دانشگاه هرمزگان
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

پایان نامه برای دریافت درجهٔ کارشناسی ارشد در رشتهٔ هواشناسی

عنوان:

برآورد آب معادل برف با استفاده از داده‌های مایکروویو غیر فعال

استاد راهنما:

دکتر ابوالحسن غیبی

اساتید مشاور:

دکتر هادی ابراهیمی

دکتر حسن لشکری

نگارش:

آذرمهر خواجه ای

تیر ماه ۱۳۹۲

اینجانب آذرمهر خواجه‌ای دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۹ مقطع کارشناسی ارشد رشته هواشناسی متعهد می‌شوم چنانچه بر اساس مطالب پایان‌نامه خود اقدام به انتشار مقاله، کتاب و ... نمایم، ضمن مطلع کردن استاد راهنما، با نظر ایشان نسبت به نشر کتاب و مقاله و ... به صورت مشترک و با ذکر نام استاد راهنما مقدم بر نام خود مبادرت کنم.

نام و نام خانوادگی دانشجو
آذرمهر خواجه‌ای

امضا

اینجانب آذرمهر خواجه‌ای دانشجوی ورودی سال ۱۳۸۹ مقطع کارشناسی ارشد رشته هواشناسی گواهی می‌کنم چنانچه در پایان‌نامه خود از فکر، ایده و نوشته دیگری بهره گرفته‌ام، با نقل قول مستقیم یا غیر مستقیم، منبع و مأخذ را نیز در جای مناسب ذکر کرده‌ام. بدیهی است مسئولیت تمامی مطالبی که نقل قول دیگران نباشد بر عهده خویش می‌دانم و جوابگوی آن خواهم بود.

نام و نام خانوادگی دانشجو
آذرمهر خواجه‌ای

امضا

چکیده

ریزش جوی به صورت برف برای تغذیه‌ی منابع سطحی و زیرزمینی کشورها می‌تواند منبعی پایدار و ثابت محسوب شود به ویژه این که در فصول خشک نیز مورد استفاده می‌باشد. کشور ایران به علت موقعیت خاص جغرافیایی و ناهمواری‌های بسیار پراکنده و تأثیر دیگر عوامل از جمله جبهه‌های آب و هوایی، از مناطق خشک جهان به شمار می‌رود. با توجه به کوهستانی بودن کشور در ارتفاعات بارندگی عموماً به‌صورت برف نازل می‌شود. در این راستا، مشکل اصلی، عدم دسترسی به مناطق برف‌گیرِ دوردست و صعب العبور، نداشتن شبکه‌های متراکم برف‌سنجی و مستمر نبودن اندازه‌گیری‌ها می‌باشد. از این رو برای رفع این نقصان، سنجش از دور می‌تواند به‌عنوان یک ابزار مهم و کارآمد مد نظر قرار گیرد.

در این تحقیق با استفاده از دمای روشنائی واحد گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته A (AMSU-A) روی ماهواره‌های NOAA، تکنیک شبکه‌های عصبی مصنوعی و همچنین رگرسیون چندگانه آب معادل برف در حوضه‌های آبریز استان تهران برای فصل زمستان (ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس) طی یک دوره پنج ساله (۲۰۱۰-۲۰۰۶) محاسبه و صحت‌سنجی شده است. در مجموع اطلاعات دیده‌بانی شده ۲۴ ایستگاه برف سنجی کشور برای ۱۹۶ روز طی دوره مورد مطالعه جهت بازیابی و صحت‌سنجی بکار رفته است. براساس نتایج به‌دست آمده بهترین برآوردها با مقادیر شاخص‌های خطا (r=۰/۸۹۹۱، Bias=۰/۸۴، MSE=۹/۵۴ و RMSE=۳/۰۹) مربوط به ماه فوریه و بدترین برآوردها (r=۰/۶۰۸۳، Bias=۱/۴۱، MSE=۴۱/۷۹ و RMSE=۶/۴۶) مربوط به ماه مارس است. نتایج نشان‌دهنده برتری شبکه‌های عصبی مصنوعی نسبت به روش رگرسیون می‌باشد. این نتایج همچنین نشان می‌دهند که مشاهدات این گمانه زن پتانسیل بالایی را برای آشکارسازی پوشش برف دارد و استفاده از اطلاعات آن برای محاسبه آب معادل برف در مناطقی نظیر کشور ایران که با محدودیت ایستگاه‌های زمینی برف سنجی مواجه است پیشنهاد می شود.

