

بررسی روند تغییرات پارامترهای اقلیمی شهرستان بروجرد در ۲۰ سال آتی با استفاده از مدل HADCM3

محمدحسین جهانگیر^{۱*}، اقبال نوروزی^۲، یزدان یاراحمدی^۲

۱. استادیار، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۷/۰۴/۰۱؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۷/۰۸/۱۳)

چکیده

در چند دهه اخیر افزایش دما سبب برهم خوردن تعادل اقلیمی کره زمین شده و تغییرات گسترده‌ای را در اغلب نواحی آن به وجود آورده است که از آن به عنوان تغییر اقلیم یاد می‌شود. استفاده از مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری در برآورد نوسانات اقلیمی این امکان را فراهم کرده است تا بتوان داده‌های آب و هوایی را در مقیاس مکانی و زمانی مناسب تولید کرد. در پژوهش حاضر کارایی مدل LARS - WG برای تولید و شبیه‌سازی داده‌های روزانه دما، کمینه و بیشینه بارش و ساعت آفتابی در شهرستان بروجرد با استفاده از پارامترهای آماری MAE ، R^2 ، $RMSE$ و MBE بررسی و ارزیابی شده و تغییرات ناشی از آن در دهه‌های آینده آشکار شد. نتایج پژوهش حاضر نشان داد مدل HadCM3 توانایی لازم را در تولید داده‌های روزانه دارد. پس از اطمینان از کارایی مدل، از خروجی مدل استفاده شده و داده‌های روزانه دما، کمینه و بیشینه بارش و ساعت آفتابی برای دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۵) تحت سه سناریوی A1B, A2, B1 شبیه‌سازی شد. نتایج به دست آمده از برآورد مدل HadCM3 برای سناریوهای بررسی شده در دوره‌های آتی، بیان می‌کند که میانگین مجموع پارامترهای هواشناسی روند افزایشی داشته است و هر سه سناریو این میزان افزایش را نشان می‌دهند.

کلیدواژگان: بروجرد، تغییر اقلیم، شبیه‌سازی، مدل LARS - WG، Hadcm3.

مقدمه

بسیاری از سامانه‌های محیط زیست طبیعی مانند منابع آب، تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم قرار گرفته‌اند، به طوری که بهره‌برداری از منابع آب، تولید محصولات کشاورزی، فرایند فرسایش، تولید رواناب و بسیاری دیگر از فرایندهای هیدرولوژیکی دچار دگرگونی شده‌اند [۱]. آنچه در مطالعات تغییر اقلیم ضروری به نظر می‌رسد، افزایش آگاه‌شدن از میزان تغییرات کمی و کیفی آینده و نیز ارزیابی پیامدهای آن بر بخش‌های مختلفی است که کمتر مورد توجه قرار گرفته است [۲]. مدل‌های اقلیمی ابزارهای نوینی هستند که بیشتر از سی سال از ارائه آنها نمی‌گذرد. در هر مدل اقلیمی تلاش شده است فرایندهای مؤثر بر اقلیم، شبیه‌سازی شوند و براساس آن وضعیت آب و هوایی برای سال‌های آینده پیش‌بینی شود، چون پیش‌بینی شرایط آب و هوایی تحت تأثیر پدیده تغییر اقلیم، به طور قطعی ممکن نیست. راه حل جایگزین، مشخص کردن امکان رخدادهای گوناگون برای آن است که سناریوی اقلیمی نامیده می‌شود [۳]. امروزه، مدل‌های گردش عمومی GCM مناسب‌ترین ابزار برای توسعه سناریوهای اقلیمی آینده‌اند. بزرگ‌مقیاس بودن داده‌های خروجی مدل‌های GCM موجب استفاده از ابزارهای ریزمقیاس کردن می‌شود تا بتوان داده‌های بزرگ‌مقیاس جهانی را به داده‌های اقلیمی برای منطقه مد نظر تبدیل کرد. در بیشتر بررسی‌های انجام‌شده در زمینه تغییر اقلیم در یک منطقه خاص، فقط از یک روش ریزمقیاس کردن برای تولید داده‌های اقلیمی در دوره‌های آینده استفاده شده است [۴ و ۵]. بهترین ابزار برای ارزیابی آثار پدیده تغییر اقلیم، مدل‌های عمومی AOGCM هستند که فرایندهای فیزیکی در اتمسفر، اقیانوس، کریوسفر و سطح زمین و تغییرات سیستم آب و هوایی جهانی را در پی افزایش غلظت گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی می‌کنند. بنابراین، برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در مقیاس منطقه‌ای و محلی نیاز به توسعه ابزارهای ریزمقیاس‌نمایی است [۶]. به‌طور کلی، ریزمقیاس‌نمایی به دو دسته تقسیم می‌شود: روش‌های آماری و روش‌های دینامیکی [۷]. روش‌های آماری نسبت به دینامیکی به پارامترهای کمتری نیاز دارند و به‌همین دلیل در مطالعات مربوط به علوم آب بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند [۸]. انواع مدل‌های

