

## ارزیابی تأثیرات اقتصادی و هیدرولوژیکی تغییرات اقلیم در حوضه آبخیز خررود

ابوذر پرهیزکاری<sup>۱</sup>، سعید یزدانی<sup>۲\*</sup>

۱. دانشجوی دکتری اقتصاد کشاورزی، دانشگاه پیام نور تهران

۲. استاد گروه اقتصاد کشاورزی، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۱۰/۱۰؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۶/۰۱/۱۵)

## چکیده

در مطالعه حاضر ابتدا الگوی رفتاری متغیر اقلیمی بارش طی دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۳ در سطح حوضه آبخیز خررود بررسی شد. سپس از یک سیستم مدل‌سازی بیوفیزیکی- اقتصادی برای ارزیابی تأثیر تغییرات اقلیم ناشی از کاهش بارش بر متغیرهای هیدرولوژیکی (منابع آب در دسترس و ارزش واقعی نهاده آب آبیاری) و اقتصادی (تولیدات کشاورزی و سود ناخالص کشاورزان) تحت سناریوهای مختلف (تغییر اقلیم ملایم، متوسط و شدید) استفاده شد. سیستم مدل‌سازی یادشده، شامل تابع عملکرد محصولات مبتنی بر میزان بارش (جزء بیوفیزیکی مدل) و رهیافت برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی (جزء اقتصادی مدل) بود که طی سه مرحله پیاپی در محیط نرم‌افزاری GAMS 24.1 حل شد. داده‌های مورد نیاز از طریق ایستگاه‌های باران‌سنجی و اداره‌های ذی‌ربط در استان قزوین جمع‌آوری شد. الگوی رفتاری بارش نشان داد این متغیر اقلیمی پس از سال ۱۳۸۰ در سطح حوضه آبخیز خررود روندی کاهشی را طی کرده است. نتایج مدل نشان داد تغییرات اقلیم ناشی از کاهش بارش تحت سناریوهای ملایم تا شدید به کاهش ۱۱/۳ تا ۲۳/۰ درصد در منابع آب در دسترس، افزایش ۷/۰۸ تا ۱۵/۲۲ درصد در ارزش اقتصادی آب آبیاری، کاهش ۵/۱۴ تا ۱۶/۳۹ درصد در مجموع سطح زیر کشت محصولات آبی و کاهش ۶/۵۸ تا ۱۳/۴۱ درصد در سود ناخالص کشاورزان حوضه آبخیز خررود نسبت به شرایط سال مبنا یا پایه منجر شده است. بیشترین کاهش منابع آب در دسترس نیز تحت سناریوی تغییر اقلیم شدید و به میزان ۲۹/۱۵ میلیون مترمکعب حاصل شد. در پایان برای مقابله با آثار تغییر اقلیم و حفاظت از منابع آب در سطح این حوضه آبخیز، به‌کارگیری تکنیک‌های کم‌آبیاری، تعیین نرخ آب‌بها برای کشاورزان بر اساس ملاحظه برابری، آیش‌گذاری اراضی و ارائه تسهیلات به کشاورزان برای تجهیز مزارع به سیستم‌های نوین آبیاری پیشنهاد شد.

**کلیدواژگان:** الگوی رفتاری بارش، پایداری منابع آب، تغییرات اقلیم، متغیرهای هیدرولوژیکی، مدل بیوفیزیکی- اقتصادی.

## مقدمه

آبخیز خررود، برنامه‌ریزی مناسبی را برای مدیریت منابع آب در این استان ایجاد می‌کند.

## پیشینه تحقیق

طی سال‌های اخیر، در زمینه ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر کمیت و کیفیت منابع آب سطحی و زیرزمینی و میزان منابع آب در دسترس، مطالعات متعددی صورت گرفته است. محمودی و پرهیزکاری [۴] آثار تغییر اقلیم بر عملکرد محصولات منتخب، الگوی کشت و سود ناخالص کشاورزان را در محدوده مطالعاتی دشت قزوین بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد با اعمال سناریوی یک درجه افزایش دما و ۱۰ میلی‌متر کاهش بارش، عملکرد جو، ذرت، چغندر و یونجه به ترتیب ۱۵، ۲۴، ۱۳ و ۱۷ درصد افزایش و عملکرد گندم، گوجه‌فرنگی و کلزا به ترتیب ۲۹، ۲۰ و ۲۳ درصد کاهش می‌یابد. سود ناخالص کشاورزان نیز نسبت به سال پایه ۱۰/۵ درصد افزایش می‌یابد. گودرزی و همکارانش [۵] با بهره‌گیری از مدل اقلیمی IHACRES و مدل گردش عمومی HadCM3 تأثیر تغییرات اقلیمی بر تغییرات رواناب سطحی حوضه آبریز دریاچه ارومیه را بررسی کردند. نتایج نشان داد متوسط رواناب سطحی در حوضه مطالعه‌شده طی دهه‌های ۲۰۲۰، ۲۰۵۰ و ۲۰۸۰ نسبت به دوره پایه به ترتیب ۵/۴، ۲۲/۳۵ و ۶۵/۴ درصد کاهش خواهد یافت. افزون بر این، نتایج به‌دست‌آمده از سناریوهای مختلف نشان داد حوضه آبریز دریاچه ارومیه در دوره‌های آتی به‌طور جدی با مشکل کاهش رواناب سطحی، کاهش بارندگی و افزایش دما روبه‌رو خواهد شد. مسماریان و همکارانش [۶] تأثیر تغییر اقلیم بر بیلان آب زیرزمینی دشت شهرکرد را بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد میزان بارندگی سالانه به‌طور متوسط برای دوره ۲۰۱۵-۲۰۲۹ حدود ۱۲ درصد افزایش و متوسط دمای سالانه ۰/۴ درجه سلسیوس افزایش خواهد یافت. همچنین، بر اثر افزایش بهره‌برداری از چاه‌ها طی دوره مد نظر، ذخیره آبخوان دشت شهرکرد به مقدار ۶/۳ تا ۱۰/۹۴ میلیون مترمکعب کاهش خواهد یافت. نظری پویا و همکارانش [۷] تأثیرات تغییر اقلیم بر پارامترهای هیدرو اقلیمی حوضه سد اکباتان در استان همدان را بررسی کردند. نتایج پژوهش آنها نشان داد در این حوضه، میزان متوسط دمای هوا طی دوره ۲۰۴۵-

تغییرات اقلیم یکی از مسائل مهمی است که طی دهه‌های اخیر در بخش کشاورزی نمود یافته و تولید محصولات زراعی را با محدودیت مواجه کرده است. این پدیده منابع آبی هر منطقه را طی زمان تغییر می‌دهد. با افزایش دما، نیاز گیاهان به آب بیشتر می‌شود و بهره‌برداری از منابع آب افزایش می‌یابد. علاوه بر این، کاهش نزولات آسمانی و عدم تغذیه صحیح آبخوان‌ها و سفره‌های آب زیرزمینی از دیگر عواملی هستند که به بهره‌برداری بیش از حد منابع آب منجر شده است. بدین منظور پیش‌بینی‌ها بیان‌کننده آن است که تا سال ۲۰۵۰ مسئله مدیریت منابع آب اصلی‌ترین موضوع بحث‌شده در کشورهای مختلف جهان خواهد بود. کشور ایران نیز بر اساس پیش‌بینی‌های انجام‌شده تا سال ۲۰۲۵ به لیست کشورهای که با وضعیت کمبود آب مواجه‌اند، اضافه خواهد شد [۱].

در ایران با توجه به ناپایداری شرایط اقلیمی و عدم توزیع یکنواخت زمانی- مکانی بارش، توجه به پایداری منابع آب و شیوه‌های مقابله با خشکی و خشکسالی ضروری است [۲]. حوضه آبخیز خررود محدوده مطالعاتی در این تحقیق است که در بخش جنوب غربی استان قزوین واقع شده است. میانگین بارش سالانه در این حوضه حدود ۲۳۴/۱ میلی‌متر است که این میزان حدود هشت درصد کمتر از متوسط بارندگی در سطح کشور است. طی سال‌های اخیر، به‌وجود آمدن شکاف بین قیمت واقعی آب کشاورزی و قیمتی که کشاورزان به‌عنوان آب‌بها پرداخت می‌کنند، سبب مصرف بی‌رویه آب آبیاری در این حوضه شده است. در واقع، پرداخت بهای کم برای نهاده آب توسط کشاورزان، مصرف بی‌رویه آب و کاهش راندمان آن را در پی داشته است. با توجه به این‌که در این حوضه آب‌های سطحی از طریق بارندگی و تشکیل رودخانه فصلی خررود به‌دست می‌آیند، در فصول گرم سال کاهش بارندگی و نبود این منبع موقت (رودخانه فصلی خررود) سبب شده است آب آبیاری مورد نیاز برای کشاورزان از طریق برداشت آب‌های زیرزمینی تأمین شود. این عامل طی زمان سبب افت سطح آب‌های زیرزمینی و منفی شدن بیلان آب در بیشتر نقاط این حوضه، به‌ویژه در مناطق منتهی به دشت قزوین شده است [۳]. به‌طور کلی، مصرف بی‌رویه آب آبیاری و کاهش بارش طی سال‌های اخیر در حوضه

و هیدرولوژیکی استفاده شد. فرایند نخست، شامل مدل برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی<sup>۵</sup> (PMP) است که جزء اقتصادی مدل تجمیعی در این مطالعه به‌شمار می‌رود. فرایند دوم، شامل تابع عملکرد محصولات مبتنی بر نیاز آبی و میزان بارش است که جزء بیوفیزیکی مدل تجمیعی است. شکل ۱، فرایند انجام کار در این تحقیق را نشان می‌دهد.

