

## مهار تنش‌های آبی حوضه‌های آبریز کشور با مکان‌یابی مناسب صنایع بزرگ با توجه به تغییر اقلیم

محمدعلی زنگی‌آبادی<sup>۱</sup>، مجید علومی بایگی<sup>۲\*</sup>، کامران داوری<sup>۳</sup>، محمدحسین جاویدی دشت‌بیاض<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
<sup>۲</sup> استاد گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
<sup>۳</sup> استاد گروه مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد  
<sup>۴</sup> استاد گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

دریافت: ۱۴۰۰/۸/۲، بازنگری: ۱۴۰۰/۹/۱۲، پذیرش: ۱۴۰۰/۹/۲۳، نشر آنلاین: ۱۴۰۰/۹/۲۳

### چکیده

بررسی الگوهای تغییر اقلیم برای کشور ایران نشان‌دهنده کاهش میزان بارش و افزایش دما در اغلب حوضه‌های آبریز کشور است که منجر به افزایش شاخص‌های پایش تنش آبی در بلندمدت می‌گردد. علاوه بر تغییر اقلیم، برداشت قابل توجه آب در صنایع پرمصرفی نظیر صنعت فولاد باعث تشدید وضعیت تنش آبی در حوضه‌های آبریز مربوطه می‌شود. در این مقاله، یک مدل برای مهار تنش‌های آبی حوضه‌های آبریز کشور به‌وسیله مکان‌یابی مناسب صنایع بزرگی که دولت قصد احداث آن‌ها را دارد، ارائه می‌گردد. مدل پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده که نتایج حاصله نسبت به سناریوهای تغییر اقلیم مقاوم باشند. در بخش آب، پیش‌بینی حجم آب تجدیدپذیر از طریق تخمین میزان بارش و دما به‌وسیله زیرمقیاس‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم برای حوضه‌های مختلف آبریز با گام جغرافیایی کوچک و تخمین تباخیر واقعی از رابطه تک‌پارامتری Fu، انجام می‌شود. تأثیر ظرفیت و مکان توسعه صنایع بزرگ بر تنش‌های آبی با استفاده از شاخص تنش آبی SDG 6.4.2، که به‌عنوان نمایه توسعه پایدار منابع آب معرفی شده است، مدل می‌شود. برنامه‌ریزی بلندمدت برای تعیین ظرفیت و مکان صنایع بزرگ توسط یک بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف کمینه نمودن تنش‌های آبی و هزینه‌های توسعه صنایع بزرگ مدل می‌گردد. درنهایت، مدل پیشنهادی برای مهار تنش‌های آبی حوضه‌های آبریز کشور ایران با در نظر گرفتن پنج صنعت پرمصرف و سه سناریوی تغییر اقلیم استفاده شده است.

**کلیدواژه‌ها:** تغییر اقلیم، تنش‌های آبی، آب تجدیدپذیر، هم‌بست آب و صنعت، Bodyko-type.

### ۱- مقدمه

شامل حجم بارش، رواناب سطحی و میزان تباخیر واقعی، وضعیت پایداری منابع آب ایران با توجه به منحنی‌های Bodyko بررسی شده است. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که در تعدادی از زیرحوضه‌های آبریز کشور، برداشت آب زیرسطحی به حدی است که شرایط بهره‌برداری ناپایدار را برای منابع آب ایجاد کرده است. در (IRERC، ۲۰۱۷) وضعیت جوی کشور ایران با استفاده از ۱۶ مدل تغییر اقلیم، طی سه سناریوی بدبینانه، عادی و خوش‌بینانه برای سال ۲۰۳۰ پیش‌بینی شده است. نتایج ارائه‌شده در این مطالعه نشان می‌دهد که میانگین، کمینه و بیشینه دما در سه سناریوی تغییر اقلیم تحت مطالعه، در کلیه استان‌های کشور نسبت به مقادیر پایه افزایش پیدا می‌کند. همچنین در این مطالعه

اقلیم کره زمین در حال تغییر است. مهم‌ترین شاخصه‌های تغییر اقلیم، گرمایش زمین و تغییر الگوهای بارش در نقاط مختلف کره زمین می‌باشند. بروز این عوامل در یک محل، کاهش دسترسی به منابع آب را در بلندمدت به دنبال دارد. پژوهش‌های بلندمدت پیش‌بینی می‌کنند که ۴۲٪ جمعیت جهان در سال ۲۰۵۰ در حوضه‌های آبریز در معرض خطر سکونت دارند (Arnell و همکاران، ۲۰۱۱). در این پژوهش‌ها، حوضه‌های آبریز با جریان سطحی سالانه سرانه کم‌تر از  $1000 m^3$  به‌عنوان حوضه‌های آبریز در معرض خطر تعیین شده‌اند. در (Panahi و همکاران، ۲۰۲۰) با استفاده از داده‌های هیدرولوژی ۳۰ سال اخیر

\* نویسنده مسئول؛ شماره تماس: ۰۵۱-۳۸۸۰۵۰۵۲

در این مقاله، با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در کشورهای مورد مطالعه، وابستگی قابل توجه بخش آب به بخش انرژی نشان داده شده و بر لزوم در نظر گرفتن این تأثیر در سیاست‌گذاری بخش‌های آب و انرژی تأکید شده است.

Zarei (۲۰۲۰) به بررسی همبست بین آب، انرژی و غذا برای کشورهای ایران، عراق و ترکیه از طریق شاخص ارائه شده توسط FAO<sup>۴</sup> پرداخته شده است. در این مطالعه، بر لزوم مورد توجه قرار دادن همبست بین بخش‌های مختلف در سیاست‌گذاری‌ها و عقد قراردادهای دوجانبه بین کشورها تأکید شده است. نکته حائز اهمیت در این مطالعات، استفاده از مفهوم همبست برای مدل‌سازی تأثیر متقابل بخش‌های آب و انرژی است.

در نظر گرفتن همبست بین بخش‌های آب و صنعت، منجر به جامعیت مدل و در نتیجه پایداری بلندمدت منابع می‌شود. برداشت آب توسط صنایع بزرگ در کشورهای در حال توسعه، یکی از مهم‌ترین بخش‌های قابل بررسی در این زمینه است. به‌عنوان مثال، صنعت بتن و سیمان در سال ۲۰۱۲ میزان ۹٪ آب برداشت شده صنعتی جهان را به خود اختصاص داده که معادل ۱/۷٪ آب برداشت شده کل کره زمین است (Miller و همکاران، ۲۰۱۸). از سوی دیگر، کاهش دسترسی به منابع آب باعث محدود شدن ظرفیت تولیدی صنایع خواهد شد. از این رو، به منظور حفظ پایداری بخش‌های آب و صنعت در مقیاس کشوری، بایستی علاوه بر بررسی تأثیر تغییر اقلیم، همبست میان این بخش‌ها در برنامه‌ریزی‌های توسعه بلندمدت مدنظر قرار گیرند.

توسعه بلندمدت صنایع به صورت یک مسئله جایابی تسهیلات با ظرفیت معین<sup>۵</sup> مدل‌سازی می‌شود. با حل مسئله CMWP، محل و ظرفیت تسهیلات جدید با هدف کمینه‌سازی هزینه کل تعیین می‌شود (Lara و همکاران، ۲۰۱۸).

Daneshzand و Shoele (۲۰۰۹) رویکردهای مختلف مدل‌سازی مسئله CMWP ارائه شده است. در (رنجبر و حکیم‌پور، ۱۳۹۶) جایابی بانک‌ها در کلان‌شهر تبریز توسط مسئله CMWP مدل و با استفاده از روش‌های ابتکاری مختلف حل شده است. Yao و Murray (۲۰۲۰) مسئله CMWP با استفاده از دو روش بهینه‌سازی کلاسیک ریاضی و بهینه‌سازی فضایی<sup>۶</sup> حل و کارایی روش‌ها با یکدیگر مقایسه شده است. مراجع (Aras و همکاران، ۲۰۰۷؛ Akyüz، ۲۰۱۷) با مدل‌سازی و حل مسئله CMWP با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری مختلف، به مقایسه کارایی این روش‌های بهینه‌سازی پرداخته‌اند.

در این مقاله، یک مدل برای مهار تنش‌های آبی به وسیله مکان‌یابی صنایع بزرگ با در نظر گرفتن تغییر اقلیم ارائه می‌گردد.

پیش‌بینی شده است که میزان بارندگی کشور ۹/۰۶٪ در سناریوی بدبینانه کاهش پیدا می‌کند. بنابر نتایج این مطالعه با توجه به کاهش حجم بارش و افزایش تبخیر، حجم آب تجدیدپذیر قابل برنامه‌ریزی کشور در بلندمدت کاهش پیدا می‌کند.

Jiang و همکاران (۲۰۱۵) تأثیر تغییر اقلیم و سایر فعالیت‌های انسانی بر پارامترهای مورد استفاده در روابط تک‌پارامتری Budyko-type بررسی شده است. Van Vliet و همکاران (۲۰۱۶) توسط پنج مدل از دسته مدل‌های GCM<sup>۱</sup> و دو سناریو از سناریوهای تغییر اقلیم RCP<sup>۲</sup>، پیش‌بینی شده است که میزان جریان سطحی آب در ۲۵٪ مساحت زمین شامل بخش شمالی آمریکای شمالی، آسیا و مناطق گرمسیری کره زمین در دهه ۲۰۵۰ افزایش می‌یابد. این مطالعه، کاهش در میزان جریان سطحی آب در بخش‌هایی از ایالات متحده آمریکا، جنوب و مرکز اروپا، جنوب شرقی آسیا، و بخش جنوبی آفریقای جنوبی که دربرگیرنده ۸٪ سطح زمین هستند، را نشان می‌دهد. کاهش دسترسی به منابع آب، بر بخش‌های مختلف یک کشور تأثیر می‌گذارد. یکی از بخش‌هایی که در مطالعات بسیاری مورد توجه قرار گرفته است، بخش انرژی است. به دلیل مصرف قابل توجه آب در نیروگاه‌های حرارتی و وابستگی بازده عملکردی آن‌ها به دما، کاهش دسترسی به منابع آب و افزایش دما ناشی از تغییر اقلیم منجر به کاهش ظرفیت عملی نیروگاه‌ها می‌شود.

Van Vliet و همکاران (۲۰۱۶) کاهش ۵/۳ الی ۱۹ درصدی برای ظرفیت قابل تأمین واحدهای حرارتی کل دنیا پیش‌بینی شده است. در مطالعه صورت گرفته برای کشور آمریکا، تغییر اقلیم علت کاهش ۴/۲ درصدی توان قابل استحصال واحدهای حرارتی این کشور گزارش شده است (Miara و همکاران، ۲۰۱۷).

Liu و همکاران (۲۰۱۹) تأثیر قیود آبی بر صنعت برق آمریکا، علت افزایش قیمت برق و کاهش استفاده از فناوری‌های پرمصرف بیان شده است. از سوی دیگر تولید برق توسط نیروگاه‌های حرارتی نیاز به برداشت میزان قابل توجهی آب شیرین دارد.

Pan و همکاران (۲۰۱۸) برداشت حجم آب بیش از ۲۰۰ m<sup>۳</sup> به‌ازای تولید هر مگاوات ساعت انرژی الکتریسیته برای واحدهای حرارتی گزارش شده است. مدل‌سازی و بررسی این تأثیر متقابل توسط رویکردهای مختلفی صورت گرفته است. استفاده از مفهوم همبست<sup>۳</sup> به منظور مدل‌سازی یکپارچه بخش‌های آب و انرژی با توجه به اهداف توسعه پایدار بیش از دیگر رویکردها مورد اقبال قرار گرفته است.

Siddiqi و Anadon (۲۰۱۱) با استفاده از رویکرد کمی به بررسی همبست بخش‌های آب و انرژی در خاورمیانه پرداخته است.

