



دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گستر

نشریه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک
جلد بیست و دوم، شماره اول، ۱۳۹۴
<http://jwsc.gau.ac.ir>

تأثیر تغییر اقلیم آینده بر احتمالات انتقال طبقات خشکسالی در اقلیم‌های حدی ایران (مطالعه موردی: ایستگاه‌های بندرانزلی و بوشهر)

* جواد بذرافشان^۱، سمیه حجابی^۲ و آیدا هاشمی‌نسب^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران، دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران،
^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، دانشگاه تهران
تاریخ دریافت: ۹۲/۵/۱۶؛ تاریخ پذیرش: ۹۲/۹/۲۶

چکیده

هدف از این مطالعه مقایسه فراوانی‌های انتقال و فراوانی‌های غیر شرطی خشکسالی در شرایط تغییر اقلیم آینده با شرایط اقلیم فعلی در دو اقلیم حدی ایران (بندرانزلی و بوشهر) می‌باشد. ریزمقیاس نمایی شرایط اقلیم آتی بر مبنای مدل LARS-WG در دوره آماری ۲۱۰۰-۲۰۵۶ به انجام رسید. دوره پایه مطالعه در هر دو ایستگاه، دوره ۲۰۰۵-۱۹۵۶ انتخاب شد. سپس، شاخص بارندگی استاندارد تعدیل شده در سه مقیاس زمانی شامل ۳ ماهه (کوتاه‌مدت)، ۶ ماهه (میان‌مدت) و ۱۲ ماهه (بلندمدت) در دوره‌های فعلی و آتی محاسبه و طبقه‌بندی گردید. به‌منظور مقایسه فراوانی‌های انتقال در دوره آتی با دوره پایه لازم بود تا وابستگی فراوانی‌های انتقال به مقیاس زمانی خشکسالی و شرایط اقلیمی بررسی شود. این کار به کمک مدل‌های لوگ-خطی چهار بعدی صورت گرفت و بهترین ساختار مدل لوگ-خطی با استفاده از روش حذف پس-رو تعیین شد. بر مبنای مدل بهینه لوگ-خطی ماتریس فراوانی‌های مورد انتظار محاسبه شد. آزمون نسبت بخت‌ها برای مقایسه فراوانی‌های انتقال طبقات خشکسالی در دو حالت، یکی در شرایط تغییر مقیاس زمانی خشکسالی و دیگری، در شرایط تغییر اقلیم آینده اجرا گردید. نتایج پژوهش بیانگر افزایش معنی‌دار فراوانی‌های انتقال در ایستگاه بندرانزلی (انتقال از طبقه خشکسالی شدید به غیرخشکسالی و بالعکس) و کاهش معنی‌دار در ایستگاه بوشهر

* مسئول مکاتبه: jbazr@ut.ac.ir

(ماندگاری در طبقه خشکسالی شدید) بود. از نظر فراوانی‌های غیرشرطی نیز مشخص شد که فراوانی طبقه بسیار شدید خشکسالی (در ایستگاه بندرانزلی) و طبقه متوسط خشکسالی (در ایستگاه بوشهر) در آینده نسبت به گذشته افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی: تغییر اقلیم، خشکسالی، شاخص بارندگی استاندارد تعدیل شده، مدل لوگ-خطی، اقلیم‌های حدی

مقدمه

پدیده گرمایش جهانی در قرن حاضر که ناشی از تغییر در غلظت گازهای گلخانه‌ای جو (از ۲۸۰ پی.پی.ام. در سال ۱۷۵۰ به ۳۷۹ پی.پی.ام. در سال ۲۰۰۵ و در صورت ادامه این روند، تا بیش از ۶۰۰ پی.پی.ام. در پایان قرن بیست و یک) به دلیل رشد صنایع و کارخانجات پس از انقلاب صنعتی و افزایش مصرف سوخت‌های فسیلی، تخریب منابع طبیعی و تغییر کاربری اراضی کشاورزی دانسته می‌شود (آی.پی.سی.سی، ۲۰۰۱)، موجب خواهد شد که خشکسالی‌های فراگیر و شدید، زندگی میلیون‌ها نفر در سراسر کره زمین را تهدید و امکان کشاورزی مدرن در بخش‌های زیادی از کره زمین را سلب نمایند (نچرال نیوز، ۲۰۰۶).

خشکسالی یک رخداد هواشناسی تکرارشونده و موقتی است که ناشی از کمبود بارندگی نسبت به حالت نرمال یا مقدار مورد انتظار اقلیمی آن می‌باشد و می‌تواند در هر اقلیمی رخ دهد اما ویژگی‌های آن از منطقه‌ای به منطقه دیگر به‌طور محسوسی متفاوت است (گیلت، ۱۹۵۰). خشکسالی‌ها انواع مختلفی دارند: هواشناسی، کشاورزی، هیدرولوژی و اقتصادی-اجتماعی (دراکوپ و همکاران، ۱۹۸۰). برای به‌کمیت‌درآوردن (پایش) خشکسالی در هر یک از این گروه‌ها، شاخص‌های مختلفی ارائه شده است. هر پدیده خشکسالی، به‌طور عمده با سه مشخصه سختی، تداوم و فراوانی وقوع شناخته می‌شود. ویژگی‌های خشکسالی ممکن است با گذشت زمان تغییر چندانی نکرده یا در اثر تغییر شرایط اقلیمی، تغییر کنند. این تغییرات ممکن است در اقلیم گذشته تاکنون وجود داشته باشند/ نباشند و بر حسب روند تغییرات اقلیم آتی در یک منطقه، گرایش صعودی یا نزولی داشته و یا بدون روند باشند. در زمینه تأثیر تغییر اقلیم بر مشخصه‌های خشکسالی (شامل فراوانی، مدت و شدت) بر مبنای مقایسه داده‌های تاریخی (اقلیم کنونی) و داده‌های به‌دست آمده از سناریوهای تغییر اقلیم (اقلیم آتی)

مطالعات متعددی در مقیاس کره زمین، قاره‌ای یا منطقه‌ای انجام شده است. در یک نمونه از این مطالعات، بورک و همکاران (۲۰۰۶) با محاسبه شاخص سختی خشکسالی پالم (PDSI)^۱ در مقیاس جهانی و بر مبنای آمار اقلیمی کره زمین در نیمه دوم قرن بیستم به این نتیجه رسیدند که در دهه ۱۹۹۰، فراوانی وقوع خشکسالی‌ها حدود ۲۵ درصد نسبت به دهه‌های قبل افزایش یافته است. این در حالی است که تحت سناریوی A2 مدل HADCM3، فراوانی وقوع خشکسالی‌ها در طی قرن ۲۱ اندکی کاهش خواهد یافت اما تداوم آن‌ها طولانی‌تر می‌گردد. علاوه بر این، گستره تحت‌تأثیر خشکسالی‌های استثنایی از ۱ درصد (در شرایط فعلی) به ۳۰ درصد مساحت خشکی‌های کره زمین (تا اواخر قرن ۲۱) افزایش خواهد یافت. در پژوهشی دیگر، که توسط شفیلد و وود (۲۰۰۸) در مقیاس کره زمین به انجام رسید، تغییر در فراوانی وقوع خشکسالی‌ها بر مبنای داده‌های رطوبت خاک (قرون ۲۰ و ۲۱) به‌دست آمده از شبیه‌سازی هشت مدل AOGCM (گزارش چهارم IPCC) تحت سناریوهای A1B، SRES B1 و A2 مورد بررسی قرار گرفت و پیش‌بینی شد که از نیمه دوم قرن ۲۰ تا انتهای قرن ۲۱ تداوم خشکسالی‌های کوتاه‌مدت به دو برابر و فراوانی خشکسالی‌های بلندمدت به سه برابر افزایش یابد. به هر حال، مقدار تغییر در فراوانی خشکسالی تحت سناریوهای انتشار وخیم‌تر مانند A1B و A2 بیش‌تر از سناریوی B1 پیش‌بینی شده است.

