

# زمین بان

نشریه علمی، اجتماعی، فرهنگی

جنگ فقط تراژدی انسانی نیست...



گاهنامه شماره ۴



دانشگاه علوم  
پزشکی کرمان

بهار ۱۴۰۵



# اطلاعات نشریه

نشریه علمی، فرهنگی، اجتماعی زمین بان

شماره ۴ | بهار ۱۴۰۵

شماره مجوز: ۱۰/۵۰/۱۲۱۷

صاحب امتیاز: سرکار خانم فاطمه رحیمی

دبیر علمی: سرکار خانم فاطمه رحیمی

شورای سردبیران: جناب آقای دکتر مجید هاشمی

سرکار خانم دکتر مریم دولت آبادی

موسس و مدیر مسئول: سرکار خانم فاطمه رحیمی

دبیر اجرایی: سرکار خانم فاطمه شیروانی

ویراستار: سرکار خانم دکتر مریم دولت آبادی،

جناب آقای دکتر مجید هاشمی

صفحه آرا: محسن محمدی

هیئت تحریریه: خانم فاطمه شیروانی، خانم فاطمه رحیمی،

خانم زهرا سبک خیز، خانم ندا ادهمی، خانم حنا ترک زاده،

خانم انیس حاج غنی، آقای سبحان قنبری، آقای رضا جمشیدی،

خانم فائزه اسلامی، خانم زهرا رضایت بخش، خانم زهرا بهجتی،

خانم همتا سلاجقه، خانم محدثه سادات حسینی

# فهرست

## سخن مدیر مسئول

۱

## پیش‌گفتار

۳

## گفت‌وگو با اساتید

(تهیه و تنظیم: فاطمه رحیمی، هم‌تا سلاجقه)

## مطالب علمی

۹

## از فضا تا زمین

(ارزیابی چندساله فرونشست با کاربرد فناوری‌های نوین سنجش از دور)

۱۷

## فشرده‌گی برگشت‌ناپذیر خاک و تغییر شکل زمین

(مکانیسم‌های ژئوتکنیکی برداشت آب و اثرات بلندمدت برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی)

۲۱

## بهره‌برداری از منابع آب نامتعارف

۲۶

## تأثیر جهانی بهره‌برداری بیش از حد آب زیرزمینی بر فرونشست زمین

۳۰

## تجربه‌های جهانی در کنترل فرونشست زمین و چارچوب سیاستی مدیریت منابع آب

۳۹

## تحلیل همبستگی بین فرونشست زمین و آلودگی نیتрат در آب زیرزمینی

(شواهدی از فرو فشار آبخوان‌ها و نفوذ آلاینده‌ها)

۴۳

## تأثیر تغذیه مصنوعی آبخوان بر فرونشست زمین

۴۸

## بزرگ‌داشت بهداشت محیط





## سخن مدیر مسئول



### فاطمه رحیمی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت  
محیط دانشگاه علوم پزشکی کرمان



E-mail:

Rahiimii.fatemeh.r@gmail.com

به نام پروردگار توانا و حافظ محیط زیست  
خوانندگان ارجمند، اعضای محترم جامعه علمی و فعالان گرامی حوزه  
بهداشت محیط

با افتخار تمام، چهارمین شماره از نشریه تخصصی «زمین بان» را با محوریت  
مهم و حیاتی «از قطره قطره آب تا عمق خاک: نگاهی به بهره‌برداری از منابع  
آب و فرونشست زمین» به حضور شما عزیزان تقدیم می‌داریم.  
فرونشست زمین دیگر یک واژه صرفاً علمی نیست؛ این پدیده خاموش اما  
ویرانگر، در حقیقت ندای دردناک خاک سرزمینمان است که زنگ خطری  
جدی را از اعماق به صدا درآورده است. این بحران، نتیجه مستقیم بهره  
برداری بی‌رویه و شتاب زده از منابع حیاتی، به ویژه آب‌های زیرزمینی است و  
یادآور آن است که رابطه انسان با طبیعت، نیازمند یک بازنگری جدی،  
عمیق و مسئولانه است. این مسئله نه تنها یک چالش علمی، بلکه به یک  
بحران ملی و اخلاقی تبدیل شده است که آینده توسعه و زیرساخت‌های  
کشور را تحت الشعاع قرار داده است.

نشریه زمین بان در این شماره کوشیده است تا با اتکا به دانش تخصصی و  
با نگاهی چندبعدی و تحلیلی، ابعاد گسترده این چالش را بررسی کند و  
تصویری روشن، علمی و البته دغدغه‌مند از واقعیت‌های پنهان زیر پایمان  
ارائه دهد. هدف ما، فراهم آوردن بستری جهت ارتقای آگاهی عمومی است.  
این دستاورد ارزشمند، بدون همراهی صمیمانه، دلسوزانه و مسئولانه جمع  
کثیری از فرهیختگان میسر نبود. مراتب سپاس خود را از اساتید ارجمند که



با دانش غنی خود چراغ راه ما بودند، دانشجویان فعال و اعضای محترم هیئت تحریریه که با تلاش خستگی‌ناپذیر خود ستون‌های این نشریه را محکم کردند، و با قلم توانای خود به غنای علمی «زمین بان» افزودند، ابراز می‌دارم.



با آرزوی قلبی، این شماره از «زمین بان» بتواند جرقه کوچکی باشد؛ جرقه‌ای که تفکر زیست‌محیطی را در دل‌ها روشن‌تر کند و ما را به سوی توسعه‌ای پایدار و مهربان‌تر با زمین سوق دهد. امیدواریم محتوای این نشریه این حس مسئولیت را در تک‌تک ما تقویت کند که به عنوان حافظان امین آب و خاک، این میراث گران‌بها را سالم و پرامید برای فرزندانمان به یادگار بگذاریم. بیایید همه با هم، برای سربلندی این سرزمین تلاش کنیم.

با احترام و ارادت خالصانه





مصاحبه با جناب آقای

## دکتر علیرضا نصیری

پلی از شیمی به مهندسی بهداشت محیط، در مسیر  
اخلاق و سخت کوشی



فاطمه رحیمی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط

همتا سلاجقه

دانشجوی کارشناسی مهندسی بهداشت محیط

پژوهش و تحقیق

در بخش اجتماعی شماره چهارم نشریه زمین بان میزبان استادی بودیم که نه تنها در عرصه علم و پژوهش نامی برجسته است، بلکه در وادی اخلاق و تعهد نیز قله نشین به حساب می آید. جناب آقای دکتر علیرضا نصیری، معاون محترم و فعال مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط دانشگاه علوم پزشکی کرمان و در لیست ۲ درصد برتر دانشمندان استنفورد، در گپ وگفتی دلنشین، از پیچ وخم های یک زندگی علمی پرمایه را گفتند. ما حاصل این مصاحبه، نه فقط گزارشی از افتخارات، بلکه یک منشور عملی و اخلاقی برای دانشجویان است.

### مسیر پرفراز و نشیب تا قله پژوهش

دکتر نصیری مسیر تحصیلی خود را از مقطع کارشناسی رشته شیمی کاربردی شروع و در مقاطع بالاتر دکترای تخصصی در گرایش شیمی آلی ادامه دادند. اما از سال ۱۳۸۸، دنیای حرفه ای ایشان در حوزه پژوهشی نانو تکنولوژی در تصفیه آب و فرایندهای نوین و توسعه یافته تصفیه آب و فاضلاب در مرکز تحقیقات مهندسی بهداشت محیط ادامه یافت.

روایت یک دوره سخت: «گذراندن دوره تحصیلی پرچالش مقطع دکترا»

در خلال صحبت ها، از ایشان پرسیدیم که چالش برانگیزترین موقعیت زندگی شان چه بوده است. پاسخ، ما را به دوران دکترای ایشان برد؛ دوره ای که همزمان با کار تمام وقت در کرمان، مجبور بودند برای تحصیل به شهر یزد سفر کنند. ایشان این دوران را اینگونه توصیف کردند:

«مقطع تحصیلی دکترای من در یزد چون هم زمان با اشتغال من در کرمان شده بود و دو طرف کاری و تحصیلی انسان های برجسته، پرتلاش و جدی بودند، مدیریت همزمان



موقعیت تحصیلی و کاری خیلی سخت و پرچالش شده بود و همین شرایط سخت و پرچالش تجربه های بسیاری را به همراه داشت»

این صحبت صمیمانه، گویای تمام تلاش های پنهان یک پژوهشگر برای رسیدن به قله های علمی است. تلاشی سخت و پربار که نتیجه آن، کسب رتبه یک جشنواره فرهیختگان و انتخاب رساله دکترای ایشان بعنوان برترین های رشته علوم پایه بود.

(۱)

### در مسیر افتخار



دستاوردها و افتخارات دکتر نصیری نشان می دهد که این سختی ها، ثمره ای شیرین داشته اند:

(۲)

- پژوهشگر برتر دانشجویی سال ۱۳۹۸
- پژوهشگر برتر استانی سال ۱۴۰۰
- پژوهشگر برتر دانشگاهی سال ۱۳۹۹ و ۱۴۰۳
- انتخاب شدن جزو لیست ۲ درصد دانشمندان برتر جهان در سال ۲۰۲۴
- چاپ و انتشار بیش از ۱۰۰ مقاله علمی و تخصصی در مجلات معتبر بین المللی و داخلی با  $H-Index = 46$
- آرایه بیش از ۳۰ مقاله در همایش ها و کنفرانس های ملی و بین المللی
- مشارکت در بیش از ۷۰ طرح تحقیقاتی با داخل و خارج از دانشگاه، صنایع و سازمان های دولتی و خصوصی
- داور علمی تخصصی بیش از ۵۰ مجله علمی معتبر در انتشارات بین المللی

### وقتی علاقه متولد می شود: از انتخاب تا عشق به شیمی



دکتر نصیری صادقانه در مورد انتخاب رشته شیمی سخن گفتند. سخن ایشان جالب بود: در ابتدا دلیل خاصی مبنی بر علاقه شدید برای انتخاب شیمی وجود نداشت. اما در ادامه مسیر بود که این علاقه شکوفا شد:

«وارد رشته شیمی شدم اما در ادامه واقعاً به این رشته علاقه مند شدم و علی رغم چالش های زیادی که از نظر کمبود امکانات و تجهیزات وجود داشت تا مقطع دکترای تخصصی ادامه دادم.»

و اگر زمان به عقب برگردد؟ پاسخ ایشان قاطع است:

«بله من واقعاً رشته شیمی را دوست دارم... همچنان در همین مسیر پیش میرم»



## سوخت موتور: توکل به خدای متعال، انگیزه، تلاش و فرمول «ادامه دادن»



از دکتر نصیری درباره منبع انرژی و انگیزه‌شان پرسیدیم تا راز این پشتکار مداوم را بدانیم:

«توکل به خدای متعال و انگیزه در انسان همانند سوخت یک موتور می ماند. انسان هم سوخت و انرژی مورد نیاز خود را برای رسیدن به اهداف و ادامه دادن در این مسیر، از توکل در امور به خدا و انگیزه ایی که دارد میگیرد»

ایشان این انرژی را از اهدافی که قرار است به آن‌ها دست پیدا کند و احساس مفید بودن برای جامعه و دانشجویان می گیرد. ایشان با قاطعیت، مهم ترین درسی که در سابقه ۱۵-۱۴ ساله کاری خود آموخته اند را بیان کردند: هرگز ناامید نشویم و حتی با شکست های پی در پی و در کمال ناامیدی هم ادامه دهیم.

«شاید به اون نتیجه دلخواه نرسی ولی به نظر من رمزش ادامه دادن و کنار نکشیدن. بالا و پایین زیاد داره و اگر وسط کار بخوای مسیر رو خالی کنی، عقب می مونی بطوریکه موفقیت بازی سرعت نیست بلکه بازی دوام و پایداریه»

## اصول مدیریت بحران: انعطاف یا پذیرش؟



یکی از جنبه های مهم در زندگی حرفه ای، نحوه برخورد با موانع غیرقابل پیش بینی است. دکتر نصیری راهکار خود را در مواجهه با چالش ها اینگونه تشریح کردند:

«اگر شرایط در زندگی شخصی و یا کاری مساعد نباشد سعی می کنم ان شرایط را تا حد امکان و توان تغییر بدم. اگر هم توانایی تغییر شرایط را نداشته باشم اگر امکانش باشه مسیرم را تغییر میدم و اگر این امکان هم وجود نداشته نباشد سعی میکنم با شرایط کنار بیام و مسیرم را ادامه بدم تا زمانیکه بتوانم شرایط را تغییر بدم»

در پاسخ به این سوال که «چه ویژگی در خود می بینین که دوست دارین تغییر بدین؟»



پاسخ دادند: ویژگی را که دوست دارم در خود ظریف‌تر و عمیق‌تر روی آن کار کنم «صبر در گفتار» یعنی توانایی در برابر عجله ذهن برای قضاوت یا پاسخگویی در مسائل است. البته، این به معنای نارضایتی از خودم نیست، بلکه گسترش آنچه هستم در جهتی که بتوانم بهتر و تاثیر گذارتر باشم.

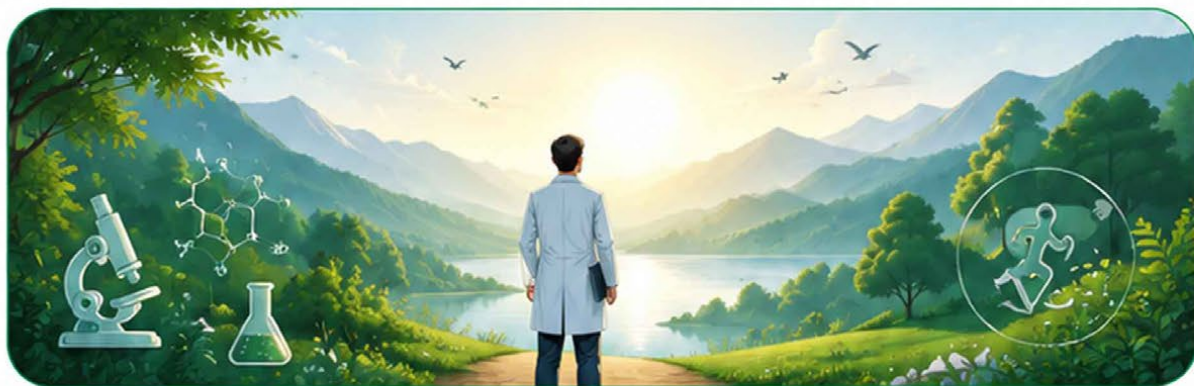
## آرامش خارج از محیط کاری: سفر و ورزش

از ایشان درباره منبع آرامششان خارج از فضای کاری پرسیدیم. دکتر نصیری با وجود درگیری زیاد کاری، اهل سفر هستند (البته اگر فرصتش پیش بیاید) اما اصلی‌ترین راهکار ایشان برای تجدید قوا و حفظ سلامت روحی و جسمی، ورزش کردن است:

«ورزش کردن واقعاً به انسان کمک می‌کند که هم از نظر جسمی و هم از نظر روحی خود را برای شرایط سخت همیشه آماده نگه دارد که بتواند مسیر خود را طی نماید.»

## تأکیدی حیاتی: چرا «دانشمند بی اخلاق» یک پول سیاه هم نمی‌ارزد!

اوج صراحت و دغدغه دکتر نصیری در بحث اخلاق بود. ایشان اعتقاد دارند که شان و منزلت استادی بسیار بالاست و استاد باید هم از لحاظ علمی و هم از لحاظ اخلاقی و فکری، فردی فرهیخته و شایسته باشد تا شایستگی عنوان استادی را در این مقام داشته باشد. در پاسخ به اینکه ویژگی اصلی یک استاد یا محقق چیست، دکتر نصیری اینگونه بیان کردند:



«بحث اخلاقی در کنار بحث علمی مهم‌ترین ویژگی یک استاد است»



چرا؟ چون دانشجو استادش را الگو قرار می‌دهد و رفتارها و کنش‌های او را می‌آموزد. همچنین دکتر نصیری همراه با یک لبخند، جمله ای را به زبان آوردند:

“

«همانطور که ما سعی کردیم از اساتید و بزرگان حوزه خود بیاموزیم، این موارد واقعاً اهمیت دارند. یک محقق و استاد علاوه بر اصول علمی حتماً بایستی اصول اخلاقی را هم سرلوحه کار خود قرار دهد»



این جمله کوتاه، چکیده فلسفه ایشان در آموزش و پژوهش است: علم باید در خدمت تعهد، امانت‌داری و صداقت باشد.

### قاب ماندگار: دانشجویانی که در ذهن استاد نقش بستند.



از ایشان پرسیدیم آیا دانشجویی با ویژگی خاص یا طرز فکری متفاوت در ذهنشان مانده است. دکتر نصیری با لبخندی بدون تأمل پاسخ دادند:

“



«بله همه دانشجویانی که در پروژه‌های تحقیقاتی ما مشارکت داشتند در ذهن من باقی مانده اند. هر کدام از این دانشجویان یک ویژگی خاص داشتند. حقیقتاً کلیه دانشجویانی که تا به امروز با ایشان چه در کلاس‌های درس و چه در پروژه‌های تحقیقاتی همکاری داشتم، همه دانشجویان خوب، پرتلاش، سخت‌کوش و فعالی بودند.»

”

ایشان دلیل این ماندگاری را سختی‌ها و محدودیت‌های کار آزمایشگاهی و علاقه واقعی دانشجویانی می‌دانند که با وجود همه این چالش‌ها، وارد تیم تحقیقاتی می‌شوند و با علاقه و سخت‌کوشی فعالیت می‌کنند.

### توصیه راهگشا به دانشجویان: بر روی توانمندی‌های خود سرمایه‌گذاری کنید



دکتر نصیری که خود پلی از شیمی به بهداشت محیط زده‌اند، به دانشجویان بهداشت محیط و تمامی رشته‌ها توصیه کردند که به هیچ عنوان از آینده شغلی خود ناامید نشوند، حتی اگر از دیگران، جملات ناامیدکننده شنیده‌اند و شرایط اشتغال برای ایشان سخت شده است، رمز عبور از چالش‌های شغلی، به توانمندی فردی وابسته است:



«شما می‌توانید یک مهندس بهداشت محیط باشید اما در کنار آن یک گرافیست خوب هم باشید، یک برنامه‌نویس خوب هم باشید...»