#### منطقه مطالعه شده

حوضه آبخیز خررود با مساحتی معادل ۳۲۴۹ کیلومتر مربع در طول جغرافیایی ۶° و ۵۳° تا ۴۵° و ۴۰° شرقی و عرض جغرافیایی ۲۵° و ۳۵° تا ۴۷° و ۴۰° شمالی واقع شده است [۱۴]. مهم‌ترین منبع تأمین آب در این حوضه، رودخانه خررود است که در مناطق بالادست شهرستان آوج دارای ۱۳۲۰ متر و در مناطق پایین‌دست دشت قزوین دارای ارتفاع ۱۲۰۰ متر از سطح دریاست. آورد سالانه این رودخانه ۲۶ میلیون مترمکعب است که پس از رودخانه شاهرود دومین رودخانه پرآب قزوین محسوب می‌شود. کشاورزی آبی بیشتر در اراضی حاصل‌خیز پیرامون این رودخانه صورت می‌گیرد و کشاورزان مناطق بالادست، آب مورد نیاز خود را از طریق سیستم‌های پمپاژ و انتقال آب از رودخانه تأمین می‌کنند. مجموع منابع آب در دسترس کشاورزان در این حوضه آبخیز حدود ۱۲۷ میلیون مترمکعب است که برای کشت و تولید محصولات منتخبی چون گندم آبی، جو آبی، ذرت دانه‌ای، گوجه‌فرنگی، چغندر و یونجه مصرف می‌شود. میزان سطح زیر کشت اراضی فاریاب در این منطقه حدود ۱۰۳۶۵ هکتار است [۱۵]. شکل ۲ موقعیت جغرافیایی استان قزوین و حوضه آبخیز خررود را در آن نشان می‌دهد.

جزء اقتصادی مدل تجمیعی: رهیافت برنامه‌ریزی ریاضی

#### اثباتی (PMP)

برنامه‌ریزی ریاضی اثباتی (PMP) از جمله مدل‌هایی است که برای تحلیل سیاست‌ها و حل مسائل در سطح تجمیعی استفاده می‌شود [۱۶ و ۱۷]. این مدل نخستین‌بار در سال ۱۹۹۵ توسط هوویت<sup>۶</sup> معرفی و برای تحلیل سیاست‌های بخش کشاورزی استفاده شد [۱۸]. مهم‌ترین مسئله در مدل PMP، تعیین سطح تجمیع مکانی (فضایی)<sup>۷</sup> برای

۲۰۶۵ بر اساس سناریوهای یادشده، به‌ترتیب ۲/۱۲ و ۱/۱۲ درجه سانتی‌گراد افزایش می‌یابد و میزان بارندگی به‌ترتیب ۶/۱ و ۱/۴ درصد کاهش پیدا می‌کند.

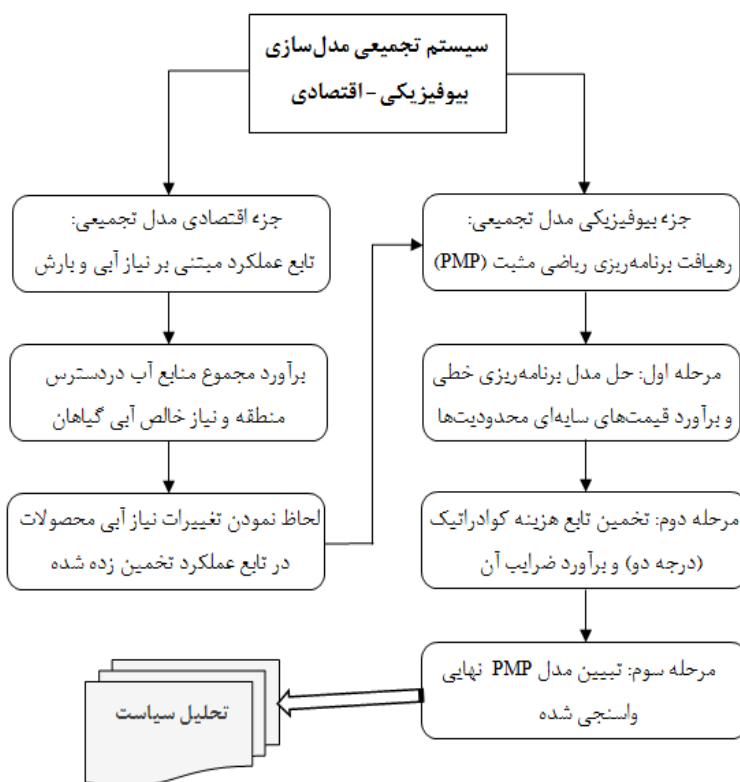
در خارج از کشور نیز جونگ و چانگ [۸] روندهای رواناب آینده تحت سناریوی مختلف تغییر اقلیم در حوضه رودخانه ویلامت اورگان<sup>۱</sup> آمریکا را ارزیابی کردند. نتایج، روندهای منفی در رواناب بهار و تابستان و روندهای مثبت در رواناب پاییز و زمستان را برای دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۹۹ نشان داد. تراینهام و همکارانش [۹] تأثیرات پدیده تغییر اقلیم را بر سامانه منابع آب در منطقه پیوجت سوند<sup>۲</sup> بررسی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد تغییر اقلیم، آبدهی مطمئن سامانه را در آینده کاهش خواهد داد و لازم است سیاست‌های بهره‌برداری برای تأمین تقاضای آب در افق آتی تغییر کند. پانس و همکارانش [۱۰] با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی به ارزیابی آثار تغییر اقلیم بر تولیدات بخش کشاورزی در کشور شیلی پرداختند. نتایج پژوهش آنها نشان داد پدیده تغییر اقلیم آثار توزیعی متفاوتی را بر عملکرد محصولات منتخب زراعی و باغی در این کشور دارد، اما بیشترین تأثیرات منفی این پدیده (کاهش عملکرد) در تولید میوه‌جات است. استیو و همکارانش [۱۱] با استفاده از یک مدل هیدرو اقتصادی<sup>۳</sup> آثار تغییر اقلیم بر تولیدات بخش کشاورزی و مدیریت منابع آب در حوضه آبخیز میدل گادایانیا<sup>۴</sup> در کشور اسپانیا را ارزیابی کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد تغییر اقلیم به‌وجودآمده در منطقه مطالعه شده می‌تواند آثار متعددی را بر کاهش منابع آب در دسترس، کاهش عملکرد محصولات و افزایش نیاز آبی محصولات زراعی و باغی ذرت، برنج، گندم، زیتون، هلو و آلو داشته باشد.

