

مدل سازی اثرات انتقال آب بین حوضه‌ای بر سطح و حجم آبخوان حوضه مبدأ انتقال با استفاده از نرم افزار WEAP (مطالعه موردی: اثر انتقال آب رودخانه بهشت آباد بر سطح و حجم آبخوان شلمزار)

شاهین سلیم پور ناغانی^۱، دکتر سید آرمان هاشمی منفرد^{۲*}، دکتر مهدی اژدری مقدم^۳

چکیده

انتقال بین حوضه‌ای آب، انتقال آب از حوضه‌ای به حوضه دیگر است. حوضه‌ای که به آن آب منتقل می‌شود، حوضه مقصد و حوضه‌ای که آب از آن منتقل می‌شود، حوضه مبدأ نامیده می‌شود. انتقال بین حوضه‌ای آب با وجود تأمین آب در حوضه مقصد، احتمالاً می‌تواند عامل تغییراتی در حوضه‌های مبدأ و مقصد باشد که باید مورد ارزیابی قرار گیرد. هدف از انجام این تحقیق، پیش‌بینی اثرات احتمالی انتقال آب رودخانه بهشت آباد به فلات مرکزی ایران بر سطح و حجم یکی از آبخوان‌های منطقه مبدأ انتقال به نام شلمزار و نیز ارائه راهبردهای مختلف در مدت ۳۰ سال پس از اجرای طرح است؛ برای این منظور از نرم افزار WEAP استفاده شد. براساس نتایج حاصل از این تحقیق، انتقال آب بین حوضه‌ای می‌تواند بر سطح و حجم آبخوان در منطقه مبدأ انتقال تأثیر منفی داشته باشد و موجب افت سطح آب زیرزمینی شود. در اثر انتقال آب و با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ، پس از گذشت ۳۰ سال حجم آبخوان از ۱۶۰/۷ میلیون مترمکعب به حدود ۳۰ میلیون مترمکعب کاهش می‌یابد. به منظور جلوگیری از کاهش حجم آبخوان، حداکثر آب قابل انتقال از رودخانه به حوضه مقصد در شرایط آبی نرمال و خشکسالی به ترتیب ۴۵۰ و ۱۶۰ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد. همچنین میزان حداکثر آب قابل انتقال با توجه به نیاز زیست‌محیطی رودخانه و در شرایط آبی نرمال، حدود ۳۵۰ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد. نتایج مدل حاکی از آن است که میزان کاهش حجم آبخوان مطالعاتی در شرایط انتقال آب از حوضه و در صورت اجرای طرح‌های توسعه منابع آب در مدت ۳۰ سال، حدود ۵ برابر خواهد بود.

جغرافیا و توسعه، شماره ۶۲، بهار ۱۴۰۰
تاریخ دریافت: ۹۸/۰۹/۰۶
تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۶/۰۳
صفحات: ۲۰۸-۱۸۳



واژه‌های کلیدی:

انتقال بین حوضه‌ای آب، آب زیرزمینی، حوضه بهشت آباد، آبخوان شلمزار، WEAP.

مقدمه

بقیه مناطق دارای آب و هوای مرطوب یا نیمه مرطوب است؛ بنابراین منابع آب موجود کشور، دارای پراکندگی زیادی است (Madani, 2014:316). اغلب رودخانه‌های پرآب در غرب و شمال کشور واقع شده و مناطق مرکزی و شرق کشور همواره با مسئله کمبود آب مواجه بوده‌اند. این عوامل امکان انتقال آب بین حوضه‌ای را در کشور فراهم می‌آورد. این طرح‌ها ممکن است دارای اثرات متفاوت اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی باشند (Abrishamchi & Tajrish, 2005: 260; Karamouz, Mojahedi, & Ahmadi, 2010: 90)

کشور ایران از آب و هوای متنوعی برخوردار است. میزان بارش سالانه، حدود ۴۱۳ میلیارد مترمکعب برآورد می‌شود که البته میزان و پراکندگی آن در سطح کشور بسیار متفاوت است. تغییرات بارش از کمتر از ۵۰ میلی‌متر در مرکز ایران تا حدود ۱۰۰۰ میلی‌متر در ساحل دریای خزر متغیر است. متوسط بارندگی در سطح کشور حدود ۲۵۰ میلی‌متر در سال است که کمتر از یک سوم میانگین جهانی است. بیش از ۶۵٪ کشور دارای اقلیم خشک، ۲۰٪ نیمه خشک و

۱- دانشجوی دکتری منابع آب، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان
۲- دانشیار گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان (نویسنده مسئول)
۳- استاد گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی شهید نیکبخت، دانشگاه سیستان و بلوچستان

Shahin.Salimpour@pgs.usb.ac.ir
hashemi@eng.usb.ac.ir
mazhdary@eng.usb.ac.ir

در نظر گرفتن نیازهای گیرنده و تأمین کننده آب، رویکرد تصمیم‌گیری برای تعیین حجم و قیمت ارائه داد (Ballestero, 2004: 75-88).

کارالو^۶ و ماگرینی^۷ (۲۰۰۶) انتقال بین‌حوضه‌ای را به‌عنوان تضادی در مدیریت منابع آب در برزیل معرفی کرده و نتیجه‌گرفتند که این روش تأمین آب، دارای عدم اطمینان سیاسی، اداری و قانونی است (De Carvalho & Magrini, 2006: 193-213).

فنگ^۸ و همکاران (۲۰۰۷) برای بررسی اثرات اقتصادی-اجتماعی طرح انتقال آب جنوب به شمال چین، یک سیستم پشتیبانی در تصمیم‌گیری تهیه و ارائه کرده‌اند که آسیب‌پذیری منابع آب موجود را ارزیابی می‌کند (Feng, Li, Duan, & Zhang, 2007: 1983-2003).

گوپتا^۹ و واندر زاگ^{۱۰} (۲۰۰۸) انتقال آب بین‌حوضه‌ای را از دیدگاه‌های مختلف علمی مورد ارزیابی قرار داده و تلاش کردند تا به این سؤال پاسخ دهند که آیا چنین نقل و انتقالاتی با مفهوم مدیریت یکپارچه منابع آب سازگار است یا خیر (Gupta & van der Zaag, 2008: 28-40). بوناچی^{۱۱} و آندریچ^{۱۲} (۲۰۱۰) تأثیر انتقال آب بین‌حوضه‌ای و توسعه مخزن سد را بر رژیم هیدرولوژیکی جریان رودخانه بررسی کردند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تأثیرات ناشی از انتقال آب باعث ایجاد تغییرات ناگهانی در رژیم‌های هیدرولوژیکی بخش‌های پایین‌دست رودخانه‌های مورد مطالعه می‌شوند (Bonacci & Andrić, 2010: 3852-3863).

مهتا^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از مدل WEAP^{۱۴} به بررسی تأمین و تقاضای آب مناطق شهری در حومه دریاچه ویکتوریا پرداختند. راهبردهای تعریف

و ممکن است تعادل کیفیت و کمیت آب را در منطقه مبدأ مختل کرده (Wei, Yang, Abbaspour, Mousavi, & Gnauck, 2010: 2) و حتی باعث ایجاد اختلاف بین مناطق مبدأ و مقصد شود (Yang & Zehnder, 2005: 342)؛ از این رو برای دستیابی به یک توسعه پایدار، باید این طرح‌ها بررسی و ارزیابی شوند (Abrishamchi & Tajrishi, 2005: 269). چنین پروژه‌هایی اغلب در مرحله برنامه‌ریزی از لحاظ فنی ارزیابی می‌شوند، اما معمولاً از نظر تأثیرات زیست‌محیطی ارزیابی آن‌ها کم یا ضعیف است (Davies, Thoms, & Meador, 1992: 326).

انتقال آب بین‌حوضه‌ای عبارت است از برداشت، انحراف یا پمپاژ آب سطحی و زیرزمینی از یک حوضه و تخلیه همه یا بخشی از آن در حوضه‌ای دیگر. پیشینه تاریخی طرح‌های انتقال آب بین‌حوضه‌ای در جهان زیاد نبوده و تقریباً در یک قرن اخیر آغاز شده‌است.

یویچ^۱ (۲۰۰۱) مشکلات ناشی از انتقال آب بین حوضه‌ای بین کشورهای مختلف را بررسی کرده و مشخصه‌های ژئومورفولوژی، زمین‌شناسی و هیدرولوژیکی را از پارامترهای بسیار مؤثر در این مبحث می‌داند (Yevjevich, 2001: 342-348). شائو^۲ و وانگ^۳ (۲۰۰۳) امکان انتقال آب بین حوضه‌های آبریز رودخانه‌های زرد و یانگ‌تسه^۴ را در راستای طرح انتقال آب از شمال به جنوب چین، بررسی کرده‌اند. آن‌ها اثرات این طرح را بر قوانین آب، روند سیاست‌گذاری، روش‌های موجود مدیریت حوضه‌های آبریز و همچنین محیط-زیست آن‌ها، مورد ارزیابی قرار داده‌اند (Shao, Wang & Wang, 2003: 5-14).

بالسترو^۵ (۲۰۰۴) مسائل اقتصادی ناشی از میزان آب قابل‌انتقال و نیز قیمت عادلانه آن را بررسی کرد و با

6-Carvalho
7-Magrini
8-Feng
9-Gupta
10-Van der Zaag
11-Bonacci
12-Andrić
13-Mehta
14-Water Evaluation And Planning System

1-Yevjevich
2-Shao
3-Wang
4-Yangtze
5-Ballestero

و نگهداری از منابع آب زیرزمینی این منطقه را چند برابر می‌کند. اهداف مطالعه حاضر، پیش‌بینی اثرات انتقال آب رودخانه بهشت‌آباد به حوضه زاینده رود و فلات مرکزی ایران بر روی یکی از آبخوان‌های حوضه مبدأ انتقال به نام شلمزار، تعریف راهبردهایی در جهت کاهش یا رفع اثرات منفی احتمالی و نهایتاً برآورد میزان حداکثر آب قابل انتقال از حوضه با در نظر گرفتن شرایط هیدرولوژیکی نرمال، خشکسالی و نیز تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه در طول ۳۰ سال آتی پس از بهره‌برداری از طرح است. برای این منظور از نرم‌افزار WEAP استفاده و با استفاده از آن راهبردهای مختلف به منظور ارزیابی اثرات انتقال آب در مدت ۳۰ سال آینده تعریف شد.

