

پیش‌بینی تغییرات اقلیمی با استفاده از الگوریتم نرو-فازی (مطالعه‌ی موردی: ایستگاه‌های تهران و تبریز)

نازلی نورینی* (دانشجوی کارشناسی ارشد)
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی کرمان

مسعودرضا حسامی کرمانی (استادیار)
بخش مهندسی عمران، دانشگاه شهید باهنر کرمان

مدل‌های جهانی اقلیم (GCMs) به‌علت قدرت تفکیک مکانی پایین، قابل استفاده در مطالعات منطقه‌یی نیستند. به همین منظور از روش‌هایی موسوم به ریزمقیاس‌نمایی آماری برای تبدیل خروجی مدل‌های GCM به مقیاس منطقه‌یی و محلی استفاده می‌شوند. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم نرو-فازی (ANFIS) و روش خوشه‌بندی فازی داده‌ها (FCM)، به مدل‌سازی اقلیمی در تهران و تبریز پرداخته شده است. برای پایداری مدل، ۱۰۰ سناریو شبیه‌سازی شده است.

میانگین دمای بیشینه در ایستگاه تهران در دوره‌ی پایه‌ی ۱۹۶۱-۱۹۹۰، ۲۲/۴۸ درجه‌ی سانتی‌گراد است و در هر یک از دوره‌های ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ به ترتیب ۲۳/۵۲، ۲۵/۰۵ و ۲۶/۲۷ درجه‌ی سانتی‌گراد پیش‌بینی شده است. بارش روزانه در این ایستگاه در دوره‌های پایه و آینده به ترتیب ۰/۶۳، ۱/۱ و ۱/۱۷ میلی‌متر در روز به دست آمده است. در ایستگاه تبریز، میانگین دمای بیشینه ۱۷، ۱۸/۳۱، ۱۹/۸۱ و ۲۱/۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و میانگین بارش روزانه ۰/۸۴، ۰/۶۰، ۰/۴۷ و ۰/۳۳ میلی‌متر در روز به ترتیب برای هر یک از دوره‌های مدل‌سازی حاصل شده است. نتایج، نشان‌دهنده‌ی افزایش درجه‌ی حرارت بیشینه در هر دو ایستگاه و رفتار متفاوت بارش است.

واژگان کلیدی: تغییرات اقلیمی، مدل‌های جهانی اقلیم، ریزمقیاس‌نمایی آماری، نرو-فازی، نسل سوم مدل‌های جهانی اقلیم کانادا.

۱. مقدمه

درک برخی از فرآیندهای هیدرولوژیکی و بررسی تأثیر عواملی مانند تغییرات اقلیمی از اصول توسعه و پیشرفت در منابع آب محسوب می‌شود. به همین منظور در سال‌های اخیر، توجه بسیاری از دانشمندان محیط زیست به مسئله‌ی گرم‌شدن تدریجی هوا و اثرات این پدیده در محیط زیست مانند توان افزایش روزهای سرد، شب‌های سرد، تولید شبنم کمتر در مناطق خشک، موج گرمای مداوم در بسیاری از مناطق خشک، و افزایش سطح بالای دریا... جلب شده است.^[۱-۳]

گرم‌شدن زمین یکی از عوامل تهدیدکننده‌ی حیات بر روی کره‌ی زمین تلقی می‌شود. بنابراین، بهتر است برای درک ماهیت پیچیده‌ی جو و پیش‌بینی تغییرات آن را مدل کرد.

خروجی مدل‌های جهانی اقلیم برای بررسی تغییرات اقلیمی، از سناریوهای

* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۱۱/۱۵، اصلاحیه ۱۳۹۱/۵/۱۶، پذیرش ۱۳۹۱/۷/۲۵.

پیشنهادی هیئت دول اقلیم به منظور پیش‌بینی تغییرات اقلیم استفاده می‌کنند. تا کنون سه نسل متفاوت از خروجی مدل‌های اقلیم در اختیار پژوهشگران قرار گرفته است. تفاوت نسل دوم خروجی مدل‌های جهانی اقلیم و نسل سوم، در پارامترهای جوی است و در پارامترهای اقیانوسی تغییری ایجاد نشده است. از پارامترهای جوی تغییر یافته‌شده در نسل سوم خروجی مدل‌های جهانی اقلیم نسبت به نسل دوم می‌توان به CLASS^۱ (واحد جدیدی برای بیان فرآیندهای سطح زمین)، رفتار جدید انتقال بخار آب، و مدل‌سازی ابرهای متراکم اشاره کرد.^[۴]

نسل کنونی مدل‌های جهانی اقلیم، به‌علت قدرت تفکیک‌پذیری پایین، در مطالعات کاربردی با ابعاد کوچک‌تر از ابعاد خود کارایی ندارند. مدل‌های جهانی اقلیم محاسبات دینامیک سیالات را در مقیاس قاره‌یی به‌خوبی انجام می‌دهند، ولی فرآیندهای کوچک مقیاس را پارامتری نمی‌کنند. پارامتری‌کردن به معنی جایگزین‌کردن یک فرآیند کوچک مقیاس یا پیچیده یا یک فرآیند ساده‌تر یا مدل‌شده در GCM است.^[۵] در این راستا، کاهش مقیاس به منزله‌ی روشی برای درون‌یابی متغیرهای

