

## دورنمایی از وضعیت خشکسالی ایران طی سی سال آینده

لیلی خزانه داری (کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی اقلیم شناسی بلایای جوی، نویسنده مسؤل)  
Lk142@yahoo.com

فاطمه زابل عباسی (کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی اقلیم شناسی کاربردی)  
abbasi 9999 @ yahoo.com

شهرزاد قندهاری (کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی اقلیم شناسی بلایای جوی)  
Sh. ghand hari @ gmail.com

منصوره کوهی (کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی اقلیم شناسی کاربردی)  
Man\_ koohi @ yahoo.com

شراره ملبوسی (کارشناس پژوهشکده اقلیم شناسی، عضو گروه پژوهشی تغییر اقلیم)

### چکیده

پیامدهای ناشی از تغییر اقلیم، به ویژه در اثر افزایش گازهای گلخانه‌ای، طی سال‌های اخیر مشکلات زیادی را همراه داشته که به صورت مستقیم یا غیرمستقیم بخش‌های مختلف جامعه را تحت تأثیر قرار داده است. یکی از مهمترین این پیامدها افزایش وقوع بلایای جوی-اقلیمی نظیر سیل، خشکسالی، چرخندهای حاره‌ای، بالا آمدن سطح آب دریا، توفان گرد و غبار و ... است، که شایع‌ترین آنها در ایران وقوع سیل و خشکسالی است. با توجه به موقعیت جغرافیایی ایران و سیستم‌های سینوپتیکی که این منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهند، آشکار است که خشکی از جمله ویژگی‌های این منطقه به حساب می‌آید و خشکسالی یکی از مهمترین و شایع‌ترین بلایای جوی-اقلیمی است که این کشور را متأثر می‌سازد. از آن جا که خشکسالی، بخش‌های مختلف جامعه مانند منابع آب، کشاورزی، صنعت، اقتصاد، بهداشت و ... را تحت تأثیر قرار می‌دهد، لذا پایش و ارزشیابی این بلیه در آینده به منظور ارایه‌ی برنامه ریزی صحیح در بخش‌های مختلف جامعه، امری لازم و ضروری است. برای دستیابی به این هدف، ابتدا باید داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی شبیه‌سازی شوند. برای این منظور یکی از مناسب‌ترین روش‌ها، استفاده از خروجی الگوهای جفت شده جو-اقیانوس گردش عمومی جو (AOGCM)<sup>۱</sup> است. لذا، در این نوشتار ابتدا با استفاده از خروجی‌های الگوی GCM و

---

#### 1. Atmospheric-Ocean General Circulation Model

ریزگردانی<sup>۱</sup> آنها به کمک الگوی LARS-WG، داده‌های بارش طی دوره ۳۹-۲۰۱۰ شبیه‌سازی شده است. سپس با استفاده از این داده‌ها وضعیت خشکسالی کشور به کمک دو شاخص دهک (DI)<sup>۲</sup> و استاندارد بارش (SPI)<sup>۳</sup> طی این دوره مورد بررسی و ارزشیابی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این تحقیق ضمن تأیید هم‌خوانی این دو شاخص جهت بررسی وضعیت خشکسالی در کشور، نشان داده است که طی سی سال آینده شرایط خشکسالی در کشور رو به افزایش خواهد بود که این مسأله وقوع تغییر اقلیم در منطقه را تأیید می‌کند، به گونه‌ای که طی دوره مورد مطالعه، در سال‌های ۲۰۲۵، ۲۰۳۲، ۲۰۳۴، ۲۰۳۵ و ۲۰۳۹ بیشتر نقاط کشور با خشکسالی شدید و بسیار شدید روبرو خواهد بود که در این میان، وضعیت خشکسالی در سال ۲۰۳۹ به مراتب بحرانی‌تر خواهد بود.

**کلیدواژه‌ها:** الگوهای گردش عمومی جو، ریزگردانی، LARS-WG، خشکسالی، شاخص دهک، شاخص SPI.

## درآمد

به منظور بررسی اثرات آتی تغییر اقلیم بر بخش‌های مختلف نظیر منابع آب، کشاورزی، محیط زیست، بهداشت، صنعت و اقتصاد، ابتدا باید متغیرهای اقلیمی تحت تأثیر تنش‌های ناشی از گازهای گلخانه‌ای شبیه‌سازی شوند. معتبرترین ابزار موجود جهت شبیه‌سازی داده‌های اقلیمی برای دوره‌های آتی، استفاده از خروجی الگوهای جفت شده جو-اقیانوس گردش عمومی جو است (شاه کرمی و مساح بوانی، ۱۳۸۵:۱). یکی از ضعف‌های اصلی الگوهای GCM، بزرگ مقیاس بودن مکانی متغیرهای اقلیمی شبیه‌سازی شده (در حدود پنجاه هزار کیلومتر مربع) است که با توجه به تغییرات اقلیمی و توپوگرافی این نتایج مستقیم‌آدر مقیاس ایستگاهی قابل استفاده نیستند. بنابراین لازم است تا خروجی این الگوها، به روش‌های مختلف در مقیاس ایستگاهی و منطقه‌ای کوچک مقیاس شوند. ریزگردانی داده‌ها به دور روش آماری و دینامیکی امکان‌پذیر است (بابائیان و نجفی نیک، ۱۳۸۴:۴۷).