منطقه مورد مطالعه

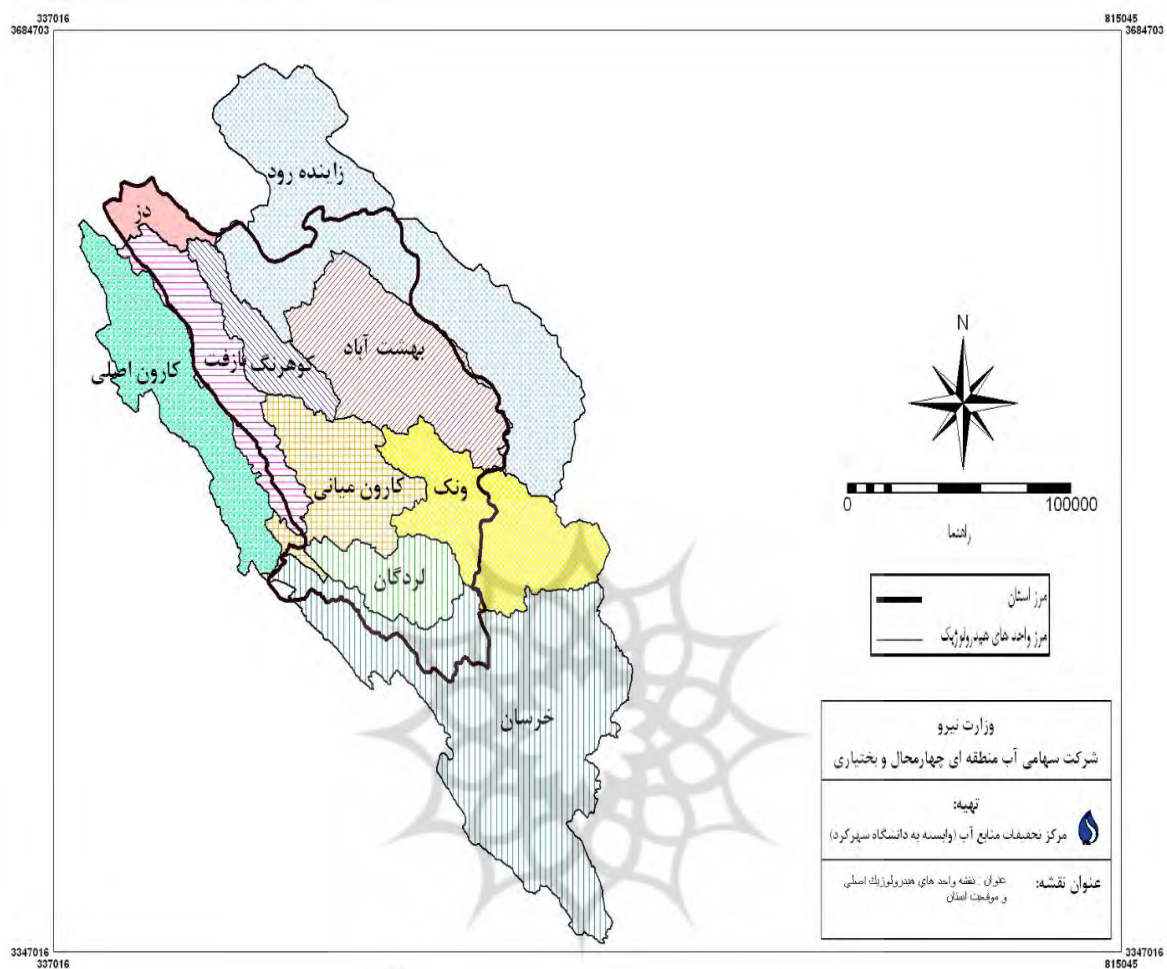
استان چهارمحال و بختیاری بین ۳۱ درجه و ۹ دقیقه تا ۳۲ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی و ۴۹ و ۲۸ دقیقه تا ۵۱ درجه و ۲۵ دقیقه طول شرقی در جنوب‌غربی کشور قرار گرفته‌است. در تقسیم‌بندی حوضه‌ای، کشور به ۶ حوضه اصلی تقسیم شده که از جمله آن‌ها می‌توان به حوضه آبریز خلیج فارس- دریای عمان و حوضه آبریز فلات مرکزی اشاره کرد. این استان در بخشی از حوضه آبریز کارون بزرگ و حوضه گاوخونی واقع است (شکل ۱)؛ بر این اساس می‌توان در استان، ۹ واحد هیدرولوژیک اصلی انتخاب کرد که در شکل ۲ ارائه شده‌است. همان‌گونه که در شکل‌های ۱ و ۲ ملاحظه می‌شود، حوضه شلمزار زیرحوضه بهشت‌آباد با وسعت ۴۳۰ کیلومتر مربع و در قسمت شرق حوضه واقع شده‌است (کد ۲۳۲۹ در شکل ۱). ۱۴۱ کیلومتر مربع از وسعت محدوده را دشت، ۲۸۹ کیلومتر مربع را ارتفاعات و ۹۳/۴۹ کیلومتر مربع از وسعت دشت را نیز آبخوان تشکیل می‌دهد.

شده تا سال ۲۰۵۰ را پوشش داده‌اند که در این راهبردها تأمین و تقاضای آب، درآمدها و هزینه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند (Mehta, Aslam, Dale, Miller, & Purkey, 2013: 22-31).

ژو^۱ و چن^۲ (۲۰۲۰) برای به حداکثر رساندن مزایای استفاده از سیستم انتقال آب بین حوضه‌ای، یک مدل تجمع ذرات و الگوریتم NSGA-II بهبودیافته برای ایجاد استراتژی‌های عملیاتی برای انتقال آب و تخصیص آن طراحی کردند. آن‌ها انتقال آب به شهر شنژن^۳ چین را مورد مطالعه قرار دادند و راهبردهای مختلف تأمین آب را با الگوریتم بهبودیافته بهینه کردند (Xu & Chen, 2020: 1-10).

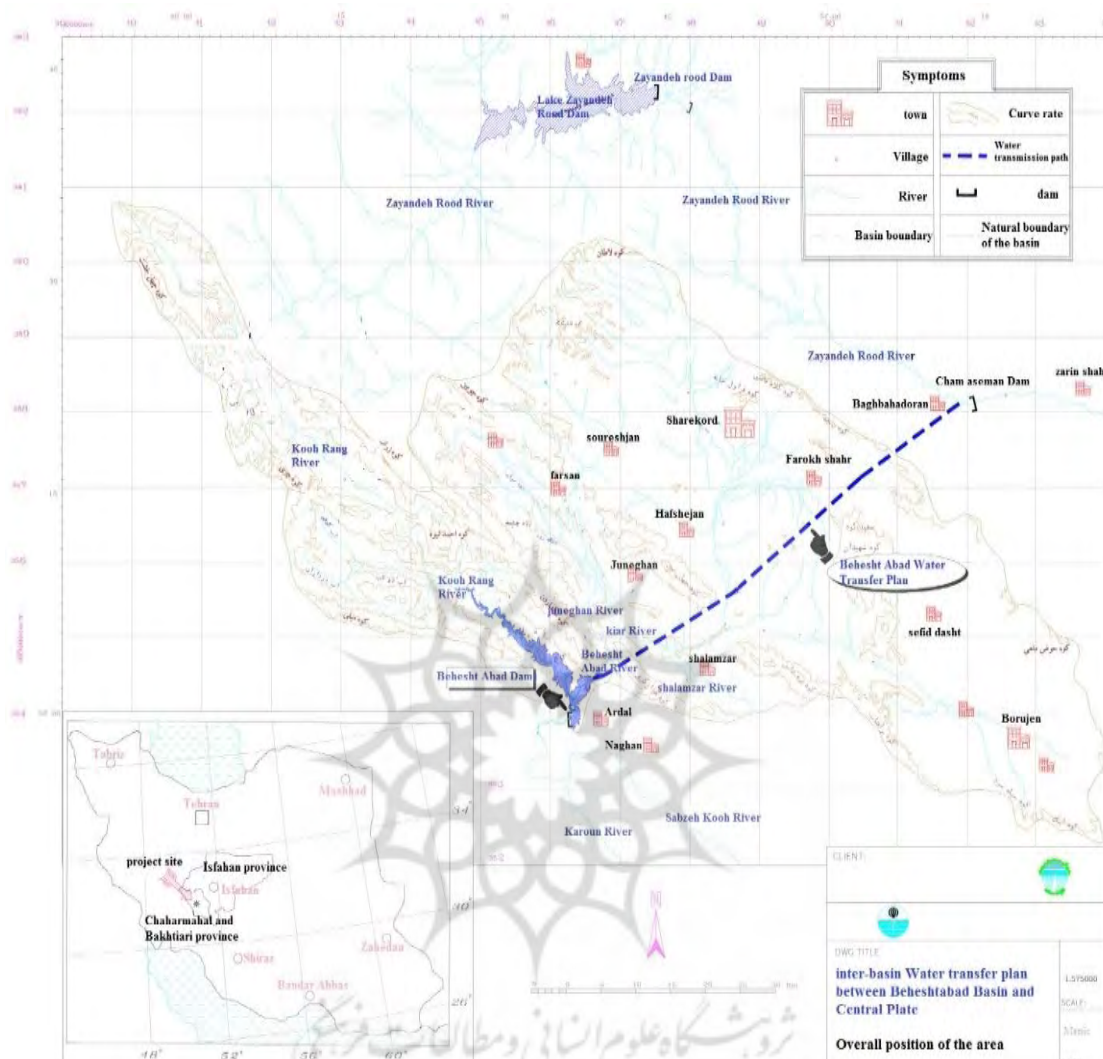
راجرز^۴ و همکاران (۲۰۲۰) در تحقیقی با عنوان ارزیابی یکپارچه پروژه انتقال آب جنوب به شمال چین به ارزیابی تأثیرات مختلف آن، از جمله مدیریت آب، مسائل حقوقی آن، کیفیت آب، تأثیر آن بر جمعیت و افزایش شهرنشینی، مسائل زیست‌محیطی آن پرداختند. نتایج نشان داد که فرصت‌ها و مسئولیت‌های مشخص شده در پروژه نامتوازن و نابرابر هستند. با اینکه این طرح ممکن است استفاده بیش از حد از آب‌های زیرزمینی را کاهش دهد، اما از لحاظ مصرف انرژی بسیار پرهزینه است و پایداری طرح را زیر سؤال می‌برد (Rogers et al, 2020: 1-15).

استان چهارمحال و بختیاری با بارش نسبتاً زیاد سرچشمه اصلی دو رودخانه کارون و زاینده‌رود است. به دلیل ویژگی‌های اقلیمی و توپوگرافی استان، درصد زیادی از بارش به صورت رواناب از طریق سرشاخه‌های زاینده‌رود، دز و کارون از استان خارج شده و بیشتر مصارف آب به‌ویژه در زیرحوضه بهشت‌آباد وابسته به منابع آب زیرزمینی است. این موضوع اهمیت مدیریت



شکل ۲: واحدهای اصلی هیدرولوژیک استان چهارمحال و بختیاری
مأخذ: مرکز تحقیقات منابع آب استان وابسته به دانشگاه شهکرد، ۱۳۹۰

پرتال جامع علوم انسانی



شکل ۳: موقعیت جغرافیایی طرح انتقال آب بین حوضه‌های بهشت‌آباد از حوضه مبدأ به حوضه مقصد

مأخذ: وزارت نیرو، مطالعات مرحله اول طرح انتقال آب، ۱۳۸۷

چهارچوب مسائل مربوط به مدیریت مصرف، کیفیت آب و حفظ اکوسیستم‌ها ضروری به نظر می‌رسد. نرم‌افزار WEAP ابزاری برای برنامه‌ریزی یکپارچه منابع آب است. مزیت اصلی این نرم‌افزار، رویکرد یکپارچه آن در شبیه‌سازی سیستم‌های آبی و جهت‌گیری آن در راستای سیاست‌ها است. WEAP در معادلات خود، مسائل مربوط به نیاز (الگوهای مصرف آب، هزینه‌ها و تخصیص) را همگام با مسائل مربوط به منابع (جریان‌های سطحی، آب‌های زیرزمینی، مخازن و انتقال‌های آب) لحاظ کرده

هدف از طرح انتقال آب رودخانه بهشت‌آباد، به صورت متوسط انتقال حدود ۷۴۶ میلیون مترمکعب آب در سال به منظور تأمین آب موردنیاز عمدتاً بخش‌های شرب و صنعت در فلات مرکزی ایران است. شکل ۳ موقعیت طرح انتقال آب را نشان می‌دهد (وزارت نیرو، مطالعات مرحله اول طرح انتقال آب، ۱۳۸۷).

