



۱۲۹۷.۱ - ۲۰۸۰۳



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش اتمی مولکولی

اندازه‌گیری دما به روش غیر تماسی

استاد راهنما:

دکتر محمود سلطان‌الکتابی

۱۳۸۸/۱۰/۲۷

استاد مشاور:

مهندس محمد سلطانی

آموزشگاه عالی فیزیک  
گروه فیزیک

پژوهشگر:

مریم اکبری نساجی

شهریور ماه ۱۳۸۸

۱۲۹۶۰۱

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات  
و نوآوری های ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه  
متعلق به دانشگاه اصفهان است.

پهوه ښکاره شوی پایان نامه  
رعایت شده است  
تکمیلات تکمیلی دانشگاه اصفهان



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه ی کارشناسی ارشد رشته ی فیزیک گرایش اتمی-مولکولی

خانم مریم اکبری نساجی

تحت عنوان

اندازه گیری دما به روش غیر تماسی

۱۳۸۸/۱۰/۲۷

در تاریخ ۱۳۸۸/۶/۱۶ توسط هیأت داوران زیر بررسی و با درجه...  
...به تصویب نهایی رسید.

امضا

امضا

با مرتبه ی علمی استاد

دکتر محمود سلطان الکتابی

۱- استاد راهنمای پایان نامه

امضا

امضا

با مرتبه ی علمی مربی

مهندس محمد سلطانی

۲- استاد مشاور پایان نامه

امضا

امضا

با مرتبه ی علمی استادیار

دکتر مرتضی حاج محمودزاده

۳- استاد داور داخل گروه

امضا

امضا

با مرتبه ی علمی استادیار

دکتر علی محمودی

۴- استاد داور خارج از گروه

امضای مدیر گروه

تا ز میخانه و می نام و نشان خواهد بود

سر ما خاکه ره پهر مغان خواهد بود

حلقه‌ی پهر مغان از ازل در گوش است

بر همانی که بوحی و همان خواهد بود

در اینجا لازم می دانم که از استاد راهنمای عزیز و بزرگوارم جناب پروفیسور محمود سلطان‌الکتابی که با علم و صبر و همکاری صمیمانه خود در به انجام رساندن این پایان نامه مرا همراهی کردند تشکر کنم. همچنین از دکتر علی محمودی که اینجانب را از نظرات و راهنمایی‌هایی ارزنده خود بهره مند ساختند کمال تشکر را می نمایم. از جناب مهندس محمد سلطانی که امکان برپایی آزمایشات را فراهم نموده و اطلاعات ارزنده‌ای را در اختیار من قرار دادند متشکرمو در نهایت از کلیه عوامل صنعت اپتیک اصفهان کمال تشکر را دارم.

به پدر و مادر عزیزم

## چکیده

هدف اصلی ما در این پایان نامه اندازه‌گیری دمای جسم به روش غیرتماسی در ناحیه فروسرخ بود که بر اساس مطالعات به این نتیجه رسیدیم که بهترین بازه برای اندازه‌گیری ناحیه ( $8-12 \mu m$ ) است به این دلیل که عبوردهی در این ناحیه بیشینه است و جذب قابل اغماض می‌باشد. ابزاری که در این تحقیق برای اندازه‌گیری دمای جسم بکار گرفتیم تابش‌سنج طیفی تبدیل فوریه‌ای فروسرخ و دوربین‌های حرارتی بوده‌اند. به طور مثال به کمک تابش‌سنج طیفی تبدیل فوریه‌ای فروسرخ توانستیم طیف دمای ظاهری جسم را به دست آوریم و همچنین توانستیم طیف تابشی جسم را از فواصل دور اندازه‌گیری کنیم. ما توانستیم از این طیف برای نشان دادن آلودگی‌های جوی استفاده کنیم. ابزار دیگری که برای اندازه‌گیری دمای جسم بکاربردیم دوربین‌های حرارتی تصویربردار فروسرخ بودند که به کمک تصاویر گرفته شده از این دوربین‌ها توانستیم دمای ظاهری جسم را به دست آوریم. تابشی که به کمک دوربین حرارتی اندازه‌گیری کردیم وابسته به طول موج نیست پس از اندازه‌گیری دمای ظاهری جسم دمای تصحیح شده جسم را به دست آوردیم که برای این کار از مدل‌های ریاضی استفاده کردیم که به کمک این مدل‌های ریاضی توانستیم دمای واقعی جسم را به دست آورده و همچنین عوامل ایجاد خطا در اندازه‌گیری دما را بررسی و اندازه‌گیری کردیم.

