. بنابراین، گذر کل از میان یک کیلومتر از جوّ در نزدیکی سطح دریا در دمای ۳۲°C و رطوبت نسبی ۶۰٪ تقریباً برابر است با  $\tau_{atmos} = 0.848 \times 0.591 \cong 0.50$ . در همان شرایط دما و رطوبت، گذر کل برای طول مسیر  $1 \text{ Km}$  در ناحیه (۸-۱۲  $\mu m$ ) LWIR به طور قابل ملاحظه ای بهتر است، یعنی  $\tau_{atmos} = 0.995 \times 0.723 \cong 0.72$ .

شکل (۹-۱) یک نمودار گذر جوّی در مسیری یک کیلومتری در هر دو پنجره ی مادون قرمز (MWIR و LWIR) است. در این نمودار مثال های بیان شده در بالا نشان داده شده است. این دو منحنی اطلاعاتی در ارتباط با تغییر آب قابل بارش در دو پنجره ی اصلی IR ارایه می کنند.



شکل ۱-۸- مونوگرام جهت تعیین مقدار آب قابل بارش از دما و رطوبت نسبی.



شکل ۱-۹- میزان گذر از مسیر ۱ km برای باندهای طیفی LWIR و MWIR.



### ۱-۶-۸- مدل های رایانه ای

روشن است که موضوع گذر جوئی بسیار پیچیده است. افزایش قدرت رایانه های موجود و تلاش های متخصصان در این حوزه به مدل های رایانه ایی با جزییات بسیار رهنمون شده است. هم اکنون نسخه ی هفتم LOWTRAN که گسترده ترین برنامه ی مورد استفاده در این زمینه است توسط مدیریت ژئوفیزیک پایگاه نیروی هوایی هانسکم در ماساچوست<sup>۱</sup> پشتیبانی می شود.

### ۱-۷- آشکارسازهای IR نوعی

$$S / N = [W_T \varepsilon_T - W_B \varepsilon_B] [\tau_A] \left[ \frac{\tau_0 d'}{4(f / \#)^2} \right] \left[ \frac{D^*}{\sqrt{\Delta F}} \right]$$

در این بخش، به طور خلاصه برکت مربوط به آشکارساز سیستم را در معادله ی عمومی عملکرد [معادله ی (۱۷-۱)] مورد بررسی قرار خواهیم داد. بحث خود را با شناسایی دو گروه اساسی از آشکارسازها که به طور معمول جهت تبدیل انرژی تابشی به سیگنال الکتریکی مورد استفاده قرار می گیرند، آغاز می کنیم.

#### ۱-۷-۱- آشکارسازهای حرارتی

یک آشکارساز حرارتی انرژی تابشی را جذب می کند که این امر سبب تغییر مشخصه های الکتریکی آشکارساز می شود. پاسخ الکتریکی ناشی از تغییر دمای هدف، سیگنالی الکتریکی ایجاد می کند که می توان آن را تقویت نموده و نمایش داد. یکی از جالب ترین مشخصه های آشکارسازهای حرارتی، پاسخ دهی یکسان آنها به تمامی طول موجها است. این ویژگی سبب پایداری سیستمی می شود که بایستی در بازه ی دمایی گسترده ای عمل نماید. عامل مهم دیگر در رابطه با آشکارسازهای حرارتی این است که نیاز به خنک سازی نداشته باشند. با وجود این، زمان پاسخ این گونه آشکارسازها در حدود میلی ثانیه بوده و در نتیجه نسبتاً کند هستند. بعلاوه آشکارسازی آنها یک یا دو مرتبه کمتر از آشکارسازهای فوتونی است.

1. Hanscom Air Force Base in Massachusetts

متداول ترین آشکارسازهای حرارتی عبارتند از: ترموکوپل، ترموپیل، بالومتر و پیروالکتریک.