از جمله مطالعاتی که در زمینه‌ی الگوسازی اقلیمی مناطق مختلف جهان با استفاده از الگوهای آماری انجام شده است، می‌توان به پژوهش تامسون و مالان<sup>۴</sup> (۱۹۹۵) در زمینه‌ی الگوسازی سی سال اقلیم ایستگاه‌های

1. Downscaling
2. Decile Index
3. Standard Precipitation Index
4. Thompson & Mullan

هواشناسی در نیوزلند اشاره کرد (تامسون و مالان، ۱۹۹۵:۱۱۵). جانسون<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۶) نیز دو الگوی مختلف تولید داده های هواشناسی با عناوین USCLIMATE و CLIGEN را مورد بررسی قرار دادند (جانسون و همکاران، ۱۹۹۶:۱۸۷۸). ویلکس<sup>۲</sup> و همکاران (۱۹۹۲ و ۱۹۹۹) روشی را برای کاربرد سناریوهای تغییر اقلیم با استفاده از الگوی WGEN که یک الگوی مولد داده های هواشناسی است، ابداع کردند. این الگو برای تولید مقادیر روزانه دمای بیشینه و کمینه ی بارندگی و تابش روزانه مناسب است (ویلکس، ۱۹۹۲:۶۷ و ویلکس و ویلی<sup>۳</sup>، ۱۹۹۹:۳۲۹). مک کاگ<sup>۴</sup> و همکاران (۲۰۰۳) توان مندی الگوی CLIMGEN را جهت شبیه سازی پارامترهای هواشناسی در ایستگاه های اتاریوی<sup>۵</sup> جنوبی در کانادا مطالعه کردند (مک کاگ و همکاران، ۲۰۰۳:۱۲۸). در مطالعه ای که توسط دوپروسکی<sup>۶</sup> در جمهوری چک انجام شد، الگوی MET & ROLL مورد ارزیابی قرار گرفت. به کمک این الگو داده های دمای بیشینه و کمینه ی تابش خورشید و بارش روی ایستگاه های هواشناسی الگوسازی شد (دوپروسکی، ۱۹۹۶:۹۷ و دوپروسکی، ۱۹۹۶:۱۲). زمنف و بروکس<sup>۷</sup> (۱۹۹۹) شبیه سازی داده ها را با استفاده از الگوی LARS-WG در انگلستان مورد مطالعه قرار دادند (زمنف و بروکس، ۱۹۹۹:۱۳۷). بابائیان و همکاران (۲۰۰۴) نیز تغییرات اقلیمی کره جنوبی را به کمک این الگو طی دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰ بررسی کردند (بابائیان و همکاران، ۲۰۰۴:۹۸). در ایران نیز بابائیان و همکاران این الگو را روی برخی از ایستگاه های هواشناسی استان خراسان مورد ارزیابی قرار دادند (بابائیان و نجفی نیک، ۱۳۸۴:۴۷).

کاربرد داده های بارش شبیه سازی شده به روش های متفاوت، در پژوهش های مختلفی ارایه شده است. یکی از کاربردهای مهم و بسیار سودمند این داده ها، استفاده از آنها جهت پایش و ارزیابی خشکسالی است. به عنوان مثال، صمدی نقاب (۱۳۸۵) داده های بارش حاصل از سناریوی IS92a و الگوی GCM مرکز CISRO (IS92a) استرالیا را به روش رگرسیون یک متغیره و پارامترهای بدون بعد ریزگردانی کرد. سپس، با استفاده از داده های ریزگردانی شده و نیز داده های دیدبانی شده برای یک دوره آماری سی ساله، شاخص استاندارد بارش را برای ماه های مارس، آوریل، می و ژوئن با هر دو نوع داده محاسبه نمود. نتایج وی نشان داد

1. Johnson
2. Wilks
3. Wilby
4. MC. Kague
5. Ontario
6. Dubrovsky
7. Semenev & Brooks

که با استفاده از این روش می‌توان از این شاخص، که تاکنون تنها جهت پایش خشکسالی در گذشته استفاده شده است، به عنوان ابزاری جهت پیش‌بینی‌های آینده استفاده کرد (صمدی نقاب، ۱۳۸۵:۱۹۳). در تحقیق دیگر، مساح بوانی و مرید (۱۳۸۴) اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و کشاورزی حوضه‌ی زاینده رود اصفهان را به کمک داده‌های الگو گردش عمومی HadCM3 طی دو دوره ۲۰۱۰-۳۹ و ۲۰۷۰-۹۹ مورد بررسی قرار دادند. تجزیه و تحلیل اطلاعات، کاهش بارندگی، افزایش دما و افزایش سال‌های خشک متوالی را تا سال ۲۱۰۰ نشان داد (مساح بوانی و مرید، ۱۳۸۴:۴۰). گوش و ماجمدار<sup>۱</sup> (۲۰۰۶) برای برآورد بارش، یک الگوی رگرسیون خطی<sup>۱</sup> را توسعه دادند و در آن با استفاده از خروجی‌های میانگین فشار سطح دریا و ارتفاع ژئوپتانسیل، میزان بارش را برآورد کردند. این پیش‌بینی براساس سناریوی IS92a، حاکی از احتمال افزایش رویدادهای حدی هیدرولوژیکی در اوریسا<sup>۲</sup> (هند) در آینده بوده است (گوش و ماجمدار، ۲۰۰۶:۴۰۳). حجازی زاده و شیرخانی (۱۳۸۴) جهت بررسی وقوع خشکسالی در دوره کوتاه مدت و وقوع آن در منطقه خراسان از دو روش گیس و ماهر<sup>۳</sup> و زنجیره مارکف<sup>۴</sup> استفاده نمودند. سپس با محاسبه‌ی فراوانی دوره‌های خشک، احتمال وقوع این دوره‌ها و سرانجام دوره بازگشت آنها را مشخص کردند (حجازی زاده و شیرخانی، ۱۳۸۴:۱۳). در تحقیق دیگری، لشنی زند و تلوری (۱۳۸۳) با استفاده از شاخص استاندارد بارش و با توجه به امتیازاتی که این شاخص در تحلیل منطقه‌ای و ایجاد ارتباط زمانی بین رخداد‌های خشکسالی در نواحی مختلف یک پهنه دارد، نقشه‌های پهنه‌بندی ماهانه‌ی خشکسالی برای یک دوره‌ی سی ساله را تهیه کردند. سپس با استفاده از داده‌های حاصل از مساحی نقشه‌های ماهانه خشکسالی، سری‌های زمانی میانگین ماهانه شدت خشکسالی را برای هر حوضه به دست آوردند. سپس، به کمک الگوهای سری زمانی و انتخاب مناسب‌ترین الگو، اقدام به پیش‌بینی ماهانه شاخص شدت متوسط خشکسالی برای شش حوضه‌ی واقع در غرب و شمال غرب کشور نمودند و در پایان با استفاده از الگوهای به دست آمده، خشکسالی‌های اقلیمی ۴۸ ماه آینده را برای هر حوضه و کل منطقه پیش‌بینی کردند (لشنی زند و تلوری، ۱۳۸۳:۱۲۳۰۸). رضیی و همکاران (۱۳۸۲) نیز شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی هواشناسی را به صورت موردی در سطح استان سیستان و بلوچستان از طریق ترکیب تئوری RUN

1. Ghosh & Mujumdar
2. Orissa
3. Gibbs & Maher
4. Markov Chain

و زنجیره مارکف با ساخت ماتریس احتمال انتقال و ماتریس ایستا مورد بررسی قرار دادند و وضعیت بلندمدت منطقه را از نظر تداوم و طول مدت خشکسالی ها طی ده سال آینده، پیش بینی نمودند (رضیی و همکاران، ۱۳۸۲:۲۹۲).

