

شماره ۱۲۰، پاییز ۱۳۹۷

# پژوهش‌های آبخیزداری

(پژوهش و سازندگی)

## اثر تغییر اقلیم بر ژرفای یخ‌بندان خاک در اقلیم نیمه‌خشک و کوهستانی دشت ملایر

الهام کلهر

کارشناس ارشد آبخیزداری، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

حمید نوری\*

(نویسنده‌ی مسئول)\* استادیار اقلیم‌شناسی، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

علیرضا ایلدرومی

دانشیار ژئومورفولوژی، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی منابع طبیعی و محیط‌زیست، دانشگاه ملایر، ملایر، ایران

تاریخ دریافت: اردیبهشت ۱۳۹۷ تاریخ پذیرش: مرداد ۱۳۹۷

\* Corresponding Email: Hamidwatershed@yahoo.com

### چکیده

ژرفای یخ‌بندان سنج‌های مهمی در مدیریت رطوبت خاک در زمین‌های کشاورزی و باغ‌ها است. هدف از این پژوهش، بررسی اثر گرم‌شدن جهانی و تغییر اقلیم، در حالت‌های ممکن اقلیمی مختلف، بر ژرفای یخ‌بندان خاک دشت ملایر، قطب تولید انگور کشمشی کشور است. برای شبیه‌سازی آب‌وهوای آینده‌ی نزدیک از آمار روزانه‌ی بیشینه و کمینه‌ی دمای هوا، ساعت‌های آفتابی و بارش ایستگاه سینوپتیک ملایر در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۳، و از شبیه‌های HADCM3 و LARS-WG در حالت‌های ممکن خوش‌بینانه، بدبینانه و متوسط استفاده شد. کارآیی شبیه لارس، با مقایسه‌ی داده‌های مشاهده‌ی و برآوردشده با شاخص‌های  $R^2$ ، NSE، RMSE، MAE ارزیابی شد. نتایج نشان دادند که این شبیه کارآیی لازم را برای پیش‌بینی تولید داده‌های روزانه‌ی اقلیمی منطقه دارد. شاخص یخ‌بندان هوا با استفاده از روش‌های نروژی و فنلاندی و آمریکایی، و ژرفای یخ‌بندان خاک در دوره‌ی پایه و آینده‌ی نزدیک با استفاده از روش‌های مک‌کوبین و معیار، محاسبه و مقایسه شد. براساس هر سه حالت ممکن انتشار  $A_1B$ ،  $A_2$  و  $B_1$  دمای فصل زمستان افزایش خواهد یافت، و تغییرات دمای کمینه از دمای بیشینه بیشتر خواهد بود. شاخص‌های CRM و RSME در دوره‌ی پایه و زمان آینده نشان می‌دهند که روش نروژی، و بیش از آن روش فنلاندی، در این منطقه‌ی نیمه‌خشک و کوهستانی زاگرس، قابلیت مناسبی را برای برآورد ژرفای یخ‌بندان (در تراز ۰/۵) دارند. کاربرد این روش پیش‌برآورد ژرفای یخ‌بندان خاک را پیش‌بینی می‌نماید. بر اثر تغییر اقلیم، میزان ژرفای نفوذ یخ‌بندان در این دشت مهم کشاورزی تا انتهای سال ۲۰۳۰ کاهش می‌یابد.

واژگان کلیدی: روش مک‌کوبین، روش معیار، ژرفای یخ‌بندان، شبیه LARS-WG، ملایر

## Climate Change Effects on Soil Freezing Depth in a Mountainous Region and a Semi-Arid Climate on the Malayer Plain

**Elham Kalhor**

M.Sc. Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environments, Malayer University, Malayer, Iran

**Hamid Nouri\***

(Corresponding Author)\* Assistant Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environments, Malayer University, Malayer, Iran

**Alireza Ildoromi**

Associate Professor, Department of Range and Watershed Management, Faculty of Natural Resources and Environments, Malayer University, Malayer, Iran

### Abstract

Soil freezing depth is an important parameter in the management of soil water availability in agriculture and horticulture. The purpose of this study was to investigate the effect of global warming and climate change on the freezing depth by using different scenarios on the Malayer Plain, which is the center of grape and raisin production in the country. Daily minimum and maximum air temperatures, sunshine hours, and precipitation data were collected from the Malayer Synoptic Station from 1995 to 2013 and used to simulate the near future climate using the HADCM3 and LARS-WG models based on the optimistic, pessimistic, and moderate scenarios. Performances of these models were evaluated by comparing observation and simulation data using the  $R^2$ , NSE, RMSE, and MAE indices. The results showed that these models have the necessary efficiency to predict the production of daily data in the region. The air freezing index was estimated by using the Norwegian, Finnish, and American methods based on the mean daily air temperature. Soil freezing depth was estimated by the McKeown and Standard model based on the soil texture at different depths and air temperatures. Annual precipitation, maximum and minimum temperatures will rise under the three scenarios  $A_1B$ ,  $A_2$ , and  $B_1$ . The air temperature will increase in winter more than the other seasons, while the absolute value of minimum temperature changes will be higher than that of the maximum temperature. The RSME and CRM indicators in the base and future periods indicate that the Norwegian method, and more, than that the Finnish method, are suitable for estimating the soil freezing depth (at the 5% level) in this semi-arid and mountainous Zagros Region. Application of this method overestimates a deeper freezing depth for the future. Due to the climate change, the depth of freezing will be reduced by the end of 2030 in this important agricultural plain.

**Keywords:** freezing depth, LARS-WG model, Malayer, McKeown method, standard method

### مقدمه

(گلشن و همکاران ۲۰۱۴). وقوع پدیده‌ی یخبندان در خاک سبب بسته‌شدن فضاهای خالی و کاهش نفوذپذیری خاک و در پی آن زیادشدن امکان وقوع روان‌آب می‌شود (کری و همکاران ۱۹۷۸).

دمای خاک ترکیبی از تبادل جرم و انرژی بین نیوار و سطح زمین است، و نقش مهمی در تمام فرایندهای فیزیکی و زیستی خاک دارد

و پوشش برف در این شبیه جدید، باعث پذیرفتن شبیه‌سازی بیشینه‌ی ژرفاهای یخبندان در چندین هزار ایستگاه در ایالات متحده شد. ژرفاهای بیشینه‌ی یخبندان خاک، از صفر تا ۱۰۰ سانتی‌متری با میانگین خطای مطلق ۵/۴ سانتی‌متری شبیه‌سازی شد. گسترش نفوذ سرمای زمستان در همه‌ی ایستگاه‌ها، جز غیر از ایستگاه‌هایی که خاک مرطوب و شیارهای یخ زده دارند، روی می‌دهد. زی و اسپیتلر (۲۰۱۴)، برای پیش‌بینی دمای زمین از الگوی عددی تک‌بعدی در خاک‌های یخ‌زده‌ی جزئی استفاده کردند. شبیه‌سازی علاوه بر هدایت حرارتی، مواردی همچون انتقال رطوبت، انباشتگی برف، ذوب کردن، یخبندان خاک و آب شدن را نیز دربر می‌گیرد. نتایج با اندازه‌گیری‌های آزمایشی دمای زمین، برای سه منطقه در مونتانا، آمریکا مقایسه شد. تفاوت‌های بین دمای ژرفای شبیه‌سازی‌شده با پوشش برف یا بدون برف و انجماد و آب شدن، آشکار می‌کند که توجه کردن به انتقال رطوبت، پیش‌بینی‌های دمایی را اندکی بهتر می‌کند؛ هرچند که این می‌تواند زمان محاسباتی اجرا شده را مقداری افزایش دهد. در دهه‌های اخیر در زمینه‌ی شبیه‌سازی اقلیمی و تأثیر تغییر اقلیم بر پدیده‌های محطی مانند دمای هوا و دمای خاک و یخبندان، مطالعات بسیار وسیعی در سطح منطقه‌ای و جهانی انجام شده است. شبیه‌سازی LARS-WG از شبیه‌های گردش عمومی است که با ریزمقیاس‌نمایی شبیه‌های گردش عمومی نیوار کاربرد زیادی در پیش‌بینی تغییرات اقلیمی آینده و شبیه‌سازی آن داشته و پژوهشگران مختلفی دقت زیاد این شبیه را در شبیه‌سازی داده‌های آب‌وهوایی ایستگاه‌های مختلف اقلیمی، تأیید کرده‌اند (ویلیامز ۱۹۹۱، باباییان و نجفی‌نیک ۲۰۰۷، سبحانی و فاطمی‌نیا ۲۰۱۴، و ماوروماتیس و هانسن ۲۰۰۱). گودرز و همکاران (۲۰۱۵) کارآیی شبیه LARS-WG را برای تولید داده‌های روزانه‌ی بارش، دمای کمینه و بیشینه و ساعت آفتابی، در حوزه‌ی آبخیز قره‌سوی استان گلستان بررسی و ارزیابی کردند. مقایسه‌ی مقادیر میانگین ماهانه‌ی مشاهداتی و تولیدشده‌ی متغیرهای هواشناسی مذکور با استفاده از سنج‌های آماری NA، RMSE و MAE نشان‌دهنده‌ی کارآیی شبیه برای تولید داده‌های روزانه و همبستگی زیاد بین مقادیر مشاهده‌ی و تولیدشده در حوزه بود. ردی<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۱۴) برای بررسی تغییر اقلیم در منطقه‌ی تلانگای جنوبی از اطلاعات آب‌وهوایی دوره‌ی آماری سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۱۰ و شبیه LARS-WG استفاده کردند و نشان دادند که دمای کمینه به‌طور نسبی در دامنه‌ی ۱۰/۲- تا ۲/۷٪، برای سال‌های ۲۰۳۰-۲۰۶۰ کاهش می‌یابد.

