



Hydro-Economic Modeling of how Rainfall Reduction Affects the Cropping Pattern and Farmers Profits in the Tashk-Bakhtegan Basin

R. Rafiei¹, F. Nasiri Saleh^{2*}, and N. Najafi Toohkshokh³

Abstract

Water scarcity is one of the most important and influential factors affecting the crop patterns and the farmers profits. This research was conducted to evaluate the effects of rainfall reduction on cultivation pattern and farmers profits in the Tashk-Bakhtegan basin. To this purpose, a hybrid model which included two parts; i.e. hydrological and economic, was used. In the hydrological section, the water evaluation and planning system model (WEAP) and in the economic section, the positive mathematical programming model (PMP) were used. In this research, the effects of rainfall reduction on the agricultural sector were determined in two scenarios of 20 and 40% reduction by determining the amount of water delivered to this sector and then the reaction of farmers was examined through their cultivation pattern and profits. This modeling was done regionally in 5 distinct zones of the Tashk-Bakhtegan basin and compared to the base year (2006-2007). The results of this research showed that in the scenario of 20% rainfall reduction, the area under cultivation and farmers profits were decreased by 33% and 29%, respectively, and in the scenario of 40% rainfall reduction, the same were decreased by 36% and 32%, respectively. Among the different crops, the most changes in the area under cultivation were related to alfalfa and the area under cultivation of rice did not changed due to its high profits.

Keywords: Water Evaluation and Planning System Model (WEAP), Positive Mathematical Programming Model (PMP), Production Function with Constant Elasticity of Substitution (CES).

Received: February 18, 2020

Accepted: December 19, 2020

مدل سازی هیدرواقتصادی تأثیر کاهش بارش بر الگوی کشت و سود کشاورزان در حوضه آبریز طشک-بختگان

رضا رفیعی آتانی^۱، فرزین نصیری صالح^{۲*} و نیلوفر نجفی توه خشک^۳

چکیده

کمبود آب یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین عوامل در الگوی کشت و سود کشاورزان است. این تحقیق برای ارزیابی اثرات کاهش بارش بر الگوی کشت و سود کشاورزان در حوضه آبریز طشک-بختگان انجام شد. برای این منظور، از یک مدل تلفیقی که شامل دو بخش هیدرولوژیکی و اقتصادی است، استفاده گردید. در بخش هیدرولوژیکی، مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP) و در بخش اقتصادی، مدل برنامه‌ریزی مثبت ریاضی (PMP) استفاده شدند. در این تحقیق اثرات کاهش بارش در دو سناریوی کاهش ۲۰ و ۴۰ درصدی، بر بخش کشاورزی از طریق تعیین میزان آب تحویلی به این بخش تعیین شد و سپس عکس‌العمل کشاورزان از طریق الگوی کشت و سود آن‌ها بررسی گردید. این مدل‌سازی به صورت منطقه‌ای در ۵ ناحیه مجزا از حوضه طشک-بختگان و نسبت به سال پایه (۲۰۰۶-۲۰۰۷) انجام شد. نتایج این تحقیق نشان داد با اجرای سناریوی ۲۰ درصد کاهش بارش، سطح زیر کشت و سود کشاورزان به ترتیب ۳۳ و ۲۹ درصد کاهش یافتند و با سناریوی ۴۰ درصد کاهش بارش، میزان کاهش سطح زیرکشت و سود کشاورزان به ترتیب ۳۶ و ۳۲ درصد بود. در بین محصولات مختلف، بیش‌ترین تغییرات سطح زیرکشت مربوط به یونجه بود و سطح زیرکشت محصول برنج به دلیل سود بالای آن تغییری نکرد.

کلمات کلیدی: مدل برنامه‌ریزی ریاضی مثبت (PMP)، مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP)، تابع تولید با کشش جانشینی ثابت (CES).

تاریخ دریافت مقاله: ۹۸/۱۱/۲۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۹/۹/۲۹

1- M.Sc. Graduate in Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

2- Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: nasirisaleh@modares.ac.ir

3- M.Sc. Graduate in Water Resources Engineering and Management, Faculty of Civil & Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.

*- Corresponding Author

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۲- استادیار گروه مهندسی آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط‌زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

۳- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس.

*- نویسنده مسئول
بحث و مناظره (Discussion) در مورد این مقاله تا پایان بهار ۱۴۰۰ امکانپذیر است.

آب در چین ایجاد کردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد که در مناطقی مانند شمال چین که با کمبود آب مواجه هستند، باید بخش‌های کم‌مصرف آب را توسعه داده و توسعه صنایع آلاینده همانند تولید کاغذ را کنترل نمود. (Pulido-Velazquez et al., 2008) از یک مدل هیدرواقتصادی برای ارزیابی هزینه فرصت مصرف آب^۲ در اسپانیا استفاده کردند. نتایج نشان داد که این پارامتر، اطلاعات مهمی در رابطه با ناکارآمدی اقتصادی سیاست‌های تخصیص آب فعلی یا طراحی زیرساخت‌ها برای مدیران آب فراهم می‌کند. همچنین تأکید شد که هزینه‌های فرصت منابع آب باید در طراحی سیاست‌های کارآمد قیمت‌گذاری در مناطقی با مشکلات کمبود آب در نظر گرفته شود. (Maneta et al., 2009) با استفاده از یک مدل هیدرواقتصادی اثرات خشکسالی را در حوضه برزیلیان بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه در بخش اقتصادی از روش برنامه‌ریزی مثبت ریاضی (PMP^۸) و در بخش هیدرولوژیکی از یک مدل فیزیکی پایه سه بعدی^۹ استفاده کردند. در این مطالعه اثرات خشکسالی به صورت کاهش بارش و افزایش تبخیر و تعرق به مدل اعمال شد. نتایج نشان داد که کشاورزان نسبت به کاهش بارش به صورت حداقل نمودن اثرات آن بر سود واکنش نشان می‌دهند. البته اثرات کاهش بارش بر کشاورزان متفاوت است و به عواملی از قبیل موقعیت مزرعه در حوضه و دسترسی به آب زیرزمینی بستگی دارد. (Connor et al., 2009) در مطالعه‌ای با استفاده از مدل‌سازی هیدرواقتصادی به بررسی آثار اقتصادی تغییر اقلیم در حوضه ماری دارلینگ در استرالیا پرداختند. در این مطالعه از یک مدل بیلان آبی برای پیش‌بینی کاهش جریان ورودی به حوضه در سه سناریوی تغییر اقلیم (ملایم، متوسط و شدید) استفاده شد. همچنین برای تخمین اثرات تغییر اقلیم بر تولیدات کشاورزی آبی و سودآوری آن از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی بهره گرفته شد. نتایج نشان داد که روش‌های سازگاری ارزان قیمت برای تغییر اقلیم ملایم و متوسط کارساز است ولی در تغییر اقلیم شدید گزینه‌هایی هم‌چون کاهش سطح زیرکشت محصولات آبی و سرمایه‌گذاری برای آبیاری با کارایی بهتر نیاز است. (Varela-Ortega et al., 2011) با استفاده از یک مدل هیدرواقتصادی به بررسی تعادل بین اهداف حفاظتی آب زیرزمینی و دستیابی به شاخص‌های زندگی روستایی تحت عدم قطعیت آب و اقلیم پرداختند. در آن مطالعه از تلفیق یک مدل اقتصادی بهینه‌سازی و مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP)، به‌عنوان یک ابزار قدرتمند برای بررسی اثرات سیاست‌های مختلف آبی و کشاورزی تحت سناریوهای مختلف اقلیمی استفاده شد. نتایج آن تحقیق نشان داد سیاست‌های فعلی تخصیص آب مبتنی بر سهمیه منطقه‌ای ممکن است در کاهش مصرف آب در مزارع نقش داشته باشد، اما قادر به بازیابی آبخوان نیست و ضررهای درآمدی را به جوامع روستایی وارد

در دهه‌های اخیر از تحلیل‌های سیستمی^۱ برای مدیریت بهتر منابع آب استفاده گسترده‌ای شده است. از ابتدای به‌کارگیری چنین مدل‌های سیستمی در منابع آب، اهداف اقتصادی و محدودیت‌ها به‌عنوان دو مبحث اصلی مطرح بوده‌اند (Maass et al., 1962; Loucks et al., 1981). توسعه چنین مدل‌های سیستمی را می‌توان در سال‌های اخیر به مدل‌های هیدرواقتصادی^۲ مربوط دانست (Rafiei Darani et al., 2017). آغاز استفاده از مدل‌های هیدرواقتصادی را می‌توان در دهه‌های ۱۹۶۰ و ۱۹۷۰ در مناطق خشکی هم‌چون فلسطین اشغالی و جنوب غربی ایالات متحده آمریکا دنبال کرد. مدل‌های هیدرواقتصادی جنبه‌های هیدرولوژیکی، مهندسی، محیط‌زیستی و اقتصادی سیستم‌های منابع آب را در یک چارچوب منسجم نشان می‌دهند. این مدل‌ها برای بررسی هم‌زمان روابط بین متغیرهای هیدرولوژیکی (منابع آب) و متغیرهای اقتصادی (سود ناخالص، درآمد، ارزش آب، میزان تولید) استفاده می‌شوند. ایده اصلی در این نوع مدل‌سازی، عملیاتی‌کردن مفاهیم اقتصادی با در نظر گرفتن آن‌ها در قالب مدل‌های مدیریت منابع آب است (Harou et al., 2009). اغلب مدل‌های هیدرواقتصادی براساس یک الگوریتم بهینه‌سازی اقتصادی که مشروط به فرآیندهای جریان‌های آب سطحی و زیرزمینی (فرآیندهای هیدرولوژیکی) است، عمل می‌کنند (Brouwer and Hofkes, 2008). مدل‌های هیدرواقتصادی به دنبال پیدا کردن روش‌هایی برای بهبود کارایی و شفافیت در کاربری آب هستند. هم‌چنین این مدل‌ها ابزاری مناسب و قوی برای هدایت و انجام مدیریت یکپارچه منابع آب^۳ می‌باشند (Harou et al., 2009). از مدل‌های هیدرواقتصادی برای حل مسائل مختلف مدیریت منابع آب از جمله: راهبردهای تخصیص آب، قیمت‌گذاری و بازار آب، تحلیل آب مجازی^۴ و ردپای آب^۵، تغییر اقلیم و خشکسالی استفاده شده است. برای مثال Rosegrant et al. (2000) یک مدل هیدرواقتصادی برای بررسی تعامل و ارتباط بین تخصیص آب، بهره‌وری کشاورزی، تقاضای غیر کشاورزی آب و تخریب منابع برای برآورد دستاوردهای اجتماعی و اقتصادی ناشی از بهبود در تخصیص و کارایی مصرف آب معرفی نمودند. این مدل در حوضه مایپو در شیلی مورد استفاده قرار گرفت. منافع اقتصادی استفاده از آب با استفاده از ابزارهای مختلف بر مبنای مدیریت تقاضا هم‌چون بازارهای آب براساس توابع تولید و سود در رابطه با آب برای بخش کشاورزی و شهری - صنعتی ارزیابی شد. نتایج نشان داد که استفاده از بازارهای آب کارایی بالایی دارد و هم‌چنین میزان تجارت و سود حاصل از آن را افزایش می‌دهد. Guan and Hubacek (2008) با ترکیب مدل داده-ستانده^۶ و مدل بیلان هیدرولوژیکی، یک چارچوب هیدرواقتصادی جدید برای بررسی منابع

می‌کند. این وضعیت در صورت خشکسالی بدتر می‌شود. با این وجود، پایداری طولانی مدت آبخوان و نگهداری از معیشت روستایی تنها در صورتی حاصل می‌شود که تدابیر دیگری برای سیاست‌گذاری مانند کنترل انتزاع غیرقانونی و تأسیس بانک آب در نظر گرفته شود. George et al. (2011) با استفاده از مدل هیدرواقتصادی به بررسی اثرات سیاست‌های مختلف تخصیص آب در زیرحوضه ماسی که در حوضه کریشنا در کشور هند قرار دارد، پرداختند. نتایج نشان داد که در این زیرحوضه رقابت برای آب بسیار زیاد است و تغییر کاربری کشاورزی آب به کاربری شهری در آینده احتمالاً افزایش می‌یابد. Jiang and Grafton (2012) با استفاده از یک مدل هیدرواقتصادی به بررسی توأمان اثرات اقتصادی تغییر اقلیم و نقش بازار آب در حوضه ماری دارلینگ استرالیا پرداختند. نتایج نشان داد که در سناریوی تغییر اقلیم متوسط، میزان کاهش آب کشاورزی ناچیز است اما در سناریوی تغییر اقلیم شدید، کاهش چشم‌گیری در مصرف آب، کاربری اراضی (سطح زیرکشت) و سود دیده می‌شود. هم‌چنین مقایسه نتایج مدل در شرایط وجود و عدم وجود بازار آب درون منطقه‌ای در دوره‌هایی که آب در دسترس کاهش زیادی داشت، نشان داد که بازار آب باعث کاهش اثرات تغییر اقلیم روی مزارع می‌شود. Blanco-Gutierrez et al. (2013) با استفاده از یک مدل هیدرواقتصادی، اثرات زیست‌محیطی و اقتصادی-اجتماعی سیاست‌های مختلف را تحت شرایط تغییر اقلیم در حوضه گادیانا در اسپانیا بررسی کردند. آنها در مدل اقتصادی از بهینه‌سازی براساس ریسک و برای شبیه‌سازی هیدرولوژیکی از مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP) استفاده کردند. نتایج مدل‌سازی آنها نشان داد که در صورت ادامه دادن الگوی کشت جاری تا سال ۲۰۱۵، تأمین جریان محیط‌زیستی حوضه گادیانا دچار مشکل شده و رقابت بین کاربری آب بخش کشاورزی و محیط‌زیست به ویژه در طول تابستان که نیاز آبی محصولات بیشتر می‌شود، افزایش می‌یابد. برای تأمین حداقل جریان محیط‌زیستی، لازم بود تا آب آبیاری برای کشت برنج کاهش یابد که این موضوع سودآوری و شرایط اقتصادی شالیکاران خرده‌مالک بالادست رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌داد. Torres et al. (2014) با استفاده از یک مدل هیدرواقتصادی به بررسی اثرات کاهش بارش و عرضه آب آبیاری بر سود کشاورزان در حوضه بوریتی در برزیل پرداختند. مدل اقتصادی تحقیق آنها براساس روش برنامه‌ریزی مثبت ریاضی (PMP) بود و در مدل هیدرولوژیکی با استفاده از بیلان آب، میزان آب در دسترس برآورد می‌شد. نتایج تحقیق آنها نشان داد که کاهش ۵ درصدی آب در دسترس، باعث کاهش ۱/۲ درصدی سود کشاورزان می‌شود. هم‌چنین اگر آب در دسترس ۵۰ و ۹۰ درصد کاهش یابد، سود کشاورزان به ترتیب ۱۱ و ۳۲ درصد کاهش خواهد یافت.

مشکل از مدل اقتصادی برنامه‌ریزی مثبت ریاضی (PMP) و مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP) به تحلیل سیاست‌های مدیریت منابع در دشت نیشابور پرداختند. راهبردهای به کار رفته در این مطالعه شامل سه سناریوی اصلی کاهش دسترسی به منابع آب در بخش کشاورزی (کاهش ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصدی) بود که تأثیر آن بر الگوی کشت و منابع و مصارف آب بررسی شد. نتایج نشان داد که بیش‌ترین کاهش در مصرف آب مربوط به سناریوی سوم بوده که علت اصلی آن نیز مربوط به تغییر و کاهش سطح زیرکشت محصولات مختلف است.

۲- روش انجام کار و منطقه مورد مطالعه

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مرور مطالعات مرتبط گذشته نشان داد در مطالعات خارجی تنوع زیادی در مدل‌های استفاده شده وجود دارد و در آنها اغلب از مدل‌های شبیه‌سازی-بهینه‌سازی استفاده شده است. درحالی‌که در مطالعات داخلی از مدل‌های تلفیقی کم‌تر استفاده شده و در اغلب آنها برای بررسی اثرات خشکسالی و یا تغییر در عرضه آب تنها یک مدل بهینه‌سازی بکار رفته که موجب خطا در نتایج می‌شود. یکی از اهداف مهم این تحقیق استفاده از روش بارش-رواناب (FAO) و شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی (بارش، تبخیر-تعرق، نفوذ و رواناب و غیره) به جای استفاده از شرایط مرزی در تعیین میزان آب در دسترس در حوضه می‌باشد.

حوضه آبریز طشک-بختگان در شمال استان فارس و در دامنه‌های شرقی بخش جنوبی زاگرس قرار گرفته است. وسعت این حوضه معادل ۲۷۲۲۰ کیلومترمربع است که از ۲۲ محدوده مطالعاتی تشکیل شده است. حدود ۶۳ درصد از مساحت حوضه نیمه‌خشک و حدود ۲۲ درصد از مساحت آن در محدوده اقلیمی خشک قرار دارد. بقیه مساحت حوضه در محدوده اقلیمی مدیترانه‌ای و درصد ناچیزی در محدوده اقلیمی مرطوب قرار می‌گیرد (Davari, 2016). بارش متوسط سالانه حوضه ۲۳۰ میلی‌متر و دمای متوسط آن ۱۵ درجه سانتی‌گراد است و در مجموع دارای اقلیم خشک بیابانی معتدل است (Ghotbizadeh, 2017). در این حوضه دو رودخانه اصلی کر و سیوند وجود دارد که در محل پل خان به یک‌دیگر متصل شده و رودخانه کر را تشکیل می‌دهند. این رود در نهایت وارد دریاچه طشک-بختگان می‌شود. در این حوضه سه سد مخزنی درودزن، ملاصدرا و سیوند و شبکه‌های آبیاری و زهکشی مربوط به این سدها وجود دارند. بزرگترین سد و شبکه آن

برنج، ذرت‌دانه‌ای، جو و یونجه در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. همچنین ناحیه ۳ به‌عنوان مرکز کشاورزی حوضه قلمداد می‌شود. در بخش کشاورزی میزان سهم آب زیرزمینی و سطحی در سال پایه به ترتیب ۷۶/۹ درصد و ۲۳/۱ است (Jamab, 2013). این موضوع اهمیت آب زیرزمینی در این حوضه را به خوبی مشخص می‌کند.

۲-۲- چارچوب مدل‌سازی هیدرواقتصادی

همان‌طور که قبلاً ذکر شد در این تحقیق از یک مدل هیدرواقتصادی که دارای دو بخش هیدرولوژیکی و اقتصادی است، استفاده می‌شود. در مدل هیدرولوژیکی (WEAP)، براساس شرایط هیدرولوژیکی و اقلیمی و همچنین میزان مصارف بخش‌های مختلف، میزان آب تخصیص داده شده به بخش کشاورزی تعیین شده و در مدل اقتصادی سطح زیر کشت محصولات براساس محدودیت‌های آبی (میزان آب تخصیصی به کشاورزی) و با هدف حداکثرسازی سود کشاورزان تعیین شده است.

مربوط به سد و شبکه آبیاری و زهکشی درودزن است. به طور کلی در سطح حوضه، چهار شبکه آبیاری اعم از مدرن و تلفیقی موجود می‌باشد که وسعت کل این شبکه‌ها بالغ بر ۱۳۲۵۰۰ هکتار می‌باشد. علاوه بر این در این حوضه بندها و سدهای انحرافی دیگری نیز مانند بند امیر، بند فیض‌آباد و بند تیلکان وجود دارد (Jamab, 2013). این حوضه آبریز براساس مطالعات (Jalali (2017) و با در نظر گرفتن معیارهایی همچون ویژگی‌های هیدرولوژیکی مشترک، عدم تقاطع خط حوضه‌آبریز با آبخوان، توجه به مرز منابع آب زیرزمینی، سیستم هیدرولوژی رودخانه کر و سیوند، موقعیت دریاچه‌های طشک و بختگان به ۵ ناحیه تقسیم شده است (شکل ۱). خشکسالی‌های رخ داده در دهه ۱۳۸۰، همراه با توسعه سطوح زیرکشت آبی در بالادست دریاچه‌های طشک و بختگان، منجر به کاهش شدید سطح آب دریاچه‌ها شده که در برخی از فصول سال باعث خشک شدن کامل آن‌ها شده است. در نواحی شمالی حوضه (ناحیه ۱) به دلیل بارندگی مناسب علاوه بر گسترش کشت آبی، زراعت دیم از سطوح قابل ملاحظه‌ای برخوردار است. لیکن در بخش‌های میانی و جنوبی (نواحی ۳ و ۴) کشت آبی متداول می‌باشد. محصول عمده حوضه گندم می‌باشد و پس از آن

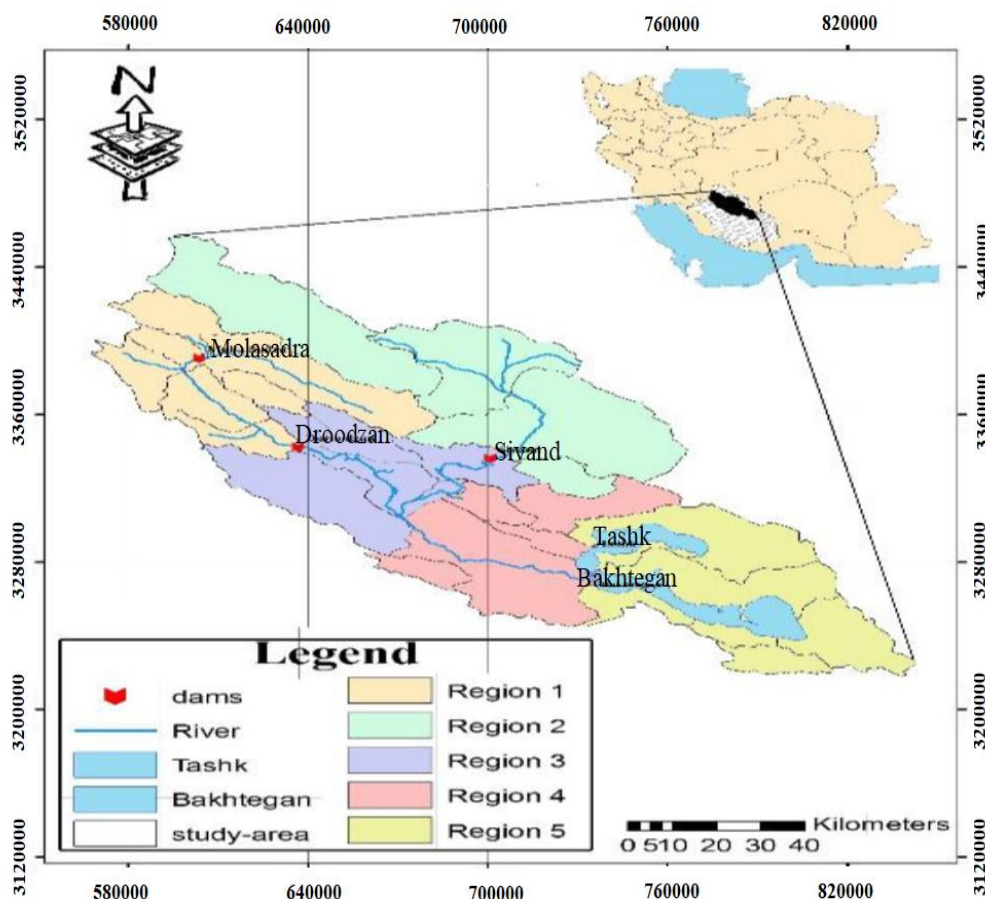


Fig. 1- Thashk-Bakhtegan Basin

شکل ۱- حوضه آبریز طشک- بختگان

لازم به ذکر است که بهینه‌سازی مدل اقتصادی در نرم‌افزار GAMS انجام شده است. به دلیل وجود تفاوت‌هایی از لحاظ رفتار کشاورزان و شرایط محیطی و اقلیمی، امکان بررسی حوضه به صورت یکجا وجود نداشته و بررسی‌ها در نواحی پنج‌گانه فوق‌الذکر انجام شده است. تحلیل سناریوهای کاهش بارش نسبت به سال پایه (۲۰۰۶-۲۰۰۷) انجام شد. لازم به ذکر است که معیار انتخاب سناریوهای کاهش بارش و همچنین یکی از معیارهای انتخاب سال پایه در این تحقیق شاخص بارش استاندارد (SPI^(۱)) در دوره زمانی (۱۹۹۱-۱۹۹۲ تا ۲۰۱۵-۲۰۱۶) است. در این دوره زمانی با توجه به شاخص بارش استاندارد، بارش در سال پایه وضعیت نرمال و دو سناریوی موردنظر شرایط خشکسالی و خشکسالی نسبتاً شدید را نشان می‌دهند.