ریزمقیاس‌نمایی آماری عبارت‌اند از: ROLLT، SDSM، CLIMGEN، LARS-WG و MET [۷]. این مدل‌ها قادرند پارامترهای جوئی و اقیانوسی را برای یک دوره طولانی مدت با استفاده از سناریوهای تأییدشده IPCC مدل‌سازی کنند [۹]. اما ضعف عمده این مدل‌ها قدرت تفکیک مکانی کم آنها است که برای غلبه بر این مشکل باید خروجی مدل‌های یادشده قبل از استفاده در مطالعات ارزیابی آثار تغییر اقلیم، ریزمقیاس شوند. در خصوص دقت مدل‌های ریزمقیاس‌نمایی آماری، تحقیقات زیادی در ایران و دنیا انجام شده است که در ادامه به آنها اشاره خواهد شد. بابایی و سهرابی طی پژوهشی عملکرد مدل LARS-WG را در ایستگاه‌های ساحلی ایران ارزیابی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل LARS-WG در شبیه‌سازی توزیع روزانه و میانگین ماهانه و فصلی بیشتر سری‌ها عملکرد مناسبی دارد [۱۰]. چن و همکارانش میزان دما و بارش را برای منطقه سودان و سودان جنوبی با هفت مدل گردش عمومی جو براساس سناریوی A2 و با استفاده از مدل LARS-WG پیش‌بینی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بین کمترین و بیشترین دمای همه مدل‌های گردش عمومی جو نوعی هماهنگی در کلیه ایستگاه‌ها وجود دارد اما درباره بارش بیان‌کننده یک عدم قطعیت زیاد در مدل گردش عمومی جو است [۱۱]. هاشمی و همکارانش دو مدل LARS-WG و SDSM را برای شبیه‌سازی بارش‌های شدید در حوزه کلوتا واقع در جزیره جنوبی نیوزلند مقایسه کردند و نشان دادند هر دو مدل توانایی‌های مشابه و خوبی در شبیه‌سازی رویدادهای بارش شدید دارند و قابل استفاده برای پیش‌بینی‌های اقلیمی‌اند [۱۲]. Semenov و همکارانش سناریوهای تغییر اقلیم را با استفاده از مدل LARS-WG در انگلستان بررسی کردند و قابلیت این مدل در شبیه‌سازی داده‌های روزانه تأیید شد [۱۳]. عباسی و همکارانش در مطالعه‌ای تغییرات اقلیمی خراسان جنوبی را طی دوره زمانی ۲۰۱۰-۲۰۳۹ و با استفاده از مدل LARS-WG بررسی کردند. نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش آنها نشان داد به‌طور کلی عملکرد مدل بارش در مدل‌سازی متغیرهای هواشناسی ایستگاه‌های بررسی‌شده مناسب است [۷]. همچنین، پژوهشگرانی به ارزیابی تغییر اقلیم ایران در دهه‌های آینده (۲۰۲۵-۲۱۰۰ میلادی) با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی

داده‌ها با استفاده از خروجی‌های مدل گردش عمومی جوّ ECHO - G و با سناریوی A1 به منظور ریزگردانی برای چهار ایستگاه منتخب استان شامل زاهدان، زابل، ایرانشهر و چابهار تجزیه و تحلیل شد. تحلیل داده‌های تولیدشده در دوره اقلیمی آینده و مقایسه آن با دوره گذشته بیان‌کننده افزایش بارش در ایستگاه‌ها و نیز افزایش فراوانی تعداد بارش‌های سنگین در محدوده‌های ایستگاه‌ها بود. در دوره اقلیمی آینده مؤلفه کمینه دما بیش از پیشینه افزایش یافت که به کاهش دامنه شبانه‌روزی دما و کاهش دما در سال‌های آتی برای استان منجر شد [۱۷]. صالح‌نیا و همکارانش در مطالعه‌ای به بررسی دقت دو مدل ریزمقیاس‌نمایی LARS - WG و ASD در سه ایستگاه مشهد، بجنورد، بیرجند تحت مدل HADCM3 و سناریوی A2 پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل ASD نسبت به مدل LARS - WG دقت بیشتری دارد [۱۸]. روحی و همکارانش در پژوهشی توانمندی مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی دما و بارش در اقلیم گرم و خشک (ایستگاه‌های یزد و طیس) را بررسی کردند. آنها در این مطالعه از خروجی مدل HADCM3 تحت سناریوی A2 استفاده کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد مدل SDSM در ریزمقیاس‌نمایی دما در اقلیم گرم و خشک عملکرد خوبی دارد [۱۹]. هاجریور و همکارانش به مقایسه سه مدل LARS - WG, WEATHERMAN, CLIMGEN در شبیه‌سازی پارامترهای اقلیمی در سه اقلیم مختلف گرگان، گنبد، مشهد پرداختند. نتایج پژوهش آنها بیان‌کننده کارایی بهتر مدل LARS - WG در شبیه‌سازی پارامتر کمترین دما در منطقه گرگان و مشهد است و به طور کلی هر سه مدل پارامتر دما را بهتر از سایر پارامترهای اقلیمی پیش‌بینی می‌کنند [۲۰]. هدف از پژوهش حاضر، بررسی روند تغییرات بارندگی، کمترین و بیشترین دما و ساعت آفتابی، در دهه‌های اخیر (۱۹۹۶-۲۰۱۵) و پیش‌بینی این تغییرات در دهه‌های آینده (۲۰۱۶-۲۰۳۵) برای شهرستان بروجرد است.

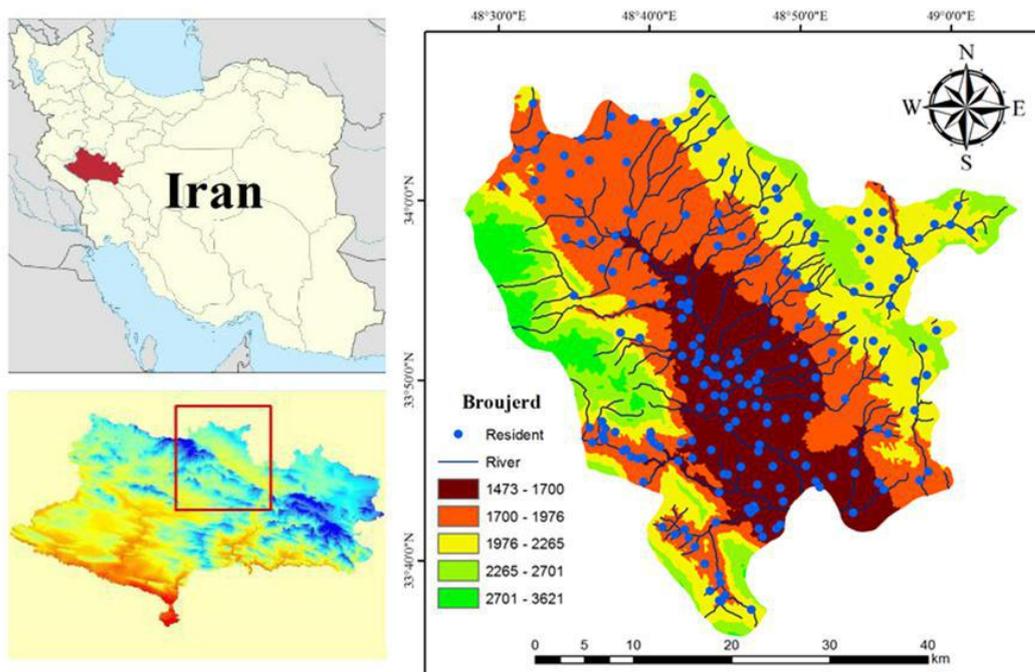
مواد و روش

شهرستان بروجرد در استان لرستان و در محدوده ۴۸ درجه ۴۵ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۲ درجه ۵۵ دقیقه عرض جغرافیایی قرار گرفته است. میانگین کمترین و

