

## Assessment of Changes in Water Resources of the Upper Aras Transboundary Basin Under the Influence of Increasing Cultivated Area, Using the SWAT Model and Global Climate Databases

M. Hajihoseini<sup>1</sup>, S. Morid<sup>2\*</sup>, S. Emamgholizadeh<sup>3</sup>, E. Mahjoobi<sup>4</sup>, B. Amirahmadian<sup>5</sup>, and H. Gholami<sup>6</sup>

### Abstract

The Upper Aras transboundary Basin, shared between Turkey and Armenia, has undergone significant agricultural development in recent decades, primarily in Turkey under the DAP project. This development has reduced water outflow from the basin, negatively affecting downstream countries. Due to the limited access to ground-based data, this study investigated these changes in water resources using CFSR and CRU global climate data, Landsat satellite imagery, and the SWAT model, as well as extensive review of the available regional reports. Results indicated that over the past 15 years, the basin has experienced increased temperatures and a slight rise in average rainfall. Also, it was revealed that the area of irrigated croplands has increased from 140,000 hectares in 1983–2008 to 230,000 hectares in 2009–2018. These changes were applied to the calibrated SWAT model in three scenarios. Among them, the results of one of the development scenarios defined as the expansion of the current cropland area, showed a decrease in the annual runoff volume of Upper Aras River from 2605 to 2155 MCM/year, representing an 18% reduction in the annual flows. Notably, the largest drop in monthly flows happened in May which was 26%. Furthermore, average agricultural water consumption in Turkey's Erzurum and Kars provinces was estimated at 494 mm/ha and 458 mm/ha, respectively, highlighting the impact of agricultural expansion under the DAP project on water resources.

**Keywords:** Aras Transboundary Basin, Turkish DAP Project, Land Use Changes, SWAT Model, CFSR and CRU Climate Database.

Received: December 11, 2024

Accepted: January 25, 2025

## ارزیابی تغییرات منابع آب حوضه فرامرزی ارس علیا تحت تأثیر افزایش سطح زیرکشت، با استفاده از مدل SWAT و پایگاه‌های اقلیمی جهانی

محمد رضا حاجی حسینی<sup>۱</sup>، سعید مرید<sup>۲\*</sup>، صمد امامقلی زاده<sup>۳</sup>، عماد محجوبی<sup>۴</sup>، بهرام امیراحمدیان<sup>۵</sup>، هوشنگ غلامی<sup>۶</sup>

### چکیده

حوضه آبریز فرامرزی ارس علیا مشترک بین کشورهای ترکیه و ارمنستان است که طی دهه‌های اخیر شاهد توسعه اراضی کشاورزی، عمدتاً در قلمرو کشور ترکیه و ذیل طرح DAP بوده است. این توسعه متعاقباً کاهش خروجی آب از این بخش از حوضه ارس را بدنبال داشته که اثرات منفی آن متوجه کشورهای پائین دست می‌شود. بررسی این تغییرات، هدف این تحقیق را رقم می‌زند. اما، با توجه به عدم دسترسی به داده‌ها و اطلاعات مشاهده‌ای؛ از پایگاه‌های داده اقلیمی CFSR و CRU، محدود داده‌های زمینی، تصاویر ماهواره‌ای لندست و مدل جامع SWAT استفاده شده است. نتایج نشان داد که حوضه افزایش دما و رشد جزئی در متوسط بارش را در ۱۵ سال اخیر تجربه کرده است. همچنین، مشخص شد که سطح زیرکشت اراضی آبی از ۱۴۰ هزار هکتار برای دوره ۲۰۰۸–۱۹۸۳ به ۲۳۰ هزار هکتار برای دوره ۲۰۰۹–۲۰۱۸ افزایش یافته است. این تغییرات محیطی در مدل واسنجی شده SWAT در سناریوهای مختلف تغییر کاربری اراضی اعمال شد. نتایج یکی از سناریوهای توسعه (توسعه سطح زیرکشت فعلی) نشان داد حجم رواناب سالانه ارس علیا از ۲۶۰۵ به ۲۱۵۵ میلیون مترمکعب در سال کاهش یافته است که نشان‌دهنده کاهش ۱۸٪ آورد رودخانه است. رژیم جریان ماهانه رودخانه نیز در ماه می با ۲۶٪، بیشترین کاهش را تجربه کرده است. علاوه بر این، متوسط مصرف آب کشاورزی در بخش غربی (استان ارزنوم) و شرقی (استان قارص) ارس علیا در ترکیه به ترتیب ۴۹۴ و ۴۵۸ میلی‌متر در هکتار برآورد شد که تأثیر توسعه‌های آبی کشاورزی ذیل پروژه DAP را بر منابع آب حوضه برجسته می‌کند.

**کلمات کلیدی:** حوضه فرامرزی ارس، پروژه DAP ترکیه، تغییرات کاربری اراضی، مدل شبیه‌سازی SWAT، پایگاه داده اقلیمی CFSR و CRU.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۹/۲۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۱۶

1- Ph.D. student in Civil Engineering, Department of Water and Environmental Engineering, Shahrood University of Technology, Semnan, Iran.

2- Professor, Department of Water Resources Engineering and Management, Faculty of Agriculture, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. Email: s\_morid@hotmail.com

3- Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Semnan, Iran.

4- Assistant Professor, Department of Water and Environmental Engineering, Faculty of Civil Engineering, Shahrood University of Technology, Semnan, Iran.

5- Visiting Professor, Faculty of Law and Political Science, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

6- Head of the Northwest Border Rivers Group, Bureau of Transboundary Rivers and Shared Water Resources, Ministry of Energy, Tehran, Iran.

\*- Corresponding Author

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران گرایش مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران.

۲- استاد گروه مهندسی و مدیریت منابع آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه تربیت مدرس تهران، تهران، ایران.

۳- استاد گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران.

۴- استادیار گروه مهندسی آب و محیط زیست، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شاهرود، سمنان، ایران.

۵- استاد مدعو دانشکده حقوق و علوم سیاسی دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

۶- رئیس گروه رودخانه‌های مرزی شمالغرب کشور، دفتر رودخانه‌های مرزی و منابع آب مشترک، وزارت نیرو، تهران، ایران.

\*- نویسنده مسئول

(Neitsch et al., 2005). مدل SWAT در حوضه‌های آبریز متعددی در سطح جهان بکار گرفته شده که از جمله می‌توان به Rossi et al. (2009) اشاره نمود که مدل را به منظور شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه فرامرزی مکنونگ با هدف بررسی سناریوهای مختلف مدیریتی به منظور تسهیل در برنامه‌ریزی و مدیریت مشترک حوضه در چارچوب کمیسیون رودخانه مکنونگ (MRC) پیشنهاد نمودند. این حوضه، بزرگ‌ترین رودخانه شرق آسیا را در خود جای داده است که از ۶ کشور چین، ویتنام، میانمار، لائوس، تایلند و کامبوج عبور می‌کند. Bardossy and Hundecha (2004) در تحقیقی اثر تغییرات کاربری اراضی را بر رواناب حوضه رودخانه مرزی Rhine با استفاده از تصاویر ماهواره لندست، مورد بررسی قرار دادند. به منظور بررسی اثر این تغییرات، دو سناریوی کاربری شامل کاربری مربوط به سال ۱۹۸۵ و نیز افزایش مناطق جنگلی و شهری را در مدل SWAT تعریف کردند. نتایج آن‌ها تحت دو مدل ساخته شده نشان داد که گسترش شهرنشینی منجر به افزایش رواناب‌های پایین در جریان تابستان می‌شود، در حالی که افزایش رواناب‌های بالا در جریان زمستان بسیار کمتر است. از طرف دیگر تشدید جنگل‌کاری، حجم کل رواناب را به‌طور قابل توجهی کاهش داده است.

بدلیل عدم دسترسی به اطلاعات مورد نیاز مانند داده‌های اقلیمی، در حوضه‌های فرامرزی که عمدتاً ناشی از ملاحظات امنیتی است (Matthews, 2013)، تأمین آنها برای شبیه‌سازی‌های فوق با استفاده از پایگاه‌های داده جهانی صورت گرفته است (Akhtar et al., 2009; Bitew et al., 2011; Fadil et al., 2011 and Vu et al., 2012). در این خصوص می‌توان به داده‌های شبکه‌بندی شده NCEP CSFR<sup>3</sup> اشاره نمود. این پایگاه اقلیمی در تحقیقات مختلفی به منظور شبیه‌سازی جریان رودخانه در مدل SWAT مورد استفاده قرار گرفته است (Dile and Srinivasan, 2014; Fuka et al., 2014; Auerbach et al., 2016). پایگاه اقلیمی CRU<sup>4</sup> نیز یکی دیگر از این منابع مورد توجه بوده است که اطلاعات مربوط به بارش و دما در مقیاس ماهانه را بطور جهانی در خود جای داده و در مدل‌های بارش-رواناب مانند SWAT برای تولید جریان رودخانه، مورد استفاده قرار گرفته است (Schuol and Abbaspour, 2007; Fadil et al., 2011; Hajjoseini et al., 2016; Marhaento et al., 2017). استفاده از این مدل، به بررسی تغییرات جریان آب تحت سناریوهای تغییرات کاربری اراضی پرداختند. این محققین نشان دادند که افزایش سطح کشاورزی از ۳۹٪ به ۴۵٪، افزایش مناطق مسکونی از ۱۰٪ به ۴۴٪ و کاهش سطح جنگل‌ها از ۴۸٪ به ۱۶٪، موجب افزایش ضریب رواناب از ۳۵٪ به ۴۴٪ و کاهش نسبت تبخیر-ترقق به بارندگی از ۶۰٪ به ۵۴٪ شده است. بر اساس بررسی آن‌ها با استفاده از روش‌های

حوضه آبریز فرامرزی ارس مشترک میان کشورهای ترکیه، ارمنستان، ایران و آذربایجان قرار دارد که بخش ارس علیا ۲۰٪ از مساحت آن را در برمی‌گیرد. کل منابع آب تجدیدپذیر این حوضه، حدود ۷/۸ میلیارد متر مکعب است (Williams et al., 2006) که نقش بی‌بدیلی در تأمین آب شرب، صنعت و کشاورزی کشورهای ساحلی آن دارد. اهمیت این منابع و منافع آن منتج به پروژه‌های مشترک آبی متعددی از جمله سدهای ارس (مشترک میان ایران و آذربایجان) و آخوریان (مشترک میان ترکیه و ارمنستان) شده که فضای مساعد همکاری را در حوضه رقم زده است. با این حال، وضعیت کمی و کیفی آب این رودخانه، به دلیل رشد جمعیت، توسعه اقتصادی، افزایش پروژه‌های آبی در حال اجرا (Matthews, 2013a) و تغییرات آب و هوایی به شدت تحت فشار بوده (Yu et al., 2015) و طی سال‌های اخیر بستری برای مناقشات شده است. بعلاوه، کشورهای بالادست، در حال اجرای پروژه‌های آبی متعددی در این حوضه هستند. بطور مشخص ترکیه، در این حوضه پروژه بزرگ توسعه آناتولی شرقی موسوم به DAP<sup>1</sup> را در دستور کار دارد (TRCOLD, 2014). هرچند ابعاد آن بطور دقیق مشخص نیست، ولی گزارش‌های محدودی در این خصوص در دسترس است. به عنوان نمونه، بانک جهانی (۱۹۸۳)، توسعه آینده اراضی کشاورزی دشت ایغدیر ترکیه در ارس سفلی ترکیه را با ۵۵ درصد افزایش، از رقم ۳۰ به حدود ۵۳ هزار هکتار پیش‌بینی نموده است. (Water and Dsi (2018) شبکه‌های آبیاری در حال بهره‌برداری در منطقه DAP ترکیه را حدود ۵۲۵ هزار هکتار با طول لوله‌گذاری ۳۸۵ هزار متر گزارش کرده است. همچنین، ساخت ۱۹۶ هزار هکتار شبکه آبیاری جدید و احداث حدود ۶۸۰ هزار هکتار شبکه‌های آبیاری مدرن، برنامه‌ریزی شده است.