**کلیدواژه‌ها:** غیرتماسی، عبوردهی، تابش‌سنج طیفی تبدیل فوریه‌ای فروسرخ، دمای ظاهری، دوربین حرارتی.

فصل اول: تابش سنجی

۱-۱	مقدمه	۱
۲-۱	تابش سنجی و نورسنجی	۲
۳-۱	کلید واژه‌های تابش سنجی و واحدهای آن	۲
۴-۱	قوانین تابش جسم سیاه	۴
۱-۴-۱	چشمه‌های جسم سیاه	۵
۵-۱	سطح لامبرتی	۷
۶-۱	اجسام خاکستری	۸
۱-۶-۱	ضریب گسیلدهی	۹
۱-۱-۶-۱	وابستگی طیفی ضریب گسیلدهی	۱۰
۲-۶-۱	قوانین کیرشهف	۱۲
۷-۱	عبوردهی جوی	۱۳
۱-۷-۱	جذب	۱۴
۲-۷-۱	پراکندگی	۱۴
۳-۷-۱	تلاطم مسیر (جو)	۱۸
۴-۷-۱	تابندگی مسیر	۱۸

فصل دوم: روش‌های اندازه‌گیری دما

۱-۲	مقدمه	۲۰
۲-۲	روش‌های اندازه‌گیری دما	۲۱
۳-۲	اساس طبقه‌بندی حرارت‌سنج‌های غیرتماسی	۲۱
۴-۲	روش‌های اندازه‌گیری دما به صورت ناکنا	۲۵
۱-۴-۲	روش اندازه‌گیری دما با سامانه تک‌باند-ناکنا	۲۵



۲-۴-۲	روش اندازه‌گیری دما با سامانه دوباند ناکنا	۲۶
۲-۴-۳	روش اندازه‌گیری دما با سامانه چندباند ناکنا	۲۷
۲-۵-۲	دمای ظاهری	۲۷
۲-۵-۱	میزان شار رسیده از هدف به آشکارساز	۲۸
۲-۵-۲	بررسی رابطه بین ولتاژ (سیگنال) خروجی و دمای هدف	۳۱
۲-۵-۳	بیان دمای تفاضلی و محاسبه آن توسط شار رسیده به حسگر	۳۳
۲-۶-۶	محاسبه دمای تصحیح شده جسم با بیان یک الگوی ریاضی در سامانه‌های حرارتی	۳۴
۲-۶-۱	کالیبراسیون	۳۵
۲-۶-۲	سیگنال حقیقی	۳۶
۲-۶-۳	سیگنال تصحیح شده	۳۷
۲-۶-۴	دمای تصحیح شده جسم	۳۹

### فصل سوم بررسی سامانه‌های تصویربردار حرارتی

۳-۱	مقدمه	۴۲
۳-۲	معرفی سامانه‌های فرورسرخ و الکترواپتیکی	۴۳
۳-۳	مشخصات دوربین‌های حرارتی	۴۵
۳-۳-۱	معیارهای تشخیص کیفیت وابسته به فرد	۴۵
۳-۳-۱-۱	کمترین اختلاف دمای قابل تفکیک	۴۵
۳-۳-۲	مشخصه پاسخ دوربین	۴۶
۳-۳-۲-۱	تابع انتقال سیگنال	۴۶
۳-۳-۲-۱-۱	گستره دینامیکی	۴۷
۳-۳-۲-۲	تابع پاسخ شکاف	۴۸
۳-۳-۳	مشخصه نوفه	۴۹
۳-۳-۴	مشخصه توان تفکیک تصویر	۵۱

۵۲.....	۴-۳ اجزای یک سامانه تصویربردار حرارتی
۵۲.....	۱-۴-۳ هدف
۵۳.....	۱-۴-۳-۱ چشمه‌های خارجی
۵۱.....	۴-۳-۳ مشخصه توان تفکیک تصویر
۵۲.....	۴-۳ اجزای یک سامانه تصویربردار حرارتی
۵۲.....	۱-۴-۳ هدف
۵۳.....	۱-۴-۳-۱ چشمه‌های خارجی
۵۴.....	۲-۴-۳ بخشهای اپتیکی سامانه حرارتی
۵۶.....	۳-۴-۳ آشکارساز
۵۷.....	۱-۳-۴-۳ آشکارسازهای حرارتی
۵۷.....	۲-۳-۴-۳ آشکارسازهای فوتونی
۵۸.....	۴-۴-۳ سامانه الکترونیک
۵۸.....	۵-۴-۳ صفحه نمایش
۵۹.....	۶-۴-۳ بررسی خطی پذیری سامانه‌های حرارتی

### فصل چهارم کارهای تجربی

۶۱.....	۱-۴ مقدمه
۶۲.....	۲-۴ معرفی تابش سنج طیفی تبدیل فوریه‌ای فروسرخ
۶۵.....	۳-۴ تئوری زینه بندی
۶۷.....	۴-۴ اندازه‌گیری با تابش سنج طیفی
۶۹.....	۵-۴ اندازه‌گیری ۱
۶۹.....	۱-۵-۴ (دمای ظاهری یک دود کش)
۷۴.....	۲-۵-۴ دمای ظاهری ابر
۷۷.....	۳-۵-۴ حضور خطوط جذب و نشر عناصر موجود در جو در طیف دمای ظاهری
۸۱.....	۴-۵-۴ چگونگی محاسبه دمای واقعی جسم به کمک طیف تابشی اندازه‌گیری شده هدف
۸۳.....	۵-۵-۴ اندازه‌گیری ویژگی‌های دوربین حرارتی مورد آزمایش