4. Food and Agriculture Organization  
5. Capacitated Multi-facility Weber Problem (CMWP)  
6. Spatial optimization method

1. General circulation models  
2. Representative concentration pathways  
3. Nexus

• پایش تنش‌های آبی از طریق شاخص SDG 6.4.2، که به-عنوان نمایه توسعه پایدار منابع آب معرفی شده است (Dickens و همکاران، ۲۰۱۹)، صورت می‌پذیرد. این شاخص برای هر حوضه آبریز در سال مورد مطالعه، با توجه به مکان و ظرفیت توسعه صنایع بزرگ در آن حوضه و تغییر اقلیم کمینه می‌شود. مزیت استفاده از این شاخص، تأثیرپذیری مستقیم از تغییر در میزان برداشت آب به‌واسطه توسعه صنایع بزرگ و تغییر در میزان دسترسی به منابع آب به‌واسطه تغییر اقلیم است.

• تأثیر تغییر اقلیم بر حجم آب تجدیدپذیر کشور توسط سه سناریوی B1، A1B و A2 از سناریوهای تغییر اقلیم IPCC لحاظ می‌شود. تغییر اقلیم در افق زمانی بلندمدت از طریق تغییر الگوهای بارش و دمای حوضه‌های آبریز بر دسترسی به منابع آب تأثیر می‌گذارد. این تغییرات منجر به تغییر حجم آب تجدیدپذیر شده و وضعیت تنش آبی حوضه‌های آبریز را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در این راستا، ابتدا با زیرمقیاس‌سازی سناریوهای تغییر اقلیم برای هر حوضه آبریز با گام جغرافیایی کوتاه، متغیرهای هواشناسی مورد نیاز شامل میزان بارش، کمینه، میانگین و بیشینه دمای ماهیانه و تابش فرا اتمسفری هر یک از نقاط انتخابی حوضه‌های آبریز در هر سناریوی تغییر اقلیم استخراج می‌گردند. سپس با استفاده از رابطه تک‌پارامتری fu از دسته رویکردهای Budyko-type، میزان تبخیر واقعی محاسبه می‌شود. در نهایت با توجه به میزان بارش استخراج شده و میزان تبخیر واقعی، حجم آب تجدیدپذیر محاسبه می‌شود. محاسبه پارامتر رابطه fu نیز از طریق اطلاعات تاریخی بارش و تبخیر حوضه‌های آبریز گزارش شده در بیان‌های بلندمدت آب کشور صورت می‌گیرد. شایان ذکر است که پیش‌بینی جمعیت هر حوضه آبریز نیز به‌منظور تأمین نیروی انسانی توسعه صنایع بزرگ نیز از متغیرهای قابل استخراج از سناریوهای تغییر اقلیم است.

• مسئله برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه صنایع بزرگ به‌صورت یک مسئله بهینه‌سازی دو هدفه ایستا مدل‌سازی می‌شود. اهداف این مسئله کمینه نمودن شاخص تنش آبی حوضه‌های آبریز و هزینه‌های توسعه صنایع بزرگ است. متغیرهای تصمیم این مسئله ظرفیت توسعه تولید صنایع و مکان احداث آن‌ها در پهنه کشور می‌باشد. در چارچوب پیشنهادی این مقاله، هزینه‌های زمین، تجهیزات، نصب و بهره‌برداری در مکان‌های مختلف یکسان فرض می‌شود. لذا این هزینه‌ها در مسئله بهینه‌سازی توسعه بلندمدت صنایع بزرگ در نظر گرفته نشده و فقط هزینه انتقال مواد اولیه و محصولات برای تعیین مکان و ظرفیت صنایع منظور می‌شود. در این مقاله فرض شده است که ظرفیت قابل

شاخص تنش آبی SDG 6.4.2، با توجه به توسعه صنایع اصلاح و برای مدل‌سازی تنش‌های آبی در هر حوضه آبریز استفاده می‌شود. دسترسی به منابع آب که به‌طور مستقیم تحت تأثیر تغییر اقلیم می‌باشد، به‌وسیله حجم آب منابع تجدیدپذیر در این شاخص لحاظ شده است. در این مقاله به‌منظور بررسی تأثیر تغییر اقلیم بر حجم آب تجدیدپذیر کشور، سه سناریو از سناریوهای تغییر اقلیم IPCC<sup>۱</sup> انتخاب شده و پس از زیرمقیاس‌سازی این سناریوها برای حوضه‌های آبریز، داده‌های هواشناسی مورد نیاز برای محاسبه حجم آب تجدیدپذیر هر یک از حوضه‌های آبریز استخراج می‌شود. در این راستا، میزان تبخیر با استفاده از رویکرد Budyko-type تک‌پارامتری محاسبه می‌گردد. توسعه صنایع بزرگ کشور با استفاده از رویکرد CMWP در قالب یک مسئله برنامه‌ریزی بلندمدت چند هدفه، با اهداف کمینه نمودن تنش‌های آبی و هزینه‌های حمل‌ونقل مواد اولیه و محصولات صنایع بزرگ مدل می‌شود. خروجی این برنامه‌ریزی، ظرفیت بهینه تولید هر صنعت و مکان احداث آن در پهنه کشور می‌باشد. نتایج حاصله، میزان رشد آب برداشت‌شده در هر حوضه آبریز به‌واسطه توسعه صنایع را تعیین می‌کند.

در بخش ۲، مسئله کمینه‌سازی تنش‌های آبی کشور توسط مکان‌یابی مناسب صنایع بزرگ با در نظر گرفتن تغییر اقلیم مدل‌سازی می‌گردد. در بخش ۳، مدل پیشنهادی برای مهار تنش‌های آبی حوضه‌های آبریز کشور ایران استفاده و نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل پیشنهادی تحلیل می‌شود. برای این منظور پنج صنعت پرمصرف آب با توجه به سه سناریوی تغییر اقلیم مکان‌یابی می‌شوند. در بخش ۴ به جمع‌بندی مطالب ارائه‌شده مبادرت می‌گردد.

## ۲- روش تحقیق

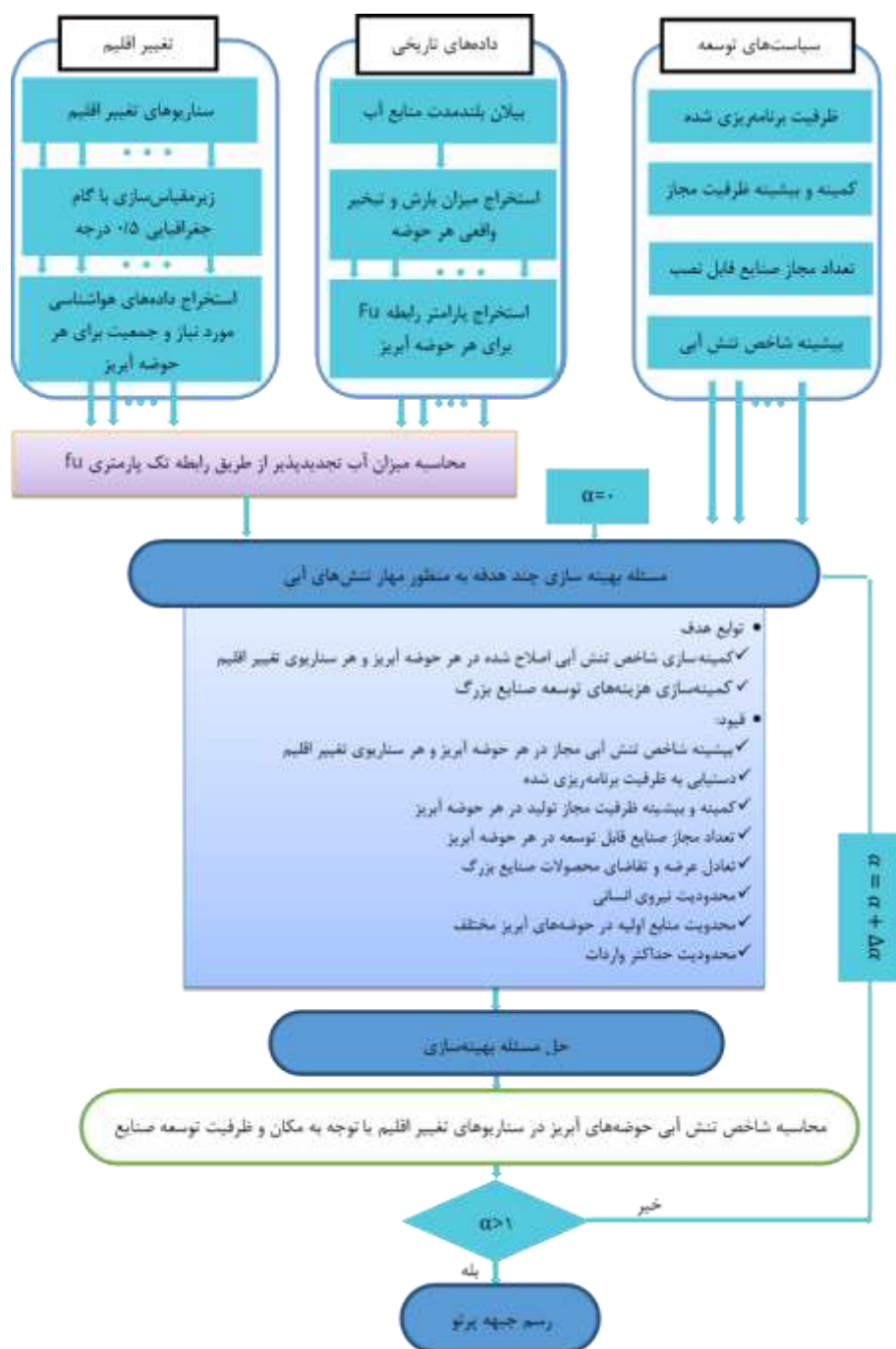
در این بخش ابتدا چارچوب پیشنهادی برای کمینه‌سازی تنش‌های آبی کشور با مکان‌یابی مناسب برای توسعه صنایع بزرگ و در نظر گرفتن تغییر اقلیم تشریح و سپس در قالب یک مسئله ریاضی مدل می‌گردد.

### ۲-۱- تشریح چارچوب پیشنهادی

به‌منظور ارائه چارچوب پیشنهادی برای کمینه‌سازی تنش‌های آبی کشور با توجه به تأثیر توسعه صنایع بزرگ و تغییر اقلیم، ابتدا هر یک از بخش‌های پایش تنش‌های آبی، تغییر اقلیم، و توسعه صنایع بزرگ مدل‌سازی شده و سپس با توجه به ارتباط بین این بخش‌ها، یک مدل به‌صورت ایستا، بلندمدت، و در مقیاس کشوری با تفکیک حوضه‌های آبریز اصلی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی دوهدفه ارائه می‌گردد.

تأثیر توسعه صنایع بزرگ بر تنش‌های آبی، آب برداشت‌شده از هر حوضه آبریز برای بهره‌برداری صنایع جدید به آب برداشت‌شده آن حوضه، جهت محاسبه شاخص تنش آبی، اضافه می‌گردد. مدل به‌گونه‌ای طراحی شده است که نتایج حاصله نسبت به عدم قطعیت در رخدادهای سناریوهای مختلف تغییر اقلیم مقاوم باشد. چارچوب پیشنهادی در فلوجارت شکل (۱) تشریح شده است.