### ۱-۷-۲- آشکارسازهای فوتونی یا کوانتومی

آشکارسازهای فوتونی یا کوانتومی بر اساس اثر فوتونی یا کوانتومی عمل می‌نمایند. در این حالت فوتون‌های جذب شده تولید حامل‌های بار الکتریکی آزاد می‌کنند که پیامد آن تغییر مشخصه الکتریکی المان پاسخ دهنده است. آشکارسازهای فوتونی سریع‌تر از آشکارسازهای حرارتی بوده و پاسخ آنها در حدود میکروثانیه است. همان گونه که پیشتر نیز بیان شد، آشکارپذیری آنها به طور قابل ملاحظه‌ای بزرگ‌تر است. جهت دستیابی به آشکارپذیری بالا، آشکارساز بایستی خنک شود. برای کاهش دما به طور محدود از کولرهای ترموالکتریک یک یا چند مرحله‌ای استفاده می‌شود. جهت دستیابی به خنک‌سازی تا دماهای خیلی کم،  $77^\circ K$  و حتی کمتر باید روش‌های خنک‌سازی کرایوژنیک<sup>۱</sup> به کار گرفته شود.

### ۱-۷-۳- آشکارسازهای فوتوکانداکتیو

این آشکارسازها جزو پر استفاده‌ترین گروه آشکارسازهای فوتونی هستند. عملکرد آنها بر پایه‌ی اثر فوتوکانداکتیو است. فوتون‌های مادون قرمز فرودی جذب شده تولید حامل‌های بار آزاد می‌کنند که در نتیجه، رسانندگی الکتریکی المان تغییر می‌کند.

برخی از موادی که در این گروه از آشکارسازها قرار می‌گیرند عبارتند از:

PbS	سولفید سرب
PbSe	سلناید سرب
InSb	ایندیم آنتیموان
HgCdTe	کادمیوم تلوراید جیوه

### ۱-۷-۴- آشکارسازی ویژه و نویز معادل پهنای باند<sup>۲</sup>

عدد شایستگی که جهت توصیف عملکرد یک آشکارساز استفاده می‌شود، آشکارپذیری ویژه،  $D^*$  (دی-استار) نامیده می‌شود. آن نسبت سیگنال به نویز است،

1. Cryogenic cooling method  
2. Noise equivalent bandwidth

هنگامی که  $1\text{ W}$  انرژی بر روی آشکارسازی با سطح حساس  $1\text{ cm}^2$  فرود می آید و نویزی با پهنای باند الکتریکی  $1\text{ Hz}$  اندازه گیری شود. این تعریف در دهه ی پنجاه میلادی توسط کلارک جونز ارایه شد. واحد آن  $\text{cm Hz}^{1/2} \text{ W}^{-1}$  است و توافق شده که برحسب « جونز » بیان شود [۷].

در این جا مخرج کسر براکت مورد بحث مربوط به پهنای باند الکتریکی تقویت کننده ی سیستم مورد استفاده جهت اندازه گیری نویز است. متداول ترین تعریف پهنای باند عبارت است از بازه ی فرکانسی ای که بهره ی توان از نصف بیشینه ی مقدار آن بیشتر باشد. هم چنین بیشتر پهنای باند  $3\text{-dB}$  نامیده می شود [۸].

در شکل (۱-۱۰) برای برخی از متداول ترین آشکارسازهای فوتوکنداکتیو IR، آشکاربندی ویژه به صورت تابعی از طول موج نشان داده شده است.

جهت روشن شدن اثر خنک سازی بر روی عملکرد، برخی از منحنی های شکل (۱-۱۰) به صورت پر رنگ نشان داده شده است. این منحنی ها مربوط به آشکارساز سلناید سرب در سه دمای مختلف  $195$ ،  $295$  و  $77\text{ K}$  یا  $78$ ،  $22$  و  $196^\circ\text{C}$  است.

توجه به این نکته جالب است که، پاسخ طیفی با کاهش دمای آشکارساز به طرف طول موج های بلندتر منتقل می شود.