توسعه‌های فوق می‌تواند تبعات منفی بر بخش‌های پائین دست حوضه و بخصوص ایران و آذربایجان داشته باشد. درخصوص کمی‌سازی تأثیر طرح‌های توسعه DAP روی پائین دست تحقیقات کمی انجام شده و بخشی از این مطالعات کیفی هستند. اما، تلاش این تحقیق آنست که بتواند با استفاده از اطلاعات و ابزار مناسب حتی‌الامکان تغییرات آبی این طرح‌ها را به‌صورت کمی مورد بررسی قرار دهد.

به‌منظور شبیه‌سازی وضعیت هیدرولوژیکی حوضه‌های فرامرزی تحت تأثیر پروژه‌های توسعه آبی، مدل SWAT<sup>2</sup> از پرکاربردترین آنها است (Arnold, 1993). این مدل، برای بررسی اثرات توسعه سدسازی، توسعه اراضی کشاورزی و شیوه‌های مدیریتی در سطح حوضه و مزرعه بر روی کمیت و کیفیت آب است. که در حوضه‌های پیچیده با شرایط مختلف مدیریتی، کاربری اراضی و نوع خاک کارکرد مناسبی را دارد

همچنین، مصرف آب در بخش کشاورزی و رژیم جریان رودخانه تحت سناریوهای مذکور ارزیابی شد. بدین ترتیب، این تحقیق تلاش خواهد نمود چشم‌اندازی حتی‌الامکان واقعی را از توسعه سدسازی و اراضی آبی در ارس علیا داشته باشد.

## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- منطقه مطالعاتی

وسعت کل حوضه آبریز فرامرزی ارس ۹۷ هزار کیلومتر مربع و طول آن ۱۰۷۲ کیلومتر است که در انتهای حوضه پس از اتصال به رودخانه کورا، به دریای خزر می‌ریزد. طول شاخه اصلی ارس در ترکیه ۵۴۸ کیلومتر است که عمدتاً از استان‌های ارزروم، قارص (زیرحوضه ارس علیا در ترکیه)، ایغدیر و آگری (زیرحوضه ارس سفلی در ترکیه) عبور می‌کند. محدوده مطالعاتی این تحقیق بخش بالادست حوضه ارس تا ایستگاه سورمالو (حدود ۲۰ هزار کیلومتر مربع) است که من بعد ارس علیا اطلاق می‌شود (منطقه سبز رنگ در شکل ۱).

تجزیه و تحلیل آماری، ۷۲ درصد تغییرات جریان آب، به تغییرات کاربری اراضی نسبت داده شد. (Hajihosaini et al. (2020) استفاده از پایگاه CRU، تصاویر ماهواره‌ای لندست و SWAT، به ارزیابی اثرات تغییرات کاربری اراضی و پارامترهای اقلیمی حوضه فرامرزی هیرمند در چهار سناریوی مختلف، پرداختند. نتایج نشان داد که با افزایش ۶۴ هزار هکتاری سطح زیر کشت محصولات آبی، جریان سالانه رودخانه ۳۴۶ میلیون مترمکعب کاهش یافته است. در مقابل تبخیر و تعرق در دوره مذکور از ۵۶۹۰ به ۷۳۲۰ مترمکعب در هکتار افزایش یافته است که از دلایل اصلی آن می‌توان به زمین‌هایی با کشت دو بار در سال اشاره نمود.

بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق ارزیابی تغییرات منابع آب حوضه فرامرزی ارس علیا تحت تأثیر افزایش سطح زیر کشت است. بدین منظور ابتدا کارکرد پایگاه‌های اقلیمی جهانی شامل NCEP CSFR و CRU با استفاده از داده‌های زمینی محدود بررسی می‌شوند. سپس با استفاده از مدل شبیه‌ساز SWAT وضعیت هیدرولوژیکی حوضه ارس علیا در ترکیه تحت سناریوهای مختلف توسعه کشاورزی، بررسی شد.



Fig. 1- Upstream of the Aras River transboundary basin  
شکل ۱- منطقه مطالعاتی در بالادست حوضه آبریز فرامرزی ارس (ارس علیا)

رودخانه مرزی ارس علیا در ترکیه، تمام آب فلات تکمان را جمع می‌کند و در جهت شمال در داخل حوضه به سمت شرق کوه‌های ساکالتوتان جریان می‌یابد. پس از عبور از تنگه عمیق و شیب‌دار مسیتلی که بین کوه‌های ساکالتوتان و کوه توپچو قرار دارد، به سمت دشت پاسبینر فرود می‌آید. در اینجا نهر حسن کلا (پاسبینر) به آن پیوسته و در جهت شمال شرقی جریان می‌یابد و از مرزهای استان ارزروم خارج می‌شود. سپس از میان فرورفتگی‌های جنوب فلات ارزروم-قارص می‌گذرد و به مرز ارمنستان می‌رسد. شاخه آخوریان، سرشاخه مهمی است که در این نقطه به رودخانه ارس می‌پیوندد، این شاخه از داخل خاک ترکیه به نام شاخه کارس شروع شده و در ادامه آن، شاخه مرزی آخوریان را تشکیل می‌دهد. سد آخوریان نیز که مشترک بین ترکیه و ارمنستان است، بر روی این شاخه مرزی قرار دارد. در حوضه ارس علیا ترکیه، دشت‌های حاصل‌خیز نظیر قارص وجود دارد که عموماً فلات و دشت‌های وسیعی است که اطراف آن را کوه‌های بلند احاطه کرده است (Aras Basin Drought Management Plan, 2022). بر این اساس تغییرات رقوم ارتفاعی ترکیه از ۷۹۰ تا ۵۱۳۶ متر از سطح دریاهای آزاد است.

متوسط بارندگی بلندمدت سالانه در استان قارص ۴۸۰ میلی‌متر و در استان ارزروم ۴۱۰ میلی‌متر است که در تمامی ماه‌های سال نیز پراکنش بارندگی وجود دارد (Karaoglu, 2014). متوسط دمای میانگین بلندمدت سالانه در استان‌های قارص و ارزروم نیز به ترتیب برابر ۴/۸ و ۵/۳ درجه سانتیگراد است.

## ۲-۲- پروژه توسعه آناتولی شرقی (DAP) ترکیه

پروژه توسعه آناتولی شرقی ترکیه موسوم به DAP حدود ۲۳٪ از مساحت کشور ترکیه را دربرمی‌گیرد و در ۱۴ استان<sup>۵</sup> این کشور با جمعیت حدود ۶ میلیون نفر اجرا می‌شود. عملیات اجرایی این پروژه در سال ۲۰۱۱ با هدف ارتقای سطح توسعه استان‌های مذکور آغاز به کار کرده است. از مهمترین اهداف آبی این پروژه، تجهیز و نوسازی صنعت دامداری، آبیاری زمین‌های کشاورزی، افزایش بازدهی انواع کشت‌ها، توسعه باغداری و استفاده از انرژی‌های نوین است. پروژه‌های توسعه منابع آبی در بالادست رودخانه ارس در ترکیه، شامل ۱۵ سد شناسایی شده بر روی سرشاخه‌ها است. این سدها در مراحل مختلف مطالعه، ساخت و اجرا و یا در حال بهره‌برداری هستند. مجموع حجم ذخیره این مخازن بیش از ۳ میلیارد متر مکعب می‌رسد که برابر با کل آب تجدیدپذیر ترکیه است. به عنوان نمونه سدهای کارس (هدف کشاورزی) و کاراکورت (اهداف برقی و کشاورزی) در استان قارص به ترتیب با حجم‌های ۱۸۲ و ۵۹۰ میلیون مترمکعب، در سال‌های

۲۰۱۸ و ۲۰۲۰ بهره‌برداری شد<sup>۶</sup> و سدهای توزلویچای و اولندی نیز با حجم‌های ۲۶۵ و ۹۸ میلیون متر مکعب با هدف کشاورزی و تنظیم آب پایین‌دست، در حال ساخت است. سدهای مذکور می‌تواند نقش زیادی در تأمین آب برای اراضی پایین‌دست (دشت‌های قارص مرکزی و ایغدیر) داشته باشند. موقعیت سدهای مذکور در شکل (۲) نشان داده شده است. سد سویلمز یکی دیگر از سدهای بزرگ پروژه DAP است که چهارمین سد بزرگ ترکیه می‌باشد. این سد با حجم مخزن ۱۲۹۴ میلیون مترمکعب با اهداف کشاورزی و برقی در حال ساخت بوده و برنامه‌ریزی شده است تا ۳۹ هزار هکتار از اراضی پایین‌دست را آبیاری نماید (DSI, 2023). بازه‌های زمانی مدل‌سازی انجام شده این پژوهش، دوره‌های ۱۹۸۳ تا ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ است که بازه زمانی دوم، تا حدی با شروع عملیات اجرایی پروژه DAP همزمان بوده است، اما همانطور که در بالا ذکر شد، با توجه به تاریخ بهره‌برداری سدهای این کشور که عمدتاً بعد از سال ۲۰۱۸ است و هنوز به‌طور کامل اجرا نشده است، بررسی آن در دست بررسی است و در این پژوهش به‌طور خاص توسعه‌های اراضی آبی تا سال ۲۰۱۸، بدون تبعات سدهای مذکور، بررسی خواهد شد.

## ۳-۲- داده‌ها و اطلاعات مورد استفاده

### ۳-۲-۱- داده‌های هواشناسی و آبسنجی

همانگونه که اشاره شد، داده‌های زمینی محدودی در بالادست حوضه آبریز ارس قابل دسترس است. بر این اساس داده‌های اقلیمی دو پایگاه NCEP<sup>۸</sup> و CRU<sup>۹</sup> پس از ارزیابی با داده‌های زمینی، مورد استفاده قرار گرفت. پایگاه داده CFSR یک مدل جهانی اتمسفری مربوط به مرکز ملی پیش‌بینی محیط زیستی ایالات متحده (NCEP) است که پارامترهای هواشناسی مختلفی نظیر دما، بارش، رطوبت نسبی و غیره را از سال ۱۹۷۹ لغایت ۲۰۱۴ به صورت روزانه و با تفکیک مکانی ۰/۳ درجه ارائه می‌دهد. تعداد پیکسل‌های CFSR در محدوده مطالعاتی این تحقیق، ۳۰ پیکسل و موقعیت مکانی آنها در شکل (۱) مشخص شده است. پایگاه اقلیمی CRU دومین پایگاه داده مورد استفاده در این تحقیق است و در دانشگاه ایست‌آنجلیا (بریتانیا) تهیه و در دسترس قرار گرفته است. CRU از جمله مدل‌های شبیه‌ساز دینامیکی محسوب می‌شود که حداکثر داده‌های هواشناسی زمینی ثبت شده در سطح جهان را به‌کار می‌گیرد. شمار ایستگاه‌های مورد استفاده در CRU متغیر است، به‌طوری‌که حداثی سال‌های ۱۹۰۱ تا ۱۹۸۰، شمار آن ۴۹۵۷ ایستگاه و از سال ۱۹۸۱ به ۱۴۵۷۲ ایستگاه افزایش یافته است (Harris et al., 2014). این پایگاه علاوه بر قدرت تفکیک مکانی بالا، دوره زمانی بلندمدتی را پوشش می‌دهد. نسخه مورد استفاده در

مطالعاتی این تحقیق، ۱۳ پیکسل و موقعیت مکانی آنها در شکل (۱) مشخص شده است.