توسعه کارخانه‌های موجود صنایع مختلف در مقابل ظرفیت لازم برای توسعه بلندمدت صنایع قابل‌اغماض بوده و برای توسعه بلندمدت هر صنعت باید یک یا چند کارخانه در حوضه‌های آبریز مختلف احداث نمود. سیاست‌های توسعه صنایع نظیر میزان ظرفیت برنامه‌ریزی‌شده برای توسعه صنایع بزرگ، کمیته و بیشینه ظرفیت مجاز برای توسعه هر صنعت در حوضه‌های آبریز مختلف و تعداد صنعت مجاز قابل توسعه در هر حوضه آبریز در قالب قیود مسئله پیاده‌سازی می‌شوند. به‌منظور در نظر گرفتن



شکل ۱- فلوجارت رویکرد پیشنهادی

$$Eva_p^s = 0.0023R_a^s (T_{ave}^s + 17.8)\sqrt{TR^s} \quad \forall s \quad (3)$$

در این رابطه  $R_a^s$  بیانگر تشعشع فرا اتمسفری ماهانه در عرض جغرافیایی محل مورد مطالعه،  $T_{ave}^s$  میانگین دمای ماهانه محل مطالعه و  $TR^s$  تفاوت بیشینه و کمینه دمای ماهانه محل مطالعه در سناریوی تغییر اقلیم  $s$  است. حجم آب برداشت شده سالیانه به خاطر تولید محصول  $i$  در حوضه آبریز  $c$  توسط رابطه خطی (۴) محاسبه می‌شود.

$$f_i^c = x_i * APC_{i,c} \quad \forall i, c \quad (4)$$

در رابطه فوق  $x_i$  میزان آب مصرفی به‌ازای تولید هر یک واحد محصول  $i$  و  $APC_{i,c}$  ظرفیت توسعه صنعت یا محصول  $i$  در حوضه آبریز  $c$  می‌باشد. حداکثر مقدار مجاز شاخص تنش آبی در هر حوضه آبریز توسط قید (۵) محدود می‌شود.

$$NWSI_c^s \leq NWSI_c^{max} \quad \forall c, s \quad (5)$$

$NWSI_c^{max}$  حداکثر مقدار مجاز شاخص تنش آبی حوضه آبریز  $c$  می‌باشد. با اضافه کردن این قید، تأثیر بخش آب بر بخش صنعت لحاظ می‌شود. این قید با محدود کردن میزان برداشت آب با توجه به میزان دسترسی به منابع آب در هر حوضه، مکان و ظرفیت نصب صنایع جدید را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در ادامه، مسئله برنامه‌ریزی بلندمدت توسعه صنایع بزرگ مدل‌سازی می‌گردد. دستیابی به ظرفیت برنامه‌ریزی شده برای توسعه تولید صنایع مختلف در سطح کشور توسط قید (۶) و حداقل ظرفیت تولیدی هر صنعت در هر حوضه آبریز توسط قید (۷) مدل می‌گردد. قید (۸) با اعمال بیشینه ظرفیت برای توسعه تولید هر محصول در حوضه آبریز، امکان تمرکززدایی صنایع و جمعیت را برای بهره‌بردار مسئله فراهم می‌نماید. از سوی دیگر، تعداد نیروی انسانی موردنیاز برای بهره‌برداری از هر یک از صنایع به ظرفیت تولیدی سالانه آن صنعت وابسته است. از این‌رو، در (۹) نیروی انسانی موردنیاز برای بهره‌برداری از هر یک از صنایع به نیروی انسانی فعال و در دسترس آن حوضه آبریز محدود شده است. در (۱۰) حداقل و حداکثر تعداد صناعی که می‌تواند در یک حوضه آبریز توسعه یابد، تعیین شده است.

$$\sum_c APC_{i,c} \geq APC_i^{Planned} \quad \forall i \quad (6)$$

$$APC_{i,c} \geq APC_i^{min} * u_{(i,c)} \quad \forall i, c \quad (7)$$

$$APC_{i,c} \leq APC_i^{max} * u_{(i,c)} \quad \forall i, c \quad (8)$$

## ۲-۲- مدل‌سازی چارچوب پیشنهادی

به‌منظور پایش تنش آبی حوضه‌های آبریز مختلف، شاخص SDG 6.4.2 استفاده می‌شود (Dickens و همکاران، ۲۰۱۹). این شاخص با توجه به تأثیر توسعه صنایع بزرگ کشور و سناریوهای مختلف تغییر اقلیم به‌صورت زیر اصلاح می‌شود.

$$NWSI_c^s = \frac{TFWW_c^{Pre} + \sum_i f_i^c}{TRWR_c^s - EWR_c^s} \quad (1)$$

در این رابطه  $NWSI_c^s$  شاخص تنش آبی اصلاح‌شده حوضه آبریز  $c$  در سناریوی  $s$  سال مورد مطالعه،  $TFWW_c^{Pre}$  حجم آب برداشت‌شده<sup>۱</sup> سالیانه از حوضه آبریز  $c$  قبل از توسعه صنایع،  $f_i^c$  حجم آب برداشت‌شده سالیانه به خاطر تولید محصول  $i$  در حوضه آبریز  $c$ ، و  $TRWR_c^s$  و  $EWR_c^s$  به ترتیب حجم آب منابع تجدیدپذیر<sup>۲</sup> سالیانه و حجم آب موردنیاز سالیانه محیط‌زیست<sup>۳</sup> در حوضه  $c$  در سناریوی تغییر اقلیم  $s$  می‌باشند. تأثیر توسعه صنایع بر تنش‌های آبی، توسط جمله دوم صورت کسر رابطه (۱) یعنی آب برداشت‌شده به خاطر توسعه صنایع مدل‌سازی می‌شود. همچنین تأثیر تغییر اقلیم بر دسترسی به منابع آب تجدیدپذیر و در نتیجه تنش‌های آبی نیز توسط سناریوهای مختلف تغییر اقلیم مدل می‌شود. برای این منظور از سه سناریوی تغییر اقلیم B1، A1B و A2 تعریف‌شده توسط IPCC استفاده می‌شود (IPCC، ۲۰۰۰).

به‌منظور محاسبه  $TRWR_c^s$ ، میزان تبخیر واقعی در هر حوضه آبریز از میزان بارش کاسته می‌شود. تبخیر واقعی حوضه آبریز  $c$  در سناریوی تغییر اقلیم  $s$  ( $Eva_{a,c}^s$ ) با استفاده از رویکرد Budyko توسط رابطه تک‌پارامتری Fu محاسبه می‌شود. رابطه تک‌پارامتری Fu به‌صورت (۲) تعریف شده است (Jiang و همکاران، ۲۰۱۵؛ حمیدی کارزنوئی، ۱۳۹۲).

$$Eva_{a,c}^s = Prec_c^s \times \left[ 1 + \frac{Eva_{p,c}^s}{Prec_c^s} - \left( 1 + \left( \frac{Eva_{p,c}^s}{Prec_c^s} \right)^{w_c} \right)^{\frac{1}{w_c}} \right]^{0.5} \quad (2)$$

در رابطه فوق  $Prec_c^s$  بیانگر میزان بارش ماهیانه،  $Eva_{p,c}^s$  بیانگر تبخیر پتانسیل ماهیانه حوضه آبریز  $c$  در سناریوی تغییر اقلیم  $s$  و  $w_c$  پارامتر Fu برای حوضه آبریز  $c$  می‌باشد. به‌منظور محاسبه تبخیر پتانسیل از رابطه (۳) استفاده می‌شود (Mianabadi و همکاران، ۲۰۱۹).

$$D_{i,c} \leq \sum_{c'} S_{i,c',c} + Imp_{i,c} \quad \forall i, c \quad (14)$$

در روابط فوق،  $APC_{i,c}$  ظرفیت توسعه صنعت یا محصول  $i$  در حوضه آبریز  $c$ ،  $APC_i^{Planned}$  کل ظرفیت برنامه‌ریزی شده برای توسعه صنعت  $i$  در کشور و  $APC_i^{min}$  و  $APC_i^{max}$  به ترتیب کمینه و بیشینه ظرفیت توسعه صنعت  $i$  در یک حوضه می‌باشند. نیروی انسانی موردنیاز برای تولید هر واحد از محصول  $i$  توسط  $H_{res_i}$  نمایش داده می‌شود.  $Pop_c$  نیروی انسانی فعال و در دسترس حوضه آبریز  $c$  در سال مورد مطالعه می‌باشد.  $u_{(i,c)}$  متغیر باینری است که  $u_{(i,c)} = 1$  بیان‌گر توسعه صنعت  $i$  در حوضه آبریز  $c$  و  $u_{(i,c)} = 0$  بیان‌گر عدم توسعه صنعت  $i$  در حوضه آبریز  $c$  است.  $No_c^{min}$  و  $No_c^{max}$  تعداد بیشینه و کمینه صنایعی است که می‌توانند در حوضه آبریز  $c$  توسعه یابند. قیود فوق، امکان افزایش تاب‌آوری<sup>۱</sup> سیستم را در حوادث طبیعی نظیر زلزله و سیل یا حوادث غیرطبیعی نظیر حملات نظامی فراهم می‌سازد. میزان مواد اولیه  $r$  موردنیاز سالیانه برای تولید محصول  $i$  در حوضه آبریز  $c$  توسط قید (۱۱) لحاظ می‌شود.

$$\sum_{c'} S_{i,c',c} \leq APC_{i,c} \quad \forall i, c \quad (15)$$

$$Imp_{i,c} \leq Imp_{i,c}^{max} \quad \forall i, c \quad (16)$$

در نهایت، هزینه‌های انتقال مواد اولیه ( $RC$ )، محصولات تولیدی ( $PC$ ) و واردات ( $IC$ ) توسط معادلات خطی (۱۷)-(۱۹) محاسبه می‌شود.

$$RC = \sum_{r,c',c} R_{r,c',c}^{Sent} * Trans. Cost_{r,c',c}^{Rawmaterail} \quad (17)$$

$$PC = \sum_{r,c',c} S_{r,c',c}^{Sent} * Trans. Cost_{r,c',c}^{Product} \quad (18)$$

$$IC = \sum_{r,c',c} Imp_{r,c',c} * Trans. Cost_{r,c',c}^{Import} \quad (19)$$

به منظور در نظر گرفتن هم‌زمان تأثیر توسعه صنایع بزرگ و تغییر اقلیم بر تنش‌های آبی، یک بهینه‌سازی چندهدفه با اهداف کمینه‌سازی میانگین شاخص‌های تنش آبی روی حوضه‌های مختلف آبریز و هزینه‌های حمل‌ونقل در (۲۰)-(۲۲) تعریف می‌شود. شاخص تنش آبی (۱) و قیود (۴) و (۵) ارتباط متقابل بخش‌های آب و صنعت را مدل می‌نمایند. در نهایت، مسئله کمینه‌سازی تنش‌های آبی کشور توسط مکان‌یابی مناسب برای توسعه صنایع بزرگ و در نظر گرفتن تغییر اقلیم به صورت مدل (۲۰)-(۲۲) می‌گردد.

$$Min. \sum_c t_c, \quad RC + PC + IC \quad (20)$$

$$s. t.: NWSI_c^s \leq t_c \quad \forall c, s \quad (21)$$

$$(1)-(19) \quad (22)$$

با توجه به (۲۱) نتایج بهینه‌سازی نسبت به تغییر اقلیم مقاوم می‌شود. به منظور حل بهینه‌سازی چندهدفه و رسم جبهه پرتو، مجموع موزون توابع هدف به‌ازای وزن‌های مختلف حداقل می‌گردد (Boyd و Vandenberghe, ۲۰۰۴). برای این منظور، مجموع

$$APC_{i,c} * H_{res_i} \leq Pop_c \quad \forall c \quad (9)$$

$$No_c^{min} \leq \sum_i u_{(i,c)} \leq No_c^{max} \quad \forall c \quad (10)$$

در روابط فوق،  $APC_{i,c}$  ظرفیت توسعه صنعت یا محصول  $i$  در حوضه آبریز  $c$ ،  $APC_i^{Planned}$  کل ظرفیت برنامه‌ریزی شده برای توسعه صنعت  $i$  در کشور و  $APC_i^{min}$  و  $APC_i^{max}$  به ترتیب کمینه و بیشینه ظرفیت توسعه صنعت  $i$  در یک حوضه می‌باشند. نیروی انسانی موردنیاز برای تولید هر واحد از محصول  $i$  توسط  $H_{res_i}$  نمایش داده می‌شود.  $Pop_c$  نیروی انسانی فعال و در دسترس حوضه آبریز  $c$  در سال مورد مطالعه می‌باشد.  $u_{(i,c)}$  متغیر باینری است که  $u_{(i,c)} = 1$  بیان‌گر توسعه صنعت  $i$  در حوضه آبریز  $c$  و  $u_{(i,c)} = 0$  بیان‌گر عدم توسعه صنعت  $i$  در حوضه آبریز  $c$  است.  $No_c^{min}$  و  $No_c^{max}$  تعداد بیشینه و کمینه صنایعی است که می‌توانند در حوضه آبریز  $c$  توسعه یابند. قیود فوق، امکان افزایش تاب‌آوری<sup>۱</sup> سیستم را در حوادث طبیعی نظیر زلزله و سیل یا حوادث غیرطبیعی نظیر حملات نظامی فراهم می‌سازد. میزان مواد اولیه  $r$  موردنیاز سالیانه برای تولید محصول  $i$  در حوضه آبریز  $c$  توسط قید (۱۱) لحاظ می‌شود.