واژه‌های کلیدی: آب معادل برف، ایران، گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته، شبکه‌های عصبی مصنوعی، رگرسیون

تقدیم به

وجود نازنین **پدری**

که سایه‌اش آرامش خاطر تمام دوران زندگی و تحصیلم است،

مادری

به زلالی چشمه که غم‌خوار و پناهگاه عواطفم است،

و **برادر** مهربانی

که دلسوزی‌های همیشگی‌اش زداینده‌ی دغدغه‌هایم و پشتیبان تلاش‌های علمی‌ام بوده و هست.

تقدیر

شکر و سپاس **خداوند** منان را که بزرگ‌ترین امید و یاور، در لحظه لحظه‌ی زندگیست . . .

بر حسب وظیفه از از استاد راهنمای گرانقدر

جناب آقای دکتر **غیبی**

که بانهایت حوصله و سعه صدر، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید کمال تشکر و قدردانی را دارم،

همچنین از اساتید مشاور محترم

جناب آقای دکتر **لشکری** و جناب آقای مهندس **ابراهیمی**

سپاس‌گزارم،

و

از تمامی عزیزانی که وجودشان مشوق و یاری‌گر من در انجام این تحقیق بود . . .

فهرست مطالب

فصل اول کلیات تحقیق ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۱-۲- تعریف مساله ۲

۱-۳- پرسش‌های تحقیق ۴

۱-۴- فرضیه‌های تحقیق ۴

۱-۵- اهداف تحقیق ۴

۱-۶- پیشینه تحقیق ۵

۱-۷- ساختار تحقیق ۷

فصل دوم هیدرولوژی برف ۸

۲-۱- مقدمه ۹

۲-۲- نقش برف در چرخه هیدرولوژیک ۹

۲-۳- اندازه‌گیری پارامترهای مهم در هیدرولوژی برف ۱۰

۲-۳-۱- عمق برف ۱۰

۲-۳-۲- چگالی برف ۱۱

۲-۳-۳- آب معادل برف ۱۱

۲-۴- تفاوت برف و باران از نظر هیدرولوژی ۱۲

۲-۵- روش‌های مختلف برف‌سنجی ۱۳

۲-۵-۱- برف‌سنجی به روش مستقیم ۱۳

۲-۵-۱-۱- باران‌سنج‌ها و باران‌نگارها ۱۳

۲-۵-۱-۲- اندازه‌گیری روی میز ۱۴

۲-۵-۱-۳- لوله‌ی اندازه‌گیری برف ۱۴

۲-۵-۱-۴- بالشتک برفی ۱۴

۲-۵-۲- ایستگاه‌های دورسنجی (تله متری) ۱۵

۲-۵-۳- برف‌سنجی به روش استفاده از اشعه گاما ۱۶

۲-۵-۴- روش استفاده از عکس‌های ماهواره‌ای برای عملیات برف‌سنجی ۱۷

۲-۶- پارامترهای مؤثر بر نحوه توزیع برف ۱۸

۲-۶-۱- اثر توپوگرافی ۱۸

۲-۶-۲- اثر پوشش گیاهی ۱۹

۲-۶-۲-۱- محیط‌های جنگلی ۲۰

۲-۶-۳- اثر باد ۲۱
۲-۶-۳-۱- سرعت برشی باد ۲۱
۲-۶-۳-۲- آستانه‌ی سرعت برشی – برف ۲۱
۲-۶-۴- اثر دما ۲۲
۲-۷- طبقه‌بندی برف ۲۲