### ۱-۷-۵- پیکربندی های آشکارسازها

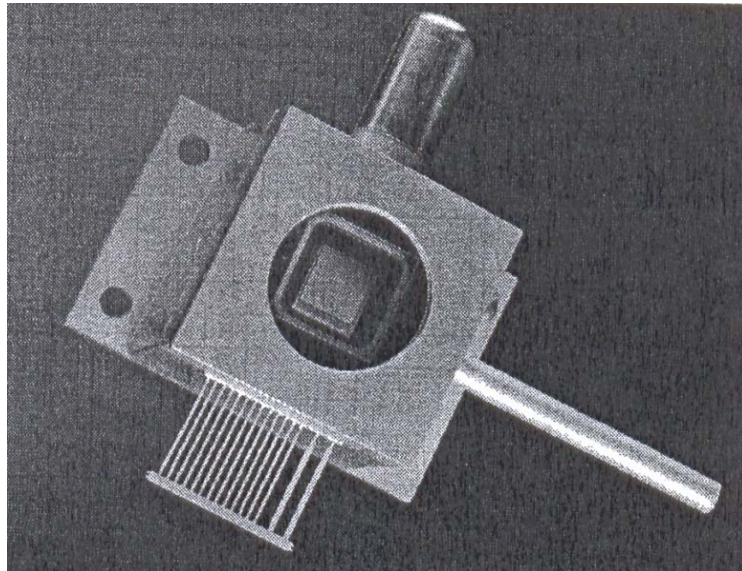
بیشتر آشکارسازها به صورت تک المانی نیستند بلکه آنها را به صورت آرایه چیدمان می کنند. به عنوان مثال، در تصویربرداری حرارتی تعدادی المان آشکارساز را به دو صورت تک خط یا دو بعدی قرار می دهند. آرایه های خطی مکانیسم روبش را به یک محور افقی یا عمودی محدود می نمایند. ( روبش فرآیند کاوش صحنه با آشکارسازی متوالی یک میدان پوشش داده شده توسط یک تک المان یا یک آرایه خطی است). آرایه های دو بعدی فرآیند روبش را به طور کامل حذف می کنند. این گونه آرایه ها موسوم به آرایه های استارینگ<sup>۱</sup> یا آرایه های صفحه کانونی (FPA)<sup>۲</sup> می باشند. به سادگی می توان مزایای چنین گروهی از آشکارسازهای کوچک را در صفحه کانونی تصور نمود.

1. staring arrays
2. Focal Plane Array (FPA)

اگرچه از دیدگاه اپتیکی، چنین آرایه‌هایی میدان دید گسترده‌ای ایجاد می‌کنند که به پیچیدگی بیشتری در تصحیحات ابیراهی منجر می‌شود. این موضوع با جزئیات بیشتر در فصل‌های (۳) و (۴) مورد بحث قرار خواهد گرفت.

در شکل (۱-۱۱) یک آرایه آشکارساز خنک‌شده توسط یک کولر ترموالکتریک چند مرحله‌ای نشان داده شده است. اندازه‌ی هر المان (پیکسل<sup>۱</sup>) به کوچکی  $30 \times 30 \mu m$  بوده و تعداد کل المان‌ها در چنین آرایه‌ای می‌تواند بیش از ۶۵۰۰۰ باشد.

در فصل بعدی به بحث در ارتباط با براکت اپتیک معادله عمومی عملکرد تابش‌سنجی [معادله (۱-۷)] خواهیم پرداخت.



شکل ۱-۱۱- یک آرایه صفحه کانونی HgCdTe خنک شده به صورت ترموالکتریکی.

## ۸-۱- مراجع

- [1] G.Holst, "Testing and Evaluation of Infrared Imaging Systems", JCD Publishing Company (1993).
- [2] E.Hecht , "Optics", second ed. , Addison – Wesley (1990).
- [3] F.Von Krbek , " Erlebte Physik", Deutscher Verlag (1942), P.119.

---

1. pixel

- [4] Infrared Radiation Calculator , Infrared Information Analysis Center , Ann Arbor, MI, and EG&G Judson, Montgomeryville , PA and others.
- [5] F.Smith , "The Infrared and Electro – Optical Systems Handbook" , Vol. 2 , Atmospheric Propagation of Radiation , ERIM&SPIE(1993).
- [6] R. Hudson , "Infrared System Engineering" , John Wiley (1969) , P.118.
- [7] W.Rogatto, "The Infrared and Electro – Optical Systems Handbook" , Vol.3 , Electro Optical Component , ERIM&SPIE (1993), P.251.
- [8] R.Hudson , " Infrared System Engineering" , John Wily (1969), P.312



فصل دوم

مبانی اپتیک

## ۲-۱- مقدمه

در این فصل به بحث در مورد سومین براکت معادله‌ی عمومی عملکرد تابش‌سنجی [معادله‌ی (۷-۱)] می‌پردازیم.

$$S/N = [W_T \varepsilon_T - W_B \varepsilon_B] [\tau_A] \left[ \frac{\tau_0 d'}{4(f/\#)^2} \right] \left[ \frac{D^*}{\sqrt{\Delta f}} \right]$$

