وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه
گاوازنگ - زنجان

# مطالعه پارامترهای فیزیکی هواویزهای جو زنجان با استفاده از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی، داده‌های ماهواره‌ای، مدل هواشناسی HYSPLIT و داده‌های NCEP/NCAR

**پایان‌نامهٔ دکتری**

امیر معصومی

استاد راهنما:
**دکتر حمیدرضا محمدی خالصی‌فرد**

مهر ۱۳۹۱

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به

پدر و مادرم

همسر مهربانم، یترا

# سپاس گزاری ...

بر خود لازم می‌دانم در ابتدا از زحمات دکتر ثبوتی بنیانگذار دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان در پایه‌گذاری محیطی علمی برای بهتر آموختن سپاسگزاری کنم. از دکتر خالصی‌فرد استاد راهنمای هر دو مقطع کارشناسی ارشد و دکتری‌ام بسیار سپاسگزارم. از ایشان در این مدت بسیار آموخته‌ام. نوشتن این پایان‌نامه بدون کمک‌های علمی دوستان خوبم فرهاد عبدی، علی بیات، روح‌اله مرادحاصلی و هادی برزویی امکان‌پذیر نبود.

هشت سال از بهترین لحظه‌های زندگی‌ام در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان سپری شد که شیرینی آن را وام‌گزار دوستان خوبم احد صابر، جعفر مصطفوی امجد، رسول عالی‌پور، فرهاد عبدی، حمیدرضا خلیلیان، احسان احدی اخلاقی، یوسف عزیزی و نیز سایر دوستانم هستم.

# چکیده

هواویزها ذرات ریز جامد یا مایع معلق در هوا هستند که ابعاد آنها از چندین نانومتر تا چندین ده میکرون متغیر است. اغلب آنها در اثر عوامل طبیعی چون وزش باد در صحراها، تبخیر سطحی آب اقیانوس‌ها و دریاها، فوران‌های آتشفشانی و سوختن جنگل‌ها و چمنزارها وارد جو می‌شوند. عوامل انسانی نظیر سوزاندن سوخت‌های فسیلی و تغییر پوشش سطحی زمین سهم ده درصدی در تولید هواویزهای جوی دارد.

هواویزها بر زور تابشی جو، ویژگی ابرها، کیفیت هوا و سلامتی انسانها تأثیر می‌گذارند. توزیع زمانی و مکانی هواویزهای جوی بسیار متغیر است و به همین دلیل بررسی تأثیرات هواویزها، نیازمند مطالعه پیوسته و جهانی آنهاست. نمونه برداری از هواویزها و بررسی آزمایشگاهی آنها در کنار روش‌های سنجش از دور از طریق دستگاه‌های زمین-پایه، دستگاه‌های نصب شده بر روی ماهواره‌های هواشناسی و هواپیماها، روش‌های مختلف و مکمل بررسی هواویزهاست.

شیدسنج خورشیدی نوعی تابش‌سنج زمین-پایه است که شدت نور مستقیم رسیده از خورشید و پراکنده شده از آسمان را در طول‌موج‌های معین و با میدان دید باریک ثبت می‌کند. با استفاده از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی می‌توان ویژگی‌های فیزیکی و اپتیکی هواویزها شامل عمق اپتیکی هواویزها، نمای آنگستروم، سپیدایی پراکندگی یگانه، تابع فازی، ضریب شکست و تابع توزیع اندازه هواویزها را به دست آورد. در این پایان‌نامه از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی برای استخراج ویژگی‌های هواویزهای جو شهر زنجان در بازه‌های زمانی مهر ۱۳۸۵-مهر ۱۳۸۷ و دی ۱۳۸۸-شهریور ۱۳۸۹ استفاده شده است.

عمق اپتیکی هواویزها بیانگر میزان هواویزهاست و از خاموشی نور مستقیم خورشید در چهار طول موج ۴۴۰، ۶۷۵، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر حاصل می‌شود. نمای آنگستروم به عنوان معیاری کیفی از

ابعاد هواویزها از ارتباط میان اندازه‌گیری‌های عمق اپتیکی هواویزها در سه طول موج ۴۴۰، ۶۷۵ و ۸۷۰ نانومتر به دست می‌آید. سپیدایی پراکندگی یگانه، تابع فازی، ضریب شکست و تابع توزیع اندازه هواویزها از تحلیل داده‌های نور پراکنده شده از آسمان که شیدسنج خورشیدی در طول موج ۸۷۰ نانومتر آن را اندازه‌گیری و ثبت می‌کند؛ استخراج می‌شوند. این کمیت‌ها اطلاعات ارزشمندی از میزان، نوع غالب و چگونگی توزیع ابعادی هواویزها را در اختیار می‌گذارند. استخراج این ویژگی‌ها نیازمند برآورد نظری شدت نور پراکنده شده از آسمان با استفاده از حل معادله انتقال تابش و سپس به‌کارگیری روش وارون‌سازی برای مقادیر نظری و واقعی شدت نور پراکنده شده از آسمان است. نظریه‌های پراکندگی می و ریلی در تمامی مراحل روش فوق برای محاسبه نظری کمیت‌های اپتیکی درگیر در مسأله برهمکنش نور خورشید با هواویزها و مولکول‌ها به کار گرفته می‌شوند.