فصل سوم مبانی سنجش از دور برف ۲۴
۳-۱- مقدمه ۲۵
۳-۲- سنجش از دور (دورکاوی) برف ۲۵
۳-۳- انرژی یا تشعشع الکترومغناطیس ۲۸
۳-۴- مکانیسم برخورد متقابل انرژی الکترومغناطیس با پدیده‌های سطحی ۲۹
۳-۵- طیف انرژی الکترومغناطیس و کاربرد آن در مطالعه برف ۳۱
۳-۵-۱- خواص الکترومغناطیسی برف در ناحیه‌ی مرئی و فروسرخ نزدیک ۳۲
۳-۵-۲- خواص الکترومغناطیسی برف در ناحیه‌ی فروسرخ حرارتی ۳۳
۳-۵-۳- خواص الکترومغناطیسی برف در ناحیه‌ی مایکروویو ۳۴
۳-۵-۳-۱- پس‌پراکندگی مایکروویوِ برف ۳۸
۳-۵-۳-۲- گسیل مایکروویوِ برف ۳۹
۳-۶- ابزارهای سنجش مایکروویو ماهواره‌ای ۴۰
۳-۶-۱- ابزارهای سنجش غیرفعال ۴۰
۳-۶-۲- ابزارهای سنجش فعال ۴۱
۳-۷- تاریخچه ماهواره هواشناسی NOAA ۴۲
۳-۷-۱- مدارهای ماهواره‌ای ۴۳
۳-۷-۲- ماهواره‌های NOAA-K,L,M ۴۵
۳-۸- واحد گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته AMSU ۴۵
۳-۸-۱- گمانه‌زن مایکروویو پیشرفته واحد A (AMSU-A) ۴۸
۳-۹- محصول پوشش برف AMSU ۵۰
۳-۱۰- محصول آب معادل برفِ AMSU ۵۱
۳-۱۱- محصول آب معادل برفِ سایر سنجنده‌های مایکروویو غیرفعال ۵۱

فصل چهارم داده‌ها و روش انجام تحقیق ۵۳
۴-۱- مقدمه ۵۴
۴-۲- محدوده‌ی مورد مطالعه ۵۴

۴-۳- منابع داده‌ها ۵۶
۴-۳-۱- داده‌های ایستگاهی ۵۶
۴-۳-۲- داده‌های ماهواره‌ای ۵۷
۴-۴- روش‌های پردازش داده‌ها ۵۷
۴-۵- شبکه‌های عصبی مصنوعی ۵۷
۴-۶- ساختار شبکه‌های عصبی مصنوعی ۵۸
۴-۷- توپولوژی شبکه‌های عصبی مصنوعی ۶۰
۴-۸- شبکه پرسِپترون چند لایه ۶۱
۴-۹- قوانین یادگیری شبکه ۶۳
۴-۱۰- الگوریتم پس انتشار خطا ۶۴
۴-۱۱- مدل رگرسیون چندگانه ۶۵
۴-۱۲- شاخص‌های خطا ۶۶

فصل پنجم بحث، نتایج و پیشنهادات ۶۸
۵-۱- مقدمه ۶۹
۵-۲- اعتبارسنجی الگوریتم بازیابی آب معادل برف ۶۹
۵-۳- بازیابی آب معادل برف با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ۷۱
۵-۴- آماده‌سازی ورودی‌ها و طراحی شبکه‌های عصبی ۷۱
۵-۵- ماه ژانویه ۷۵
۵-۵-۱- نتایج حاصل از اجرای مدل ۱ ۷۵
۵-۵-۲- نتایج حاصل از اجرای مدل ۲ ۷۷
۵-۵-۳- نتایج حاصل از اجرای مدل ۳ ۷۹
۵-۵-۴- نتایج حاصل از اجرای مدل ۴ ۸۱
۵-۶- ماه فوریه ۸۴
۵-۶-۱- نتایج حاصل از اجرای مدل ۱ ۸۴
۵-۶-۲- نتایج حاصل از اجرای مدل ۲ ۸۶
۵-۶-۳- نتایج حاصل از اجرای مدل ۳ ۸۸
۵-۶-۴- نتایج حاصل از اجرای مدل ۴ ۹۰
۵-۷- ماه مارس ۹۳
۵-۷-۱- نتایج حاصل از اجرای مدل ۱ ۹۳
۵-۷-۲- نتایج حاصل از اجرای مدل ۲ ۹۵
۵-۷-۳- نتایج حاصل از اجرای مدل ۳ ۹۷