در اروپا، بلنکینسوپ و فولر (۲۰۰۷a) با پیش‌بینی خشکسالی‌ها بر مبنای داده‌های بارندگی ماهانه به‌دست آمده از ادغام شش مدل اقلیم منطقه‌ای (RCM) مشتق از چهار مدل گردش عمومی جو (GCM) تحت سناریوی انتشار A2 در مجمع الجزایر بریتانیا پیش‌بینی کردند که خشکسالی‌های کوتاه‌مدت تابستانه در بیش‌تر مناطق افزایش می‌یابند. این در حالی است که با توسعه این مطالعه در گستره اروپا (بلنکینسوپ و فولر، ۲۰۰۷b) مشخص شد که طول مدت خشکسالی‌های بلندمدت در اروپای جنوبی افزایش می‌یابد. چیزی که هر دو مطالعه نام‌برده به آن اذعان داشتند این بود که در سراسر اروپا مقدار بارندگی‌های زمستانه افزایش یافته و از مقدار بارندگی‌های تابستانه کاسته می‌شود.

در استرالیا، ارزیابی خشکسالی‌های آینده به کمک دو شاخص دهک‌های بارندگی و دهک‌های رطوبت خاک تحت دو سناریوی B1 و A1F1 نشان داد که فراوانی خشکسالی به‌طور قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد و افزایش فراوانی خشکسالی‌های کشاورزی بیش‌تر از خشکسالی هواشناسی خواهد بود (امپلاسوکا و همکاران، ۲۰۰۸). نتایج اعمال شاخص SPI بر خروجی شش مدل گردش عمومی

1- Palmer Drought Severity Index

جو تحت دو سناریوی A2 و B2 تا انتهای قرن حاضر در انگلستان نشان داد که تحت سناریوی A2 افزایش چشمگیری در فراوانی وقوع خشکسالی‌های استثنایی کوتاه‌مدت اتفاق می‌افتد. در مقابل، کاهش در خشکسالی‌های بلندمدت در اسکاتلند دیده شد که مربوط به افزایش در بارندگی زمستانه می‌باشد (ویدال و وید، ۲۰۰۹).

تعیین احتمال انتقال طبقات خشکسالی، پیش‌نیاز پیش‌بینی‌های احتمالاتی خشکسالی با استفاده از مدل‌های مارکوفی، شبه‌مارکوفی، مارکوف پنهان و لوگ-خطی است. در حیطه مدل‌های لوگ-خطی از دو روش نسبت بخت‌ها (موریرا و همکاران، ۲۰۰۶؛ موریرا و همکاران، ۲۰۰۸) و استنباط شبه تحلیل واریانس (موریرا و همکاران، ۲۰۱۲) برای مقایسه فراوانی انتقال خشکسالی بین زیردوره‌های یک سری زمانی تاریخی استفاده شده است. به‌عنوان مثال، اگر یک سری زمانی تاریخی ۹۰ ساله به سه دوره سی‌ساله شکسته شود، به کمک روش‌های فوق می‌توان گفت که آیا فراوانی انتقال بین طبقات مختلف یک شاخص خشکسالی با گذشت زمان افزایش یافته است یا خیر (موریرا و همکاران، ۲۰۰۶؛ موریرا و همکاران، ۲۰۰۸؛ بذرافشان، ۲۰۱۰). به هر حال، مقایسه فراوانی‌های انتقال را می‌توان در مورد خروجی‌های ریزمقیاس شده مدل‌های اقلیم جهانی طی دوره‌های آتی نیز انجام داد و نتایج به‌دست آمده از اقلیم فعلی را با نتایج به‌دست آمده از سناریوی معین انتشار گازهای گلخانه‌ای مقایسه کرد. این مهم، در واقع، هدف این مطالعه در اقلیم‌های حدی ایران (بسیار مرطوب: ایستگاه بندرانزلی و فراخشک: ایستگاه بوشهر) را تشکیل می‌دهد.

روش تحقیق

داده‌ها و روش ریزمقیاس نمایی: برای انجام این مطالعه از داده‌های اقلیم فعلی و اقلیم آتی (ریزمقیاس شده مجموع بارندگی ماهانه) دو ایستگاه هواشناسی بندرانزلی (شاخص اقلیم بسیار مرطوب و پرباران) و بوشهر (شاخص اقلیم بسیار خشک و کم‌باران) استفاده شده است. علت انتخاب این دو ایستگاه، شکننده بودن اقلیم‌های حدی (بسیار مرطوب و فراخشک) کشور نسبت به تغییر اقلیم آینده است (نوغان‌کار و همکاران، ۲۰۱۳). به‌منظور ریزمقیاس نمایی داده‌های بارندگی، از خروجی مدل بزرگ-مقیاس HADCM3 که کاربرد وسیع‌تری در مطالعات تغییر اقلیم دارد، تحت سناریوی A2 (در بدبینانه‌ترین حالت) استفاده شد. دوره پایه برای واسنجی معادلات مدل ریزمقیاس نما در هر دو ایستگاه منتخب، دوره آماری ۲۰۰۰-۱۹۷۱ انتخاب گردید. ریزمقیاس نمایی داده‌های بارندگی با استفاده از مدل LARS-WG و بر مبنای نرخ تغییر پیشنهادی سناریوی A2 طی دوره آماری

۲۰۴۰-۲۰۱۱ انجام شد. لازم به ذکر است که روش مدل LARS-WG مبتنی بر توزیع‌های نیمه‌تجربی است و برای ریزمقیاس‌نمایی از روش فاکتور تغییر^۱ استفاده می‌کند (سمنوف، ۲۰۱۲). شاخص بارندگی استاندارد تعدیل شده: اساس شاخص بارندگی استاندارد (SPI)، برازش یک توزیع احتمال مناسب بر سری مجموع بارندگی‌های ماهانه در پنجره زمانی معین است. سپس، احتمال عدم تجاوز مقادیر بارندگی از روی تابع توزیع تجمعی مناسب تعیین و احتمال به‌دست آمده از این طریق به متغیر تصادفی نرمال استاندارد (یعنی، SPI) تبدیل می‌شود (مک‌کی و همکاران، ۱۹۹۳). در نسخه تعدیل شده SPI که توسط کائو و گووینداراجو (۲۰۱۰) توسعه یافت و شاخص بارندگی استاندارد تعدیل شده (SPImod) نامیده شد، ماه پایانی یک پنجره زمانی نیز در محاسبه SPI مهم است، بدین معنا که اگر یک پنجره زمانی مانند پنجره سه‌ماهه انتخاب شده باشد، نسخه اولیه SPI بدون توجه به ماه پایانی، برازش توزیع‌های آماری را بر کل سری زمانی مجموع بارندگی در پنجره سه‌ماهه بررسی می‌کند، اما در نسخه تعدیل شده با ۱۲ سری زمانی سه‌ماهه (هر یک از سری‌ها به یک ماه معین از سال ختم می‌شود) مواجه هستیم که لازم است برازش توزیع بر هر یک از آن‌ها به‌طور مجزا صورت گیرد. طبقه‌بندی SPI تعدیل شده همانند نسخه اولیه آن است (جدول ۱). در این مطالعه، SPI تعدیل شده بر مبنای آمار بارندگی اقلیم فعلی و اقلیم آتی در ایستگاه‌های منتخب محاسبه و با استفاده از جدول ۱ طبقه‌بندی گردید.

جدول ۱- طبقات مختلف خشکسالی SPImod و کدهای اختصاص یافته به هر طبقه.