این تحقیق مقادیر مربوط به بارش، حداقل و حداکثر دمای هوا با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه و در مقیاس ماهانه برای بازه زمانی ۱۹۳۴ لغایت ۲۰۲۳ میلادی است. تعداد پیکسل‌های CRU در محدوده

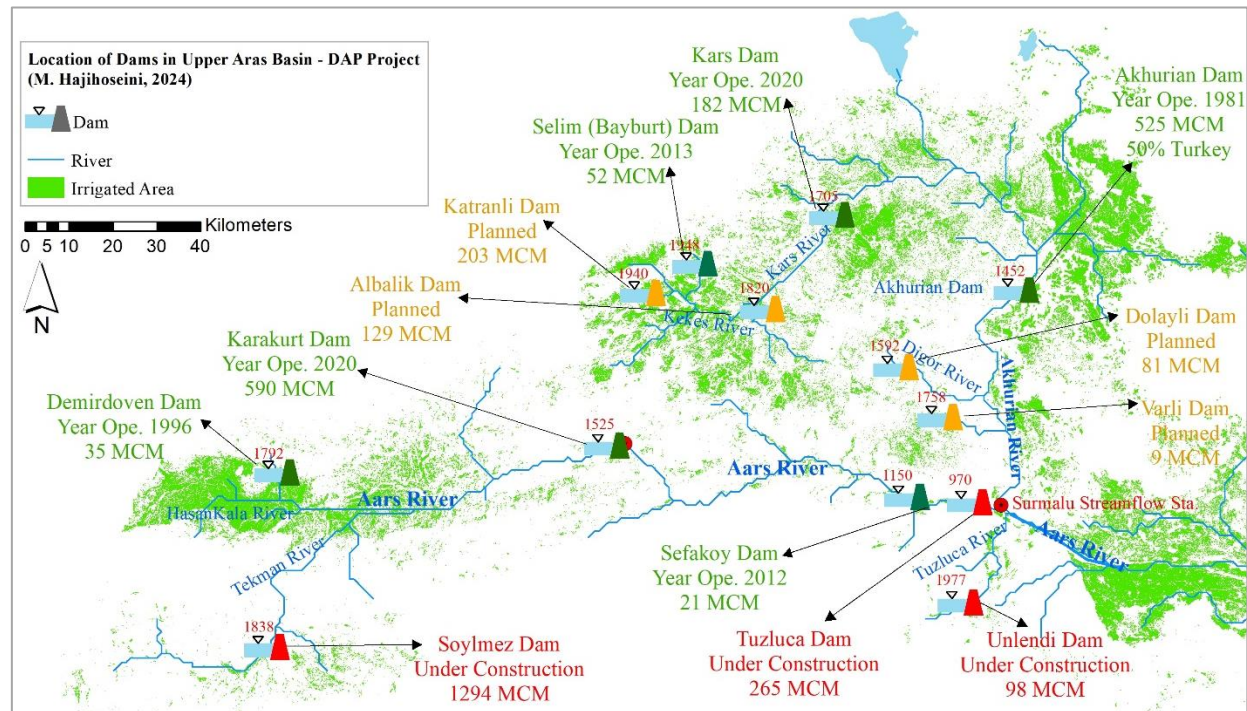


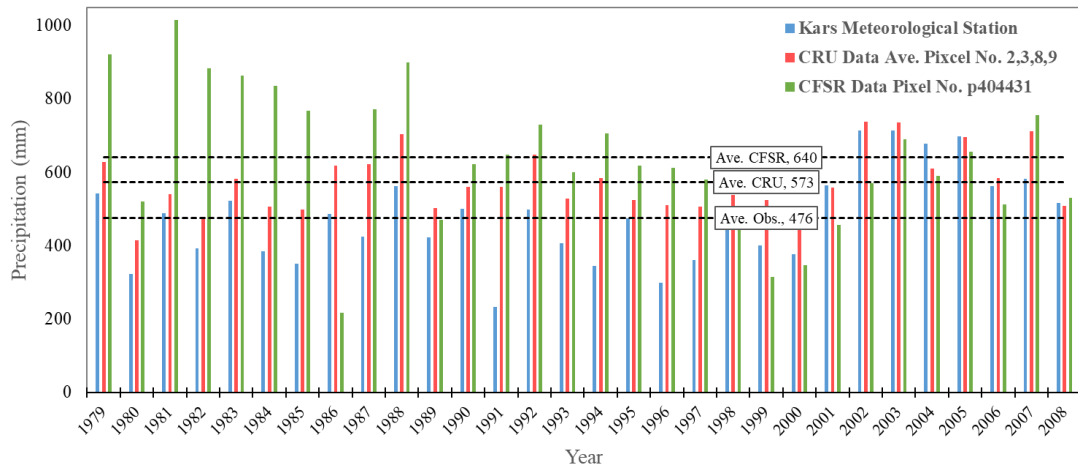
Fig. 2- Location of dams in the Eastern Anatolia Project (DAP) in Upper Aras basin in Turkey

شکل ۲- موقعیت سدهای پروژه توسعه آناتولی شرقی (DAP) در زیرحوضه ارس علیا در ترکیه

(شکل ۱) در ارزیابی‌ها و واسنجی مدل مورد استفاده قرار گرفت. دوره آماری داده‌های دبی ایستگاه‌های مشاهداتی کشور ترکیه در حوضه ارس که از سایت پروژه DAP ترکیه استفاده شده مربوط به بازه زمانی ۱۹۷۹ لغایت ۲۰۱۱ است و همپوشانی ایستگاه‌ها فقط تا بازه زمانی ۲۰۰۸ است. لذا مبنای ارزیابی‌ها و شبیه‌سازی و واسنجی مدل SWAT نیز در بازه زمانی ۳۰ سال مذکور انجام شد. بر این اساس دوره آماری ۱۹۷۹ تا ۱۹۸۲ برای آماده‌سازی مدل، ۱۹۸۳ تا ۱۹۹۸ برای واسنجی و ۱۹۹۹ تا ۲۰۰۸ برای اعتبارسنجی مدل در مقیاس ماهانه برای هر دو ایستگاه کاراکورت (در بالادست) و سورمالو (در پایین‌دست) مورد استفاده قرار گرفت. میانگین آورد سالانه ایستگاه مشاهداتی کاراکورت طی دوره مذکور، برابر ۴۹ مترمکعب بر ثانیه (یک میلیارد و ۵۴۵ میلیون متر مکعب) و در ایستگاه سورمالو برابر ۷۶ مترمکعب بر ثانیه (۲ میلیارد و ۳۹۶ میلیون متر مکعب) است (شکل ۴).

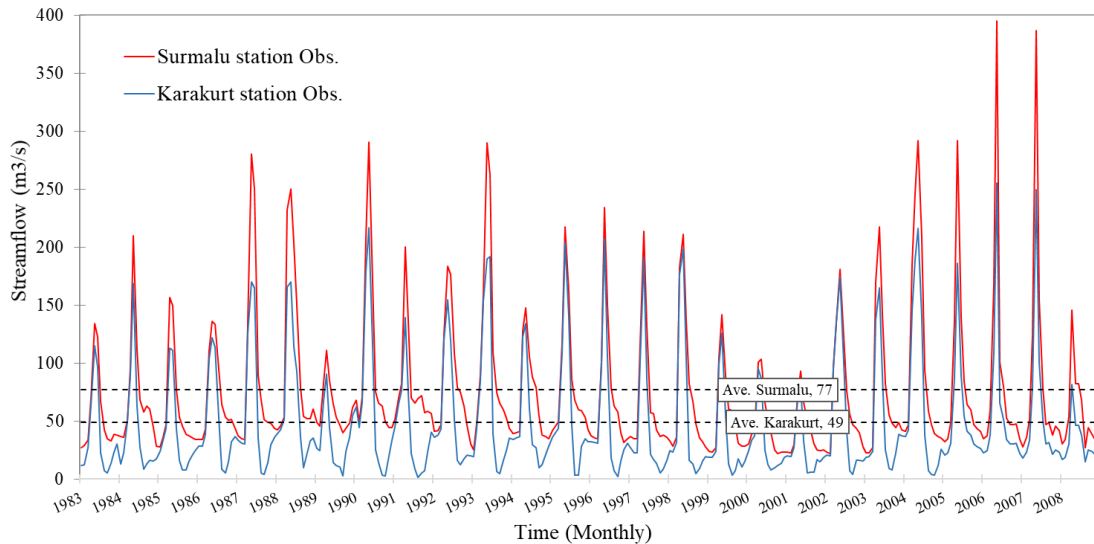
در ادامه به منظور ارزیابی‌های اولیه، ایستگاه هواشناسی کارس به عنوان ایستگاه مبنا و پارامترهای هواشناسی بارش و دمای ماهانه دو پایگاه CRU و NCEP طی سال‌های ۱۹۷۹ لغایت ۲۰۰۸ (دوره واسنجی و اعتبارسنجی مدل SWAT) مقایسه شد. همانطور که در شکل (۳) ملاحظه می‌شود، متوسط بارش بلند مدت ۳۰ ساله مشاهداتی در ایستگاه کارس، متوسط ۴ پیکسل پایگاه CRU در اطراف ایستگاه کارس و پیکسل شماره P404431 پایگاه CFSR، به ترتیب برابر ۴۷۶، ۵۷۳ و ۶۴۰ میلی متر است که اختلاف مشهودی بین پایگاه CFSR در مقایسه با ایستگاه مشاهداتی کارس شاهد هستیم.

درخصوص ایستگاه‌های هیدرومتری، علی‌رغم محدودیت اطلاعات در حوضه‌های فرامرزی، داده‌های مشاهداتی برخی از ایستگاه‌های مهم در بالادست، از گزارش‌های مرجع در کشور ترکیه<sup>۱۰</sup> و ارمنستان<sup>۱۱</sup> استخراج شد. با توجه به اینکه در بالادست حوضه ارس، دو شاخه اصلی کارس و ارس قرار دارد، ایستگاه‌های زمینی کاراکورت و سورمالو



**Fig. 3- Comparison of 30-year long-term precipitation time series of Kars observation station in Turkey compared to CRU and CFSR global data**

شکل ۳- مقایسه سری زمانی بارش بلند مدت ۳۰ ساله ایستگاه مشاهداتی Kars ترکیه در مقایسه با پایگاه‌های CRU و CFSR



**Fig. 4- Monthly discharge time series of Karakurt and Surmalu observation stations in the Upper Aras basin**

شکل ۴- سری زمانی ماهانه دبی ایستگاه‌های مشاهداتی کاراکورت و سورمالو در زیرحوضه ارس علیا

۲۰۰۸-۱۹۷۹ و ۲۰۱۸-۲۰۰۹ به طور خاص مورد استفاده قرار گرفته است. اما، چالش اصلی تفکیک اراضی آبی و دیم بود (در نقشه GLCC، تفکیک این دو را بطور کامل انجام نداده است). بدین منظور، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست (تحلیل زمانی NDVI) و بررسی گزارش‌های متعدد منطقه مطالعاتی و نقشه‌های در دسترس مانند: گزارش بانک جهانی در خصوص اراضی کشاورزی دشت ایغدیر ترکیه (۱۹۸۳)، گزارش مرکز DSI ترکیه با عنوان طرح جامع حوضه ارس ترکیه (۲۰۱۵)، گزارش اداره مدیریت آب وزارت زراعت و