در تحقیق حاضر، جهت پایش و ارزشیابی خشکسالی کشور طی سی سال آینده (۳۹-۲۰۱۰)، از خروجی الگوهای GCM استفاده شده است. برای این منظور، ابتدا این داده ها با استفاده از الگوی LARS-WG که یکی از روش های آماری ریزگردانی است، کوچک مقیاس شده اند. سپس، به کمک داده های بارش شبیه سازی شده، وضعیت خشکسالی به کمک دو شاخص دهک (DI) و استاندارد بارش (SPI) برای کشور، طی دوره مورد مطالعه، بررسی شده است.

## مواد و روش ها

### الف) معرفی الگو

یکی از معروف ترین الگوهای مولد داده های تصادفی وضع هوا الگوی LARS-WG است که برای تولید داده های روزانه بارش، تابش، بیشینه و کمینه دمای یک ایستگاه تحت شرایط اقلیم حاضر و آینده به کار می رود (زمنف و بارو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۲:۳۰). الگوهای مصنوعی مولد پارامترهای هواشناسی<sup>۲</sup>، الگوهای عددی هستند که خروجی الگوهای گردش عمومی جو را با استفاده از روش های آماری به نحوی ریزگردانی می کنند که به مقدار واقعی در مقیاس ایستگاهی بسیار شباهت دارد. اولین نسخه LARS-WG در سال ۱۹۹۰ در بوداپست، به عنوان روشی آماری جهت ریزگردانی داده ها ابداع شد و اساس و تئوری آن توسط راسکو<sup>۳</sup> (۱۹۹۱) ارایه گردید. در این الگو از توزیع های آماری پیچیده ای استفاده شده است و مبنای الگوسازی در آن طول دوره های تر و خشک، بارش روزانه و سری های تابش توزیع نیمه تجربی قرار گرفته است (راسکو و همکاران، ۱۹۹۱:۲۷).

در این الگو برآورد دما به کمک سری های فوریه انجام می شود و دمای بیشینه و کمینه روزانه به صورت فرایندهایی تصادفی با میانگین و انحراف معیارهای روزانه که به وضعیت تر یا خشک روز مورد نظر وابسته اند، الگوسازی می شود. سری فوریه مرتبه سوم برای شبیه سازی میانگین و انحراف معیار درجه حرارت های

1. Barrow
2. Weather Generator
3. Rasco

فصلی به کار می‌رود. مقادیر مانده‌ها که از تفریق مقادیر میانگین از مقدار دیدبانی شده حاصل می‌شوند، در تحلیل خود هم‌بستگی زمانی داده‌های بیشینه و کمینه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در واقع الگوی LARS-WG از سه بخش اصلی شامل کالیبراسیون الگو، ارزشیابی الگو و ایجاد داده‌های هواشناسی تشکیل شده است (بابائیان و نجفی نیک، ۱۳۸۴: ۴۷).

### ب) داده‌ها و منطقه‌ی مورد مطالعه

پس از بررسی و کنترل کیفی داده‌ها، از میان ایستگاه‌های سینوپتیک کشور تعداد ۴۷ ایستگاه که در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۷۶، دارای آمار بدون نقص بودند، انتخاب شدند. در این ارتباط، نرمال بودن داده‌ها بررسی شد و هم‌گنی آنها با استفاده از آزمون Run Test مورد ارزشیابی قرار گرفت. نتایج حاصل روی ۴۷ ایستگاه مورد نظر قابل قبول بود و تصادفی بودن آنها در سطح اطمینان ۹۵٪ پذیرفته شد. در این تحقیق، از داده‌های دیدبانی شده ایستگاه‌های مورد مطالعه و داده‌های سناریوی A1 الگوی گردش عمومی جو ECHO-G استفاده شده است که داده‌های اخیر با استفاده از الگوی LARS-WG در مقیاس ایستگاهی ریزگردانی شده‌اند. برای این منظور الگو چندین بار اجرا شد و مقادیر متوسط سری‌های تولید شده مبنای داوری قرار گرفتند.

به طور کلی، ارایه‌ی پیش‌بینی‌های بلندمدت به کمک الگوهای اقلیمی براساس مجموعه‌ای از فرضیات انجام می‌شود، که این فرضیات در قالب سناریوهایی بیان می‌شود. سناریوهای اقلیمی نتایج قابل قبول و سازگاری با اقلیم آتی هستند، که براساس اثرات حیات انسان بر اقلیم بنا شده‌اند. تمام سناریوهای اقلیمی با الگوهای GCM شبیه‌سازی شده‌اند. این پیش‌بینی‌های اقلیمی بر مبنای تغییر انتشار و غلظت گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌های جوّی (نظیر دی‌اکسیدسولفور و ...) و با توجه به فرضیات اجتماعی-اقتصادی و گسترش و توسعه‌ی فن‌آوری در آینده بنا شده‌اند. در این ارتباط هیأت بین‌الدول تغییر اقلیم<sup>۱</sup> با همکاری سازمان هواشناسی جهانی<sup>۲</sup> و برنامه‌ی محیط زیست سازمان ملل متحد<sup>۳</sup> با هدف ارزشیابی، شناخت و مطالعه‌ی جنبه‌های علمی، فنی، اقتصادی-اجتماعی و مخاطرات ناشی از تغییر اقلیم توسط انسان، سناریوهای مختلفی را ارایه نموده است. این سناریوها شامل برآورد جمعیت، تولید ناخالص ملی، میزان مصرف انرژی (به تفکیک بخش‌های

1. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)

2. World Meteorological Organization (WMO)

3. United Nations Environment Programme (UNEP)

تجاری، صنعت، حمل و نقل و مسکونی)، تولید انرژی، میزان تولید و مصرف سوخت های ثانوی، میزان تولید انرژی از سوخت های مایع، جامد، گاز هیدروژنی، هسته ای، خورشیدی، بیوماس، مقدار انتشار دی اکسید کربن، منواکسید کربن، اکسید نیترو، اکسیدهای نیتروژن و متان از طریق احتراق، انتشار متان از معادن و بسیاری منابع انتشار گازهای گلخانه ای برای مناطق مختلف کره زمین است. با این توضیح، در مطالعه حاضر فرضیات مورد نظر جهت اجرای الگوی LARS-WG براساس سناریوی A1 در نظر گرفته شده است. در این سناریو مقادیر انتشار گازها در جو تا سال ۲۱۰۰ مطابق جدول ۱ فرض شده است.