کد	طبقه	SPImod
۱	غیرخشکسالی	بزرگ‌تر از ۱-
۲	خشکسالی متوسط	۱/۵- تا ۱-
۳	خشکسالی شدید	۲- تا ۱/۵-
۴	خشکسالی بسیار شدید	کم‌تر از ۲-

مدل چهار بعدی لوگ-خطی: مدل‌های لوگ-خطی ابزار مناسبی برای درک الگوهای وابستگی در بین متغیرهای رسته‌ای^۲ می‌باشند (افیفی و همکاران، ۲۰۰۴). فرآیند مدل‌سازی بر روی مقادیر فراوانی

- 1- Change Factor
2- Categorical Data

مندرج در یک جدول توافقی اجرا می‌شود. جدول توافقی مورد بررسی (جدول ۲) دارای چهار متغیر A, B, C و D به ترتیب با سطوح ۱, ۲, ۳, ۴؛ $k=1, 2, 3, 4$ و $l=1, 2, 3, 4$ می‌باشد. متغیر A معرف شاخص بارندگی استاندارد تعدیل شده در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماه، متغیر B معرف شرایط اقلیم فعلی و شرایط سناریوی انتشار گازهای گلخانه‌ای A2 مدل HADCM3، متغیر C به کلاس خشکسالی در زمان t و متغیر D به کلاس خشکسالی در زمان t+۱ اشاره دارد. سطوح ۱، ۲، ۳ و ۴ متغیرهای C و D به ترتیب نماینده طبقات غیرخشکسالی، خشکسالی متوسط، خشکسالی شدید و خشکسالی بسیار شدید می‌باشند. بر طبق جدول ۳، فراوانی‌های مشاهده شده (O_{ijkl}) بیانگر تعداد موارد انتقال از کلاس k در ماه t به کلاس l در ماه t+۱ از شاخص SPImod در مقیاس زمانی i تحت شرایط اقلیمی j می‌باشد. برای مثال، O_{1221} نشان‌دهنده فراوانی‌های انتقال از کلاس ۲ (خشکسالی متوسط) به کلاس ۱ (غیرخشکسالی) تحت سناریوی A2 مدل HADCM3 در مقیاس زمانی سه ماهه SPImod است.

ابعاد جدول توافقی در واقع، تعیین‌کننده ابعاد مدل لوگ-خطی است. با برآزش مدل‌های لوگ-خطی بر جدول توافقی فراوانی‌های مشاهده‌شده انتقال طبقات خشکسالی (O_{ijkl}) می‌توان فراوانی‌های مورد انتظار (E_{ijkl}) متناظر با هر یک از عناصر جدول توافقی مشاهده شده را محاسبه و وابستگی یا استقلال متغیرهای مورد نظر را آزمون نمود.

جدول ۲- جدول توافقی چهاربعدی فراوانی مشاهده‌ای انتقال بین کلاس‌های خشکسالی.

کلاس خشکسالی در زمان t+۱ (D)				کلاس خشکسالی در زمان t (C)	شرایط اقلیمی (B)	مقیاس زمانی SPImod (A)
کد: ۴	کد: ۳	کد: ۲	کد: ۱			
O_{1114}	O_{1113}	O_{1112}	O_{1111}	کد: ۱		
O_{1124}	O_{1123}	O_{1122}	O_{1121}	کد: ۲	اقلیم فعلی	
O_{1134}	O_{1133}	O_{1132}	O_{1131}	کد: ۳	(کد: ۱)	
O_{1144}	O_{1143}	O_{1142}	O_{1141}	کد: ۴		۳ ماهه (کد: ۱)
O_{1214}	O_{1213}	O_{1212}	O_{1211}	کد: ۱		
O_{1224}	O_{1223}	O_{1222}	O_{1221}	کد: ۲	سناریوی A2	
O_{1234}	O_{1233}	O_{1232}	O_{1231}	کد: ۳	(کد: ۲)	
O_{1244}	O_{1243}	O_{1242}	O_{1241}	کد: ۴		

جواد بذرافشان و همکاران

ادامه جدول ۲-

کلاس خشکسالی در زمان t+1 (D)				کلاس خشکسالی	شرایط اقلیمی	مقیاس زمانی SPImod
کد: ۴	کد: ۳	کد: ۲	کد: ۱	در زمان t (C)	(B)	(A)
O ₂₁₁₄	O ₂₁₁₃	O ₂₁₁₂	O ₂₁₁₁	کد: ۱		
O ₂₁₂₄	O ₂₁₂₃	O ₂₁₂₂	O ₂₁₂₁	کد: ۲	اقلیم فعلی	
O ₂₁₃₄	O ₂₁₃₃	O ₂₁₃₂	O ₂₁₃₁	کد: ۳	(کد: ۱)	
O ₂₁₄₄	O ₂₁₄₃	O ₂₁₄₂	O ₂₁₄₁	کد: ۴		۶ ماهه (کد: ۲)
O ₂₂₁₄	O ₂₂₁₃	O ₂₂₁₂	O ₂₂₁₁	کد: ۱		
O ₂₂₂₄	O ₂₂₂₃	O ₂₂₂₂	O ₂₂₂₁	کد: ۲	سناریوی A2	
O ₂₂₃₄	O ₂₂₃₃	O ₂₂₃₂	O ₂₂₃₁	کد: ۳	(کد: ۲)	
O ₂₂₄₄	O ₂₂₄₃	O ₂₂₄₂	O ₂₂₄₁	کد: ۴		
O ₃₁₁₄	O ₃₁₁₃	O ₃₁₁₂	O ₃₁₁₁	کد: ۱		
O ₃₁₂₄	O ₃₁₂₃	O ₃₁₂₂	O ₃₁₂₁	کد: ۲	اقلیم فعلی	
O ₃₁₃₄	O ₃₁₃₃	O ₃₁₃₂	O ₃₁₃₁	کد: ۳	(کد: ۱)	
O ₃₁₄₄	O ₃₁₄₃	O ₃₁₄₂	O ₃₁₄₁	کد: ۴		۱۲ ماهه (کد: ۳)
O ₃₂₁₄	O ₃₂₁₃	O ₃₂₁₂	O ₃₂₁₁	کد: ۱		
O ₃₂₂₄	O ₃₂₂₃	O ₃₂₂₂	O ₃₂₂₁	کد: ۲	سناریوی A2	
O ₃₂₃₄	O ₃₂₃₃	O ₃₂₃₂	O ₃₂₃₁	کد: ۳	(کد: ۲)	
O ₃₂₄₄	O ₃₂₄₃	O ₃₂₄₂	O ₃₂₄₁	کد: ۴		

در این پژوهش، از یک مدل لوگ-خطی چهاربعدي همگن به صورت زیر استفاده شد (اگرستی، ۱۹۹۰):

$$\begin{aligned} \text{Log } E_{ijkl} = & \lambda + \lambda_i^A + \lambda_j^B + \lambda_k^C + \lambda_l^D + \lambda_{ij}^{AB} + \lambda_{ik}^{AC} + \lambda_{il}^{AD} + \lambda_{jk}^{BC} + \lambda_{jl}^{BD} + \lambda_{kl}^{CD} \\ & + \lambda_{ijk}^{ABC} + \lambda_{ijl}^{ABD} + \lambda_{ikl}^{ACD} + \lambda_{jkl}^{BCD} \end{aligned} \quad (1)$$

که در آن، λ : ثابت، λ_i^A : پارامتر مربوط به سطح i ام متغیر A، λ_j^B : پارامتر مربوط به سطح j ام متغیر B، λ_k^C : پارامتر مربوط به سطح k ام متغیر C، λ_l^D : پارامتر مربوط به سطح l ام متغیر D.

λ_{ij}^{AB} : پارامتر مربوط به اثر متقابل سطح i ام متغیر A و سطح j ام متغیر B، λ_{ik}^{AC} : پارامتر مربوط به اثر متقابل سطح i ام متغیر A و سطح k ام متغیر C، λ_{il}^{AD} : پارامتر مربوط به اثر متقابل سطح i ام متغیر A و سطح l ام متغیر D، λ_{jk}^{BC} : پارامتر مربوط به اثر متقابل سطح j ام متغیر B و سطح k ام متغیر C، λ_{jl}^{BD} : پارامتر مربوط به اثر متقابل سطح j ام متغیر B و سطح l ام متغیر D، λ_{kl}^{CD} : پارامتر مربوط به اثر متقابل سطح k ام متغیر C و سطح l ام متغیر D، λ_{ijk}^{ABC} : پارامتر مربوط به اثر متقابل سطح i ام متغیر A، سطح j ام متغیر B و سطح k ام متغیر C، λ_{ijl}^{ABD} : پارامتر مربوط به اثر متقابل سطح i ام متغیر A، سطح j ام متغیر B و سطح l ام متغیر D، λ_{jkl}^{BCD} : پارامتر مربوط به اثر متقابل سطح j ام متغیر B و سطح k ام متغیر C و سطح l ام متغیر D می‌باشد.