”

ایشان تأکید کردند که وظیفه اصلی دانشجو در دانشگاه، پیشرفت درسی و علمی است، اما کسی در دوره علمی و تحصیلی خود "برد" می‌کند که در کنار آن، در تیم تحقیقاتی و پژوهشی خود اصول اخلاقی مانند امانت‌داری، صداقت، تعهد کاری و سخت‌کوشی را تقویت کرده و ارتقا داده باشد. در نهایت دکتر نصیری شخصیت خود را در چند کلمه پرتلاش، آرام، همراه و جدی توصیف کردند. ایشان مصداق این شعار است: تلاش کن، سخت‌کوش باش و ادامه بده؛ چون رمز موفقیت در ادامه دادن است.





# از فضا تا زمین

ارزیابی چند ساله فرونشست با کاربرد  
فناوری‌های نوین سنجش از دور



## فاطمه شیروانی

دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط  
هرمزگان



E-mail:  
Yalda.shirvani82@gmail.com



## انیس حاج غنی

کارشناس مهندسی بهداشت محیط



E-mail:  
Anishajghani81@gmail.com

### مقدمه

فرونشست زمین از دهه‌های اخیر به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های ژئوتکنیکی، زیست‌محیطی و امنیتی مطرح شده است. عوامل متعددی از جمله کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، بهره‌برداری بی‌رویه از منابع طبیعی، تغییر کاربری زمین و تشدید اثرات تغییر اقلیم، بسیاری از دشت‌های کشور را (به‌ویژه در نواحی مرکزی ایران) با نرخ‌های نگران‌کننده فرونشست مواجه ساخته‌اند. اهمیت این پدیده زمانی آشکارتر می‌شود که بدانیم در بسیاری از موارد بازگشت‌پذیری فرونشست ممکن نیست و فشردگی ایجادشده در لایه‌های رسی به صورت غیرقابل بازگشت باقی می‌ماند.

در مناطق آبرفتی و دشت‌های نیمه‌خشک، فرونشست عمدتاً در نتیجه تحولات هیدرولوژیک، بهره‌برداری بیش از حد از منابع زیرسطحی و در برخی موارد تغییرات اقلیمی رخ می‌دهد. ایران به دلیل شرایط اقلیمی خشک و نیمه‌خشک، توسعه کشاورزی با نیاز آبی بالا و رشد جمعیت شهری، طی سال‌های اخیر نقاط گسترده‌ای از فرونشست را تجربه کرده و در حال حاضر در میان کشورهای دارای نرخ‌های بالای فرونشست قرار دارد. به‌ویژه در دشت‌های مرکزی کشور، فرونشست طی دهه اخیر به عنوان یک مخاطره زیست‌محیطی و زیرساختی برجسته پدیدار شده که پیامدهایی نظیر کاهش ظرفیت ذخیره آب زیرزمینی، افزایش احتمال ایجاد شکاف‌ها و گسل‌نمایی سطحی، تهدید سلامت عمومی و آسیب به زیرساخت‌های شهری و کشاورزی را به دنبال دارد. تحلیل‌های کشوری و منطقه‌ای نشان می‌دهد که نقاط



فرونشست عمدتاً در نواحی مرکزی و جنوب شرقی کشور متمرکز شده اند؛ از جمله رفسنجان و دشت های کرمان، دشت های پیرامون اصفهان و محدوده های اطراف تهران و هشتگرد. در برخی مطالعات کشوری، سهم مساحت هایی که فرونشست آنها از آستانه بحرانی فراتر رفته گزارش شده است. داده ها همچنین حاکی از تنوع قابل ملاحظه در نرخ فرونشست میان دشت ها هستند؛ در برخی کانون ها نرخ های محلی به چندین ده سانتی متر در سال (بیش از ۳۰-۳۵ سانتی متر در سال) رسیده اند که با مطالعات محلی همخوانی دارد، در حالی که در سایر دشت ها نرخ متوسط فرونشست در محدوده چند میلی متر تا چند سانتی متر در سال گزارش شده است. این روندها غالباً همزمان با افت های قابل توجه سطح آب زیرزمینی رخ داده اند.

تحلیل های همبستگی نشان می دهد که استخراج مفرط منابع زیرسطحی برای آبیاری و مصارف شهری مهم ترین عامل مرتبط با فرونشست است. علاوه بر این، ویژگی های رسوبات آبرفتی (از جمله ساختار لایه بندی هیدرولیکی و کاهش جریان های سطحی) نقش تسهیل کننده در تشدید فرونشست دارند. الگوهای فصلی آب دهی (زمستان-تابستان) و وقوع خشکسالی های متناوب نیز به عنوان عوامل تشدیدکننده مطرح اند. پیامدهای فرونشست شامل کاهش ظرفیت ذخیره آب های زیرزمینی (که در موارد فشردگی آبرفتی غیرقابل بازگشت است)، خسارت به راه ها، خطوط انتقال و سازه های سطحی از جمله فرودگاه ها، و افزایش خطر پدید آمدن شکاف ها و گودال های سطحی است. از منظر بهداشت محیط نیز تغییرات در ساختار هیدرولوژیک می تواند بر کیفیت منابع آب آشامیدنی تأثیر منفی بگذارد. در چنین شرایطی، فناوری های نوین سنجش از دور به عنوان ابزارهایی دقیق، سریع و کم هزینه برای پایش مداوم و پایش بینی روند فرونشست اهمیت یافته اند. برای کاهش ریسک ناشی از این مخاطرات، اتخاذ راهبردهای چندوجهی ضروری است؛ تحلیل ها نشان می دهد ترکیب مانیتورینگ ماهواره ای پیوسته، پایش چاه ها، مدیریت مصرف آب در کشاورزی و احیای مصنوعی سفره های آب زیرزمینی می تواند در کاهش ریسک و مدیریت کارآمد فرونشست مؤثر باشد.

پیشرفت های اخیر در سنجش از دور راداری<sup>(۱)</sup> (InSAR)، به ویژه داده های

1. Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR)



Sentinel ۱ و روش‌های سری‌زمانی تداخل‌سنجی راداری (InSAR)، امکان نقشه‌برداری گسترده، پیوسته و دقیق از تغییرات عمودی سطح زمین را فراهم کرده‌اند. این ابزارها برای تحلیل روندهای بلندمدت و شناسایی «نقاط داغ» (مناطق که نرخ و شدت فرونشست در آنها بالاتر از میانگین منطقه بوده و روند آن شتاب‌دار یا در حد بحرانی است) بسیار مناسب‌اند.

تصاویر Sentinel ۱ با روش‌های پیشرفته تداخل‌سنجی یکی از دقیق‌ترین و مقرون‌به‌صرفه‌ترین روش‌ها برای پایش فرونشست زمین محسوب می‌شود و در شناسایی الگوهای مکانی، روندهای زمانی و نقاط بحرانی در دشت‌های وسیع نقش مؤثری در مدیریت منابع آب زیرزمینی و برنامه‌ریزی شهری دارد.

سنجش از دور فعال مبتنی بر ارسال انرژی و دریافت پراکنش امواج، امکان ثبت داده‌ها در همه ساعات شبانه‌روز و تحت شرایط جوی ناهمگون (ابری، گردوغبار، بارندگی) را فراهم می‌سازد؛ از این رو Sentinel ۱ برای دشت‌های خشک، نیمه‌خشک و پرگردوغبار مانند مناطق مرکزی ایران گزینه‌ای ایده‌آل است. این ماهواره شامل دو ماهواره راداری (Sentinel ۱A و Sentinel ۱B) در باند C با دوره بازگشت ۶ تا ۱۲ روز و پهنه برداشت وسیع (تا حدود ۲۵۰ کیلومتر عرض) است؛ مد نواری آن پوشش وسیعی را با دقت مکانی حدود ۵×۵ متر ارائه می‌دهد. از سال ۲۰۱۴، در دسترس قرار گرفتن رایگان داده‌های Sentinel ۱ موجب توسعه گسترده کاربردهای InSAR در مطالعات فرونشست شده است.

در سامانه‌های SAR، حرکت ماهواره دهانه مصنوعی بزرگی ایجاد می‌کند که وضوح مکانی بالاتر از رادارهای معمولی فراهم می‌آورد؛ هر پیکسل نتیجه ترکیب بازتاب‌های متعدد ثبت‌شده در طول مسیر پرواز است که حساسیت بالا به تغییرات موقعیت سطح زمین را ممکن می‌سازد. InSAR با بهره‌گیری از اطلاعات فاز و شدت تصاویر تکرارشونده، تغییرات فاز را تحلیل می‌کند؛ تغییرات فاز بین تصاویر پیایی حامل اطلاعات مکانیکی دقیق از جابجایی سطح زمین نسبت به ماهواره بوده و سری‌زمانی این تصاویر می‌تواند جابجایی‌های زمین را در حد میلی‌متر اندازه‌گیری کند.

روش‌های اصلی پردازش InSAR عبارتند از:

- تداخل‌سنجی تفاضلی (D-InSAR)<sup>(۱)</sup>: محاسبه اختلاف فاز بین دو

۱. Differential InSAR (D-InSAR)



تصویر در دو زمان مختلف برای استخراج تغییر شکل رخ داده؛ مناسب برای شناسایی تغییرات ناگهانی اما دارای محدودیت در پوشش گیاهی متغیر و تحلیل تغییرات تدریجی بلندمدت.

- مجموعه‌های با پایه کوچک (S-BAS)<sup>(۱)</sup>: استفاده از مجموعه‌ای از جفت تصاویر با پایه فضایی و زمانی کوچک برای کاهش اثرات جوی، نویز و خطاهای مداری؛ مناسب برای پایش تدریجی و بلندمدت و تولید سری زمانی با دقت میلی‌متری.

- تداخل‌سنجی نقاط بازتابنده پایدار (PSI)<sup>(۲)</sup>: انتخاب پیکسل‌هایی با بازتاب پایدار در طول زمان که دقت بسیار بالا فراهم می‌کنند و برای بررسی نشست در مقیاس ساختمان یا بلوک شهری مناسب‌اند. مزایای ترکیب داده‌های Sentinel ۱ و روش‌های InSAR شامل دقت میلی‌متری در اندازه‌گیری تغییرات آهسته، پوشش گسترده یک صحنه، هزینه نسبتاً پایین، توانایی تشخیص نقاط داغ، تکرارپذیری بالا برای تحلیل روندهای زمانی، امکان ادغام با داده‌های آبخوان و چاه‌ها و کاهش نیاز به حضور میدانی گسترده است. قابلیت ثبت داده در شرایط شبانه‌روز و عدم حساسیت به ابر، کاربرد این فناوری را در مناطق خشک و پرگردوغبار ارتقاء می‌دهد. علاوه بر این، در مناطق شهری که پراکنش‌کننده‌های پایدار (ساختمان‌ها و سازه‌ها) وجود دارند، روش PSI کارایی ویژه‌ای دارد. سنجش از دور راداری برای مطالعه تالاب‌ها و مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم نیز مناسب است؛ نفوذ امواج رادار و توانایی ثبت بازتاب از پوشش گیاهی و خاک مرطوب باعث شده داده‌های SAR در مطالعات آب‌گیری شده کاربردی باشند. با این حال، تغییرات پوشش گیاهی و شرایط جوی می‌توانند نویز و خطا ایجاد کنند که به استفاده از روش‌هایی مانند S-BAS و تلفیق با داده‌های زمینی نیازمند است.

برای تحقق تحلیل‌های کاربردی و سیاست‌محور، تلفیق داده‌های Sentinel ۱ InSAR با داده‌های تکمیلی زمینی ضروری است؛ این داده‌ها شامل مشاهدات چاه (سطح ایستابی و میزان برداشت)، داده‌های شبکه GNSS<sup>(۳)</sup> (سامانه‌های ناوبری ماهواره‌ای جهانی) برای اعتبارسنجی، اطلاعات کیفیت آب و داده‌های ژئوتکنیکی محلی می‌شوند ایجاد پردازش خودکار Sentinel ۱ همراه با شبکه چاه‌های پایش و

۱. Small Baseline Subset (S-BAS)

۲. Persistent Scatterer Interferometry (PSI)

۳. Global Navigation Satellite System (GNSS)



ایستگاه‌های GNSS و پایش کیفیت آب امکان پیگیری همزمان فرونشست و پیامدهای بهداشتی را فراهم می‌آورد.

در زمینه فناوری‌های تکمیلی

- GNSS ایستگاهی با ایستگاه‌های زمینی دائمی دقت میلی‌متری و قابلیت اعتبارسنجی نتایج InSAR را فراهم می‌کند؛ هرچند شبکه‌های GNSS در ایران هنوز محدودند اما توسعه آنها در حال پیشرفت است.

- داده‌های چندطیفی و ابرطیفی اطلاعاتی درباره رطوبت خاک، بافت خاک، پوشش گیاهی و تغییر کاربری ارائه می‌دهند که برای تحلیل علل فرونشست ضروری است.

- LiDAR<sup>(۱)</sup> (فاصله‌یابی و سنجش با نور) از هواپیما یا پهپاد مدل‌های سه‌بعدی دقیق سطح ارائه می‌دهد و رادارهای باندهای L و P با طول موج‌های بلندتر نفوذ بیشتری به لایه‌های سطحی دارند؛ مأموریت‌های آتی می‌توانند دقت پایش فرونشست را افزایش دهند.

مطالعات موردی داخلی و بین‌المللی نشان می‌دهند که ترکیب InSAR و داده‌های زمینی توانسته نقش بهره‌برداری غیرپایدار از منابع آب زیرزمینی را در فرونشست‌های دشت‌های مرکزی ایران نشان دهد. داده‌های ماهواره‌ای امکان شناسایی سریع مناطق پرخطر و اولویت‌بندی اقدامات حفاظتی را فراهم می‌کنند، اما تصمیم‌گیری سیاست‌محور مستلزم تلفیق این داده‌ها با اطلاعات چاه‌ها، الگوهای مصرف کشاورزی و ارزیابی زمین‌شناسی محلی است. برای مثال، در برخی مناطق ایران نرخ فرونشست محلی بیش از ده‌ها سانتی‌متر در سال



۱. Light Detection and Ranging (LiDAR)



گزارش شده که با افت سطح آب زیرزمینی همزمان است. چالش‌ها و محدودیت‌ها شامل حساسیت داده‌های راداری به تغییرات رطوبت و شرایط جوی، ناپایداری بازتاب در پوشش گیاهی و نیاز به داده‌های تکمیلی زمینی (عمق چاه‌ها، سطح آب زیرزمینی، بافت خاک و اطلاعات ژئوتکنیکی) است. همچنین تحلیل در مناطق کوهستانی ممکن است به دلیل سایه‌زنی و همپوشانی پیچیده‌تر شود.

پیشنهادها و راهبردهای مدیریتی

- ایجاد سامانه ملی پایش فرونشست با ترکیب داده‌های Sentinel ۱، شبکه GNSS و پایش چاه‌ها.
- استفاده از نقشه‌های خطر برای تعیین مناطق ممنوعه برداشت آب و اولویت‌بندی مداخلات.

• تقویت تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و مدیریت جریان‌های سطحی برای افزایش توان بازیابی آبخوان و کاهش افت ایستابی.

• ترویج روش‌های آبیاری کم‌مصرف و مدیریت مصرف آب در کشاورزی به عنوان مداخله‌های کلیدی برای کاهش یا توقف روند فرونشست.

• توسعه الگوریتم‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی برای مدل‌سازی و پیش‌بینی مناطق مستعد فرونشست با تلفیق داده‌های InSAR، بارش، تبخیر، سطح آبخوان، بافت خاک و دیگر پارامترها.

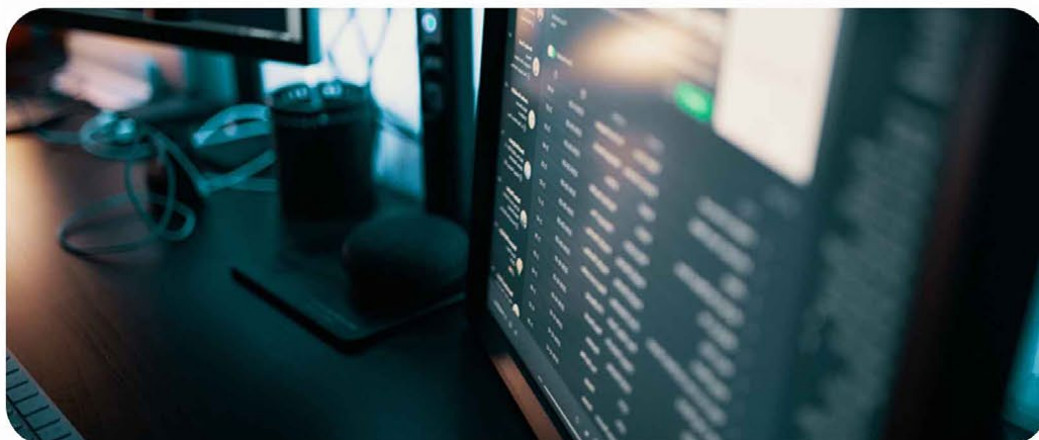
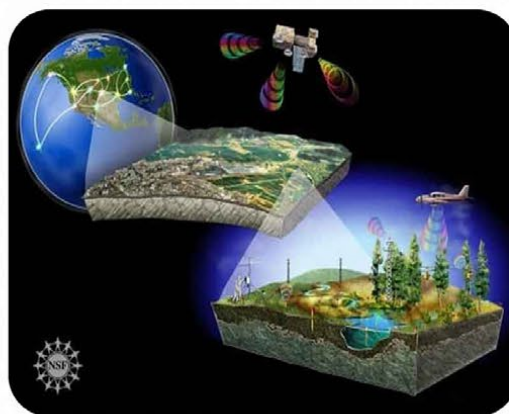
در مجموع، فناوری‌های نوین سنجش از دور راداری و روش‌های InSAR، به‌ویژه با داده‌های Sentinel ۱، ابزارهایی توانمند برای پایش و پیش‌بینی فرونشست فراهم می‌کنند؛ اما اثربخشی آنها در مدیریت مخاطره مستلزم تلفیق با داده‌های زمینی، توسعه زیرساخت‌های پایش ملی و اجرای سیاست‌های کنترلی و احیاکننده منابع آب زیرزمینی است.