برای محاسبه‌ی ژرفای نفوذ یخبندان خاک، در نقاط مختلف اقلیمی و عرض‌های جغرافیایی مختلف کشور و جهان، مطالعات مختلفی انجام شده است؛ اما اثر گرم‌شدن جهانی و تغییر اقلیم بر ژرفای نفوذ یخبندان کمتر بررسی شده است. تغییر اقلیم می‌تواند با افزایش دمای هوا و دمای خاک، به‌ویژه در فصل‌های سرد سال موجب کاهش

عوارض یخبندان خاک در سطح زمین بر زندگی انسان‌ها و فعالیت‌های عمرانی و بازدهی محصولات زراعی اثر می‌کند و هر ساله خسارت‌های جبران‌ناپذیری بر بخش‌های مختلف کشاورزی، حمل‌ونقل و پروژه‌های عمرانی همچون سدسازی و جاده‌سازی وارد می‌آورد (فیروزان ۲۰۱۰). یخبندان خاک از عوامل متعددی از جمله دمای هوا، بارندگی، پوشش سطح خاک (برف و پوشش گیاهی)، رطوبت خاک، ویژگی‌های گرمایی خاک و شرایط آب‌شناسی اثر می‌پذیرد (زوو و جیو ۲۰۰۰). خلیلی‌اقدام و همکاران (۲۰۱۲) داده‌های کمینه، بیشینه، متوسط و دمای خاک در ژرفای ۵، ۲۰، ۳۰، ۵۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری را در ساعت‌های ۰۳۰۰، ۰۹۰۰ و ۱۸۰۰ در دوره‌ی پنج‌ساله (۲۰۱۲-۲۰۰۷) در ایستگاه تحقیقات هواشناسی کهریز ارومیه مطالعه کردند، و پی بردند که بیشینه‌ی ژرفای نفوذ یخبندان واقعی تا ۳۰ سانتی‌متری خاک است، و روش معادله‌ی معیار SNIPPL-۱۵-۷۴ ژرفای یخبندان را بیش از مقدار واقعی برآورد کرده است؛ درحالی‌که برآورد ژرفای یخبندان به روش مک‌کویین بر پایه‌ی معادله‌ی فنلاندی بسیار به نتایج ژرفای واقعی نزدیک‌تر است.

نجفی‌مود و همکاران (۲۰۰۷) با بهره‌بردن از رابطه‌ی وایزی، رابطه‌ی بین دمای هوا و دمای اعماق مختلف خاک (۵-۱۰-۲۰-۳۰-۵۰-۱۰۰ سانتی‌متری) را با استفاده از روش‌های معیار، آمریکایی، نروژی و فنلاندی به‌دست آوردند. نتایج نشان داد که بین دمای هوا و خاک در عمق‌های به‌جز ۱۰۰ سانتی‌متری رابطه‌ی مناسبی برقرار است، و روش فنلاندی بهترین برآورد را از ژرفای نفوذ یخبندان ارائه کرد. سلاجقه و همکاران (۲۰۱۳) ژرفای نفوذ یخبندان را با روش‌های آمریکایی، نروژی و فنلاندی در ایستگاه‌های سینوپتیک مشهد، در دوره‌ی آماری ۱۷ ساله (۱۹۹۲-۲۰۰۸)، آزمودند و مناسب‌ترین شبیه را تعیین کردند. براساس این نتایج در اقلیم‌های گرم، برای تعیین مقدار شاخص یخبندان (AFI) بین روش آمریکایی با روش‌های نروژی و فنلاندی اختلاف معنی‌داری وجود داشت؛ درحالی‌که در اقلیم‌های سرد، اختلاف درصد کمتری دیده شد؛ نتایج نشان داد که روش فنلاندی، مناسب‌ترین روش تخمین ژرفای یخبندان در منطقه است. ایواتا و همکاران (۲۰۱۱)، ارتباط بین یخبندان خاک و نفوذ آب ناشی از ذوب برف را در زمین‌های کشاورزی ساپورو و ممورو، در شمال ژاپن بررسی کردند. در ایستگاه ممورو، با برداشتن برف ابتدای زمستان، منطقه‌ای مهار شده را ایجاد کردند. با وجود آن‌که هوای ایستگاه ساپورو گرم‌تر بود، اما به‌دلیل پوشش نازک برف در ناحیه‌ی مهار شده، ژرفای سرمازدگی در منطقه‌ی آزمایشی ساپورو و ناحیه‌ی مهار شده‌ی ممورو تقریباً مشابه بود. از این نفوذ در منطقه‌ی ساپورو، به‌وسیله‌ی لایه‌ی یخی ضخیمی جلوگیری شد.

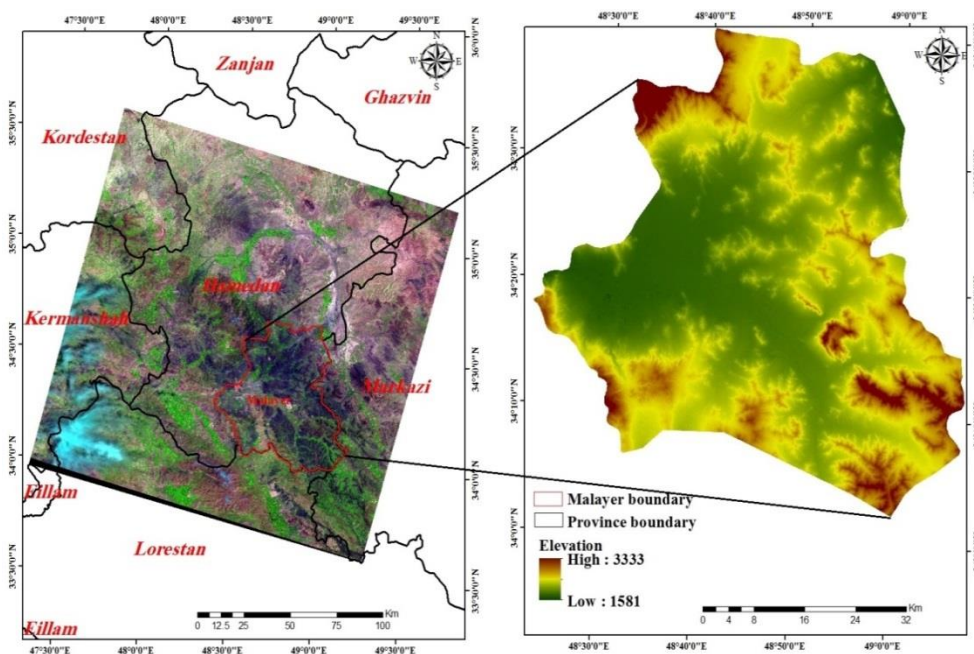
دیگاتانو و همکاران (۲۰۱۰)، از شبیه هم‌زمانی گرما و آب SHAW برای شبیه‌سازی بیشینه‌ی ژرفای یخبندان فصلی در ایالات متحده استفاده کردند. به‌کاربردن دمای روزانه، درصد رطوبت، بارش برف

## منطقه‌ی بررسی شده

شهرستان ملایر در ۴۸ درجه و ۴۹ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۴ درجه و ۱۷ دقیقه عرض جغرافیایی قرار دارد و از شمال به همدان، از شرق به اراک، از جنوب به بروجرد و از غرب به توپسرکان و نهاوند محدود شده است. ارتفاع این شهرستان از سطح دریا ۱۷۸۰ متر و فاصله‌اش از همدان و تهران به ترتیب ۸۶ و ۳۹۰ کیلومتر است. ملایر از نظر آب‌وهوایی در مرز آب‌وهوای معتدل کوهستانی و آب‌وهوای نیمه‌بیابانی ایران و در طبقه‌بندی دومارتن در اقلیم نیمه‌خشک، با ضریب خشکی ۱۳/۶ است و خصوصیات هر دو نوع آب‌وهوا را دارد. میانگین دمای سالانه‌ی آن ۱۳/۴۴ درجه‌ی سانتی‌گراد، میانگین دمای فصل‌های سرد سال تا ۲۰ درجه زیر صفر، و میانگین بارندگی سالانه‌ی آن به ۲۴۲/۲ میلی‌متر می‌رسد (شکل ۱).