رابطه ۱، فرم کلی مدل‌های لوگ-خطی مورد استفاده در این پژوهش را نشان می‌دهد. برآورد پارامترهای مدل با استفاده از روش بیشینه درست‌نمایی^۱ انجام شد. همچنین، فرض شد که مانده‌ها از توزیع پواسون پیروی می‌کنند. با برازش مدل بر جدول توافقی فراوانی‌های مشاهده‌ای، معنی‌دار بودن اثر متقابل متغیرها در سطح احتمال معین (در اینجا، سطح ۵ درصد) با استفاده از روش حذف پس‌رو^۲ آزمون گردید (برای درک روش حذف پس‌رو به بذرافشان (۲۰۱۰) مراجعه شود). در صورت عدم معنی‌داری وابستگی دو متغیر رسته‌ای، مؤلفه اثر متقابل از رابطه ۱ حذف می‌شود. چنانچه هیچ‌یک از مؤلفه‌های اثر متقابل در مدل نهایی ابقاء نگردند، نتیجه گرفته می‌شود که هیچ‌گونه وابستگی بین متغیرهای رسته‌ای وجود ندارد. پس از تعیین فرم بهینه مدل لوگ-خطی در هر یک از ایستگاه‌ها، فراوانی‌های مورد انتظار متناظر با هر یک از خانه‌های جدول توافقی مشاهده‌ای (جدول ۲) محاسبه می‌شود. معیارهای متعددی برای تعیین مدل بهینه لوگ-خطی وجود دارد که از جمله آن‌ها می‌توان به معیار نسبت درست‌نمایی کای مربع^۳ (G^2) اشاره کرد. این معیار با توجه به سطوح متغیرها در این مطالعه، به صورت زیر تعریف شد (اگرستی، ۱۹۹۰):

$$G^2 = 2 \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^c \sum_{k=1}^d \sum_{l=1}^d (O_{ijkl}) \log \left(\frac{O_{ijkl}}{E_{ijkl}} \right) \quad (2)$$

- 1- Maximum Likelihood
- 2- Backward Elimination
- 3- Likelihood Ratio Chi-Square

با فرض پیروی G^2 از توزیع کای-مربع، p -value متناظر با مقدار معین G^2 را تعیین نموده و با سطح معنی‌داری α مقایسه می‌کنیم. چنانچه شرط $p\text{-value} > \alpha$ برقرار باشد، فرضیه H_0 (مدل برازش خوبی بر داده‌ها دارد) رد نخواهد شد.

نسبت بخت‌ها و فاصله اطمینان آن: نسبت بخت‌ها، در اینجا، به صورت نسبت فراوانی‌های مورد انتظار انتقال از یک طبقه خشکسالی (در زمان t) به طبقه دیگر خشکسالی (در زمان $t+1$) تحت شرایط اقلیم فعلی (E_{ijkl}) به شرایط اقلیم آتی ($E_{i'jkl}$) در مقیاس زمانی معین SPI_{mod} تعریف شده است (اگرستی، ۱۹۹۰):

$$\Omega_{1/2|ijkl} = E_{i'jkl} / E_{ijkl} \quad (3)$$

که در آن، $\Omega_{1/2|ijkl}$: نسبت بخت‌ها است. با لگاریتم‌گیری از طرفین رابطه ۳ می‌توان فرم دیگری برای نسبت بخت‌ها براساس رابطه ۱ نوشت:

$$\begin{aligned} \text{Log}\Omega_{1/2|ijkl} &= \text{Log}E_{i'jkl} - \text{Log}E_{ijkl} \quad (4) \\ &= \lambda_{i'}^B + \lambda_{i'k}^{AB} + \lambda_{i'k}^{BC} + \lambda_{i'l}^{BD} + \lambda_{i'jk}^{ABC} + \lambda_{i'jl}^{ABD} + \lambda_{i'kl}^{BCD} - \lambda_i^B - \lambda_{ik}^{AB} - \lambda_{ik}^{BC} \\ &\quad - \lambda_{il}^{BD} - \lambda_{ijk}^{ABC} - \lambda_{ijl}^{ABD} - \lambda_{ikl}^{BCD} \end{aligned}$$

فاصله اطمینان $100 - \alpha / 2$ درصد این نسبت با آنتی‌لگاریتم‌گیری از حد بالا و پایین بازه زیر به دست می‌آید:

$$[\text{Log}\Omega_{1/2|ijkl} - Z_{100-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\text{Log}\Omega_{1/2|ijkl})}, \text{Log}\Omega_{1/2|ijkl} + Z_{100-\alpha/2} \sqrt{\text{Var}(\text{Log}\Omega_{1/2|ijkl})}] \quad (5)$$

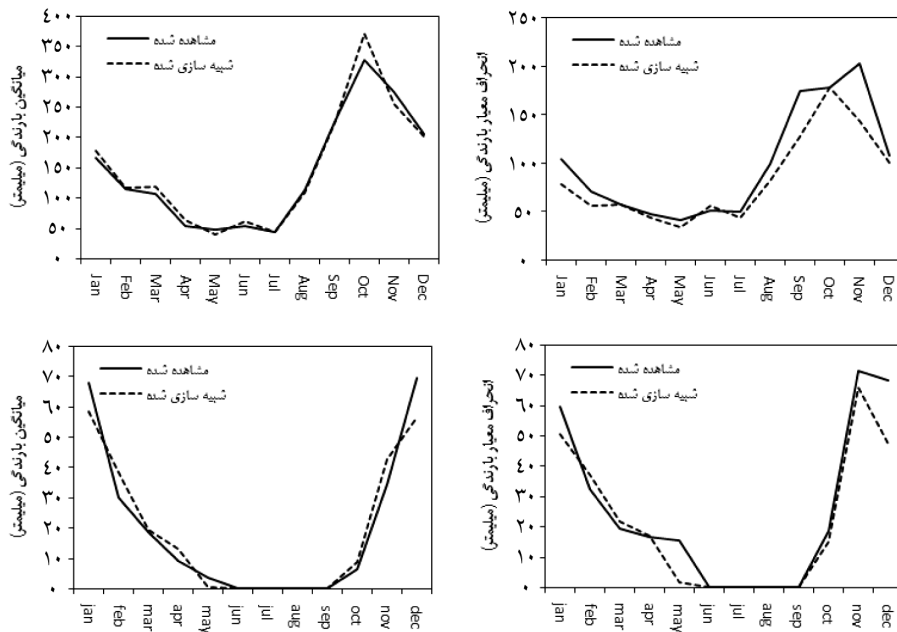
که در آن، $Z_{100-\alpha/2}$ چندک $100 - \alpha / 2$ متغیر تصادفی نرمال استاندارد و α سطح معنی‌داری است. اگر عدد ۱ در فاصله اطمینان مربوط به نسبت بخت‌ها قرار گیرد به این معنا است که بین شرایط فعلی و تحت سناریوی تغییر اقلیم از نظر فراوانی انتقال از کلاس k به کلاس l اختلاف معنی‌داری وجود ندارد. چنانچه، عدد ۱ در فاصله اطمینان نام‌برده قرار نگیرد به این معنا است که فراوانی انتقال در

شرایط فعلی کم‌تر از شرایط آتی است (اگر حد بالای فاصله اطمینان کم‌تر از یک باشد) یا فراوانی انتقال در شرایط فعلی بیش‌تر از شرایط آتی است (اگر حد پایین فاصله اطمینان بزرگ‌تر از یک باشد). شایان ذکر است که نسبت بخت‌ها برای انتقال از یک مقیاس زمانی به مقیاس زمانی دیگر نیز محاسبه شد.