روش انجام تحقیق

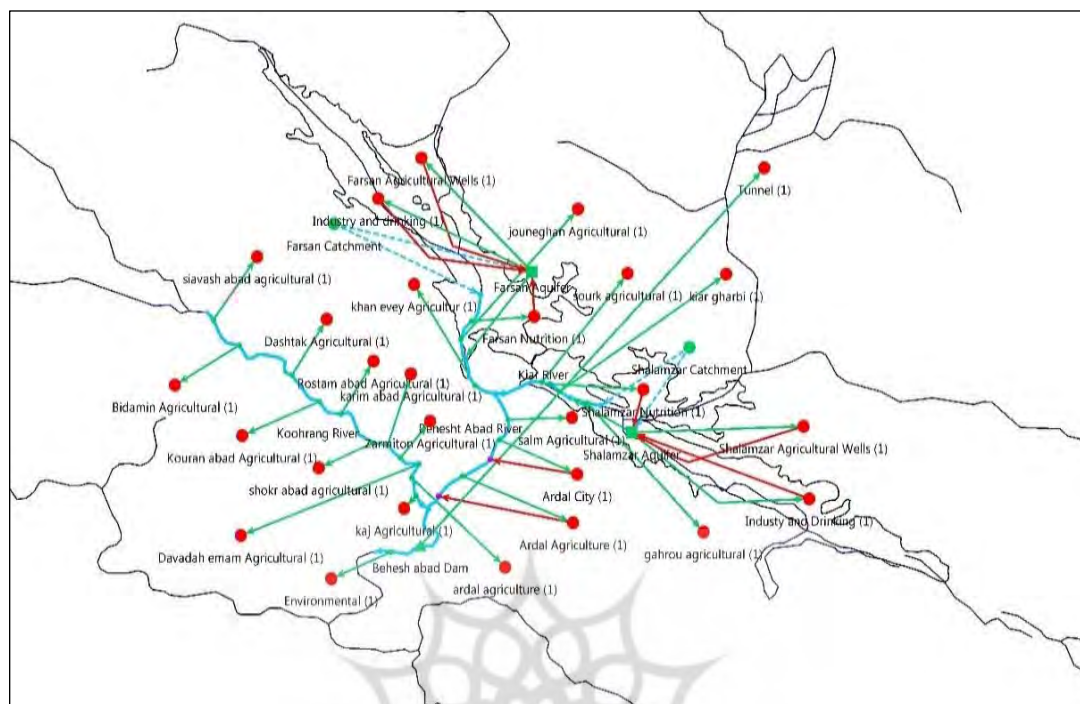
در طول دهه اخیر، اتخاذ رویکردی یکپارچه درباره توسعه منابع آب و در نظر گرفتن طرح‌های تأمین آب در

در ادامه با فرض اینکه بهره‌برداری از طرح انتقال آب از سال ۲۰۱۵ آغاز و به مدت ۳۰ سال - یعنی تا سال ۲۰۴۵ میلادی - ادامه یابد، با تعریف راهبردهای گوناگون برای منطقه مبدأ انتقال به پیش‌بینی اثرات انتقال آب بین‌حوضه‌ای بر حجم آبخوان شلمزار در مدت ۳۰ سال پرداخته شد. در این تحقیق سال ۲۰۱۵ به‌عنوان شرایط موجود به مدل معرفی و ۱۰ راهبرد نیز تعریف شد. هدف از تعریف و مدل‌سازی این راهبردها، برآورد حجم آب قابل‌انتقال از حوضه مبدأ به حوضه مقصد، تعیین اثرات این انتقال بر روی آبخوان منطقه مورد مطالعه و همچنین کاهش اثرات مخرب احتمالی انتقال آب از حوضه مورد مطالعه بود. این راهبردها با توجه به شرایط هیدرولوژیکی حوضه، تأمین یا عدم‌تأمین نیازها آبی، از جمله نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست رودخانه، رشد جمعیت، افزایش سطح زیرکشت و نیز رشد صنعت در حوضه مبدأ در طول ۳۰ سال آینده تعریف و مدل‌سازی شدند.

در شکل ۴ شماتیک مدل‌سازی حوضه مورد مطالعه در WEAP شامل: نقاط نیاز، گره‌های برداشت آب شامل: آب سطحی و زیرزمینی، انتقال آب از حوضه مبدأ، آب برگشتی از مصارف شرب، صنعت و کشاورزی به آب‌های سطحی و زیرزمینی، نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست رودخانه و نیز مخزن نشان داده شده است. در واقع شماتیک در مدل WEAP از ابزارهای مبتنی بر GIS تشکیل شده است و فایل‌های وکتور یا رستر GIS را می‌توان به لایه‌های پیش‌زمینه اضافه کرد (Yates et al., 2005:489).

و براساس معادلات پایه بیلان آبی عمل می‌کند. WEAP می‌تواند در سیستم‌های شهری و کشاورزی، حوضه‌های مستقل، سیستم‌های رودخانه‌ای مرزی و پیچیده بهره برد و به‌طور کلی کاربردهای آن طیف وسیعی از مسائل مدیریت منابع آب و زیست‌محیطی را شامل می‌شود (Yates et al., 2005: 488).

در تحقیق حاضر که مطالعه موردی و زیرمجموعه روش تحقیق توصیفی است، با استفاده از نرم‌افزار WEAP حوضه مطالعاتی شلمزار و انتقال آب از رودخانه بهشت‌آباد برای ۳۰ سال آینده (از سال ۲۰۱۵ تا سال ۲۰۴۵ میلادی) مدل‌سازی شد و اثرات احتمالی انتقال آب بر حجم آبخوان مطالعاتی در این افق زمانی پیش‌بینی شد. برای این منظور فرض شد که انتقال آب از سال ۲۰۱۵ که سال پایه مدل‌سازی است، صورت می‌پذیرد. داده‌های مورد استفاده در این تحقیق شامل: میزان حجم آب برداشت‌های گوناگون و تأمین نیازهای مختلف از محل آب‌های زیرزمینی و سطحی به‌صورت سالانه شامل: بخش کشاورزی، صنعت، شرب، نرخ رشد جمعیت منطقه، داده‌های مربوط به آبخوان مورد مطالعه شامل: حجم آن (جدول شماره ۲)، میزان بارش و تبخیر سالیانه منطقه (جدول شماره ۱ و ۳) و نیز حجم آب پیش‌بینی‌شده در مطالعات اولیه طرح در جهت انتقال از حوضه - یعنی به‌طور متوسط ۷۴۶ میلیون متر مکعب در سال - هستند. با استفاده از داده‌های فوق که در جداول شماره ۱، ۲ و ۳ ارائه شده است و نیز معادلات بیلان آب، حوضه شلمزار با استفاده از روش بارش - رواناب سازمان کشاورزی و غذا ملل متحد (FAO^۱) در WEAP مدل‌سازی شد.



شکل ۴: شماتیک و اجزای مدل‌سازی منطقه مورد مطالعه در نرم‌افزار WEAP شامل موقعیت رودخانه بهشت‌آباد، گره‌های نیاز و برداشت آب، انتقال آب، آب برگشتی و نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست رودخانه تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

روش مدل‌سازی حوضه

برای مدل‌سازی فرایندهای مربوط به حوضه مورد مطالعه از روش بارش- رواناب مربوط به سازمان کشاورزی و غذا (FAO) در WEAP استفاده شد. این روش با به‌کاربردن ضرایب گیاهی (Kc^1)، تبخیر- تعرق را برای گیاهانی که آبیاری یا توسط باران تغذیه می‌شوند، تعیین می‌کند. باقی‌مانده بارندگی که به‌وسیله تبخیر-تعرق مصرف نمی‌شود، به‌عنوان رواناب به رودخانه و قسمتی از آن به آب زیرزمینی منتقل می‌شود.

روش بارش- رواناب

روش بارش- رواناب راهی ساده برای محاسبه رواناب به‌صورت تفاوت میان بارش و تبخیر و تعرق گیاه است و درواقع قسمتی از بارش است که در روند تبخیر و تعرق قرار نمی‌گیرد و تبدیل به رواناب برای تأمین

دبی پایه می‌شود. همان‌طور که در معادله ۱ ملاحظه می‌شود، تبخیر و تعرق گیاه (ETc^2) با ضرب تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETo^3) در ضریب کشت (Kc) برای هر نوع کاربری برآورده می‌شود که در اثر شرایط مختلف آب‌وهوایی و در ضریب Kc خصوصیات محصول و گیاه گنجانده می‌شود. اثر تعرق محصول و تبخیر خاک در یک ضریب محصول واحد به‌نام ضریب کشت (Kc) ادغام شده‌است. (معادله ۱)

(Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998:90)

$$ETc = Kc * ETo \quad \text{معادله ۱}$$

ضریب Kc شامل ویژگی‌های محصول و میانگین اثرات تبخیر از خاک است. مقادیر میانگین ضرایب محصول واحد (Kc) برای حداکثر ارتفاع متوسط گیاه و محصولات مختلف بدون تنش و مناطق دارای آب و

2-Crop evapotranspiration
3-Reference crop evapotranspiration

1-Crop coefficient

T متوسط دمای هوا در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین (°C)، G چگالی شار گرمایی خاک [$\text{MJ} (\text{M}^2 \text{D})^{-1}$].
 u_2 میانگین سرعت باد در ارتفاع ۲ متر در ۲۴ ساعت
 e_s فشار بخار اشباع (ms^{-1})، e_a فشار بخار واقعی
 Δ شیب منحنی فشار بخار-دما [$\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$] و γ
 ضریب رطوبتی (سایکومتری) [$\text{kPa}^\circ\text{C}^{-1}$] هستند
 (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998:65).

معادلات مربوط به بیلان آب

در ادامه، معادلات مربوط به بیلان آب استفاده شده در محاسبات این بخش آورده شده است که در آنها زیرنویس LC به معنی پوشش زمین و HU واحد هیدرولوژیکی، I آبیاری شده و NI آبیاری نشده است (Sieber & Purkey, 2007:196):

$$\text{PrecipAvailableForET}_{LC} = \text{Precip}_{HU} * \text{Area}_{LC} * 10^{-5} * \text{PrecipEffective}_{LC} \quad \text{معادله ۳}$$

$$\text{ETpotential}_{LC} = \text{ETreference}_{HU} * K_{LC} * \text{Area}_{LC} * 10^{-5} \quad \text{معادله ۴}$$

$$\text{PrecipShortfall}_{LC,I} = \text{Max}(0, \text{ETpotential}_{LC,I} - \text{PrecipAvailableForET}_{LC,I}) \quad \text{معادله ۵}$$

$$\text{SupplyRequirement}_{LC,I} = (1 / \text{IrrFrac}_{LC,I}) * \text{PrecipShortfall}_{LC,I} \quad \text{معادله ۶}$$

$$\text{SupplyRequirement}_{HU} = \sum_{LC,I} \text{SupplyRequirement}_{LC,I} \quad \text{معادله ۷}$$

مربوط به پوشش زمین و کل واحد هیدرولوژیکی مورد نیاز است و این در حالی است که راندمان آبیاری را نیز مدنظر قرار می دهد (Sieber & Purkey, 2007:197):

$$\text{Supply}_{HU} = \text{براساس روش تخصیص منابع WEAP محاسبه می شود} \quad \text{معادله ۸}$$

$$\text{Supply}_{LC,I} = \text{Supply}_{HU} * (\text{SupplyRequirement}_{LC,I} / \text{SupplyRequirement}_{HU}) \quad \text{معادله ۹}$$

$$\text{ETActual}_{LC,NI} = \text{Min}(\text{ETpotential}_{LC,NI}, \text{PrecipAvailableForET}_{LC,NI}) \quad \text{معادله ۱۰}$$

$$\text{ETActual}_{LC,I} = \text{Min}(\text{ETpotential}_{LC,I}, \text{PrecipAvailableForET}_{LC,I} + \text{IrrFrac}_{LC,I} * \text{Supply}_{LC,I}) \quad \text{معادله ۱۱}$$

$$\text{EF}_{LC} = \text{ETActual}_{LC} / \text{ETpotential}_{LC} \quad \text{معادله ۱۲}$$

روانایی که به آب زیرزمینی و آب سطحی تبدیل می شود، از معادلات زیر به دست می آید (Sieber & Purkey, 2007:197):

هوای نیمه مرطوب برای استفاده در معادله Penman-Monteith فائو (معادله ۱) از جداول مقاله شماره ۵۶ آبیاری و زهکشی فائو به دست می آید (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998:110-114).