طول دوره‌ی سرما و برآوردنشدن نیازهای سرمایگی گیاهان، گل‌دهی زودرس، کاهش عمل‌کرد، بازدهی محصولات کشاورزی و افزایش خطر سرمازدگی بهاره شود. نتایج پیش‌بینی عمق نفوذ یخبندان، علاوه بر شناخت وضعیت آب‌شناسی زمین می‌تواند در مدیریت زمین‌های کشاورزی و باغ‌ها و کاهش شدت خسارت به‌کار رود. این تحقیق به بررسی اثر تغییر اقلیم بر ژرفای یخبندان خاک در دشت ملایر که اقلیمی نیمه‌خشک و کوهستانی دارد، می‌پردازد. تاکستان‌های این دشت، از مراکز عمده‌ی تولید انگور و کشمش کشور و منطقه است و تحلیل فیزیک زیستی محیطی و ریزاقلیم‌شناسی منطقه می‌تواند در مدیریت تولید این محصول راهبردی و جهانی مؤثر باشد.

## مواد و روش‌ها



شکل ۱- نقشه‌ی موقعیت جغرافیایی شهرستان ملایر.

روش‌های نروژی و فنلاندی و آمریکایی برآورد، و با تعیین بافت اعماق مختلف خاک به روش چگالی‌سنجی، ژرفای یخبندان در دوره‌ی پایه و آینده، با استفاده از روش‌های مختلف شبیه‌ساز مک‌کویین و شبیه‌ساز محاسبه و مقایسه شد.

## شبیه‌ساز LARS-WG

شبیه‌ساز LARS-WG برای ریزمقیاس‌نمایی داده‌های تولیدشده از شبیه‌ساز عمومی نیوار HADCM3 از مقادیر دمای کمینه، بیشینه، بارش و تابش استفاده می‌کند. این شبیه‌ساز برای هر یک از

## روش پژوهش

در این پژوهش از داده‌های ایستگاه سینوپتیک ملایر در دشت تاکستان‌های ملایر استفاده شده است. این ایستگاه در عرض جغرافیایی ۳۴ درجه و ۱۷ دقیقه، طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۴۹ و ارتفاع ۱۷۸۰ متر از سطح دریا قرار دارد. داده‌های به‌کاررفته دمای کمینه و بیشینه‌ی هوا و بارش روزانه در سال‌های آماری ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۳ است. داده‌های اقلیمی آینده با شبیه‌ساز عمومی HADCM3 تولید و با شبیه‌ساز LARS-WG برای حالت‌های ممکن انتشار  $A_2$ ،  $B_1$  و  $A_1B$  ریزمقیاس‌نمایی شد. در مرحله‌ی بعد شاخص یخبندان هوا با

### تعیین شاخص یخبندان هوا

در برآورد ژرفای نفوذ یخبندان در خاک، ابتدا باید شاخص یخبندان هوا (AFI) را تعیین کرد. شاخص یخبندان هوا، دمای احتمالی هوا را که باعث یخبندان خاک در ژرفای مشخص می‌شود، نشان می‌دهد. سنجی مهم به کاررفته در این روش، میانگین دمای روزانه هوا است (فیروزان و همکاران ۲۰۱۰). شاخص یخبندان هوا معیاری از بزرگی و مدت دماهای بیش‌تر و کم‌تر از صفر درجه‌ی سانتی‌گراد در طول یک فصل سرما است. متغیر هواشناسی به کاررفته برای محاسبه‌ی AFI میانگین دمای هوای روزانه است (خلیلی و همکاران ۲۰۱۲). این متغیر از میانگین دمای کمینه و بیشینه‌ی روزانه براساس رابطه‌ی ۶، به دست می‌آید.

$$\bar{T} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (\text{رابطه‌ی ۶})$$

### روش‌های محاسبه‌ی شاخص یخبندان هوا (AFI)

روش‌های متعددی در سراسر دنیا برای محاسبه‌ی AFI مورد استفاده قرار گرفته است که از میان آن‌ها سه روش اهمیت بیشتری دارند. این سه روش عبارت‌اند:

- روش آمریکایی (AFI<sub>US</sub>): در این روش اختلاف مقادیر تجمعی دمای میانگین روزانه‌ی بالاتر و پایین‌تر از صفر درجه‌ی سانتی‌گراد، در طول فصل زمستان محاسبه و برای هر فصل سرد یک منحنی تجمعی ساخته می‌شود. در این روش دوره‌هایی از فصل سرما نیز که در آن‌ها دمای میانگین روزانه مثبت است، در محاسبات دخالت داده می‌شوند. نسبت ریاضی برای این روش در رابطه‌ی ۷ آمده است:

$$S_i = \sum_{i=1}^N \bar{T} \quad (\text{رابطه‌ی ۷})$$

که در آن N تعداد روزهای سرد و  $\bar{T}$  متوسط دمای روزانه به درجه‌ی سانتی‌گراد است.

- روش نروژی (AFINOR): شاخص یخبندان در این روش با استفاده از میانگین دمای روزانه‌ی منفی در زمستان برآورده می‌شود (استرر و کرنل، ۱۹۹۵).

$$AFI = \sum_{i=1}^N (\bar{T}) / \bar{T} \leq 0 \quad (\text{رابطه‌ی ۸})$$

که در آن N: تعداد روزهای سرد در دوره‌ی سرد و  $\bar{T}$ ، میانگین دمای منفی روزانه است.

- روش فنلاندی (AFIFIN): این روش بر پایه‌ی میانگین داده‌های ماهانه است (استرر و کرنل، ۱۹۹۵). در این روش میانگین دمای منفی ماهانه، به شرط آن‌که منفی باشد، در تعداد روزهای آن ماه ضرب می‌شود و در نهایت مقادیر به دست آمده با یکدیگر جمع می‌شوند.

متغیرهای دمای بیشینه و کمینه، تشعشع خورشیدی و تعداد ساعات آفتابی توزیع نیمه تجربی جداگانه‌ی در نظر می‌گیرد؛ و به‌طور خودکار میزان ساعت آفتابی را با استفاده از رابطه‌ی ۱ به تشعشعات خورشیدی تبدیل می‌کند.

$$a + b(n/N) \quad (\text{رابطه‌ی ۱})$$

a و b ضریب‌های ثابت معادله‌اند و مقدار n/N نرخ واقعی مدت‌زمان احتمالی ساعت آفتابی است.

### ارزیابی شبیه

برای مقایسه‌ی داده‌های مشاهده‌ی و برآوردشده و ارزیابی و تشخیص کارآیی شبیه LARS-WG در ایستگاه ملایر، از شاخص‌های ضریب همبستگی ( $R^2$ )، میانگین مربعات خطا (RSME)، میانگین خطای مطلق (MAE) و ناس ساتکلیف (NSE) در دوره‌ی پایه (۱۹۹۳-۲۰۱۳) استفاده شد (سمونوف و بارو ۲۰۰۲). مقدار سنجی NSE بین منهای بی‌نهایت و یک متغیر است و هرچه این مقدار به یک نزدیک‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی بیش‌تر بودن دقت شبیه است. سنج‌های MAE و RMSI خطای شبیه را نشان می‌دهند و پایین‌تر بودن مقادیر مربوط به این دو معیار، نشانگر کارآیی بهتر شبیه است. نزدیک به صفر بودن سنجی BIAS نیز نشان‌دهنده‌ی دقت بیشتر شبیه در شبیه‌سازی است (ردی و همکاران ۲۰۱۴). آمارهای یادشده با استفاده از روابط ۲ تا ۵ محاسبه شده‌اند.

$$NSE = \left[ 1 - \frac{\sum (X_o - X_s)^2}{\sum (X_o - \bar{X}_o)^2} \right] \quad (\text{رابطه‌ی ۲})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_o - X_s)^2}{N}} \quad (\text{رابطه‌ی ۳})$$

$$MAE = \frac{\sum |X_o - X_s|}{N} \quad (\text{رابطه‌ی ۴})$$

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum (X_s - X_o) \quad (\text{رابطه‌ی ۵})$$

در روابط بالا  $X_o$  داده‌های مشاهده‌شده،  $X_s$  داده‌های شبیه‌سازی شده،  $X_o$  میانگین داده‌های مشاهده‌شده و N تعداد داده‌ها است؛ آزمون‌های آماری مربع کای برای مقایسه‌ی توزیع‌های فراوانی، آزمون T برای مقایسه‌ی مقادیر میانگین‌ها و آزمون F برای مقایسه‌ی انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی شده به کار برده شد (نظری پویا و همکاران ۲۰۱۷). پس از اطمینان از قابلیت شبیه LARS-WG در تولید داده‌های اقلیمی، این شبیه برای ریزمقیاس‌نمایی برون‌داد شبیه گردش عمومی نیوار HADCM3 و تولید داده‌های مصنوعی برای پیش‌بینی اقلیم در دوره‌ی ۲۰۱۴ تا ۲۰۳۰ اجرا شد.