۸۵.....	۱-۵-۵-۴ آزمون کمترین اختلاف دمای قابل تفکیک
۸۶.....	۲-۵-۵-۴ آزمون تابع انتقال سیگنال
۸۸.....	۳-۵-۵-۴ تابع پاسخ شکاف
۹۰.....	۴-۵-۵-۴ آزمون نوفه زمانی فرکانس بالا
۹۱.....	۵-۵-۵-۴ نوفه فضایی فرکانس پایین
۹۲.....	۶-۵-۵-۴ اندازه‌گیری دمای ظاهری جسم با سامانه تصویربردار حرارتی
۹۳.....	۱-۶-۵-۴ مراحل اندازه‌گیری دمای ظاهری هدف با دوربین حرارتی فروسرخ بلند
۹۸.....	۷-۵-۴ اندازه‌گیری دمای تصحیح شده جسم
۱۰۳.....	۶-۴ جمع بندی

### فصل پنجم بررسی نامعینی در اندازه‌گیری دمای جسم

۱۰۴.....	۱-۵ مقدمه
۱۰۵.....	۲-۵ مجموعه نامعینی‌های ذاتی در اندازه‌گیری دمای جسم
۱۰۶.....	۱-۲-۵ کمترین خطا
۱۰۸.....	۲-۲-۵ تفاضل دمایی معادل نوفه
۱۰۹.....	۳-۲-۵ توان تفکیک دمایی رقمی
۱۱۰.....	۴-۲-۵ پایداری دمایی
۱۱۳.....	۵-۲-۵ تکرار پذیری دمایی دوربین
۱۱۴.....	۶-۲-۵ یکنواختی اندازه‌گیری
۱۱۵.....	۷-۲-۵ توان تفکیک فضایی اندازه‌گیری شده
۱۱۵.....	۳-۵ تعیین نامعینی ذاتی دوربین در اندازه‌گیری دما
۱۱۶.....	۴-۵ مجموعه نامعینی‌های غیرذاتی در اندازه‌گیری دمای جسم
۱۲۲.....	۵-۵ جمع بندی

صفحه

عنوان

۱۲۳.....	جمع‌بندی و پیشنهادات.....
۱۲۴.....	پیوست الف.....
۱۳۴.....	پیوست ب.....
۱۴۳.....	منابع و مآخذ.....

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۴	شکل ۱-۱: توان تابش شده از واحد سطح یک جسم سیاه بر حسب طول موج در دماهای مختلف .....
۶	شکل ۱-۲: چشمه جسم سیاه نقطه ای شامل یک حفره با یک روزنه در جلوی آن .....
۶	شکل ۱-۳: چشمه جسم سیاه جزئی .....
۸	شکل ۱-۴: سطح لامبرتی هدف .....
۱۰	شکل ۱-۵: نمودار مربوط به ضریب گسیلدهی اجسام مختلف .....
۱۱	شکل ۱-۶: وابستگی چگالی توان تابشی به ضریب گسیلدهی بر حسب طول موج .....
	شکل ۱-۷: طیف گسیلدهی برای سه تابش کننده مختلف جسم سیاه، جسم خاکستری و یک تابشگر
۱۱	انتخابی .....
۱۲	شکل ۱-۸: تابش فرود آمده بر هدف به سه بخش تقسیم می شود .....
۱۴	شکل ۱-۹: جذب انرژی فوتون فرودی توسط مولکول‌های جوی .....
۱۵	شکل ۱-۱۰: انواع پراکندگی الف: پراکندگی ریلی، ب: پراکندگی می، پ: پراکندگی هندسی .....
۱۷	شکل ۱-۱۱: تغییرات شار پرتو فرودی پس از عبور از مسافت $dx$ .....
۱۸	شکل ۱-۱۲: انواع پراکندگی الف: پراکندگی ریلی، ب: پراکندگی می، پ: پراکندگی هندسی .....
۱۹	شکل ۱-۲: دو نمونه از سامانه‌های تصویربردار و غیرتصویربردار حرارتی .....
۲۴	شکل ۲-۲: چند نمونه از وسایل اندازه‌گیری غیرتماسی دما .....
۲۶	شکل ۲-۳: وابستگی چگالی طیف تابشی به طول موج به ازای دماهای مختلف .....
	شکل ۲-۴: یک تابش سنج طیفی فقط می‌تواند تابش را اندازه گیری کند. سامانه نمی‌تواند تابش
۲۷	گسیل شده را از تابش منعکس شده مجزا کند .....
۲۸	شکل ۲-۵: میدان دیده شده توسط حسگر از سطح جسم کوچکتر است .....
۳۰	شکل ۲-۶: میدان دیده شده توسط حسگر از سطح جسم بزرگتر است .....
۳۳	شکل ۲-۷: هندسه دمای تفاضلی (اختلاف دما) .....
	شکل ۲-۸: رابطه بین دمای خروجی $T_{cor}$ و دمای صحیح جسم $T_{ob}$ و سیگنال تصحیح شده $S_{cor}$ و سیگنال
۴۰	به دست آمده $S_{bb}$ در فرایند کالیبراسیون با جسم سیاهی در دمای $T_{ob}$ .....
۴۴	شکل ۳-۱: الگوی استاندارد از یک حسگر تصویربردار .....
	شکل ۳-۲: تصویر الگوی چهار نواری متناوب استاندارد. الف: اختلاف دمای هدف-زمینه کم است ب: اختلاف
۴۶	دمای هدف-زمینه زیاد است .....