### جدول ۱. مقادیر گازهای منتشر شده در سناریوی انتشار پایه A1

Year	Foss CO2 (Gt C)	Defo CO2 (Gt C)	CH4 (Tg)	N2O (Tg N)	SO2,1 (Tg S)	SO2,2 (Tg S)	SO2,3 (Tg S)
1990	6.167	1.083	322.213	6.292	0.000	0.000	0.000
2000	6.790	1.581	346.821	6.885	-8.485	1.762	1.434
2010	9.705	1.550	416.774	7.332	-14.513	21.617	8.616
2020	12.233	1.613	483.767	7.727	-18.517	33.686	13.945
2030	14.189	0.704	547.212	7.485	-21.483	24.278	16.939
2040	15.192	0.255	530.648	7.144	-23.569	5.030	24.709
2050	16.194	-0.194	514.085	6.803	-25.654	-14.219	32.478
2060	15.894	-0.271	463.562	6.346	-26.344	-14.594	20.446
2070	15.594	-0.349	413.039	5.889	-26.784	-14.570	14.559
2080	14.988	-0.431	370.346	5.502	-27.647	-15.276	1.948
2090	14.076	-0.520	335.482	5.185	-28.181	-15.516	1.049
2100	13.164	-0.608	300.618	4.869	-28.716	-15.756	0.150

### پ) صحت سنجی الگو

برای دستیابی به بهترین نتایج در هر الگوی، کالیبراسیون صحیح و صحت سنجی اطلاعات از اهمیت بسیاری برخوردار است. از این رو، با استفاده از ۳۰ سال داده دیدبانی شده ۴۷ ایستگاه سینوپتیک منتخب کشور در دوره پایه ۲۰۰۵-۱۹۷۶ و مقایسه آن با داده های تولید شده الگو در این دوره، کالیبراسیون الگو LARS-WG صورت گرفت. برای این منظور، یک سناریوی حالت پایه تهیه و این الگو برای دوره نرمال اجرا شد. جهت مقایسه خروجی های الگو با داده های دیدبانی شده، از آزمون های آماری مختلف نظیر t-student، زوجی و نیز نمودارهای مقایسه ای استفاده گردید. همچنین ضرایب هم بستگی، میانگین ماهانه، انحراف معیار، بایاس و

میانگین خطای مطلق در سری داده‌های دیدبانی شده و نرمال نیز برای تمامی ایستگاه‌های مورد نظر محاسبه شد. به عنوان مثال برخی از نتایج تحلیل‌های آماری برای دو ایستگاه بندرانزلی و بیرجند در جدول ۲ نشان داده شده است. با تحلیل نتایج به دست آمده از آزمون t-student برای ۴۷ ایستگاه منتخب، ملاحظه شد که بین مقادیر الگوسازی شده بارش و مقادیر واقعی آن اختلاف معنی‌داری با خطای بحرانی ۰/۰۵ وجود ندارد، به عبارت دیگر خطای موجود تصادفی است. همچنین مقادیر هم‌بستگی پیرسن<sup>۱</sup> بین داده‌های الگوسازی شده بارش و داده‌های واقعی در سطح معنی‌دار ۰/۰۱ قابل قبول است.

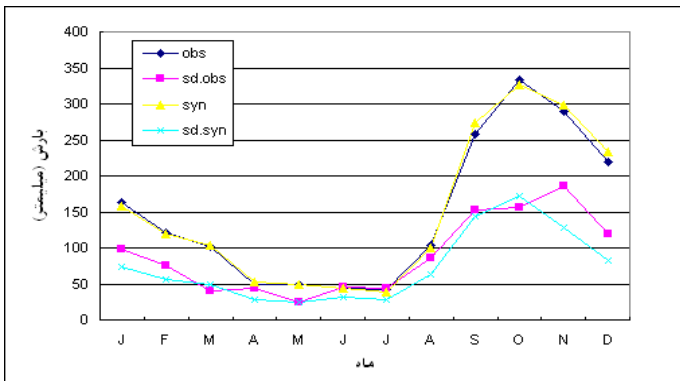
در شکل‌های ۱ و ۲، مقادیر بارش ماهانه حاصل از الگو براساس متوسط چندین سری بارش در کنار مقادیر دیدبانی بارش ماهانه و همچنین انحراف معیار آنها طی دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶ به عنوان نمونه برای دو ایستگاه انزلی و بیرجند ارائه شده است. با توجه به این شکل‌ها ملاحظه می‌شود که الگو به خوبی توانسته تغییرات بارش را طی ماه‌های مختلف شبیه‌سازی کند و اختلاف مشاهده شده در برخی از ماه‌ها با توجه به آزمون t-student با خطای بحرانی ۰/۰۵ معنی‌دار نیست. به عبارت دیگر، الگو LARS-WG توانایی الگوسازی اقلیم دوره گذشته ایستگاه‌های مورد مطالعه را براساس یک سناریوی حالت پایه داراست.