#### مواد و روش

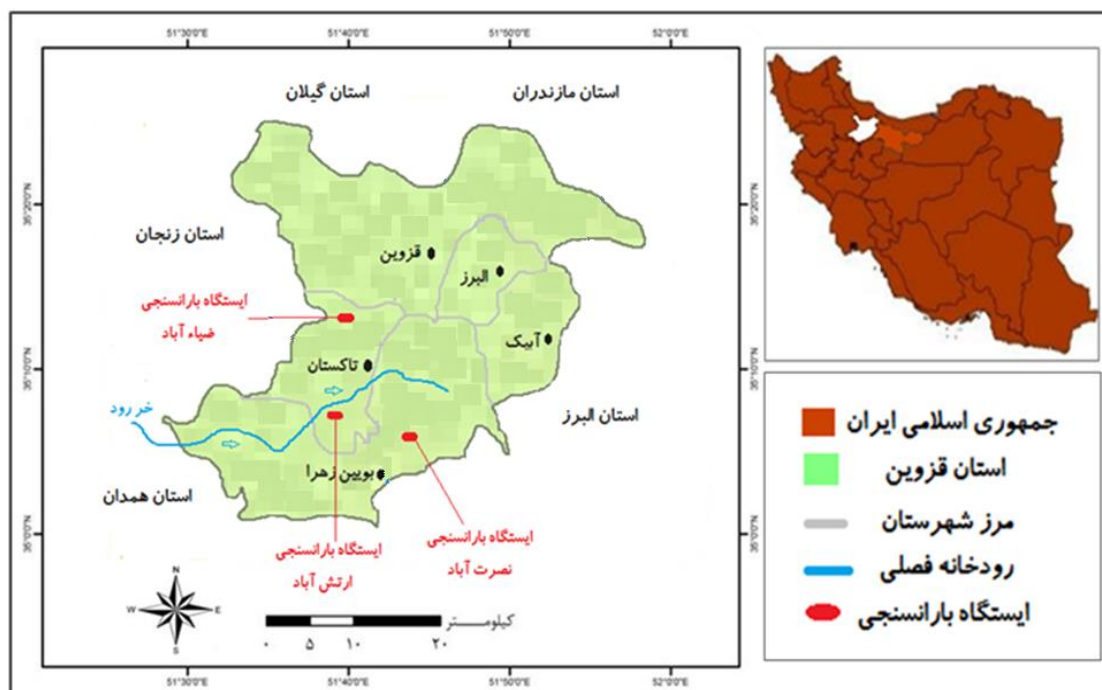
سیستم تجمیعی مدل‌سازی بیوفیزیکی- اقتصادی استفاده شده در تحقیق حاضر که برگرفته از روش‌های هوویت و همکارانش [۱۲] و قریشی و همکارانش [۱۳] است، دو فرایند مجزا داشت که از ارتباط بین این دو فرایند برای تحلیل آثار تغییر اقلیم بر متغیرهای اقتصادی

5. Positive Mathematical Programming  
6. Howitt  
7. Spatial Aggregation

1. Willamette River Basin  
2. Puget Sound  
3. Hydro-Economic Model  
4. Middle- Guadiana Basin, Spain



شکل ۱. فرایند انجام کار در مدل تجمیعی بیوفیزیکی-اقتصادی [۱۸ و ۱۹]



شکل ۲. موقعیت منطقه مطالعه شده [۱۵]

$$a_{ihj} = \frac{\tilde{Area}_{ih}}{\tilde{Area}_{ih, Land}} \quad \forall ihj \quad (5)$$

رابطه ۲ محدودیت منابع را نشان می‌دهد که در آن  $b_j$  کل منابع در دسترس است. رابطه ۳ محدودیت واسنجی مدل را نشان می‌دهد که در آن  $\tilde{Area}_{ih}$  مقدار مشاهده شده فعالیت  $i$  در سال پایه تحت روش آبیاری  $h$  است.  $\varepsilon$  نیز مقدار مثبت کوچکی است که برای جلوگیری از به وجود آمدن وابستگی خطی بین محدودیت‌های ساختاری و واسنجی به کار می‌رود [۱۲] و [۱۹]. در رابطه ۲  $\lambda_{ih}^j$  قیمت سایه‌ای محدودیت سیستمی و در رابطه ۳  $\lambda_{ih}^c$  قیمت سایه‌ای محدودیت واسنجی را نشان می‌دهد. رابطه ۴ نیز بیان‌کننده محدودیت منفی بودن سطح فعالیت‌های زراعی است [۱۲، ۱۶ و ۱۷].

مرحله دوم: تخمین تابع هزینه کوادراتیک<sup>۲</sup> (درجه دوم) در این مرحله از مقادیر دوگان به دست آمده برای محدودیت‌های واسنجی در مرحله اول، برای تخمین تابع هزینه غیرخطی یا کوادراتیک (درجه دوم) استفاده می‌شود. معمولاً برای آسانی محاسبه و فقدان دلایل قوی برای انتخاب توابع دیگر، از تابع هزینه متغیر درجه دوم زیر استفاده می‌شود. این تابع دو ضریب آلفا (پارامتر رهگیری) و گاما (شیب تابع هزینه) دارد و شکل ریاضی آن به صورت زیر است [۱۹ و ۲۰].

$$TC_{ih} = \alpha_{ih} Area_{ih} + \frac{1}{\gamma} \gamma_{ih} Area_{ih}^2 \quad (6)$$

در رابطه یادشده،  $TC_{ih}$  کل هزینه تولید محصول  $i$  تحت روش آبیاری  $h$ ،  $\alpha_{ih}$  پارامتری برای نشان دادن هزینه متوسط (پارامتر رهگیری) و  $\gamma_{ih}$  شیب تابع هزینه و پارامتری به تبعیت از مقادیر دوگان محدودیت‌های واسنجی است (پارامتر گاما).

هزینه نهاده آب به صورت مجزا در تابع هدف غیرخطی مرحله سوم لحاظ می‌شود [۱۹]. رابطه ۷ هزینه نهاده آب را در قالب آب‌بها نشان می‌دهد:

$$C_{W, Charge} = \sum_{i=1}^6 \sum_{h=1}^4 [V cost_{h, water} + (Wcharge * IW_{ih}^R)] Area_{ih} \quad (7)$$

در رابطه یادشده،  $V cost_{h, water}$  هزینه متغیر مربوط به روش آبیاری  $h$ ،  $Wcharge$  قیمت آب یا آب‌بهای

تعریف دامنه کاری این مدل است. تعیین این سطح به جای تحلیل سیاست‌ها در یک بعد وسیع، ترکیبی از ویژگی‌های منطقه‌ای را با مجموعه داده‌های کوچک‌تر لحاظ کرده و سیاست‌های مد نظر را در سطح مناطق تعیین شده بررسی می‌کند [۱۷]. به طور کلی، واسنجی مدل PMP ارائه شده در مطالعه حاضر در سه مرحله زیر صورت می‌گیرد.

مرحله اول: حل مدل برنامه‌ریزی خطی (LP) و برآورد مقادیر دوگان محدودیت‌ها

در این مرحله، یک مدل برنامه‌ریزی خطی<sup>۱</sup> (LP) برای حداکثر کردن مجموع سود ناخالص کشاورزان با توجه به محدودیت‌های منابع و واسنجی حل می‌شود و در ادامه مقادیر دوگان یا قیمت‌های سایه‌ای برای مجموعه محدودیت‌های مدل به دست می‌آید [۱۲ و ۱۷]. شکل ریاضی این مرحله از مدل PMP را می‌توان برای منطقه مطالعه شده به صورت زیر نشان داد:

$$Max \Pi = \left( \sum_{i=1}^6 \sum_{h=1}^4 (price_{ih} * yield_{ih} - \sum_{j=1}^5 a_{ihj} cost_{ihj}) \right) Area_{ih} \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^6 a_{ihj} Area_{ih} \leq b_j \quad \forall jh \quad [\lambda_{ih}^j] \quad (2)$$

$$Area_{ih} \leq \tilde{Area}_{ih} + \varepsilon \quad \forall ih \quad [\lambda_{ih}^c] \quad (3)$$

$$Area_{ih} \geq 0 \quad \forall ih \quad (4)$$

رابطه ۱ به عنوان تابع هدف مدل برنامه‌ریزی خطی، شامل حداکثر کردن مجموع سود ناخالص کشاورزان است. در این رابطه،  $\Pi$  مجموع سود ناخالص کشاورزان،  $i$  تعداد محصولات (گندم آبی، جو آبی، ذرت دانه‌ای، گوجه‌فرنگی، چغندر قند و یونجه)،  $z$  تعداد نهاده‌ها (زمین، آب، نیروی کار، ماشین‌آلات و سرمایه) و  $h$  روش آبیاری (غرقابی، جوی و پشته‌ای، قطره‌ای، بارانی) است.  $price_{ih}$ ،  $yield_{ih}$  و  $Area_{ih}$  به ترتیب قیمت بازاری، عملکرد و سطح زیر کشت محصول  $i$  است که با روش آبیاری  $h$  در حوضه آبخیز خررود تولید شده است.  $cost_{ihj}$  هزینه تولید محصول  $i$  با مصرف نهاده  $j$  و روش آبیاری  $h$  است.  $a_{ihj}$  بیان‌کننده ضرایب لئونتیف است که نسبت استفاده هر عامل تولید به زمین را نشان می‌دهد و از رابطه ۵ به دست می‌آید [۱۲ و ۱۹].

آبیاری  $h$  و  $IF\ cost$  و  $WF$  به ترتیب بیان کننده هزینه استحصال آب و حجم آب استحصالی در منطقه مطالعه شده هستند [۱۳ و ۲۰].