$$\beta_{r,i} * APC_{i,c} \leq \sum_{c'} R_{r,c',c}^{Sent} \quad \forall i, c, r \quad (11)$$

$\beta_{r,i}$  میزان ماده اولیه  $r$  موردنیاز برای تولید یک واحد محصول  $i$  است. میزان کل ماده اولیه  $r$  ارسالی سالیانه از حوضه آبریز  $c'$  به حوضه آبریز  $c$  توسط  $R_{r,c',c}^{Sent}$  نشان داده شده است. دقت شود که از منابع یک حوضه آبریز می‌توان مواد اولیه به صنایع همان حوضه ارسال نمود ( $c' = c$ ). در (۱۲) میزان ماده اولیه ارسالی سالیانه از حوضه  $c'$  به حوضه‌های دیگر به حداکثر ماده اولیه قابل استخراج سالیانه از منابع حوضه  $c'$  یعنی  $R_{r,c'}^{Available}$  محدود شده است.

$$\sum_c R_{r,c',c}^{Sent} \leq R_{r,c'}^{Available} \quad \forall r, c', c \quad (12)$$

تبادل عرضه و تقاضای محصول  $i$  در کل کشور با توجه به پیش‌بینی مصرف سالیانه این محصول در هر حوضه در افق زمانی مورد مطالعه ( $D_{i,c}$ ) و در نظر گرفتن میزان واردات سالیانه این محصول به حوضه آبریز  $c$  ( $Imp_{i,c}$ ) توسط قید (۱۳) مدل شده است. در قید (۱۴) نحوه تأمین مصرف محصول  $i$  در حوضه آبریز  $c$  از طریق تولیدات داخلی و واردات مدل‌سازی شده است.

$$\sum_c (APC_{i,c} + Imp_{i,c}) \geq \sum_c D_{i,c} \quad \forall i \quad (13)$$

شکل (۲) حاکی از وضعیت بهره‌کشی میانه در سه حوضه آبریز دریای خزر، خلیج فارس و دریاچه ارومیه، وضعیت بهره‌کشی بیش‌ازحد در حوضه آبریز مرزی شرق و وضعیت بهره‌کشی فاجعه‌بار در حوضه‌های آبریز فلات مرکزی و قره‌قوم است.



شکل ۲- وضعیت تنش آبی حوضه‌های آبریز اصلی کشور ایران

جدول ۱- دسته‌بندی وضعیت بهره‌کشی بر اساس شاخص تنش آبی

شاخص تنش آبی	وضعیت بهره‌کشی
$0 \leq NWSI < 0.3$	بهره‌کشی سبک
$0.3 \leq NWSI < 0.6$	بهره‌کشی میانه
$0.6 \leq NWSI < 1$	بهره‌کشی زیاد
$1 \leq NWSI < 1.3$	بهره‌کشی بیش‌ازحد
$1.3 \leq NWSI < 1.6$	بهره‌کشی گزاف
$NWSI \geq 1.6$	بهره‌کشی فاجعه‌بار

در بخش توسعه صنایع، تعداد ۵ صنعت فولاد خام، سیمان، قند و شکر، کاغذ و پالایش نفت به‌عنوان صنایع بزرگ مصرف‌کننده آب انتخاب شده‌اند. در جدول (۲) ظرفیت تولید سالیانه هر یک از صنایع منتخب برای سال ۲۰۳۰، با توجه به ظرفیت تولیدی در سال ۲۰۱۵، پیش‌بینی ظرفیت هر یک با توجه به سند توسعه ۱۴۰۴ (۲۰۲۵) و رشد ظرفیت جهانی پیش‌بینی شده است. همچنین مقادیر کمینه و بیشینه ظرفیت هر واحد تولیدی این صنایع به ترتیب در ستون‌های چهارم و پنجم جدول (۲) مشخص شده است. میزان ماده اولیه و آب موردنیاز برای تولید یک واحد محصول هر یک از صنایع در جدول (۳) مشخص شده است. جدول (۴) موجود بودن مواد اولیه در هر یک از حوضه‌های آبریز را نشان می‌دهد. میزان رشد مصرف محصولات هر یک از این صنایع در هر حوضه آبریز سالیانه ۵٪ پیش‌بینی شده است.

هزینه‌های انتقال و میانگین شاخص‌های تنش آبی نرمال شده و یک تابع هدف به‌صورت (۲۳) در نظر گرفته می‌شود.

$$\text{Min. } \alpha * \left( \frac{1}{NWSI_{max} \times N_c} \sum_c t_c \right) + (1 - \alpha) * \left( \frac{RC + PC + IC}{total\ cost_{max}} \right) \quad (23)$$

$NWSI_{max}$  و  $total\ cost_{max}$  به‌ترتیب مقدار بیشینه مجموع هزینه‌های انتقال و میانگین شاخص تنش آبی و  $N_c$  نمایش‌دهنده تعداد حوضه‌های آبریز است. ضریب  $\alpha$  در بازه ۰ تا ۱ با گام کوتاه تغییر داده می‌شود و در هر مقدار  $\alpha$ ، بهینه‌سازی اجرا و ظرفیت و مکان صنایع در حوضه‌های آبریز مختلف تعیین و هزینه حمل‌ونقل مربوطه محاسبه می‌شود. سپس با توجه به ظرفیت و مکان تعیین‌شده صنایع، آب برداشته‌شده به خاطر توسعه صنایع از هر حوضه آبریز مشخص شده و شاخص تنش آبی هر حوضه آبریز در هر سناریو تغییر اقلیم محاسبه می‌شود. درنهایت جبهه پرتو برای اهداف هزینه حمل‌ونقل و میانگین شاخص تنش آبی رسم می‌شود. بهره‌بردار با مصالحه بین این دو هدف نقطه مناسب از جبهه پرتو را انتخاب می‌کند.

### ۳- شبیه‌سازی و تحلیل نتایج

در این بخش، مدل ارائه‌شده برای کاهش تنش‌های آبی حوضه‌ها آبریز اصلی ایران در سال ۲۰۳۰ به کار گرفته می‌شود.

#### ۳-۱- معرفی محدوده جغرافیایی مورد مطالعه

کشور ایران دارای شش حوضه آبریز اصلی با نام‌های دریای خزر، خلیج فارس و دریای عمان، دریاچه ارومیه، فلات مرکزی، مرزی شرق و قره‌قوم می‌باشد. وضعیت تنش آبی حوضه‌های آبریز بر اساس دسته‌بندی شاخص تنش آبی SDG 6.4.2 مطابق جدول ۱ تعیین می‌شود (Smakhtin, ۲۰۰۴). مطابق جدول (۱) به هر وضعیت، یک اسم و یک رنگ اختصاص داده می‌شود. در این مقاله وضعیت تنش آبی برای مقادیر بزرگ‌تر از ۱ شاخص تنش آبی SDG 6.4.2 توسعه داده شده است. برای محاسبه شاخص تنش آبی، حجم آب موردنیاز محیط‌زیست برابر با ۲۰٪ حجم آب تجدیدپذیر در نظر گرفته شده است (Smakhtin, ۲۰۰۴). همچنین از بیان عمومی آب کشور ارائه‌شده در سالنامه آماری آب کشور ۹۳-۹۴ برای تعیین میزان آب برداشت‌شده و محاسبه حجم آب تجدیدپذیر استفاده شده است (وزارت نیرو، ۱۳۹۷). در شکل (۲) وضعیت تنش آبی حوضه‌های آبریز در سال ۲۰۱۵ توسط رنگ مربوطه نمایش داده شده است. در این شکل به هر حوضه آبریز یک شماره اختصاص داده شده است. از این پس حوضه آبریز خلیج فارس و دریای عمان به‌اختصار خلیج فارس نامیده می‌شود.

که بخشی از تقاضا می‌تواند توسط واردات محصولات تأمین شود. هزینه واردات محصولات نیز با در نظر گرفتن سه نوع واردات زمینی، هوایی و دریایی محاسبه شده است. بدین‌منظور برای هر نوع از واردات، یک یا چند حوضه آبریز به‌عنوان مرز ورود کالا شناسایی شده و میانگین فاصله آن مرزها تا حوضه‌های آبریز مختلف محاسبه شده است.

جدول ۴- وجود مواد اولیه در حوضه‌های آبریز مختلف

ماده اولیه	حوضه آبریز				
	۱	۲	۳	۴	۵
سنگ‌آهن	*	*	*	*	*
زغال‌سنگ	*	*	*	*	*
آهن بازیافتی	*	*	*	*	*
سنگ‌آهک	*	*	*	*	*
ماسه	*	*	*	*	*
نیشکر و چغندر قند	*	*	*	*	*
چوب	*	*	*	*	*
نفت خام	*	*	*	*	*

هزینه حمل‌ونقل واردات به هر یک از حوضه آبریز به‌صورت میانگین وزن‌دهی شده هر یک از انواع مختلف واردات در سطر آخر جدول (۶) داده شده است. فرض شده است که در هر حوضه آبریز حداقل یک محصول تولید شود. تعداد بیشینه صنایع قابل توسعه در هر حوضه آبریز با توجه به جمعیت و مساحت حوضه آبریز در حوضه‌های آبریز ۱ تا ۶ به ترتیب ۳، ۴، ۲، ۴، ۳ و ۳ تعیین شده است. در شبیه‌سازی، به دلیل افزایش تولید ملی، میزان واردات مجاز ۰/۲ ظرفیت برنامه‌ریزی شده در نظر گرفته شده است.

### ۳-۲- نتایج شبیه‌سازی

در ادامه، ابتدا نتایج شبیه‌سازی برای تعیین تأثیر تغییر اقلیم بر منابع آب حوضه‌های آبریز مختلف ارائه می‌شود. سپس با توجه به هم‌بست آب و صنعت، به بررسی تأثیر مکان‌یابی مناسب صنایع بزرگ کشور بر تنش‌های آبی با در نظر گرفتن تغییر اقلیم مبادرت می‌گردد.

### ۳-۲-۱- تأثیر تغییر اقلیم بر حجم آب تجدیدپذیر کشور

به‌منظور تعیین تأثیر بلندمدت تغییر اقلیم بر دسترسی به منابع آب از سه سناریوی تغییر اقلیم B1، A1B و A2 تعریف شده توسط IPCC استفاده می‌شود (IPCC، ۲۰۰۰). هر سناریو شامل اطلاعات زیادی نظیر جمعیت، رشد اقتصاد و آلودگی در نقاط مختلف زمین است. با انتخاب نقاطی با گام جغرافیایی ۰/۵ درجه در پهنه کشور و با استفاده از اطلاعات موجود برای این نقاط در سه سناریو فوق، ارتفاع بارش و میانگین، بیشینه و کمینه دمای هر یک از این نقاط در طی هر ماه توسط نرم‌افزار Meteonorm7 استخراج می‌گردد.

توزیع مقدار مصرف محصولات در هر حوضه آبریز، با توجه به جمعیت آن حوضه در جدول (۵) داده شده است. به‌منظور محاسبه هزینه‌های انتقال درون و بین حوضه‌ای، تعداد ۴۵ شهر بزرگ کشور انتخاب شده است. پس از تعیین حوضه دربرگیرنده شهرهای منتخب، میانگین فاصله درون و بین حوضه‌ای برای حوضه‌های آبریز مختلف تعیین شده است.