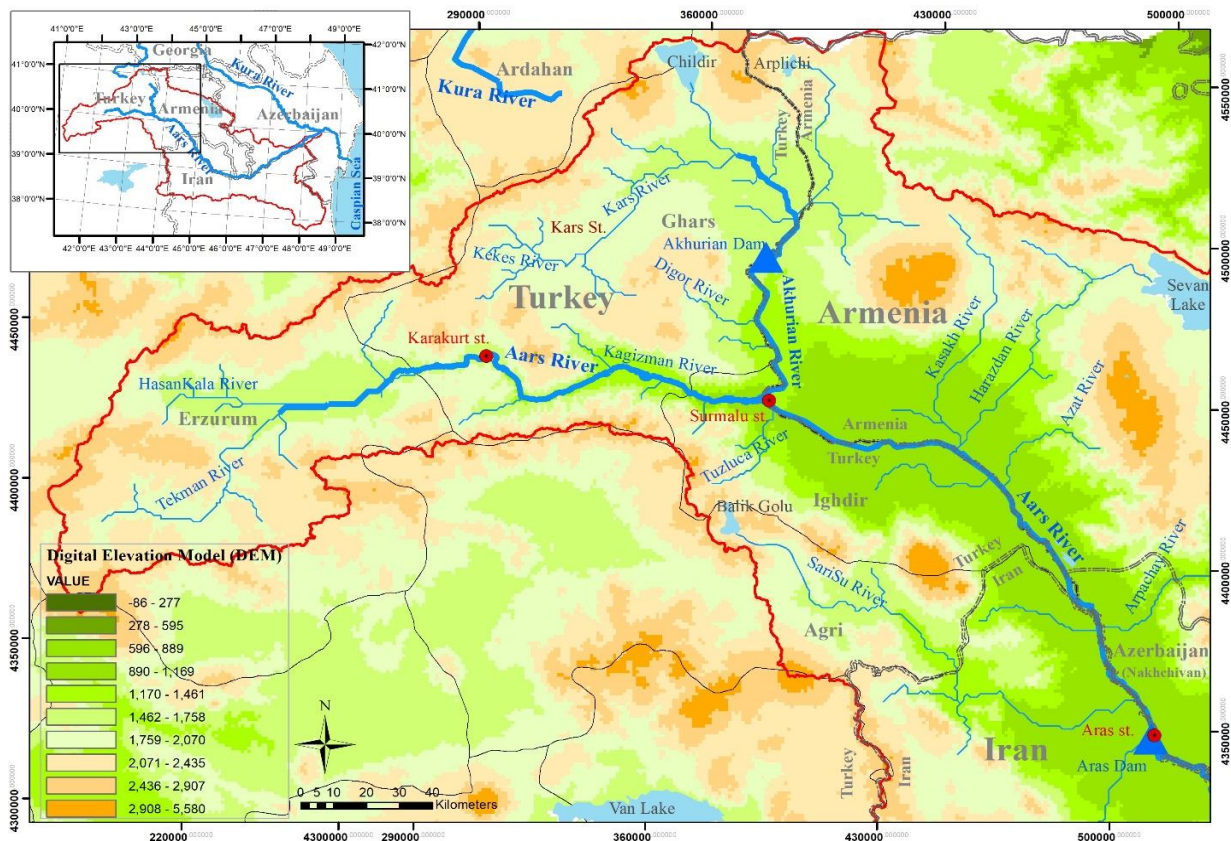
### ۲-۳-۲- لایه‌های رقومی (Land Use- Soil- DEM)

متناسب با نیاز اطلاعاتی مدل SWAT، لایه‌های رقومی DEM<sup>12</sup> با اندازه سلولی ۹۰ متر (شکل ۴)، نقشه‌های کاربری اراضی و پوشش گیاهی جهانی<sup>۱۳</sup> و نقشه خاک سازمان جهانی خواربار<sup>۱۴</sup> برای منطقه مطالعاتی آماده شد.

نقشه پایه کاربری اراضی مورد استفاده در این تحقیق، مربوط به پایگاه‌های جهانی (GLCC) متعلق به USGS است که نرم‌افزار SWAT نیز از آن استفاده می‌نماید. این اطلاعات برای دو مقطع زمانی

افزایش سطح زیر کشت محصولات آبی در مدل SWAT لحاظ شد. این مقادیر برای بازه‌های زمانی ۲۰۰۸-۱۹۸۳ و ۲۰۱۸-۲۰۰۹ به ترتیب برابر ۱۴۰ و ۲۳۰ هزار هکتار اعمال شد. این مقادیر بخش‌هایی از زیرحوضه ارس علیا در کشور ارمنستان در بالادست سرشاخه آخوریان را نیز شامل می‌شود. بر این اساس، ۳ سناریو در این تحقیق، مورد بحث قرار خواهد گرفت. سناریو اول (پایه) با حفظ شرایط پایه (سطح زیرکشت ۱۴۰ هزار هکتار)، مدل برای کل دو بازه زمانی فوق اجرا شده است. در سناریو دوم (واقعی)، شرایط پایه (سطح زیر کشت ۱۴۰ هزارهکتار) برای بازه زمانی اول (۲۰۰۸-۱۹۸۳ میلادی) و شرایط توسعه (سطح زیرکشت ۲۳۰ هزار هکتار) برای بازه زمانی دوم (۲۰۰۹-۲۰۱۸ میلادی)، اجرا شده و پارامترهای واسنجی شده کاربری‌های کشاورزی (در قالب HRUها) از مرحله اول، جایگزین کاربری‌های مشابه در مراحل بعدی شد. در سناریو سوم (توسعه)، شرایط توسعه (سطح زیرکشت ۲۳۰ هزار هکتار) برای هر دو بازه زمانی لحاظ شده است.

جنگلداری ترکیه با عنوان طرح مدیریت سیلاب حوضه ارس-کورا ترکیه (۲۰۱۹)، پروژه مدیریت ریسک خشکسالی حوضه‌های ارس-کورا (۲۰۲۲)، همچنین پروژه نوسازی و انکشافات خدمات زیربنایی روستایی ترکیه (ILEMOD<sup>15</sup>), گزارش محیط زیست کشور ترکیه (Yontar B., 2009) و کاربری اراضی تولید شده حوضه ارس در ترکیه (Nouri, 2021) تفکیک مد نظر انجام شد. در گزارش‌های مذکور میزان کل اراضی قابل کشت در حوضه ارس ترکیه برابر ۱۰۷۵ هزار هکتار برآورد شده است و حدود ۲۵۰ هزار هکتار (۱۴٪) از اراضی مذکور، اراضی بدون استفاده (شامل اراضی آیش، متروکه و بیشه) نام برده شده است. اراضی قابل کشت در محدوده مطالعاتی این تحقیق در زیرحوضه ارس علیا ترکیه (استان‌های قارص و ارزروم)، برابر ۵۹۵ هزار هکتار برآورد می‌گردد که حدود ۱۲۳ هزار هکتار از آن، اراضی بدون استفاده (شامل اراضی آیش، متروکه و بیشه) است. بر اساس مقایسه و بررسی‌های انجام شده در خصوص اراضی آبی موجود و همچنین ارزیابی انجام شده، دو نقشه کاربری اراضی برای اعمال



**Fig. 5- Digital Elevation Model (DEM) of the Upper Aras basin in Turkey and location of the discharge stations (Sumalu and Karakurt) and meteorological station (Kars)**

شکل ۵- نقشه مدل رقومی ارتفاع (DEM) زیرحوضه ارس علیا در ترکیه و موقعیت مکانی ایستگاه‌های هیدرومتری (کاراکورت، سورمالو) و هواشناسی (کارس)

## ۴-۲- مدل SWAT

برای انجام شبیه‌سازی‌ها در مدل SWAT، حوضه به تعدادی زیرحوضه و سپس به واحدهای کوچک‌تر HRU<sup>16</sup> تقسیم شد. این واحدها تا حد امکان دارای ترکیبات یکسانی از خاک، توپوگرافی و پوشش گیاهی هستند. خروجی‌های مدل مانند رواناب سطحی در هر زیرحوضه، از برآورد میانگین نتایج آن برای هر HRU، به روش متوسط وزنی، با توجه به سطح آن‌ها به دست می‌آیند. ورودی‌های اصلی مدل نیز مواردی مانند بارش روزانه، حداکثر و حداقل دمای روزانه، تابش خورشید، سرعت باد، رطوبت نسبی، نقشه رقمی ارتفاع، کاربری اراضی و خاک هستند. شبیه‌سازی هیدرولوژیکی حوضه آبریز توسط مدل SWAT در دو مرحله صورت می‌گیرد. مرحله اول یا فاز زمین<sup>۱۷</sup>، کنترل‌کننده مقدار ورودی آب، رسوب و مواد مغذی از هر زیرحوضه به داخل مجاری زهکش اصلی است که در بخش بعد به روابط حاکم بر آن‌ها اشاره خواهد شد. مرحله دوم شامل روندیابی<sup>۱۸</sup> و حرکت آب، رسوب و مواد مغذی از شبکه‌های زهکش حوضه تا خروجی آن است. برای تعیین رواناب خروجی حوضه در این مدل، از روش‌های ماسکینگ‌ها یا ذخیره متغیر<sup>۱۹</sup> استفاده می‌شود. معادله اساسی در مدل SWAT، معادله بیلان است که مطابق زیر تعریف شده است (Neitsch et al., 2011):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})_i \quad (1)$$

در این رابطه،  $SW_t$  مقدار نهایی آب در خاک در روز  $t$ ،  $SW_0$  مقدار اولیه آب در خاک در روز  $t$ ،  $R_{day}$  بارش روزانه،  $Q_{surf}$  رواناب سطحی،  $E_a$  تبخیر و تعرق واقعی،  $W_{seep}$  آبی که از پروفیل خاک به منطقه غیراشباع وارد می‌شود و  $Q_{gw}$  جریان آب زیرزمینی خروجی به رودخانه می‌باشد. کلیه واحدها برحسب میلی‌متر هستند.

حجم رواناب ناشی از بارندگی در سطح حوضه یکی از متغیرهای هیدرولوژیکی مهم می‌باشد که در تعیین میزان دبی خروجی از حوضه‌ها، دبی اوج و غیره نقش اساسی دارد. در مدل SWAT حجم رواناب برای هر واحد هیدرولوژیکی با وارد کردن مقادیر بارندگی روزانه و یا ساعتی محاسبه می‌شود. در این مدل دو روش برای تخمین حجم رواناب سطحی وجود دارد که شامل روش شماره منحنی SCS و روش معادله نفوذ Green & Ampt است.

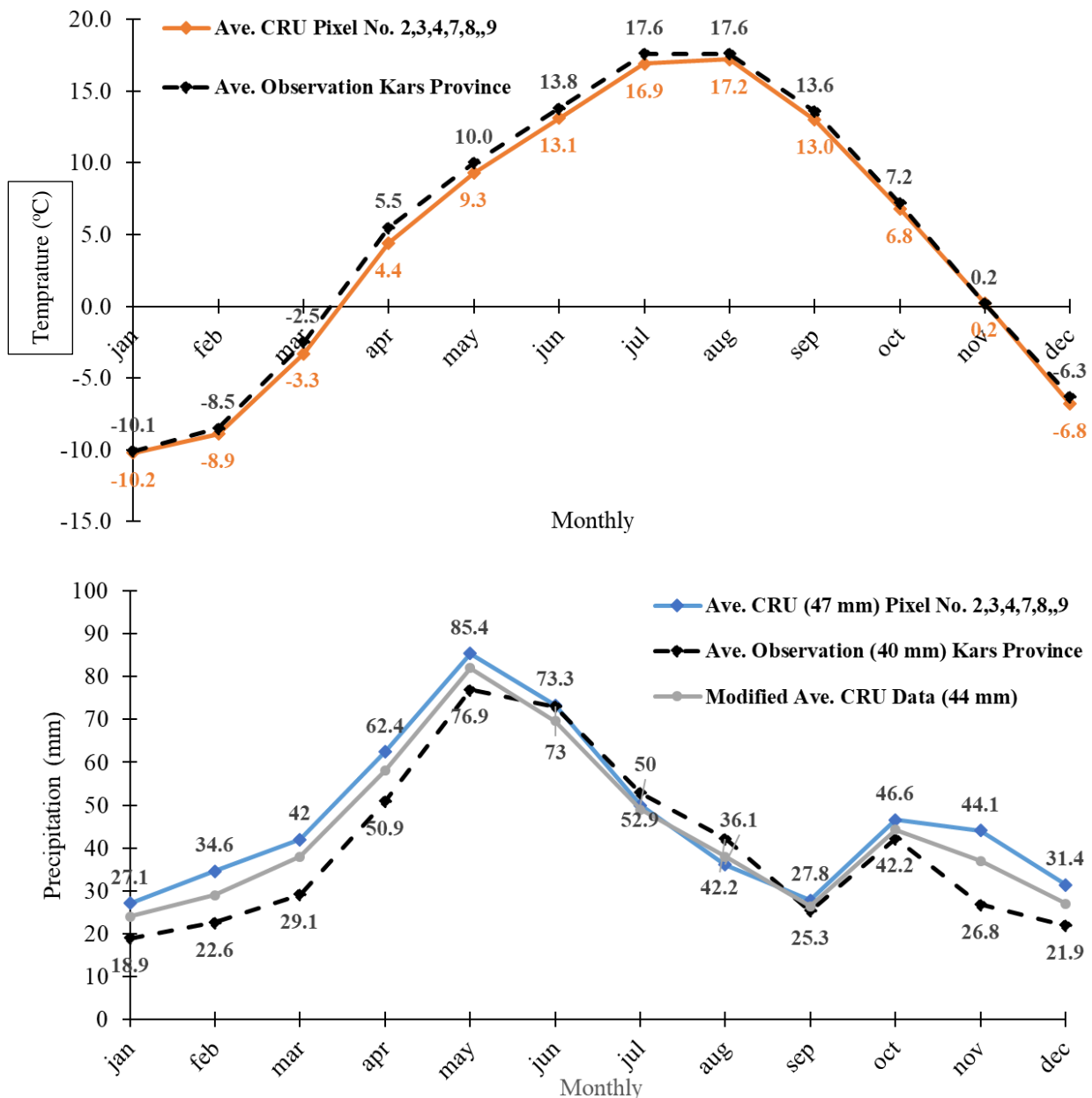
## ۴-۲-۱- واسنجی مدل و تحلیل عدم قطعیت

با توجه به پارامترهای متعدد برای شبیه‌سازی فرآیندهای مختلف در مدل SWAT، واسنجی آن بخشی از چالش‌های پیش رو در آماده‌سازی مدل است. بدین منظور از الگوریتم Sufi2 در نرم‌افزار SWAT-CUP برای واسنجی استفاده شد (Abbaspour et al., 2009). از معیارهای مورد استفاده برای بررسی عدم قطعیت در این الگوریتم، فاکتورهای P و R هستند. کیفیت برازش با تعیین درصد مربوط به متغیرهای مشاهده شده که درون باند عدم قطعیت ۹۵ درصد قرار می‌گیرند (P-factor) و همچنین متوسط فاصله بین باندهای بالا و پایین (R-factor) تعیین می‌شود. علاوه بر این، از ضریب تبیین ( $R^2$ ) و کارایی نش-ساتکلیف (NS) نیز برای تعیین نکویی برازش مدل استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

### ۳-۱- تحلیل سری زمانی ماهانه بارش و دمای حوضه ارس علیا

با توجه به طول دوره آماری بلند مدت پایگاه اقلیمی CRU و نتایج مناسب آن، داده‌های دما و بارش مربوط به طور نقطه‌ای با تنها ایستگاه در دسترس - یعنی کارس، و ارقام گزارشات موجود از متوسط بارش استان قارص مورد ارزیابی قرار گرفت. این مقایسه به دلیل اهمیت برآورد مطلوب بارش در سطح حوضه آبریز برای مدل‌سازی این تحقیق است. بدین منظور، سری زمانی بلند مدت ماهانه و سالانه مربوط به پارامترهای دما و بارش ایستگاه و استان قارص با متوسط پیکسل‌های پایگاه CRU در محدوده ایستگاه و استان به تفکیک برای دوره ۱۹۷۹ لغایت ۲۰۰۶ میلادی بررسی و ارزیابی شد. همانطور که در شکل (۶) قابل ملاحظه است، الگوی ماهانه دما و بارش مشاهداتی و پایگاه اقلیمی CRU از روند بسیار نزدیکی برخوردار هستند. به همین ترتیب، متوسط بارش ماهانه استان قارص ۴۰ میلی‌متر (به استناد مرجع Karaoglu (2014) و متوسط بارش CRU نیز ۴۷ میلی‌متر برآورد شده است. این مقدار برای محل ایستگاه قارص به ترتیب ۴۲ و ۴۸ میلی‌متر بود. در ادامه، تلاش شد تا اصلاح ممکن در داده‌های CRU انجام گیرد. بدین منظور سری زمانی روزانه داده‌ها برای هر پیکسل از CRU در محدود منطقه به انجام رسید و داده‌های پرت شناسایی و حذف شدند. متوسط ماهانه بارش داده‌های CRU بعد از اصلاح در محل ایستگاه ۴۵ و استان به ۴۴ میلی‌متر رسید (شکل ۶).



**Fig. 6- Monthly mean temperature (a) and precipitation (b) of Kars meteorological station along with the CRU based monthly mean temperature and precipitation of the Kars province for the period of 1979-2006**

شکل ۶- سری زمانی ماهانه دما و بارش (a) و بارش و مقادیر متوسط ماهانه دما و بارش در محدوده استان براساس داده‌های پایگاه CRU طی دوره ۱۹۷۹ لغایت ۲۰۰۶ میلادی

اعتبارسنجی مدل می‌پردازیم که با توجه به داده‌های موجود در دو مرحله اجرا شد، تفاوت دو مرحله داده‌های اقلیمی مورد استفاده هستند. در آنها، ۴ سال ابتدای دوره برای آماده‌سازی مدل ۲۰، دوره ۱۷ ساله ۱۹۸۳ لغایت ۱۹۹۹ برای واسنجی و دوره ۹ ساله ۲۰۰۰ لغایت ۲۰۰۸ برای دوره اعتبارسنجی در نظر گرفته شده است.

### ۲-۳- شبیه‌سازی آورد رودخانه با استفاده از مدل SWAT و اطلاعات ماهواره‌ای

با استفاده از یافته‌های قبل برای منطقه مطالعاتی این تحقیق، شبیه‌سازی جریان رودخانه با استفاده از مدل شبیه‌ساز SWAT برای سال ۱۹۷۹ لغایت ۲۰۰۸ اجرا شد. در این قسمت به واسنجی و

### ۳-۲-۱- واسنجی و اعتبارسنجی بر اساس داده‌های اقلیمی CFSR

همانطور که آمد، در این مرحله، واسنجی و اعتبارسنجی مدل بر اساس داده‌های اقلیمی (بارش و دمای حداقل و حداکثر) CFSR اجرا شد. بر این اساس با مقایسه نتایج اولیه شبیه‌سازی ماهانه جریان رودخانه در دو ایستگاه کاراکورت و سورمالو با مقادیر مشاهداتی، ضریب  $R^2$  به ترتیب ۰/۱۳ و ۰/۱۰ را نشان داد. به منظور بهبود نتایج، ابتدا تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مهم خاک انجام شد. پس از آن به منظور ارتقاء ارقام اوج جریان و دبی‌های پایه، پارامترهای آب زیرزمینی، برف و دما آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت (جدول ۱). بر این اساس و پس از اجرای مدل در تعداد دفعات زیاد و انتخاب بهترین محدوده برای پارامترهای مذکور، نهایتاً ضریب  $R^2$  برای ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو به ترتیب برابر ۰/۳۶ و ۰/۴۸ بدست آمد.

### ۳-۲-۲- واسنجی و اعتبارسنجی بر اساس داده‌های اقلیمی CRU

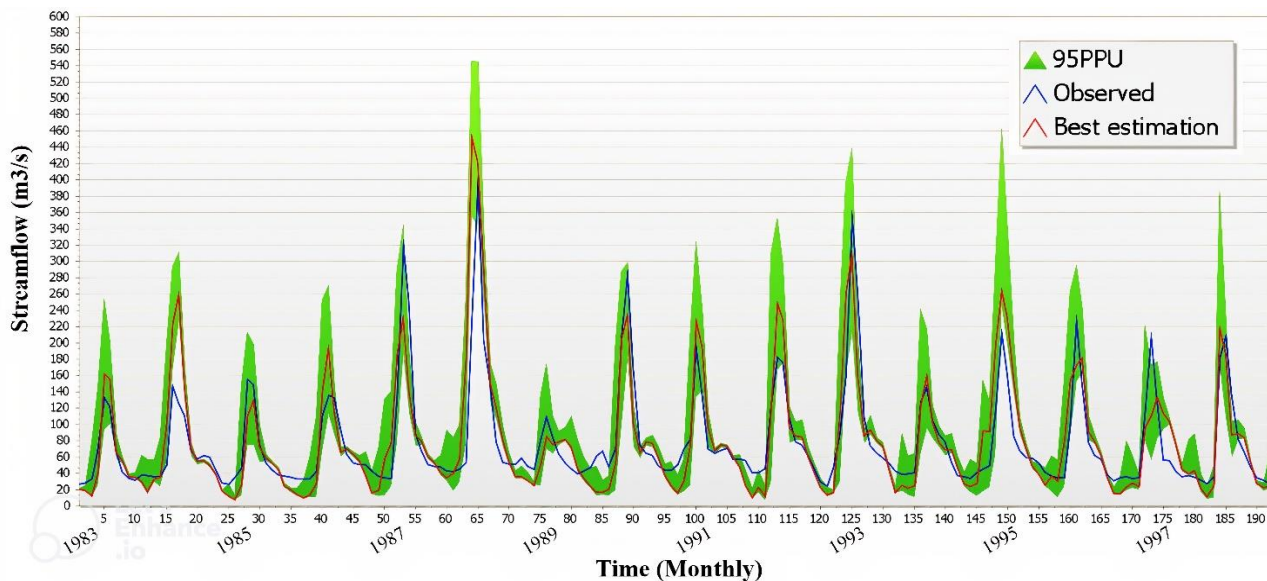
برای این قسمت، واسنجی و اعتبارسنجی مدل بر اساس داده‌های اقلیمی (بارش و دمای حداقل و حداکثر) CRU اجرا شد. بر این اساس با مقایسه نتایج اولیه شبیه‌سازی ماهانه جریان رودخانه در دو ایستگاه

کاراکورت و سورمالو با مقادیر مشاهداتی، ضریب  $R^2$  به ترتیب ۰/۲۹ و ۰/۳۱ را نشان داد. به منظور بهبود نتایج مانند قبل، تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای مهم انجام شد که در جدول (۱) قابل مشاهده هستند. بر این اساس و پس از اجرای مدل در تعداد دفعات زیاد و انتخاب بهترین محدوده برای پارامترهای مذکور، نتایج بسیار خوبی برای دوره واسنجی بدست آمد (شکل‌های ۷ و ۸) که ضریب  $R^2$  برای ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو به ترتیب برابر ۰/۶۵ و ۰/۷۱ و NS به ترتیب برابر ۰/۶۲ و ۰/۶۹ حاصل شد. این معیارها برای دوره اعتبارسنجی (سال‌های ۱۹۹۹ لغایت ۲۰۰۸) نیز برای دو ایستگاه فوق به ترتیب ۰/۶۹ و ۰/۷۴ و ضریب NS برابر ۰/۶۰ و ۰/۶۴ بدست آمد. مقایسه عدم قطعیت نتایج جریان شبیه‌سازی شده توسط مدل با استفاده از پایگاه CRU حاکی از آن است که عملکرد جزئی‌تری نسبت به پایگاه CFSR داشته است. بر این اساس شاخص R-factor برای ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو به ترتیب برابر ۰/۴۴ و ۰/۳۸ و شاخص P-factor برای ایستگاه‌های مذکور، به ترتیب برابر ۰/۳۵ و ۰/۳۹ بدست آمد. نهایتاً با توجه به نتایج رضایت‌بخش پایگاه CRU، در ادامه سناریوهای مدیریتی بر مبنای این پایگاه داده اقلیمی انجام می‌شود.



Fig. 7- Comparison of simulated streamflow from the SWAT model and observations at Karakurt station based on CRU climate data

شکل ۷- مقایسه جریان رواناب شبیه‌سازی شده مدل SWAT و مشاهداتی در ایستگاه کاراکورت بر اساس داده‌های اقلیمی CRU



**Fig. 8 - Comparison of simulated streamflow from the SWAT model and observations at Surmalu station based on CRU climate data**

شکل ۸- مقایسه جریان رواناب شبیه‌سازی شده مدل SWAT و مشاهداتی در ایستگاه سورمالو بر اساس داده‌های اقلیمی CRU

**Table 1- Sensitive parameters and upper and lower bands**

جدول ۱- پارامترهای حساس و باند بالا و پایین

Parameter	Method*	CRU		NCEP CFSR	
		Low and Up band of Sensitive Parameters	Fitted Value	Low and Up band of Sensitive Parameters	Fitted Value
CN2.mgt	r	U.S.S.** [-0.27,-0.60]	-0.43	U.S.S. [-0.1,-0.3]	-0.130
		U.K.S.*** [-0.4,-0.6]	-0.50	U.K.S. [-0.2,-0.4]	-0.380
SOL_AWC.sol	r	U.S.S. [2.4,3.8]	3.10	U.S.S. [-4,-8]	-4.500
		U.K.S. [2.4,3.9]	3.20	U.K.S. [-2,-6]	-2.500
GWQMN.gw	v	[0.5,0.7]	0.60	U.S.S. [700,900]	805.000
				U.K.S. [500,800]	777.500
REVAPMN.gw	r	[0.26,0.43]	0.35	U.S.S. [-0.1,-0.3]	-0.280
				U.K.S. [0.1,0.3]	0.230
ALPHA_BF.gw	r	[-0.20,-0.26]	-0.25	[0.80,0.95]	0.860
TLAPS.sub	v	[-3.6,-3.8]	-3.70	[-1,-4]	-1.220
PLAPS.sub	v	[-105,-80]	-92.00	[40,80]	43.000
GW_DELAY.gw	r	[36,41]	38.84	[0.1,0.3]	0.210
SMFMN.bsn	r	[0.9,2.0]	1.50	[-0.1,-0.2]	-0.130
SFTMP.bsn	r	[-4,-10]	-7.00	[-0.4,-0.6]	-0.405
SMTMP.bsn	r	[1.20,1.99]	1.60	[-0.1,-0.3]	-0.105
SMFMP.bsn	r	[5.8,8.3]	7.08	[-0.1,-0.3]	-0.285
Esco.bsn	v	[-0.1,-0.5]	-0.30	[1.8,2.2]	0.200
SNO50COV.bsn	v	-	-	[1.5,2.5]	2.170
SNO_SUB.sub	v	-	-	[40,70]	57.200
TIMP.bsn	r	-	-	[-0.3,-1.5]	-0.870
EPCO.hru	r	-	-	[0.7,0.9]	0.790

\* v = Replace, r = Relative

\*\* Upper Surmalu Station (61 sub basin)

\*\*\* Upper Karakurt Station (21 sub basin)

### ۳-۳-۳- شیب‌سازی و ارزیابی رواناب رودخانه مرزی ارس تحت تأثیر افزایش سطح زیرکشت

براساس مدل SWAT واسنجی‌شده، نقشه‌های کاربری اراضی منتخب و داده‌های CRU تحلیل‌های این بخش به انجام می‌رسد. بدین منظور، سه سناریو تعیین شد. در سناریو اول، وضعیت آورد رودخانه مرزی ارس در شرایط پایه (سطح زیر کشت ۱۴۰ هزار هکتار) در هر دو بازه زمانی اول (۱۹۸۳-۲۰۰۸) و دوم (۲۰۰۹-۲۰۱۸) بر مبنای عدم توسعه کاربری اراضی، اجرا شد. سپس در سناریو دوم، وضعیت آورد رودخانه در شرایط واقعی و تغییر کاربری اراضی (سطح زیرکشت بازه‌های زمانی اول و دوم به ترتیب ۱۴۰ و ۲۳۰ هزار هکتار) شیب‌سازی شد. در نهایت در سناریو سوم، آورد رودخانه در شرایط توسعه کاربری اراضی در هر دو بازه زمانی (سطح زیرکشت ۲۳۰ هزار هکتار) اجرا شد. این سناریو بدین معناست که با فرض تکرار شرایط اقلیمی گذشته که قدری هم خوشبینانه است، چنین سطحی، چه تبعاتی را روی منابع آب و بخصوص خروجی‌های آن حوضه خواهد داشت.

### ۳-۳-۱- سناریوی شرایط پایه و عدم توسعه (سناریو یک)

همانطور که آمد، شرایط پایه براساس سطح اراضی کشاورزی آبی (بالادست ایستگاه آبنجی سورمالو در ترکیه) برابر ۱۴۰ هزار هکتار به انجام رسیده است که نتایج در جدول (۲) قابل ملاحظه هستند. روند ارقام سالیانه دبی رودخانه مرزی ارس در بالادست ایستگاه سورمالو در شکل نشان می‌دهد که جریان رودخانه روند تقریباً ثابت و افزایش جزئی داشته است. بر این اساس، متوسط آورد شیب‌سازی شده رودخانه مرزی ارس در ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو در بازه زمانی اول (۱۹۸۳-۲۰۰۸) به ترتیب برابر ۱۴۰۹ و ۲۵۸۲ میلیون مترمکعب برآورد شده که مقادیر مشاهداتی ایستگاه‌های مذکور نیز به ترتیب ۱۵۴۵ و ۲۴۵۹ میلیون مترمکعب ثبت شده است. در این سناریو، وضعیت جریان بعد از سال ۲۰۰۸ (بازه زمانی دوم) با فرض عدم توسعه کاربری اراضی، در ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو، به ترتیب ۱۴۱۱ و ۲۶۰۵ میلیون مترمکعب را نشان می‌دهد. همچنین، مدل در حالتی که اراضی کشاورزی صفر باشد، اجرا شد تا برآوردی از پتانسیل منابع آب حوضه و متعاقباً مصرف آب کشاورزی در بالادست ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو نیز صورت گیرد. بر این اساس، پتانسیل منابع آب به ترتیب برابر ۱۵۸۰ و ۳۲۱۳ میلیون مترمکعب در سال در بازه زمانی اول است. میزان متوسط سالیانه مصرف آب نیز در بخش کشاورزی ارس علیا در بازه زمانی اول، حدود ۱۷۱ میلیون مترمکعب در محدوده استان ارزروم و ۶۳۰ میلیون مترمکعب در بخش استان قارص برآورد شده است.

### ۳-۳-۲- سناریو واقعی و افزایش سطح زیرکشت محصولات آبی (سناریو دو)

به منظور بررسی اثر تغییرات کاربری اراضی، ابتدا سطح اراضی کشاورزی آبی برای بازه‌های زمانی اول و دوم اعمال شد. برای اعمال افزایش کاربری کشاورزی برای بازه دوم (۲۰۰۹ لغایت ۲۰۱۸ با ۲۳۰ هزار هکتار)، پارامترهای واسنجی شده کاربری‌های کشاورزی (در قالب HRUها) از مرحله اول، جایگزین کاربری‌های مشابه در مراحل بعدی شد. نهایتاً مدل در دو موقعیت ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو شیب‌سازی شد. مطابق نتایج جدول (۲) و نتایج این بخش، متوسط دبی شیب‌سازی شده رودخانه مرزی ارس در ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو در بازه زمانی دوم (۲۰۰۹-۲۰۱۸) به ترتیب برابر ۳۸/۹ و ۶۸/۳ مترمکعب بر ثانیه برآورد شده است. نتایج شیب‌سازی در کل دوره ۱۹۸۳ لغایت ۲۰۱۸ نشان می‌دهد که متوسط آورد سالیانه رودخانه مرزی ارس در زیرحوضه ارس علیا در ترکیه در ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو در بازه زمانی دوم نسبت به بازه زمانی اول به ترتیب حدود ۱۲٪ و ۱۷٪ کاهش یافته است.

### ۳-۳-۳- سناریو توسعه فعلی و افزایش سطح زیرکشت محصولات آبی (سناریو سه)

همانطور که قبلاً آمد، این سناریو با فرض تکرار شرایط اقلیمی دوره اول و دوم تاریخی و سطح فعلی اراضی کشاورزی (۲۳۰ هزار هکتار) در مدل اعمال شد. بر این اساس، نتایج (جدول ۲) در کل دوره ۱۹۸۳ لغایت ۲۰۱۸ در مقایسه با سناریو اول نشان می‌دهد، متوسط آورد سالیانه رودخانه مرزی ارس در زیرحوضه ارس علیا در ترکیه در ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو به ترتیب به رقم ۱۲۳۱ و ۲۱۶۶ میلیون مترمکعب می‌رسد. به عبارتی دیگر افزایش اراضی کشاورزی در ارس علیا در ترکیه نسبت به شرایط پایه، در زیرحوضه بالادست کاراکورت و سورمالو به ترتیب با کاهش متوسط ۱۸۲ و ۴۵۰ میلیون مترمکعب در سال همراه بوده است. بنابراین در مجموع می‌توان بیان نمود توسعه کشاورزی تا سال ۲۰۱۸، باعث کاهش حدود ۱۳٪ در ایستگاه کاراکورت و ۱۸٪ در ایستگاه سورمالو در بلند مدت خواهد شد. باتوجه به اینکه این توسعه، بدون اضافه شدن سدهای جدید ترکیه است، بدیهی است بهره‌برداری از این سدها، نظیر سد کارس در سال ۲۰۱۹، کاراکورت در سال ۲۰۲۰ و سدهای درحال ساخت سویلمز، تولولچای و اولندی، و مشخص شدن توسعه شبکه آن، می‌توان میزان تأثیر آن بر جریان رودخانه مرزی ارس را بررسی نمود.

### ۳-۳-۴- تأثیر توسعه اراضی روی رژیم جریان رودخانه

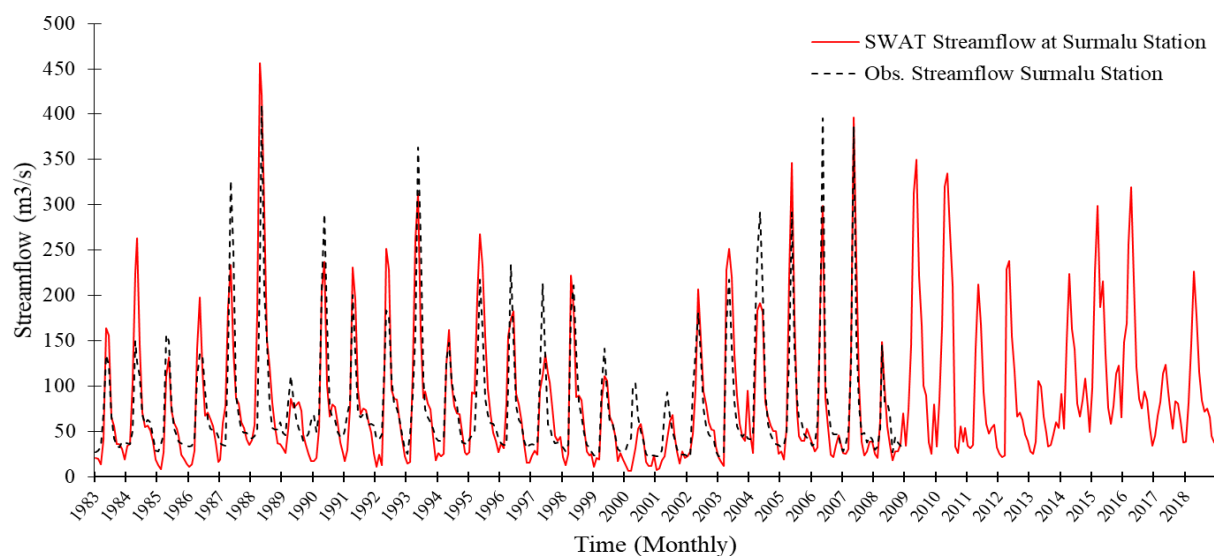
نظر به اهمیت این سناریو روی خروجی آب از حوضه ارس، وضعیت آن با جزئیات بیشتری ارائه می‌شود. این توضیحات صرفاً برای ایستگاه سورمالو ارائه می‌شود که خروجی اصلی این بخش از حوضه و متعاقباً ورودی به کشور است. بدین منظور، ابتدا سری زمانی جریان شبیه‌سازی شده و تاریخی آن در شکل (۹) نشان داده شده است. همانطور که در شکل ملاحظه می‌شود، علاوه بر کاهش آوردی که در

جدول (۲) نشان داده شد، توسعه اراضی کشاورزی، باعث شده تا غالباً جریان ماه‌های پرآب، نسبت به دوره تاریخی کاهش داشته باشند. برای بررسی بهتر موضوع متوسط بلند مدت ماهانه این سناریو و آمار مشاهداتی نیز مورد مقایسه قرار گرفت که نتایج در شکل (۱۰) قابل ملاحظه هستند. ملاحظه می‌شود که افت جریان در اغلب ماه‌ها قابل مشاهده خواهد بود، با این تفاوت که در ماه می، بیشترین مقدار آن را شاهد خواهیم بود.

**Table 2- Comparison of SWAT model simulation output under different scenarios at Karakurt and Surmalu stations (million cubic meters per year)**

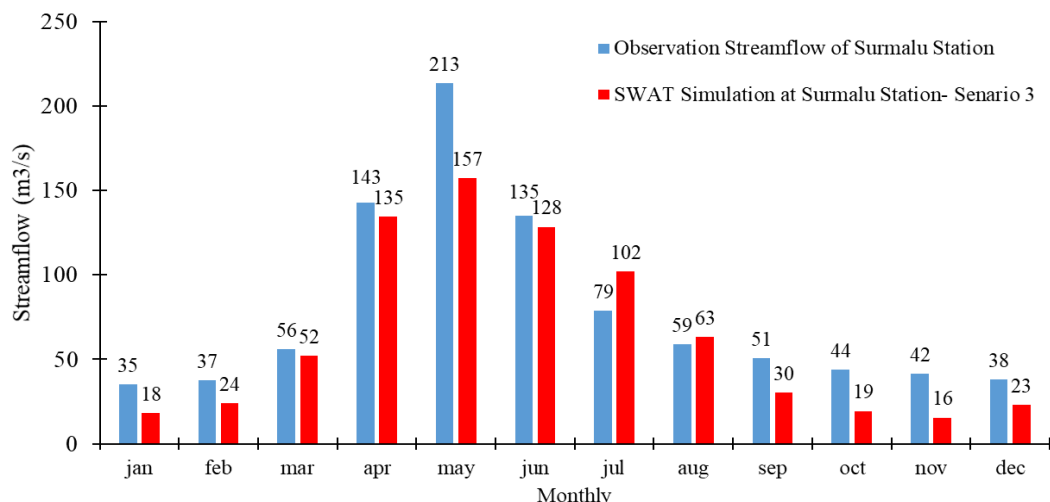
جدول ۲- مقایسه آورد شبیه‌سازی مدل SWAT تحت سناریوهای مختلف در ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو (میلیون مترمکعب در سال)

Time Period	Cultivated area Station	The entire time period (140,000 hectare)	The first time period (140,000 hectare) & the second time period (230,000 hectare)	The entire time period (230,000 hectare)	The entire time period (Zero hectare)
		Scenario One (Base)	Scenario Two (Real)	Scenario Three (Development)	Basin potential
First time period (1983-2008)	Karakurt	1409	1409	1233	1580
	Surmalu	2582	2582	2177	3212
Second time period (2009-2018)	Karakurt	1411	1229	1229	1587
	Surmalu	2605	2155	2155	3305
Entire time period (1983-2018)	Karakurt	1410	1324	1231	1584
	Surmalu	2571	2365	2166	3201



**Fig. 9- Comparison of the discharge obtained from SWAT model simulation (Scenario 3) and observations of the Aras River at Surmalu station during the period 1983 to 2018**

شکل ۹- مقایسه دبی شبیه‌سازی مدل SWAT (سناریو سه) و مشاهداتی رودخانه مرزی ارس در ایستگاه سورمالو طی دوره ۱۹۸۳ تا ۲۰۱۸



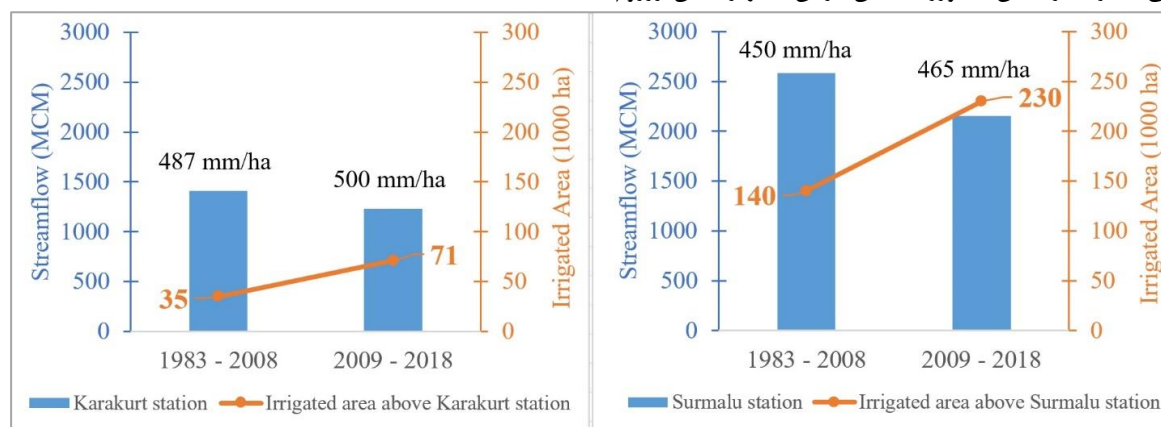
**Fig. 10- Comparison of the simulated monthly flow regime of the SWAT model (Scenario 3) and observations of the Aras River at Surmalu station**

شکل ۱۰- مقایسه رژیم جریان ماهانه شبیه‌سازی شده مدل SWAT (سناریو سه) و مشاهداتی رودخانه مرزی ارس در ایستگاه سورمالو

بدست آمده است. این نتایج در مقایسه با نتایج (Nouri (2021) در خصوص میزان تبخیر و تعرق واقعی (ET) مصارف کشاورزی ترکیه با ۴۰۲ میلی‌متر در هر هکتار، نتایج قابل قبولی است. همچنین، با مقایسه مقادیر ارائه شده در مقاله (Karaoglu (2014) که میزان پتانسیل تبخیر و تعرق (PET<sup>22</sup>) حوضه در استان‌های ارزروم و قارص به ترتیب ۲۹۸ و ۲۴۹ میلی‌متر در هر هکتار اعلام نموده است، در صورتی که این اعداد مربوط به متوسط استان باشد، با نتایج تحقیق همخوانی دارد، اما در صورتیکه صرفاً مربوط به اراضی کشاورزی باشد، این مقادیر دست پائین هستند.

### ۳-۴- نیاز مصارف آب در بخش کشاورزی ارس علیا

با توجه به نتایج فوق‌الذکر، متوسط نیاز آبی مصارف کشاورزی در بازه‌های زمانی اول و دوم برای بالادست ایستگاه کاراکورت (استان ارزروم) به ترتیب حدود ۴۸۷ و ۵۰۰ میلی‌متر در هر هکتار برآورد شد. همچنین، این برآورد برای بالادست ایستگاه سورمالو (استان قارص) به ترتیب حدود ۴۵۰ و ۴۶۵ میلی‌متر در هر هکتار برآورد می‌شود (شکل ۱۱). همانطور که در بخش‌های قبل ذکر شد، بارش استان قارص نسبت به استان ارزروم بیشتر بوده و بر همین اساس نتایج مربوط به نیاز آبی مصارف در بخش کشاورزی استان قارص کمتر از استان ارزروم



**Fig. 11 - SWAT model simulation output at Karakurt and Surmalu stations, the area under cultivation (thousand hectares) and water requirement (mm/hectare) for agriculture in each sub-basin**

شکل ۱۱- آورد شبیه‌سازی مدل SWAT در ایستگاه کاراکورت و سورمالو، سطح زیر کشت (هزار هکتار) و نیاز آبی مصارف (میلی‌متر در هکتار) کشاورزی هر زیرحوضه

#### ۴- نتیجه گیری

این تحقیق تلاشی بود برای بررسی اثرات توسعه اراضی کشاورزی در حوضه ارس علیا ترکیه روی آورد جریان آن در دوره تاریخی که بدین منظور از مدل جامع SWAT، داده‌های اقلیمی جهانی و داده‌های محدود مشاهداتی در دسترس استفاده به عمل آمد، نتایج زیر از این تحقیق قابل ارائه است:

- در چارچوب مدل‌سازی SWAT در زیرحوضه ارس علیا در ترکیه، از پایگاه‌های اقلیمی جهانی شامل NCEP CSFR و CRU در کنار داده‌های زمینی محدود استفاده شد. به منظور بررسی تغییرات منابع آب حوضه مذکور تحت تأثیر افزایش سطح زیرکشت، و با توجه به ابهامات در خصوص طرح‌های توسعه و مشخصا توسعه اراضی آبی، از گزارش‌های مرجع و تصاویر ماهواره‌ای لندست برای پشتیبانی دقت، استفاده شد. بدین ترتیب سعی شد چشم‌اندازی حتی‌الامکان واقعی از وضعیت حوضه ارس علیا قبل از بهره‌برداری از سدهای پروژه DAP ترکیه داشته باشیم. ضمن اینکه بررسی اثر بهره‌برداری سدها در سال‌های ۲۰۱۹ به بعد، توسط نویسندگان در حال انجام است. بر این اساس نتایج زیر قابل ارائه است:
- نتایج مقایسه بارش متوسط ماهانه و سالانه در سطح حوضه ارس علیا در دوره زمانی مورد مطالعه، عملکرد مناسب‌تر داده‌های CRU نسبت به CFSR را نشان داد. به‌طور میانگین متوسط بارش بلندمدت ۳۰ ساله در ایستگاه کارس ترکیه برابر ۴۹۷ میلی‌متر در سال است. این رقم برای پایگاه‌های CFSR و CRU به ترتیب برابر ۶۴۰ و ۵۴۵ میلی‌متر است. نتایج برای دما نیز مجدداً برتری عملکرد پایگاه CRU را نشان داد؛
- بر اساس تصاویر ماهواره‌ای و ارزیابی گزارش‌های متعدد مرجع، تغییر کاربری اراضی طی دو دوره ۱۹۷۹ تا ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۸ گویای افزایش سطح زیر کشت از ۱۴۰۰۰۰ به ۲۳۰۰۰۰ هکتار است؛
- توانایی مدل SWAT در شبیه‌سازی دبی جریان حوضه فرامرزی ارس در بالادست با استفاده از پایگاه CRU نشان داد که مدل نتایج مناسبی براساس شاخص‌های آماری داشته است بطوریکه ضریب  $R^2$  در دو ایستگاه آسنجی کاراکورت و سورمالو در دوره واسنجی به ترتیب ۰/۶۵ و ۰/۷۱ و ضریب NS نیز به ترتیب ۰/۶۲ و ۰/۶۹ بوده‌اند؛
- بر اساس بستر محاسباتی توسعه یافته، بررسی روند و تغییرات جریان طی ۴۰ سال اخیر (۱۹۷۹ لغایت ۲۰۱۸) نشان داد رواناب حوضه ارس علیا تحت تأثیر عمدتاً افزایش سطح زیر کشت

محصولات آبی، سالیانه از حجم ۲۶۰۵ میلیون مترمکعب به ۲۱۵۵ کاهش یافته است. به عبارتی دیگر افزایش اراضی کشاورزی در ارس علیا در ترکیه نسبت به شرایط پایه، کاهش متوسط ۴۵۰ میلیون مترمکعبی در سال را به همراه داشته است. با توجه به اینکه این توسعه، بدون اضافه شدن سدهای جدید ترکیه است، بدیهی است بهره‌برداری از سایر سدهای زیرحوضه ارس علیا در ترکیه نظیر سد کارس در سال ۲۰۱۹، کاراکورت در سال ۲۰۲۰ و سدهای درحال ساخت سویلمز، توزلوچای و اولنددی این پتانسیل را دارند که جریان رودخانه مرزی ارس را تحت تأثیر قرار دهند؛

مقایسه رژیم ماهانه جریان شبیه‌سازی شده در سناریوهای پایه و توسعه فعلی (سناریو سه) نشان می‌دهد که تحت تأثیر توسعه اراضی کشاورزی، حجم جریان در ایستگاه‌های کاراکورت و سورمالو به ترتیب ۱۲٪ و ۲۱٪ کاهش یابد. رژیم جریان نیز تغییر یافته که بیشترین آن مربوط به ماه می خواهد بود؛

توسعه‌های آبی در کشور ترکیه، ذیل پروژه توسعه آناتولی شرقی (DAP) انجام شده که بر این اساس بهره‌برداری از حدود ۱۵ سد بر روی سرشاخه‌های رودخانه مرزی ارس پیش‌بینی شده است. مجموع احجام سدهای بهره‌برداری شده، درحال ساخت و مطالعاتی این پروژه، به ترتیب برابر ۱۱۴۲، ۱۶۵۷ و ۴۲۲ میلیون متر مکعب است. با بررسی‌های انجام شده در خصوص این پروژه، سدهای تازه بهره‌برداری شده (سدهای کارس و کاراکورت) عمدتاً بعد از سال ۲۰۱۸ شروع به آگیری شده و سایر سدهای درحال احداث (سدهای سویلمز، توزلوچای و اولنددی) نیز بعد از سال ۲۰۲۴ آگیری می‌شود. بنابراین بررسی میزان توسعه شبکه اراضی کشاورزی سدهای مذکور و میزان تأثیر آن بر آورد رودخانه مرزی ارس در پژوهش آتی نیاز به بررسی است. با این حال، نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که متوسط مصرف آب در بخش کشاورزی برای بالادست ایستگاه کاراکورت (استان ارزروم) حدود ۴۹۴ و برای بالادست ایستگاه سورمالو (استان قارص) حدود ۴۵۸ میلی‌متر در هر هکتار است. این اختلاف بدلیل بیشتربودن متوسط بارش در استان قارص نسبت به استان ارزروم است. اینها ارقامی خواهند بود که می‌تواند مبنایی برای کاهش خروجی آب سالیانه از حوضه باشند.

#### پی‌نوشت‌ها

1- Eastern Anatolia Project or Doğu Anadolu Projesi (DAP)

- 12- Digital Elevation Model (DEM)-NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)
- 13- <https://lta.cr.usgs.gov/GLCC>
- 14- <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey>
- 15- Izlenmesinde Modernizasyon Projesi
- 16- Hydrologic Response Unit
- 17- Land Phase
- 18- Water Routing Phase
- 19- Variable Storage
- 20- Warm up
- 21- Evapo-Transpiration
- 22- Potential Evapotranspiration

- 2- Soil and Water Assessment Tool
- 3- National Centers for Environmental Prediction-Climate Forecast System Reanalysis
- 4- Climate Research Unit ([www.cru.uea.ac.uk](http://www.cru.uea.ac.uk))
- ۵- استان های ارزروم، آغری، ایغدیر، قارص، اردهان، ارزینجان، بینگول، توتجلی، مالاتیا، آلازیغ، موش، بیتلیس، وان و حکاری
- 6- <https://www.Renewableenergyworld.com>
- 7- <https://iccgrup.com/en/projeler/ongoing-projects-09426891239268034/erzurum-soylemez-dam>
- 8- <https://globalweather.tamu.edu/>
- 9- <http://www.cru.uea.ac.uk/data>
- 10- <https://dsi.gov.tr/sayfa/detay/744>
- 11- <http://dx.doi.org/10.1596/978-1-4648-0335-2>

- Abbaspour KC (2007) User Manual for SWAT-CUP. SWAT calibration and uncertainty analysis programs. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Eawag, Dübendorf, Switzerland, 95 p.
- Akhtar M, Ahmad N, and Booij M J (2009) Use of regional climate model simulations as input for hydrological models for the Hindukush-Karakorum-Himalaya region. *Hydrology and Earth System Science* 13(7):1075-1089
- Arnold J G, Srinivasan R, Muttiah R S, and Williams J R (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *Journal of the American Water Resources Association* 34(1): 73-89
- Auerbach DA, Easton ZM, Walter MT, Flecker AS, Fuka DR (2016) Evaluating weather observations and the climate forecast system reanalysis as inputs for hydrologic modelling in the tropics. *Hydrological Processes* 30(19):3466-3477
- Bitew MM, Gebremichael M (2011) Assessment of satellite rainfall products for streamflow simulation in medium watersheds of the Ethiopian highlands. *Hydrology and Earth System Sciences* 15(4):1147-1155
- Dile YT, Srinivasan R (2014) Evaluation of CFSR climate data for hydrologic prediction in data-scarce watersheds: an application in the Blue Nile River Basin. *Journal of the American Water Resources Association* 50(5):1226-1241
- Fadil A, Rhinane H, Kaoukaya A, Kharchaf Y, Alami Bachir O (2011) Hydrologic Modeling of the Bouregreg Watershed (Morocco) Using GIS and SWAT Model. *Journal of Geographic Information System*. 3:279-289
- Fuka DR, Walter MT, MacAlister C, Degaetano AT, Steenhuis TS, Easton ZM (2014) Using the climate forecast system reanalysis as weather input data for watershed models. *Hydrological Processes* 28(2230): 5613-5623
- General Directorate of state Hydraulic Works (Dsi) activity report (2018) Ankara. <https://cdniys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/759/1107/DosyaGaleri/dsi-2018-faaliyet raporuu.pdf>
- Hajihoseini H R, Hajihoseini M R, Morid S, Delavar M, and Booij M J (2016) Hydrological assessment of the 1973 treaty on the transboundary Helmand River, using the SWAT model and a global climate database. *Water Resource Management* 30(13):4681-4694
- Hajihoseini M R, Hajihoseini H R, Morid S, Delavar M, and Booij M J (2020) Impacts of land use changes and climate variability on transboundary Hirmad River using SWAT. *Journal of Water and Climate Change* 11(4):1695-1711
- Hajihoseini M, Morid S, Emamgholizadeh S, Amirahmadian B, Mahjoobi E, and Gholami H (2023) Conflict and cooperation in Aras International Rivers Basin: Status, trend, and future. *Sustainable Water Resources Management* 9(1)
- Harris I, Jones PD, Osborn TJ, and Lister DH (2014) Updated high-resolution grids of monthly climatic observations-the CRU TS3.10 datasets. *Climatology* 34(3):623-642
- Hundeche Y, and Bárdossy A (2004) Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology* 292(1-4):281-295
- Karaoglu M (2014) Agricultural meteorological properties of Aras Basin in Turkey. *Turkish Journal of Agricultural Research* 1(1):1-8
- Marhaento H, Booij M J, and Hoekstra A Y (2017) Attribution of changes in stream flow to land use change and climate change in a mesoscale tropical catchment in Java, Indonesia. *Journal of Hydrology Research*, 48(4):1143-1155
- Matthews M (2013) Reducing transboundary degradation in the Kura-Aras River basin. Desk study (a), Hydrology (b), Climate change (c), Water quality (d) UNDP/ GEF projects
- Mirumachi N (2015) Transboundary water politics in the developing world. Routledge, New York. ISBN 9780415812962
- Monteiro J, Gücker B, and Srinivasan R (2014) Comparison between Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) weather data and data from meteorological stations in Brazil to evaluate the suitability of CFSR data for SWAT. Conference: International SWAT Conference 2014
- MÜDÜR G (2022) Aras Basin drought management plan report. Su PEK Project, Ankara
- Neitsch S L, Arnold J G, Kiniry J R, & Williams J R (2005) Soil and water assessment tool theoretical documentation.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, Srenivasan R, Williams JR (2011) Soil and water assessment tool

- theoretical documentation. Texas Water Resources Institute Technical Report, No 406, 647p.
- Nouri M (2021) Effects of climatic and human factors on reducing Aras River flow using remote sensing (Case study: Upstream catchment of Aras dam). M. S. Thesis, Tarbiat Modares University of Tehran. (In Persian)
- Rossi CG, Srinivasan R, Jirayoot K, Le Duc T, Souvannabouth P, Binh N. and Gassman PW (2009) Hydrologic evaluation of the lower Mekong River Basin with the Soil and Water Assessment Tool model. International Agricultural Engineering Journal 18(1)
- Schuol J, Abbaspour K C (2006) Using monthly weather statistics to generate daily data in a SWAT model application to West Africa. Ecological Modelling 201(3-4):301-311
- World Bank Group (1983) Staff appraisal report in Turkey, Igridir Region, Irrigation project. Report No. 4299-TU
- TRCOLD (2014) Dams of Turkey report. International Commission on Large Dams Turkish National Committee
- Vu MT, Raghavan SV, Liong SY (2012) SWAT use of gridded observations for simulating runoff—a Vietnam river basin study. Journal of Hydrology and Earth System Sciences 16(8):2801-2811
- Williams L, Zazanashvili N, Sanadiradze G, Kandaurov A (2006) An eco-regional conversation plan for the Caucasus, 2nd edn. WWF Caucasus Program Office, ISBN: 99940-58-55-X
- Yontar B (2009) Determination of diffuse pollution sources in Aras basin and Management recommendation. Istanbul Technical University, Institute of Science, 501071704 (In Turkish)
- Yu W, Cestti RE, Lee JY (2015) Toward integrated water resources management in Armenia. World Bank Group