تبخیر و تعرق گیاه مرجع (ETO) را می توان با معادله ای که در ابتدا توسط پنمن-مانتیس ارائه شده و سپس توسط آلن توسعه یافته، محاسبه کرد (معادله ۲)

(Allen, Pereira, Raes, & Smith, 1998:65):

معادله ۲:

$$\text{ETO} = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma\left(\frac{900}{T+273}\right)u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

که در آن ETO تبخیر و تعرق گیاه مرجع (mmd^{-1}), R_n تابش خالص در سطح زمین [$\text{MJ} (\text{M}^2 \text{D})^{-1}$].

چهار معادله آخر برای محاسبه مقدار آب اضافی استفاده می شود (منظور، اضافه بر مقدار بارش موجود است) که برای تأمین آب مورد نیاز برای تبخیر-تعرق

$$\text{Runoff}_{LC} = \text{Max} (0, \text{PrecipAvailableForET}_{LC} - \text{ETpotential}_{LC}) + (\text{Precip}_{LC} * (1 - \text{PrecipEffective}_{LC})) + (1 - \text{IrrFrac}_{LC,I}) * \text{Supply}_{LC,I} \quad \text{معادله ۱۳}$$

$$\text{RunoffToGW}_{HU} = \sum_{LC} (\text{Runoff}_{LC} * \text{RunoffToGWFraction}_{LC}) \quad \text{معادله ۱۴}$$

$$\text{RunoffToSurfaceWater}_{HU} = \sum_{LC} (\text{Runoff}_{LC} * (1 - \text{RunoffToGWFraction}_{LC})) \quad \text{معادله ۱۵}$$

تعریف پارامترهای فوق به شرح زیر است (Sieber & Purkey, 2007:197):

مساحت پوشش زمین (هکتار)	Area
بارندگی (میلی‌متر)	Precip
بارش مؤثر (برحسب درصد): درصدی از بارندگی که می‌تواند برای محاسبه تبخیر-تعرق استفاده شود.	PrecipEffective
بارندگی در دسترس برای تبخیر-تعرق	PrecipAvailableForET
ضریب گیاهی سازمان غذا و کشاورزی (فائو)	Kc
تبخیر-تعرق گیاه مرجع	ETreference
تبخیر-تعرق پتانسیل	ETpotential
کمبود تبخیر-تعرق اگر فقط بارندگی در نظر گرفته شود.	PrecipShortfall
درصدی از آب تأمین شده که برای تبخیر-تعرق در دسترس است.	IrrFrac
احتیاجات آبیاری محصول	SupplyRequirement
میزان آب تأمین شده برای آبیاری	Supply
کسری از تبخیر-تعرق پتانسیل که برآورده شده است.	EF
رواناب حاصل از یک پوشش زمین	Runoff
روانابی که به آب زیرزمینی تبدیل می‌شود.	RunoffToGW
روانابی که به آب سطحی تبدیل می‌شود.	RunoffToSurfaceWater

برای محاسبه شاخص‌های فوق و نیز مدل‌سازی حوضه و آبخوان، از داده‌های موجود در جداول ۱ تا ۳ استفاده شد.

جدول ۱: اطلاعات هواشناسی حوضه مورد مطالعه

میانگین دمای سالانه (°C)		میانگین بارش سالانه (mm)	
ارتفاعات	دشت	ارتفاعات	دشت
۱۱/۵۱	۱۱/۸	۶۵۶/۶	۵۸۵/۳۹

مأخذ: شرکت مدیریت منابع آب ایران، بیلان آب محدوده شلمزار، ۱۳۹۰

جدول ۲: حجم ذخایر آب زیرزمینی در محدوده مطالعاتی

وضعیت آبخوان	حجم اولیه آبخوان (MCM)	ضریب ذخیره متوسط (درصد)	ضخامت متوسط (m)	وسعت (Km ²)	آبخوان
در حالت تعادل	۱۶۰/۶۹	۳	۷۰	۹۳/۴۹	شلمزار

مأخذ: شرکت مدیریت منابع آب ایران، بیلان آب محدوده شلمزار، ۱۳۹۰

جدول ۳: مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی، بارندگی کل و مؤثر سالانه در محدوده مطالعاتی

نام حوضه	مساحت منطقه (Km ²)	متوسط تعداد روزهای بارندگی در سال (روز)	تعداد روزهای دارای تبخیر واقعی (روز)	متوسط بارندگی سالانه (mm)	متوسط تبخیر-تعرق پتانسیل سالانه (mm)	متوسط تبخیر-تعرق واقعی سالانه (mm)	متوسط بارندگی مؤثر سالانه (mm)	متوسط KC برای گیاهان کوچک طبق جدول فائو
شلمزار	۴۳۰	۸۱	۱۳۹	۵۸۵/۳۹	۱۲۶۵/۱۱	۲۹۸/۹۲	۲۸۶/۴۷	۰/۹۰ - ۱/۰۵

مأخذ: شرکت مدیریت منابع آب ایران، بیان آب محدوده شلمزار، ۱۳۹۰

تدوین راهبردها

پس از مدل سازی فرایندهای مربوط به حوضه مورد مطالعه و معرفی آبخوان و حوضه به مدل WEAP و نیز در نظر گرفتن انتقال آب از حوضه، به منظور کاهش اثرات احتمالی انتقال آب بر روی آبخوان حوضه مبدأ، تعیین حجم انتقال آب بهینه در شرایط هیدرولوژیکی نرمال و خشکسالی، تأمین نیازهای آبی توسعه منابع آب حوضه مبدأ و نیز تأمین نیاز زیست محیطی پایین دست رودخانه، ۱۰ راهبرد به شرح ذیل تعریف و برای ۳۰ سال مدل سازی انجام شد. در گام اول چارچوب زمانی، مرزهای مکانی، اجزای سیستم و پیکربندی مسئله در WEAP برقرار شده و در مرحله دوم شرایط موجود که یک تصویر کلی از تقاضای واقعی آب، منابع و عرضه مورد نیاز برای سیستم است، ایجاد شد. در این مسئله سال ۲۰۱۵ به عنوان شرایط موجود در نظر گرفته شد و تمام اطلاعات سیستم (مانند: نیاز، داده های منابع و...) در شرایط موجود به مدل داده شدند و راهبردها براساس شرایط موجود تعریف شدند. راهبرد نشان می دهد که چگونه سیستم در آینده و در طول زمان و مکان، در یک مشخصات اقتصادی-اجتماعی و در یک شرایط مشخصی از سیاست گذاری درگیر می شود. راهبردها می توانند نیازهای آبی و قیمت ها و حتی عوامل محیطی را ارزیابی کنند. همه راهبردها از یک سال پایه شروع می شوند و از نظر موضوع، راهبردها می توانند موضوعات وسیعی را شامل شوند. در این مسئله افق زمانی مورد نظر ۳۰ سال است که یک افق بلندمدت در برنامه ریزی منابع آب است.

راهبردهای تعریف شده در این مسئله عبارتند از:
راهبرد ۱ (سناریو مرجع): این راهبرد به صورت پیش فرضی وجود دارد که داده های شرایط موجود را تا انتهای دوره زمانی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۵ (افق زمانی ۳۰ ساله) منظور کرده و به عنوان مبنای مقایسه با سایر راهبردهایی که در آنها تغییراتی در داده های سیستم داده شده، به کار می رود. در این راهبرد اثرات انتقال آب که به طور متوسط سالانه ۷۴۶ میلیون مترمکعب در مطالعات طرح تعیین شده است، بر حجم آبخوان شلمزار در شرایط آبی نرمال، بدون در نظر گرفتن طرح های توسعه منابع آب و تحت شرایط کنونی (سال پایه) برای ۳۰ سال آینده تعیین می شود.
راهبرد ۲: در این راهبرد اثرات انتقال آب بر روی حجم آبخوان منطقه مبدأ انتقال (آبخوان شلمزار) با میزانی که در طرح پیش بینی شده است، یعنی سالانه به طور متوسط حدود ۷۴۶ میلیون مترمکعب (حداکثر ظرفیت) تعیین می شود. این راهبرد در برگیرنده طرح های توسعه منابع آب منطقه مبدأ انتقال آب، شامل افزایش سطح زیرکشت زمین های کشاورزی و افزایش برداشت از آب های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه و همچنین با در نظر گرفتن طرح های برداشت و انتقال از آب های سطحی پیش بینی شده در افق ۳۰ سال آینده به منظور توسعه منابع آبی، در شرایط آبی نرمال است.
راهبرد ۳: تعیین اثرات انتقال آب با حداکثر میزان پیش بینی شده با در نظر گرفتن توسعه منابع آبی شامل آب زیرزمینی و سطحی برای شرایط خشکسالی در طول مدت ۳۰ سال آینده.

نتایج و بحث

راهبرد ۱ (مرجع): این راهبرد به صورت پیش فرض وجود دارد که داده‌های شرایط موجود را تا انتهای دوره زمانی از سال ۲۰۱۵ تا ۲۰۴۵ (افق زمانی ۳۰ ساله) منظور کرده و به عنوان مبنای مقایسه با سایر راهبردهایی که در آن‌ها تغییراتی در داده‌های سیستم داده شده، به کار می‌رود. راهبردی مرجع، اثرات انتقال آب در طی مدت ۳۰ سال را با حداکثر ظرفیتی که در مطالعات طرح پیش‌بینی شده، بر روی آبخوان شلمزار، همراه با عواملی مثل برداشت از آب زیرزمینی، آب‌های سطحی و مصارف آب را تا انتهای افق زمانی تحت شرایط موجود و با فرض عدم اجرای طرح‌های جدید توسعه منابع آب بررسی خواهد کرد. در واقع می‌توان گفت شاخص اصلی در این راهبرد تعیین اثرات انتقال آب با میزان حجمی که در مطالعات اولیه پروژه تعیین شده است، بدون در نظر گرفتن طرح‌های توسعه‌ای برای ۳۰ سال آینده است. در این راهبرد اثرات انتقال آب (متوسط سالانه ۷۴۶ میلیون مترمکعب) بر حجم آبخوان شلمزار در شرایط آبی نرمال، بدون در نظر گرفتن طرح‌های توسعه منابع آب و تحت شرایط کنونی (سال پایه) تعیین شد. حجم آبخوان مطالعاتی در سال ۲۰۱۵ برابر با ۱۶۰/۷ میلیون مترمکعب است که تحت انتقال آب در سال ۲۰۴۵ حجم آن به حدود ۶۸/۵ میلیون مترمکعب (حدود ۵۷/۴ درصد) کاهش می‌یابد. در این حالت میزان افت سطح ایستابی آب زیرزمینی برابر با ۲۵ متر خواهد بود (شکل ۵).

راهبرد ۲ انتقال آب با حجم پیش‌بینی شده در مطالعات اولیه طرح (۷۴۶ میلیون مترمکعب در سال) با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه منابع آب و شرایط آبی نرمال: در این راهبرد اثرات انتقال آب بر روی حجم آبخوان شلمزار با میزانی که در طرح پیش‌بینی شده است، تعیین شد. این راهبرد دربرگیرنده طرح‌های توسعه منابع

راهبرد ۴: افزایش نیاز زیست‌محیطی پایین دست رودخانه بهشت‌آباد: در حالت کلی در این تحقیق نیاز زیست‌محیطی پایین دست رودخانه برابر با حداقل میزان آن، یعنی ۱۰ درصد میانگین درازمدت دبی پایه آن در نظر گرفته شد. در این راهبرد نیاز زیست‌محیطی پایین دست ابتدا از ۱۰ درصد به ۳۰ درصد و سپس میزان آن به ۶۰ درصد افزایش داده شد و نتایج با حالت حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه (۱۰ درصد دبی پایه) مقایسه شد.