پنجاه رویداد غباری با استفاده از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی در بازه‌های زمانی اشاره شده برای جو زنجان ثبت شده‌اند که برای یافتن میزان نشست آنها در جو زنجان، چشمه‌های تولید کننده آنها، مسیرهای حرکتی و گستره جغرافیایی آنها از نتایج نمایانی افقی سطح شهر زنجان، مدل هواشناسی HYSPLIT، داده‌های NCEP/NCAR و داده‌های عمق اپتیکی سامانه MODIS ماهواره Aqua استفاده شده است.

نتیجه این مطالعات نشان داده‌اند که ذرات غبار و هواویزهای شهری-صنعتی دو نوع اصلی هواویزهای تشکیل دهنده جو زنجان هستند. هواویزهای شهری-صنعتی نوع غالب هواویزهای جو زنجان در بازه زمانی اواسط پاییز تا اواسط زمستان هستند. این نوع از هواویزها اغلب ریزدانه‌اند و دارای مقادیر سپیدایی پراکندگی یگانه و بخش حقیقی ضریب شکست کمتری در مقایسه با ذرات غبار هستند. افزوده شدن هواویزهای نوع غبار به جو زنجان موجب می‌شود که آنها هواویز غالب در بقیه طول سال (اواخر زمستان - اوایل پاییز) باشند. ابعاد اغلب ذرات غبار بیشتر از یک میکرون است و آنها بیشترین مقادیر سپیدایی پراکندگی یگانه و بخش حقیقی ضریب شکست را در میان همه انواع هواویزها دارا هستند. مشاهده شده است که به ویژه میزان غبار جو شهر زنجان در فصل بهار و اوایل تابستان افزایش

چشمگیری می‌یابد. همچنین ۵۰ رویداد غباری برای اندازه‌گیری در بازه‌های زمانی اشاره شده ثبت شده‌اند که ٪۸۲ آنها بین ماه‌های فروردین و تیر توزیع شده‌اند. در رویدادهای غباری نمایانی افقی سطح زمین کاهش می‌یابد که نشانگر چگالی بالای غبار در نزدیکی سطح زمین است. همچنین بخش درشت‌دانه تابع توزیع ابعادی هواویزها افزایش شدیدی نشان می‌دهد و مقادیر کمیت‌های سپیدایی پراکندگی یگانه و بخش حقیقی ضریب شکست هواویزهای جو زنجان به مقادیر مشخصه این کمیت‌ها برای غبار میل می‌کند. غبار مشاهده شده در جو زنجان چشمه محلی ندارد و از انتقال غبار چشمه‌های غباری منطقه خاورمیانه به جو زنجان ناشی می‌شود. نتایج مدل هواشناسی HYSPLIT، داده‌های NCEP/NCAR و نیز داده‌های عمق اپتیکی سامانه MODIS ماهواره Aqua نشان می‌دهند که چشمه غباری حوزه رودخانه‌های دجله و فرات در کشور عراق منشأ بیش از ٪۸۰ رویدادهای غباری جو زنجان است. انتقال غبار از چشمه‌های غباری ناحیه بین دریاچه‌های خزر و آرال و دریاچه نمک قم به جو شهر زنجان نیز مسئول بخش اندکی از رویدادهای غباری آن است.

**واژه‌های کلیدی:** *هواویز، ویژگی‌های اپتیکی و فیزیکی هواویزها، زنجان، شیدسنج خورشیدی، معادله انتقال تابش، روش وارونگی، غبار، رویداد غباری، حوزه رودخانه‌های دجله و فرات.*

# فهرست


چکیده . . . . . پنج

**۱ هواویزها، تأثیرات آنها، روش‌های مطالعه و منطقه مورد مطالعه آنها** ۱

۱.۱ مقدمه . . . . . ۱

۲.۱ انواع هواویزها . . . . . ۳

۱.۲.۱ هواویزهای نمک دریایی . . . . . ۸

۲.۲.۱ غبار . . . . . ۹

۳.۲.۱ هواویزهای ناشی از سوختن مواد زیست‌توده . . . . . ۱۵

۴.۲.۱ هواویزهای شهری-صنعتی . . . . . ۱۵

۳.۱ تأثیرات هواویزها . . . . . ۱۷

۱.۳.۱ تأثیرات هواویزها بر کیفیت هوا و سلامتی انسانها . . . . . ۱۷

۲.۳.۱ تأثیرات هواویزها بر بودجه تابشی زمین . . . . . ۱۸

۴.۱ روش‌های مطالعه هواویزها . . . . . ۲۲

۱.۴.۱ سنجش از دور توسط ماهواره‌های هواشناسی . . . . . ۲۳

۲.۴.۱ اندازه‌گیری درمحل زمین-پایه . . . . . ۲۷

۳.۴.۱ سنجش از دور زمین-پایه . . . . . ۲۷

۵.۱ شهر زنجان و اهمیت مطالعه هواویزهای جو آن . . . . . ۳۱

**۲ مبانی نظری مطالعه هواویزها با استفاده از شیدسنج خورشیدی ۳۷**

۱.۲ شیدسنج خورشیدی . . . . . ۳۷

۱.۱.۲ بخش‌های تشکیل دهنده شیدسنج خورشیدی . . . . . ۳۹

۲.۱.۲ طول موج‌های اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی . . . . . ۴۲