- شکل ۳-۳: تابع پاسخ یک دوربین نمونه نسبت به تغییر شدت در هدفی با اندازه ثابت را می‌بینیم شیب بخش خطی نمودار تابع انتقال سیگنال رانشان می‌دهد..... ۴۷
- شکل ۳-۴: نمودار مربوط به تابع پاسخ شکاف یک دوربین نمونه می‌بینیم که در حالت ایده آل یک رابطه خطی بین پاسخ دوربین به شکاف‌های مختلف و زاویه فضایی در برگیرنده آن شکاف برقرار است ..... ۴۸
- شکل ۳-۵: نمودار تابع تبدیل مدولاسیون..... ۵۲
- شکل ۳-۶: نمایش فرایند اندازه‌گیری با یک دوربین حرارتی تک‌باند به روش ناکنا..... ۵۲
- شکل ۳-۷: تابش دریافتی خورشید در سطح زمین همراه با خطوط جذب آن..... ۵۳
- شکل ۳-۸: جزئیات یک موازی‌ساز نوری..... ۵۶
- شکل ۳-۹: نمایی از دو آشکارساز با  $384 \times 288$  آرایه و ابعاد  $35 \mu m$ ..... ۵۶
- شکل ۳-۱۰: چگونگی تشکیل زاویه دید مشاهده‌گر و زاویه دید حسگر..... ۵۹
- شکل ۴-۱: اجزای مختلف یک تابش‌سنج طیفی..... ۶۳
- شکل ۴-۲: رابطه بین تابش اندازه‌گیری شده و تابش دریافتی از صحنه. شیب خط بیان‌گر بهره دستگاه و فاصله از مبدأ آن انحراف دستگاه را نشان می‌دهد..... ۶۵
- شکل ۴-۳: نمایی از برپایی آزمایش اندازه‌گیری دمای ظاهری..... ۶۹
- شکل ۴-۴: تداخل نگاشت مربوط به هدف (بدنه دودکش) در فاصله ۷ متری از دستگاه تابش‌سنج طیفی..... ۷۰
- شکل ۴-۵: طیف تابشی هدف (بدنه دودکش)..... ۷۱
- شکل ۴-۶: طیف دمای ظاهری هدف با استفاده از نرم افزار MATLAB..... ۷۲
- شکل ۴-۷: شکل ۴-۷: طیف تابشی کالیبره شده هدف که با منحنی جسم سیاه برازش شده است..... ۷۴
- شکل ۴-۸: طرح واره‌ای از برپایی آزمایش در اندازه‌گیری تابندگی طیفی آسمان..... ۷۵
- شکل ۴-۹: تابندگی جسم سیاه با دمای ۳۱۲ کلوین (خط چین)، آسمان ابری (خط پر) و آسمان صاف (نقطه خط)..... ۷۶
- شکل ۴-۱۰: تفاضل تابندگی آسمان ابری و صاف (خط پر) و جسم سیاه برازش شده به آن (خط چین)..... ۷۷
- شکل ۴-۱۱: طرح واره‌ای از یک الگوی دو لایه‌ای برای دورحسی..... ۷۹
- شکل ۴-۱۲: حضور خط جذب  $CO_2$  در طیف دمای ظاهری در عدد موج  $668/5 \text{ cm}^{-1}$  به ازای  $\Delta T = -15$ ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۳: حضور خط نشری  $CO_2$  در طیف دمای ظاهری در عدد موج  $668/5 \text{ cm}^{-1}$  به ازای  $\Delta T = +10$ ..... ۸۰
- شکل ۴-۱۴: نمایی از دوربین حرارتی غیره خنک شونده مدل ۷۳۰ S، ناحیه کارکرد فرورسرخ بلند  $12-1 \mu m$ ..... ۸۴
- شکل ۴-۱۵: نحوه برپایی آزمایش برای اندازه‌گیری کمترین اختلاف دمای قابل تفکیک MRTD..... ۸۵
- شکل ۴-۱۶: منحنی کمترین اختلاف دمای قابل تفکیک..... ۸۶