مرحله سوم: تبیین مدل PMP نهایی واسنجی شده در این مرحله که مرحله پایانی مدل PMP است، با استفاده از تابع هزینه غیرخطی واسنجی شده در مرحله قبل و مجموعه محدودیت‌های ارائه شده (به استثنای محدودیت واسنجی)، یک مدل برنامه ریزی غیرخطی به صورت روابط ۹-۱۷ ساخته می‌شود [۱۲ و ۱۷]:

$$Max \prod = \sum_{i=1}^f \sum_{h=1}^f \left[ (price_{ih} * yield_{ih} * \varphi change_{yield, rain}) \right] Area_{ih} - \left( \alpha_{ih} Area_{ih} + \gamma_{ih} Area_{ih} \right) - \left( \sum_{i=1}^f \sum_{h=1}^f [V\ cost_{h, water} + (W\ charge * IW_{ih}^R)] Area_{ih} \right) \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^f \sum_{h=1}^f [(IE\ cost_h * WE_h) + (IF\ cost * WF)] Area_{ih}$$

Subject to:

$$\sum_{i=1}^f \sum_{h=1}^f IW_{ih}^R * Area_{ih} \leq (1 - Cloos) * T_{wat} \quad (10)$$

$$\sum_{i=1}^f \sum_{h=1}^f Area_{ih} \leq T_{Area} \quad (11)$$

$$DArea_i = TArea - TArea_{ih} \quad \forall ih \quad (12)$$

$$\sum_{h=1}^f WE_h + WF \leq T_{wat} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^f La_{ih} * Area_{ih} \leq TLa \quad \forall h \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^f K_{ih} * Area_{ih} \leq TK \quad \forall h \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^f M a_{ih} * Area_{ih} \leq TMa \quad \forall h \quad (16)$$

$$Area_{ih} \geq 0 \quad \forall ih \quad (17)$$

بارش است. رابطه ۱۰ محدودیت آب قابل دسترس را در حوضه آبخیز مطالعه شده نشان می‌دهد که در آن،  $Cloos$  درصد حجم قابل انتقال آب و  $T_{wat}$  کل آب قابل دسترس است. رابطه ۱۱ بیان کننده محدودیت اراضی آبی زیر کشت است و نشان می‌دهد مجموع سطح زیر کشت محصولات آبی ( $Area_{ih}$ ) در حوضه بررسی شده کمتر از کل سطح زیر کشت محصولات ( $TArea$ ) است. رابطه ۱۲ محدودیت اراضی دیم یا زمین‌های بدون آبیاری در حوضه آبخیز مطالعه شده است و نشان می‌دهد سطح زیر کشت

پرداختی توسط کشاورزان در حوضه آبخیز مد نظر و  $IW_{ih}^R$  حجم آب استفاده شده برای تولید محصول  $i$  تحت روش آبیاری  $h$  در منطقه مطالعه شده است [۱۹]. رابطه ۸ هزینه مربوط به نهاده آب را در قالب هزینه‌های استحصال و انتقال آب نشان می‌دهد:

$$C_{Tred} = \sum_{i=1}^f \sum_{h=1}^f [(IE\ cost_h * WE_h) + (IF\ cost * WF)] Area_{ih} \quad (8)$$

در رابطه ۸  $WE_h$  و  $IE\ cost_h$  به ترتیب بیان کننده هزینه انتقال آب آبیاری و حجم آب انتقال یافته در روش

رابطه ۹ تابع هدف غیرخطی مدل PMP را نشان می‌دهد که شامل تابع عملکرد مبتنی بر نیاز آبی و بارش (جزء بیوفیزیکی مدل تجمعی یا رابطه ۱۸)، تابع هزینه خطی برای نهاده آب (در قالب آب‌بها، هزینه‌های انتقال و استحصال آب) و تابع هزینه درجه دوم یا کوادراتیک برای سایر نهاده‌های استفاده شده (زمین، نیروی کار، سرمایه و ماشین‌آلات) است. ضریب مقداری  $\varphi change_{yield, rain}$  در این رابطه، بیان کننده تغییرات به وجود آمده در عملکرد محصولات منتخب پس از اعمال سناریوهای اقلیمی کاهش

$$IW_{nih}^R = \frac{(ET_{nih}^R - ERain_{ni})}{IEff_{nih}} \quad \forall nih \quad (19)$$

با در اختیار داشتن مقادیر کارایی سیستم‌های آبیاری و منابع آب در دسترس می‌توان رابطه ۲۰ را بین متغیر اقلیمی بارش و نیاز آبی محصولات برقرار کرد [۲۰]:

$$ET_{nih}^R = (IW_{nih}^R * IEff_{nih}) + ERain_{ni} \quad \forall nih \quad (20)$$

پس از محاسبه مقادیر نیاز آبی بر اساس میزان بارش در رابطه ۲۰، می‌توان تغییرات نیاز آبی محصولات را در تابع عملکرد تخمینی لحاظ کرد و از این طریق تغییرات به وجود آمده در عملکرد محصولات ( $\phi change_{yield, rain}$ ) را محاسبه و آثار آن را با حل مدل برنامه‌ریزی ارائه‌شده در محیط نرم‌افزاری GAMS 24.1 بر منابع آب در دسترس، تولیدات کشاورزی و شاخص‌های اقتصادی سود ناخالص و ارزش آب سنجید.

پس از بررسی الگوی رفتاری متغیر اقلیمی بارش در سطح حوضه آبخیز خررود طی دوره مطالعه‌شده، به منظور انعطاف‌پذیری سناریوهای ارائه‌شده و دستیابی به نتایج کاربردی، آثار اقتصادی و هیدرولوژی متغیر اقلیمی بارش تحت سه سناریوی کاهش بارش ۱۰، ۲۰ و ۳۰ میلی‌متر ارزیابی شد. انتخاب سناریوهای اقلیمی پس از ارزیابی تغییرات بارش طی دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۳ در سطح حوضه آبخیز خررود صورت گرفت. بدین منظور، سه حالت متفاوت بارشی به ترتیب ملایم (کاهش متوسط بارش در سال‌های مد نظر به میزان ۱۰ میلی‌متر)، متوسط (کاهش متوسط بارش در سال‌های مد نظر به میزان ۲۰ میلی‌متر) و شدید (کاهش متوسط بارش در سال‌های مد نظر به میزان ۳۰ میلی‌متر) بررسی شد (برای انتخاب سناریوهای اقلیمی در این مطالعه متوسط کاهش بارش برای سال‌های یادشده مد نظر قرار گرفت).

### نتایج و بحث

همان‌گونه که در بخش مواد و روش‌ها اشاره شد، در این تحقیق ابتدا تغییرات متغیر اقلیمی بارش طی دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۳ در سطح حوضه آبخیز خررود بررسی شد. بدین منظور، از داده‌های سری زمانی ثبت‌شده برای متغیر اقلیمی بارش طی دوره بررسی‌شده در ایستگاه‌های

اراضی دیم برابر با تفاضل اراضی آبیاری شده و کل اراضی زیر کشت است. رابطه ۱۳ محدودیت منابع آب قابل استحصال و انتقال را نشان می‌دهد و بیان‌کننده آن است که مجموع حجم آب استحصال و انتقالی در حوضه آبخیز خررود به علت وجود تلفات و هدررفت به صورت تبخیر و تعرق و ورود به زهکش‌ها کمتر از کل حجم آب قابل دسترس است. روابط ۱۴-۱۶ به ترتیب محدودیت‌های مربوط به نهاده‌های نیروی کار، سرمایه و ماشین‌آلات هستند. در این روابط،  $La_{ih}$ ،  $K_{ih}$  و  $Ma_{ih}$  به ترتیب بیان‌کننده میزان مورد نیاز نیروی کار، سرمایه و ماشین‌آلات برای تولید محصول  $i$  تحت روش آبیاری  $h$  و  $TK$ ،  $TLa$  و  $TMa$  به ترتیب مجموع نیروی کار، سرمایه و ماشین‌آلات قابل دسترس در حوضه آبخیز خررود هستند. رابطه ۱۷ نیز بیان‌کننده غیر منفی بودن سطح فعالیت‌های زراعی در حوضه آبخیز خررود است و تضمین می‌کند که روش یادشده به لحاظ فیزیکی در منطقه مطالعه‌شده قابل اجراست.

### جزء بیوفیزیکی مدل تجمیعی: تابع عملکرد محصولات مبتنی بر نیاز آبی و بارش

تغییرات بارش تا حد زیادی می‌تواند میزان عملکرد محصولات را تحت تأثیر قرار دهد. اثرگذاری این متغیر از طریق نیاز خالص آبی محصولات صورت می‌پذیرد (۱۳) و [۱۹]. در مطالعه حاضر، به منظور بررسی آثار سناریوهای بارشی بر عملکرد محصولات از تابع عملکرد مبتنی بر نیاز آبی ارائه‌شده توسط قارشی و همکارانش [۳۷] به صورت زیر استفاده شد:

$$Yield_{nih} = f(ET_{nih}^R) = a_{ij} + b_{ij} \times ET_{nih}^R + c_{ij} \times (ET_{nih}^R)^2 \quad (18)$$

که در آن،  $Yield_{nih}$  و  $ET_{nih}^R$  عملکرد و نیاز آبی محصول  $i$  تحت روش آبیاری  $h$  در حوضه آبخیز  $r$  هستند. عرض از مبدأ،  $b_{ij}$  شیب و  $c_{ij}$  ضریب عامل درجه دوم تابع عملکرد است. براساس رابطه ۱۹ منابع آب قابل دسترس برای تولید محصول  $i$  تحت روش آبیاری  $h$  تابعی از میزان بارش ( $ERain_{ni}$ )، نیاز آبی محصولات ( $ET_{nih}^R$ ) و کارایی سیستم‌های آبیاری ( $IEff_{nih}$ ) است [۲۰]:

پس از سال ۱۳۸۰ در سطح حوضه آبخیز خررود نسبت به سال‌های قبل از آن کاهش یافته است.