۵-۷-۴- نتایج حاصل از اجرای مدل ۴ ..... ۹۹
۵-۸- ساختار منتخب ۱-۲-۵ (ماه ژانویه) ۱۰۲
۵-۹- ساختار منتخب ۱-۷-۶ (ماه فوریه) ۱۰۳
۵-۱۰- ساختار منتخب ۱-۴-۴ (ماه مارس) ۱۰۵
۵-۱۱- مدل رگرسیون چندگانه ۱۰۷
۵-۱۲- نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۱۱

منابع ۱۱۳

پیوست یک ۱۱۸

فهرست جدول‌ها

جدول ۲-۱ مقادیر تخمینی توزیع آب در کره زمین..... ۱۰
جدول ۲-۲ آستانه‌های سرعت برشی در سه نوع انتقال برف..... ۲۲
جدول ۳-۱ مدل‌های تجربی ثابت دی الکتریک برف مرطوب در محدوده‌های فرکانسی مختلف ۳۷
جدول ۳-۲ میزان عکس‌العمل سنجنده‌های مختلف نسبت به برخی خصوصیات برف..... ۴۲
جدول ۳-۳ ابزارهای سنجش NOAA-K,L, M..... ۴۵
جدول ۳-۴ مشخصات کانالی AMSU-A و AMSU–B، که کانال‌های ۱ تا ۱۵ مربوط به AMSU-A و ۱۶ تا ۲۰ مربوط به AMSU-B می‌باشد..... ۴۷
جدول ۳-۵ مجموعه محصولات MSPPS..... ۴۸
جدول ۳-۶ زمان محلی عبور از استوا مربوط به چهار ماهواره نوآ در اواسط سال ۲۰۰۶..... ۴۸
جدول ۴-۱ موقعیت جغرافیایی و ارتفاع ایستگاه‌های مورد مطالعه..... ۵۵
جدول ۵-۱ داده‌های آب معادل برف ایستگاه‌های برف‌سنجی حوضه‌های آبریز استان تهران..... ۶۹
جدول ۵-۲ نتایج حاصل از برآورد آب معادل برف توسط الگوریتم سنجنده نسبت به مقادیر واقعی..... ۷۱
جدول ۵-۳ مدل‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی..... ۷۴
جدول ۵-۴ نتایج محاسبه خطاها به همراه تعیین ساختار بهینه در مدل اول در ماه ژانویه..... ۷۵
جدول ۵-۵ نتایج محاسبه خطاها به همراه تعیین ساختار بهینه در مدل دوم ماه ژانویه..... ۷۷
جدول ۵-۶ نتایج محاسبه خطاها به همراه تعیین ساختار بهینه در مدل سوم ماه ژانویه..... ۷۹
جدول ۵-۷ نتایج محاسبه خطاها به همراه تعیین ساختار بهینه در مدل چهارم ماه ژانویه..... ۸۱
جدول ۵-۸ نتایج محاسبه خطاها به همراه تعیین ساختار بهینه در مدل اول ماه فوریه..... ۸۴
جدول ۵-۹ نتایج محاسبه خطاها به همراه تعیین ساختار بهینه در مدل دوم ماه فوریه..... ۸۶
جدول ۵-۱۰ نتایج محاسبه خطاها به همراه تعیین ساختار بهینه در مدل سوم ماه فوریه..... ۸۸
جدول ۵-۱۱ مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی و تعیین ساختار بهینه در ماه فوریه..... ۹۰
جدول ۵-۱۲ مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی و تعیین ساختار بهینه در ماه مارس..... ۹۳
جدول ۵-۱۳ مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی و تعیین ساختار بهینه در ماه مارس..... ۹۵
جدول ۵-۱۴ مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی و تعیین ساختار بهینه در ماه مارس..... ۹۷
جدول ۵-۱۵ مدل‌های مختلف شبکه عصبی مصنوعی و تعیین ساختار بهینه در ماه مارس..... ۹۹
جدول ۵-۱۶ مقادیر شاخص‌های خطا روی داده‌های آموزش و آزمون در مدل ۱-۲-۵..... ۱۰۲
جدول ۵-۱۷ مقادیر شاخص‌های خطا روی داده‌های آموزش و آزمون در مدل ۱-۷-۶..... ۱۰۴

