



«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 پیش بینی شده برای انجام طرح: ۱۲ ماه

تاریخ شروع درخواست: ۱۴۰۴/۱۱/۱۸

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

فهرست مطالب

۱- خلاصه پیشنهاد.....	۳
۲- بیان مسئله و شرح پیشینه.....	۳
۱-۲- معرفی موضوع.....	۵
۲-۲- ضرورت و اهمیت اجرای طرح.....	۶
۲-۳- مروری بر ادبیات و پیشینه پژوهش و ذکر شکاف‌های زمینه پژوهشی.....	۷
۲-۴- سؤالات پژوهش.....	۹
۲-۵- نوآوری‌ها.....	۹
۲-۶- دستاوردها.....	۱۰
۳- روش‌شناسی پژوهش.....	۱۰
۳-۱- روش جمع‌آوری داده و اطلاعات.....	۱۱
۳-۲- روش تحلیل داده‌ها.....	۱۴
۳-۳- محدودیتها و چالش‌های اجرای پژوهش.....	۱۸
۳-۴- تربیت نیروی انسانی متخصص.....	۱۸
۳-۵- ملاحظات اخلاقی (در صورت لزوم).....	۱۸
۴- شرح علمی و ارائه مشخصات و نیازمندی‌های فنی-آزمایشگاهی طرح (در صورت لزوم).....	۱۹
۴-۱- امکانات، تجهیزات و سایر منابع موجود در سازمان مجری.....	۱۹
۴-۲- امکانات، تجهیزات و سایر منابع مورد نیاز ناموجود در سازمان مجری.....	۱۹
۵- فعالیتهای طرح و زمانبندی طبق نمودار گانت.....	۱۹
۶- توجیه هزینه‌های انجام طرح.....	۲۱
۷- برون‌دادها و تعهدات.....	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 برهم‌کنش‌های 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 SSP2-4.5 و SSP5-8.5) استفاده می‌شود. با توجه به اینکه داده‌های مدل‌های اقلیمی ممکن است نسبت به داده‌های مشاهداتی دارای اریبی باشند، اعمال روش‌های تصحیح اریبی نظیر نگاشت چندق (Quantile Mapping) برای بارش و نگاشت واریانس (Variance Scaling) برای دما ضروری است تا اریبی سیستماتیک کاهش یافته و عدم قطعیت پیش‌نگری‌ها کاهش یابد. برای شبیه‌سازی دقیق رخداد‌های هیدرو-اقلیمی 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 دینامیک 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 آتروپوژنیک، 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 نظیر شبکه‌های جاده‌ای، سیستم‌های آبیاری و شبکه‌های برق را تخریب نماید (Galloway & Burbey, 2011). مطالعات جهانی نشان می‌دهند که ۱۵۹۶ شهر بزرگ جهان معادل ۲۲ درصد از کلانشهرها، مانند مکزیکوسیتی، 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 سازندها در لایه‌های آبخوان و حرکات تکتونیک طبقه‌بندی کرد (Guo et al., 2017). در این میان، برداشت بی‌رویه از منابع آب زیرزمینی به عنوان محرک اصلی انسانی برای فرونشست زمین در نظر گرفته می‌شود و نزدیک به ۶۰ درصد از موارد گزارش‌شده در سطح جهان را به خود اختصاص می‌دهد که امنیت آبی و محیطی را تحت تأثیر خود قرار داده است (Bagheri-Gavkosh et al., 2021). امروزه امنیت آب به یکی از چالش‌های بنیادین جوامع بشری تبدیل 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، چرخه‌ی 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). در مناطق خشک و نیمه‌خشک، این دو

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 تأمین‌کننده 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 بازتحلیل‌شده نشان می‌دهند که آبخوان‌های واقع در مناطق خشک، از جمله ایران، با نرخ‌های هشداردهنده‌ای از تخلیه مواجه هستند (Shamsudduha & Taylor, 2020). در ایران، برهمکنش غیرخطی و هم‌افزایی تغییر اقلیم و عوامل انسانی، به‌ویژه در گذار از استفاده آب‌های سطحی به وابستگی مطلق به آب‌های زیرزمینی، منجر به رخداد فرونشست‌های برگشت‌ناپذیر 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 پیشران‌ها به دلیل برهمکنش 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 نشان‌دهنده کاهش چشمگیر منابع آب در مناطق تحت تنش 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 تنش‌های مداوم منابع آب ناشی از بارش محدود و تقاضای فزاینده روبروست (Barati et al., 2023). شواهد نشان می‌دهد که در دهه‌های اخیر، پهنه‌های آبی سطحی نظیر دریاچه ارومیه و دریاچه طشک-بختگان و همچنین بسیاری از رودخانه‌ها به شدت کاهش یافته‌اند و همزمان ذخایر آب زیرزمینی به سطوح بحرانی رسیده‌اند (Tourian et al., 2015; Mozafari et al., 2022; Shayeghi et al., 2024). برآوردهای علمی حاکی از آن است که بین سال‌های ۲۰۰۲ تا ۲۰۱۵، ذخیره آب زیرزمینی ایران سالانه حدود ۵/۲۵ کیلومتر مکعب کاهش یافته است (Ashraf et al., 2021). این کاهش‌ها بازتابی از برهمکنش پیشران‌های هیدروکلیمایی 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-تعرق، 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.