۳.۱.۲ مدهای اندازه‌گیری شیدسنج خورشیدی . . . . . ۴۳

۲.۲ الگوریتم تعیین عمق اپتیکی هواویزها . . . . . ۴۶

۱.۲.۲ تعیین موقعیت خورشید . . . . . ۴۶

۲.۲.۲ عمق اپتیکی کل . . . . . ۴۷

۳.۲.۲ عمق اپتیکی مولکولی . . . . . ۴۹

۴.۲.۲ طرح‌واره کلی تعیین عمق اپتیکی هواویزها . . . . . ۵۴

۳.۲ الگوریتم تعیین نمای آنگستروم . . . . . ۵۵

۴.۲ نظریه می و محاسبه نظری ویژگی‌های هواویزها . . . . . ۵۸

۱.۴.۲ سپیدایی پراکندگی یگانه و تابع فازی تک ذره واقع در رژیم می . . . . . ۶۰

۲.۴.۲ مقادیر محتمل ضریب شکست هواویزها . . . . . ۶۴

۳.۴.۲ تابع توزیع اندازه پیش‌فرض هواویزها . . . . . ۶۷

۴.۴.۲ سپیدایی پراکندگی یگانه و تابع فازی برای مجموعه‌ای از هواویزهای جوی ۷۰

۵.۲ معادله انتقال تابش و برآورد شدت نور پراکنده شده از آسمان . . . . . ۷۳

۱.۵.۲ استنتاج اویلری معادله انتقال تابش . . . . . ۷۴

۲.۵.۲ تجزیه میدان تابشی به میدان‌های تابشی مستقیم و پخشی . . . . . ۷۶

۳.۵.۲ معادله انتقال تابش برای جو متشکل از صفحات افقی همگن . . . . . ۷۸

۴.۵.۲ جداسازی میدان تابشی به میدان‌های تابشی رو به بالا و رو به پایین . . . ۸۱

۵.۵.۲ حل معادله انتقال تابش برای جو متشکل از صفحات افقی همگن . . . ۸۶

۶.۵.۲ روش مرتبه‌های متوالی پراکندگی برای حل شبه‌دقیق معادله انتقال تابش . ۸۶
۷.۵.۲ طرح‌واره برآورد شدت نور خورشید پراکنده شده از آسمان از معادله انتقال تابش برای مد اندازه‌گیری صفحه اصلی شیدسنج خورشیدی . . . . . ۸۹
۶.۲ الگوریتم تعیین سپیدایی پراکندگی یگانه، تابع فازی، تابع توزیع اندازه و ضریب شکست هواویزها . . . . . ۹۵

**۳ نتایج تجربی بررسی هواویزهای جو زنجان با استفاده از شیدسنج خورشیدی ۱۰۵**
۱.۳ مکان اندازه‌گیری، بازه زمانی اندازه‌گیری و ویژگی‌های مطالعه شده هواویزهای جو زنجان . . . . . ۱۰۵
۲.۳ عمق اپتیکی هواویزها . . . . . ۱۰۷
۳.۳ نمای آنگستروم . . . . . ۱۱۱
۴.۳ بررسی همبستگی عمق اپتیکی و نمای آنگستروم هواویزهای جو زنجان . . . . . ۱۱۴
۵.۳ سپیدایی پراکندگی یگانه و بخش موهومی ضریب شکست هواویزها . . . . . ۱۱۷
۶.۳ بخش حقیقی ضریب شکست هواویزها . . . . . ۱۱۹
۷.۳ تابع توزیع اندازه هواویزها . . . . . ۱۲۲
۸.۳ تحول زمانی هواویزهای جو زنجان . . . . . ۱۲۷

**۴ بررسی چشمه‌های تولید کننده هواویزهای جو زنجان با استفاده از اندازه‌گیری‌های شیدسنج خورشیدی، داده‌های ماهواره‌ای و مدل‌های هواشناسی ۱۳۰**
۱.۴ هواویزهای غالب جو زنجان . . . . . ۱۳۰
۱.۱.۴ هواویزهای ناشی از فعالیت‌های شهری-صنعتی . . . . . ۱۳۱
۲.۱.۴ ذرات غبار . . . . . ۱۳۱
۲.۴ چشمه‌های غباری منطقه خاورمیانه . . . . . ۱۳۲
۱.۲.۴ حوزه رودخانه‌های دجله و فرات در کشور عراق . . . . . ۱۳۴

