دانشگاه زنجان
دانشکده فنی و مهندسی
گروه عمران - نقشه برداری

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی عمران - نقشه برداری
گرایش ژئودزی

بررسی تغییرات زمانی لایه تروپسفر با استفاده از اندازه گیری‌های ایستگاه‌های دائم GPS

نگارش:
فرشته طاهرخانی

استاد راهنمای اول:
دکتر محمدعلی شریفی

استاد راهنمای دوم:
دکتر جمال عسگری

استاد مشاور:
دکتر مجید عباسی

زمستان ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به پدر و مادر عزیزم

تشکر و قدرانی

خداوند مهربان و بلند مرتبه را سپاس که یاریم کرد در راه دانش، توشه‌ایی هر چند اندک برگیرم، اگر چه این دفتر، تحفه‌ایی ناقابل از دریای بی‌کران دانشی است که خداوند منان در نهاد انسان‌ها، این اشرف مخلوقات گذاشته است، اما این تحفه اندک حاصل چندین ماه تحقیق و جستجو و نگارش بود تا شاید ردی از دانسته‌هایم بر جای بگذارم.

در ابتدا از پدر و مادرم عزیزم که در تمامی این سال‌ها بستر مناسبی فراهم نمودند تا با خیالی آسوده به کسب علم و دانش بپردازم، با تمام وجود قدردانی می‌کنم.

این مسیر پر فراز و نشیب که هر چند گاهی اوقات پیمودن آن به دشواری انجام می‌گرفت حاصل لطف بی‌کران ایزد منان و عنایت ویژه انسان‌های شریفی است، که هر چه در انبان دانسته‌ها داشتند بر طبق اخلاص گذاشتند.

اگرچه بیان نام مبارک و شریف این بزرگواران نمی‌تواند ذره‌ای از زحمات و مرحمت آنان را جبران نماید، اما وظیفه خود می‌دانم که نام این استادان بی‌ریا و دلسوز زینت بخش ابتدای این پایان‌نامه باشد.

استاد، جناب آقای دکتر مجید عباسی، قبل از آنکه از او بیاموزم و مشق بگیرم، با رفتار، اخلاق و گفتارش به من آموخت که در مسیر دانش صبور، مهربان، باگذشت و بخشنده باشم، اگر نبود تشویق و ترغیب این بزرگوار، شاید مسیر راه برایم به سختی می‌گذشت. لذا تشکر ویژه خود را نثار این استاد بزرگوار می‌نمایم.

راهنمایی درست و بجا سالک را به مقصد می‌رساند و عالم را به علم. از اساتید راهنما جناب آقای دکتر محمدعلی شریفی و جناب آقای دکتر جمال عسگری تشکر خالصانه می نمایم که در این مسیر راهنمایم شدند، تا این پایان نامه به سرانجام برسد.

همچنن جا دارد از ازجناب آقای دکتر علیرضا امیری سیمکویی و جناب آقای دکتر یوسفعلی عابدینی به خاطر رهنمودهای مفیدشان تشکر نمایم .

یاران و همراهان دیگر در این وادی به من امیدواری دادند و مشوقم شدند. ازعزیزان و بزرگواران، آقای مهندس بهزاد مظفری، برادر عزیزم مجید طاهرخانی، آقای دکتر علی‌محمد علی‌محمدی، خواهر عزیزم مرضیه طاهرخانی و آقایان مهندس رضا دوستی، سینا کیایی و مهدی غلام‌نیا و خانم‌ها مهندس ژاله پرسون و زیبا محمدخانی تشکر و قدرانی می‌نمایم .

در پایان امیدوارم که این پایان‌نامه مورد استفاده اساتید و دانشجویان گرامی قرار گیرد.

چکیده

امواج الکترومغناطیس ارسالی از ماهواره‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی $GNSS$ در هنگام عبور از هواکره، تحت تأثیر آن قرار می‌گیرند. تقسیم‌بندی هواکره بر اساس پارامترهای متفاوتی صورت می‌پذیرد، که بر اساس امواج الکترومغناطیس عبوری از آن، به دو بخش هواکره خنثی و یون‌کره تقسیم می‌شود. اثر هواکره خنثی روی امواج ارسالی ماهواره‌ها تأخیر پایین‌کره نامیده می‌شود. علت این نام‌گذاری سهم عمده پایین‌کره در این تأخیر است.