که  $\tau_0$  گذر خالص پس از جذب و اتلاف‌های فرنل تمامی المان‌های اپتیکی است؛ که نه تنها شامل عدسی‌ها و آینه‌ها می‌باشد، بلکه پنجره‌ها و فیلترها را نیز شامل می‌شود. همان‌گونه که پیشتر نیز بیان شد، هر چند  $d'$  اندازه‌ی خطی المان آشکارساز است، اما در «براکت اپتیک» ظاهر شده است، زیرا اندازه میدان‌بند نیز هست. در این فصل برای خواننده‌ای که دغدغه‌ی ابیراهی‌های اپتیکی را ندارد، برخی مثال‌های عددی محاسبات  $S/N$  با پیشگویی عملکرد بسیار مقدماتی یک پیکربندی سیستمی ارائه می‌شود.

در برخی مواقع، تحلیل بیشتری از بخش اپتیک مورد نیاز است. بدین منظور، شناخت مبانی اپتیک لازم است.

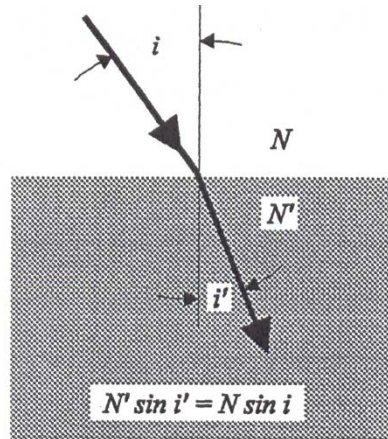
در ابتدا با مبانی اپتیک هندسی، یعنی قانون اسنل شروع می‌کنیم. این قانون به نام ویلی برورد اسنل فان روین<sup>۱</sup> (۱۶۲۶-۱۵۹۱) ستاره‌شناس و ریاضیدان آلمانی دانشگاه لیدن هلند نامیده شده است. این قانون بیان می‌کند که، هنگامی که نور از یک محیط شفاف به محیط دیگری وارد می‌شود، حاصل‌ضرب سینوس در ضریب شکست در طرفین فصل مشترک دو محیط برابر است.

به بیان ساده ضریب شکست نسبت سرعت نور در خلاء به سرعت نور در محیط است. با مراجعه به شکل (۱-۲) می‌توانیم بنویسیم:

$$\frac{\sin i}{\sin i'} = \frac{N'}{N} \quad (1-2)$$

1. Willibrord Snell Van Royen

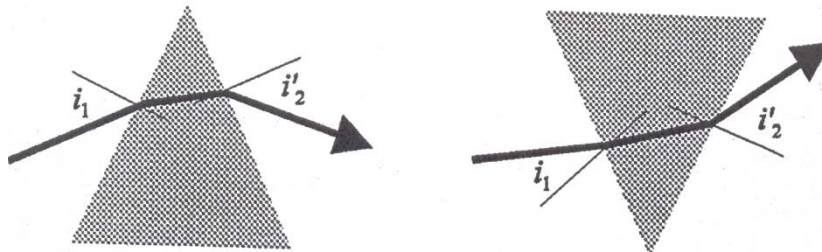




شکل ۲-۱- قانون اسنل برای یک پرتو وارد شده به محیطی با چگالی بیشتر  $(N' > N)$ .

## ۲-۲- قانون اسنل و منشور

با به کار بردن قانون اسنل برای سطوح یک منشور، در می یابیم که هنگام عبور یک پرتو از منشور، پرتو همواره به سمت بخش ضخیم تر خمیده می شود. این وضعیت در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.

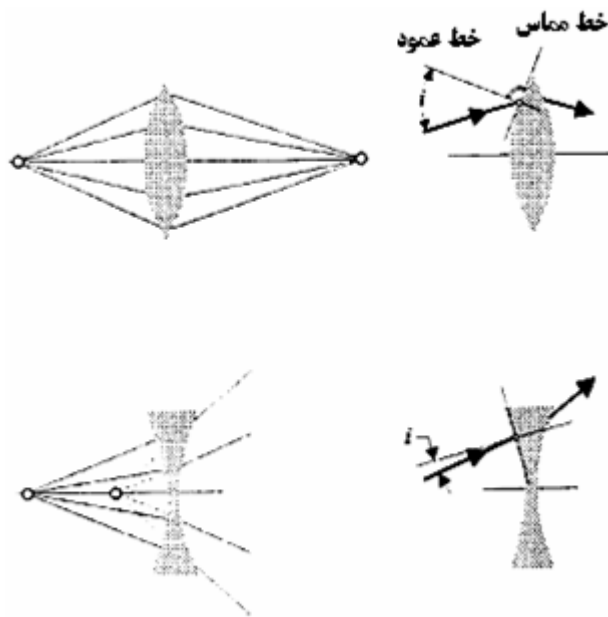


شکل ۲-۲- قانون اسنل برای یک منشور.