جوی بزرگ‌مقیاس و استخراج داده‌های کوچک‌مقیاس هواشناسی، ابداع شد.^[۹-۶] پایه و اساس این روش بر این فرض استوار است که بین فرآیندهای جوی با مقیاس‌های متفاوت می‌توان رابطه‌ی پیدا کرد. از الگوهای آب و هوایی بزرگ‌مقیاس برای مدل‌کردن بسیاری از پارامترهای هواشناسی استفاده شده است؛ مانند مدل‌سازی وقوع بارندگی در واشنگتن،^[۱۰] الگوی زمان-مکان بارندگی روزانه در حوضه‌ی رو،^[۱۱] و نبراسکای شرقی.^[۱۲] دمای میانگین و بارندگی ماهانه در ایالت آرگون،^[۸] وقوع بارندگی شدید و خشکی در حوضه‌ی رودخانه‌ی دلور،^[۹] وقوع بارندگی‌های نادر در جزایر بریتانیا،^[۱۳] بارندگی زمستانه در ابریا.^[۱۴] اولین استفاده از رگرسیون در زمینه‌ی تغییرات اقلیم در سال ۱۹۸۴ صورت گرفت.^[۱۳] و بین میانگین ماهانه درجه‌ی حرارت و بارندگی، و خروجی‌های مدل‌های جهانی اقلیم با استفاده از رگرسیون خطی رابطه‌ی پیدا شد. در سال ۱۹۹۶، برای اولین بار از شبکه‌های عصبی مصنوعی برای محاسبه‌ی بارندگی استفاده شد.^[۱۵] در سال ۱۹۹۳، نیز با استفاده از معیار همبستگی رابطه‌ی بین بارش در زمستان و الگوی فشار در سطح دریا برای اسپانیا پیدا شد.^[۱۶] همچنین در سال ۱۹۹۹، با استفاده از شبکه‌های عصبی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، بارش پیش‌بینی شد و مدلی دقیق با ترکیب این دو روش به دست آمد.^[۱۷] در سال ۲۰۰۰ هم مدلی برای بارش روزانه با استفاده از شبکه‌های عصبی پیشنهاد شد، پارامترهای استفاده‌شده در این مدل شامل غلظت سطح فشار ۵۰۰-۱۰۰۰ هکتوپاسکال، ارتفاع ۵۰۰-۷۰۰ هکتوپاسکال از سطح دریا، و رطوبت سطح ۷۰۰ هکتوپاسکال بود؛ و نتایج، دقت بالای مدل شبکه‌های عصبی را اثبات می‌کرد.^[۱۸] در سال ۲۰۰۲، نیز اولین مدل رایانه‌ی برای انجام ریزمقیاس‌نمایی با استفاده از رگرسیون خطی چندمتغیره به نام SDSM^۲ ارائه شد.^[۱۹] در سال ۲۰۰۲، هم با استفاده از قانون فازی به پیش‌بینی بارش پرداخته شد. همچنین در سال ۲۰۰۶، با بهره‌گیری از الگوریتم شبکه‌ی عصبی زمانی به محاسبه‌ی ریزمقیاس‌نمایی آماری و شاخص‌های حدی اقلیمی پرداخته شد.^[۲۰] در سال ۲۰۰۶، مدل‌سازی بارش برای تغییرات اقلیمی با روش ماشین برداری^۳ انجام شد که بر این اساس، روش ماشین برداری روشی قابل اعتماد برای مدل‌سازی بارش است.^[۲۱] در سال ۲۰۰۸، در یونان نیز با مقایسه‌ی دو مدل رگرسیونی و شبکه‌ی عصبی مصنوعی تغییرات اقلیم بررسی شد؛ و براساس نتایج به دست آمده، شاخص‌های بارش با دقت پایین‌تری با شبکه‌ی عصبی نسبت به مدل رگرسیونی مدل شد.^[۲۲] در سال ۲۰۰۸، نرم‌افزاری به نام ASD برای پیش‌بینی اقلیمی ارائه شد.^[۲۳] در SDSM انتخاب متغیرهای غالب توسط کاربر و با قضاوت او انجام می‌شود، اما در ASD این مرحله به صورت خودکار و با استفاده از دو روش رگرسیون گام به گام و همبستگی جزئی صورت می‌گیرد. از طرفی، در ASD تفاوت بین GCM و NCEP در آینده نیز اعمال شده است. در سال ۲۰۰۸، به ریزمقیاس‌نمایی تغییرات دمای حوضه‌ی مدیترانه با استفاده از مدل‌های همبستگی استاندارد و خروجی‌های جهانی اقلیم، HadCM^۳ و ECHAM^۴/OPYC^۳ پرداخته شده است.^[۲۴] در سال ۲۰۱۰، هم برای ریزمقیاس‌نمایی بارش، به مدل‌سازی بارش با استفاده از روش آمار پالس مستطیلی Neyman-Scott پرداخته شد و نتایج خوبی و دقیقی به دست آمد. براساس این مدل‌سازی، شاخص‌های حدی بارش با دقت خوب مدل شدند.^[۲۵]

یکی از ابزارهای جدید برای پیش‌بینی بارش و دما، استفاده از الگوریتم‌های تکاملی^۴ است. اصطلاح «محاسبات تکاملی» اولین بار در سال ۱۹۹۱ مورد استفاده قرار گرفت و نظر پژوهشگرانی که بر روی زمینه‌های مختلف این نوع محاسبات کار می‌کردند، را به خود جلب کرد. نقطه‌ی قدرت واقعی مدل‌های محاسبات تکاملی، قوی بودن آنهاست. در این بحث، قوی بودن به معنای این است که الگوریتم می‌تواند در حل بسیاری از مسائل، با کمیته‌ی تنظیمات برای در نظر گرفتن کیفیت حل مسئله‌ی

خاص مورد استفاده قرار گیرد. معمولاً، یک الگوریتم تکاملی به تعیین طول بردار مورد نیاز برای حل مسئله، بعضی جزئیات برای کدگذاری، و یک تابع برازش نیاز دارد. بقیه‌ی قسمت‌های الگوریتم نیازی به تغییر ندارند. در نهایت، روش‌های قوی معمولاً سریع هستند و پیاده‌سازی آسانی دارند. کاربرد محاسبات تکاملی، حوزه‌های وسیعی مانند: ۱. برنامه‌ریزی، ۲. طراحی، ۳. شبیه‌سازی و شناسایی، ۴. کنترل، ۵. دسته‌بندی را در بر می‌گیرند. شبیه‌سازی شامل در نظر گرفتن مدل یا طرحی برای سیستم و تشخیص رفتار سیستم در این مدل است. بعضی اوقات به علت عدم اطمینان از رفتار سیستم در شرایط مطمئن از شبیه‌سازی استفاده می‌شود. در دیگر موارد، رفتار سیستم برای ما شناخته شده است، اما هدف این پژوهش از انجام شبیه‌سازی، اندازه‌گیری دقت مدل است.

امروزه، پژوهشگران با استفاده از روش‌های هوشمند، روش‌های جدیدی را با داده‌های متنوع و در مکان‌های متفاوت برای پیش‌بینی پارامترهای هواشناسی پیشنهاد می‌کنند. در این پژوهش، با استفاده از الگوریتم نو-فازی به مدل‌سازی و پیش‌بینی درجه حرارت‌های پیشینه و بارش پرداخته شده است.

۲. مواد و روش‌ها

۱.۲. منطقه‌ی مورد مطالعه و داده‌های استفاده‌شده

سیستم مشاهده‌ی اقلیم جهانی (GCOS)^۵ در سال ۱۹۹۲ به منزله‌ی قسمتی از سازمان هواشناسی جهانی و چند سازمان وابسته به سازمان ملل تأسیس شد.

هدف از ایجاد این سیستم، دسترسی مطمئن پژوهشگران به مشاهدات و اطلاعات مربوط به اقلیم شامل: خصوصیات چند نظمی فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی فرآیندهای اتمسفری، اقیانوسی، هیدرولوژیکی و زمینی است. از داده‌های GCOS در دیده‌بانی اقلیمی، تغییرات اقلیمی، ارزیابی تأثیر و تغییرپذیری اقلیم، کاربرد آن در پیشرفت اقتصاد جهانی، مدل‌سازی و پیش‌بینی اقلیمی استفاده شده است.

در سراسر دنیا از کل ۱۰۲۵ ایستگاه GCOS زمینی موجود در دنیا، تعداد ۵۲ ایستگاه در جنوب و جنوب غربی آسیا قرار گرفته است. در ایران، ۷ ایستگاه زیر نظر سازمان مشاهدات اقلیمی جهانی (GCOS) فعالیت می‌کنند که نام این ایستگاه‌ها در جدول ۱ آورده شده است (شکل ۱).^[۲۶]

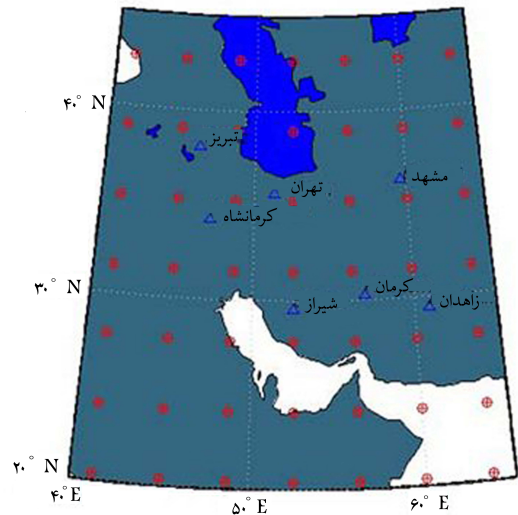
در این پژوهش با استفاده از اطلاعات ایستگاه‌های GCOS تبریز و تهران، دما و بارش پیش‌بینی شده است؛ و داده‌های مورد استفاده، داده‌های مشاهداتی بارش و دماست و برای انجام روش ریزمقیاس‌نمایی آماری از داده‌های موسوم به NCEP^۶ استفاده شده است.