هم‌افزایی برداشت آب‌های زیرزمینی، تغییر اقلیم، کاهش بارش و فرونشست زمین 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 ۱/۶ برابر حداکثر حجم تاریخی دریاچه ارومیه است (Ashraf et al., 2019). هم‌افزایی کاهش تغذیه آبخوان‌ها ناشی از خشکسالی‌های هواشناسی و تلفیق برداشت بی‌رویه برای کشاورزی، چرخه‌ای معیوب را در کشور شکل داده است بطوریکه 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 سرزمینی 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 برهمکنش 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 تشدید 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 بیان 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 برهم‌کنش تغییر اقلیم و سوءمدیریت منابع آب.
۴. پیش‌نگری تغییرات ذخیره کل آب (TWS) و نرخ فرونشست زمین در افق‌های آتی تحت سناریوهای مشترک اجتماعی-اقتصادی (SSPs) با استفاده از رویکرد چند مدلی همادی CMIP6

۲-۱- معرفی موضوع

تغییر اقلیم به عنوان یک پدیده‌ی 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 تنش آبی را تشدید 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 قطعیت‌ها، 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 تشدید 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، حیاتی است (IPCC, 2021).

با گرم شدن اقلیم جهانی و تشدید چرخه هیدرولوژیک خشکی، برهمکنش 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 محرک فرونشست باشند. برای مثال، خشکسالی‌ها ریسک فرونشست را از طریق افزایش تقاضا برای برداشت آب زیرزمینی تشدید می‌کنند، و از سوی دیگر، برخی فرآیندهای ایجادکننده فرونشست مانند اکسیداسیون مواد آلی

¹ Anthropogenic Droughts

خاک، منجر به آذارسازی گازهای گلخانه‌ای شده و بازخوردهای مثبت اقلیمی ایجاد می‌کند 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، ۱۴۰۲الف).

این برداشت بی‌رویه که عمدتاً ناشی از فشار بخش کشاورزی با سهم مصرف حدود ۹۴ درصد (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۴۰۲الف) 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 به‌صورت مرگ آبخوان تعبیر می‌شود؛ زیرا با فشردگی لایه‌های رسوبی، تخلخل خاک از بین رفته و حتی در صورت بارش آبی، 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 دست‌کم گرفته شود و جوامع در برابر پیامدهای آن ناآماده 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 زمره مناطقی با بالاترین نرخ‌های فرونشست ناشی از برداشت آب زیرزمینی قرار دارد، درک پاسخ‌های پیچیده سطح زمین به محرک‌های اقلیمی و انسانی و کمی‌سازی سهم هر یک، برای مدیریت پایدار منابع و جلوگیری از خسارات جبران‌ناپذیر 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 تأثیر دماهای بالا تبخیر می‌شود (Foroumandi et al., 2023). آب زیرزمینی سهم اصلی تامین 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 تشدید کرده‌اند.

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

- نرخ فرونشست در برخی مناطق غربی ایران به حدود ۱۸/۹ سانتی متر در سال رسیده است و حداقل ۲۵ درصد از جمعیت کشور در مناطقی زندگی می کنند که پتانسیل فرونشست تا یک متر را دارا هستند (Motagh et al., 2008). این پدیده، زیرساخت ها کلانشهرهایی مانند تهران با ۱۵ میلیون جمعیت و شریان های حیاتی را تهدید می کند. همزمانی فرونشست ها با فعالیت های تکتونیکی در مناطق لرزه خیز، می تواند اثرات زلزله ها را تشدید کرده و به فاجعه ای انسانی منجر شود.
- آبخوان های دشت های کلیدی مانند حوضه کرخه (سید غذایی ایران) و کارون، با نرخ هشداردهنده ای در حال تخلیه هستند (به ترتیب ۱۰۰۸ و ۰۹۱ کیلومتر مکعب کاهش طی ۱۴ سال) (Ashraf et al., 2021). این روند با افزایش شوری آب (افزایش ۱۸۳ درصدی هدایت الکتریکی در حوضه کارون) (Naddafi et al., 2007)، عملاً خاک های حاصلخیز را غیرقابل کشت می کند. تداوم این وضعیت، امنیت غذایی را به خطر می اندازد.
- شرایط ایران نماد بارز خشکسالی انسان ساخت^۱ است. نتایج این تحقیق می تواند مدل های ارزشمندی برای مدیریت منابع آب ارائه دهد. مهم تر از همه، فرونشست زمین منجر به کاهش دائمی و غیرقابل برگشت ظرفیت ذخیره آبخوان^۲ می شود (Don et al., 2006)؛ پدیده ای که اگر امروز کمی سازی و مدیریت نشود، احیای منابع آب در سال های پرباران آتی را غیرممکن می سازد.

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

پدیده فرونشست زمین که زمانی تنها به عنوان یک چالش ژئوتکنیکی محلی در نظر گرفته می شد، امروزه به یک بحران جهانی با ابعاد پیچیده محیط زیستی و اقتصادی تبدیل شده است. مطالعات اخیر نشان می دهند که این پدیده دیگر به صورت مجزا عمل نمی کند، بلکه در یک چرخه بازخوردی خطرناک با تغییر اقلیم و پدیده های فرین جوی قرار گرفته است. بررسی ادبیات موضوع نشان می دهد که درک جامعه علمی از فرونشست، از تمرکز صرف بر مکانیک خاک به سمت تحلیل های سیستماتیک و چندوجهی که در آن برهم کنش اقلیم، مدیریت منابع آب و تاب آوری زیرساخت ها 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 سیلاب و پیشروی آب دریا و مدیریت منابع آب و استراتژی های سازگاری بررسی می شود.