۲.۲.۴ ناحیه بین دریاچه‌های خزر و آرال در کشور ترکمنستان . . . . . ۱۳۴
۳.۲.۴ چشمه‌های غباری شبه جزیره عربستان . . . . . ۱۳۵
۴.۲.۴ چشمه‌های داخل فلات ایران . . . . . ۱۳۶
۳.۴ مدل هواشناسی HYSPLIT و مسیریابی انتقال غبار به جو زنجان . . . . . ۱۳۷
۴.۴ رویدادهای غباری جو زنجان . . . . . ۱۴۱
۵.۴ بررسی مفصل یک رویداد غباری، ۴ تیر ۱۳۸۹ . . . . . ۱۴۸
۱.۵.۴ داده‌های شیدسنج خورشیدی . . . . . ۱۴۸
۲.۵.۴ داده‌های عمق اپتیکی هواویزی حاصل از ماهواره هواشناسی Aqua . . . ۱۵۰
۳.۵.۴ مدل هواشناسی HYSPLIT . . . . . ۱۵۳
۴.۵.۴ داده‌های NCEP/NCAR . . . . . ۱۵۴

**۵ مرور نتایج و کارهای پیش رو ۱۵۷**

۱.۵ مرور نتایج . . . . . ۱۵۷
۲.۵ کارهای پیش رو . . . . . ۱۶۰
واژه‌نامه فارسی به انگلیسی . . . . . ۱۷۴

# لیست تصاویر


۱.۱ عکسی از شهر تهران در یک روز آلوده (۵ خرداد ۱۳۹۱). هواویزهای ناشی از آلودگی شهری موجب کاهش نمایانی جو شده‌اند. . . . . ۴

۲.۱ طرح‌واره‌ای از چگونگی تشکیل هواویزهای نمک دریایی در اثر تبخیر افشانه‌های آب [۱۵]. . . . . ۸

۳.۱ تصویر هواویزهای نمک دریایی خشک شده در زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی. پهنای شکل برابر ۲٫۷ میکرون است [۲۰]. . . . . ۹

۴.۱ سازوکار نوعی خیزش غبار در ناحیه صحرا در شمال آفریقا [۲۲]. . . . . ۱۰

۵.۱ طوفان غباری در تاریخ ۱۳ آگوست سال ۲۰۰۴ در کشور چاد در شمال آفریقا. عکس برگزیده سال ۲۰۰۴ مؤسسه WorldPressPhoto اثر JahiChikwendiu [۲۴]. ۱۱

۶.۱ عکس ابزار MODIS نصب شده بر روی ماهواره Aqua از ناحیه وسیعی به مرکز شهر زنجان در سه روز متوالی ۴-۲ تیر ۱۳۸۹ که انتقال غبار از کشور عراق به نواحی غربی، شمال غربی و شمال شرقی ایران را به خوبی نشان می‌دهد [۲۵]. . ۱۲

۷.۱ تصویر ذرات غبار در زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی [۲۷]. . . . . ۱۴

۸.۱ تصویر ذرات دوده در زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی: (a) ذرات دوده با ساختار زنجیروار؛ ابعاد هر ذره بین ۶۰ – ۴۰ نانومتر متغیر است و طول نوار مقیاس ۵۰۰ نانومتر است. (b) ذرات دوده با ساختار اسفنجی؛ طول نوار مقیاس ۲۰۰ نانومتر است [۳۹]. . . . . ۱۶

۹.۱ تصویر ذرات سولفات در زیر میکروسکوپ الکترونی روبشی: (a) ذره سولفات با اندازه تقریبی ۵۱۰ نانومتر. (b) ذره سولفات با اندازه تقریبی ۲۱۵ نانومتر که ذرات دوده با شکل زنجیروار به آن چسبیده‌اند. طول نوار مقیاس در هر دو قسمت شکل ۲۰۰ نانومتر است. [۳۹] . . . . . ۱۷

۱۰.۱ طرح‌واره‌ای از مجموع اثرات مستقیم و غیرمستقیم هواویزها بر بودجه تابشی زمین [۱]. . . . . ۲۰

۱۱.۱ زور تابشی اقلیم بین سالهای ۱۷۵۰ تا ۲۰۰۵ میلادی. هواویزها در مجموع اثر منفی بر زور تابشی دارند و باعث کاهش دمای سطح زمین می‌شوند. فعالیت‌های انسانی در مجموع زور تابشی را افزایش می‌دهند و اثرات گرمایشی در پی دارند [۱]. . . ۲۱

۱۲.۱ چیدمان لیدار CALIOP مستقر بر روی ماهواره CALIPSO که از سال ۲۰۰۶ تاکنون به بررسی هواویزها و ابرها می‌پردازد [۶۰]. . . . . ۲۶

۱۳.۱ چیدمان لیدار پس پراکننده کشسان مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان [۶۰]. . . . . ۲۸