- شکل ۴-۱۷: نمودار تابع تبدیل سیگنال در دوربین مورد آزمایش ..... ۸۷
- شکل ۴-۱۸: بخش خطی نمودار تابع پاسخ که با یک رابطه خطی برازش داده شده است. شیب نمودار برابر با  $22/84$  است ..... ۸۸
- شکل ۴-۱۹: نمودار تابع پاسخ شکاف مربوط به دوربین مورد آزمایش ..... ۹۰
- شکل ۴-۲۰: نحوه برپایی آزمایش برای اندازه گیری غیر یکنواختی ..... ۹۲
- شکل ۴-۲۱: منحنی کالیبراسیون شدت (سطح خاکستری تصویر) بر حسب دما که با نمودار خطی برازش شده است ..... ۹۵
- شکل ۴-۲۲: نمایی از برپایی آزمایش، هدف را در مقابل دوربین یک بار در سایه و بار دیگر در آفتاب قرار داده ایم ..... ۹۶
- شکل ۴-۲۳: الف- تصویری از هدف مورد آزمایش با دوربین حرارتی در سایه چون نسبت به اطراف دمای کمتری دارد تیره تر به نظر می رسد. ب- تصویری از هدف مورد آزمایش با دوربین حرارتی در آفتاب چون نسبت به اطراف دمای بیشتری دارد روشن تر به نظر می رسد ..... ۹۷
- شکل ۴-۲۴: نمایی از تابع پاسخ دوربین حرارتی به ازای آشکارساز میکروبلومتر غیر خنک شونده آمورف-سیلیکون ..... ۹۹
- شکل ۴-۲۵: میزان عبوردهی عدسی از جنس ژرمانیوم که با DLC پوشش داده شده باشد ..... ۱۰۰
- شکل ۴-۲۶: الف- میزان بازتاب یک عدسی با پوشش ضد بازتاب در ناحیه  $8-14 \mu m$ ، ب- میزان عبوردهی یک عدسی با پوشش ضد بازتاب در ناحیه  $8-14 \mu m$  ..... ۱۰۱
- شکل ۵-۱: نمودار کمترین خطا برای دوربین مورد آزمایش ..... ۱۰۷
- ۲- تابع چگالی احتمال مربوط به دمای تصحیح شده در فرایند اندازه گیری دمای جسم ..... ۱۰۹
- شکل ۵-۳: خطا در اندازه گیری دمای جسم سیاه با دمای  $40^\circ C$  به ازای تغییر دمای مختلف محیط ..... ۱۱۲
- شکل ۵-۴: نمودار ثابت گسیلدهی جسم  $C_e$  به ازای چندین دمای جسم و با فرض دمای زمینه ۲۹۸ کلوین ..... ۱۲۰
- شکل ۵-۵: نمودار ثابت عبوردهی جو  $C_r$  به ازای چندین دمای جسم و با فرض ضریب گسیلدهی جسم  $0/88$  ..... ۱۲۱
- دمای زمینه ۲۹۸ کلوین ..... ۱۲۱
- شکل ۵-۶: نمودار ثابت دمای زمینه  $C_r$  به ازای چندین دمای جسم با فرض ضریب گسیلدهی جسم  $0/88 = \epsilon$  و دمای زمینه ۲۹۸ کلوین ..... ۱۲۱

## فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۱: واحدها و عبارات تابش سنجی.....	۳
جدول ۲-۱: نوع پراکندگی بر حسب اندازه ذرات.....	۱۶
جدول ۱-۴: مشخصات تابش سنج طیفی MR300.....	۶۴
جدول ۲-۴: مشخصات دوربین حرارتی مورد استفاده در این تحقیق.....	۸۳
جدول ۳-۴: نتایج مربوط به آزمون کمترین اختلاف دمای قابل تفکیک (MRTD).....	۸۵
جدول ۴-۴: نتایج مربوط به آزمایش تابع پاسخ شکاف دوربین مورد آزمایش.....	۸۹
جدول ۵-۴: مقادیر مربوط به نوفه فضایی فرکانس پایین (نایکنواختی تصویر).....	۹۱
جدول ۶-۴: مقادیر مربوط به دمای ظاهری هدف با سامانه های تصویربردار حرارتی.....	۹۷
جدول ۷-۴: مقادیر مربوط به رابطه (۵-۴۰) را می بینید.....	۱۰۳
جدول ۸-۴: مقادیر سیگنال تصحیح شده و حقیقی جسم و دمای واقعی محاسبه شده را می بینید.....	۱۰۳
جدول ۱-۵: تغییرات دمای محیط و دمای تصحیح شده به ازای جسم سیاه با دمای ثابت $40^{\circ}C$ .....	۱۱۲
جدول ۲-۵: تغییرات دمای محیط و دمای تصحیح شده به ازای جسم سیاه با دمای ثابت $40^{\circ}C$ .....	۱۱۴
جدول ۳-۵: نتایج مربوط به نامعینی‌های جزئی ذاتی در دوربین حرارتی به ازای ۲ دمای خاص را در	
زیر می بینیم.....	۱۱۶
جدول ۴-۵: محاسبات مربوط به نامعینی‌های جزئی غیر ذاتی برای یک نمونه خاص با دمای ۳۱۳ کلوین... ..	۱۲۲