روش معیار، ژرفای نفوذ یخبندان بررسی می شود که این ژرفا را در روش مک کوین، با استفاده از رابطه ی ۱۰ می توان محاسبه کرد:

$$D = \lambda * (AFI)^{1/2} \quad (\text{رابطه ی ۱۰})$$

D ژرفای نفوذ یخبندان برحسب متر، AFI شاخص یخبندان و  $\lambda$  ضریب بی بُعد معادله است. مقدار  $\lambda$  تابع بافت خاک است و از جدول ۱ برآورد می شود (کوین و همکاران ۱۹۹۸).

$$AFI = \sum_{i=1}^{12} \{ (\bar{T}_{i\text{month}}) / \bar{T}_{i\text{month}} * N_i \} \quad (\text{رابطه ی ۹})$$

که در آن ( $\bar{T}_{i\text{month}}$ ) میانگین دمای منفی ماهانه برحسب درجه ی سانتی گراد، برای ماههایی که میانگین دمای آن ها منفی است و  $N_i$  تعداد روزها در ماه مورد نظر است.

### محاسبه ی شاخص یخبندان خاک

پس از تعیین شاخص یخبندان هوا با استفاده از روش مک کوین و

جدول ۱- رابطه ی بافت خاک و ضریب  $\lambda$ .

سنگ ریزه	ماسه	خاک بافت متوسط (لومی) شنی	خاک بافت متوسط (لومی) رسی	رسی	بافت خاک
۰/۰۱۲۵	۰/۰۶۹	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۱۲	ضریب $\lambda$

$H_H$ : ژرفای نفوذ یخبندان برآورد شده، برحسب متر  
 $T_M$ : میانگین دمای منفی ماهانه، برحسب درجه ی سانتی گراد  
 $H_a$ : ضریب بی بُعد که از جدول شماره ی ۲، براساس بافت خاک به دست می آید.

روش دیگر برای برآورد ژرفای نفوذ یخبندان، معادله ی معیار (Snipil - ۱۵ - ۷۴) است که در رابطه ی ۱۱ تعریف شده است (کوین و همکاران ۱۹۹۸؛ استورر و کرنل ۱۹۹۵).

$$H_H = (H_a) (\sum |T_M|)^{1/2} \quad (\text{رابطه ی ۱۱})$$

جدول ۲- رابطه ی بافت خاک و ضریب  $H_a$ .

سنگ ریزه	ماسه ی زبر و متوسط	ماسه ی لای (سیلتی) - ماسه ی رسی - ماسه ی نرم	رس	بافت خاک
۳۴	۳۰	۲۸	۲۳	$H_a$

و معیار، محاسبه و با دوره ی پایه مقایسه شد.

### بحث و نتایج

نتایج ارزیابی و تشخیص کارآیی شبیه، در جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به شکل ۲ و نتایج جدول ۳، شبیه سازی بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعت آفتابی به میزان بسیار خوبی با داده های مشاهده شده تطابق دارد. مقدار ضریب تبیین در مورد همه ی متغیرهای بالا به دست آمد. شاخص های خطاستجی از جمله میانگین خطای مطلق، میانگین انحراف خطا و میانگین مربعات خطا نیز کوچک بود. مقادیر کوچک تر، بیانگر وجود اختلاف کم تر داده های مشاهده شده و پیش بینی شده در طول دوره ی آماری است.

آماره ی ضریب جرم باقی مانده ی (CRM) محاسبه شده، با استفاده از رابطه ی ۱۲ به همراه شاخص RSME (رابطه ی ۳) برای ارزیابی دقت شبیه سازی ژرفای یخبندان در روش های مختلف و مقایسه ی آن ها با داده های اندازه گیری شده، به کار می رود.

$$CRM = \frac{\sum_1^n (X_o - X_s)}{\sum_1^n x_o} \quad (\text{رابطه ی ۱۲})$$

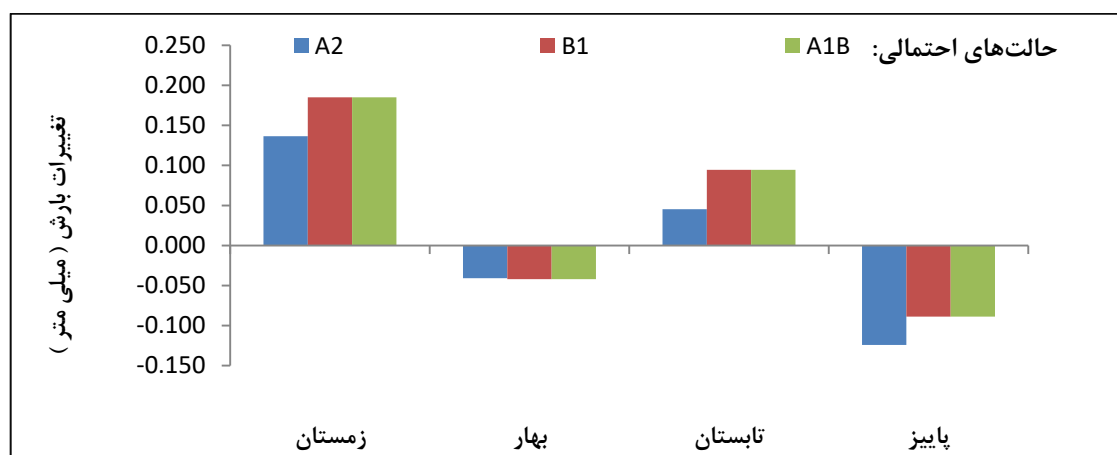
که در آن  $X_o$  داده های مشاهده شده،  $X_s$  داده های شبیه سازی شده و n تعداد داده ها است. آماره ی ضریب جرم باقی مانده می تواند بیش برآوردی یا کم برآوردی را نیز تعیین کند. به طور کلی، براساس داده های خروجی شبیه LARSE-WG نمایه ی یخبندان هوا در آینده و ژرفای نفوذ یخبندان به روش های -مک کوین

جدول ۳- نتایج ارزیابی و اعتبارسنجی شبیه ریزمقیاس نمایی LARS-WG.

متغیر	بارش	کمینه دما	بیشینه دما	ساعات آفتابی
$R^2$	۰/۹۹۳	۰/۹۳۴	۰/۹۹۸	۰/۹۹۹
NSE	۰/۹۷۳۴	۰/۹۹۸۲	۰/۹۹۹۵	۰/۹۹۸۳
RSME	۰/۳۱۴۴	۰/۲۳۸۱	۰/۲۵۶۰	۰/۲۵۶۴
MAE	-۰/۱۳۷۵	-۰/۰۴۱۱	۰/۰۰۱۷	۰/۱۳۶۷

معیار بوده است. مقایسه‌ی نتایج حاصل از آزمون K-S برای توزیع فراوانی داده‌های مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده برای سنج‌های مختلف، نشان‌دهنده‌ی توانایی شبیه LARS-WG در بازسازی این سنج‌ها و نبود اختلاف معنی‌دار در تراز اعتماد ۱٪ است. با توجه به داده‌های اقلیمی دشت ملایر در دوره‌ی پایه بارش، دمای کمینه و بیشینه‌ی این منطقه در دوره‌ی آینده (۲۰۱۱-۲۰۳۰) محاسبه شد (شکل‌های ۳، ۴ و ۵).

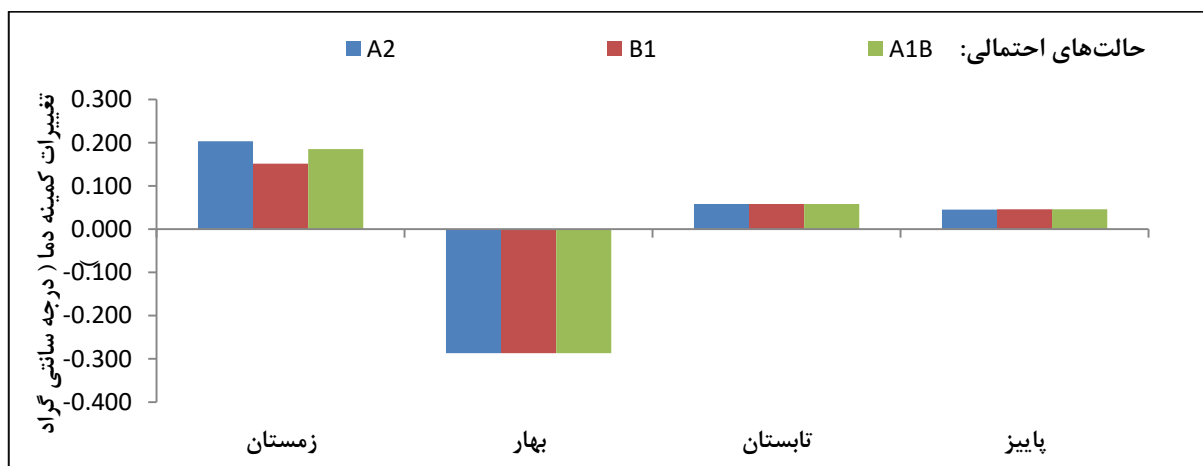
باتوجه به نتایج آزمون T شبیه در تمامی ماه‌ها توانایی شبیه‌سازی بارش میانگین ماهانه، دمای کمینه و دمای بیشینه را داشته و مقادیر همبستگی در تمامی ماه‌ها در تراز اعتماد ۱٪ پذیرفته است. در آزمون F انحراف معیار داده‌های بارش، دمای کمینه و دمای بیشینه‌ی مشاهده‌شده و تولیدشده در تمامی ماه‌ها همبستگی مناسبی دارد و شبیه در شبیه‌سازی انحراف معیارها کارآیی زیادی نشان می‌دهد. بارش کم در ماه تیر هم سبب ناتوانی شبیه در شبیه‌سازی انحراف



شکل ۲- نمودار تغییرات میانگین فصلی دشت ملایر در دوره‌ی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ نسبت به دوره‌ی پایه.