۱۴.۱ شیدسنج خورشیدی مدل CE۳۱۸-۲ مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان. . . . . ۲۹

۱۵.۱ پوشش جغرافیایی ایستگاه‌های شیدسنج خورشیدی فعال زیرمجموعه AERONET در خردادماه ۱۳۹۱. شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان یکی از ۹۷۶ ایستگاه عضو AERONET و تنها ایستگاه موجود در ایران است [۲۵]. . . . . ۳۱

۱۶.۱ میزان متوسط بارندگی سالانه منطقه خاورمیانه. میزان متوسط بارندگی سالانه اغلب نقاط ایران زیر ۴۰۰ میلی‌متر است. میزان متوسط بارندگی سالانه شهر زنجان بین ۲۰۰ تا ۴۰۰ میلی‌متر است [۸۶]. . . . . ۳۲

۱۷.۱ موقعیت جغرافیایی ایستگاه‌های شیدسنج خورشیدی فعال زیرمجموعه AERONET در خردادماه ۱۳۹۱ با مرکزیت ایران. شیدسنج خورشیدی مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان تنها ایستگاه موجود از این نوع در ایران است. تعداد زیاد ایستگاه‌های شیدسنج کشورهای دیگر دلیل اهمیت مطالعه هواویزها است [۲۵]. ۳۳

۱۸.۱ نقشه ارتفاعی منطقه خاورمیانه. موقعیت شهر زنجان با حلقه سبز رنگی مشخص شده است. . . . . ۳۴

۱۹.۱ میانگین روزانه نمایانی افقی سطح شهر زنجان در سال ۲۰۱۰ میلادی. . . . . ۳۵

۱.۲ شیدسنج خورشیدی مدل CE۳۱۸-۲ مستقر در دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه زنجان. . . . . ۴۰

۲.۲ اجزای تشکیل دهنده بخش اپتیکی شیدسنج خورشیدی. . . . . ۴۱

۳.۲ طیف تابشی خورشید در بالا و پایین جو زمین و طول موج‌های انتخابی شیدسنج خورشیدی. . . . . ۴۲

۴.۲ نمایه اندازه‌گیری شدت نور آسمان در مد المقنطرات [۸۱]. . . . . ۴۴

۵.۲ ترتیب اندازه‌گیری برای زوایای سمتی مختلف نسبت به خورشید در مد المقنطرات [۸۱]. . . . . ۴۴

۶.۲ نمایه اندازه‌گیری شدت نور آسمان در مد صفحه اصلی [۸۱]. . . . . ۴۵
۷.۲ ترتیب اندازه‌گیری برای زوایای ارتفاعی مختلف نسبت به خورشید در مد صفحه اصلی [۸۱]. . . . . ۴۵
۸.۲ هندسه اندازه‌گیری شدت نور مستقیم خورشید عبوری از جو زمین توسط شیدسنج خورشیدی در مد اندازه‌گیری خورشید. . . . . ۴۸
۹.۲ عمق اپتیکی کل محاسبه شده از داده‌های شیدسنج خورشیدی در چهار طول موج ۴۴۰، ۶۷۵، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر برای دو روز مختلف از سال ۲۰۱۰ میلادی: (a) ۲۲ مارس (یک روز نسبتا صاف) و (b) ۲۵ ژوئن (یک روز غباری). . . . . ۵۰
۱۰.۲ طرح‌واره کلی تعیین عمق اپتیکی هواویزها. . . . . ۵۴
۱۱.۲ تغییرات روزانه عمق اپتیکی هواویزهای جو زنجان در چهار طول موج ۴۴۰، ۶۷۵، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر برای یک روز صاف (۷ ژانویه ۲۰۰۸). . . . . ۵۵
۱۲.۲ تغییرات روزانه عمق اپتیکی هواویزهای جو زنجان در چهار طول موج ۴۴۰، ۶۷۵، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر برای یک روز غباری (۶ می ۲۰۰۷). . . . . ۵۶
۱۳.۲ تغییرات روزانه عمق اپتیکی هواویزهای جو زنجان در چهار طول موج ۴۴۰، ۶۷۵، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر برای یک روز خیلی غباری (۲۴ ژوئن ۲۰۱۰). . . . . ۵۷
۱۴.۲ تغییرات روزانه نمای آنگستروم برای جو زنجان و برای سه روز ۷ ژانویه ۲۰۰۸ (روز صاف)، ۶ می ۲۰۰۷ (یک روز غباری) و ۲۴ ژوئن ۲۰۱۰ (یک روز خیلی غباری). ۵۹
۱۵.۲ بازده پراکندگی نظری محاسبه شده از نظریه می برای ذرات کروی شکل با شعاع‌های بین ۵۰ نانومتر تا حدود ۱۸ میکرون در برهمکنش با نور فرودی با طول موج ۸۷۰ نانومتر. بخش حقیقی ضریب شکست ذرات برابر ۱/۵۰ اختیار شده است و چهار مقدار ۰، ۰/۰۰۱، ۰/۰۱ و ۰/۱ برای بخش موهومی ضریب شکست ذرات در نظر گرفته شده است. . . . . ۶۳