## پیشگفتار

### ۱- مقدمه

تابش فرورسرخ تا حدود ۲۰۰ سال پیش ناشناخته بود. هرشل یک تکفامساز ساخت و از یک ترمومتر به عنوان آشکارساز استفاده کرد. بنابراین توانست توزیع انرژی خورشید را اندازه گیری کند. به دنبال آن کارهای کیرشهف، استفان، بولتزمن، وین، ریلی و ماکس پلانک، با قانون پلانک به اوج خود رسید. در طول جنگ جهانی دوم شیوه‌های پیشرفته تابش فرورسرخ بوجود آمد. کاربردهای نظامی و بویژه صلح‌آمیز این تابش در قرن بیستم بسیار گسترش یافت. دورحسی فرورسرخ، پیشرفت‌های زیادی را در ارتباط با آشکارسازهای فرورسرخ موجب شده است. بازه فرورسرخ ناحیه ای از طول موج‌های بلندتر از مرئی و تا قبل از حدود چند میلی‌متر است و در محدوده‌های مختلف برای آشکارسازی تابش آن طول-موج از آشکارسازهای حساس به آن ناحیه استفاده می‌کنند [۱]. چگونگی تقسیم بندی نواحی فرورسرخ در مراجع مختلف متفاوت است که ما در این پایان‌نامه نواحی را به شرح زیر تقسیم بندی کرده ایم [۱]:

$۰/۴-۰/۷ \mu m$	$۰/۷-۲ \mu m$	$۳-۵ \mu m$	$۸-۱۴ \mu m$
ناحیه مرئی	ناحیه فرورسرخ کوتاه	ناحیه فرورسرخ میانی	ناحیه فرورسرخ بلند

اصول تحلیل و طراحی همه سامانه‌های تابش فرورسرخ مشابه است. اتم‌های اجسام در دمای بالاتر از صفر مطلق در حال ارتعاش هستند که هر چه دمای جسم بالاتر رود جسم بیشتر ارتعاش می‌کند و انرژی بیشتری تابش می‌کند. پس همه اجسام با نسبتی که وابسته به دمای آن‌ها و ضریب گسیلدهی سطح است تابش می‌کنند [۲]. تابش نشر پیوسته ای از سطح هدف است که به دما و ویژگی‌های سطح بستگی دارد. چشمه‌های جسم سیاه بی‌نهایت داغ یا چشمه‌های مصنوعی داغ در ناحیه مرئی تابش می‌کنند. برای اندازه‌گیری تابش جسم از سامانه‌های تصویربردار استفاده می‌شود. سامانه‌های تصویربردار از الگوی حرارتی تابشی صحنه یک تصویر مرئی بوجود می‌آورند. به چنین سامانه‌هایی ناکنا می‌گویند از این سامانه‌ها می‌توان در آشکارسازی نقاط سرد و گرم و یا سطوحی با ضرایب گسیلدهی متفاوت استفاده کرد. تابش حرارتی اجسام در ناحیه فرورسرخ بیشتر از تابش مرئی می‌تواند در دود و گرد و غبار نفوذ کند. بنابراین از سامانه‌های تصویربردار ناکنای فرورسرخ می‌توان در شرایط بد آب و هوایی استفاده کرد همچنین از این سامانه‌ها را در تاریکی‌های مطلق و یا جایی که نورضعیفی وجود دارد برای تهیه تصاویر مرئی می‌شود. در این پایان‌نامه آزمایش‌ها در ناحیه فرورسرخ میانی و بلند صورت می‌گیرد که از سامانه‌های تصویربردار حرارتی در دو ناحیه فرورسرخ میانی و بلند در شرایط مختلفی استفاده می‌شود. به طور مثال سامانه‌های حرارتی که در ناحیه فرورسرخ میانی کار می‌کنند مناسب‌تر برای شرایط داغ هستند و متاثر از نور بازتاب یافته خورشید می‌باشند همچنین در شرایط مناسب آب و هوایی بکار می‌روند. اما سامانه‌های تصویربردار حرارتی در ناحیه فرورسرخ بلند بیشتر به اشیای هم دمای محیط حساس هستند و در شرایط بد آب و هوایی و گرد و غبار شدید استفاده می‌شوند و نسبت به نور انعکاس یافته خورشید تاثیر پذیری ناچیزی دارند. در بررسی‌ها در این نواحی چگالی توان تابشی هدف اهمیت ویژه ای دارد [۲]. تصاویر تشکیل شده در این سامانه‌ها می‌تواند سطوح

خاکستری باشد و یا در آنها از مدهای رنگی استفاده شود. در زیر به بخشی از کاربردهای این سامانه‌های تصویربردار اشاره می‌کنیم.

کاربرد سامانه‌های تصویربردار حرارتی به ۴ گروه اصلی طبقه‌بندی می‌شوند [۱]:

۱. نظامی

۲. صنعتی

۳. پزشکی

۴. تحقیقاتی

۱. از جمله کاربردهای نظامی سامانه‌های تصویربردار به موارد زیر می‌توان اشاره کرد:

- در جستجوگرها و اسلحه‌های هوشمند و همچنین در سامانه‌های مراقبت‌های هوایی و زمینی، ناوبری ماهواره-

ای، سامانه‌های مراقبت هوشمند به دو صورت کنا و ناکنا مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱].