یکی از نخستین حلقه های ارتباطی میان تغییر اقلیم و پایداری زمین، اثرات مستقیم کمبود رطوبت بر خاک های ریزدانه است. در حالی که پژوهش های اولیه، مانند مطالعه تاریخی (Brignall et al., 2002) در انگلستان، بر خسارات اقتصادی ناشی از انقباض خاک های رسی (Clay shrinkage) به زیرساخت های مسکونی در پی خشکسالی های شدید دهه ۱۹۷۰ تمرکز داشتند، تحقیقات نوین با بهره گیری از فناوری های پیشرفته سنجش از دور، ابعاد پیچیده تری از این رابطه را آشکار کرده اند.

با گذر زمان و تشدید تغییر اقلیم، پژوهشگران دریافته اند که خشکسالی ها تنها منجر به نشست های موقت نمی شوند، بلکه می توانند تغییرات جبران ناپذیری در ظرفیت آبخوان ها ایجاد کنند. در این راستا، Miller et al., (2020) با استفاده از تداخل سنجی راداری (InSAR) در کالیفرنیا نشان دادند که چگونه خشکسالی های سریع و شدید، منجر به فرونشست های گسترده در مجاورت کانال های انتقال آب شده و تهدیدی جدی برای امنیت آبی ایجاد می کنند. این مطالعه بر نقش حیاتی نوسانات آب زیرزمینی در تغییر شکل های الاستیک و غیرالاستیک پوسته زمین تأکید داشت.

در همین راستا، مطالعات جدیدتر بر ماهیت غیرالاستیک^۳ این تغییر شکل ها تمرکز کرده اند. Welch et al., (2024) در بررسی خاک های منبسط شونده سواحل تگزاس دریافته اند که فرونشست های ناشی از خشکسالی صرفاً یک واکنش فیزیکی بازگشت پذیر نیستند، بلکه حدود ۱۰ درصد از این نشست ها به صورت دائمی باقی مانده و منجر به از دست رفتن تراز ارتفاعی زمین می شوند. این یافته توسط پژوهش جدید Dörr et al., (2025) در دلتای مکنونگ ویتنام نیز تأیید شد؛ آن ها نشان دادند خشکسالی های شدید می تواند فرونشستی تا ۷ سانتی متر 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 روشنی نشان می‌دهد که با افزایش تواتر خشکسالی‌های ناشی از تغییر اقلیم، نرخ فرونشست‌های برگشت‌ناپذیر در دشت‌های آبرفتی و مناطق ساحلی شتاب نگران‌کننده‌ای 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 سیلاب، منجر به کم‌برآوردی فاحش ریسک می‌شود. *Tfwala* (۲۰۱۸) با توسعه مدل‌های فیزیوگرافی نشان دادند که ترکیب فرونشست زمین و تغییر اقلیم، نه تنها عمق سیلاب‌ها را افزایش می‌دهد، بلکه مدت زمان ماندابی^۱ را نیز بین ۱۳ تا ۲۷ درصد طولانی‌تر می‌کند که این امر خسارات وارده به مناطق مسکونی را به شدت تشدید می‌نماید. این موضوع در مناطق ساحلی اهمیتی دوچندان می‌یابد. در این راستا، *Bürgmann & Shirzaei* (۲۰۱۸) با بررسی خلیج سان‌فرانسیسکو نشان دادند که نقشه‌های خطر سیلاب 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 خواهند بود.

بخش قابل توجهی از ادبیات پژوهش به نقش فعالیت‌های انسانی، به‌ویژه برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی، و برهم‌کنش 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 بدبینانه 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 سری 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 رساندند. *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 خواهند داشت. این مطالعه و پژوهش *Wang et al.*, (2024) که به تحلیل بازگشت سطح زمین پس از کنترل برداشت آب پرداخته‌اند، روزه‌های امیدوارانه‌ای را نشان می‌دهند که با مدیریت صحیح و کاهش فشار بر آبخوان‌ها، می‌توان حتی در شرایط تغییر اقلیم، روند فرونشست را تعدیل یا معکوس کرد.

مرور 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 بتوانند به‌طور 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، مرور مطالعات انجام‌شده در ایران نشان می‌دهد که مؤلفه‌های کلیدی همچون فرونشست زمین، خشکسالی و تغییر اقلیم، عمدتاً به‌صورت 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

¹ Inundation duration

اسناد بالادستی منتشرشده توسط مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی پرداخته شده است تا تصویری جامع و مبتنی بر داده‌های ملی از این بحران‌ها 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؛ به‌طوری‌که ۷۵ درصد بارش‌های کشور تنها در 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 به‌عنوان ذخایر استراتژیک، تأمین‌کننده ۵۵ درصد کل نیاز آبی کشور هستند (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۴). با این حال، برداشت سالیانه ۳۶۴ 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، ۱۴۰۲ الف). اسناد حاکی از آن است که ۱۲۰ میلیارد مترمکعب از کسری تجمعی مخازن (معادل یک‌چهارم ذخایر استاتیک و تجدیدناپذیر) از دست رفته است. این تخلیه سبب تغییر جهت گرادیان هیدرولیکی شده و رودخانه‌ها که در حالت طبیعی تغذیه‌کننده آبخوان بودند، اکنون به درون سفره‌های آب زیرزمینی زهکشی می‌شوند (مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، ۱۳۹۶).