در کاربردهایی مثل ژئودینامیک و بررسی تغییر شکل پوسته زمین توسط گیرنده‌های $GNSS$، نیاز به تعیین موقعیت دقیق عاری از هر گونه خطا، از جمله خطای پایین‌کره، توسط گیرنده‌های $GNSS$ است. اثر پایین‌کره روی امواج الکترومغناطیس ارسالی از ماهواره‌های سیستم تعیین موقعیت جهانی $GNSS$ یک پارامتر مهم محدود کننده دقت در تعیین موقعیت توسط این ماهواره‌ها محسوب می‌شود.

هدف این پایان‌نامه اطمینان از حذف اثر پایین‌کره روی مختصات ایستگاه‌های دائم $GNSS$ است. برای این منظور وابستگی بین تأخیر زنیتی پایین‌کره و مؤلفه‌ی ارتفاعی برخی از ایستگاه‌های دائم $GNSS$ اروپا بررسی شده است. هر چند اثر تأخیر پایین‌کره مدل‌سازی شده و از روی مشاهدات $GNSS$ حذف شده است، اما نتایج حاصل شده در این پایان‌نامه گویای این است که، هنوز هم اثر پایین‌کره روی مؤلفه‌ی ارتفاعی وجود دارد.

همچنین در این پایان‌نامه، سری‌های زمانی تأخیر پایین‌کره و درجه حرارت نقطه شبنم مورد آنالیز قرار گرفت، که از نتایج آن وجود پریود ۱ ساله و حدوداً ۲۰ روزه در مورد تأخیر پایین‌کره و پریود یک ساله در مورد درجه حرارت نقطه شبنم است.

از دیگر نتایج این پایان‌نامه مشاهده وابستگی بسیار زیاد بین مشاهدات هواشناسی رادیوسوندها (درجه حرارت نقطه شبنم) و تأخیر زنیتی پایین‌کره است، که از این مسئله می‌توان در جهت اهداف هواشناسی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: *تأخیر پایین‌کره، مشاهدات دائم ایستگاه‌های $GNSS$، وابستگی، تابع هم‌بستگی متقابل، مشاهدات رادیوسوند*

فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها سه

فهرست جدول‌ها شش

مقدمه هشت

۱ پایین‌کره ۱

۱.۱ هواکره ۱

۱.۱.۱ عوامل مؤثر در طبقه‌بندی هواکره ۱

۲.۱.۱ طبقه‌بندی هواکره ۲

۲.۱ پایین‌کره و اثرات آن در انتشار امواج ۴

۳.۱ تعاریف ۵

۱.۳.۱ ضریب شکست ۵

۲.۳.۱ بخار آب ۵

۳.۳.۱ تأخیر انتشار و حالت انکسار ۱۱

۴.۱ تأخیر هیدرواستاتیک زنیتی ۱۶

۵.۱ تأخیر مرطوب زنیتی ۱۸

۱.۵.۱ تأخیر مرطوب زنیتی و بخار آب ۱۸

۶.۱ تأخیر پایین‌کره مایل ۲۰

۱.۶.۱ تابع تصویر ۲۱

۷.۱ عدم تقارن آزیموتی و پارامتر گرادیان ۲۵

۸.۱ مدل‌های پایین‌کره ۲۹

۹.۱ ابزارهای تعیین تأخیر پایین‌کره ۳۲

۱.۹.۱ رادیوسوند ۳۳

۲.۹.۱ رادیومتر ۳۵

۳.۹.۱ سیستم ناوبری ماهواره‌ای جهانی ($GNSS$) ۳۶

۲ اثر پایین‌کره بر روی مشاهدات $GNSS$ ۳۷

۱.۲ سیستم ناوبری ماهواره‌ای جهانی ($GNSS$) . . . ۳۷

۲.۲ معادلات مشاهدات . . . ۳۸

۱.۲.۲ معادلات مشاهدات شبه فاصله کد . . . ۳۹

۲.۲.۲ معادلات مشاهدات فاز موج حامل . . . ۴۱

۳.۲ مدل‌سازی اریبی باقی‌مانده تأخیر پایین‌کره . . . ۴۲

۱.۳.۲ اریبی باقی‌مانده تأخیر پایین‌کره نسبی . . . ۴۶

۲.۳.۲ اریبی باقی‌مانده تأخیر پایین‌کره مطلق . . . ۴۸

۳ مفاهیم پایه سری‌های اطلاعاتی ۵۲

۱.۳ سری اطلاعات . . . ۵۲

۱.۱.۳ ویژگی‌های آماری . . . ۵۳

۲.۳ آنالیز طیفی . . . ۵۵

۱.۲.۳ آنالیز طیفی به روش فوریه . . . ۵۶

۲.۲.۳ آنالیز طیفی کم‌ترین‌مربعات . . . ۶۱

۳.۳ تئوری هم‌آمیخت و هم‌بستگی . . . ۶۳

۱.۳.۳ هم‌بستگی . . . ۶۴

۴ پردازش اطلاعات ۶۶

۱.۴ منابع داده‌ها و نحوه دسترسی . . . ۶۶

۱.۱.۴ اطلاعات پایین‌کره . . . ۶۶

۲.۱.۴ سری‌های زمانی مختصات ایستگاه‌های $GNSS$ . . . ۷۷

۳.۱.۴ اطلاعات مربوط به رادیوسوندها . . . ۸۰

۲.۴ آنالیز اطلاعات . . . ۸۵

۱.۲.۴ آنالیز سری‌های زمانی تأخیر پایین‌کره‌ی حاصل از $GNSS$ . . . ۸۶

۲.۲.۴ آنالیز طیفی درجه حرارت نقطه شبنم . . . ۹۳

۳.۲.۴ آنالیز هم‌بستگی بین سری‌های زمانی نقطه شبنم، تأخیر پایین‌کره و مؤلفه ارتفاعی ایستگاه‌های $GNSS$ . . . ۹۸