جدول ۱. مشخصات جغرافیایی ایستگاه‌های سیستم مشاهده‌ی اقلیم جهانی در ایران.

| نام ایستگاه | عرض جغرافیایی | طول جغرافیایی | ارتفاع (متر) |
|---------------|---------------|---------------|--------------|
| تبریز | ۳۸ °۵N | ۴۶ ۱۷E | ۱۳۶۱ |
| مشهد | ۳۶ ۱۶N | ۵۹ ۳۸E | ۹۹۹ |
| تهران-مهرآباد | ۳۵ ۴۱N | ۵۱ ۱۹E | ۱۱۹۱ |
| کرمانشاه | ۳۴ ۲۱N | ۴۷ ۰۹E | ۱۳۱۹ |
| کرمان | ۳۰ ۱۵N | ۵۶ ۵۸E | ۱۷۵۴ |
| شیراز | ۲۹ ۳۲N | ۵۲ ۳۶E | ۱۴۸۴ |
| زاهدان | ۲۹ ۲۸N | ۶۰ ۵۳E | ۱۳۷۰ |

جدول ۲. لیست متغیرهای NCEP.

| شماره | نام متغیر |
|-------|--------------------------------------|
| ۱ | فشار سطح صفر |
| ۲ | قدرت جریان هوا سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال |
| ۳ | سرعت مداری سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال |
| ۴ | سرعت نصف‌النهاری سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال |
| ۵ | سرعت چرخشی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال |
| ۶ | جهت جریان باد سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال |
| ۷ | واگرایی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال |
| ۸ | قدرت جریان هوا سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال |
| ۹ | سرعت مداری سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال |
| ۱۰ | سرعت نصف‌النهاری سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال |
| ۱۱ | سرعت چرخشی سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال |
| ۱۲ | جهت جریان باد سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال |
| ۱۳ | واگرایی سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال |
| ۱۴ | ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال |
| ۱۵ | ارتفاع ژئوپتانسیل سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال |
| ۱۶ | قدرت جریان هوا سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال |
| ۱۷ | سرعت مداری سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال |
| ۱۸ | سرعت نصف‌النهاری سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال |
| ۱۹ | سرعت چرخشی سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال |
| ۲۰ | جهت جریان باد سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال |
| ۲۱ | واگرایی سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال |
| ۲۲ | رطوبت ویژه سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال |
| ۲۳ | رطوبت ویژه سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال |
| ۲۴ | رطوبت ویژه در سطح زمین |
| ۲۵ | دمای متوسط در ارتفاع ۲ متر |



شکل ۱. موقعیت ایستگاه‌های GCOS.

این داده‌ها شبکه‌بندی شد بر روی شبکه‌های GCM درون‌یابی شده‌اند و در روش ریزمقیاس نمای رگرسیونی به منزله‌ی متغیر مستقل استفاده شده‌اند. از داده‌های NCEP برای واسنجی و ارزیابی مدل، و از داده‌های GCM برای پیش‌بینی تغییرات اقلیمی در زمان آینده استفاده شده است. تمامی داده‌های NCEP، قبل از درون‌یابی خطی برای مغایرت با داده‌های CGCM^۳، براساس داده‌های ۶ ساعته‌ی روزانه، میانگین‌گیری شده‌اند.^[۲]

۲.۲. انتخاب متغیرهای غالب

جدول ۲ لیست متغیرهای مستقل NCEP را نمایش می‌دهد. انتخاب متغیرهای مستقلی که در مدل نهایی از آنها استفاده می‌شود، به دلیل تأثیر مستقیم در مشخصات مدل و نتایج، یکی از مهم‌ترین مراحل انجام کاهش مقیاس آماری است. متغیرهای غالب (متغیرهای مستقل انتخاب شده) باید از نظر فیزیکی با متغیرهای وابسته مرتبط باشند، از نظر آماری همبستگی بالایی با متغیر وابسته داشته باشند، در دوره‌ی زمانی مورد مطالعه در دسترس و در نهایت با دقت خوبی مدل شده باشند. در این پژوهش متغیرهای مستقل با استفاده از نرم‌افزار ASD انتخاب شدند؛^[۲۳] که این مدل، الهام گرفته‌شده از روش ریزمقیاس نمای SDSM است.

در جدول ۳، متغیرهای انتخاب شده در مدل با استفاده از روش رگرسیون گام به گام در ایستگاه‌های تهران و تبریز نشان داده شده است. همان‌طور که از جدول پیداست، متغیرهای انتخاب شده برای دمای بیشینه تقریباً یکسان‌اند و فشار سطح صفر در تمامی پارامترها برای دو ایستگاه انتخاب شده است. در دمای بیشینه، ۴ پارامتر مشترک در دو ایستگاه مشاهده می‌شود، ولی برای بارندگی متغیرهای مختلفی وجود دارد که نشان از پیچیدگی پدیده‌ی بارندگی است. واریانس دمای بیشینه برای ایستگاه‌های تهران و تبریز به ترتیب ۹۶٪ و ۹۵٪ و برای بارش ۲۰٪ و ۱۱٪ محاسبه شده است.

۳.۲. مدل‌سازی با استفاده از الگوریتم نرو-فازی

در این پژوهش با استفاده از الگوریتم تکاملی نرو-فازی (ANFIS) تغییرات اقلیمی در ۲ ایستگاه تبریز و تهران مدل‌سازی شد.

در بین ترکیب‌های مختلف موجود در محاسبات نرم، ترکیب منطق فازی با

شبکه‌های عصبی در قالب سیستم‌های نرو-فازی جلوه‌ی بیشتری دارد. این سیستم‌ها نقش مهمی در استنتاج قواعد از مشاهدات ایفا می‌کنند. روشی کارا در این راستا توسط دکتر راجر جانگ در سال ۱۹۹۵، با عنوان ANFIS توسعه داده شده است. در چنین سیستم‌هایی به وسیله‌ی ورودی و خروجی‌های موجود و با کمک دانش بشری، در قالب قوانین اگر-آنگاه فازی برای ورودی دلخواه، خروجی مطلوب حاصل خواهد شد. در این پژوهش، از مدل فازی Sugeno مرتبه‌ی اول استفاده شده است. مدل‌سازی دما به روش نرو-فازی را می‌توان به صورت رابطه‌ی ۱ تعریف کرد:

$$T_i = \text{ANFIS}(P) + e_i \quad (1)$$

که در آن، T_i دمای روزانه‌ی میانگین، بیشینه و یا کمینه است و P متغیرهای مستقل و e_i خطای مدل هستند.

وقوع و مقدار بارندگی در ۲ مرحله با استفاده از معادله‌های ۲ و ۳ مدل شده‌اند:

$$O_i = \text{ANFIS}(P) \quad (2)$$

$$R_i = \text{ANFIS}(P) + e_i \quad (3)$$

در این معادله‌ها، O_i و R_i به ترتیب وقوع و میزان بارش، و P متغیرهای مستقل هستند. بعد از مدل‌سازی، مقدار e_i (خطای مدل) با فرض اینکه از توزیع نرمال

جدول ۳. متغیرهای غالب انتخاب شده برای ایستگاه تبریز و تهران.

| پارامتر | تبریز | تهران |
|-------------|--|---|
| دمای بیشینه | فشار سطح صفر واگرایی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال جهت جریان باد سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال واگرایی سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال دمای متوسط در ارتفاع ۲ متری | فشار سطح صفر واگرایی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال سرعت نصف النهاری سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال جهت جریان باد سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال دمای متوسط در ارتفاع ۲ متری |
| بارندگی | فشار سطح صفر قدرت جریان هوا سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال جهت جریان باد سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال قدرت جریان هوا سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال سرعت مداری سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال | فشار سطح صفر واگرایی سطح ۵۰۰ هکتوپاسکال سرعت نصف النهاری سطح ۱۰۰۰ هکتوپاسکال رطوبت ویژه ی سطح ۸۵۰ هکتوپاسکال دمای متوسط در ارتفاع ۲ متری |