۲-۴- سؤالات پژوهش

- چگونه رخدادهای فرین اقلیمی (مانند خشکسالی‌های تشدید 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؟

۲-۵- 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 (۲۰۰۲ تا ۲۰۰۵) نهفته است. بر خلاف 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 پیش‌بینی‌های هیدروکلیماتی 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-ترقق واقعی (Eta) و تغییرات کاربری اراضی (LULC) را مدل‌سازی می‌کند. این رویکرد در حوضه‌های ناهمگن ایران، مناطقی را که بیشترین آسیب‌پذیری را در برابر کمبود آب شیرین دارند شناسایی کرده و اثرات آبخاری 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 بررسی می‌کنند، این تحقیق بر برهمکنش غیرخطی و تشدیدکننده 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 کلان‌مقیاس ثقی (GRACE) برای درک تغییرات کلی آب و داده‌های با تفکیک مکانی بالا (InSAR) برای پایش تغییرات سطح زمین، امکان تفکیک دقیق سیگنال‌های اقلیمی از سیگنال‌های انسانی را فراهم می‌کند.

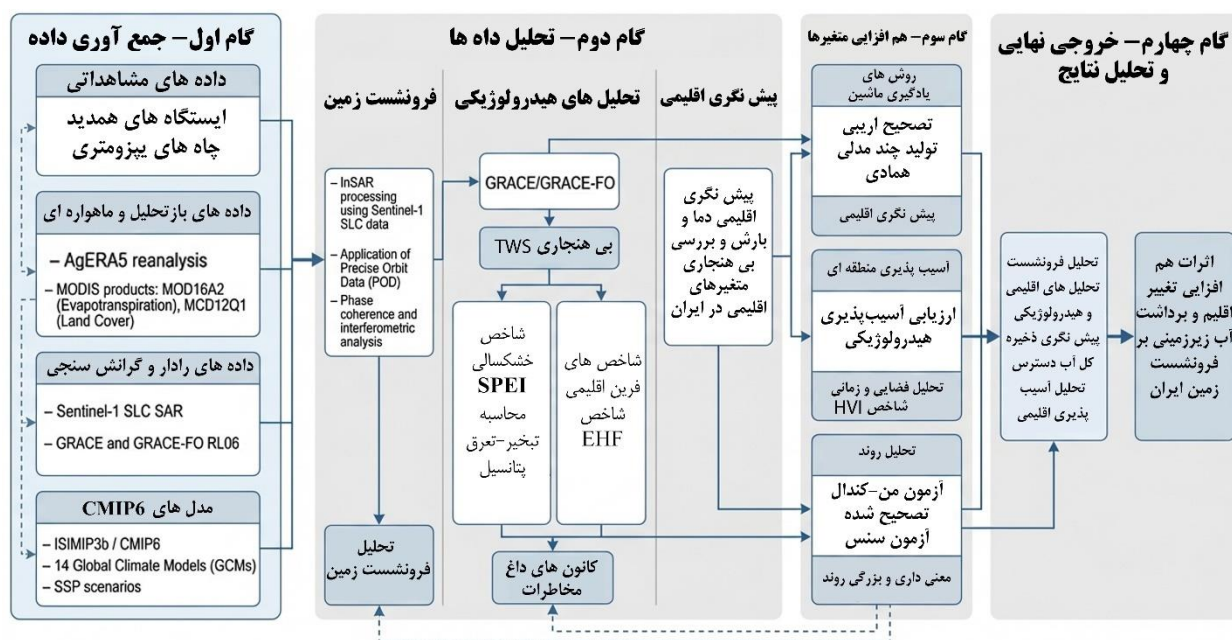
۲-۶- دستاوردها

اجرای این طرح پژوهشی منجر به ایجاد یک سنتز 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 سناریوهای 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 خسارات اقتصادی و محیط‌زیستی آتی جلوگیری کنند. در نهایت، این طرح با برجسته 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 پیژومتری و متغیرهای جوی ایستگاه‌های سینوپتیک با دوره آماری ۳۰ ساله) و محصولات بازتحلیل و سنجش‌ازدور است. به‌منظور پوشش خلاءهای مکانی-زمانی، از داده‌های بازتحلیل AgERA5 با تفکیک ۰.۱ درجه قوسی و گام روزانه به‌عنوان 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 و GRACE-FO (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 سناریوهای SSP (از خوش‌بینانه تا بدبینانه) تا سال ۲۱۰۰ به کار گرفته خواهد شد. در مرحله پردازش و تحلیل، ارزیابی فرونشست با تکنیک تداخل‌سنجی راداری بر روی داده‌های 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 بی‌هنجاری آب استفاده می‌گردند. پایش خشکسالی از طریق شاخص SPEI صورت می‌گیرد که در آن تبخیر-تعرق پتانسیل با روش پنمن-مانتیش فائو-۵۶ محاسبه شده و بیلان آب بر توزیع لوگ-لوجستیک سه پارامتری برازش 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 اریبی (نگاشت صدک برای بارش و نگاشت واریانس برای دما) قرار گرفته و درستی‌سنجی می‌شوند.