نتایج و بحث

ارزیابی مدل مولد داده LARS-WG در شبیه‌سازی اقلیم فعلی: توانایی مدل LARS-WG از نظر شبیه‌سازی میانگین و انحراف معیار ماهانه بارندگی در اقلیم فعلی مورد در شکل ۱ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱، مشاهده می‌شود که در ایستگاه بندرانزلی، تفاوت‌هایی در میانگین ماه اکتبر و همچنین در انحراف معیار ماه‌های سپتامبر و نوامبر دیده می‌شود. در ایستگاه بوشهر نیز تفاوت‌هایی در میانگین ماه‌های دسامبر و ژانویه و انحراف معیارهای ماه‌های می، دسامبر و ژانویه دیده می‌شود. برای آزمون معنی‌داری تفاوت میانگین‌ها و نسبت انحراف معیارهای ماهانه شبیه‌سازی شده به مشاهده شده به‌ترتیب از آزمون t -استیودنت و آزمون F استفاده شد. نتایج نشان داد که تفاوت معنی‌داری در نتایج شبیه‌سازی‌های بارندگی از نظر میانگین و انحراف معیار در ماه‌های مختلف در سطح اطمینان ۱ درصد وجود ندارد. نتایج به‌دست آمده، این امکان را فراهم نمود تا از مدل LARS-WG برای شبیه‌سازی شرایط اقلیم آتی استفاده گردد.

تعیین ساختار وابستگی فراوانی‌های انتقال: جدول ۳ مدل‌های لوگ-خطی بهینه قابل برآزش بر فراوانی‌های انتقال طبقات خشکسالی SPI تعدیل شده را در دو ایستگاه بندرانزلی و بوشهر نشان می‌دهد. علاوه بر این، پارامترهایی مانند درجه آزادی (df)، نسبت درست‌نمایی کای-مربع (G^2) و p -value مدل‌ها در جدول نام‌برده آورده شده است. فرضیه H_0 دال بر برآزش مناسب مدل لوگ-خطی بر داده‌ها و فرضیه H_1 مخالف آن می‌باشد. براساس مقادیر آماره G^2 و p -value متناظر برای هر یک از مدل‌ها (طبق جدول ۳)، برآزش مدل‌ها در سطح اعتماد ۵ درصد پذیرفته شد. با توجه به جدول ۳ مشاهده می‌شود که وابستگی فراوانی‌های انتقال به مقیاس زمانی شاخص SPI_{mod} (یعنی λ_{ijl}^{ABD}) در هر دو ایستگاه ابقاء شده است. در ایستگاه بوشهر وابستگی فراوانی‌های انتقال به شرایط اقلیمی معنی‌دار شده است اما در ایستگاه بندرانزلی وابستگی فراوانی طبقه شدت خشکسالی در زمان t با شرایط اقلیمی (فعلی و آینده) معنی‌دار شده است.



شکل ۱- بررسی میزان تطابق میانگین‌ها (سمت راست) و انحراف معیارهای (سمت چپ) ماهانه بارندگی مشاهده‌شده و شبیه‌سازی‌شده در ایستگاه بندرانزلی (بالا) و بوشهر (پایین) تحت شرایط اقلیم فعلی.

جدول ۳- مدل‌های لوگ-خطی بهینه در ایستگاه‌های مورد بررسی.

ایستگاه	مدل	df	G^2	p-value
بندرانزلی	$\text{Log } E_{ijkl} = \lambda + \lambda_i^A + \lambda_j^B + \lambda_k^C + \lambda_l^D + \lambda_{ik}^{AC} + \lambda_{ijl}^{ABD}$	۴۴	۳۱/۸	۰/۹۱
بوشهر	$\text{Log } E_{ijkl} = \lambda + \lambda_i^A + \lambda_j^B + \lambda_k^C + \lambda_l^D + \lambda_{ijk}^{ABC} + \lambda_{ijl}^{ABD}$	۳۲	۲۴/۳	۰/۸۳

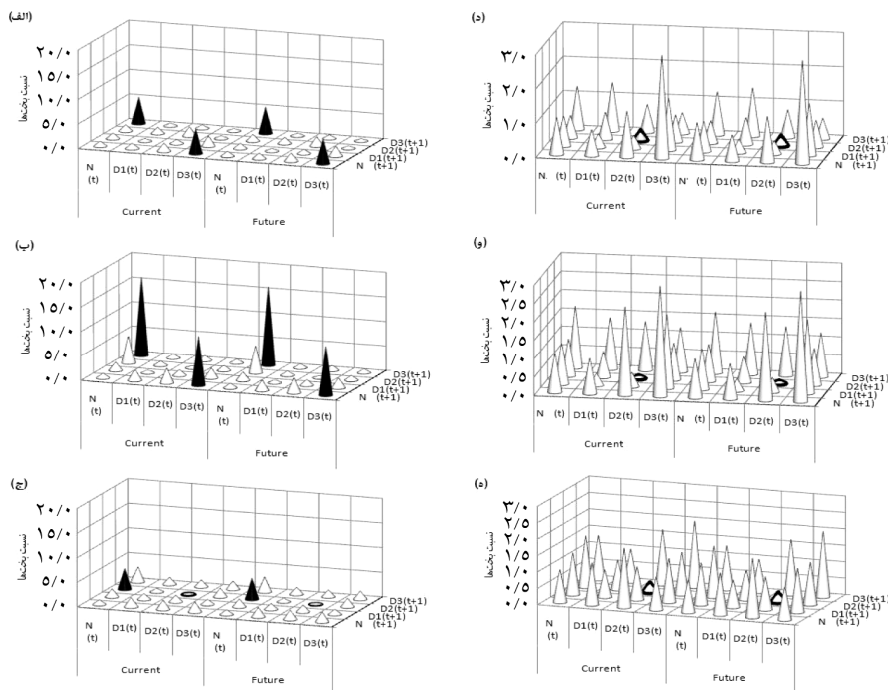
پس از تعیین مدل‌های مناسب، فراوانی‌های مورد انتظار در هر دو ایستگاه برآورد گردید. جدول ۴، فراوانی‌های مورد انتظار و مشاهده‌ای را به‌عنوان نمونه در ایستگاه بندرانزلی نشان می‌دهد. با برآورد فراوانی‌های مورد انتظار در هر دو دوره زمانی (دوره پایه و دوره تغییر اقلیم) می‌توان نسبت بخت‌ها و فاصله اطمینان مربوطه را محاسبه کرد (شکل ۲). نتایج نشان می‌دهد که در ایستگاه بندرانزلی، با افزایش مقیاس زمانی از ۳ به ۶ ماه و ۳ به ۱۲ ماه فراوانی انتقال از طبقه غیرخشکسالی به خشکسالی بسیار شدید و بالعکس، در اقلیم فعلی کاهش معنی‌دار یافته و در اقلیم آتی نیز کاهش معنی‌دار خواهد

یافت (افزایش نسبت بخت‌ها برای SPI3/SPI6 و SPI3/SPI12 تحت شرایط اقلیم فعلی و آینده در شکل ۲-الف-ب). این در حالی است که در انتقال از مقیاس زمانی ۶ به ۱۲ ماه، فراوانی انتقال از طبقه غیرخشکسالی به خشکسالی شدید کاهش معنی‌دار یافته و از طبقه شدید به طبقه شدید افزایش معنی‌دار نشان می‌دهد (شکل ۲-ج). در ایستگاه بوشهر صرفاً کاهش معنی‌دار در انتقال از طبقه خشکسالی شدید به طبقه خشکسالی شدید در هر سه نسبت بخت SPI3/SPI6، SPI3/SPI12 و SPI6/SPI12 مشاهده شد. این نتیجه تحت هر دو شرایط اقلیم فعلی و آتی یکسان بود. لازم به ذکر است که اگر نسبت بخت مثلاً SPI3/SPI6 افزایش یابد، یعنی در انتقال از مقیاس زمانی ۳ به ۶ ماهه، فراوانی انتقال از یک طبقه به طبقه دیگر کاهش می‌یابد.

جدول ۴- جدول توافقی چهاربعدی فراوانی مشاهده‌ای و مورد انتظار انتقال بین کلاس‌های خشکسالی در ایستگاه بندرانزلی.

