



اتاق بازرگانی
صنایع، معادن و کشاورزی
اصفهان
ISFAHAN CHAMBER OF COMMERCE
INDUSTRIES, MINES AND AGRICULTURE

فرونشت اصفهان؛

وضعیت موجود، پیامدها، عوامل؛

و بسته راهکارهای کاهش عوامل فرونشت

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

عنوان پژوهش: فرونشست اصفهان؛ وضعیت موجود، پیامدها، عوامل و بسته راهکارهای کاهش عوامل فرونشست

مرکز پژوهش و بررسی های اقتصادی اتاق بازرگانی اصفهان

تهیه کننده: سجاد انتشاری، پریسا حمیدی، امیر حسین عقیلی

مشاور: بهرام نادى و آرش جزینی

تاریخ انتشار: تابستان ۱۴۰۵

واژگان کلیدی: فرونشست زمین؛ آبخوان اصفهان-برخوار؛ افت سطح آب زیرزمینی؛ تعادل بخشی آبخوان؛ مدیریت

یکپارچه منابع آب.

فهرست

۱.	مقدمه و هدف	۶
۲.	وضعیت فرونشست در اصفهان	۷
۱.۲.	موقعیت جغرافیایی محدوده	۷
۲.۲.	وضعیت موجود فرونشست زمین در محدوده	۸
۱.۲.۱.	وضعیت فرونشست شهر اصفهان	۹
۲.۲.۲.	وضعیت فرونشست دشت اصفهان برخوار	۱۰
۲.۲.۳.	جمع‌بندی	۱۲
۳.۲.	مقایسه فرونشست اصفهان با سایر مناطق کشور	۱۳
۳.	ریسک، پیامدها و اثرات فرونشست	۱۵
۱.۳.	مفهوم ریسک فرونشست زمین	۱۵
۲.۳.	خطر خاک‌های واگرا در پهنه فرونشست اصفهان و اطراف آن	۱۶
۳.۳.	آسیب‌پذیری زیرساختی	۱۷
۱.۳.۳.	المان‌های شهری آسیب‌پذیر واقع در پهنه فرونشست	۱۷
۴.۳.	پیامدهای فرونشست	۲۲
۱.۴.۳.	پیامدهای اجتماعی و انسانی	۲۲
۲.۴.۳.	پیامدهای اقتصادی و زیرساختی	۲۳
۳.۴.۳.	پیامدهای آبخوان، کشاورزی و امنیت غذایی	۲۳
۴.۴.۳.	پیامدهای فرهنگی و هویتی	۲۴
۵.۴.۳.	چشم‌انداز منطقه‌ای بحران	۲۴
۴.	علل ایجاد و تشدید فرونشست در اصفهان	۲۵
۱.۴.	نقش ویژه افت سطح آب زیرزمینی، در بروز و تشدید فرونشست	۲۷
۲.۴.	نقش قطع جریان دائمی زاینده رود در تشدید فرونشست	۲۹
۳.۴.	مقایسه عوامل طبیعی و زمین‌شناسی با افت سطح آب زیرزمینی	۳۱
۴.۳.۱.	سرعت اثرگذاری	۳۱
۴.۳.۲.	شدت و گستره اثر	۳۲
۴.۳.۳.	وابستگی و نقش محرک	۳۲
۴.۳.۴.	جمع‌بندی	۳۲
۴.۴.	مقایسه اثر ساخت‌وساز شهری با افت سطح آب زیرزمینی بر فرونشست زمین	۳۳

۳۴	۵.۴	بررسی وضعیت افت سطح آب زیرزمینی در اصفهان بر خوار
۳۵	۶.۴	روند تاریخی مدیریت منابع آب در دشت اصفهان
۳۶	۵	عوامل افت سطح آب
۳۶	۵.۱	تاثیر تغییرات اقلیمی بر الگوی بارش و کاهش تغذیه طبیعی به منابع آب زیرزمینی
۳۷	۵.۲	خشکی رودخانه زاینده رود و کاهش نفوذ به آبخوان
۳۸	۵.۳	تاثیر برداشت از منابع آب زیرزمینی بر افت سطح آب آبخوان
۴۰	۶	تحلیل میزان برداشت از آب های زیرزمینی
۴۰	۶.۱	بخش کشاورزی
۴۰	۶.۲	بخش صنعت و خدمات
۴۰	۶.۳	فضای سبز شهری
۴۱	۶.۴	شرب و بهداشت
۴۱	۶.۵	جمع بندی
۴۳	۷	راهکارهای کنترل عوامل افت سطح آب زیرزمینی
۴۳	۷.۱	نحوه اثرگذاری راهکارها روی آبخوان
۴۴	۷.۲	دسته بندی راهکارها از منظر اثرگذاری بر آبخوان
۴۴	۷.۲.۱	دسته نخست؛ اصلاح حکمرانی
۴۴	۷.۲.۲	دسته دوم؛ کاهش یا توقف بارگذاری
۴۵	۷.۲.۳	دسته سوم؛ افزایش تغذیه آبخوان
۴۵	۷.۳	لیست راهکارها
۴۹	۷.۴	تحلیل و الگوهای ساختاری راهکارها
۴۹	۷.۴.۱	توزیع کلی اقدامات بر اساس «اثر روی آبخوان»
۵۰	۷.۴.۲	توزیع بر اساس دسته بندی کلی
۵۱	۷.۴.۳	تحلیل سطح اجرا
۵۱	۷.۴.۴	تحلیل متولیان
۵۱	۷.۵	لیست صنایع آب صفر
۵۴	۸	اولویت بندی راهکارها
۵۴	۸.۱	معیارهای تصمیم گیری و اولویت بندی
۵۴	۸.۱.۱	تاثیر بر منابع آب آبخوان (C ^۱)
۵۵	۸.۱.۲	زمان اثرگذاری (C ^۲)

۵۵	ریسک (C ^۳)	۸. ۱. ۳
۵۵	اثرگذاری اجتماعی-فرهنگی (C ^۴)	۸. ۱. ۴
۵۶	پیش‌نیازی برای سایر اقدامات (C ^۵)	۸. ۱. ۵
۵۶	هزینه (C ^۶)	۸. ۱. ۶
۵۶	نتایج اولویت بندی راهکارها	۸. ۲
۵۶	روشن‌شناسی اولویت‌بندی و انتخاب سبد راهکارهای تعادلی	۸. ۲. ۱
۵۷	تجربه اولیه: ساختار و گام‌های اجرایی روش CORASO	۸. ۲. ۲
۵۷	چرا روش‌های وزن‌دهی پیشینی (مانند کوراسو) در این مسئله ناکارآمد هستند؟	۸. ۲. ۳
۶۱	مفهوم جبهه پارتو و راهکارهای غیرمغلوب	۸. ۲. ۱
۶۲	ضرورت توجه به راهکارهای نزدیک به پارتو (Near-Pareto Solutions)	۸. ۲. ۲
۶۳	گذار از رویکرد پیشینی به رویکرد پسینی	۸. ۲. ۳
۶۵	ابزارهای نمایش گرافیکی فضای تصمیم	۸. ۲. ۴
۶۶	مبانی ریاضی و منطق هوشمندانه نرمال‌سازی معیارها	۸. ۳
۷۰	جمع‌بندی بخش روش تحقیق	۸. ۳. ۱
۷۰	نتایج اولویت بندی راهکارها	۸. ۴
۸۶	بسته سیاستی استان	۹. ۱
۸۶	چشم‌انداز	۹. ۱. ۱
۸۶	هدف اصلی	۹. ۲
۸۷	اهداف فرعی	۹. ۳
۸۷	بسته راهکارهای کوتاه مدت و فوری (۱ تا ۲ سال)	۹. ۴
۸۹	بسته راهکارهای میان مدت زیرساختی و تحولی	۹. ۵
۹۰	الزامات اجرایی بسته سیاستی	۹. ۶
۹۰	الزامات حقوقی و قانونی	۹. ۶. ۱
۹۰	الزامات مالی	۹. ۶. ۲
۹۰	الزامات حکمرانی و نهادی	۹. ۶. ۳
۹۱	الزامات اجتماعی، سیاسی	۹. ۶. ۴
۹۱	الزامات فنی و زیست‌محیطی	۹. ۶. ۵
۹۱	مراجع:	۱۰. ۱



۱. مقدمه و هدف

پدیده فرونشست زمین در دهه‌های اخیر به یکی از جدی‌ترین تهدیدهای محیط‌زیستی، زیرساختی و اقتصادی بسیاری از دشت‌های کشور تبدیل شده است. در این میان، دشت اصفهان-برخوار به دلیل تمرکز بالای جمعیت، توسعه گسترده شهری و صنعتی، و اتکای شدید به منابع آب زیرزمینی، در صدر مناطق پرخطر قرار دارد. افت پیوسته سطح آب زیرزمینی، برداشت بیش از ظرفیت تجدیدپذیر آبخوان و کاهش تغذیه طبیعی آن به‌ویژه پس از خشک‌سالی‌های ممتد و کاهش جریان رودخانه زاینده‌رود موجب شده تعادل میان تغذیه و تخلیه به‌طور کامل برهم بخورد و افت سطح آب زیرزمینی رخ دهد و فرونشست در سطحی وسیع شکل گیرد.

از آنجا که واژه‌های مشابهی همچون «فروچاله» و «فروریزش» نیز در ادبیات فرورفت زمین استفاده می‌شوند، در ابتدای گزارش لازم است مرزبندی روشنی میان این پدیده‌ها صورت گیرد تا هدف تحلیل به‌درستی مشخص شود. **فرونشست** به فرورفتن آرام، تدریجی و گسترده سطح زمین در مقیاس وسیع گفته می‌شود؛ در مقابل، فروچاله نوعی فرورفت ناگهانی، نقطه‌ای و عمیق است که معمولاً بر اثر انحلال لایه‌های آهکی یا گچی و ایجاد حفره‌های زیرسطحی اتفاق می‌افتد. فروریزش نیز به ریزش ناگهانی سقف فضا‌های زیرزمینی نظیر قنات، تونل‌ها یا معادن اطلاق می‌شود. اشاره به این دو پدیده صرفاً به‌منظور تفکیک مفهومی و جلوگیری از سوء برداشت است؛ چرا که در این گزارش تمرکز ما کاملاً بر فرونشست گسترده و تدریجی دشت اصفهان-برخوار است، نه فروریزش‌های موضعی یا فروچاله‌های کارستی.

گسترش فرونشست در محدوده شهری اصفهان و پیرامون آن، علاوه بر تهدید زیرساخت‌ها، خطوط انتقال انرژی، شبکه‌های حمل‌ونقل و تأسیسات حیاتی، می‌تواند آثار تاریخی ارزشمند شهر را نیز در معرض خطر جدی قرار دهد. تداوم این روند پیامدهای اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی گسترده‌ای از جمله کاهش بهره‌وری اراضی کشاورزی، تخریب زیرساخت‌ها، تشدید بیابان‌زایی و افزایش آسیب‌پذیری جوامع محلی را به دنبال خواهد داشت. از همین رو، مدیریت عوامل ایجاد کننده و تشدید کننده فرونشست، ضرورتی فوری و حیاتی برای پایداری زیست‌محیطی و اقتصادی منطقه به شمار می‌آید.

بر این اساس، این گزارش با هدف بررسی وضعیت فرونشست در محدوده اصفهان و ارائه مجموعه‌ای از راهکارهای عملی، یکپارچه و قابل اجرا برای مهار روند فرونشست زمین تهیه شده است؛ تا مسیر تصمیم‌سازی و سیاست‌گذاری برای مدیریت بحران در دشت اصفهان-برخوار روشن‌تر و هدفمندتر شود.

هدف اصلی این مطالعه، شناسایی و تدوین مجموعه‌ای از راهکارهای عملی برای کاهش عوامل مؤثر بر افت سطح آب زیرزمینی و کنترل روند فرونشست زمین در محدوده آبخوان اصفهان-برخوار است. با توجه به وضعیت بحرانی فرونشست در آبخوان اصفهان برخوار، ضرورت دارد تا حد امکان راهکارها در کوتاه مدت مؤثر واقع گردد و در مرز جغرافیایی استان اصفهان قابل انجام باشد تا بتوان با پیگیری‌های استانی، این راهکارها را به نتیجه رساند.

در این راستا، در این گزارش ابتدا وضعیت موجود فرونشست زمین، روند افت سطح آب زیرزمینی و عوامل مؤثر در بروز و تشدید این پدیده مورد بررسی قرار می‌گیرد و نشان داده می‌شود که افت سطح آب زیرزمینی اصلی‌ترین دلیل فرونشست در آبخوان اصفهان برخوار است. سپس با تحلیل الگوی برداشت از منابع آب زیرزمینی در بخش‌های مختلف مصرف و الگوهای

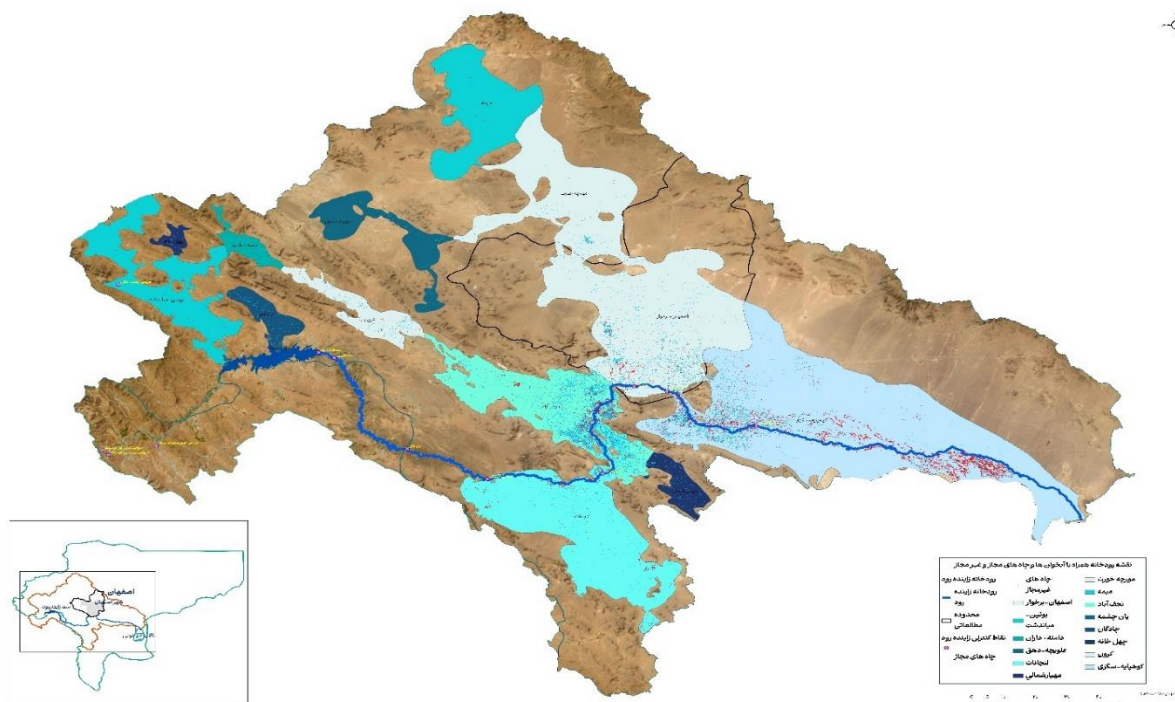
تغذیه آبخوان و بررسی نقش هر یک از عوامل طبیعی و انسانی، مجموعه‌ای از اقدامات پیشنهادی برای مدیریت منابع آب و کاهش فشار بر آبخوان شناسایی می‌شود.

در ادامه، این اقدامات بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای فنی، اجرایی، اقتصادی و اجتماعی مورد ارزیابی و اولویت‌بندی قرار می‌گیرند تا امکان تعیین راهکارهای مؤثرتر و قابل اجرا در سطح استان فراهم شود. در نهایت، نتایج این ارزیابی در قالب یک بسته سیاستی پیشنهادی ارائه می‌شود که می‌تواند به عنوان مبنایی برای برنامه‌ریزی و تصمیم‌گیری مدیران و سیاست‌گذاران استانی در جهت کنترل عوامل تشدیدکننده فرونشست و مدیریت پایدار منابع آب زیرزمینی مورد استفاده قرار گیرد.

۲. وضعیت فرونشست در اصفهان

۱.۲. موقعیت جغرافیایی محدوده

در این فصل ابتدا محدوده مطالعاتی حوضه آبریز زاینده‌رود معرفی می‌شود، سپس به تشریح محدوده مطالعاتی اصفهان-برخوار پرداخته خواهد شد. در ادامه، وضعیت فرونشست زمین در محدوده اصفهان-برخوار بررسی شده و در پایان، فرونشست این منطقه با سایر مناطق کشور مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در شکل ۱، نقشه حوضه آبریز زاینده‌رود، مسیر رودخانه، محدوده آبخوان‌های منطقه و پراکنش چاه‌های بهره‌برداری از آب زیرزمینی نشان داده شده است. پهنه‌های رنگی بیانگر آبخوان‌های مختلف از جمله آبخوان اصفهان-برخوار و دشت‌های اطراف هستند که منابع اصلی تأمین آب زیرزمینی منطقه محسوب می‌شوند.



شکل ۱- نقشه رودخانه همراه با آبخوان ها و چاه های مجاز و غیرمجاز

در شکل ۲ مرز جغرافیایی شهرستانهای واقع بر آبخوان اصفهان بر خوار نشان داده شده است. با توجه به اینکه شهر اصفهان بر روی آبخوان و دشت اصفهان-برخوار واقع شده است و پدیده فرونشست ماهیتی ناحیه‌ای و وابسته به رفتار کل آبخوان دارد، نه یک پدیده موضعی صرفاً شهری، می‌توان نتیجه گرفت که کنترل فرونشست در محدوده شهر اصفهان، بدون بررسی و مدیریت کل دشت، امکان‌پذیر نیست. فرونشست زمین در مقیاس واحدهای هیدروژئولوژیک رخ می‌دهد؛ از این رو، رویکردهای علمی FAO Groundwater Governance، UNESCO IHP و نیز دستورالعمل‌های SGMA کالیفرنیا به صراحت تأکید می‌کنند که مدیریت فرونشست باید بر مبنای «محدوده هیدروژئولوژیک آبخوان» انجام شود، نه بر اساس مرزهای سیاسی، شهری یا شهرستانی. بنابراین برای تدوین هرگونه برنامه کنترل فرونشست در شهر اصفهان، مطالعه و مدیریت یکپارچه دشت اصفهان-برخوار، به عنوان یک سامانه واحد، ضرورت قطعی دارد.



شکل ۲- نقشه آبخوان اصفهان برخوار و مرز شهرستان‌های اصفهان، برخوار، شاهین شهر و خمنی شهر

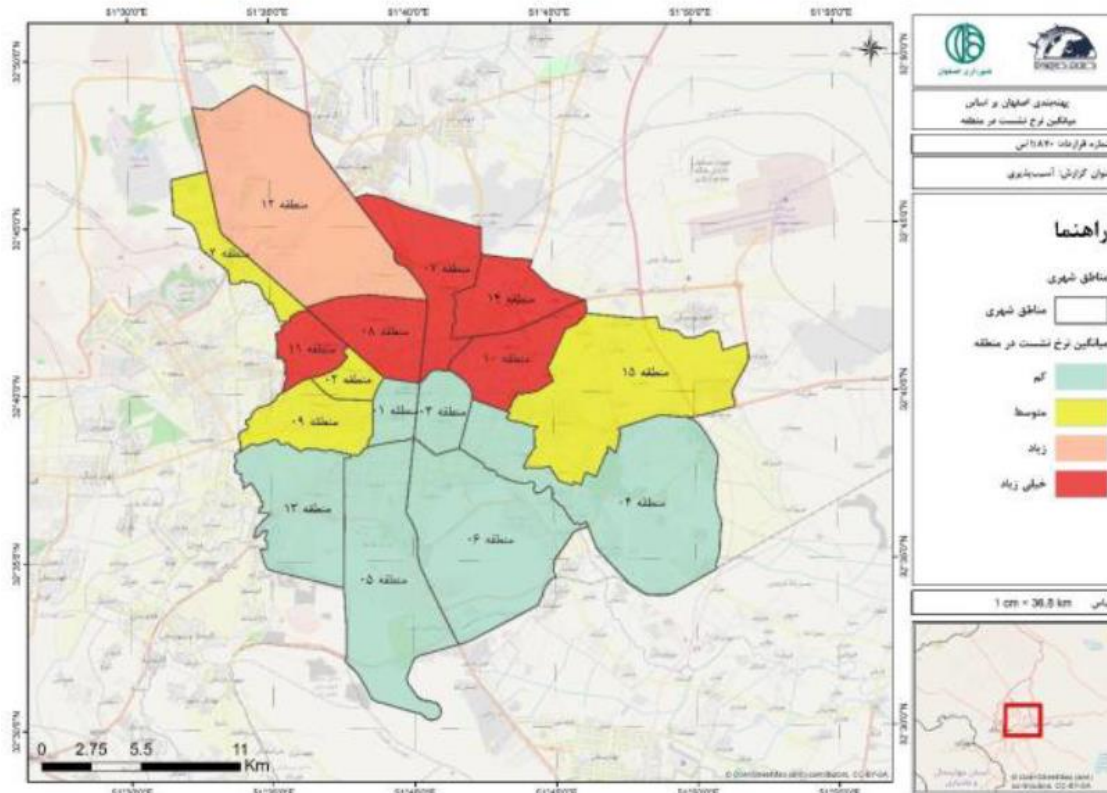
۲.۲. وضعیت موجود فرونشست زمین در محدوده

در این بخش ابتدا وضعیت فرونشست در شهر اصفهان، سپس وضعیت فرونشست در دشت اصفهان-برخوار تحلیل می‌شود.



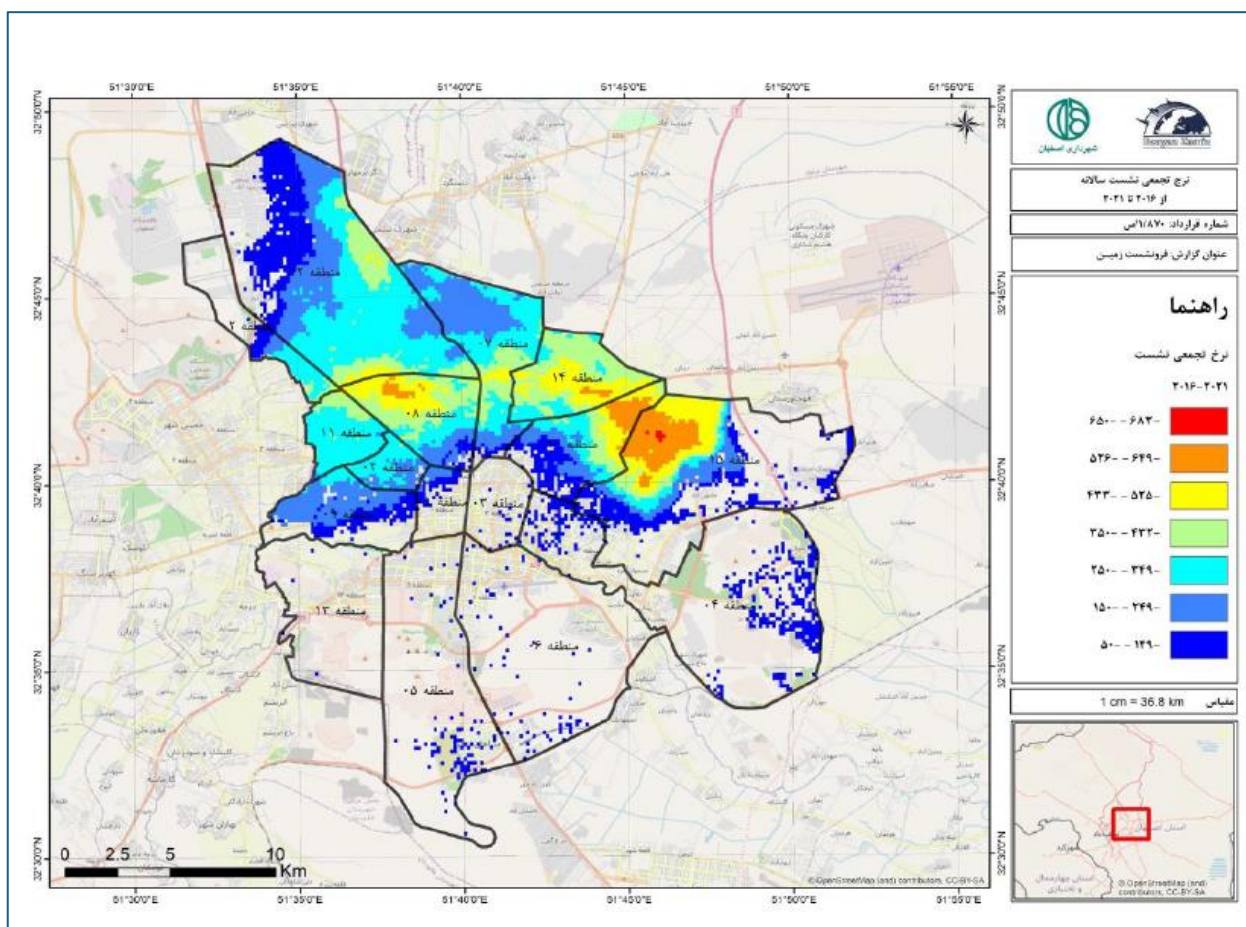
۱.۲.۲. وضعیت فرونشست شهر اصفهان

شکل ۳، نقشه میانگین نرخ فرونشست سالانه در مناطق مختلف شهر اصفهان را در چهار طبقه کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد نشان می‌دهد. بیشترین میزان فرونشست در بخش‌های مرکزی و شمالی شهر، به‌ویژه در مناطق ۷، ۸، ۱۰، ۱۱ و ۱۴ مشاهده می‌شود که در نقشه با رنگ قرمز مشخص شده‌اند. در مقابل، مناطق جنوبی شهر مانند ۴، ۵، ۶ و ۱۳ که به رودخانه زاینده‌رود نزدیک‌تر هستند، نرخ فرونشست کمتری دارند و با رنگ سبز نمایش داده شده‌اند. به طور کلی الگوی نقشه نشان‌دهنده افزایش شدت فرونشست از جنوب به سمت مرکز و شمال شهر اصفهان است.



شکل ۳- نقشه نرخ فرونشست در اصفهان بر اساس گزارش شهرداری اصفهان، مطالعات شرکت مهندسين مشاور بنیان زمین پایدار

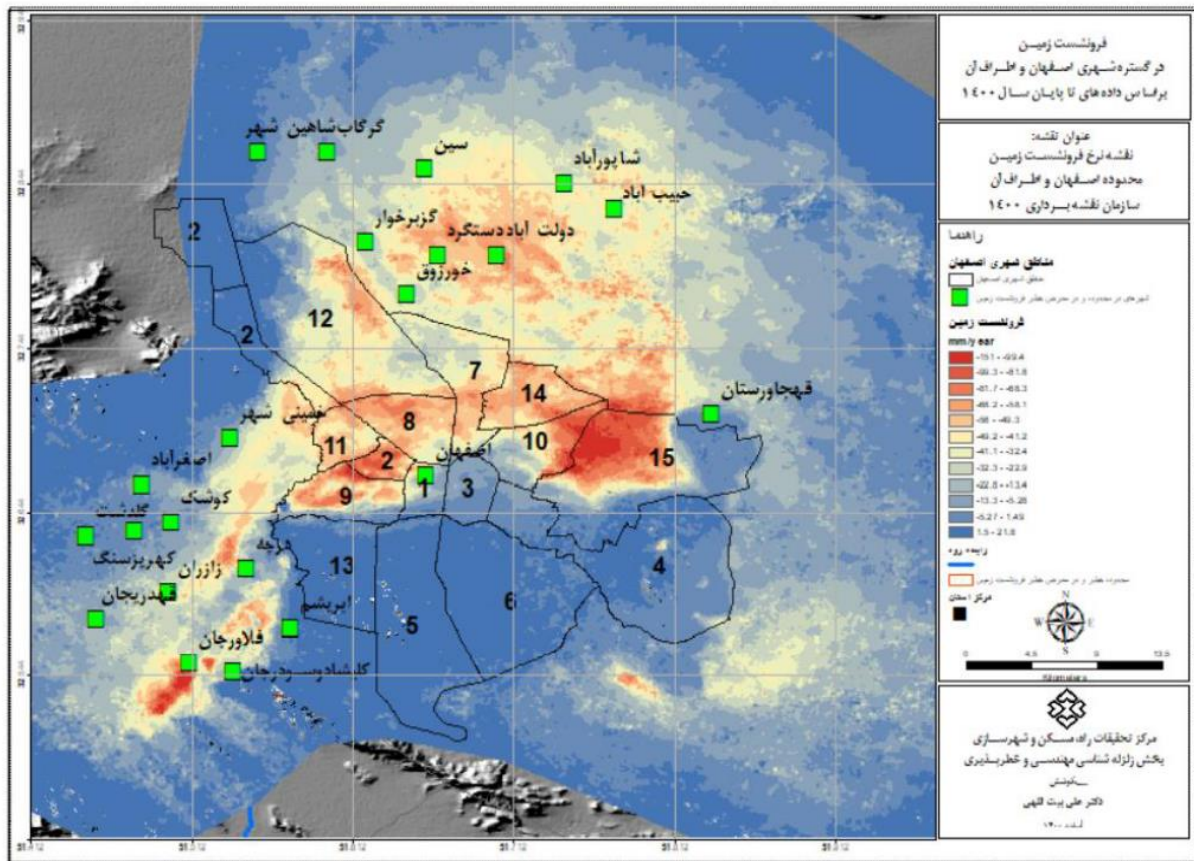
در شکل ۴ نرخ تجمعی فرونشست زمین در اصفهان طی سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۲۱ نشان داده شده است. شدت فرونشست با طیف رنگی از آبی (کمترین) تا قرمز (بیشترین) مشخص شده است. بیشترین مقادیر فرونشست در شمال، شمال‌شرق و بخش‌هایی از مرکز شهر دیده می‌شود؛ نواحی‌ای که با افت شدید سطح آب زیرزمینی، تراکم بالای چاه‌های بهره‌برداری و رسوبات ریزدانه هم‌زمانی دارند. مناطق جنوب و غرب در پهنه‌های کم‌خطرتر قرار گرفته‌اند، هرچند کاملاً عاری از خطر نیستند.

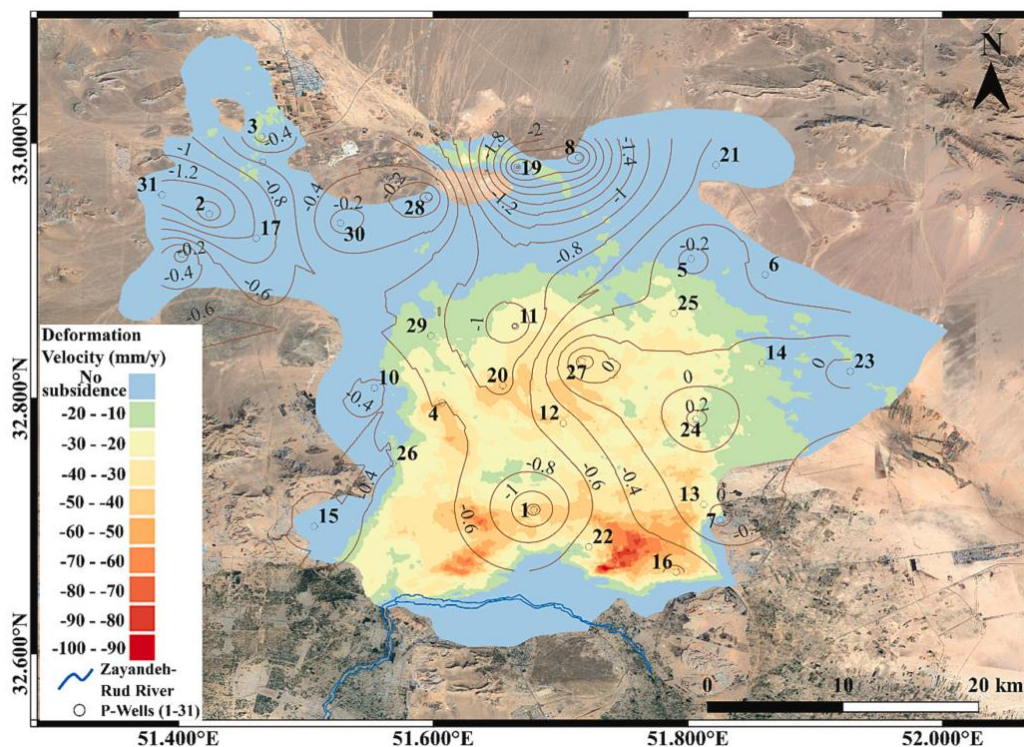


شکل ۴ - نقشه فرونشست اصفهان (گزارش مرحله سوم فرونشست اصفهان - شهرداری - مطالعات شرکت مهندسی مشاور بنیان زمین پایدار

۲.۲.۲. وضعیت فرونشست دشت اصفهان بر خوار

در شکل ۵، نقشه با طیف رنگی از زرد روشن تا قرمز تیره، نرخ فرونشست سالیانه در مقیاس میلی متر بر سال را نشان می دهد. نواحی قرمز (مرکز و شمال شرق استان) دارای بیشترین نرخ فرونشست (تا ۶۷ میلی متر در سال) هستند که به وضوح بخش هایی مانند خمینی شهر، برخوار، شاهین شهر و حوزه های حاشیه زاینده رود را شامل می شوند.





شکل ۶- نقشه نرخ فرونشست در دشت اصفهان - برخوار^۱

بر اساس شکل ۶، بیشترین سرعت جابجایی^۲ و تغییر شکل زمین^۳ در بخش‌های مرکزی و جنوبی آبخوان و محدوده شهر اصفهان مشاهده می‌شود.

۳.۲.۲. جمع‌بندی

با توجه به شواهد مکانی و نقشه‌های مختلف فرونشست، مشخص می‌شود که مسئله فرونشست در اصفهان یک پدیده موضعی و صرفاً شهری نیست، بلکه رفتاری ناحیه‌ای و وابسته به کل آبخوان اصفهان-برخوار و حوضه آبریز زاینده‌رود دارد. نقشه حوضه و آبخوان‌ها نشان می‌دهد که شهر اصفهان مستقیماً بر روی آبخوان اصفهان-برخوار قرار گرفته و تمرکز چاه‌های بهره‌برداری از آب زیرزمینی در همین محدوده است. نتایج حاصل از نقشه‌های نرخ سالانه و تجمعی فرونشست در شهر اصفهان بیانگر بیشترین مقادیر جابجایی زمین در بخش‌های مرکزی، شمالی و شمال شرقی شهر است؛ نواحی‌ای که با افت شدید سطح آب زیرزمینی، تراکم چاه‌ها و رسوبات ریزدانه هم‌زمانی دارند. در مقیاس دشت نیز، الگوی فرونشست از جنوب به سوی مرکز و شمال شرق تشدید شده و مناطقی مانند برخوار، شاهین شهر، خمینی شهر و حاشیه‌های زاینده‌رود را در بر می‌گیرد؛ به گونه‌ای که در برخی نقاط، نرخ فرونشست به چندین سانتی‌متر در سال می‌رسد. این الگو، با یافته‌های روش‌های نوین پایش نظیر SBAS-InSAR سازگار است و نشان می‌دهد بیشترین سرعت تغییر شکل زمین در محدوده آبخوان و به‌ویژه پیرامون شهر اصفهان رخ می‌دهد. در

^۱ Sharifi A, Khodaei B, Ahrari A, Hashemi H, Haghighi AT. Can river flow prevent land subsidence in urban areas Science of The Total Environment. ۲۰۲۴;۹۱۷:۱۷۰۵۵۷.

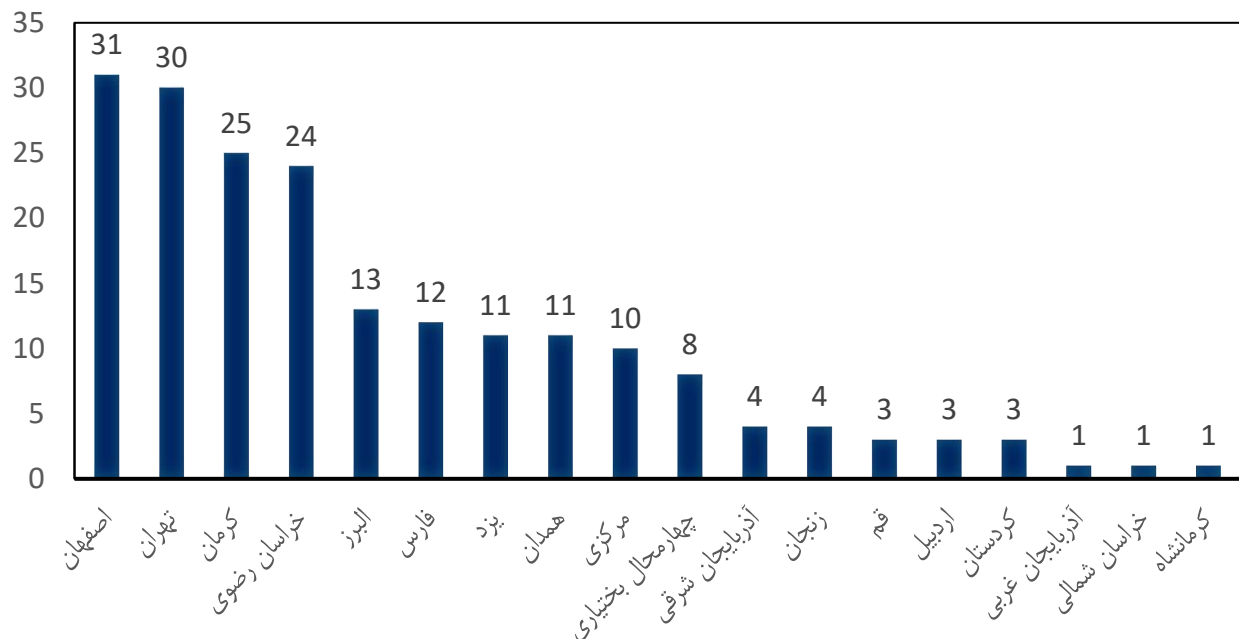
^۲ Displacement

^۳ Deformation

نتیجه، کنترل و مدیریت فرونشست در شهر اصفهان بدون رویکرد مدیریت یکپارچه آبخوان اصفهان-برخوار امکان پذیر نیست و لازم است برنامه ریزی ها بر مبنای محدوده های هیدروژئولوژیک، نه مرزهای اداری و سیاسی، انجام گیرد.

۳.۲. مقایسه فرونشست اصفهان با سایر مناطق کشور

داده های سنجش از دور در سال ۲۰۲۴ نشان می دهد که استان اصفهان یکی از کانون های مهم فرونشست زمین در ایران محسوب می شود. با این حال، در برخی مناطق دیگر کشور مانند رفسنجان و آرزویه در استان کرمان، ساوجبلاغ و نظرآباد در استان البرز و بخش هایی از استان گلستان، نرخ سالانه فرونشست یا وسعت پهنه های درگیر حتی از اصفهان نیز بیشتر گزارش شده است. شکل ۷ تعداد شهرهای واقع در پهنه های با خطر بالای فرونشست زمین در استان های مختلف کشور را نشان می دهد. بر اساس شکل ۷، استان اصفهان با ۳۱ شهر بیشترین تعداد شهرهای در معرض فرونشست را دارد و پس از آن تهران با ۳۰ شهر، کرمان با ۲۵ شهر و خراسان رضوی با ۲۴ شهر قرار دارند. همچنین استان های البرز (۱۳ شهر)، فارس (۱۲ شهر)، یزد و همدان (۱۱ شهر) و مرکزی (۱۰ شهر) نیز تعداد قابل توجهی از شهرهای در معرض خطر را شامل می شوند. به طور کلی، این شکل نشان می دهد که بخش قابل توجهی از شهرهای در معرض خطر فرونشست در استان های مرکزی کشور قرار دارند و استان اصفهان بیشترین سهم را در این میان دارد.