جدول ۲. مقایسه‌ی مقادیر الگوسازی الگو LARS-WG با مقادیر واقعی در دوره ۲۰۰۵-۱۹۷۶

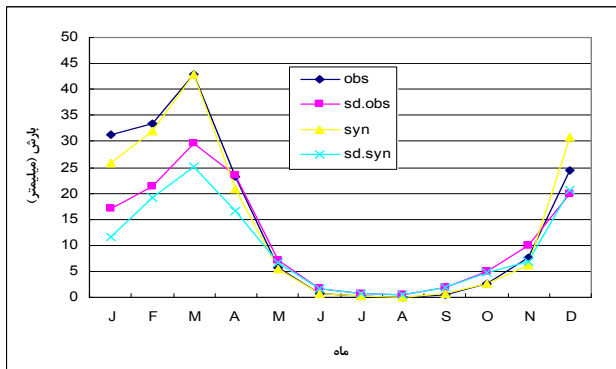
Correlation	MAE	BIAS	t-TEST	ایستگاه / مقادیر
۰/۹۹۸	۰/۹۴	۱/۳	۰/۹۳	بندرانزلی
۰/۹۹۲	۰/۱۸	۰/۳۹۶	۰/۸۸	بیرجند

1. Pearson's Correlation





شکل ۱. مقایسه‌ی مقادیر بارش الگوسازی شده و دیدبانی شده برای ایستگاه بندر انزلی (۲۰۰۵-۱۹۷۶)



شکل ۲. مقایسه‌ی مقادیر بارش الگوسازی شده و دیدبانی شده برای ایستگاه بیرجند (۲۰۰۵-۱۹۷۶)

پس از اطمینان از توان‌مندی الگو برای شبیه‌سازی بارش کشور طی سال‌های آینده، سناریوهای تغییر اقلیم روی پانزده شبکه‌ی محاسباتی، بر مبنای مقایسه‌ی خروجی‌های الگو ECHO-G در دوره‌های ۲۰۰۵-۱۹۷۶ و ۲۰۳۹-۲۰۱۰ تدوین گردید و با استفاده از رفتار اقلیمی دوره گذشته ایستگاه‌های مورد مطالعه و چندین بار اجرای الگو، مقادیر بارش روزانه‌ی این ایستگاه‌ها طی دوره ۲۰۱۰-۳۹ شبیه‌سازی شدند و در نهایت به منظور پایش و ارزشیابی خشکسالی در این دوره، مقادیر متوسط سری داده‌های بارش تولید شده مورد استفاده قرار گرفت.

### ت) ارزشیابی خشکسالی با استفاده از شاخص دهک

شاخص دهک به عنوان یک شاخص هواشناسی جهت پایش خشکسالی توسط سیستم مراقبت خشکسالی استرالیا<sup>۱</sup> انتخاب شده است، زیرا این روش دارای محاسبات نسبتاً ساده‌ای است و به تعداد داده‌های کمتری نیاز دارد (هایز<sup>۲</sup>، ۲۰۰۲:۱۰)، اما اشکال این روش آن است که برای محاسبه‌ی دهک‌ها به آمار اقلیمی بلندمدت نیاز است.

در این تحقیق به منظور پایش خشکسالی در کشور طی دوره ۲۰۱۰-۳۹ به روش دهک، ابتدا به کمک نرم افزار SPSS شاخص دهک سالانه برای هر یک از ایستگاه‌های مورد مطالعه، طی این دوره محاسبه و سپس در محیط Arc view نقشه‌های پهنه بندی آن رسم شده است.

### ث) ارزشیابی خشکسالی با استفاده از شاخص SPI

شاخص SPI از دیگر شاخص‌هایی است که در تحلیل منطقه‌ای خشکسالی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این شاخص استاندارد بوده و می‌توان از آن در مطالعات منطقه‌ای و ایجاد ارتباط زمانی بین رخداد‌های خشکسالی در نواحی مختلف استفاده کرد. شاخص SPI در سال ۱۹۹۳ توسط مک کی و همکاران با توجه به بررسی اثرات متفاوت کمبود بارش روی آب‌های زیرزمینی، ذخایر و منابع آب‌های سطحی، کلاهک برفی و جریان آبراهه‌ها در ایالت کلرادو ارائه شد (مک کی<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۳:۱۷۹).

استفاده از این شاخص دارای امتیازاتی است که عبارت‌اند از: سادگی این روش (شاخص SPI فقط بر پایه پارامتر بارش بنا شده است)، قابلیت بالای این شاخص به عبارتی چند بعدی بودن آن (به این معنی که در هر مقیاس زمانی قابل محاسبه است)، این شاخص از توزیع نرمال پیروی می‌کند، در نتیجه می‌توان وقایع خشکسالی شدید و فراگیر را برای هر مکان و در هر مقیاس زمانی طبقه بندی کرد (هایز و همکاران، ۱۹۹۹:۲۳۲).

با توجه به طبقه بندی شدت خشکسالی بر اساس شاخص SPI، مشاهده می‌شود که مقادیر منفی SPI معرف بارش کمتر از نرمال (شرایط آغاز خشکسالی) و مقادیر مثبت آن معرف بارش بیشتر از نرمال (شرایط پایان خشکسالی) است (احمدیان طبری و همکاران، ۱۳۸۵:۱۹).

1. Australian Drought Watch System
2. Hayes
3. McKee

## بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق، با استفاده از داده‌های سناریوی A1 الگوی گردش عمومی جو که توسط الگوی LARS-WG در مقیاس ایستگاهی ریزگردانی شده است، داده‌های بارش برای ۴۷ ایستگاه انتخابی در سطح کشور، طی سی سال آینده (دوره ۲۰۳۹-۲۰۱۰) شبیه‌سازی شد. سپس به منظور پایش و ارزشیابی خشکسالی طی این دوره، به کمک این داده‌ها شاخص دهک و SPI در مقیاس سالانه برای ایستگاه‌های مورد نظر محاسبه و نقشه‌های پهنه‌بندی آن تهیه گردید. لازم به ذکر است که پهنه‌بندی شاخص خشکسالی به روش IDW<sup>۱</sup> و در محیط Arc view انجام شده است.

مطالعه‌ی وضعیت خشکسالی طی سی سال آینده در ایران نشان داد که دو شاخص دهک و SPI به خوبی در این منطقه با یکدیگر تطابق داشته و یکدیگر را تأیید می‌کنند، اما باید توجه داشت که در پهنه‌بندی انجام شده توسط این دو شاخص (شکل‌های ۳ تا ۸) محدوده‌ی طبقه‌بندی این شاخص‌ها متفاوت بوده، اما هر دوی آنها جهت پیش‌آگاهی وقوع خشکسالی در منطقه‌ی مورد مطالعه با یکدیگر هم‌خوانی دارند. بررسی وضعیت خشکسالی ایران طی دوره مورد مطالعه براساس این دو شاخص، نشان داد که در بیشتر سال‌های مورد مطالعه شرایط خشکسالی در بسیاری از بخش‌های کشور وجود خواهد داشت، به گونه‌ای که در سال‌های ۲۰۱۱، ۲۰۲۵، ۲۰۳۲، ۲۰۳۴، ۲۰۳۵ و ۲۰۳۹ منطقه با وضعیت خشکسالی شدیدی روبرو خواهد بود.