## ۲-۳- گذار از یک منشور به یک عدسی

اگر مطابق شکل (۲-۳) تعدادی منشور ناقص را کنار هم قرار دهیم، پرتوهای ناشی از یک نقطه‌ی محوری پس از عبور از آرایه منشور، بسته به جهت منشورها به طور متقارن همگرا یا واگرا می شوند. با افزایش تعداد منشورها تا بی نهایت، یک عدسی

کوژ یا کاو استوانه‌ای ایجاد می‌شود. همان‌گونه که در شکل (۳-۲) نشان داده شده است، یک عدسی با تقارن چرخشی دارای مقاطع نصف النهاری<sup>۱</sup> است. با توجه به شکل (۳-۲) مشاهده می‌کنیم که خط مماس بر عدسی در نقطه‌ای که پرتو وارد عدسی می‌شود معادل با وجه یک « منشور جایگزیده<sup>۲</sup> » است. قانون اسنل را می‌توان برای تغییر جهتی پرتو به کار برد. در این حالت  $i$  زاویه تشکیل شده میان پرتو و خط عمود بر عدسی است.



شکل ۳-۲- گذار از منشورها به عدسی‌ها.

## ۴-۲ - تشکیل تصویر

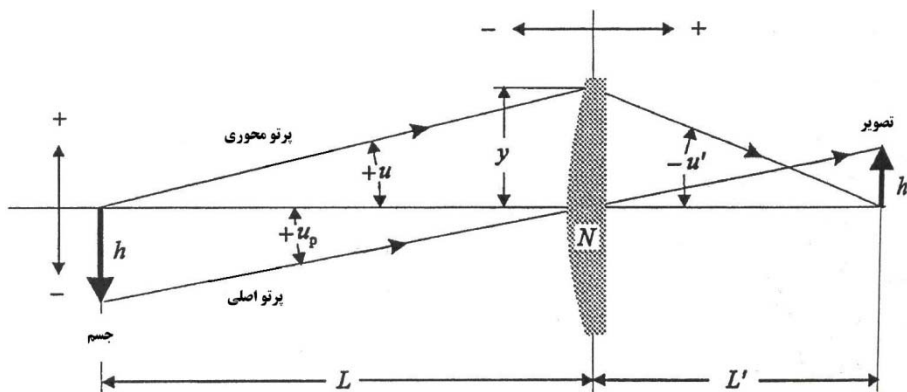
جهت سادگی، این موضوع را به یک تک عدسی نازک محدود کرده که تقریباً مرتبه‌ی اول نامیده می‌شود. یک عدسی نازک عدسی‌ای است که ضخامت آن در مقایسه با فاصله‌ی کانونی آن کوچک است. به بیان دیگر، فرض می‌شود که ضخامت

1. Meridional cross sections
2. localized prism

صفر است. در مباحث بعدی نشان خواهیم داد که هر چند چنین عدسی ای وجود ندارد اما، مفهوم عدسی نازک بسیار مناسب بوده و محاسبات را ساده و نتایج پُر باری فراهم می‌سازد.

تقریب مرتبه‌ی اول از این فرض که سینوس یک زاویه برابر با تانژانت زاویه است و بنابر این مساوی با خود زاویه است، به دست می‌آید. حوزه‌ای را که می‌توان در آن این حالت را در نظر گرفت ناحیه‌ی پیرامحوری<sup>۱</sup> و این فرضیه را تقریب پیرامحوری<sup>۲</sup> می‌نامند، زیرا برخی فرضیات ساده را می‌توان در این ناحیه به کار برد. این مفهوم به تفصیل در فصل سوم بحث خواهد شد.

توجه به علامت قراردادی ردّ پرتو اپتیکی مهم است. اخیراً تغییراتی در علامت زاویه بین پرتو و محور اپتیکی صورت گرفته است. بنابراین بهتر است دقت کافی در تعریف علامت قراردادی مورد استفاده در یک مرجع مشخص صورت پذیرد. امروزه به طور متداول علامت گذاری‌هایی که در شکل (۲-۴) نشان داده شده، استفاده می‌شود.