شکل ۷- تعداد شهرهای واقع بر پهنه های با خطر بالای فرونشست زمین در استان های کشور^۴

^۴ <https://rc.majlis.ir/fa/report/show/۱۷۵۵۲۶۹>



در مقابل، استان‌هایی مانند اردبیل، کردستان، آذربایجان غربی، خراسان شمالی و کرمانشاه دارای مقادیر بسیار پایین تری در شاخص ریسک فرونشست هستند. به طور کلی، این شکل نشان می‌دهد که بیشترین ریسک فرونشست زمین در استان‌های مرکزی و پرجمعیت کشور متمرکز است و استان اصفهان در بالاترین سطح خطر قرار دارد.

همانطور که در دو شکل بالا مشاهده می‌شود استان اصفهان در سال ۱۴۰۱ دارای بیشترین تعداد شهر واقع در پهنه فرونشستی و ریسک فرونشست در کشور است و بعد از اصفهان، شهر تهران با فاصله کم، دارای بیشترین ریسک است. در جدول ۳ مقایسه شهر اصفهان با مهم‌ترین شهرهای دنیا که دارای بحران جدی فرونشست هستند انجام گردیده است.

جدول ۱- مقایسه شهر اصفهان با مهم‌ترین شهرهای دارای بحران فرونشست جهان، بر اساس نرخ فرونشست، مناطق مسکونی، صنعتی و کشاورزی درگیر و پیامدهای زیست‌محیطی^۵

شهر/منطقه	نرخ فرونشست (سانتیمتر/سال)	مناطق مسکونی تحت تاثیر	مناطق صنعتی درگیر	مناطق کشاورزی درگیر	آسیب زیست‌محیطی
اصفهان (ایران)	تا ۱۸	۳۱ شهر، یک میلیون نفر	صنایع مادر، شهرک‌های صنعتی	دشت برخوار، کاشان، شرق اصفهان	آثار تاریخی (سی و سه پل، میدان نقش جهان)، ترک زمین، مهاجرت اجباری
جاکارتا (اندونزی)	تا ۲۵ در برخی مناطق	میلیون‌ها نفر	حاشیه رودخانه و مناطق بندری	کم؛ بیشتر شهری	نشست ساختمان‌ها، افزایش طغیان آب، مهاجرت انسانی
هوی‌چی‌مین‌سیتی (ویتنام) ^۶	تا ۴۳ (برخی نقاط)، میانگین ۱۶	بیش از ۹ میلیون نفر	مناطق شهری و بنادر	باغات پیرامونی	خسارت به زیرساخت، سیلاب پی‌درپی
شانگهای (چین)	تا ۲۵ (برخی نقاط)، میانگین پایین‌تر	میلیون‌ها نفر	شهرک‌های فناوری و اسکله‌ها	پیرامون شهر	آسیب به زیرساخت ریلی و دریایی، فرونشست محله‌ها
مکزیکوسیتی (مکزیک)	تا ۵۰، میانگین ۳۵-۲۰	۲۰+ میلیون نفر	صنایع شهری و قدیمی	نواحی کشاورزی اطراف	تخریب راه و مترو، فروچاله‌ها، مشکلات مدیریت آب
هیوستون (آمریکا) ^۷	تا ۱۷	چندصد هزار نفر	صنایع نفتی و حمل و نقل	حریم شهری	آسیب زیرساخت پتروشیمی و آب‌رسانی
دلتای بنگلادش/چیناگونگ	تا ۳۷	چند صد هزار نفر	بنادر و صنایع دریایی	پرجمعیت‌ترین مناطق برنج کشور	تهدید غرق شهرها، کاهش حاصل خیزی زمین‌ها
ونیز (ایتالیا)	تا ۴ (در کنترل)	زیر یک میلیون نفر	صنایع گردشگری و خدمات	محدود	تخریب بناهای تاریخی، ورود آب دریا به شهر

^۵ <https://cms.deltares.nl/assets/common/downloads/Sinking-cities-۱.pdf>

^۶ <https://www.visualcapitalist.com/cp/visualized-which-coastal-cities-are-sinking-the-fastest/>

^۷ <https://www.nature.com/articles/s۰۰۲۴۰-۰۲۵-۴۴۲۸۴-y>

به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت اصفهان در میان شهرهای ایران بالاترین ریسک فرونشست را دارد؛ این فرونشست علاوه بر حوزه‌های وسیع کشاورزی، صنعت و مناطق مسکونی، آثار مخرب زیست‌محیطی پایداری نسبت به بیشتر شهرهای ایران به جا گذاشته است. مناطق شهری (۳۱ شهر و منطقه استان)، آثار تاریخی متعدد، بخش عمده‌ای از صنایع و پهنه‌های کشاورزی اصفهان تحت تاثیر فرونشست هستند و متوسط نرخ فرونشست سالانه بین ۱۵ تا ۲۵ سانتیمتر گزارش شده است. در مقایسه، تهران و البرز نیز دچار نرخ بالای فرونشست تا ۳۰ سانتیمتر هستند اما تمرکز خسارت به ویژه بر نواحی صنعتی و حاشیه‌های شهری است. مشهد (خراسان رضوی)، دشت‌های رفسنجان و کرمان، شیراز و مرودشت، قزوین، یزد و همدان نیز با نرخ‌های بالا و تهدید جدی برای زمین‌های کشاورزی و برخی زیرساخت‌های شهری روبه‌رو هستند.

۳. ریسک، پیامدها و اثرات فرونشست

فرونشست زمین صرفاً یک پدیده زمین‌شناختی نیست، بلکه فرآیندی است که در صورت تداوم، می‌تواند طیف گسترده‌ای از پیامدهای زیرساختی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی را در یک منطقه رقم بزند. هنگامی که این پدیده در پهنه‌های شهری و مناطق دارای تراکم جمعیت، زیرساخت‌های حیاتی و میراث فرهنگی رخ می‌دهد، آثار آن از یک مسئله فنی فراتر رفته و به یک چالش چندبعدی در حوزه مدیریت سرزمین و تاب‌آوری شهری تبدیل می‌شود.

در دشت اصفهان-برخوار، تداوم افت سطح آب‌های زیرزمینی و تشدید نرخ فرونشست سبب شده است که بخش‌های قابل توجهی از شهر و پیرامون آن در معرض مخاطرات ناشی از این پدیده قرار گیرند. این وضعیت نه تنها پایداری سازه‌ها و زیرساخت‌های شهری را تهدید می‌کند، بلکه می‌تواند بر امنیت اقتصادی، معیشت، هویت فرهنگی و کیفیت زندگی ساکنان نیز اثرگذار باشد.

بر این اساس، در این فصل تلاش شده است با تکیه بر چارچوب مفهومی ریسک، ابعاد مختلف خطر، میزان آسیب‌پذیری و عناصر در معرض خطر در محدوده دشت اصفهان-برخوار بررسی شود. در ادامه، ضمن معرفی مفهوم ریسک و مؤلفه‌های آن، مهم‌ترین پیامدهای فرونشست در حوزه‌های زیرساختی، محیط‌زیستی، اقتصادی، اجتماعی و فرهنگی تحلیل شده و تصویری جامع از دامنه اثرات این پدیده در منطقه ارائه می‌شود.

۳.۱. مفهوم ریسک فرونشست زمین

برای محاسبه ریسک فرونشست زمین مدل‌ها و روابط مختلفی به کار می‌رود، اما رایج‌ترین رویکرد بر پایه حاصل ضرب سه مؤلفه اصلی است:

ریسک = آسیب‌پذیری × در معرض خطر بودن × شدت خطر فرونشست

بدیهی است که حذف هر یک از این مؤلفه‌ها، مفهوم ریسک را بی‌معنا می‌کند؛ برای مثال، ممکن است در یک پهنه بیابانی نرخ فرونشست بالا باشد، اما به دلیل نبود جمعیت و زیرساخت، آسیب‌پذیری و در معرض خطر بودن صفر است و در نتیجه ریسک

قابل توجهی شکل نمی گیرد، هرچند خطر فرونشست در آن ناحیه همچنان واقعی و از نظر محیط زیستی و هیدروژئولوژیکی مهم است.

در مقابل، ممکن است در یک منطقه شهری حجم بالایی از جمعیت و زیرساخت وجود داشته باشد، اما به دلیل پایین بودن شدت خطر فرونشست، ریسک همچنان کم باقی بماند. در نقطه مقابل این وضعیت، بدترین سناریو زمانی رخ می دهد که هر سه مؤلفه در سطح بالا هم زمان حضور داشته باشند؛ یعنی منطقه ای دارای آسیب پذیری بالا، جمعیت و زیرساخت های گسترده در معرض خطر، و همچنین شدت قابل توجه فرونشست باشد. در چنین شرایطی ریسک به حداکثر می رسد و مداخله مدیریتی ضرورت فوری پیدا می کند.

در دشت اصفهان-برخوار هر سه مؤلفه اصلی ریسک در سطح بالا هم زمان حضور دارند و همین موضوع این پهنه را به یکی از بحرانی ترین نقاط کشور از نظر فرونشست تبدیل کرده است. شدت خطر به واسطه افت شدید و طولانی مدت سطح آب های زیرزمینی و نرخ های فرونشست بعضاً بیش از استانداردهای جهانی در سطح بالایی قرار دارد. هم زمان، تمرکز گسترده جمعیت شهری، تراکم بالای زیرساخت های حیاتی (نظیر خطوط انتقال آب و گاز، شبکه حمل و نقل، بیمارستان ها، مدارس و بناهای تاریخی) و توسعه فشرده کالبدی شهر، سطح «در معرض خطر بودن» را به حداکثر رسانده است. از سوی دیگر، آسیب پذیری سازه ای و محیطی نیز به دلیل قدمت بافت ها، حساسیت لایه های زمین شناسی و وجود خاک های سست و واگرا در بسیاری از مناطق شهری و پیرامونی بالا ارزیابی می شود. تجمع این سه عامل، ریسک فرونشست در اصفهان را به سطحی رسانده که نیازمند توجه مدیریتی فوری، برنامه ریزی پیش گیرانه و اقدام اصلاحی در کوتاه مدت و میان مدت است.

۲.۳. خطر خاک های واگرا در پهنه فرونشست اصفهان و اطراف آن

یکی از پارامترهای مهم در ارزیابی ریسک فرونشست زمین، وجود پهنه های خاک واگرا است. خاک های واگرا در اثر افت سطح آب زیرزمینی و از دست دادن رطوبت دچار شکاف ها و ترک های طولی می شوند و زمینه را برای گسترش فرسایش تونلی و بروز فروریزش های طولی فراهم می کنند.

این پدیده می تواند خطرات قابل توجهی برای زیرساخت های شهری، راه ها، ساختمان ها، تأسیسات و به ویژه آثار تاریخی و ارزشمند شهر اصفهان ایجاد کند. بر اساس مطالعات^۸ انجام شده، وجود این نوع خاک ها در پهنه فرونشست اصفهان نیازمند توجه ویژه در برنامه ریزی عمرانی و مدیریت منابع آب زیرزمینی است تا از بروز خسارات ناشی از شکاف های سطحی و ناپایداری زمین جلوگیری شود.

به ویژه در اطراف شهر اصفهان، شواهد میدانی نشان دهنده شکاف های سطحی و آثار فرسایش تونلی است که بیانگر فعال بودن فرآیند واگرایی خاک در شرایط کاهش رطوبت و افت سطح آب زیرزمینی می باشد. این وضعیت ضرورت اقدامات کنترلی و پایش مداوم پایداری خاک را بیش از پیش آشکار می سازد.^۹

^۸ فرونشست زمین در اصفهان و اطراف آن، علی بیت اللهی و همکاران، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، ۱۴۰۱

^۹ منبع پیشین

۳.۳. آسیب پذیری زیرساختی

تخریب ساختمان‌ها، ترک برداشتن زیرساخت‌ها، نشست جاده‌ها و راه آهن، فروچاله‌ها، صدمات عمده به شبکه‌های آب و فاضلاب شهری و خطوط انتقال انرژی از مهم ترین پیامدهای مستقیم فرونشست است.

فرونشست ناهمگن^{۱۰} برای سازه‌ها بسیار مخرب است و حتی نرخ‌های پایین اما غیر یکسان نیز ترک و شکست جدی در زیرساخت‌ها ایجاد می‌کند.^{۱۱}

در مناطق صنعتی، فروکش کردن زمین باعث توقف تولید، آسیب واحدهای پتروشیمی، صنایع سنگین و از دست رفتن سرمایه‌های زیاد می‌شود. فرونشست ظرفیت ذخیره آبخوان‌ها را به طور دائم کاهش داده، کیفیت منابع آب زیرزمینی را پایین می‌آورد و باعث شور شدن خاک، خشک شدن تالاب‌ها و بیابان‌زایی می‌شود.

۳.۳.۱. المان‌های شهری آسیب پذیر واقع در پهنه فرونشست

در این بخش، در جدول ۲ فهرست جامع المان‌های شهری آسیب‌پذیر واقع در پهنه‌های دارای خطر بالای فرونشست شهر اصفهان ارائه شده است. این المان‌ها بر اساس ماهیت کارکردی در چهار گروه اصلی طبقه‌بندی شده‌اند تا امکان تحلیل هدفمند ریسک و اولویت‌بندی اقدامات مدیریتی فراهم شود. دسته‌بندی شامل «زیرساخت‌های اضطراری و حساس»، «خدمات شهری، اجتماعی و فرهنگی»، «زیرساخت‌های فنی و حمل و نقل»، و «بخش جمعیتی و سکونت» است. برای هر المان، نام، تعداد/مقدار و توضیح تکمیلی ذکر شده تا تصویری روشن از گستره و شدت قرارگیری زیرساخت‌های حیاتی و جمعیت در معرض خطر فرونشست فراهم شود.

جدول ۲- لیست المان‌های شهری آسیب‌پذیر واقع در پهنه فرونشست به تفکیک دسته‌بندی

ردیف	دسته‌بندی	نوع المان	تعداد / مقدار	توضیح
۱	زیرساخت‌های اضطراری و حساس	ایستگاه آتش‌نشانی	۹ ایستگاه	—
۲		فلکه آتش‌نشانی	۷۲۴ عدد	—
۳		بیمارستان	۳ بیمارستان	—
۴		مراکز پزشکی-درمانی	۱۱۸ مرکز	—
۵	خدمات شهری، اجتماعی و فرهنگی	مسجد	۳۳۸ مسجد	—
۶		کتابخانه	۳۷ کتابخانه	—
۷		هتل	۱ هتل	—
۸		مراکز فرهنگی	۱۹ مرکز	—

^{۱۰} Differential Subsidence

^{۱۱} <https://www.nature.com/articles/s0۰۲۴۰-۰۲۵-۴۴۲۸۴-y>

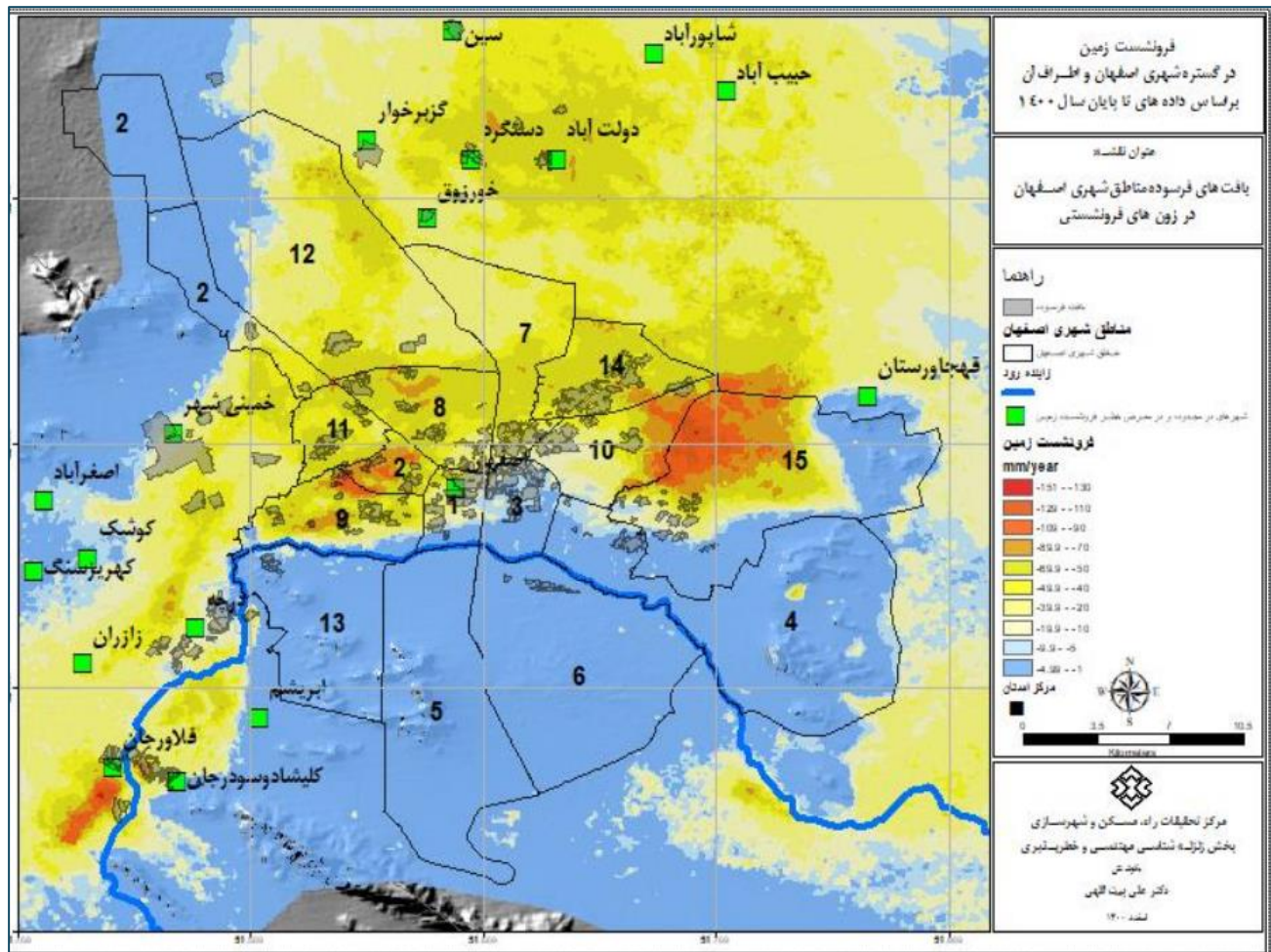


ردیف	دسته بندی	نوع المان	تعداد / مقدار	توضیح
۹		مراکز توریستی	۱۴ مرکز	—
۱۰		مراکز آموزشی	۳۷۱ مرکز	شامل ۲۵۸ مدرسه
۱۱		مدرسه	۵۸۰ مدرسه	آمار جداگانه ارائه شده
۱۲		مراکز دولتی	۷۷ مرکز	—
۱۳		مراکز صنعتی	۳۶ مرکز	—
۱۴	زیرساخت های فنی و حمل و نقل	پل	۹,۳۷۴ پل	بسیار پرریسک
۱۵		پمپ گاز CNG	۸ عدد	—
۱۶		پمپ بنزین	۱۹ عدد	—
۱۷		مخزن ذخیره	۱۴ مخزن	—
۱۸	جمعیتی و سکونت	جمعیت ساکن	۱,۲۴۲,۶۰۲ نفر	مناطق ۸ و ۱۰ بیشترین سهم
۱۹		واحدهای مسکونی	۳۷۸,۷۷۱ واحد	—
۲۰		واحدهای فاقد اسکلت	۱۲۷,۱۲۴ واحد	ریسک بسیار بالا
۲۱		بافت فرسوده پرریسک	۱۶۵۲ هکتار	منطقه ۱۴ رکورددار

با توجه به فهرست المان های شهری آسیب پذیر در جدول ۲، روشن است که بخش قابل توجهی از زیرساخت های حیاتی، خدمات عمومی و جمعیت شهر اصفهان در پهنه های دارای خطر بالای فرونشست واقع شده اند. با این حال، صرف دانستن نوع و تعداد این المان ها برای ارزیابی ریسک کافی نیست و باید محل استقرار آن ها نسبت به شدت واقعی فرونشست نیز بررسی شود. از این رو، در ادامه با استفاده از نقشه های پهنه بندی نرخ فرونشست، توزیع مکانی این زیرساخت ها و جمعیت در معرض خطر در سطح شهر و دشت اصفهان-برخوار تحلیل می شود تا ارتباط میان الگوی فرونشست و تمرکز المان های حساس شهری به صورت دقیق تری مشخص گردد. در همین راستا، شکل ۱۰ الگوی فضایی نرخ سالانه فرونشست زمین را در پهنه شهری اصفهان و شهرستان برخوار تا پایان سال ۱۴۰۰ نشان می دهد.

شکل ۸ نقشه نرخ سالانه فرونشست زمین را در پهنه شهری اصفهان و شهرستان برخوار تا پایان سال ۱۴۰۰، بر پایه داده های GPS نمایش می دهد. رنگ ها شدت فرونشست را نشان می دهند؛ به طوری که آبی بیانگر پایداری نسبی، زرد تا نارنجی نشان دهنده فرونشست متوسط و قرمز تیره معرف بیشترین میزان فرونشست (بیش از ۱۸۰ میلی متر در سال) است. محدوده های شهری شماره گذاری شده و موقعیت ایستگاه های GPS با مربع های سبز مشخص شده اند و مسیر زاینده رود نیز با خط آبی نمایش داده شده است.

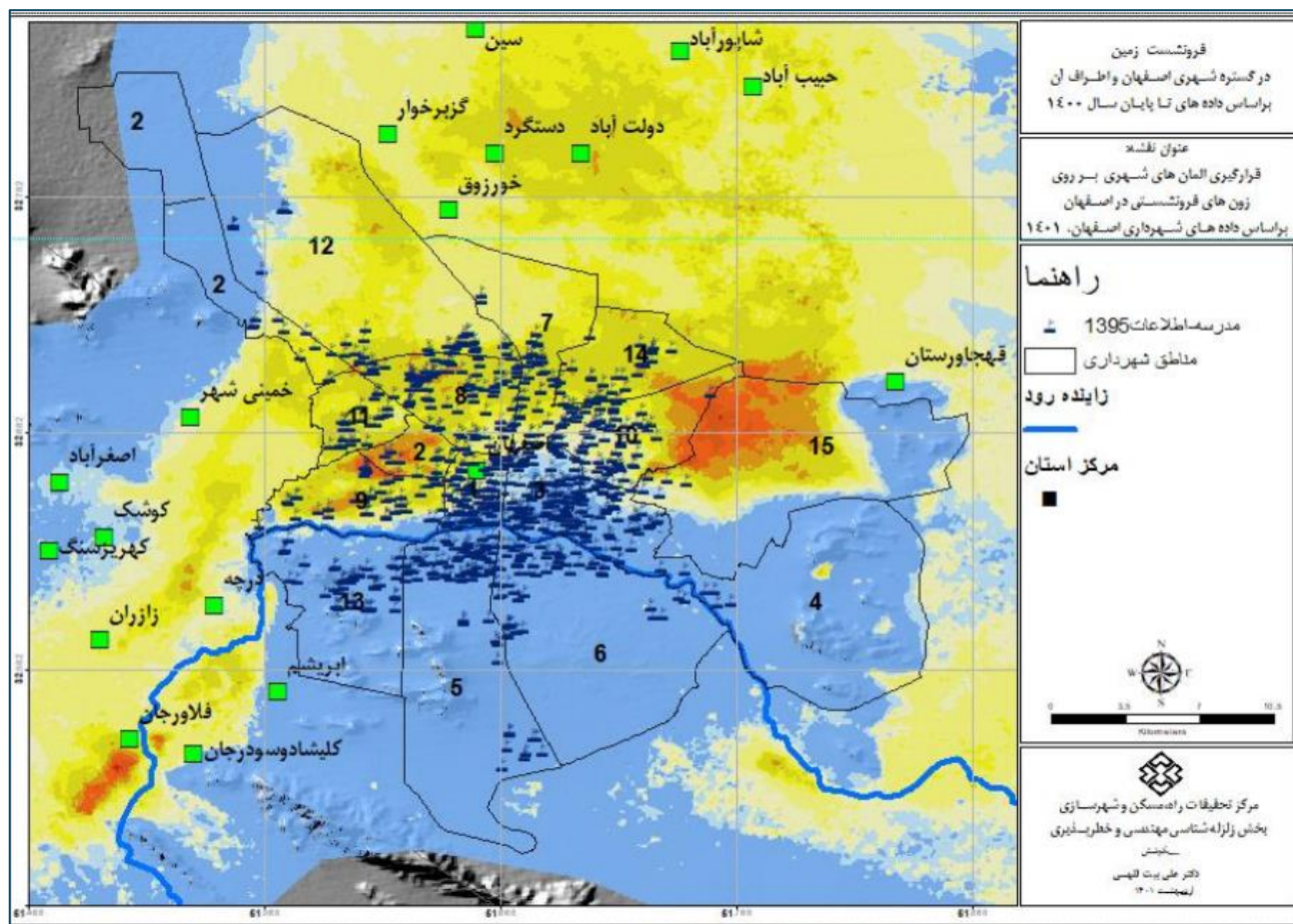
بر اساس الگوی رنگ ها، بیشترین فرونشست در شرق و شمال شرقی اصفهان (به ویژه مناطق ۱۴، ۱۵ و بخش هایی از ۸) رخ داده است؛ مناطقی که با افت شدید سطح آب زیرزمینی، فاصله بیشتر از رودخانه و رسوبات ریزدانه هم زمانی دارند. در مقابل، بخش های جنوبی و جنوب شرقی شهر (نظیر مناطق ۴، ۵، ۶ و ۱۳) عمدتاً در محدوده آبی قرار دارند و از پایداری نسبی برخوردارند. این توزیع نشان می دهد شدت فرونشست به ترکیبی از شرایط هیدروژئولوژیکی، تراکم چاه ها و فاصله از بستر رودخانه وابسته است.



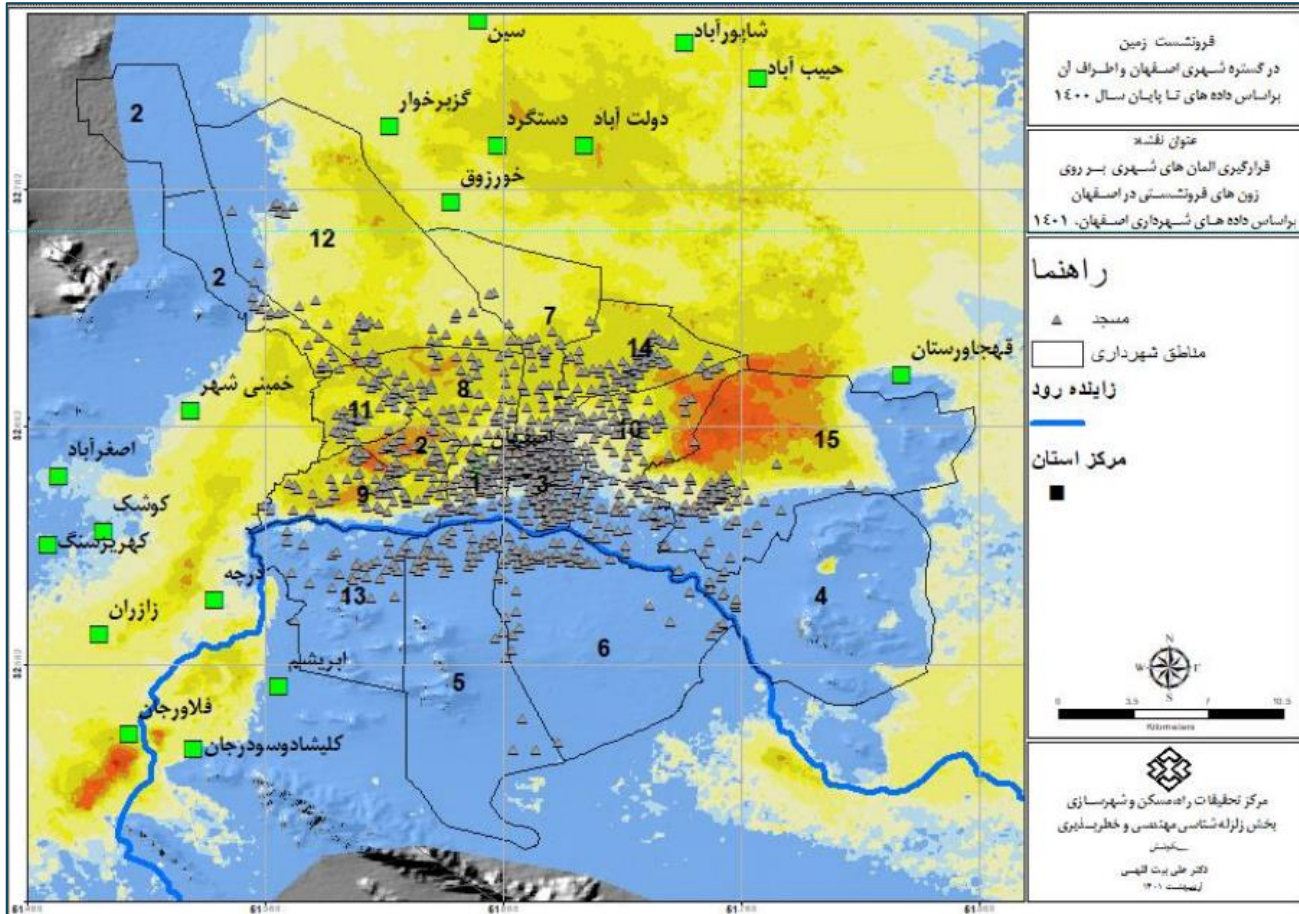
شکل ۸- نقشه یافت فرسوده مناطق شهر اصفهان در زون های فرونشست

با توجه به نتایج نقشه های نرخ فرونشست، گام بعدی، بررسی این است که کدام یک از المان های شهری حساس در پهنه های با خطر بالاتر قرار گرفته اند. از آنجا که تعداد نقشه ها و لایه های اطلاعاتی متعدد است، در این گزارش فقط برخی از آن ها به عنوان نمونه مورد تحلیل تفصیلی قرار گرفته اند تا منطق ارزیابی ریسک روشن شود. در میان انواع المان ها، زیرساخت های آموزشی و به ویژه مدارس به دلیل تراکم جمعیت دانش آموزی و اهمیت اجتماعی، از اولویت بالاتری برخوردارند. بر همین اساس، در شکل ۱۱، موقعیت مدارس شهری نسبت به پهنه های مختلف شدت فرونشست نمایش داده شده است تا میزان در معرض خطر بودن این زیرساخت های آموزشی حساس به طور مشخص تری ارزیابی شود.

شکل ۹، نقشه میزان شدت فرونشست زمین را در گستره شهری اصفهان و برخوار تا پایان سال ۱۴۰۰ نشان می دهد و هم زمان موقعیت مدارس شهری (داده های ۱۳۹۵) را با علامت های آبی مشخص کرده است. طیف رنگی از آبی تا قرمز بیانگر افزایش شدت فرونشست است و محدوده های شهرداری برای تحلیل مکانی دقیق تر ترسیم شده اند. بر اساس هم پوشانی داده ها، تعداد زیادی از مدارس در مناطق شرقی، شمال شرقی و بخش هایی از مرکز شهر در پهنه های متوسط تا شدید فرونشست قرار گرفته اند؛ به ویژه در مناطق ۲، ۹، ۱۴، ۸ و ۱۰. این وضعیت نشان می دهد بخشی از زیرساخت های آموزشی شهر در نواحی با پایداری کمتر زمین واقع شده و نیازمند توجه و ارزیابی مهندسی بیشتر هستند.



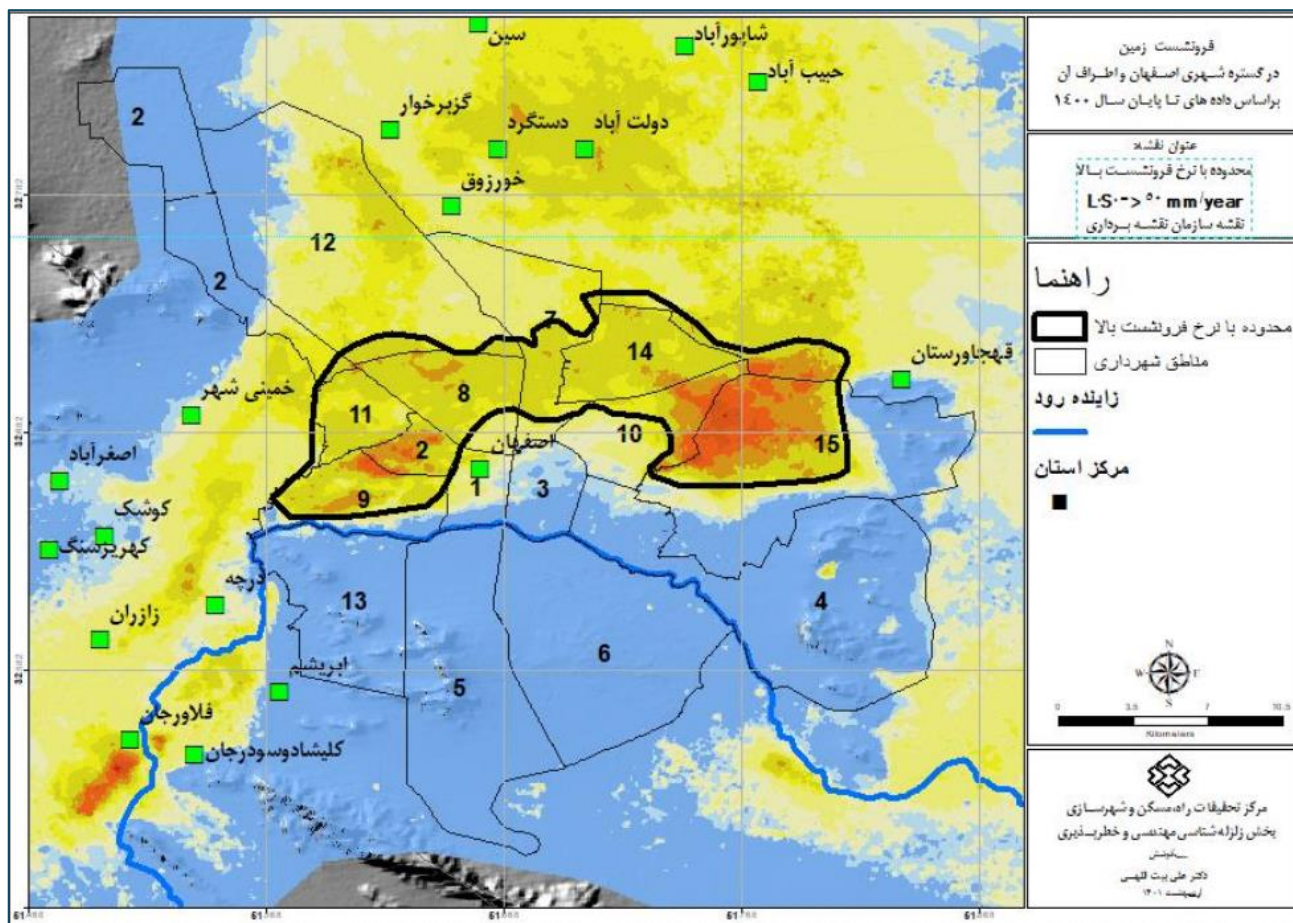
شکل ۹- نقشه المان شهری مدارس در معرض پهنه های فرونشست



شکل ۱۰- نقشه المان شهری در معرض پهنه های فرونشست- مساجد

در این شکل، موقعیت مساجد شهری با نماد مثلث های کوچک خاکستری در پهنه های مختلف فرونشست نمایش داده شده است. هم پوشانی محل استقرار مساجد با زون های فرونشست نشان می دهد که تراکم قابل توجهی از این مراکز مذهبی- اجتماعی در محدوده هایی واقع شده اند که بر اساس نقشه های پیشین، جزو پهنه های دارای خطر بالاتر محسوب می شوند. از آنجا که بسیاری از مساجد در بافت های میان سال و قدیمی شهر قرار دارند و بعضاً دارای سیستم های سازه ای سنتی یا غیره روز هستند، قرارگیری آنها در نواحی مستعد فرونشست می تواند به بروز ترک های سازه ای، نشست غیریکنواخت پی، آسیب به تزئینات معماری و کاهش ایمنی کاربران منجر شود.

از مقایسه داده های استانی ارائه شده در این بخش، می توان استنتاج نمود که استان اصفهان و بویژه شهر اصفهان، بالاترین مقدار ریسک فرونشست زمین را داراست. این ریسک بالا از یک طرف به دلیل نرخ بالای فرونشست زمین و از طرف دیگری به دلیل در معرض قرارگیری جمعیت بسیار بالا و مستحکات و آثار تاریخی متعدد ارزشمند واقع بر پهنه های با نرخ بالای فرونشست زمین در این گستره می باشد.



شکل ۱۱- مناطق شهری اصفهان در معرض قرارگیری پهنه های فرونشست

برای اجرای کردن برنامه های کاهش خطر فرونشست زمین به صورت پایلوت در اصفهان، زمان محدود و کوتاهی پیش روی مسئولان کشور است. هر گونه “تاخیر” ممکن است شرایط را در محدوده اصفهان به مرحله بازگشت ناپذیری سوق دهد.

۴.۳. پیامدهای فرونشست

فرونشست زمین در اصفهان از یک مسئله صرفاً ژئوتکنیکی فراتر رفته و به بحرانی چندبعدی با پیامدهای عمیق اجتماعی، اقتصادی و فرهنگی تبدیل شده است. تمرکز بالای جمعیت، زیرساخت های حیاتی، بافت های تاریخی و فضاها و مذهب فرهنگی در پهنه های با ریسک زیاد فرونشست، سبب شده آثار این پدیده مستقیماً بر کیفیت زندگی، امنیت معیشتی و هویت شهری و منطقه ای اثر بگذارد.

۴.۳.۱. پیامدهای اجتماعی و انسانی

فرونشست می تواند به تدریج شرایط را برای جابجایی اجباری جمعیت فراهم کند؛ چه به دلیل از دست رفتن قابلیت سکونت برخی مناطق، و چه به علت ناایمن شدن زیرساخت ها. در صورت تشدید بحران، افزایش مهاجرت درون شهری و روستا-



شهر دور از انتظار نخواهد بود؛ وضعیتی که با گسست شبکه‌های اجتماعی، کاهش احساس تعلق مکانی و تعمیق نابرابری فضایی همراه است.

ابعاد فعلی بحران قابل توجه است:

- بیش از ۳.۵ میلیون نفر از جمعیت شهری و روستایی اطراف اصفهان روی پهنه‌های فرونشستی سکونت دارند و بیش از ۱.۴ میلیون نفر در مناطق با ریسک بسیار بالای فرونشست زندگی می‌کنند.
- هزاران واحد مسکونی و ساختمان حساس، از جمله ایستگاه‌های آتش‌نشانی، مساجد، کتابخانه‌ها، بیمارستان‌ها، هتل‌ها، مدارس و جایگاه‌های سوخت در پهنه‌های پرریسک قرار گرفته‌اند و برخی مدارس به طور کامل تخلیه شده‌اند؛ امری که هم ایمنی شهروندان و هم استمرار خدمات عمومی را تهدید می‌کند.

۳.۴.۲. پیامدهای اقتصادی و زیرساختی

تخریب تدریجی ساختمان‌ها و زیرساخت‌ها، هزینه‌های سنگینی بر اقتصاد شهری تحمیل می‌کند.

- زیرساخت‌های تاریخی و گردشگری مانند سی‌وسه‌پل، پل خواجه و میدان نقش جهان، به همراه آثار هنری، جاده‌ها و خطوط ارتباطی، در معرض آسیب جدی قرار دارند؛ آسیبی که علاوه بر هزینه‌های مرمت، به کاهش درآمد گردشگری و افت جذابیت سرمایه‌گذاری منجر می‌شود.
- آسیب به شبکه‌های حمل‌ونقل و تأسیسات، موجب افزایش هزینه‌های نگهداشت، اختلال در خدمات‌رسانی و کاهش تاب‌آوری اقتصادی شهر می‌گردد.