۱۶.۲ تابع فازی برای چهار ذره با ابعاد مختلف (مولکول نوعی واقع در رژیم ریلی، هواویز کروی با شعاع ۰٫۱ میکرون، هواویز کروی با شعاع ۱ میکرون و هواویز کروی با شعاع ۱۰ میکرون) در طول موج ۸۷۰ نانومتر و برحسب زوایای پراکندگی. همگی ذرات دارای ضریب شکست مختلط یکسان $۱٫۵۰ - ۰٫۰۱i$ هستند. . . . . ۶۵

۱۷.۲ تابع توزیع اندازه جانگ و لگاریتمی-طبیعی دومدی به عنوان دو پیش‌فرض برای چگونگی توزیع ابعادی هواویزها برای حالت هواویزهای غالب ریزدانه ($\alpha = ۱٫۸$). ۶۹

۱۸.۲ تابع توزیع اندازه جانگ و لگاریتمی-طبیعی دومدی به عنوان دو پیش‌فرض برای چگونگی توزیع ابعادی هواویزها برای حالت ترکیب هواویزهای ریزدانه و درشت‌دانه ($\alpha = ۱٫۰$). . . . . ۷۰

۱۹.۲ تابع توزیع اندازه جانگ و لگاریتمی-طبیعی دومدی به عنوان دو پیش‌فرض برای چگونگی توزیع ابعادی هواویزها برای حالت هواویزهای غالب درشت‌دانه ($\alpha = ۰٫۲$). ۷۱

۲۰.۲ بازده پراکندگی محاسبه شده در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای (الف) جو با هواویزهای غالب ناشی از فعالیت‌های شهری-صنعتی ($\alpha = ۱٫۸$ و $n = ۱٫۴۵ - ۰٫۰۱۰۰i$) و (ب) جو با حضور چشمگیر غبار ($\alpha = ۰٫۲$ و $n = ۱٫۵۵ - ۰٫۰۰۱۰i$). . . . . ۷۲

۲۱.۲ تابع فازی محاسبه شده در طول موج ۸۷۰ نانومتر برای (الف) جو با هواویزهای غالب ناشی از فعالیت‌های شهری-صنعتی ($\alpha = ۱٫۸$ و $n = ۱٫۴۵ - ۰٫۰۱۰۰i$) و (ب) جو با حضور چشمگیر غبار ($\alpha = ۰٫۲$ و $n = ۱٫۵۵ - ۰٫۰۰۱۰i$). . . . . ۷۳

۲۲.۲ طرح‌واره جو با فرض صفحات موازی همگن برای محاسبه معادله انتقال تابش و برآورد شدت نور خورشید پراکنده شده از آسمان و رسیده به شیدسنج خورشیدی در زوایای پراکندگی مختلف. . . . . ۷۹

۲۳.۲ طرح‌واره برآورد شدت نور خورشید پراکنده شده از آسمان از معادله انتقال تابش برای مد اندازه‌گیری صفحه اصلی شیدسنج خورشیدی. . . . . ۹۲

۲۴.۲ برآورد نظری شدت نور خورشید پراکنده شده از آسمان در مد اندازه‌گیری صفحه اصلی شیدسنج خورشیدی و برای طول موج ۸۷۰ نانومتر با در نظر گرفتن (بدون در نظر گرفتن) سهم بازتاب زمینی، $L_{th}$ ($L_{\circ,th}$)، و مقدار واقعی آن، $L_{exp}$، برای ساعت ۴۶GMT : ۴ روز پنجم تیر ۱۳۸۹ (۲۶ ژوئن ۲۰۱۰ میلادی) و برای زوایای پراکندگی ۱۳۰ – ۲ درجه نسبت به خورشید. . . . . ۹۳

۲۵.۲ معادل شکل ۲۴.۲ با تقسیم زاویه پراکندگی به دو زیربازه ۲۰ – ۲ و ۱۳۰ – ۲۰ درجه. ۹۳

۲۶.۲ برآورد نظری شدت نور خورشید پراکنده شده از آسمان در مد اندازه‌گیری صفحه اصلی شیدسنج خورشیدی و برای طول موج ۸۷۰ نانومتر با در نظر گرفتن (بدون در نظر گرفتن) سهم بازتاب زمینی، $L_{th}$ ($L_{\circ,th}$)، و مقدار واقعی آن، $L_{exp}$، برای ساعت ۲GMT : ۷ روز هجدهم دی ۱۳۸۸ (۸ ژانویه ۲۰۱۰ میلادی) و برای زوایای پراکندگی ۱۳۰ – ۲ درجه نسبت به خورشید. . . . . ۹۴

۲۷.۲ معادل شکل ۲۶.۲ با تقسیم زاویه پراکندگی به دو زیربازه ۲۰ – ۲ و ۱۳۰ – ۲۰ درجه. ۹۴