جدول ۵-۱۸ مقادیر شاخص‌های خطا روی داده‌های آموزش و آزمون در مدل ۱-۴-۴ ..... ۱۰۵
جدول ۵-۱۹ مقادیر شاخص‌های آماری خطا مربوط به داده‌های آزمون برای آب معادل برف بازیابی شده از رگرسیون چندگانه در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس..... ۱۰۸

فهرست شکل‌ها

شکل ۲-۱ نحوه توزیع آب در کره زمین ۹
شکل ۲-۲ اندازه‌گیری عمق برف با استفاده از التراسونیک ۱۱
شکل ۲-۳ رابطه بین چگالی، عمق و آب معادل برف ۱۲
شکل ۲-۴ توزین لوله‌ی نمونه‌بردار برف توسط نیروسنج ۱۴
شکل ۲-۵ نمای یک بالشتک برفی ۱۵
شکل ۲-۶ نمای یک ایستگاه دورسنجی ۱۶
شکل ۲-۷ تعیین مشخصات پوشش برفی با استفاده از تابش جذب شده گاما در هواپیما ۱۷
شکل ۲-۸ تأثیر پوشش گیاهی بر جریان هوا ۱۹
شکل ۲-۹ نحوه ربایش برف توسط پوشش گیاهی ۱۹
شکل ۲-۱۰ تفاوت در انباشتگی برف ۲۰
شکل ۲-۱۱ اتلاف برف در درختان نسبت به کف جنگل ۲۰
شکل ۲-۱۲ تأثیر باد بر بلورهای برف الف) هنگام انتقال طی وزش باد ب) هنگام ریزش طی وزش باد آرام ۲۱
شکل ۲-۱۳ سرعت اصطکاکی باد در سطوح مختلف ۲۱
شکل ۲-۱۴ مشخصات فیزیکی اصلی برف انباشته شده ۲۳
شکل ۳-۱ طیف جذبی جو در نواحی مختلف طول موجی ۲۶
شکل ۳-۲ مراحل تهیه و ارسال تصویر توسط ماهواره‌های سنجش از دور ۲۷
شکل ۳-۳ یک موج الکترومغناطیس- پارامترهای آن شامل یک موج الکتریکی مارپیچی (E) و یک موج الکترومغناطیس نظیر آن (M) که هردوی آن‌ها برهم و بر جهت انتشار موج عمودند ۲۹
شکل ۳-۴ تعامل انرژی با سطح زمین ۳۱
شکل ۳-۵ منحنی طیفی برف تازه، یخ برف، یخ یخچالی و یخ یخچالی دارای خاک و خاشاک ۳۳
شکل ۳-۶ ضریب عبور عمودی از سطح زمین به فضا در عرض جغرافیایی ۱۵ درجه ۳۴
شکل ۳-۷ بخش موهومی ثابت دی الکتریک برف خشک. منحنی‌ها با چگالی (بر حسب Mgm^{-3}) برچسب خورده‌اند. منحنی‌های خاکستری برای دمای $-5^{o}C$ و مشکی برای $-15^{o}C$ هستند ۳۶
شکل ۳-۸ ثابت دی الکتریک محاسبه شده (پایین) و طول جذبِ (بالا) برف مرطوب در ۳GHz (راست)، ۱۰GHz (وسط) و ۳۰GHz (چپ). روی نمودارها، ثابت دی الکتریک با بخش حقیقی (خطوط شیب‌دار) و بخش موهومی (خطوط افقی) نشان داده شده‌اند. نمودارهای بالا با مقدار طول جذب بر حسب متر برچسب شده است ۳۸

شکل ۳-۹ گسیل مایکروویو از سطح (۱) بدون برف (خاک)، (۲) برف خشک و (۳) برف مرطوب ۳۹
شکل ۳-۱۰ نمایی شماتیک از سنجنده غیرفعال ۴۰
شکل ۳-۱۱ نحوه تعامل انرژی مایکروویو و سنجنده ۴۱
شکل ۳-۱۲ نمایی شماتیک از سنجنده فعال ۴۲
شکل ۳-۱۳ مدارهای ماهواره‌های هواشناسی ۴۴
شکل ۳-۱۴ تصویر شماتیک از اندازه‌گیری‌های AMSU-A. ماهواره با مربع روی محور Z نشان داده شده است و در امتداد محور X می‌چرخد. از این صحنه، AMSU-A تعداد 30 … j=1 گام اندازه‌گیریِ متوالی با رد متقاطع در زاویه اسکن β_j نسبت به نقطه حضیض با دامنه ^{o}۴۸/۳۳- = β_j تا ^{o}۴۸/۳۳+= β_j انجام می‌دهد. به صورت قراردادی محور Y طوری انتخاب شده است که یک سیستم مختصات راست‌گرد (X, Y, Z) تشکیل دهد ۴۹
شکل ۳-۱۵ مشخصات طیفی مایکروویو مربوط به پوشش برف و پوشش گیاهی ۵۰
شکل ۴-۱ موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه و پراکندگی ایستگاه‌های برف‌سنجی ۵۶
شکل ۴-۲ ساختار یک نورون طبیعی ۵۹
شکل ۴-۳ مدل ریاضی ساده شده عصب واقعی ۵۹
شکل ۴-۴ پرسپترون سه لایه با اتصالات کامل ۶۲
شکل ۴-۵ رفتار تابع سیگموئید ۶۲
شکل ۵-۱ نمایش نتایج اجرای الگوریتم سنجنده AMSU-A و مقادیر واقعی در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس در دوره‌ی زمانی ۲۰۱۰-۲۰۰۶. ..... ۷۰
شکل ۵-۲ نحوه انتخاب ساختار بهینه با توجه به مقدار SSE ۷۳
جدول ۵-۳ مدل‌های مختلف شبکه‌های عصبی مصنوعی ۷۴
شکل ۵-۳ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل اول در ماه ژانویه ۷۶
شکل ۵-۴ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار نهایی مدل اول (۱-۴-۶) در ماه ژانویه بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی ۷۶
شکل ۵-۵ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل دوم در ماه ژانویه ۷۸
شکل ۵-۶ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار نهایی مدل دوم (۱-۲-۵) در ماه ژانویه بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی ۷۸
شکل ۵-۷ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل سوم در ماه ژانویه ۸۰
شکل ۵-۸ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار نهایی مدل سوم (۱-۹-۴) در ماه ژانویه بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی ۸۰