۳.۴.۳. پیامدهای آبخوان، کشاورزی و امنیت غذایی

در صورت تداوم فرونشست، لایه‌های آبدار سابق خاک متراکم شده، تخلخل و ضریب ذخیره و انتقال خود را از دست می‌دهند و عملاً نفوذناپذیر می‌شوند. گسترش این روند در کل ضخامت آبخوان، به «مرگ آبخوان» می‌انجامد؛ وضعیتی که پیامدهای آن عبارت است از:

- از دست رفتن اراضی وسیع قابل کشت،
- به خطر افتادن امنیت غذایی،
- فرسایش بیشتر خاک و نابودی لایه سطحی مغذی،
- و تخریب اکوسیستم‌های وابسته به آب زیرزمینی.

در دشت اصفهان:

- سالانه حدود ۳۴۰ میلیون متر مکعب از ظرفیت آبخوان از دست می‌رود،



- و طی ۱۰ سال آینده این عدد به حدود ۳.۴ میلیارد متر مکعب خواهد رسید؛
- یعنی کشاورزی منطقه عملاً در مسیر نابودی قرار دارد. در چنین شرایطی، حتی با بازگشت آب، به دلیل کاهش شدید نفوذپذیری خاک، امکان احیای مؤثر منابع آب زیرزمینی بسیار محدود خواهد بود. بستر زاینده‌رود نیز با فشرده شدن بیش از حد، ممکن است در صورت جریان آب، مانند یک کانال تقریباً نفوذناپذیر عمل کند و فرصت تغذیه آبخوان‌ها از بین برود.

۴.۴.۳. پیامدهای فرهنگی و هویتی

فرونشست، سرمایه‌های فرهنگی و هویتی اصفهان را نیز تحت فشار قرار داده است:

- آسیب به مساجد، فضاهای مذهبی و مراکز فرهنگی، تنها یک مسئله سازه‌ای نیست، بلکه به معنای تضعیف کارکردهای اجتماعی، مذهبی و شبکه‌های همبستگی محلی است.
- تهدید بناهای تاریخی شاخص مانند سی‌وسه پل، پل خواجه و میدان نقش جهان، معادل به خطر افتادن بخشی از هویت تاریخی ایران در مقیاس ملی و جهانی است.
- نابودی باغ‌ها، مزارع و مناظر فرهنگی-طبیعی وابسته به آب، به گسست تدریجی خاطره جمعی و چشم‌اندازهای هویتی ساکنان منجر می‌شود.

۵.۴.۳. چشم‌انداز منطقه‌ای بحران

ادامه روند فعلی فرونشست در اصفهان، چشم‌اندازی نگران‌کننده در مقیاس منطقه‌ای ترسیم می‌کند؛ چشم‌اندازی که با:

- افزایش ریزگردها،
 - مهاجرت جمعیت و تخلیه سکونتگاه‌ها،
 - نابودی ظرفیت‌های کشاورزی و معیشت‌های وابسته به زمین،
- همراه است و نه تنها شهر اصفهان، بلکه کل منطقه مرکز ایران شامل یزد و بخش‌هایی از چهارمحال و بختیاری را تحت تأثیر قرار خواهد داد. در چنین بستری، فرونشست باید به‌عنوان یک بحران چندسطحی اجتماعی-اقتصادی-فرهنگی دیده شود، نه صرفاً یک مسئله ژئوتکنیکی؛ بحرانی که مدیریت آن مستلزم برنامه‌ریزی میان‌بخشی، بلندمدت و منطقه‌ای است.



۴. علل ایجاد و تشدید فرونشست در اصفهان

به منظور درک دقیق سازوکارهای ایجاد نشست و فرونشست زمین در آبخوان اصفهان-برخوار، لازم است مجموعه عوامل مؤثر بر این پدیده‌ها به صورت ساختارمند شناسایی و دسته‌بندی شوند.

جدول ۳ با تفکیک عوامل انسانی، طبیعی-زمین‌شناسی و فرایندهای سطحی، نقش هر عامل را همراه با اثر فنی آن بر زمین، سرعت و میزان اثرگذاری، و میزان وابستگی آن به افت سطح آب زیرزمینی نشان می‌دهد. این دسته‌بندی کمک می‌کند تمایز میان عوامل «اصلی و محرک» مانند افت سطح آب با عوامل «زمینه‌ساز و کند» همچون جنس رسوبات یا چینه‌بندی به روشنی مشخص شود و تفاوت میان نشست‌های عمیق مرتبط با آبخوان و نشست‌های سطحی ناشی از بارگذاری سازه‌ها تفکیک گردد. در نتیجه، جدول ارائه‌شده چارچوبی منسجم برای تحلیل علل، پیش‌بینی رفتار زمین و طراحی راهکارهای مدیریت ریسک فرونشست در دشت اصفهان-برخوار فراهم می‌کند.

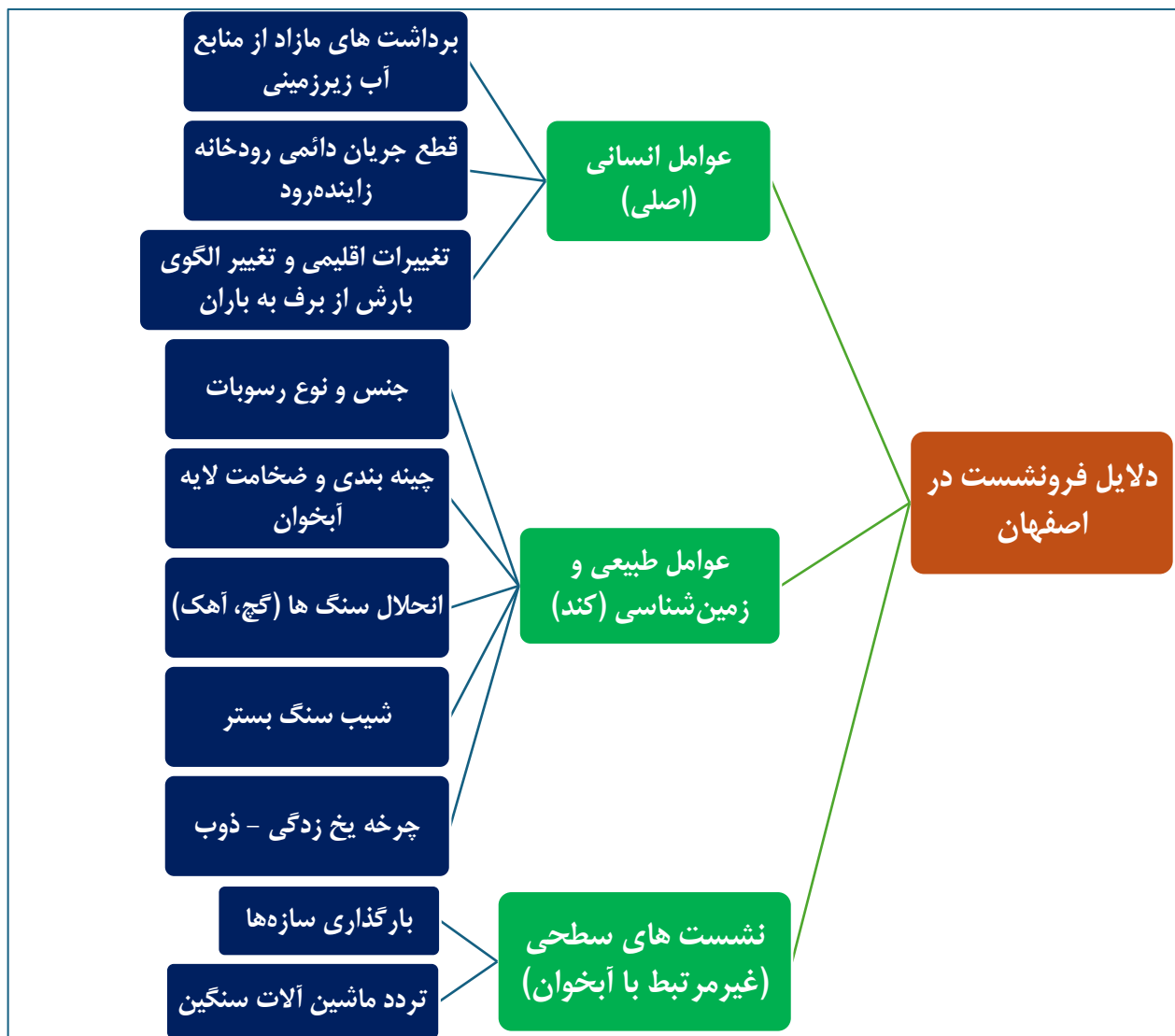
جدول ۳- عوامل مؤثر در نشست و فرونشست زمین

دسته‌بندی عامل	زیرگروه / عامل	توضیح فنی	نوع اثر بر زمین	میزان و سرعت اثرگذاری	وابستگی به افت سطح آب زیرزمینی
عوامل انسانی (افت سطح آب زیرزمینی)	تغییرات اقلیمی و تغییر الگوی بارش از برف به باران	کاهش تغذیه تدریجی آبخوان‌ها به دلیل کاهش ذخیره برفی و افزایش رواناب سریع	کاهش تغذیه آبخوان و تشدید افت سطح آب زیرزمینی	متوسط تا بلندمدت	غیرمستقیم (از طریق کاهش تغذیه آبخوان)
	برداشت‌های مازاد از منابع آب زیرزمینی	برداشت مصارف شرب، صنعت، کشاورزی و فضای سبز	کاهش منابع آب زیرزمینی	متوسط تا سریع	عامل اصلی افت سطح آب
	قطع جریان دائمی زاینده‌رود	کاهش تغذیه طبیعی آبخوان دشت از طریق بستر رودخانه و کانال‌های وابسته	کاهش تغذیه و تشدید افت سطح آب زیرزمینی	متوسط تا سریع	عامل اصلی افت سطح آب
عوامل طبیعی و زمین‌شناسی (کند)	جنس و نوع رسوبات	لایه‌های رس‌سیلت با تراکم‌پذیری بالا	فشرده‌گی در صورت افت سطح آب	کند (دهه‌ها تا قرن‌ها)	بدون افت آب، اثر بسیار کم
	چینه‌بندی و ضخامت لایه‌ها	وجود لایه‌های رسی ضخیم و کم‌نفوذ	نشست ناهمگن	کند	با افت آب فعال می‌شود
	انحلال سنگ‌ها (گچ، آهک)	حل شدن سنگ‌ها در حضور آب	شکل‌گیری حفره‌های کارستی	کند تا متوسط	بدون تغییر جریانات زیرزمینی تقریباً بی‌اثر
	شیب سنگ بستر	اختلاف ارتفاع لایه‌های زیرسطحی	جابه‌جایی تنش و تمرکز نشست	بسیار کند	بدون افت آب، تقریباً بی‌اثر



دسته‌بندی عامل	زیرگروه / عامل	توضیح فنی	نوع اثر بر زمین	میزان و سرعت اثرگذاری	وابستگی به افت سطح آب زیرزمینی
نشست‌های سطحی (غیرمرتبط با آبخوان)	چرخه یخ‌زدگی-ذوب	تغییر حجم خاک	جاب‌جایی سطحی	کند و موضعی	مستقل
	بارگذاری سازه‌ها	فشار ناشی از ساختمان‌ها، مخازن، خاکریز	تراکم موضعی خاک	سریع و قابل پیش‌بینی	مستقل
	تردد ماشین‌آلات سنگین	افزایش تراکم سطحی	نشست کم‌عمق	سریع	مستقل

شکل ۱۲- دلایل اصلی فرونشست در شهر اصفهان؛ یک شیوه متفاوت برای دسته‌بندی عوامل فرونشست در اصفهان ارائه می‌کند. در این شکل، عوامل به‌جای تفکیک جزئی و فنی به‌صورت دو گروه اصلی نمایش داده شده‌اند: عوامل مدیریتی که



شکل ۱۲- دلایل اصلی فرونشست در شهر اصفهان



آغازکننده روند افت آبخوان هستند، و عوامل زمین‌شناسی-اقلیمی که زمینه طبیعی حساسیت و شدت فرونشست را تعیین می‌کنند. به این ترتیب، شکل، نگاه کلی تری نسبت به روابط میان عوامل دارد و ساختار ساده‌تری از منشأهای اصلی فرونشست ارائه می‌دهد.

بررسی دسته‌بندی عوامل در شکل ۱۴ نشان می‌دهد که همه عوامل مؤثر بر فرونشست، شدت و زمان اثرگذاری یکسانی ندارند. برخی عوامل نقش محرک اصلی و سریع را ایفا می‌کنند و در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (سال تا دهه) باعث تشدید فرونشست می‌شوند، در حالی که گروهی دیگر بیشتر زمینه‌ساز و کند هستند و در بلندمدت (دهه‌ها تا قرن‌ها) حساسیت سامانه را افزایش می‌دهند. به بیان دیگر، فرونشست در دشت اصفهان-برخوار حاصل برهم‌کنش این عوامل است، اما سهم و وزن آن‌ها در ایجاد و تسریع پدیده یکسان نیست و باید میان عوامل «آغازکننده» و عوامل «تشدیدکننده و شکل‌دهنده الگو» تمایز قائل شد.

در این میان، عوامل مدیریتی و انسانی - به‌ویژه نحوه مدیریت منابع آب و توسعه مصرف - معمولاً اثرات سریع‌تر و پرشدت‌تری نسبت به بسیاری از عوامل زمین‌شناسی-اقلیمی دارند. برداشت بی‌رویه از چاه‌های مجاز و غیرمجاز، توسعه شهر و صنعت، تغییر کاربری اراضی و قطع جریان دائمی زاینده‌رود به‌طور مستقیم موجب افت شدید و مستمر سطح آب زیرزمینی شده‌اند و این افت، در مقایسه با فرایندهای طبیعی کند، جهشی قابل توجه در افزایش تنش مؤثر، فشردگی لایه‌های ریزدانه و آغاز فرونشست عمیق آبخوان ایجاد کرده است. در مقابل، ویژگی‌های زمین‌شناسی و اقلیمی نظیر جنس و چینه‌بندی رسوبات یا شرایط اقلیمی خشک، بیشتر بستر مستعد و زمینه حساس را فراهم می‌کنند و بدون وجود افت قابل توجه سطح آب، به‌تنهایی قادر به تولید فرونشست‌های شدید و گسترده نیستند.

با اتکا به این تمایز، در دشت اصفهان-برخوار می‌توان افت سطح آب زیرزمینی و خشکی رودخانه زاینده‌رود را به‌عنوان مهم‌ترین و اصلی‌ترین عامل فرونشست شناسایی کرد. کاهش تغذیه طبیعی آبخوان از طریق بستر رودخانه، همراه با برداشت سنگین برای شرب، کشاورزی و صنعت، باعث افت قابل ملاحظه تراز آب زیرزمینی در بخش‌های وسیع دشت و در نتیجه فشردگی برگشت‌ناپذیر لایه‌ها، کاهش دائمی ظرفیت ذخیره آبخوان و ثبت نرخ‌های بالای فرونشست شده است.

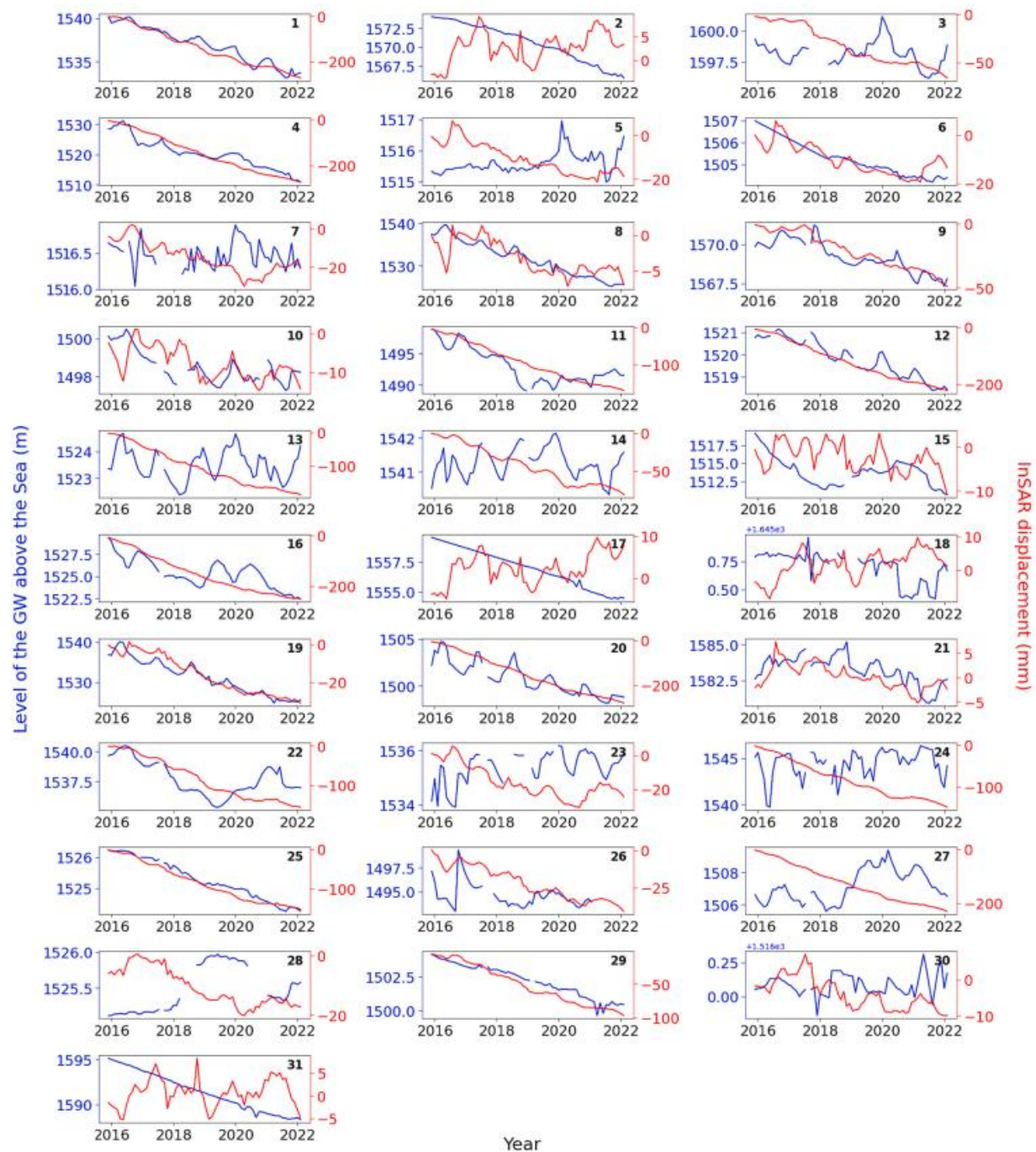
در ادامه گزارش، شواهد کمی و مکانی این موضوع - از جمله روندهای بلندمدت افت سطح آب، هم‌زمانی پهنه‌های بیشینه فرونشست با بیشترین افت، هم‌پوشانی با مسیر خشک‌شده زاینده‌رود و نواحی با تراکم بالای چاه‌ها - ارائه می‌شود تا نشان داده شود که بدون این افت شدید سطح آب و قطع تغذیه از رودخانه، ابعاد و شدت فرونشست کنونی در اصفهان-برخوار قابل تبیین نیست.

۱.۴. نقش ویژه افت سطح آب زیرزمینی، در بروز و تشدید فرونشست

در شکل ۱۳ تغییرات جابجایی سطح زمین^{۱۲} با تراز آب زیرزمینی در طول زمان مقایسه شده است. جابجایی یا تغییر شکل لزوماً معادل فرونشست نیست، بلکه به طور کلی بیانگر هر نوع تغییر مکان سطح زمین در راستای خط دید ماهواره است؛ با این حال، روندهای منفی و کاهشی در داده‌های جابجایی معمولاً نشان‌دهنده فرونشست زمین هستند. در بسیاری از چاه‌ها کاهش تدریجی

^{۱۲} InSAR displacement

سطح آب زیرزمینی با افزایش مقدار جابجایی منفی همزمان است که نشان می‌دهد افت سطح آب زیرزمینی احتمالاً باعث فشردگی رسوبات و در نتیجه فرونشست زمین شده است.



شکل ۱۳- تغییر شکل زمین^{۱۳} (خطوط قرمز) در شعاع ۵۰۰ متری چاه‌های پیزومتری در برابر سطح آب زیرزمینی (خطوط آبی) بین سال ۱۴۲۰-۱۶ تا ۲۰۲۱

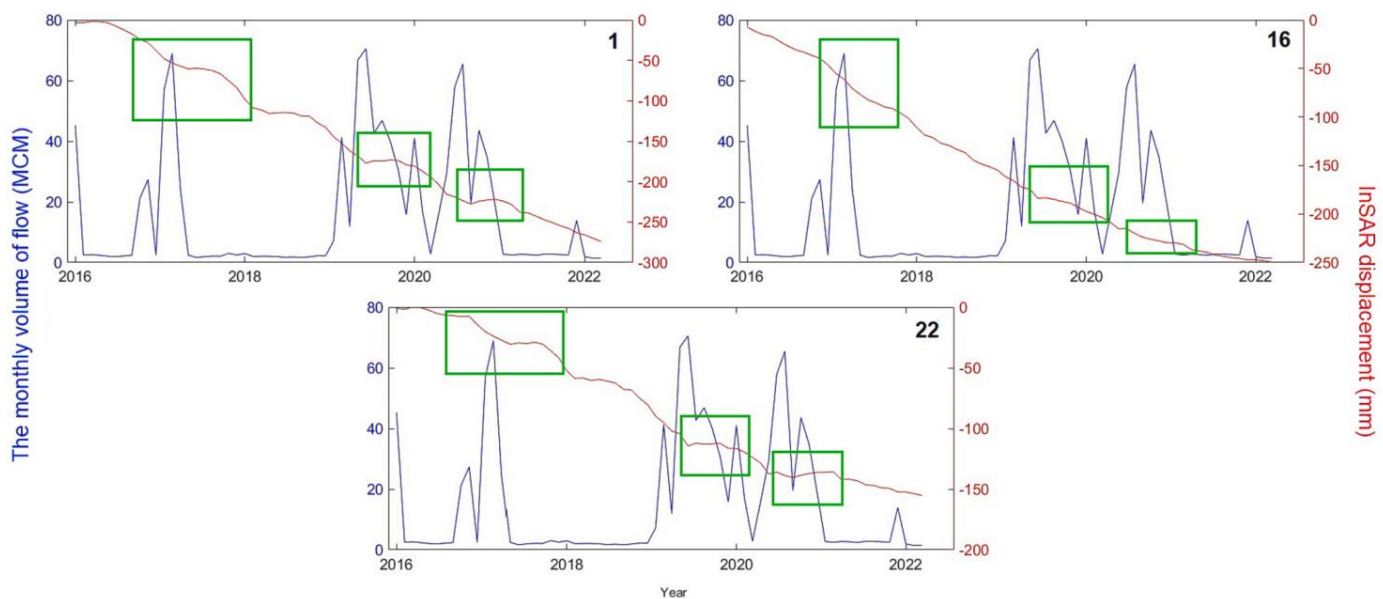
^{۱۳} Deformation

^{۱۴} Sharifi A, Khodaei B, Ahrari A, Hashemi H, Haghighi AT. Can river flow prevent land subsidence in urban areas Science of The Total Environment. ۲۰۲۴;۹۱۷:۱۷۰۵۵۷.

۲.۴. نقش قطع جریان دائمی زاینده رود در تشدید فرونشست

علاوه بر افت سطح آب زیرزمینی، قطع جریان دائمی زاینده رود نیز در تشدید فرونشست نقش ویژه ای داشته است. محاسبات نشان می‌دهد که جریان آب در مسیر رودخانه الزامی بوده و در جلوگیری از افت سطح ایستابی و فرونشست زمین از این طریق موثر است.

همان‌طور که در شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، در بازه‌هایی که جریان در رودخانه زاینده‌رود رهاسازی شده است، نرخ فرونشست کاهش یافته و در برخی مقاطع حتی به حالت توقف موقتی نزدیک شده است (کادرهای سبز رنگ). با این حال، بلافاصله پس از قطع جریان رودخانه، روند فرونشست مجدداً به وضعیت پیشین بازگشته و شیب نزولی آن افزایش یافته است. چاه‌های مورد استفاده در این تحلیل در مجاورت رودخانه قرار دارند و شماره آن‌ها مطابق نقشه پراکنش چاه‌ها در شکل ۶ است. این رفتار در برخی آبخوان‌های دیگر، مانند آبخوان نجف‌آباد، با الگوی متفاوت‌تری مشاهده می‌شود. در مجموع، نتایج نشان می‌دهد که حتی در صورت توقف کامل برداشت‌ها، تا زمانی که جریان پایدار در زاینده‌رود برقرار نشود، روند فرونشست به‌طور کامل متوقف نخواهد شد.

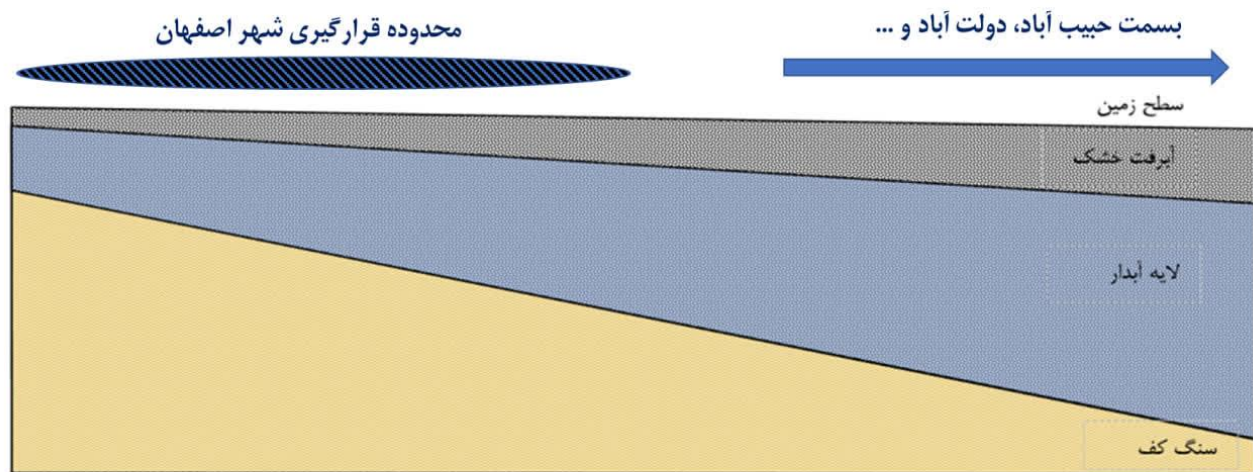


شکل ۱۴- متوسط جریان رودخانه زاینده‌رود در اصفهان (خط آبی) و سری زمانی جابجایی ماهواره SBAS-InSAR در نزدیک‌ترین چاه‌ها به رودخانه (شماره ۱، ۱۶ و ۲۲)

شکل ۱۵- فرم گوه‌ای آبخوان اصفهان - برخورد از زاینده‌رود تا حوالی حبیب‌آباد است که نشان می‌دهد از سمت زاینده‌رود به طرف حبیب‌آباد ضخامت لایه‌های رسوبی افزایش پیدا می‌کند. در بالا آبرفت خشک دیده می‌شود و زیر آن لایه آبدار قرار دارد که محل اصلی ذخیره آب زیرزمینی است. در پایین هم سنگ کف قرار گرفته که هرچه به سمت حبیب‌آباد می‌رویم عمیق‌تر می‌شود. این ساختار گوه‌ای باعث می‌شود حتی اگر هیچ برداشت آبی در آبخوان اصفهان و در شهر اصفهان صورت نگیرد، جریان آب به سمت شمال آبخوان وجود داشته باشد در نتیجه جریان دائمی از رودخانه زاینده‌رود به سمت آبخوان، محدوده

شهر اصفهان را در حالت آبدار نگه داشته و از فرونشست جلوگیری میکند. از همین جا فلسفه ی وجود مادی ها بر روی شهر اصفهان که تغذیه کننده سفره آب زیرزمینی بوده اند مشخص می شود.

جریان رودخانه زاینده رود در واقع دو نقش متمایز و مکمل در جلوگیری از فرونشست ایفا می کرده است. **نخست** آن که به عنوان اصلی ترین منبع تغذیه کننده آبخوان اصفهان -برخوار عمل کرده و با تأمین مداوم آب در ورودی جنوب غربی آبخوان، از افت شدید سطح ایستابی و فشردگی لایه های آبدار جلوگیری می نموده است. **دوم** آن که وجود جریان دائمی در بستر رودخانه، یک جریان پیوسته در ناحیه غیر اشباع زیر شهر اصفهان ایجاد می کرده است؛ جریانی که با حفظ رطوبت و فشار آب منفذی در این لایه ها، مانع از فشردگی و تراکم قابل توجه خاک در ناحیه غیر اشباع شده و به این ترتیب، از وقوع نشست و فرونشست زودهنگام در محدوده شهری اصفهان پیشگیری می کرده است.

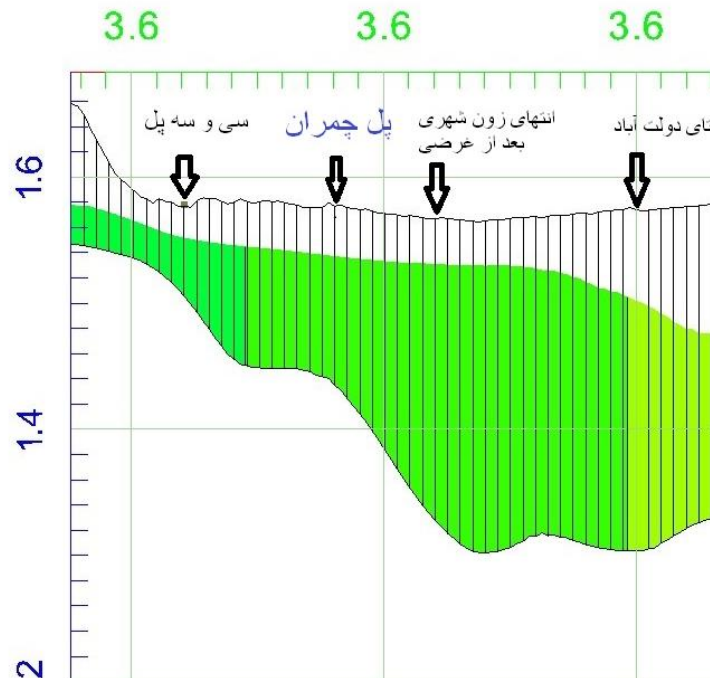


شماتیکی از فرم گوه ای آبخوان اصفهان -برخوار از زاینده رود (سمت چپ) تا حوالی حبيب آباد (سمت راست)

شکل ۱۵- فرم گوه ای آبخوان اصفهان - برخوار از زاینده رود تا حوالی حبيب آباد

در شکل پروفیل سنگ بستر آبخوان اصفهان -برخوار به موازات محور خیابان چهارباغ تا حد شمالی آبخوان را نشان می دهد. محور افقی در واقع امتداد طولی از محدوده ی سی و سه پل و پل چمران به سمت شمال (تا حوالی دولت آباد و سپس حاشیه شمالی آبخوان) است و محور عمودی نیز ارتفاع/عمق نسبی سنگ کف و ضخامت رسوبات آبرفتی را نمایش می دهد. ناحیه سبز رنگ، قسمت آبدار آبخوان (اشباع از آب) است و بخش سفید بالای آن، لایه های خشک تر یا کم اشباع را نشان می دهد. همان طور که در شکل دیده می شود، با فاصله گرفتن از زاینده رود و حرکت به سمت شمال، عمق سنگ بستر افزایش یافته و ضخامت لایه های آبرفتی بیشتر می شود؛ به عبارت دیگر، سنگ کف به صورت یک گوه عمیق شونده به طرف شمال توسعه پیدا کرده است. این هندسه باعث می شود که پتانسیل ذخیره آب زیرزمینی در بخش های میانی و شمالی مقطع بیشتر باشد و به طور طبیعی گرادیان جریان آب زیرزمینی از سمت زاینده رود به سوی شمال آبخوان برقرار شود. این ویژگی ساختاری، هم در رفتار هیدرودینامیک

آبخوان (جهت و سرعت جریان) و هم در الگوی فرونشست (حساسیت بیشتر نواحی با ضخامت بالاتر رسوبات ریزدانه) نقش مهمی دارد و توضیح می‌دهد چرا با قطع تغذیه از رودخانه، بخش‌های شمالی‌تر این پروفیل مستعد افت بیشتر سطح آب و فرونشست شدیدتر می‌شوند.



شکل سنگ بستر آبخوان اصفهان برخورد به موازات خیابان چهارباغ تا حد شمالی آبخوان

۳.۴. مقایسه عوامل طبیعی و زمین‌شناسی با افت سطح آب زیرزمینی

در فرایند فرونشست زمین، سه ویژگی کلیدی سرعت اثرگذاری، شدت و وابستگی تعیین می‌کنند که یک عامل چقدر در ایجاد فرونشست نقش دارد. در این مقایسه، افت سطح آب زیرزمینی به عنوان عامل انسانی-هیدروژئولوژیکی اصلی در برابر عوامل طبیعی و زمین‌شناسی بررسی شده است.

۳.۴.۱. سرعت اثرگذاری

از نظر سرعت اثرگذاری، افت سطح آب زیرزمینی رفتاری نسبتاً سریع تا میان‌مدت دارد (در مقیاس حدود ۱ تا ۱۰ سال). کاهش تراز آب، تقریباً بلافاصله باعث افزایش تنش مؤثر در توده خاک و به‌ویژه در لایه‌های ریزدانه و تراکم‌پذیر می‌شود. این افزایش تنش مؤثر، فرآیند فشرددگی تدریجی لایه‌های رسی و سیلتی را فعال کرده و در بازه زمانی نسبتاً کوتاهی می‌تواند به نشست محسوس سطح زمین منجر شود. در مقابل، عوامل طبیعی و زمین‌شناسی مانند ترکیب خاک و رسوبات، چینه‌بندی، شیب بستر و انحلال سنگ‌ها، ذاتاً اثرگذاری کند و بلندمدت دارند (در مقیاس دهه‌ها تا قرن‌ها) و در غیاب تغییرات شدید هیدرودینامیکی، به‌خودی‌خود نمی‌توانند در کوتاه‌مدت تغییر قابل‌توجهی در تراز سطح زمین ایجاد کنند.



۴.۳.۲. شدت و گستره اثر

از نظر شدت و گستره، افت سطح آب زیرزمینی عامل اصلی بروز فرونشست گسترده، منطقه‌ای و شدید در مقیاس دشت است. کاهش ۱۰ تا ۲۰ متری سطح آب زیرزمینی می‌تواند سبب فشردگی قابل ملاحظه لایه‌های تراکم‌پذیر شده و در نتیجه، بخش‌های وسیعی از یک دشت را با نرخ نشست‌های قابل توجه، در حد ۲۰ تا ۳۰ سانتی‌متر در سال، درگیر کند. در مقابل، عوامل طبیعی و زمین‌شناسی در اغلب موارد بیشتر نقش «زمینه‌ساز» دارند تا «محرك اصلی». این عوامل به‌تنهایی معمولاً منجر به فرونشست گسترده در مقیاس دشت نمی‌شوند، بلکه بیشتر الگوی مکانی و شدت نسبی نشست را تنظیم، هدایت یا در برخی نقاط خاص تشدید می‌کنند.

به بیان دیگر، آن‌ها بیشتر مشخص می‌کنند که کجا فرونشست سریع‌تر یا بیشتر رخ دهد، نه اینکه آیا اصولاً فرونشست رخ می‌دهد یا نه. از نظر گستره مکانی نیز به نظر می‌رسد بسیاری از عوامل طبیعی ماهیتی موضعی داشته باشند (مانند انحلال موضعی سنگ‌ها و فروچاله‌ها، یا تغییرات محدود در بافت خاک)، درحالی‌که برخی دیگر، که به‌ندرت و در شرایط ویژه رخ می‌دهند (مانند برخی ساختارهای بزرگ‌مقیاس زمین‌ساختی یا چینه‌بندی‌های خاص در سطح دشت)، می‌توانند اثرات نسبتاً گسترده‌تر ایجاد کنند؛ هرچند حتی در این حالت نیز، بدون همراهی افت سطح آب، معمولاً فرونشست چشمگیر و عمومی در مقیاس کل دشت شکل نمی‌گیرد.

۴.۳.۴. وابستگی و نقش محرك

در بُعد وابستگی و نقش محرك، **افت سطح آب زیرزمینی** عملاً به‌عنوان محرك اصلی فشردگی رسوبات عمل می‌کند و بسیاری از ویژگی‌های زمین‌شناسی تنها زمانی به‌طور جدی وارد بازی می‌شوند که سطح آب کاهش یافته باشد. افت سطح ایستابی با کاهش فشار آب منفذی، تنش مؤثر را افزایش می‌دهد و بدین ترتیب، ظرفیت تراکم‌پذیری ذاتی لایه‌های ریزدانه را فعال می‌کند. در این چارچوب، **عوامل طبیعی** بیشتر نقش «شرایط اولیه و مرزی» را دارند:

شیب سنگ‌بستر در صورت ثابت بودن سطح آب، تقریباً نقشی در آغاز فرونشست ندارد و فقط مسیر و جهت جریان آب زیرزمینی را تعیین می‌کند. جنس خاک و رسوبات اگرچه پتانسیل تراکم‌پذیری را تعریف می‌کند، اما بدون خشک شدن آبخوان و کاهش فشار آب منفذی، این پتانسیل بالفعل نمی‌شود. چینه‌بندی نیز اثری بسیار کند و تدریجی دارد و تنها در صورت افت سطح آب است که تفاوت رفتاری لایه‌ها می‌تواند به تمرکز یا تشدید نشست در برخی عمق‌ها منجر شود. انحلال سنگ‌ها تا حد زیادی مستقل از افت سطح آب زیرزمینی عمل می‌کند، اما پیامد اصلی آن تشکیل **فروچاله‌های موضعی** است نه فرونشست گسترده و یکنواخت در مقیاس دشت؛ بنابراین، این فرآیند بیشتر به ایجاد ناپایداری‌های نقطه‌ای منجر می‌شود تا نشست وسیع منطقه‌ای.

۴.۳.۴. جمع‌بندی

به‌طور کلی، افت سطح آب زیرزمینی را می‌توان **مهم‌ترین عامل فعال‌کننده پتانسیل‌های نهفته فرونشست** در دشت اصفهان بر خوار دانست. در شرایطی که سطح ایستابی پایدار باشد، اغلب عوامل طبیعی و زمین‌شناسی — نظیر جنس رسوبات،



چینه‌بندی، انحلال‌پذیری سنگ‌ها یا شیب بستر—عمدتاً اثراتی آهسته، محدود و غالباً موضعی ایجاد می‌کنند و به‌تنهایی قادر به ایجاد فرونشست گسترده و محسوس در مقیاس زمانی انسانی نیستند. با این حال، کاهش قابل توجه سطح آب زیرزمینی باعث افزایش تنش مؤثر، فعال‌شدن تراکم‌پذیری لایه‌های ریزدانه و در نتیجه، تشدید نقش همین عوامل زمینه‌ساز می‌شود؛ به گونه‌ای که ترکیب افت سطح آب با شرایط زمین‌شناسی، می‌تواند به بروز فرونشست منطقه‌ای و گسترده منجر شود.

با توجه به این ملاحظات، و بر پایه شواهد هیدروژئولوژیکی، داده‌های میدانی، نقشه‌های پهنه‌بندی و تحلیل‌های رفتارسنجی لایه‌ها در دشت اصفهان-برخوار، چنین به نظر می‌رسد که افت شدید سطح آب زیرزمینی همراه با کاهش یا قطع جریان رودخانه زاینده‌رود، نقش تعیین‌کننده‌تری نسبت به سایر عوامل در شکل‌گیری فرونشست منطقه داشته‌اند. این دو عامل، هم تغذیه طبیعی آبخوان را کاهش داده‌اند و هم با خشک‌تر شدن لایه‌های غیر اشباع، زمینه افزایش تراکم‌پذیری و نشست را فراهم کرده‌اند.