جدول ۲- پیش‌بینی ظرفیت تولید سالیانه و قیود ظرفیت واحدهای تولیدی

صنعت	واحد	ظرفیت سال ۲۰۳۰		
		APC <sub>i</sub> <sup>Planned</sup>	کمینه	بیشینه
فولاد خام	Mton	۶۸/۴۲	۱۳/۶۸	۴۷/۸۹
سیمان	Mton	۱۶۴/۶۷	۳۲/۹۳	۱۱۵/۲۷
قند و شکر	Mton	۱/۱۲	۰/۲۲	۰/۷۸
کاغذ	Mton	۲/۵۱	۰/۵	۱/۷۶
پالایش نفت	Mcm	۳۳۳/۷۳	۶۶/۷۵	۲۳۳/۶۱

مراجع: (شرکت ملی فولاد ایران، ۱۳۹۶)، (USGS، ۲۰۱۸)، (OECD، ۲۰۱۸)، (Global Cement News، ۲۰۱۹)، (FAO، ۲۰۲۱)، (OPEC، ۲۰۱۹)، (OPEC، ۲۰۱۷)، (Ansari و Seifi، ۲۰۱۲)، (Abbaszadeh، ۲۰۱۲)، (Accenture، ۲۰۱۷)، (Imbabi و همکاران، ۲۰۱۲)

### جدول ۳- ماده اولیه مورد نیاز صنایع منتخب

فولاد خام (برای تولید یک تن محصول)			
آب	آهن بازیافتی	زغال‌سنگ	سنگ‌آهن
۲۶/۵ m <sup>3</sup>	۰/۳۴ ton	۰/۵۹ ton	۱/۱۸ ton
سیمان (برای تولید یک تن محصول)			
آب	ماسه	سنگ‌آهک	
۰/۲ m <sup>3</sup>	۰/۴ ton	۱/۶۵ ton	
قند و شکر (برای تولید یک تن محصول)			
آب	معادل نیشکر و چغندر قند		
۳۲ m <sup>3</sup>	۷/۹۲ ton		
کاغذ (برای تولید یک تن محصول)			
آب	چوب		
۵/۵ m <sup>3</sup>	۲ m <sup>3</sup>		
پالایش نفت (برای تولید یک مترمکعب محصول)			
آب	نفت خام		
۱ m <sup>3</sup>	۰/۹۴ m <sup>3</sup>		

مراجع: (Colla و همکاران، ۲۰۱۷)، (WSA، ۲۰۱۵)، (WSA، ۲۰۱۹)، (Global Cement News، ۲۰۱۹)، (EIA، ۲۰۱۹)، (Hosseiniان و Nezamoleslam، ۲۰۱۸)، (Global Cement staff، ۲۰۱۵)، (British Geological Survey، ۲۰۰۵)، (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۷)، (معاونت برنامه‌ریزی وزارت صمت)، (Mena، ۱۹۸۷)، (Donovan، ۲۰۰۳)، (Van Oel و Hoekstra، ۲۰۱۰)، (Manda و همکاران، ۲۰۱۲)، (Sun و همکاران، ۲۰۱۸)

با در نظر گرفتن هزینه انتقال ۰/۰۶۵ دلار بر کیلومتر در داخل کشور (Osborne و همکاران، ۲۰۱۴)، هزینه انتقال مواد اولیه و محصولات در درون و بین حوضه‌های آبریز محاسبه و در جدول (۶) داده شده است. در مدل‌سازی ارائه‌شده فرض شده است



سپس حجم آب تجدیدپذیر هر حوضه آبریز در هر سناریو محاسبه می‌شود.

جدول ۵- پیش‌بینی رشد مصرف محصولات هریک از صنایع در سال ۲۰۳۰

کشور	۶	۵	۴	۳	۲	۱	واحد	حوضه	
								صنعت	فولاد خام
۲۸/۸۶	۱/۵۴	۰/۷۵	۱۳/۴۷	۱/۹۹	۶/۶۸	۴/۴۳	Mton	فولاد خام	
۶۳/۲۲	۳/۳۸	۱/۶۴	۲۹/۵۱	۴/۳۶	۱۴/۶۳	۹/۷۱	Mton	سیمان	
۱/۷۶	۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۸۲	۰/۱۲	۰/۴۱	۰/۲۷	Mton	قند و شکر	
۰/۷۸	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۳۶	۰/۰۵	۰/۱۸	۰/۱۲	Mton	کاغذ	
۱۱۱/۵۱	۵/۹۶	۲/۸۹	۵۲/۰۵	۷/۶۸	۲۵/۸	۱۷/۱۲	Mcm	پالایش نفت	

جدول ۶- هزینه انتقال درون و بین حوضه‌های مواد اولیه و محصولات (\$/ton)

به حوضه							از حوضه
۶	۵	۴	۳	۲	۱		
۷۶/۲۹	۱۰۹/۲۶	۶۰/۹۹	۴۰/۵۶	۷۵/۲۶	۳۹/۷۴	۱	
۹۶/۰۵	۹۰/۲۶	۶۱/۱۸	۸۱/۷	۵۵/۶۹	۷۵/۲۶	۲	
۱۰۷/۹۴	۱۳۵/۴۴	۷۸/۲۹	۹/۵۹	۸۱/۷	۴۰/۵۶	۳	
۶۱/۵۹	۷۱/۳۵	۴۹/۷۳	۷۸/۲۹	۶۱/۱۸	۶۰/۹۹	۴	
۶۴/۵	۵۸/۳۷	۷۱/۳۵	۱۳۵/۴۴	۹۰/۲۶	۱۰۹/۲۶	۵	
۱۱/۹۶	۶۴/۵	۶۱/۵۹	۱۰۷/۹۴	۹۶/۰۵	۷۶/۲۹	۶	
۶۳/۹۷	۸۸/۷۲	۵۶/۱۴	۸۰/۱۹	۶۷/۴۳	۶۳/۵۶	واردات	

آبریز ایران در هر یک از سه سناریوی تغییر اقلیم فوق برای سال ۲۰۳۰ در جدول (۷) ارائه شده است. مقدار بیشینه مجاز برای شاخص تنش آبی با توجه به شرایط دسترسی به منابع آب، ۲/۵ تعیین شده است.

### ۳-۲-۲- تأثیر توسعه صنایع بزرگ بر تنش‌های آبی

در این بخش نتایج شبیه‌سازی چارچوب پیشنهادی در محیط نرم‌افزاری GAMS در ارتباط با MATLAB، ارائه می‌شود. در این راستا مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مدل‌سازی شده در (۲۰)-(۲۳) با سه فرض تمرکز بر کمینه‌سازی هزینه‌ها (طرح ۱،  $\alpha=0$ )، تمرکز بر کاهش تنش‌های آبی و هزینه‌ها (طرح ۲،  $\alpha=0/35$ ) و تمرکز بر کمینه‌سازی تنش‌های آبی (طرح ۳،  $\alpha=0$ ) حل شده است.

برای این منظور، با استفاده از (۲) و (۳) میزان تبخیر واقعی و تبخیر پتانسیل به‌صورت ماهانه برای هر یک از نقاط منتخب محاسبه می‌شود. برای تخمین پارامتر  $\omega_c$  در هر حوضه آبریز، از بیلان بلندمدت عمومی آب کشور ارائه‌شده در سالنامه آماری آب ۹۳-۹۴ کشور استفاده می‌شود (وزارت نیرو، ۱۳۹۷). با توجه به آخرین اطلاعات منتشرشده توسط شرکت مدیریت منابع آب ایران منتهی به سال آبی ۹۴-۹۵، حجم آب برداشت‌شده در ۵ سال آبی اخیر تغییر قابل توجهی نداشته و با استفاده از رویکردهای مدیریتی و بهره‌وری تثبیت شده است (شرکت مدیریت منابع آب ایران). لذا در این مقاله، حجم آب برداشت‌شده در سال ۲۰۳۰ برابر با حجم آب برداشت‌شده در سال آبی ۹۴-۹۵ فرض می‌شود. حجم آب برداشت‌شده و حجم آب تجدیدپذیر برای هر یک از حوضه‌های

جدول ۷- حجم آب برداشت شده و آب تجدیدپذیر (Mcm/year)

حوضه	پیش‌بینی صورت گرفته برای سال ۲۰۳۰			
	A2	A1B	B1	TFWW <sup>Pre</sup>
۱	۲۰۱۶۴/۹	۱۹۷۷۷/۲	۲۰۱۳۴/۴	۶۶۹۴/۹
۲	۵۲۸۴۶/۳	۵۲۶۷۹/۱	۵۲۰۵۸/۶	۱۷۷۴۸/۹
۳	۴۷۲۰/۳	۴۶۴۹/۱	۴۷۳۵/۳	۲۲۱۱
۴	۳۸۳۵۰/۳	۳۷۰۳۷/۵	۳۷۸۰۴/۵	۳۰۵۶۸/۴
۵	۲۵۱۰/۳	۲۴۶۰/۲	۲۴۹۴/۲	۱۴۱۳/۷
۶	۲۳۳۰/۷	۲۳۵۲	۲۳۴۸/۲	۲۶۲۵/۳
کشور	۱۲۰۹۲۲/۸	۱۱۸۹۵۵	۱۱۹۵۷۵/۳	۶۱۲۶۲/۱

آبی این حوضه آبریز می‌شود. دلیل این جابجایی، پیش‌بینی بیشترین حجم آب تجدیدپذیر در حوضه آبریز خلیج فارس در سناریوهای تغییر اقلیم است. علیرغم افزایش برداشت آب در حوضه آبریز خلیج فارس، وضعیت بهره‌کشی این حوضه آبریز در هیچ کدام از سناریوهای تغییر اقلیم وخیم‌تر نشده است.

تأثیر مثبت تغییر اقلیم در سال ۲۰۳۰ بر وضعیت تنش آبی حوضه‌های آبریز شماره ۴ (فلات مرکزی) و شماره ۵ (مرزی شرق)، در کلیه سناریوهای تغییر اقلیم در **Error! Reference source not found.** قابل مشاهده است. این تأثیر به‌گونه‌ای است که در کلیه طرح‌ها برای سال ۲۰۳۰، علی‌رغم احداث صنایع جدید و افزایش برداشت آب نسبت به شرایط قبل از توسعه، وضعیت تنش آبی حوضه آبریز فلات مرکزی از وضعیت بهره‌کشی فاجعه‌بار به وضعیت بهره‌کشی بیش‌ازحد و در حوضه آبریز مرزی شرق از وضعیت بهره‌کشی بیش‌ازحد به بهره‌کشی زیاد بهبود پیدا کرده است.

در ادامه جبهه پرتو برای دو هدف متعارض<sup>۱</sup> کمینه‌سازی هزینه‌های حمل‌ونقل و کمینه‌سازی میانگین تنش‌های آبی رسم می‌شود. برای این منظور، با تغییر ضریب  $\alpha$  از صفر (طرح ۱) تا یک (طرح ۳) با دقت ۰/۰۰۱، تمرکز برنامه‌ریزی از تمرکز کامل بر کمینه‌سازی هزینه‌ها به تمرکز کامل بر کمینه‌سازی تنش‌های آبی تغییر داده می‌شود. برای هر یک از مقادیر این ضریب، بهینه‌سازی انجام و متغیرهای تصمیم و توابع هدف محاسبه می‌گردند. جبهه پرتو مربوطه در شکل (۴) نمایش داده شده است. تحلیل جبهه پرتو نشان می‌دهد که با مکان‌یابی مناسب صنایع به قیمت افزایش هزینه‌ها می‌توان تنش‌های آبی کشور را کاهش داد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در طرح ۲ یعنی  $\alpha=0/35$ ، با افزایش  $4/41\%$  هزینه‌های حمل‌ونقل نسبت به طرح مینا، تنش‌های آبی نسبت به طرح مینا  $6/84\%$  کاهش می‌یابد. همچنان‌که شکل (۴) نشان می‌دهد در  $\alpha=0$  قدر مطلق شیب جبهه پرتو زیاد است و با افزایش  $\alpha$  قدر مطلق شیب این منحنی کاهش می‌یابد. نرخ کاهش قدر مطلق شیب جبهه پرتو تا  $\alpha=0/5$  ناچیز است در نزدیکی این نقطه قدر مطلق شیب به‌شدت کاهش می‌یابد و سپس نرخ کاهش قدر مطلق شیب کم می‌شود. این بدان معنی است که قبل از نقطه  $\alpha=0/5$  با صرف هزینه کم تنش‌های آبی به‌صورت قابل‌توجهی کاهش می‌یابد ولی پس از این نقطه کاهش تنش‌های آبی مستلزم صرف هزینه زیاد است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با انتخاب  $\alpha=0/5$  میانگین شاخص تنش آبی کشور برابر با  $0/78$  و هزینه‌های حمل‌ونقل برابر با  $42037M\$$  می‌باشد. همچنان‌که در شکل (۴) نشان داده شده است، با انتخاب  $\alpha=0/5$ ، برنامه‌ریزی تنها با تحمل  $8/62\%$  افزایش در هزینه‌های حمل‌ونقل نسبت به طرح