داده‌های مدل گردش عمومی جوّ پرداخته‌اند. نتایج پژوهش آنها (اجرای مدل با داده‌های HadCM3) کاهش ۲/۵ درصدی بارش تا دهه ۲۱۰۰ را نشان داده است [۱۴]. رضایی و همکارانش کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری در پیش‌بینی بارش در دو اقلیم خشک و فراخشک را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میزان بارش سالانه تا سال ۲۰۲۹ در ایستگاه کرمان در سناریوهای A2 و B2 به ترتیب ۱/۳ و ۰/۳ میلی‌متر کاهش و در ایستگاه بم حدود ۴/۵۶ و ۵/۴ میلی‌متر نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت [۳]. رجبی و همکارانش به منظور بررسی آسیب‌پذیری تحت شرایط تغییر اقلیم در بالادست حوزه رودخانه تامس نتایج مدل LARS - WG و SDSM را برای بیشترین و کمترین دما و میزان بارش با هم مقایسه کردند. پژوهش آنها نشان داد مدل LARS - WG نتایج قابل قبولی برای داده‌های دما ارائه می‌دهد، اما مدل SDSM روند فصلی را به خوبی شبیه‌سازی می‌کند [۱۵]. عزیزاده اثر تغییر اقلیم بر افزایش مصرف آب در دشت مشهد را بررسی کرد. نتایج پژوهش ایشان نشان داد بر اثر افزایش دمای ۲ درجه سانتی‌گرادی، نیاز خالص آبیاری با الگو و ترکیب کشت کنونی در آینده ۶ درصد افزایش خواهد یافت [۱۶]. عزیزاده و همکارانش آثار احتمالی تغییر اقلیم بر تبخیر - تعرق حوضه آبریز رودخانه کشف‌رود را با استفاده از ریزمقیاس‌نمایی خروجی مدل گردش عمومی جوّ HADCM3 تحت سناریوی اقلیمی A2 و برای سه دوره ۲۰۱۰-۲۰۳۹، ۲۰۴۰-۲۰۶۹ و ۲۰۷۰-۲۰۹۹ بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد بر اثر افزایش دما میزان تبخیر و تعرق در تمامی ماه‌ها برای هر سه دوره مطالعه‌شده افزایش خواهد یافت [۸]. رضایی و همکارانش کارایی مدل ریزمقیاس‌نمایی آماری در پیش‌بینی بارش در دو اقلیم خشک و فراخشک را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد میزان بارش سالانه تا سال ۲۰۲۹ در ایستگاه کرمان با سناریوهای A2 و B2 به ترتیب ۱/۳ و ۰/۳ میلی‌متر کاهش و در ایستگاه بم حدود ۴/۵۶ و ۵/۴۶ میلی‌متر نسبت به دوره پایه افزایش خواهد داشت [۳]. همچنین طی پژوهشی به شبیه‌سازی تغییرات اقلیمی استان سیستان و بلوچستان با استفاده از ریزگردانی داده‌های مدل گردش عمومی (GCM) برای دوره اقلیمی آینده (۲۰۱۰-۲۰۳۵) پرداخته شد. در پژوهش یادشده

نیمه مرطوب با تابستان گرم و زمستان نسبتاً سرد است. طول دوره خشکی ۱۵۴ روز (خرداد - آبان) و شروع دوره خشکی اوایل خرداد و پایان دوره خشکی اوایل آبان است. شکل ۱ موقعیت شهرستان بروجرد را نشان می‌دهد.

بیشترین دمای سالانه به ترتیب ۸/۲ و ۲۱/۹ متر است. بارش سالانه ۴۵۶/۲ میلی‌متر و ارتفاع از سطح دریا ۱۶۲۹ متر است. میزان تبخیر پتانسیل شهرستان بروجرد ۱۹۲۹ میلی‌متر برآورد شده است. نوع اقلیم شهرستان بروجرد



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی ایستگاه مطالعه شده

در پژوهش حاضر ابتدا داده‌های هواشناسی بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعت آفتابی ایستگاه سینوپتیک شهرستان بروجرد به صورت روزانه از سال آماری (۱۹۹۵-۲۰۱۵) از مرکز آمار و اطلاعات سازمان هواشناسی کشور اخذ و سپس این داده‌ها به قالب مناسب مدل LARS - WG تبدیل شد. در پژوهش حاضر از مدل ریزمقیاس‌کننده HadCM3، برای ریزمقیاس‌کردن داده‌های مدل گردش عمومی جو LARS - WG که یکی از مدل‌های مشهور مولد داده‌های تصادفی وضع هواست، استفاده شده است. مدل گردش عمومی HadCM3 یک مدل GCM (جفت‌شده جوی - اقیانوسی) است؛ که در مرکز تحقیقاتی HCCPR5 در انگلیس اجرا شده و شبکه‌ای با ابعاد ۲/۵ درجه عرض جغرافیایی و ۳/۷۵ درجه طول جغرافیایی دارد. مشخصات کامل این مدل در جدول ۱ آورده شده است. سناریوهای تغییر اقلیم A1B, A2, B1 در مطالعه حاضر استفاده شده است. وجود هر سه سناریوی متوسط، بدبینانه و خوش‌بینانه در دوره پایه