۵ نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۰۹

۱.۵ نتیجه‌گیری . . . ۱۰۹

۲.۵ پیشنهادات . . . ۱۱۱

مراجع ۱۱۲

فهرست شکل‌ها

۱.۱ طبقه‌بندی هواکره بر اساس پارامترهای مختلف [۱] ۴

۲.۱ تغییرات فشار جزئی هوای اشباع شده نسبت به دما [۱۰] ۱۰

۳.۱ خمیدگی موج در پایین‌کره ۱۲

۴.۱ سهم هر کدام از بخش‌های حالت انکسار مرطوب در برای فشار اشباع شده [۱۳] ۱۴

۵.۱ رابطه بین اختلاف شعاع (ds) ، اختلاف فاصله (dr) و زاویه زنیتی (z) ۲۰

۶.۱ هواکره شیب‌دار [۳۷] ۲۶

۷.۱ تابع تصویر آزیموتی $Chen$ و $Herring$ [۳۶] ۲۸

۸.۱ رادیوسوند ۳۳

۹.۱ دو نمونه بخارسنج رادیومتری[۴] ۳۶

۱.۲ سیستم‌های GPS، $GLONASS$ و $Galileo$ در یک نگاه [۳] ۳۹

۲.۲ مشاهده تفاضلی یگانه [۳۷] ۴۳

۳.۲ تأثیر اریبی نوع یک روی خط مبنا [۳۷] ۴۵

۴.۲ تأثیر اریبی نوع دو روی خط مبنا [۳۷] ۴۵

۵.۲ زاویه زنیتی گیرنده‌ها در نقاط P_1 و P_2 با ماهواره [۳۷] ۴۹

۱.۳ اجزا تشکیل دهنده یک سری اطلاعاتی [۳۱] ۵۵

۲.۳ تصویر مربوط به هم‌بستگی متقابل دو سری زمانی $f(t)$ و $g(t)$ ۶۵

۱.۴ نقشه ایستگاه‌های دائم $GNSS$ اروپا ۶۷
۲.۴ بخش $Header$ فایل‌ها با فرمت $SGNYYJJJS.TRO$ ۶۹
۳.۴ بخش $Header$ فایل‌ها با فرمت $SGNYYJJJS.TRP$ ۶۹
۴.۴ دو نمونه از گراف‌های مربوط به فایل با فرمت $*.TRO$ ۷۵
۵.۴ دو نمونه از گراف‌های مربوط به فایل با فرمت $*.TRP$ ۷۶
۶.۴ سری زمانی اولیه (تصویر بالا) و سری زمانی پالایش شده (تصویر پایین) ۷۷
۷.۴ سری زمانی دارای گپ (تصویر بالا) و سری زمانی بدن گپ (تصویر پایین) ۷۸
۸.۴ دو نمونه از گراف‌های مربوط به سری زمانی باقی‌مانده ارتفاع ۷۹
۹.۴ تصویر مربوط به سری زمانی دارای اشتباه و گپ و سری زمانی پالایش شده و عاری از گپ ۸۰
۱۰.۴ فرمت FSL ۸۲
۱۱.۴ تصویر مربوط به سری زمانی اولیه و پالایش شده درجه حرارت نقطه شبنم ۸۳
۱۲.۴ موقعیت‌های ایستگاه‌های رادیوسوند و $GNSS$ ۸۴
۱۳.۴ آنالیز طیفی کم‌ترین‌مربعات مقادیر تأخیر پایین‌کره تا فرکانس ۵ . . . . . ۸۶
۱۴.۴ آنالیز طیفی کم‌ترین‌مربعات مقادیر تأخیر پایین‌کره مربوط به ۲۴ ایستگاه ۸۷
۱۵.۴ آنالیز طیفی کم‌ترین‌مربعات مقادیر تأخیر پایین‌کره ۸۹
۱۶.۴ دامنه گراف‌های آنالیز طیفی کم‌ترین‌مربعات مقادیر تأخیر زنیتی مربوط به ۲۴ ایستگاه بعد از حذف فرکانس مربوط به مقدار بیشینه ۹۰
۱۷.۴ گراف‌های آنالیز سری‌های زمانی درجه حرارت نقطه شبنم مربوط به سه ایستگاه ۹۳
۱۸.۴ گراف‌های آنالیز طیفی مربوط به درجه حرارت نقطه شبنم ۹۴
۱۹.۴ گراف‌های آنالیز سری‌های زمانی درجه حرارت نقطه شبنم مربوط به سه ایستگاه بعد از حذف مؤلفه مربوط به فرکانس ۱ . . . . . ۹۶
۲۰.۴ گراف‌های آنالیز طیفی درجه حرارت نقطه شبنم بعد از حذف مؤلفه مربوط به فرکانس مربوط به دامنه بیشینه ۹۷

۲۱.۴ تصویر مربوط به سطح زیر نمودار تابع هم‌بستگی متقابل سری زمانی تأخیر پایین‌کره و مؤلفه ارتفاعی ایستگاه $BRUS$ ۱۰۰
۲۲.۴ هاتصویر مربوط به گراف‌های تابع هم‌بستگی متقابل بین تأخیر زنیتی پایین‌کره و مؤلفه‌ی ارتفاعی ایستگاه ۱۰۱
۲۳.۴ نمونه‌ایی از گراف‌های تابع هم‌بستگی متقابل بین درجه حرارت نقطه شبنم و تأخیر زنیتی پایین‌کره ۱۰۶

فهرست جدول‌ها

۱.۱ ثوابت رابطه (۱۱.۱) و (۱۲.۱) ۱۱

۲.۱ ضرایب تابع تصویر هیدرواستاتیک ۲۴

۳.۱ ضرایب تابع تصویر مرطوب ۲۵

۴.۱ جمله تصحیح B برای مدل اصلاح شده سستاموئینن ۳۱

۵.۱ جمله تصحیح δ_R برای مدل اصلاح شده سستاموئینن ۳۲

۱.۲ مشخصات سیستم‌های ناوبری GPS، $GLONASS$ و $Galileo$ ۳۸

۲.۲ وابستگی تصحیح انکسار پایین‌کره به پارامترهای هواشناسی ۴۷

۱.۴ ویژگی‌های مربوط به مکان و حالت ایستگاه‌های ثابت $GNSS$ اروپا ۷۱

۲.۴ موقعیت ایستگاه‌های $GNSS$ فرانسه ۷۲

۳.۴ نوع آنتن و گیرنده ایستگاه‌های $GNSS$ اروپا ۷۳

۴.۴ کشورهایی که مشاهدات رادیوسوند آن‌ها دانلود شده است و تعداد ایستگاه‌ها در هر کشور ۸۱

۵.۴ اسامی ایستگاه‌های رادیوسند و $GNSS$ با ذکر فواصل آن‌ها ۸۵

۶.۴ نتایج آنالیز طیفی کم‌ترین‌مربعات بر روی سری‌های زمانی ZTD ۸۸

۷.۴ نتایج آنالیز طیفی کم‌ترین‌مربعات بر روی سری‌های زمانی ZTD ۹۲

۸.۴ نتایج آنالیز طیفی کم‌ترین‌مربعات بر روی سری‌های زمانی نقطه شبنم ۹۵

۹.۴ ضرایب هم‌بستگی سری‌های زمانی مؤلفه ارتفاعی و ZTD ۹۹

۱۰.۴ نتایج محاسبه سطح زیر نمودار تابع هم‌بستگی متقابل اریب نرمالیزه ۱۰۲

۱۱.۴ ضرایب هم‌بستگی سری‌های زمانی ZTD، مؤلفه ارتفاعی و درجه حرارت نقطه شبنم . . ۱۰۳
۱۲.۴ نتایج تابع هم‌بستگی متقابل نااریب ۱۰۷
۱۳.۴ نتایج تابع هم‌بستگی متقابل اریب نرمالیزه ۱۰۸