مدل پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده است که علاوه بر حداقل شدن هزینه‌ها، تنش‌های آبی حوضه‌های آبریز در سه سناریوی تغییر اقلیم B1، A1B و A2 حداقل شود. با استفاده از این رویکرد، تنش‌های آبی ضمن حداقل شدن، نسبت به تغییر اقلیم مقاوم می‌گردد. میانگین شاخص تنش آبی کشور روی حوضه‌های آبریز مختلف قبل از توسعه یعنی در سال ۲۰۱۵ برابر با  $1/08$  است. با حل مدل پیشنهادی و تعیین ظرفیت تولید و محل نصب بهینه هر یک از صنایع، شاخص تنش آبی حوضه‌های آبریز در سال ۲۰۳۰ در هر یک از سه سناریوی تغییر اقلیم به‌صورت جداگانه محاسبه می‌گردد. در طرح ۱، میانگین شاخص تنش آبی کشور روی حوضه‌های آبریز مختلف و سناریوهای مختلف تغییر اقلیم برابر با  $0/88$  است. در این طرح هزینه‌های حمل‌ونقل در مقدار کمینه خود و برابر با  $38701M\$$  است. این طرح به‌عنوان طرح مینا در نظر گرفته می‌شود و درصد تغییر میانگین شاخص تنش آبی و هزینه‌های حمل‌ونقل نسبت به این طرح سنجیده می‌شود. در طرح ۳، میانگین شاخص‌های تنش آبی کشور مقدار کمینه خود را دارد که این مقدار برابر با  $0/77$  است. در این طرح هزینه‌های حمل‌ونقل برابر با  $58138M\$$  است. از این‌رو، با تغییر تمرکز از کمینه‌سازی هزینه‌ها به کمینه‌سازی تنش آبی، میانگین شاخص‌های تنش آبی  $12/98\%$  کاهش می‌یابد. این کاهش، هزینه‌های حمل‌ونقل را  $50/22\%$  افزایش می‌دهد.

در شکل (۳) شاخص‌های تنش آبی برای حوضه‌های آبریز کشور برای سناریوی تغییر اقلیم B1 و برای سه طرح مذکور ترسیم شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در طرح ۱، شاخص تنش آبی حوضه آبریز شماره شش (قره‌قوم) در سال ۲۰۳۰ نسبت به سال ۲۰۱۵ در کلیه سناریوهای تغییر اقلیم افزایش دارد. این افزایش، به علت کاهش حجم آب تجدیدپذیر پیش‌بینی شده برای این حوضه آبریز در اثر تغییر اقلیم و در نظر نگرفتن تنش‌های آبی در طرح ۱ است. اما با در نظر گرفتن تنش‌های آبی در حل مسئله در طرح ۳، شاخص تنش آبی حوضه آبریز شماره شش (قره‌قوم) در کلیه سناریوها بیش از  $30\%$  نسبت به طرح مینا کاهش می‌یابد. شکل (۳) کاهش این شاخص را در سناریوی B1 تأیید می‌نماید. این کاهش باعث تغییر وضعیت تنش آبی این حوضه آبریز از بهره‌کشی فاجعه‌بار به بهره‌کشی گزاف در هر سه سناریوی تغییر اقلیم می‌شود. بهبود در وضعیت تنش آبی حوضه آبریز قره‌قوم، سبب افزایش شاخص تنش آبی در حوضه آبریز شماره دو (خلیج فارس) می‌گردد. مهم‌ترین عامل این بهبود، جابه‌جایی بخش عمده‌ای از تولید صنعت فولاد خام از حوضه آبریز قره‌قوم به حوضه آبریز خلیج فارس است. علاوه بر انتقال صنعت فولاد، انتقال صنعت کاغذ به حوضه آبریز خلیج فارس نیز باعث افزایش شاخص تنش

### ۳-۳- تحلیل حساسیت

در این بخش، حساسیت نتایج شبیه‌سازی نسبت به پارامترهای زیر بیان می‌شود

(الف) حداکثر ظرفیت مجاز هر صنعت در هر حوضه آبریز،  
 (ب) حداقل و حداکثر تعداد صنایع قابل توسعه در هر حوضه آبریز  
 (ج) حداکثر حد مجاز شاخص تنش آبی در هر حوضه آبریز مطالعه می‌شود.

آنالیزهای (الف) و (ب) به منظور بررسی تأثیر قیود مربوط به سیاست‌گذاری در توسعه صنایع، طراحی شده‌اند. تحلیل (ج) نیز به منظور بررسی تأثیر محدودیت استفاده از منابع آب طراحی شده است.

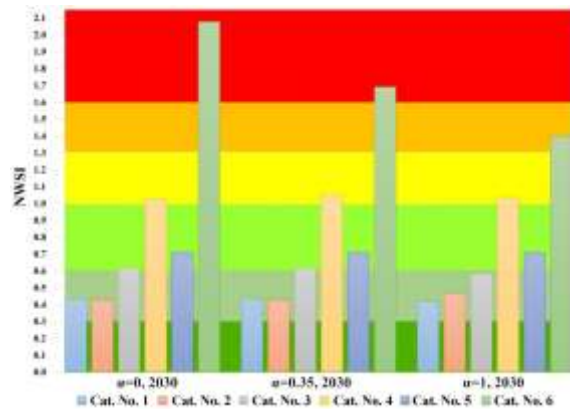
(الف) در این بررسی، حداکثر ظرفیت مجاز برای نصب هر صنعت ۲۰ درصد نسبت به مقدار آن در جدول (۲) افزایش داده شده است. مقادیر داده‌شده در جدول (۲) به‌عنوان مقدار پایه در نظر گرفته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در طرح ۱، هزینه‌های حمل‌ونقل و  $۳/۰۲\%$  نسبت به حالت پایه کاهش پیدا می‌کند. در این حالت میانگین شاخص‌های تنش آبی نسبت به مقدار محاسبه‌شده در حالت پایه  $۱/۵۹\%$  افزایش پیدا می‌کند. در طرح ۳، تنش‌های آبی  $۰/۰۴\%$  کاهش نسبت به حالت پایه در این طرح داشته و هزینه‌های حمل‌ونقل و  $۱/۰۲\%$  نسبت به هزینه محاسبه‌شده برای حالت پایه در این طرح افزایش می‌یابد. همچنین در این طرح حجم برداشت آب در حوضه آبریز خلیج فارس  $۱۴/۳۵\%$  افزایش و در حوضه آبریز فلات مرکزی و دریای خزر بیش از  $۳۰\%$  نسبت حالت پایه کاهش می‌یابد.

(ب) در این بررسی، علاوه بر آزادسازی قید حداکثر ظرفیت مجاز هر صنعت، حداکثر و حداقل تعداد صنعت مجاز قابل توسعه در هر حوضه آبریز به ترتیب برابر با ۵ و ۰ در نظر گرفته می‌شود. در این حالت در طرح ۳، به جز بخشی از صنعت شکر که در حوضه آبریز فلات مرکزی جایابی می‌شود، کلیه صنایع در حوضه آبریز خلیج فارس جایابی می‌شوند. علی‌رغم جایابی اغلب صنایع در حوضه آبریز خلیج فارس، با توجه به تأثیر تغییر اقلیم، وضعیت بهره‌کشی در هیچ‌یک از سناریوهای تغییر اقلیم وخیم‌تر نمی‌شود.

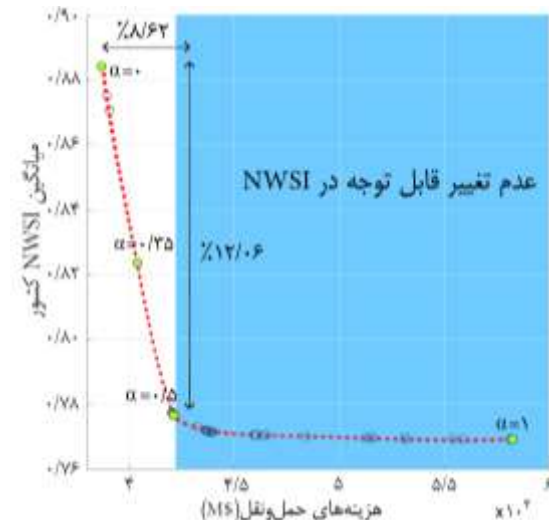
(ج) در این بررسی، با کاهش حد مجاز شاخص تنش آبی برای کلیه حوضه‌های آبریز به عدد ۲، در طرح ۱، میانگین شاخص تنش آبی کل کشور  $۱/۶۵\%$  نسبت به مقدار محاسبه‌شده در حالت پایه کاهش می‌یابد. این کاهش، باعث افزایش  $۱/۰۳\%$  در هزینه‌های حمل‌ونقل نسبت به حالت پایه این طرح می‌شود. به تبع محدود شدن برداشت

مبنا قادر به  $۱۲/۰۶\%$  کاهش در میانگین شاخص تنش آبی نسبت طرح مبنا است.

در جدول (۸)، ظرفیت توسعه هر یک از صنایع در هر یک از حوضه‌های آبریز در طرح‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. همچنین در این جدول، هزینه‌های حمل‌ونقل و میزان آب برداشت‌شده صنایع بزرگ در هر حوضه آبریز درج شده است. به دلیل ثابت بودن ظرفیت توسعه صنایع و محدود بودن میزان واردات محصولات، مطابق جدول (۸) مجموع آب مصرف‌شده در کل کشور در سه طرح بررسی‌شده یکسان می‌باشد. از مقایسه این نکته با نمودار ارائه‌شده در شکل (۳)، اهمیت در نظر گرفتن هم‌بست آب-صنعت و تأثیر تغییر اقلیم در برنامه‌ریزی‌های بلندمدت بیش‌ازپیش مشخص می‌گردد، یعنی در طرح ۳، علی‌رغم ثابت بودن حجم آب برداشت‌شده نسبت به طرح‌های دیگر، با جایابی مناسب صنایع، میانگین شاخص تنش آبی حدود ۱۲ درصد نسبت به طرح مبنا کاهش می‌یابد.



شکل ۳- مقایسه شاخص تنش آبی در سال ۲۰۳۰ برای سناریوی B1



شکل ۴- جبهه پرتو تابع هدف (۲۳)

آب، تولید محصولات در حوضه آبریز قره‌قوم محدود می‌شود. در نتیجه محدودیت برداشت آب در این حوضه می‌شود. درنتیجه محدودیت برداشت آب در این حوضه می‌شود. درنتیجه محدودیت برداشت آب در این حوضه می‌شود.

آب، تولید محصولات در حوضه آبریز قره‌قوم محدود می‌شود. در نتیجه محدودیت برداشت آب در این حوضه می‌شود. درنتیجه محدودیت برداشت آب در این حوضه می‌شود.