پیروی می‌کنند، محاسبه می‌شود (رابطه‌ی ۴):

$$e_i = \sqrt{\frac{VIF}{12}} z_i S_e + b \quad (4)$$

در این رابطه b ، بایاس^۷ مدل، VIF ^۸ عامل تورم واریانس، z_i عدد تصادفی با توزیع نرمال و S_e خطای معیار تخمین در دوره‌ی واسنجی است. برای مدل‌کردن وقوع بارندگی از عدد تصادفی r ($0 \leq r \leq 1$) با توزیع یکنواخت استفاده شده است؛ اگر $r \leq 0$ باشد، بارندگی اتفاق می‌افتد. در هنگام استفاده از داده‌های NCEP برای واسنجی و ارزیابی مدل، عامل تورم واریانس ۱۲، و بایاس ۰ در نظر گرفته شده است. در هنگام استفاده از داده‌های GCM برای تخمین مقادیر در آینده، مقادیر بایاس و عامل تورم واریانس از رابطه‌های ۵ و ۶ محاسبه شده است.^[۲۳]

$$b = M_{obs} - M_d \quad (5)$$

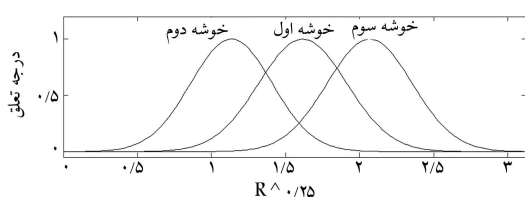
$$VIF = \frac{12 (V_{obs} - V_d)}{S_e^2} \quad (6)$$

در این مدل‌سازی، برای خوشه‌بندی از روش میانگین فازی، که زیرشاخه‌ی روش C-Mean است، استفاده شد. برای خوشه‌بندی به روش C-Mean شکل‌های مختلفی بیان شده است؛ ولی همه‌ی آنها، دارای فرآیندی تکراری هستند که برای تعدادی ثابت از خوشه‌ها، سعی در تخمین این موارد دارند:

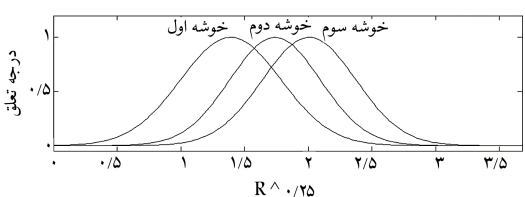
۱. به دست آوردن نقاطی به منزله‌ی مراکز خوشه‌ها، این نقاط در واقع همان میانگین نقاط متعلق به هر خوشه هستند.

۲. نسبت دادن هر نمونه‌ی داده به یک خوشه، که آن داده کمترین فاصله تا مرکز آن خوشه را داشته باشد.

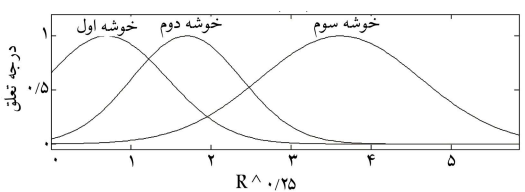
در مدل‌سازی درجه‌ی حرارت بیشینه، تعداد خوشه‌ها برای هر ماه به صورت جداگانه براساس ضریب تعیین مدل بین داده‌ها و نتایج مدل در مرحله‌ی کالیبراسیون برای هر ایستگاه به دست آمده است. در بارش، در تمامی ماه‌ها برای مدل‌سازی وقوع، تعداد خوشه‌ها ۲ و برای مدل‌سازی مقدار بارش، تعداد خوشه‌ها ۳ در نظر گرفته شد. شکل توابع عضویت ماه فوریه برای بارش در ایستگاه تهران در شکل‌های ۲ الی ۶ مشاهده می‌شود.



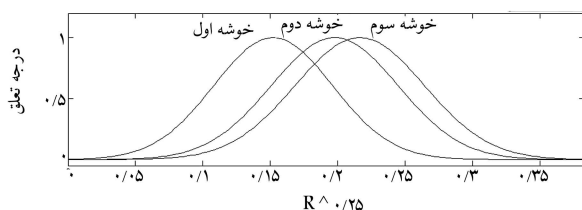
شکل ۱. توابع عضویت ماه فوریه ریشه‌ی چهارم بارش در ایستگاه تهران برای متغیر غالب شماره‌ی ۱.



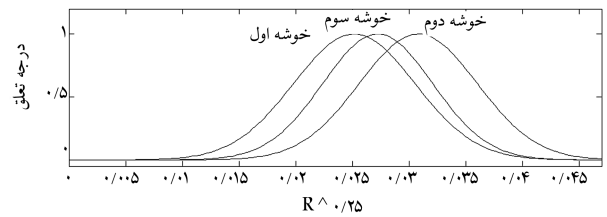
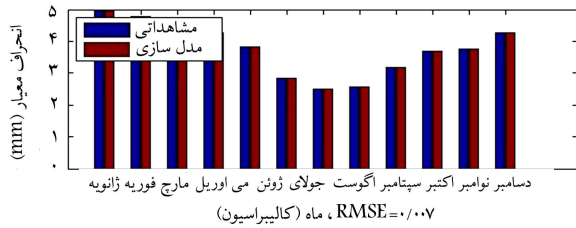
شکل ۲. توابع عضویت ماه فوریه ریشه‌ی چهارم بارش در ایستگاه تهران برای متغیر غالب شماره‌ی ۲.



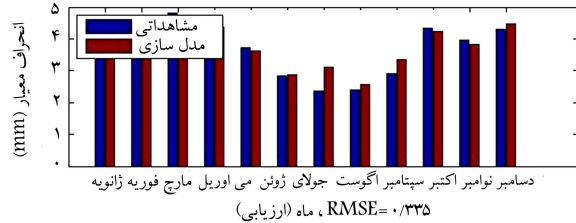
شکل ۳. توابع عضویت ماه فوریه ریشه‌ی چهارم بارش در ایستگاه تهران برای متغیر غالب شماره‌ی ۳.



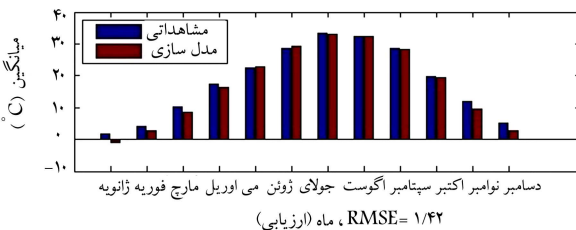
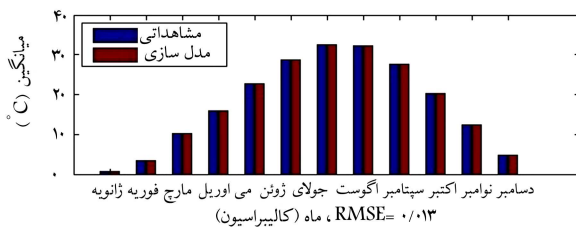
شکل ۴. توابع عضویت ماه فوریه ریشه‌ی چهارم بارش در ایستگاه تهران برای متغیر غالب شماره‌ی ۴.