راهبرد ۵: راهبرد اصلاح مصرف کشاورزی در حوضه مبدأ انتقال (افزایش راندمان آب کشاورزی در حوضه مبدأ).

راهبرد ۶: برآورد میزان حجم سالانه تغذیه مصنوعی آبخوان مذکور در جهت جلوگیری از روند نزولی کاهش حجم آن در صورت انتقال آب با حداکثر ظرفیت (۷۴۶ میلیون مترمکعب در سال).

راهبرد ۷: برآورد حداکثر میزان آب قابل انتقال در شرایط آبی نرمال و با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ انتقال که باعث افت سطح آبخوان حوضه مبدأ انتقال در طول مدت ۳۰ سال نشود.

راهبرد ۸: برآورد حداکثر میزان آب قابل انتقال با در نظر گرفتن افزایش نیاز زیست‌محیطی رودخانه و طرح‌های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ انتقال در شرایط آبی نرمال.

راهبرد ۹: برآورد حداکثر میزان حجم آب قابل انتقال در شرایط خشکسالی و با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ انتقال که باعث افت سطح آبخوان حوضه مبدأ در طول مدت ۳۰ سال نشود.

راهبرد ۱۰: افزایش تدریجی آب قابل انتقال در طی چند سال از میزان حداکثر به دست آمده در راهبرد هفتم تا میزان تعیین شده در مطالعات اولیه طرح به منظور جلوگیری از روند کاهش حجم آبخوان.

مطالعات طرح (حداکثر ظرفیت برابر MCM ۷۴۶) همراه با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه منابع آب و در شرایطی که منطقه مورد مطالعه تحت خشکسالی باشد. این راهبرد همانند راهبرد ۲ است که در آن طرح‌های توسعه منابع آب سطحی و زیرزمینی نیز لحاظ شده است، با این تفاوت که در این راهبرد فرض بر این استوار است که محدوده مطالعاتی شلمزار در طول افق زمانی ۳۰ ساله دچار خشکسالی شود. در این حالت میزان بارش طبیعتاً کاهش خواهد یافت. در محدوده شلمزار میزان بارش در شرایط خشکسالی نسبت به شرایط هیدرولوژیکی نرمال حدود ۳۷ درصد کاهش نشان می‌دهد. در جدول ۳ میزان بارش در شرایط آبی نرمال و خشکسالی برای محدوده مطالعاتی آورده شده است. آمار جدول ۴ در یک دوره ۳۰ ساله از سال ۱۳۶۰ تا ۱۳۹۰ اندازه‌گیری شده است.

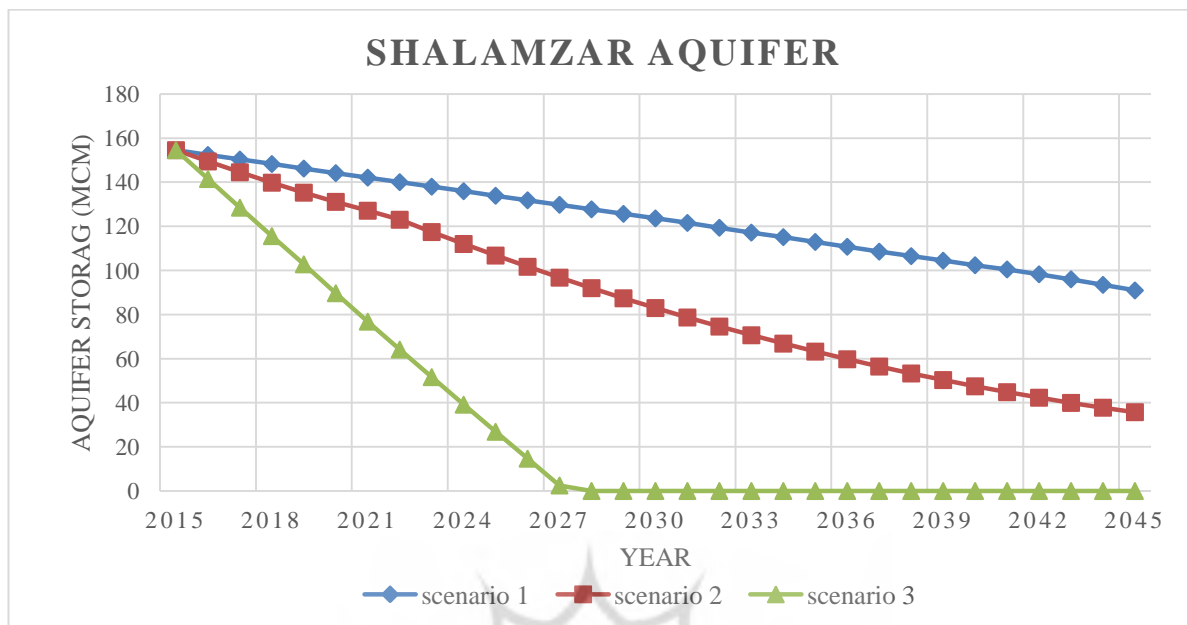
آب منطقه مبدأ انتقال آب، شامل افزایش سطح زیرکشت، افزایش نرخ جمعیت، صنعت و افزایش برداشت از آب‌های زیرزمینی منطقه مورد مطالعه و همچنین با در نظر گرفتن طرح‌های برداشت و انتقال از آب‌های سطحی پیش‌بینی شده در افق ۳۰ سال آینده به منظور توسعه منابع آبی، در شرایط هیدرولوژیکی نرمال است. راهبرد ۲ در واقع همان راهبرد مرجع است، با این تفاوت که در این راهبرد طرح‌های توسعه منابع آب در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۵ مشخص است، تحت این راهبرد حجم آبخوان از میزان ۱۶۰/۷ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۱۵، به حدود ۳۰ میلیون مترمکعب در سال ۲۰۴۵ کاهش یافته است. در این حالت میزان افت سطح ایستابی آب زیرزمینی برابر با ۴۶/۹۳ متر خواهد بود.

راهبرد ۳ انتقال آب با حجم پیش‌بینی شده در مطالعات اولیه طرح (حداکثر ظرفیت) و با در نظر گرفتن طرح‌های توسعه منابع آب و شرایط خشکسالی: این راهبرد شامل انتقال آب با حجم پیش‌بینی شده در

جدول ۴: بارش سالیانه در شرایط مختلف سال آبی محدوده مطالعاتی

متوسط بارندگی سالانه (میلی‌متر)		نام واحد هیدرولوژیک	نام محدوده مطالعاتی
خشکسالی	شرایط آبی نرمال	بهشت‌آباد	شلمزار
۳۹۴	۵۳۸/۴		

مأخذ: شرکت مدیریت منابع آب ایران، بیان آب محدوده شلمزار، ۱۳۹۰

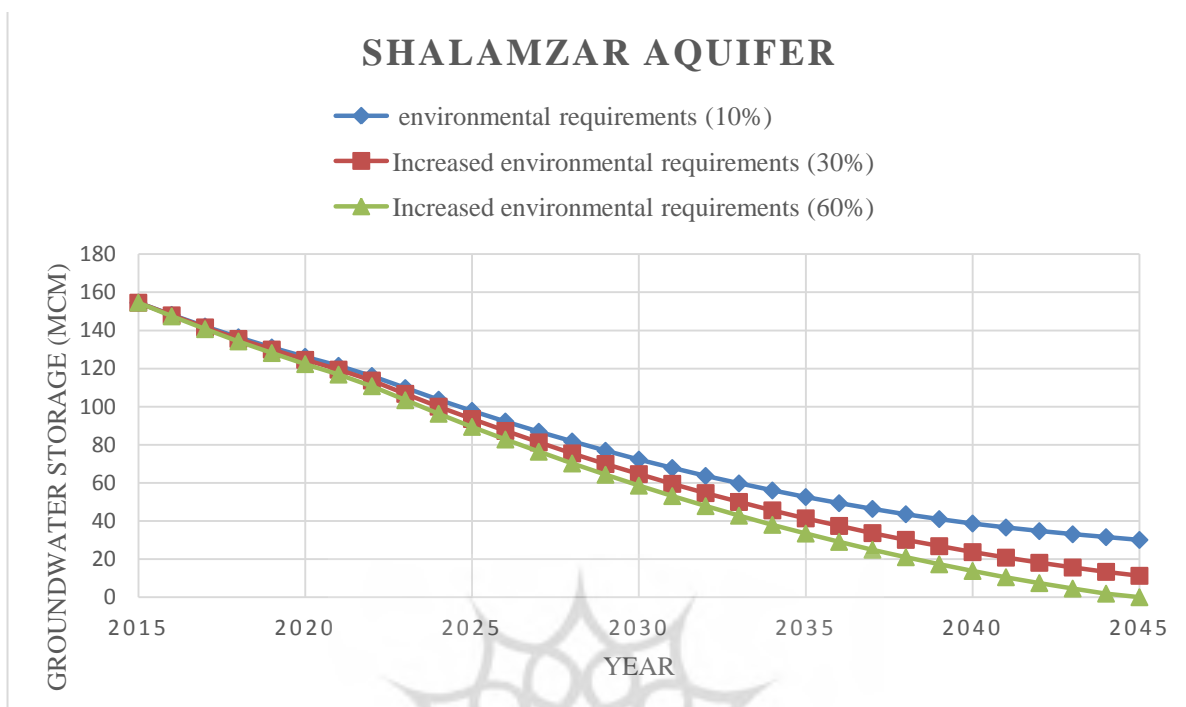


شکل ۵: پیش‌بینی روند کاهش حجم آبخوان محدوده مطالعاتی تحت راهبردهای ۱، ۲ و ۳ طی مدت ۳۰ سال تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

اول طرح انتقال آب، ۱۳۸۷) که در تمامی راهبردها به جز راهبرد حاضر حداقل نیاز زیست‌محیطی ۱۰۷ میلیون مترمکعب لحاظ شد. در این راهبرد نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست از ۱۰ درصد به ۳۰ درصد که در واقع حالت متوسط تأمین نیاز زیست‌محیطی رودخانه است، افزایش داده شد و سپس میزان آن به ۶۰ درصد که حفاظت زیست‌بوم رودخانه در شرایط عالی است، افزایش داده شد و نتایج با حالت حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه در شکل ۶ مقایسه گردید. در شرایط حفظ زیستگاه با کیفیت متوسط پس از گذشت ۳۰ سال در سال ۲۰۴۵ میزان کاهش حجم به دست می‌آید. در حالت حفظ زیستگاه با کیفیت عالی همان‌طور که در شکل ۶ مشخص شده است، آبخوان پس از طی ۳۰ سال تقریباً خشک خواهد شد.

همان‌گونه که در شکل ۵ مشخص است، در صورتی که آب با میزان حجم پیش‌بینی شده از رودخانه بهشت‌آباد منتقل شود و در طول ۳۰ سال نیز شرایط خشکسالی وجود داشته باشد، آبخوان شلمزار در سال ۲۰۲۷ یعنی ۱۲ سال پس از بهره‌برداری، خشک خواهد شد. در این حالت میزان کاهش حجم آبخوان شلمزار سالانه حدود ۱۳ میلیون مترمکعب خواهد بود.