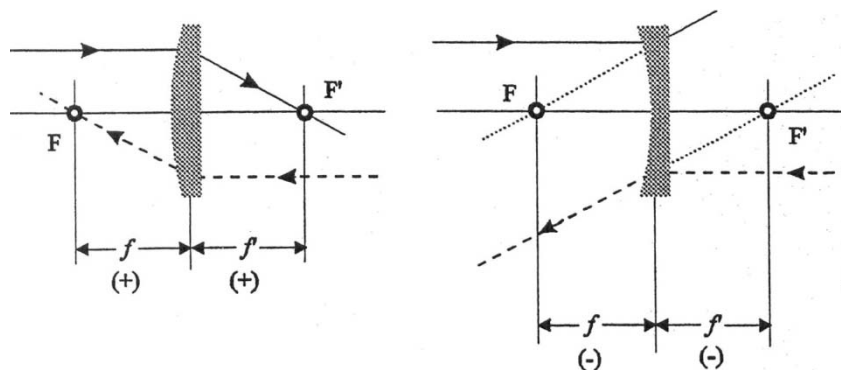


شکل ۲-۴- روابط اساسی و علامت‌های قراردادی برای یک عدسی نازک در محدوده‌ی پیرامحوری.

اگر جسم در بی نهایت قرار گرفته باشد، زاویه‌ی  $u$  صفر می‌شود و فاصله‌ی تصویر تشکیل شده تا عدسی فاصله‌ی کانونی  $f$  نامیده می‌شود و به صفحه‌ی تصویر، صفحه‌ی

1. paraxial region
2. Paraxial approximation

کانونی گفته می‌شود. فاصله‌ی کانونی یک عدسی همگرا مثبت و فاصله کانونی یک عدسی واگرا منفی در نظر گرفته می‌شود. در شکل (۵-۲) این تعاریف نشان داده شده است. اگر پیرامون عدسی هوا باشد، فاصله‌ی کانونی در هر دو سمت عدسی برابر است. در شکل‌های (۴-۲) و (۵-۲) تعدادی معادله‌ی مناسب و ساده جهت تعیین مکان، بزرگنمایی و جهت یک تصویر برای چیدمان نشان داده شده است.



شکل ۵-۲- علامت‌های قراردادی برای عدسی‌های همگرا و واگرا.

نخستین معادله عبارت است از:

$$\frac{1}{L'} = \frac{1}{L} + \frac{1}{f} \quad (۲-۲)$$

بزرگنمایی را می‌توان به چند طریق بیان نمود:

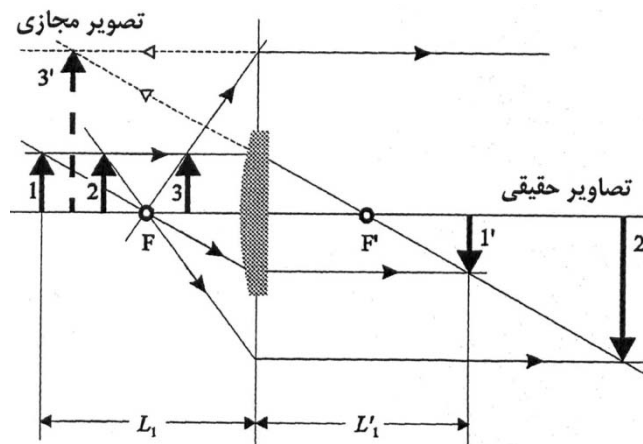
$$m = \frac{h'}{h} = \frac{L'}{L} = \frac{u}{u'} \quad (۳-۲)$$

به طور معمول رابطه‌ی مربوط به بزرگنمایی زاویه‌ای مورد توجه نیست. هنگامی که جسم در بی‌نهایت قرار گرفته باشد تصویر در صفحه‌ی کانونی تشکیل می‌شود و بزرگنمایی صفر خواهد شد.

## ۲-۵- روابط جسم - تصویر

هنگامی که جسمی با اندازه ثابت به عدسی نزدیک و نزدیک‌تر می‌شود، با مشاهده آن چه برای تصویر رخ می‌دهد، رابطه بین جسم و تصویر بهتر درک می‌شود

(شکل (۲-۶) را مشاهده کنید). برای یافتن مکان تصویر و اندازه‌ی آن یک پرتو موازی با محور اپتیکی از بالای جسم ۱ (سر پیکان) به سمت راست می‌کشیم تا پرتو صفحه‌ی عدسی را قطع کند. پرتو پس از عبور از عدسی نازک به سمت محور اپتیکی خم می‌شود و در نقطه‌ی کانونی،  $F'$  محور را قطع می‌کند. پرتو دیگری از همان جسم به سمت نقطه‌ی کانونی،  $F$  رسم می‌شود. این پرتو موازی با محور اپتیکی از عدسی خارج می‌شود. جایی که این دو پرتو هم‌دیگر را قطع می‌کنند تصویر نقطه‌ی بالای جسم، یعنی نقطه  $۱'$  ایجاد می‌شود. هرگاه جسمی که در سمت چپ عدسی کاو قرار گرفته به سمت عدسی نزدیک‌تر شود (جسم ۲)، تصویر  $۲'$  از عدسی دور می‌شود و به سمت راست حرکت می‌کند. هنگامی که جسم در نقطه‌ی کانونی عدسی،  $F$  قرار داده شود تصویر در بی‌نهایت تشکیل می‌شود. این مسئله اساس کار یک کالیماتور است که منبعی در بی‌نهایت را شبیه‌سازی می‌کند. هرگاه جسم بین نقطه‌ی کانونی  $F$  و عدسی قرار داده شود، تصویر تشکیل‌شده مجازی است.  $۳'$  تصویر مجازی ۳ است. برای تعیین اندازه و مکان تصویر مجازی پرتوها پس از عبور از عدسی و امتداد آنها در پشت عدسی یکدیگر را قطع می‌کنند (خطوط نقطه‌چین در شکل (۲-۶)). جسم و تصویر در یک سمت عدسی قرار می‌گیرند و جهت تصویر همانند حالت ۱ و ۲ که تصاویر حقیقی هستند، تغییر نمی‌کند.



شکل ۲-۶- روابط میان جسم و تصویر.

یک تصویر حقیقی را می‌توان بر روی یک پرده انداخت در حالی که با یک تصویر مجازی نمی‌توان این کار را کرد. تصویر یک جسم در آینه یا بزرگ‌نما<sup>۱</sup> مثال‌های خوبی از تصاویر مجازی است. درک مفهوم تصاویر حقیقی و مجازی مهم است زیرا همان گونه که به زودی مشاهده خواهیم کرد، مردمک‌های ورودی و خروجی که مسیر انرژی تابشی را در یک سیستم اپتیکی کنترل می‌کنند، می‌توانند حقیقی یا مجازی باشند. با استفاده از معادلات (۲-۲) و (۳-۲) برای یک عدسی با فاصله‌ی کانونی  $f = 30$  و جسمی با ارتفاع  $h = 10$  سه حالت نشان داده شده در شکل (۲-۶) در جدول (۲-۱) محاسبه شده است.

جدول ۱-۲- تغییر مکان، بزرگ‌نمایی و جهت تصویر با تغییر مکان جسم.

	$L$	$L'$	$M$	$h'$	تصویر
۱	-۷۵	۵۰	-۰/۶۶۷	-۶/۶۶۷	حقیقی
۲	-۷۵	۹۰	-۲	-۲۰	حقیقی
۳	-۲۰	-۶۰	+۳	+۳۰	مجازی

شکل (۲-۷) رابطه‌ی میان جسم- تصویر [معادله‌ی (۲-۲)] را برای یک عدسی مثبت نشان می‌دهد. منحنی بر حسب واحد فاصله‌ی کانونی رسم شده است. سه مثال جدول (۱-۲) در شکل نشان داده شده است.

## ۲-۶- روزنه‌بندها<sup>۲</sup>، مردمک‌ها<sup>۳</sup> و پنجره‌ها<sup>۴</sup>

در یک سیستم اپتیکی دو بند وجود دارد که انرژی عبوری را محدود می‌کند. نخستین آن روزنه‌بند،  $AS$  و دیگری میدان‌بند،  $FS$  است. روزنه بند خود می‌تواند یک المان نظیر عنبیه<sup>۵</sup> یا لبه‌ی یک نگهدارنده عدسی باشد. روزنه‌بند حدّ زاویه‌ای یک

1. magnifier  
2. stops  
3. pupils  
4. windows  
5. iris