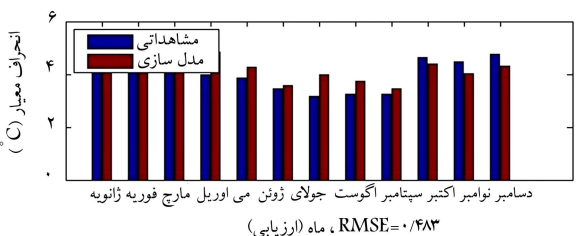
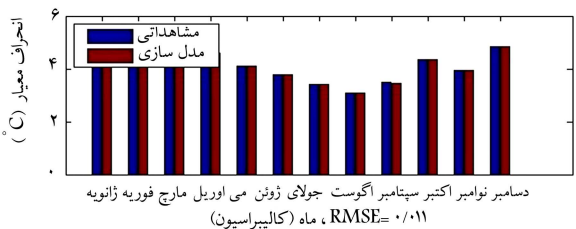
شکل ۶. توابع عضویت ماه فوریه ریشه‌ی چهارم بارش در ایستگاه تهران برای متغیر غالب شماره‌ی ۵.



شکل ۸. انحراف معیار درجه حرارت بیشینه در ایستگاه تهران در دو دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.



شکل ۹. میانگین درجه حرارت بیشینه در ایستگاه تبریز در دو دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.



شکل ۱۰. انحراف معیار درجه حرارت بیشینه در ایستگاه تبریز در دو دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.

۳. بحث و نتایج

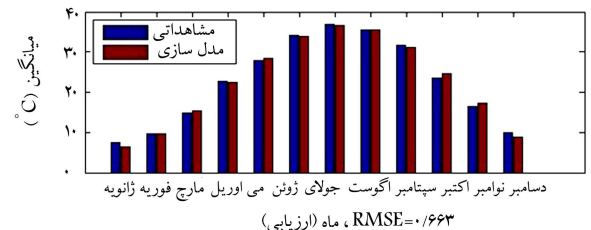
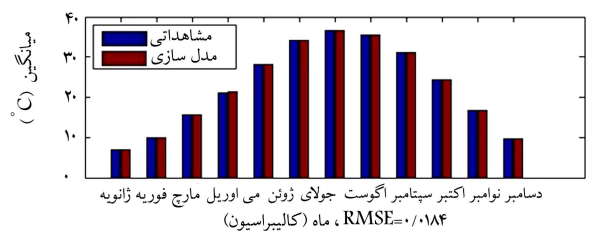
۱.۳. ارزیابی مدل‌های درجه حرارت با استفاده از داده‌های NCEP

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهده‌شده و خروجی مدل درجه حرارت بیشینه در دو دوره‌ی واسنجی (۱۹۶۱-۱۹۷۵) و ارزیابی (۱۹۷۶-۱۹۹۰) در ایستگاه تهران با استفاده از داده‌های NCEP را نشان می‌دهند. دقت محاسبه شاخص‌ها از جذر میانگین مربع خطا (RMSE) تعیین شده است. با توجه به نمودارها مشخص می‌شود که مقادیر محاسبه‌شده در دوره‌ی واسنجی نسبت به دوره‌ی ارزیابی دقت بیشتری دارند. این موضوع در RMSE مربوط به هر دوره نیز مشهود است.

در شکل‌های ۹ و ۱۰ به ترتیب میانگین و انحراف معیار مقادیر مشاهده‌شده و خروجی مدل درجه حرارت بیشینه در دو دوره‌ی واسنجی (۱۹۶۱-۱۹۷۵) و ارزیابی (۱۹۷۶-۱۹۹۰) در ایستگاه تبریز با استفاده از داده‌های NCEP مشاهده می‌شود. با توجه به نمودارها مشخص می‌شود که مقادیر محاسبه‌شده در دوره‌ی واسنجی نسبت به دوره‌ی ارزیابی دقت بیشتری دارند، که این موضوع در RMSE مربوط به هر دوره نیز مشهود است.

در جدول ۴، مقادیر جذر میانگین خطا در هر ایستگاه نشان داده شده و با خطای به‌دست‌آمده از ASD در همان ایستگاه مقایسه شده است.

در جدول ۴ مشاهده می‌شود که الگوریتم نو-فازی با دقت بسیار بالایی، پارامتر درجه حرارت بیشینه‌ی روزانه را مدل کرده است. مقادیر RMSE در دوره‌ی کالیبراسیون و در دوره‌ی ارزیابی مربوط به پارامترهای درجه حرارت نزدیک به صفر



شکل ۷. میانگین درجه حرارت بیشینه در ایستگاه تهران در دو دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.

جدول ۴. ریشه‌ی میانگین خطای شاخص‌های درجه حرارت بیشینه‌ی مدل‌سازی شده با ANFIS و ASD (سانتی‌گراد).

| | ASD | | نرو-فازی | |
|--------------|-------------|---------|-------------|---------|
| | کالیبراسیون | ارزیابی | کالیبراسیون | ارزیابی |
| تهران | ۰/۰۱۱ | ۰/۸ | ۰/۱۸۴ | ۰/۶۶۳ |
| انحراف معیار | ۰/۰۱۱ | ۰/۲ | ۰/۰۷۲ | ۰/۳۳۵ |
| تهران | ۰/۰۱۴ | ۱/۰۷ | ۰/۱۳ | ۱/۴۲ |
| انحراف معیار | ۰/۰۱۶ | ۰/۳۷ | ۰/۰۱۱ | ۰/۴۸۳ |

هستند. در مقایسه با نرم‌افزار ASD، در نتایج تغییر مشهودی دیده نمی‌شود.

۲.۳. ارزیابی مدل‌های بارش با استفاده از داده‌های NCEP

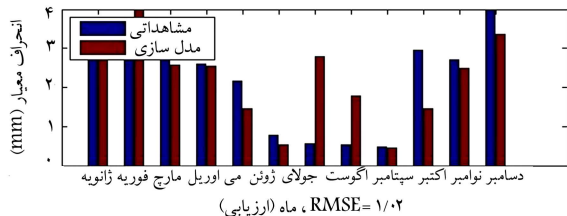
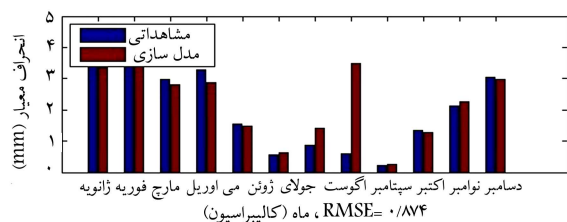
پارامتر بارندگی در ۲ مرحله‌ی وقوع و مقدار بارش مدل شده است. برای وقوع از شاخص درصد روزهای مرطوب و برای مقدار بارندگی از شاخص‌های میانگین و انحراف معیار استفاده شده است (جدول ۵ و شکل‌های ۱۱ تا ۱۶).

۳.۳. پیش‌بینی تغییرات اقلیمی

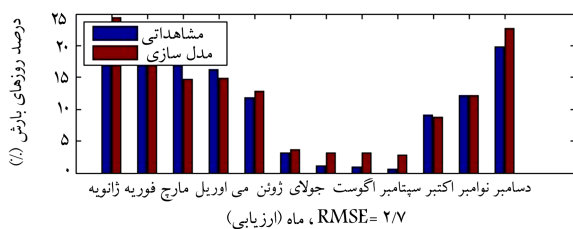
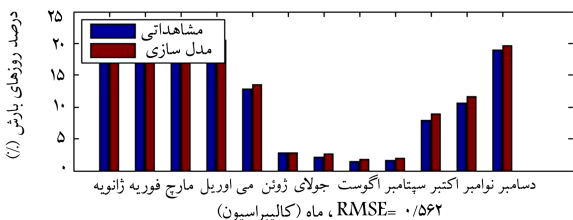
بعد از انجام واسنجی و ارزیابی مدل‌های درجه حرارت و بارندگی، با استفاده از داده‌های نسل سوم مدل جهانی اقلیم، پارامترهای درجه حرارت و بارش برای دوره‌ی

جدول ۵. ریشه میانگین خطای شاخص‌های بارش مدل‌سازی شده با ANFIS و ASD (میلی‌متر در روز).