مقیاس زمانی SPImod (A)	شرایط اقلیمی (B)	کلاس خشکسالی در زمان t (C)	فراوانی انتقال مشاهده‌ای				فراوانی انتقال مورد انتظار			
			کد: ۱	کد: ۲	کد: ۳	کد: ۴	کلاس خشکسالی در زمان t+1 (D)	کلاس خشکسالی در زمان t+1 (D)	کد: ۱	کد: ۲
۳ ماهه (کد: ۱)	اقلیم فعلی (کد: ۱)	کد: ۱	۴۵۶	۲۸	۱۳	۹	۴۵۶/۹	۳۲/۳	۱۱/۵	۶/۵
		کد: ۲	۳۷	۷	۶	۰	۳۲/۲	۱۰/۰	۷/۸	۱/۶
		کد: ۳	۱۰	۹	۸	۳	۱۰/۴	۸/۹	۷/۸	۳/۲
		کد: ۴	۳	۶	۳	۱	۵/۰	۵/۶	۴/۲	۲/۸
	سناریوی A2 (کد: ۲)	کد: ۱	۴۶۴	۲۹	۸	۶	۴۶۴/۱	۲۵/۷	۱۰/۵	۹/۵
		کد: ۲	۲۷	۱۰	۸	۳	۳۲/۸	۸/۰	۷/۲	۲/۴
		کد: ۳	۱۰	۶	۶	۴	۱۰/۶	۷/۱	۷/۲	۴/۸
		کد: ۴	۶	۳	۴	۵	۵/۰	۴/۴	۳/۸	۴/۲
۶ ماهه (کد: ۲)	اقلیم فعلی (کد: ۱)	کد: ۱	۴۵۳	۳۴	۹	۱	۴۶۶/۳	۳۰/۱	۸/۹	۱/۲
		کد: ۲	۳۵	۱۹	۷	۳	۲۹/۳	۱۹/۵	۶/۳	۲/۸
		کد: ۳	۹	۱۰	۴	۳	۶/۴	۱۰/۶	۴/۲	۴/۴
		کد: ۴	۰	۱	۶	۵	۱/۰	۲/۸	۷/۳	۶/۱
	سناریوی A2 (کد: ۲)	کد: ۱	۴۸۶	۱۹	۷	۱	۴۷۳/۷	۲۳/۹	۸/۱	۱/۸
		کد: ۲	۲۳	۱۵	۴	۳	۲۹/۷	۱۵/۵	۵/۷	۴/۲
		کد: ۳	۳	۸	۳	۷	۶/۶	۸/۴	۳/۸	۶/۶
		کد: ۴	۱	۳	۷	۹	۱/۰	۲/۲	۶/۷	۸/۹

فراوانی انتقال مشاهده‌ای				فراوانی انتقال مورد انتظار				کلاس خشکسالی در زمان t (C)	شرایط اقلیمی (B)	مقیاس زمانی SPImod (A)
کلاس خشکسالی در زمان t+1 (D)				کلاس خشکسالی در زمان t+1 (D)						
کد: ۱	کد: ۲	کد: ۳	کد: ۴	کد: ۱	کد: ۲	کد: ۳	کد: ۴			
۴۹۷	۱۷	۳	۰	۴۹۹/۱	۱۸/۹	۲/۱	۰/۴	کد: ۱	اقلیم فعلی (کد: ۱)	۱۲ ماهه (کد: ۳)
۱۶	۱۸	۱۰	۲	۱۵/۴	۱۶/۷	۸/۹	۲/۰	کد: ۲		
۴	۹	۱۴	۲	۳/۵	۷/۸	۱۷/۸	۳/۲	کد: ۳		
۰	۲	۲	۳	۰/۵	۲/۸	۴/۲	۳/۶	کد: ۴		
۵۰۸	۱۶	۰	۰	۵۰۶/۹	۱۵/۱	۱/۹	۰/۶	کد: ۱	سناریوی A2 (کد: ۲)	
۱۴	۱۱	۶	۲	۱۵/۶	۱۳/۳	۸/۱	۳/۰	کد: ۲		
۲	۴	۱۹	۵	۳/۵	۶/۲	۱۶/۲	۴/۸	کد: ۳		
۰	۲	۵	۵	۰/۵	۲/۲	۳/۸	۵/۴	کد: ۴		



شکل ۲- نسبت بخت‌ها برای SPI3/SPI16 (ردیف اول)، SPI3/SPI12 (ردیف دوم) و SPI6/SPI12 (ردیف سوم) در ایستگاه بندرانزلی (الف، ب، ج) و ایستگاه بوشهر (د، و، ه). مخروط‌های مشکی توپر نشان‌دهنده افزایش معنی‌دار و مخروط‌های توخالی با دیواره ضخیم نشان‌دهنده کاهش معنی‌دار هستند.

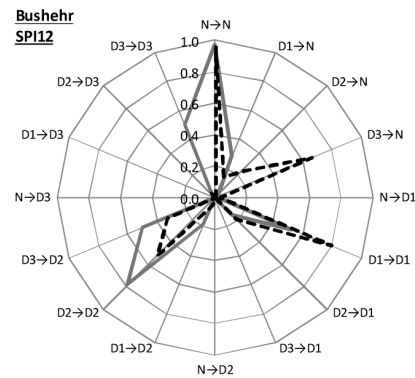
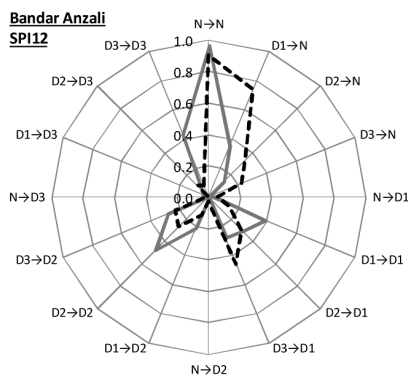
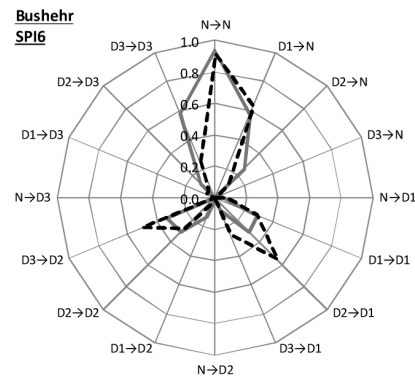
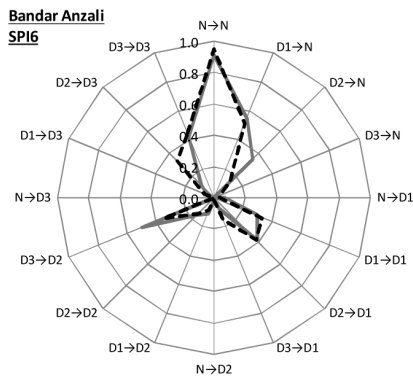
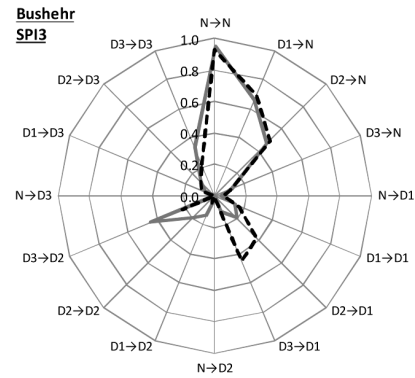
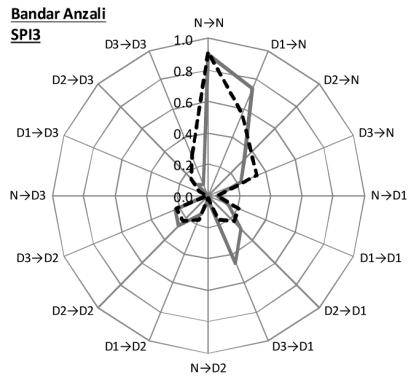
سؤال دیگر پژوهش این بود که آیا فراوانی‌های انتقال در شرایط تغییر اقلیم (تحت سناریوی A2) نسبت به گذشته افزایش می‌یابند؟ امکان بررسی این سؤال در ایستگاه بوشهر با توجه به وابستگی فراوانی‌های انتقال با شرایط اقلیمی وجود داشت، اما در ایستگاه بندرانزلی به دلیل عدم وابستگی آن‌ها به یکدیگر قابل بررسی نبود. در ایستگاه بوشهر، صرفاً کاهش معنی‌دار در انتقال از طبقه شدید به طبقه شدید مشاهده شد که مشابه نتایج به دست آمده در محاسبه نسبت بخت‌ها برای مقیاس‌های زمانی مختلف SPI بود. البته، افزایش‌هایی تا ۴ برابر مقدار فعلی در فراوانی‌های انتقال برخی طبقات مشاهده شد اما از نظر آماری معنی‌دار نبودند.