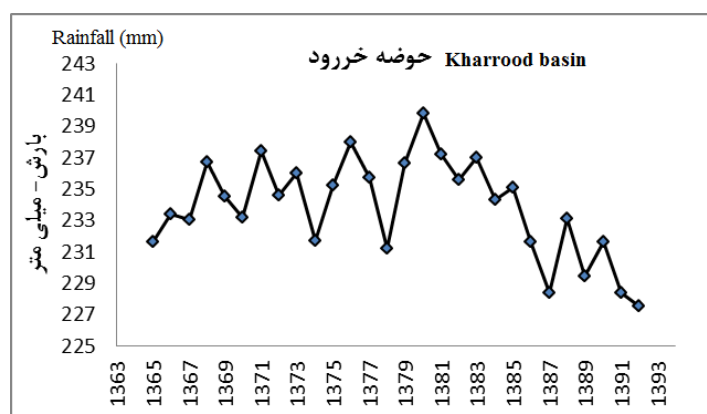
جدول ۲ میانگین بارش ماهانه را در حوضه آبخیز خررود طی سال پایه (۱۳۹۲-۱۳۹۳) نشان می‌دهد. با توجه به این جدول، ملاحظه می‌شود که در سال پایه بیشترین میزان بارش در ماه‌های فروردین و اردیبهشت و کمترین میزان بارش در مردادماه حاصل شده است.

باران‌سنجی واقع در محدوده مطالعاتی استفاده شد. جدول ۱، مشخصات ایستگاه‌های مدنظر را نشان می‌دهد:

شکل ۳ روند تغییرات یا الگوی رفتاری متغیر اقلیمی بارش را در مقیاس سالانه و برای دوره زمانی یادشده در سطح حوضه آبخیز خررود نشان می‌دهد. با توجه به این شکل، ملاحظه می‌شود که متغیر اقلیمی بارش در سطح حوضه آبخیز خررود پس از سال ۱۳۸۰ روندی کاهشی را طی کرده است. این امر بیان می‌کند که میانگین بارندگی‌های سالانه

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های باران‌سنجی مطالعه‌شده در حوضه آبخیز خررود

نام ایستگاه باران‌سنجی	طول جغرافیایی (درجه)	عرض جغرافیایی (درجه)	ارتفاع حوضه (متر)	دوره آماری مد نظر
نصرت‌آباد	۵۰/۷۳	۳۵/۹۶	۱۲۱۰	۱۳۶۰-۱۳۹۳
ضیاء‌آباد	۴۲/۱۶	۳۶/۰۵	۱۲۶۸	۱۳۶۵-۱۳۹۳
ارتش‌آباد	۴۰/۲۸	۳۹/۴۴	۱۳۱۹	۱۳۶۰-۱۳۹۳



شکل ۳. الگوی رفتاری بارش طی دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۳ در حوضه آبخیز خررود

جدول ۲. میانگین بارش ماهانه و فصلی در حوضه آبخیز خررود طی سال پایه ۱۳۹۲-۱۳۹۳

میزان بارش (mm)	ماه‌ها و فصول سال	میزان بارش (mm)	ماه‌ها و فصول سال
۱۲/۳	مهر	۴۳/۱	فروردین
۲۸/۵	آبان	۳۸/۷	اردیبهشت
۲۰/۶	آذر	۱۲/۳	خرداد
۲۰/۴	میانگین بارش پاییز	۳۱/۴	میانگین بارش بهار
۳۸/۹	دی	۲/۷	تیر
۳۰/۷	بهمن	۰/۳	مرداد
۱۹/۱	اسفند	۴/۸	شهریور
۲۹/۵	میانگین بارش زمستان	۲/۶	میانگین بارش تابستان



سطحی در حوضه آبخیز خررود ۷۱/۹۰ میلیون مترمکعب بوده که منابع آب تجمیع‌یافته منطقه و آورد رودخانه خررود بیشترین سهم را (۵۱/۴۷ میلیون مترمکعب) در تأمین جریانات آب سطحی به خود اختصاص داده‌اند. آب‌های زیرزمینی نیز با ۵۴/۸۳ میلیون مترمکعب حجم، بخش دیگری از منابع آب در دسترس کشاورزان را در حوضه رودخانه خررود تأمین می‌کنند. با توجه به اینکه در منطقه بررسی‌شده بیشتر کشاورزان آب مورد نیاز برای اراضی زراعی خود را از طریق جریانات سطحی رودخانه خررود تأمین می‌کنند، در فصول گرم سال با کاهش جریانات سطحی، منابع آب زیرزمینی تا حد زیادی بهره‌برداری می‌شوند. سهم زیاد منابع آب زیرزمینی در جدول ۳، بیان‌کننده این موضوع است. به‌طور کلی، ملاحظه می‌شود که کل منابع آب در دسترس کشاورزان حوضه آبخیز خررود طی سال پایه حدود ۱۲۶/۷۳ میلیون مترمکعب است.

جدول ۴ میزان کارایی و درصد استفاده از روش‌های متنوع آبیاری (غرقابی، جوی و پشته‌ای، قطره‌ای و بارانی) را در حوضه آبخیز خررود طی سال پایه نشان می‌دهد.

افزون بر یافته‌های یادشده، داده‌های آماری جدول ۲ نشان می‌دهند در مردادماه سال پایه، در حوضه رودخانه خررود بارشی به‌میزان ۰/۳ میلی‌متر صورت گرفته است که کمترین سطح بارش را طی ماه‌های مختلف سال در این حوضه آبخیز نشان می‌دهد. بیشترین میزان بارندگی به‌طور میانگین حدود ۳۱/۴ میلی‌متر و در فصل بهار (ماه‌های فروردین، اردیبهشت و خرداد) و کمترین میزان بارندگی به‌طور میانگین حدود ۲/۶ میلی‌متر و در فصل تابستان (ماه‌های تیر، مرداد و شهریور) به وقوع پیوسته است. نتایج تأثیرپذیری بیشتر بارش‌های بهار را نسبت به بارش‌های پاییزه و زمستانه در حوضه آبخیز خررود طی سال پایه ۱۳۹۲-۱۳۹۳ نشان می‌دهند.

جدول ۳ میزان آب در دسترس حاصل از منابع آبی مختلف (چاه‌ها، کانال‌ها، سدها، رودخانه‌ها، چشمه‌ها و قنات‌ها) را برای سال پایه ۱۳۹۲-۱۳۹۳ تحت شرایط متفاوت آب و هوایی، در سطح حوضه آبخیز خررود نشان می‌دهد.

با توجه به این جدول ملاحظه می‌شود که در سال پایه، میزان کل منابع آب در دسترس حاصل از جریانات

جدول ۳. منابع آب قابل دسترس تحت شرایط اقلیمی متفاوت در سطح حوضه آبخیز خررود طی سال پایه (برحسب میلیون مترمکعب)

منابع تأمین آب در منطقه مطالعه‌شده	حجم آب سطحی	حجم آب زیرزمینی	حجم کل آب در دسترس	سهم منبع تأمین آب (درصد)
چاه‌های عمیق شخصی	۰	۱۸/۷۰	۱۸/۷۰	۱۴/۷۵
چاه‌های نیمه‌عمیق شخصی	۰	۲۴/۶۵	۲۴/۶۵	۱۹/۴۵
چاه‌های عمیق دولتی	۰	۱۱/۴۸	۱۱/۴۸	۹/۰۸
کانال‌ها و سدهای انحرافی	۱۳/۱۷	۰	۱۳/۱۷	۱۰/۳۹
رودخانه و آب تجمیع‌یافته	۵۱/۴۷	۰	۵۱/۴۷	۴۰/۶۱
قنات و چشمه	۷/۲۶	۰	۷/۲۶	۵/۷۲
مجموع آب در دسترس	۷۱/۹۰	۵۴/۸۳	۱۲۶/۷۳	۱۰۰

جدول ۴. میزان کارایی و درصد استفاده از روش‌های متنوع آبیاری در حوضه آبخیز خررود

روش‌های متنوع آبیاری در منطقه مطالعه‌شده	درصد کاربری روش آبیاری در سطح اراضی	درصد راندمان روش آبیاری در منطقه
آبیاری غرقابی	٪۳۶	٪۴۳
آبیاری جوی و پشته‌ای	٪۴۱	٪۵۱
آبیاری قطره‌ای	٪۱۴	٪۹۳
آبیاری بارانی	٪۹	٪۸۷

راندمان آنها در مقایسه با روش‌های نوین آبیاری بسیار کم است و به هدررفت حجم زیادی از منابع آب در دسترس کشاورزان منطقه منجر می‌شوند.