۲-۲-۱- مدل هیدرولوژیکی

برای تحلیل منابع و مصارف آب در این تحقیق از مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP) استفاده شده است. این مدل با استفاده از رویکرد جامع برای شبیه‌سازی سیستم‌های آبی توسط مؤسسه محیط‌زیست استکهلم (SEI^(۲)) برای از بین بردن فاصله میان فرآیندهای هیدرولوژیکی و مدیریت منابع آب حوضه توسعه داده شده که نرم‌افزاری جامع، انعطاف‌پذیر و کاربر پسند برای تحلیل سیاست‌ها است. مدل WEAP براساس معادلات پایه بیلان آبی عمل کرده و آن‌را می‌توان در سیستم‌های شهری و کشاورزی، حوضه‌های مستقل یا سیستم‌های رودخانه‌ای مرزی پیچیده به کار برد. کار با مدل WEAP معمولاً شامل چندین گام است. در تعریف تحقیق، چارچوب زمانی، مرزهای مکانی، اجزای سیستم و تنظیمات مسئله انجام می‌شود. وضع موجود که از آن می‌توان به عنوان گام واسنجی مدل در شرایط توسعه استفاده کرد، یک تصویر کلی از نیازهای آبی واقعی، بارهای آلودگی، منابع و تأمین سیستم را نشان می‌دهد. در شرایط موجود، فرضیات کلیدی برای بیان سیاست‌ها، هزینه‌ها و عواملی که بر نیاز، آلودگی، تأمین و هیدرولوژی مؤثرند، تعریف می‌شود. سناریوها در شرایط موجود ساخته می‌شوند و با استفاده از آن‌ها می‌توان اثر فرضیات یا سیاست‌های مختلف را بر میزان دسترسی و مصرف آب در آینده بررسی کرد. نهایتاً سناریوها با توجه به میزان آب، هزینه‌ها و سودها، سازگاری با اهداف زیست‌محیطی و حساسیت به عدم قطعیت در متغیرهای کلیدی ارزیابی می‌شوند. داده‌های اصلی مورد استفاده در این تحقیق شامل مساحت مناطق مختلف، میزان بارش و تبخیر، رواناب، حجم آب زیرزمینی، جمعیت مناطق، سطح زیرکشت محصولات، تعداد واحدهای صنعتی، میزان مصرف آب در بخش‌های مختلف می‌باشند. در این تحقیق مدل‌سازی بخش هیدرولوژیکی با استفاده از مدل WEAP، شامل دو بخش اصلی است:

بخش اول: تحلیل و شبیه‌سازی فرآیندهای هیدرولوژیکی حوضه مانند: بارش، تبخیر و تعرق، نفوذ، روان‌آب و غیره با استفاده از روش بارش- رواناب (FAO):

بخش دوم: مدیریت و تخصیص منابع آب به مصارف مختلف (کشاورزی، صنعت و شرب) براساس نیاز هر بخش، اولویت‌ها و محدودیت‌ها با استفاده از بهینه‌سازی خطی.

در بخش اول با در نظر گرفتن یک مکان تقاضا که فرآیندهای ساده شده هیدرولوژیکی و کشاورزی- هیدرولوژیکی مانند بارش، تبخیر- تعرق و رشد گیاه در آن اتفاق می‌افتد و نیز با تأکید بر بارندگی و آبیاری کشاورزی محاسبات مربوط به رواناب انجام می‌شود (Sieber and Purkey, 2011). رواناب در مدل WEAP از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود:

$$R = \max(0, PAE - ETP) + (P(1 - PE)) + (1 - IF)S \quad (1)$$

در رابطه فوق R میزان رواناب، PAE میزان بارش قابل استفاده برای تبخیر- تعرق، ETP تبخیر- تعرق پتانسیل، P بارش، PE ضریب بارش کم شده، IF ضریب آبیاری و S میزان آب تأمین شده برای آبیاری است (تمام اجزا برحسب مترمکعب). همچنین میزان تغذیه آب زیرزمینی و رواناب سطحی از روابط (۲) و (۳) محاسبه می‌شوند:

$$RTG = \sum (R \times RTGF) \quad (2)$$

$$RTS = \sum (R(1 - RTGF)) \quad (3)$$

در روابط فوق RTG، RTS به ترتیب میزان تغذیه آب زیرزمینی و میزان رواناب سطحی برحسب مترمکعب می‌باشند. همچنین RTGF ضریب تغذیه آب زیرزمینی است.

در بخش دوم آب برای تأمین نیازهای مصرف‌کنندگان و میزان جریان پایین‌دست، براساس اولویت تقاضا، اولویت منبع عرضه، معادله بیلان جرم و سایر محدودیت‌ها، به وسیله الگوریتم بهینه‌سازی خطی با هدف بیشینه نمودن درصد تأمین نیاز در هر گره تقاضا (هر یک از نواحی پنج‌گانه)، پخش می‌شود. میزان آب مورد نیاز هر گره تقاضا در مدل WEAP، با توجه به نوع مصرف آب، سطح فعالیت و نرخ استفاده از آب در واحد سطح فعالیت به دست می‌آید. سطح فعالیت برای مصارف شرب شهری و روستایی نفر، برای مصارف کشاورزی سطح زیرکشت و برای مصارف صنعتی تعداد واحد صنعتی است. تقاضای آبی یک گره نیاز (DS)، به صورت مجموع تقاضاهای شاخه‌های پایه آن (Br) تعریف می‌شود. (شاخه پایه شاخه‌ای است که زیرشاخه‌ای ندارد). در نهایت با استفاده از رابطه (۴)، می‌توان مقدار نیاز سالانه هر سایت تقاضا را محاسبه کرد:

$$AD = \sum_{Br} (TAL_{Br} \times WUR_{Br}) \quad (4)$$

در رابطه (۴)، AD نیاز سالانه سایت تقاضا بر حسب میلیون مترمکعب در سال، TAL_{Br} سطح فعالیت سالانه بسته به نوع تقاضا و WUR_{Br} نرخ مصرف آب بر حسب میلیون مترمکعب بر واحد سطح فعالیت است. تقاضای ماهانه نیز برابر با سهم ماهانه از تقاضای سالانه تنظیم شده است. علاوه بر موارد فوق برای محاسبه نیاز از منبع عرضه در مکان تقاضا باید مقدار تلفات در مکان تقاضا، مقدار جریان قابل توزیع مجدد در مکان تقاضا و یا در صورت وجود استفاده از الگوهای مدیریتی در هر مکان تقاضا را در نظر گرفت (Sieber and Purkey, 2011).

۲-۲-۲- مدل اقتصادی

نتیجه اعمال یک سیاست و اثرگذاری آن تا حد زیادی وابسته به نحوه عکس‌العمل بهره‌برداران نسبت به سیاست اعمال شده است. عکس‌العمل بهره‌برداران نیز تحت تأثیر شرایط مزرعه، نگرش و ویژگی‌های فردی آن‌ها قرار دارد. این امر به کمک مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی فراهم شده است. به عبارت دیگر پیش از آن‌که تصمیم به سیاست‌گذاری گرفته شود، شبیه‌سازی عکس‌العمل احتمالی کشاورزان از طریق روش‌هایی مانند برنامه‌ریزی مثبت ریاضی می‌تواند کمک مؤثری برای اتخاذ تصمیمات صحیح‌تر تلقی شود (Parhizkari, 2013). واسنجی مدل اقتصادی مبتنی بر روش PMP در این تحقیق با توجه به تخمین ضرایب تابع تولید با کشش جانشینی ثابت (CES^{13})، برآورد ضرایب تابع هزینه درجه دوم (Quadratic) و همچنین محدودیت‌هایی که برای منابع مورد استفاده در منطقه وجود دارد، در چند مرحله صورت گرفته است. در مدل‌های PMP با این فرض که کشاورزان در شرایط موجود و با توجه به قیمت محصول و نهاده‌ها و محدودیت‌های موردنظر به‌طور بهینه عمل می‌کنند، سعی می‌شود تا با استفاده از یک تابع هدف غیرخطی و محدودیت‌های موردنظر سطوح مشاهده شده فعالیت‌ها بازسازی شود. ایده کلی مدل PMP استفاده از اطلاعات موجود در متغیرهای دوگان محدودیت‌های واسنجی است که جواب مسأله برنامه‌ریزی خطی را به سطح فعالیت‌های موجود محدود می‌کند. در واقع مقادیر دوگان برای تصریح تابع هدف غیرخطی مورد استفاده قرار می‌گیرند که سطح فعالیت‌های مشاهده‌شده را مجدداً از طریق جواب بهینه مسأله برنامه‌ریزی جدیدی که فاقد محدودیت واسنجی است، بازسازی می‌کند (Dianati, 2015). مراحل گام به گام واسنجی سیستم مدل‌سازی اقتصادی ارائه شده در این تحقیق با استفاده از روش PMP به‌صورت زیر می‌باشد:

مرحله اول: حل مدل برنامه‌ریزی خطی کمکی و محاسبه قیمت‌های سایه‌ای^{۱۴}

این مرحله شامل حل یک مدل برنامه‌ریزی خطی برای حداکثر نمودن سود منطقه‌ای کشاورزان با توجه به مجموعه محدودیت‌های منابع و واسنجی می‌باشد. همچنین، در این مرحله پس از حل مدل برنامه‌ریزی خطی کمکی ارائه شده، مقادیر قیمت‌های سایه‌ای یا مقادیر دوگان برای مجموعه محدودیت‌های منابع و واسنجی به‌دست می‌آید. شکل ریاضی این مرحله از مدل PMP به صورت زیر است:

$$\text{Max } \Pi = \sum_{i=1}^g (P_{i,g} \times Y_{i,g} - \sum_{j=1}^l \alpha_{i,g,j} \times C_{i,g,j}) X_{i,g} \quad (5)$$

Subject to:

$$\sum_i \alpha_{i,g,j} \times X_{i,g} \leq \text{RHS}_{j,g} \quad [\lambda_j^d] \quad (6)$$

$$X_{i,g} \geq \bar{X}_{i,g, \text{land}} + \varepsilon \quad [\lambda_i^c] \quad (7)$$

$$X_{i,g} \geq 0 \quad (8)$$

در روابط فوق اندیس‌های (j, g, i) به ترتیب نشان‌دهنده محصولات، ناحیه و نهاده‌ها یا عوامل تولید محصول شامل زمین، آب، نیروی کار و سرمایه (کود، سم، بذر) می‌باشند. رابطه (۵) تابع با هدف حداکثرسازی سود کشاورزان است. در این رابطه X متغیر تصمیم که نشان‌دهنده سطح زیر کشت برای هر محصول در هر ناحیه است، P قیمت محصولات در هر ناحیه، Y عملکرد محصول در هر ناحیه، C هزینه عوامل تولید برای هر محصول در هر ناحیه و درنهایت α ضریب لئونتیف یا ماتریس ضرایب فنی بوده که از رابطه (۹) به‌دست می‌آید:

$$\alpha_{i,g,j} = \frac{\bar{X}_{i,g,j}}{\bar{X}_{i,g, \text{land}}} \quad (9)$$

رابطه (۶) نشان‌دهنده محدودیت منابع است. در این رابطه RHS میزان منابع در دسترس است. رابطه (۷) محدودیت واسنجی مدل را ارائه می‌کند. \bar{X} میزان سطح فعالیت یا میزان منابع استفاده شده در سال پایه را نشان می‌دهد و ε مقدار مثبت کوچکی است. این محدودیت به این دلیل به مدل اضافه می‌شود تا جواب بهینه برنامه‌ریزی خطی همان سطح فعالیت مشاهده‌شده در سال پایه را به‌دست دهد. رابطه (۸) نیز نشان‌دهنده مثبت بودن سطوح فعالیت بوده و تضمین می‌کند روش فوق به لحاظ فیزیکی در منطقه قابلیت اجرا دارد. بعد از حل مدل، مقادیر دوگان یا قیمت‌های سایه‌ای محدودیت‌های واسنجی $[\lambda_i^c]$ و منابع $[\lambda_j^d]$ به‌دست می‌آید. از این مقادیر برای تخمین ضرایب تابع تولید و هزینه استفاده می‌شود (Howitt, 1995; Howitt et al., 2012).

مرحله دوم: تخمین تابع تولید و هزینه با استفاده از مقادیر دوگان مرحله اول

با توجه به پیشینه مطالعاتی و همچنین سادگی محاسبات و فقدان دلایل قوی برای انتخاب توابع دیگر، توابع مورد استفاده در این تحقیق تابع تولید با کشش جانشینی ثابت (CES) و تابع هزینه درجه دوم (Quadratic) است. شکل کلی تابع تولید به‌صورت رابطه (۱۰) است:

در این مرحله که در واقع سیاست‌های مدنظر و پیش‌بینی‌های لازم انجام می‌شود، با استفاده از توابع تولید و هزینه واسنجی شده تابع هدف غیرخطی با محدودیت‌های سیستمی (آب، زمین، نیروی کار و سرمایه) حل می‌شود:

$$\text{Max } \Pi = \sum_i^g P_{i,g} \times \tau_{i,g} \left(\sum_j \beta_{i,g,j} \times x_{i,g,j}^p \right)^{\frac{v}{\rho}} - \sum_i^g \alpha_{i,g,j} \times x_{i,g,j} + 0.5 \times \gamma_{i,g,j} \times x_{i,g,j}^2 \quad (19)$$

Subject to:

$$\sum_i x_{i,g,j} \leq \text{RHS}_{g,j} \quad (20)$$

در روابط فوق $x_{i,g,j}$ متغیر تصمیم یا همان میزان نهاده استفاده شده برای تولید هر محصول در هر منطقه است (Howitt, 1995).

۲-۳- نحوه تلفیق مدل‌های اقتصادی و هیدرولوژیکی

چگونگی تلفیق اجزای اقتصادی- اجتماعی و هیدرولوژیکی به این دلیل که معمولاً در فضاهای زمانی و مکانی متفاوت تحلیل می‌شوند، حائز اهمیت است. برای تلفیق دو مدل هیدرولوژیکی و اقتصادی در این مطالعه از رهیافت مدل‌سازی مجزا استفاده می‌شود. بدین صورت که الگوهای اقتصادی و هیدرولوژیکی به صورت روابط پسین و پیشین حل می‌شوند و داده‌های خروجی از یک مدل به عنوان داده‌های ورودی در مدل دیگر به کار گرفته می‌شود. در شکل ۲ چگونگی ارتباط دو مدل هیدرولوژیکی و اقتصادی ارائه شده است. در مدل هیدرولوژیکی آب تحویلی به بخش کشاورزی براساس شرایط اقلیمی و با در نظر گرفتن نیاز بخش‌های مختلف تعیین می‌شود. سپس میزان آب تحویلی به بخش کشاورزی به عنوان محدودیت وارد مدل اقتصادی می‌شود. با استفاده از دیگر محدودیت‌های مدل اقتصادی و همچنین با در نظر گرفتن حداکثرسازی سود کشاورزان، مدل اقتصادی سطح زیرکشت بهینه از نظر اقتصادی را مشخص می‌کند. در این روش عکس‌العمل کشاورزان (الگوی کشت و سود کشاورزان) در اثر کاهش بارش پیش‌بینی می‌شود.

۳- نتایج و بحث

با توجه به اهمیت کشاورزی در حوضه طشک- بختگان و سهم بالای این بخش در مصرف آب، پیش‌بینی می‌شود با خشکسالی و کاهش بارش، بیش‌ترین فشار به بخش کشاورزی وارد شود. یکی دیگر از دلایل این افزایش فشار اولویت پایین بخش کشاورزی (بعد از شرب و صنعت) است. این فشار مضاعف منجر به کاهش سهم آب بخش کشاورزی و عکس‌العمل کشاورزان می‌شود. در این حالت کشاورزان سعی می‌کنند با تغییر الگوی کشت ضرر ناشی از خشکسالی را به حداقل ممکن برسانند.

$$Y_{i,g} = \tau_{i,g} \left(\sum_j \beta_{i,g,j} \times h_{i,g,j}^p \right)^{\frac{v}{\rho}} \quad (10)$$

در این رابطه Y میزان تولید محصول، h عامل تولید و τ پارامتر مقیاس است. β پارامتر تولید است که سهم نهاده j را برای تولید محصول i نشان می‌دهد. v ضریب بازده ثابت نسبت به مقیاس است که در تابع CES مستلزم آن است که این ضریب برابر با یک شود. ρ نیز متغیری است که برحسب کشش جانشینی محصولات (σ) تعریف می‌شود و از رابطه (۱۱) به دست می‌آید:

$$\rho = \frac{(\sigma-1)}{\sigma} \quad (11)$$

تابع تولید با استفاده از چهار نهاده آب، زمین، سرمایه و نیروی کار تعریف می‌شود. با استفاده از مقادیر دوگان می‌توان با رابطه (۱۲) مقدار پارامتر تولید برای نهاده اول ($L=1$) را تخمین زد.

$$\beta_1 = 1 / \left(1 + \frac{h_1^{(-1/\sigma)}}{CS_1} \left(\sum_L \frac{CS_L}{h_L^{(-1/\sigma)}} \right) \right) \quad (12)$$

پس از محاسبه پارامتر تولید برای اولین نهاده، می‌توان برای تخمین پارامتر تولید برای دیگر نهاده‌ها ($L \neq 1$)، از رابطه (۱۳) استفاده کرد:

$$\beta_L = \frac{CS_L \times h_L^{(-1/\sigma)}}{CS_1 \times h_1^{(-1/\sigma)}} \quad (13)$$

در رابطه (۱۳) اندیس L شمارنده نهاده‌ها است. همچنین CS هزینه فرصت نهاده j برای تولید محصول i است که با استفاده از مقادیر دوگان محدودیت‌های واسنجی و سیستمی طبق رابطه (۱۴) محاسبه می‌شود:

$$CS_{i,g,j} = c_{i,g,j} + \lambda_i^c + \lambda_i^j \quad (14)$$

در نهایت نیز پارامتر مقیاس با استفاده از رابطه (۱۵) محاسبه می‌شود:

$$\tau_{i,g} = \frac{\left(\frac{Y_{i,g}}{X_{i,g,j}} \right) \bar{X}_{i,g,j}}{\left(\sum_j \beta_{i,g,j} \times h_{i,g,j}^p \right)^{\frac{v}{\rho}}} \quad (15)$$

در ادامه لازم است تابع هزینه زمین نیز تخمین زده شود. شکل کلی تابع هزینه درجه دوم به صورت رابطه (۱۶) است:

$$TC_{i,g,land} = \alpha_{i,g,j} + 0.5 \times \gamma_{i,g,j} \times X_{i,g,j}^2 \quad (16)$$

در رابطه فوق، TC هزینه کل مربوط به نهاده زمین، α پارامتر رهگیری و γ شیب تابع هزینه غیرخطی است. برای برآورد ضرایب تابع هزینه (α و γ) از روابط (۱۷) و (۱۸) استفاده می‌شود (Howitt, 1995):

$$\gamma_{i,g,j} = \frac{2\lambda_i^c}{X_{i,g,land}} \quad (17)$$

$$\alpha_{i,g,j} = C_{i,g,j} - \lambda_i^c \quad (18)$$

لازم به ذکر است که برای تخمین ضرایب تابع هزینه درجه دوم، می‌توان از روش‌های دیگری نیز استفاده کرد.

مرحله سوم: تبیین مدل واسنجی شده نهایی با تابع هدف غیرخطی

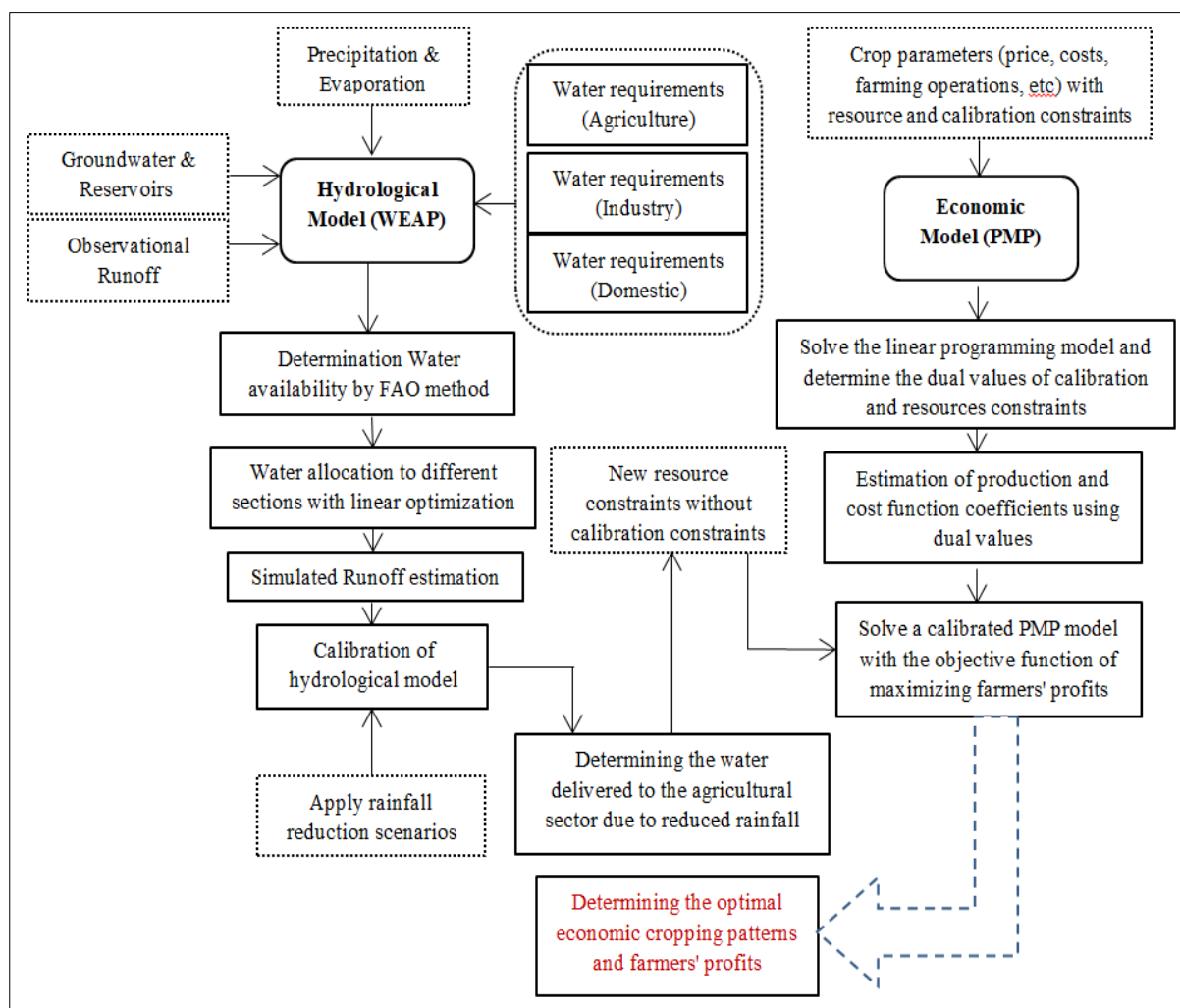


Fig. 2- Conceptual framework for hydro-economic modeling

شکل ۲- چارچوب مفهومی مدل سازی هیدرواقتصادی

بیشینه کشاورزان بر مبنای الگوی کشت بهینه محصولات تعیین شده است. در جدول ۱ نتایج حاصل از اثرات سناریوهای کاهش بارش بر میزان آب تحویلی به بخش کشاورزی و تغییرات آن نسبت به سال پایه (۲۰۰۶-۲۰۰۷) به تفکیک هر ناحیه ارائه شده است (سناریوی ۱: ۲۰٪ کاهش بارش و سناریوی ۲: ۴۰٪ کاهش بارش).

هدف از اعمال این سناریو تعیین عکس‌العمل کشاورزان در هنگام خشکسالی است. بدین صورت که ابتدا با اعمال سناریوی کاهش بارش در مدل هیدرولوژیکی میزان آب تحویلی به بخش کشاورزی در اثر کاهش بارش مشخص و سپس این مقدار به عنوان محدودیت وارد مدل اقتصادی شده و با استفاده از درآمد و هزینه محصولات مختلف، سود

Table 1- Water delivered to farmers in rainfall reduction scenarios

جدول ۱- آب تحویلی به کشاورزان در سناریوهای کاهش بارش

| Region | Delivered Water (Base Year) | Delivered Water (Scenario 1) | Δ% (Scenario 1) | Delivered Water (Scenario 2) | Δ% (Scenario 2) |
|--------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|-----------------|
| 1 | 370.72 | 287.42 | -22.47 | 276.71 | -25.36 |
| 2 | 429.26 | 429.26 | 0.00 | 424.19 | -1.18 |
| 3 | 552.56 | 340.05 | -38.46 | 318.50 | -42.36 |
| 4 | 475.93 | 294.41 | -38.14 | 284.56 | -40.21 |
| 5 | 97.13 | 66.25 | -31.79 | 64.29 | -33.81 |
| Basin | 1925.60 | 1417.38 | -26.39 | 1368.24 | -28.94 |

جدول ۲ الی ۵ نشان می‌دهند در هر دو سناریوی ۲۰٪ و ۴۰٪ کاهش بارش، بیش‌ترین کاهش سطح زیرکشت به ترتیب مربوط به نواحی ۴، ۳، ۵، ۱ و ۲ است. در بین محصولات نیز یونجه به دلیل مصرف آب زیاد و همچنین سود کم، بیش‌ترین کاهش سطح زیرکشت را در کل حوضه داشته است. سطح زیرکشت برنج نیز علی‌رغم مصرف آب زیاد تغییری نکرده است. بنابراین ملاحظه می‌شود همانند نتیجه تحقیق Maneta et al. (2009)، کشاورزان نسبت به کاهش بارش به صورت حداقل نمودن اثرات آن بر سود نیز واکنش نشان می‌دهند.

مقادیر جدول ۱ نشان می‌دهد که بیش‌ترین اثر کاهش بارش به ترتیب مربوط به نواحی ۳، ۴، ۵، ۱ و ۲ است. با قرار دادن این مقادیر به‌عنوان محدودیت آب در مدل اقتصادی، سطح زیرکشت محصولات و سود کشاورزان در این شرایط محاسبه شده‌اند. در جداول ۲ و ۳ به ترتیب تغییرات سطح زیرکشت و سود کشاورزان در سناریوی ۲۰ درصد کاهش بارش نسبت به سال پایه ارائه شده است. همچنین جداول ۴ و ۵ به ترتیب تغییرات سطح زیرکشت و سود کشاورزان در سناریوی ۴۰ درصد کاهش بارش نسبت به سال پایه را نشان می‌دهند.