مقایسه احتمالات انتقال تحت شرایط فعلی و اقلیم آتی: در اینجا مناسب خواهد بود تا مقادیر عددی احتمالات انتقال طبقات مختلف خشکسالی تحت شرایط تغییر اقلیم و اقلیم فعلی مورد مقایسه و بررسی بیش‌تر قرار گیرد. این مقایسه در شکل ۳ تحت سه وضعیت خشکسالی کوتاه‌مدت (۳ ماهه)، میان‌مدت (۶ ماهه) و بلندمدت (۱۲ ماهه) در دو ایستگاه پرباران (بندرانزلی) و کم‌باران (بوشهر) کشور نشان داده شده است. با توجه به شکل نام‌برده (و به کمک جدول ۱) مشاهده می‌شود:

- در مقیاس زمانی سه ماهه و در ایستگاه بندرانزلی، احتمالات انتقال $D3 \rightarrow D3$ و $D3 \rightarrow N$ به ترتیب ۲۰ درصد و ۱۰ درصد در آینده نسبت به گذشته افزایش می‌یابند. این در حالی است که در ایستگاه خشک بوشهر احتمالات انتقال $D3 \rightarrow D1$ و $D2 \rightarrow D1$ افزایش معنی‌دار نسبت به گذشته نشان می‌دهند (به ترتیب با ۳۳ و ۱۸ درصد اختلاف نسبت به گذشته).

- در مقیاس زمانی ۶ ماهه، احتمالات انتقال $D2 \rightarrow D3$ (در ایستگاه بندرانزلی) با مقداری معادل ۲۲ درصد و $D2 \rightarrow D1$ ، $D3 \rightarrow D1$ و $D3 \rightarrow D2$ (در ایستگاه بوشهر) به ترتیب با مقداری معادل ۲۵، ۱۷ و ۱۷ درصد نسبت به گذشته افزایش می‌یابند.

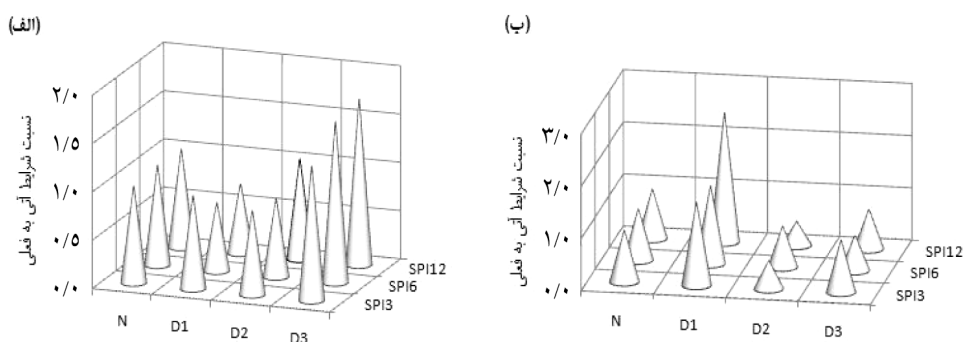
- در مقیاس زمانی ۱۲ ماهه، در ایستگاه بندرانزلی، احتمالات انتقال هر سه طبقه خشکسالی به طبقه غیرخشکسالی افزایش معنی‌دار می‌یابد (بین ۲۰-۳۲ درصد). همچنین، انتقال از طبقه $D3 \rightarrow D1$ نیز به طور معنی‌داری نسبت به گذشته افزایش می‌یابد (۱۸ درصد). در ایستگاه بوشهر، احتمالات انتقال طبقات خشکسالی شدید و بسیار شدید به طبقه غیرخشکسالی به ترتیب به میزان ۶۷ و ۱۹ درصد نسبت به گذشته افزایش می‌یابد. همچنین، افزایش معنی‌دار در انتقال طبقه خشکسالی متوسط به خشکسالی متوسط رخ می‌دهد (معادل ۲۷ درصد).



شکل ۳- مقایسه احتمالات انتقال تحت شرایط اقلیم فعلی (خط پیوسته ضخیم) و اقلیم آتی (تحت سناریوی A2) (خط چین) در مقیاس‌های زمانی ۳، ۶ و ۱۲ ماهه SPI در دو ایستگاه بوشهر و بندرانزلی.

نکته قابل تأمل از نتایج نام برده این است که افزایش احتمالات انتقال معمولاً در انتقال از طبقه بالاتر خشکسالی به طبقات پایین‌تر اتفاق می‌افتد و کم‌تر حالت عکس، یعنی انتقال از سطوح پایین‌تر خشکسالی به سطوح بالاتر خشکسالی اتفاق می‌افتد. این به آن معنی است که گرایش به تضعیف شدت خشکسالی در آینده وجود دارد، گرچه اختلاف احتمالات انتقال آینده با گذشته از نظر مقدار، بزرگ است.

مقایسه فراوانی غیرشرطی طبقات خشکسالی تحت شرایط فعلی و اقلیم آتی: علاوه بر فراوانی‌های شرطی (انتقال)، فراوانی‌های غیرشرطی طبقات خشکسالی شاخص SPImod در ایستگاه‌های بوشهر و بندرانزلی محاسبه شد. نتایج در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به شکل نام‌برده ملاحظه می‌شود که در ایستگاه بسیار مرطوب بندرانزلی، فراوانی طبقه بسیار شدید (D3) خشکسالی در آینده نسبت به گذشته افزایش و فراوانی دو طبقه شدید (D2) و متوسط (D1) در آینده نسبت به گذشته کاهش می‌یابد. در ایستگاه فراخسک بوشهر، فراوانی طبقه متوسط خشکسالی در آینده افزایش می‌یابد و از فراوانی سایر طبقات کاسته می‌شود. این نتیجه بیانگر این مطلب است که بحران خشکسالی در اقلیم بسیار مرطوب بندرانزلی بسیار شدیدتر از اقلیم فراخسک بوشهر است.



شکل ۴- مقایسه نسبت فراوانی‌های غیرشرطی طبقات خشکسالی در ایستگاه بندرانزلی (الف) و بوشهر (ب) در شرایط آتی نسبت به شرایط فعلی.

نتیجه گیری

در این مطالعه، فراوانی‌های انتقال مرتبه نخست طبقات مختلف شاخص بارندگی استاندارد تعدیل شده (SPImod) در دو ایستگاه بندرانزلی (معرف اقلیم بسیار مرطوب ایران) و بوشهر (معرف اقلیم بسیار خشک ایران) تحت شرایط اقلیم فعلی و تغییر اقلیم آتی (خروجی ریزمقیاس شده سناریوی انتشار A2 مدل HADCM3) محاسبه شد. برای ریزمقیاس نمایی از مدل پرکاربرد LARS-WG استفاده شد. برازش مدل‌های مختلف لوگ-خطی بر ماتریس فراوانی‌های انتقال مشاهده شده ایستگاه‌ها انجام شد و مدل بهینه به روش حذف پس-رو تعیین گردید. آزمون نسبت بخت‌ها به منظور مقایسه فراوانی‌های انتقال مورد انتظار بین مقیاس‌های زمانی مختلف SPImod (۳، ۶ و ۱۲ ماه) انجام شد. آزمون نسبت بخت‌ها همچنین، برای مقایسه فراوانی‌های انتقال بین شرایط اقلیم فعلی و شرایط تغییر اقلیم اجرا شد. نتایج نشان داد: الف) مدل ریزمقیاس نمای LARS-WG کارایی مناسبی در شبیه‌سازی اقلیم فعلی دارد، در نتیجه می‌تواند برای ریزمقیاس نمایی شرایط اقلیم آتی مورد استفاده قرار گیرد. ب) مدل بهینه لوگ-خطی برای شبیه‌سازی وابستگی چهار فاکتور مقیاس زمانی خشکسالی، شرایط اقلیمی، طبقه خشکسالی در زمان فعلی و طبقه خشکسالی در زمان آتی، مدلی بود که بین فراوانی‌های انتقال طبقات خشکسالی با مقیاس زمانی خشکسالی (در هر دو ایستگاه مورد بررسی)، بین فراوانی‌های انتقال خشکسالی و شرایط اقلیمی (صرفاً ایستگاه بوشهر)، و بین فراوانی غیرشرطی خشکسالی و شرایط اقلیمی (در ایستگاه بندرانزلی) وابستگی معنی‌دار برقرار نمود. ج) آزمون نسبت بخت‌ها بین مقیاس‌های زمانی مختلف خشکسالی در ایستگاه بندرانزلی بیانگر افزایش معنی‌دار انتقال بین دو طبقه خشکسالی بسیار شدید و غیرخشکسالی و در ایستگاه بوشهر، کاهش معنی‌دار در انتقال از طبقه شدید در زمان t به طبقه شدید در زمان $t+1$ است. د) آزمون نسبت بخت‌ها برای مقایسه فراوانی‌های انتقال بین شرایط آتی و فعلی در ایستگاه بوشهر نشان داد که در دوره آتی، فراوانی انتقال از طبقه شدید در زمان t به طبقه شدید در زمان $t+1$ نسبت به گذشته به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد، گرچه افزایش‌هایی تا \pm برابر مقدار فعلی در آینده در فراوانی‌های انتقال در ایستگاه بوشهر مشاهده شد اما از نظر آماری معنی‌دار نبود. و) مقایسه فراوانی‌های انتقال بدون توجه به نتایج مدل‌های لوگ-خطی، صرفاً با توجه ماتریس فراوانی‌های انتقال مشاهده‌ای نیز انجام شد. تقریباً بر مبنای ماتریس‌های انتقال خشکسالی در دوره آتی و دوره فعلی می‌توان گفت که این فراوانی‌ها در آینده افزایش خواهند یافت و این افزایش، در بیش‌تر موارد در انتقال از سطوح بالاتر