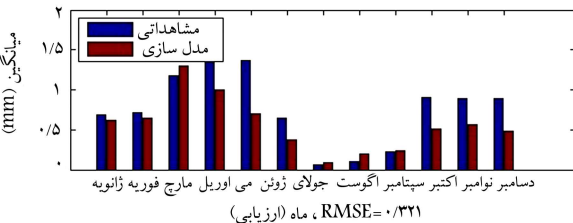
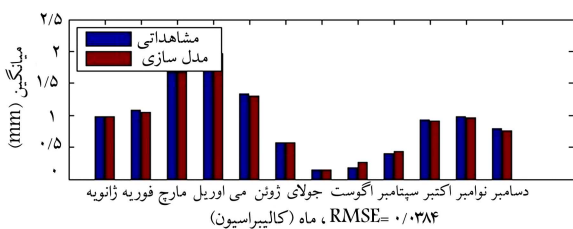
| | ASD | | نرو-فازی | |
|--------------|-------------|---------|-------------|---------|
| | کالیبراسیون | ارزیابی | کالیبراسیون | ارزیابی |
| تهران | ۰/۰۱۸ | ۰/۱۹ | ۰/۰۶۷ | ۰/۲۳ |
| انحراف معیار | ۰/۱۹ | ۰/۵۶ | ۰/۸۷ | ۱/۰۲ |
| تهران | ۰/۰۲۸ | ۰/۲۹ | ۰/۰۳۸ | ۰/۳۲ |
| انحراف معیار | ۰/۲۱ | ۰/۶۴ | ۰/۴۵ | ۰/۸۲ |
| تهران | ۰/۰۳۲ | ۳/۸۲ | ۰/۴۸ | ۴/۴۸ |
| انحراف معیار | ۰/۳۲ | ۰/۳۲ | ۰/۴۸ | ۰/۴۸ |



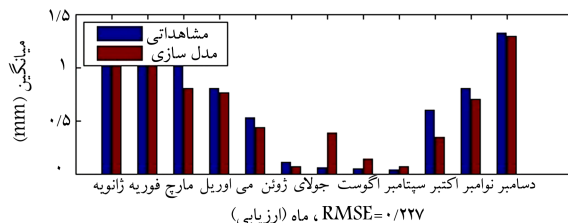
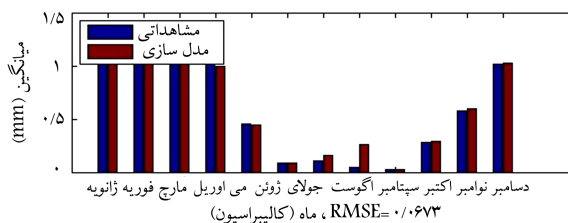
شکل ۱۲. انحراف معیار بارندگی روزانه بر حسب میلی‌متر در روز در ایستگاه تهران در ۲ دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.



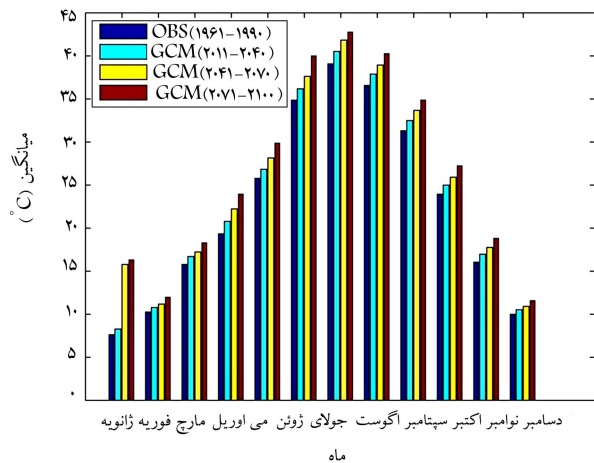
شکل ۱۳. تعداد روزهای بارندگی در هر ماه در ایستگاه تهران در ۲ دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.



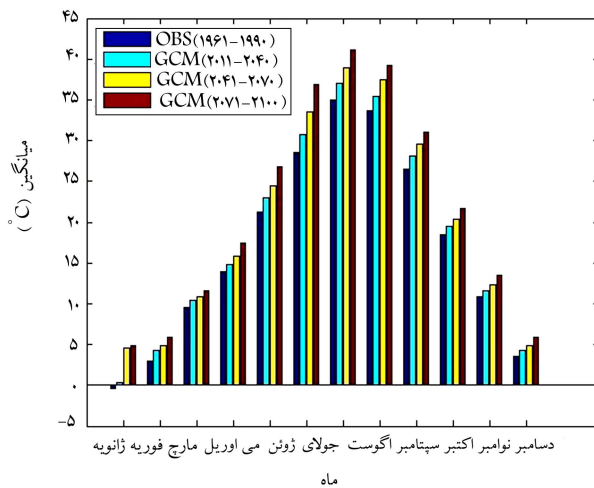
شکل ۱۴. میانگین بارندگی روزانه بر حسب میلی‌متر در روز در ایستگاه تبریز در ۲ دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.



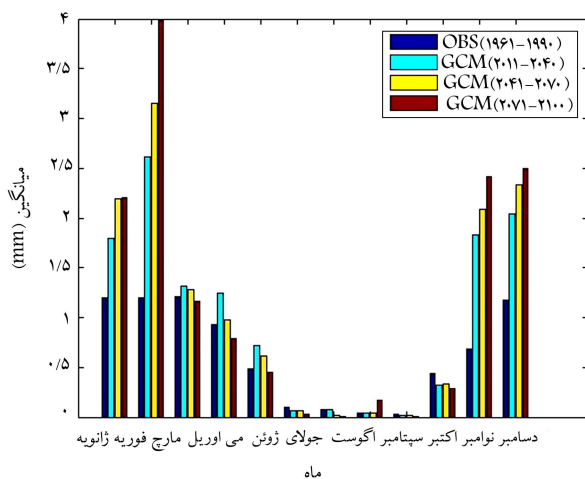
شکل ۱۱. میانگین بارندگی روزانه بر حسب میلی‌متر در روز در ایستگاه تهران در ۲ دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.



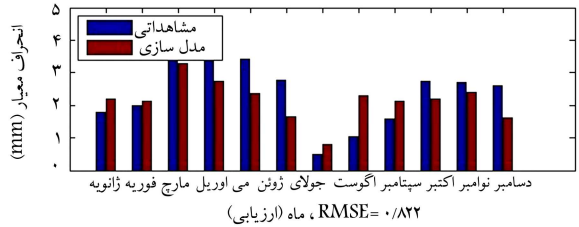
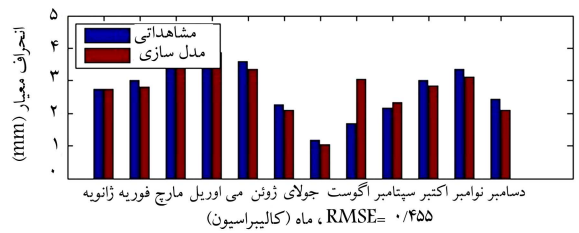
شکل ۱۷. میانگین درجه حرارت بیشینه برای دوره‌ی اقلیم آینده با استفاده از داده‌های نسل سوم مدل جهانی اقلیم در ایستگاه تهران.