در شکل شماره ۳ وضعیت خشکسالی کشور طی سال ۲۰۱۱ با استفاده از شاخص دهک و SPI نشان داده شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در نواحی شمال شرق و شمال غرب کشور، وضعیت خشکسالی شدید حاکم خواهد بود، به گونه‌ای که استان‌های خراسان رضوی، سمنان، زنجان و همدان دارای خشکسالی بسیار شدید و استان‌هایی نظیر خراسان شمالی، شاهرود، گرگان، برخی از نواحی شمالی، شرقی و مرکزی نظیر گیلان، زاهدان و کرمان، همچنین استان‌های آذربایجان شرقی و غربی، کردستان و کرمانشاه دارای خشکسالی شدید خواهند بود.

در شکل شماره ۴ وضعیت خشکسالی کشور طی سال ۲۰۲۵ با استفاده از دو شاخص مورد مطالعه، نشان داده شده است. براساس این شکل، به جز قسمت‌هایی از شمال شرق، شمال غرب، جنوب شرق کشور و نیز

1. Inverse Distance Weighted

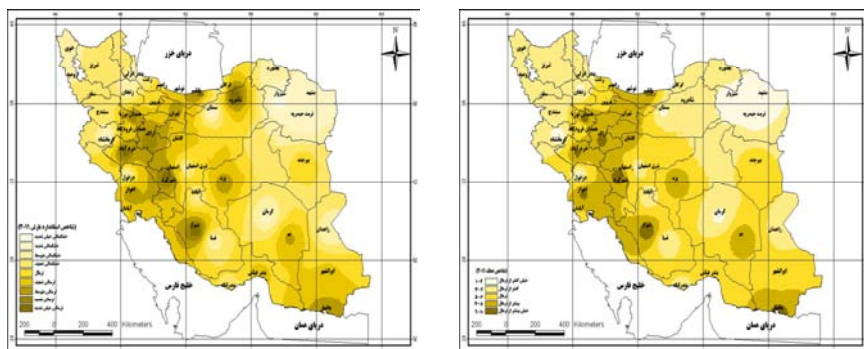
بخش‌هایی از استان‌های سمنان، یزد و مازندران در بیشتر نقاط کشور شرایط خشکسالی شدید و بسیار شدید برقرار خواهد بود.

شکل شماره ۵، وضعیت خشکسالی کشور را طی سال ۲۰۳۲ با استفاده از دو شاخص مذکور نشان می‌دهد. با توجه به این شکل ملاحظه می‌شود که در استان‌های خراسان شمالی، شاهرود، یزد، آذربایجان شرقی و غربی و بخش‌های جنوبی استان سیستان و بلوچستان شرایط خشکسالی شدید و بسیار شدید حاکم خواهد بود. در شکل شماره ۶ ملاحظه می‌شود که طی سال ۲۰۳۴ بخش‌هایی از استان‌های تهران، قزوین، سمنان، کاشان و نیز قسمت‌های مرکزی کشور نظیر یزد، کرمان، بخش‌هایی از جنوب مانند استان فارس و نیز برخی از نواحی غربی نظیر استان کردستان تحت تأثیر خشکسالی قرار خواهند داشت.

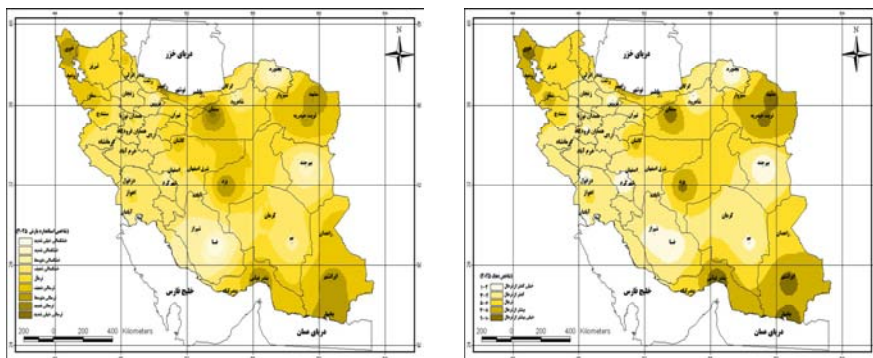
با توجه به شکل شماره ۷ مشاهده می‌شود که طی سال ۲۰۳۵ خشکسالی بخش‌های وسیع‌تری از کشور را تحت تأثیر قرار خواهد داد، به گونه‌ای که در نواحی شرقی و شمال شرقی، نواحی غربی، مرکزی و بخش‌هایی از جنوب کشور شرایط خشکسالی شدید و بسیار شدید حاکم خواهد بود. در بین این نواحی، استان‌های خراسان رضوی، خراسان جنوبی، سیستان و بلوچستان، کرمان، مرکزی، خوزستان، کاشان و کردستان دارای شرایط بحرانی‌تری خواهند بود.

طی دوره مورد مطالعه، شدیدترین وضعیت خشکسالی مربوط به سال ۲۰۳۹ خواهد بود که در این سال بیشتر مناطق کشور، به جز بخش‌های کوچکی از غرب، شمال غرب، جنوب غرب و جنوب (نظیر بخش‌های استان‌های آذربایجان غربی، کرمانشاه، خوزستان و هرمزگان) دارای بارش‌های کمتر از نرمال خواهند بود که معرف شرایط خشکسالی شدید و بسیار شدید است (شکل ۸).