در بخش پیش‌نگری و تحلیل‌های آماری، پیش‌بینی ذخیره آب (TWS) برای دوره‌های آتی با استفاده از مدل یادگیری ماشین تقویت گرادیان (CatBoost) و بر اساس ورودی‌های اقلیمی تصحیح‌شده 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 خودهمبستگی داده‌ها، از آزمون ناپارامتریک من-کندال تصحیح شده استفاده شده و شیب 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 ۳-۱ و ۳-۲ تشریح شدند. فرآیند اجرایی تحقیق در فلوچارت زیر ارائه شده است.



شکل ۱- فلوچارت اجرایی انجام تحقیق

۳-۱- روش جمع آوری داده و اطلاعات

داده های هواشناسی و چاه های پیژومتری

به منظور دستیابی به اهداف تحقیق و تبیین دقیق برهم کنش میان متغیرهای اقلیمی و منابع آب، داده های متشکل از دو بخش اصلی داده های هواشناسی و داده های چاه های پیژومتری 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 اتکا 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 ساعات 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 پیژومتری استفاده خواهد شد. این داده ها شامل اندازه گیری های سطح آب در چاه های پیژومتری در دسترس می باشد که توسط سازمان آب منطقه ای ثبت و گردآوری شده اند. تلفیق داده های سطح آب زیرزمینی با پارامترهای استخراج شده از ایستگاه های سینوپتیک، امکان ارزیابی دقیق بیلان آب و تأثیر پدیده هایی 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 ای 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 استاندارد 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 پردازش داده های خام ERA5 فرآیندی پیچیده و تخصصی است، استفاده از مجموعه داده AgERA5 پژوهشگران را از انجام این مراحل

بی‌نیاز کرده و امکان ورود مستقیم به مرحله تحلیل و مدل‌سازی را فراهم می‌سازد. متغیرهای موجود در این مجموعه داده به گونه‌ای طراحی شده‌اند که نیازهای ورودی اکثر مدل‌های کشاورزی و اکولوژیک را مرتفع سازند. در فرآیند آماده‌سازی این داده‌ها، گام‌های زمانی به صورت روزانه و منطبق بر منطقه زمانی محلی جمع شده‌اند. همچنین، جهت دستیابی به دقت افقی بالاتر، اصلاحات توپوگرافی بر روی داده‌ها اعمال شده و تفکیک افقی به 0.1° ارتقا یافته است. این اصلاحات و مقیاس‌کاهی آماری به شبکه 0.1° ، از طریق اعمال معادلات رگرسیونی خاص برای هر متغیر و شبکه، بر روی داده‌های میان‌یابی 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 0.1° آموزش دیده‌اند. این رویکرد سبب شده است تا داده‌های نهایی سازگاری بسیار بالایی با توپوگرافی دقیق‌تر، الگوهای کاربری اراضی و مرزهای خشکی و دریا در مدل HRES داشته باشند.

محصولات ماهواره‌ای مورد استفاده

به منظور بررسی و برآورد دقیق‌تر بیلان آبی در محدوده مورد مطالعه، از داده‌های 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 بهره‌برداری قرار خواهد گرفت. این یک محصول یک ترکیبی هشت روزه است که با تفکیک افقی ۵۰۰ متر تولید می‌شود. مبنای محاسباتی الگوریتم به کار رفته در مجموعه داده‌های MOD16، معادله پنمن-مانتیت است. در این الگوریتم، ورودی‌های متعددی شامل داده‌های هواشناسی بازتحلیل روزانه به همراه محصولات سنجنش از دوری MODIS نظیر پویایی ویژگی‌های پوشش گیاهی، آلبیدو و پوشش اراضی لحاظ می‌گردد. در ساختار این محصول، مقادیر پیکسل‌ها برای دو لایه تبخیر-تعرق (ET و PET) حاصل جمع مقادیر تمام هشت روز در دوره ترکیبی است، در حالی که مقادیر پیکسل برای لایه‌های شار گرمای نهان (LE و PLE) میانگین هشت روز آن دوره می‌باشد.

با توجه به اینکه تغییرات سطح زمین و الگوی بهره‌برداری از اراضی، نقش کلیدی در بیلان آب، نفوذپذیری خاک و شدت برداشت از آب‌های زیرزمینی ایفا می‌کند و مستقیماً بر تشدید خشکسالی و وقوع فرونشست مؤثر است، پایش دقیق این تغییرات در تحلیل اثرات هم‌افزا ضروری می‌باشد. بدین منظور، جهت استخراج نقشه‌های پوشش زمین از محصول داده‌ای نوع پوشش زمین نسخه ۶.۱ با شناسه MCD12Q1 استفاده خواهد شد. این محصول حاصل ترکیب داده‌های 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 بازه‌های زمانی سالانه ارائه می‌دهد. در تولید محصول MCD12Q1 نسخه ۶.۱ از روش‌های طبقه‌بندی نظارت‌شده بر روی داده‌های بازتابی ماهواره‌های ترا و آکوا بهره گرفته شده است. جهت تعیین انواع پوشش زمین در این محصول، از روش‌های طبقه‌بندی متنوع و معتبری استفاده گردیده که شامل برنامه بین‌المللی ژئوسفر-بیوسفر (IGBP)، دانشگاه مریلند (UMD)، شاخص سطح برگ (LAI)، چرخه‌های بیوژئوشیمیایی (BIOME-BGC) و انواع عملکردی گیاه (PFT) می‌باشد.