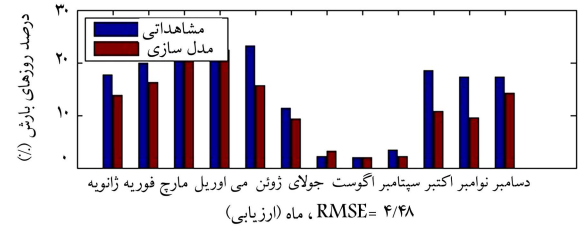
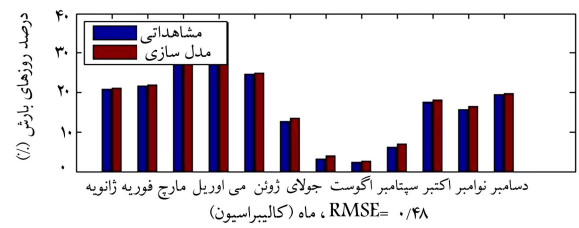
شکل ۱۸. میانگین درجه حرارت بیشینه برای دوره‌ی اقلیم آینده با استفاده از داده‌های نسل سوم مدل جهانی اقلیم در ایستگاه تبریز.



شکل ۱۹. میانگین بارش برای دوره‌ی اقلیم آینده با استفاده از داده‌های نسل سوم مدل جهانی اقلیم در ایستگاه تهران.



شکل ۱۵. انحراف معیار بارندگی روزانه بر حسب میلی‌متر در روز در ایستگاه تبریز در ۲ دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.



شکل ۱۶. تعداد روزهای بارندگی در هر ماه در ایستگاه تبریز در ۲ دوره‌ی واسنجی و ارزیابی با استفاده از داده‌های NCEP.

سی ساله‌ی ۲۰۴۱-۲۰۷۰، ۲۰۱۱-۲۰۴۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ پیش‌بینی و با دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ مقایسه شد. شکل‌های ۱۷ الی ۲۰ تغییرات درجه حرارت بیشینه و بارندگی را از سال ۱۹۶۱ تا ۱۹۹۰ میلادی نسبت به دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ در ایستگاه‌های تهران و تبریز نشان می‌دهد.

این نتایج بر اساس ۱۰۰ سناریو ایجاد شده است که با در نظر گرفتن خطا، نتایج نهایی با ANFIS و ASD در جدول‌های ۶ و ۷ ارائه شده است. تفاوت در هر یک از سناریوها مربوط به مولفه‌ی غیرقطعی مدل می‌شود. مؤلفه‌ی قطعی مدل که وابسته به متغیرهای اتمسفری است، در تمام سناریوها یکسان است. با توجه به جدول ۶، مدل‌سازی انجام شده با ANFIS و ASD روند تغییرات درجه حرارت صعودی است و افزایش دمایی در حدود ۳٫۷۹ درجه‌ی سانتی‌گراد برای ایستگاه تهران و افزایش ۴٫۳ درجه‌ی سانتی‌گراد برای ایستگاه تبریز بر اساس مدل‌سازی انجام شده با ANFIS قابل پیش‌بینی است. با توجه به جدول ۶، پیش‌بینی بارش در آینده برای ۲ ایستگاه مختلف متفاوت است. در ایستگاه تهران افزایش بارندگی و در ایستگاه تبریز، کاهش بارش پیش‌بینی می‌شود. با افزایش گرمایش جهانی، سطح دریاها بالا خواهد رفت و این باعث تغییر در الگو و مقدار بارش

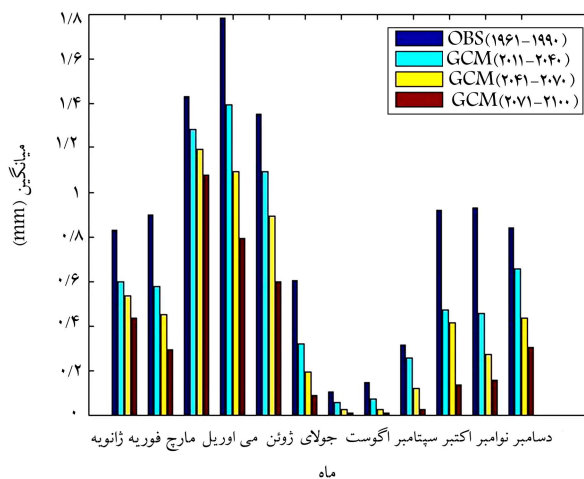
خواهد شد. بالا رفتن سطح دریاها و گرمایش جهانی، در مقدار رطوبت هوا مؤثر است؛ و در بعضی مناطق باعث افزایش بارش و در بعضی دیگر منجر به کاهش بارش خواهد شد. [۲۷]

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش ریزمقیاس‌نمایی آماری برای ایستگاه‌های تهران و تبریز از ایستگاه‌های سیستم مشاهده‌ی اقلیم جهانی در ایران، برای دوره‌ی ۳۰ ساله‌ی ۱۹۹۰-۱۹۶۱ با استفاده از الگوریتم نرو-فازی انجام شد. از ۱۵ سال اول داده‌ها (۱۹۶۱-۱۹۷۵) برای واسنجی و محاسبه‌ی ضرایب مدل و از ۱۵ سال دوم (۱۹۷۶-۱۹۹۰) برای ارزیابی نحوه‌ی عملکرد مدل و مقایسه‌ی اعداد محاسبه‌شده با اعداد مشاهده‌شده استفاده شد. مهم‌ترین متغیر برای مدل‌کردن بارندگی، فشار سطح صفر به‌دست آمد و بارندگی و دما با استفاده از داده‌های نسل سوم جهانی اقلیم برای دوره‌های ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ پیش‌بینی شد. اگرچه مقدار واریانس توضیح داده‌شده با مدل‌های بارندگی نسبت به مدل‌های درجه حرارت بسیار پائین‌تر بود؛ اما از آنجایی‌که هدف، پیش‌بینی تغییرات اقلیمی است، ارزیابی مدل‌ها باید براساس شاخص‌های آماری و اقلیمی صورت پذیرد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که تطابق بسیار خوبی بین شاخص‌های محاسبه‌شده براساس خروجی مدل‌های نرو-فازی و مقادیر مشاهده‌تای وجود دارد. پیش‌بینی اقلیمی برای بارش روزانه و دمای بیشینه برای دوره‌های ۲۰۱۱-۲۰۴۰، ۲۰۴۱-۲۰۷۰ و ۲۰۷۱-۲۱۰۰ صورت گرفت. میانگین دمای بیشینه در ایستگاه تهران در دوره‌ی پایه‌ی ۱۹۹۰-۱۹۶۱، ۲۲/۴۸ درجه‌ی سانتی‌گراد و در هر یک از دوره‌های آینده به‌ترتیب ۲۳/۵۲، ۲۵/۰۵ و ۲۶/۲۷ درجه‌ی سانتی‌گراد پیش‌بینی شد؛ و بارش روزانه در این ایستگاه در دوره‌ی پایه و آینده به‌ترتیب ۰/۶۳، ۱/۱ و ۱/۱۷ میلی‌متر در روز به‌دست آمد. در ایستگاه تبریز، میانگین دمای بیشینه ۱۷، ۱۸/۳۱، ۱۹/۸۱ و ۲۱/۳۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و میانگین بارش روزانه ۰/۸۴، ۰/۶۰، ۰/۴۷ و ۰/۳۳ میلی‌متر در روز برای هر یک از دوره‌های مدل‌سازی به‌دست آمد. نتایج، نشان‌دهنده‌ی افزایش درجه حرارت بیشینه در هر دو ایستگاه است، که با چهارمین گزارش هیئت دول اقلیم مبنی بر افزایش درجه حرارت بیشینه بین ۲/۴ تا ۶/۴ درجه‌ی سانتی‌گراد در قرن بیست و یکم مطابقت دارد. رفتار بارش در ۲ ایستگاه متفاوت پیش‌بینی شده است، که احتمالاً می‌تواند به‌دلیل تغییر در مقدار رطوبت هوا براساس گرمایش جهانی و تأثیرات متفاوت آن در مناطق مختلف در میزان بارش باشد.