بررسی نتایج به دست آمده از عدم قطعیت ناشی از به‌کارگیری مدل سناریوهای مختلف، امکان بررسی‌های مقایسه‌ای و دقیق‌تر خروجی حاصل از شبیه‌سازی‌ها را بیشتر بر واقعیت منطبق می‌کند. هریک از سناریوها ویژگی‌هایی از جمله مربوط به رشد اقتصادی جهان، جمعیت جهان و آگاهی‌های اجتماعی را نشان می‌دهند. برای اجرای مدل LARS - WG از داده‌های روزانه دمای کمینه، دمای بیشینه، طی دوره آماری ۲۰ سال (۱۹۹۶-۲۰۱۵) استفاده شد که دوره (۱۹۹۶-۲۰۱۵) به‌عنوان دوره پایه برای ایستگاه بروجرد در نظر گرفته شده است. داده‌های ۲۰ سال گذشته (۱۹۹۶-۲۰۱۵) به‌عنوان مبنای تغییر اقلیم گذشته قرار گرفت. مدل LARS - WG در سه مرحله اجرا می‌شود، این مراحل شامل کالیبره کردن، ارزیابی داده‌ها و تولید داده برای دوره آینده است. خروجی این مدل شامل دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش، ساعت آفتابی یا تابش و تبخیر و تعرق پتانسیل است. در مرحله کالیبره کردن مدل، داده‌های تهیه‌شده در دوره پایه

شاخص‌های خطاسنجی میانگین مجذور مربعات خطا RMSE (رابطه ۲)، میانگین خطای مطلق MAE (رابطه ۳) و میانگین انحراف خطا MBE (رابطه ۴) به دست آمد. سپس، داده‌های تولیدشده با استفاده از مدل و داده‌های واقعی (مشاهده‌شده) در دوره پایه ارزیابی شدند. در روابط یادشده X_i و Y_i به ترتیب i امین داده واقعی (مشاهده‌شده) و شبیه‌سازی‌شده توسط مدل، \bar{X} و \bar{Y} میانگین کل داده‌های X_i و Y_i در جامعه آماری و n تعداد کل نمونه‌های ارزیابی‌شده هستند.

(۱۹۹۶-۲۰۱۵) برای ایستگاه بروجرد پردازش و اصلاح شدند. سپس، داده‌ها آماده ورود به مدل LARS - WG شدند. به این ترتیب، مدل برای دوره پایه اجرا شده و پارامتر بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعت آفتابی به صورت روزانه برای دوره یادشده شبیه‌سازی شد. در مرحله ارزیابی مدل، خروجی مدل آنالیز شد. سپس، داده‌های مشاهده‌ای با داده‌های شبیه‌سازی‌شده برای دوره پایه مقایسه و ارزیابی شدند. پارامتر شبیه‌سازی‌شده با استفاده از محاسبه ضریب تعیین R^2 (رابطه ۱)،

جدول ۱. مشخصات مدل Hadcm3 (Carter et al, 1999)

Hadcm3	خصوصیات
$۲/۷۵ \times ۲/۷۵$	قدرت تفکیک جوی (درجه) (طول×عرض)
$۱/۲۵ \times ۱/۲۵$	قدرت تفکیک اقیانوسی (درجه) (طول×عرض)
SO4: 1860 - 1989 CO2: 1860 - 1989	دوره شبیه‌سازی گازهای گلخانه‌ای و ذرات معلق در گذشته
240 : دوره کنترل	طول دوره شبیه‌سازی (سال)
A1, A2, B1	سناریوهای شبیه‌سازی‌شده SRES
رشد سریع اقتصادی، بیشینه رشد جمعیت در نیمه قرن و پس از آن روند کاهشی، رشد سریع فناوری‌های نوین و مؤثر	A1B
رشد سریع جمعیت جهان، اقتصاد ناهمگن و همسو با شرایط منطق‌هایی در سراسر جهان	A2
همگرایی جمعیت در سراسر جهان، تغییر در ساختار اقتصاد (کاهش مواد آلاینده و معرفی منابع فناوری پاک و مؤثر)	B1

مدل گردش عمومی جو Hadcm3 استفاده شد. سپس، داده‌های دوره (۲۰۱۶-۲۰۳۵) با استفاده از سه سناریوی تغییر اقلیم B1, A1B, A2 به دست آمد و به این ترتیب مقادیر روزانه پارامترهای مطرح‌شده برای دوره (۲۰۱۶-۲۰۳۵) تولید شد. پس از تولید داده‌ها برای ۲۰ سال آتی، از خروجی پارامترهای مطرح‌شده مدل میانگین‌گیری کرده و نرمال ماهانه پارامترهای یادشده در دوره ۲۰۱۶-۲۰۳۵ با استفاده از سه سناریوی تغییر اقلیم محاسبه شد. سپس تغییرات بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و ساعت آفتابی ماهانه دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۵) مقادیر مشاهده‌شده و تولیدشده و همچنین انحراف معیار پارامترهای یادشده ماهانه محاسبه و نمودار آن‌ها رسم شد.

بحث و نتایج

به منظور کالیبره کردن و اطمینان از صحت مدل LARS - WG ابتدا یک سناریوی پایه برای دوره آماری (۱۹۹۶-

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)^2}{n}} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - Y_i|}{n} \quad (3)$$

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - Y_i)}{n} \quad (4)$$

پس از ارزیابی مدل LARS - WG، با استفاده از شاخص‌های خطاسنجی و ضریب تعیین و اطمینان از مناسب بودن مدل، از آن برای ریزمقیاس کردن داده‌های

داده‌های مربوط به ساعت آفتابی را با دقت کمتری نسبت به سایر داده‌های هواشناسی تولید می‌کند، بنابراین با توجه به این موارد توانایی مدل در داده‌سازی تأیید شده است. مقادیر نشان می‌دهند بین داده‌ها همبستگی معناداری وجود دارد. برای اطمینان از درستی واسنجی مدل از شاخص‌های خطاسنجی RMSE، MAE و MBE استفاده شد (جدول ۲). مقایسه میانگین‌های ماهانه مشاهداتی و تولیدشده متغیرهای هواشناسی دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعت آفتابی با استفاده از پارامترهای آماری R^2 ، MAE و MBE نشان داد مدل کارایی لازم را برای تولید داده‌های روزانه پارامترهای یادشده در ایستگاه بروجرد را دارد و می‌توان با طراحی سناریو، داده‌های هواشناسی دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعت آفتابی را با استفاده از مدل یادشده پیش‌بینی کرد.

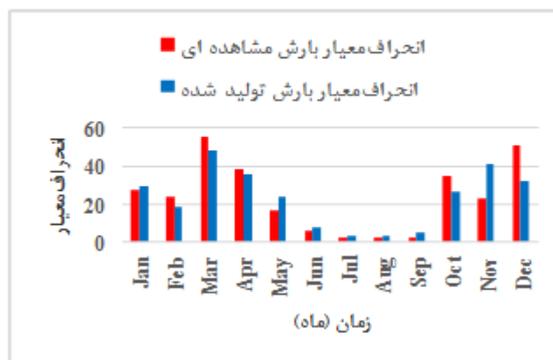
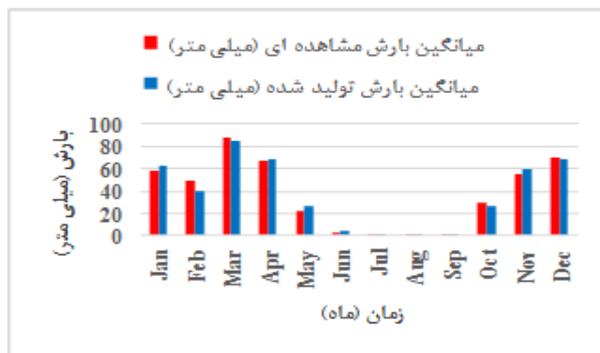
جدول ۲. مقادیر شاخص همبستگی (R^2) و شاخص‌های خطاسنجی (MAE, RMSE, MBE) پارامترهای هواشناسی

RMSE	R^2	MBE	MAE	
۳/۸۳۸۰	۰/۹۸۳۶	-۰/۲۵۴۲	۳/۰۲۴۲	بارش
۰/۲۹۰۹	۰/۹۹۸۷	۰/۰۶۵۸	۰/۲۲۴۲	دمای کمینه
۰/۳۲۷۴	۰/۹۹۹۱	۰/۰۴۴۲	۰/۲۷۷۵	دمای بیشینه
۰/۲۴۸۵	۰/۹۹۸۸	-۰/۰۰۶	۰/۲۱۷۵	تابش

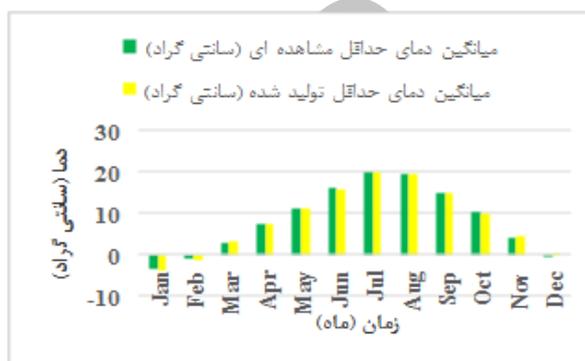
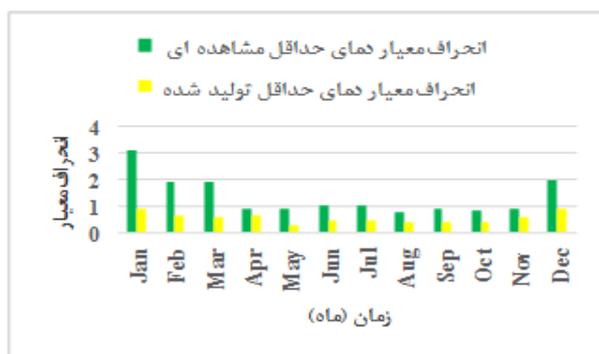
همچنین، انحراف معیار دمای کمینه تولیدشده در همه ماه‌ها از انحراف معیار مشاهده‌شده کمتر است. شکل ۴ میانگین و انحراف معیار دمای بیشینه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میانگین دمای بیشینه تولیدشده در بیشتر ماه‌ها از مقدار مشاهده‌شده کمتر و در بعضی ماه‌ها حتی برابر است. همچنین، انحراف معیار دمای بیشینه تولیدشده در همه ماه‌ها از انحراف معیار مشاهده‌ای کمتر است. شکل ۵ میانگین و انحراف معیار ساعت آفتابی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میانگین ساعت آفتابی تولیدشده در بیشتر ماه‌ها از میانگین مشاهده‌ای زیادتر است. همچنین، انحراف معیار ساعت آفتابی تولیدشده توسط مدل در بیشتر ماه‌های سال کمتر از میزان مشاهده‌شده است. نتایج تحقیق حاضر با تحقیق [۲۱] مطابقت دارد. با توجه به نتایج گفته‌شده، ملاحظه می‌شود نمودار داده‌های مشاهداتی و تولیدشده در دوره پایه تقریباً به هم نزدیک هستند و این خود صحت توانایی مدل را برای دوره آتی تأیید می‌کند.

۲۰۱۵) تدوین و مدل برای این دوره اجرا شد. در پژوهش حاضر ابتدا داده‌های روزانه پارامترهای هواشناسی دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعت آفتابی ایستگاه بروجرد طی دوره آماری (۱۹۹۶-۲۰۱۵) به‌عنوان داده‌های ورودی به مدل LARS - WG وارد شد و با کمک مدل داده‌های روزانه متغیرهای هواشناسی یادشده در همین دوره تولید شد. برای واسنجی مدل ضریب تعیین داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل برای دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۵) در ایستگاه سینوپتیک بروجرد محاسبه شد (جدول ۲). نتایج نشان می‌دهند مقدار ضریب تعیین در همه موارد میزان درخور توجهی داشت و همچنین مقادیر شاخص‌های خطاسنجی نیز نسبتاً کم بوده که نشان‌دهنده همبستگی زیاد بین مقادیر مشاهده‌ای و تولیدشده دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۵) است. مدل یادشده

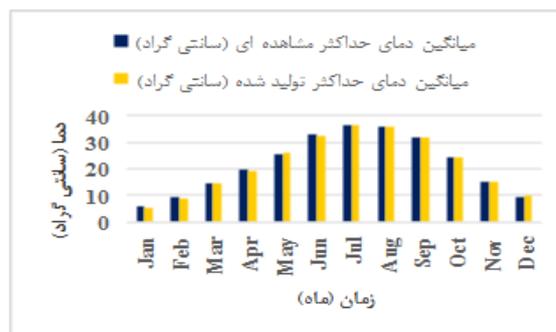
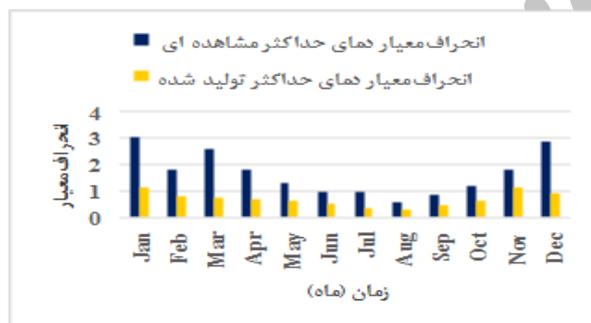
در مرحله بعد با کمک مدل LARS - WG داده‌های روزانه پارامتر هواشناسی یادشده برای سناریوهای A1B, B1 و A2 مدل گردش عمومی جو Hadcm3 برای ۲۰ سال آتی شبیه‌سازی شد. مقادیر مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعت آفتابی نشان داد همبستگی زیادی بین مقادیر مشاهداتی و تولیدشده توسط مدل وجود دارد. میانگین و انحراف معیار داده‌های مشاهداتی و شبیه‌سازی‌شده مربوط به هریک از پارامترهای هواشناسی نشان داده شده است که نتایج نشان می‌دهد شکل ۲ مربوط به میانگین و انحراف معیار بارش است. در ضمن، میانگین بارش شبیه‌سازی‌شده در بیشتر ماه‌ها در حال افزایش بوده و بیشتر از میزان بارش مشاهداتی است. همچنین، انحراف معیار داده‌های مشاهداتی در بیشتر ماه‌ها کمتر از داده‌های شبیه‌سازی‌شده بوده است. شکل ۳ میانگین و انحراف معیار دمای کمینه را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میانگین دمای کمینه تولیدشده در بیشتر ماه‌ها از مقدار مشاهده‌شده کمتر و در بعضی ماه‌ها حتی برابر است.



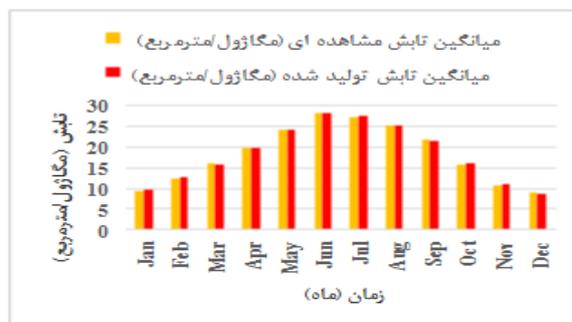
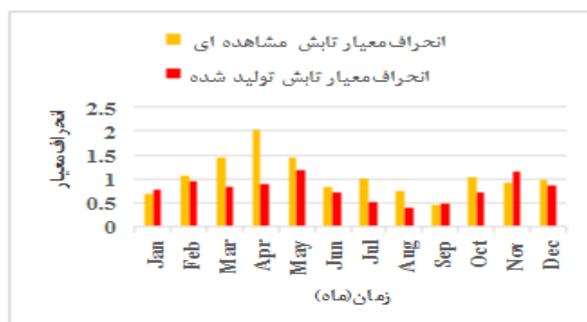
شکل ۲. نمودار میانگین و انحراف معیار بارش ماهانه تولیدشده و مشاهده‌ای (۱۹۹۶-۲۰۱۵)



شکل ۳. نمودار میانگین و انحراف معیار کمترین دمای ماهانه تولیدشده و مشاهده‌ای (۱۹۹۶-۲۰۱۵)



شکل ۴. نمودار میانگین و انحراف معیار بیشترین دمای ماهانه تولیدشده و مشاهده‌ای (۱۹۹۶-۲۰۱۵)



شکل ۵. نمودار میانگین و انحراف معیار تابش ماهانه تولیدشده و مشاهده‌ای (۱۹۹۶-۲۰۱۵)

جدول ۳. تغییرات ماهانه پارامترهای اقلیمی بر اساس سناریوهای A1B, B1 و A2 مدل Hadcm3 برای ۲۰ سال آتی

دسامبر	نوامبر	اکتبر	سپتامبر	اگوست	جولای	ژوئن	می	آوریل	مارس	فوریه	ژانویه	
۰/۰۹	۴/۴	۹/۹	۱۷/۷۴	۱۹/۳۴	۱۹/۸۴	۱۵/۸۹	۱۱/۰۵	۷/۳	۳/۱۶	-۱/۴۲	-۳/۷۳	پایه
۰/۲	۴/۹۵	۱۰/۳	۱۵/۲	۱۹/۶۷	۲۰/۴۹	۱۶/۴۵	۱۱/۵۳	۷/۷۹	۳/۳۸	-۱/۱۹	-۳/۵۸	A1B
۰/۲۳	۵/۲۶	۱۰/۴۸	۱۵/۲۴	۱۹/۵۷	۲۰/۴۳	۱۶/۴۵	۱۱/۶۱	۷/۷۶	۳/۴۳	-۰/۹۹	-۳/۴	A2
۰/۲۶	۵	۱۰/۳	۱۵/۲۴	۱۹/۶	۲۰/۳۸	۱۶/۳۹	۱۱/۵۶	۷/۷۳	۳/۴۵	-۰/۹	-۳/۶	B1
۹/۹۵	۱۵/۱۹	۲۴/۱۶	۳۱/۶۱	۳۶/۱۲	۲۶/۵۵	۳۲/۷۳	۲۶/۱۵	۱۹/۴۲	۱۴/۸۶	۹/۰۵	۵/۶۱	پایه
۹/۹۶	۱۵/۸۳	۲۳/۸	۳۱/۹۳	۳۶/۵۳	۳۷/۱۹	۳۲/۰۶	۲۶/۷۶	۱۹/۶۹	۱۵/۲	۹/۰۷	۵/۶۵	A1B
۱۰/۱۷	۱۵/۹۶	۲۴/۲	۳۱/۹۲	۳۶/۴۶	۳۷/۲۲	۳۳/۱۰	۲۶/۸۲	۱۹/۹۹	۱۵/۴۳	۸/۹۹	۵/۶۸	A2
۱۰	۱۵/۸۹	۲۴/۱۴	۳۱/۹۴	۳۶/۵۴	۳۷/۲۴	۳۲/۹۹	۲۶/۶۵	۱۹/۹۵	۱۵/۱۱	۸/۵۵	۵/۶۲	B1
۶۸/۰۳	۵۹/۸۶	۲۶/۵۷	۱/۴۴	۱/۶۶	۰/۷۹	۳/۴۵	۲۷/۱۶	۶۸/۸۲	۸۴/۷۱	۴۰/۳۱	۶۲/۷۲	پایه
۶۳/۴۴	۸۰/۵۵	۵۵/۶۱	۳/۴۱	-۰/۲۸	۰/۴	۳/۲۹	۳۲/۶۱	۸۴/۲۴	۷۸/۲۸	۳۸/۰۳	۷۹/۲۹	A1B
۶۸/۹۵	۷۴/۱۸	۳۹/۰۶	۳/۰۴	۰/۴	۰/۲	-۰/۱۶	۲۸/۸۹	۶۰/۴۴	۸۷/۶۱	۴۶/۴۸	۸۳/۱۷	A2
۷۷/۱۴	۸۰/۵۳	۴۶/۳۵	۲/۵	-۰/۴۱	۰/۱	۱/۰۵	۲۶/۳۲	۶۶/۲۲	۹۳/۸۷	۴۹/۸۳	۷۶/۸۲	B1
۸/۶۲	۱۱/۱۳	۱۶/۰۹	۲۱/۶۳	۲۵/۱۱	۲۷/۵۱	۲۸/۲۵	۲۴/۲۴	۱۹/۹۱	۱۵/۸۲	۱۲/۶۴	۹/۷۸	پایه
۱۰/۶۷	۱۳/۸۱	۱۶/۱۵	۱۷/۶۳	۲۲/۸	۲۷/۳۹	۲۸/۵	۲۵/۹۱	۲۱/۶۴	۱۸/۴۸	۱۴/۹۱	۱۱/۹۱	A1B
۱۰/۷۵	۱۳/۱۷	۱۶/۱۵	۱۷/۶۴	۲۲/۵۹	۲۷/۲۴	۲۸/۵۶	۲۵/۹۷	۲۱/۸	۱۸/۶۸	۱۴/۸۳	۱۱/۷۷	A2
۱۰/۷۲	۱۳/۱۴	۱۶/۱۸	۱۷/۶۸	۲۲/۴۹	۲۷/۰۵	۲۸/۴۵	۲۵/۹۸	۲۱/۸	۱۸/۷۳	۱۴/۷۵	۱۱/۸۳	B1

جدول ۴. میانگین ۲۰ ساله پارامترهای اقلیمی برای دوره پایه و دوره آتی سه سناریوی تغییر اقلیمی A1B, B1 و A2 مدل Hadcm3 برای ۲۰ سال آتی

دوره آینده (۲۰۱۶ - ۲۰۳۶)			دوره پایه (۱۹۹۶ - ۲۰۱۵)	
B1	A2	A1B		
۸/۸۳	۸/۹۰	۸/۸۶	۴/۶۳	دمای کمینه
۲۲/۲۲	۲۲/۲۹	۲۲/۲۶	۱۹/۸۷	دمای بیشینه
۴۷۲/۹۱	۴۶۲/۵۷	۴۵۴/۳۵	۴۴۱/۴۰	بارش
۱۸/۳۸	۱۸/۴۳	۱۸/۴۴	۸/۵۰	ساعت آفتابی

نتیجه گیری

در پژوهش حاضر داده‌ها به منظور بررسی و ارزیابی تغییرات بارش، دمای کمینه، دمای بیشینه و تابش با توجه به تغییر اقلیم ایستگاه سینوپتیک بروجرد طی سال‌های (۲۰۱۶-۲۰۳۵) با استفاده از خروجی مدل HadCM3 با سه سناریوی A1B, A2 و B1 با استفاده از مدل LARS - WG ریزمقیاس شد. پس از ارزیابی مدل برای دوره پایه (۱۹۹۶-۲۰۱۵)، بر اساس شاخص‌های خطاسنجی و ضریب همبستگی تعیین صحت و دقت مدل انجام شد. با استفاده از نمودارهای میانگین انحراف معیار تغییرات بارش شبیه‌سازی شده در بیشتر ماه‌ها در حال افزایش بوده و بیشتر از بارش مشاهداتی است. همچنین، میانگین دمای کمینه و بیشینه تولید شده در بیشتر ماه‌ها از مقدار مشاهده شده کمتر است. تغییرات ساعت‌های آفتابی تولید شده در بیشتر ماه‌ها بیشتر از تغییرات میانگین مشاهده شده است. همچنین، میانگین ۲۰ سال آتی (۲۰۱۶-۲۰۳۶) دمای کمینه و بیشینه در بیشتر ماه‌ها روند افزایشی

بعد از اطمینان از صحت و کارایی مدل LARS - WG در شبیه‌سازی پارامترهای هواشناسی، دمای کمینه، دمای بیشینه، بارش و ساعت آفتابی در ایستگاه بروجرد، داده‌های روزانه پارامترهای یاد شده سه سناریوی A1B, B1 و A2 مدل Hadcm3 برای ۲۰ سال آتی شبیه‌سازی شد که نتایج در جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، میزان دمای کمینه و دمای بیشینه در بیشتر ماه‌های سال روند افزایشی داشته است. همچنین، میزان بارندگی و ساعت آفتابی در اغلب ماه‌های سال روند افزایشی داشته است. نتایج به دست آمده از پارامترهای دمای کمینه و بیشینه، بارش و ساعت آفتابی شبیه‌سازی شده ۲۰ سال آتی (۲۰۱۶-۲۰۳۶) نشان می‌دهد مجموع پارامترهای مد نظر در ۲۰ سال آتی در مقایسه با ۲۰ سال پایه روند افزایشی داشته است و هر سه سناریو این میزان افزایش را نشان می‌دهند. نتایج در جدول ۴ ارائه شده است.

- [11]. Chen H, Guo J, Zhang Z, Xu C-Y. Prediction of temperature and precipitation in Sudan and South Sudan by using LARS-WG in future. *Theor Appl Climatol*. 2013;113(3-4):363-75.
- [12]. Hashemi MZ, Shamseldin AY, Melville BW. Comparison of SDSM and LARS-WG for simulation and downscaling of extreme precipitation events in a watershed. *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2011;25(4):475-84. [Persian]
- [13]. Semenov MA, Barrow EM, Lars-Wg A. A stochastic weather generator for use in climate impact studies. *User Man Herts UK*. 2002;
- [14]. In IC and LU, the Chesapeake Bay Watershed, Ellicott City MC for W, Protection. Cappiella, Karen and Kenneth Brown. In 2001.
- [15]. Rajabi A, Sedghi H, Eslamian SS, Musavi H. Comparison of Lars-WG and SDSM downscaling models in Kermanshah (Iran). *Ecol Env Conserv*. 2010;16(4):1-7. [Persian]
- [16]. A, Alizadeh. GH K. Effect of Climate Change on Agricultural Water Use in Mashhad Valley. *Geogr Res*. 2002;(65,66):189-201. [Persian]
- [17]. Bernard C. *Urban Water Cycle Processes and Interactions* [Internet]. Chapters Taylor & Francis. 2007. Available from: <http://ganj.irandoc.ac.ir/articles/557901>
- [18]. Saleh Niya, N. Alizadeh, A. Sayari N. Comparison of two LARS-WG and ASD microscopic models in prediction of rainfall and temperature under changing conditions and in different weather conditions. *Irrig & drainage Iran*. 2014;8(2):233-45. [Persian]
- [19]. Rohi, F., Mirrokni, M., Massah Bovani, U., and Nasresfahani L. Performance Assessment of SDSM model in downscaling rainfall and precipitation In hot and dry climates (Case study: hamdidi of Yazd and Tabas station). *Geophysic*. 2016;9(4):104-25. [Persian]
- [20]. Hajjarpour, A. Yousefi, M. and Kamkar B. Precision test of simulators LARS- WG, Weather Man and CLIMGE Ninthree different climatessimulated (Gorgan, Gonbad and Mashhad). *Geogr Dev*. 2014;35(59):201-16. [Persian]
- [21]. Yarmoradi BN zahra. Predicting the Climatic Parameters Changes of Lorestan Province in the next 50 years using the HADCM3 model. *Sci - Res Q Geogr Data*. 2017;26(101):143-54. [Persian]
- داشته است. درضمن، بارندگی و ساعت‌های آفتابی نیز در اغلب ماه‌های سال روند افزایشی داشته‌اند و سه سناریو این روند افزایشی را نشان می‌دهند.
- منابع**
- [1]. Seyyed Kaboli, H. AkhodAli, A.M. Masah Bavani, A.R. Radmanesh F. A Downscaling Model Based on K-nearest neighbor (K-NN) Non-parametric Method. *Water Soil*. 2012;26(4):779-808. [Persian]
- [2]. R Esmaili, H Ataie, G Fallah Ghalhary. Assessment of Climate Change Impact on the Future Development of Apricot and Almond Species. (Case Study: Khorasan Razavi Province). *Agric Sci Sustain Prod*. 2012;21(1):145-63. [Persian]
- [3]. Rezaei, M. Nohtani, M. Moghaddamnia, A. Abkar, A. Rezaei M. Performance Evaluation of Statistical Downscaling Model (SDSM) in Forecasting Precipitation in two Arid and Hyper arid Regions. *Water Soil*. 2014;28(4):836-45. [Persian]
- [4]. Jones RN. Managing uncertainty in climate change projections-issues for impact assessment. *Clim Change*. 2000;45(3-4):403-19.
- [5]. Wilby RL, Dawson CW. The statistical downscaling model: insights from one decade of application. *Int J Climatol*. 2013;33(7):1707-19.
- [6]. Jim Wulliman PE. *Learning from Nature Reducing Urban Storm Impact*. London. 2005;
- [7]. Abassi, F. Malbusi, S. Babaeian, I. Asmari, M. Borhani R. Climate Change Prediction of South Khorasan Province During 2010-2039 by Using Statistical Downscaling of ECHO-G Data. *Water & Soil*. 2010;24(2):218-33. [Persian]
- [8]. Alizadeh, A. Sayari, N. Hesami Kermani, M. R. Bannayan Aval, M. Farid Hossaini A. Assessment of Climate Change Potential Impacts on Agricultural Water Use and Water Resources of Kashaf rood basin. *Water Soil*. 2010;24(4):815-35. [Persian]
- [9]. Carter TR, Hulme M, Lal M. IPCC-TGCIAGuidelines on the use of scenario data for climate impact and adaptation assessment, version 1. IPCC, Task Gr Scenar Impact Assess. 1999;
- [10]. B. Ababaei FMT sohrabi. Evaluation of the performance of the LARS-WG model at 12 coastal meteorological stations Iran. *Iran Water Res*. 2011;5(9):217-22. [Persian]