مقدمه

سیستم‌های $GNSS$[1] از انتشار امواج رادیویی که با سرعت نور منتشر می‌شوند، برای اندازه‌گیری فاصله، به هدف تعیین موقعیت استفاده می‌کنند. وقتی این سیگنال‌ها از هواکره عبور می‌کنند تحت تأثیر سه حالت قرار می‌گیرند:

- دچار تأخیر می‌شوند،
- مسیر آن‌ها دچار خمش می‌شود،
- جذب می‌شوند.

در این پایان‌نامه تنها تأخیر انتشار در هواکره‌ی خنثی مورد نظر است، که شامل تأخیر غیر مستقیم ایجاد شده توسط خمش نیز می‌شود.

اثر هواکره‌ی خنثی (قسمت غیر یونیزه شده هواکره) روی امواج الکترومغناطیس، شکست پایین‌کره[2] یا تأخیر پایین‌کره نامیده می‌شود. هر چند آرام‌کره و میان‌کره هم جزیی از هواکره خنثی می‌باشند ولی علت این نام‌گذاری سهم غالب پایین‌کره در این تأخیر است.

در کاربردهایی مثل ژئودینامیک نیاز به تعیین موقعیت دقیق توسط گیرنده‌های $GNSS$ است. هدف این پایان‌نامه اطمینان از حذف اثر پایین‌کره روی مختصات ایستگاه‌های ثابت $GNSS$ است. برای این منظور مقدار وابستگی بین تأخیر پایین‌کره، مشاهدات هواشناسی رادیوسندها و مختصات ایستگاهای دائم $GNSS$ در اروپا توسط تابع هم‌بستگی متقابل و ضرایب هم‌بستگی بررسی می‌شود.

آشنایی با هواکره‌ی زمین و عوامل مؤثر در طبقه‌بندی آن در فصل اول بحث شده است. همچنین در این بخش راجع به پایین‌کره و انتشار امواج در آن بحث شده است.

فصل دوم شامل خلاصه‌ایی از سیستم‌های $GNSS$ و مقایسه انواع این سیستم‌ها با یکدیگر است. همچنین

[1] Global Navigation Satellite System
[2] Tropospheric Refraction

در این فصل معادلات مشاهدات $GNSS$ و اثر خطاهای مختلف به خصوص پایین‌کره روی آن‌ها شرح داده شده است.

توضیحاتی در مورد سری‌های زمانی، آنالیز طیفی، هم‌آمیخت[1] و هم‌بستگی در فصل سوم بیان شده است.

فصل چهارم شامل توضیحاتی راجع‌به نحوه دسترسی به داده‌ها و شرح آماده سازی آن‌ها است. در این فصل نتایج آنالیز طیفی سری‌های زمانی (۱) تأخیر زنیتی پایین‌کره و (۲) مشاهدات هواشناسی رادیوسوندها (درجه حرارت نقطه شبنم) آورده شده است. همچنین نتایج آنالیز هم‌بستگی بین سه سری زمانی تأخیر زنیتی پایین‌کره، درجه حرارت نقطه شبنم و مؤلفه‌ی ارتفاعی ایستگاه‌های دائم $GNSS$ گنجانده شده است.

فصل پنجم شامل نتایج و پیشنهادات است.

[1] Convolution

فصل اول

پایین‌کره

در این فصل مختصری راجع‌به هواکره[1] و پایین‌کره بحث می‌شود. همچنین روش برآورد مقدار تأثیر پایین‌کره روی سیگنال‌های الکترومغناطیس، شرح داده خواهد شد.

۱.۱ هواکره

هواکره لایه‌ای از گازهایی است که زمین را در بر گرفته‌اند، این گازها به‌وسیله‌ی جاذبه زمین نگه‌داشته شده‌اند. از جمله این گازها می‌توان به نیتروژن (۷۸/۱%)، اکسیژن (۲۰/۹%)، مقدار کمی از آرگون (۰/۹%)، دی‌اکسیدکربن (حدوداً ۰/۰۳۹% اما در واقعیت مقدار آن متغیر است) و بخار آب اشاره کرد. هواکره موجودات روی زمین را از طریق جذب اشعه فرابنفش خورشید و کم کردن دما محافظت می‌کند. هواکره به سرعت با افزایش ارتفاع رقیق می‌شود، اما هیچ مرز دقیقی بین لایه‌های آن و همچنین با فضای خارج از آن وجود ندارد. ۷۵% از جرم هواکره تا ارتفاع ۱۱ کیلومتر از سطح زمین است [۵].

۱.۱.۱ عوامل مؤثر در طبقه‌بندی هواکره

با ارتفاع گرفتن از سطح زمین، با طبقه‌های مختلفی از هواکره روبه‌رو می‌شویم، که در این طبقه‌بندی بعضی پارامترها اهمیت ویژه‌ای خواهند داشت. از جمله این پارامترها می‌توان به طبیعت مولکول‌ها و یون‌ها در اثر میدان گرانش زمین، جذب تابش خورشیدی و دما اشاره نمود. حدود لایه‌های مختلف نه از نظر مکانی و نه

[1] Atmosphere

از نظر زمانی بطور مطلق ثابت نیست و دلیل آن ثابت نبودن پارامترهای مؤثر در طبقه‌بندی لایه‌ها است.

دمای لایه‌های بالایی وابسته به جذب خورشیدی است و در هنگام روز و شب مقدار آن متفاوت است. حالت الکتریکی طبقات هواکره و ترکیبات آن‌ها بر اثر فعالیت خورشید تغییر می‌کند. همچنین لازم است تغییرات محل جغرافیایی، مانند میدان مغناطیسی زمین را نیز در نظر گرفت.

۲.۱.۱ طبقه‌بندی هواکره

هواکره را می‌توان بر حسب دما، یونیزاسیون، میدان مغناطیسی و ویژگی‌های الکتریکی تقسیم‌بندی کرد.

هواکره زمین بر حسب دما به لایه‌های زیر تقسیم می‌شود:

- **پایین‌کره**[۱]: پایین‌کره پایین‌ترین لایه هواکره است که خود از لایه‌های کوچک‌تری تشکیل شده است. وجه تمایز این لایه با دیگر لایه‌های هواکره، تجمع اکثر بخار آب هواکره در آن است. به همین دلیل بسیاری از پدیده‌های هواشناسی که با رطوبت ارتباط دارند و عاملی تعیین‌کننده در وضعیت هوا به شمار می‌آیند (از قبیل ابر، باران، برف، مه و رعد و برق) در این لایه رخ می‌دهند. منبع حرارتی لایه پایین‌کره انرژی تابشی سطح زمین است. از این رو در این لایه با افزایش ارتفاع دما کاهش می‌یابد. ضخامت پایین‌کره، از شرایط حرارتی متفاوتی که در عرض‌های جغرافیایی مختلف حاکم است تبعیت می‌کند. این ضخامت معمولاً از ۱۷ تا ۱۸ کیلومتر در استوا به ۱۰ تا ۱۱ کیلومتر در مناطق معتدل و ۷ تا ۸ کیلومتر در قطب‌ها تغییر می‌کند.

- **آرام‌کره**[۲]: لایه آرام‌کره بر روی لایه پایین‌کره قرار دارد و ضخامت متوسط آن حدود ۲۳ کیلومتر است. در ۳ کیلومتر اول آرام‌کره دمای هوا ثابت است، اما در قسمت‌های بالاتر دمای هوا با ارتفاع افزایش می‌یابد. در آرام‌کره به ندرت ابر تشکیل می‌شود و تنها در شرایط ویژه‌ای ممکن است ابرهای کوهستانی به نام ابرهای مرواریدی در ارتفاع ۲۱ تا ۲۹ کیلومتری از سطح زمین ظاهر شوند، که علت وجود آن‌ها حرکات موجی شکل هوا از سوی موانع می‌باشد. از دیگر ویژگی‌های مهم آرام‌کره وجود ازن در این لایه است که به‌خصوص در ارتفاع ۲۰ تا ۳۰ کیلومتری سطح زمین بر اثر واکنش‌های مختلف فتوشیمیایی به‌دست می‌آید. ازن حالت خاصی از اکسیژن است که وظیفه اصلی آن جذب اشعه مادون قرمز خورشید است. مقدار ازن در این لایه معمولاً روند فصلی دارد، حداکثر آن در بهار و حداقل آن در پاییز مشاهده

---

[۱] Troposphere

[۲] Stratosphere

می‌شود.

- **میان‌کره**[۱]: در بالای لایه گرم ازن لایه میان‌کره قرار دارد که دما در آن متناسب با افزایش ارتفاع، با آهنگ ۰/۳ سانتیگراد به ازای هر ۱۰۰ متر کاهش می‌یابد، به طوری‌که دما در مرز فوقانی آن در ارتفاع ۸۰ تا ۹۰ کیلومتری به ۸۰- درجه سانتیگراد می‌رسد. نتیجه این دمای پایین انجماد بخار آب ناچیز موجود در این لایه است که باعث تشکیل ابرهای شب‌تاب می‌شود. این ابرها درتابستان و در عرض‌های بالا دیده می‌شوند. میان‌کره سردترین لایه هواکره است.

- **گرم‌کره**[۲]: گرم‌کره در بالای میان‌کره قرار دارد. در این لایه اشعه فرابنفش باعث یونیزاسیون می‌شود. اصطلاح گرم‌کره به علت دمای بالای این لایه است، که این میزان ممکن است به $1227°$ سانتی‌گراد ($1239°$ فارنهایت یا $1500°$ کلوین) برسد. گرم‌کره فاقد مرز فوقانی معین است. جلوه سرخی شفق یکی از پدیده‌های گرم‌کره پایینی است. قسمت پایینی گرم‌کره به طور عمده ترکیبی از ازت (N_2) و اکسیژن (O_2) به صورت مولکولی یا اتمی است در حالی که در کیلومترهای بالا اکسیژن (O_2) به ازت (N_2) غلبه می‌کند. دمای زیاد در این لایه به دلیل جذب اشعه ماوراء بنفش به‌وسیله اکسیژن اتمی است [۶].

- **برون‌کره**[۳]: برون‌کره دورترین لایه هواکره از سطح زمین است. شاید حد بالای این لایه به ارتفاع ۹۶۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر برسد. به هر حال نمی‌توان برای آن حد معینی تعیین کرد. برون‌کره فضای انتقالی بین هواکره زمین و فضای بین سیاره‌ای محسوب می‌شود.

هواکره با توجه به ساختمان امواج الکترومغناطیس، به دو قسمت هواکره‌ی خنثی و یون‌کره تقسیم می‌شود.

هواکره‌ی خنثی

هواکره‌ی خنثی شامل پایین‌کره، آرام‌کره و میان‌کره می‌شود، اما معمولاً آن را به پایین‌کره خلاصه می‌کنند و تأخیری را که در امواج الکترومغناطیس توسط هواکره‌ی خنثی به‌وجود می‌آید، تأخیر پایین‌کره می‌نامند. علت این نام‌گذاری سهم عمده پایین‌کره در ایجاد تأخیر در امواج الکترومغناطیس عبوری از هواکره است.

---

[۱] Mesosphere

[۲] Thermosphere

[۳] Exosphere

شکل ۱.۱: طبقه‌بندی هواکره بر اساس پارامترهای مختلف [۱]

یون‌کره

از بخش فوقانی میان‌کره تا ارتفاع تقریبی ۱۰۰۰ کیلومتری از زمین، بار الکتریکی شدیدی حاکم است که زاییده وجود یون‌ها و الکترون‌های آزاد است. در حقیقت پرتوهای پر انرژی خورشید که از فضای خارج هواکره به طبقات بالایی هواکره وارد می‌شوند، باعث گسستگی پیوند یا یونیزاسیون مولکول‌ها و اتم‌ها می‌شوند. بر اثر یونیزاسیون، الکترون آزاد می‌شود و باقی‌مانده اتم به صورت یون در می‌آید، به همین علت این لایه از هواکره را یون‌کره نامیده‌اند. شدت یونیزاسیون در تمام ارتفاعات یون‌کره یکسان نیست، بنابراین لایه‌های متفاوت با تراکم الکترون و یون متفاوت با ارتفاعات مجاور خود در یون‌کره وجود دارد، این لایه‌ها در ارتباطات رادیویی اهمیت بسیاری دارند که به ترتیب افزایش ارتفاع عبارت از D ، E و F هستند.

۲.۱ پایین‌کره و اثرات آن در انتشار امواج

هواکره‌ی خنثی یا به عبارت دیگر پایین‌کره برای فرکانس‌های تا ۳۰ گیگاهرتز غیرمتفرق‌کننده[۱] می‌باشد. محیط غیرمتفرق‌کننده محیطی است که سرعت امواج مستقل از فرکانس است. ضریب انکسار پایین‌کره تابعی از دما، فشار و فشار جزئی[۲] بخار آب می‌باشد. ضریب انکسار شامل دو مؤلفه خشک و مرطوب است. در حدود ٪۹۰ تأخیر پایین‌کره به علت جزء خشک یا هیدرواستاتیک می‌باشد که به طور عمده تابعی از فشار است [۱]. جزء

[۱] Nondispersive

[۲] فشار اجزاء تشکیل دهنده هواکره زمین را فشار جزئی می‌نامند.

مرطوب تابعی از فشار بخار آب است و به علت تغییر پذیری بالای این مؤلفه، مدل‌سازی آن مشکل می‌باشد.

خیلی از تکنیک‌ها مثل $GNSS$ از انتشار امواج رادیویی برای اندازه‌گیری فاصله استفاده می‌کنند. وقتی سیگنال‌ها از هواکره عبور می‌کنند، دچار تأخیر می‌شوند، که در این بخش تأخیر انتشار در هواکره‌ی خنثی یا پایین‌کره بحث می‌شود.

۳.۱ تعاریف

قبل از شرح تأخیر پایین‌کره در این بخش، برخی تعاریف ارائه می‌شوند:

۱.۳.۱ ضریب شکست

نسبت سرعت نور در خلأ (c) به سرعت موج در محیطی دیگر (v) را ضریب شکست آن محیط گویند و آن را با n نشان می‌دهند.

$$n = c/v \tag{۱.۱}$$

۲.۳.۱ بخار آب

پایین‌کره متشکل از بخار آب و هوای خشک است. هوای خشک تغییرات قابل توجهی در عرض و ارتفاع ندارد، اما مقدار بخار آب از لحاظ مکانی و زمانی بسیار متغیر است. بیشترین مقدار بخار آب هواکره در لایه مرزی ۲ کیلومتر پایین پایین‌کره قرار دارد [۱].

آب در پایین‌کره به صورت گاز (ابر و مه)، مایع (باران) و یا جامد (برف، تگرگ و یخ) وجود دارد. این مؤلفه نه تنها به علت ریزش برف و باران بلکه به خاطر مقدار زیاد انرژی که در پروسه‌ی تبدیل حالت آن رخ می‌دهد، یک جزء بسیار مهم در هواشناسی محسوب می‌شود. در این بخش لازم است یک سری کمیت‌های وابسته به بخار آب شرح داده شود.

منابع رطوبت در هواکره

اقیانوس‌ها منبع اصلی بخار آب برای هواکره می‌باشند، همچنین تبخیر از روی رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، خاك مرطوب، مناطق پوشیده از برف و یخ و نواحی پوشیده از گیاه نیز در مقدار بخار آب هواکره مؤثر است. بخار

آب می‌تواند در مواقعی که بارندگی وجود دارد به وسیله عمل تبخیر در هواکره پراکنده شده و به میزان رطوبت هوا بیافزاید. از طریق تصعید از سطوح یخی و برفی نیز به بخار آب هواکره اضافه می‌شود. هر گاه آب تبخیر می‌شود هوای اطراف خود را خنك می‌کند، زیرا برای تبخیر خود احتیاج به حرارت دارد که این حرارت لازم را باید از هوای محیط اطراف خود جذب کند.

معیارهای سنجش مقدار بخار آب در هواکره

۱. درجه حرارت نقطه شبنم[۱]؛

۲. نسبت آمیختگی[۲]؛

۳. رطوبت ویژه[۳]؛

۴. رطوبت مطلق[۴]؛

۵. رطوبت نسبی[۵].

درجه حرارت نقطه شبنم

شبنم رطوبتی متراکم است که به صورت قطرات روی اشیاء و سطوح مختلف مشاهده می‌شود. درجه حرارت نقطه شبنم معیاری برای ارزیابی مقدار رطوبت هوا است و به درجه حرارتی گفته می‌شود، که اگر هوا تا آن درجه سرد شود رطوبت موجود در هوا مایع شده و به شکل شبنم ظاهر می‌شود. در واقع اگر دمای هوا به درجه‌ایی برسد که در فشار ثابت صد در صد از بخار آب اشباع گردد، چنین درجه‌ایی به درجه حرارت نقطه شبنم موسوم است، بنابراین درجه حرارت نقطه شبنم همان نقطه اشباع[۶] است .

هنگامی‌که درجه حرارت نقطه شبنم به زیر نقطه انجماد نزول کند آن را نقطه فریز[۷] می‌نامند. در این حالت

---

[۱] Dew point temperature

[۲] Mixing ratio

[۳] Specific humidity

[۴] Absolute humidity

[۵] Relative humidity

[۶] Saturation

[۷] Frost point