پانویس‌ها

1. Canadian land surface scheme for GCMs
2. statistical down-scaling model
3. vector machine
4. evolutionary algorithm
5. global climate change
6. national centers for environmental Prediction
7. Bias
8. Variance inflation factors
9. root mean square error



شکل ۲۰. میانگین بارش برای دوره‌ی اقلیم آینده با استفاده از داده‌های نسل سوم مدل جهانی اقلیم در ایستگاه تبریز.

جدول ۶. روند تغییرات درجه حرارت و بارش مدل‌سازی‌شده با ANFIS در آینده.

| دوره | دمای بیشینه (°C) | | بارش (mm/day) | |
|-----------|------------------|-------|---------------|-------|
| | تهران | تبریز | تهران | تبریز |
| ۱۹۹۰-۱۹۶۱ | ۲۲/۴۸ | ۱۷ | ۰/۶۳ | ۰/۸۴ |
| ۲۰۴۰-۲۰۱۱ | ۲۳/۵۲ | ۱۸/۳۱ | ۱ | ۰/۶۰ |
| ۲۰۷۰-۲۰۴۱ | ۲۵/۰۵ | ۱۹/۸۱ | ۱/۱ | ۰/۴۷ |
| ۲۱۰۰-۲۰۷۱ | ۲۶/۲۷ | ۲۱/۳۰ | ۱/۱۷ | ۰/۳۳ |

جدول ۷. روند تغییرات درجه حرارت و بارش مدل‌سازی‌شده با ASD در آینده.

| دوره | دمای بیشینه (°C) | | بارش (mm/day) | |
|-----------|------------------|-------|---------------|-------|
| | تهران | تبریز | تهران | تبریز |
| ۱۹۹۰-۱۹۶۱ | ۲۲/۴۸ | ۱۷ | ۰/۶۳ | ۰/۸۴ |
| ۲۰۴۰-۲۰۱۱ | ۲۴/۰۶ | ۱۸/۹۵ | ۱/۸ | ۱/۳۴ |
| ۲۰۷۰-۲۰۴۱ | ۲۵/۰۶ | ۲۰/۱۸ | ۱/۸۸ | ۱/۲۴ |
| ۲۱۰۰-۲۰۷۱ | ۲۶/۶۴ | ۲۱/۵۳ | ۱/۹۶ | ۱/۱۴ |

منابع (References)

1. IPCC, *The Physical Science Basis*, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge, U.K.:Cambridge, University Press (2007).
2. Nasa, *Climate Change Effect*, Available from: <http://climate.nasa.gov/causes/>. (2011).
3. IPCC, *Synthesis Report*, Contribution of Working Group I, II and III to the Fourth Assessment Report of

- the Intergovernmental Panel on Climate Change, An Assessment of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, Switzerland, Cambridge University Press (2007).
4. DAI Team, *CGCM3 Predictors, Sets of Predictor Variables Derived From CGCM3 T47 and NCEP/NCAR Reanalysis*, Montreal, QC, Canada, pp. 16 (2008).
 5. Wilby, R.L. and Wigley, T.M.L. "Downscaling general circulation model output: A review of methods and limitations", *Progress in Physical Geography* 214, **21**(4), pp. 530-548 (1997).
 6. Hay, L.E., McCabe, G.J., Wolock, D.M. and Ayers, M.A. "Use of weather types to disaggregate general circulation model predictions", *Geophysical Research*, **97**, pp. 2781-2790 (1992).
 7. Karl, T.R., Wang., W.C., Schlesinger, M.E., Knight, R.W. and Portman, D. "A method of relating general circulation simulated climate to observed local climate, Part I, seasonal statistics", *Journal of Climate*, **3**, pp. 1053-1079 (1990).
 8. Wigley, T.M.L., Jones, P.D., Briffa, K.R. and Smith, G. "Obtaining subgrid scale information from coarse-resolution general circulation model output", *Journal of Geophysical Research*, **95**(D2), pp. 1943-1953 (1990).
 9. Hay, L.E., McCabe, G.J., Wolock, D.M. and Ayers, M.A. "Simulation of precipitation by weather type analysis", *Water Resources Research*, **27**(4), pp. 493-501 (1991).
 10. Hughes JP, G.P. "A class of stochastic models for relating synoptic atmospheric patterns to local hydrologic phenomenon", *Water Resources Research*, **30**(5), pp. 1525-1546 (1994).
 11. Bardossy, A. and Plate, E.J. "Modeling daily rainfall using a semi-markov representation of circulation pattern occurrence", *Journal of Hydrology*, **122**(1-4), pp. 33-47 (199).
 12. Matyasovszky, I., Bogardi, I. and Duckstein, L. "Comparison of two GCMs to downscale temperature and precipitation under climate change", *Water Resources Research*, **30**(12), pp. 3437-3448 (1994).
 13. Kim, J.W., Chang, J.T., Baker, N.L., Wilks, D.S. and Gates, W.L. "The statistical problem of climate inversion: Determination of relationship between local and large-scale climate", *Monthly Weather Review*, **112**(10), pp. 2069-2077 (1984).
 14. Richardson, C.W. "Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation", *Water Resources Research*, **17**(1), pp. 182-190 (1981).
 15. Hewitson, B. and Crane, R. "Climate downscaling: Techniques and application", *Climate Research*, **7**(2), pp. 85-95 (1996).
 16. Von Storch, H., Zorita, E. and Cubasch, U. "Downscaling of global climate change estimates to regional scales: An application to Iberian rainfall in wintertime", *Journal of Climate*, **6**, pp. 1161-1171 (1993).
 17. Choi, L. "An application hydroinformatic tools for rainfall forecasting", University of New South Wales, phd thesis, Australia, pp. 752 (1993).
 18. Cavazos, T. "Using self-organizing maps to investigate extreme climate event: An application to wintertime rainfall in the balkans", *Journal of Climate*, **13**(10), pp. 1718-1732 (2000).
 19. Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow, E.M. "SDSM-a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts", *Environmental Modelling & Software*, **17**(2), pp. 145-157 (2002).
 20. Dibike, Y.B. and Coulibaly, P. "Temporal neural networks for downscaling climate variability and extremes", *Neural Networks*, **19**(2), pp. 135-144 (2006).
 21. Chen Shien-Tsung, P.S.Y. and Yi-Hsuan, T. "Statistical downscaling of daily precipitation using support vector machines and multivariate analysis", *Journal of Hydrology*, **385**(1-4), pp. 13-22 (2010).
 22. Tolika, K., Anagnostopoulou, C., Maheras, P. and Vafiadis, M. "Simulation of future changes in extreme rainfall and temperature conditions over the greek area: A comparison of two statistical downscaling approaches", *Global and Planetary Change*, **63**(2-3), pp. 132-151 (2008).
 23. Hessami, M., Gachon, P., Ouarda, T.B.M.J. and St-Hilaire, A. "Automated regression-based statistical downscaling tool", *Environmental Modelling & Software*, **23**(6), pp. 813-834 (2008).
 24. Hertig, E. and Jacobeit, J. "Downscaling future climate change: Temperature scenarios for the mediterranean area", *Global and Planetary Change*, **63**(2-3), pp. 127-131 (2008).
 25. Burton, A., Fowler, H.J., Blenkinsop, S. and Kilsby, C.G. "Downscaling transient climate change using a neyman-scott rectangular pulses stochastic rainfall model", *Journal of Hydrology*, **381**(1-2), pp. 18-32 (2010).
 26. Secretariat, G. "Global climate observing system", World Meteorological Organization, Switzerland (November 2007).
 27. NASA, *A Warmer World might not be a Wetter one*, Available from: <http://science.nasa.gov/earth-science/big-questions/how-well-can-we-predict-future-changes-in-the-earth-system/> (2005).