۲. از جمله کاربردهای صنعتی سامانه‌های تصویر بردار می‌توان موارد زیر را نام برد:

- در تشخیص آلودگی‌های محیط و تغییرات آب و هوایی

- در کشاورزی و فرایندهای شیمیایی

- در صنعت خودروسازی و دیگر صنایع

- در تشخیص نشت رطوبت و فرسایش در سقف‌ها و دیوارها و همچنین در تشخیص نشت حرارتی در منازل و

کارخانه‌ها برای جلوگیری از هدر رفتن منابع انرژی حرارتی از تصاویر حرارتی استفاده می‌شود

- کاربرد در تشخیص خرابی اتصالات و نشت حرارتی در صنعت و نیز بخش‌های مختلف هواپیما، ریل‌های قطار و

باند فرودگاه، کابل‌های پر فشار برق، سامانه‌های خنک کننده و تهویه هوا و غیره را می‌توان نام برد

- از این فناوری می‌توان در شناسایی، بررسی و مطالعه آتش استفاده کرد که اطلاعاتی درباره رشد، گستره، ابعاد

و مکان آتش می‌دهد. در صورتی که سامانه تصویربردار از حساسیت بالایی برخوردار باشد می‌تواند مکان یک انسان را در

میان دود و آتش تشخیص دهد [۳].

۳. از کاربردهای پزشکی تصاویر فروسرخ می‌توان موارد زیر را نام برد:

- در تشخیص سرطان و تومورها با استفاده از تصاویر حرارتی بر اساس دمای بدن [۳].

۴. بعضی از کاربردهای تحقیقاتی این فناوری عبارتند از:

- بررسی تغییرات حرارتی زمین و تشخیص خطرات زمینی مثل آتشفشان [۱].

- از تصاویر حرارتی فروسرخ در اندازه‌گیری دمای اهداف به صورت غیرتماسی استفاده می‌شود که در این پایان-

نامه بدان می‌پردازیم.

در زیر به معرفی مزایا و کاربردهای اندازه‌گیری غیرتماسی دما پرداخته‌ایم.

دما را می‌توان به صورت غیرتماسی به صورت کیفی و یا کمی بررسی و اندازه‌گیری کرد. از بیشترین وسایلی که

در این راستا استفاده می‌شود پیرومترها و سامانه‌های تصویربردار حرارتی هستند [۴]. در این پایان‌نامه برای اندازه‌گیری

دمای ظاهری غیرتماسی جسم به دو روش عمل کرده‌ایم. در روش اول از تابش سنج طیفی تبدیل فوری‌های فروسرخ

استفاده کردیم و توانستیم طیف دمای ظاهری هدف را به دست بیاوریم. در روش دوم از یک دوربین حرارتی تصویربردار استفاده کردیم و به کمک تصویرحرارتی هدف دمای ظاهری آن را به دست آوردیم علاوه بر آن با بیان یک الگوی ریاضی توانستیم دمای واقعی جسم را نیز تخمین بزنیم. در حرارت سنج‌های غیرتماسی ابتدا تابش هدف در یک یا چند باند اندازه‌گیری می‌شود سپس بر اساس تابش اندازه‌گیری شده دمای هدف را به دست می‌آوریم. از جمله مزایای اندازه‌گیری دما با حرارت‌سنج‌های غیرتماسی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد که اهمیت و لزوم استفاده از حرارت‌سنج‌های غیرتماسی را بیشتر نشان می‌دهد.

۱. اندازه‌گیری دما می‌تواند خیلی سریع در حدود چند میلی‌ثانیه انجام بگیرد

۲. از این روش می‌توان در زمان واقعی (Real time) دمای جسم را اندازه‌گیری کرد

۳. از این روش می‌توان دمای اهداف متحرک را اندازه‌گیری کرد

۴. این روش امکان اندازه‌گیری دما در محیط‌های خطرناک و در جایی که امکان دسترسی فیزیکی وجود نداشته

باشد را فراهم می‌کند

۵. در این روش انرژی به هدر نمی‌رود چون غیر تماسی است پس در شرایطی که حرارت خیلی ضعیف است هم

می‌توان اندازه‌گیری دقیقی انجام داد [۵]

۶. از روش اندازه‌گیری غیر تماسی دما و به کمک طیف دمای ظاهری جسم می‌توانیم آلاینده‌های موجود در جو