افزایش مربوط به زمستان به میزان ۰/۱۹ میلی‌متر و بیش‌ترین کاهش، مربوط به پاییز به میزان ۰/۰۹ است؛ در حالت ممکن A1B میانگین فصلی بارش در پاییز و بهار کاهش و در فصل‌های دیگر افزایش می‌یابد، و بیش‌ترین افزایش مربوط به زمستان، به میزان ۰/۱۹ میلی‌متر و بیش‌ترین کاهش مربوط به پاییز، به میزان ۰/۰۹ میلی‌متر است.

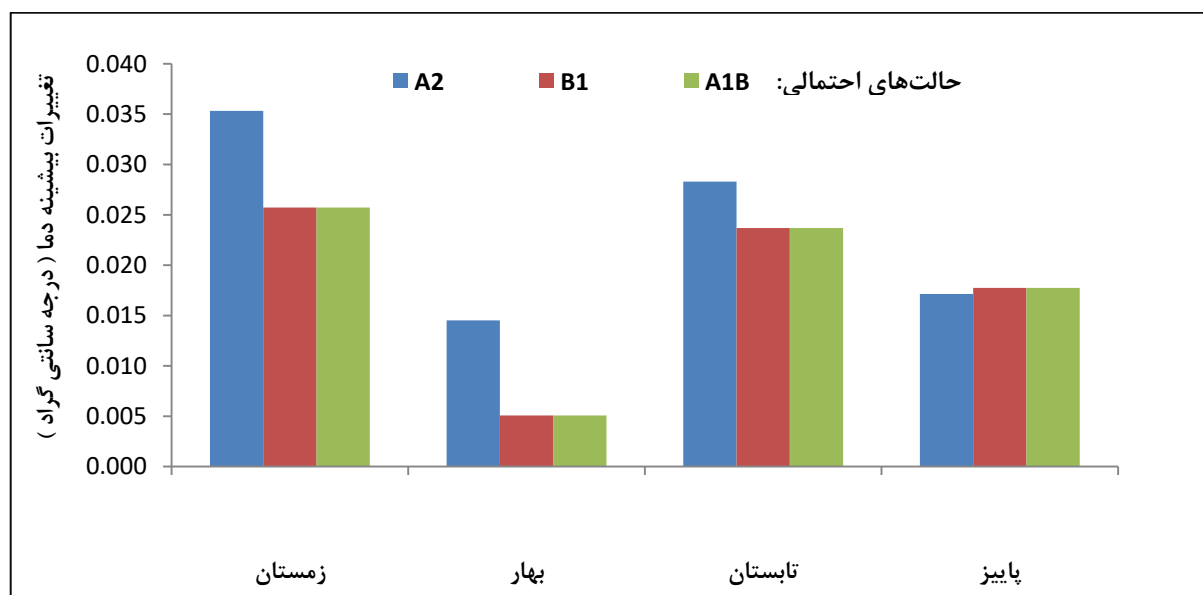
نتایج شکل ۲ نشان می‌دهد که در دوره‌ی زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و با در نظر گرفتن حالت ممکن A2 میانگین فصلی بارش در پاییز و بهار کاهش و در زمستان و تابستان افزایش می‌یابد، و بیش‌ترین افزایش مربوط به زمستان به میزان ۰/۱۴ میلی‌متر و بیش‌ترین کاهش مربوط به پاییز به میزان ۰/۱۲ است. در حالت ممکن B1 میانگین فصلی بارش در پاییز و بهار کاهش، در فصل‌های دیگر افزایش می‌یابد، و بیش‌ترین



شکل ۳- نمودار تغییرات میانگین فصلی دمای کمینه شهرستان ملایر در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ نسبت به دوره پایه.

افزایش مربوط به اسفند با ۰/۵ درجه سانتی گراد و بیشترین کاهش مربوط به آذر با ۰/۲۸ درجه سانتی گراد است؛ همچنین در حالت ممکن A<sub>1</sub>B میانگین ماهانه دمای کمینه در همه ماهها، به جز بهمن و آذر افزایش می یابد؛ به طوری که بیشترین میزان افزایش مربوط به اسفند با ۰/۵ درجه سانتی گراد و بیشترین کاهش مربوط به آذر با ۰/۲۸ درجه سانتی گراد است.

با توجه به شکل ۳، مشخص می شود که در دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و با در نظر گرفتن حالت ممکن A<sub>2</sub> میانگین ماهانه دمای کمینه در همه ماهها، به جز بهمن و آذر افزایش می یابد؛ به طوری که بیشترین میزان افزایش، مربوط به اسفند با ۰/۵۸ درجه سانتی گراد و بیشترین کاهش مربوط به آذر با ۰/۳۷ درجه سانتی گراد است. با توجه به حالت ممکن B<sub>1</sub> میانگین ماهانه دمای کمینه در همه ماهها، به جز بهمن و آذر افزایش می یابد؛ به طوری که بیشترین میزان



شکل ۴- نمودار تغییرات میانگین فصلی دمای بیشینه شهرستان ملایر در دوره ۲۰۱۱-۲۰۳۰ نسبت به دوره پایه.

با ۰/۰۳۵ درجه سانتی گراد و کمترین افزایش در بهار با ۰/۰۱۵ درجه سانتی گراد است؛ با توجه به حالت ممکن B<sub>1</sub> نیز میانگین فصلی دمای بیشینه در همه فصلها افزایش خواهد یافت. بیشترین

نتایج شکل ۴ نشان می دهد که در دوره زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و در حالت ممکن A<sub>2</sub>، میانگین فصلی دمای بیشینه در همه فصلها افزایش خواهد یافت. بیشترین میزان افزایش مربوط به زمستان



یافت. بیش‌ترین افزایش در زمستان با ۰/۰۲۶ درجه‌ی سانتی‌گراد و کم‌ترین افزایش در بهار با ۰/۰۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است؛ مقادیر تغییرات سالانه‌ی سنجه‌های اقلیمی نیز در جدول ۴ آورده شده است.

میزان افزایش در زمستان با ۰/۰۲۶ درجه‌ی سانتی‌گراد و کم‌ترین افزایش در بهار با ۰/۰۰۵ درجه‌ی سانتی‌گراد است. در حالت ممکن A<sub>1</sub>B، میانگین فصلی دمای بیشینه در همه‌ی فصل‌ها افزایش خواهد

جدول ۴- تغییرات سالانه‌ی سنجه‌های اقلیمی شهرستان ملایر.

حالت ممکن	بارش (mm)	دمای کمینه (°C)	دمای بیشینه (°C)	میانگین دما (°C)
A <sub>2</sub>	۰/۰۳۶	۰/۰۹۰	۰/۰۲۴	۰/۰۵۷
B <sub>1</sub>	۰/۰۶۵	۰/۰۸۵	۰/۰۲۰	۰/۰۵۲
A <sub>1</sub> B	۰/۰۶۵	۰/۰۸۵	۰/۰۲۰	۰/۰۵۲

این نتایج با نتایج تحقیقات باباییان و همکاران (۲۰۰۷)، زابل عباسی و همکاران (۲۰۰۹)، خلیلی‌اقدم و همکاران (۲۰۱۲) و گودرزی و سلطانی (۲۰۱۵) ردی و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد. نتایج برآورد ژرفای نفوذ یخ‌بندان در دوره‌ی آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۳ نتایج بررسی بافت خاک در اعماق مختلف ایستگاه ملایر با استفاده از روش چگالی‌سنجی (جدول ۵) نشان می‌دهد که خاک‌های منطقه، از نوع خاک بافت متوسط (لومی) شنی یا شنی و در مجموع سبک اند.