جدول ۵، نتایج به‌دست‌آمده از مدل بیوفیزیکی-اقتصادی ارائه‌شده را پس از اعمال سناریوهای اقلیمی ناشی از کاهش بارش در سطح حوضه آبخیز خررود نشان می‌دهد:

جدول ۵. تأثیر تغییرات اقلیم بر میزان منابع آب در دسترس و تولیدات کشاورزی در حوضه رودخانه خررود

شاخص بررسی‌شده	وضعیت فعلی	میزان تغییرات	سناریوهای اقلیمی ناشی از کاهش بارش		
			تغییر اقلیم ملایم	تغییر اقلیم متوسط	تغییر اقلیم شدید
منابع آب در دسترس <sup>۱</sup>	۱۲۶/۷۳	مقدار	۱۱۲/۴۰	۱۰۵/۵۷	۹۷/۵۸
		درصد	-۱۱/۳	-۱۶/۷	-۲۳/۰
سطح زیر کشت آبی <sup>۲</sup>	۱۰۳۶۵	مقدار	۹۸۳۲	۹۲۱۷	۸۶۶۷
		درصد	-۵/۱۴	-۱۱/۰۷	-۱۶/۳۹
سود ناخالص کل <sup>۳</sup>	۲۱۱/۴۶	مقدار	۱۹۷/۵۴	۱۹۲/۰۰	۱۸۳/۱۰
		درصد	-۶/۵۸	-۹/۲۰	-۱۳/۴۱
ارزش اقتصادی آب <sup>۴</sup>	۱۴۷۵	مقدار	۱۵۷۹	۱۶۴۲	۱۷۰۰
		درصد	۷/۰۸	۱۱/۳۶	۱۵/۲۲

۱. برحسب میلیون مترمکعب؛ ۲. برحسب هکتار؛ ۳. برحسب ده میلیون ریال؛ ۴. برحسب ریال در مترمکعب

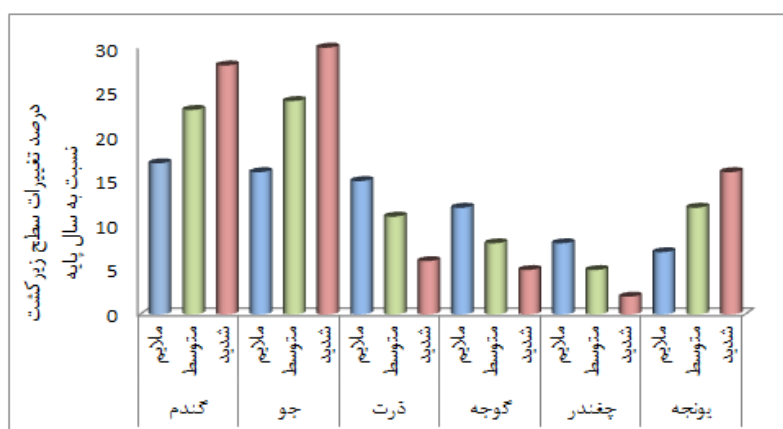
مطابق با نتایج جدول ۵، ملاحظه می‌شود که پس از رخداد تغییرات اقلیم تحت سناریوهای ملایم تا شدید در سطح حوضه آبخیز خررود، میزان بازده ناخالص کشاورزان از ۱۹۷۵/۴ به ۱۸۳/۱۰ میلیون ریال می‌رسد که نسبت به شرایط سال پایه ۶/۵۸ تا ۱۳/۴۱ درصد کاهش می‌یابد. کاهش عایدی یا بازده ناخالص کشاورزان این حوضه به‌علت کم‌شدن منابع آب در دسترس کشاورزان و عدم توسعه سطح زیر کشت محصولات منتخب زراعی است. بنابراین، کاهش بازده ناخالص کشاورزان حوضه آبخیز خررود از دیگر پیامدها و آثار اقتصادی تغییرات اقلیم ناشی از کاهش بارش است. افزون بر این، نتایج مندرج در جدول ۵ بیان می‌کند که با اعمال سناریوهای تغییر اقلیم ملایم، متوسط و شدید، قیمت سایه‌ای یا ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری در حوضه آبخیز خررود به‌ترتیب ۱۵۷۹، ۱۶۴۲ و ۱۷۰۰ ریال برآورد می‌شود که این میزان در مقایسه با شرایط سال پایه (ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری ۱۴۷۵ ریال) با افزایشی معادل ۷/۰۸، ۱۱/۳۶ و ۱۵/۲۲ درصد همراه است. علت این امر، کاهش ۱۱/۳، ۱۶/۷ و ۲۳/۰ درصدی منابع آب در دسترس کشاورزان در حوضه آبخیز خررود

با توجه به نتایج جدول ۴، ملاحظه می‌شود که روش‌های آبیاری قطره‌ای و بارانی در بین سایر روش‌ها بیشترین راندمان آبیاری را دارند، درحالی که به‌دلیل نیاز به هزینه‌های اولیه، کوهستانی‌بودن منطقه و شیب‌داربودن اراضی کاربردی کمتری را در بین سایر روش‌ها دارند. روش‌های آبیاری جوی و پشته‌ای و غرقابی بیشترین درصد استفاده را در حوضه آبخیز خررود دارند، درحالی که

با توجه به نتایج جدول ۵، ملاحظه می‌شود که کاهش بارش در حوضه آبخیز خررود تحت سناریوهای اقلیمی ملایم تا شدید موجب کاهش منابع آب در دسترس کشاورزان این حوضه از ۱۱۲/۴۰ به ۹۷/۵۸ میلیون مترمکعب می‌شود که این میزان، کاهشی معادل با ۱۱/۳ تا ۲۳ درصد را در منابع آب در دسترس کشاورزان نسبت به شرایط سال پایه به دنبال دارد. کاهش مجموع سطح زیر کشت محصولات آبی از ۹۸۳۲ به ۸۶۶۷ هکتار نیز از پیامدهای اقتصادی دیگر به‌وجودآمده بر اثر کاهش بارش تحت سناریوهای ملایم تا اقلیم در سطح حوضه آبخیز خررود است. علت این امر، کم‌شدن منابع آب در دسترس کشاورزان بر اثر کاهش بارش است که امکان کشت مجموع اراضی مستعد موجود در منطقه را غیرممکن کرده است. درواقع، با رخداد پدیده تغییر اقلیم ناشی از کاهش بارش تحت سناریوهای ملایم تا شدید و به‌تبع آن، با کاهش منابع آب قابل استحصال در سطح حوضه آبخیز خررود، کشاورزان این منطقه به سمت کاهش سطح زیر کشت محصولات آبربر متمایل می‌شوند و این امر در نهایت کاهش مجموع اراضی زیر کشت منطقه را به دنبال دارد. افزون بر این،

آب آبیاری را تحت شرایط رخداد تغییر اقلیم ناشی از کاهش بارش در سطح حوضه آبخیز خررود بازگو می‌کند. بنابراین، افزایش ارزش واقعی نهاده آب یکی دیگر از پیامدها یا آثار اقتصادی تغییرات اقلیم در محدوده مطالعاتی است. شکل ۴، درصد تغییرات الگوی کشت محصولات منتخب زراعی را تحت سناریوهای اقلیمی ملایم، متوسط و شدید (سناریوهای ناشی از ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر کاهش بارش) در سطح حوضه آبخیز خررود نشان می‌دهد:

تحت شرایط اقلیمی ملایم، متوسط و شدید است که به محدودیت منابع آب موجود برای کشاورزان این حوضه منجر می‌شود. درواقع، نتایج گویای این است که با کاهش بارش به میزان ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر نسبت به سال پایه و یا با رخداد تغییر اقلیم ملایم تا شدید، کشاورزان حوضه آبخیز خررود با محدودیت بیشتری برای تأمین آب آبیاری مورد نیاز اراضی خود مواجه می‌شوند که در این شرایط ناگزیر به پرداخت قیمت یا ارزش بیشتری برای هر مترمکعب آب خواهند شد. این امر افزایش ارزش واقعی یا اقتصادی نهاده