خشکسالی به سطوح پایین‌تر آن اتفاق می‌افتد. یعنی، در آینده گرایشی به سوی تضعیف شدت خشکسالی وجود خواهد داشت. ه) بررسی فراوانی‌های غیرشرطی طبقات مختلف خشکسالی نشان داد که در ایستگاه بندرانزلی، فراوانی طبقه بسیار شدید و در ایستگاه بوشهر، فراوانی طبقه متوسط در آینده نسبت به گذشته افزایش می‌یابد. از این‌رو، تنش و بحران خشکسالی در اقلیم بسیار مرطوب بندرانزلی بسیار وخیم‌تر از اقلیم بسیار خشک بوشهر خواهد بود.

منابع

1. Afifi, A., Clark, V.A., and May, S. 2004. Computer-aided multivariate analysis (Fourth edition). Chapman and Hall/CRC Press, USA.
2. Agresti, A. 1990. Categorical Data Analysis. John Wiley & Sons. New York. 558p.
3. Bazrafshan, J. 2010. Application of log-linear models for analysis of the SPI drought class transitions in old weather stations of Iran during 20th century. Iran. Water Res. J. 4: 7. 109-118.
4. Blenkinsop, S., and Fowler, H.J. 2007a. Changes in drought frequency, severity and duration for the British Isles projected by the PRUDENCE regional climate models. J. Hydrol. 342: 50-71.
5. Blenkinsop, S., and Fowler, H.J. 2007b. Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. Inter. J. Climatol. 27: 1595-1610.
6. Burke, E.J., Brown, S.J., and Christidis, N. 2006. Modeling the recent evolution of global drought and projections for the twenty-first century with the Hadley Centre Climate Model. J. Hydrometeorol. 7: 1113-1125.
7. Dracup, J.A., Lee, K.S., and Paulson, E.G.Jr. 1980. On the definitions of droughts. Water Resources Research. 16: 2. 297-302.
8. Gillete, H.P. 1950. A creeping drought under way. Water and Sewage Works. 97: 104-105.
9. IPCC. 2001. Climate Change: the Scientific Basis. Cambridge University Press. Houghton, U.K. and New York. Pp: 1-83.
10. Kao, S.C., and Govindaraju, R.S. 2010. A copula-based joint deficit index for droughts. J. Hydrol. 380: 121-134.
11. McKee, T.B., Doesken, N.J., and Kleist, J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceedings of the Eighth Conference on applied Climatology. American Meteorological Society, Boston, Pp: 179-184.
12. Moreira, E.E., Paulo, A.A., Coelho, C.A., Pereira, L.S., and Mexia, J.T. 2008. SPI-based drought category prediction using log-linear models. J. Hydrol. 354: 116-130.

13. Moreira, E.E., Paulo, A.A., Pereira, L.S., and Mexia J.T. 2006. Analysis of SPI drought class transitions using log-linear models. *J. Hydrol.* 331: 349-359.
14. Moreira, E.E., Mexia, J.T., and Pereira, L.S. 2012. Are drought occurrence and severity aggravating? A study on SPI drought class transitions using log-linear models and ANOVA-like inference. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 16: 3011-2012.
15. Mpelasoka, F., Hennessy, K., Jones, R., and Bates, B. 2008. Comparison of suitable drought indices for climate change impacts assessment over Australia towards resource management. *Inter. J. Climatol.* 28: 1283-1292.
16. Natural News. 2006. Global warming to cause massive drought over next 100 years, say climatologists. In: http://www.naturalnews.com/020649_global_warming_climate_change.html.
17. Noghankar, H., Bazrafshan, J., and Hejabi, S. 2013. Risk Analysis of agricultural drought characteristics under current climate and changing climate conditions in various climates of Iran. *Iran. Water Res. J.* 6: 11. 185-194.
18. Semenov, M. 2012. Manual of LARS-WG. Rothamsted Research Press, UK. [Available in <http://www.rothamsted.ac.uk/mas-models/larswg.html>]. 27Pp.
19. Sheffield, J., and Wood, E.F. 2008. Global Trends and Variability in Soil Moisture and Drought Characteristics, 1950-2000, from Observation-Driven Simulations of the Terrestrial Hydrologic Cycle. *J. Clim.* 21: 432-458.
20. Vidal, J.P., and Wade, S. 2009. A multimodel assessment of future climatological droughts in the United Kingdom. *Inter. J. Climatol.* 29: 2056-2071.



Gorgan University of Agricultural
Sciences and Natural Resources

J. of Water and Soil Conservation, Vol. 22(1), 2015
<http://jwsc.gau.ac.ir>

Future Climate Change Impact on Drought Classes Transition Probabilities in Extreme Climates of Iran (Case Study: Bandar Anzali and Bushehr Stations)

***J. Bazrafshan¹, S. Hejabi² and A. Hashemi Nasab³**

¹Assistant Prof., Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran,

²Ph.D. Student, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran,

³M.Sc. Student, Dept. of Irrigation and Reclamation Engineering, University of Tehran

Received: 08/07/2013; Accepted: 12/17/2013

Abstract

The aim of this study is the comparison of conditional and unconditional frequencies of drought in future climate change conditions with current climate. Two extreme climates of Iran, including Bandar Anzali and Bushehr were studied. The statistical downscaling of the future climate conditions was done based on LARS-WG model for the period of 2056-2100. The period of 1956-2005 was chosen as the base period of the study. Then, the modified standardized precipitation index was calculated and classified over three time scales of 3-month, 6-month and 12-month in the current and future periods. In order to compare the transmission frequencies of the future with the base period, it was necessary to evaluate the dependency of transmission frequencies on drought time scale and climate conditions. This was done using a four dimensional log-linear model, and the best log-linear model structure was determined based on the backward elimination method. The expected frequencies matrices were calculated based on the most appropriate log-linear model. The odds ratio test was performed for comparing the transition frequencies of the drought classes in terms of changing drought time scale and climate conditions. The results revealed the significant increase of the transition frequencies in Bandar Anzali station (transition from severe drought class to non-drought and vice versa) and the significant decrease in Bushehr station (consistency in severe drought class). Also, the frequency of the extreme drought class (in Bandar Anzali station) and moderate drought class (in Bushehr station) will increase in the future compared with the current.

Keywords: Climate change, Drought, Extreme climates, Log-linear model, Modified standardized precipitation index

* Corresponding Author; Email: jbazr@ut.ac.ir