۲۸.۲ طرح‌واره استخراج سپیدایی پراکندگی یگانه، بخش موهومی ضریب شکست و تابع فازی هواویزها. . . . . ۹۸

۲۹.۲ طرح‌واره استخراج بخش حقیقی ضریب شکست و تابع توزیع اندازه هواویزها. . ۱۰۳

۱.۳ تصویر ماهواره‌ای مکان سایت IASBS که در شمالی‌ترین نقطه شهر زنجان قرار دارد.۱۰۶

۲.۳ تحول زمانی میانگین روزانه عمق اپتیکی هواویزهای جو زنجان در طول موج ۸۷۰ نانومتر و برای (a) سال ۲۰۰۷، (b) سال ۲۰۰۸ و (c) سال ۲۰۱۰ میلادی. . . . ۱۰۹

۳.۳ تغییرات زمانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویزهای جو زنجان در طول موج ۸۷۰ نانومتر. . . . . ۱۱۰

۴.۳ تغییرات زمانی میانگین ماهانه عمق اپتیکی هواویزهای جو زنجان در طول‌موج‌های ۴۴۰، ۶۷۵، ۸۷۰ و ۱۰۲۰ نانومتر. . . . . ۱۱۱

۵.۳ تحول زمانی میانگین روزانه نمای آنگستروم هواویزهای جو زنجان برای (a) سال ۲۰۰۷، (b) سال ۲۰۰۸ و (c) سال ۲۰۱۰ میلادی. . . . . ۱۱۳
۶.۳ تغییرات زمانی میانگین ماهانه نمای آنگستروم هواویزهای جو زنجان. . . . . ۱۱۴
۷.۳ میانگین روزانه عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ nm برحسب میانگین روزانه نمای آنگستروم برای جو زنجان. افزایش عمق اپتیکی هواویزها با کاهش شدید نمای آنگستروم همراه است. . . . . ۱۱۵
۸.۳ میانگین روزانه نمایانی افقی در سطح شهر زنجان در سال ۲۰۱۰ برحسب (a) میانگین روزانه عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ nm و (b) میانگین روزانه نمای آنگستروم. به استثنای چند روز خاص دارای عمق اپتیکی هواویزی خیلی زیاد و نمای آنگستروم خیلی کم، ارتباط خاصی میان تغییرات این دو ویژگی هواویزها و نمایانی افقی در سطح شهر زنجان مشاهده نمی‌شود. به عبارت دیگر بادهای محلی تأثیری در خیزش غبار ندارند و غبار موجود در جو زنجان اغلب در ارتفاعات بالا قرار داشته و منشأ خارجی دارد. . . . . ۱۱۶
۹.۳ تغییرات زمانی میانگین ماهانه سپیدایی پراکندگی یگانه هواویزهای جو زنجان در طول موج ۸۷۰ nm برای بازه زمانی مهر ۱۳۸۵ - تیر ۱۳۸۶ (اکتبر ۲۰۰۶ - ژوئیه ۲۰۰۷) و دی ۱۳۸۸ - شهریور ۱۳۸۹ (ژانویه ۲۰۱۰ - سپتامبر ۲۰۱۰). . . . . ۱۱۹
۱۰.۳ میانگین روزانه سپیدایی پراکندگی یگانه هواویزهای جو زنجان در طول موج ۸۷۰ nm برحسب (a) میانگین روزانه عمق اپتیکی هواویزها در طول موج ۸۷۰ nm و (b) میانگین روزانه نمای آنگستروم. . . . . ۱۲۰
۱۱.۳ تغییرات زمانی میانگین ماهانه بخش حقیقی ضریب شکست هواویزهای جو زنجان در طول موج ۸۷۰ nm برای بازه زمانی مهر ۱۳۸۵ - تیر ۱۳۸۶ (اکتبر ۲۰۰۶ - ژوئیه ۲۰۰۷) و دی ۱۳۸۸ - شهریور ۱۳۸۹ (ژانویه ۲۰۱۰ - سپتامبر ۲۰۱۰). . . . . ۱۲۱

۱۲.۳ تابع توزیع اندازه هواویزهای جو زنجان در روز ۶ فوریه ۲۰۱۰ (۱۷ بهمن ۱۳۸۸)، ساعت ۱۰GMT : ۷. سایر ویژگی‌های هواویزهای جو زنجان در این لحظه به قرار زیر است: $\tau_{a,۸۷۰} = ۰/۰۴$، $\alpha = ۱/۷۰$، $\omega_{۰} = ۰/۸۶$ و $n = ۱/۴۰ - ۰/۰۲۰۸i$. . ۱۲۴