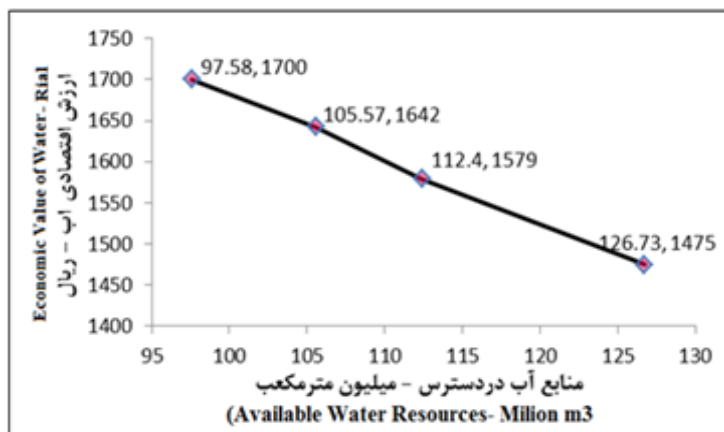


شکل ۴. درصد تغییرات الگوی کشت محصولات منتخب تحت سناریوهای اقلیمی ناشی از کاهش بارش در حوضه آبخیز خررود

اعمال سناریوهای اقلیمی کاهش بارش در حوضه آبخیز خررود نسبت به سال پایه با افزایش همراه است. علت افزایش سطح زیر کشت این محصول، تعدد واحدهای پروار بندی و پرورش دام در منطقه مطالعه شده است که تمایل کشاورزان یونجه‌کار را برای کشت بیشتر این محصول و کسب سود اقتصادی بیشتر افزایش می‌دهد. زراعت همراه با دامداری در سطح حوضه آبخیز خررود نیز علت دیگری برای افزایش تمایل کشاورزان برای توسعه سطح زیر کشت محصول یونجه در الگوی زراعی منطقه است. به‌طور کلی، تغییرات سطح زیر کشت محصولات در الگوی کشت حوضه آبخیز خررود یکی دیگر از پیامدها و آثار مهم اقتصادی تغییرات اقلیم ناشی از کاهش بارش به‌شمار می‌رود.

شکل ۵ تابع تقاضای آب آبیاری کشاورزان حوضه آبخیز خررود را برای سال پایه (۱۳۹۲-۱۳۹۳) و پس از ارزیابی آثار سناریوهای اقلیمی کاهش بارش ملایم، متوسط و شدید نشان می‌دهد:

با توجه به شکل ۴، ملاحظه می‌شود که با کاهش بارش تحت سناریوهای مختلف (ملایم، متوسط و شدید)، سطح زیر کشت محصولات غله‌ای گندم و جو آبی در حوضه آبخیز خررود نسبت به سال پایه افزایش می‌یابد، درحالی که سطح زیر کشت محصولات ذرت دانه‌ای و گوجه‌فرنگی نسبت به شرایط سال پایه کاهش می‌یابد. درواقع، با کاهش بارش و به تناسب آن کاهش منابع آب در دسترس، تمایل کشاورزان حوضه آبخیز خررود برای کشت محصولات با نیاز آبی زیاد (مانند چغندر قند، گوجه‌فرنگی و ذرت دانه‌ای) کاهش یافته و به سمت کشت محصولات با نیاز آبی کمتر (مانند گندم و جو آبی) متمایل می‌شوند. علت کاهش سود ناخالص کشاورزان حوضه آبخیز مطالعه شده پس از اعمال سناریوهای اقلیمی کاهش بارش نیز تمایل کمتر آنها برای کشت محصولات با صرفه اقتصادی زیاد (مانند چغندر قند، گوجه‌فرنگی و ذرت دانه‌ای) است که این محدودیت با کاهش شدیدتر بارش و به تناسب آن کاهش بیشتر منابع آب در دسترس نسبت به سال پایه چشمگیرتر است. سطح زیر کشت یونجه نیز پس از



شکل ۵. برآورد تابع تقاضای آب آبیاری کشاورزان حوضه آبخیز خررود

نتایج مطالعات یادشده نیز بیان می‌کند که رخداد پدیده تغییر اقلیم، منابع آب در دسترس را در مناطق مختلف جهان تحت تأثیر قرار داده و به کاهش منابع آب قابل حصول منجر شده است. در زمینه آثار تغییر اقلیم بر سطح زیر کشت محصولات زراعی، نتایج به دست آمده در این تحقیق، هم‌راستای یافته‌های به دست آمده از تحقیقات محمودی و پرهیزکاری [۴] و قریشی و همکارانش [۲۰] است. یافته‌های این مطالعات بیان می‌کند که با رخداد تغییر اقلیم کاهش بارش سالانه، مجموع سطح زیر کشت محصولات منتخب کاهش می‌یابد و سطح کمتری از اراضی زراعی زیر کشت می‌رود که تحت چنین شرایطی، تغییر از کشت محصولات سالیانه به دائمی برای کشاورزان سودمندتر خواهد بود. در زمینه آثار تغییر اقلیم بر سود ناخالص کشاورزان، نتایج تحقیق حاضر با نتایج تحقیقات محمودی و پرهیزکاری [۴] و پانس و همکارانش [۱۰] هم‌خوانی و قرابت دارد. یافته‌های تحقیقات یادشده بیان‌کننده کاهش عایدی و سود ناخالص کشاورزان در شرایط رخداد تغییر اقلیم است. در زمینه آثار تغییر اقلیم بر ارزش اقتصادی آب نیز نتایج این تحقیق با یافته‌های مطالعات خانلری و کیخا [۲۱]، محمودی و پرهیزکاری [۴] و مدلین-آزورا و همکارانش [۱۶] مطابقت دارد که همگی این مطالعات ارتباط غیرمستقیم یا معکوس بین کاهش منابع آب در دسترس تحت شرایط رخداد تغییر اقلیم را با ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری در سطح منطقه‌ای نشان می‌دهند.

#### نتیجه‌گیری

نتایج به دست آمده از الگوی رفتاری متغیر اقلیمی بارش طی دوره ۱۳۶۵-۱۳۹۳ در سطح حوضه آبخیز خررود

با توجه به تابع تقاضای آب برآوردشده در شکل ۵، ملاحظه می‌شود که بین ارزش اقتصادی آب آبیاری و منابع آب در دسترس در کشاورزان رابطه معکوس یا غیرمستقیمی وجود دارد. با کاهش متغیر اقلیمی بارش و به تناسب آن کاهش منابع آب در دسترس کشاورزان در سطح حوضه آبخیز خررود، ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری نسبت به شرایط سال پایه افزایش می‌یابد. به طوری که با تشدید کاهش بارش ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر در حوضه آبخیز خررود و رخداد تغییرات اقلیمی ملایم تا شدید، میزان منابع آب در دسترس کشاورزان از ۱۱۲/۴ به ۹۷/۵۸ میلیون مترمکعب می‌رسد که کاهش معادل با ۲۹/۱۵ میلیون مترمکعب را در مجموع منابع آب در دسترس کشاورزان نسبت به شرایط سال پایه به همراه دارد. با ایجاد محدودیت آب آبیاری برای کشاورزان حوضه آبخیز خررود، ارزش اقتصادی هر مترمکعب از این نهاده کمیاب از ۱۴۷۵ ریال در سال پایه به ۱۷۰۰ ریال تحت سناریوی تغییرات اقلیم شدید می‌رسد که افزایش ۱۵/۲۲ درصدی این شاخص اقتصادی را نشان می‌دهد. این امر بیان‌کننده آن است که تحت شرایط رخداد تغییر اقلیم، کشاورزان حوضه آبخیز خررود ناگزیر به پرداخت ارزش بیشتری برای هر مترمکعب آب آبیاری هستند و یا اینکه ناگزیرند هر مترمکعب آب آبیاری را در سطح قیمت بیشتری نسبت به شرایط سال پایه (شرایط عدم رخداد تغییر اقلیم) تقاضا کنند.

به طور کلی، در زمینه آثار تغییر اقلیم بر منابع آب در دسترس، یافته‌های تحقیق حاضر با یافته‌های مطالعه محمودی و پرهیزکاری [۴] در داخل کشور و یافته‌های تحقیق استیو و همکارانش [۱۱] همسو و هم‌جهت است.

- نتایج تحقیق حاضر نشان داد ارزش اقتصادی هر مترمکعب آب آبیاری در سطح حوضه آبخیز خررود در صورت وقوع تغییرات اقلیم شدید نسبت به تغییرات اقلیم ملایم، بیشتر است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود که برای حفظ و پایداری منابع آب و جلوگیری از مصرف بی‌رویه این نهاده، تعیین نرخ آب‌بها برای کشاورزان حوضه آبخیز خررود مطابق با روند تغییرات ارزش اقتصادی آب در شرایط وقوع خشکسالی (اقلیم شدید) و ترسالی (اقلیم ملایم) و ملاحظه برابری صورت گیرد.

- با توجه به کاهش چشمگیر مجموع سطح زیر کشت محصولات آبی در حوضه آبخیز خررود، آیش‌گذاری زمین‌های کشاورزی در شرایط رخداد تغییرات اقلیم شدید برای جلوگیری از خسارت‌های بلندمدت به تولیدات زراعی پیشنهاد می‌شود.