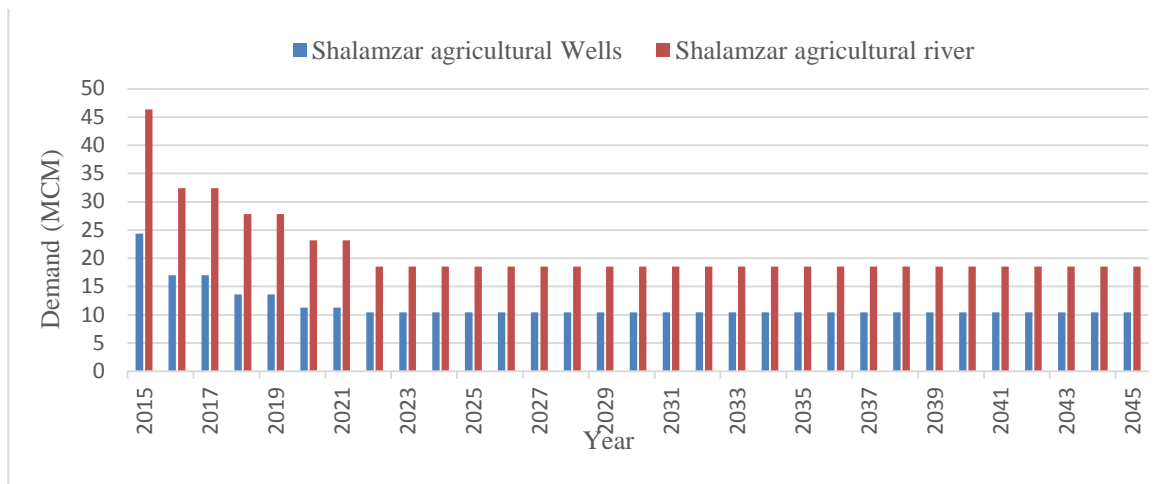
راهبرد ۴ افزایش نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست رودخانه بهشت‌آباد: در این راهبرد نیاز زیست‌محیطی پایین‌دست رودخانه بهشت‌آباد افزایش داده شد. در حالت کلی در این تحقیق نیاز زیست‌محیطی رودخانه برابر با حداقل میزان آن، یعنی حفظ زیستگاه رودخانه در بدترین شرایط و به میزان ۱۰ درصد میانگین درازمدت دبی پایه در نظر گرفته شد. دبی پایه رودخانه بهشت‌آباد بعد از اتصال رودخانه کوه‌رنگ به آن برابر با ۱۰۷۰ میلیون مترمکعب در سال است (وزارت نیرو، مطالعات مرحله



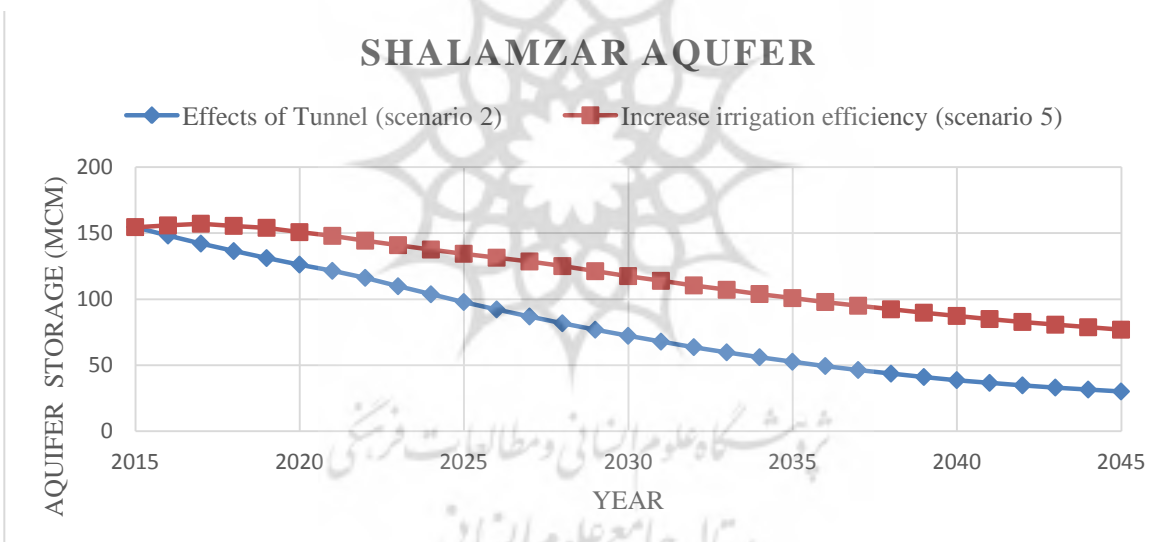
شکل ۶: روند کاهش حجم آبخوان با افزایش ۳۰ و ۶۰ درصد نیاز زیست محیطی و مقایسه با راهبرد کمترین نیاز زیست محیطی (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹)

افزایش راندمان در طی ۸ سال و هر دو سال یکبار صورت می‌گیرد (شکل ۷). با اعمال این راهبرد، میزان افت حجم آبخوان ۸۳/۸۳ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد که نسبت به راهبرد ۲ (راندمان ۳۰ درصد)، ۴۶/۸۷ میلیون مترمکعب کاهش نشان می‌دهد. افت سطح ایستابی نیز ۳۰ متر به دست می‌آید. در شکل ۸ روند کاهش حجم آبخوان شلمزار در راهبرد افزایش راندمان کشاورزی با راهبرد دوم مقایسه شده است. با اصلاح الگوی کشاورزی، نیاز آبی منطقه مبدأ انتقال از محل آب زیرزمینی در افق ۳۰ ساله به میزان ۱۲۵۸/۸۴ میلیون مترمکعب است که در راهبرد مرجع (سناریوی مرجع) این مقدار ۲۵۲۲/۷۸ میلیون مترمکعب است؛ بنابراین در بخش تأمین نیازها نیز اعمال این راهبرد اثرات مثبتی دارد.

راهبرد ۵ اصلاح مصرف کشاورزی در حوضه مبدأ انتقال (افزایش راندمان آب کشاورزی): در این راهبرد اصلاح مصرف آب کشاورزی (افزایش راندمان آب کشاورزی) حوضه مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. هدف از این راهبرد کاهش اتلاف آب در بخش کشاورزی از محل آب‌های زیرزمینی و سطحی و نیز نشان دادن تأثیرات روش‌های نوین در سیستم آبیاری به منظور کاهش اثرات منفی انتقال آب بر آبخوان محدوده مطالعاتی است. انتظار می‌رود که با کاهش سرانه مصرف کشاورزی، نیاز تأمین نشده بخش کشاورزی، شرب، صنعت به طور چشم‌گیری کاهش پیدا کند و اثر مثبتی بر روی روند کاهش حجم آبخوان بگذارد. راندمان کشاورزی در حوضه شلمزار در سال پایه (۲۰۱۵) برابر با ۳۰ درصد است که در این راهبرد ۶۵ درصد در نظر گرفته شده است.



شکل ۷: تقاضای آبی پیش‌بینی شده در راهبرد افزایش راندمان آب کشاورزی از محل آب‌های سطحی و زیرزمینی محدوده مورد مطالعه (تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵)



شکل ۸: مقایسه کاهش حجم آبخوان شلمزار در راهبرد افزایش راندمان کشاورزی با راهبرد ۲ تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

شد (جدول ۵). این میزان آب را می‌توان با احداث سدهای ذخیره‌ای به‌منظور ذخیره سیلاب و پخش آن تأمین کرد.

جدول ۵: حجم برآوردشده تغذیه آبخوان به‌منظور جلوگیری از افت سطح آن

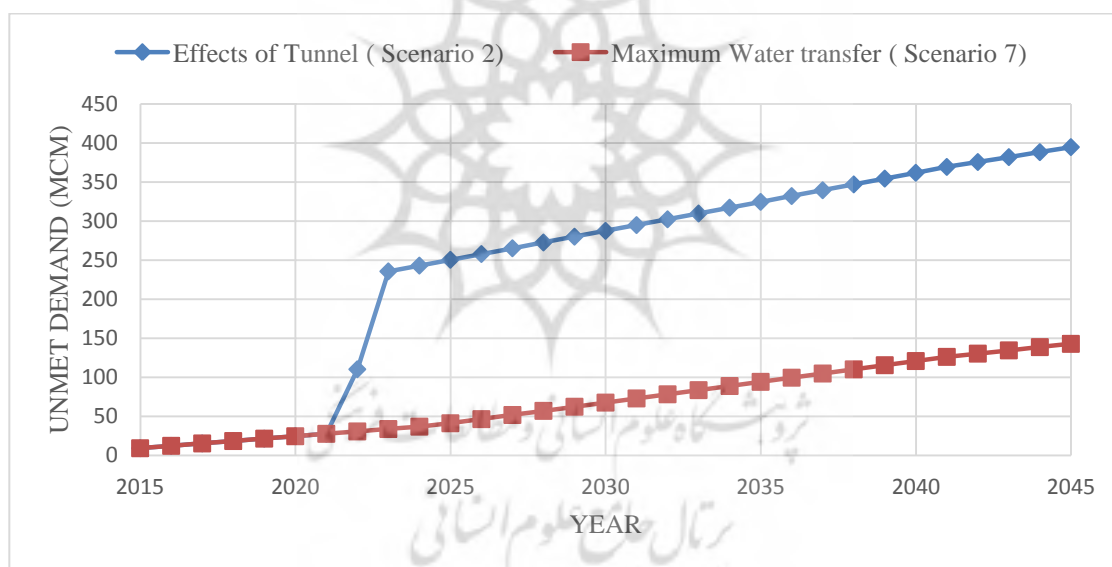
میزان حجم تغذیه مصنوعی (میلیون مترمکعب در سال)	نام آبخوان
۱۱	شلمزار

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۵

راهبرد ۶ برآورد میزان حجم سالانه تغذیه مصنوعی آبخوان مذکور به‌منظور جلوگیری از روند نزولی کاهش حجم آن در صورت انتقال آب با حداکثر ظرفیت آب: در این راهبرد میزان حجم سالانه تغذیه مصنوعی آبخوان مورد مطالعه، به‌منظور جلوگیری از روند نزولی کاهش حجم آن، انتقال آب با حداکثر ظرفیت (سالانه ۷۴۶ میلیون متر مکعب) در حالی برآورد شد که حجم تغذیه مصنوعی برابر با ۱۱ میلیون مترمکعب در سال برآورد

تأمین نشده در این محدوده خواهد شد؛ بنابراین این حجم آب انتقالی با توجه به ظرفیت تولید آب در منطقه مبدأ بیشتر از حجمی است که قابلیت انتقال دارد. در این راهبرد حداکثر آب قابل انتقال به حوضه مقصد در شرایط آبی نرمال و با حداقل نیاز زیست محیطی برابر با ۴۵۰ میلیون مترمکعب در سال برآورد شده است. در نتیجه با انتقال این مقدار آب، حجم ذخیره آبخوان در طی ۳۰ سال در حالت تعادل قرار خواهد گرفت. همچنین نیاز زیست محیطی رودخانه و انتقال آب تأمین خواهد شد و کمترین میزان عدم نیاز وجود خواهد داشت (شکل ۹).

راهبرد ۷ برآورد حداکثر میزان آب قابل انتقال در شرایط آبی نرمال و با در نظر گرفتن طرح های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ به منظور جلوگیری از افت سطح آبخوان: در این راهبرد حداکثر میزان آب قابل انتقال در شرایط آبی نرمال و با در نظر گرفتن طرح های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ برآورد شد. در مطالعات طرح انتقال آب، میزان آب قابل انتقال سالانه به طور متوسط ۷۴۶ میلیون مترمکعب در نظر گرفته شد. همان طور که در راهبردهای قبل ملاحظه شد، این میزان آب انتقالی باعث کاهش سطح ایستابی آبخوان منطقه مبدأ انتقال شده و همچنین در آینده باعث افزایش نیاز



شکل ۹: نمودار مقایسه نیازهای تأمین نشده راهبرد ۷ با راهبرد ۲

تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

رودخانه افزایش داده شده است و با توجه به افزایش نیاز زیست محیطی، حداکثر آب قابل انتقال برآورد شد. در راهبرد ۷ حداکثر آب قابل انتقال در حالت کمترین نیاز زیست محیطی رودخانه برآورد شد. در این راهبرد نیاز زیست محیطی به دو حالت نیاز زیست محیطی رودخانه برای حفظ زیست گاه با کیفیت متوسط، یعنی ۳۲۱ میلیون مترمکعب در سال و حالت دوم افزایش نیاز

راهبرد ۸ برآورد حداکثر میزان آب قابل انتقال با در نظر گرفتن افزایش نیاز زیست محیطی رودخانه و طرح های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ در شرایط آبی نرمال: در این راهبرد حداکثر میزان آب قابل انتقال با در نظر گرفتن افزایش نیاز زیست محیطی رودخانه و طرح های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ در شرایط آبی نرمال به دست آمد. برای این کار میزان نیاز زیست محیطی

میلیون مترمکعب درسال برآورد شد. در این حالت حجم آبخوان مورد مطالعه مانند سال پایه (۲۰۱۵) در حالت پایدار باقی می ماند (جدول ۶).