براساس نتایج جدول ۴، میانگین بارش سالانه در دوره‌ی زمانی ۲۰۱۱-۲۰۳۰ و با توجه به هر سه حالت ممکن افزایش خواهد یافت. بیش‌ترین میزان افزایش مربوط به حالت ممکن B<sub>1</sub> و A<sub>1</sub>B به میزان ۰/۰۶۵ میلی‌متر است. میانگین دمای کمینه و بیشینه-ی سالانه در هر سه حالت ممکن افزایش خواهد یافت. بیش‌ترین میزان افزایش مربوط به حالت ممکن A<sub>2</sub> و به میزان ۰/۰۹۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای دمای کمینه و ۰/۰۲۴ درجه‌ی سانتی‌گراد برای دمای بیشینه است.

جدول ۵- نوع خاک ایستگاه سینوپتیک ملایر.

ژرفا (سانتی‌متر)	۵-۰	۱۰-۵	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	۵۰-۳۰	۱۰۰-۵۰
نوع خاک	خاک بافت متوسط (لومی) شنی	خاک بافت متوسط (لومی) شنی	خاک بافت متوسط (لومی) شنی	خاک بافت متوسط (لومی) شنی	خاک بافت شنی	خاک شنی

در جدول ۶، نتایج نمایه‌ی یخ‌بندان‌زایی هوا به سه روش آمریکایی و نروژی و فنلاندی برای ایستگاه سینوپتیک ملایر ارائه شده است. مقادیر برآوردشده‌ی نمایه‌ی حاصل از روش آمریکایی بیش‌تر از دو

روش دیگر است. به‌طور کلی نتایج روش نروژی و فنلاندی در وضعیت متعادل و مناسب‌تری قرار دارد.

جدول ۶- نمایه یخ‌بندان زایی هوا (AFI) ایستگاه سینوپتیک ملایر با استفاده از سه روش US, Nor, Fin در دوره ی آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۳.

سال	روش آمریکایی	روش نروژی	روش فنلاندی
۱۹۹۶-۱۹۹۵	۲۷	۷۶	۰
۱۹۹۷-۱۹۹۶	۵۳	۴۹	۰
۱۹۹۸-۱۹۹۷	۴۵	۶۱	۳۲
۱۹۹۸-۱۹۹۹	۰/۰۳	۰/۰۳	۰
۲۰۰۰-۱۹۹۹	۵۷	۵۸	۴۲
۲۰۰۱-۲۰۰۰	۷۸	۳۶	۰
۲۰۰۲-۲۰۰۱	۳۲	۵۰	۰
۲۰۰۳-۲۰۰۲	۷۲	۵۴	۰
۲۰۰۴-۲۰۰۳	۹۵	۱۳	۰
۲۰۰۵-۲۰۰۴	۸۶	۹۳	۸۲
۲۰۰۶-۲۰۰۵	۶۲	۴۷	۰
۲۰۰۷-۲۰۰۶	۶۴	۷۱	۰/۵۷
۲۰۰۸-۲۰۰۷	۱۱/۱	۱/۱۵	۱
۲۰۰۹-۲۰۰۸	۲۶	۴۲	۰
۲۰۱۰-۲۰۰۹	۴۳	۳۳	۰
۲۰۱۱-۲۰۱۰	۷۰	۵۱	۰
۲۰۱۲-۲۰۱۱	۹۰	۴۵	۰
۲۰۱۳-۲۰۱۲	۱/۱۸	۴۰	۰
میانگین	۵۰/۱۳	۴۵/۶	۸/۸

پیش‌بینی بهتر عمل می‌کنند؛ هرچند تمام شبیه‌ها بیش‌برآورد است. نتایج برآورد ژرفای یخ‌بندان با استفاده از روش معیار نشان داد که این روش ژرفای یخ‌بندان را بیش‌تر از مقادیر واقعی برآورد کرده است. شاخص RSME و CRM برای این روش به ترتیب ۶۵/۳۵ و ۹/۱۶ است؛ پس این روش هم بیش‌برآورد کرده است. بررسی رابطه بین ژرفای یخ‌بندان مشاهده‌شده و نمایه یخ‌بندان هوا با روش‌های مختلف نشان می‌دهد که در مجموع روش نروژی و به‌ویژه فنلاندی توان بهتری دارند. رابطه‌ی یادشده با ضریب تبیین ۷۸٪ در تراز ۵٪ معنی‌دار است.

ژرفای نفوذ یخ‌بندان مشاهده‌شده و محاسبه‌شده براساس روش مک‌کوپین (با استفاده از شاخص‌های یخ‌بندان آمریکایی و نروژی و فنلاندی) و نیز براساس معادله‌ی معیار در جدول ۷ ارائه شده است. شاخص RSME و CRM برای سه روش آمریکایی و فنلاندی و نروژی به ترتیب «۱۰۲/۲۴، ۷/۰۷»، «۱۴/۴۹، ۱/۲۶» و «۶/۵۷، ۲۵/۸۰» محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه‌شده ی ژرفای نفوذ یخ‌بندان در روش مک‌کوپین، مبتنی بر روش آمریکایی، با مقادیر مشاهده‌شده تفاوت فراوانی دارد و می‌توان گفت با منطقه‌ی مطالعه‌شده سازگاری ندارند؛ اما روش نروژی و به‌ویژه روش فنلاندی برای این

جدول ۷- ژرفای نفوذ یخبندان مشاهده شده و محاسبه شده با روش مک کوین و روش معیار (SNipII - ۱۵ - ۷۴) بر حسب سانتی متر در زمان پایه در ایستگاه سینوپتیک ملایر.

سال	ژرفای یخبندان مشاهده شده	یخبندان با ژرفای روش مک کوین و روش فنلاندی	ژرفای یخبندان با روش مک کوین و روش نروژی	یخبندان با ژرفای روش مک کوین و روش آمریکایی	ژرفای یخبندان با روش استاندارد
۱۹۹۵-۱۹۹۶	۲۷/۲	.	۳۳	۱۲	.
۱۹۹۶-۱۹۹۷	۷/۵	.	۲۱	۲۳	.
۱۹۹۷-۱۹۹۸	۱۰/۱	۱۴	۲۶	۲۰	۱۲۰
۱۹۹۸-۱۹۹۹	.	.	۱/۶	۱/۶	.
۱۹۹۹-۲۰۰۰	۱۱/۲	۱۹	۲۷	۲۵	۱۳۲
۲۰۰۰-۲۰۰۱	۱۳/۱	.	۱۵	۳۲	.
۲۰۰۱-۲۰۰۲	۵/۵	.	۲۲	۱۴	.
۲۰۰۲-۲۰۰۳	۶/۴	.	۲۳	۳۱	.
۲۰۰۳-۲۰۰۴	.	.	۵۷	۴۱	.
۲۰۰۴-۲۰۰۵	۱۰/۷	۳۶	۴۱	۳۷	۱۵۰
۲۰۰۵-۲۰۰۶	۷/۴	.	۲۱	۲۷	.
۲۰۰۶-۲۰۰۷	۱۱/۱	۲۵	۳۱	۲۸	۱۴۰
۲۰۰۷-۲۰۰۸	۲۰/۴	۴۵	۵۰	۴۸	۸۱
۲۰۰۸-۲۰۰۹	۱۰/۱	.	۱۸	۱۱	.
۲۰۰۹-۲۰۱۰	۵/۵	.	۱۴	۱۹	.
۲۰۱۰-۲۰۱۱	۸/۱	.	۲۲	۳۰	.
۲۰۱۱-۲۰۱۲	۵/۳	.	۱۹	۴۰	.
۲۰۱۲-۲۰۱۳	۹/۹	.	۱۸	۵۱	.

تا سال ۲۰۳۱ براساس سه روش آمریکایی و نروژی و فنلاندی نشان داده شده است. با توجه به محاسبات، مقدار نمایه یخبندان به روش آمریکایی بیش تر از دو روش دیگر است، و برعکس، مقدار نمایه یخبندان به روش فنلاندی از دو روش دیگر کم تر است. روش نروژی شرایط مناسب تری نسبت به روش های دیگر نشان می دهد.

نتایج برآورد ژرفای نفوذ یخبندان در آینده ی نزدیک با استفاده از خروجی شبیه اقلیمی ریزمقیاس نمایی شده ی LARSE-WG در آینده ی نزدیک (۲۰۱۴-۲۰۳۱)، نمایه ی یخبندان-زایی هوا و ژرفای یخبندان در روش های مختلف محاسبه شد. در جدول ۸، نمایه ی یخبندان زایی هوا (AFI) و در جدول ۹، ژرفای نفوذ یخبندان

جدول ۸- نمایه یخ‌بندان‌زایی هوا در ایستگاه سینوپتیک ملایر با استفاده از سه روش US, Nor, Fin در دوره ی آماری ۲۰۳۱-۲۰۱۴.

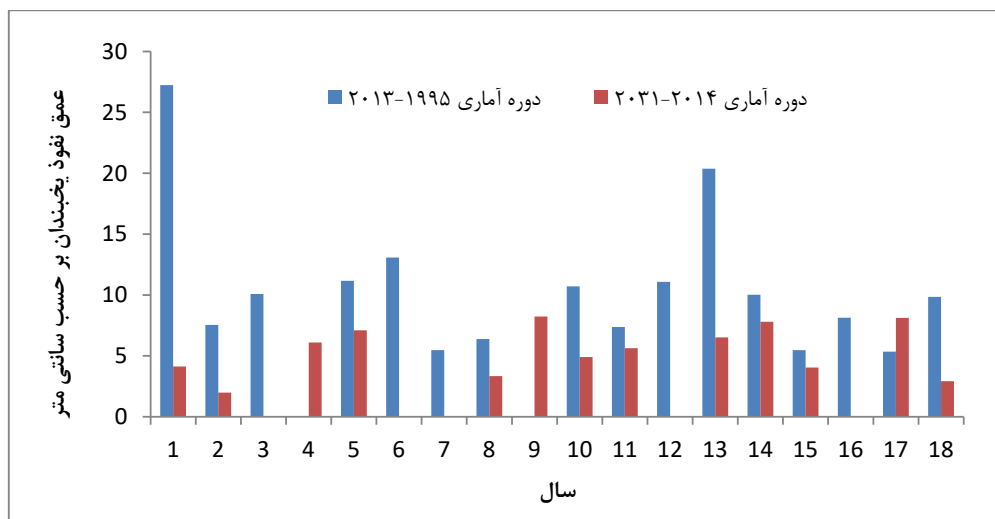
سال آماری	آمریکایی	نروژی	فنلاندی
۲۰۱۴-۲۰۱۳	۴۳/۲۵	۴۶/۷۵	.
۲۰۱۵-۲۰۱۴	۲۹۴/۷۵	۹/۱۵	.
۲۰۱۶-۲۰۱۵	۷۸/۳۵	۱۱/۷	.
۲۰۱۷-۲۰۱۶	۳۶/۶۵	۶۷/۴	.
۲۰۱۸-۲۰۱۷	۴۱/۹۵	۶۱/۴۵	.
۲۰۱۹-۲۰۱۸	۱۰۴/۴۵	۳۳/۵۵	.
۲۰۲۰-۲۰۱۹	۱۲۷/۱۵	۳۱/۲۵	.
۲۰۲۱-۲۰۲۰	۲۸/۷۵	۲۷/۹۵	.
۲۰۲۲-۲۰۲۱	۱۳۹/۹	۴۲	.
۲۰۲۳-۲۰۲۲	۱۱۰/۱	۴۲/۵	.
۲۰۲۴-۲۰۲۳	۲۴/۴۵	۳۶/۴۵	.
۲۰۲۵-۲۰۲۴	۲۸/۹	۵۱/۷۵	.
۲۰۲۶-۲۰۲۵	۲۰/۵	۶۷/۷	۲۳/۴۳
۲۰۲۷-۲۰۲۶	۱۰۵/۲	۵۷/۶۵	.
۲۰۲۸-۲۰۲۷	۶۴/۲	۶۳/۲۵	.
۲۰۲۹-۲۰۲۸	۵/۷	۶۲/۵۵	.
۲۰۳۰-۲۰۲۹	۵۳/۹۵	۶۷/۵	.
۲۰۳۱-۲۰۳۰	۶۰/۴۵	۴۲	.

جدول ۹- ژرفای نفوذ یخ‌بندان مشاهده شده و محاسبه شده با روش مک‌کوبین و روش معیار (SNipII - ۱۵ - ۷۴) بر حسب سانتی‌متر در زمان آینده‌ی نزدیک، در ایستگاه سینوپتیک ملایر.

سال	ژرفای یخ‌بندان برآورد شده از شبیه	ژرفای یخ‌بندان با روش مک‌کوبین و روش آمریکایی	ژرفای یخ‌بندان با روش مک‌کوبین و روش نروژی	ژرفای یخ‌بندان با روش مک‌کوبین و روش فنلاندی
۲۰۱۴-۲۰۱۳	۴/۲	۱۹	۲۰	.
۲۰۱۵-۲۰۱۴	۱/۹	۵۱	۹	.
۲۰۱۶-۲۰۱۵	.	۲۷	۱۰	.
۲۰۱۷-۲۰۱۶	۶/۱	۱۸	۲۴	.
۲۰۱۸-۲۰۱۷	۷/۲	۱۹	۲۳	.
۲۰۱۹-۲۰۱۸	.	۳۰	۱۷	.
۲۰۲۰-۲۰۱۹	.	۳۴	۱۶	.
۲۰۲۱-۲۰۲۰	۳/۳	۱۶	۱۵	.
۲۰۲۲-۲۰۲۱	۸/۲	۳۵	۱۹	.
۲۰۲۳-۲۰۲۲	۴/۹	۳۱	۱۶	.
۲۰۲۴-۲۰۲۳	۵/۶	۱۵	۱۸	.
۲۰۲۵-۲۰۲۴	.	۱۶	۲۱	.
۲۰۲۶-۲۰۲۵	۶/۵	۱۴	۲۶	۱۵
۲۰۲۷-۲۰۲۶	۷/۸	۳۰	۲۳	.
۲۰۲۸-۲۰۲۷	۴/۱	۲۴	۲۴	.
۲۰۲۹-۲۰۲۸	.	۷	۲۴	.
۲۰۳۰-۲۰۲۹	۸/۱	۲۲	۲۵	.
۲۰۳۱-۲۰۳۰	۲/۹	۲۳	۱۹	.

که در آینده‌ی نزدیک، ژرفای نفوذ یخبندان بر اثر گرم شدن جهانی و افزایش دما کاهش می‌یابد که چالشی تأثیرگذار بر مدیریت دما، رطوبت و فیزیک زیستی محیطی خاک دانسته می‌شود.

در شکل ۵، مقایسه‌ی ژرفای نفوذ یخبندان مشاهده‌شده، در دوره‌ی آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۳ و محاسبه‌شده با روش فنلاندی در سال‌های آینده (۲۰۱۴-۲۰۳۱) نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد



شکل ۵- مقایسه‌ی ژرفای نفوذ یخبندان ایستگاه سینوپتیک ملایر در دو دوره‌ی آماری ۱۹۹۵-۲۰۱۳ و ۲۰۱۴-۲۰۳۱.

اقلیم با تأثیر بر فراوانی وقوع یخبندان خاک و نیز شدت و مدت و ژرفای آن، بر ذخایر رطوبتی خاک و تنش سرما اثر می‌گذارد و باعث افزایش آفات و بیماری‌ها در تاکستان‌های منطقه می‌شود؛ بنابراین بررسی وضعیت ژرفای یخبندان و روند تغییرات آن در آینده‌ی نزدیک (تا پایان سال ۲۰۳۰) می‌تواند در مدیریت باغ‌های منطقه، مهم و ضروری باشد. در این پژوهش داده‌های کمینه و بیشینه‌ی دما و میانگین بارش ایستگاه سینوپتیک ملایر در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۱۳ استخراج و با استفاده از شبیه‌های HADCM3 و LARS-WG برحسب سه حالت ممکن  $A_1B$ ،  $A_2$ ،  $B_1$  برای سال‌های ۲۰۱۴ تا ۲۰۳۰ ریزمقیاس‌نمایی شد. تولید داده‌های اقلیمی در آینده‌ی نزدیک، پس از صحت‌سنجی پذیرفتنی شبیه لارس، با استفاده از سنجه‌های آماری  $RMSE$ ،  $MAE$ ،  $RMSE$  و  $NA$  انجام شد. نتایج نشان داد که دمای کمینه براساس هر سه حالت ممکن در فصل بهار کاهش و در فصول دیگر افزایش خواهد یافت؛ براساس هر سه حالت ممکن، انتشار بارش و دمای کمینه و بیشینه‌ی سالانه روند افزایشی خواهند داشت؛ ضمن آن‌که تغییرات دمای کمینه، نسبت به دمای بیشینه بیش‌تر خواهد بود. شاخص  $RSME$  و  $CRM$  برای دوره‌ی پایه در سه روش آمریکایی و فنلاندی و نورژی به ترتیب «۱۰۲/۲۴»، «۷/۰۷»، «۱۴/۴۹»، «۱/۲۶» و «۲۵/۸۰»، «۶/۵۷» محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که مقادیر محاسبه‌شده‌ی ژرفای نفوذ یخبندان در روش مک‌کوپن مبتنی بر روش آمریکایی، با مقادیر مشاهده‌شده تفاوت فراوانی دارد و می‌توان گفت با منطقی‌مورد مطالعه سازگاری ندارد؛ اما روش نورژی و به‌ویژه روش فنلاندی برای این پیش‌بینی بهتر عمل می‌کنند؛ هرچند تمام شبیه‌ها بیش‌تر برآورد است؛ نتایج برآورد ژرفای یخبندان با استفاده از روش معیار نشان داد که این روش، ژرفای یخبندان را بیش‌تر از