- ارائه تسهیلات و وام‌های با نرخ بهره کم به کشاورزان خرده‌پای حوضه آبخیز خررود برای خرید وسایل اولیه و تجهیز مزارع به سیستم‌های نوین آبیاری (قطره‌ای و بارانی) به منظور افزایش سود ناخالص آنها پیشنهاد می‌شود که کاهش شدیدی را در منابع آب در دسترس خود تحت شرایط رخداد تغییرات اقلیم تجربه می‌کنند.

- در مطالعه حاضر از یک سیستم مدل‌سازی بیوفیزیکی- اقتصادی برای ارزیابی آثار تغییر اقلیم ناشی از کاهش بارش بر متغیرهای هیدرولوژیکی و اقتصادی در سطح حوضه آبخیز خررود استفاده شد. با توجه به قابلیت سیستم یادشده در ایجاد ارتباط بین دو جزء بیوفیزیکی و اقتصادی، بررسی آثار تغییر اقلیم ناشی از افزایش دمای هوا، تشدید انتشار گازهای گلخانه‌ای و افزایش تبخیر و تعرق در مطالعات آینده، به پژوهشگران و محققان علاقه‌مند پیشنهاد می‌شود.

#### منابع

- [1]. Parhizkari A. Determination economic value of irrigation water and farmer's response to price and non-price policies in Qazvin province, the thesis submitted for the degree of M.Sc in the field of agricultural economics, University of Zabol, Iran, 2013; 130 P. [In Persian]
- [2]. Ghayour H, Masodian A. The effects of global warming on the water cycle in nature, Journal of Geographical Researchs, 1996; 46(1): 53-69. [In Persian]

نشان داد این متغیر پس از سال ۱۳۸۰ با روندی کاهشی همراه بوده و این امر بیان‌کننده کاهش متوسط بارندگی‌های سالانه پس از سال ۱۳۸۰ در سطح حوضه آبخیز خررود است. نتایج به‌دست‌آمده از مدل بیوفیزیکی- اقتصادی نیز نشان داد پس از اعمال سناریوهای تغییرات اقلیم ناشی از کاهش ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر بارش (سناریوهای ملایم تا شدید) در سطح حوضه آبخیز خررود، میزان منابع آب در دسترس کشاورزان کاهش می‌یابد که یکی از متغیرهای مهم هیدرولوژیکی محسوب می‌شود. افزون بر موارد یادشده، نتایج این مطالعه بیان‌کننده کاهش مجموع سطح زیر کشت محصولات آبی متناسب با میزان کاهش منابع آب قابل دسترس و در سطح حوضه آبخیز خررود بود. پس از اعمال سناریوهای کاهش بارش به میزان ۱۰ تا ۳۰ میلی‌متر نسبت به سال مبنا، ملاحظه شد که سود ناخالص کشاورزان در سطح حوضه آبخیز خررود کاهش می‌یابد و کشاورزان این منطقه تحت شرایط رخداد تغییرات اقلیم شدید بیشترین میزان کاهش عایدی و بازده ناخالص را تجربه می‌کنند. نتایج نشان داد محدودیت آب آبیاری در حوضه آبخیز خررود پس از رخداد تغییرات اقلیم ناشی از کاهش بارش، به افزایش ارزش واقعی یا اقتصادی آب آبیاری منجر می‌شود. شیب ملایم و نزولی تابع تقاضای آب برآوردشده برای کشاورزان حوضه آبخیز خررود تحت شرایط رخداد تغییر اقلیم، گویای ارتباط غیرمستقیم بین متغیر هیدرولوژیکی مجموع منابع آب در دسترس و متغیر اقتصادی ارزش واقعی آب بود.

در پایان، با توجه نتایج این تحقیق و ناهمگامی آثار تغییر اقلیم ناشی از کاهش بارش، برای حفظ و پایداری منابع آب زیرزمینی و مدیریت صحیح منابع آب سطحی در حوضه آبخیز خررود پیشنهادهای زیر ارائه می‌شود:

- ارزیابی آثار تغییر اقلیم ناشی از کاهش بارش، بیان‌کننده کاهش منابع آب در دسترس و به تبع آن کاهش سطح زیر کشت محصولات آب‌بر گوجه‌فرنگی و ذرت دانه‌ای در الگوی کشت حوضه آبخیز خررود بود. به‌کارگیری تکنیک‌های کم‌آبیاری در چنین شرایطی (با توجه به انعطاف‌پذیری تابع عملکرد درجه دوم و تبعیت آن از نیاز آبی محصولات) برای تأثیر پایدارتر بر حفظ منابع آب توأم با باقی‌ماندن محصولات با نیاز آبی زیاد در الگوی کشت حوضه مطالعه‌شده پیشنهاد می‌شود.

- [3]. Parhizkari A, Sabuhi M. Analysis of the economic and welfare impacts of establishment irrigation water market in Qazvin province, *Journal of Agricultural Economics and Development*, 2013; 27(4): 338-350. [In Persian]
- [4]. Mahmoodi A, Parhizkari A. Economic analysis of climate change impacts on crop yield, crop pattern, and gross margin for farmers (Case Study: Qazvin). *Development of Agriculture and Rural Development*, 2015; 1(2): 25-40. [In Persian]
- [5]. Godarzi M, Salahi B, Hosein S.A. The effects of climate change on surface runoff changes (Case study: The lake's basin). *Eco-hydrology Journal*, 2015; 2(2): 175-189. [In Persian]
- [6]. Mesmarian Z, Mesahebevani A, Javadi S. The impact of climate change on groundwater balance Shahrekord plain in future periods. *Eco-hydrology Journal*, 2016; 3(2): 234-242. [In Persian]
- [7]. Nazari Poya H, Kordvani P, Faraji Rad AR. Assessing the impact of climate change on hydro dynamic parameters of the Ekbatan dam basin (Case study: Hamedan province). *Eco-hydrology Journal*, 2016; 3(2): 181-194. [In Persian]
- [8]. Jung IIW, Chang H. Assessment of future runoff trends under multiple climate change scenarios in the Willamette River Basin, Oregon, USA. *Journal of Hydrology*, 2010; 16: 63-87.
- [9]. Traynham L, Palmer R, Polebitski A. Impacts of future climate conditions and forecasted population growth on water supply systems in the Puget Sound region, *Water Resours*, 2011; 137(2): 318-326.
- [10]. Ponce R, Blanco M, Giupponi C. The economic impacts of climate change on the Chilean agricultural sector: a non-linear agricultural supply model. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2014; 74(4): 404-412.
- [11]. Esteve P, Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Downing T. A hydro-economic model for the assessment of climate change impacts and adaptation in irrigated agriculture, *Ecological Economics*, 2012; 120(2): 49-58.
- [12]. Howitt RE, Medellin-Azuara J, MacEwan D, Lund R. Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Science of the Environmental Modeling and Software*, 2012; 38: 244-258.
- [13]. Qureshi ME, Whitten S, Mainuddin M, Marvanek M, Elmahdi A. A biophysical and economic model of agriculture and water in the Murray-Darling Basin, Australia, *Environmental Modelling and Software*, 2013; 41: 98-106.
- [14]. Agriculture Jihad Organization of Qazvin Province. 2015. The improvement of plant production. [In Persian]
- [15]. Regional Water Company of Qazvin province. The part of water resources management. 2015; 19p [In Persian]
- [16]. Medellan-Azuara J, Harou J, Howitt R. Predicting farmer responses to water pricing, rationing and subsidies assuming profit maximizing investment in irrigation technology. *Science of the Agricultural Water Management*, 2011; 108: 73-82.
- [17]. Parhizkari A, Sabouhi M, Ahmadpour M, Badibarzin H. Simulation the Farmers' Response to Irrigation Water Pricing and Rationing Policies (Case Study: Sistan Region). *Journal of Agricultural Economics and Development*, 2014; 28(2): 164-176. [In Persian]
- [18]. Parhizkari A, Sabouhi M. Simulation farmers' response to reducing available water policy, *Journal of Water and Irrigation Management*, 2013; 3(2): 59-74. [In Persian]
- [19]. Parhizkari A, Sabuhi M, Ziaee S. Simulation water market and analysis of the effects irrigation water sharing policy on cropping patterns under conditions of water shortage, *Journal of Agricultural Economics and Development*, 2013; 27(3): 242-252. [In Persian]
- [20]. Qureshi ME, Schwabe K, Connor J, Kirby M. Environmental water incentive policy and return flows, *Water Resources Research*, 2010; 46p.
- [21]. Khanlari A, Keykha AA. Assessment the impact of climate change on the agricultural production in Mazandaran province, Master's thesis, Faculty of Agriculture, University of Zabol, 2010; 72p. [In Persian]