#### نتیجه‌گیری

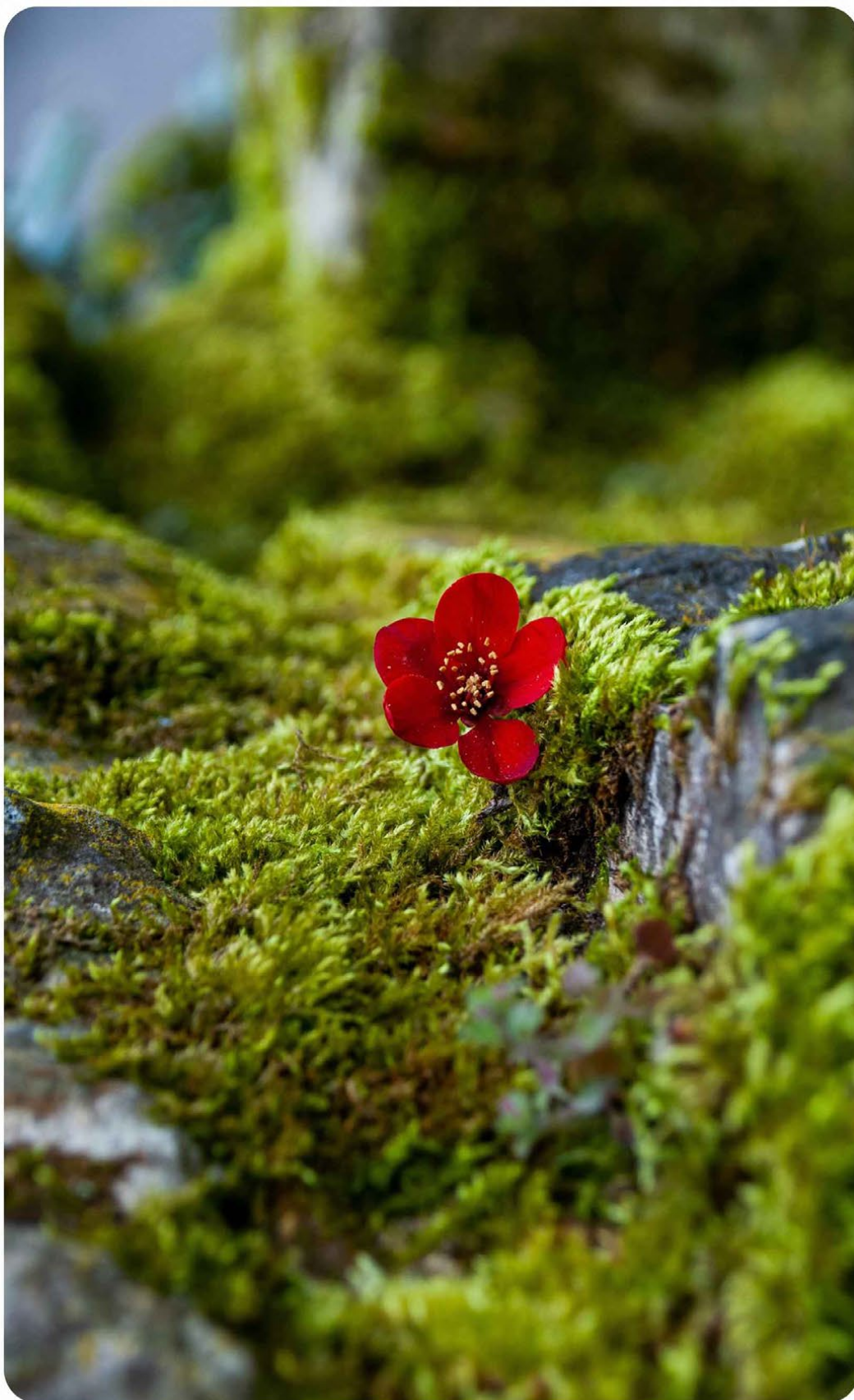
تحلیل‌های چندساله مبتنی بر داده‌های Sentinel ۱ در دشت‌های مرکزی ایران نشان داده‌اند که الگوی فرونشست عمده با افت سطح آب زیرزمینی همزمان است و نقاط داغی با نرخ‌های محلی بسیار بالا در نواحی پراشتار بهره‌برداری کشاورزی و پیرامون مراکز شهری شناسایی شده‌اند. داده‌های ماهواره‌ای امکان شناسایی سریع مناطق پرخطر و تعیین اولویت‌های حفاظتی را فراهم می‌کنند، با این حال برای تدوین



سیاست‌های مؤثر و پایدار، تلفیق این مشاهدات با اطلاعات زمینی مانند مشاهدات چاه (عمق و تغییرات سطح ایستابی، میزان برداشت)، داده‌های ژئوتکنیکی و شبکه‌های GNSS ضروری است. برای تبدیل نتایج رصد ماهواره‌ای به اقدامات مدیریتی مؤثر، راهبردی چندوجهی لازم است: ایجاد سامانه ملی پایش فرونشست مبتنی بر Sentinel-1 و شبکه GNSS، همگرایی داده‌های InSAR با پایش چاه‌ها و کیفیت آب، تعیین مناطق ممنوعه برداشت بر مبنای نقشه‌های خطر، تقویت تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و ترویج روش‌های آبیاری کم‌مصرف در کشاورزی. افزون بر این، به‌کارگیری مدل‌های یادگیری ماشین و ترکیب داده‌های چندمنبع (بارش، تبخیر، بافت خاک، الگوهای مصرف) می‌تواند پیش‌بینی مناطق مستعد فرونشست را بهبود بخشد و به برنامه ریزی بلندمدت برای مدیریت منابع آب یاری رساند. در نتیجه، سنجش از دور راداری و روش‌های InSAR با داده‌های Sentinel-1، به‌ویژه در مطالعات چندساله، ابزارهای توانمندی برای شناسایی، مانیتورینگ و پیش‌بینی فرونشست در دشت‌های مرکزی ایران فراهم می‌کنند؛ لیکن اثربخشی این فناوری‌ها در کاهش ریسک مستلزم تلفیق مشاهدات ماهواره‌ای با داده‌های زمینی و اجرای سیاست‌های مدیریت یکپارچه و بازآفرینی منابع آب زیرزمینی است تا از تبدیل فرونشست‌های موضعی به بحران‌های زیست‌محیطی و زیرساختی گسترده جلوگیری شود.











## فشردگی برگشت ناپذیر خاک و تغییر شکل زمین

مکانیسم های ژئوتکنیکی برداشت آب و  
اثرات بلندمدت برداشت بی رویه آب زیرزمینی



### زهراسبک خیز

کارشناسی ارشد مهندسی بهداشت محیط



E-mail:  
Zahrasabokkhiz.76@gmail.com

### حنانه ترک زاده ماهانی

کارشناسی مهندسی بهداشت محیط



E-mail:  
Hananeh.tzd80@gmail.com

#### مقدمه

برداشت بی رویه آب های زیرزمینی طی چند دهه اخیر به عنوان یکی از جدی ترین چالش های زیست محیطی، اقتصادی و ژئوتکنیکی در مناطق خشک و نیمه خشک مطرح شده است. آبخوان ها که زمانی منبعی پایدار و مطمئن برای تأمین آب به شمار می آمدند، به دلیل افزایش جمعیت، توسعه بی رویه اراضی کشاورزی، حفر چاه های متعدد و تغییر در الگوهای بارش تحت فشار قرار گرفته اند. کاهش مستمر سطح آب زیرزمینی نه تنها توازن چرخه ی آب را مختل می کند، بلکه پیامدهایی عمیق بر ساختار فیزیکی و مکانیکی خاک و پایداری سطح زمین دارد؛ از جمله تراکم برگشت ناپذیر خاک و تغییر شکل تدریجی زمین که در موارد حاد به فرونشست های عمیق و جبران ناپذیر منجر می شود. فشردگی خاک در اثر برداشت آب عمده تاً از طریق دو مکانیسم اصلی فشردگی الاستیک و پلاستیک رخ می دهد. در مرحله فشردگی الاستیک، کاهش حجم خاک متناسب با تغییر تنش موثر است. اما در خاک های اشباع ریزدانه، با ادامه برداشت آب، تنش موثر از آستانه تسلیم فراتر می رود و فشردگی پلاستیک آغاز می شود که برگشت ناپذیر است.

در لایه های زیرسطحی، به ویژه در خاک های رسی و سیلتی اشباع یا نیمه اشباع، تخلخل و ساختمان خاصی وجود دارد که تحمل بار را ممکن می سازد. وقتی سطح آب زیرزمینی کاهش می یابد، فشار آب منفذی افت کرده و تنش مؤثر افزایش می یابد؛ این امر موجب نزدیک شدن ذرات خاک و



کاهش فضای خالی بین آنها می‌شود. در خاک‌های ریزدانه، به‌ویژه هنگام خشک‌شدن اولیه، ساختار صفحه‌ای ذرات دگرگون شده و به دلیل چسبندگی بالا فشردگی دائمی رخ می‌دهد. برخلاف فشردگی الاستیک که با بازگشت فشار آب تا حدی قابل بازیابی است، فشردگی پلاستیک و خزش ثانویه منجر به کاهش دائمی تخلخل می‌شوند و بازیابی حجم حتی با تزریق آب یا مدیریت دقیق محدود است.

### نقش ساختار میکروسکوپی خاک در برگشت‌ناپذیری

ساختار میکروسکوپی خاک تعیین‌کننده اصلی برگشت‌ناپذیری است. در خاک‌های رسی، ذرات با نسبت سطح به حجم بالا، تحت تأثیر نیروهای بین ذره‌ای قرار دارند. مدل‌های تخلخل دوگانه نشان می‌دهند که تخلخل ماکرو (بین تجمع ذرات) سریع‌تر تخلیه می‌شود، در حالی که تخلخل میکرو (درون تجمع ذرات) کندتر و اغلب برگشت‌ناپذیر است. کاهش فشار آب منفذی منجر به فروپاشی تجمع ذرات می‌شود، که در آن ذرات رس به یکدیگر چسبیده و پیوندهای جدیدی تشکیل می‌دهند. این فرآیند با مفهوم فشار پیش‌تحکیمی مرتبط است؛ اگر تنش موثر فعلی از فشار پیش‌تحکیمی فراتر رود، فشردگی پلاستیک رخ می‌دهد و منحنی فشردگی از حالت خط فشردگی نرمال به حالت بیش‌تحکیمی تغییر می‌کند. بازیابی حجم در این حالت محدود به تورم الاستیک است که تنها بخشی از کاهش حجم را جبران می‌کند. علاوه بر این، پدیده‌های شیمیایی مانند تبادل کاتیونی می‌تواند ساختار را تغییر دهد. برای مثال، کاهش شوری آب منفذی می‌تواند نیروهای دافعه بین ذرات را کاهش دهد و فشردگی را تشدید کند. محدودیت‌های بازیابی حجم و مکانیسم‌های ژئوتکنیکی مرتبط را می‌توان به صورت زیر در جدول ۱ خلاصه کرد:

**جدول ۱: محدودیت‌های اصلی بازیابی حجم و مکانیسم‌های ژئوتکنیکی مرتبط**

| محدودیت بازیابی                                                                                                | مکانیسم اصلی                 | پیامد بر رفتار خاک          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-----------------------------|
|  کاهش نفوذپذیری           | مسدود شدن مسیرهای جریان      | کند شدن فرایند بازیابی      |
|  خزش ثانویه               | جابه‌جایی ویسکوز ذرات        | فشردگی مداوم تحت تنش ثابت   |
|  پیوندهای شیمیایی دائمی   | تشکیل پیوندهای جدید بین ذرات | تثبیت ساختار فشرده          |
|  تخریب تجمع ذرات خاک حساس | فروپاشی ساختاری              | از دست رفتن ظرفیت کامل تورم |



این محدودیت‌ها باعث می‌شوند حتی پس از توقف برداشت یا تزریق آب، بخش قابل توجهی از کاهش حجم خاک غیرقابل بازگشت باقی بماند. پیامدهای سطحی و زیرسطحی این فرآیندها گسترده و فراتر از تغییرات موضعی است. فرونشست‌های سالانه‌ی قابل توجه (در مواردی بیش از ۳۰-۲۰ سانتی‌متر و در برخی دشت‌ها تا بیش از ۲۵ سانتی‌متر در سال) علاوه بر خسارت مستقیم به زیرساخت‌ها (شامل ترک‌های عمیق، ناپایداری ساختمان‌ها، کج شدن دکل‌ها و شکست خطوط انتقال)، موجب تغییر الگوی زهکشی، افزایش نفوذ آلودگی به سفره‌های آب و مخاطرات گسترده‌ی زیست‌محیطی می‌شوند. مناطق دارای لایه‌های رسی ضخیم در زیرسطح بیشترین نرخ فرونشست را تجربه می‌کنند؛ در مقابل، آبخوان‌های ماسه‌ای نشست کمتری نشان می‌دهند که اهمیت مطالعه‌ی ویژگی‌های ژئومکانیکی هر دشت را برجسته می‌سازد. آثار برداشت بی‌رویه فراتر از مسائل ژئوتکنیکی است: تراکم خاک نفوذپذیری و تهویه را کاهش می‌دهد، تبخیر و جمع‌شدگی سطحی را افزایش می‌دهد، ریشه‌زایی گیاهان را محدود می‌سازد و در نتیجه عملکرد محصولات کشاورزی را کاهش و هزینه‌های تولید را افزایش می‌دهد. نابودی تالاب‌ها، خشک شدن قنات و چشم‌اندازهای آبی، کاهش جریان‌های زیرسطحی و از بین رفتن زیستگاه‌ها از دیگر پیامدهای زیست‌محیطی است که به افزایش گردوغبار، از بین رفتن پوشش گیاهی و تغییرات اقلیمی محلی می‌انجامد.

پایش بلندمدت و یکپارچه‌ی اثرات برداشت آب زیرزمینی برای مدیریت این بحران حیاتی است. فناوری‌های ماهواره‌ای مانند InSAR با استفاده از ماهواره‌های Sentinel-۱ و ALOS امکان ردیابی تغییر شکل سطح زمین با دقت میلی‌متری را فراهم کرده‌اند و در ترکیب با داده‌های چاه‌های مشاهده‌ای و آزمایش‌های ژئوتکنیکی تصویر دقیقی از روند افت آبخوان‌ها ارائه می‌دهند. یکی از مهم‌ترین یافته‌های حاصل از داده‌های InSAR این است که بیشترین نرخ فرونشست معمولاً در مناطقی رخ می‌دهد که لایه‌های رسی ضخیم در زیرسطح وجود دارد. رس‌ها به دلیل ساختار صفحه‌ای و رفتار وابسته به رطوبت، بیش از سایر خاک‌ها تحت تأثیر افت سطح آب قرار می‌گیرند. در این مناطق، با کاهش سطح آب، رس‌ها دچار جمع‌شدگی و فشردگی می‌شوند و این تغییرات ساختاری به نشست سطح زمین منجر می‌گردد. در مقابل، در مناطقی که خاک‌های دانه‌درشت مانند شن و ماسه حاکم است، میزان نشست کمتر است؛ زیرا این خاک‌ها از ابتدا متراکم‌تر هستند و تخلخل آنها کمتر تغییر می‌کند. این موضوع اهمیت شناخت ویژگی‌های ژئومکانیکی هر دشت را در تحلیل مخاطرات فرونشست برجسته



می‌سازد. با این حال، چالش اصلی در بسیاری از کشورها، فقدان سیستم پایش یکپارچه و برنامه‌ریزی بلندمدت است؛ بسیاری از آبخوان‌ها سال‌هاست در وضعیت بیلان منفی قرار دارند و حتی بازه‌های بارشی پرشدت قادر به جبران افت‌های چنددهه‌ای نیستند.

## راهکارهای مهار فرونشست و کاهش پیامدهای جبران‌ناپذیر فشردگی برگشت‌ناپذیر



- کنترل و محدودسازی برداشت
  - مدیریت الگوی کشت و توسعه روش‌های آبیاری کم‌مصرف
  - جلوگیری از حفر چاه‌های غیرمجاز
  - احیای مصنوعی آبخوان‌ها از طریق تزریق یا تغذیه کنترل‌شده
  - پایش مستمر سطح زمین با استفاده از ماهواره‌ها و تجهیزات زمینی
- در مجموع، فشردگی برگشت‌ناپذیر خاک ناشی از برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی یک پدیده تجمعی و غالباً پنهان است که پیامدهای بلندمدت گسترده‌ای در پایداری زمین، زیرساخت‌ها، کشاورزی و محیط‌زیست دارد؛ پیشگیری و کاهش اثرات آن مستلزم پایش مستمر، مدیریت علمی منابع آب و توسعه‌ی راهکارهای فنی-سیاستی یکپارچه است.

### نتیجه‌گیری

برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی پیامدهای زیان‌باری را در ابعاد محیط‌زیستی، اقتصادی و مهندسی به دنبال دارد؛ فرآیندی که آرام و تدریجی رخ می‌دهد اما می‌تواند منجر به فرونشست زمین، از دست رفتن ساختار طبیعی خاک و کاهش منابع آبی شود. فشردگی برگشت‌ناپذیر خاک، پدیده‌ای ژئوتکنیکی پیچیده است که ناشی از ترکیب مکانیسم‌های تنش موثر، ساختار میکروسکوپی خاک و رفتار پلاستیک-ویسکوز ماده بوده و محدودیت‌های بازیابی آن به دلیل کاهش نفوذپذیری، خزش ثانویه، تغییر پیوندهای شیمیایی و تخریب ساختاری است؛ به‌طوری‌که حتی با مدیریت دقیق، بخش قابل‌توجهی از کاهش حجم دائمی می‌ماند. پیامدهای این فرایند از کاهش ظرفیت باربری تا نیاز به مدل‌سازی رفتاری چندمقیاسی و پیش‌بینی بلندمدت گسترده را دربرمی‌گیرد و بنابراین در طراحی مهندسی و سیاست‌گذاری منابع آب ضروری است. برای جلوگیری از پیامدهای جبران‌ناپذیر در مقیاس وسیع، باید مدیریت علمی و عملی منابع آب زیرزمینی همراه با تحقیقات بیشتر بر توسعه مدل‌های پیش‌بینی و راهکارهای بازدارنده و ترمیمی دنبال شود.