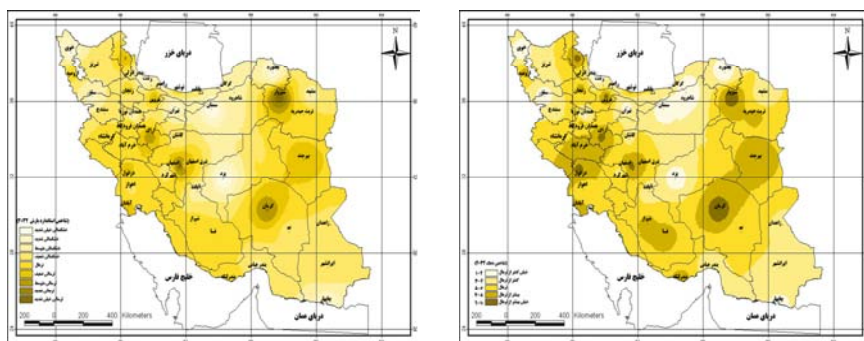
به طور کلی این مطالعه نشان می‌دهد که طی سی سال آینده شرایط خشکسالی در کشور رو به افزایش است که این مسأله وقوع تغییر اقلیم در منطقه را تأیید می‌کند. با توجه به صحت سنجی انجام شده در این تحقیق، داده‌های بارش شبیه‌سازی شده که اساس کار ارزشیابی خشکسالی به دو روش دهک و SPI هستند، با دقت بیش از ۹۰٪ قابل قبول‌اند، لذا به نظر می‌رسد که پایش و ارزشیابی انجام شده درخصوص وقوع خشکسالی در کشور طی دوره‌ی مورد مطالعه نیز با این احتمال قابل بحث و بررسی باشد.



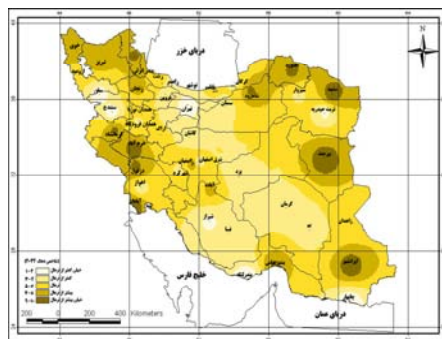
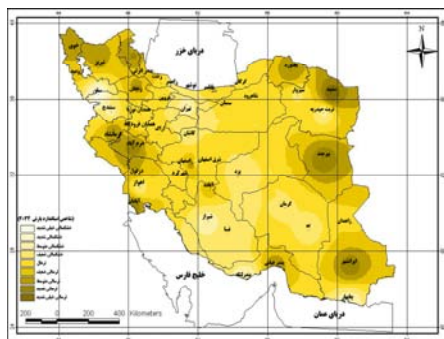
شکل ۳. وضعیت خشکسالی ایران بر اساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طی سال ۲۰۱۱



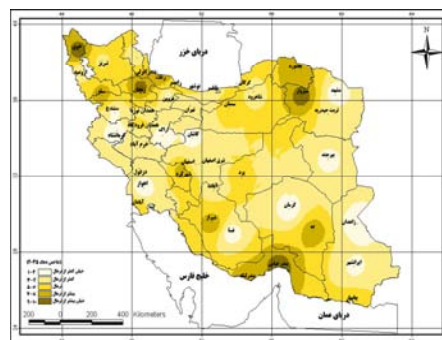
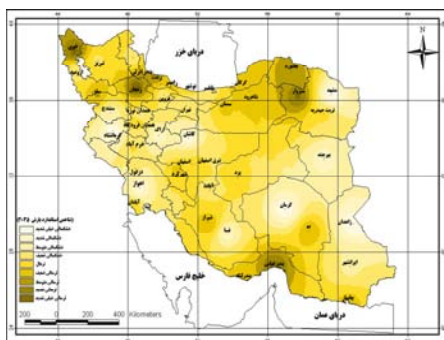
شکل ۴. وضعیت خشکسالی ایران بر اساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طی سال ۲۰۲۵



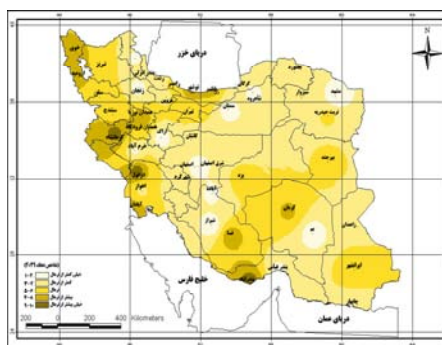
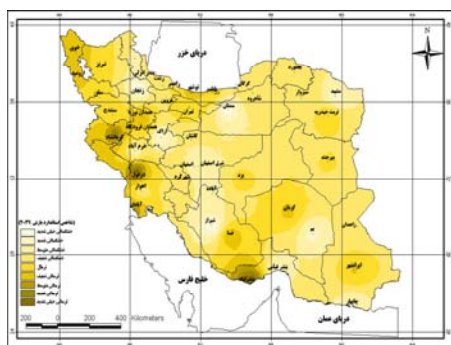
شکل ۵. وضعیت خشکسالی ایران بر اساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طی سال ۲۰۳۲



شکل ۶. وضعیت خشکسالی ایران بر اساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طی سال ۲۰۰۴



شکل ۷. وضعیت خشکسالی ایران بر اساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طی سال ۲۰۰۵



شکل ۸. وضعیت خشکسالی ایران بر اساس شاخص دهک (راست) و SPI (چپ) طی سال ۲۰۰۹

**پیوست:****• GCM (General Circulation Model):**

در یک الگوی گردش عمومی (که الگو اقلیم جهانی نیز شناخته و هر دو این ها به اختصار GCM نامیده می شوند) همان معادلات حرکت به کار رفته در الگوهای پیش بینی عددی وضع هوا (NWP) به کار می روند، اما هدف آن شبیه سازی عددی تغییرات ایجاد شده در اقلیم به عنوان نتیجه ای از تغییرات کند در برخی از شرایط مرزی (نظیر ثابت خورشیدی) یا پارامترهای فیزیکی (نظیر غلظت گازهای گلخانه ای) است. الگوهای پیش بینی عددی وضع هوا (NWP) برای پیش بینی آتی وضعیت آب و هوایی در کوتاه مدت (۱ تا ۳ روز) و میان مدت (۴ تا ۱۰ روز) به کار می رود، اما GCMها برای زمان طولانی تری (سال های متوالی) اجرا می شوند تا بتوانند درباره چگونگی شرایط اقلیم در دوره های آماری اطلاعات کافی را پیاموزند.