داده‌های ماهواره‌ای راداری Sentinel-1

تحلیل پدیده فرونشست زمین با استفاده از فناوری سنجنش‌ازدور راداری، نیازمند درک عمیق از ماهیت سیگنال‌های دریافتی و انتخاب دقیق نوع داده‌ها بر اساس هندسه تصویربرداری است. مأموریت تصویربرداری راداری Sentinel-1 که به عنوان یک منظومه ماهواره‌ای با مدار قطبی طراحی شده است، به واسطه بهره‌گیری از رادار دهانه ترکیبی (SAR) در باند C، امکان تصویربرداری پیوسته در تمام شرایط جوی و در طول شبانه‌روز را فراهم می‌آورد. این ویژگی، یعنی عدم تأثیرپذیری از پوشش ابر یا فقدان نور خورشید، زیربنای اصلی استمرار پایش تغییرات سطحی است. با این حال، طراحی یک متدولوژی دقیق برای بررسی فرونشست، مستلزم عبور از محصولات آشکارسازی شده دامنه (GRD) و تمرکز بر محصولات سطح یک SLC است، زیرا پارامتر فاز که حامل اصلی اطلاعات جابجایی سطح در تکنیک‌های تداخل‌سنجی است، در محصولات GRD حذف شده و تنها دامنه سیگنال باقی می‌ماند.

داده‌های ماهواره‌ای GRACE و GRACE-FO

در مناطقی که داده‌های زمینی اندک است، داده‌های ماهواره‌ای دیدگاه‌های ارزشمندی از چرخه آب در مقیاس حوضه‌ای تا جهانی فراهم می‌کنند. در این میان، مأموریت‌های سنجش از دور GRACE و GRACE-FO به دلیل ارائه آرشیو گسترده‌ای از داده‌های ذخیره آب خشکی (TWS) با دقت بالا جایگاه ویژه‌ای دارند (Rodell and Reager, 2023). 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 بازبازی 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 ۲۲ مه ۲۰۱۸ 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 اکتشافات، چشم‌اندازی منحصر به فرد از اقلیم زمین را ارائه می‌دهند که پیامدهای گسترده‌ای 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 و دنباله آن، GRACE-FO، 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 پردازش‌شده 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 داده‌هایی را فراهم می‌کند که امکان ارزیابی دقیق اثرات تغییر اقلیم بر منابع آب و سیستم‌های وابسته را میسر می‌سازد. داده‌های پایه اقلیمی مورد نیاز در این تحقیق، موسوم به واداشت‌های مرتبط با اقلیم (CRFs²)، از خروجی‌های شبیه‌سازی فاز ششم پروژه مقایسه مدل‌های جفت‌شده (CMIP6) استخراج شده‌اند. به منظور لحاظ نمودن عدم قطعیت‌های ساختاری در پیش‌نگری‌های اقلیمی، از داده‌های ۱۴ مدل گردش کلی (GCM) منتخب شامل مدل‌های GFDL-ESM4، CanESM5، CESM2-WACCM، CNRM-CM6-1، CNRM-ESM2-1، EC-Earth3، JIM-ESM4، UKESM1-0-LL و 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 می‌گردند. دومین معیار، در دسترس بودن شبیه‌سازی‌های مدل اقلیمی^۲ با متغیرهای مورد نیاز برای مدل‌سازی اثرات تغییر اقلیم بوده است. معیار 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 معتبر 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 خواهند 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 ۱۶۰۱ تا ۱۸۴۹) 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 (CO₂) و متان (CH₄) 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 حاره‌ای 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).

۳-۲- روش تحلیل داده‌ها

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

در گام نخست تدوین روش تحقیق، وضعیت عملیاتی منظومه ماهواره‌ای Sentinel-1 باید به دقت مدنظر قرار گیرد تا بازه زمانی تکرار تصویربرداری به درستی در مدل‌سازی‌ها لحاظ شود. برای استخراج دقیق نرخ فرونشست، 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 تداخل‌سنجی 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 سنجی سیگنال بازگشتی 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 می‌کنند، شاخصی حیاتی محسوب می‌شوند. این محصولات منشعب از داده‌های سطح ۲، اگرچه فاقد تصحیح رادیومتریک زمین (RTC) و فیلتر اسپکل هستند، اما به واسطه ارتورکتیفیکیشن با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی کوپرنیک (Copernicus DEM) با تفکیک مکانی ۳۰ متر، اطلاعات ارزشمندی در خصوص پایداری فاز سطحی ارائه می‌دهند که در تفسیر الگوهای فرونشست در مناطق غیرشهری و دارای پوشش گیاهی اهمیت دارد. در مجموع، روش تحقیق مربوط به فرونشست 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 نظیر 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 فائو-۵۶ (FAO-56 Penman-Monteith) استفاده خواهد شد. این روش با بهره‌گیری از متغیرهای هواشناسی شامل میانگین تندى باد، ساعات آفتابی، تابش ورودی روزانه و دما، برآوردی دقیق‌تر نسبت به روش‌های مبتنی بر دما (مانند تورنت‌وایت یا هارگریوز) ارائه می‌دهد و نوسانات انرژی و دینامیک جو را در محاسبه نیاز آبی جو لحاظ می‌کند (Allen et al., 1998).

پس از محاسبه سری زمانی بیلان آب اقلیمی، گام بعدی برازش 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-لوژیستیک (Log-Logistic) استفاده می‌گردد. برای برآورد پارامترهای این توزیع، روش گشتاورهای وزن‌دار احتمالی ناریب (ub-pwm) به کار گرفته خواهد شد. این روش در مقایسه با روش‌هایی نظیر حداکثر درست‌نمایی، کارایی بالاتری با اربیی کمتری در تحلیل سری‌های زمانی اقلیمی ارائه می‌دهد. در نهایت، مقادیر حاصل از تابع توزیع تجمعی به یک متغیر نرمال 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 تجمیع 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، ۱۲ یا ۲۴ ماه) برای واکاوی خشکسالی‌های هیدرولوژیک و اثرات تأخیری آن‌ها بر ذخایر 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 اقلیم‌شناسی 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 پرش‌های 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 تشدیدکننده خشکسالی و تبخیر، با استفاده از نمایه فاکتور گرمای 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 وارده 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، جهت 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 & Srivier, 2023). در این تحقیق، برای همسوسازی داده‌های مدل با داده‌های مشاهداتی و کاهش عدم قطعیت، از روش‌های نگاشت صدک^۱ برای تصحیح اریبی داده‌های بارش جهت بهبود نمایش میانگین‌ها و مقادیر فرین (Rajczak et al., 2016) و روش نگاشت واریانس^۲ برای تصحیح واریانس دمای شبیه‌سازی شده با تغییرات مشاهداتی (Maraun & Widmann, 2018) به کار گرفته خواهد شد. برای ارزیابی درستی کارایی مدل‌ها و داده‌های تصحیح شده، از سنجه‌های آماری استاندارد شامل درصد میانگین اریبی خطا (PBIAS)، میانگین خطای مطلق (MAE)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) و ضریب همبستگی پیرسون استفاده می‌شود تا اطمینان حاصل شود مدل‌ها از دقت کافی برخوردار هستند.

پیش‌نگری ذخیره کل آب (TWS^۳) 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 آبی TWS نیازمند تغذیه 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 CNRM-ESM2-، CNRM-CM6-1، CESM2-WACCM، CanESM5، GFDL-ESM4، MPI-ESM1-2-HR، IPSL-CM6A-LR، TaiESM1، MIROC6، KACE-1-0-G، JIEM-ESM4، EC-Earth3، 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، تعبیه 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 تا ۲۱۰۰، 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 تأثیرگذار است.

رویکرد یادگیری 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 بزرگ‌مقیاس 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 برابر 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 زیرزمینی، نفوذ، تبخیر-تعرق پتانسیل و واقعی محاسبه می‌گردد. در این روش، هر یک از متغیرهای هیدرولوژیکی بر اساس آستانه‌های تنش منابع آب طبقه‌بندی و وزن‌دهی 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:

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

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 برای مدیریت پایدار منابع آب و مقابله با تخریب اکوسیستم محسوب می‌شود (Mengistu et al., 2025).

تحلیل روند داده‌ها

در این پژوهش، به منظور آشکارسازی تغییرات و روند در سری‌های زمانی متغیرهای اقلیمی، پایش خشکسالی، نوسانات تراز آب‌های زیرزمینی و ذخایر آب در دسترس، از رویکردهای ناپارامتریک پیشرفته استفاده خواهد شد. اگرچه آزمون کلاسیک من-کندال ابزاری استاندارد جهت شناسایی روندهای یکنواخت در داده‌های محیطی محسوب می‌شود (Kendall, 1975; Mann, 1945)، اما فرض استقلال داده‌ها در این آزمون، کاربرد آن را در سری‌های زمانی هیدرولوژیک که اغلب دارای ساختار خودهمبستگی هستند، با چالش مواجه می‌کند. وجود خودهمبستگی معنی‌دار می‌تواند منجر به افزایش کاذب احتمال رد فرضیه صفر و برآورد نادرست معنی‌داری روند شود. لذا در این مطالعه، جهت غلبه بر اثرات خودهمبستگی و افزایش دقت تحلیل‌ها، از نسخه‌های تصحیح شده آزمون من-کندال (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 تعدیل می‌گردد تا اثرات خودهمبستگی خنثی شود. در نهایت، به منظور 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، برآوردی مقاوم در برابر داده‌های پرت ارائه می‌دهد و مکمل مناسبی برای آزمون‌های من-کندال محسوب می‌شود (Sen, 1968).

۳-۳- محدودیت‌ها و چالش‌های اجرای پژوهش

۱. **فقدان سامانه پایش مداوم و یکپارچه فرونشست:** در حال حاضر، شبکه ایستگاه‌های دائمی GPS (GNSS) که به طور اختصاصی و با تراکم مناسب برای پایش نرخ لحظه‌ای فرونشست 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.
۲. **دسترسی دشوار و پراکندگی داده‌های چاه‌های پیژومتری:** داده‌های سطح آب زیرزمینی (پیژومتری) 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 زمان‌بر و دشوار است.
۳. **عدم قطعیت در داده‌های میدانی موجود:** داده‌های برداشت شده میدانی در دستگاه‌های اجرایی کشور گاهی دارای خطاهای انسانی یا عدم به‌روزرسانی در بازه‌های زمانی منظم هستند که می‌تواند دقت ورودی‌های مدل را تحت‌الشعاع قرار دهد.

۳-۴- 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 هیدرو-کلیمایی و تحلیل‌های پیچیده آماری، که منجر به تولید دانش 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 فرونشست 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 بدنه اجرایی کشور در آینده است.

۳-۵- ملاحظات اخلاقی (در صورت لزوم)

- در این پژوهش، تمامی اصول اخلاق علمی و پژوهشی رعایت خواهد شد. این موارد شامل:
۱. **امانت‌داری در داده‌ها:** تمامی داده‌های دریافتی از سازمان‌ها تنها برای مقاصد علمی این طرح استفاده شده و محرمانگی آن‌ها در صورت لزوم حفظ خواهد شد.
 ۲. **رعایت حقوق مالکیت فکری:** در تمامی برون‌دادها، به منابع داده‌ها و تحقیقات پیشین به درستی استناد خواهد شد و از سرقت ادبی پرهیز می‌شود.
 ۳. **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 حجیم (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 مجهز به نرم‌افزارهای پیشرفته و لایسنس‌دار جهت تحلیل‌های مکانی و بصری‌سازی داده‌ها.
۳. دسترسی به پایگاه‌های علمی: دسترسی دانشگاه به ژورنال‌ها و پایگاه‌های داده علمی معتبر 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 تفکیک 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

شماره مرحله / فعالیت	عنوان مرحله / فعالیت	مرحله / فعالیت پیش نیاز	درصد وزنی به مبلغ کل پروژه	نام منابع مورد استفاده (نیروی انسانی، مواد مصرفی، خدمات و ...)	خروجی ها و دستاوردهای مرحله	مدت زمان اجرا (ماه)	نمودار زمان بندی (ماه)											
							۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
۱	گردآوری پایگاه داده های چندمنبعی: اخذ داده های زمینی (چاه ها، سینوپتیک)، دانلود تصاویر ماهواره ای (Sentinel-1, GRACE, MODIS)، داده های AgERA5 و مدل های CMIP6	-	۱۰	پژوهشگر، سیستم رایانه ای با ظرفیت ذخیره سازی بالا، اینترنت پرسرعت، مکانبات اداری (سازمان آب/هواشناسی)	پایگاه داده خام شامل داده های زمینی، ماهواره ای و مدل های اقلیمی	۱												
۲	آماده سازی و کنترل کیفیت داده ها (QC): همگن سازی داده های ایستگاهی، تصحیحات هندسی تصاویر، بررسی داده های پرت و تشکیل سری های زمانی پایه	۱	۲۰	پژوهشگر، نرم افزارهای آماری و GIS، نرم افزارهای سنجش ازدور	مجموعه داده های تصحیح شده، همگن و آماده برای پردازش	۴												
۳	پردازش پیشرفته سنجش ازدور (راداری و گرانشی): تداخل سنجی راداری (InSAR) روی Sentinel-1 برای فرونشست و پردازش GRACE برای استخراج TWS	۲	۱۰	سیستم پردازشی قوی، نرم افزارهای پردازش راداری، کدهای پایتون/R (TWS)	نقشه های نرخ فرونشست، سری زمانی نوسانات ذخیره آب (TWS)	۱												
۴	تحلیل های هیدرو-اقلیمی و فرین ها: محاسبه شاخص های خشکسالی (SPEI)، تبخیر-تعرق (MOD16)، کاربری اراضی و شاخص های فرین (ET-SCI, EHF)	۲ و ۳	۱۰	پژوهشگر، نرم افزارهای کدنویسی R و Python، بسته های آماری تحلیل خشکسالی	نمودارهای پهنه بندی خشکسالی، نقشه های کاربری اراضی، تحلیل امواج گرمايي و فرین ها	۵												
۵	مقیاس کاهی و تصحیح اریبی مدل های اقلیمی: اجرای ۱۴ مدل GCM، اعمال نگاشت صدک (بارش) و واریانس (دما) و ارزیابی خطا (RMSE, MAE)	۲ و ۴	۱۰	داده های پروژه ISIMIP3b، کدهای تصحیح اریبی، سیستم محاسباتی	سناریوهای SSP1-2.6, 3-7.0, 5-8.5	۴												
۶	مدل سازی هوشمند با یادگیری ماشین: توسعه مدل CatBoost برای پیش نگری TWS آتی با استفاده از خروجی های اقلیمی و داده های تاریخی	۳ و ۵	۱۰	کتابخانه های یادگیری ماشین Scikit-learn/CatBoos، پردازنده گرافیکی (GPU)	مدل پیش بینی کدنده، سری زمانی پیش نگری	۴												
۷	ارزیابی آسیب پذیری، تحلیل روند و تدوین نهایی: محاسبه شاخص HVI، آزمون من-کنندال تصحیح شده	۳ تا ۵	۱۰	پژوهشگر، تیم مشاوره، نرم افزارهای تحلیل آماری و واژه پرداز	نقشه های پهنه بندی آسیب پذیر ی (HVI)،	۵												

مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، دفتر مطالعات زیربنایی (گروه عمران و شهرسازی). (۱۴۰۲-ب). اظهارنظر کارشناسی درباره: «لایحه کنترل فرونشست 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 فرونشست 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. Moftakhari, 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., Moftakhari, 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., Mojtahedi, 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., & Srivier, 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., Beaudoing, 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.
- Shamsudduha, 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., Tangdamrongsab, 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 مؤسسات دیگر جهت حمایت ارائه نشده است و یا با همکاری مؤسسات دیگر در حال انجام نیست.

نام و نام خانوادگی مجری

عباسعلی داداشی رودباری

امضاء (اسکن شده)

دستورالعمل ارسال فرم به بنیاد ملی علم ایران

تمامی مراحل ارسال طرح، رفع نقایص، داوری، تصویب، نظارت طرح‌ها و کلیه اطلاع‌رسانی‌ها 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 معذور 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