جدول ۸- ظرفیت توسعه تولید صنایع برای حوضه‌های آبریز کشور در هر طرح

تمرکز بر کاهش هزینه‌ها (طرح ۱)							
حوضه	فولاد خام (Mton)	سیمان (Mton)	قند و شکر (Mton)	کاغذ (Mton)	پالایش نفت (Mton)	هزینه‌های حمل‌ونقل (M\$)	آب برداشت شده توسعه صنعت (Mton)
۱	۰	۴۹/۴	۰/۷۸	۰	۲۳۳/۶	۲۶۸/۶	۲۶۸/۶
۲	۰	۰	۰/۷۵	۰	۰	۲۴/۱	۲۴/۱
۳	۰	۱۱۵/۳	۰	۰	۱۰۰/۱	۱۲۳/۲	۱۲۳/۲
۴	۲۰/۵	۰	۰	۰	۰	۵۴۳/۹	۵۴۳/۹
۵	۰	۰	۰	۰/۷۵	۰	۴/۱۴	۴/۱۴
۶	۴۷/۹	۰	۰	۱/۷۶	۰	۱۲۷۸/۹	۱۲۷۸/۹
تمرکز هم‌زمان بر کاهش هزینه‌ها و تنش‌های آبی (طرح ۲)							
۱	۰	۴۹/۴	۰/۷۸۴	۰	۲۳۳/۶	۲۶۸/۶	۲۶۸/۶
۲	۰	۰	۰/۷۵	۰	۰	۲۴/۱	۲۴/۱
۳	۰	۱۱۵/۳۷	۰	۰	۱۰۰/۱	۱۲۳/۲	۱۲۳/۲
۴	۴۷/۸۹۴	۰	۰	۰	۰	۱۲۶۹/۲	۱۲۶۹/۲
۵	۰	۰	۰	۰/۷۵	۰	۴/۱۴	۴/۱۴
۶	۲۰/۵۲۶	۰	۰	۱/۷۶	۰	۵۵۳/۶	۵۵۳/۶
تمرکز بر کاهش تنش‌های آبی (طرح ۳)							
۱	۰	۴۹/۴	۰	۰	۰	۹/۹	۹/۹
۲	۴۷/۹	۰	۰/۷۸	۱/۰۰۴	۲۳۳/۶	۱۵۳۳/۴	۱۵۳۳/۴
۳	۰	۰	۰	۰/۵	۰	۲/۷۶	۲/۷۶
۴	۲۰/۵	۱۱۵/۳	۰/۷۵	۰	۱۰۰/۱	۶۹۱/۲	۶۹۱/۲
۵	۰	۰	۰	۰/۵	۰	۲/۷۶	۲/۷۶
۶	۰	۰	۰	۰/۵	۰	۲/۷۶	۲/۷۶

می‌کند. این تأثیر به‌گونه‌ای است که در طرح ۳ میانگین شاخص تنش آبی حوضه آبریز قره‌قوم بیش از ۳۰٪ کاهش می‌یابد. با توجه به این که مسئله مهار تنش‌های آبی در قالب یک مسئله بهینه‌سازی چندهدفه مدل‌سازی شده است، امکان مصالحه بین دو هدف متعارض کاهش میانگین تنش‌های آبی و کاهش هزینه‌های حمل‌ونقل برای برنامه‌ریز فراهم شده است. جبهه پرتو نشان می‌دهد که با انتخاب  $\alpha=0/5$  می‌توان با تحمل فقط ۸/۶۲٪ افزایش در هزینه‌های حمل‌ونقل، میانگین شاخص‌های تنش آبی کشور را ۱۲/۰۶٪ نسبت به طرح مبنا کاهش داد. این نتیجه کاهش قابل توجه تنش‌های آبی با افزایش حداقلی هزینه را به‌همراه دارد. شاخص تنش آبی محاسبه‌شده برای سناریوهای تغییر اقلیم مختلف، تأثیر تغییر اقلیم در برنامه‌ریزی بلندمدت را نشان می‌دهد. بیشترین تأثیر تغییر اقلیم در تنش آبی حوضه‌های آبریز فلات مرکزی و مرزی شرق است. این تأثیر باعث بهبود وضعیت تنش آبی این حوضه‌ها در کلیه طرح‌ها است. نتایج حاصله کارایی مدل پیشنهادی را تأیید می‌کنند. لذا به‌منظور دستیابی به توسعه پایدار،

#### ۴- خلاصه و جمع‌بندی

هدف این مقاله، ارائه یک مدل برای مهار تنش‌های آبی با مکان‌یابی مناسب صنایع بزرگ با توجه به تغییر اقلیم است. به‌منظور مدل‌سازی تأثیر توسعه صنایع بزرگ و تغییر اقلیم بر تنش‌های آبی، شاخص تنش آبی SDG 6.4.2، اصلاح و استفاده شده است. مدل پیشنهادی به‌گونه‌ای طراحی شده است که نتایج حاصله نسبت به سناریوهای تغییر اقلیم در نظر گرفته شده مقاوم باشد. این مدل برای سه طرح تمرکز کامل بر کمینه‌سازی هزینه‌ها (طرح ۱- طرح مبنا)، تمرکز بر کمینه‌سازی هزینه‌ها و تنش‌های آبی (طرح ۲) و تمرکز کامل بر کمینه‌سازی تنش‌های آبی (طرح ۳) برای کشور ایران شبیه‌سازی شده است. مقایسه شبیه‌سازی طرح‌های ۱ و ۳ نشان‌دهنده تأثیر در نظر گرفتن هم‌بست آب-صنعت در مهار تنش‌های آبی کشور است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در طرح ۳ میانگین شاخص‌های تنش آبی کشور ۱۳٪ نسبت به طرح مبنا کاهش می‌یابد. در این طرح، هزینه‌های حمل‌ونقل ۵۰٪ نسبت به طرح مبنا افزایش پیدا

- Daneshzand F, Shoeleh R, "Multifacility location problem", Facility Location. Springer, 2009, 69-92.
- Dickens C, Smakhtin V, Biancalani R, Villholth KG, Eriyagama N, "Incorporating environmental flows into "Water Stress", Indicator 6.4. 2: Guidelines for a Minimum Standard Method for Global Reporting", FAO, 2019.
- Donovan M, "SUGAR | refining of sugarbeet and sugarcane. in: caballero b (ed) encyclopedia of food sciences and nutrition (Second Edition)", Oxford: Academic Press, 2003, 5659-5665.
- EIA, "Petroleum supply monthly archives", U.S. Energy Information Administration (EIA), 2019.
- FAO database, Available online at: <http://www.fao.org/>.
- Global Cement News, "Iranian official says trade sanctions have not slowed cement exports. global cement news", 2019. Available at: <https://www.globalcement.com/news/item/8580-iranian-official-says-trade-sanctions-have-not-slowed-cemen>.
- Global Cement Staff, "Analysis: gimmie water-water conservation in the cement industry", Global Cement staff, 2013.
- Hosseini SM, Nezamoleslami R, "Water Footprint and Virtual Water Assessment in Cement Industry: A Case study in Iran", Journal of cleaner production, 2018, 172, 2454-2463.
- Imbabi MS, Carrigan C, McKenna S, "Trends and developments in green cement and concrete technology", International Journal of Sustainable Built Environment, 2012, 1 (2), 194-216.
- IPCC, "IPCC special report", Cambridge University, Cambridge, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.
- IRERC, "Third national communication to united nations framework convention on climate change (UNFCCC)", No. 152, Iran Environmental Research Center (IRERC), Pardisan Eco-park, Hakim Expressway, Tehran, Iran, 2017.
- Jiang C, Xiong L, Wang D, Liu P, Guo S, Xu C-Y, "Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters", Journal of Hydrology, Elsevier, 2015, 522, 326-338.
- Kim K, Kim H, Lee H, Jun SM, Hwang S, Song JH, Kang MS, "Development and assessment of watershed management indicators using the budyko framework parameter", Sustainability, 2021, 13 (7), 3864.
- Lara CL, Trespalacios F, Grossmann IE, "Global optimization algorithm for capacitated multi-facility continuous location-allocation problems", Journal of Global Optimization, 2018, 71 (4), 871-889.
- Liu L, Hejazi M, Iyer G, Forman BA, "Implications of water constraints on electricity capacity expansion in the united states", Nature Publishing Group, Nature Sustainability, 2019, 2 (3), 206-213.
- Manda BMK, Blok K, Patel MK, "Innovations in papermaking: an lca of printing and writing paper from conventional and high yield pulp", Science of the Total Environment, 2012, 439, 307-320.
- Mena A, "The utilisation of sugarcane by-products as در نظر گرفتن همبست آب و صنعت در مسائل برنامه‌ریزی بلندمدت ضرورت دارد.
- ### ۵- مراجع
- حمیدی کاریزنوئی ز، "ارزیابی روش‌های تجربی برآورد تبخیر-تغرق واقعی سالانه در مقیاس بزرگ به کمک تبخیر-تغرق برآوردی از مدل SWAT"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، گروه مهندسی آب، ۱۳۹۲.
- رنجبر ا، حکیم‌پور ف و طلعت‌اھری س، "ارزیابی و مقایسه الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری در مکان‌یابی تسهیلات مطالعه موردی: بانک‌ها"، اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، ۱۳۹۶، ۲۶ (۱۰۱)، ۴۵-۵۹.
- شرکت مدیریت منابع آب ایران، دفتر مطالعات پایه، گروه مطالعات آب‌های زیرزمینی، <http://wrbs.wrm.ir>، دسترسی برخط.
- شرکت ملی فولاد ایران، "نتایج مطالعات پایش طرح جامع فولاد کشور (پایش سال ۱۳۹۵)"، شرکت ملی فولاد ایران، ۱۳۹۶.
- مرکز آمار ایران، "سالنامه آماری کشور"، ۱۳۹۵، تهران، مرکز آمار ایران، دفتر ریاست، روابط عمومی و همکاری‌های بین‌الملل، ۱۳۹۷.
- معاونت برنامه‌ریزی وزارت صنعت، معدن و تجارت (صمت)، "گزارش مصرف آب در بخش صنعت"، معاونت برنامه‌ریزی وزارت صنعت، معدن و تجارت، دفتر آمار و فرآوری داده‌ها.
- وزارت نیرو، "سالنامه آماری آب کشور"، ۱۳۹۳، وزارت نیرو، دفتر برنامه‌ریزی کلان آب و آبفاوی وزارت نیرو، ۱۳۹۷.
- Arnell NW, Van Vuuren DP, Isaac M, "The implications of climate policy for the impacts of climate change on global water resources", Global Environmental Change, 2011, 21 (2), 592-603.
- Abbaszadeh P, Maleki A, Alipour M, Maman YK, "Iran's oil development scenarios by 2025", Energy Policy, 2013, 56, 612-622.
- Accenture, "Steel Demand Beyond 2030", Accenture Sstrategy, 2017.
- Akyüz MH, "The capacitated multi-facility weber problem with polyhedral barriers: efficient heuristic methods", Computers and Industrial Engineering, 2017, 113, 221-240.
- Ansari N, Seifi A, "A System Dynamics Analysis of Energy Consumption and Corrective Policies in Iranian Iron and Steel Industry", Energy, 2012, 43 (1), 334-343.
- Aras N, Altinel İ K, Orbay M, "New heuristic methods for the capacitated multi - facility weber problem", Naval Research Logistics (NRL), 2017, 54, 2, 21-32.
- Boyd S, Vandenberghe L, "Convex Optimization", Cambridge University Press, 2004.
- British Geological Survey, "Cement Raw Materials", British Geological Survey, 2005.
- Colla V, Matino I, Branca TA, Fornai B, Romaniello L, Rosito F, "Efficient Use of Water Resources in the Steel Industry, Water, 2017, 9 (11), 874-899.

- (4), 375-380.
- WSA, "Fact Sheet: Steel and Raw Materials", World Steel Association (WSA), Brussels, Belgium, 2019.
- WSA, "Water Management in the Steel Industry", World Steel Association (WSA), Brussels, Belgium, 2015.
- Yao J, Murray AT, "A spatial optimization approach for solving a multi-facility location problem with continuously distributed demand", Springer, *Innovations in Urban and Regional Systems*, 2020, 113-135.
- Zarei M, "The water-energy-food nexus: A holistic approach for resource security in Iran, Iraq, and Turkey", *Water-Energy Nexus*, 2020, 3, 81-94.
- substitutes for cereal in animal feed", *Proceedings of the FAO Expert Consultation on the Substitution of Imported Concentrate Feeds in Animal Production Systems in Developing Countries: FAO Animal Production and Health Paper*, 1987, 63.
- Mianabadi A, Coenders-Gerrits M, Shirazi P, Ghahraman B, Alizadeh A, "A global budyko model to partition evaporation into interception and transpiration", *Copernicus GmbH, Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23 (12), 4983-5000.
- Miara A, Macknick JE, Vörösmarty CJ, Tidwell VC, Newmark R, Fekete B, "Climate and water resource change impacts and adaptation potential for us power supply", *Nature Publishing Group, Nature Climate Change*, 2017, 7 (11), 793-798.
- Miller SA, Horvath A, Monteiro PJM, "Impacts of Booming Concrete Production on Water Resources Worldwide", *Nature Publishing Group, Nature Sustainability*, 2018, 1 (1), 69-76.
- OECD, "OECD-FAO agricultural outlook 2018-2027", *Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) & Food and Agriculture Organization (FAO)*, 2018.
- OPEC, "World oil outlook 2040", *Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC)*, Vienna, Austria, 2017.
- OPEC, "OPEC annual statistical bulletin (2019)", *Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC)*, Vienna, Austria, 2019.
- Osborne T, Pachón MC, Araya GE, "What Drives the High Price of Road Freight Transport in Central America?", *World Bank Policy Research Working Paper*, 2014, 6844.
- Pan SY, Snyder SW, Packman AI, Lin YJ, Chiang PC, "Cooling water use in thermoelectric power generation and its associated challenges for addressing water-energy nexus", *Water-Energy Nexus*, 2018, 1 (1), 26-41.
- Panahi DM, Kalantari Z, Ghajarnia N, Seifollahi-Aghmiuni S, Destouni G, "Variability and change in the hydro-climate and water resources of Iran over a recent 30-year period", *Nature Publishing Group, Scientific reports* 2020, 10 (1), 1-9.
- Siddiqi A, Anadon LD, "The Water-Energy Nexus in Middle East and North Africa", *Elsevier, Energy Policy*, 2011, 39 (8), 4529-4540.
- Smakhtin V, "Taking into account environmental water requirements in global-scale water resources assessments", *Iwmi*, 2004.
- Sun P, Elgowainy A, Wang M, Han J, Henderson RJ, "Estimation of US Refinery Water Consumption and Allocation to Refinery Products", *Fuel*, 2018, 221, 542-557.
- USGS, "2015 Minerals Yearbook, Cement [Advance Release]", *United States Geological Survey (USGS)*, 2018.
- Van Oel PR, Hoekstra AY, "The Green and Blue Water Footprint of Paper Products: Methodological Considerations and Quantification", *Unesco-IHE Institute for Water Education*, 2010, 46.
- Van Vliet MTH, Wiberg D, Leduc S, Riahi K, "Power-Generation System Vulnerability and Adaptation to Changes in Climate and Water Resources", *Nature Publishing Group, Nature Climate Change*, 2016, 6

## EXTENDED ABSTRACT

# Country's Catchment Water Stress Management by Large Industries Proper Locating Considering Climate Change

Mohammad Ali Zangiabadi<sup>a</sup>, Majid Oloomi Buygi<sup>a,\*</sup>, Kamran Davari<sup>b</sup>, Mohammad Hossein Javidi Dasht Bayaz<sup>a</sup>

<sup>a</sup> *Electrical Engineering Group, Engineering Faculty, Ferdowsi University of Mashhad*

<sup>b</sup> *Water Engineering Group, Agriculture Faculty, Ferdowsi University of Mashhad*

**Received:** 23 November 2021; **Review:** 03 December 2021; **Accepted:** 14 December 2021

---

### Keywords:

Budyko-type, Climate change, Renewable water, Sustainable development, Water-Industry Nexus.

---

## 1. Introduction

The Earth's climate has been changing since began drastically. Global warming and change in precipitation pattern are consequence of climate change. Climate change and over-withdrawal of water for industrial purposes has increase water stresses around the world. Long-term water stresses may cause disasters. Hence it is necessary to control water stress. This paper proposes a model to manage water stress of different catchments by proper locating of large industries considering climate change.

## 2. Methodology

In this paper, a model for managing water stresses of different catchments by locating large industries considering climate change is presented. SDG 6.4.2 water stress index (Dickens et al., 2019), is modified based on industries development and employed for measuring water stresses of catchments. Water resources availability that is directly affected by climate change is included in this index by predicting the volume of renewable water resources in different climate change scenarios. In order to model the long-term impact of climate change on renewable water resources availability climate change scenarios B1, A1B and A2 that are defined by the IPCC are considered (IPCC, 2000). To downscale the climate change scenarios, country is divided into selected points with a spatial step of 0.5 degrees. Then, Meteonorm7 is used to extract precipitation height and average, maximum and minimum monthly temperature for the points in each climate change scenario. The amount of actual evaporation of precipitation is calculated using the one-parameter Budyko-type approach known as "fu equation" (Jiang et al., 2015). The development of large industries in the country is modeled through a long-term multi-objective planning problem. In this problem production capacity of each industry and its location in the country are determined by minimizing catchments' water stress indices and transportation costs of raw materials and products considering climate change. The procedure of the proposed model for managing water stress indices is shown in Fig. 1.

---

\* Corresponding Author

E-mail addresses: m.a.zangiabadi@mail.um.ac.ir (Mohammad Ali Zangiabadi), m.ooloomi@um.ac.ir (Majid Oloomi Buygi), k.davary@um.ac.ir (Kamran Davari), h-javidi@um.ac.ir (Mohammad Hossein Javidi Dasht Bayaz).

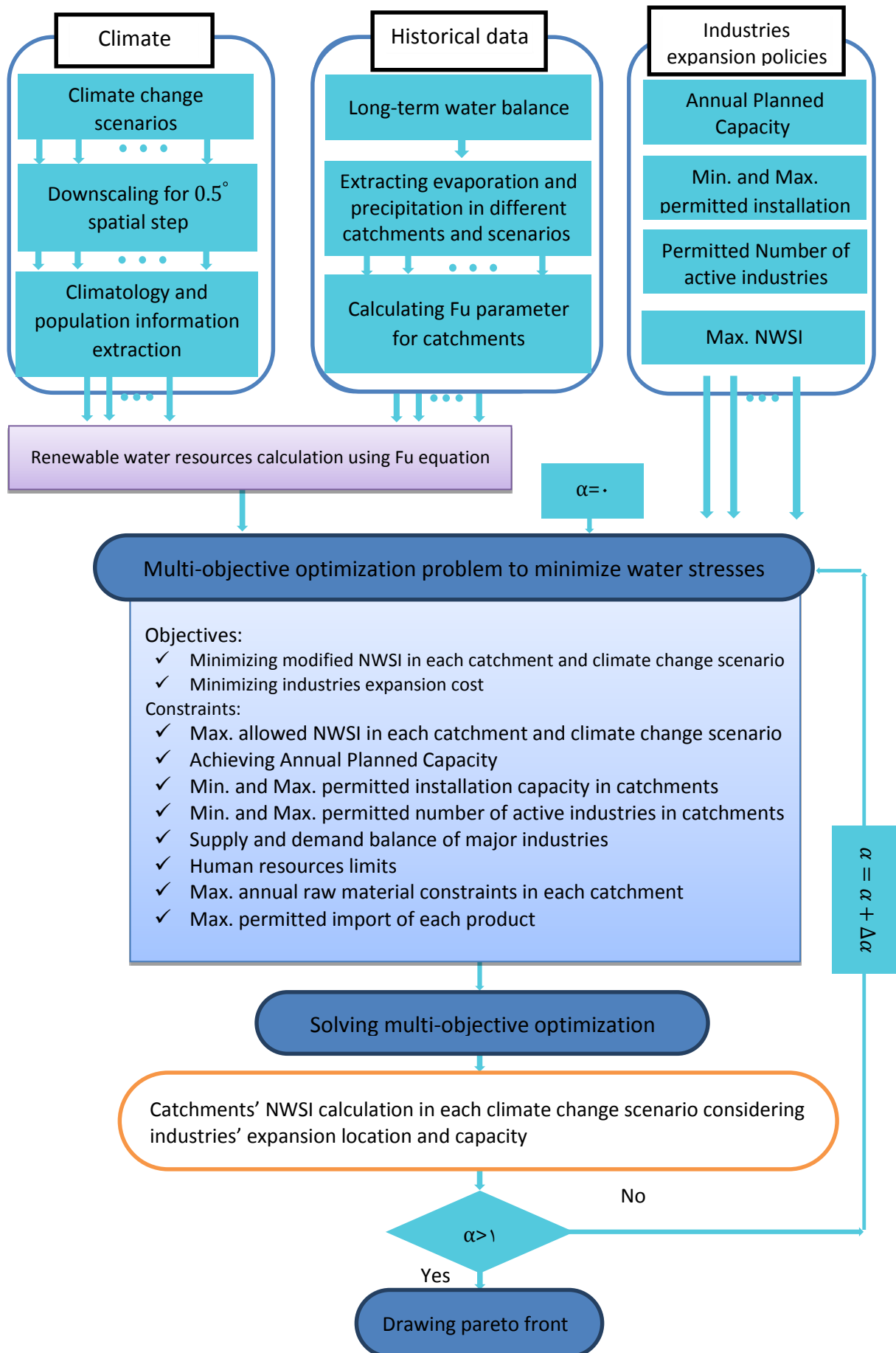


Fig. 1. Purposed approach overview



### 3. Results and discussion

The proposed model is implemented on Iran to manage water stress of the six main catchments by locating of the steel, cement, sugar, paper and refinery industries as the significant water consuming industries for 2030. The proposed model is simulated in the GAMS in conjunction with MATLAB.

Simulation results show although industry sector development increases water withdrawal, water stress indices can be reduced by optimal sizing and locating of large industries. Simulation results also show that if planners focus on cost minimization, the average water stress index of the country over different scenarios and different catchments will be equal to 0.8840 in 2030. In this case, total annual transportation cost will be at its minimum possible amount that is M\$38.627. If planners focus on minimizing catchments' water stress indices, the average water stress index of country in 2030 reduces to 0.7692. In this case, total transportation cost will be M\$58.138. Therefore, by shifting the focus from cost minimization to water stress minimization, the average water stress index decreases by 12.98%. This reduction increases transfer costs by 50.22%. The calculated water stress index under different assumptions for the climate change scenario B1 in 2030 shows that the water stress status of catchment No.6 is improve from "Extremely Overexploited" to "Heavily Overexploited" by focusing on water stress reduction while other catchment's status have no changes. The ability to compromise between water stresses and transportation cost is provided for planners by drawing the pareto-front of objectives. The objectives' paerto-front shows that the planner can reduce the average water stress index by 12.06% of by tolerating only 8.62% increase in transporting costs.

### 4. Conclusions

In this article, the water stresses of the country's main catchments are managed by proper sizing and locating large industries considering climate change. The proposed model, which is robust to climate change scenarios, is defined in form of long-term multi-objective optimization problem. The objectives are to minimize water stress indices as well as raw material and products transportation costs. The water stress indices are limited to ensure sustainability of water resources. The supply and demand balance of industrial products is modeled for each catchment considering inter and intra catchment product transportations and product import. The amounts of imported products are limited based on the planner's policy. Industries and population decentralization are modeled by considering constraints for minimum and maximum production capacity and number of active industries in each catchment.

The main finding of this paper is optimal sizing and locating of large industries despite of increase in water withdrawal due to development of industries can reduce water stress indices. The proposed model provides the planner the ability to make a trade-off between water stresses and transportation cost. Comparing the following two sentences highlights the importance of this trade-off. Minimization of water stresses reduces the average water stress index by 12.98% and increases total transportation cost by 50.22%. However, compromising between water stresses and costs reduces the average water stress index by 12.06% and increases total transportation cost only by 8.62%.

### 5. References

- Dickens C, Smakhtin V, Biancalani R, Villholth KG, Eriyagama N, "Incorporating environmental flows into "Water Stress", Indicator 6.4. 2: Guidelines for a Minimum Standard Method for Global Reporting", FAO, 2019.
- IPCC, "IPCC special report", Cambridge University, Cambridge, Intergovernmental Panel on Climate Change, 2000.
- Jiang C, Xiong L, Wang D, Liu P, Guo S, Xu C-Y, "Separating the impacts of climate change and human activities on runoff using the Budyko-type equations with time-varying parameters", Journal of Hydrology, Elsevier, 2015, 522, 326-338.