زیست محیطی برای حفظ زیستگاه با کیفیت عالی، یعنی ۶۰ درصد دبی رودخانه بهشت آباد برابر با ۶۴۲ میلیون مترمکعب در سال در نظر گرفته شد که به ترتیب حداکثر میزان آب قابل انتقال ۴۰۰ و ۳۵۵

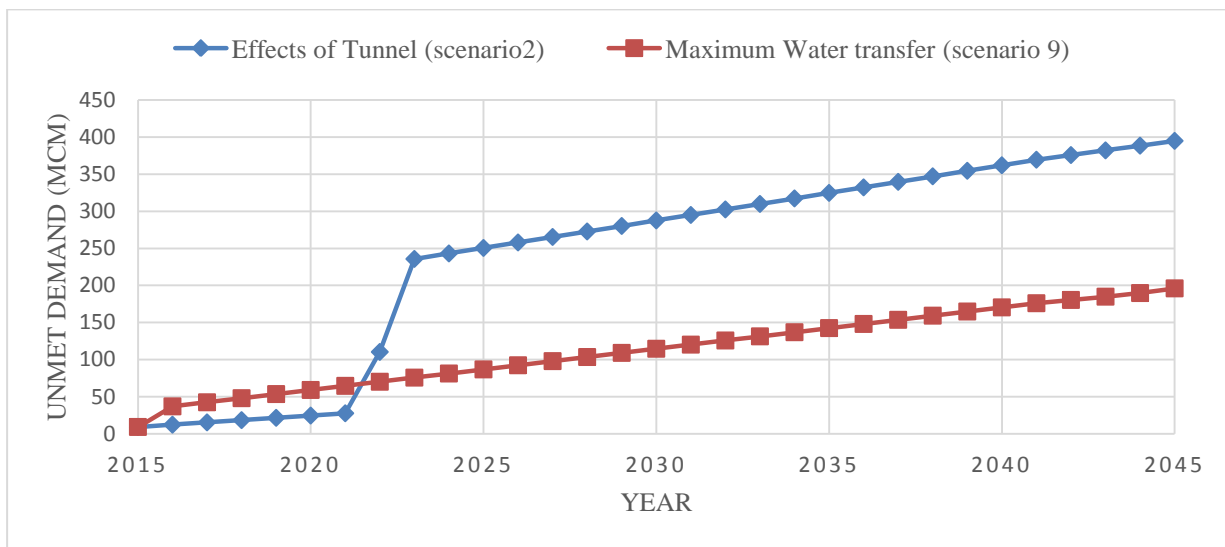
جدول ۶: برآورد حداکثر آب قابل انتقال با در نظر گرفتن افزایش نیاز زیست محیطی رودخانه

میزان افزایش نیاز زیست محیطی	حداکثر آب قابل انتقال
۳۰ درصد دبی بلندمدت رودخانه بهشت آباد	۴۰۰ میلیون مترمکعب در سال
۶۰ درصد دبی بلندمدت رودخانه بهشت آباد	۳۵۵ میلیون مترمکعب در سال

مأخذ: نگارندگان، ۱۳۹۵

شرایط نرمال حدود ۳۷ درصد کاهش نشان می دهد. در این حالت به منظور تأمین نیاز زیست محیطی پایین دست رودخانه، تأمین نیاز کامل بخش انتقال آب و همچنین برای اینکه در بقیه بخش ها کمترین عدم تأمین نیاز را داشته باشیم، سالانه می توان تنها حدود ۱۶۰ میلیون مترمکعب آب را به حوضه مقصد منتقل کرد که این میزان در مطالعات طرح دیده نشده و در همه حالات میزان آب قابل انتقال ۷۴۶ میلیون متر مکعب درسال به صورت متوسط پیش بینی شده است. در شکل ۱۰ تأمین نیاز بخش های مختلف در این راهبرد با راهبرد ۲ مقایسه شده است.

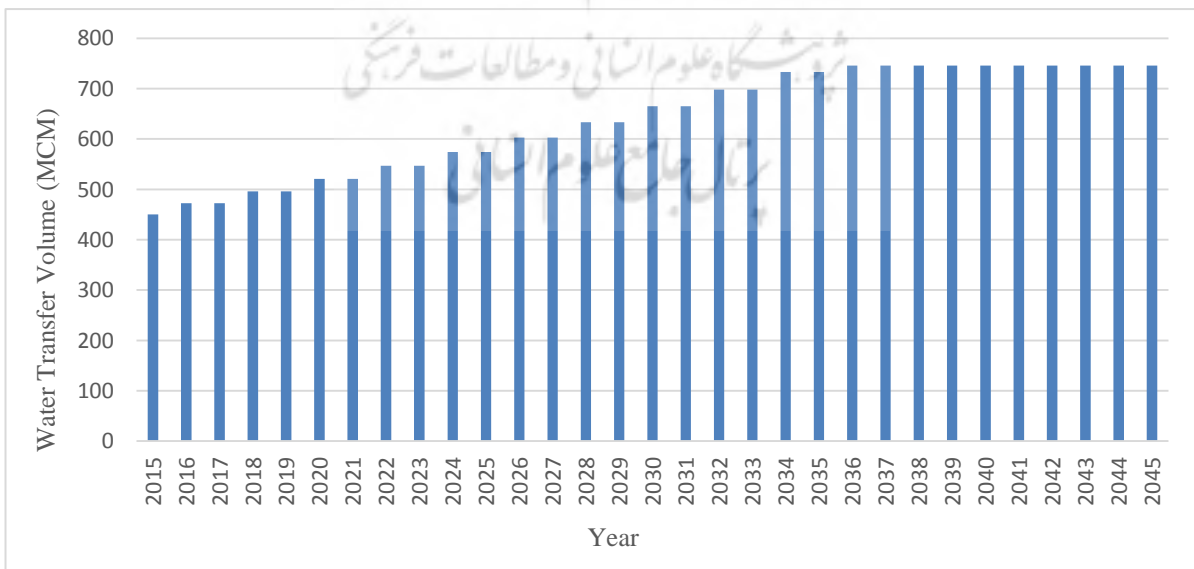
راهبرد ۹ برآورد حداکثر میزان حجم آب قابل انتقال در شرایط خشکسالی و با در نظر گرفتن طرح های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ به منظور جلوگیری از افت سطح آبخوان: این راهبرد شامل برآورد حداکثر میزان حجم آب قابل انتقال در شرایط خشکسالی و با در نظر گرفتن طرح های توسعه منابع آب در حوضه مبدأ انتقال است که باعث افت سطح آبخوان شلمزار در مدت ۳۰ سال نشود. این راهبرد در واقع راهبرد ۷ است، با این تفاوت که در طول افق زمانی ۳۰ سال شرایط خشکسالی بر حوضه مبدأ انتقال آب حاکم باشد. همان طور که در راهبرد ۳ نیز گفته شد، در حالت خشکسالی در محدوده شلمزار میزان بارش نسبت به



شکل ۱۰: مقایسه نیازهای تأمین نشده راهبرد ۹ با راهبرد ۲
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

منظور، از مقدار بهینه انتقال آب در راهبرد ۷ (۴۵۰) میلیون مترمکعب در سال) تا مقدار پیش‌بینی شده در مطالعات طرح (۷۴۶ میلیون مترمکعب در سال) هر دو سال به میزان ۵ درصد به حجم آب انتقالی افزوده می‌شود (شکل ۱۱).

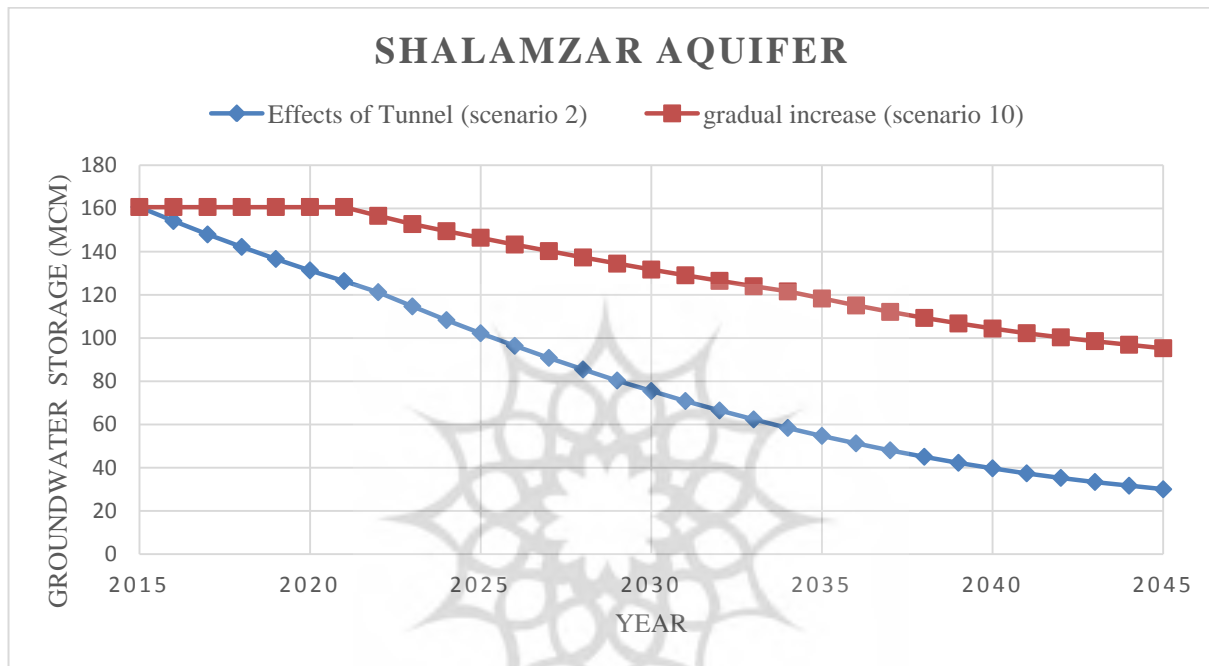
راهبرد ۱۰ افزایش تدریجی آب قابل انتقال در طی چند سال از میزان حداکثر برآورد شده در راهبرد هفتم تا میزانی تعیین شده در مطالعات اولیه طرح: هدف از این راهبرد افزایش تدریجی آب قابل انتقال در طی چند سال است تا به حوضه اجازه داده شود تنش‌های ناشی از انتقال آب را جبران کند؛ برای این