شکل ۵-۹ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل چهارم در ماه ژانویه ۸۲
شکل ۵-۱۰ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار نهایی مدل چهارم (۱-۲-۳) در ماه ژانویه بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی..... ۸۲
شکل ۵-۱۱ همبستگی بین مقادیر برآورد شده‌ی آب معادل برف با شبکه عصبی مصنوعی و مقادیر مشاهده‌ای در ساختارهای نهایی هر یک از چهار مدل در ماه ژانویه..... ۸۳
شکل ۵-۱۲ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل اول در ماه فوریه ۸۵
شکل ۵-۱۳ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار نهایی مدل اول (۱-۷-۶) در ماه فوریه بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی..... ۸۵
شکل ۵-۱۴ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل دوم در ماه فوریه ۸۷
شکل ۵-۱۵ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار منتخب مدل دوم (۱-۲-۵) در ماه فوریه بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی..... ۸۷
شکل ۵-۱۶ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل سوم در ماه فوریه ۸۹
شکل ۵-۱۷ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار منتخب مدل سوم (۱-۲-۴) در ماه فوریه بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی..... ۸۹
شکل ۵-۱۸ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل چهارم در ماه فوریه..... ۹۱
شکل ۵-۱۹ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار منتخب مدل چهارم (۱-۷-۳) در ماه فوریه بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی..... ۹۱
شکل ۵-۲۰ بهترین همبستگی بین مقادیر برآورد شده‌ی آب معادل برف با شبکه عصبی مصنوعی و مقادیر مشاهده‌ای در ساختارهای منتخب هر یک از چهار مدل در ماه فوریه..... ۹۲
شکل ۵-۲۱ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل اول در ماه مارس ۹۴
شکل ۵-۲۲ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار منتخب مدل اول (۱-۳-۶) در ماه مارس بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی..... ۹۴
شکل ۵-۲۳ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل دوم در ماه مارس ۹۶
شکل ۵-۲۴ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار منتخب مدل دوم (۱-۸-۵) در ماه مارس بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی..... ۹۶

شکل ۵-۲۵ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل سوم در ماه مارس ۹۸
شکل ۵-۲۶ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار منتخب مدل سوم (۱-۴-۴) در ماه مارس بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی..... ۹۸
شکل ۵-۲۷ نمایش شاخص‌های آماری محاسبه شده برای چهار ساختار مدل چهارم در ماه مارس..... ۱۰۰
شکل ۵-۲۸ نتایج برآورد آب معادل برف توسط ساختار منتخب مدل چهارم (۱-۷-۳) در ماه مارس بین مقادیر مشاهده شده (Observed) و مقادیر حاصل از شبکه عصبی..... ۱۰۰
شکل ۵-۲۹ بهترین همبستگی بین مقادیر برآورد شده‌ی آب معادل برف با شبکه عصبی مصنوعی و مقادیر مشاهده‌ای در ساختارهای منتخب هر یک از چهار مدل در ماه مارس..... ۱۰۱
شکل ۵-۳۰ انحراف معیار (Bias) مقدار آب معادل برف واقعی (ایستگاهی) و مقدار بازیابی شده‌ی آن توسط شبکه عصبی برای الگوهای آموزش (سمت چپ) و الگوهای آزمون (سمت راست) در ماه ژانویه..... ۱۰۳
شکل ۵-۳۱ انحراف معیار (Bias) مقدار آب معادل برف واقعی (ایستگاهی) و مقدار بازیابی شده‌ی آن توسط شبکه عصبی برای الگوهای آموزش (سمت چپ) و الگوهای آزمون (سمت راست) در ماه فوریه..... ۱۰۴
شکل ۵-۳۲ انحراف معیار (Bias) مقدار آب معادل برف واقعی (ایستگاهی) و مقدار بازیابی شده‌ی آن توسط شبکه عصبی برای الگوهای آموزش (سمت چپ) و الگوهای آزمون (سمت راست) در ماه مارس..... ۱۰۶
شکل ۵-۳۳ انحراف معیار (Bias) (سمت چپ)، همبستگی (سمت راست) بین مقدار آب معادل برف واقعی (ایستگاهی) و مقدار بازیابی شده‌ی آن توسط مدل رگرسیون چندگانه برای الگوهای آزمون در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس..... ۱۰۹
شکل۵-۳۴ نتایج برآورد آب معادل برف توسط مدل رگرسیون چندگانه در ماه‌های ژانویه، فوریه و مارس..... ۱۱۰