## بهره‌برداری از منابع آب نامتعارف



**ندا ادهمی**

کارشناس مهندسی بهداشت محیط



E-mail:  
Adhami8174@gmail.com

آب به عنوان یکی از حیاتی‌ترین منابع برای زندگی بشر، کشاورزی، صنعت و محیط زیست، همواره کلیدی‌ترین عامل توسعه پایدار به شمار می‌رود. با این حال، با رشد جمعیت، افزایش تقاضا برای غذا، تغییرات اقلیمی، کاهش بارش‌ها و کاهش سطح منابع آب شیرین، فشار بر منابع آب افزایش یافته است. بسیاری از مناطق جهان، به ویژه مناطق خشک و نیمه خشک با بحران کم‌آبی و تنش آبی مواجه هستند. کشورهای کم‌آب به تغییر اساسی در برنامه‌ریزی و مدیریت از طریق بهره‌برداری خلاقانه از منابع آب جایگزین و نامتعارف برای تولید مواد غذایی، معیشت، اکوسیستم‌ها، سازگاری با تغییرات اقلیمی و توسعه پایدار کلی نیاز دارند. اگر می‌خواهیم از تبدیل شدن کمبود آب به یک چالش جهانی مزمن جلوگیری کنیم، نه تنها باید بهره‌وری مصرف آب را بهبود بخشیم، بلکه باید فراتر از منابع آب متعارف نیز نگاه کنیم. در این شرایط، استفاده از منابع آب نامتعارف یا Non-Conventional Water Resources به عنوان راهکاری مکمل برای تأمین آب مطرح شده است.

از بستر دریا تا جو فوقانی زمین، جهان از نعمت انواع منابع آب نامتعارف برخوردار است که می‌توان از آنها بهره‌برداری کرد. پتانسیل آنها همچنان، ناشناخته مانده است، اگرچه در سال‌های اخیر نمونه‌های پراکنده‌ای از بهره‌برداری از چنین گزینه‌های نامتعارفی برای افزایش منابع آب برای مصارف مختلف دیده شده است. زمان آن فرا رسیده است که با ادامه تحقیقات کاربردی و پیشرفت‌های فناوری، پیام‌های سیاستی مؤثر، مشارکت



بخش خصوصی و توسعه ظرفیت، از پتانسیل کامل منابع آب نامتعارف بهره ببریم. منابع آب نامتعارف به منابعی گفته می‌شود که برخلاف منابع متعارف مانند رودخانه‌ها، دریاچه‌ها یا سفره‌های آب زیرزمینی تجدیدپذیر، به عنوان گزینه‌های مکمل و جایگزین برای تأمین آب مورد استفاده قرار می‌گیرند. این منابع می‌توانند شامل آب‌های پساب تصفیه‌شده، آب باران یا رواناب سطحی، آب شور یا نیمه‌شور، آب حاصل از مه و شبنم، آب زیرزمینی کم تجدید و دیگر گزینه‌ها باشند. در یک تعریف دیگر، بهره‌برداری از این منابع زمانی مطرح می‌شود که تقاضای آب بیش از توان منابع متعارف بوده و بنابراین استفاده از منابع کمتر متداول، توجیه‌پذیر می‌گردد.

## انواع منابع آب نامتعارف



۱. آب باران و رواناب سطحی  
جمع‌آوری آب باران از پشت‌بام‌ها، خیابان‌ها، بام‌ها یا سطوح، ذخیره‌سازی و استفاده برای مصارف غیرشرب مثلاً آبیاری فضای سبز و مدیریت رواناب سطحی شهری، اکنون به عنوان منبع بالقوه مطرح است.
  ۲. پساب تصفیه‌شده  
استفاده مجدد از پساب تصفیه‌شده شهری یا صنعتی برای مصارف کشاورزی، فضای سبز، صنعت یا حتی شرب در موارد خاص و با کیفیت بالا.
  ۳. آب شور یا نیمه‌شور  
شیرین‌سازی آب دریا یا آب زیرزمینی کم‌کیفیت و در مناطق ساحلی یا جزایر که آب شیرین محدود است، تکنولوژی‌های شیرین‌سازی یا استفاده از آب زیرزمینی شور به عنوان منبع مطرح هستند.
  ۴. مه، شبنم، آب حاصل از تقطیر جوی  
در مناطق خشک و نیمه‌خشک با رطوبت شبانه مناسب، امکان جمع‌آوری آب از شبنم یا مه وجود دارد. مثلاً استفاده از توری‌های مه‌گیر یا سطوح سرد که شبنم را جمع می‌کنند.
  ۵. آب‌های زیرزمینی کم‌تجدید یا عمیق  
برخی از سفره‌های آب زیرزمینی که تجدیدپذیری کمی دارند یا در عمق بسیار زیاد هستند، در بسیاری از کشورها کم‌تر متعارف محسوب می‌شوند. اما باید توجه داشت که استفاده از آن‌ها همراه با مخاطرات کاهش ذخیره و افت سطح آب است.
- مطالعه‌ای جدید در چین نشان داده است که اهمیت این منابع در شرایط کم‌آبی شدید روشن شده است. دشت شمال چین پایگاه مهم تولید غلات، پنبه و میوه در چین است. با این حال، آب و هوای آن خشک و بدون باران



است و بنابراین، منابع آب کمیاب هستند. ترکیب منابع آب، جمعیت و زمین های کشت شده بسیار نامتوازن است و این منطقه را به منطقه ای با کمبود جدی آب در چین تبدیل کرده است. علاوه بر بهره برداری بیش از حد از آب های زیرزمینی در درازمدت، کمبود آب به یک گلوگاه مهم تبدیل شده است که توسعه اقتصادی و اجتماعی دشت شمال چین و امنیت غذایی ملی را محدود می کند. بنابراین، استفاده کامل از منابع آب نامتعارف و کاهش نسبت منابع آب متعارف، کمبود منابع آب را کاهش داده و بهره برداری از منابع آب را بهبود می بخشد. کشور ایران نیز از نظر جغرافیایی بخش عمده ای از آن در مناطق خشک و نیمه خشک قرار دارد و با تنش آبی روبه روست. بنابراین بهره گیری از منابع آب نامتعارف می تواند فرصت بزرگی باشد. استفاده از بارش های متناوب، رواناب های شهری/روستایی، پساب شهری و صنعتی، شیرین سازی آب شور (به ویژه در مناطق ساحلی جنوب) و شبکه های جمع آوری مه/شبلم می تواند مورد توجه قرار گیرد.

- استفاده از منابع آب نامتعارف می تواند دارای مزایای زیر باشد:
- کاهش فشار بر منابع آب متعارف: با استفاده از پساب یا آب باران، بخشی از نیازها (به ویژه مصارف غیرشرب) از منابع متعارف کم می شود، که از منظر پایداری اهمیت دارد.
  - افزایش انعطاف پذیری آبرسانی: در شرایط تغییر اقلیم، نوسانات بارش و خشکسالی، برخورداری از منابع جایگزین کمک می کند تا زنجیره تأمین آب مقاوم تر شود.
  - کاهش هزینه های وابستگی به منابع دور یا انتقال آب: اگر آب محلی مانند باران یا پساب استفاده شود، نیاز به انتقال طولانی یا پمپاژ زیاد ممکن است کاهش یابد.
  - بهبود بازیافت مواد مغذی: در استفاده از پساب برای کشاورزی، امکان استفاده دوباره از نیتروژن و فسفر وجود دارد و لذا از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی مزایا دارد.
  - کاهش آلاینده های فاضلاب: با استفاده مجدد از پساب، بخشی از بار آلودگی خروجی به محیط کاهش می یابد و این بهبود کیفیت محیط زیست را به همراه دارد.
  - توسعه پایدار شهری و کاهش ابتکارات زیرساختی بزرگ: شهرها می توانند با پروژه های کوچک تر و محلی تر جمع آوری آب باران یا پساب، بخشی از نیاز خود را تأمین کنند.





هم‌زمان با فرصت‌ها، بهره‌برداری از منابع آب نامتعارف با چالش‌ها و مخاطراتی نیز همراه است. کیفیت آب و سلامت عمومی، استفاده از پساب، آب باران یا آب زیرزمینی کم‌تر تجدیدپذیر ممکن است شامل آلاینده‌های میکروبی، ترکیبات شیمیایی، نیتрат، فلزات سنگین یا دیگر عوامل باشد. شیرین‌سازی آب شور یا تصفیه کامل پساب نیازمند مصرف انرژی بالا و هزینه سرمایه‌ای بالاست. برخی منابع مانند سفره‌های زیرزمینی عمیق یا آب شور دارای نرخ تجدیدپذیری کم هستند؛ استفاده بی‌رویه از آن‌ها می‌تواند باعث افت سطح آب، کاهش فشار آب، فرونشست زمین یا تخریب اکوسیستم شود. برای بهره‌برداری موفق لازم است قوانین، مقررات، استاندارد کیفیت، نرخ‌های تعرفه مناسب، پایش و کنترل وجود داشته باشد. از آب پساب یا منابع نامتعارف ممکن است با مقاومت فرهنگی مواجه شود؛ مردم ممکن است نگرانی‌هایی درباره سلامت یا کیفیت آب داشته باشند. در برخی مناطق، اولویت‌ها همچنان با آب شرب و منابع متعارف است و ممکن است منابع نامتعارف به عنوان گزینه درجه دوم دیده شود، که به کندی توسعه می‌یابد. تأثیرات محیط‌زیستی جانبی، مثلاً شیرین‌سازی آب دریایی ممکن است با تخلیه پساب شور یا افزایش مصرف انرژی همراه باشد که می‌تواند اثرات منفی بر محیط‌زیست داشته باشد.

چالش کمبود آب در مناطق خشک و نیمه‌خشک همچنان رو به افزایش و تشدید است. برای مواجهه با این چالش، نیاز به ایجاد مجموعه‌ای متنوع از استراتژی‌های مدیریت آب وجود دارد. با توجه به اینکه منابع آب نامتعارف به عنوان موضوع مشترک مطرح هستند، استراتژی‌های زیرپتانسیل کمک به رفع کمبود آب جهانی را دارند:

- ۱- ترویج تحقیقات و اقدامات بیشتر در مورد جنبه‌های فنی و غیرفنی منابع آب نامتعارف
  - ۲- اطمینان از اینکه آب‌های نامتعارف برای محیط زیست سودمند هستند، نه هزینه‌بر
  - ۳- قرار دادن آب‌های نامتعارف به عنوان منبع قابل اعتماد آب در مواقع عدم قطعیت
  - ۴- حمایت از رویکردهای مکمل و چندبعدی مانند پرداختن به کمبود آب و تغییرات اقلیمی به طور هم‌زمان، زیرا بیشتر تأثیرات تغییرات اقلیمی از طریق مسائل مربوط به آب بیان می‌شوند.
- بنابراین بهره‌برداری از منابع آب نامتعارف، گزینه‌ای ارزشمند برای مناطقی



نظیر ایران است که با تنش آبی روبه‌رو هستند. این منابع می‌توانند فشار بر منابع آب متعارف را کاهش دهند، انعطاف‌پذیری سیستم تأمین آب را افزایش دهند و گام مهمی به سوی توسعه پایدار و مقابله با تغییرات اقلیمی باشند. با این حال، موفقیت این رویکرد نیازمند چارچوب مدیریتی مناسب، سرمایه‌گذاری صحیح، فناوری‌های متناسب، ارزیابی اقتصادی دقیق، و پذیرش اجتماعی است.





# تأثیر جهانی بهره‌برداری بیش از حد آب زیرزمینی بر فرونشست زمین



## سبحان قنبری

دانشجوی دکتری مهندسی بهداشت محیط،

دانشگاه علوم پزشکی اصفهان



E-mail:

Sobhanghanbari1376@gmail.com

## فرونشست زمین، میراث پنهان تخلیه سفره‌های زیرزمینی



فرونشست زمین نه تنها یک مسئله محلی، بلکه یک پدیده جهانی است که در بیش از ۱۰۰ کشور مشاهده شده و بیش از ۱/۲ میلیارد نفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد. این پدیده در مناطق خشک و نیمه خشک، شهرهای بزرگ و دشت‌های کشاورزی شدیداً مشهود است. در این بخش، با تمرکز بر مکانیسم‌های فیزیکی، هیدرولوژیکی و ژئومکانیکی، به بررسی جامع تأثیرات جهانی بهره‌برداری بیش از حد آب زیرزمینی بر فرونشست زمین پرداخته می‌شود. هدف، ارائه دیدگاهی علمی، چندبعدی و مبتنی بر داده‌های معتبر است که تمامی جوانب هیدرولوژیکی، ژئوتکنیکی، زیست محیطی، اقتصادی و اجتماعی را پوشش دهد. سفره‌های آب زیرزمینی به دو دسته محدود و آزاد تقسیم می‌شوند. در سفره‌های آزاد، سطح آب با سطح فشار اتمسفری در تعادل است؛ در حالی که در سفره‌های محدود، لایه‌های نفوذناپذیر آب را تحت فشار قرار می‌دهند. بهره‌برداری بیش از حد عمدتاً در سفره‌های محدود رخ می‌دهد، زیرا کاهش فشار در این سیستم‌ها مستقیماً به فشردگی لایه‌های رسی منجر می‌شود. تغذیه طبیعی سفره‌ها از طریق نفوذ بارش، نشت رودخانه‌ها و آبیاری کشاورزی انجام می‌شود. اما در بسیاری از مناطق، برداشت سالانه چندین برابر تغذیه است. برای مثال، در دشت‌های مرکزی ایران، نرخ برداشت تا ۱۰ برابر نرخ تغذیه گزارش شده است. این عدم تعادل، Storage Depletion نامیده می‌شود.



## تأثیرات چندبعدی فرونشست



۱. تأثیرات ژئوتکنیکی  
از نظر ژئوتکنیکی، کاهش ظرفیت باربری خاک، ایجاد ترک‌های کششی و تغییر شیب زمین، پایداری سازه‌ها را به خطر می‌اندازد و هزینه‌های تعمیر زیرساخت‌ها را به شدت افزایش می‌دهد.
۲. تأثیرات هیدرولوژیکی  
از منظر هیدرولوژیکی، فرونشست حجم ذخیره سفره را تا ۳۰ درصد کاهش می‌دهد، عمق چاه‌ها را افزایش می‌دهد و هزینه پمپاژ را بالا می‌برد. ایجاد قیف فرونشست، جریان زیرزمینی را تغییر می‌دهد و در مناطق ساحلی، نفوذ آب شور را تسهیل می‌کند.
۳. تأثیرات زیست‌محیطی  
خشک شدن تالاب‌ها مانند تالاب گاوخونی در ایران، کاهش تنوع زیستی و تخریب اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی، تنها بخشی از این پیامدها هستند.
۴. تأثیرات اقتصادی  
از نظر اقتصادی، علاوه بر هزینه‌های مستقیم تعمیر، کاهش عملکرد محصولات کشاورزی به دلیل تغییر سطح زمین و اختلال در سیستم‌های زهکشی، امنیت غذایی را تهدید می‌کند.
۵. تأثیرات اجتماعی  
تأثیرات اجتماعی نیز قابل توجه است؛ جابه‌جایی اجباری جمعیت، افزایش نابرابری در دسترسی به آب و تشدید تنش‌های اجتماعی در مناطق روستایی، نشان‌دهنده بعد انسانی این بحران است. فرونشست، به عنوان یک تهدید خاموش، تمامی ارکان توسعه پایدار را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

| پیامد                                                                                                         | مثال                                                |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|
| <br>آسیب به زیرساخت      | ترکیدگی لوله‌ها، کج شدن پل‌ها،<br>ترک در ساختمان‌ها |
| <br>کاهش ظرفیت چاه‌ها    | نشست سر چاه و کاهش عمق موثر                         |
| <br>تغییر هیدرولوژی سطحی | معکوس شدن شیب رودخانه‌ها،<br>کاهش ظرفیت کانال‌ها    |
| <br>افزایش هزینه پمپاژ   | نیاز به پمپ‌های قوی‌تر جهت<br>کنترل افت سطح آب      |



## راهکارهای علمی و عملی کاهش فرونشست



۱. تزریق مصنوعی: تزریق آب سطحی، تصفیه شده یا بازیافتی به سفره، فشار آب منفذی را افزایش می دهد و تنش مؤثر بر اسکلت خاک را کاهش می دهد. این فرآیند، به ویژه در فاز الاستیک، می تواند تغییر شکل های قبلی را تا حد زیادی بازگرداند و از ورود به فاز غیرالاستیک جلوگیری کند. در لایه های رسی، تزریق باعث تورم موقت می شود و در نتیجه کاهش سرعت فشردگی می شود.

۲. مدیریت تقاضا: کاهش نرخ پمپاژ، افت هد هیدرولیکی را محدود می کند و از عبور فشار از آستانه تنش جلوگیری می کند. این راهکار، پیشگیری است و از فعال شدن فشردگی غیرالاستیک جلوگیری می کند.