Table 2- Crop area in the scenario of 20% rainfall reduction

جدول ۲- سطح زیرکشت محصولات در سناریوی ۲۰٪ کاهش بارش

| Crop Area (ha) | Wheat | | | Barley | | | Alfalfa | | | Rice | | |
|----------------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-----|
| | Base Year | Scenario1 | Δ% | Base Year | Scenario1 | Δ% | Base Year | Scenario1 | Δ% | Base Year | Scenario1 | Δ% |
| R1 | 34967.0 | 25441.1 | -27.2 | 2195.0 | 2195.0 | 0.0 | 1163.0 | 1163.0 | 0.0 | 5370.0 | 5370.0 | 0.0 |
| R2 | 39279.0 | 39279.0 | 0.0 | 5590.0 | 5590.0 | 0.0 | 2331.0 | 2331.0 | 0.0 | 1.2 | 1.2 | 0.0 |
| R3 | 66895.5 | 37303.2 | -44.2 | 5319.9 | 0.0 | -100.0 | 2768.3 | 0.0 | -100.0 | 12629.4 | 12629.4 | 0.0 |
| R4 | 59104.5 | 29397.8 | -50.3 | 4921.1 | 0.0 | -100.0 | 1723.7 | 0.0 | -100.0 | 11904.7 | 11904.7 | 0.0 |
| R5 | 10586.0 | 5591.4 | -47.2 | 2513.0 | 2513.0 | 0.0 | 255.0 | 0.0 | -100.0 | 93.0 | 93.0 | 0.0 |
| Basin | 210832.0 | 137012.6 | -35.0 | 20539.0 | 10298.0 | -49.9 | 8241.0 | 3494.0 | -57.6 | 29998.2 | 29998.2 | 0.0 |

(Changes in the total crop area in the basin= -32.93)

Table 3- Farmers profit in the scenario of 20% rainfall reduction

جدول ۳- سود کشاورزان در سناریوی ۲۰٪ کاهش بارش

| Profit (10 ⁹ Rial) | Wheat | | | Barley | | | Alfalfa | | | Rice | | |
|-------------------------------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|--------|-----------|-----------|-----|
| | Base Year | Scenario1 | Δ% | Base Year | Scenario1 | Δ% | Base Year | Scenario1 | Δ% | Base Year | Scenario1 | Δ% |
| R1 | 87.39 | 63.58 | -27.2 | 6.10 | 6.10 | 0.0 | 4.36 | 4.36 | 0.0 | 48.98 | 48.98 | 0.0 |
| R2 | 94.44 | 94.44 | 0.0 | 11.90 | 11.90 | 0.0 | 12.62 | 12.62 | 0.0 | 0.02 | 0.02 | 0.0 |
| R3 | 265.14 | 147.85 | -44.2 | 8.84 | 0.00 | -100.0 | 18.84 | 0.00 | -100.0 | 122.07 | 122.07 | 0.0 |
| R4 | 206.70 | 102.81 | -50.3 | 9.43 | 0.00 | -100.0 | 10.56 | 0.00 | -100.0 | 108.58 | 108.58 | 0.0 |
| R5 | 22.47 | 11.87 | -47.2 | 5.21 | 5.21 | 0.0 | 0.37 | 0.00 | -100.0 | 0.44 | 0.44 | 0.0 |
| Basin | 676.13 | 420.55 | -37.8 | 41.48 | 23.22 | -44.0 | 46.74 | 16.98 | -63.7 | 280.08 | 280.08 | 0.0 |

(Changes in the total profit of the farmers in the basin = -29.06)

Table 4- Crop area in the scenario of 40% rainfall reduction

جدول ۴- سطح زیرکشت محصولات در سناریوی ۴۰٪ کاهش بارش

| Crop Area (ha) | Wheat | | | Barley | | | Alfalfa | | | Rice | | |
|----------------|-----------|-----------|-------|-----------|-----------|--------|-----------|------------|--------|-----------|------------|-----|
| | Base Year | Scenario2 | Δ% | Base Year | Scenario2 | Δ% | Base Year | Scenario 2 | Δ% | Base Year | Scenario 2 | Δ% |
| R1 | 34967.0 | 23815.9 | -31.9 | 2195.0 | 2195.0 | 0.0 | 1163.0 | 1163.0 | 0.0 | 5370.0 | 5370.0 | 0.0 |
| R2 | 39279.0 | 39279.0 | 0.0 | 5590.0 | 5590.0 | 0.0 | 2331.0 | 2331.0 | 0.0 | 1.2 | 1.2 | 0.0 |
| R3 | 66895.5 | 32581.8 | -51.3 | 5319.9 | 0.0 | -100.0 | 2768.3 | 0.0 | -100.0 | 12629.4 | 12629.4 | 0.0 |
| R4 | 59104.5 | 27187.3 | -54.0 | 4921.1 | 0.0 | -100.0 | 1723.7 | 0.0 | -100.0 | 11904.7 | 11904.7 | 0.0 |
| R5 | 10586.0 | 5192.2 | -51.0 | 2513.0 | 2513.0 | 0.0 | 255.0 | 0.0 | -100.0 | 93.0 | 93.0 | 0.0 |
| Basin | 210832.0 | 128056.2 | -35.0 | 20539.0 | 10298.0 | -49.9 | 8241.0 | 3494.0 | -57.6 | 29998.2 | 29998.2 | 0.0 |

(Changes in the total profit of the farmers in the basin = -36.26)

Table 5- Profit of farmers in the scenario of 40% rainfall reduction

جدول ۵- سود کشاورزان در سناریوی ۴۰٪ کاهش بارش

| Profit (10 ⁹ Rial) | Wheat | | | Barley | | | Alfalfa | | | Rice | | |
|----------------------------------|--------------|------------|-------|--------------|------------|--------|--------------|------------|--------|--------------|------------|-----|
| | Base Year | Scenario 2 | Δ% | Base Year | Scenario 2 | Δ% | Base Year | Scenario 2 | Δ% | Base Year | Scenario 2 | Δ% |
| R1 | 87.39 | 59.52 | -31.9 | 6.10 | 6.10 | 0.0 | 4.36 | 4.36 | 0.0 | 48.98 | 48.98 | 0.0 |
| R2 | 94.44 | 94.44 | 0.0 | 11.90 | 11.90 | 0.0 | 12.62 | 12.62 | 0.0 | 0.02 | 0.02 | 0.0 |
| R3 | 265.14 | 129.14 | -51.3 | 8.84 | 0.00 | -100.0 | 18.84 | 0.00 | -100.0 | 122.07 | 122.07 | 0.0 |
| R4 | 206.70 | 95.08 | -54.0 | 9.43 | 0.00 | -100.0 | 10.56 | 0.00 | -100.0 | 108.58 | 108.58 | 0.0 |
| R5 | 22.47 | 11.02 | -51.0 | 5.21 | 5.21 | 0.0 | 0.37 | 0.00 | -100.0 | 0.44 | 0.44 | 0.0 |
| Basin | 676.13 | 389.19 | -42.4 | 41.48 | 23.22 | -44.0 | 46.74 | 16.98 | -63.7 | 280.08 | 280.08 | 0.0 |

(Changes in the total profit of the farmers in the basin = -32.07)

۴- خلاصه و جمع‌بندی

در الگوی کشت حوضه باقی مانده است. با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان گفت که انتظار می‌رود کشاورزان در مقابل کاهش بارندگی با تغییر الگوی کشت، برای حداقل کردن اثرات کاهش بارش بر سود اقتصادی عکس‌العمل نشان دهند. یکی دیگر از نتایج این تحقیق کاهش سطح زیرکشت محصول گندم در تمامی نواحی بود. این موضوع باتوجه به اهمیت راهبردی محصول گندم در بحث امنیت غذایی بسیار مهم است. همچنین پیشنهاد می‌شود در صورت کاهش سهم آب بخش کشاورزی، از کشت محصولات آب‌بر و با صرفه اقتصادی کم جلوگیری شود. البته با این روش نمی‌توان از کشت محصولاتی همانند برنج در این حوضه جلوگیری کرد. حذف محصولات آب‌بری مانند برنج در این منطقه که سودآوری بالایی دارند، تنها با اعمال سیاست‌های مختلف از طرف دولت و تصمیم‌گیران بخش کشاورزی میسر خواهد شد. این سیاست‌ها می‌توانند بر مبنای آب مجازی و توسعه گیاهان دارویی کم‌آب‌طلب و با سود اقتصادی بالا در نظر گرفته شوند. از محدودیت‌های این تحقیق عدم دقت بالای مدل‌سازی آب زیرزمینی است که می‌توان برای شبیه‌سازی آن از مدل‌های مربوط به آب زیرزمینی همچون (ModFlow) استفاده کرد. همچنین پیشنهاد می‌شود در مطالعات بعدی به مواردی همچون وضعیت اشتغال در منطقه و صنایع پایین‌دست توجه کرد. این موضوعات و البته دیگر محدودیت‌های اجتماعی-اقتصادی در تعیین سطح زیرکشت محصولات به‌خصوص در شرایط خشکسالی حائز اهمیت می‌باشد.

پی‌نوشت‌ها

- 1- Systems Analysis
- 2- Hydro-Economic Model
- 3- Integrated Water Resource Management
- 4- Virtual Water
- 5- Water Footprint
- 6- Input-Output Models (IOM)
- 7- Opportunity Cost
- 8- Positive Mathematical Programming
- 9- Physics-based 3-D Hydrologic Model

هدف اصلی این مطالعه بررسی واکنش کشاورزان نسبت به خشکسالی (کاهش بارش) در حوضه طشک- بختگان است. به همین منظور وضعیت سطح زیرکشت و سود کشاورزان در یک سال با شرایط بارشی نرمال (۲۰۰۶-۲۰۰۷) با سناریوهای کاهش بارش مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. برای دستیابی به این اهداف از یک مدل تلفیقی به‌عنوان چارچوب اصلی مطالعه استفاده شد. در بخش اقتصادی، مدل برنامه‌ریزی مثبت ریاضی (PMP) و در بخش هیدرولوژیکی، مدل برنامه‌ریزی و ارزیابی منابع آب (WEAP) مورد استفاده قرار گرفتند. به‌منظور دستیابی به نتایج کاربردی، تحلیل شرایط مختلف به‌صورت منطقه‌ای در ۵ ناحیه مجزا در سطح حوضه طشک- بختگان و نسبت به سال پایه (۲۰۰۶-۲۰۰۷) صورت گرفت. سپس با استفاده از داده‌های هر بخش دو مدل اقتصادی و هیدرولوژیکی تشکیل و ضرایب مورد نظر واسنجی شدند. در نهایت میزان تغییر آب تحویلی به کشاورزان از مدل هیدرولوژیکی و تغییرات سطح زیرکشت و سود کشاورزان از مدل اقتصادی در شرایط کاهش بارش نسبت به سال پایه برآورد شدند. نتایج نهایی مدل در کل حوضه نشان داد که در سناریوی ۲۰ و ۴۰ درصد کاهش بارش، میزان آب تحویلی به کشاورزان ۲۶ و ۲۹ درصد کاهش می‌یابد. این مقادیر کاهش یافته آب تحویلی به‌عنوان محدودیت وارد مدل اقتصادی شده و سطح زیرکشت و سود کشاورزان در این شرایط مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در کل حوضه نشان داد که در شرایط ۲۰ درصد کاهش بارش، سطح زیر کشت و سود کشاورزان به ترتیب ۳۳ و ۲۹ درصد و در شرایط ۴۰ درصد کاهش بارش، سطح زیرکشت و سود کشاورزان به ترتیب ۳۶ و ۳۲ درصد کاهش یافتند. از میان نواحی پنج‌گانه، ناحیه ۲ کم‌ترین تأثیر و نواحی ۳ و ۴ بیش‌ترین تأثیرپذیری را از کاهش بارش داشتند. در بین محصولات نیز بیش‌ترین تغییرات سطح زیرکشت مربوط به یونجه بود و سطح زیرکشت محصول برنج هیچ تغییری نکرد. محصول یونجه هم آب بالایی مصرف می‌کند و هم سود اقتصادی کمی دارد اما محصول برنج علی‌رغم مصرف آب زیاد، به دلیل سود بالا بدون تغییر

- applications, and future prospects. *Journal of Hydrology* 375(3-4):627-643
- Howitt R E (1995) A calibration method for agricultural economic production models. *Journal of Agricultural Economics* 46(2):147-159
- Howitt R E, Medellín-Azuara J, MacEwan D, and Lund J R (2012) Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. *Environmental Modelling & Software* 38:244-258
- Jalali A (2017) Evaluation of water resources management system at the catchment scale Case study: Tashk-Bakhtegan Basin). M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture Sciences, Tarbiat Modares University (TMU) (In Persian)
- Jamab (2013) Comprehensive water plan studies, catchments: Maharloo-Bakhtegan, Abargo-Sirjan, Kavirlut, Daranjir -Saghand, Hamoon-Jazmourian. Package No. 1: Potentials and Current Status of Water Resources Development-2006, Volume 4-Surface Water Resources (Quantitative and Qualitative) (In Persian)
- Jiang Q and Grafton R Q (2012) Economic effects of climate change in the Murray-Darling Basin, Australia. *Agricultural Systems* 110:10-16
- Loucks DP, Stedinger JR, and Haith DA (1981) *Water resource systems planning and analysis*. Prentice-Hall
- Maass A, Hufschmidt MM, Dorfman R, and et al. (1962) *Design of water-resources systems*. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts
- Maneta M P, Torres M D O, Wallender W W, Vosti S, Howitt R, Rodrigues L, Bassoi L H, and Panday S (2009) A spatially distributed hydroeconomic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment. *Water Resources Research* 45(11)
- Parhizkari A, Mahmoodi A, Shokatfadaie M (2017) Assessing the impacts of climate change on available water resources and agricultural production in shahrood river basin. *Agricultural Economics Research* 9(1):23-50
- Pulido-Velazquez M, Andreu J, Sahuquillo A, and Pulido-Velazquez D (2008) Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface-groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain. *Ecological Economics* 66(1):51-65
- Rfiei Darani H, Kohansal M, Ghorbani M, Sobohi M (2017) Hydroeconomic modeling in the analysis of water resources management strategies in Neyshabur
- 10- Food and Agriculture Organization of the United Nations
- 11- Standardized Precipitation Index
- 12- The Stockholm Environment Institute
- 13- Constant Elasticity of Substitution
- 14- Shadow Price

۵- مراجع

- Blanco-Gutiérrez I, Varela-Ortega C, and Purkey D R (2013) Integrated assessment of policy interventions for promoting sustainable irrigation in semi-arid environments: A hydro-economic modeling approach. *Journal of Environmental Management* 128:144-160
- Brouwer R and Hofkes M (2008) Integrated hydro-economic modelling: Approaches, key issues and future research directions. *Ecological Economics* 66(1):16-22
- Connor J, Schwabe K, King D, Kaczan D, and Kirby M (2009) Impacts of climate change on lower Murray irrigation. *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 53(3):437-456
- Davari A (2016) Hydraulic assessment of river environmental conditions considering the dynamics of water uses, case study: Kor River. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture Sciences, Tarbiat Modares University (TMU) (In Persian)
- Dianati M (2015) Economic analysis the effects of reduction of the Helmand River flow on cropping pattern and farmers' gross profit in sistian region. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture Sciences, University of Zabol (In Persian)
- George B, Malano H, Davidson B, Hellegers P, Bharati L, and Massuel S (2011) An integrated hydro-economic modelling framework to evaluate water allocation strategies I: Model development. *Agricultural Water Management* 98(5):733-746
- Ghotbizadeh M (2017) Assessing the institutional adaptive capacity of water resource systems versus environmental changes (Case study: Tashk-Bakhtegan Basin). M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture Sciences, Tarbiat Modares University (TMU) (In Persian)
- Guan D and Hubacek K (2008) A new and integrated hydro-economic accounting and analytical framework for water resources: A case study for North China. *Journal of Environmental Management* 88(4):1300-1313
- Harou JJ, Pulido-Velazquez M, Rosenberg D E, Medellín-Azuara J, Lund J R and Howitt R E (2009) Hydro-economic models: Concepts, design,

- agricultural income. In Embrapa Cerrados-Artigo em anais de congresso (Alice). In: inovagri international meeting, 2; simpósio brasileiro de salinidade, 2; reunião brasileira sobre engenharia da irrigação, 2, Fortaleza, 2014. Anais... Piracicaba: inovagri: inct-ei: inctsa. 299-308
- Varela-Ortega C, Blanco-Gutiérrez I, Swartz C H, and Downing T E (2011) Balancing groundwater conservation and rural livelihoods under water and climate uncertainties: An integrated hydro-economic modeling framework. *Global Environmental Change* 21(2):604-619
- plain. *Agricultural Economics and Development* 99(25):41-77
- Rosegrant M W, Ringler C, McKinney D C, Cai X, Keller A, and Donoso G (2000) Integrated economic-hydrologic water modeling at the basin scale: The Maipo River basin. *Agricultural Economics* 24(1):33-46
- Sieber J and Purkey D (2011) WEAP user guide. Stockholm Environmental Institute, US Center
- Torres M D O, Rodrigues L, and Paz J M (2014) Hydro-economic model for the assessment of water resources allocation and availability impacts on