**• LARS-WG:**

یک الگو شبیه سازی سری های زمانی از داده های هواشناسی روزانه برای یک مکان مشخص، با توانایی های زیر است:

۱. تولید سری های زمانی بلندمدت مناسب برای ارزشیابی خطرات کشاورزی و هیدرولوژی؛
۲. تولید مقادیر متوسط داده های هواشناسی شبیه سازی شده برای مناطق فاقد ایستگاه؛
۳. این الگو یک ابزار ساده محاسباتی برای تولید داده های روزانه هواشناسی در یک مکان مشخص در آینده براساس سناریوهای اقلیمی به منظور ارزشیابی اثرات مختلف تغییر اقلیم است.

**• HadCM:**

یکی از انواع الگوهای پیش بینی اقلیمی است که اطلاعات مربوط به چگونگی وضع آب و هوا را به صورت بلندمدت ارائه می دهد. این الگو در مرکز Met Office در انگلستان اجرا می شود و نتایج آن به طور مرتب در سایت این مرکز به آدرس <http://www.metoffice.gov.uk> در دسترس است.

**منابع و مآخذ:**

۱. احمدیان طبعی، جواد-همکاران، (۱۳۸۵)، پتانسیل ها و محدودیت های اقلیمی شهرستان های خراسان رضوی، پژوهشکده اقلیم شناسی، گزارش پروژه.
۲. بابائیان، ایمان-نجفی نیک، زهرا، (۱۳۸۴)، مطالعه مقدماتی و ارزشیابی الگوهای Weather Generator مطالعه موردی: ارزشیابی الگو LARS-WG بر روی ایستگاه های منتخب خراسان، پژوهشکده اقلیم شناسی، گزارش پروژه.
۳. حجازی زاده، زهرا - شیرخانی، علیرضا، (۱۳۸۴)، تحلیل و پیش بینی خشکسالی و دوره های خشک کوتاه مدت در استان خراسان، پژوهش های جغرافیایی، شماره ۵۷.
۴. رضی، طیب - شکوهی، علیرضا - تقفیان، بهرام، (۱۳۸۲)، پیش بینی شدت، تداوم و فراوانی خشکسالی با استفاده از روش های احتمالاتی و سری های زمانی - مطالعه موردی استان سیستان و بلوچستان، مجله بیابان، جلد ۸، شماره ۲.



۵. شاه کرمی، نازنین، مساح بوانی، علیرضا، (۱۳۸۵)، تحلیل عدم قطعیت الگوهای جفت شده اقیانوس-اتمسفر-گردش عمومی جو بر سناریوهای تغییر اقلیم دما و بارندگی در حوضه زاینده رود، کارگاه فنی اثرات تغییر اقلیم در مدیریت منابع آب.
۶. صمدی نقاب، سینا، (۱۳۸۵)، پیش بینی خشکسالی با روش ریزگردانی خروجی الگوهای GCM، مجله جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره هشتم.
۷. لشنی زند، مهران - تلوری، عبدالرسول، (۱۳۸۳)، بررسی خشکسالی اقلیمی و امکان پیش بینی آن در شش حوضه واقع در غرب و شمال غرب ایران، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۷۲.
۸. مساح بوانی، علیرضا - مرید، سعید، (۱۳۸۴)، اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و تولید محصولات کشاورزی، مجله تحقیقات منابع آب، سال اول.
9. Babaeian, I., Kwon, W.T. and Im, E.S., (2004), *Application of Weather Generator Technique for Climate Change Assessment over Korea*, Korea Meteorological Research Institute, Climate Research Lab., 98 pp.
10. Dubrovsky, M., (1996), Met & Roll, *The Stochastic Generator of Daily Weather Series for the Crop Growth Model*, Meteorological Bulletin 49, 97-105.
11. Dubrovsky, M., (1996), *Validation of the Stochastic Weather Generator Met & ROLL*, Meteorogickeo Zpravy, Vo. 149, pp. 12q-1380.
12. Ghosh, S., Mujumdar, P.P., (2006), *Future Rainfall Scenario over Orissa with GCM Projections by Statistical Downscaling*, Current Science, Vol. 90, No. 3.
13. Hayes, M.J., Svobada, M.D., Wilhite, D.A. and Vanyarkho, O.V., (1999), *Monitoring 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index*, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 80.
14. Hayes, Michael, J., (2002), *When Is Drought?* Drought Indices, Climate Impacts Specialist, National Drought Mitigation Center, (<http://www.drought.unl.edu/whatis/indices.htm>).
15. Johnson, G.L., Hanson, C.L., Hardegree, S.P. and Ballard, E.B., (1996), *Stochastic Weather Simulation: Overview and Analysis of two Commonly Used Models*, J. Applied Meteorology 35, 1878-1896.
16. McKee, T.B., N.J., Doesken and J., Kliest, (1993), *The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales*, In Proceedings of the 8th Conference of Applied Climatology, 17-22 January, Anaheim, CA. American Meteorological Society, Boston, MA., 179-184.
17. Mc Kague, K., et al. (2003), *Clim. Gen-A ZGmvenient Weather Genera Tion Tool for Canadian Climate Stations*, Proceeding of CCAE/SCGR 2003 Meeting, Montreal, Canada.
18. Rasco, P., Szeidl, L. and Semenov, M.A., (1991), *A Serial Approach to local Stochastic Models*, J. Ecological Modeling, 57, 27-41.
19. Semenov, M.A. and Brooks R.J., (1999), *Spatial Interpolation of the LARS-WG Stochastic Weather Generator in Great Britain*, Climate Research, 11: 137-148.
20. Semenov, M.A. and Barrow, E.M., (2002), *LARS-WG a Stochastic Weather Generator for Use in Climate Impact Studies*, User's Manual, Version 3.0.
21. Thompson, C.S. and Mullan, A.B, (1995), *Weather Generators*, NIWA Internal Report, 115-120.
22. Wilks, D.S., (1992), *Adapting Stochastic Weather Generation Algorithms for Climate Change Studies*, Climate Change, 22, 67-84.
23. Wilks, D.S. and Wilby, R.L., (1999), *The Weather Generation Game: A Review of Stochastic Weather Models*, Progress in Physical Geography, 23, 329-357.