۱۳.۳ تابع توزیع اندازه هواویزهای جو زنجان در روز ۱۰ ژوئیه ۲۰۰۷ (۱۹ تیر ۱۳۸۶)، ساعت ۴۰GMT : ۳. سایر ویژگی‌های هواویزهای جو زنجان در این لحظه به قرار زیر است: $\tau_{a,۸۷۰} = ۰/۲۵$، $\alpha = ۰/۵۰$، $\omega_{۰} = ۰/۹۲$ و $n = ۱/۵۵ - ۰/۰۰۵۰i$. . ۱۲۴

۱۴.۳ مقدار میانگین ماهانه تابع توزیع اندازه هواویزهای جو زنجان برای بازه اول اندازه‌گیری، اکتبر ۲۰۰۶ - ژوئیه ۲۰۰۷ (مهر ۱۳۸۵ - تیر ۱۳۸۶). . . . . ۱۲۵

۱۵.۳ مقدار میانگین ماهانه تابع توزیع اندازه هواویزهای جو زنجان برای بازه سوم اندازه‌گیری، ژانویه - سپتامبر ۲۰۱۰ (دی ۱۳۸۸ - شهریور ۱۳۸۹). . . . . ۱۲۶

۱۶.۳ مقدار میانگین ماهانه نمای آنگستروم، عمق اپتیکی هواویزها، بخش حقیقی ضریب شکست و سپیدایی پراکندگی یگانه هواویزهای جو زنجان. . . . . ۱۲۸

۱.۴ (a) موقعیت مکانی چشمه‌های غباری کمربند غباری (رنگ تیره نقشه) و (b) تقسیم آن به سه ناحیه z۱: چشمه‌های غباری شمال آفریقا، z۲: چشمه‌های منطقه خاورمیانه شامل حوزه رودخانه‌های دجله و فرات در کشور عراق، ناحیه بین دریاچه‌های آرال و خزر در کشور ترکمنستان و چشمه‌های شبه جزیره عربستان و z۳: چشمه‌های آسیای جنوبی و شرقی شامل چشمه‌های جنوب شرقی ایران، شبه قاره هند و چین [۲۱]. . . . . ۱۳۳

۲.۴ ناحیه بین دریاچه‌های خزر و آرال که یکی از چشمه‌های مهم غبار منطقه است. دریاچه خشک Kara – Bogaz فعال‌ترین بخش این چشمه غباری است. . . . . ۱۳۵

۳.۴ چشمه‌های غباری شبه جزیره عربستان بیشتر در نواحی شرقی و جنوب شرقی آن قرار دارند (رنگ‌های تیره شکل). اعداد و رنگ‌های روی شکل معیاری از فعالیت چشمه‌های غباری است. (نتیجه گیری شده از داده‌های ماهواره TOMS) [۸۶]. . ۱۳۶

۴.۴ نقشه ارتفاعی ایران. مکان دریاچه نمک قم در جنوب تهران با علامت + نشان داده شده است. دریاچه‌های هامون و هامون جازموریان در جنوب شرقی ایران به ترتیب با نمادهای ۱ و ۲ مشخص شده‌اند [۲۱]. . . . . ۱۳۷

۵.۴ نتایج مدل مسیریابی رو به عقب HYSPLIT برای جو زنجان و برای روز خیلی صاف ۲۲ مارس ۲۰۱۰ (۲ فروردین ۱۳۸۹). این شکل نشان می‌دهد که بسته‌های هوا در طی ۷۲ ساعت از چه مناطقی و در چه ارتفاعی رد شده‌اند تا اینکه توانسته‌اند در ساعت ۳۰ : ۱۲ ظهر روز ۲ فروردین ۱۳۸۹ در سه ارتفاع ۵۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ متر بالاتر از سطح زمین به جو زنجان برسند [۱۲۸]. . . . . ۱۳۹

۶.۴ نتایج مدل مسیریابی رو به عقب HYSPLIT برای جو زنجان و برای روز خیلی غباری ۱۲ ژوئن ۲۰۰۸ (۲۳ خرداد ۱۳۸۷). این شکل نشان می‌دهد که بسته‌های هوا در طی ۷۲ ساعت از چه مناطقی و در چه ارتفاعی رد شده‌اند تا اینکه توانسته‌اند در ساعت ۳۰ : ۱۲ ظهر روز ۲۳ خرداد ۱۳۸۷ در سه ارتفاع ۵۰۰، ۱۵۰۰ و ۲۵۰۰ متر بالاتر از سطح زمین به جو زنجان برسند [۱۲۸]. . . . . ۱۴۰

۷.۴ نقشه منطقه خاورمیانه که مکان چشمه‌های غبار رسیده به جو زنجان را در ۵۰ رویداد غباری این شهر بین ۱۲ مهر ۱۳۸۵ - ۸ مهر ۱۳۸۹ نشان می‌دهد. چشمه‌های غباری حوزه رودخانه‌های دجله و فرات در کشور عراق مسئول ۴۱ رویداد غباری جو زنجان‌اند. ۶ رویداد غباری جو زنجان از چشمه‌های کشور ترکمنستان ناشی می‌شوند و دریاچه نمک قم نیز منشأ ۳ رویداد غباری زنجان است. . . . . ۱۴۶