۳. جایگزینی منابع آب زیرزمینی با منابع سطحی یا غیرمتعارف: کاهش وابستگی به آب زیرزمینی، فشار بر سفره را کم می کند و امکان بازیابی طبیعی را فراهم می آورد. این راهکار، فشار تقاضا را از سفره حذف می کند و به لایه های رسی فرصت تثبیت می دهد. منابع جایگزین:

- آب های سطحی (رودخانه، سد): انتقال بین حوضه ای

- آب بازیافتی: تصفیه فاضلاب شهری برای کشاورزی

- نمک زدایی: در مناطق ساحلی

- جمع آوری آب باران: در مقیاس محلی

۴. پایش هوشمند و مدل سازی پیش بینی کننده: پایش مداوم افت فشار، نرخ فرونشست و رفتار لایه ها، امکان مداخله زودهنگام را فراهم می کند. داده های واقعی، ورودی مدل های عددی می شوند و سناریوهای مدیریتی را شبیه سازی می کنند.

۵. مهندسی ژئوتکنیکی و اصلاح رفتار لایه ها: در مواردی که فرونشست فعال است، می توان با تثبیت مصنوعی لایه های رسی، فشردگی را کاهش داد. این روش، تنش مؤثر را از طریق افزایش مقاومت اسکلت خاک کاهش می دهد.

۶. اصلاح الگوی مصرف و مدیریت کشاورزی هوشمند: کشاورزی ۷۰ درصد مصرف آب زیرزمینی را تشکیل می دهد. کاهش تبخیر، افزایش کارایی آبیاری و تغییر الگوی کشت، تقاضای آب را کاهش می دهد و فشار بر سفره را کم می کند.

### نتیجه گیری

بهره برداری بیش از حد آب زیرزمینی، از طریق مکانیسم های پیچیده هیدرومکانیکی، منجر به فرونشست زمین در مقیاس جهانی شده است.



این پدیده، که عمدتاً غیرقابل بازگشت است، پیامدهای گسترده‌ای در حوزه های ژئوتکنیکی، هیدرولوژیکی، زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی دارد. هیچ راهکار واحدی برای مقابله با فرونشست ناشی از بهره‌برداری بیش از حد آب زیرزمینی کافی نیست؛ بنابراین، رویکرد یکپارچه ضروری است که شامل پایش مداوم با فناوری‌های پیشرفته، تزریق هدمند آب در مناطق بحرانی، کاهش برداشت از طریق قوانین سخت‌گیرانه و قیمت‌گذاری پلکانی، جایگزینی تدریجی منابع زیرزمینی با منابع سطحی یا غیرمتعارف در بلندمدت، و آموزش عمومی و مشارکت اجتماعی می‌شود. این رویکرد چندجانبه، فرونشست را از حالت فعال به حالت پایدار تبدیل کرده و با بازیابی نسبی فشار منفذی، فشردگی تأخیری را کاهش می‌دهد. بدون اقدام فوری، فرونشست زمین نه تنها زیرساخت‌ها را نابود می‌کند، بلکه امنیت آبی، غذایی و سکونت‌گاه‌ها را تهدید خواهد کرد. تحقیقات آینده باید بر توسعه مدل‌های پیش‌بینی دقیق‌تر، ارزیابی ریسک ترکیبی (با زلزله و سیل) و سیاست‌گذاری مبتنی بر داده تمرکز کند.





# تجربه‌های جهانی در کنترل فرونشست زمین و چارچوب سیاستی مدیریت منابع آب



## رضا جمشیدی

دانشجوی دکتری مهندسی بهداشت محیط

دانشگاه علوم پزشکی اصفهان  
E-mail: Jamshidi75reza@gmail.com



## فائزة اسلامی

دانشجوی کارشناسی مهندسی بهداشت محیط

E-mail: F.eslami1754@gmail.com



## زهرا رضایت بخش

دانشجوی کارشناسی مهندسی بهداشت محیط

E-mail: Zahrarezaei1754@gmail.com

## مقدمه

فرونشست زمین، پیامدی گسترده و پیچیده از برداشت بی‌رویه منابع زیرزمینی و تغییرات محیطی است که پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی قابل توجهی بر زیرساخت‌ها، کشاورزی و امنیت آب کشورها دارد. اهمیت بهره‌گیری از تجربیات جهانی در کنترل این پدیده از چند جهت برجسته است: نخست، تنوع شرایط هیدرولوژیک، زمین‌شناسی و اجتماعی-اقتصادی در کشورهای مختلف، مجموعه‌ای از ابزارها و راهکارهای عملی را فراهم می‌آورد که می‌توانند متناسب با شرایط محلی تطبیق داده شوند؛ دوم، فناوری‌های نوین پایش، از جمله سنجش از دور و InSAR، تجربیات موفق را در شناسایی الگوهای فرونشست و پایش بلندمدت فراهم کرده‌اند که امکان تصمیم‌گیری مبتنی بر شواهد را تقویت می‌کند؛ و سوم، سازوکارهای نهادی و سیاست‌گذاری اقتصادی مانند تعیین مناطق بحرانی، ثبت و کنترل چاه‌ها، تعرفه‌گذاری آب و برنامه‌های ترویجی در مدیریت تقاضا، از طریق آزمون و خطای بین‌المللی، راه‌های مؤثری برای کاهش فشار بر آبخوان‌ها نشان داده‌اند. چارچوب سیاستی مدیریت منابع آب برای پیشگیری از فرونشست باید جامع، چندوجهی و تطبیق‌پذیر باشد. این چارچوب شامل ارکان کلیدی زیر است: پایش و اطلاع‌رسانی مستمر برای رصد وضعیت آبخوان‌ها و فرونشست؛ برنامه‌ریزی فضایی و تعیین مناطق حساس برای اعمال محدودیت‌های بهره‌برداری؛ توسعه منابع آب سطحی و بازچرخانی به عنوان جایگزین برای کاهش برداشت از سفره‌ها؛ ابزارهای



اقتصادی و حقوقی برای ایجاد انگیزه در کاهش مصرف و جلوگیری از برداشت غیرمجاز؛ و تقویت ظرفیت نهادی و مشارکت ذی‌نفعان محلی برای تضمین اجرای سیاست‌ها. ادغام تجارب بین‌المللی با داده‌ها و اولویت‌های ملی، می‌تواند راه‌حل‌های مقرون‌به‌صرفه و پایدار فراهم آورد و ریسک‌پذیری سیستم‌های آبی در برابر تغییرات اقلیمی و فشارهای انسانی را کاهش دهد. در ادامه تجربیات کشورهای مختلف در کنترل فرونشست زمین و چارچوب سیاستی مدیریت منابع آب ارائه شده است.

## ایران

در ایران، پیشگیری و کنترل فرونشست زمین طی دهه‌های اخیر به صورت مجموعه‌ای از اقدامات فنی، مدیریتی، قانونی و پژوهشی پیگیری شده است که مبتنی بر شناخت علل ساختاری (برداشت بی‌رویه آب زیرزمینی، کاهش تغذیه طبیعی، تغییرات کاربری زمین و بارگذاری سطحی) و تطبیق سیاست‌ها با ظرفیت‌های محلی طراحی گردیده‌اند. در بعد فنی، پروژه‌های تغذیه مصنوعی و مدیریت شده سفره‌های آب زیرزمینی در برخی دشت‌ها اجرا یا مورد مطالعه قرار گرفته‌اند که شامل تزریق یا نفوذ هدایت شده آب سطحی پس از تصفیه، ایجاد مخازن ذخیره و استفاده از آب‌های بازچرخانی برای افزایش تجدیدپذیری منابع زیرسطحی است؛ همچنین ساخت سازه‌های کنترل سطح آب (چاه‌های پیکربندی مجدد، سدهای زیرسطحی و پخش سیلاب) و حفاظت از نواحی نفوذپذیر طبیعی جهت بهبود نفوذ بارش‌ها از دیگر اقدامات مهندسی به‌شمار می‌آیند. در حوزه مدیریت منابع، طرح‌های منطقه‌ای و حوضه‌ای برای تعیین تراز بهره‌برداری مجاز، ثبت و پایش چاه‌ها، و مدیریت یکپارچه عرضه و تقاضا توسعه یافته‌اند. به‌منظور کاهش فشار مصرف، سیاست‌های تعدیل تقاضا شامل ارتقای بهره‌وری آب در بخش کشاورزی (آبیاری تحت فشار، کشت‌های کم‌مصرف آب، اصلاح الگوی کشت)، اجرای تعرفه‌های آب تفکیکی و برنامه‌های صرفه‌جویی شهری و صنعتی پیگیری شده‌اند؛ در برخی مناطق پروژه‌های بازچرخانی فاضلاب شهری و استفاده از آب‌پساب‌های تصفیه‌شده در کشاورزی و صنعت به‌عنوان جایگزینی برای آب زیرزمینی اجرا شده‌اند. در بعد نهادی و قانونی، قوانینی برای ثبت چاه‌ها، صدور مجوز بهره‌برداری و کنترل حفاری غیرمجاز وجود دارد و نهادهای مسئول (وزارت نیرو، سازمان‌های آب استانی، مؤسسات پژوهشی) تلاش کرده‌اند نقش هماهنگ‌کننده‌ای در تدوین سیاست‌ها و نظارت بر اجرای آنها ایفا کنند؛ با این حال ضعف در اجرای مقررات، پراکندگی وظایف بین دستگاه‌ها و ناکافی بودن سازوکارهای تنبیهی از چالش‌های مهم تلقی می‌شود. از منظر اقتصادی، ابزارهایی چون تعرفه‌گذاری پلکانی،



مشوق‌های مالی برای اجرای فناوری‌های صرفه‌جویانه و برنامه‌های تأمین مالی پروژه‌های تغذیه مصنوعی به تدریج وارد سیاست‌گذاری شده‌اند، هرچند پوشش و اثرگذاری آنها هنوز ناهمگن است. پژوهش و ظرفیت‌سازی نیز بخش مهمی از پاسخ ایران بوده است؛ مطالعات سنجش از دور و مدل‌سازی هیدروژئولوژیک در دشت‌هایی چون اصفهان، تهران، کرمان و دشت‌های جنوبی کشور انجام شده که به شناسایی مناطق بحرانی فرونشست و اولویت‌بندی مداخلات کمک کرده‌اند. در مجموع، تجربه ایران نشان می‌دهد که موفقیت در پیشگیری و کنترل فرونشست مستلزم طراحی بسته‌های سیاستی ترکیبی است که مدیریت تقاضا، تأمین جایگزین آب (سطحی و بازچرخانی)، ظرفیت‌سازی نهادی، پایش مستمر و ابزارهای اقتصادی را هم‌زمان به کار گیرد؛ افزون بر این، تقویت هماهنگی بین‌بخشی، بهبود اجرای مقررات، تخصیص منابع مالی پایدار برای پروژه‌های تغذیه و نوسازی زیرساخت‌های آبی و مشارکت موثر جوامع محلی برای نگهداری اقدامات نفوذی و صرفه‌جویی آب از شروط لازم برای دستیابی به مدیریت پایدار آبخوان‌ها و کاهش فرونشست در ایران است.

### تایلند

بانکوک، شهر دلتایی، در کنترل فرونشست زمین پیشرفت قابل توجهی داشته اما هنوز نیازمند اقدامات تکمیلی است. این شهر بیش از پنج دهه با مسئله فرونشست مواجه بوده و بر روی دشت «دلتای جوان» قرار دارد که از رسوبات اواسط دوران سوم تا کواترنر تشکیل شده است. حوضه آب زیرزمینی چائوفریا شامل هشت سفره آب است که گرچه به صورت جداگانه در نظر گرفته شده‌اند، به دلیل تداوم ناقص لایه‌های رسی، ارتباطات هیدرولیکی قابل توجهی میان آنها وجود دارد؛ از همین رو برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی به سهولت باعث فرونشست می‌شود. پیامدهای برداشت بیش از حد شامل افت فشار سفره‌ها، افزایش هزینه‌های پمپاژ و شور شدن آب به دلیل نفوذ آب دریا است.

در پاسخ به بحران، بین سال‌های ۱۹۷۸ تا ۱۹۸۱ و بنا به درخواست هیأت ملی محیط زیست و شورای تحقیقات ملی، اولین مطالعه جامع درباره فرونشست در بانکوک انجام شد. بر اساس نتایج، سه پروژه اصلی زیر پیشنهاد شد:

- مطالعه منابع و سفره‌های آب زیرزمینی
  - بررسی استخراج آب‌های زیرزمینی و فرونشست ناشی از آن
  - اجرای یک ترازیبی سراسری در شهر
- این پروژه‌ها با هزینه‌ای حدود ۱/۵ میلیون دلار توسط اداره منابع آب



زیرزمینی و اداره نقشه برداری سلطنتی تایلد اجرا شدند. پس از انتشار گزارش ها، از اوایل دهه ۱۹۸۰ تا اوایل دهه ۲۰۰۰ سیاست های متعددی به کار گرفته شد که مهم ترین آنها عبارت اند از: تعیین مناطق بحرانی آب های زیرزمینی برای تسهیل اجرای سیاست ها، توسعه شبکه توزیع آب لوله کشی با اتکا بر منابع سطحی، کنترل چاه ها شامل ثبت و جلوگیری از چاه های غیرقانونی و ممنوعیت استفاده از آب زیرزمینی در مناطقی که آب سطحی در دسترس است، مکانیزم قیمت گذاری برداشت آب زیرزمینی: تعرفه اولیه در ۱۹۸۵ معادل ۰/۰۳ دلار بر مترمکعب بود که به تدریج در ۱۹۹۴ به ۰/۰۹ دلار و در ۲۰۰۳ به ۰/۲۱ دلار افزایش یافت؛ در ۲۰۰۶ هزینه های حفاظتی اضافی برای کاربران مناطق بحرانی نیز اعمال شد و پایش و نظارت مستمر با استفاده از ترازیبی های دوره ای و نصب ایستگاه های اندازه گیری جهت رهگیری میزان بهره برداری و فرونشست.

تجربه تایلد در بانکوک نشان می دهد که ترکیب مطالعات علمی، تعیین مناطق بحرانی، توسعه جایگزین های آبی سطحی، وضع مقررات و قیمت گذاری و نظارت مستمر می تواند روند فرونشست را کند کرده یا کنترل کند؛ با این حال، استمرار پایش، مدیریت یکپارچه منابع آب و سازگاری سیاست ها با تغییرات اقلیمی برای تکمیل این موفقیت ها ضروری است.

### چین

در چین، به ویژه در شهرهای ساحلی مانند شانگهای و پکن، راهکارهای پیشگیری و کنترل فرونشست زمین مبتنی بر رویکردی یکپارچه و چندوجهی طراحی و اجرا شده اند؛ این راهکارها شامل کاهش برداشت از آبخوان ها از طریق جایگزینی آب زیرزمینی با منابع سطحی (پروژه های انتقال و آبرسانی شهری)، اجرای تغذیه مصنوعی سفره ها و پروژه های تغذیه مدیریت شده، تعطیلی یا محدودسازی چاه های عمیق و انتقال صنایع پرمصرف به حومه، ایجاد شبکه های پایش ترازیبی و سنجش از دور برای ردیابی تغییرات نشست و سطح ایستابی، و تنظیم مقررات شهری برای کاهش بارگذاری و افزایش فضاها و نفوذپذیر شهری (کمربندهای سبز، معابر نفوذپذیر و گودال های نفوذ) است؛ علاوه بر این، ابزارهای سیاستی نظیر وضع ضوابط استخراج، مشوق های اقتصادی و برنامه ریزی زمانی اجرای سیاست ها، و تقویت ظرفیت نهادی و مشارکت عمومی در مدیریت تقاضا و نگهداری زیرساخت ها، در تثبیت نتایج مؤثر بوده اند.

شانگهای، شهر ساحلی چین، نمونه ای از تأثیرات برداشت بی رویه آب زیرزمینی و مدیریت شهری بر فرونشست زمین است و تجربه های آن برای سیاست گذاری و مدیریت پایدار منابع آب قابل استفاده اند. اولین مورد



ثبت شده فرونشست در شانگهای به سال ۱۹۲۱ بازمی‌گردد و دولت از دهه ۱۹۶۰ اقدام به اجرای پروژه‌های کنترلی کرد. هنگامی که میزان فرونشست به حدود ۱/۶۹ متر رسید، مقرراتی برای محدود کردن استفاده از چاه‌های عمیق وضع شد. در سال ۱۹۶۶ سیاست «تغذیه زمستانی و برداشت تابستانی» اجرا شد که شامل تغذیه مصنوعی سفره‌ها از منابع سطحی بود؛ این اقدام همراه با انتقال صنایع به حومه و تعطیلی چاه‌های عمیق شهری تا پایان دهه ۱۹۶۰ روند فرونشست را مهار کرد. برای پایش و مدیریت بهتر، شبکه‌ای از نقاط ترازیابی در سراسر منطقه شهری نصب شد و پایش مستمر فرونشست آغاز گردید. در پاسخ به اثرات سازه‌ای بر فرونشست (از جمله بارگذاری ناشی از آسمان‌خراش‌ها) در سال ۲۰۰۳ برنامه‌ای برای افزایش کمربندهای سبز، کاهش تراکم ساختمانی و حفظ فضاها برای بازسازی شهری پیشنهاد شد. آخرین طرح جامع مدیریت فرونشست از سال ۲۰۱۳ به مدت شش سال اجرا شد و موفق شد نرخ فرونشست را تا حدود ۵ میلی‌متر در سال کاهش دهد. تجربه شانگهای نشان می‌دهد که ترکیب سیاست‌های فنی (تغذیه مصنوعی، پایش دقیق)، مدیریتی (انتقال صنایع، کنترل چاه‌ها)، فضایی (کنترل تراکم ساخت‌وساز، توسعه فضاها سبز) و اتخاذ جایگزین‌های آبی می‌تواند فرونشست را به‌طور مؤثری کاهش دهد. این رویکرد چندوجهی الگویی قابل اقتباس برای کشورهای است که به دنبال چارچوب سیاستی مدیریت پایدار منابع آب برای پیشگیری از فرونشست زمین هستند.

تجربه چین نشان می‌دهد که ترکیب فناوری‌های مهندسی هیدرولوژیک، پایش علمی مستمر و سازوکارهای قانونی و مدیریتی برای بازسازی آبخوان‌ها و کاهش فرونشست ضروری و مؤثر است و همچنین ترکیب تأمین آب جایگزین، کاهش فشار بر آبخوان‌ها و اقدامات نظارتی می‌تواند اثرگذاری سیاست‌های مدیریت منابع آب را افزایش دهد و الگوی مفیدی برای کشورهای درگیر فرونشست ارائه کند.

## کالیفرنیا

دره سن‌خوآکین (San Joaquin Valley)، یکی از بزرگ‌ترین مناطق کشاورزی جهان، نمونه‌ای کلیدی برای «سیاست‌گذاری و مدیریت پایدار منابع آب برای پیشگیری از فرونشست زمین» است. برداشت گسترده و طولانی‌مدت آب‌های زیرزمینی از دهه ۱۹۲۰ باعث کاهش ذخیره آبخوان‌ها، تراکم رسوبات و فرونشست شدید (تا حدود ۹ متر در برخی نقاط) شد. برای مقابله، از دهه ۱۹۵۰ واردات و توزیع آب سطحی از کانال دلتا-مندوتا و از دهه ۱۹۷۰ از قنات‌های کالیفرنیا توسعه یافت که با کاهش پمپاژ، تا پایان دهه ۱۹۶۰ و اوایل ۱۹۷۰



فرونشست را به طور قابل توجهی کاهش داد. با این حال خشکسالی های طولانی (مثلاً ۱۹۷۶-۱۹۷۷، ۱۹۸۷-۱۹۹۲ و دوره های پس از ۲۰۰۷ و از ۲۰۱۲ به بعد) باعث افزایش مجدد پمپاژ و بروز نوسانات در سطح آبخوان و فرونشست شد. ارزیابی های گسترده توسط سازمان زمین شناسی آمریکا و توسعه مدل های هیدرولوژیک یکپارچه بود تا وضعیت کنونی آبخوان ها و تغییرات تاریخی آنها را شناسایی کنند؛ رفتار سیستم در برابر تنش های انسانی و تغییر اقلیم را پیش بینی کنند؛ تعامل میان عرضه و تقاضا، جریان سطحی و زیرسطحی و فرونشست را شبیه سازی نمایند. آمارها نشان می دهد از آغاز خشکسالی اخیر (از ۲۰۱۲) تا ۷۰٪ مصارف منطقه از آب زیرزمینی تأمین شده و ذخیره آبخوان ها از ۱۹۶۲ تاکنون با میانگین تقریباً ۱/۸۵ میلیارد مترمکعب در سال کاهش یافته است (در خشکسالی ها نرخ کاهش دو برابر می شود). برای مقابله حقوقی و نهادی، «قانون مدیریت پایدار آب های زیرزمینی کالیفرنیا» سازمان های محلی را موظف کرده طرح های مدیریت حوضه ای تدوین و در بازه ۲۰ ساله اجرا کنند تا پایداری آبخوان ها محقق شود. این قانون کاهش مزمن سطح آب، نفوذ آب شور، کاهش کیفیت آب، فرونشست مؤثر بر کاربری زمین و کاهش جریان های سطحی را به عنوان پیامدهای نامطلوب هدف گذاری کرده است. اقدامات فنی در حال گسترش شامل پروژه های تغذیه مدیریت شده آبخوان است؛ به عنوان مثال، جمع آوری آب سطحی و تزریق یا نفوذ کنترل شده در مناطقی مانند شهرستان های فرنو و کرن برای بازیابی ذخایر زیرزمینی است.

تجربه دره سن خواکین نشان می دهد که ترکیب تأمین جایگزین آب سطحی، مدل سازی و پایش یکپارچه، سازوکارهای قانونی الزام آور و پروژه های تغذیه مصنوعی، محورهای ضروری هر چارچوب سیاستی برای پیشگیری از فرونشست زمین و تضمین مدیریت پایدار منابع آب است.

### ژاپن

توکیو در ژاپن، با دشت نفوذپذیر شرقی و بخش تپه ای غربی، به دلیل ذخایر قابل توجه آب زیرزمینی و مصرف گسترده صنعتی و شهری، تجربه آموزنده ای برای "سیاست گذاری و مدیریت پایدار منابع آب برای پیشگیری از فرونشست زمین" ارائه می دهد. اولین موارد فرونشست در توکیو از سال ۱۹۱۰ ثبت شد و با تشدید پمپاژ در دهه های میانی قرن بیستم سطح آبخوان ها به طور چشمگیری افت کرد؛ در سال ۱۹۶۵ سطح آب زیرزمینی تا ۵۸ متر زیر سطح دریا کاهش یافت و نرخ فرونشست به حدود ۲۴ سانتی متر در سال رسید. در پاسخ، شهرداری توکیو از سال ۱۹۶۸ مقررات کنترلی وضع کرد که منجر به کاهش قابل توجه فرونشست شد؛ تا اوایل دهه ۱۹۷۰ سطح آب



زیرزمینی به ۱۰-۶ متر زیر سطح دریا بازگشت. تجربه توکیو نشان می‌دهد کنترل پمپاژ همراه با سیاست‌های جامع می‌تواند فشار بر آبخوان‌ها را کاهش دهد، اما نقش تغذیه مصنوعی و نفوذ آب باران نیز حیاتی است. در شهرهای بزرگ، آسفالت و ساخت‌وساز مانع نفوذ باران به زمین می‌شود و بخش عمده روان‌آب‌ها به رودخانه‌ها و شبکه فاضلاب هدایت می‌شوند؛ کاهش نفوذ باران توان تجدید آبخوان‌ها را محدود و ریسک فرونشست را افزایش می‌دهد. بر این پایه، مقررات توکیو مطابق ماده ۱۴۱ قانون حفاظت از محیط زیست مؤکداً نصب سازه‌های نفوذی (مانند گودال‌های نفوذ در محل پمپاژ) و تشویق اقدامات محلی برای افزایش نفوذ آب باران را پیشنهاد می‌کند. درس‌های کلیدی توکیو برای چارچوب سیاستی کشورهای دیگر عبارت‌اند از:

- ترکیب مقررات محدودکننده برداشت با اقدامات تغذیه سفره‌ها
  - ارتقای زیرساخت‌های شهری برای افزایش نفوذ باران (معابر نفوذپذیر، گودال‌ها، فضای سبز)
  - هماهنگی مدیریت عرضه و مدیریت تقاضا و مشارکت مردمی در حفظ منابع آب
- این تجربه بین‌المللی نشان می‌دهد که سیاست‌گذاری یکپارچه و اقدامات فنی-فضایی مکمل هم بوده و برای پیشگیری پایدار از فرونشست زمین ضروری‌اند.

### مکزیک

مکزیک، با جمعیتی حدود ۲۰ میلیون نفر، نمونه‌ای بارز از پیامدهای برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی و ضرورت سیاست‌گذاری پایدار برای پیشگیری از فرونشست زمین است. بیشتر نیازهای آب شهری و صنعتی این شهر به سفره‌های آب زیرزمینی وابسته است که عمدتاً درون یک آبخوان آبرفتی-آذرآواری واقع در زیر لایه‌ای ضخیم از رسوبات دریاچه‌ای کواترنری جای گرفته‌اند؛ این رسوبات بسیار متخلخل و قابل تراکم‌اند و در نتیجه آسیب‌پذیری بالایی در برابر فرونشست دارند. استخراج گسترده آب زیرزمینی از اواخر قرن نوزدهم آغاز شد و در دهه ۱۹۳۰ تشدید یافت؛ پیامد آن فرونشست گسترده در مرکز شهر و خسارات سنگین به ساختمان‌ها، زیرساخت‌ها، شبکه حمل‌ونقل و تأسیسات آب و فاضلاب بود. بر پایه داده‌های توپوگرافی، میانگین فرونشست در بازه‌ی ۱۹۵۲-۱۸۹۱ حدود ۴/۵۶ متر برآورد شده است. به‌منظور کاهش اثرات محلی، بسیاری از چاه‌های درون شهری بسته شد و بهره‌برداری به چاه‌های جدید در حاشیه شهر منتقل گردید؛ این اقدام موجب جابه‌جایی مشکل به مناطق پیرامونی شد اما راه



شد اما راه حلی پایدار برای محافظت از کل منطقه شهری نبود. تجربه مکزیکوسیتی نشان می‌دهد که سیاست‌ها باید فراتر از جابه‌جایی بهره‌برداری عمل کنند و شامل موارد زیر باشند: کاهش وابستگی به آبخوان‌ها از طریق توسعه منابع سطحی و بازچرخانی آب؛ ثبت و کنترل چاه‌ها؛ قیمت‌گذاری و ابزارهای اقتصادی برای مدیریت تقاضا؛ برنامه‌های نظارت پایدار (از جمله پایش زمینی و سنجش از دور)؛ و تقویت ظرفیت نهادی و مشارکت جامعه برای اجرای بلندمدت. تنها ترکیب این راهکارها می‌تواند از تکرار جابجایی مسأله و خسارات گسترده جلوگیری کند و مدیریت پایدار منابع آب را در شهرهای بزرگ تضمین نماید.

## هلند

هلند با تجربه‌ای پیشرو در پیشگیری و کنترل فرونشست زمین، رویکردی یکپارچه و مبتنی بر مهندسی هیدرولوژیک، سیاست‌گذاری نهادی و مدیریت کاربری زمین را پیاده‌سازی کرده است. به دلیل گستردگی زمین‌های کم ارتفاع و رسوبات نرم حاصل از رسوب‌گذاری دلتا، سیاست‌های هلند شامل کنترل سطح آب‌های زیرزمینی از طریق شبکه‌های گسترده زهکشی و تنظیم هیدرولوژیک، احیای و بازطراحی سیستم‌های زهکشی به منظور حفظ رطوبت مناسب خاک در نوارهای کشاورزی، و استفاده از سازه‌های مهندسی (نظیر پایداری خاک، تقویت پی‌ها و تزریق مصالح) برای محافظت از زیرساخت‌ها است؛ افزون بر این، برنامه‌های بلندمدت بازیابی و تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها و مدیریت تطبیقی مبتنی بر پایش دقیق (از جمله شبکه سنجش سطح آب، داده‌های زمین‌سنجی و سنجش از دور) به کار گرفته شده‌اند. از منظر سیاستی، قوانین فضایی و مقررات کاربری زمین، مشوق‌های مالی برای کشاورزی پایدار و چارچوب‌های نهادی میان‌بخشی (شورای‌های آب، شهرداری‌ها و آژانس‌های ملی) هماهنگی اقدامات را تضمین می‌کنند؛ همچنین برنامه‌ریزی شهری و زیرساختی مبتنی بر ارزیابی ریسک و سناریوهای اقلیمی، سازگاری درازمدت با تغییرات سطح دریا و نفوذ آب شور را مدنظر قرار می‌دهد.

موفقیت هلند در مهار فرونشست ناشی از ادغام تدابیر فنی-مهندسی، مدیریت مبتنی بر داده و چارچوب‌های قانونی و نهادی است که قابلیت انتقال به سایر مناطق آسیب‌پذیر را دارا می‌سازد.

## آفریقا جنوبی

آفریقای جنوبی نمونه‌ای از به‌کارگیری ابزارهای اقتصادی و مقرراتی برای مدیریت پایدار منابع آب و پیشگیری از فرونشست زمین است. در این کشور:



- نرخ فرونشست بر پایه تابعی از تغییر ارتفاع سطح آب زیرزمینی محاسبه می‌شود و خسارات مستقیم (به زیرساخت‌ها و کاهش ظرفیت ذخیره‌ی آبخوان) به صورت مرتبط با کاهش ایستابی تعیین می‌گردد.
- خسارات غیرمستقیم فرونشست نیز به صورت تابعی از درجه‌ی تراکم غیرالاستیک ناشی از استخراج آب زیرزمینی مدل‌سازی می‌شود.
- برای محدود کردن برداشت بیش از حد، نظامی ترکیبی از مالیات ثابت، سهمیه‌بندی و جریمه برای استخراج‌کنندگان اجرا می‌شود؛ اثر این ابزارها بر پمپاژ و کاهش ذخیره‌ی آبخوان کمی‌سازی می‌شود.
- بسته‌های سیاستی شامل ترکیب مالیات‌ها، سهمیه‌ها و زمان‌بندی اجرای آن‌ها هستند تا تأثیر ترکیبی ابزارها بر کاهش فرونشست و جبران خسارات اقتصادی بهینه گردد.
- تجربه‌ی آفریقای جنوبی نشان می‌دهد که ادغام مدل‌سازی خسارت، ابزارهای اقتصادی و سهمیه‌بندی زمان‌بندی شده می‌تواند چارچوبی موثر برای سیاست‌گذاری و مدیریت پایدار منابع آب فراهم کند و به عنوان الگویی برای کشورها درگیر فرونشست زمین قابل اقتباس است.







# تحلیل همبستگی بین فرونشست زمین و آلودگی نیتрат در آب زیرزمینی: شواهدی از فرو فشار آبخوان ها و نفوذ آلاینده ها



**زهره بهجتی**

دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط



E-mail:  
Behjatizahra4@gmail.com

مقدمه

پدیده فرونشست زمین، که عمدتاً ناشی از برداشت بیش از حد آب های زیرزمینی و ایجاد کاهش فشار منفذی در آبخوان است، به یک بحران جهانی تبدیل شده است. به طور همزمان، آلودگی نیترات در آب های زیرزمینی، سلامت عمومی و اکوسیستم ها را تهدید می کند. یافته ها نشان می دهد که برداشت بی رویه از آبخوان ها باعث کاهش سطح آب و در نتیجه کاهش فشار منفذی در خلل و فرج خاک می شود. این کاهش فشار، منجر به فشرده شدن غیرقابل بازگشت لایه های خاک (به ویژه لایه های رسی) و نشست سطح زمین می گردد. از سوی دیگر، منابع اصلی نیترات شامل کودهای شیمیایی کشاورزی، فاضلاب های شهری و پساب های صنعتی هستند که به طور طبیعی به سمت آبخوان ها نفوذ می کنند. داده های میدانی از مناطق مختلف جهان از جمله دشت های ایران، دره مرکزی کالیفرنیا و بیابان های چین، همبستگی مثبتی بین نرخ فرونشست و غلظت نیترات را تأیید می کنند.

مکانیسم های ارتباط: از فرو فشار آبخوان ها تا نفوذ آلاینده ها

- تغییر در هیدرودینامیک و هیدروشیمی آبخوان

افت شدید سطح آب زیرزمینی، هندسه و دینامیک جریان در آبخوان را تغییر می دهد. این تغییر می تواند باعث ایجاد گرادیان هیدرولیکی جدید و قوی تر به سمت مراکز برداشت (چاه ها) شود. این جریان های جدید، می توانند آلاینده های نیتراتی را که پیش از این در مناطق پیرامونی یا در



لایه‌های کم عمق تر به دام افتاده بودند، شسته و به عمق اصلی آبخوان هدایت کنند. به عبارت ساده، فرونشست با تغییر مسیر جریان، شستشوی آلاینده‌ها را تسریع می‌بخشد.

### ایجاد ترک‌ها، شکاف‌ها و تسریع فرآیند نفوذ

یکی از واضح‌ترین شواهد میدانی، ایجاد شکاف‌ها و ترک‌های بزرگ در سطح زمین در اثر فرونشست نامتوازن است. این شکاف‌ها، مسیرهای مستقیم و سریعی را برای نفوذ آلاینده‌های سطحی (مانند رواناب‌های آلوده به کود کشاورزی) به عمق آبخوان فراهم می‌کنند. مطالعات موردی در دشت‌های فرونشستی ایران (مانند دشت مشهد و ورامین) نشان داده‌اند که غلظت نیترات در مجاورت این گسل‌ها و شکاف‌های ناشی از فرونشست به طور قابل توجهی بالاتر از سایر نقاط است. این شکاف‌ها سیستم تصفیه طبیعی خاک را دور زده و آلودگی را مستقیماً به سفره آب زیرزمینی تزریق می‌کنند.

- تغییر در شرایط اکسیداسیون و احیاء و رهاسازی نیترات

کاهش سطح آب زیرزمینی، شرایط ژئوشیمیایی محیط آبخوان را تغییر می‌دهد. با پایین رفتن سطح آب، لایه‌های خاک که قبلاً در شرایط بی‌هوازی (احیا) بودند، در معرض اکسیژن قرار می‌گیرند. این تغییر می‌تواند باعث اکسیداسیون شکل‌های دیگر نیتروژن (مانند آمونیوم) که در خاک به دام افتاده‌اند، به نیترات محلول شود. در نتیجه، حتی بدون منبع آلودگی جدید، افت سطح آب می‌تواند منجر به رهاسازی و افزایش غلظت نیترات از خود ساختار خاک شود.

مطالعات متعدد در سراسر جهان این ارتباط را تأیید کرده‌اند. از جمله مطالعات انجام شده در دره مرکزی کالیفرنیا، داده‌های InSAR و نمونه‌برداری از چاه‌ها نشان داد که مناطقی با نرخ فرونشست بالاتر (بیش از ۲۰ سانتی‌متر در سال)، عموماً دارای غلظت نیترات بیشتری هستند. این همبستگی در مناطقی که کشاورزی شدید وجود دارد، قوی‌تر است. همچنین در دشت Fu yang در چین، مدل‌سازی هیدرولوژیکی نشان داد که افت سطح آب زیرزمینی نه تنها باعث فرونشست شده، بلکه سرعت حرکت آلاینده‌های نیتراتی از مناطق کشاورزی به سمت مرکز آبخوان را افزایش داده است. و در ایران در دشت تهران-کرج، بررسی‌های ژئوفیزیکی و شیمیایی حاکی از آن است که ترک‌های ناشی از فرونشست، نقش کانال‌های مماسی را برای نفوذ سریع آلودگی از سطح به لایه‌های اشباع ایفا می‌کنند.

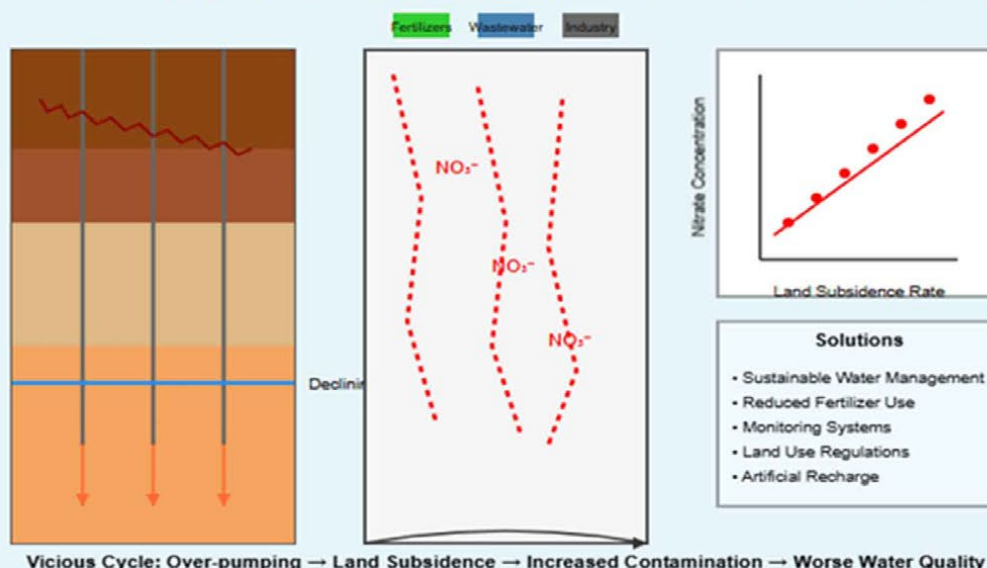
### نتیجه‌گیری

در نتیجه شواهد علمی نشان می‌دهند که بین فرونشست زمین و آلودگی



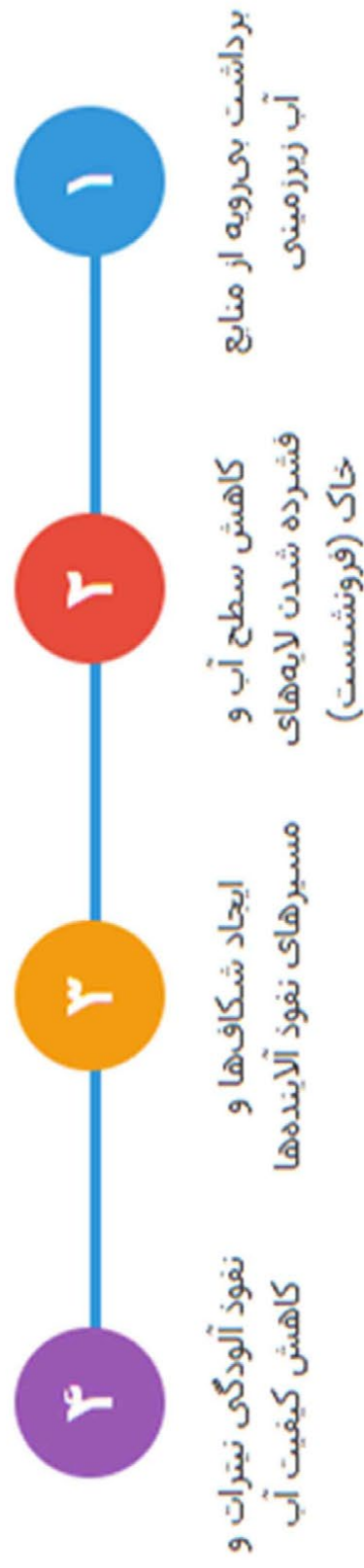
نیترات یک چرخه معیوب و خودتقویت کننده وجود دارد. برداشت بی رویه از آب های زیرزمینی باعث افت سطح آب و فشرده شدن خاک (فرونشست) می شود. این فرونشست، به نوبه خود، با ایجاد شکاف ها و تغییر در جریان آب زیرزمینی، مسیرهای مستقیمی برای نفوذ سریع آلودگی های نیتراتی از سطح به عمق آبخوان ایجاد می کند. در نتیجه، کیفیت آب به شدت کاهش یافته و این امر، خود باعث حفر چاه های عمیق تر و برداشت بیشتر می شود. این چرخه، وضعیت آبخوان را به طور پیوسته بحرانی تر می کند. راهکاری های پیشنهادی برای این چالش شامل مدیریت یکپارچه منابع آب: اجرای دقیق طرح های تعادلبخشی آبخوان ها و کاهش برداشت از منابع زیرزمینی، تنها راه برای شکستن این چرخه است. ایجاد شبکه های پایشی که به طور همزمان رصد تغییرات تراز آب، نرخ فرونشست را با تکنیک هایی مانند InSAR و کنترل کیفیت شیمیایی آب (به ویژه نیترات) انجام دهند. محدودیت در استفاده از کودهای نیتروژنه در مناطقی که در معرض خطر بالای فرونشست و شکاف خوردگی هستند. درک این ارتباط پیچیده برای تدوین استراتژی های مؤثر حفاظت از منابع آب و خاک در مناطق خشک و نیمه خشک مانند ایران، امری حیاتی است.

#### Correlation Analysis: Land Subsidence and Nitrate Pollution in Groundwater





## چرخه معیوب فرونشست و آلودگی نیترات



این چرخه معیوب منجر به **تشدید همزمان دو بحران زیست محیطی** می‌شود و شکستن آن نیازمند مدیریت یکپارچه منابع آب است.





# تأثیر تغذیه مصنوعی آبخوان بر فرونشست زمین



**محدثه السادات حسینی مقدم**

دانشجوی کارشناسی ارشد بهداشت محیط



E-mail:

Hosinemohadeseh6@gmail.com

فرونشست زمین یکی از جدی‌ترین و در عین حال کم‌تر قابل مشاهده ترین مخاطرات ژئوهیدرولوژیکی محسوب می‌شود که مستقیماً از بهره برداری ناپایدار منابع آب زیرزمینی ناشی می‌گردد. این پدیده به‌ویژه در دشت‌های شهری و کشاورزی با تراکم جمعیت بالا، تهدیدی فزاینده برای زیرساخت‌ها، شبکه‌های راه، ساختمان‌ها، خطوط انتقال آب و حتی الگوهای طبیعی زهکشی زمین به‌شمار می‌آید. در دشت‌های آبرفتی، برداشت بی‌رویه آب از آبخوان سبب افت سطح آب زیرزمینی و در نتیجه کاهش فشار آب منفذی می‌شود. کاهش فشار منفذی، فشرده‌سازی تدریجی لایه‌های رسی و سیلتی را به دنبال دارد که به نشست دائمی سطح زمین می‌انجامد. این تغییر شکل می‌تواند به شکستن سازه‌ها، جابه جایی تأسیسات و نابودی سرمایه‌های زیرزمینی منجر شود. بر اساس داده های سازمان زمین‌شناسی ایران، میزان فرونشست در برخی دشت‌ها نظیر ورامین، مشهد و اصفهان، به بیش از ۳۰ سانتی‌متر در سال رسیده که از بحرانی‌ترین مقادیر در جهان است. در پاسخ به این بحران، یکی از اثبات شده‌ترین روش‌های مدیریتی، تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها است. این روش با هدایت کنترل شده آب‌های سطحی، رواناب‌ها یا پساب‌های تصفیه شده به درون سازندهای آبدار، به احیای ذخائر زیرزمینی و حفظ تعادل هیدرولیکی کمک می‌کند. تغذیه مصنوعی نه تنها جنبه حفاظتی دارد، بلکه بخشی از استراتژی پایدار منابع آبی در شرایط تغییر اقلیم و رشد تقاضا محسوب می‌شود.



## مکانیسم فرونشست زمین

فرونشست اساساً نتیجه‌ی برهم خوردن تعادل بین فشار آب و بار مؤثر وارد بر سازندهای زمین‌شناسی است. در دشت‌های آبرفتی، ساختار لایه‌ای متشکل از ماسه، سیلت و رس باعث می‌شود در صورت افت سطح آب، لایه‌های رسی بیشتر فشرده شوند. این تراکم نه تنها سطح زمین را تغییر می‌دهد بلکه ظرفیت نگهداری آب در آبخوان را نیز کاهش می‌دهد.

### • نقش فشار منفذی و تنش مؤثر

فرونشست بر پایه‌ی مفهوم تنش مؤثر شکل می‌گیرد؛ مفهومی که توسط کارل ترزاقی بنیان گذاشته شد و بیان می‌کند که هنگامی که سطح آب زیرزمینی پایین می‌رود، فشار منفذی کاهش یافته و در نتیجه تنش مؤثر افزایش می‌یابد. این افزایش تنش، دانه‌ها را بیشتر به هم فشرده کرده و موجب کاهش حجم سازند و در نهایت نشست زمین می‌شود.

### • فشرده‌سازی سازندها

دو نوع اصلی فشرده‌سازی در پدیده فرونشست وجود دارد: فشرده‌سازی الاستیک برگشت‌پذیر و در لایه‌های ماسه‌ای رخ می‌دهد. با تزریق مجدد آب، ساختار تا حدودی احیا می‌شود و فشرده‌سازی غیرالاستیک مربوط به رس‌ها و لایه‌های کم نفوذ است و تغییر شکل دائمی محسوب می‌شود. عبور از حد فشاری اولیه موجب آرایش مجدد ذرات و فشردگی غیرقابل برگشت لایه‌ها می‌گردد. در بسیاری از دشت‌های ایران، وجود لایه‌های ضخیم رسی باعث شده حتی کاهش چند متری سطح آب، نشست‌های چندین سانتی‌متری تا متری را ایجاد کند.

## روش‌های تغذیه مصنوعی آبخوان

تغذیه مصنوعی مجموعه‌ای از فنون است که آب را به صورت کنترل شده به درون زمین وارد می‌کند تا منابع زیرزمینی احیا شوند. بسته به نوع زمین و عمق آبخوان، روش‌ها به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

### ۱. روش‌های نفوذ سطحی

- حوضچه‌های نفوذ: برکه‌های کم عمق که آب در آن جمع شده و از طریق نفوذ ثقلی وارد خاک می‌شود. این روش ساده، کم هزینه و مناسب برای آبخوان‌های کم عمق با خاک ماسه‌ای است.
- کانال‌های نفوذ: کانال‌هایی با طراحی نفوذی که امکان انتقال آب به مناطق دورتر و بازایی تدریجی سطح پیزومتری را فراهم می‌کنند.
- سدهای تغذیه‌ای کوچک: سدهایی موقت در مسیر رودخانه‌ها که باعث نفوذ سیلاب‌ها به لایه‌های زیرین خاک می‌گردند.

### ۲. روش‌های تزریق مستقیم



• چاه‌های تزریق: در این روش آب با فشار از طریق پمپ‌ها به آبخوان تزریق می‌شود. کنترل دقیق دبی و عمق تزریق از مزایای آن است؛ هرچند هزینه اولیه بالا و خطر گرفتگی چاه از معایب محسوب می‌شود.

• چاه‌های نفوذی: انتقال آب از سطح به عمق با فشار کم یا نیروی ثقلی، مناسب برای سازندهای نیمه نفوذپذیر.

در کشورهای پیشرو مانند استرالیا، آمریکا و هند سامانه‌های تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها به طور گسترده برای جبران افت سطح آب زیرزمینی و کاهش فرونشست مورد استفاده قرار می‌گیرند. نمونه بارز آن پروژه Orange County Groundwater Replenishment System در ایالات متحده است که سالانه بیش از ۳۰۰ هزار مترمکعب آب به آبخوان تزریق می‌کند.

### تأثیر تغذیه مصنوعی در کاهش فرونشست

با تزریق آب، سطح ایستایی افزایش یافته و فشار هیدروستاتیک در لایه‌های رس و سیلت بازیابی می‌گردد. این امر مستقیماً موجب کاهش تنش مؤثر و در نتیجه توقف فشرده‌سازی می‌شود. در مناطقی که فرونشست قبل‌ارخ داده، فشار آب تزریقی می‌تواند به بازگشت جزئی فشرده‌سازی، یا همان پدیده‌ی Elastic Rebound منجر گردد. هدف اصلی تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها، نگه داشتن سطح فشار آب زیرزمینی در منطقه‌ای بالاتر از حد بحرانی است تا فشارهای فشاری زیان‌آور بر سازندهای حساس کاهش یابد. هرچه فشار منفذی بالاتر باشد، میزان تراکم و نشست زمین کمتر خواهد بود. تحلیل‌های عددی نشان داده‌اند که افزایش سطح آب فقط به اندازه‌ی ۲ تا ۳ متر می‌تواند نرخ فرونشست را تا ۶۰ درصد کاهش دهد. تأثیر در محیط‌های کارستی و شکافدار، در محیط‌های آهکی یا کارستی، تزریق آب علاوه بر بازیابی حجم آبخوان، باعث پایداری غارها و جلوگیری از تشکیل سینک‌هول‌ها (Sinkholes) می‌شود. افزایش فشار منفذی دیواره‌ها را تقویت کرده و احتمال فروافتادگی سقف غارها را کاهش می‌دهد.

### چالش‌ها و ملاحظات مدیریتی

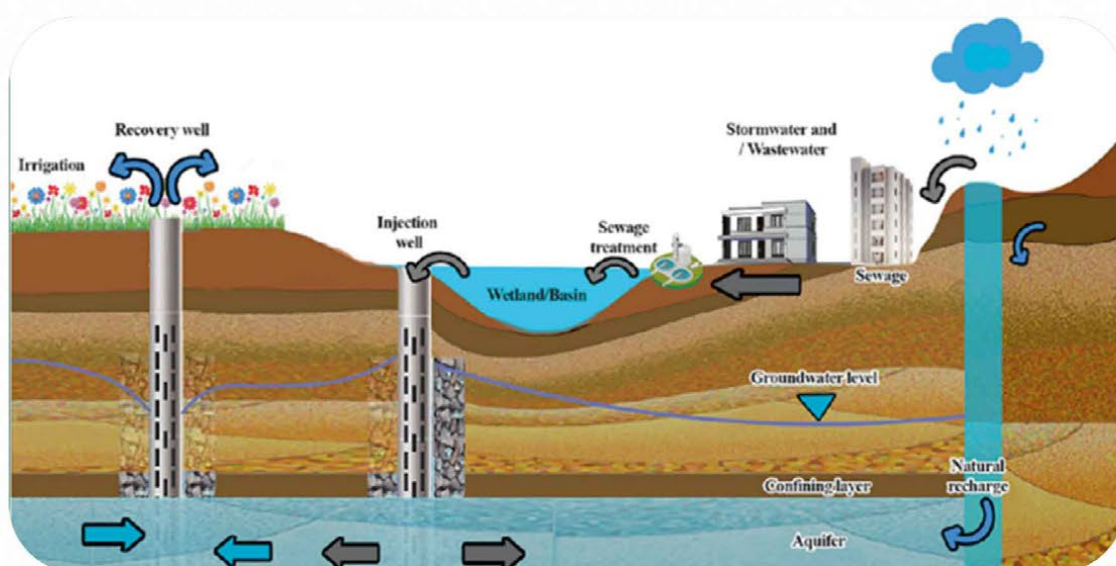
آب ورودی معمولاً حاوی مواد معلق، ترکیبات آلی و معدنی است که موجب گرفتگی منافذ خاک یا چاه‌ها می‌شود. برای جلوگیری از گرفتگی انجام پیش تصفیه از جمله رسوب‌گیری، فیلتراسیون یا کلرزنی ضروری است. در پروژه‌های بزرگ، استفاده از فیلترهای چندمرحله‌ای و پایش دوره‌ای چاه‌های تزریق حتمی است. در صورت استفاده از پساب‌های تصفیه‌نشده، احتمال ورود آلودگی‌های نیترات، فسفات یا فلزات سنگین به آبخوان وجود دارد که می‌تواند منابع آب شرب را آلوده سازد. انتخاب محل تزریق، کنترل کیفی مستمر



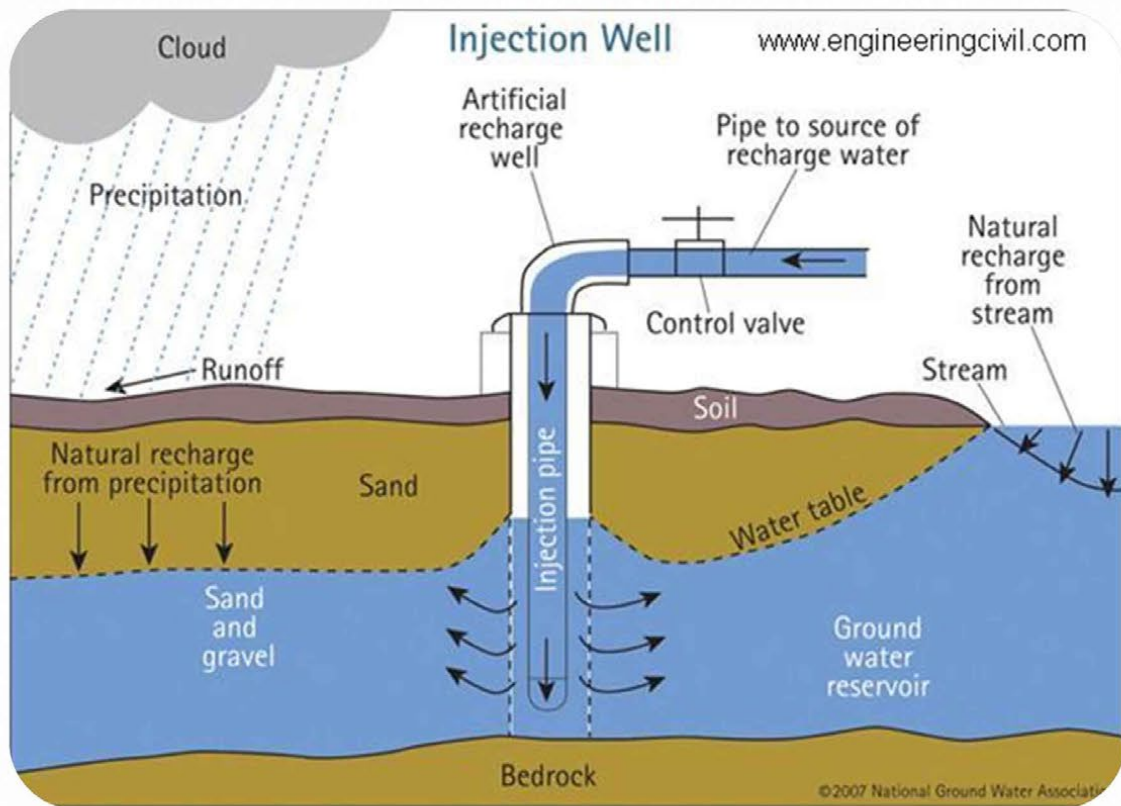
و بررسی زمان ماندگاری آب در آبخوان از الزامات فنی این طرح است. تزریق در لایه‌های ناپایدار ممکن است فشار داخلی را افزایش داده و موجب تحریک فعالیت‌های لرزه‌ای شود، هرچند در فشارهای پایین این خطر ناچیز است. پیش از آغاز طرح، لازم است ساختار زمین‌شناسی، نفوذپذیری، تخلخل مؤثر و سوابق پمپاژ تاریخی منطقه به دقت مدل‌سازی شود.

### نتیجه‌گیری

فرونشست زمین نتیجه مستقیم کاهش فشار آب منفذی در اثر برداشت بی‌رویه از منابع زیرزمینی است. این پدیده نه تنها کاهش ارتفاع سطح زمین را در پی دارد، بلکه ظرفیت ذخیره آبخوان و پایداری سازه‌های انسانی را نیز تهدید می‌کند. تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها یکی از مؤثرترین و پایدارترین راهکارها برای بازگرداندن فشار منفذی، حفظ تراز آب زیرزمینی و کاهش نرخ نشست است. تزریق هدفمند آب، هم موجب تعادل هیدرولیکی منطقه می‌شود و هم از آسیب‌های ژئوتکنیکی بلندمدت جلوگیری می‌کند. اجرای موفق تغذیه مصنوعی آبخوان‌ها مستلزم طراحی علمی، شناخت دقیق شرایط زمین‌شناسی، و به کارگیری سیستم‌های کنترل کیفیت و مانیتورینگ پیوسته است. از دیدگاه برنامه‌ریزی محیطی، این فناوری نه تنها راهکاری فنی برای حفظ منابع آب بلکه یک سیاست کلیدی برای پایداری شهری، امنیت آبی و کاهش خطرات زمین‌شناسی است. هنگامی که سطح آب زیرزمینی پایین می‌رود، فشار منفذی کاهش یافته و در نتیجه تنش مؤثر افزایش می‌یابد. این افزایش تنش، دانه‌ها را بیشتر به هم فشرده کرده و موجب کاهش حجم سازند و در نهایت نشست زمین می‌شود.









# بزرگ داشت بهداشت محیط

چهار سال ممکن است زیاد به نظر برسد. من آن موقع ها که فکرش را می کردم می گفتم: «هوووو، هشت ترم!! می دونی چقدر طول می کشه؟» حالا می دانم. می دانم به اندازه هشت لحظه است. هشت لحظه، لبریز از خاطراتی که گوشه کنار ساختمان دانشکده می ماند. روی نیمکت های محوطه، بالای قاب تخته وایت برد، در آستانه درب اتاق اساتید، توی سالن امتحان، روی دسته صندلی ها، قاب گرفته، آویز شده به دیوار حافظه و ذهن.

انگار همین دیروز بود، بزرگداشت محیط قاب گرفته رازدم زیر بغلم، رفتم تا دانشکده: «آقای بصیرت، این قاب مارو نصب می کنین؟» و او افتاده بود جلوی قدم هایم.

حالا انگار از آن موقع چندین سال می گذرد. از آن موقع که جلوی درب سالن آمفی تاتر پک پذیرایی می دادیم دست دانشجویها: «به جشن بزرگداشت بهداشت محیط خوش اومدین!»

از آن موقع استقبال از دانشجویان جدیدالورود: «رشته بهداشت محیط از اون رشته هاست که توش میشه کارهای خیلی بزرگ کرد.»

قبول کنید یا نکنید، کارشناسی چشم بهم زدن می گذرد. بعد حالا یا می روید مقطع ارشد یا نمی روید، خانم و آقا مهندس می شوید می روید توی فیلد و پای کار.

اما چیزی که مهم است، معدل و آن ۱۳۱ واحد پاس شده نیست. حتی آن افتادن ها و حذف شدن ها هم نه. در این مدت، ذره ذره، آرام آرام خانواده می شوید. یک خانواده بزرگ، پر از قهر و آشتی، اشک و لبخند. خانواده ای که لحظه های کشمکش و افتخار و غرور را پشت سر می گذارند، کنار هم رشد می کنند و خواه ناخواه، به واسطه آن اتفاقات ساده، عجیب و یا حتی غیرقابل باور با یک دیگر عجین می شوند.

آن چهار سال که بگذرد، آن موقع که هرکس کشیده شود جایی دیگر، می بینی یک ماهی جدا افتاده ای، در جایی دیگر که با حسی غیرقابل وصف وصل شده به همان دریای خودش، آن خانواده اصطلاحاً آکادمیکش.

من این را آن موقع که قاب های استاد دریجانی عزیز را، در آزمایشگاه آلودگی هوا، تماشا می کردم فهمیدم. که همه چیز در احساس ثبت شده در تصاویر می ماند، که جان دارند، طوری که انگار بچه ها هیچ وقت از ما و دانشکده مان دور نشده بودند.

پاییز ۱۴۰۴ خانواده مهندسی بهداشت محیط کرمان، باری دیگر این رشته



مقدس را بزرگ داشت. گردهمایی که جدا از تمامی لحظات و آموزه هایش، یک دوره‌می ساده و خانوادگیست. در این شماره از نشریه زمین بان، بخشی را به ثبت لحظات خوش اختصاص دادیم. به خاطراتی که در تصاویر جان دارند، نفس می کشند و با احساسات درآمیخته اند. یک سنت جدید، لبخند زدن با خنده توی عکس ها، برای آن وقت که دلتنگ این لحظه ها شدیم و از دریایمان دور بودیم.

آبان ماه سال ۱۴۰۴  
فاطمه شیروانی









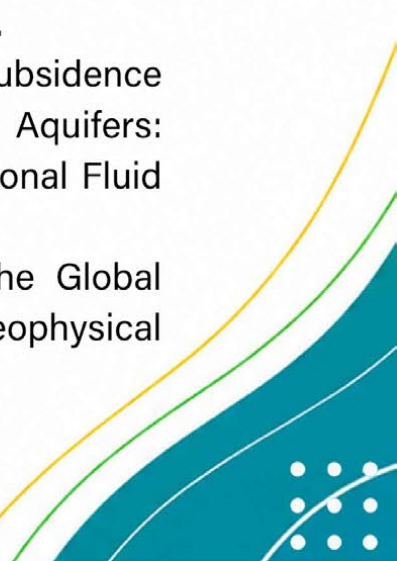




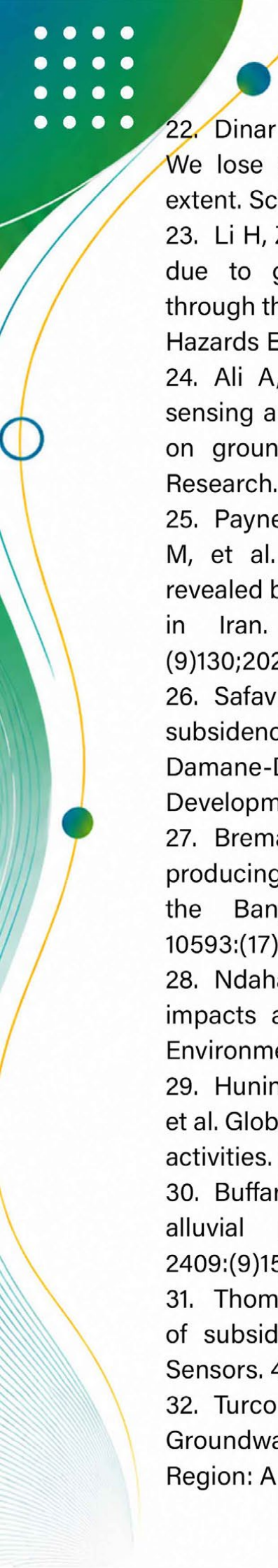
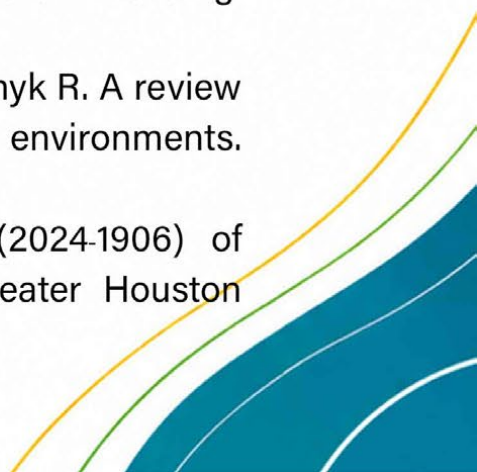
# منابع

1. Hu J, Yan Y, Dai H, He X, Lv B, Han M, et al. Prediction method for dynamic subsidence basin in mining area based on SBAS-InSAR and time function. Remote Sensing. 1938:(11)16;2024.
2. i F, Liu G, Tao Q, Zhai M. Land subsidence prediction model based on its influencing factors and machine learning methods. Natural hazards. 41-3015:(3)116;2023.
3. Wang R, Wu K, He Q, He Y, Gu Y. A novel method of monitoring surface subsidence law based on probability integral model combined with active and passive remote sensing data. Remote Sensing. 299:(2)14;2022.
4. Yang C, Qiuxiang T, Guolin L, LuYao W. Detailed mining subsidence monitoring combined with InSAR and probability integral method. Chinese Journal of Geophysics. 66-3554:(10)64;2021.
5. Haghshenas Haghighi, M.; Motagh, M. Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. Science Advances 3039 :(19)10 ,2024.
6. Babaei, S.; Khalili, M.A.; Chirico, R.; Sorrentino, A.; Di Martire, D. Spatiotemporal characterization of the subsidence and change detection in Tehran plain (Iran) using InSAR observations and Landsat 8 satellite imagery. Remote Sensing Applications: Society and Environment 36:101290 ,2024.
7. Zhang Y, Huang H, Liu Y, Bi H, Zhang Z, Wang K, et al. Impacts of soft soil compaction and groundwater extraction on subsidence in the Yellow River Delta. Marine Georesources & Geotechnology. 504-1497:(12)39;2021.
8. Eyo EU, Ng'ambi S, Abbey SJ. An overview of soil-water characteristic curves of stabilised soils and their influential factors. Journal of King Saud University-Engineering Sciences. 45-31:(1)34;2022.
9. Lee C, Kim J, Kim J-S. A Review of the Barcelona Expansive Model (BExM) and its Application for Numerical Simulation of the Mechanical Behavior of Highly Expansive Unsaturated Soils. Tunnel and Underground Space. 62-347:(4)35;2025.



- 
- 
10. Abdullah BA, Al-Badran YM. Shear Strength Behaviour of Unsaturated Soils: A Review. *Al-Rafidain Journal of Engineering Sciences*. 46-2024:536.
  11. Houston SL, Zhang X. Review of expansive and collapsible soil volume change models within a unified elastoplastic framework. *Soils and Rocks*. 44;2021:e2021064321.
  12. Ng CWW, Zhou C, Chiu CF. Constitutive modelling of state-dependent behaviour of unsaturated soils: an overview. *Acta Geotechnica*. 25-2705:(10)15;2020.
  13. Chai Q, Han W, Wan F, Ding Z, Wu F. Study on coordinated allocation of conventional and unconventional water resources in typical regions of North China. *Frontiers in Earth Science*. 11:1198431;2023.
  14. Elbana TA, Bakr N, Elbana M. Reuse of treated wastewater in Egypt: Challenges and opportunities. *Unconventional Water Resources and Agriculture in Egypt*. 53-2017:429.
  15. Marchioni M, Raimondi A, Di Chiano MG, Sanfilippo U, Mambretti S, Becciu G. Costs-benefit Analysis for the use of Shallow Groundwater as non-conventional Water Resource. *Water Resources Management*. 42-2125:(5)37;2023.
  16. Qadir M, Smakhtin V, Koo-Oshima S, Guenther E. *Unconventional water resources*: Springer; 2022.
  17. Qadir M, Smakhtin V, Koo-Oshima S, Guenther E. *The Future of Unconventional Water Resources*. *Unconventional Water Resources*: Springer; 2022. p. 309-299.
  18. Bagheri-Gavkosh M, Hosseini SM, Ataie-Ashtiani B, Sohani Y, Ebrahimian H, Morovat F, et al. Land subsidence: A global challenge. *Science of The Total Environment*. 778:146193;2021.
  19. Hasan MF, Smith R, Vajedian S, Pommerenke R, Majumdar S. Global land subsidence mapping reveals widespread loss of aquifer storage capacity. *Nature Communications*. 6180:(1)14;2023.
  20. Chalá DC, Quiñones-Bolaños E, Mehrvar M. Land Subsidence Due to Groundwater Exploitation in Unconfined Aquifers: Experimental and Numerical Assessment with Computational Fluid Dynamics. *Water*. 467:(3)16;2024.
  21. Davydzienka T, Tahmasebi P, Shokri N. Unveiling the Global Extent of Land Subsidence: The Sinking Crisis. *Geophysical Research Letters*. (4)51;2024:e2023GL104497.
- 



- 
22. Dinar A, Esteban E, Calvo E, Herrera G, Teatini P, Tomás R, et al. We lose ground: Global assessment of land subsidence impact extent. *Science of The Total Environment*. 786:147415;2021.
  23. Li H, Zhu L, Guo G, Zhang Y, Dai Z, Li X, et al. Land subsidence due to groundwater pumping: hazard probability assessment through the combination of Bayesian model and fuzzy set theory. *Nat Hazards Earth Syst Sci*. 35-823:(2)21;2021.
  24. Ali A, Bilal M. A comprehensive review of GIS and remote sensing applications in assessing land use and land cover impacts on groundwater systems. *Environmental Science and Pollution Research*. 52-18631:(31)32;2025.
  25. Payne JA, Watson A, Maghsoudi Y, Ebmeier S, Rigby R, Lazecký M, et al. Widespread extent of irrecoverable aquifer depletion revealed by country-wide analysis of land surface subsidence hazard in Iran. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. (9)130;2025:e2024JB030367.
  26. Safavi HR, Pour SI. Evaluation of management scenarios for land subsidence reduction and groundwater rehabilitation in Damane-Daran plain, Iran. *Groundwater for Sustainable Development*. 23:100995;2023.
  27. Bremard T. Monitoring land subsidence: the challenges of producing knowledge and groundwater management indicators in the Bangkok metropolitan region, Thailand. *Sustainability*. 10593:(17)14;2022.
  28. Ndahangwapo NN, Thiam DR, Dinar A. Land subsidence impacts and optimal groundwater management in South Africa. *Environmental and Resource Economics*. 126-1097:(5)87;2024.
  29. Huning LS, Love CA, Anjileli H, Vahedifard F, Zhao Y, Chaffe PL, et al. Global land subsidence: Impact of climate extremes and human activities. *Reviews of Geophysics*. (4)62;2024:e2023RG000817.
  30. Buffardi C, Ruberti D. The issue of land subsidence in coastal and alluvial plains: A bibliometric review. *Remote Sensing*. 2409:(9)15;2023.
  31. Thomas F, Livio FA, Ferrario F, Pizza M, Chalaturnyk R. A review of subsidence monitoring techniques in offshore environments. *Sensors*. 4164:(13)24;2024.
  32. Turco MJ, Greuter A, Wang G. A Century (2024-1906) of Groundwater and Land Subsidence Studies in Greater Houston Region: A Review. *Groundwater*. 83-459:(4)63;2025.
- 



- 
- 
33. Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 1486–1459 ,(8)19.
34. Moghaddam, M. H., Raessi, M., & Moradi, A. (2018). Land subsidence and ground fissure hazards in the Mashhad Valley, NE Iran: Implications for groundwater contamination. *Environmental Earth Sciences*, 545 ,(15)77.
35. Wang, J., Chai, L., Yang, P., & Liu, H. (2020). Responses of groundwater flow and nitrogen contamination to groundwater extraction in the Fu yang plain, China. *Journal of Hydrology*, ,590 125255.
36. Ojha, C., Werth, S., & Shirzaei, M. (2019). Groundwater loss and aquifer system compaction in San Joaquin Valley during 2015–2012 drought. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, ,(3)124 3143–3127.
37. Böhlke, J. K. (2002). Groundwater recharge and agricultural contamination. *Hydrogeology Journal*, 179–153 ,(1)10.
38. Zhang Y, Wu J, Xue Y, Wang Z, Yao Y, Yan X, Wang H. Land subsidence and uplift due to long-term groundwater extraction and artificial recharge in Shanghai, China. *Hydrogeology Journal*. 66-1851:(8)23;2023.
39. Shi X, Jiang S, Xu H, Jiang F, He Z, Wu J. The effects of artificial recharge of groundwater on controlling land subsidence and its influence on groundwater quality and aquifer energy storage in Shanghai, China. *Environmental Earth Sciences*. 195:(3)75;2016.
40. Phien-Wej N, Giao P, Nutalaya P. Field experiment of artificial recharge through a well with reference to land subsidence control. *Engineering Geology*. 201-187:(2-1)50;2019.
41. Li M-G, Chen J-J, Xu Y-S, Tong D-G, Cao W-W, Shi Y-J. Effects of groundwater exploitation and recharge on land subsidence and infrastructure settlement patterns in Shanghai. *Engineering Geology*. 282:105995;2021.
- 







# زمین بان



نشریه علمی، اجتماعی، فرهنگی



دانشگاه علوم پزشکی کرمان

..... راه های ارتباطی: .....

@yaldaasunrise

@Dolatabadi\_maryam