را شناسایی کنیم

## ۲- نحوه انجام تحقیق در این پایان‌نامه

در این پایان‌نامه هدف اصلی اندازه‌گیری دمای جسم به روش غیرتماسی با استفاده از تابش آن در ناحیه فروسرخ بود. پس لازم دیدیم در ابتدا به بررسی کامل ناحیه فروسرخ بپردازیم و مزایای استفاده از این ناحیه نسبت به ناحیه مرئی را بررسی کنیم و همچنین چگونگی رفتار نور و ذره را در کل ناحیه فروسرخ مورد مطالعه قرار دهیم. پس از مطالعات به این نتیجه رسیدیم که با توجه به محدوده دمایی مورد نظر و میزان تابش جسم ناحیه مطلوب برای اندازه‌گیری‌ها انتخاب ناحیه فروسرخ بلند ( $8-14 \mu m$ ) می‌باشد که در این ناحیه با حداکثر عبوردهی جو روبه رو هستیم که این موضوع برای ما که در صدد دریافت تابش از صحنه مورد نظر هستیم بسیار مطلوب است. در ادامه به دنبال شناخت هر چه بیشتر وسایل و ابزارهای بودیم که بتوانیم از آنها برای اندازه‌گیری تابش هدف در ناحیه مورد نظر استفاده کنیم که از آن دسته می‌توانیم به تابش‌سنج‌طیفی تبدیل فوری‌های فروسرخ و دوربین‌حرارتی اشاره کنیم. علت استفاده از هر کدام از این وسایل، بستگی به کاربردهای ویژه‌ی آنها داشت. به طور مثال اگر به دنبال تعیین طیف دمایی از جسم مورد نظر بودیم یعنی اینکه می‌خواستیم چگونگی رفتار دمایی یک جسم را در یک بازه طول موجی بررسی کنیم لازم بود که از تابش سنج طیفی تبدیل فوری‌های استفاده کنیم. علاوه بر آن برای دریافت

تابش اجسام از فاصله‌های خیلی دور مثل ابر و یا اجرام آسمانی استفاده از این ابزار را توصیه می‌کنیم که شاید پیش از این کسی از آن به عنوان ابزاری برای دماسنجی استفاده نکرده بود. از جمله مزایای این روش اندازه‌گیری، دقت بالا و امکان اندازه‌گیری در فواصل طولانی است در ضمن به کمک طیف دمایی که اندازه‌گیری کردیم توانستیم حضور آلاینده‌های موجود در جو را را نیز نشان دهیم. اما ابزار دیگری که در این پایان‌نامه برای دماسنجی از آن استفاده کردیم دوربین‌های حرارتی تصویربردار فروسرخ بودند که به کمک تصاویری که با این دوربین‌ها گرفتیم و با ارائه روش‌هایی که در ادامه به آن خواهیم پرداخت توانستیم دمای ظاهری اجسام را اندازه‌گیری کنیم با استفاده از انواع دوربین‌ها می‌توانیم از محدوده دمایی خیلی پایین تا حد دماهای کوره را اندازه‌گیری کنیم. لازم به ذکر است که در این حالت تابشی که از جسم دریافت می‌کنیم به صورت بازه طول موجی نیست بلکه به صورت انتگرالی از کل تابش پلانک در بازه طول موجی مورد نظر به طور مثال (۸-۱۴  $\mu m$ ) است که به صورت سطوح خاکستری آن‌ها را دریافت می‌کنیم. پس این بار عوامل دیگری در اندازه‌گیری دما دخیل بودند که ما را مجبور به شناسایی کامل مشخصات تصویر و ویژگی‌های دوربین حرارتی کردند. پس از اندازه‌گیری دمای ظاهری جسم با دوربین حرارتی به دنبال روشی برای تصحیح دمای ظاهری و نزدیک کردن آن به دمای واقعی جسم بودیم پس به بیان الگوهای ریاضی پرداختیم تا بتوانیم عوامل موثر بر دمای اندازه‌گیری شده را بررسی کنیم و میزان خطا در اندازه‌گیری‌ها را مورد مطالعه قرار دهیم که در طول این پایان‌نامه به شرح کامل آن‌ها خواهیم پرداخت.

### ۳- ساختار کلی پایان‌نامه

با توجه به موضوع مورد تحقیق و لزوم و اهمیت شناخت مفاهیم اولیه تابش‌سنجی و آشنایی با ناحیه طول موجی فروسرخ و همچنین آشنایی با ابزار و وسایلی که در این ناحیه مورد استفاده قرار می‌گیرند مباحث را به گونه‌ای تنظیم کردیم که تا حد امکان مطالب مورد نیاز را پوشش دهد.

در فصل اول به بیان تعاریف اولیه در مورد تابش‌سنجی و نورسنجی و ضریب‌گسیلدهی و عوامل موثر بر ضریب-گسیلدهی پرداختیم.

در فصل دوم روش‌های اندازه‌گیری دما به صورت غیرتماسی را شرح می‌دهیم و وسایلی که در این مورد استفاده می‌شود را معرفی می‌کنیم دمای ظاهری هدف را معرفی می‌کنیم و به صورت تئوری مراحل تبدیل یک شار فوتونی به دما را در یک حرارت‌سنج غیرتماسی بررسی می‌کنیم. سپس دمای تصحیح شده جسم را عنوان می‌کنیم و با یک بیان ریاضی مراحل تبدیل یک دمای ظاهری به دمای تصحیح شده را دنبال خواهیم کرد.

در فصل سوم به بررسی سامانه‌های تصویربردار حرارتی پرداخته ایم. سامانه‌های فروسرخ و سامانه‌های الکترواپتیک را معرفی می‌کنیم و شرایط استفاده از هر کدام را شرح خواهیم داد مشخصات یک دوربین حرارتی را به طور