بر این اساس، می‌توان گفت که سایر عوامل طبیعی و زمین‌شناسی بیشتر در حد تعدیل‌کننده الگو و شدت فرونشست عمل کرده‌اند و نقش آن‌ها در مقایسه با تأثیر افت سطح آب و تغییرات رژیم رودخانه‌ای، در مرتبه‌ای پایین‌تر قرار می‌گیرد. به‌طور کلی، بر پایه داده‌های موجود می‌توان اظهار داشت که ترکیب افت سطح آب زیرزمینی و خشکی زاینده‌رود، مهم‌ترین مجموعه عوامل مؤثر بر فرونشست دشت اصفهان-برخوار به شمار می‌آید، هرچند سهم سایر عوامل نیز در چارچوب نقش‌های زمینه‌ساز و تقویت‌کننده قابل توجه است.

۴.۴. مقایسه اثر ساخت‌وساز شهری با افت سطح آب زیرزمینی بر فرونشست زمین

در تحلیل ژئوتکنیکی فرونشست، تفاوت بنیادی میان بارگذاری سازه‌ای و افت تراز آب زیرزمینی در «عمق اثرگذاری» و «توزیع تنش مؤثر» نهفته است. بار ناشی از ساخت‌وسازهای شهری، حتی در متراکم‌ترین حالت، نوعی بار سطحی محسوب می‌شود که بر اساس تئوری‌های توزیع تنش، شدت آن با افزایش عمق به سرعت کاهش یافته و در اعماق میانی (بیش از ۲۰ متر) عملاً ناچیز می‌شود. این بار تنها می‌تواند منجر به نشست‌های تحکیمی در لایه‌های فوقانی شود که ماهیتی موضعی، محدود و قابل پیش‌بینی دارند و با فرونشست‌های منطقه‌ای در مقیاس وسیع، تفاوت ماهوی دارند.

در مقابل، افت سطح آب زیرزمینی سازوکار کاملاً متفاوتی دارد. ستون خاک از دانه‌های جامد و فضاهای خالی تشکیل شده است که این فضاها در حالت اشباع با آب پر می‌شوند. در چنین شرایطی، آب موجود در حفره‌های خاک فشاری به نام «فشار آب منفذی» وارد می‌کند و بخشی از بار کلی را تحمل می‌نماید. طبق اصل تنش مؤثر، تنش کل برابر است با حاصل جمع «تنش مؤثر» و «فشار آب منفذی». تنش مؤثر همان نیرویی است که مستقیماً به اسکلت جامد خاک وارد می‌شود و عامل اصلی فشردگی و تحکیم خاک به شمار می‌رود. هنگامی که سطح آب زیرزمینی پایین می‌رود، فشار آب منفذی کاهش می‌یابد و در نتیجه تنش مؤثر به همان میزان افزایش پیدا می‌کند. این افزایش تنش مؤثر در کل ضخامت ستون خاک، به‌ویژه در لایه‌های ریزدانه و تراکم‌پذیر مانند رس و سیلت که در اعماق زیاد قرار دارند، باعث فشردگی تدریجی و جبران‌ناپذیر لایه‌ها می‌شود.

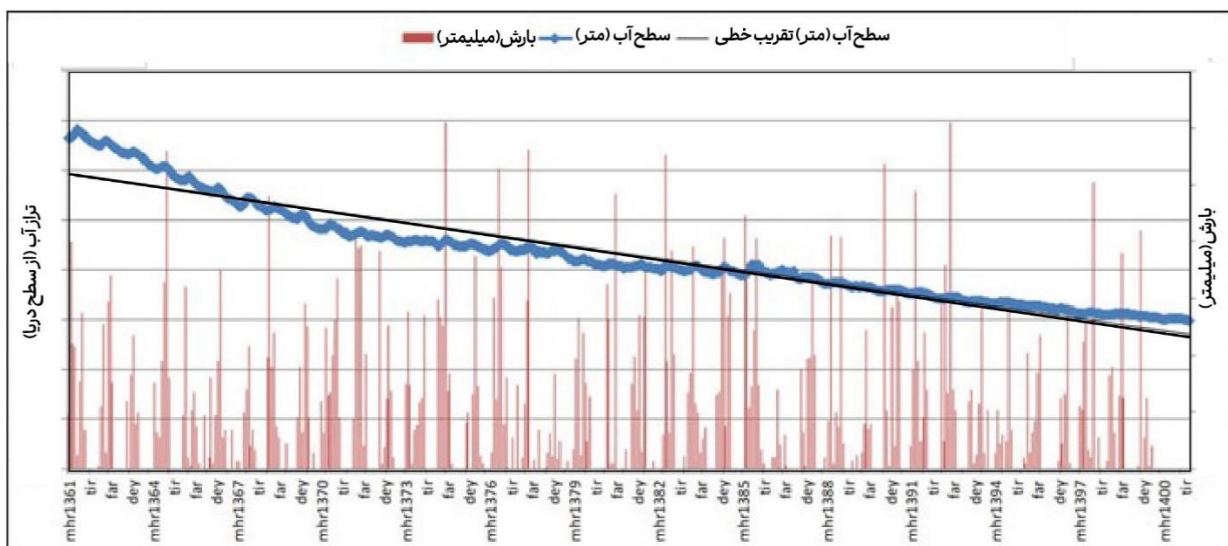
به همین دلیل، حتی اگر از نظر عددی بار کل ساختمان‌های یک شهر با اثر یک متر افت سطح آب قابل مقایسه به نظر برسد، مکانیزم اثرگذاری آن‌ها کاملاً متفاوت است. بار سازه‌ها تنها لایه‌های کم‌عمق را تحت تأثیر قرار می‌دهد و نشست ناشی از آن معمولاً موضعی و محدود است، در حالی که افت سطح آب زیرزمینی لایه‌هایی با ضخامت ده‌ها متر را درگیر می‌کند، تنش



مؤثر را در اعماق زیاد افزایش می‌دهد و موجب فرونشست گسترده، عمیق و غالباً غیرقابل بازگشت می‌شود. در نتیجه، ساخت و ساز شهری نقش بسیار ناچیزی در فرونشست گسترده داشته و عامل اصلی و بلامنازع این پدیده در دشت‌هایی مانند اصفهان، صرفاً افت سطح آب زیرزمینی و تخلیه آبخوان‌هاست.

۵.۴. بررسی وضعیت افت سطح آب زیرزمینی در اصفهان بر خوار

در شکل ۱۶- هیدروگراف آبخوان اصفهان - بر خوار همراه با تراز و عمق آب زیرزمینی و بارش بر محدوده اصفهان - بر خوار؛ خط آبی و خط روند مشکی تغییرات سطح آب زیرزمینی در آبخوان اصفهان- بر خوار را نشان می‌دهند که هم به صورت تراز آب نسبت به سطح دریا (محور عمودی چپ) و هم به صورت عمق آب زیرزمینی (محور عمودی راست) قابل خواندن است. میله‌های قرمز نیز بارش ماهانه را نمایش می‌دهند. روند کلی شکل بیانگر کاهش تدریجی و پیوسته سطح آب زیرزمینی در طول دوره مورد بررسی است. اگرچه در طول این دوره بارش رخ داده است، اما این بارش‌ها تنها موجب نوسانات کوتاه مدت در هیدروگراف شده و نتوانسته‌اند روند نزولی سطح آب زیرزمینی را متوقف کنند. این الگو نشان می‌دهد که برداشت از آبخوان بیش از میزان تغذیه آن بوده و در نتیجه سطح آب زیرزمینی به طور مداوم در حال افت است.

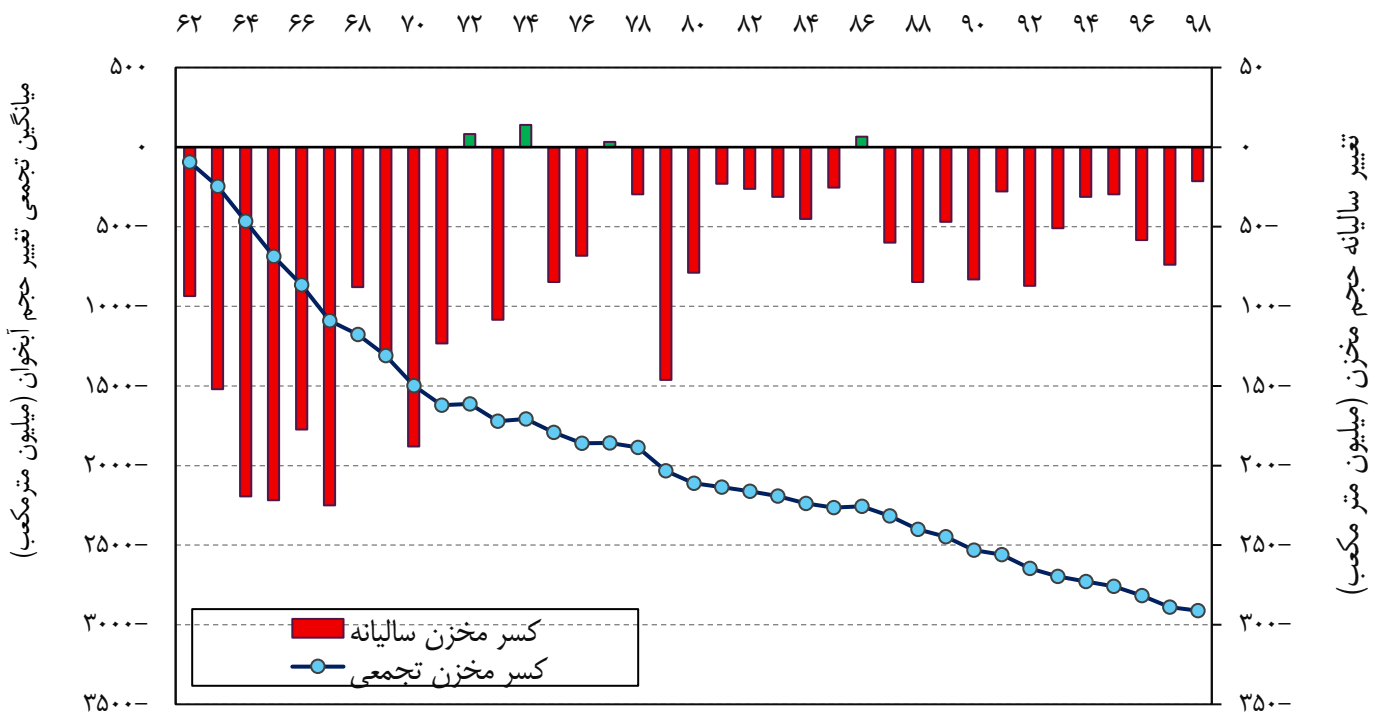


شکل ۱۶- هیدروگراف آبخوان اصفهان - بر خوار همراه با تراز و عمق آب زیرزمینی و بارش بر محدوده اصفهان - بر خوار

شکل ۱۷ تغییرات کسری سالانه مخزن و کسری تجمعی آبخوان اصفهان- بر خوار را در دوره مورد بررسی نشان می‌دهد. در این شکل، میله‌های قرمز بیانگر تغییرات سالانه حجم مخزن و خط آبی نشان‌دهنده کسری تجمعی مخزن است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در بیشتر سال‌ها تغییرات سالانه مخزن منفی بوده است؛ به این معنا که میزان برداشت از آبخوان بیش از میزان تغذیه آن بوده و در نتیجه کسری تجمعی مخزن به طور پیوسته افزایش یافته و بیانگر کاهش تدریجی ذخایر آب زیرزمینی در این آبخوان است.



با این حال، در برخی سال‌ها مانند ۱۳۷۲ و ۱۳۸۶ که جریان رودخانه زاینده‌رود وضعیت بهتری داشته است، تغییرات سالانه مخزن مثبت شده است. این وضعیت نشان می‌دهد که جریان رودخانه و تغذیه ناشی از آن می‌تواند موجب بهبود وضعیت آبخوان و کاهش سرعت افزایش کسری مخزن شود؛ ولی اگر میزان برداشت‌ها کنترل نشود، نمی‌تواند آبخوان را به تعادل برساند.



شکل ۱۷- تغییرات حجم مخزن سالیانه و کسری تجمعی مخزن آبخوان اصفهان - برقرار

۴.۶. روند تاریخی مدیریت منابع آب در دشت اصفهان

دشت اصفهان از سال ۱۳۴۶ به دلیل نگرانی از افت سطح آب زیرزمینی، به طور رسمی ممنوعه برای حفر چاه‌های جدید اعلام شد و تعدادی از چاه‌های موجود نیز مسدود گردید. در آن دوره، بررسی‌های دوره‌ای برای کنترل سطح آب زیرزمینی انجام می‌شد. با این حال، در سال ۱۳۶۱ با بهره‌برداری مجدد از چاه‌های مسدود شده، روند افت منابع آب زیرزمینی در این دشت به طور جدی آغاز شد. بنابراین بحران کنونی آب در این منطقه پدیده‌ای جدید نیست و بخش مهمی از آن به مدیریت نامناسب منابع آب در دهه‌های گذشته بازمی‌گردد.



۵. عوامل افت سطح آب

افت سطح آب زیرزمینی در آبخوان اصفهان-برخوار حاصل برهم کنش مجموعه‌ای از عوامل اقلیمی، هیدرولوژیکی و انسانی است که هر یک به تنهایی یا در کنار یکدیگر می‌توانند شدت و نرخ کاهش سطح آب را تعیین کنند. از یک سو، تغییرات الگوی بارش و افزایش دما در دهه‌های اخیر موجب اختلال در تغذیه طبیعی آبخوان شده و سهم ورودی‌های هیدرولوژیکی-اعم از نفوذ بارش، ذوب برف و بازگشت آب کشاورزی-را کاهش داده است. از سوی دیگر، خشک شدن یا کاهش چشمگیر جریان زاینده‌رود نقش یکی از مهم‌ترین مسیرهای تغذیه آبخوان را تضعیف کرده و پایداری تراز آب زیرزمینی را آسیب‌پذیرتر نموده است.

در کنار این تحولات، برداشت گسترده و مداوم از چاه‌های مجاز و غیرمجاز، برداشت بیش‌ازپروانه و فشار روزافزون بر منابع آب زیرزمینی، خروجی آبخوان را به سطحی رسانده که حتی در سال‌های پرآب نیز روند افت سطح آب متوقف نشده است. بنابراین، درک دقیق سهم و سازوکارهای هر یک از این عوامل برای تحلیل علل اصلی افت سطح آب و تبیین زمینه‌های ژئوتکنیکی و هیدروژئولوژیکی فرونشست در دشت اصفهان-برخوار ضرورتی علمی و مدیریتی به شمار می‌رود. در ادامه کلیه عوامل مطرح شده را بررسی می‌نمائیم.

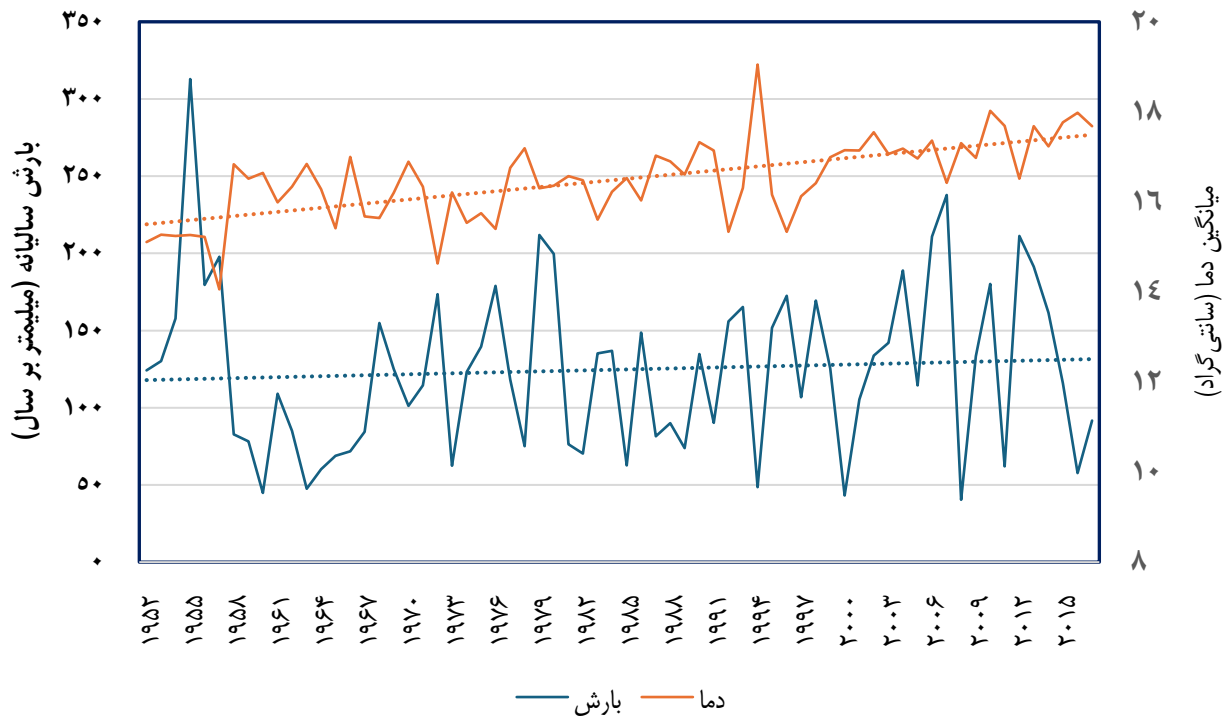
۵.۱. تأثیر تغییرات اقلیمی بر الگوی بارش و کاهش تغذیه طبیعی به منابع آب زیرزمینی

تغییرات الگوی بارش و افزایش دما طی سال‌های اخیر، هرچند از نظر عمومی و در فضای رسانه‌ای به عنوان یکی از اصلی‌ترین عوامل کاهش آبدهی و افت منابع آب مطرح می‌شوند، اما بر اساس داده‌های هیدرولوژیکی و مطالعات رسمی، سهم آن‌ها در مقایسه با سایر عوامل، از جمله برداشت‌های گسترده و کاهش تغذیه آبخوان، **عامل غالب و تعیین‌کننده محسوب نمی‌شود**. با این حال، این تغییرات اقلیمی همچنان یک متغیر مهم و اثرگذار در رفتار هیدرولوژیکی حوضه هستند.

دگرگونی الگوی بارش‌ها از حالت برف به باران، تغییر در زمان‌بندی ذوب برف و افزایش سهم رواناب سریع، باعث شده فرآیندهای طبیعی تغذیه آبخوان زاینده‌رود دستخوش تغییراتی شود. این تحولات اقلیمی، در کنار سایر فشارهای انسانی، موجب شده پاسخ هیدرولوژیکی حوضه با شرایط گذشته متفاوت باشد؛ اما باید تأکید کرد که **تغییر اقلیم تنها یکی از عوامل مؤثر است، نه مهم‌ترین عامل**.

مرور این تغییرات اقلیمی، به‌ویژه در کنار سایر محرک‌های افت سطح آب زیرزمینی، پیش‌زمینه‌ای ضروری برای درک وضعیت کنونی آبخوان و تحلیل پیامدهای مدیریتی در مقیاس حوضه به‌شمار می‌رود.

شکل ۱۸- سری زمانی میانگین سالیانه بارش و دمای ایستگاه اصفهان را طی چند دهه نشان می‌دهد. محور افقی سال‌های مورد مطالعه، محور عمودی سمت چپ بارش سالانه (میلی‌متر) و محور عمودی سمت راست میانگین دمای سالانه (درجه سلسیوس) را نشان می‌دهد. در شکل، خط آبی بیانگر بارش و خط نارنجی بیانگر دما است و خطوط نقطه‌چین روند کلی تغییرات را نمایش می‌دهند. تحلیل این نمودار و داده‌های آن نشان می‌دهد هر چند دما افزایشی بوده است ولی روند بارش‌ها کاهشی نبوده است. هر چند نوسانات بیشتر شده است. همچنین الگوی بارش‌ها از برف به باران تغییر یافته است.



شکل ۱۸- سری زمانی میانگین سالیانه بارش و دمای ایستگاه اصفهان

نتایج پژوهش‌های تغییر اقلیم در حوضه زاینده‌رود (مطالعات دانشگاه صنعتی اصفهان) نشان می‌دهد که در چند دهه گذشته الگوهای بارش، دما و زمان‌بندی ذوب برف با تغییراتی همراه بوده است. کاهش بارش‌های برفی زمستانه، افزایش دمای بهار و افزایش بارش بارانی در زمستان، موجب تغییر اساسی در رفتار هیدرولوژیکی حوضه شده است. در چنین شرایطی بخش بیشتری از بارش‌ها به جای ذخیره‌سازی طبیعی در قالب برف، به رواناب سریع تبدیل شده است.

در دهه‌های قبل بخشی از بارش به صورت برف انجام می‌شد که نقش بیشتری در تغذیه طبیعی آبخوان دشت اصفهان-برخوار داشت. ذوب تدریجی برف‌ها، امکان نفوذ آرام و مؤثر آب به لایه‌های زیرسطحی را فراهم می‌کرد و موجب پایداری بلندمدت منابع آب زیرزمینی می‌شد. اما افزایش دما و تغییر زمان بارش‌ها سبب شده سهم برف کاهش و سهم باران افزایش یابد؛ این پدیده، مطابق گزارش‌های علمی بدون کاهش محسوس بارش سالانه رخ داده و ماهیت تغییر آن بیشتر ماهوی است تا مقداری. نتیجه آنکه تغییر الگوی بارش از برف به باران سبب شده است اندکی تغذیه به آبخوان کاهش یابد هرچند تاثیر این پدیده بر تغذیه طبیعی آب زیرزمینی کمتر از ۲۵ درصد ارزیابی می‌شود.

۵.۲. خشکی رودخانه زاینده‌رود و کاهش نفوذ به آبخوان

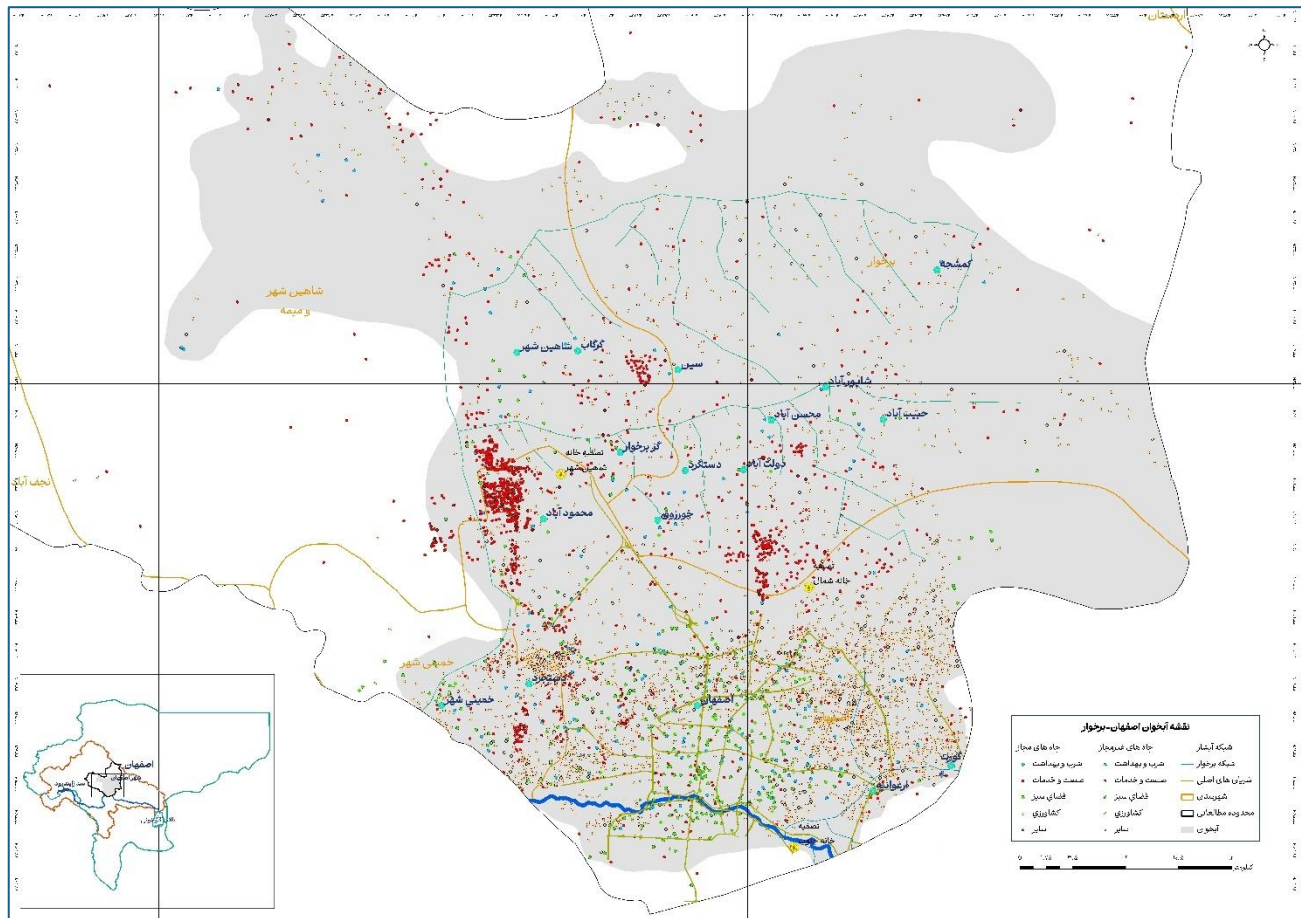
به طور عمومی در شرایطی که تعادل آبخوان برقرار باشد، رفتار اندرکنش بین رودخانه و آب زیرزمینی به این صورت است که آب رودخانه به طور طبیعی با آبخوان تبادل دارد و بخشی از آب به داخل آبخوان نفوذ می‌کند و آن را تغذیه می‌کند. به همین دلیل سطح آب زیرزمینی در طول زمان فقط نوسانات طبیعی و نسبتاً کوچک دارد. در شرایطی که رودخانه خشک یا کم‌آب



باشد عملاً تغذیه‌ای از سمت آب سطحی به آبخوان انجام نمی‌شود. در همین زمان برداشت آب از چاه ادامه دارد، بنابراین سطح آب زیرزمینی به‌طور پیوسته کاهش پیدا می‌کند. بر اساس مطالعات انجام شده (دکتر بیت‌اللهی) جریان دائمی رودخانه زاینده رود در گذشته حدود ۳.۵ مترمکعب بر ثانیه آبخوان اصفهان برخوار را تغذیه می‌نموده است. هر چند نمی‌توان سهم هر یک از عوامل در فرونشست را با دقت بیان نمود ولی به گفته علی بیت‌اللهی، رئیس بخش زلزله‌شناسی مهندسی و خطرپذیری مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، بر اساس نتایج مدل‌سازی انجام شده حدود ۵۰ درصد فرونشست زمین در اصفهان ناشی از قطع جریان آب در زاینده‌رود است. البته در شرایط عدم تعادل بین منابع و مصارف آب و در شرایطی که برداشت‌ها کنترل نشود، هر گونه جریان آب رودخانه به تنهایی نمیتواند مانع افت سطح آب شود.

۵.۳. تاثیر برداشت از منابع آب زیرزمینی بر افت سطح آب آبخوان

در کنار تغییرات اقلیمی و خشک شدن زاینده رود، برداشت گسترده آب از چاه‌ها در شمال اصفهان و مناطق اطراف نیز نقش مهمی در افت سطح آب داشته است. شکل ۱۹، نقشه محدوده دشت و آبخوان اصفهان-برخوار و محدوده شهر اصفهان بر روی این آبخوان را همراه با پراکنش چاه‌های بهره‌برداری از آب زیرزمینی بر اساس نوع مصرف نشان می‌دهد. در نقشه، موقعیت چاه‌های مجاز و غیرمجاز با علامت‌های مختلف و مصارف آن‌ها شامل کشاورزی، شرب، صنعت و فضای سبز با رنگ‌های متفاوت تفکیک شده است. تراکم بالای چاه‌ها به‌ویژه در بخش‌های مرکزی و جنوبی دشت و در اطراف شهر اصفهان مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده وابستگی زیاد منطقه به منابع آب زیرزمینی است.



شکل ۱۹- نقشه دشت و آبخوان اصفهان برخوار و محدوده شهر اصفهان همراه با چاه‌های مجاز و غیرمجاز بر اساس مصارف

بررسی داده‌های برداشت از آبخوان اصفهان-برخوار نشان می‌دهد که مجموع برداشت مجاز، برداشت چاه‌های مجاز بیش از پروانه، چاه‌های غیرمجاز، قنوات و چشمه‌ها در سال ۱۴۰۴ به حدود ۳۰۲ میلیون مترمکعب می‌رسد. این رقم بیانگر فشار سنگین و مستمری است که به آبخوان وارد می‌شود و نقش قابل توجهی در تشدید افت سطح آب و بروز فرونشست دارد. به دلیل پائین رفتن سطح آب، اکثر قنوات و چشمه‌های منطقه خشک شده است و تاثیر چندانی بر برداشت آب ندارد به طوری که بر اساس آمار موجود، برداشت از قنوات حدود ۶۰۰ هزار مترمکعب در سال و برداشت از چشمه‌های محدوده حدود ۱۴۵ هزار مترمکعب در سال برآورد شده است.

اگرچه خشکی زاینده رود و کاهش تغذیه به منابع آب زیرزمینی در افت سطح آب موثر بوده است، ولی بر اساس تحلیل هیدروگراف آب زیرزمینی، حتی در دهه ۶۰ که پرآبی بوده و روخانه جاری بوده است، افت سطح آب رخ داده است، لذا می‌توان گفت در صورتی که برداشت از منابع آب زیرزمینی کنترل نشود، جاری شدن رودخانه و افزایش تغذیه و نفوذ نمی‌تواند از افت سطح آب زیرزمینی جلوگیری کند.



۶. تحلیل میزان برداشت از آب های زیرزمینی

در دشت اصفهان برخوار، میزان برداشت از منابع آب زیرزمینی از طریق چاه های غیرمجاز حدود ۱۳.۸ میلیون مترمکعب در سال می باشد. همچنین میزان برداشت از کل چاه های مجاز حدود ۲۸۸ میلیون مترمکعب می باشد که از این مقدار حدود ۳۵ میلیون مترمکعب از طریق چاه های مجاز مازاد بر پروانه بهره برداری برداشت می شود. در ادامه میزان برداشت آب در بخش های مختلف با جزئیات ارائه می گردد.

۱.۶. بخش کشاورزی

بخش کشاورزی با اختلاف بسیار زیاد، بزرگ ترین مصرف کننده آبخوان اصفهان-برخوار است. بر اساس برآوردها، مجموع برداشت های مجاز، غیرمجاز و اضافه برداشت در این بخش حدود ۲۶۸ میلیون مترمکعب در سال است که به تنهایی بخش عمده بارگذاری بر آبخوان را تشکیل می دهد. وابستگی شدید کشاورزی منطقه به منابع آب زیرزمینی، نبود منابع جایگزین پایدار، و محدودیت های شدید آب های سطحی سبب شده فشار بلندمدت بر آبخوان به طور مداوم افزایش یابد و روند افت سطح آب زیرزمینی تشدید شود.

در کنار این، حدود ۱۲۱.۴ میلیون مترمکعب نیاز بخش کشاورزی در این دشت از منابع آب سطحی تأمین می شود؛ اما ناپایداری جریان رودخانه، وابستگی به شرایط بارش و کمبود آب در کل حوضه زاینده رود باعث شده سهم آب سطحی در سال های اخیر کاهش یابد. هرچند در طول زمان میزان برداشت از آبخوان اصفهان برخوار به مرور کم شده است ولی وابستگی کشاورزی به آبخوان بیش از پیش شده است.

۲.۶. بخش صنعت و خدمات

مجموع مصرف صنعتی از آبخوان اصفهان-برخوار حدود ۱۰ میلیون مترمکعب در سال برآورد می شود. هرچند سهم صنعت در مقایسه با سایر مصارف کمتر است، اما روند روبه رشد صنایع و ضرورت های توسعه اقتصادی می تواند در سال های آینده فشار بیشتری بر منابع آب زیرزمینی وارد کند.

در حال حاضر حدود ۱۲.۵ میلیون مترمکعب از نیاز بخش صنعت دشت اصفهان برخوار از آب سطحی تأمین می شود و این موضوع سبب شده اتکای مستقیم صنایع به منابع زیرزمینی کمتر شود؛ با انتقال آب دریا امید می رود در آینده وابستگی بخش صنعت و خدمات به آبخوان بیش از گذشته کاهش یابد.

۳.۶. فضای سبز شهری

مصرف آب فضای سبز شهری از آب زیرزمینی شامل برداشت های مجاز، غیرمجاز و اضافه برداشت سالانه بیش از ۲۲ میلیون مترمکعب برآورد می شود. آبیاری پارک ها، بلوارها و کمربندهای سبز شهری، به ویژه در پهنه های پرخطر فرونشست، وابستگی بالایی به منابع زیرزمینی دارد. این در حالی است که میزان برداشت آب سطحی برای این بخش کمتر از ۲ میلیون مترمکعب



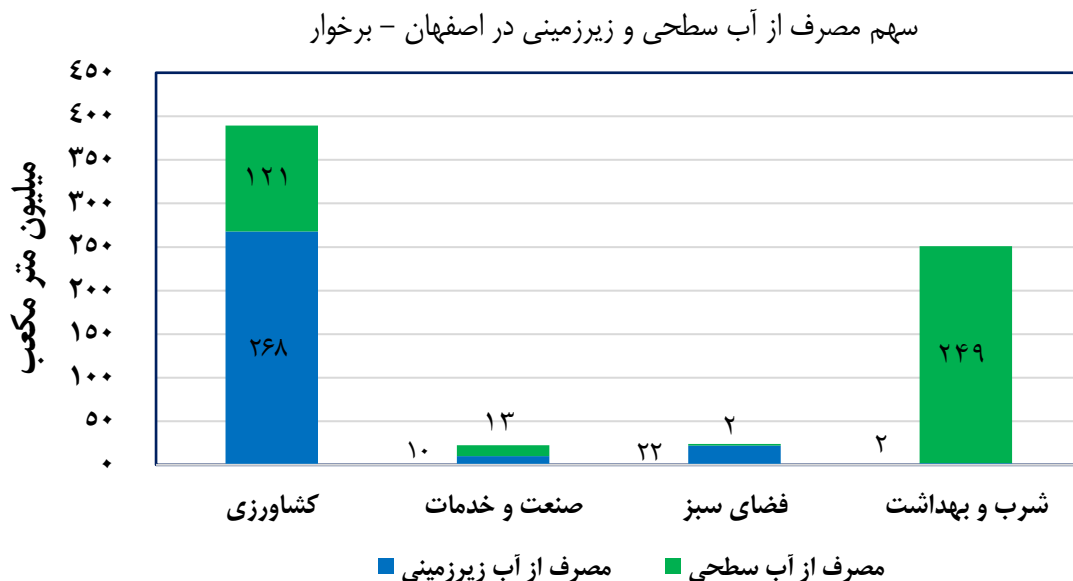
است؛ بنابراین بخش عمده نیاز آبی فضاهای سبز از منابع آب زیرزمینی تأمین شده و این موضوع یکی از چالش‌های مهم مدیریت شهری در مناطق مستعد فرونشست به شمار می‌رود. همچنین حدود ۱۳ میلیون مترمکعب از نیاز فضای سبز شهری از طریق پساب تأمین می‌شود که انتظار می‌رود در آینده سهم آب‌های نامتعارف (پساب) افزایش یافته و سهم آب زیرزمینی به طور قابل توجهی کاهش یابد.

۴.۶. شرب و بهداشت

مصرف شرب و بهداشت از آب زیرزمینی در آبخوان اصفهان-برخوار در مجموع کمتر از ۲ میلیون مترمکعب است و از نظر حجمی فشار قابل توجهی بر آبخوان وارد نمی‌کند. با این حال، به دلیل ماهیت حیاتی این نوع مصرف، ضروری است از پایدارترین و مطمئن‌ترین منابع تأمین شود. بررسی‌ها نشان می‌دهد حدود ۲۴۸/۸ میلیون مترمکعب از مصرف شرب شهر اصفهان و همچنین شهرهای پیرامونی مانند برخوار، شاهین شهر و دولت آباد، از آب سطحی و تصفیه‌خانه باباشیخ‌علی در چم آسمان تأمین می‌شود. این موضوع نشان می‌دهد که سهم برداشت آب زیرزمینی برای شرب در مقایسه با منابع سطحی بسیار ناچیز است. البته باید توجه شود که هر میزان از منابع آب سطحی برای تأمین شرب و بهداشت برداشت شود، به همان میزان جریان آب رودخانه کاهش یافته و تغذیه آبخوان اصفهان برخوار کاهش پیدا می‌کند لذا مصرف شرب از این منظر نیز اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

۵.۶. جمع‌بندی

خلاصه مطالب فوق در خصوص سهم مصرف از منابع آب سطحی و زیرزمینی در شکل ۲۰- سهم مصارف مختلف محدوده اصفهان - برخوار از آب سطحی و آب زیرزمینی ذکر شده است.

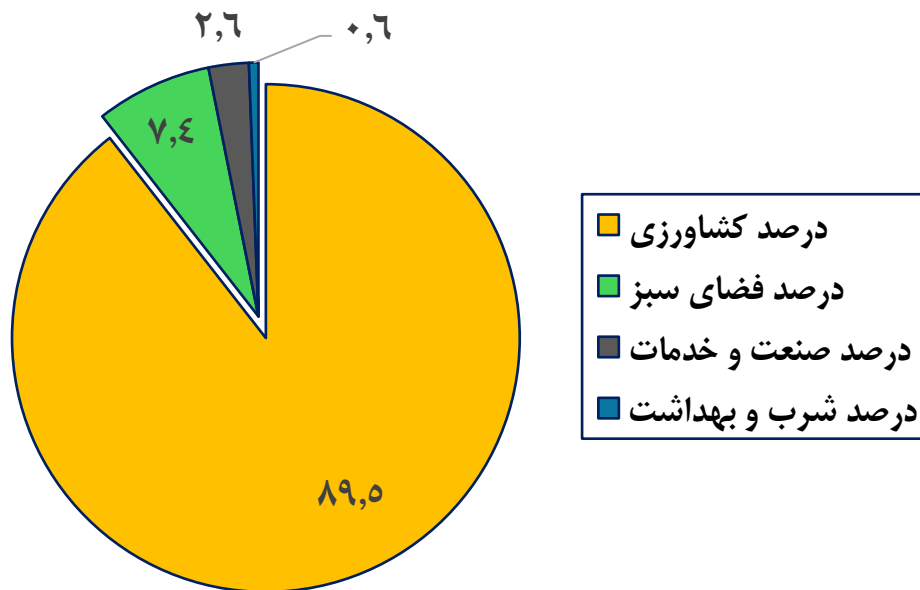


شکل ۲۰- سهم مصارف مختلف محدوده اصفهان - برخوار از آب سطحی و آب زیرزمینی

همانطور که در شکل ۲۱ مشاهده می‌شود، سهم هر یک از گروه‌های مصرف‌کننده آب زیرزمینی در محدوده و آبخوان اصفهان—برخوار مشخص شده است. مطابق این شکل، **بخش کشاورزی بیشترین سهم برداشت را دارد** و از نظر حجمی اصلی‌ترین مصرف‌کننده آب زیرزمینی محسوب می‌شود. با این حال، حجم برداشت به‌تنهایی نمی‌تواند میزان اثرگذاری هر بخش بر فرونشست زمین را توضیح دهد؛ زیرا مکان دقیق چاه‌ها و شرایط زمین‌شناسی زیرسطحی نیز نقش اساسی در حساسیت منطقه نسبت به افت سطح آب دارند.

در بسیاری از بخش‌های شهری، چاه‌های مربوط به فضای سبز، خدمات یا سایر مصارف غیرکشاورزی—با وجود داشتن حجم برداشت کمتر—در نواحی دارای رسوبات ریزدانه و لایه‌های بسیار تراکم‌پذیر قرار گرفته‌اند. افت موضعی ناشی از برداشت این چاه‌ها می‌تواند تشدیدکننده فرونشست یا ایجادکننده نشست‌های ناهمگن باشد. بنابراین **تحلیل تأثیر برداشت بر فرونشست باید بر پایه تلفیق حجم برداشت، موقعیت مکانی چاه‌ها و ویژگی‌های ژئوتکنیکی زمین انجام گیرد، نه صرفاً بر اساس مقدار برداشت آب.**

سهم مصارف مختلف از آبخوان اصفهان - برخوار



شکل ۲۱- سهم مصارف مختلف از آبخوان اصفهان - برخوار



۷. راهکارهای کنترل عوامل افت سطح آب زیرزمینی

ارزیابی اثر اقدامات مختلف مدیریت منابع آب بر آبخوان اصفهان-برخوار نشان می‌دهد که هر مداخله، بسته به ماهیت و سازوکار اجرایی خود، از سه مسیر اصلی بر وضعیت آب زیرزمینی تأثیر می‌گذارد: کاهش مصرف و تقاضای آب در مقیاس حوضه، کاهش مستقیم برداشت از چاه‌ها و نقاط برداشت، یا افزایش مستقیم تغذیه طبیعی و مصنوعی سفره. این سه سازوکار، چارچوبی مفهومی فراهم می‌کنند تا بتوان نقش و کارکرد اقدامات متعدد را بدون تکرار یا هم‌پوشانی، به صورت ساختاریافته تحلیل و طبقه‌بندی کرد.

۱.۷. نحوه اثرگذاری راهکارها روی آبخوان

یک دسته از اقدامات، اثر خود را به صورت غیرمستقیم بر آبخوان اعمال می‌کنند. این اقدامات عمدتاً با کاهش مصرف کل حوضه، مدیریت تقاضا، ارتقای بهره‌وری، کاهش بارگذاری بر رودخانه زاینده‌رود عمل می‌کنند. اثرگذاری این دسته از مداخلات از آن جهت غیرمستقیم است که ابتدا الگوی مصرف کل حوضه یا جریان رودخانه را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در مرحله بعد، از طریق افزایش جریان پایه رودخانه، امکان تغذیه طبیعی آبخوان را فراهم می‌سازند. اقداماتی مانند کاهش تقاضای شرب، مدیریت تقاضای کشاورزی کل حوضه، انتقال آب به حوضه، بهبود هماهنگی نهادی، افزایش شفافیت داده‌ها و جلوگیری از بارگذاری جدید بر رودخانه، همگی در این چارچوب قرار می‌گیرند. نتیجه نهایی آن‌ها، تقویت جریان رودخانه و در ادامه، افزایش نفوذ طبیعی آب به آبخوان است؛ هرچند مسیر اثرگذاری آن‌ها طولانی‌تر و غیرمستقیم‌تر از دو دسته دیگر است. گروه دوم شامل اقداماتی است که به شکل مستقیم برداشت آب از آبخوان را کاهش می‌دهند. این اقدامات بر نقاط برداشت حجم پمپاژ، یا شیوه بهره‌برداری از چاه‌ها اثر می‌گذارند و اثر آن‌ها سریع‌تر و روشن‌تر است. حذف برداشت‌های غیرمجاز، کاهش برداشت مازاد بر پروانه، توقف برداشت چاه‌های شرب و انتقال آن‌ها به منابع پایدارتر، جلوگیری از توسعه نقاط برداشت جدید، محدودسازی تغییر کاربری‌های آب‌بر و افزایش هزینه یا دشواری برداشت بیش‌ازحد از جمله این موارد است. این گروه ستون فقرات بازگرداندن تعادل برداشت و تغذیه در آبخوان محسوب می‌شود.

سومین دسته، اقداماتی هستند که به طور مستقیم تغذیه طبیعی یا مصنوعی آبخوان را افزایش می‌دهند. این اقدامات، برخلاف دو گروه قبلی، به جای مدیریت برداشت یا تقاضا، میزان ورودی آب به سفره را افزایش می‌دهند؛ چه از طریق افزایش نفوذ آب در مناطق شمالی آبخوان، چه هدایت سیلاب‌ها و رواناب‌ها به سازوکارهای تغذیه مصنوعی، چه بازگردانی جریان در مادی‌ها، و تقویت نفوذپذیری اراضی. تبدیل رواناب به تغذیه، ذخیره آب سال‌های پربارش برای استفاده در دوره‌های کم‌آبی، هدایت آب باران به نفوذگاه‌ها، و افزایش ورودی سفره در پی تقویت جریان رودخانه در این گروه قرار دارند. این اقدامات در جبران کسری مخزن بلندمدت آبخوان نقش کلیدی ایفا می‌کنند زیرا مستقیماً بر ورودی‌ها اثر می‌گذارند و بخشی از تعادل از دست‌رفته ذخایر زیرزمینی را بازسازی می‌کنند.

در مجموع، این سه مسیر اثرگذاری نشان می‌دهند که هیچ اقدام منفردی نمی‌تواند به تنهایی تعادل آبخوان را بازگرداند؛ بلکه ترکیب هم‌زمان کاهش مصرف، کاهش برداشت و افزایش تغذیه است که می‌تواند روند افت آب زیرزمینی را کند یا متوقف



کند. چنین چارچوبی به مدیران اجازه می‌دهد اقدامات پراکنده و متنوع را در یک ساختار معنایی مشترک قرار دهند و بفهمند هر مداخله در کدام بخش از معادله «برداشت-تغذیه» نقش آفرینی می‌کند.

۲.۷. دسته‌بندی راهکارها از منظر اثرگذاری بر آبخوان

در بررسی مجموعه راهکارهای پیشنهادی برای مدیریت و احیای آبخوان اصفهان-برخوار، کلیه اقدامات را می‌توان بر اساس «اثر مستقیم آن‌ها بر آبخوان» و سپس «ماهیت اجرایی و مدیریتی» طبقه‌بندی کرد. این ساختار امکان می‌دهد مشخص شود هر راهکار در کدام بخش از چرخه احیا عمل می‌کند: اصلاح حکمرانی، کاهش بارگذاری یا افزایش تغذیه. بر اساس طبقه‌بندی ارائه‌شده، سه گروه اصلی اثرگذاری بر آبخوان وجود دارد و هر گروه شامل مجموعه‌ای از دسته‌های «دسته‌بندی کلی» است.

۲.۷.۱. دسته نخست؛ اصلاح حکمرانی

این دسته شامل اقداماتی است که به صورت ساختاری، نهادی و اطلاعاتی ظرفیت حکمرانی آب را تقویت می‌کنند. این اقدامات مستقیماً سطح آبخوان را تغییر نمی‌دهند، اما بستر لازم برای اجرای راهکارهای کاهش بارگذاری و افزایش تغذیه را فراهم می‌سازند. دو دسته‌بندی کلی در این بخش قرار می‌گیرند:

(۱) نهادسازی

اقداماتی مرتبط با اصلاح ساختارهای مدیریتی، افزایش هماهنگی بین دستگاه‌ها، یکپارچه‌سازی مسئولیت‌ها و رفع موازی‌کاری‌ها. هدف این دسته، فراهم‌سازی بستر نهادی پایدار برای اجرای سیاست‌های حفاظتی و محدودکننده است.

(۲) داده، اطلاعات و پایش

اقداماتی شامل تقویت زیرساخت‌های اندازه‌گیری، پایش وضعیت منابع آب زیرزمینی، رصد برداشت‌ها، ثبت و انتشار اطلاعات و بهبود سامانه‌های نظارتی. این دسته اطلاعات لازم برای تصمیم‌گیری و کنترل برداشت را فراهم می‌کند.

۲.۷.۲. دسته دوم؛ کاهش یا توقف بارگذاری

این دسته شامل اقداماتی است که به‌طور مستقیم خروجی آبخوان را کاهش می‌دهند یا از افزایش مصرف جدید جلوگیری می‌کنند. این بخش بزرگ‌ترین حوزه مداخله در مدیریت آبخوان است و نقش اساسی در کنترل افت سطح آب دارد. پنج دسته‌بندی کلی ذیل این بخش قرار می‌گیرند:

(۱) حذف چاه‌های غیرمجاز:

اقداماتی برای شناسایی، مسدودسازی و حذف برداشت‌های غیرقانونی که سهم قابل توجهی در فشار بر آبخوان دارند. این دسته موجب کاهش فوری بارگذاری می‌شود.

(۲) کنترل برداشت:

اقداماتی برای اعمال محدودیت بر برداشت چاه‌های مجاز، کنترل حجمی، نظارت، پایش مستمر و اجرای قوانین بازدارنده. هدف این دسته، جلوگیری از اضافه برداشت است.

۳ جایگزینی مصارف زیرزمینی:

انتقال مصارف شرب، فضای سبز، صنعتی و کشاورزی از منابع زیرزمینی به منابع جایگزین مانند آب سطحی یا پساب تصفیه شده. این دسته وابستگی به آبخوان را کاهش می‌دهد.

۴ مدیریت توسعه:

اقداماتی برای جلوگیری از گسترش بارگذاری جدید، کنترل تغییر کاربری‌ها، محدودیت توسعه‌های شهری، صنعتی و کشاورزی و مهار روند افزایش تقاضا.

۵ اصلاح الگوی مصرف:

افزایش بهره‌وری، کاهش تلفات، اصلاح فناوری آبیاری، بهینه‌سازی مصرف شرب و ارتقای کارایی مصرف در بخش‌های مختلف.

۳.۲.۷. دسته سوم؛ افزایش تغذیه آبخوان

این دسته شامل اقداماتی است که ورودی آب به آبخوان را افزایش می‌دهند، چه از طریق جریان رودخانه، چه با استفاده از سازوکارهای طبیعی و چه با روش‌های مهندسی و مصنوعی. سه دسته‌بندی کلی ذیل این بخش قرار دارند:

۱) جاری‌سازی رودخانه و افزایش روزهای جریان رودخانه

اقداماتی برای تأمین جریان پایه و تداوم جریان زاینده‌رود با هدف تقویت تغذیه طبیعی آبخوان.

۲) افزایش تغذیه طبیعی آبخوان

حفاظت از مسیرهای نفوذ، استفاده از ظرفیت‌های طبیعی برای افزایش نفوذ، مدیریت سیلاب و جلوگیری از تخریب مناطق تغذیه‌زا.

۳) تغذیه مصنوعی

اقدامات سازه‌ای مانند احداث چاه‌های جذبی، گالری‌های تغذیه و سامانه‌های ذخیره و نفوذ کنترل‌شده برای افزایش ورودی آب به آبخوان.

۳.۷. لیست راهکارها

در جدول ۴ لیست کلیه راهکارهای کاهش فرونشست و دسته‌بندی آن‌ها ارائه گردیده است. همه‌ی این راهکارها الزاماً مناسب و مورد تأیید نیستند ولی جهت تکمیل مطالعات بررسی شده است. این راهکارها در این جدول بدون اولویت‌بندی ارائه شده‌اند.



جدول ۴- لیست کلیه اقدامات کاهش اثرات فرونشست همراه با نوع اقدام، دسته‌بندی کلی، سطح اجرا و دستگاه متولی اصلی

ردیف	اثر روی آبخوان	دسته بندی کلی	اقدام	مصرف کننده	سطح اجرا	متولی	همکاران
۱	اصلاح حکمرانی	نهاد سازی	تشکیل نهاد رسمی پایداری آبخوان ذیل سازگاری با کم آبی جهت پایش برنامه و گزارش گیری دوره ای از دستگاه‌ها و اعلام به عموم و ایجاد سامانه پایش لحظه ای منابع آب زیرزمینی دشت	بدون دسته بندی	استانی	استانداری	معاونت عمرانی استانداری معاونت اقتصادی استانداری آب منطقه‌ای اتاق بازرگانی تشکل های مردم نهاد
۲	اصلاح حکمرانی	نهاد سازی	ایجاد کمپین رسانه ای و اطلاع رسانی در مورد ضرورت تعادل بخشی آبخوان اصفهان-برخور	بدون دسته بندی	استانی	اتاق بازرگانی	آب منطقه‌ای محیط زیست تشکل های مردم نهاد استانداری صدا و سیما شهرداری
۳	اصلاح حکمرانی	نهاد سازی	مدیریت مشارکتی آب زیرزمینی با بهره‌برداران در آبخوان اصفهان-برخور	کشاورزی	استانی	آب منطقه‌ای	استانداری تعاون روستایی جهاد کشاورزی اتحادیه تعاونی های تولید
۴	اصلاح حکمرانی	داده، اطلاعات و پایش	تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی آبخوان اصفهان برخوار	کشاورزی	استانی	جهاد کشاورزی	آب منطقه‌ای
۵	کاهش یا توقف بارگذاری	حذف چاه های غیرمجاز	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز صنایع در آبخوان اصفهان برخوار	صنعت و خدمات	استانی	آب منطقه‌ای	صمت نیروی انتظامی دادستانی
۶	کاهش یا توقف بارگذاری	حذف چاه های غیرمجاز	حذف چاه های غیرمجاز کشاورزی در آبخوان اصفهان برخوار	کشاورزی	استانی	آب منطقه‌ای	دادستانی جهاد کشاورزی نیروی انتظامی
۷	کاهش یا توقف بارگذاری	حذف چاه های غیرمجاز	تعیین تکلیف چاه های غیرمجاز شرب در آبخوان اصفهان برخوار	شرب و بهداشت	استانی	آب منطقه‌ای	آب و فاضلاب
۸	کاهش یا توقف بارگذاری	حذف چاه های غیرمجاز	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز فضای سبز در آبخوان اصفهان برخوار	فضای سبز	استانی	شهرداری	آب منطقه ای
۹	کاهش یا توقف بارگذاری	کنترل برداشت	نصب کنتور حجمی و پایش آنلاین کلیه چاه های مجاز	بدون دسته بندی	استانی	آب منطقه‌ای	توزیع برق دادستانی
۱۰	کاهش یا توقف بارگذاری	جایگزینی مصارف زیرزمینی	کاهش پروانه صنایع و جایگزینی مصرف صنایع بزرگ با آب دریا و پساب	صنعت و خدمات	استانی	آب منطقه‌ای	صمت آب و فاضلاب
۱۱	کاهش یا توقف بارگذاری	جایگزینی مصارف زیرزمینی	جایگزینی مصرف مجاز فضای سبز شهری با پساب	فضای سبز	استانی	شهرداری	آب منطقه‌ای آب و فاضلاب
۱۲	کاهش یا توقف بارگذاری	جایگزینی مصارف زیرزمینی	تأمین کامل آب شرب و بهداشت از منابع سطحی	شرب و بهداشت	استانی	آب و فاضلاب	آب منطقه ای
۱۳	کاهش یا توقف بارگذاری	کنترل برداشت	توقف هر گونه مجوز کف شکنی و جابجایی	بدون دسته بندی	استانی	آب منطقه‌ای	



ردیف	اثر روی آبخوان	دسته بندی کلی	اقدام	مصرف کننده	سطح اجرا	متولی	همکاران
۱۴	کاهش یا توقف بارگذاری	مدیریت توسعه	مدیریت توسعه صنعت (توسعه صنایع آب صفر) در دشت اصفهان-برخور	صنعت و خدمات	استانی	مدیریت و برنامه ریزی	صمت استانداری
۱۵	کاهش یا توقف بارگذاری	مدیریت توسعه	توقف توسعه مسکونی (الحاق زمین و افزایش طبقات) قبل از تعیین محل تامین آب	شرب و بهداشت	استانی	راه و شهرسازی	شهرداری استانداری آب و فاضلاب
۱۶	کاهش یا توقف بارگذاری	مدیریت توسعه	توقف توسعه و تغییر کاربری به خدمات آب بر (گردشگری و ویلایی) در آبخوان قبل از تعیین محل تامین آب	صنعت و خدمات	استانی	جهاد کشاورزی	آب و فاضلاب
۱۷	کاهش یا توقف بارگذاری	مدیریت توسعه	توقف توسعه کشاورزی و صنایع کشاورزی و صرفاً ارتقا به سمت کاهش مصرف آب	کشاورزی	استانی	جهاد کشاورزی	آب منطقه‌ای
۱۸	افزایش تغذیه آبخوان	جاری سازی رودخانه	تخصیص حداقل منابع آب برای جریان زاینده رود در جداول سالیانه منابع و مصارف و رهاسازی آن	بدون دسته بندی	حوضه‌ای	وزارت نیرو	محیط زیست آب منطقه‌ای
۱۹	افزایش تغذیه آبخوان	جاری سازی رودخانه	تخصیص حداقل آب برای احتیاجات شهر اصفهان و توزیع در مادیها و شبکه های سنتی شهر	بدون دسته بندی	حوضه‌ای	وزارت نیرو	محیط زیست شهرداری آب منطقه‌ای
۲۰	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش جریان رودخانه	آزادسازی بستر و حریم رودخانه در بالادست و جلوگیری از برداشت‌های غیرمجاز در بالادست (محدوده سد چم آسمان تا اصفهان)	کشاورزی	استانی	وزارت نیرو	آب منطقه‌ای دادستانی
۲۱	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش تغذیه طبیعی آبخوان	بارورسازی ابرها (در محدوده دشت اصفهان برخور)	بدون دسته بندی	استانی	استانداری	آب منطقه ای هواشناسی
۲۲	اصلاح حکمرانی	داده، اطلاعات و پایش	دریافت تعرفه آزاد از چاه های دارای تخلف	صنعت و خدمات	استانی	آب منطقه‌ای	
۲۳	اصلاح حکمرانی	کنترل برداشت	اخذ خسارات آبخوان ناشی از اضافه برداشت	بدون دسته بندی	استانی	آب منطقه‌ای	
۲۴	اصلاح حکمرانی	داده، اطلاعات و پایش	حسابداری آب در آبخوان	بدون دسته بندی	استانی	آب منطقه‌ای	آب و فاضلاب
۲۵	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	کاهش سطوح چمن و تغییر الگوی کشت و گونه های فضای سبز	فضای سبز	استانی	شهرداری	
۲۶	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	ممنوعیت شستشوی ماشین در فضای باز	شرب و بهداشت	استانی	آب و فاضلاب	استانداری دادستانی
۲۷	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	ممنوعیت شستشوی پیاده رو و فضاهای باز	شرب و بهداشت	استانی	آب و فاضلاب	
۲۸	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش تغذیه طبیعی آبخوان	بارورسازی ابرها (در محدوده بالادست حوضه)	بدون دسته بندی	استانی	استانداری	آب منطقه ای هواشناسی
۲۹	افزایش تغذیه آبخوان	تغذیه مصنوعی	اجرای طرح مدیریت رواناب در شهرها و ایجاد مخازن یا حفر چاه جذبی برای هدایت روانابها به آبخوان	فضای سبز	استانی	شهرداری	
۳۰	افزایش تغذیه آبخوان	تغذیه مصنوعی	حفر چاه جذبی در کارخانه ها و گلخانه ها	صنعت و خدمات	استانی	منابع طبیعی و آب‌خیزداری	صمت جهاد کشاورزی
۳۱	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش روزهای جریان رودخانه	جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سرشاخه های زاینده رود تا چم آسمان)	کشاورزی	حوضه‌ای	وزارت نیرو	آب منطقه‌ای



ردیف	اثر روی آبخوان	دسته بندی کلی	اقدام	مصرف کننده	سطح اجرا	متولی	همکاران
۳۲	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش روزهای جریان رودخانه	کاهش تخصیص یزد و کاشان	شرب و بهداشت	ملی	وزارت نیرو	آب منطقه ای استانداری نمایندگان مجلس
۳۳	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش روزهای جریان رودخانه	اجرای فاز اول انتقال آب بین حوضه‌ای ماندگان برای جایگزینی برداشت شرب از رودخانه	شرب و بهداشت	ملی	آب منطقه‌ای	سازمان حفاظت محیط زیستاستانداری
۳۴	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش روزهای جریان رودخانه	اجرای سد کوهرنگ ۳ برای جبران کسری های گذشته حوضه زاینده رود	شرب و بهداشت	ملی	آب منطقه‌ای	وزارت نیرو سازمان برنامه و بودجه
۳۵	افزایش تغذیه آبخوان	تغذیه مصنوعی	تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب	بدون دسته بندی	استانی	اداره محیط زیست	آب منطقه ای
۳۶	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	بهبود فناوری و بازچرخانی آب صنایع و کاهش مصرف آب	صنعت و خدمات	استانی	صمت	صنایع
۳۷	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	الزام کارواش ها به تصفیه و بازچرخانی آب	شرب و بهداشت	استانی	صمت	آب و فاضلاب آب منطقه ای
۳۸	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	تغییر الگوی کشت در اراضی آبخوان	کشاورزی	استانی	جهاد کشاورزی	
۳۹	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	توسعه باغات به جای زراعت و همزمان کاهش پروانه	کشاورزی	استانی	جهاد کشاورزی	
۴۰	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	سامانه‌های آبیاری هوشمندانه و تصمیم‌یار مزرعه	کشاورزی	استانی	جهاد کشاورزی	
۴۱	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	جایگزینی تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل موجود	شرب و بهداشت	استانی	آب و فاضلاب	
۴۲	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	ارائه بازخورد در مورد میزان مصرف آب در قبوض خانگی	شرب و بهداشت	استانی	آب و فاضلاب	
۴۳	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	استاندارد الزام بازچرخانی آب خاکستری در ساختمان های جدید	شرب و بهداشت	استانی، ملی	سازمان نظام مهندسی	
۴۴	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	مشوق‌های اقتصادی و تعرفه‌گذاری پلکانی بازدارنده آب شرب	شرب و بهداشت	ملی	مجلس	وزارت نیرو
۴۵	کاهش یا توقف بارگذاری	کنترل برداشت تا سقف مجاز	اصلاح قیمت آب و انرژی پمپاژ آب (برق/سوخت) برای چاه‌ها و تعرفه گذاری پلکانی	کشاورزی	ملی	مجلس	وزارت نیرو
۴۶	کاهش یا توقف بارگذاری	کنترل برداشت تا سقف مجاز	تعرفه پلکانی آب صنعتی بر اساس مصرف واقعی	صنعت و خدمات	ملی	وزارت نیرو	
۴۷	کاهش یا توقف بارگذاری	کنترل سقف مجازها و پروانه ها	دوره‌ای کردن پروانه های بهره‌برداری کشاورزی در آبخوان یا ظهنویسی و کاهش پروانه ها	کشاورزی	ملی	آب منطقه‌ای	
۴۸	کاهش یا توقف بارگذاری	کنترل سقف مجازها و پروانه ها	بازخرید پروانه های بهره برداری چاه ها	کشاورزی	استانی	آب منطقه‌ای	
۴۹	اصلاح حکمرانی	نهاد سازی	ایجاد بازار و بانک آب در آبخوان	بدون دسته بندی	استانی	آب منطقه‌ای	
۵۰	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش تغذیه طبیعی آبخوان	سامانه ذخیره و بازیابی رواناب در سرشاخه های سیلابی در شمال آبخوان و اقدامات آبخیزداری	بدون دسته بندی	استانی	منابع طبیعی و آبخیزداری	آب منطقه ای



ردیف	اثر روی آبخوان	دسته بندی کلی	اقدام	مصرف کننده	سطح اجرا	متولی	همکاران
۵۱	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش تغذیه طبیعی آبخوان	حفاظت قانونی از پهنه‌های تغذیه طبیعی آبخوان	بدون دسته بندی	محلی / استانی	منابع طبیعی و آبخیزداری	
۵۲	افزایش تغذیه آبخوان	افزایش روزهای جریان رودخانه	بازخرید حقایق‌های رودخانه	کشاورزی	حوضه‌ای	آب منطقه‌ای	
۵۳	افزایش تغذیه آبخوان	تغذیه مصنوعی	نفوذپذیر کردن معابر و پیاده‌روها و استفاده از سطوح متخلخل	بدون دسته بندی	استانی	شهرداری-ه ا	
۵۴	افزایش تغذیه آبخوان	تغذیه مصنوعی	الزام حفر چاه جذبی در ساختمان‌ها برای هدایت آب ناودان منازل جدید	بدون دسته بندی	استانی	سازمان نظام مهندسی	
۵۵	افزایش تغذیه آبخوان	نهاد سازی	استقرار مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح حوضه آبریز	بدون دسته بندی	ملی / حوضه‌ای	وزارت نیرو	
۵۶	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	برچسب‌گذاری و رتبه‌بندی مصرف آب تجهیزات خانگی	شرب و بهداشت	ملی	سازمان استاندارد	وزارت صمت
۵۷	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	کاهش هدررفت و آب بدون درآمد شبکه توزیع آب شرب و بهداشت	شرب و بهداشت	استانی	آب و فاضلاب	
۵۸	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	اصلاح استاندارد الزام نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل (شیر، دوش، فلاش‌تانک کم‌مصرف) در ساختمان‌های جدید	شرب و بهداشت	استانی، ملی	سازمان نظام مهندسی	
۵۹	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	گسترش کشت گلخانه‌ای و همزمان کنترل سطح	کشاورزی	استانی	جهاد کشاورزی	
۶۰	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	اصلاح سیستم‌های آبیاری فضای سبز شهری	فضای سبز	استانی	شهرداری	
۶۱	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	توسعه سیستم‌های آبیاری نوین بدون توسعه سطح	کشاورزی	استانی	جهاد کشاورزی	
۶۲	کاهش یا توقف بارگذاری	اصلاح الگوی مصرف	جایگزینی کولرهای آبی با کولرهای گازی یا کولرهای سلولوزی	شرب و بهداشت	استانی	آب و فاضلاب	شهرداری استاندارد
۶۳	کاهش یا توقف بارگذاری	کنترل برداشت تا سقف مجاز	اصلاح و تعدیل پروانه چاه‌های کشاورزی	کشاورزی	استانی	آب منطقه‌ای	جهاد کشاورزی استاندارد
۶۴	کاهش یا توقف بارگذاری	کنترل برداشت تا سقف مجاز	کاهش پروانه‌های بهره‌برداری فضای سبز (روی کاغذ)	فضای سبز	استانی	آب منطقه‌ای	شهرداری
۶۵	اصلاح حکمرانی	شفافیت و داده	انجام پایش مستمر میزان فرونشست در محدوده	بدون دسته بندی	استانی	زمین شناسی	آب منطقه ای

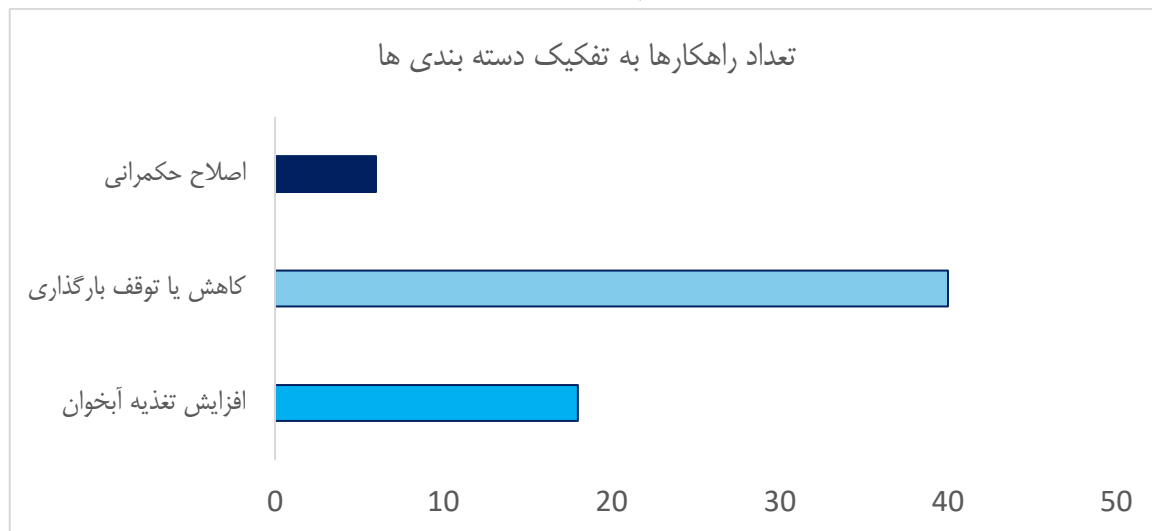
۴.۷. تحلیل و الگوهای ساختاری راهکارها

۴.۷.۱. توزیع کلی اقدامات بر اساس «اثر روی آبخوان»

طبق شکل ۲۲، بر اساس سه گروه اصلی اثرگذاری اصلاح حکمرانی حدود ۶ اقدام، کاهش یا توقف بارگذاری بیشترین سهم با حدود ۴۰ اقدام، افزایش تغذیه آبخوان حدود ۱۸ اقدام است. این توزیع نشان می‌دهد محور اصلی راهبردها «کاهش

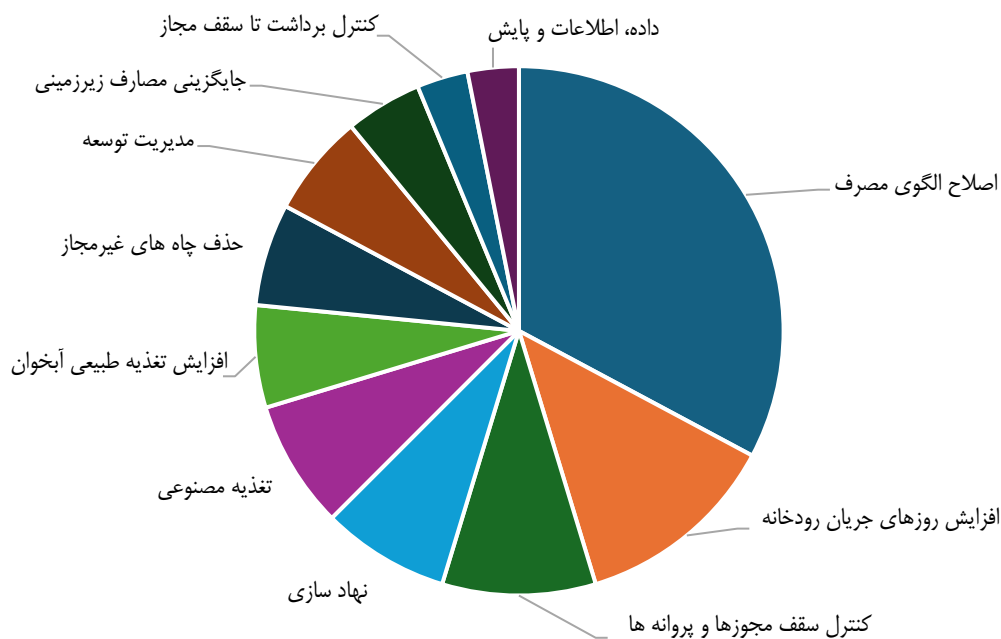


بارگذاری» است که با ماهیت بحران افت آبخوان همخوانی دارد.

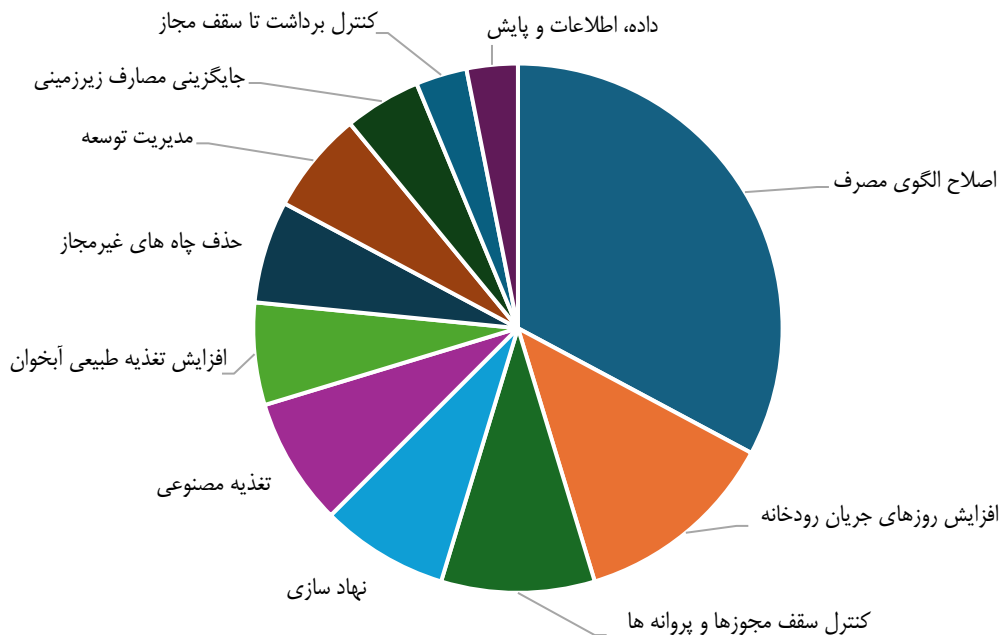


شکل ۲۲- تعداد اقدامات در هر دسته اصلی اثرگذاری بر آبخوان

۲.۴.۷. توزیع بر اساس دسته بندی کلی



شکل ۲۳- توزیع تعداد اقدامات بر اساس دسته بندی کلی را نشان می دهد که نشان می دهد در بین راهکارهای اولیه ارائه شده، بیشترین تمرکز بر اصلاح الگوی مصرف بوده است.



شکل ۲۳- توزیع تعداد اقدامات بر اساس دسته بندی کلی

۳.۴.۷. تحلیل سطح اجرا

در تحلیل سطح اجرا، مشخص می شود که بخش عمده اقدامات در سطح استانی قابل پیگیری است، به طوری که بیش از ۷۰ درصد اقدامات در این سطح بررسی شده اند. پس از آن، سطح حوضه ای عمدتاً در موضوعاتی مرتبط با مدیریت جریان رودخانه و تعیین و تأمین حقابه ها نقش دارد. در مقابل، سطح ملی بیشتر به اقدامات ساختاری و کلان که دارای ریسک و حساسیت بالاتری هستند—مانند سیاست های تعرفه گذاری آب یا طرح های انتقال آب—محدود می شود.

۴.۴.۷. تحلیل متولیان

در میان نهادهای درگیر در مدیریت آبخوان، **شرکت آب منطقه ای اصفهان** پرتکرارترین و محوری ترین نهاد است و نقش اصلی را در کنترل برداشت، ساماندهی چاه ها و پایش وضعیت ایفا می کند. پس از آن، **شرکت آبفا** با مسئولیت هایی همچون تأمین آب شرب، اصلاح الگوی مصرف و مشارکت در مدیریت پساب قرار دارد، در سطح بالادست، **وزارت نیرو** مسئول تنظیم جریان رودخانه، حقابه ها و اقدامات حوضه ای است. **جهاد کشاورزی** با وظایفی نظیر اصلاح الگوی مصرف در بخش کشاورزی و بهبود الگوی کشت در حوزه تقاضای آب اثرگذار است و **شهرداری** نیز به واسطه مدیریت فضای سبز و نظارت بر چاه های جذبی نقش مهمی در مصارف شهری دارد.

۵.۷. لیست صنایع آب صفر

با توجه به اینکه یکی از راهکارهای ارائه شده، توسعه صنایع آب صفر در محدوده مطالعاتی است. بر اساس معیارهای ذیل،



لیستی از صنایع آب صفر قابل توسعه در این منطقه ارائه شده است. معیارهای شناسایی صنعت آب صفر عبارتند از:

۱- آب در فرآیند تولید استفاده نمی شود.

۲- خنک کاری آبی ندارد.

۳- شست و شوی صنعتی ندارد.

۴- مصرف فقط انسانی است.

جدول ۵- صنایع آب صفر به همراه دسته بندی آنها

ردیف	دسته بندی	نام صنعت
۱	صنایع دیجیتال و دانشی	- فناوری اطلاعات و توسعه نرم افزار - خدمات IT و دیتاسترهای کم مصرف - طراحی دیجیتال و گرافیک - خدمات مالی و فین تک - برنامه نویسی - طراحی اپلیکیشن - خدمات Cloud management - تحلیل داده و Big Data - هوش مصنوعی و ML services - امنیت سایبری - طراحی وب - دیجیتال مارکتینگ - SEO services - تولید محتوای آنلاین - مدیریت شبکه های اجتماعی - بازی سازی - تجهیزات مخابراتی - انیمیشن دیجیتال - طراحی سه بعدی - تدوین ویدئو
۲	صنایع خلاق و فرهنگی	- تولید محتوا و رسانه - نشر و چاپ دیجیتال - صنایع هنری سبک



ردیف	دسته بندی	نام صنعت
	مونتاژ و ساخت سبک	- مونتاژ الکترونیک - تولید قطعات کامپیوتری - مونتاژ لوازم خانگی - صنایع روشنایی LED - مونتاژ تجهیزات اداری - مونتاژ تجهیزات پزشکی خشک - مونتاژ ابزار دقیق - مونتاژ ماشین آلات سبک - مونتاژ برد الکترونیکی - مونتاژ کامپیوتر - مونتاژ موبایل - تولید قطعات نیمه هادی (Dry fabrication stages) - مونتاژ تجهیزات مخابراتی
۳	صنایع تولیدی خشک (Dry Manufacturing)	- تولید پوشاک و نساجی خشک (بدون رنگرزی) - تولید مبلمان - صنایع پلاستیک و پلیمر خشک - تزریق پلاستیک، اکستروژن پلیمر - بسته بندی خشک - تولید قطعات پلیمری - تولید فوم صنعتی - تولید کارتن - چاپ خشک
۴	صنایع نساجی خشک	- دوخت پوشاک - برش پارچه - مونتاژ پوشاک - تولید کفش خشک - تولید کیف و چرم مصنوعی
۵	صنایع چوب خشک	- تولید مبلمان - نجاری صنعتی - MDF assembly - تولید دکوراسیون داخلی - کابینت سازی
۶	صنایع انرژی بدون آب	- تولید تجهیزات خورشیدی - تولید توربین بادی



ردیف	دسته بندی	نام صنعت
		- مونتاژ باتری
		- تولید تجهیزات ذخیره انرژی

۸. اولویت بندی راهکارها

در این فصل ابتدا روش اولویت بندی و شاخص های اولویت بندی تشریح و در نهایت نتایج اولویت بندی ارائه میگردد.

۸.۱. معیارهای تصمیم گیری و اولویت بندی

پیرو برگزاری جلسات مشترک میان کارگروه کشاورزی و کارگروه معدن اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی اصفهان، مجموعه‌ای شامل ۶۴ اقدام پیشنهادی با هدف کاهش عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در محدوده آبخوان اصفهان-برخوار شناسایی و تدوین شده است. با توجه به محدودیت منابع، زمان و ظرفیت اجرایی دستگاه‌ها و نهادهای مرتبط، اجرای همزمان تمامی اقدامات امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، ضرورت دارد این اقدامات بر اساس میزان اثرگذاری، امکان‌پذیری و اهمیت راهبردی آن‌ها اولویت‌بندی شوند.

به منظور دستیابی به یک چارچوب تصمیم‌گیری نظام‌مند، در ادامه که به‌صورت «ماتریس تصمیم» تنظیم شده است، هر یک از اقدامات بر اساس مجموعه‌ای از معیارهای مشخص مورد ارزیابی و امتیازدهی قرار می‌گیرند. این رویکرد امکان مقایسه اقدامات مختلف و تعیین اولویت اجرای آن‌ها را فراهم می‌سازد.

برای این منظور، شش معیار اصلی تعریف شده است که هر اقدام با توجه به آن‌ها امتیازدهی می‌شود. برخی از این معیارها ماهیت مثبت دارند؛ به این معنا که امتیاز بالاتر نشان‌دهنده مطلوبیت بیشتر اقدام است. در مقابل، برخی معیارها ماهیت منفی دارند؛ به این معنا که امتیاز بالاتر بیانگر وضعیت نامطلوب‌تر بوده و در فرآیند اولویت‌بندی باید با دقت بیشتری مورد توجه قرار گیرند.

۸.۱.۱. تأثیر بر منابع آب آبخوان (C۱)

این معیار میزان تأثیر هر اقدام بر بهبود وضعیت منابع آب زیرزمینی آبخوان اصفهان-برخوار را ارزیابی می‌کند. به‌طور مشخص، بررسی می‌شود که اجرای هر اقدام تا چه اندازه می‌تواند منجر به کاهش برداشت از منابع آب زیرزمینی یا افزایش تغذیه و تقویت آبخوان شود. اقداماتی که نقش مؤثرتری در کاهش فشار بر منابع آب زیرزمینی داشته باشند، امتیاز بالاتری کسب می‌کنند. این معیار از نوع مثبت است؛ بنابراین هرچه میزان اثرگذاری اقدام بر بهبود وضعیت آبخوان بیشتر باشد، امتیاز آن مطلوب‌تر خواهد بود.

البته با توجه به اینکه بخشی از راهکارها همپوشانی دارند و تاثیر مشترک می گذارند، به جای بررسی تاثیر واقعی هر راهکار بر منابع آب آبخوان، اثر بالقوه مستقل هر راهکار تخمین زده میشود.

اثر بالقوه مستقل^{۱۵} (Independent Potential Impact) به بیشترین مقدار صرفه جویی یا کاهش برداشت اطلاق می شود که یک راهکار می تواند در شرایط فرضی اجرای کامل، بدون وابستگی به هیچ اقدام پشتیبان یا تقویت کننده ایجاد کند.

۲.۱.۸. زمان اثرگذاری (C۲)

این معیار مدت زمان مورد نیاز برای اجرا و مشاهده آثار عملی و ملموس هر اقدام را مورد ارزیابی قرار می دهد. برخی اقدامات ممکن است در کوتاه مدت قابل اجرا بوده و اثرات آن ها سریع تر نمایان شود، در حالی که برخی دیگر نیازمند زمان طولانی تری برای اجرا یا مشاهده نتایج هستند. این معیار از نوع منفی در نظر گرفته شده است؛ بدین معنا که هرچه زمان مورد نیاز برای تحقق اثرات اقدام بیشتر باشد، امتیاز آن از منظر این معیار کمتر مطلوب تلقی می شود.

۳.۱.۸. ریسک (C۳)

در این معیار، میزان ریسک و احتمال عدم موفقیت یا بروز چالش در اجرای هر اقدام مورد توجه قرار می گیرد. ریسک می تواند ابعاد مختلفی داشته باشد، از جمله ریسک های اجتماعی (مانند مقاومت ذی نفعان)، حقوقی و مقرراتی، اقتصادی و مالی، مدیریتی و اجرایی. اقداماتی که با عدم قطعیت یا موانع بیشتری در مسیر اجرا مواجه هستند، امتیاز ریسک بالاتری دریافت می کنند. این معیار نیز از نوع منفی است؛ بنابراین هرچه سطح ریسک بالاتر باشد، مطلوبیت اقدام از این منظر کمتر خواهد بود.

۴.۱.۸. اثرگذاری اجتماعی-فرهنگی (C۴)

این معیار میزان تاثیر هر اقدام در ایجاد حساسیت عمومی، افزایش آگاهی اجتماعی و درگیر شدن جامعه در موضوع مدیریت منابع آب را ارزیابی می کند. برخی اقدامات علاوه بر اثرات فنی، می توانند موجب جلب توجه افکار عمومی، تقویت مشارکت مردمی و

^{۱۵} این مقدار از طریق تجربیات پیشین یا مطالعات موردی مشابه در آبخوان های دیگر و یا بر اساس داده های آبخوان استخراج می شود. بسیاری از دستورالعمل های حکمرانی آب زیرزمینی—از جمله گزارش های (۲۰۱۶) FAO Groundwater Governance Framework، UNESCO IHP Groundwater Resources Assessment (۲۰۱۸) و OECD Water Governance Initiative (۲۰۲۱)—تأکید می کنند که برای تحلیل سیاست های چندگانه و جلوگیری از حذف یا تجمع نادرست اثرات، لازم است ابتدا ظرفیت بالقوه هر اقدام به صورت مستقل و بدون ملاحظه هم افزایی با سایر سیاست ها برآورد شود. با این حال، این گزارش ها تصریح می کنند که اثر بالقوه مستقل نباید با اثر واقعی در سناریوی ترکیبی اشتباه گرفته شود، زیرا در عمل بسیاری از راهکارهای فنی، اقتصادی یا حکمرانی دارای مناطق همپوشان اثر هستند. به همین دلیل، نهادهایی مانند California Department of Water Resources در چارچوب SGMA (۲۰۲۰-۲۰۲۳) و نیز (۲۰۱۹-۲۰۲۲) European Groundwater Directive Implementation Reports (EU) توصیه می کنند که ابتدا اثر بالقوه مستقل هر سیاست به طور کامل گزارش شود—حتی اگر جمع اثرات از ظرفیت واقعی تاثیر بر آبخوان بیشتر شود—و سپس در مرحله بعد، با استفاده از فرایند «تعدیل اثرات» (Adjustment / Normalization) اثر نهایی قابل تحقق برای سناریوهای واقعی استخراج گردد. این روش علاوه بر شفافیت، امکان مقایسه قدرت نسبی هر راهکار را فراهم می کند و از پدیده دوباره شماری جلوگیری می نماید.

شکل گیری فرهنگ مصرف بهینه آب شوند. به عنوان نمونه، اقداماتی مانند نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل می تواند طیف گسترده ای از شهروندان را درگیر کرده و به ارتقای فرهنگ صرفه جویی در مصرف آب کمک کند. این معیار از نوع مثبت است و هرچه اثرگذاری اجتماعی و فرهنگی یک اقدام بیشتر باشد، امتیاز بالاتری به آن اختصاص می یابد.

۵.۱.۸. پیش نیازی برای سایر اقدامات (C۵)

برخی اقدامات نقش زیرساختی یا تسهیل کننده دارند و اجرای آنها می تواند زمینه ساز یا پیش نیاز اجرای سایر اقدامات باشد. در این معیار بررسی می شود که هر اقدام تا چه اندازه به عنوان یک اقدام پایه ای می تواند اجرای سایر برنامه ها را ممکن، آسان تر یا مؤثرتر کند. اقداماتی که نقش کلیدی تری در ایجاد بستر لازم برای پیشبرد سایر اقدامات دارند، امتیاز بالاتری دریافت می کنند. این معیار از نوع مثبت است.

۶.۱.۸. هزینه (C۶)

این معیار به بررسی میزان هزینه مورد نیاز برای اجرای هر اقدام می پردازد. برخی اقدامات نیازمند سرمایه گذاری قابل توجهی در حوزه زیرساخت، تجهیزات یا منابع مالی هستند، در حالی که برخی دیگر با هزینه های کمتر و منابع محدودتر قابل اجرا می باشند. این معیار از نوع منفی تعریف شده است؛ به این معنا که هرچه هزینه اجرای یک اقدام بیشتر باشد، امتیاز آن از منظر این معیار کمتر مطلوب تلقی می شود.

در مجموع، با بهره گیری از این شش معیار، امکان ارزیابی ساختاریافته و مقایسه اقدامات فراهم می شود و می توان بر اساس امتیازات حاصل، اولویت نسبی اقدامات را برای برنامه ریزی و اجرا تعیین کرد. این چارچوب می تواند به تصمیم گیران کمک کند تا منابع و ظرفیت های موجود به گونه ای تخصیص یابد که بیشترین اثرگذاری در کاهش عوامل مؤثر بر فرونشست زمین در آبخوان اصفهان-برخوار حاصل شود.

۲.۸. نتایج اولویت بندی راهکارها

۱.۲.۸. روش شناسی اولویت بندی و انتخاب سبد راهکارهای تعادلی

در مسائل مدیریت کلان منابع آب، به ویژه در حوضه های بحرانی نظیر آبخوان اصفهان-برخوار، تصمیم گیری به معنای یافتن یک پاسخ تک بعدی و ریاضی نیست. ما با سیستمی پویا و روبرو هستیم که در آن ابعاد هیدرولوژیکی، اجتماعی، اقتصادی و زیست محیطی در هم تنیده اند. بنابراین، انتخاب و اولویت بندی راهکارهای کاهش فرونشست، نیازمند ابزاری است که بتواند این پیچیدگی و تنوع دیدگاه ها را منعکس کند.

در این بخش، ابتدا تجربه اولیه پژوهش در به کارگیری روش های کلاسیک تصمیم گیری (روش CORASO) تشریح شده و سپس علل روش شناختی عبور از آن و اتخاذ رویکرد تصمیم گیری پسینی (Pareto-based) با جزئیات کامل تبیین می گردد.



۸.۲.۲. تجربه اولیه: ساختار و گام‌های اجرایی روش CORASO

در فاز نخست طراحی روش تحقیق، الگوریتم تصمیم‌گیری بر مبنای روش CORASO (که یک روش جدید و ترکیبی در تصمیم‌گیری چندمعیاره است) تنظیم شد. فلسفه این روش، رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس تعریف نقاط مرجع (بهترین و بدترین وضعیت) و سنجش فاصله نسبی هر گزینه از این نقاط است. گام‌های محاسباتی این روش به شرح زیر طراحی و تدوین شده بود:

گام اول: تشکیل ماتریس تصمیم (X): در این گام، راهکارهای پیشنهادی (m گزینه) در سطرها و معیارهای ارزیابی (n معیار شامل معیارهای اقتصادی، فنی، اجتماعی و محیط‌زیستی) در ستون‌های ماتریس قرار می‌گیرند. هر آرایه x_{ij} نشان‌دهنده عملکرد گزینه i ام در معیار j ام است.

گام دوم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم: با توجه به اینکه معیارها دارای واحدهای اندازه‌گیری متفاوتی هستند (مانند تومان برای هزینه، مترمکعب برای حجم آب و درصد‌های کیفی برای پذیرش اجتماعی)، مقادیر ماتریس تصمیم با استفاده از روش‌های خطی بی‌مقیاس‌سازی می‌شوند تا مقادیر بین صفر و یک قرار گیرند.

گام سوم: اعمال اوزان معیارها (W): در این مرحله، وزن‌های نسبی معیارها که از طریق نظرسنجی از خبرگان استخراج شده‌اند، در ماتریس نرمال‌شده ضرب می‌شوند تا ماتریس بی‌مقیاس وزن‌دار حاصل شود.

گام چهارم: تعیین مقادیر تجمعی گزینه‌ها: عملکرد کلی هر گزینه با ترکیب مقادیر وزن‌دار آن در تمامی معیارها محاسبه می‌شود.

گام پنجم: محاسبه فاصله از نقاط مرجع (ایده‌آل و ضد ایده‌آل): در این گام، فاصله هر راهکار از بهترین عملکرد ممکن (مرز مطلوبیت) و بدترین عملکرد ممکن (مرز فاجعه) محاسبه می‌گردد. هدف، شناسایی گزینه‌هایی است که هم‌زمان کمترین فاصله را با ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را با ایده‌آل منفی داشته باشند.

گام ششم: استخراج شاخص نهایی CORASO و رتبه‌بندی خطی: در نهایت، با ترکیب محاسبات گام‌های قبلی، یک شاخص عددی نهایی برای هر گزینه به دست می‌آید. گزینه‌ها بر اساس این شاخص نزولی مرتب شده و یک لیست خطی از اولویت اول تا آخر ارائه می‌شود.

۸.۲.۳. چرا روش‌های وزن‌دهی پیشینی (مانند کوراسو) در این مسئله ناکارآمد هستند؟

پس از بررسی‌های عمیق‌تر روی ساختار مسئله آبخوان اصفهان-برخوار، مشخص شد که اعمال رتبه‌بندی‌های خطی و وزن‌دهی‌های صلب (رویکرد پیشینی) در مسائل واقعی مدیریت منابع آب با چالش‌های بنیادی مواجه است. دلایل این موضوع را می‌توان در چند بخش خلاصه کرد:

الف) تحلیل فضای تعارض در دیدگاه و ضرورت بازنگری در روش‌شناسی پژوهش

آبخوان اصفهان-برخوار نه تنها یک سامانه هیدرولوژیکی، بلکه بستری متراکم از ذی‌نفعان و ذی‌مدخلان با اهداف، انتظارات و مقیاس‌های زمانی متعارض و دیدگاه نخبگانی مختلف است. در چنین فضایی، استفاده از روش‌های «پیشینی»^{۱۶} که متکی بر

^{۱۶} A Priori



وزن‌دهی ثابت توسط پژوهشگر است، نه تنها یک خطای روش شناختی، بلکه نادیده گرفتن ماهیت سیاسی تصمیم‌گیری در حکمرانی آب است.

(۱) تعارضات بین‌بخشی^{۱۷}

اهداف کلان نهادهای مختلف در تقابل مستقیم با یکدیگر قرار دارند:

- بخش کشاورزی: بر تداوم معیشت، امنیت غذایی و حفظ حقوق تاریخی (حقابه) تأکید دارد، در حالی که برنامه‌های «تعادل‌بخشی سفره آب زیرزمینی» مستقیماً محدودکننده فعالیت‌های این بخش است.
- بخش صنعت: بر امنیت تأمین آب برای تداوم تولید و توسعه اقتصادی متمرکز است که با محدودیت‌های استخراج آب زیرزمینی در تضاد است.
- مدیریت شهری (شهرداری): متولی حفظ فضای سبز، مدیریت مادی‌ها و تلطیف دمای محیط است که نیاز به تخصیص حقابه دارد، اما با محدودیت‌های شدید منابع آبی مواجه است.
- نهادهای مدنی و عمومی: مطالبه‌گر جاری‌سازی دائمی زاینده‌رود و احیای جریان‌های سطحی به‌عنوان حق عمومی و زیست‌محیطی هستند.
- حکمرانی کلان (استانداری): متولی ایجاد توازن ناپایدار میان رشد اقتصادی، امنیت اجتماعی و ملاحظات محیط‌زیستی است.

(۲) تعارضات درون‌بخشی^{۱۸}

پیچیدگی مسئله زمانی دوچندان می‌شود که تضادهای درونی حاکم بر هر یک از این نهادها نیز لحاظ گردد:

- تضاد بین کشاورزان شهرستان‌های برخوار و شاهین‌شهر با کشاورزان خمینی‌شهر و اصفهان: شکاف عمیق میان کشاورزان شهرستان‌های دشت اصفهان - برخوار که به دلیل موقعیت جغرافیایی از دسترسی متفاوتی به منابع آب برخوردارند، هرگونه توافق عمومی برای مدیریت یکپارچه را با چالش «عدالت در توزیع آب» مواجه کرده است.
- تضاد نهادی در حکمرانی آب: چالش ساختاری شرکت آب منطقه‌ای در مدیریت «مأموریت‌های دوگانه»؛ این نهاد از یک‌سو متولی حاکمیتی حفاظت و صیانت از منابع آب زیرزمینی است، و از سوی دیگر با ضرورت‌های عملکردی در فرآیند تخصیص و عرضه آب مواجه است که با پایداری عملیاتی و تأمین هزینه‌های زیرساختی پیوند خورده است. این وضعیت نیازمند ایجاد توازن ظریف میان رویکرد حفاظتی و ملاحظات جاری مدیریت منابع است.

(۳) ضرورت گذار به تصمیم‌گیری پسینی

در فضای فوق، تخصیص «وزن» به معیارها توسط پژوهشگر، عملاً به‌معنای جانب‌داری علمی از یک دیدگاه در برابر دیگری است. مثلاً افزایش وزنی «اثرگذاری بر منابع آب» بدون در نظر گرفتن تبعات آن، عملاً به‌معنای نادیده گرفتن اولویت معیشتی کشاورزان انتهای شبکه است. در واقعیت.

^{۱۷} Inter-sectoral Conflicts

^{۱۸} Intra-sectoral Conflicts

در این فضا، مسئله اصلی نه صرفاً تعارض میان ذی‌نفعان، بلکه تکثر دیدگاه‌ها در میان صاحب‌نظران، کارفرمایان، نخبگان و دیگر افراد اثرگذار در فرآیند ارائه، ارزیابی و انتخاب راهکارهاست. هر یک از این کنشگران، بر اساس جایگاه تخصصی، تجربه اجرایی، مسئولیت نهادی و نوع مواجهه با مسئله، ممکن است برداشت متفاوتی از اهمیت معیارها و اولویت راهکارها داشته باشند. از این رو، تخصیص «وزن» به معیارها از سوی پژوهشگر، فراتر از یک اقدام صرفاً فنی، عملاً به معنای ترجیح ضمنی یک چارچوب تحلیلی و یک نظام اولویت‌بندی خاص بر سایر دیدگاه‌های موجود خواهد بود.

برای مثال، افزایش وزن معیار «اثرگذاری بر منابع آب آبخوان» بدون توجه هم‌زمان به هزینه‌ها و ریسک اجرایی آن، می‌تواند به معنای برجسته‌سازی یک نوع نگاه تخصصی و کم‌رنگ شدن ملاحظات باشد که از سوی برخی دیگر از صاحب‌نظران یا کارفرمایان مورد تأکید قرار می‌گیرد. در چنین شرایطی، از آنجا که افراد و نهادهای متعددی در صورت‌بندی مسئله و نیز در پذیرش یا رد راهکارهای پیشنهادی نقش دارند، تعیین پیشینی اوزان و انتخاب راهکارها بر آن اساس، به احتمال زیاد با دیدگاه‌ها و ترجیحات بخشی از این جامعه اثرگذار و ذی‌مدخل در تعارض قرار خواهد گرفت.

بر این مبنا، وزن‌دهی پیشینی را نمی‌توان اقدامی کاملاً خنثی و صرفاً محاسباتی تلقی کرد؛ بلکه این فرایند ماهیتی راهبردی و ارزشی دارد. از همین رو، مرجعیت پژوهشگر برای تعیین قطعی این اوزان، لزوماً از سوی همه بازیگران مؤثر پذیرفته نخواهد شد، زیرا هر نظام وزن‌دهی، به‌طور ضمنی بازتاب‌دهنده ترجیح یک نوع نگاه نسبت به دیگر نگاه‌های موجود است.

رویکرد روش‌شناختی پژوهش:

با توجه به این پیچیدگی‌ها، پژوهشگر از هرگونه وزن‌دهی پیش فرض اجتناب می‌کند. رویکرد اتخاذ شده، تصمیم‌گیری پسینی است که بر سه گام استوار است:

۱) تولید فضای راهکارهای کارا (جبهه پارتو): تولید تمامی سناریوهای ممکن برای کاهش فرونشست.

۲) واگذاری تصمیم به جلسات تصمیم‌گیری: پژوهشگر در این مطالعه نقش «طراح فضای تصمیم» را ایفا می‌کند تا تصمیم‌گیرنده (که واجد مشروعیت قانونی است) بتواند با آگاهی از هزینه‌ها و منافع دقیق هر سناریو، در مورد سبد نهایی راهکارها به توافقی مشارکتی دست یابد.

ب) پویایی و عدم قطعیت در ترجیحات خبرگان

یکی دیگر از ملاحظات اساسی در انتخاب رویکرد تصمیم‌گیری، پویایی و عدم قطعیت در ترجیحات خبرگان و تصمیم‌گیرندگان است. شواهد پژوهشی نشان می‌دهد که خبرگان، مدیران و سایر افراد اثرگذار در فرایند تصمیم‌گیری، معمولاً پیش از آنکه پیامدهای واقعی گزینه‌ها را به‌صورت عینی و مقایسه‌پذیر مشاهده کنند، قادر به ارائه اوزان دقیق، پایدار و کاملاً قابل اتکا برای معیارها نیستند. در چنین شرایطی، تخصیص وزن نه بر پایه مواجهه با نتایج واقعی، بلکه در یک فضای انتزاعی، ذهنی و تا حدی فرضی انجام می‌شود؛ فضایی که در آن، افراد ناگزیرند بدون مشاهده روشن هزینه‌ها، منافع و آثار جانبی هر گزینه، درباره اهمیت نسبی معیارها اظهار نظر کنند.

مسئله آن است که ترجیحات انسانی غالباً ثابت، صلب و مستقل از زمینه نیستند، بلکه در مواجهه با اطلاعات جدید، شفاف‌تر شدن پیامدها و آشکار شدن مبادله‌ها میان اهداف، دستخوش تغییر می‌شوند. به بیان دیگر، آنچه یک خبره یا مدیر در مرحله اولیه و در قالب پرسشنامه یا مصاحبه به عنوان «اولویت» بیان می‌کند، لزوماً همان ترجیحی نیست که پس از مشاهده نتایج واقعی گزینه‌ها همچنان بر آن پافشاری خواهد کرد. برای مثال، ممکن است یک مدیر در مرحله وزن‌دهی اولیه، به معیار «کاهش

مصرف آب» وزن بالایی اختصاص دهد، اما هنگامی که در نتایج مدل مشاهده می‌کند تحقق این هدف در یک سناریوی خاص با پیامدهایی نظیر کاهش درآمد کشاورزان یا بروز تنش‌های اجتماعی همراه است، ارزیابی وی از مطلوبیت آن گزینه تغییر یابد و ترجیح او به سمت راهکاری با توازن بیشتر میان اهداف سوق پیدا کند.

از این منظر، ترجیحات خبرگان را نمی‌توان مجموعه‌ای از قضاوت‌های قطعی، تغییرناپذیر و از پیش تثبیت شده دانست. برعکس، این ترجیحات دارای ظرفیت پویایی هستند و در تعامل با نتایج، پیامدها و شواهد عینی بازتعریف می‌شوند. بنابراین، صلب فرض کردن ترجیحات در ابتدای فرایند تصمیم‌گیری و تبدیل آن‌ها به اوزان ثابت، می‌تواند مدل را از واقعیت تصمیم‌گیری فاصله دهد؛ زیرا در این حالت، نظام ترجیحات به کاررفته در مدل، بازتاب‌دهنده ترجیحات واقعی افراد در هنگام مواجهه با پیامدهای ملموس گزینه‌ها نخواهد بود، بلکه صرفاً بازتاب‌دهنده قضاوتی اولیه و انتزاعی است.

بر همین اساس، یکی از محدودیت‌های بنیادین رویکردهای مبتنی بر وزن‌دهی پیشینی آن است که پویایی ترجیحات انسانی را نادیده می‌گیرند و فرض می‌کنند تصمیم‌گیرنده از همان آغاز، تصویر روشنی از اولویت‌های خود دارد. حال آنکه در مسائل پیچیده‌ای مانند مدیریت آب و کاهش فرونشست، ترجیحات اغلب در جریان مشاهده و مقایسه گزینه‌ها شکل می‌گیرند، تعدیل می‌شوند و در نهایت تثبیت نسبی می‌یابند. از این‌رو، هر چارچوب تصمیم‌گیری که بخواهد به واقعیت نزدیک‌تر باشد، باید امکان بازاندیشی در ترجیحات را پس از مشاهده نتایج و تحلیل مبادله‌ها فراهم کند، نه آنکه آن‌ها را در ابتدای فرایند به صورت قطعی و غیرقابل تغییر مفروض بگیرد.

ج) حساسیت بالای رتبه‌بندی نهایی به نوسانات کوچک اوزان

یکی دیگر از ایرادهای فنی و روش‌شناختی در روش‌های رتبه‌بندی مبتنی بر وزن‌دهی، حساسیت بالای نتایج نهایی به تغییرات کوچک در اوزان معیارهاست. در بسیاری از روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، به‌ویژه روش‌هایی که بر ترکیب خطی معیارها و محاسبه امتیاز نهایی برای هر گزینه استوارند، وزن هر معیار نقش تعیین‌کننده‌ای در جایگاه نهایی راهکارها دارد. در چنین ساختاری، حتی تغییرات جزئی در مقدار وزن‌ها می‌تواند منجر به تغییر محسوس در رتبه‌بندی گزینه‌ها شود؛ به گونه‌ای که برای مثال، افزایش وزن معیار «هزینه» از ۰.۲۵ به ۰.۲۸ یا کاهش اندک وزن معیار «اثرگذاری بر کاهش فرونشست» ممکن است جایگاه راهکار اول و دوم را به‌طور کامل جابه‌جا کند.

این مسئله از آن جهت اهمیت دارد که اوزان معیارها، به‌ویژه در مسائل پیچیده و چندبعدی، معمولاً بر پایه قضاوت‌های انسانی، برداشت‌های کارشناسی و ترجیحات ذهنی تعیین می‌شوند. بنابراین، هنگامی که تغییرات بسیار کوچک در این اوزان بتواند نتیجه نهایی مدل را دگرگون کند، پایداری و قابلیت اتکای رتبه‌بندی با تردید مواجه می‌شود. در چنین شرایطی، این پرسش مطرح می‌شود که آیا راهکاری که در رتبه نخست قرار گرفته، واقعاً از نظر عملکردی بر سایر گزینه‌ها برتری معنادار دارد، یا صرفاً محصول یک ترکیب خاص از اوزان انتخاب‌شده است. به بیان دیگر، رتبه نهایی ممکن است بیش از آنکه بازتاب‌دهنده برتری واقعی راهکارها باشد، بازتاب‌دهنده حساسیت مدل نسبت به وزن‌های ذهنی و اولیه باشد.

پیامد عملی این حساسیت آن است که نتایج حاصل از مدل، به جای آنکه مبنایی پایدار برای گفت‌وگو و تصمیم‌گیری فراهم کند، خود به موضوع مناقشه تبدیل می‌شود. در جلسات تصمیم‌گیری، تمرکز اصلی باید بر تحلیل اثرات واقعی راهکارها، پیامدهای اجرایی، هزینه‌ها، منافع و مبادله‌های میان اهداف مختلف باشد. با این حال، در صورت استفاده از رتبه‌بندی‌های بسیار حساس به اوزان، بخش قابل توجهی از بحث‌ها ممکن است به درستی یا نادرستی اوزان تعیین‌شده توسط پژوهشگر اختصاص



یابد. در نتیجه، به جای آنکه گفت‌وگو حول این پرسش شکل گیرد که «هر راهکار چه پیامدهایی دارد و در چه شرایطی مناسب‌تر است»، بحث‌ها به این سمت منحرف می‌شود که «چرا وزن این معیار ۰.۲۵ در نظر گرفته شده و نه ۰.۲۸» یا «چرا وزن معیار دیگر کمتر یا بیشتر لحاظ شده است».

این وضعیت به‌ویژه در موضوعاتی مانند مدیریت آب و کاهش فرونشست، که با پیامدهای اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و نهادی گسترده همراه است، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. در چنین مسائلی، اختلاف اندک در وزندهی ممکن است ناشی از تفاوت دیدگاه میان خبرگان، کارفرمایان یا نهادهای اثرگذار باشد؛ اما همین اختلاف اندک می‌تواند خروجی مدل را به‌طور قابل توجهی تغییر دهد. بنابراین، اتکای کامل به یک رتبه‌بندی نهایی و منفرد که بر پایه مجموعه‌ای از اوزان ثابت تولید شده است، می‌تواند تصویری بیش از حد قطعی و ساده‌شده از واقعیت تصمیم‌گیری ارائه دهد.

از این منظر، حساسیت بالایی رتبه‌بندی به نوسانات کوچک اوزان، یکی از محدودیت‌های جدی رویکردهای پیشینی و وزن‌محور محسوب می‌شود. این حساسیت موجب می‌شود نتایج از پایداری لازم برخوردار نباشند و مشروعیت آن‌ها نزد تصمیم‌گیرندگان و صاحب‌نظران کاهش یابد. به همین دلیل، در مواجهه با مسائل پیچیده، به جای تأکید بر تولید یک رتبه‌بندی قطعی و وابسته به اوزان اولیه، مناسب‌تر است فضای تصمیم به گونه‌ای طراحی شود که گزینه‌های مختلف، عملکرد آن‌ها در معیارهای گوناگون و مبادله‌های میان آن‌ها به‌صورت شفاف ارائه گردد. چنین رویکردی امکان می‌دهد تصمیم‌گیرندگان به جای درگیر شدن در مناقشه بر سر عدد دقیق اوزان، بر فهم پیامدهای واقعی راهکارها و انتخاب آگاهانه‌تر تمرکز کنند.

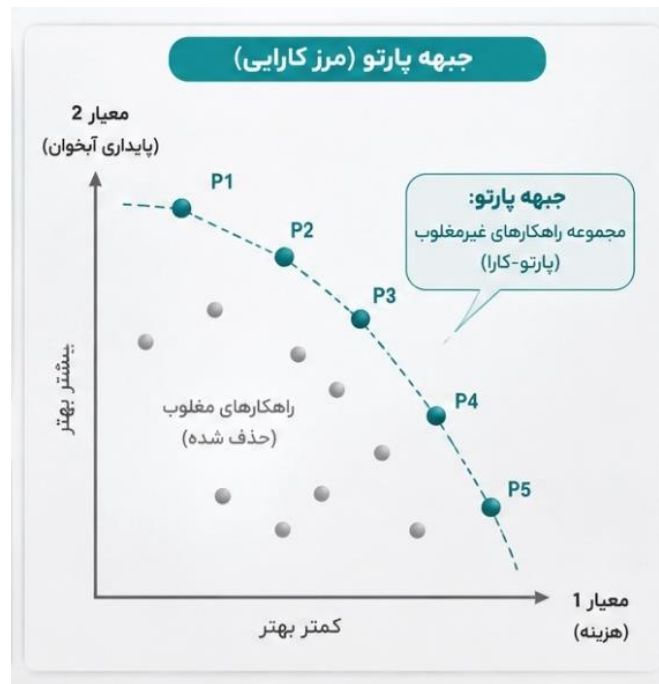
۸.۲.۱. مفهوم جبهه پارتو و راهکارهای غیر مغلوب

هسته اصلی رویکرد پسینی، استخراج جبهه پارتو (Pareto Frontier) است (شکل ۲۵). در مسائل چندهدفه، معمولاً یک راهکار وجود ندارد که در همه معیارها بهترین باشد. در نتیجه، به دنبال راهکارهای غیرمغلوب (Non-dominated) می‌گردیم.

یک راهکار مانند A زمانی مغلوب راهکار B می‌شود که راهکار B در تمامی معیارها عملکردی برابر یا بهتر از A داشته باشد و حداقل در یکی از معیارها به وضوح از A برتر باشد. اگر چنین راهکاری (B) وجود داشته باشد، راهکار A کارا نیست و از فضای تصمیم حذف می‌شود.

اما اگر راهکاری وجود داشته باشد که بهبود در یکی از معیارهای آن (مثلاً اثرگذاری بر منابع آب آبخوان) مستلزم پس‌رفت در معیار دیگر (مثلاً افزایش شدید هزینه‌ها) باشد، این راهکار غیرمغلوب یا پارتو-کارا است.

مجموعه تمامی این راهکارهای غیرمغلوب، جبهه پارتو را شکل می‌دهند. این جبهه در **واقع‌مرز کارایی سیستم** را مشخص می‌کند و به مدیران نشان می‌دهد که برای کسب هر میزان بهبود در پایداری آبخوان، دقیقاً چه هزینه‌ای (اجتماعی یا اقتصادی) را باید پردازند. شکل ۲۵، مفهوم **جبهه پارتو و راهکارهای غیرمغلوب** را در تصمیم‌گیری چندهدفه نمایش می‌دهد و نشان می‌دهد چگونه می‌توان با حذف گزینه‌های مغلوب، مجموعه‌ای از کاراترین راهکارها را برای انتخاب نهایی در اختیار تصمیم‌گیران قرار داد.



شکل ۲۵- مفهوم جبهه پارتو؛ شناسایی راهکارهای غیرمغلوب و مرز کارایی تصمیم‌ها.

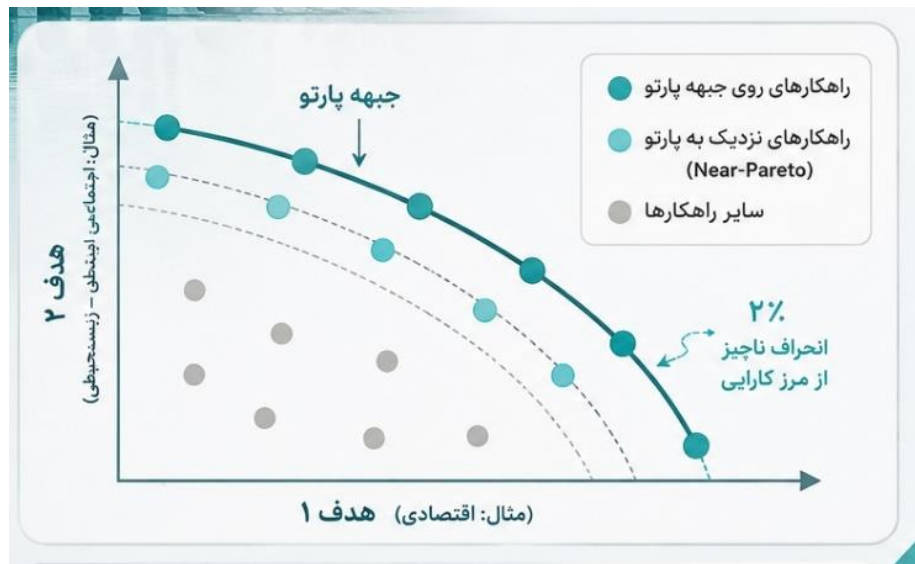
۸.۲.۲. ضرورت توجه به راهکارهای نزدیک به پارتو (Near-Pareto Solutions)

در ریاضیات محض، پس از حل مدل تنها نقاط روی جبهه پارتو به عنوان جواب‌های بهینه معرفی می‌شوند. اما در مهندسی و مدیریت منابع آب در دنیای واقعی، محدود کردن تصمیم به نقاط دقیق پارتو ممکن است ما را از گزینه‌های بسیار ارزشمند اجرایی محروم کند. به همین دلیل، در این پژوهش مفهوم راهکارهای نزدیک به پارتو (Near-Pareto) وارد محاسبات شده است.

راهکار نزدیک به پارتو گزینه‌ای است که از نظر محاسباتی دقیقاً روی مرز پارتو قرار نگرفته و فاصله اندکی (مثلاً در حد چند درصد انحراف ناچیز) با مرز کارایی دارد. دلیل اهمیت این راهکارها در فرآیند تصمیم‌گیری اصفهان-برخوار این است که قرار نیست صرفاً یک راهکار انتخاب شود بلکه باید یک سبد از راهکارها انتخاب گردد که گزینه‌های نزدیک به پارتو بتواند در این سبد قرار گیرد.

گاهی یک گزینه که روی کاغذ ۲٪ عملکرد ضعیف‌تری نسبت به جواب مطلق پارتو دارد، میتواند یک گزینه‌ی پذیرفته شده باشد. معرفی این گزینه‌ها انعطاف‌پذیری فوق‌العاده‌ای به کارفرما در جلسات تصمیم‌گیری می‌دهد تا بتواند سبدی از راهکارهای واقع‌بینانه و قابل اجرا را انتخاب کند.

در شکل ۲۶، تفاوت میان راهکارهای پارتو و راهکارهای نزدیک به پارتو نمایش داده شده است؛ گزینه‌هایی که با وجود فاصله اندک از مرز کارایی، می‌توانند به دلیل قابلیت اجرا و پذیرش بیشتر، در سبد نهایی تصمیم‌گیری قرار گیرند.



شکل ۲۶- مفهوم راهکارهای نزدیک به پارتو و نقش آن‌ها در انتخاب سبکی از گزینه‌های کارآمد و قابل اجرا

۸.۲.۳. گذار از رویکرد پیشینی به رویکرد پسینی

در سایه پیچیدگی‌های تعارض منافع میان ذی‌نفعان و تعارض دیدگاه‌ها میان ذی‌مدخلان آبخوان اصفهان-برخوار و وجود پارادوکس‌های مدیریتی اتخاذ روش‌های سنتی تصمیم‌گیری که بر وزن‌دهی پیش‌فرض استوارند، با محدودیت‌های جدی مواجه است. از آنجا که تعیین وزن، یک «فرآیند هنجاری و ترجیح‌محور» محسوب می‌شود، پژوهشگر صلاحیت تحمیل اولویت‌های ذهنی خود بر مدیران و تصمیم‌گیران را ندارد. در نتیجه، برای حل این چالش‌ها، در این پژوهش تصمیم بر آن شد که پارادایم تصمیم‌سازی از حالت «پیشینی» (A Priori) به «پسینی» (A Posteriori) تغییر یابد. تفاوت مفهومی و عملیاتی این دو رویکرد به شرح زیر تبیین می‌گردد:

۱. رویکرد پیشینی^{۱۹}

این رویکرد که فلسفه روش‌هایی نظیر AHP, CORASO و TOPSIS بر آن بنا شده است، بر این پیش‌فرض استوار است که تصمیم‌گیرنده می‌تواند پیش از تحلیل گزینه‌ها، به تنهایی یا با مشارکت صاحب نظران اهمیت نسبی اهداف و معیارها را مشخص کند. در این روش، پژوهشگر یا خبرگان منتخب، اقدام به تعیین وزن معیارها نموده و با فرمول‌بندی ریاضی، اهداف را به یک «تک‌تابع ادغامی» تبدیل می‌کنند.

فرآیند: در این رویکرد، ابتدا پژوهشگر یا خبره با تعیین وزن معیارها، اهمیت نسبی اهداف را مشخص می‌کند؛ سپس مدل بر اساس این اوزان حل شده و گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند؛ و در نهایت، خروجی فرایند به صورت یک جواب نهایی واحد و از پیش جهت‌گیری شده به تصمیم‌گیرنده ارائه می‌گردد. چالش: این رویکرد مدل را وادار به تولید تنها یک یا چند جواب بهینه می‌کند که در فضای متراکم تفاوت و تعارض دیدگاه‌ها، عملاً یک جواب «تحمیلی» است که مشروعیت آن نزد سایر ذی‌نفعان به چالش کشیده می‌شود.

^{۱۹} A Priori

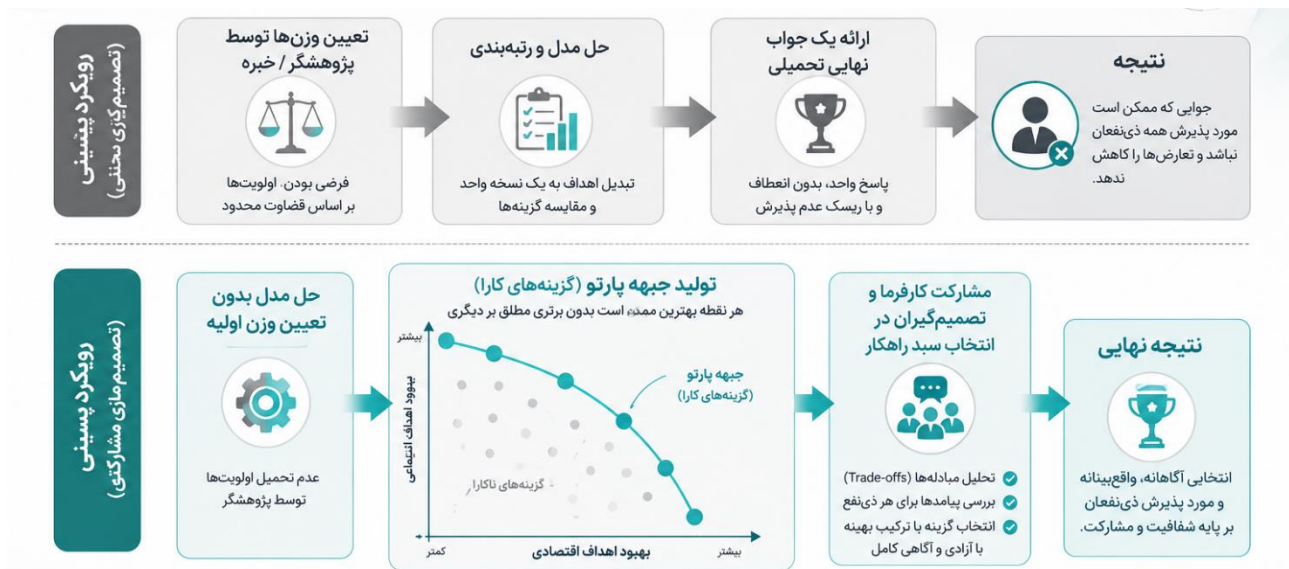
۲. رویکرد پسینی^{۲۰}

در این رویکرد که رویکرد انتخابی پژوهش حاضر است، پژوهشگر هیچ فرضی در مورد اوزان معیارها اعمال نمی‌کند. مدل ریاضی به گونه‌ای حل می‌شود که تمامی جواب‌های بهینه و «کارا» (جبهه پارتو) که هیچ کدام بر دیگری برتری مطلق ندارند، تولید شوند.

فرآیند: در این رویکرد، مدل بدون اعمال هرگونه وزن اولیه برای معیارها حل می‌شود تا مجموعه‌ای از جواب‌های کارا در قالب جبهه پارتو تولید گردد؛ سپس این نتایج به گونه‌ای ارائه می‌شود که کارفرما و تصمیم‌گیران بتوانند با بررسی گزینه‌های موجود و مقایسه مبادله‌های میان آن‌ها، در انتخاب سبد راهکار مناسب مشارکت کنند.

مزیت: در این مدل، نتایج در قالب یک «جبهه پارتو» به تصمیم‌گیرنده ارائه می‌شود. کارفرما و ذی‌نفعان با مشاهده تمام گزینه‌های ممکن و تحلیل دقیق «مبادله‌ها»^{۲۱}، با آزادی کامل اقدام به انتخاب گزینه یا ترکیب بهینه می‌نمایند.

در شکل ۲۴، تفاوت دو پارادایم تصمیم‌گیری در مسائل پیچیده و چندذی‌نفعی را نشان می‌دهد. در رویکرد پیشینی، وزن معیارها پیش از تحلیل تعیین شده و در نهایت یک پاسخ واحد به تصمیم‌گیرندگان ارائه می‌شود. در مقابل، در رویکرد پسینی، بدون اعمال وزن اولیه، مجموعه‌ای از راهکارهای کارا (جبهه پارتو) تولید می‌شود تا تصمیم‌گیرندگان با بررسی مبادله‌ها و بر اساس اولویت‌ها و شرایط واقعی، مناسب‌ترین گزینه یا ترکیب راهکارها را انتخاب کنند. در این چارچوب، نقش پژوهشگر از «تحویل‌کننده تصمیم» به «تسهیل‌گر فرآیند تصمیم‌سازی» تغییر می‌یابد. تفاوت دو روش رویکرد پیشینی و پسینی در نمودار مفهومی زیر ارائه گردیده است.



شکل ۲۴- مقایسه فرآیند تصمیم‌سازی در رویکردهای پیشینی و پسینی با تأکید بر نقش جبهه پارتو

نتیجه‌گیری روش‌شناختی

با اتخاذ رویکرد پسینی، نقش پژوهشگر از «تصمیم‌ساز تحمیلی» به «تسهیل‌گر فضای تصمیم» ارتقا می‌یابد. در این چارچوب،

^{۲۰} A Posteriori

^{۲۱} Trade-offs



جبهه پارتو مشتمل بر مجموعه‌ای از راهکارهای «کارا» تولید می‌شود که تبیین‌کننده هزینه‌ها و منافع هر ذی‌نفع است. این مدل به‌جای تحمیل یک گزینه، «فضای انتخاب» را در اختیار تصمیم‌گیرندگان دارای مشروعیت قانونی قرار می‌دهد تا با آگاهی از مبادلات مدیریتی، به یک توافق مشارکتی و واقع‌بینانه دست یابند.

۸.۲.۴. ابزارهای نمایش گرافیکی فضای تصمیم

با افزایش تعداد راهکارها و معیارهای ارزیابی، بررسی مستقیم داده‌های عددی و ماتریس‌های عملکرد برای ذی‌نفعان دشوار و در بسیاری موارد غیرعملی می‌شود. در مسائل چندمعیاره، صرف ارائه اعداد نمی‌تواند به‌خوبی مبادله‌ها، تعارض‌ها و الگوی عملکرد راهکارها را آشکار سازد؛ از این‌رو، استفاده از ابزارهای بصری‌سازی مکمل برای فهم بهتر فضای تصمیم ضروری است.

در حالتی که تعداد معیارها دو و حداکثر سه معیار باشد، امکان ترسیم مستقیم جبهه پارتو وجود دارد. در فضای دوبعدی، هر راهکار به‌صورت یک نقطه در صفحه نمایش داده می‌شود و مجموعه جواب‌های کارا به‌روشنی قابل مشاهده است. در فضای سه‌بعدی نیز این ترسیم همچنان ممکن است، هرچند خوانایی آن نسبت به حالت دوبعدی کمتر می‌شود. اما زمانی که تعداد معیارها از سه بیشتر شود، مسئله وارد فضای Π بعدی می‌گردد؛ فضایی که ادراک مستقیم آن برای انسان ممکن نیست و نمایش کامل آن در یک نمودار واحد عملاً کارایی خود را از دست می‌دهد. در چنین شرایطی، باید از روش‌های جایگزین برای نمایش ساختار تصمیم استفاده کرد. برای مثال، در یک مسئله شش‌معیاره می‌توان معیارها را به‌صورت دوبعدی ترسیم کرد تا روابط میان آن‌ها، تعارض‌ها و الگوهای مبادله بهتر آشکار شود.

۱. جدول مقایسه‌ای

نخستین ابزار تحلیلی است. این جدول مقادیر دقیق و خام عملکرد هر یک از راهکارهای منتخب جبهه پارتو و Near-Pareto را در تمامی معیارها نشان می‌دهد و مرجع اصلی برای تحلیل‌های عددی و مقایسه‌های دقیق محسوب می‌شود. با این حال، به دلیل حجم بالای اطلاعات، این جدول به‌تنهایی برای درک شهودی و سریع فضای تصمیم کافی نیست.

۲. نمودار راداری

این نمودار برای مقایسه بصری تعداد محدودی از راهکارها کاربرد دارد. در این نمودار، هر معیار بر روی یک شعاع قرار می‌گیرد و هر راهکار به‌صورت یک چندضلعی نمایش داده می‌شود. راهکارهای متوازن معمولاً به شکل چندضلعی‌های منظم‌تر دیده می‌شوند، در حالی که راهکارهای افراطی یا نامتوازن، شکل‌های کشیده و نامتقارن پیدا می‌کنند. البته این نمودار برای تعداد زیاد گزینه‌ها یا معیارها خوانایی خود را از دست می‌دهد.

۳. نمودار محورهای موازی

این نمودار یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای نمایش هم‌زمان تعداد زیاد معیارها و راهکارها به‌شمار می‌رود. در این نمودار، هر معیار به‌صورت یک محور عمودی نمایش داده می‌شود و هر راهکار یک خط شکسته است که این محورها را در نقاط متناظر با عملکرد خود قطع می‌کند. تقاطع خطوط میان دو محور، وجود تعارض میان معیارها را نشان می‌دهد؛ برای مثال، اگر خطوط بین



محور «هزینه» و «اثربخشی» به شدت متقاطع باشند، بیانگر آن است که بهبود یکی از این دو معیار معمولاً با تضعیف دیگری همراه است.

در مجموع، در مسائل چندمعیاره، ابزارهای بصری مکمل تحلیل‌های عددی هستند، نه جایگزین آن‌ها. جدول مقایسه‌ای دقت عددی را فراهم می‌کند، نمودار راداری الگوی کلی عملکرد را آشکار می‌سازد، و نمودار محورهای موازی برای فهم ساختار تعارض‌ها و مبادله‌ها در فضاها و چندبعدی کارآمد است. ترکیب این ابزارها می‌تواند درک فضای تصمیم را برای کارفرما و سایر ذی‌نفعان تسهیل کرده و انتخاب راهکار را شفاف‌تر و آگاهانه‌تر سازد.

۳.۸. مبانی ریاضی و منطق هوشمندانه نرمال‌سازی معیارها

در مسائل تصمیم‌گیری چندمعیاره، معیارهای ارزیابی معمولاً دارای ماهیت، مقیاس، دامنه تغییرات و الگوی توزیع متفاوت هستند؛ از این رو، مقایسه مستقیم آن‌ها امکان‌پذیر نیست. برخی معیارها در واحدهای پولی سنجیده می‌شوند، برخی در مقیاس‌های فیزیکی مانند حجم آب، و برخی دیگر ممکن است شاخص‌های نسبی یا امتیازهای کارشناسی باشند. در چنین شرایطی، اگر مقادیر خام معیارها بدون تبدیل و هم‌مقیاس‌سازی وارد فرایند تحلیل شوند، معیارهایی که دامنه عددی بزرگ‌تری دارند، صرف‌نظر از اهمیت واقعی‌شان، اثر بیشتری بر نتایج خواهند گذاشت و در نتیجه، تصویری گمراه‌کننده از برتری یا ضعف راهکارها ایجاد می‌شود. از این رو، نرمال‌سازی یکی از مراحل بنیادین در ساخت فضای تصمیم محسوب می‌شود؛ مرحله‌ای که طی آن، مقادیر ناهمگن معیارها به یک دامنه مشترک، معمولاً بین صفر و یک، منتقل می‌شوند تا امکان مقایسه، تحلیل و نمایش هم‌زمان آن‌ها فراهم گردد.

با این حال، نرمال‌سازی صرفاً یک تبدیل ریاضی خنثی و یکنواخت نیست، بلکه انتخاب نوع تابع نرمال‌سازی باید با ماهیت داده‌ها، رفتار توزیعی آن‌ها و منطق تحلیلی هر معیار سازگار باشد. استفاده از یک روش خطی ساده برای همه معیارها، هرچند از نظر محاسباتی آسان است، اما در بسیاری از موارد می‌تواند منجر به از دست رفتن تفاوت‌های معنادار، کاهش قدرت تفکیک مدل و حتی تحریف اولویت‌های تحلیلی شود. این مسئله به‌ویژه در پژوهش حاضر اهمیت بیشتری دارد، زیرا داده‌های مربوط به معیارهای مختلف در آبخوان اصفهان-برخوار نه تنها از نظر مقیاس، بلکه از حیث الگوی پراکندگی، چولگی توزیع و نقاط حساس تصمیم‌گیری نیز با یکدیگر متفاوت بودند. بنابراین، برای پرهیز از ساده‌سازی غیردقیق و به‌منظور حفظ معنای واقعی تفاوت‌ها میان راهکارها، برای هر معیار از تابع نرمال‌سازی متناسب با ویژگی‌های آماری و تحلیلی آن استفاده شد.

بر این اساس، در این پژوهش به جای به کارگیری یک الگوی یکنواخت برای همه معیارها، از رویکردی هوشمندانه و متناسب با ماهیت داده‌ها استفاده شد؛ به گونه‌ای که برای معیار هزینه، نرمال‌سازی لگاریتمی و برای معیار منابع آب، نرمال‌سازی مبتنی بر تابع لجستیک به کار گرفته شد. منطق انتخاب هر یک از این توابع در ادامه تشریح می‌شود.

مشکل اساسیِ نگاشت‌های خطی در این است که نرخ تغییرات (Sensitivity) را در سراسر دامنه داده‌ها یکسان فرض می‌کنند؛ در حالی که رفتار داده‌های معیارها در آبخوان اصفهان-برخوار دارای ویژگی‌های غیرخطی و ناهمگنی است. برای مثال، در معیارهای هزینه‌ای یا شاخص‌های بهره‌وری آب، تفاوت‌های اندک در بازه‌های مقادیر «بهینه» یا «بحرانی»، بار معنایی و راهبردی متفاوتی نسبت به بازه‌های میانی دارند. استفاده از یک رویکرد خطی، عملاً باعث فشردگی کاذب در نواحی حساس و نادیده گرفتن تفکیک‌پذیری (Discriminability) بین گزینه‌ها می‌شود؛ به گونه‌ای که تفاوت‌های معنادار در بخش‌های



کلیدی تصمیم‌گیری در نمودار نهایی گم می‌شود. از این‌رو، برای پرهیز از این تقلیل‌گرایی فنی و بازتاب دقیق‌تر ترجیحات سیاست‌گذارانه، از توابع نرمال‌سازی تخصصی (غیرخطی) استفاده شد:

الف) نرمال‌سازی لگاریتمی برای معیار هزینه

«نرمال‌سازی برای هم‌مقیاس کردن داده‌ها حیاتی است، اما روش‌های خطی ساده برای داده‌های آبخوان اصفهان-برخوار مناسب نبودند. از آنجا که توزیع هزینه‌ها به‌شدت نامتقارن است (تمرکز بیشتر راهکارها در هزینه‌های پایین)، روش‌های خطی باعث «فشرده‌گی کاذب» می‌شوند؛ یعنی تفاوت‌های ظریف و مهم بین راهکارهای کم‌هزینه را از بین می‌برند و آن‌ها را در نمودار یکسان نشان می‌دهند. در حالی که برای ما، حفظ «ترتیب» و تمایز دقیق این گزینه‌های اقتصادی بسیار کلیدی‌تر از فاصله عددی آن‌هاست.

به همین دلیل از «نرمال‌سازی لگاریتمی معکوس» استفاده شد. این روش دو مزیت اصلی دارد:

۱. ناحیه هزینه‌های پایین را در نمودار «باز» می‌کند تا تفاوت‌های دقیق بین راهکارها بهتر دیده و تفکیک شوند (افزایش دقت در تصمیم‌گیری).
۲. ماهیت معکوس آن، به کاهش هزینه در ناحیه بهینه، «وزن» و اهمیت غیرخطی بیشتری می‌دهد که با هدف اصلی مدیریتی ما همسو است.

در نتیجه، این روش به جای یکسان‌انگاری ساده، اولویت‌بندی واقعی راهکارها را در فضای تصمیم‌گیری بهتر حفظ می‌کند. جهت اصلاح ناهنجاری در مقیاس داده‌ها و متقارن‌سازی توزیع معیارها، تبدیل لگاریتم طبیعی اعمال گردید؛ این رویکرد ضمن تعدیل دامنه متغیرها، منجر به بهبود تفکیک‌پذیری در فضای تصمیم‌گیری می‌شود.

$$x'_i = \ln(x)$$

سپس، با توجه به اینکه هزینه یک معیار کاهش‌ی (هرچه کمتر، مطلوب‌تر) است، مقادیر لگاریتمی به صورت معکوس نرمال‌سازی شدند تا مقدار نزدیک به ۱ نشان‌دهنده هزینه کمتر (وضعیت بهتر) باشد:

$$n_i = \frac{\max(\ln x_i) - \ln x_i}{\max(\ln x_{ij}) - \min(\ln x_{ij})}$$

این فرمولاسیون باعث می‌شود که حساسیت مدل نسبت به اختلاف هزینه‌ها در پروژه‌های کوچک و متوسط حفظ شده و در عین حال گزینه‌های با هزینه‌های نجومی نیز به درستی مقیاس‌دهی شوند.

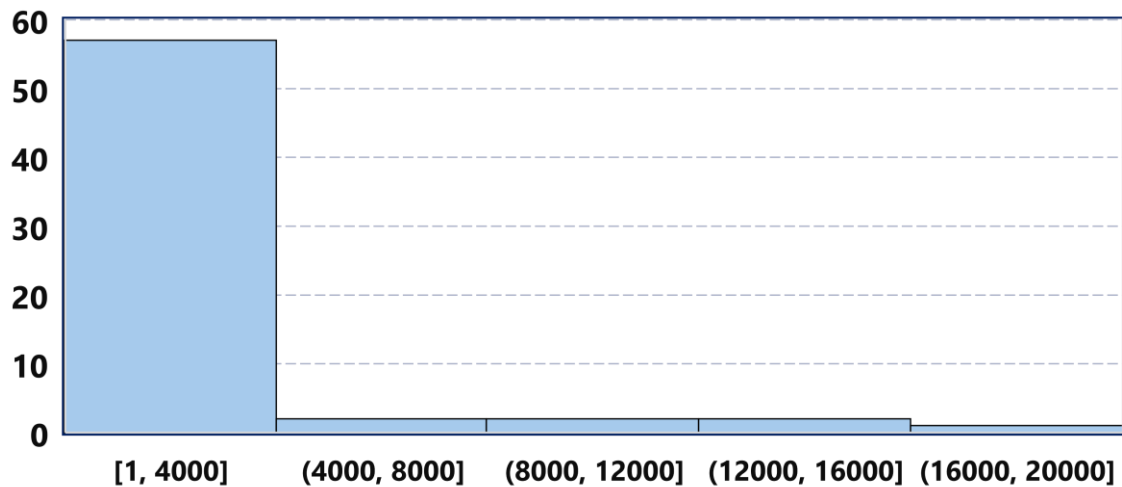
بر اساس الگوی شکل ۲۷، توزیع داده‌ها به‌شدت **چوله به راست** است؛ یعنی بخش عمده مشاهدات در مقادیر پایین متمرکز شده‌اند و با افزایش مقدار شاخص، فراوانی به‌سرعت کاهش می‌یابد.

به‌طور مشخص، بیشترین فراوانی در نخستین بازه، یعنی حدود ۰ تا ۵۰۰۰، قرار دارد و خط درصد تجمعی نیز نشان می‌دهد که حدود ۸۵ تا ۹۰ درصد کل داده‌ها در همین بازه نخست متمرکز هستند. این موضوع بیانگر آن است که اغلب گزینه‌ها یا مشاهدات دارای مقادیر پایین‌اند و فقط تعداد محدودی از آن‌ها در سطوح بالاتر قرار می‌گیرند.

از نظر تحلیلی، چنین الگویی نشان می‌دهد که توزیع متغیر مورد نظر **نامتقارن** است و دارای **دنباله بلند در سمت راست** است. در نتیجه، استفاده از روش‌های خطی ساده برای تحلیل یا نرمال‌سازی این معیار ممکن است باعث شود تفاوت‌های مهم میان مقادیر پایین به‌خوبی دیده نشود، زیرا بخش اصلی داده‌ها در یک ناحیه متراکم قرار گرفته‌اند. به همین دلیل، این نوع توزیع

معمولاً نیازمند استفاده از روش‌های نرمال‌سازی غیرخطی، مانند **تبدیل لگاریتمی معکوس**، است تا هم چولگی داده‌ها تعدیل شود و هم تمایز میان گزینه‌های واقع شده در ناحیه پرتراکم بهتر حفظ گردد.

نمودار توزیع فراوانی معیار هزینه اجرایی راهکارها (میلیارد تومان)



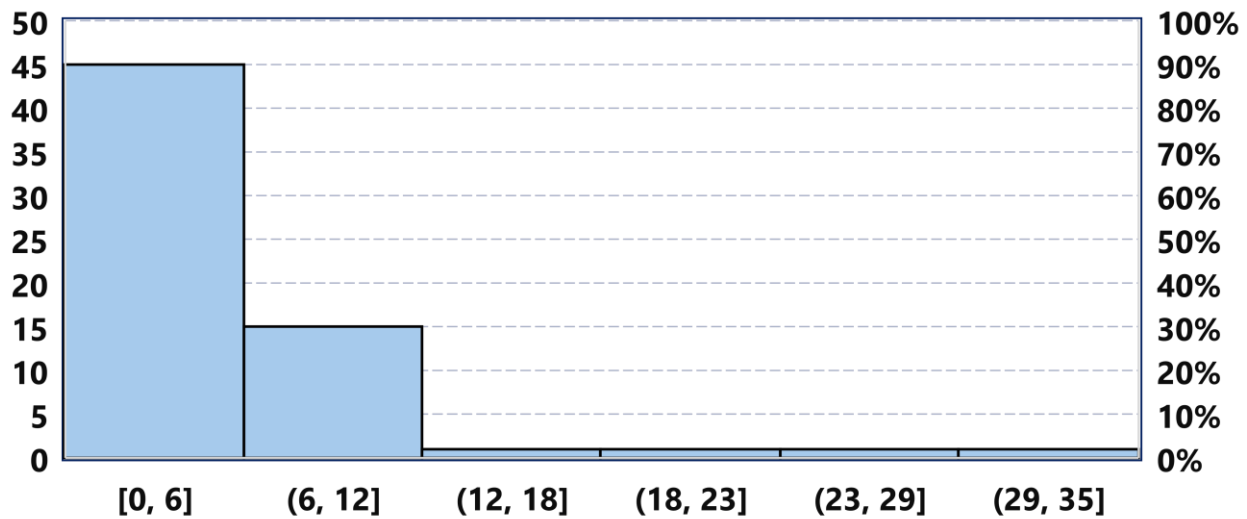
شکل ۲۷- نمودار توزیع فراوانی معیار هزینه اجرایی راهکارها (میلیارد تومان)

ب) نرمال‌سازی لجستیک برای معیار منابع آب

بررسی توزیع فراوانی «معیار اثرگذاری بر آبخوان» نشان می‌دهد که اکثریت راهکارها (حدود ۸۸ درصد از مشاهدات) در بازه‌های پایین‌تر اثرگذاری متمرکز شده‌اند. این چولگی مثبت (Right-skewed) در داده‌ها بیانگر آن است که بخش عمده‌ای از راهکارهای استخراج‌شده، دارای ظرفیت محدودی در بهبود وضعیت کمی یا کیفی آبخوان هستند. این توزیع متمرکز، ضرورت استفاده از توابع نرمال‌سازی غیرخطی — به‌ویژه تابع لجستیک (S-Curve) — را دوچندان می‌کند؛ چرا که بهره‌گیری از مدل‌های خطی در چنین فضایی، منجر به سرکوب تفاوت‌های میان راهکارهای کم‌اثر و راهکارهای با اثرات قابل‌ملاحظه می‌شد.

در رویکرد پژوهش حاضر، این تمرکز داده‌ها همچنین بر چالش برانگیز بودن وزن‌دهی پیش‌دستانه (A priori) صحه می‌گذارد. از آنجا که توافق بر سر «آستانه اثرگذاری معنادار» میان متخصصان، کارفرمایان و ذینفعان (به‌دلیل تضاد در دیدگاه‌های فنی و مدیریتی) یک موضوع مبتنی بر قضاوت‌های هنجاری است، صرف‌تکیه بر تحلیل‌های عددی ساده‌انگارانه نمی‌تواند این پیچیدگی را پوشش دهد. بنابراین، این توزیع هیستوگرام، مبنایی است برای تبیین ضرورت گذار به رویکرد «تصمیم‌گیری مبتنی بر مشارکت» و انتخاب راهکار از طریق تحلیل جبهه‌ی پارتو، به‌جای تحمیل وزن‌های پیش‌فرض کارشناسی.

نمودار توزیع فراوانی اثر بر روی آبخوان (بالقوه به م.م.م.)



شکل ۲۷- نمودار هیستوگرام معیار اثرگذاری بر روی آبخوان (اثر بالقوه مستقل م.م.م.)

داده‌های مربوط به احجام منابع آب، با دامنه‌ای بین **۳۵ میلیون مترمکعب**، رفتاری به‌وضوح **نامتقارن** از خود نشان می‌دادند. در بررسی این معیار مشاهده شد که تمرکز اصلی داده‌ها در حوالی مرز ۳ میلیون مترمکعب قرار دارد؛ مرزی که از منظر تصمیم‌گیری، نقش یک نقطه آستانه حساس را ایفا می‌کند. به همین دلیل، برای نرمال‌سازی این معیار از **تابع لجستیک (S-Curve)** استفاده شد تا تغییرات داده‌ها در ناحیه میانی با حساسیت بیشتری بازتاب یابد و اثر مقادیر دورتر از آستانه به‌صورت تدریجی کاهش پیدا کند.

برخلاف معیار هزینه‌ها که در آن مقادیر کمتر اهمیت بیشتری دارند و بنابراین از نرمال‌سازی لگاریتمی معکوس استفاده شد، در این معیار تمرکز اصلی بر یک بازه میانی و بحرانی است؛ یعنی نه مقادیر بسیار کم و نه مقادیر بسیار زیاد، به‌تنهایی بیانگر اولویت تصمیم‌گیری نیستند. در چنین شرایطی، استفاده از روش‌های مبتنی بر وارون‌سازی خطی یا آنتی‌لگاریتمی مناسب نیست، زیرا این روش‌ها نمی‌توانند اهمیت ویژه ناحیه میانی را به‌خوبی نمایش دهند. در مقابل، تابع لجستیک به دلیل ماهیت غیرخطی خود، امکان اعمال **نقطه عطف مشخص** و ایجاد **تغییر تدریجی در شیب نرمال‌سازی** را فراهم می‌کند؛ به گونه‌ای که حساسیت مدل در اطراف آستانه بحرانی افزایش یافته و تمایز میان گزینه‌ها در ناحیه تصمیم‌گیری اصلی بهتر حفظ می‌شود.

$$n_i = \frac{1}{1 + e^{-k(x_i - c)}}$$

که در آن:

- c مرکز تابع لجستیک (نقطه عطف) است که بر اساس ویژگی‌های فضای تصمیم‌گیری و بررسی هیستوگرام امتیازهای تاثیرگذاری منابع آب برابر با ۳ تنظیم شد. این کار باعث می‌شود مقادیر در اطراف این نقطه بیشترین حساسیت تغییرات را داشته باشند.



- k شیب انتقال تابع است که میزان تندی تغییرات در اطراف نقطه مبنا را کنترل می کند.

این روش توزیع غیریکنواخت داده ها را اصلاح کرده و تفاوت گزینه هایی را که در محدوده مقادیر بحرانی منابع آب قرار دارند، با دقت بالایی برجسته می کند تا تصمیم گیرنده در این بازه حساس دچار خطای ارزیابی نشود.

۸.۳.۱. جمع بندی بخش روش تحقیق

بخش روش شناسی اولویت بندی راهکارها در این پژوهش نشان دهنده یک گذار متدولوژیک از روش های صلب وزن دهی پیشینی (نظیر روش CORASO) به سمت رویکرد تعاملی و پسینی پارتو است. این تغییر رویکرد تضمین می کند که نتایج روش تصمیم گیری به عنوان یک دستورالعمل تحمیلی به مدیران ارائه نشود، بلکه بستری شفاف برای درک هزینه ها، پیامدها و مبادله های میان اهداف فراهم آورد. با تلفیق مفاهیم جبهه پارتو، تحلیل گزینه های Near-Pareto، ابزارهای پیشرفته بصری سازی و روش های نرمال سازی اختصاصی (لگاریتمی و لجستیک)، چارچوب تصمیمی طراحی شده است که با واقعیت های هیدروپلیتیک و اجتماعی آبخوان اصفهان-برخوار سازگاری کامل دارد.

۸.۴. نتایج اولویت بندی راهکارها

جدول ۶، اولویت بندی شماتیک راهکارهای پیشنهادی را بر اساس معیارهای نرمال شده نشان می دهد. امتیاز هر راهکار با توجه به شش معیار اثر بر منابع آب آبخوان، زمان اثرگذاری، ریسک، اثرگذاری فرهنگی، پیش نیاز و هزینه محاسبه شده و به منظور مقایسه پذیری، در مقیاس صفر تا یک ارائه شده است. با این حال، این جدول صرفاً بیانگر یک ارزیابی اولیه و شماتیک است و نباید به عنوان اولویت بندی قطعی تلقی شود، زیرا انتخاب نهایی راهکارها می تواند تحت تأثیر ملاحظات اجرایی، نهادی و ترجیحات تصمیم گیران قرار گیرد. در این جدول، رنگ سبز نشان دهنده وضعیت مطلوب تر و رنگ قرمز بیانگر وضعیت ضعیف تر هر راهکار در هر معیار است؛ بنابراین، الگوی رنگ ها صرفاً به درک سریع تر تفاوت های نسبی میان گزینه ها کمک می کند. بر این اساس، ممکن است برخی راهکارهای دشوارتر یا زمان برتر، به دلیل عملکرد بهتر در سایر معیارها، همچنان به عنوان گزینه های مناسب تر قابل توجه باشند.

جدول ۶- جدول اولویت بندی شماتیک راهکارها

ردیف	اقدام	معیارهای نرمال شده				
		اثر بر منابع آب آبخوان (C۱)	زمان اثرگذاری (C۲)	ریسک (C۳)	اثرگذاری فرهنگی (C۴)	پیش نیاز (C۵)
		(C۱)	(C۲)	(C۳)	(C۴)	(C۵)
هزینه (C۶)						
۱	تشکیل نهاد رسمی پایداری آبخوان ذیل سازگاری با کم آبی جهت پایش برنامه و گزارش گیری دوره ای از دستگاهها و اعلام به عموم و ایجاد سامانه پایش لحظه ای منابع آب زیرزمینی دشت	۰.۷۰	۱.۰۰	۰.۵۰	۰.۸۰	۱.۰۰
						۰.۷۲



ردیف	اقدام	معیارهای نرمال شده				
		اثر بر منابع آب آبخوان (C۱)	زمان اثرگذاری (C۲)	ریسک (C۳)	اثرگذاری فرهنگی (C۴)	پیش نیازی (C۵)
هزینه (C۶)						
۲	ایجاد کمپین رسانه ای و اطلاع رسانی در مورد ضرورت تعادل بخشی آبخوان اصفهان-برخوار	۰.۰۷	۱.۰۰	۱.۰۰	۱.۰۰	۰.۸۰
۳	مدیریت مشارکتی آب زیرزمینی با بهره‌برداران در آبخوان اصفهان-برخوار	۰.۲۶	۱.۰۰	۰.۳۳	۰.۸۰	۱.۰۰
۲۴	حسابداری آب در آبخوان	۰.۲۶	۰.۵۰	۱.۰۰	۰.۶۰	۰.۸۰
۹	نصب کنتور حجمی و پایش آنالاین کلیه چاه های مجاز	۱.۰۰	۰.۵۰	۰.۳۳	۰.۴۰	۰.۴۰
۶۳	اصلاح و تعدیل پروانه چاه های کشاورزی	۰.۵۴	۱.۰۰	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۶۰
۱۹	تخصیص حداقل آب برای احتیاجات شهر اصفهان و توزیع در مادیها و شبکه های سستی شهر	۰.۴۵	۰.۵۰	۰.۱۳	۱.۰۰	۰.۴۰
۱۸	تخصیص حداقل منابع آب برای جریان زاینده رود در جداول سالیانه منابع و مصارف و رهاسازی آن	۰.۵۷	۰.۳۳	۰.۱۴	۱.۰۰	۰.۴۰
۴۹	ایجاد بازار و بانک آب در آبخوان	۰.۸۵	۰.۲۰	۰.۱۴	۰.۶۰	۰.۸۰
۷	تعیین تکلیف چاه های غیرمجاز شرب در آبخوان اصفهان برخوار	۰.۰۰	۱.۰۰	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۸۰
۵۵	استقرار مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح حوضه آبریز	۰.۲۶	۰.۵۰	۰.۲۰	۰.۸۰	۰.۸۰
۲۳	اخذ خسارات آبخوان ناشی از اضافه برداشت	۰.۵۲	۰.۵۰	۰.۱۷	۰.۴۰	۰.۶۰
۸	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز فضای سبز در آبخوان اصفهان برخوار	۰.۵۹	۰.۵۰	۰.۲۰	۰.۸۰	۰.۸۰
۴۵	اصلاح قیمت آب و انرژی پمپاژ آب (برق/سوخت) برای چاهها و تعرفه گذاری پلکانی	۰.۹۵	۰.۲۰	۰.۱۱	۰.۴۰	۰.۴۰
۱۰	کاهش پروانه صنایع و جایگزینی مصرف صنایع بزرگ با آب دریا و پساب	۰.۱۳	۱.۰۰	۰.۱۳	۰.۶۰	۰.۲۰
۳۰	حفر چاه جذبی در کارخانه ها و گلخانه ها	۰.۲۱	۰.۳۳	۰.۲۵	۰.۸۰	۰.۴۰
۳۲	کاهش تخصیص یزد و کاشان	۰.۲۶	۰.۳۳	۰.۱۴	۱.۰۰	۰.۲۰
۳۳	اجرای فاز اول انتقال آب بین حوضه‌ای ماندگان برای جایگزینی برداشت شرب از رودخانه	۰.۷۲	۱.۰۰	۰.۲۰	۰.۶۰	۰.۴۰
۲۷	ممنوعیت شستشوی پیاده رو و فضاهای باز	۰.۰۱	۰.۵۰	۰.۲۰	۱.۰۰	۰.۲۰
۴۲	ارائه بازخورد در مورد میزان مصرف آب در قبوض خانگی	۰.۰۳	۰.۵۰	۰.۱۷	۱.۰۰	۰.۲۰



ردیف	اقدام	معیارهای نرمال شده					
		اثر بر منابع آب آبخوان (C۱)	زمان اثرگذاری (C۲)	ریسک (C۳)	اثرگذاری فرهنگی (C۴)	پیش نیازی (C۵)	هزینه (C۶)
۲۶	ممنوعیت شستشوی ماشین در فضای باز	۰.۰۰	۰.۵۰	۰.۲۰	۱.۰۰	۰.۲۰	۱.۰۰
۶	حذف چاه های غیرمجاز کشاورزی در آبخوان اصفهان برخوار	۰.۳۸	۰.۵۰	۰.۱۴	۰.۴۰	۰.۸۰	۰.۶۳
۴۰	سامانه های آبیاری هوشمندانه و تصمیم یار مزرعه	۰.۶۱	۰.۵۰	۰.۳۳	۰.۶۰	۰.۴۰	۰.۴۰
۴	تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی و صنایع آبخوان اصفهان برخوار	۰.۴۵	۰.۳۳	۰.۳۳	۰.۴۰	۰.۶۰	۰.۷۲
۵	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز صنایع در آبخوان اصفهان برخوار	۰.۰۷	۰.۵۰	۰.۱۴	۰.۴۰	۱.۰۰	۰.۷۲
۴۶	تعرفه پلکانی آب صنعتی بر اساس مصرف واقعی	۰.۰۲	۰.۲۵	۰.۵۰	۰.۴۰	۰.۶۰	۱.۰۰
۱۳	توقف هر گونه مجوز کف شکنی و جابجایی	۰.۱۵	۱.۰۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۱.۰۰
۵۰	سامانه ذخیره و بازپایی رواناب در سرشاخه های سیلابی در شمال آبخوان و اقدامات آبخیزداری	۰.۹۹	۰.۲۵	۰.۵۰	۰.۴۰	۰.۲۰	۰.۴۰
۶۴	کاهش پروانه های بهره برداری فضای سبز (روی کاغذ)	۰.۲۳	۰.۵۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۶۰	۱.۰۰
۵۴	الزام حفر چاه جذبی در ساختمان ها برای هدایت آب ناودان منازل جدید	۰.۰۰	۰.۳۳	۰.۳۳	۰.۸۰	۰.۲۰	۱.۰۰
۱۶	توقف توسعه و تغییر کاربری به خدمات آب بر (گردشگری و ویلایی) در آبخوان قبل از تعیین محل تامین آب	۰.۰۴	۰.۵۰	۰.۱۱	۰.۶۰	۰.۴۰	۱.۰۰
۴۴	مشوق های اقتصادی و تعرفه گذاری پلکانی بازدارنده آب شرب	۰.۰۶	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۶۰	۰.۴۰	۱.۰۰
۱۲	تامین کامل آب شرب و بهداشت از منابع سطحی	۰.۱۳	۱.۰۰	۰.۵۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۵۷
۶۱	توسعه سیستم های آبیاری نوین بدون توسعه سطح	۰.۶۴	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۶۰	۰.۶۰	۰.۱۳
۳۱	جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سرشاخه های زاینده رود تا چم آسمان)	۰.۱۹	۰.۲۵	۰.۱۷	۰.۸۰	۰.۸۰	۰.۳۰
۱۴	مدیریت توسعه صنعت (توسعه صنایع آب صفر) در دشت اصفهان-برخوار	۰.۲۳	۰.۳۳	۰.۱۴	۰.۴۰	۰.۴۰	۱.۰۰
۴۷	دوره های کردن پروانه های بهره برداری کشاورزی در آبخوان یا ظهرنویسی و کاهش پروانه ها	۰.۴۱	۰.۲۵	۰.۲۵	۰.۴۰	۰.۴۰	۰.۷۸
۶۰	اصلاح سیستم های آبیاری فضای سبز شهری	۰.۳۰	۰.۳۳	۰.۵۰	۰.۶۰	۰.۴۰	۰.۲۸
۵۹	گسترش کشت گلخانه ای و همزمان کنترل سطح	۰.۴۵	۰.۵۰	۰.۳۳	۰.۶۰	۰.۴۰	۰.۱۳



ردیف	اقدام	معیارهای نرمال شده					
		اثر بر منابع آب آبخوان (C۱)	زمان اثرگذاری (C۲)	ریسک (C۳)	اثرگذاری فرهنگی (C۴)	پیش نیازی (C۵)	هزینه (C۶)
۴۳	استاندارد الزام بازچرخانی آب خاکستری در ساختمان های جدید	۰.۰۲	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۶۰	۰.۲۰	۱.۰۰
۵۸	اصلاح استاندارد الزام نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل (شیر، دوش، فلاش تانک کم مصرف) در ساختمان های جدید	۰.۰۰	۰.۲۰	۰.۱۷	۰.۸۰	۰.۲۰	۱.۰۰
۱۷	توقف توسعه کشاورزی و صنایع کشاورزی و صرفا ارتقا به سمت کاهش مصرف آب	۰.۰۷	۰.۳۳	۰.۱۴	۰.۴۰	۰.۴۰	۱.۰۰
۱۱	جایگزینی مصرف مجاز فضای سبز شهری با پساب	۰.۷۰	۰.۵۰	۰.۱۷	۰.۶۰	۰.۲۰	۰.۱۸
۲۵	کاهش سطوح چمن و تغییر الگوی کشت و گونه های فضای سبز	۰.۲۰	۰.۳۳	۰.۵۰	۰.۸۰	۰.۲۰	۰.۳۰
۱۵	توقف توسعه مسکونی (الحاق زمین و افزایش طبقات) قبل از تعیین محل تامین آب	۰.۰۵	۰.۳۳	۰.۱۴	۰.۴۰	۰.۴۰	۱.۰۰
۲۲	دریافت تعرفه آزاد از چاه های دارای تغییر کاربری آب زیرزمینی	۰.۰۲	۰.۳۳	۰.۱۷	۰.۲۰	۰.۶۰	۱.۰۰
۳۷	الزام کارواش ها به تصفیه و بازچرخانی آب	۰.۰۲	۰.۲۵	۰.۱۷	۰.۸۰	۰.۲۰	۰.۶۵
۳۵	تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب	۰.۵۸	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۴۰	۰.۴۰	۰.۲۰
۲۹	اجرای طرح مدیریت رواناب در شهرها و ایجاد مخازن یا حفر چاه جذبی برای هدایت روانابها به آبخوان	۰.۳۳	۰.۲۰	۰.۲۵	۰.۸۰	۰.۲۰	۰.۳۵
۲۰	آزادسازی بستر و حریم رودخانه در بالادست و جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سد چم آسمان تا اصفهان)	۰.۱۶	۰.۳۳	۰.۱۷	۰.۸۰	۰.۲۰	۰.۳۵
۳۹	توسعه باغات به جای زراعت و همزمان کاهش پروانه	۰.۳۳	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۶۰	۰.۲۰	۰.۳۷
۵۷	کاهش هدررفت و آب بدون درآمد شبکه توزیع آب شرب و بهداشت	۰.۰۵	۰.۳۳	۰.۳۳	۰.۸۰	۰.۲۰	۰.۲۴
۵۱	حفاظت قانونی از پهنه های تغذیه طبیعی آبخوان	۰.۱۱	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۰	۱.۰۰
۵۶	برچسب گذاری و رتبه بندی مصرف آب تجهیزات خانگی	۰.۰۶	۰.۲۰	۰.۱۷	۰.۶۰	۰.۲۰	۰.۷۲
۳۸	تغییر الگوی کشت در اراضی آبخوان	۰.۱۵	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۶۰	۰.۲۰	۰.۴۰
۲۸	بارورسازی ابرها (در محدوده بالادست حوضه)	۰.۴۵	۰.۳۳	۰.۱۴	۰.۶۰	۰.۲۰	۰.۱۸
۴۸	بازخرید پروانه های بهره برداری چاه ها	۰.۳۸	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۴۰	۰.۳۵



ردیف	اقدام	معیارهای نرمال شده				
		اثر بر منابع آب آبخوان (C۱)	زمان اثرگذاری (C۲)	ریسک (C۳)	اثرگذاری فرهنگی (C۴)	پیش نیازی (C۵)
۴۱	جایگزینی تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل موجود	۰.۱۴	۰.۲۵	۰.۱۴	۰.۴۰	۰.۳۵
۶۲	جایگزینی کولرهای آبی با کولرهای گازی یا کولرهای سلولوزی	۰.۰۳	۰.۲۵	۰.۵۰	۰.۶۰	۰.۰۷
۳۴	اجرای سد کوه‌رنگ ۳ برای جبران کسری های گذشته حوضه زاینده رود	۰.۴۲	۰.۲۵	۰.۱۱	۰.۴۰	۰.۰۳
۵۲	بازخرید تخصیص های کشاورزی از رودخانه	۰.۵۵	۰.۲۵	۰.۱۱	۰.۲۰	۰.۰۷
۵۳	نقوذپذیر کردن معابر و پیاده‌روها و استفاده از سطوح متخلخل	۰.۰۲	۰.۲۰	۰.۵۰	۰.۶۰	۰.۰۳
۲۱	بارورسازی ابرها (در محدوده دشت اصفهان برقرار)	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۲۰	۰.۲۰	۰.۲۸
۳۶	بهبود فناوری و بازچرخانی آب صنایع و کاهش مصرف آب	۰.۰۷	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۴۰	۰.۲۸

در جدول فوق، در قسمت معیارهای ارزیابی نرمال شده، عدد بیشتر به معنی مطلوبیت بیشتر است.