نتایج بررسی ژرفای نفوذ یخبندان براساس روش‌های مک‌کوپن و معیار، با مقادیر واقعی نفوذ یخبندان مقایسه شد. نتایج نشان داد که روش معیار، مقدار یخبندان را بسیار بیشتر از مقدار واقعی برآورد کرده است. چنین نتیجه‌ای از سوی خلیلی‌ا قدم (۲۰۱۲) و یزدانی و همکاران (۲۰۱۱)، در تمام مناطق بررسی‌شده ارائه شده است؛ با مقایسه‌ی نتایج ژرفای نفوذ یخبندان براساس روش مک‌کوپن و مقدار واقعی ژرفای نفوذ یخبندان مشخص شد که این روش هم ژرفای یخبندان را بیش‌تر از مقدار واقعی برآورد کرده است و نمی‌تواند به‌عنوان یک روش صددرصد مناسب برای این منطقه پیشنهاد شود. فیروزان (۲۰۱۰)، سلاجقه و همکاران (۲۰۱۴) و نجفی مود و همکاران (۲۰۰۷) و گانتانو و همکاران (۲۰۱۰) نیز مناسب نبودن روش مک‌کوپن را در مناطق مختلف برای برآورد ژرفای نفوذ یخبندان گزارش کرده‌اند. روش نورژی و به‌ویژه روش فنلاندی، در مقایسه با دیگر روش‌ها توان بیش‌تری برخوردار اند. این یافته با نتایج تحقیق نجفی مود و همکاران (۲۰۰۷) و تسینگریلیس و همکاران (۲۰۱۴) همخوانی دارد.

#### نتیجه‌گیری

تغییر اقلیم، باعث تغییر پدیده‌های حدی اقلیمی مانند توفان، تگرگ، سرما و گرماهای شدید و غیرمترقبه، سیل و خشکسالی می‌شود. درحالی‌که دمای هوا و بارش، از سنجه‌های محیطی مهم و مؤثر در مدیریت حوزه‌های آبخیز است، دمای خاک و ژرفای یخبندان را هم می‌توان در ردیف مهم‌ترین سنجه‌های اقلیمی در عرصه‌ی مدیریت آب‌شناسی حوزه‌های آبخیز و کشاورزی دانست. دشت ملایر، به‌عنوان مهم‌ترین تولیدکننده‌ی انگور کشمش‌ی کشور، جایگاه مهمی در اقتصاد مردم منطقه دارد. گرم شدن جهانی و منطقه‌ای و تغییر

آینده نشان می‌دهد که روش فنلاندی در آینده، نسبت به زمان پایه عمل‌کرد بهتری خواهد داشت. بررسی رابطه‌ی بین ژرفای یخبندان مشاهده‌شده و نمایه‌ی یخبندان هوا با روش‌های مختلف نشان می‌دهد که در مجموع روش نروژی و به‌ویژه روش فنلاندی توان بیش‌تر و برآورد بیش‌تری دارند. این روش در آینده، تا حدودی کم‌برآورد است. رابطه‌ی یادشده، با ضریب تبیین ۰/۷۸ در تراز ۰/۵٪ معنی‌دار است.

مقادیر واقعی برآورد نموده است. شاخص RSME و CRM برای این روش به ترتیب ۶۵/۳۵ و ۹/۱۶ است؛ پس این روش هم بیش‌برآورد دانسته می‌شود. شاخص RSME و CRM برای دوره‌ی آینده (تا سال ۲۰۳۱) در سه روش آمریکایی و نروژی و فنلاندی، به ترتیب «۸۶/۳۸»، «۵/۶۸»، «۱۷/۰۳»، «۴/۴۱» و «۵/۲۷»، «۰/۷۶»- محاسبه شد. مقایسه‌ی شاخص‌های توانایی شبیه در برآورد ژرفای یخبندان در زمان پایه و



- Babaian A, Najafi Nik Z. 2007. Introduction and evaluation of LARS-WG model for modeling meteorological parameters of Khorasan province, statistical period (1961–2003). Nivar: Scientific and Technical Journal of the Iran Meteorological Organization, 62–63(2): 50–64.
- Barnett T, Malone R, Pennell W, Stammer D, Semtner B, Washington W. 2004. The effects of climate change on water resources in the West: Introduction and overview. Climatic Change, 62: 1–11.
- Cary JW, Campbell GS, Papendick RI. 1978. Is the soil frozen or not?. An algorithm using weather records. Water Resour. Res, 14(6): 1117–1122.
- Firozan M. 2010. Statistical analysis of glaciers and minimum temperatures with emphasis on penetration depth. Case study: Bojnourd City. Master's thesis, Tarbiat Moallem University, Faculty of Geography, Sabzevar, Iran.
- Fridleifsson IB, Bertani R, Huenges E. Lund JW, Ragnarsson A, Rybach L. 2008. The possible role and contribution of geothermal energy to the mitigation of climate change. IPCC scoping meeting on renewable energy sources, pp. 59–80.
- 6.Gaetano T, Cameron M, Wilks DS. 2010. Physical simulation of Maximum Seasonal Soil Freezing Depth in the United States Using Routine weather observations. Journal of Applied Meteorology, 40(1): 546–555.
- Golshan S, Raeini Sirjaz M, Norouz Velashedi R. 2014. Investigation and detection of global warming effects on changes in soil temperature and its estimation by regression correlation method. Case study: Kerman. Water and Soil Conservation Research Journal, 22 (4):121–138.
- Goodarzi M, Soltani M. 2018. The prediction of the effect of climate change on the temperature and precipitation of the decade of 2020. Journal of Rainfall Systems, 3 (2):31–38.
- Goodarzi M, Khosravaniyan J, Hejazi S. 2015. Application of the LARS-WG model for forecasting the meteorological parameters in Gharosso Basin. Geographical Space Scientific-Research Quarterly, 5 (51): 263–279.
- Iwata Y, Nemoto M, Hasegawa S, Yanai Y, Kuwao K, Tomoyoshi H. 2011. Influence of rain, air temperature, and snow cover on subsequent spring-snowmelt infiltration into thin frozen soil layer in northern Japan. Journal of Hydrology, 401(3–4): 165– 176.
- Khalili Aghdam N, Assadidi A, Soltani A, Kamkar B. 2012. Validity of the LARS-WG model to predict some Sanandaj atmospheric parameters. Journal of Soil and Water Conservation, 19(4):12–26.
- Koewn M, Klark M, Matheson D. 1988. Frost penetration and thermal regim in dry gravel. Cold Reg. Eng, 2(3):111–123.
- Najafi Mood M, Alizadeh A, Mohammadian A, Mousavi J. 2007. Investigating the relationship between air temperature and soil temperature in different depths and also, estimating the depth of frost. Case study: Razavi Khorasan Province. Journal of Water and Soil Science (Agricultural Sciences and Technology), 22 (2): 456–466.
- Nazari Pouya H, Kardavani P, Faraji Rad A. 2017. Investigation and evaluation of climate change effects on hydroquilitic parameters of Ekbatan Dam Basin (Hamadan Province). Ecocheidrology, 3(2): 181–194.
- Reddy KS, Kumar M, Maruthi V, Umesha B, Vijayalaxmi, Nageswar Raocvk. 2014. Climate change analysis southern Telangana region, Andhra Pradesh using LARS- WG moel. Jornal of Currebt Science, 107(1): 54– 62.
- Salajeghe M, Sana'e Nejad H, Bakhtiari B, Araghizadeh M. 2013. Glacial depth zoning and determination of the most suitable estimation method using screen temperature in Khorasan Razavi. Second International Conference on Plant, Water, Soil and Air Modeling, Kerman: Advanced Industrial and Advanced Studies University, pp. 154–167.
- Semenov MA, Barrow EM. 2002. LARS-WG a Stochastic weather generator for use in climate impact studies", User Manual, Version 3.0, p 28.
- Sobhani B, Fatiminia F. 2014. Modeling of climate factors in South Khorasan Province. Natural Geography Researches, 46(3): 313–332.
- Steurer P, Crandell J. 1995. Comparison of Methods used to create estimate of air-freezing index. Journal of Cold Regions Engineering, 9(2): 64– 75.
- Tsilingiridis G, Papakoštas K. 2014. Investigating the relationship between air and ground temperature variations in shallow depths in northern Greece. Energy, 73(3): 1007– 1016.
- Xu, HN, Spitler JD. 2014. The relative importance of moisture transfer, soil freezing and snow cover on ground temperature predictions. Renewable Energy, 72: 1–11
- Yazdani V, Ghahraman B, Farahi G, Nouri H. 2011. Modeling the depth of soil temperature with the help of meteorological parameters. Journal of Soil and Water Conservation Research, 19 (4): 23–39.

- Zabul Abbasi F, Melbosi Sh, Babayan A, Barani R. 2009. Prediction of climate change in Southern Khorasan in 2010–2010 by using the ECHO-G Output Statistical Exponential Scale. *Journal of Water and Soil (Agricultural Science and Technology)*, 24 (2): 218–233.
- Zhou Y, Guo D. 2000. The zonal and regional conditions for development of frozen ground. *Science Press of China. Beijing*, 3(2): 56–69.