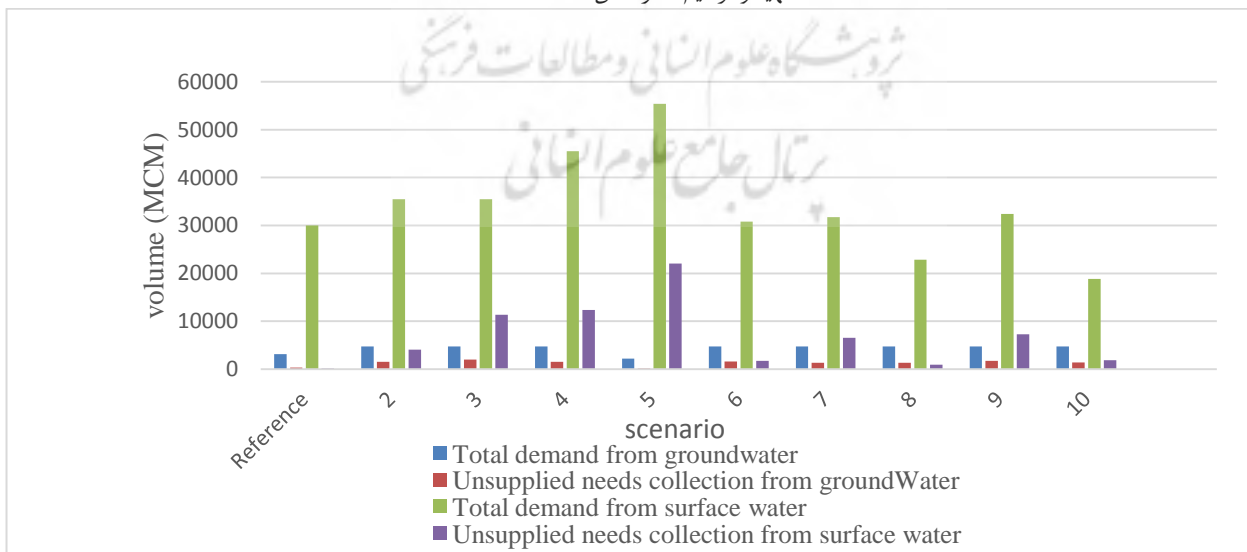
شکل ۱۱: افزایش تدریجی میزان آب قابل انتقال از مقدار بهینه محاسباتی تا میزان پیش‌بینی شده در مطالعات طرح
تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

در شکل ۱۲ روند تغییرات حجم آبخوان شلمزار تحت این راهبرد نشان داده شده است که تا سال ۲۰۲۱ بدون افت سطح پیش‌بینی می‌شود. از سال ۲۰۲۲ به بعد، روند کاهش حجم شروع شده و برابر با ۶۵/۴

میلیون مترمکعب در پایان افق ۳۰ ساله است. در نهایت در شکل ۱۳ کل تقاضای آبی و عدم تأمین نیازها در بخش‌های مختلف حوضه نشان داده شده است.



شکل ۱۲: مقایسه روند کاهش حجم آبخوان شلمزار راهبرد ۱۰ با راهبرد ۲ تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵



شکل ۱۳: تقاضای آبی و عدم تأمین نیاز بخش‌های مختلف حوضه مبدأ از محل آب‌های سطحی و زیرزمینی در طول ۳۰ سال تهیه و ترسیم: نگارندگان، ۱۳۹۵

نتیجه

در سناریوی مرجع، حدود ۵۷/۴ درصد حجم آبخوان در اثر انتقال آب کاهش می‌یابد. تحت اعمال راهبرد ۲ حدود ۸۱/۳ درصد حجم آبخوان کاهش خواهد یافت. اگر در طول افق زمانی ۳۰ ساله حوضه مبدأ انتقال از نظر شرایط هیدرولوژیکی در وضعیت خشکسالی قرار داشته باشد، با انتقال آب به میزان پیش‌بینی شده، ۱۲ سال پس از بهره‌برداری از طرح، آبخوان خشک خواهد شد. با افزایش نیاز زیست‌محیطی به منظور حفظ زیستگاه با کیفیت متوسط، میزان کاهش حجم آبخوان پس از گذشت ۳۰ سال نسبت به حالت حداقل نیاز زیست‌محیطی، ۱۹ میلیون مترمکعب افزایش نشان می‌دهد. با افزایش نیاز زیست‌محیطی برای حفظ زیستگاه در شرایط عالی، با انتقال آب به میزان ۷۴۶ میلیون مترمکعب، پیش‌بینی می‌شود آبخوان مطالعاتی پس از گذشت ۳۰ سال خشک شود. با افزایش راندمان آب کشاورزی از ۳۰ به ۶۵ درصد، حدود ۵۰ درصد تقاضای آبی از محل آب زیرزمینی محدوده مطالعاتی کاهش پیدا می‌کند. با توجه به نتایج، اصلاح الگوی مصرف کشاورزی می‌تواند به عنوان راه‌کاری برای مقابله با اثرات انتقال آب بر حجم آبخوان انتخاب شود، اما از لحاظ تأمین نیاز تقاضاهای آبی در بخش‌های مختلف کارآمدتر بوده و عدم تأمین نیاز طرح‌های توسعه منابع آب کمتر از راهبرد ۲ است. برای تأمین افت حجم آبخوان، حجم تغذیه مصنوعی سالانه ۱۱ میلیون مترمکعب برآورد شد. حداکثر آب قابل انتقال براساس حداقل نیاز زیست‌محیطی بدون افت حجم آبخوان، برابر با ۴۵۰ میلیون مترمکعب در

سال برآورد شده است که با میزان محاسبه شده در مطالعات طرح، اختلاف زیادی دارد. در راهبرد ۸، در صورت افزایش نیاز زیست‌محیطی به میزان ۳۰ و ۶۰ درصد دبی بلندمدت رودخانه، حداکثر آب قابل انتقال به ترتیب ۳۵۵ و ۴۰۰ میلیون مترمکعب در سال پیش‌بینی می‌شود. در شرایط خشکسالی در محدوده مطالعاتی، برای جلوگیری از افت حجم آبخوان، تأمین حداقل نیاز زیست‌محیطی رودخانه و انتقال آب و نیز کمترین عدم تأمین نیاز در سایر بخش‌ها، حجم آب قابل انتقال حدود ۱۶۰ میلیون مترمکعب در سال برآورد شد. با اعمال سیاست افزایش تدریجی آب قابل انتقال، روند کاهش حجم آبخوان نسبت به راهبرد دوم، حدود ۵۰ درصد بهبود یافته و اعمال این سناریو تا حدودی کارآمد به نظر می‌رسد. با توجه به نتایج مدل‌سازی، در صورت عدم انتقال آب از حوضه و توسعه طرح‌های منابع آب، حجم آبخوان تا سال ۲۰۲۲ ثابت باقی خواهد ماند و بعد از آن سالانه حدود ۲/۲۵ میلیون مترمکعب کاهش نشان می‌دهد که در پایان افق ۳۰ ساله میزان کاهش حجم آن ۲۹/۹ میلیون مترمکعب و میزان افت سطح ایستابی آن ۹/۶ متر پیش‌بینی می‌شود. نتایج مدل حاکی از آن است که میزان کاهش حجم آبخوان مطالعاتی در شرایط انتقال آب از حوضه و در صورت اجرای طرح‌های توسعه منابع آب در طول مدت ۳۰ سال حدود ۵ برابر خواهد بود.

منابع

- Gupta, J., & van der Zaag, P. (2008). Interbasin water transfers and integrated water resources management: Where engineering, science and politics interlock. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 33(1-2), 28-40.
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474706507000666>
- Karamouz, M., Mojahedi, S. A., & Ahmadi, A. (2010). Interbasin Water Transfer: Economic Water Quality-Based Model. *Journal of Irrigation&Drainage Engineering*, 136(2), 90-98.
<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0000140>
- Madani, K. (2014). Water management in Iran: what is causing the looming crisis? *Journal of Environmental Studies&Sciences*, 4(4), 315-328.
<https://doi.org/10.1007/s13412-014-0182-z>
- Mehta, V. K., Aslam, O., Dale, L., Miller, N., & Purkey, D. R. (2013). Scenario-based water resources planning for utilities in the Lake Victoria region. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 61, 22-31.
<https://doi.org/10.1016/j.pce.2013.02.007>
- Rogers, S., Chen, D., Jiang, H., Rutherford, I., Wang, M., Webber, M., . . . Zhang, W. (2020). An integrated assessment of China's South—North Water Transfer Project. *Geographical Research*, 58(1), 49-63.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/1745-5871.12361>
- Shao, X., Wang, H., & Wang, Z. (2003). Interbasin transfer projects and their implications: A China case study. *International Journal of River Basin Management*, 1(1), 5-14.
<https://doi.org/10.1080/15715124.2003.9635187>
- Sieber, J., & Purkey, D. (2007). *Water evaluation and planning system user guide for weap21*. Stockholm Environment Institute, US Center.
<http://www.weap21.org/>
- Wei, S., Yang, H., Abbaspour, K., Mousavi, J., & Gnauck, A. (2010). Game theory based models to analyze water conflicts in the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project in China. *Water Research*, 44(8), 2499-2516.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.01.021>
- Abrishamchi, A., & Tajrishi, M. (2005). Interbasin water transfer in Iran. Paper presented at the Water conservation, reuse, and recycling: proceeding of an Iranian American workshop.
https://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=Erohqf3RuzkC&oi=fnd&pg=PA252&ots=SLDLMEScaS&sig=E_xti5XP-TVj-STtcsMRQ9zPgvA#v=onepage&q&f=false
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. Fao, Rome, 300(9), D05109.
<http://www.fao.org/3/X0490E/X0490E00.htm>
- Ballestero, E. (2004). Inter-Basin Water Transfer Public Agreements: A Decision Approach to Quantity & Price. *Water resources management*, 18(1), 75-88.
<https://doi.org/10.1023/B:WARM.0000015390.39862.b9>
- Bonacci, O., & Andrić, I. (2010). Impact of an inter-basin water transfer and reservoir operation on a karst open streamflow hydrological regime: an example from the Dinaric karst (Croatia). *Hydrological processes*, 24(26), 3852-3863.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/hyp.7817>
- Davies, B. R., Thoms, M., & Meador, M. (1992). An assessment of the ecological impacts of inter-basin water transfers, and their threats to river basin integrity and conservation. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2(4), 325-349.
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aqc.3270020404>
- De Carvalho, R. C., & Magrini, A. (2006). Conflicts over water resource management in Brazil: a case study of inter-basin transfers. *Water resources management*, 20(2), 193-213.
<https://doi.org/10.1007/s11269-006-7377-3>
- Feng, S., Li, L. X., Duan, Z. G., & Zhang, J. L. (2007). Assessing the impacts of South-to-North Water Transfer Project with decision support systems. *Decision Support Systems*, 42(4), 1989-2003.
<https://doi.org/10.1016/j.dss.2004.11.004>

- Xu, W., & Chen, C. (2020). Optimization of Operation Strategies for an Interbasin Water Diversion System Using an Aggregation Model and Improved NSGA-II Algorithm. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 146(5), 04020006.
<https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29IR.1943-4774.0001462>
- Yang, H., & Zehnder, A. J. B. (2005). The South-North Water Transfer Project in China. *Water International*, 30(3), 339-349.
<https://doi.org/10.1080/02508060508691874>
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. *Water International*, 30(4), 487-500.
<https://doi.org/10.1080/02508060508691893>
- Yevjevich, V. (2001). Water Diversions and Interbasin Transfers. *Water International*, 26(3), 342-348.
<https://doi.org/10.1080/02508060108686926>
- شرکت مدیریت منابع آب ایران، مطالعات بهمگام‌سازی تلفیق مطالعات منابع آب حوضه آبریز کارون بزرگ (۱۳۹۰). *بیان آب محدوده مطالعاتی شلمزار*، جلد ۳.
- مرکز تحقیقات منابع آب استان چهارمحال و بختیاری وابسته به دانشگاه شهرکرد، ۱۳۹۰.
<https://sku.ac.ir/Page/54/>
- وزارت نیرو، مطالعات مرحله اول طرح انتقال آب به فلات مرکزی ایران (۱۳۸۷). *جلد ۳۶ (گزارش‌های تونل انتقال آب)*.





پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی