



بنیاد ملی علم ایران

«جزئیات طرح پژوهشی»

فارسی: مدل سازی اثرات هم افزایی تغییر اقلیم و برداشت آب زیرزمینی بر فرونشست زمین در ایران بر اساس چند مدلی همادی CMIP6

**Modeling the Synergistic Effects of Climate Change and
Groundwater Withdrawal on Land Subsidence in Iran
Based on CMIP6 Multi-Model Ensemble**

مجری طرح: دکتر عباسعلی داداشی رودباری

محل اجرای طرح: دانشگاه فردوسی مشهد

مدت زمان پیش‌بینی شده برای انجام طرح: ۱۲ ماه

تاریخ شروع درخواست: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

شماره طرح‌های قبلی مجری با بنیاد: - (در صورت وجود)

بنیاد ملی علم ایران

فهرست مطالب

۱- خلاصه پیشنهاد	۳
۲- بیان مسئله و شرح پیشینه	۳
۳- معرفی موضوع	۵
۴- ضرورت و اهمیت اجرای طرح	۶
۵- مروری بر ادبیات و پیشینه پژوهش و ذکر شکاف‌های زمینه پژوهشی	۷
۶- سوالات پژوهش	۹
۷- نوآوری‌ها	۹
۸- دستاوردها	۱۰
۹- روش‌شناسی پژوهش	۱۰
۱۰- روش جمع‌آوری داده و اطلاعات	۱۱
۱۱- روش تحلیل داده‌ها	۱۴
۱۲- محدودیتها و چالش‌های اجرای پژوهش	۱۸
۱۳- تربیت نیروی انسانی متخصص	۱۸
۱۴- ملاحظات اخلاقی (در صورت لزوم)	۱۸
۱۵- شرح علمی و ارائه مشخصات و نیازمندی‌های فنی—آزمایشگاهی طرح (در صورت لزوم)	۱۹
۱۶- امکانات، تجهیزات و سایر منابع موجود در سازمان مجری	۱۹
۱۷- امکانات، تجهیزات و سایر منابع مورد نیاز ناموجود در سازمان مجری	۱۹
۱۸- فعالیتهای طرح و زمانبندی طبق نمودار گانت	۱۹
۱۹- توجیه هزینه‌های انجام طرح	۲۱
۲۰- بروندادها و تعهدات	۲۱
۲۱- سایر توضیحات مورد نیاز	۲۱

۱- خلاصه پیشنهاد

با توجه به پیچیدگی‌های سیستم‌های هیدرولوژیک و اثرات هم‌افزای تغییر اقلیم بر منابع آب زیرزمینی، این پژوهش از یک رویکرد جامع و چند مدلی همادی برای کمی‌سازی آسیب‌پذیری منابع آب استفاده می‌کند. برای مدل‌سازی دقیق برهم‌کش‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی، از مدل‌های یادگیری ماشین (ML) تحت سناریوهای CMIP6 استفاده خواهد شد. برای برآورد دقیق متغیرهای اقلیمی (بارش و دما) در آینده (تا سال ۲۱۰۰)، از خروجی‌های مدل‌های CMIP6 تحت سناریوهای مختلف SSP (مانند ۴.۵-SSP2 و ۸.۵-SSP5) استفاده می‌شود. با توجه به اینکه داده‌های مدل‌های اقلیمی ممکن است نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای اربی‌باشد، اعمال روش‌های تصحیح اربی‌با نظیر نگاشت چندک (Quantile Mapping) برای بارش و نگاشت واریانس (Variance Scaling) برای دما ضروری است تا اربی‌سیستماتیک کاهش یافته و عدم قطعیت پیش‌نگری‌ها کاهش یابد. برای شبیه‌سازی دقیق رخدادهای هیدرولوژیکی و کاهش عدم قطعیت ذاتی مدل‌ها، کارایی چندین مدل یادگیری ماشین ارزیابی خواهد شد. مطالعات نشان داده‌اند که مدل‌هایی مانند تقویت دسته‌بندی (CatBoost) کارایی بسیار مطلوبی در شبیه‌سازی چند مدلی همادی (Ensemble) دارند. این مدل‌ها قادرند روابط غیرخطی پیچیده و دینامیک اقلیمی را شناسایی کرده و الگوهای پنهان در پاسخ حوضه آبخیز به تغییر اقلیم را پیش‌نگری کنند. به منظور بررسی اثرات ترکیبی خشکسالی، آبهای زیرزمینی و تغییر اقلیم، از شاخص آسیب‌پذیری هیدرولوژیک (HVI) استفاده خواهد شد. این شاخص بر اساس مؤلفه‌های بیلان آب شامل بارش، جریان آب زیرزمینی و تبخیر-تعرق محاسبه می‌شود. این رویکرد امکان کمی‌سازی آسیب‌پذیری حوضه را در سناریوهای مختلف فراهم می‌کند. استفاده از این شاخص به شناسایی مناطق با حساسیت اکولوژیکی بالا و ارزیابی ریسک تنش هیدرولوژیک کمک کرده و بینش‌های عملی برای مدیریت پایدار آب و زیرساخت‌های انطباقی ارائه می‌دهد. این تحقیق با ادغام پیش‌نگری‌های اقلیمی و تحلیل‌های هیدرولوژیکی، تاب‌آوری در برابر کمبود آب و تخریب اکوسیستم را تضمین کرده و راهکارهای مؤثری برای مقابله با چالش‌های اقلیمی کوتاه‌مدت و بلندمدت فراهم می‌آورد.

۲- بیان مسئله و شرح پیشینه

فرونشست زمین به عنوان یک پدیده زمین‌شناسی و آنتروپوزنیک، هم‌اکنون در بیش از ۱۵۰ کشور در سطح جهان مشاهده شده است که ضمن تهدید زیرساخت‌ها، زمینه ساز گسترش فرسایش و تلفات خاک و بسیاری از مخاطرات محیطی می‌باشد (Bagheri-Gavkosh et al., 2021). این پدیده که با جابه‌جایی عمودی سطح زمین مشخص می‌شود، می‌تواند نرخ‌هایی از میلی‌متر تا سانتی‌متر در سال داشته باشد و زیرساخت‌های حیاتی نظری شکه‌های جاده‌ای، سیستم‌های آبیاری و شبکه‌های برق را تخریب نماید (Galloway & Burbey, 2011). مطالعات جهانی نشان می‌دهند که ۱۵۹۶ شهر بزرگ جهان میانگین ۲۲ درصد از کلانشهرها، مانند مکزیکوستی، جاکارتا، پکن و تهران در مناطق مستعد فرونشست قرار دارند (Herrera-García et al., 2021). عوامل متعددی در بروز این پدیده دخیل هستند که می‌توان آن‌ها را به دو دسته عوامل انسانی از جمله بهره‌برداری از منابع زیرزمینی و ساخت‌وسازهای مهندسی و عوامل طبیعی شامل تغییر اقلیم، ویژگی سازنده‌ها در لایه‌های آبخوان و حرکات تکتونیک طبقه‌بندی کرد (Guo et al., 2017). در این میان، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به عنوان محرك اصلی انسانی برای فرونشست زمین در نظر گرفته می‌شود و نزدیک به ۶۰ درصد از موارد گزارش شده در سطح جهان را به خود اختصاص می‌دهد که امنیت آبی و محیطی را تحت تاثیر خود قرار داده است (Bagheri-Gavkosh et al., 2021).

امروزه امنیت آب به یکی از چالش‌های بین‌المللی جوامع بشری شده است، به گونه‌ای که تخمین زده می‌شود ۸۰ درصد از جمعیت جهان با تهدیدات جدی امنیت آبی مواجه هستند (Scanlon et al., 2023). اگرچه تغییر اقلیم به عنوان یک پیش‌ران طبیعی، چرخه‌ای آب را تشدید کرده و الگوهای بارش و دما را تغییر می‌دهد، اما مداخلات انسانی به‌ویژه کشاورزی فاریاب که مسئول ۷۰ درصد برداشت و ۹۰ درصد مصرف آب جهانی است نقش غالب را در تغییرات ذخیره آب ایفا می‌کند (Siebert et al., 2010).

عامل به صورت مجزا عمل نمی‌کنند، بلکه یک چرخه بازخوردی مخرب را شکل می‌دهند. خشکسالی‌ها منجر به کاهش آب‌های سطحی و تغذیه طبیعی آبخوان‌ها شده و از سوی دیگر کشاورزان ناچار به جایگزینی منابع با پمپاژ شدید آب‌های زیرزمینی می‌باشند. آب‌های زیرزمینی به عنوان منبع اصلی تأمین آب شیرین در جهان، نقش حیاتی در امنیت آبی ایفا می‌کنند و تأمین کننده حدود ۳۶ درصد از آب شرب و ۴۲ درصد از آب کشاورزی در مقیاس جهانی هستند (Scanlon et al., 2012). با ورود زمین به عصر «آنتروپوسن» (دوره انسان‌ساخت)، تعادل دینامیک این منابع تحت تأثیر دو واداشت اصلی، یعنی تغییر اقلیم و فعالیت‌های انسانی، به شدت مختل شده است (Gleeson et al., 2020). در حالی که گرمایش جهانی از طریق افزایش نرخ تبخیر موجب کاهش تغذیه طبیعی آبخوان‌ها می‌شود، نیاز روزافزون جمعیت به غذا و آب، برداشت‌های انسانی را به سطحی ناپایدار رسانده است (de Graaf et al., 2019).

بر اساس شواهد ماهواره‌ای GRACE، در دو دهه اخیر (۲۰۰۲ تا ۲۰۲۲)، روندهای نزولی شدید در ذخیره کل آب (TWS) در کانون‌های کشاورزی جهان مشاهده شده است. داده‌های بازتحلیل شده نشان می‌دهند که آبخوان‌های واقع در مناطق خشک، از جمله ایران، با نرخ‌های هشداردهنده‌ای از تخلیه مواجه هستند (Shamsudduha & Taylor, 2020). در ایران، برهمنکش غیرخطی و هم‌افزایی تغییر اقلیم و عوامل انسانی، به‌ویژه در گزار از استفاده آب‌های سطحی به وابستگی مطلق به آب‌های زیرزمینی، منجر به رخداد فرونیست‌های برگشت ناپذیر شده است. درک اثرات تغییر اقلیم و عوامل انسانی بر منابع آب جهانی، که به طور فزاینده‌ای ناپایدار شده‌اند، برای تدوین استراتژی‌های سازگاری و کاهش اثرات، حیاتی است (Rodell et al., 2018). با این حال، تفکیک این پیشان‌ها به دلیل برهمنکش پیچیده آن‌ها در مقیاس‌های مختلف، همچنان یک چالش دشوار محسوب می‌شود. نخستین گام عملی در این راستا، کمی‌سازی روندها و شناسایی عوامل اثرگذار در این تغییرات است (Ji et al., 2024).

بررسی‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای نشان دهنده کاهش چشمگیر منابع آب در مناطق تحت تنفس آبی مانند جنوب و غرب آسیا است (Chandanpurkar et al., 2025); چالشی که در ایران به وضوح قابل مشاهده است. ایران که در کمربند اقلیمی خشک تا نیمه‌خشک قرار دارد، با تنفس‌های مداوم منابع آب ناشی از بارش محدود و تقاضای فزاینده روپرور است (Barati et al., 2023). شواهد نشان می‌دهد که در دهه‌های اخیر، پهنه‌های آبی سطحی نظیر دریاچه ارومیه و دریاچه طشك-بختگان و همچنین بسیاری از رودخانه‌ها به شدت کاهش یافته‌اند و همزمان ذخایر آب زیرزمینی به سطوح بحرانی رسیده‌اند (Ashraf et al., 2021). این کاهش‌ها بازتابی از برهمنکش پیشان‌های هیدرولوکیمی و انسانی، از جمله کاهش تغذیه آبخوان‌ها و برداشت‌های بی‌رویه است (Shayeghi et al., 2024). علاوه بر این، تغییر کاربری اراضی (LULC) نظیر توسعه کشاورزی و شهرنشینی، با تغییر الگوهای رواناب و تبخیر-ترعرق، مستقیماً بر توزیع آب اثر می‌گذارد (Wang et al., 2023). این پژوهش در پی آن است که با واکاوی این پیچیدگی‌ها، سهم عوامل مختلف در نوسانات منابع آب ایران را بررسی نماید.

هم افزایی برداشت آب‌های زیرزمینی، تغییر اقلیم، کاهش بارش و فرونیست‌زمن در ایران به مرحله بحرانی رسیده است. داده‌های بلندمدت نشان می‌دهد که در بازه زمانی ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵، حجم ذخیره آبخوان‌های کشور حدود ۷۴ کیلومتر مکعب کاهش یافته است (Ashraf et al., 2017). این رقم تقریباً $1/6$ برابر حداکثر حجم تاریخی دریاچه ارومیه است (Ashraf et al., 2019). هم افزایی کاهش تغذیه آبخوان‌ها ناشی از خشکسالی‌های هواشناسی و تلفیق برداشت بی‌رویه برای کشاورزی، چرخه‌ای معیوب را در کشور شکل داده است بطوريکه کاهش آب‌های سطحی کشاورزان را به حفر چاههای عمیق‌تر و برداشت بیشتر سوق می‌دهد (افزایش چاهها از ۴۶۰,۰۰۰ به ۷۹۴,۰۰۰ حلقه) (Ashraf et al., 2017).

توسعه پایدار و امنیت سرمیانی در فلات ایران، به‌واسطه ویژگی‌های خاص جغرافیایی و اقلیمی، پیوندی ناگسستنی با مدیریت منابع آب دارد. همانطور که گفته شد ایران بر اساس شاخص‌های اقلیمی در کمربند خشک جهان واقع شده است، به‌طوری که ۳۵ درصد از پهنه آن را مناطق فراخشک، خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهند. این محدودیت ذاتی با پتانسیل تبخیر سالیانه‌ای که سه برابر متوسط جهانی گزارش شده، تشدید می‌گردد. در دهه‌های اخیر، همگرایی مؤلفه‌های طبیعی نظیر تغییر اقلیم با مداخلات انسانی، چرخه‌ای مخرب را ایجاد کرده که

برآیند آن ناترازی شدید در منابع آب و ظهور پدیده‌های ژئوتکنیکی نظیر فرونشست است. پدیده‌ای که نرخ وقوع آن در ایران بیش از ۵ برابر متوسط نرخ جهانی برآورد شده است (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۴۰۲). تحلیل‌های هیدرولوژیک نشان می‌دهد که حجم آب تجدیدپذیر کشور از حدود ۱۳۰ میلیارد مترمکعب در بلندمدت به ۸۹ میلیارد مترمکعب در متوسط ۱۰ سال اخیر کاهش یافته است که این امر گویای کوچک شدن منابع آبی در دسترس است (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۶). لذا مسئله اصلی این پژوهش، فقدان درک دقیق از برهمنکش غیرخطی و هم‌افزایی میان تغییر اقلیم و کاهش منابع آب و متعاقب آن رخداد فرونشست زمین است. اگرچه مطالعات پیشین بسیاری رخداد فرونشست و خشکسالی را در دشت‌های ایران تأیید کرده‌اند، اما این پژوهش‌ها اغلب نتوانسته‌اند به دلیل عدم تطابق زمانی و مکانی داده‌ها، رابطه کمی دقیقی بین تغییر اقلیم و نرخ فرونشست در مقیاس‌های مختلف ارائه دهند. این پژوهش بر آن است تا مشخص کند چگونه ترکیب خشکسالی‌های انسان ساخت^۱ (AghaKouchak et al., 2015) و تغییر اقلیم، نرخ فرونشست را فراتر از مجموع اثرات تک‌تک آن‌ها تشیدد کرده است.

هدف کلی این پژوهش، مدل‌سازی و تحلیل دینامیک هم‌افزایی تغییر اقلیم بر نرخ فرونشست زمین در ایران و آشکارسازی چشم‌انداز آینده است. بر این اساس اهداف اختصاصی زیر دنبال خواهد شد:

۱. ارزیابی کمی روند تاریخی و فعلی افت سطح آب‌های زیرزمینی و تعیین سهم نسبی نوسانات اقلیمی و برداشت‌های انسانی در بیلان منفی آبخوان‌های کشور.
۲. مدل‌سازی فضایی نرخ فرونشست زمین و تحلیل پیامدهای آن با هدف ارزیابی ریسک و آسیب‌پذیری زیرساخت‌های حیاتی در دشت‌های بحرانی کشور.
۳. شناسایی و اولویت‌بندی کانون‌های بحرانی حاصل از برهمنکش تغییر اقلیم و سوء مدیریت منابع آب.
۴. پیش‌نگری تغییرات ذخیره کل آب (TWS) و نرخ فرونشست زمین در افق‌های آتی تحت سنازویوهای مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSPs) با استفاده از رویکرد چند مدلی همادی CMIP6

۱-۲- معرفی موضوع

تغییر اقلیم به عنوان یک پدیده جهانی، امنیت غذایی، منابع آب آشامیدنی و مصرف انرژی را تهدید کرده و نیاز فوری به سازگاری و ایجاد تاب‌آوری را برجسته می‌سازد (IPCC, 2014). این پدیده آسیب‌پذیری حوضه‌های آبخیز را در برابر عدم تعادل هیدرولوژیک تحت تأثیر قرار می‌دهد، در حالی که فعالیت‌های انسانی تنש آبی را تشیدد کرده و توسعه پایدار را با مانع مواجه می‌کنند (Mahdian et al., 2023). تغییر اقلیم پیامدهای غیرقابل پیش‌بینی برای دسترس‌پذیری به منابع آب دارد که به دلیل وجود عدم قطبیت‌ها، مدیریت منابع آب را پیچیده می‌سازد.

با افزایش دما و تغییر الگوهای بارش، سیستم‌های انسانی و اکولوژیکی در مناطق کم‌آب به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. نوسانات ناشی از فشارهای انسانی، رخدادهای فرین مانند خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها را تشیدد کرده و بر عرضه آب کشاورزی تأثیر منفی می‌گذارد (Moon et al., 2024). در این راستا، پاسخ‌های سیستم منابع آب سطحی و زیر سطحی به تغییر اقلیم در سطح حوضه آبخیز برای پایداری منابع آب و کارکرد اکوسیستم‌ها، جیانی است (IPCC, 2021).

با گرم شدن اقلیم جهانی و تشیدد چرخه هیدرولوژیک خشکی، برهمنکش میان رخدادهای فرین اقلیمی (نظیر خشکسالی‌ها و سیلاب‌ها) و فرونشست زمین به طور فزاینده‌ای بر یکدیگر اثرگذار خواهند بود. این رابطه دو سویه است؛ به این معنا که فرونشست می‌تواند اثرات وقایع فرین را تغییر دهد (بطور مثال با تغییرات زهکشی سطحی، فشرده شدن لایه خاک و کاهش نفوذپذیری می‌تواند منجر به افزایش تجمع رواناب‌ها و گسترش سیلاب‌ها شود) و متقابلاً رخدادهای فرین می‌توانند محرك فرونشست باشند. برای مثال، خشکسالی‌ها ریسک فرونشست را از طریق افزایش تقاضا برای برداشت آب زیرزمینی تشیدد می‌کنند، و از سوی دیگر، برخی فرآیندهای ایجاد‌کننده فرونشست مانند اکسیداسیون مواد آلی

^۱ Anthropogenic Droughts

خاک، منجر به آزادسازی گازهای گلخانه‌ای شده و بازخوردهای مثبت اقلیمی ایجاد می‌کنند که خود باعث تسریع تغییر اقلیم می‌شود. با وجود اثرات ویرانگر ترکیب مخاطرات اقلیمی و فرونشست بر سیستم‌های طبیعی و ساخته‌شده، بررسی اثرات همافزایی میان رخدادهای فرین، تغییر اقلیم، فرونشست و فعالیت‌های انسانی همچنان یک شکاف بحرانی در درک مخاطرات آبشاری و بازخوردهای پیچیده باقی مانده است (Huning et al., 2024).

مسئله اصلی پژوهش، گسست عمیق میان ظرفیت‌های هیدرولوژیک کشور و بارگذاری‌های توسعه‌ای انجام شده بر منابع آب است. شواهد آماری حاکی از یک پارادوکس نگران‌کننده در چرخه بارش-رواناب است؛ به‌گونه‌ای که در ۱۰ سال اخیر، با وجود کاهش ۱۱ درصدی بارش‌ها، حجم جریان‌های سطحی کاهشی ۴۴ درصدی را تجربه کرده است. این اختلاف فاحش نشان‌دهنده نقش غالب رواناب‌های دست‌خوره و برداشت‌های انسانی پیش از رسیدن آب به شبکه‌های پایش است (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۶). نتیجه مستقیم محدودیت منابع سطحی، فشار مضاعف بر منابع آب زیرزمینی بوده است. طبق آمار سال ۱۴۰۱، کسری تجمعی آبخوان‌های کشور به رقم ۱۴۳ میلیارد مترمکعب رسیده که روندی کاملاً نزولی و بدون بازگشت را نشان می‌دهد (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۴۰۲ال).

این برداشت بی‌رویه که عمدتاً ناشی از فشار بخش کشاورزی با سهم مصرف حدود ۹۴ درصد (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۴۰۲ال) و یا بر اساس آمار سال ۱۳۸۶ معادل ۹۲ درصد است، منجر به تخلیه فشار منفذی آب در لایه‌های خاک و وقوع فرونشست شده است. مسئله حائز اهمیت این است که فرونشست در ایران صرفاً یک پدیده زمین‌شناختی نیست، بلکه به صورت مرگ آبخوان تعبیر می‌شود؛ زیرا با فشردگی لایه‌های رسوبی، تخلخل خاک از بین رفت و حتی در صورت بارش آتی، امکان ذخیره‌سازی آب وجود نخواهد داشت. در حال حاضر بیش از ۳۵ درصد جمعیت کشور در مواجهه با خطرات ناشی از فرونشست قرار دارند و زیرساخت‌های حیاتی نظیر راه‌آهن، فرودگاه‌ها و خطوط انرژی با تهدید جدی مواجه‌اند (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۴۰۲ب). عدم انطباق قوانین، ضعف در نظارت و طراحی سازه‌های آبی (سدها) بر اساس داده‌های قدیمی که منجر به خالی ماندن متوسط ۵۶ درصد حجم مخازن سدها شده است (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۶)، ابعاد مدیریتی این مسئله را پیچیده‌تر کرده است.

ضرورت اجرای این طرح از آنجا ناشی می‌شود که بدون در نظر گرفتن این همافزایی و حلقه‌های بازخورد در مدل‌سازی‌ها، ممکن است شدت تغییر اقلیم و شتاب فرونشست در بسیاری از مناطق دست کم گرفته شود و جوامع در برابر پیامدهای آن نااماده باقی بمانند. مدل‌سازی دقیق این فرآیندها برای شناسایی جمعیت‌های آسیب‌پذیر، ارزیابی زیرساخت‌های در معرض خطر و توسعه راهبردهای کاهش و سازگاری ضروری است. با توجه به اینکه ایران در زمرة مناطقی با بالاترین نرخ‌های فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی قرار دارد، درک پاسخ‌های پیچیده سطح زمین به محرك‌های اقلیمی و انسانی و کمی‌سازی سهم هر یک، برای مدیریت پایدار منابع و جلوگیری از خسارات جبران‌پذیر حیاتی است. تلاش‌های بین‌رشته‌ای و پیشرو باید برای توسعه سیاست‌هایی که اثرات فرونشست انسانی و تغییر اقلیم را کاهش یا معکوس می‌کنند، به کار گرفته شود (Huning et al., 2024).

۲-۲- ضرورت و اهمیت اجرای طرح

اجرای این پژوهش از آن جهت حائز اهمیت است که ایران با میانگین بارش سالانه کمتر از یک‌سوم میانگین جهانی مواجه است و حدود ۷۳ درصد از همین بارش اندک نیز تحت تاثیر دماهای بالا تبخیر می‌شود (Foroumandi et al., 2023). آب زیرزمینی سهم اصلی تأمین آب کشور را بر عهده دارد و عمدتاً در بخش کشاورزی مصرف می‌شود؛ با این حال، الگوهای کشت و آبیاری ناکارآمد و نامتناسب با اقلیم، تلفات آب را تشديد کرده‌اند.

مدل‌سازی جامع بررسی اثرات همافزایی تغییر اقلیم و برداشت آب زیرزمینی بر فرونشست زمین، از منظر مدیریت پایدار منابع آب و اینمی زیرساخت‌ها ضروری اندک‌پذیر دارد. اهمیت این موضوع از آنجا ناشی می‌شود که فشارهای وارده بر آبخوان‌ها در دهه‌های آینده به دلیل رشد جمعیت، شهرنشینی و توسعه اقتصادی تشید خواهد شد. پیش‌بینی می‌شود که تقاضای جهانی آب صنعتی و خانگی تا سال ۲۰۵۰ بین ۸۰ تا ۵۰ درصد افزایش باید (Kuang et al., 2024). در مناطقی که وابستگی شدیدی به آب زیرزمینی دارند، مانند ایران، خطر فرونشست برگشت‌پذیر بسیار جدی است.

- نرخ فرونشست در برخی مناطق غربی ایران به حدود ۱۸/۹ سانتی‌متر در سال رسیده است و حداقل ۲۵ درصد از جمعیت کشور در مناطقی زندگی می‌کنند که پتانسیل فرونشست تا یک متر را دارا هستند (Motagh et al., 2008). این پدیده، زیرساخت‌ها کلانشهرهایی مانند تهران با ۱۵ میلیون جمعیت و شریان‌های حیاتی را تهدید می‌کند. همزمانی فرونشست‌ها با فعالیت‌های تکتونیکی در مناطق لرزه‌خیز، می‌تواند اثرات زلزله‌ها را تشدید کرده و به فاجعه‌ای انسانی منجر شود.
- آبخوان‌های دشت‌های کلیدی مانند خوضه کرخه (سبد غذایی ایران) و کارون، با نرخ هشداردهنده‌ای در حال تخلیه هستند (به ترتیب ۱۰.۸ و ۰.۹۱ کیلومتر مکعب کاهش طی ۱۴ سال) (Ashraf et al., 2021). این روند با افزایش شوری آب (افزایش ۱۸۳ درصدی هدایت الکتریکی در خوضه کارون) (Naddafî et al., 2007)، عملًا خاک‌های حاصلخیز را غیرقابل کشت می‌کند. تداوم این وضعیت، امنیت غذایی را به خطر می‌اندازد.
- شرایط ایران نماد بارز خشکسالی انسان‌ساخت^۱ است. نتایج این تحقیق می‌تواند مدل‌های ارزشمندی برای مدیریت منابع آب ارائه دهد. مهم‌تر از همه، فرونشست زمین منجر به کاهش دائمی و غیرقابل برگشت ظرفیت ذخیره آبخوان^۲ می‌شود (Don et al., 2006؛ پدیده‌ای که اگر امروز کمی‌سازی و مدیریت نشود، احیای منابع آب در سال‌های پربران آتی را غیرممکن می‌سازد).

۳-۲- مروری بر ادبیات و پیشینه پژوهش و ذکر شکاف‌های زمینه پژوهشی

پدیده فرونشست زمین که زمانی تنها به عنوان یک چالش ژئوتکنیکی محلی در نظر گرفته می‌شد، امروزه به یک بحران جهانی با ابعاد پیچیده محیط‌زیستی و اقتصادی تبدیل شده است. مطالعات اخیر نشان می‌دهند که این پدیده دیگر به صورت مجزا عمل نمی‌کند، بلکه در یک چرخه بازخوردی خطرناک با تغییر اقلیم و پدیده‌های فرین جوی قرار گرفته است. بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که درک جامعه علمی از فرونشست، از تمرکز صرف بر مکانیک خاک به سمت تحلیل‌های سیستماتیک و چندوجهی که در آن برهم‌کنش اقلیم، مدیریت منابع آب و تاب‌آوری زیرساخت‌ها محوریت دارد، تکامل یافته است. در ادامه، سیر تحول دانش در این حوزه با تمرکز بر سه محور کلیدی سازوکارهای تشدید‌کننده در اثر خشکسالی، تشدید مخاطرات سیالاب و پیشروی آب دریا و مدیریت منابع آب و استراتژی‌های سازگاری بررسی می‌شود. یکی از نخستین حلقه‌های ارتباطی میان تغییر اقلیم و پایداری زمین، اثرات مستقیم کمبود رطوبت بر خاک‌های ریزدانه است. در حالی که پژوهش‌های اولیه، مانند مطالعه تاریخی Brignall et al., (2002) در انگلستان، بر خسارات اقتصادی ناشی از انقباض خاک‌های رسی (Clay shrinkage) به زیرساخت‌های مسکونی در پی خشکسالی‌های شدید دهه ۱۹۷۰ تمرکز داشتند، تحقیقات نوین با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته سنجش از دور، ابعاد پیچیده‌تری از این رابطه را آشکار کردند.

با گذر زمان و تشدید تغییر اقلیم، پژوهشگران دریافتند که خشکسالی‌ها تنها منجر به نشستهای موقت نمی‌شوند، بلکه می‌توانند تغییرات جبران‌ناپذیری در ظرفیت آبخوان‌ها ایجاد کنند. در این راستا، Miller et al., (2020) با استفاده از تداخل‌سنگی راداری (InSAR) در کالیفرنیا نشان دادند که چگونه خشکسالی‌های سریع و شدید، منجر به فرونشست‌های گسترده در مجاورت کانال‌های انتقال آب شده و تهدیدی جدی برای امنیت آبی ایجاد می‌کنند. این مطالعه بر نقش حیاتی نوسانات آب زیرزمینی در تغییر شکل‌های الاستیک و غیرالاستیک پوسته زمین تأکید داشت.

در همین راستا، مطالعات جدیدتر بر ماهیت غیرالاستیک^۳ این تغییر شکل‌ها تمرکز کردند. Welch et al., (2024) در بررسی خاک‌های منیسپشنونده سواحل تگزاس دریافتند که فرونشست‌های ناشی از خشکسالی صرفاً یک واکنش فیزیکی بازگشت‌پذیر نیستند، بلکه حدود ۱۰ درصد از این نشستهای به صورت دائمی باقی مانده و منجر به از دست رفتن ترازو ارتفاعی زمین می‌شوند. این یافته توسط پژوهش جدید Dörr et al., (2025) در دلتای مکونگ ویتنام نیز تأیید شد؛ آن‌ها نشان دادند خشکسالی‌های شدید می‌تواند فرونشستی تا ۷ سانتی‌متر را در عرض

¹ Anthropogenic drought

² Aquifer Storage Loss

³ Inelastic

چند ماه تحمیل کند که حتی با بازگشت فصل بارش نیز کاملاً جبران نمی‌شود. این نتایج به روشی نشان می‌دهد که با افزایش تواتر خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم، نرخ فرونشست‌های برگشت‌ناپذیر در دشت‌های آبرفتی و مناطق ساحلی شتاب تگران‌کننده‌ای یافته است. همزمان با فرونشست زمین، تغییر الگوی بارش و بالا آمدن سطح آب دریاها، سناریوی مخاطرات طبیعی را دگرگون کرده است. ادبیات موجود نشان می‌دهد که نادیده گرفتن نرخ فرونشست در مدل‌سازی‌های سیلان، منجر به کم‌آوردن فاحش رسک می‌شود. Chen & Tfwala (۲۰۱۸) با توسعه مدل‌های فیزیوگرافی نشان دادند که ترکیب فرونشست زمین و تغییر اقلیم، نه تنها عمق سیلان‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه مدت زمان ماندابی^۱ را نیز بین ۱۳ تا ۲۷ درصد طولانی‌تر می‌کند که این امر خسارات وارد به مناطق مسکونی را به شدت تشدید می‌نماید. این موضوع در مناطق ساحلی اهمیتی دوچندان می‌یابد. در این ارست، Bürgmann & Shirzaei (۲۰۱۸) با بررسی خلیج سان فرانسیسکو نشان دادند که نقشه‌های خطر سیلان که صرفاً بر اساس سناریوهای بالا آمدن سطح آب دریا تدوین شده‌اند، گمراه‌کننده‌اند. آن‌ها اثبات کردند که با لحاظ کردن نرخ فرونشست محلی، مساحت مناطق در معرض خطر غرقابی تا ۹۰ درصد بیشتر از برآوردهای قبلی خواهد بود. در سطح کلان‌تر (Huning et al., 2024) استدلال می‌کنند که یک چرخه معیوب شکل گرفته است. از یک سو پدیده‌های فرین اقلیمی (مانند خشکسالی و سیل) پیش‌ران فرونشست هستند و از سوی دیگر، فرونشست زمین شدت اثرات این پدیده‌ها را تقویت می‌کند. این پژوهش هشدار می‌دهد که بدون در نظر گرفتن این بازخوردهای متقابل، راهکارهای سازگاری با تغییر اقلیم محکوم به شکست خواهد بود.

بخش قابل توجهی از ادبیات پژوهش به نقش فعالیت‌های انسانی، بهویژه برداشت بی‌رویه آبهای زیرزمینی، و برهمنکش آن با متغیرهای اقلیمی اختصاص دارد. در ایران، Andaryani et al., (2019) با مطالعه دشت مرند نشان دادند که اگرچه تغییر کاربری اراضی مؤثر است، اما تحت سناریوهای بدینانه اقلیمی، تغییر اقلیم نقش غالب را در کاهش ذخیره آبخوان و تشدید فرونشست ایفا می‌کند. این یافته‌ها با پژوهش Ghorbani et al., (2022) در دشت اردبیل هم‌راستا است که با استفاده از تکنیک‌های سوی زمانی InSAR، نرخ‌های فرونشست هشداردهنده‌ای تا ۴۵ میلی‌متر در سال را ثبت کردند که مستقیماً با پمپاژ آب و کاهش بارش در ارتباط است.

تلاش برای کمی‌سازی این تأثیرات در مقیاس‌های وسیع‌تر نیز صورت گرفته است. Adem et al., (2024) در عربستان سعودی با تلفیق داده‌های ماهواره‌ای GRACE و InSAR، همبستگی قوی میان تخلیه ذخایر آب زیرزمینی و نرخ فرونشست را در محیط‌های خشک به اثبات رسانندند. Collados-Lara et al., (2020) با ارائه روشی جدید برای ارزیابی سناریوهای تغییر اقلیم بر آبخوان‌های اسپانیا، پیش‌نگری کردند که نرخ فرونشست در افق ۲۰۴۵ می‌تواند تا ۵۴ درصد افزایش یابد. در نهایت، Li et al., (2025) با مدل‌سازی همبست جریان آب زیرزمینی و فرونشست در چین، دریافتند که در آینده، تقاضای آب (ناشی از عوامل اقتصادی-اجتماعی) و استراتژی‌های انتقال آب (مانند پروژه انتقال آب جنوب به شمال)، تأثیری به مراتب بیشتر از تغییر اقلیم مستقیم بر نرخ فرونشست خواهد داشت. این مطالعه و پژوهش Wang et al., (2024) که به تحلیل بازگشت سطح زمین پس از کنترل برداشت آب پرداخته‌اند، روزنه‌های امیدی را نشان می‌دهند که با مدیریت صحیح و کاهش فشار بر آبخوان‌ها، می‌توان حتی در شرایط تغییر اقلیم، روند فرونشست را تعديل یا معکوس کرد.

مروء منابع فوق نشان می‌دهد که پارادایم علمی از مشاهده فرونشست به پیش‌نگری و مدیریت هم‌افزایی‌ها تغییر کرده است. شکاف اصلی در دانش کنونی، کمبود مدل‌های جامع‌نگری است که بتواند به طور همزمان دینامیک‌های غیرالاستیک خاک، اقلیمی و مداخلات مدیریتی کلان (مانند انتقال آب) را در یک پلتفرم واحد شبیه‌سازی کنند تا استراتژی‌های سازگاری و کاهش اثرات واقع‌بینانه‌تری تدوین گردد.

علیرغم وجود ادبیات پژوهشی غنی در سطح جهانی که به بررسی همه‌جانبه پدیده‌های اقلیمی پرداخته‌اند، مروء مطالعات انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد که مؤلفه‌های کلیدی همچون فرونشست زمین، خشکسالی و تغییر اقلیم، عمدتاً به صورت مجزا و منفک از یکدیگر مورد واکاوی قرار گرفته‌اند؛ رویکردی که بررسی تفصیلی تمامی آن‌ها در چارچوب محدود این پژوهش نمی‌گنجد. با این حال، به‌منظور تبیین دقیق وضعیت کنونی کشور در مواجهه با چالش‌های تغییر اقلیم، نوسانات منابع آب زیرزمینی و نرخ فرونشست، در این تحقیق به استناد گزارش‌های رسمی و

^۱ Inundation duration

اسناد بالادستی منتشرشده توسط مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی پرداخته شده است تا تصویری جامع و مبتنی بر داده‌های ملی از این بحث‌ها ارائه گردد.

مطالعات رسمی کشور و اسناد بالادستی از سوی مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی نشان می‌دهند که توزیع بارش در ایران دارای ناهمگونی شدید زمانی و مکانی است؛ به طوری که ۷۵ درصد بارش‌های کشور تنها ۲۵ درصد سطح کشور و عمدتاً در فصول غیر زراعی رخ می‌دهد (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۶). روند تغییر اقلیم باعث شده تا کشور از نظر شاخص فالکن مارک وارد مرحله تنش آبی شود، چرا که سرانه آب تجدیدپذیر از ۴۰۰۰ مترمکعب در سال ۱۳۳۵ به ۱۴۰۰ مترمکعب در سال ۱۳۸۵ کاهش یافته است (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۴). همچنین تغییر الگوی بارش و افزایش دما سبب شده تا در حوضه‌هایی مانند حوضه آبریز دریای خزر، علیرغم افزایش ۲ درصدی بارش در یک دهه اخیر، جریان سطحی ۴۶ درصد کاهش یابد که بیانگر نقش مخرب برداشت‌های بالادست و تغییر کاربری اراضی است (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۴۰۲). آب‌های زیرزمینی به عنوان ذخایر استراتژیک، تأمین‌کننده ۵۵ درصد کل نیاز آبی کشور هستند (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۴). با این حال، برداشت سالیانه ۳۶.۴ میلیارد مترمکعب از این منابع تنها برای بخش کشاورزی (معادل ۸۵ درصد کل برداشت از آب زیرزمینی)، تعادل آبخوان‌ها را برهم زده است (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۴۰۲الف). اسناد حاکی از آن است که ۱۲۰ میلیارد مترمکعب از کسری تجمعی مخازن (معادل یک‌چهارم ذخایر استراتژیک و تجدیدناپذیر) از دست رفته است. این تخلیه سبب تغییر جهت گرادیان هیدرولیکی شده و رودخانه‌ها که در حالت طبیعی تغذیه کننده آبخوان بودند، اکنون به درون سفره‌های آب زیرزمینی زهکشی می‌شوند (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۶).

۴-۲- سؤالات پژوهش

- چگونه رخدادهای فرین اقلیمی (مانند خشکسالی‌های تشید شده ناشی از تغییر اقلیم) با فعالیت‌های انسانی نظیر برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی ترکیب شده و بر نرخ و دامنه فرونشست زمین در دشت‌های بحرانی ایران اثر می‌گذارند؟
- با توجه به اینکه نرخ‌های فرونشست غیرخطی بوده و در مقیاس‌های زمانی و مکانی متفاوتی رخ می‌دهند، سهم عوامل انسانی در مقایسه با عوامل طبیعی در دشت‌های کلیدی مانند رفسنجان، مشهد، تهران و ورامین در سناریوهای مختلف آینده چگونه خواهد بود؟
- چه راهبردهای سازگاری و کاهشی می‌تواند بر اساس درک هم‌افزایی میان فرونشست و رخداد فرین اقلیمی تدوین شود تا تاب‌آوری زیرساخت‌ها و جوامع در مواجهه با خطر افزایش یابد؟

۵-۲- نوآوری‌ها

- نوآوری اصلی این تحقیق در رویکرد جامع آن برای کمی‌سازی دینامیک زمانی-مکانی ذخیره آب خشکی (TWS) در حوضه‌های آبریز اصلی ایران با استفاده از داده‌های GRACE/GRACE-FO در یک بازه زمانی طولانی مدت (۲۰۰۵ تا ۲۰۲۰) نهفته است. برخلاف مطالعات پیشین که ممکن است تنها بر یک عامل تمرکز داشته باشند، این پژوهش با به کارگیری تحلیل روند و مدل‌های CMIP6 را به طور آماری به پیش‌ران‌های هیدرولیکی و انسانی نسبت می‌دهد.
جنبه متمایز و نوآورانه دیگر این طرح، تفکیک سهم نسبی تغییرپذیری طبیعی اقلیمی و فعالیت‌های انسانی در کاهش ذخایر آب است. این مطالعه ارتباط بین تغییرات TWS با بارش، تبخیر-تعرق واقعی (ETa) و تغییرات کاربری اراضی (LULC) را مدل‌سازی می‌کند. این رویکرد در حوضه‌های ناهمگن ایران، منطقی را که بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر کمبود آب شیرین دارند شناسایی کرده و اثرات آبشاری تغییر اقلیم و شیوه‌های مدیریت زمین بر بیلان آب منطقه‌ای را شفاف‌سازی می‌کند. نتایج این تحلیل فرآیند-محور، بینش‌های جدیدی را برای مدیریت یکپارچه زمین و آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک فراهم می‌آورد.
- برخلاف مطالعات متداول که همبستگی ساده بین بارش و سطح آب را برسی می‌کنند، این تحقیق بر برهmeknesh غیرخطی و تشید کننده میان نوسانات اقلیمی و مداخله انسانی تمرکز دارد. این رویکرد نشان می‌دهد که چگونه تغییر کاربری اراضی و توسعه کشاورزی، حساسیت سیستم‌های آبخوان را به نوسانات اقلیمی تغییر داده است.

- استفاده همزمان از داده‌های کلان مقیاس ثقلی (GRACE) برای درک تغییرات کلی آب و داده‌های با تفکیک مکانی بالا برای پایش تغییرات سطح زمین، امکان تفکیک دقیق سیگنال‌های اقلیمی از سیگنال‌های انسانی را فراهم می‌کند.

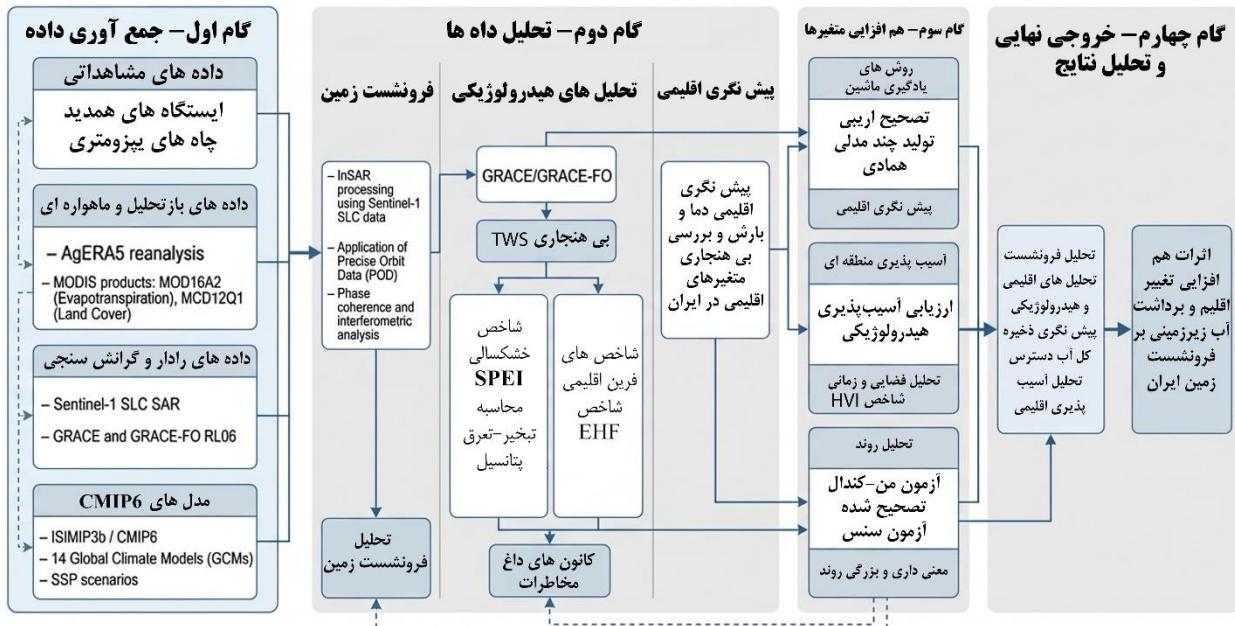
۶-۲- دستاوردها

اجرای این طرح پژوهشی منجر به ایجاد یک سنتر جامع از روابط پیچیده میان تغییر اقلیم، فعالیت‌های انسانی و فرونشست زمین خواهد شد که فراتر از ارزیابی‌های تک‌بعدی معمول است. یکی از دستاوردهای اصلی، شناسایی دقیق کانون‌های بحرانی و نرخ‌های فرونشست در ستاریوهای آینده خواهد بود که با استفاده از داده‌های نوین و درک عمیق‌تر از چرخه‌های هیدرولوژیکی تشدید شده حاصل می‌شود. این پژوهش با پر کردن شکاف موجود در بررسی اثرات ترکیبی رخدادهای فرین و فرونشست، بینش‌های لازم را برای بهروزرسانی ارزیابی‌های ریسک و آسیب‌پذیری فراهم می‌کند. همچنین، شناخت بهتر از نحوه برهمکنش فرونشست با سیستم‌های اقلیمی و انسانی، به مدیران منابع آب و برنامه‌ریزان شهری در ایران امکان می‌دهد تا سیاست‌های مدیریتی (مانند آنچه در قانون مدیریت پایدار آب زیرزمینی کالیفرنیا SGMA اجرا شده است) را بومی‌سازی کرده و از خسارates اقتصادی و محیط‌زیستی آتی جلوگیری کنند. در نهایت، این طرح با برگسته کردن نقش بازخوردهای اقلیمی ناشی از فرونشست، به ادبیات جهانی در زمینه مخاطرات آبشاری و تغییر اقلیم کمک شایانی خواهد نمود.

۳- روش‌شناسی پژوهش

این پژوهش با رویکردی ترکیبی و چندمنبعی، برهم‌کنش متغیرهای اقلیمی، منابع آب زیرزمینی و پدیده فرونشست را با الگوریتم‌های یادگیری ماشین (Machine Learning) ترکیب و مورد بررسی قرار می‌دهد. مجموعه داده تحقیق شامل تلفیقی از پایش‌های زمینی (سطح ایستابی چاههای پیزومتری و متغیرهای جوی ایستگاه‌های سینوپتیک با دوره آماری ۳۰ ساله) و محصولات بازتحلیل و سنجش‌ازدور است. به منظور پوشش خلاء‌های مکانی‌زمانی، از داده‌های بازتحلیل AgERA5 با تفکیک ۰.۱ درجه قوسی و گام روزانه به عنوان مکمل داده‌های ایستگاهی و از محصولات سنجنده MODIS شامل MOD16A2 (برای تبخیر-تعرق) و MCD12Q1 (برای پوشش اراضی) استفاده می‌شود. همچنین، پایش نوسانات ذخیره کل آب (TWS) با بهره‌گیری از داده‌های گرانشی ماهواره‌های GRACE-FO و GRACE (نسخه RL06) و تحلیل دقیق فرونشست زمین با استفاده از تصاویر راداری Sentinel-1 صورت می‌پذیرد. برای مدل‌سازی اقلیمی آینده نیز خروجی ۱۴ مدل گردش کلی (GCM) از پروژه ISIMIP3b/CMIP6 تحت ستاریوهای SSP (از خوش‌بینانه تا بدینانه) تا سال ۲۱۰۰ به کار گرفته خواهد شد. در مرحله پردازش و تحلیل، ارزیابی فرونشست با تکنیک تداخل‌سنگی راداری بر روی داده‌ای SLC و با اعمال مدارهای دقیق (POD) و تحلیل همبستگی فاز انجام می‌شود، در حالی که داده‌های GRACE پس از تصحیحات ژئوفیزیکی برای استخراج سری زمانی بی‌هنجری آب استفاده می‌گردد. پایش خشکسالی از طریق شاخص SPEI صورت می‌گیرد که در آن تبخیر-تعرق پتانسیل با روش پنمن-مانتیث فائز-۵۶ محاسبه شده و بیلان آب بر توزیع لوگ-لوگستیک سه پارامتری برآش می‌شود. همزمان، رخدادهای فرین جوی با نمایه‌های فرین اقلیمی (ET-SCI) و امواج گرمایی با شاخص فاکتور گرمای مازاد (EHF) پایش می‌شوند. داده‌های مدل‌های اقلیمی نیز پیش از استفاده، تحت فرآیند تصحیح اربی (نگاشت صدک برای بارش و نگاشت واریانس برای دما) قرار گرفته و درستی‌سنگی می‌شوند.

در بخش پیش‌نگری و تحلیل‌های آماری، پیش‌بینی ذخیره آب (TWS) برای دوره‌های آتی با استفاده از مدل یادگیری ماشین تقویت گردید (CatBoost) و بر اساس ورودی‌های اقلیمی تصحیح شده انجام می‌پذیرد. همچنین آسیب‌پذیری هیدرولوژیکی حوضه با محاسبه شاخص HVI و وزن‌دهی به مؤلفه‌های بیلان آب کمی‌سازی می‌شود. در نهایت، جهت شناسایی روندهای معنی‌دار در سری‌های زمانی و حذف اثرات خودهمیستگی داده‌ها، از آزمون ناپارامتریک من-کنдал تصحیح شده استفاده شده و شبیه تغییرات با تخمین گر شیب سن برآورد می‌گردد تا نتایج تحلیل‌ها از استحکام آماری لازم برخوردار باشند. شرح کامل هر یک از این موارد در دو بخش ۱-۳ و ۲-۳ تشریح شدند. فرآیند اجرایی تحقیق در فلوچارت زیر ارائه شده است.



شکل ۱ - فلوچارت اجرایی انجام تحقیق

۳-۱- روشن جمع آوری داده و اطلاعات

داده های هواشناسی و چاه های پیزومتری

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق و تبیین دقیق برهم کش میان متغیرهای اقلیمی و منابع آب، داده های متشکل از دو بخش اصلی داده های هواشناسی و داده های چاه های پیزومتری تشکیل گردید. در بخش هواشناسی، از داده های ثبت شده در ایستگاه های سینوپتیک سازمان هواشناسی کشور که دارای پراکنش مناسب در کشور و طول دوره آماری قابل اتناکا می باشند، استفاده خواهد شد. بازه زمانی انتخابی برای این پژوهش، یک دوره آماری سی ساله (سه دهه اخیر) را در بر می گیرد که امکان تحلیل روندهای بلندمدت را فراهم می سازد. متغیرهای اقلیمی مورد استفاده شامل میانگین دما، دمای کمینه و بیشینه روزانه، مجموع بارش، تندی باد و ساعت آفتابی می باشند. انتخاب این متغیرها با هدف محاسبه دقیق تبخیر-تعرق پتانسیل، برآورد شاخص های خشکسالی و همچنین شناسایی و تحلیل رخدادهای فرین اقلیمی صورت گرفته است. پیش از ورود داده ها به مرحله تحلیل، آزمون های کنترل کیفیت و همگنی بر روی سری های زمانی اعمال خواهد شد تا از درستی داده های مورد استفاده در مدل سازی ها و محاسبات آماری اطمینان حاصل شود.

در بخش دوم و به منظور بررسی وضعیت کمی منابع آب زیرزمینی و تحلیل نوسانات سطح ایستابی، از داده های پیزومتری استفاده خواهد شد. این داده ها شامل اندازه گیری های سطح آب در چاه های پیزومتری در دسترس می باشد که توسط سازمان آب منطقه ای ثبت و گردآوری شده اند. تلقیق داده های سطح آب زیرزمینی با پارامترهای استخراج شده از ایستگاه های سینوپتیک، امکان ارزیابی دقیق بیلان آب و تأثیر پدیده های نظیر خشکسالی بر ذخایر آب زیرزمینی منطقه را میسر می سازد.

مجموعه داده باز تحلیل تصحیح شده AgERA5

در این پژوهش، با توجه به محدودیت های موجود در دسترسی به شبکه های پایش زمینی و فقدان داده های آماری منسجم و بلندمدت در سطح کشور، از داده های باز تحلیل استفاده خواهد شد. بدین منظور، مجموعه داده AgERA5 به عنوان منبع اصلی داده های اقلیمی سطح زمین انتخاب شد. این مجموعه داده، ورودی های معتبر و استانداردی را فراهم می آورد و بازه زمانی سال ۱۹۷۹ تاکنون را پوشش می دهد. پایگاه داده AgERA5 بر مبنای داده های ساعتی سطح زمین در مدل ERA5 (متعلق به مرکز ECMWF) توسعه یافته است. از آنجایی که دریافت و پیش برداش زمین از ERA5 فرآیند پیچیده و تخصصی است، استفاده از مجموعه داده AgERA5 پژوهشگران را از انجام این مراحل

بی نیاز کرده و امکان ورود مستقیم به مرحله تحلیل و مدل سازی را فراهم می سازد. متغیرهای موجود در این مجموعه داده به گونه ای طراحی شده اند که نیازهای ورودی اکثر مدل های کشاورزی و اکولوژیک را مرتفع سازند. در فرآیند آماده سازی این داده ها، گام های زمانی به صورت روزانه و منطبق بر منطقه زمانی محلی تجمعی شده اند. همچنین، جهت دستیابی به دقت افقی بالاتر، اصلاحات توپوگرافی بر روی داده ها اعمال شده و تفکیک افقی به 1° ارتقا یافته است. این اصلاحات و مقیاس کاهی آماری به شبکه $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ از طریق اعمال معادلات رگرسیونی خاص برای هر متغیر و شبکه، بر روی داده های میان یابی شده ERA5 صورت پذیرفته است. نکته حائز اهمیت آن است که معادلات مذکور با استفاده از مدل عملیاتی جوی با تفکیک بالا (HRES) متعلق به ECMWF و با همان دقت $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ آموزش دیده اند. این رویکرد سبب شده است تا داده های نهایی سازگاری بسیار بالایی با توپوگرافی دقیق تر، الگوهای کاربری اراضی و مرزهای خشکی و دریا در مدل HRES داشته باشند.

محصولات ماهواره ای مورد استفاده

به منظور بررسی و برآورد دقیق تر بیلان آبی در محدوده مورد مطالعه، از داده های تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی سنجنده MODIS استفاده خواهد شد. بدین منظور محصول تبخیر-تعرق / شار گرمای نهان سنجنده MODIS با شناسه MOD16A2 نسخه ۶.۱ مورد بهره برداری قرار خواهد گرفت. این یک محصول یک ترکیبی هشت روزه است که با تفکیک افقی 500 m تولید می شود. مبنای محاسباتی الگوریتم به کار رفته در مجموعه داده های MOD16، معادله پمن-مانیتیث است. در این الگوریتم، ورودی های متعدد شامل داده های هواشناسی باز تحلیل روزانه به همراه محصولات سنجش از دوری MODIS نظیر پویایی ویژگی های پوشش گیاهی، آلبیدو و پوشش اراضی لحظه می گردد. در ساختار این محصول، مقادیر پیکسل ها برای دو لایه تبخیر-تعرق (ET و PET) حاصل جمع مقادیر تمام هشت روز در دوره ترکیبی است، در حالی که مقادیر پیکسل برای لایه های شار گرمای نهان (LE و PLE) میانگین هشت روز آن دوره می باشد.

با توجه به اینکه تغییرات سطح زمین و الگوی بهره برداری از اراضی، نقش کلیدی در بیلان آب، نفوذ پذیری خاک و شدت برداشت از آب های زیرزمینی ایفا می کند و مستقیماً بر تشديد خشکسالی و وقوع فرونشست مؤثر است، پایش دقیق این تغییرات در تحلیل اثرات هم افزا ضروری می باشد. بدین منظور، جهت استخراج نقشه های پوشش زمین از محصول داده ای نوع پوشش زمین نسخه ۶.۱ با شناسه MCD12Q1 استفاده خواهد شد. این محصول حاصل ترکیب داده های طیفسنج تصویربرداری با قدرت تفکیک متوسط (MODIS) بر روی هر دو ماهواره ترا (Terra) و آکوا (Aqua) بوده و انواع پوشش زمین را در مقیاس جهانی و در بازه های زمانی سالانه ارائه می دهد. در تولید محصول MCD12Q1 نسخه ۶.۱، از روش های طبقه بندی نظارت شده بر روی داده های بازتابی ماهواره های ترا و آکوا بهره گرفته شده است. جهت تعیین انواع پوشش زمین در این محصول، از روش های طبقه بندی متنوع و معتبری استفاده گردیده که شامل برنامه بین المللی ژئوسفر-بیوسفر (IGBP)، دانشگاه مریلند (UMD)، شاخص سطح برگ (LAI)، چرخه های بیوژئو شیمیایی (BIOME-BGC) و انواع عملکردی گیاه (PFT) می باشد.

داده های ماهواره ای راداری Sentinel-1

تحلیل پدیده فرونشست زمین با استفاده از فناوری سنجش از دور راداری، نیازمند درک عمیق از ماهیت سیگنال های دریافتی و انتخاب دقیق نوع داده ها بر اساس هندسه تصویربرداری است. مأموریت تصویربرداری راداری Sentinel-1 که به عنوان یک منظومه ماهواره ای با مدار قطبی طراحی شده است، به واسطه بهره گیری از رادار دهانه ترکیبی (SAR) در باند C، امکان تصویربرداری پیوسته در تمام شرایط جوی و در طول شبکه روز را فراهم می آورد. این ویژگی، یعنی عدم تأثیر پذیری از پوشش ابر یا فقدان نور خورشید، زیربنای اصلی استمرار پایش تغییرات سطحی است. با این حال، طراحی یک متداوله ای دقیق برای بررسی فرونشست، مستلزم عبور از محصولات آشکار سازی شده دامنه (GRD) و تمرکز بر محصولات سطح یک SLC است، زیرا پارامتر فاز که حامل اصلی اطلاعات جابجایی سطح در تکنیک های تداخل سنجی است، در محصولات GRD حذف شده و تنها دامنه سیگنال باقی می ماند.

داده‌های ماهواره‌ای GRACE-FO و GRACE

در مناطقی که داده‌های زمینی اندک است، داده‌های ماهواره‌ای دیدگاه‌های ارزشمندی از چرخه آب در مقیاس حوضه‌ای تا جهانی فراهم می‌کنند. در این میان، ماموریت‌های سنجش از دور GRACE-FO و GRACE به دلیل ارائه آرشیو گستردگی از داده‌های ذخیره آب خشکی (TWS) (Rodell and Reager, 2023) با دقت بالا جایگاه ویژه‌ای دارند. متغیر TWS یک شاخص یکپارچه از سیستم هیدرولوژیکی است که شامل مجموع آب‌های ذخیره شده در سطح و زیر زمین، از جمله رطوبت خاک، برف، آبهای سطحی، و آب زیرزمینی می‌شود (Wang et al., 2025). با این وجود، این داده‌ها تنها تغییرات خالص عمودی ستون آب را نشان می‌دهند و بدون مدل‌های کمکی قادر به تفکیک مولفه‌های فردی نیستند.

مأموریت آزمایش بازیابی گرانش و اقلیم نسخه فالو-آن (GRACE-FO)، به عنوان مأموریت اصلی GRACE (که در مارس ۲۰۰۲ آغاز شده بود)، حاصل همکاری مشترک میان ناسا و مرکز تحقیقات علوم زمین آلمان (GFZ) است. این مأموریت که در ۲۰۱۸ مه ۲۲ به فضا پرتاب شد، نقشی محوری در ردیابی جابه‌جایی آب‌های کره زمین ایفا می‌کند. هدف بنیادین این سامانه، نظارت دقیق بر تغییرات ذخایر آب زیرزمینی، حجم آب در دریاچه‌ها و رودخانه‌های بزرگ، رطوبت خاک، صفحات یخی و یخچال‌ها، و همچنین نوسانات سطح دریا ناشی از ورود آب به اقیانوس‌ها است. این اكتشافات، چشم‌اندازی منحصر به فرد از اقلیم زمین را ارائه می‌دهند که پیامدهای گستردگی برای جامعه بشری و جمعیت جهانی در بر دارد (Landerer et al., 2020).

در این پژوهش، جهت پایش نوسانات زمانی ذخیره آب‌های خشکی (TWSa)، از داده‌های نسخه ششم (RL06) حاصل از مأموریت‌های ماهواره‌ای GRACE-FO و دنباله آن، GRACE، به عنوان منبع اصلی اطلاعات استفاده خواهد شد. اساس کار این ماهواره‌های دوقلو، ردیابی دقیق تغییرات فاصله بین ماهواره‌ای با استفاده از سیستم مسافت‌سنج باند K است که امکان نقشه‌برداری از تغییرات میدان گرانشی زمین را فراهم می‌آورد (Tapley et al., 2004). سیگنال‌های گرانشی باقی‌مانده، پس از اعمال تصحیحات استاندارد جوی و اقیانوسی، عمدتاً بیانگر تغییرات در ذخیره آب‌های خشکی هستند (Landerer and Swenson, 2012). شایان ذکر است که پارامتر TWS شامل مجموعه‌ای از مولفه‌های هیدرولوژیکی از جمله آب‌های زیرزمینی، رطوبت خاک، آب رودخانه‌ها و دریاچه‌ها، برف، یخچال‌های طبیعی و آب موجود در تاج پوشش گیاهی می‌باشد (Pan et al., 2017). جهت دستیابی به داده‌های سطح ۲، از محصولات پردازش شده توسط سه مرکز معتبر شامل مرکز تحقیقات فضایی (CSR)، آزمایشگاه پیشرانش جت (JPL) و مرکز تحقیقات علوم زمین آلمان (GFZ) استفاده خواهد شد.

پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اثرات میان‌بخشی (ISIMIP¹)

در این پژوهش، فرآیند گردآوری داده‌های مدل‌های گردش کلی (GCMs) برای پیش‌نگری وضعیت آینده بر مبنای پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اثرات میان‌بخشی (ISIMIP3b) طراحی شده است. این پروتکل مجموعه‌ای منسجم از داده‌های را فراهم می‌کند که امکان ارزیابی دقیق اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و سیستم‌های واپس‌ته را میسر می‌سازد. داده‌های پایه اقلیمی مورد نیاز در این تحقیق، موسوم به وداشت‌های مرتبط با اقلیم (CRFs²)، از خروجی‌های شبیه‌سازی فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت شده (CMIP6) استخراج شده‌اند. به منظور لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های ساختاری در پیش‌نگری‌های اقلیمی، از داده‌های ۱۴ مدل گردش کلی (GCM) منتخب شامل مدل‌های IITM-ESM4، CESM2-WACCM، CanESM5، ESM4، UKESM1-0-LL، MRI-ESM2-0، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR، TaiESM1، MIROC6، KACE-1-0-G استفاده خواهد شد. انتخاب این ۱۴ مدل بر اساس معیارهای سه گانه پروژه ISIMIP صورت گرفته است. نخستین معیار برای گزینش این

¹ The Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIMIP)

² climate-related forcings (CRFs)

مدل‌ها، قابلیت آن‌ها در پوشش طیف وسیعی از آینده‌های محتمل^۱ بوده است تا اطمینان حاصل شود که عدم قطعیت‌های موجود از سناریوهای انتشار پایین تا بسیار بالا در تحلیل‌ها لحاظ می‌گردد. دو میان معيار، در دسترس بودن شبیه‌سازی‌های مدل اقلیمی^۲ با متغیرهای مورد نیاز برای مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بوده است. معيار سوم و بسیار کلیدی، توانایی این مدل‌ها در ارائه شبیه‌سازی خط پایه طولانی‌مدت برای شرایط پیش از انقلاب صنعتی^۳ است؛ وجود این داده‌ها برای برآورد دقیق و معنی‌بر سطوح بازگشت رخدادهای فرین (مانند سیل و خشکسالی) ضروری است. علاوه بر این، انتخاب سناریوی SSP5-8.5 و مدل‌های مرتبط با آن، با هدف آزمون مقیاس‌پذیری اثرات اقلیمی نسبت به تغییر دمای جهانی انجام شده است تا مشخص شود که آیا می‌توان اثرات مشاهده شده در گرمایش‌های بالا را به سایر سناریوهای انتشار نیز تعمیم داد یا خیر.(Frieler et al., 2025)

متغیرهای اقلیمی مستخرج شده از این مدل‌ها تحت فرآیندهای دقیق تصحیح اریبی (Bias-adjustment) قرار خواهد گرفت تا اریبی آن‌ها نسبت به مشاهدات به حداقل برسد و برای استفاده در مدل‌های هیدرولوژیکی مناسب باشند. این مجموعه داده‌ها سه بازه زمانی اصلی را پوشش می‌دهند که عبارتند از دوره پیش از انقلاب صنعتی (از سال ۱۸۴۹ تا ۱۶۰۱) جهت تعیین شرایط پایه، دوره تاریخی (از ۱۸۵۰ تا ۲۰۱۴) برای واسنجی و بررسی روندهای گذشته، و دوره پیش‌نگری آینده (از ۲۰۱۵ تا ۲۱۰۰) برای پیش‌نگری تغییرات تحت سناریوهای مختلف انتشار. علاوه بر متغیرهای معمول اقلیمی، سری‌های زمانی غلظت گازهای گلخانه‌ای شامل دی‌اکسید کربن (CO_2) و متان (CH_4) جوی نیز به عنوان ورودی‌های اجباری برای تمامی مدل‌ها در نظر گرفته شده است تا اثرات فیزیولوژیکی و تابشی این گازها در شبیه‌سازی‌ها لحاظ گردد. همچنین برای بررسی پدیده‌های فرین همانند خشکسالی و سیل، داده‌های مربوط به مسیر توفان‌های حراره‌ای و میدان‌های باد و بارش مرتبط با آن‌ها از طریق روش‌های مقیاس‌کاهی آماری تولید و در مجموعه داده‌ها گنجانده شده است.(Frieler et al., 2025)

۲-۳- روش تحلیل داده‌ها

چارچوب تحلیلی پایش فرونژیست زمین با بهره‌گیری از داده‌های راداری Sentinel-1

در گام نخست تدوین روش تحقیق، وضعیت عملیاتی منظمه ماهواره‌ای Sentinel-1 باید به دقت مدنظر قرار گیرد تا بازه زمانی تکرار تصویربرداری به درستی در مدل‌سازی‌ها لحاظ شود. برای استخراج دقیق نرخ فرونژیست، استفاده از داده‌های سطح یک SLC (Single Look Complex) ضروری است. در این محصولات، هر پیکسل با یک مقدار مختلط (I و Q) نمایش داده می‌شود که حاوی اطلاعات دامنه و فاز است. حفظ اطلاعات فاز در این سطح از داده‌ها، امکان اجرای پردازش‌های تداخل‌سنجدی را فراهم می‌کند. به منظور تضمین دقت هندسی و مکانی در پایش جابجایی‌ها، بهره‌گیری از محصولات تعیین مدار دقیق (POD) اجتناب‌ناپذیر است.

در مرحله پردازش داده‌ها، تصحیحات رادیومتریک و هندسی نقش کلیدی در درستی سنجدی سیگنال بازگشته ایفا می‌کنند. اگرچه محصولات GRD برای تحلیل‌های مبتنی بر دامنه و شناسایی عوارض سطحی با حذف نویز اسپکل (Speckle) و پروجکشن بر روی بیضوی زمین (WGS84) بهینه شده‌اند، اما برای تحلیل‌های دقیق‌تر تغییرات سطحی و زمانی که نیاز به بررسی همبستگی فازی است، محصولات CARD-COH (Coherence) که میزان همبستگی بین یک جفت تصویر با فاصله زمانی ۱۲ روز را توصیف می‌کند، شاخصی حیاتی محاسبه می‌شوند. این محصولات منشعب از داده‌های سطح ۲، اگرچه قادر تصحیح رادیومتریک زمین (RTC) و فیلتر اسپکل هستند، اما به واسطه ارتوکتیفیکیشن با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی کوپنیک (Copernicus DEM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر، اطلاعات ارزشمندی در خصوص پایداری فاز سطحی ارائه می‌دهند که در تفسیر الگوهای فرونژیست در مناطق غیرشهری و دارای پوشش گیاهی اهمیت دارد. در مجموع، روش تحقیق مربوط به فرونژیست زمین بر پایه انتخاب داده‌های SLC، اعمال مدارات دقیق POD، در نظر گرفتن محدودیت‌های

¹ Capture a wide range of possible futures

² Availability of climate model simulations

³ Provision of a long baseline simulation assuming pre-industrial climate conditions

زمانی ناشی از وضعیت فعلی منظومه (چرخه ۱۲ روزه تا عملیاتی شدن کامل S-1C) و استفاده از محصولات همبستگی (Coherence) برای ارزیابی کیفیت فاز استوار است تا پایش دقیقی از تغییرات سطحی حاصل شود.

محاسبه شاخص خشکسالی بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI)

به منظور پایش خشکسالی و ارزیابی اثرات هم‌افزای آن بر منابع آب زیرزمینی و پدیده فرونشست، در این پژوهش از شاخص بارش تبخیر-تعرق استاندارد شده (SPEI) استفاده خواهد شد. انتخاب این شاخص بر مبنای قابلیت آن در ترکیب حساسیت به تغییرات دمایی با داده‌های بارش استوار است؛ ویژگی متمایزی که آن را نسبت به شاخص‌های صرفاً مبتنی بر بارش نظری نمایه بارش استاندارد (SPI) برتری می‌بخشد. فرآیند محاسباتی این شاخص با تعیین سری زمانی بیلان آب اقلیمی (D) آغاز می‌شود که حاصل کسر مقادیر تبخیر-تعرق پتانسیل (PET) از بارش ماهانه (P) است. با توجه به اهمیت دقت فیزیکی در مطالعات تغییر اقلیم، برای برآورد مؤلفه تبخیر-تعرق پتانسیل از روش استاندارد پنمن-مونتیث فاؤ-۵۶ (FAO-56 Penman-Monteith) استفاده خواهد شد. این روش با بهره‌گیری از متغیرهای هواشناسی شامل میانگین تندی باد، ساعات آفتابی، تابش ورودی روزانه و دما، برآورده دقیق‌تر نسبت به روش‌های مبتنی بر دما (مانند تورنث‌وایت یا هارگریوز) ارائه می‌دهد و نوسانات انرژی و دینامیک جو را در محاسبه نیاز آبی جو لحظه می‌کند (Allen et al., 1998).

پس از محاسبه سری زمانی بیلان آب اقلیمی، گام بعدی برآش تابع توزیع احتمالاتی مناسب بر داده‌ها جهت استانداردسازی است. برخلاف شاخص SPI که معمولاً از توزیع گاما بهره می‌برد، در محاسبه SPEI به دلیل ماهیت داده‌های بیلان آب که شامل مقادیر منفی نیز می‌شوند، از توزیع سه پارامتری لوگ-لوجستیک (Log-Logistic) استفاده می‌گردد. برای برآورد پارامترهای این توزیع، روش گشتاورهای وزن دار احتمالی ناریب (ub-pwm) به کار گرفته خواهد شد. این روش در مقایسه با روش‌هایی نظری حداقل درستنمایی، کارایی بالاتری با اریبی کمتری در تحلیل سری‌های زمانی اقلیمی ارائه می‌دهد. در نهایت، مقادیر حاصل از تابع توزیع تجمعی به یک متغیر نرم‌مال استاندارد با میانگین صفر و انحراف معیار یک تبدیل می‌شوند که نشان‌دهنده سری زمانی نهایی SPEI است (Vicente-Serrano et al., 2010).

یکی از ویژگی‌های بنیادین این روش که آن را برای تحلیل سیستم‌های پیچیده هیدرولوژیک و مطالعه آب‌های زیرزمینی مناسب می‌سازد، ماهیت چندمقیاسه آن است. این قابلیت به پژوهشگر اجازه می‌دهد تا با تعریف پنجره‌های زمانی مختلف، حافظه سیستم اقلیمی-هیدرولوژیکی را شبیه‌سازی کند. در این فرآیند، داده‌های بیلان آب با استفاده از یک تابع هسته در مقیاس‌های زمانی متفاوت تجمعی می‌شوند. در حالی که مقیاس‌های زمانی کوتاه (مانند ۱ تا ۳ ماه) عمدتاً بازتاب‌دهنده نوسانات رطوبت خاک و خشکسالی‌های هواشناسی هستند، مقیاس‌های زمانی طولانی‌تر (مانند ۶ تا ۲۴ ماه) برای واکاوی خشکسالی‌های هیدرولوژیک و اثرات تأخیری آن‌ها بر ذخیر آب زیرزمینی و جریان‌های سطحی حیاتی هستند. بنابراین، استفاده از مقیاس‌های زمانی بلندمدت در این پژوهش، امکان درک عمیق‌تر رابطه میان تغییر اقلیم و پدیده فرونشست ناشی از تخلیه آبخوان‌ها را فراهم می‌آورد.

تحلیل فرین‌های اقلیمی

در راستای ارزیابی تغییرات فرین‌های اقلیمی و جوی و اثرات آن‌ها بر چرخه‌های هیدرولوژیک، در این پژوهش از رویکرد استاندارد جهانی معرفی شده توسط کمیسیون اقلیمه‌شناسی سازمان جهانی هواشناسی (WMO-CCI) استفاده خواهد شد. مبنای محاسبات، مجموعه نمایه‌های تدوین شده توسط تیم کارشناسی نمایه‌های اقلیمی (ET-SCI) است که ابزاری قدرتمند برای پایش تغییرات فراوانی، شدت و تداوم رخدادهای فرین دما و بارش فراهم می‌آورد (Alexander & Herold, 2015).

پیش از محاسبه نمایه‌ها، اجرای فرآیند کنترل کیفیت (QC) بر روی داده‌های خام ایستگاهی امری ضروری است تا از درستی داده‌ها و عدم وجود خطاهای سیستماتیک یا ناهمگنی‌های ناشی از تغییر در ابزار یا موقعیت ایستگاه اطمینان حاصل شود. بدین منظور، از پروتکل‌های کنترل کیفیت استفاده می‌شود که شامل شناسایی داده‌های پرت، مقادیر غیرمنطقی (مانند دمای بیشینه کمتر از کمینه) و پرس‌های ناگهانی در سری‌های زمانی است. پس از تایید درستی داده‌ها، نمایه‌های فرین در دسته‌های مختلف محاسبه می‌شوند. در بخش نمایه‌های دمایی، تمرکز بر

تغییرات توزیع احتمالاتی دماست؛ لذا از نمایه‌های مبتنی بر صدک‌ها (Percentile-based indices) استفاده می‌شود که حساسیت بالایی به گرمایش جهانی دارند. محاسبه دقیق این نمایه‌ها نیازمند تعیین یک دوره پایه استاندارد برای برآورد آستانه‌ها است تا اثرات ناهمگنی‌های زمانی در تحلیل روندها به حداقل برسد (Dunn & Morice, 2022).

علاوه بر نمایه‌های عمومی دما، تحلیل امواج گرمایی به عنوان یکی از مخاطرات اصلی تشیدکننده خشکسالی و تبخر، با استفاده از نمایه فاکتور گرمایی مازاد (EHF) صورت می‌پذیرد. این شاخص که شدت و تداوم امواج گرمایی را با در نظر گرفتن شرایط اقلیمی محلی و سازگاری کوتاه‌مدت محاسبه می‌کند، معیاری کارآمد برای سنجش تنش‌های گرمایی واردہ بر منابع آب و محیط زیست است (Nairn & Fawcett, 2015).

در بخش تحلیل بارش، با توجه به نقش بارش‌های سنگین در رخداد سیلاب‌های ناگهانی و عدم تغذیه مؤثر آبخوان‌ها، از مجموعه نمایه‌های شدت و فراوانی بارش‌های فرین استفاده خواهد شد. این نمایه‌ها شامل بررسی حداکثر بارش‌های یک‌روزه و چندروزه و همچنین سهم بارش‌های فرین از کل بارش سالانه هستند که تغییرات آن‌ها مستقیماً بر بیلان آبی حوضه‌ها اثرگذار است (Dunn et al., 2020). در نهایت، چهت آشکارسازی روندهای معنی‌دار آماری در سری‌های زمانی نمایه‌های استخراج شده، از آزمون‌های ناپارامتریک استفاده خواهد شد که در بخش بعدی توضیحات لازم ارائه خواهد شد.

روش تصحیح اریبی (Bias Correction)

با توجه به اینکه خروجی خام مدل‌های GCM دارای اریبی سیستماتیک بوده و تفکیک افقی آن‌ها برای مطالعات منطقه‌ای نامناسب است، استفاده از روش‌های مقیاس کاهی و تصحیح اریبی ضروری است (Lafferty & Sriver, 2023). در این تحقیق، برای همسوسازی داده‌های مدل با داده‌های مشاهداتی و کاهش عدم قطعیت، از روش‌های نگاشت صدک¹ برای تصحیح اریبی داده‌های بارش جهت بهبود نمایش میانگین‌ها و مقادیر فرین (Rajczak et al., 2016) و روش نگاشت واریانس² برای تصحیح واریانس دمای شبیه‌سازی شده با تغییرات مشاهداتی (Maraun & Widmann, 2018) به کار گرفته خواهد شد. برای ارزیابی درستی کاریابی مدل‌ها و داده‌های تصحیح شده، از سنجه‌های آماری استاندارد شامل درصد میانگین اریبی خطأ (PBIAS)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطأ (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل شود مدل‌ها از دقت کافی برخوردار هستند.

پیش‌نگری ذخیره کل آب³ (TWS) تحت سناریوهای SSP

در این پژوهش، فرآیند پیش‌نگری ذخیره کل آب (TWS) بر اساس پروژه مقایسه متقابل مدل‌های اثرات میان‌بخشی (ISIMIP3b) انجام خواهد شد. پیش‌نگری تغییرات آتی TWS نیازمند تعذیب مدل‌های هیدرولوژیکی با داده‌های ورودی منسجم و سناریوهای اقلیمی معتبر است که از طریق واداشت مرتبط با اقلیم (CRF) انجام می‌شود. این داده‌ها از خروجی‌های ۱۴ مدل گردش کلی (GCM) منتخب در پروژه CMIP6 شامل مدل‌های مدل‌های CESM2-WACCM، CanESM5، GFDL-ESM4، CNRM-ESM2-، CNRM-CM6-1، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR، TaiESM1، MIROC6، KACE-1-0-G، EC-Earth3، IITM-ESM4، MRI-ESM2-0 و UKESM1-0-LL محاسبه خواهند شد. استفاده از این مدل‌ها به دلیل توانایی آن‌ها در پوشش دامنه وسیعی از تغییرات دما و بارش و همچنین ارائه شبیه‌سازی‌های خط پایه طولانی‌مدت برای شرایط پیش از انقلاب صنعتی، تعییه شده است. داده‌های جوی مذکور پیش از ورود به مدل‌های محاسبه‌گر ذخیره آب، تحت فرآیند تصحیح اریبی قرار خواهند گرفت تا اطمینان حاصل شود که اریبی آماری آن‌ها تصحیح شده و برای مطالعات هیدرولوژیکی دقیق مناسب هستند.

¹ Quantile Mapping

² Variance Scaling

³ Total Water Storage

به منظور تحلیل آینده ذخیره کل آب در بازه زمانی ۲۰۱۵-۲۱۰۰ تا، این تحقیق از آزمایش‌های گروه دوم (Group II) پروتکل ISIMIP3b پیروی می‌کند. در این پیکربندی، هدف اصلی جداسازی سیگنال‌های ناشی از تغییر اقلیم بر بیلان آب از مداخلات انسانی است (Frieler et al., 2025). بدین منظور، مدل‌سازی TWS تحت سه سناریوی اصلی انتشار انجام می‌شود. سناریوی SSP1-2.6 که بیانگر مسیر توسعه پایدار با انتشار پایین است، سناریوی SSP3-7.0 که نمایانگر رقابت‌های منطقه‌ای با انتشار بالا (و نه لزوماً ادامه وضع موجود) است، و سناریوی SSP5-8.5 که به عنوان سناریوی بدترین حالت برای آزمون مقیاس‌پذیری اثرات اقلیمی در نظر گرفته شده است. این سناریوها مسیرهای متفاوتی از واداشت‌های تابشی و تغییرات دما و بارش را به سیستم هیدرولوژیک وارد می‌کنند که مستقیماً بر مولفه‌های ذخیره آب تأثیر گذار است.

رویکرد پادگیری ماشین (ML)

برای غلبه بر محدودیت‌های مدل‌سازی سنتی و افزایش دقت پیش‌نگری رخداد هیدرو-اقلیمی، از مدل‌های یادگیری ماشین استفاده می‌شود. این مدل‌ها قادرند روابط پیچیده و غیرخطی بین متغیرهای اقلیمی بزرگ مقیاس را شناسایی کنند (Ahmed et al., 2024). در این پژوهش، الگوریتم‌های مختلفی ارزیابی می‌شوند، اما تمرکز بر مدل تقویت دسته‌بندی (CatBoost) خواهد بود، چرا که مطالعات نشان داده‌اند این مدل و سری مدل‌های این خانواده در شبیه‌سازی چند مدلی همادی (Ensemble) کارایی بالاتری دارند (Prokhorenkova et al., 2018). مدل CatBoost برای پردازش داده‌های پیچیده و کاهش نشت اطلاعات در طول آموزش مدل بسیار کارآمد است (Dorogush et al., 2018).

ارزیابی آسیب‌پذیری هیدرولوژیکی (HVI¹) در برایر تغییر اقلیم

به منظور کمی‌سازی اثرات هم‌افزای تغییر اقلیم، خشکسالی و وضعیت آب‌های زیرزمینی، یک چارچوب نوین برای محاسبه شاخص آسیب‌پذیری هیدرولوژیکی (HVI) استفاده می‌شود. این شاخص بر اساس مؤلفه‌های بیلان آب شامل بازده آب، رواناب سطحی، جریان آب

در این روش، هر یک از متغیرهای هیدرولوژیکی بر اساس آستانه‌های تنش منابع آب طبقه‌بندی و وزن دهی می‌شوند. امتیاز آسیب‌پذیری برای هر سلول محاسباتی در سطح حوضه آبخیز محاسبه شده و سپس نرمال‌سازی می‌شود. رابطه کلی برای محاسبه HVI به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$HVI = \Sigma(W_i \times R)$$

که در آن W_i وزن اختصاص داده شده به هر متغیر هیدرولوژیکی و R امتیاز بازطبقه‌بندی شده آن متغیر است. این شاخص امکان شناسایی مناطق با حساسیت اکولوژیکی بالا و ارزیابی ریسک تحت سناریوهای مختلف اقلیمی (SSP2-4.5 و SSP5-8.5) را فراهم می‌آورد و ابزاری کلیدی، بای، مدد بیت پایدار، مبنای آب و مقابله با تخریب اکو-سیستم محاسبه شد (Mengistu et al., 2025).

تحلیل و ند داده‌ها

در این پژوهش، به منظور آشکارسازی تغییرات و روند در سری های زمانی متغیرهای اقلیمی، پایش خشکسالی، نوسانات تراز آب های زیرزمینی و ذخایر آب در دسترس، از رویکردهای ناپارامتریک پیشرفته استفاده خواهد شد. اگرچه آزمون کلاسیک من-کنдал ابزاری استاندارد جهت شناسایی روندهای یکنواخت در داده های محیطی محسوب می شود (Kendall, 1975; Mann, 1945)، اما فرض استقلال داده ها در این آزمون، کاربرد آن را در سری های زمانی هیدرولوژیک که اغلب دارای ساختار خودهمبستگی هستند، با چالش مواجه می کند. وجود خودهمبستگی معنی دار می تواند منجر به افزایش کاذب احتمال رد فرضیه صفر و برآورد نادرست معنی داری روند شود. لذا در این مطالعه، جهت غلبه بر اثرات خودهمبستگ و افاش، دقت تحلیله ها، از نسخه های تصحیح شده آزمون من-کندا (Modified Mann-Kendall) استفاده

¹ Hydrologic Vulnerability Index (HVI)

خواهد شد. یکی از روش‌های به کار رفته، رویکرد تصحیح واریانس است که توسط Hamed و Rao (۱۹۹۸) پیشنهاد شده است. در این روش، ابتدا داده‌ها روندزدایی شده و سپس با محاسبه تعداد نمونه مؤثر (Effective Sample Size) بر اساس رتبه‌های ضرایب خودهمبستگی معنی‌دار، واریانس آماره آزمون تعديل می‌گردد تا اثرات خودهمبستگی خنثی شود. در نهایت، بهمنظور کمی‌سازی بزرگی تغییرات و برآورد نرخ شیب خط روند در متغیرهای مورد مطالعه (آب زیرزمینی، اقلیم و خشکسالی)، از برآوردگر شیب سن (Sen's Slope Estimator) استفاده خواهد شد. این روش ناپارامتریک، برآورده مقاوم در برابر داده‌های پرت ارائه می‌دهد و مکمل مناسبی برای آزمون‌های من-کنдал محسوب می‌شود (Sen, 1968).

۳-۳- محدودیت‌ها و چالش‌های اجرای پژوهش

- اجرای دقیق این طرح با چالش‌ها و محدودیت‌های روبروست که مدیریت آن‌ها بخش مهمی از فرآیند تحقیق را تشکیل می‌دهد:
- فقدان سامانه پایش مداوم و یکپارچه فرونیست:** در حال حاضر، شبکه ایستگاه‌های دائمی (GNSS) که به طور اختصاصی و با تراکم مناسب برای پایش نرخ لحظه‌ای فرونیست در تمام دشت‌های بحرانی کشور طراحی شده باشد، وجود ندارد. این امر درستی سنجی مدل‌ها و واسنجی ماهواره‌ها را در برخی مناطق با دشواری مواجه می‌کند.
 - دسترسی دشوار و پراکندگی داده‌های چاه‌های پیزومتری:** داده‌های سطح آب زیرزمینی (پیزومتری) که برای واسنجی مدل‌های هیدرولوژیکی حیاتی هستند، اغلب دارای نواقص آماری بوده و یا دسترسی به آن‌ها به دلیل پراکندگی در بین سازمان‌های مختلف (آب منطقه‌ای‌ها، وزارت نیرو، سازمان زمین‌شناسی) و بروکراسی‌های اداری زمان بر و دشوار است.
 - عدم قطعیت در داده‌های میدانی موجود:** داده‌های برداشت شده میدانی در دستگاه‌های اجرایی کشور گاهی دارای خطاهای انسانی یا عدم به روزرسانی در بازه‌های زمانی منظم هستند که می‌تواند دقت و رودهای مدل را تحت الشاعع قرار دهد.

۴-۳- تربیت نیروی انسانی متخصص

- این طرح پژوهشی بستری پویا برای آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی متخصص در سطوح مختلف دانشگاهی فراهم می‌کند:
- دانشجویان دکتری:** مشارکت در توسعه مدل‌های پیشرفته هیدرولوژیکی و تحلیل‌های پیچیده آماری، که منجر به تولید داشت جدید و رساله‌های دکتری با کیفیت می‌شود.
 - دانشجویان کارشناسی ارشد:** درگیر شدن در فرآیندهای پردازش داده‌های ماهواره‌ای، کار با نرم‌افزارهای سنجش از دور و GIS و تحلیل‌های مکانی، که مهارت‌های فنی آن‌ها را ارتقا می‌دهد.
 - دانشجویان کارشناسی:** آشنایی با اصول اولیه تحقیق، جمع‌آوری داده‌ها و مبانی فرونیست و تغییر اقلیم، که زمینه را برای ورود آن‌ها به مقاطع بالاتر فراهم می‌کند.

این رویکرد سلسله‌مراتبی در پژوهش، علاوه بر پیشبرد اهداف طرح، به تربیت نیروی حرفه‌ای و متخصص مسلط به تکنولوژی‌های روز دنیا (مانند پردازش‌های ابری و مدل‌سازی اقلیمی) کمک شایانی خواهد کرد که نیاز مبرم بازار کار و بدنی اجرایی کشور در آینده است.

۵-۳- ملاحظات اخلاقی (در صورت لزوم)

- در این پژوهش، تمامی اصول اخلاق علمی و پژوهشی رعایت خواهد شد. این موارد شامل:
- امانت‌داری در داده‌ها:** تمامی داده‌های دریافتی از سازمان‌ها تنها برای مقاصد علمی این طرح استفاده شده و محترمانگی آن‌ها در صورت لزوم حفظ خواهد شد.
 - رعایت حقوق مالکیت فکری:** در تمامی بروندادها، به منابع داده‌ها و تحقیقات پیشین به درستی استناد خواهد شد و از سرقت ادبی پرهیز می‌شود.
 - شفافیت در گزارش‌دهی:** نتایج، اعم از مثبت یا منفی، بدون سوگیری و با شفافیت کامل گزارش خواهد شد تا تصمیم‌گیران بتوانند بر اساس واقعیات علمی برنامه‌ریزی کنند.

۴- شرح علمی و ارائه مشخصات و نیازمندی‌های فنی-آزمایشگاهی طرح (در صورت لزوم)

با توجه به ماهیت این طرح که مبتنی بر مدل‌سازی کامپیوتری، سنجش از دور و تحلیل داده‌های کلان (Big Data) است، نیازمندی‌های این پژوهش در دسته تجهیزات آزمایشگاهی متداول (شیمیایی/فیزیکی) قرار نمی‌گیرد و تمرکز اصلی بر زیرساخت‌های پردازشی و نرم‌افزاری است.

۴-۱- امکانات، تجهیزات و سایر منابع موجود در سازمان مجری

دانشگاه مجری طرح دارای زیرساخت‌های فنی مناسبی برای پشتیبانی از این پژوهش است:

۱. **سامانه رایانش ابری و پردازش سریع (HPC):** دسترسی به سرورهای قدرتمند محاسباتی که امکان اجرای مدل‌های

سنگین اقلیمی (CMIP6) و پردازش تصاویر ماهواره‌ای حجمی (مانند سری‌های زمانی Sentinel-1 برای تداخل‌سنجی راداری) را در زمان کوتاه میسر می‌سازد.

۲. **کارگاه تخصصی مدل‌سازی سنجش از دور و GIS:** وجود آزمایشگاه‌های کامپیوتری مجهر به نرم‌افزارهای پیشرفته و لایسنس‌دار جهت تحلیل‌های مکانی و بصری‌سازی داده‌ها.

۳. **دسترسی به پایگاه‌های علمی:** دسترسی دانشگاه به ژورنال‌ها و پایگاه‌های داده علمی معترض بین‌المللی جهت مرور پیشینه و دریافت داده‌های جهانی.

۴-۲- امکانات، تجهیزات و سایر منابع مورد نیاز ناموجود در سازمان مجری

یکی از چالش‌های اصلی، نبود آرشیو داده‌های منسجم تاریخی در داخل سازمان مجری است. جمع‌آوری، استانداردسازی و یکپارچه‌سازی داده‌های پراکنده هیدرولوژیکی و زمین‌شناسی از سازمان‌های بیرونی نیازمند صرف زمان و هزینه است. همچنین ممکن است نیاز به خرید فضای ذخیره‌سازی ابری مازاد یا اشتراک‌های ویژه برای دانلود داده‌های ماهواره‌ای با تقسیک افقی بسیار بالا وجود داشته باشد که در حال حاضر در دسترس نیست.

۵- فعالیت‌های طرح و زمانبندی طبق نمودار گانت

بنیاد ملی علم ایران

نمودار زمان بندی(ماه)												عنوان مرحله / فعالیت	شماره مرحله / فعالیت						
۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	مد نهاده (ماه)	نام منابع مورد استفاده (نیروی انسانی، مواد مصرفی، خدمات و ...)	نوع کاربری کل پروژه	نوع کاربری پیش‌نیز	نوع کاربری کل پروژه	نوع کاربری پیش‌نیز		
												۱	پایگاه داده خام شامل داده‌های زمینی، ماهواره‌ای و مدل‌های اقلیمی	پژوهشگر، سیستم رایانه‌ای با طرفیت ذخیره‌سازی بالا، اینترنت پرسپرست، مکاتبات اداری (سازمان آب/هواشناسی)	۱۰	-	-	گردآوری پایگاه داده‌های چندمنبعی: اخذ داده‌های زمینی (چاه‌ها، سینوپتیک)، دانلود تصاویر ماهواره‌ای (Sentinel-1, GRACE, MODIS)، داده‌های CMIP6 و مدل‌های AgERA5 و مدل‌های	۱
												۴	مجموعه داده‌های تصحیح شده، همگن و آماده برای پردازش	پژوهشگر، نرم‌افزارهای آماری GIS و نرم‌افزارهای سنجش از دور	۲۰	۱	۱	آماده‌سازی و کنترل کیفیت داده‌ها (QC): همگنسازی داده‌های ایستگاهی، تصحیحات هندسی تصاویر، بررسی داده‌های پرت و تشکیل سری‌های زمانی پایه	۲
												۱	نقشه‌های نرخ فرونشست، سری زمانی نوسانات ذخیره آب (TWS)	سیستم پردازشی قوی، نرم‌افزارهای پردازش راداری، کدهای پایتون/R	۱۰	۲	۲	پردازش پیشرفته سنجش از دور (راداری و گرانشی): تداخل‌سنگی راداری (InSAR) روی Sentinel-1 برای TWS GRACE برای استخراج فرونشست و پردازش	۳
												۵	نمودارهای پهنه‌بندی، خشکسالی، نقشه‌های کاربری اراضی، تحلیل امواج گرمایی و فرین‌ها	پژوهشگر، نرم‌افزارهای R و Python، بسته‌های آماری تحلیل خشکسالی	۱۰	۳	۲	تحلیل‌های هیدرولو-اقلیمی و فرین‌ها: محاسبه شاخص‌های خشکسالی (SPEI)، تبیخیر-تعرق (MOD16)، کاربری اراضی و شاخص‌های فرین (ET-SCI, EHF)	۴
												۴	سازارهای SSP1-2.6, 3-7.0, 5-8.5	داده‌های پروژه ISIMIP3b، کدهای تصحیح اریبی، سیستم محاسباتی	۱۰	۴	۲	مقیاس کاهی و تصحیح اریبی مدل‌های اقلیمی: اجرای ۱۴ مدل GCM، اعمال نگاشت صدک (بارش) و واریانس (دما) و ارزیابی خطأ (RMSE, MAE)	۵
												۴	مدل پیش‌بینی کنده، سری زمانی پیش‌نگری	کتابخانه‌های یادگیری ماشین Scikit-learn/CatBoost، پردازنده گرافیکی (GPU)	۱۰	۳	۵	مدل‌سازی هوشمند با یادگیری ماشین: توسعه مدل برای پیش‌نگری TWS آتی با استفاده از CatBoost خروجی‌های اقلیمی و داده‌های تاریخی	۶
												۵	نقشه‌های پهنه‌بندی آسیب‌پذیری (HVI)	پژوهشگر، تیم مشاوره، نرم‌افزارهای تحلیل آماری و واژپرداز	۱۰	۵	۳	ارزیابی آسیب‌پذیری، تحلیل روند و تدوین نهایی: محاسبه شاخص HVI، آزمون من-کنдал تصحیح شده	۷

					تحليل روندها						
				١٠	گزارش نهایی و مقالات مستخرج	پژوهشگر	٢٠	٧ تا ١		تحليل نهایی تابع و نگارش گزارش	٨
				١٢	-	-	١٠٠	-		مجموع	

۶- توجیه هزینه های انجام طرح

هزینه‌های پیش‌بینی شده برای این طرح در دسته‌های زیر طبقه‌بندی می‌شوند که هر یک برای دستیابی به اهداف پروژه ضروری هستند:

۱. **هزینه‌های نیروی انسانی:** حق‌الزحمه پژوهشگران، دانشجویان دکتری و ارشد فعال در پژوهه و مشاوران تخصصی جهت تحلیل داده‌ها و توسعه کدها. با توجه به حجم بالای کار فنی و نیاز به تخصص بالا، این بخش سهم عمده‌ای را دارد.
 ۲. **هزینه دانلود و تأمین داده‌ها:** اگرچه بسیاری از داده‌های ماهواره‌ای رایگان هستند، اما دانلود حجم عظیمی از داده‌های اقلیمی CMIP6 و تصاویر راداری نیازمند پهنانی باند اینترنت اختصاصی و پرسرعت است. همچنین ممکن است نیاز به خرید برخی داده‌های زمینی یا نقشه‌های پایه دقیق از سازمان‌های ذیربسط باشد.
 ۳. **هزینه‌های پردازش و رایانش ابری:** اجاره سرورهای ابری خارجی یا داخلی برای اجرای الگوریتم‌های سنگین تداخل‌سنجداری (InSAR) و مدل‌سازی‌های اقلیمی ضروری است.
 ۴. **خرید تجهیزات سخت‌افزاری:** با توجه به اینکه داده‌های این طرح در مقیاس ترباپیت خواهند بود، خرید هارد دیسک‌های ظرفیت بالا (SSD/HDD) برای ذخیره‌سازی و آرشیو داده‌ها و همچنین ارتقای حافظه (RAM) و پردازنده رایانه‌های موجود برای اجرای پردازش‌ها الزامی است.

۷- بروندادها و تعهدات

اجرای موفق این طرح منجر به دستاوردهای علمی و عملی زیر خواهد شد:

۱. انتشار مقالات در مجلات معتبر JCR: تدوین و چاپ حداقل یک یا دو مقاله در مجلات تراز اول بین‌المللی (Q1/Q2) با ضریب تأثیر بالا در حوزه‌های منابع آب، سنجش از دور یا تغییر اقلیم.
 ۲. انتشار مقالات نمایه شده در Scopus و ISC: انتشار یافته‌های میانی و نهایی طرح در مجلات معتبر نمایه شده.
 ۳. انتشار مقالات علمی-پژوهشی داخلی: ارائه نتایج کاربردی بومی‌سازی شده در مجلات معتبر مورد تأیید وزارت علوم جهت استفاده محققان داخلی.
 ۴. گزارش فنی جامع: ارائه گزارش نهایی برای استفاده نهادهای تصمیم‌گیر.

سایر توضیحات مورد نیاز

فهرست منابع و مأخذ مورد استفاده برای انجام طرح (بر اساس استاندارد APA):

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، دفتر مطالعات زیربنایی (گروه عمران و شهرسازی). (۱۴۰۲-ب). اظهارنظر کارشناسی درباره: «لایحه کنترل فرونیست زمین و کاهش اثرات آن در کشور (طرح شورای عالی استانها)» (گزارش شماره ۱۹۴۲۶).

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، دفتر مطالعات زیربنایی. (۱۳۹۶). بررسی بحران آب و پیامدهای آن در کشور (گزارش شماره ۱۵۶۰۸).

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، دفتر مطالعات زیربنایی. (۱۴۰۲-الف). چالش‌های ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در کشور، بررسی شرایط فعلی و بحران فرونیست زمین (گزارش شماره ۱۸۸۸۴).

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، معاونت پژوهش‌های زیربنایی و امور تولیدی. (۱۳۹۴). حساب رد پای آب در برخی محصولات منتخب: رد پای آب سبز، آبی و خاکستری در تولید و مصرف (گزارش شماره ۱۴۷۵۷).

Adem, E., Shults, R., Ukasha, M., Elfeki, A., Alqahtani, F., & Elhag, M. (2024). Land subsidence and groundwater storage change assessment using InSAR and GRACE in the arid environment of Saudi Arabia. *Natural Hazards*, 120(14), 13137-13159.

AghaKouchak, A., Feldman, D., Hoerling, M., Huxman, T., & Lund, J. (2015). Water and climate: Recognize anthropogenic drought. *Nature*, 524(7566), 409-411.

Ahmed, A. A., Sayed, S., Abdoulhalik, A., Moutari, S., & Oyedele, L. (2024). Applications of machine learning to water resources management: A review of present status and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, 441, Article 140715.

Alexander, L. V., & Herold, N. (2015). *ClimPACTv2 indices and software*. WMO Commission for Climatology Expert Team on Sector-Specific Climate Indices.

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome, 300(9), D05109.

Andaryani, S., Nourani, V., Trolle, D., Dehghani, M., & Asl, A. M. (2019). Assessment of land use and climate change effects on land subsidence using a hydrological model and radar technique. *Journal of Hydrology*, 578, 124070.

Ashraf, B., AghaKouchak, A., Alizadeh, A., Mousavi Baygi, M., R. Moftakhar, H., Mirchi, A., ... & Madani, K. (2017). Quantifying anthropogenic stress on groundwater resources. *Scientific reports*, 7(1), 12910.

Ashraf, S., AghaKouchak, A., Nazemi, A., Mirchi, A., Sadegh, M., Moftakhar, H. R., ... & Mallakpour, I. (2019). Compounding effects of human activities and climatic changes on surface water availability in Iran. *Climatic change*, 152(3), 379-391.

Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11(1), 9135.

Ashraf, S., Nazemi, A., & AghaKouchak, A. (2021). Anthropogenic drought dominates groundwater depletion in Iran. *Scientific Reports*, 11, 9135.

Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*, 778, 146193.

Bagheri-Gavkosh, M., Hosseini, S. M., Ataie-Ashtiani, B., Sohani, Y., Ebrahimian, H., Morovat, F., & Ashrafi, S. (2021). Land subsidence: A global challenge. *Science of the Total Environment*, 778, 146193.

Barati, A. A., Pour, M. D., & Sardooei, M. A. (2023). Water crisis in Iran: A system dynamics approach on water, energy, food, land and climate (WEFLC) nexus. *Science of The Total Environment*, 882, Article 163549.

- Brignall, A. P., Gawith, M. J., Orr, J. L., & Harrison, P. A. (2002). Assessing the potential effects of climate change on clay shrinkage-induced land subsidence. In *Climate, Change and Risk* (pp. 84-102). Routledge.
- Chandanpurkar, H. A., Famiglietti, J. S., Gopalan, K., Wiese, D. N., Wada, Y., Kakinuma, K., Reager, J. T., & Zhang, F. (2025). Unprecedented continental drying, shrinking freshwater availability, and increasing land contributions to sea level rise. *Science Advances*, 11(30), eadx0298.
- Chen, C. N., & Tfwala, S. S. (2018). Impacts of climate change and land subsidence on inundation risk. *Water*, 10(2), 157.
- Collados-Lara, A. J., Pulido-Velazquez, D., Mateos, R. M., & Ezquerro, P. (2020). Potential impacts of future climate change scenarios on ground subsidence. *Water*, 12(1), 219.
- de Graaf, I. E., Gleeson, T., Van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H., & Bierkens, M. F. (2019). Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*, 574(7776), 90-94.
- de Graaf, I. E., Gleeson, T., Van Beek, L. P. H., Sutanudjaja, E. H., & Bierkens, M. F. (2019). Environmental flow limits to global groundwater pumping. *Nature*, 574(7776), 90-94.
- Don, N. C., Hang, N. T. M., Araki, H., Yamanishi, H., & Koga, K. (2006). Groundwater resources and management for paddy field irrigation and associated environmental problems in an alluvial coastal lowland plain. *Agricultural Water Management*, 84(3), 295–304.
- Dorogush, A. V., Ershov, V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: Gradient boosting with categorical features support. In Proceedings of the 32nd International Conference on Neural Information Processing Systems (pp. 1-7).
- Dörr, N., Huu, L. V., Schenk, A., & Hinz, S. (2025). Drought-induced land subsidence in the Mekong Delta, Vietnam: Insights from SAR Interferometry. *Geophysical Research Letters*, 52(18), e2025GL117096.
- Dunn, R. J., & Morice, C. P. (2022). On the effect of reference periods on trends in percentile-based extreme temperature indices. *Environmental Research Letters*, 17(3), 034026.
- Dunn, R. J., Alexander, L. V., Donat, M. G., Zhang, X., Bador, M., Herold, N., ... & Bin Hj Yussof, M. N. A. (2020). Development of an updated global land in situ-based data set of temperature and precipitation extremes: HadEX3. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 125(16), e2019JD032263.
- Foroumandi, E., Nourani, V., Huang, J. J., & Moradkhani, H. (2023). Drought monitoring by downscaling GRACE-derived terrestrial water storage anomalies: A deep learning approach. *Journal of Hydrology*, 616, Article 128838.
- Frieler, K., Lange, S., Schewe, J., Mengel, M., Treu, S., Otto, C., ... & Lengaigne, M. (2025). Scenario set-up and the new CMIP6-based climate-related forcings provided within the third round of the Inter-Sectoral Model Intercomparison Project (ISIMIP3b, group I and II). *EGUsphere*, 2025, 1-70.
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486.
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486.
- Ghorbani, Z., Khosravi, A., Maghsoudi, Y., Mojtabaei, F. F., Javadnia, E., & Nazari, A. (2022). Use of InSAR data for measuring land subsidence induced by groundwater withdrawal and climate change in Ardabil Plain, Iran. *Scientific Reports*, 12(1), 13998.

- Gleeson, T., Wang-Erlandsson, L., Porkka, M., Zipper, S. C., Jaramillo, F., Gerten, D., ... & Famiglietti, J. S. (2020). Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. *Water Resources Research*, 56(4), e2019WR024957.
- Gleeson, T., Wang-Erlandsson, L., Porkka, M., Zipper, S. C., Jaramillo, F., Gerten, D., ... & Famiglietti, J. S. (2020). Illuminating water cycle modifications and Earth system resilience in the Anthropocene. *Water Resources Research*, 56(4), e2019WR024957.
- Guo, H., et al. (2017). The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain. *Geology in China*.
- Guo, H., et al. (2017). The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain. *Geology in China*.
- Hamed, K. H., & Rao, A. R. (1998). A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 204(1-4), 182-196.
- Herrera-García, G., et al. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34–36.
- Herrera-García, G., et al. (2021). Mapping the global threat of land subsidence. *Science*, 371(6524), 34–36.
- Huning, L. S., Love, C. A., Anjileli, H., Vahedifard, F., Zhao, Y., Chaffe, P. L., ... & AghaKouchak, A. (2024). Global land subsidence: Impact of climate extremes and human activities. *Reviews of Geophysics*, 62(4), e2023RG000817.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Cambridge University Press.
- IPCC. (2021). The Physical Science Basis Summary for Policymakers Technical Summary Frequently Asked Questions Glossary.
- Ji, R., Wang, C., Cui, A., Jia, M., Liao, S., Wang, W., & Chen, N. (2024). Assessing terrestrial water storage dynamics and multiple factors driving forces in China from 2005 to 2020. *Journal of Environmental Management*, 370, Article 122464.
- Kendall, M. G. (1975). *Rank Correlation Methods*. Griffin, London.
- Kuang, X., et al. (2024). The changing nature of groundwater in the global water cycle. *Science*, 383(6686), eadf0630.
- Lafferty, D. C., & Srivastava, R. L. (2023). Downscaling and bias-correction contribute considerable uncertainty to local climate projections in CMIP6. *npj Climate and Atmospheric Science*, 6.
- Landerer, F. W., & Swenson, S. C. (2012). Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates. *Water resources research*, 48(4).
- Landerer, F. W., Flechtner, F. M., Save, H., Webb, F. H., Bandikova, T., Bertiger, W. I., et al. (2020). Extending the global mass change data record: GRACE Follow-On instrument and science data performance. *Geophysical Research Letters*, 47, e2020GL088306.
- Li, H., Guo, Z., Chen, K., Zhan, Y., Wang, Y., Ding, C., ... & Zheng, C. (2025). Modeling land subsidence under future water stress: The influence of groundwater exploitation, climate change, and inter-basin water diversion. *Water Resources Research*, 61(11), e2025WR041105.
- Mahdian, M., Hosseinzadeh, M., Siadatmousavi, S. M., Chalipa, Z., Delavar, M., Guo, M., ... & Noori, R. (2023). Modelling impacts of climate change and anthropogenic activities on inflows and sediment loads of wetlands: case study of the Anzali wetland. *Scientific Reports*, 13, 5399.
- Mann, H. B. (1945). Nonparametric Tests Against Trend. *Econometrica*, 13(3), 245-259.
- Maraun, D., & Widmann, M. (2018). Statistical downscaling and bias correction for climate research. Cambridge University Press.

- Mengistu, T. D., Chang, S. W., & Chung, I. M. (2025). Modeling and prediction of climate change impacts on water resources vulnerability: A multi-model approach. *Journal of Environmental Management*, 388, 126025.
- Miller, M. M., Jones, C. E., Sangha, S. S., & Bekaert, D. P. (2020). Rapid drought-induced land subsidence and its impact on the California aqueduct. *Remote Sensing of Environment*, 251, 112063.
- Moon, S., Ha, K. J., & Lee, S. S. (2024). Impact of anthropogenic warming on emergence of extreme precipitation over global land monsoon area. *Environmental Research Letters*, 19, Article 034018.
- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*, 35(16), L16403.
- Mozafari, M., Hosseini, Z., Fijani, E., Eskandari, R., Siahpoush, S., & Ghader, F. (2022). Effects of climate change and human activity on lake drying in Bakhtegan Basin, southwest Iran. *Sustainable Water Resources Management*, 8(4), 109.
- Naddafi, K., Honari, H., & Ahmadi, M. (2007). Water quality trend analysis for the Karoon River in Iran. *Environmental Monitoring and Assessment*, 134(1-3), 305–312.
- Nairn, J. R., & Fawcett, R. J. (2015). The excess heat factor: A metric for heatwave intensity and its use in classifying heatwave severity. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(1), 227–253.
- Pan, Y., Zhang, C., Gong, H., Yeh, P. J. F., Shen, Y., Guo, Y., ... & Li, X. (2017). Detection of human-induced evapotranspiration using GRACE satellite observations in the Haihe River basin of China. *Geophysical Research Letters*, 44(1), 190-199.
- Prokhorenkova, L., Gusev, G., Vorobev, A., Dorogush, A. V., & Gulin, A. (2018). CatBoost: Unbiased boosting with categorical features. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2018-December, 6638-6648.
- Rajczak, J., Kotlarski, S., & Schär, C. (2016). Does quantile mapping of simulated precipitation correct for biases in transition probabilities and spell lengths? *Journal of Climate*, 29, 1605-1615.
- Rodell, M., & Reager, J. T. (2023). Water cycle science enabled by the GRACE and GRACE-FO satellite missions. *Nature Water*, 1(1), 47–59.
- Rodell, M., Famiglietti, J. S., Wiese, D. N., Reager, J. T., Beaudoin, H. K., Landerer, F. W., & Lo, M. H. (2018). Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 557(7707), 651–659.
- Scanlon, B. R., Fakhreddine, S., Rateb, A., de Graaf, I., Famiglietti, J., Gleeson, T., ... & Zheng, C. (2023). Global water resources and the role of groundwater in a resilient water future. *Nature Reviews Earth & Environment*, 4(2), 87-101.
- Scanlon, B. R., Faunt, C. C., Longuevergne, L., Reedy, R. C., Alley, W. M., McGuire, V. L., & McMahon, P. B. (2012). Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(24), 9320-9325.
- Scanlon, B. R., Faunt, C. C., Longuevergne, L., Reedy, R. C., Alley, W. M., McGuire, V. L., & McMahon, P. B. (2012). Groundwater depletion and sustainability of irrigation in the US High Plains and Central Valley. *Proceedings of the national academy of sciences*, 109(24), 9320-9325.
- Sen, P. K. (1968). Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379.
- Shamsuddoha, M., & Taylor, R. G. (2020). Groundwater storage dynamics in the world's large aquifer systems from GRACE: uncertainty and role of extreme precipitation. *Earth System Dynamics*, 11(3), 755-774.
- Shayeghi, A., Ziveh, A. R., Bakhtar, A., Teymoori, J., Hanel, M., Godoy, M. R. V., Markonis, Y., & AghaKouchak, A. (2024). Assessing drought impacts on groundwater and agriculture in Iran using high-resolution precipitation and evapotranspiration products. *Journal of Hydrology*, 631, Article 130828.

- Shirzaei, M., & Bürgmann, R. (2018). Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to the San Francisco Bay Area. *Science advances*, 4(3), eaap9234.
- Siebert, S., Burke, J., Faures, J. M., Frenken, K., Hoogeveen, J., Döll, P., & Portmann, F. T. (2010). Groundwater use for irrigation—a global inventory. *Hydrology and earth system sciences*, 14(10), 1863–1880.
- Tapley, B. D., Bettadpur, S., Ries, J. C., Thompson, P. F., & Watkins, M. M. (2004). GRACE measurements of mass variability in the Earth system. *science*, 305(5683), 503–505.
- Tourian, M. J., Elmi, O., Chen, Q., Devaraju, B., Roohi, S., & Sneeuw, N. (2015). A spaceborne multisensor approach to monitor the desiccation of Lake Urmia in Iran. *Remote Sensing of Environment*, 156, 349–360.
- Vicente-Serrano, S. M., Beguería, S., & López-Moreno, J. I. (2010). A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI. *Journal of Climate*, 23, 1696.
- Wang, C. X., Yan, J. W., Liang, W., Sun, S. B., Gou, F., Li, X. F., Luo, Y. Y., & Wang, F. J. (2023). Assessing the impacts of natural conditions and human activities on terrestrial water storage in Loess Plateau, China. *Journal of Mountain Science*, 20(7), 1921–1939.
- Wang, H., Gong, H., Chen, B., Zhou, C., Yang, Y., & Sun, X. (2024). Research on land subsidence-rebound affected by dualistic water cycle driven by climate change and human activities in Dezhou City, China. *Journal of Hydrology*, 636, 131327.
- Wang, J., Shen, Y., Awange, J., Tangdamrongsub, N., Feng, T., Hu, K., Song, Y., Yang, L., Sherif, M., & Wang, X. (2025). Exploring potential drivers of terrestrial water storage anomaly trends in the Yangtze River Basin (2002–2019). *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 58, Article 102264.
- Welch, J., Wang, G., Bao, Y., Zhang, S., Huang, G., & Hu, X. (2024). Unveiling the hidden threat: Drought-induced inelastic subsidence in expansive soils. *Geophysical Research Letters*, 51(7), e2023GL107549.

اینجانب عباسعلی داداشی رودباری با اطلاع کامل از رویه‌ها و ضوابط ارائه طرح در بنیاد ملی علم ایران، این پرسشنامه را تکمیل و کلیه مندرجات آن را تایید می‌کنم. مسئولیت وجود هرگونه نقص یا اشتباه در پیشنهاد ارائه شده بر عهده اینجانب است. متعهد می‌شوم این طرح قبلاً در داخل و یا خارج کشور انجام نشده و به طور همزمان نیز برای موسسات دیگر جهت حمایت ارائه نشده است و یا با همکاری مؤسسات دیگر در حال انجام نیست.



دستورالعمل ارسال فرم به بنیاد ملی علم ایران

تمامی مراحل ارسال طرح، رفع نقایص، داوری، تصویب، نظارت طرح‌ها و کلیه اطلاع رسانی‌ها در بنیاد ملی علم ایران به صورت الکترونیکی انجام می‌شود. لذا بنیاد از بررسی طرح‌هایی که با پست معمولی یا الکترونیکی یا هر روش دیگری ارسال شده باشند معدوم است. این فرم نیز صرفاً باید به صورت اینترنتی از طریق وبسایت بنیاد به آدرس <https://rtms.insf.org> ارسال گردد. در صورت نیاز به راهنمایی بیشتر لطفاً با بنیاد تماس حاصل نمایید (اطلاعات تماس در صفحه «تماس با ما» در وبسایت بنیاد وجود دارد).

--- انتهای فرم ---



بنیاد ملی علم ایران