فصل اول

کلیات تحقیق

۱-۱- مقدمه

بارش برف و انباشت آن در حوضه‌های آبخیز منبعی با ارزش است که بررسی کمیت و کیفیت آن از اهمیت زیادی برخوردار است. تجمع، جابجایی، ذوب، تبخیر، تصعید و رواناب ناشی از برف در بهره-برداری مناسب و به موقع مورد توجه خاص آب‌شناسان و کارشناسان منابع طبیعی تجدیدپذیر می-باشد. ریزش جوی به صورت برف برای تغذیه‌ی منابع سطحی و زیرزمینی کشورها می‌تواند منبعی پایدار و ثابت محسوب شود که با ذوب تدریجی، جریان مداوم آب را در رودخانه‌ها، دریاچه‌ها، چشمه-ها، قنات‌ها و سفره‌های زیرزمینی تأمین می‌کند به ویژه این که در فصول خشک نیز مورد استفاده می‌باشد [۱].

گری و میل (۱۹۸۱) برف را چنین تعریف نموده اند: " برف شکل جامدی از آب است که در هوای آزاد در حال شناور شکل گرفته و با بالا و پایین رفتن رشد می‌کند " [۲].

برف از بلورهای شش ضلعی تشکیل شده است که حاصل تبرید بخار آب در دمای کمتر از نقطه انجماد آب است. این بلورها به‌صورت منفرد، مجتمع و یا مخلوط با سایر بلورهای یخ مشاهده می‌شود. بلورهای برف در بیشتر مواقع نمی‌توانند به یکدیگر بچسبند، اما قطرات آب سرد، آن‌ها را به هم متصل می‌نماید [۱].

در مناطق با عرض‌های جغرافیایی بالا و میانی، بارندگی به‌صورت برف اهمیت دارد [۳]. تقریباً پنج درصد از بارش جهانی که به سطح زمین می‌رسد به شکل برف می‌باشد، اگرچه در مناطق قطبی این نسبت به ۵۰ تا ۹۰ درصد می‌رسد [۴]. در واقع در مناطق سردسیری و کوهستانی، این شکل ریزش از دیگر اشکال بیشتر دیده می‌شود [۵]. بین بارش برف و ارتفاع ارتباط بسیار نزدیکی برقرار است، به طوری که، هرچه ارتفاع بیشتر می‌شود بر میزان بارش افزوده می‌گردد، زیرا کاهش درجه‌ی حرارت در نتیجه‌ی ارتفاع، کمک فراوانی بدین امر می‌کند [۶].

ویژگی هیدرولوژیکی مهم پوشش برف، آب معادل آن است که رهاسازی این رطوبت، در نهایت از طریق تصعید یا تبخیر به جو می‌رود و یا از طریق رواناب به اقیانوس‌های قطبی جاری می‌شود [۷].

بررسی دقیق برف پشته و ذوب برف در مناطق سردسیر برای کنترل عملیاتی سیل، مدلسازی تأخیری آب و مدیریت منابع در حوضه‌های تحت پوشش ذوب برف بسیار مهم و حیاتی است [۸].

ایران از نظر عرض جغرافیایی در کمربندی از کره زمین واقع شده که اغلب جزءِ مناطق خشک و نیمه خشک جهان محسوب می‌شود. لذا کمبود بارندگی که مهم‌ترین منبع تأمین آب در ایران است یک واقعیت ذاتی هیدرولوژیکی می‌باشد [۹، ۱۰].

۱-۲- تعریف مساله

همان‌طور که ذکر شد کشور ایران به علت موقعیت خاص جغرافیایی و ناهمواری‌های بسیار پراکنده و تأثیر دیگر عوامل از جمله جبهه‌های آب و هوایی، از مناطق خشک جهان به شمار می‌رود. به‌طور کلی، میزان متوسط بارندگی سالانه در کشور، ۲۵۲ میلی‌متر می‌باشد که این رقم کمتر از یک سوم