جدول ۷، نتایج اولویت‌بندی و دسته‌بندی راهکارهای تعادل‌بخشی آبخوان اصفهان-برخوار را بر اساس مفهوم جبهه پارتو و شاخص تعداد غالب‌ها نشان می‌دهد. در این تحلیل، راهکارها در ۴ جبهه پارتو طبقه‌بندی شده‌اند. راهکارهای واقع در جبهه اول (با تعداد غالب صفر)، گزینه‌های غیرمغلوب و بهینه پارتو به‌شمار می‌روند که برتری مطلق در شاخص‌های تصمیم‌گیری دارند و بدون نیاز به مصالحه (Trade-off) شدید، باید در اولویت نخست اجرا قرار گیرند هر چند بسته به شاخص‌های اولویت دار برای هر تصمیم‌گیر، ممکن است بخشی از این جبهه در اولویت قرار گیرد. با حرکت به سمت جبهه‌های بعدی (جبهه ۲ تا ۴)، راهکارها از نظر کارایی نسبی تنزل یافته و توسط تعداد بیشتری از اقدامات جبهه‌های بالاتر مغلوب می‌شوند؛ لذا اتخاذ آن‌ها نیازمند تحلیل‌های حساسیت عمیق‌تر و مدیریت تعارضات میان ذینفعان خواهد بود.

جدول ۷- دسته‌بندی بر اساس جبهه‌های پارتو راهکارها

جبهه پارتو	تعداد غالب‌ها	کد اولیه اقدام	عنوان راهکار
جبهه ۱	۰	۹	نصب کنتور حجمی و پایش آنلاین کلیه چاه‌های مجاز
جبهه ۱	۰	۵۰	سامانه ذخیره و بازیابی رواناب در سرشاخه‌های سیلابی در شمال آبخوان و اقدامات آبخیزداری
جبهه ۱	۰	۴۹	ایجاد بازار و بانک آب در آبخوان
جبهه ۱	۰	۳۳	اجرای فاز اول انتقال آب بین‌حوضه‌ای ماندگان برای جایگزینی برداشت شرب از رودخانه
جبهه ۱	۰	۱۱	جایگزینی مصرف مجاز فضای سبز شهری با پساب



عنوان راهکار	کد اولیه اقدام	تعداد غالب‌ها	جبهه پارتو
تشکیل نهاد رسمی پایداری آبخوان ذیل سازگاری با کم آبی جهت پایش برنامه و گزارش گیری دوره ای از دستگاه‌ها و اعلام به عموم و ایجاد سامانه پایش لحظه ای منابع آب زیرزمینی دشت	۱	۰	جبهه ۱
تخصیص حداقل منابع آب برای جریان زاینده رود در جداول سالیانه منابع و مصارف و رهاسازی آن	۱۸	۰	جبهه ۱
اصلاح و تعدیل پروانه چاه های کشاورزی	۶۳	۰	جبهه ۱
اخذ خسارات آبخوان ناشی از اضافه برداشت	۲۳	۰	جبهه ۱
تخصیص حداقل آب برای احتیاجات شهر اصفهان و توزیع در مادیها و شبکه های سنتی شهر	۱۹	۰	جبهه ۱
مدیریت مشارکتی آب زیرزمینی با بهره‌برداران در آبخوان اصفهان-برخوار	۳	۰	جبهه ۱
حسابداری آب در آبخوان	۲۴	۰	جبهه ۱
حفر چاه جذبی در کارخانه ها و گلخانه ها	۳۰	۰	جبهه ۱
کاهش پروانه صنایع و جایگزینی مصرف صنایع بزرگ با آب دریا و پساب	۱۰	۰	جبهه ۱
ایجاد کمپین رسانه ای و اطلاع رسانی در مورد ضرورت تعادل بخشی آبخوان اصفهان-برخوار	۲	۰	جبهه ۱
اصلاح قیمت آب و انرژی پمپاژ آب (برق/سوخت) برای چاه‌ها و تعرفه گذاری پلکانی	۴۵	۱	جبهه ۲
توسعه سیستم های آبیاری نوین بدون توسعه سطح	۶۱	۱	جبهه ۲
سامانه های آبیاری هوشمندانه و تصمیم یار مزرعه	۴۰	۱	جبهه ۲
حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز فضای سبز در آبخوان اصفهان برخوار	۸	۱	جبهه ۲
تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی و صنایع آبخوان اصفهان برخوار	۴	۱	جبهه ۲
دوره ای کردن پروانه های بهره برداری کشاورزی در آبخوان یا ظهرنویسی و کاهش پروانه ها	۴۷	۱	جبهه ۲
حذف چاه های غیرمجاز کشاورزی در آبخوان اصفهان برخوار	۶	۱	جبهه ۲
اصلاح سیستم های آبیاری فضای سبز شهری	۶۰	۱	جبهه ۲
کاهش تخصیص یزد و کاشان	۳۲	۱	جبهه ۲
کاهش پروانه های بهره برداری فضای سبز (روی کاغذ)	۶۴	۱	جبهه ۲
کاهش سطوح چمن و تغییر الگوی کشت و گونه های فضای سبز	۲۵	۱	جبهه ۲
توقف هر گونه مجوز کف شکنی و جابجایی	۱۳	۱	جبهه ۲
تأمین کامل آب شرب و بهداشت از منابع سطحی	۱۲	۱	جبهه ۲
توقف توسعه و تغییر کاربری به خدمات آب بر (گردشگری و ویلایی) در آبخوان قبل از تعیین محل تامین آب	۱۶	۱	جبهه ۲
استاندارد الزام بازچرخانی آب خاکستری در ساختمان های جدید	۴۳	۱	جبهه ۲
ممنوعیت شستشوی ماشین در فضای باز	۲۶	۱	جبهه ۲
استقرار مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح حوضه آبریز	۵۵	۲	جبهه ۲



عنوان راهکار	کد اولیه اقدام	تعداد غالب‌ها	جبهه پارتو
اجرای طرح مدیریت رواناب در شهرها و ایجاد مخازن یا حفر چاه جذبی برای هدایت روانابها به آبخوان	۲۹	۲	جبهه ۲
حذف و جایگزینی چاه‌های غیرمجاز صنایع در آبخوان اصفهان بر خوار	۵	۲	جبهه ۲
مدیریت توسعه صنعت (توسعه صنایع آب صفر) در دشت اصفهان-بر خوار	۱۴	۳	جبهه ۲
اصلاح استاندارد الزام نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل (شیر، دوش، فلاش تانک کم مصرف) در ساختمان‌های جدید	۵۸	۳	جبهه ۲
الزام کارواش‌ها به تصفیه و بازچرخانی آب	۳۷	۵	جبهه ۲
برچسب‌گذاری و رتبه‌بندی مصرف آب تجهیزات خانگی	۵۶	۶	جبهه ۲
مشوق‌های اقتصادی و تعرفه‌گذاری پلکانی بازدارنده آب شرب	۴۴	۲	جبهه ۲
ارائه بازخورد در مورد میزان مصرف آب در قبوض خانگی	۴۲	۲	جبهه ۲
تعرفه پلکانی آب صنعتی بر اساس مصرف واقعی	۴۶	۲	جبهه ۲
ممنوعیت شستشوی پیاده‌رو و فضاهای باز	۲۷	۲	جبهه ۲
الزام حفر چاه جذبی در ساختمان‌ها برای هدایت آب ناودان منازل جدید	۵۴	۲	جبهه ۲
تعیین تکلیف چاه‌های غیرمجاز شرب در آبخوان اصفهان بر خوار	۷	۲	جبهه ۲
گسترش کشت گلخانه‌ای و همزمان کنترل سطح	۵۹	۲	جبهه ۳
جلوگیری از برداشت‌های غیرمجاز در بالادست (محدوده سرشاخه‌های زاینده رود تا چم آسمان)	۳۱	۳	جبهه ۳
دریافت تعرفه آزاد از چاه‌های دارای تغییر کاربری آب زیرزمینی	۲۲	۳	جبهه ۳
تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب	۳۵	۴	جبهه ۳
توسعه باغات به جای زراعت و همزمان کاهش پروانه	۳۹	۴	جبهه ۳
آزادسازی بستر و حریم رودخانه در بالادست و جلوگیری از برداشت‌های غیرمجاز در بالادست (محدوده سد چم آسمان تا اصفهان)	۲۰	۴	جبهه ۳
تغییر الگوی کشت در اراضی آبخوان	۳۸	۴	جبهه ۳
کاهش هدررفت و آب بدون درآمد شبکه توزیع آب شرب و بهداشت	۵۷	۴	جبهه ۳
بارورسازی ابرها (در محدوده بالادست حوضه)	۲۸	۵	جبهه ۳
حفاظت قانونی از پهنه‌های تغذیه طبیعی آبخوان	۵۱	۵	جبهه ۳
توقف توسعه کشاورزی و صنایع کشاورزی و صرفاً ارتقا به سمت کاهش مصرف آب	۱۷	۵	جبهه ۳
جایگزینی کولرهای آبی با کولرهای گازی یا کولرهای سلولوزی	۶۲	۵	جبهه ۳
بازخريد پروانه‌های بهره‌برداري چاه‌ها	۴۸	۶	جبهه ۳
بارورسازی ابرها (در محدوده دشت اصفهان بر خوار)	۲۱	۹	جبهه ۳
جایگزینی تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل موجود	۴۱	۱۳	جبهه ۳
توقف توسعه مسکونی (الحاق زمین و افزایش طبقات) قبل از تعیین محل تامین آب	۱۵	۶	جبهه ۴
نفوذپذیر کردن معابر و پیاده‌روها و استفاده از سطوح متخلخل	۵۳	۶	جبهه ۴



عنوان راهکار	کد اولیه اقدام	تعداد غالبها	جبهه پارتو
بازخرید تخصیص های کشاورزی از رودخانه	۵۲	۷	جبهه ۴
اجرای سد کوه رنگ ۳ برای جبران کسری های گذشته حوضه زاینده رود	۳۴	۱۱	جبهه ۴
بهبود فناوری و بازچرخانی آب صنایع و کاهش مصرف آب	۳۶	۱۵	جبهه ۴

مواردی که در جبهه ۴ قرار دارند، ممکن است از منظر کنترل فرونشست آبخوان اصفهان-برخوار، به دلیل ملاحظات مانده هزینه، زمان اجرا یا سایر محدودیت‌ها، در اولویت توصیه قرار نگیرند. با این حال، این امر به معنای کنار گذاشتن این راهکارها نیست؛ زیرا ممکن است همین گزینه‌ها برای مواجهه با مسائل دیگری، از جمله تأمین آب شرب آینده استان، ضرورتی راهبردی و اجتناب‌ناپذیر داشته باشند.

جدول ۸- اولویت بندی راهکارها به ازای هر معیار

اولویت بندی راهکارها به ازای هر معیار						ردیف
هزینه (C۶)	پیش نیازی (C۵)	اثرگذاری فرهنگی (C۴)	ریسک (C۳)	زمان اثرگذاری (C۲)	اثر بر منابع آب آبخوان (C۱)	
تعیین تکلیف چاه های غیرمجاز شرب در آبخوان اصفهان برخوار	تشکیل نهاد رسمی پایداری آبخوان ذیل سازگاری با کم آبی جهت پایش برنامه و گزارش گیری دوره ای از دستگاهها و اعلام به عموم و ایجاد سامانه پایش لحظه ای منابع آب زیرزمینی دشت	ایجاد کمپین رسانه ای و اطلاع رسانی در مورد ضرورت تعادل بخشی آبخوان اصفهان-برخوار	ایجاد کمپین رسانه ای و اطلاع رسانی در مورد ضرورت تعادل بخشی آبخوان اصفهان-برخوار	اجرای فاز اول انتقال آب بین حوضه‌ای ماندگان برای جایگزینی برداشت شرب از رودخانه	نصب کنتور حجمی و پایش آنلاین کلیه چاه های مجاز	۱
تعرفه پلکانی آب صنعتی بر اساس مصرف واقعی	مدیریت مشارکتی آب زیرزمینی با بهره‌برداران در آبخوان اصفهان-برخوار	ممنوعیت شستشوی پیاده رو و فضاهای باز	حسابداری آب در آبخوان	تشکیل نهاد رسمی پایداری آبخوان ذیل سازگاری با کم آبی جهت پایش برنامه و گزارش گیری دوره ای از دستگاهها و اعلام به عموم و ایجاد سامانه پایش لحظه ای منابع آب زیرزمینی دشت	سامانه ذخیره و بازیابی رواناب در سرشاخه های سیلابی در شمال آبخوان و اقدامات آبخیزداری	۲
اخذ خسارات آبخوان ناشی از اضافه برداشت	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز صنایع در آبخوان اصفهان برخوار	ممنوعیت شستشوی ماشین در فضای باز	تشکیل نهاد رسمی پایداری آبخوان ذیل سازگاری با کم آبی جهت پایش برنامه و گزارش گیری دوره ای از دستگاهها و اعلام به عموم و ایجاد سامانه پایش لحظه ای منابع آب زیرزمینی دشت	اصلاح و تعدیل پروانه چاه های کشاورزی	اصلاح قیمت آب و انرژی پمپاژ آب (برق/سوخت) برای چاهها و تعرفه گذاری پلکانی	۳



۴	ایجاد بازار و بانک آب در آبخوان	مدیریت مشارکتی آب زیرزمینی با بهره‌برداران در آبخوان اصفهان-برخوار	تأمین کامل آب شرب و بهداشت از منابع سطحی	ارائه بازخورد در مورد میزان مصرف آب در قبوض خانگی	ایجاد کمپین رسانه ای و اطلاع رسانی در مورد ضرورت تعادل بخشی آبخوان اصفهان-برخوار	اصلاح و تعدیل پروانه چاه های کشاورزی
۵	اجرای فاز اول انتقال آب بین حوضه‌ای ماندگان برای جایگزینی برداشت شرب از رودخانه	توقف هر گونه مجوز کف شکنی و جابجایی	اصلاح سیستم های آبیاری فضای سبز شهری	تخصیص حداقل منابع آب برای جریان زاینده رود در جداول سالیانه منابع و مصارف و رهاسازی آن	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز فضای سبز در آبخوان اصفهان برخوار	کاهش پروانه های بهره برداری فضای سبز (روی کاغذ)
۶	جایگزینی مصرف مجاز فضای سبز شهری با پساب	تأمین کامل آب شرب و بهداشت از منابع سطحی	کاهش سطوح چمن و تغییر الگوی کشت و گونه های فضای سبز	کاهش تخصیص یزد و کاشان	استقرار مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح حوضه آبریز	دریافت تعرفه آزاد از چاه های دارای تغییر کاربری آب زیرزمینی
۷	تشکیل نهاد رسمی پایداری آبخوان ذیل سازگاری با کم آبی جهت پایش برنامه و گزارش گیری دوره ای از دستگاه ها و اعلام به عموم و ایجاد سامانه پایش لحظه ای منابع آب زیرزمینی دشت	کاهش پروانه صنایع و جایگزینی مصرف صنایع بزرگ با آب دریا و پساب	سامانه ذخیره و بازیابی رواناب در سرشاخه های سیلابی در شمال آبخوان و اقدامات آبخیزداری	تخصیص حداقل آب برای احتیاجات شهر اصفهان و توزیع در مادیها و شبکه های سنتی شهر	جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سرشاخه های زاینده رود تا چم آسمان)	تخصیص حداقل منابع آب برای جریان زاینده رود در جداول سالیانه منابع و مصارف و رهاسازی آن
۸	توسعه سیستم های آبیاری نوین بدون توسعه سطح	ایجاد کمپین رسانه ای و اطلاع رسانی در مورد ضرورت تعادل بخشی آبخوان اصفهان-برخوار	جایگزینی کولرهای آبی با کولرهای گازی یا کولرهای سلولوزی	تشکیل نهاد رسمی پایداری آبخوان ذیل سازگاری با کم آبی جهت پایش برنامه و گزارش گیری دوره ای از دستگاه ها و اعلام به عموم و ایجاد سامانه پایش لحظه ای منابع آب زیرزمینی دشت	حسابداری آب در آبخوان	تخصیص حداقل آب برای احتیاجات شهر اصفهان و توزیع در مادیها و شبکه های سنتی شهر
۹	سامانه های آبیاری هوشمندانه و تصمیم یار مزرعه	تعیین تکلیف چاه های غیرمجاز شرب در آبخوان اصفهان برخوار	تعرفه پلکانی آب صنعتی بر اساس مصرف واقعی	کاهش سطوح چمن و تغییر الگوی کشت و گونه های فضای سبز	ایجاد بازار و بانک آب در آبخوان	حفر چاه جذبی در کارخانه ها و گلخانه ها
۱۰	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز فضای سبز در آبخوان اصفهان برخوار	نصب کنتور حجمی و پایش آنلاین کلیه چاه های مجاز	نفوذپذیر کردن معابر و پیاده‌روها و استفاده از سطوح متخلخل	مدیریت مشارکتی آب زیرزمینی با بهره‌برداران در آبخوان اصفهان-برخوار	حذف چاه های غیرمجاز کشاورزی در آبخوان اصفهان برخوار	مشوق های اقتصادی و تعرفه گذاری پلکانی بازدارنده آب شرب



۱۱	تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب	جایگزینی مصرف مجاز فضای سبز شهری با پساب	مدیریت مشارکتی آب زیرزمینی با بهره‌برداران در آبخوان اصفهان-برخوار	کاهش هدررفت و آب بدون درآمد شبکه توزیع آب شرب و بهداشت	تعیین تکلیف چاه‌های غیرمجاز شرب در آبخوان اصفهان برخوار	توقف توسعه و تغییر کاربری به خدمات آب بر (گردشگری و ویلایی) در آبخوان قبل از تعیین محل تامین آب
۱۲	تخصیص حداقل منابع آب برای جریان زاینده رود در جداول سالیانه منابع و مصارف و رهاسازی آن	سامانه‌های آبیاری هوشمندانه و تصمیم‌یار مزرعه	نصب کنتور حجمی و پایش آنلاین کلیه چاه‌های مجاز	الزام حفر چاه جذبی در ساختمان‌ها برای هدایت آب ناودان منازل جدید	توسعه سیستم‌های آبیاری نوین بدون توسعه سطح	نصب کنتور حجمی و پایش آنلاین کلیه چاه‌های مجاز
۱۳	بازخرید تخصیص‌های کشاورزی از رودخانه	حذف و جایگزینی چاه‌های غیرمجاز فضای سبز در آبخوان اصفهان برخوار	سامانه‌های آبیاری هوشمندانه و تصمیم‌یار مزرعه	حفر چاه جذبی در کارخانه‌ها و گلخانه‌ها	تعرفه پلکانی آب صنعتی بر اساس مصرف واقعی	مدیریت توسعه صنعت (توسعه صنایع آب صفر) در دشت اصفهان-برخوار
۱۴	اصلاح و تعدیل پروانه چاه‌های کشاورزی	اخذ خسارات آبخوان ناشی از اضافه برداشت	گسترش کشت گلخانه‌ای و همزمان کنترل سطح	اجرای طرح مدیریت رواناب در شهرها و ایجاد مخازن یا حفر چاه جذبی برای هدایت روانابها به آبخوان	تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی و صنایع آبخوان اصفهان برخوار	توقف توسعه کشاورزی و صنایع کشاورزی و صرفاً ارتقا به سمت کاهش مصرف آب
۱۵	اخذ خسارات آبخوان ناشی از اضافه برداشت	تخصیص حداقل آب برای احتیاجات شهر اصفهان و توزیع در مادیها و شبکه‌های سنتی شهر	تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی و صنایع آبخوان اصفهان برخوار	حذف و جایگزینی چاه‌های غیرمجاز فضای سبز در آبخوان اصفهان برخوار	اخذ خسارات آبخوان ناشی از اضافه برداشت	توقف توسعه مسکونی (الحاق زمین و افزایش طبقات) قبل از تعیین محل تامین آب
۱۶	تخصیص حداقل آب برای احتیاجات شهر اصفهان و توزیع در مادیها و شبکه‌های سنتی شهر	گسترش کشت گلخانه‌ای و همزمان کنترل سطح	کاهش هدررفت و آب بدون درآمد شبکه توزیع آب شرب و بهداشت	استقرار مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح حوضه آبریز	اصلاح و تعدیل پروانه چاه‌های کشاورزی	اصلاح قیمت آب و انرژی پمپاژ آب (برق/سوخت) برای چاه‌ها و تعرفه گذاری پلکانی



۱۷	گسترش کشت گلخانه‌ای و همزمان کنترل سطح	حذف چاه های غیرمجاز کشاورزی در آبخوان اصفهان برخوار	الزام حفر چاه جذبی در ساختمان ها برای هدایت آب ناودان منازل جدید	آزادسازی بستر و حریم رودخانه در بالادست و جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سد چم آسمان تا اصفهان)	کاهش پروانه های بهره برداری فضای سبز (روی کاغذ)	ممنوعیت شستشوی پیاده رو و فضاهای باز
۱۸	تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی و صنایع آبخوان اصفهان برخوار	حسابداری آب در آبخوان	توسعه سیستم های آبیاری نوین بدون توسعه سطح	جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سرشاخه های زاینده رود تا چم آسمان)	دریافت تعرفه آزاد از چاه های دارای تغییر کاربری آب زیرزمینی	ممنوعیت شستشوی ماشین در فضای باز
۱۹	بارورسازی ابرها (در محدوده بالادست حوضه)	استقرار مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح حوضه آبریز	توسعه باغات به جای زراعت و همزمان کاهش پروانه	الزام کارواش ها به تصفیه و بازچرانی آب	تخصیص حداقل منابع آب برای جریان زاینده رود در جداول سالیانه منابع و مصارف و رهاسازی آن	ارائه بازخورد در مورد میزان مصرف آب در قبوض خانگی
۲۰	اجرای سد کوه‌رنگ ۳ برای جبران کسری های گذشته حوضه زاینده رود	کاهش پروانه های بهره برداری فضای سبز (روی کاغذ)	تغییر الگوی کشت در اراضی آبخوان	اصلاح استاندارد الزام نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل (شیر، دوش، فلاش تانک کم مصرف) در ساختمان های جدید	تخصیص حداقل آب برای احتیاجات شهر اصفهان و توزیع در مادیها و شبکه های سنتی شهر	کاهش تخصیص یزد و کاشان
۲۱	دوره‌ای کردن پروانه های بهره‌برداری کشاورزی در آبخوان با ظهورنویسی و کاهش پروانه ها	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز صنایع در آبخوان اصفهان برخوار	مشوق‌های اقتصادی و تعرفه‌گذاری پلکانی بازدارنده آب شرب	حسابداری آب در آبخوان	حفر چاه جذبی در کارخانه ها و گلخانه ها	الزام حفر چاه جذبی در ساختمان ها برای هدایت آب ناودان منازل جدید
۲۲	حذف چاه های غیرمجاز کشاورزی در آبخوان اصفهان برخوار	توقف توسعه و تغییر کاربری به خدمات آب بر (گردشگری و ویلایی) در آبخوان قبل از تعیین محل تامین آب	استاندارد الزام بازچرانی آب خاکستری در ساختمان های جدید	اصلاح سیستم های آبیاری فضای سبز شهری	اصلاح سیستم های آبیاری فضای سبز شهری	اصلاح استاندارد الزام نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل (شیر، دوش، فلاش تانک کم مصرف) در ساختمان های جدید



۲۳	بازخرید پروانه های بهره برداری چاه ها	ارائه بازخورد در مورد میزان مصرف آب در قبوض خانگی	اصلاح و تعدیل پروانه چاه های کشاورزی	جایگزینی کولرهای آبی با کولرهای گازی یا کولرهای سلولوزی	سامانه های آبیاری هوشمندانه و تصمیم یار مزرعه	استاندارد الزام بازچرخانی آب خاکستری در ساختمان های جدید
۲۴	اصلاح سیستم های آبیاری فضای سبز شهری	ممنوعیت شستشوی پیاده رو و فضاهای باز	تعیین تکلیف چاه های غیرمجاز شرب در آبخوان اصفهان برخوار	نفوذپذیر کردن معابر و پیاده‌روها و استفاده از سطوح متخلخل	گسترش کشت گلخانه‌ای و همزمان کنترل سطح	کاهش پروانه صنایع و جایگزینی مصرف صنایع بزرگ با آب دریا و پساب
۲۵	مدیریت مشارکتی آب زیرزمینی با بهره‌برداران در آبخوان اصفهان- برخوار	ممنوعیت شستشوی ماشین در فضای باز	حفر چاه جذبی در کارخانه ها و گلخانه ها	سامانه های آبیاری هوشمندانه و تصمیم یار مزرعه	مشوق های اقتصادی و تعرفه گذاری پلکانی بازدارنده آب شرب	توقف هر گونه مجوز کف شکنی و جابجایی
۲۶	حسابداری آب در آبخوان	تخصیص حداقل منابع آب برای جریان زاینده رود در جداول سالیانه منابع و مصارف و رهاسازی آن	دوره ای کردن پروانه های بهره برداری کشاورزی در آبخوان یا ظهرنویسی و کاهش پروانه ها	گسترش کشت گلخانه ای و همزمان کنترل سطح	اجرای فاز اول انتقال آب بین حوضه های ماندگان برای جایگزینی برداشت شرب از رودخانه	حفاظت قانونی از پهنه های تغذیه طبیعی آبخوان
۲۷	کاهش تخصیص یزد و کاشان	تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی و صنایع آبخوان اصفهان برخوار	اجرای طرح مدیریت رواناب در شهرها و ایجاد مخازن یا حفر چاه جذبی برای هدایت روانابها به آبخوان	توسعه سیستم های آبیاری نوین بدون توسعه سطح	توقف توسعه و تغییر کاربری به خدمات آب بر (گردشگری و ویلائی) در آبخوان قبل از تعیین محل تامین آب	مدیریت مشارکتی آب زیرزمینی با بهره برداران در آبخوان اصفهان- برخوار
۲۸	استقرار مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح حوضه آبریز	بارورسازی ابرها (در محدوده بالادست حوضه)	اجرای فاز اول انتقال آب بین حوضه های ماندگان برای جایگزینی برداشت شرب از رودخانه	توسعه باغات به جای زراعت و همزمان کاهش پروانه	نصب کنتور حجمی و پایش آنلاین کلیه چاه های مجاز	ایجاد کمپین رسانه ای و اطلاع رسانی در مورد ضرورت تعادل بخشی آبخوان اصفهان- برخوار
۲۹	بارورسازی ابرها (در محدوده دشت اصفهان برخوار)	اصلاح سیستم های آبیاری فضای سبز شهری	توقف هر گونه مجوز کف شکنی و جابجایی	تغییر الگوی کشت در اراضی آبخوان	دوره ای کردن پروانه های بهره برداری کشاورزی در آبخوان یا ظهرنویسی و کاهش پروانه ها	حسابداری آب در آبخوان
۳۰	اجرای طرح مدیریت رواناب در شهرها و ایجاد مخازن یا حفر چاه جذبی برای هدایت روانابها به آبخوان	کاهش تخصیص یزد و کاشان	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز فضای سبز در آبخوان اصفهان برخوار	مشوق های اقتصادی و تعرفه گذاری پلکانی بازدارنده آب شرب	تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب	ایجاد بازار و بانک آب در آبخوان



دوره‌ای کردن پروانه های بهره‌برداری کشاورزی در آبخوان یا ظهنویسی و کاهش پروانه ها	مدیریت توسعه صنعت (توسعه صنایع آب صفر) در دشت اصفهان-برخوار	استاندارد الزام بازچرخانی آب خاکستری در ساختمان های جدید	استقرار مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح حوضه آبریز	بارورسازی ابرها (در محدوده دشت اصفهان برخوار)	کاهش پروانه های بهره برداری فضای سبز (روی کاغذ)	۳۱
تشکیل نهاد رسمی پایداری آبخوان ذیل سازگاری با کم آبی جهت پایش برنامه و گزارش گیری دوره ای از دستگاه ها و اعلام به عموم و ایجاد سامانه پایش لحظه ای منابع آب زیرزمینی دشت	توقف توسعه کشاورزی و صنایع کشاورزی و صرفا ارتقا به سمت کاهش مصرف آب	اجرای فاز اول انتقال آب بین حوضه‌ای ماندگان برای جایگزینی برداشت شرب از رودخانه	کاهش پروانه های بهره برداری فضای سبز (روی کاغذ)	مدیریت توسعه صنعت (توسعه صنایع آب صفر) در دشت اصفهان-برخوار	مدیریت توسعه صنعت (توسعه صنایع آب صفر) در دشت اصفهان-برخوار	۳۲
حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز صنایع در آبخوان اصفهان برخوار	توقف توسعه مسکونی (الحاق زمین و افزایش طبقات) قبل از تعیین محل تامین آب	جایگزینی مصرف مجاز فضای سبز شهری با پساب	ممنوعیت شستشوی پیاده رو و فضاهای باز	حفر چاه جذبی در کارخانه ها و گلخانه ها	توسعه باغات به جای زراعت و همزمان کاهش پروانه	۳۳
تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی و صنایع آبخوان اصفهان برخوار	جایگزینی تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل موجود	برچسب گذاری و رتبه‌بندی مصرف آب تجهیزات خانگی	ممنوعیت شستشوی ماشین در فضای باز	کاهش سطوح چمن و تغییر الگوی کشت و گونه های فضای سبز	حفر چاه جذبی در کارخانه ها و گلخانه ها	۳۴
برچسب گذاری و رتبه‌بندی مصرف آب تجهیزات خانگی	اجرای سد کوهرنگ ۳ برای جبران کسری های گذشته حوضه زاینده رود	بارورسازی ابرها (در محدوده بالادست حوضه)	بارورسازی ابرها (در محدوده دشت اصفهان برخوار)	آزادسازی بستر و حریم رودخانه در بالادست و جلوگیری از برداشت‌های غیرمجاز در بالادست (محدوده سد چم آسمان تا اصفهان)	کاهش سطوح چمن و تغییر الگوی کشت و گونه های فضای سبز	۳۵
الزام کارواش ها به تصفیه و بازچرخانی آب	اصلاح قیمت آب و انرژی پمپاژ آب (برق/سوخت) برای چاه‌ها و تعرفه گذاری پلکانی	ایجاد بازار و بانک آب در آبخوان	تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب	توقف توسعه کشاورزی و صنایع کشاورزی و صرفا ارتقا به سمت کاهش مصرف آب	جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سرشاخه های زاینده رود تا چم آسمان)	۳۶



۳۷	آزادسازی بستر و حریم رودخانه در بالادست و جلوگیری از برداشت‌های غیرمجاز در بالادست (محدوده سد چم آسمان تا اصفهان)	توقف توسعه مسکونی (الحاق زمین و افزایش طبقات) قبل از تعیین محل تامین آب	بازخرید پروانه های بهره برداری چاه ها	کاهش پروانه صنایع و جایگزینی مصرف صنایع بزرگ با آب دریا و پساب	بازخرید پروانه های بهره برداری چاه ها	استقرار مدیریت یکپارچه منابع آب در سطح حوضه آبریز
۳۸	توقف هر گونه مجوز کف شکنی و جابجایی	کاهش هدررفت و آب بدون درآمد شبکه توزیع آب شرب و بهداشت	حفاظت قانونی از پهنه‌های تغذیه طبیعی آبخوان	توقف توسعه و تغییر کاربری به خدمات آب بر (گردشگری و ویلائی) در آبخوان قبل از تعیین محل تامین آب	بازخرید تخصیص های کشاورزی از رودخانه	حذف چاه های غیرمجاز کشاورزی در آبخوان اصفهان بر خوار
۳۹	تغییر الگوی کشت در اراضی آبخوان	دریافت تعرفه آزاد از چاه های دارای تغییر کاربری آب زیرزمینی	بهبود فناوری و بازچرخانی اب صنایع و کاهش مصرف اب	سامانه ذخیره و بازیابی رواناب در سرشاخه های سیلابی در شمال آبخوان و اقدامات آبخیزداری	ممنوعیت شستشوی پیاده رو و فضاهای باز	تامین کامل آب شرب و بهداشت از منابع سطحی
۴۰	جایگزینی تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل موجود	الزام حفر چاه جذبی در ساختمان ها برای هدایت آب ناودان منازل جدید	جایگزینی مصرف مجاز فضای سبز شهری با پساب	تعرفه پلکانی آب صنعتی بر اساس مصرف واقعی	ممنوعیت شستشوی ماشین در فضای باز	سامانه های آبیاری هوشمندانه و تصمیم یار مزرعه
۴۱	تامین کامل آب شرب و بهداشت از منابع سطحی	سامانه ذخیره و بازیابی رواناب در سرشاخه های سیلابی در شمال آبخوان و اقدامات آبخیزداری	اخذ خسارات آبخوان ناشی از اضافه برداشت	نصب کنتور حجمی و پایش آنالین کلیه چاه های مجاز	ارائه بازخورد در مورد میزان مصرف آب در قبوض خانگی	تغییر الگوی کشت در اراضی آبخوان
۴۲	کاهش پروانه صنایع و جایگزینی مصرف صنایع بزرگ با آب دریا و پساب	توسعه سیستم های آبیاری نوین بدون توسعه سطح	ارائه بازخورد در مورد میزان مصرف آب در قبوض خانگی	تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی و صنایع آبخوان اصفهان بر خوار	کاهش تخصیص یزد و کاشان	سامانه ذخیره و بازیابی رواناب در سرشاخه های سیلابی در شمال آبخوان و اقدامات آبخیزداری
۴۳	حفاظت قانونی از پهنه های تغذیه طبیعی آبخوان	تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب	آزادسازی بستر و حریم رودخانه در بالادست و جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سد چم آسمان تا اصفهان)	دوره ای کردن پروانه های بهره برداری کشاورزی در آبخوان یا ظهرنویسی و کاهش پروانه ها	کاهش سطوح چمن و تغییر الگوی کشت و گونه های فضای سبز	توسعه باغات به جای زراعت و همزمان کاهش پروانه
۴۴	ایجاد کمپین رسانه ای و اطلاع رسانی در مورد ضرورت تعادل بخشی آبخوان اصفهان-بر خوار	بازخرید تخصیص های کشاورزی از رودخانه	دریافت تعرفه آزاد از چاه های دارای تغییر کاربری آب زیرزمینی	تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب	کاهش هدررفت و آب بدون درآمد شبکه توزیع آب شرب و بهداشت	جایگزینی تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل موجود



۴۵	توقف توسعه کشاورزی و صنایع کشاورزی و صرفاً ارتقا به سمت کاهش مصرف آب	اجرای سد کوهرنگ ۳ برای جبران کسری های گذشته حوضه زاینده رود	جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سرشاخه های زاینده رود تا چم آسمان)	بهبود فناوری و بازچرخانی آب صنایع و کاهش مصرف آب	الزام حفر چاه جذبی در ساختمان ها برای هدایت آب ناودان منازل جدید	بازخرید پروانه های بهره برداری چاه ها
۴۶	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز صنایع در آبخوان اصفهان بر خوار	دوره ای کردن پروانه های بهره برداری کشاورزی در آبخوان یا ظهرنویسی و کاهش پروانه ها	الزام کارواش ها به تصفیه و بازچرخانی آب	اخذ خسارات آبخوان ناشی از اضافه برداشت	اجرای طرح مدیریت رواناب در شهرها و ایجاد مخازن یا حفر چاه جذبی برای هدایت روانابها به آبخوان	اجرای طرح مدیریت رواناب در شهرها و ایجاد مخازن یا حفر چاه جذبی برای هدایت روانابها به آبخوان
۴۷	بهبود فناوری و بازچرخانی آب صنایع و کاهش مصرف آب	بازخرید پروانه های بهره برداری چاه ها	برچسب گذاری و رتبه بندی مصرف آب تجهیزات خانگی	حذف چاه های غیرمجاز کشاورزی در آبخوان اصفهان بر خوار	آزادسازی بستر و حریم رودخانه در بالادست و جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سد چم آسمان تا اصفهان)	آزادسازی بستر و حریم رودخانه در بالادست و جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سد چم آسمان تا اصفهان)
۴۸	مشوق های اقتصادی و تعرفه گذاری پلکانی بازدارنده آب شرب	توسعه باغات به جای زراعت و همزمان کاهش پروانه	اصلاح استاندارد الزام نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل (شیر، دوش، فلاش تانک کم مصرف) در ساختمان های جدید	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز صنایع در آبخوان اصفهان بر خوار	الزام کارواش ها به تصفیه و بازچرخانی آب	جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سرشاخه های زاینده رود تا چم آسمان)
۴۹	برچسب گذاری و رتبه بندی مصرف آب تجهیزات خانگی	جلوگیری از برداشت های غیرمجاز در بالادست (محدوده سرشاخه های زاینده رود تا چم آسمان)	حذف چاه های غیرمجاز کشاورزی در آبخوان اصفهان بر خوار	مدیریت توسعه صنعت (توسعه صنایع آب صفر) در دشت اصفهان-بر خوار	اصلاح استاندارد الزام نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل (شیر، دوش، فلاش تانک کم مصرف) در ساختمان های جدید	کاهش سطوح چمن و تغییر الگوی کشت و گونه های فضای سبز
۵۰	توقف توسعه مسکونی (الحاق زمین و افزایش طبقات) قبل از تعیین محل تامین آب	تغییر الگوی کشت در اراضی آبخوان	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز صنایع در آبخوان اصفهان بر خوار	توقف توسعه کشاورزی و صنایع کشاورزی و صرفاً ارتقا به سمت کاهش مصرف آب	جایگزینی کولرهای آبی با کولرهای گازی یا کولرهای سلولوزی	اصلاح سیستم های آبیاری فضای سبز شهری



۵۱	کاهش هدررفت و آب بدون درآمد شبکه توزیع آب شرب و بهداشت	جایگزینی تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل موجود	تخصیص حداقل منابع آب برای جریان زاینده رود در جداول سالیانه منابع و مصارف و رهاسازی آن	توقف توسعه مسکونی (الحاق زمین و افزایش طبقات) قبل از تعیین محل تامین آب	نقض پذیر کردن معابر و پیاده‌روها و استفاده از سطوح متخلخل	بهبود فناوری و بازچرخانی آب صنایع و کاهش مصرف آب
۵۲	توقف توسعه و تغییر کاربری به خدمات آب بر (گردشگری و ویلایی) در آبخوان قبل از تعیین محل تامین آب	حفاظت قانونی از پهنه‌های تغذیه طبیعی آبخوان	بارورسازی ابرها (در محدوده بالادست حوضه)	جایگزینی تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل موجود	توسعه باغات به جای زراعت و همزمان کاهش پروانه	بارورسازی ابرها (در محدوده دشت اصفهان برخوار)
۵۳	ارائه بازخورد در مورد میزان مصرف آب در قبوض خانگی	بهبود فناوری و بازچرخانی آب صنایع و کاهش مصرف آب	کاهش تخصیص یزد و کاشان	اجرای سد کوه‌رنگ ۳ برای جبران کسری های گذشته حوضه زاینده رود	تغییر الگوی کشت در اراضی آبخوان	کاهش هدررفت و آب بدون درآمد شبکه توزیع آب شرب و بهداشت
۵۴	جایگزینی کولرهای آبی با کولرهای گازی یا کولرهای سلولوزی	مشوق‌های اقتصادی و تعرفه‌گذاری پلکانی بازدارنده آب شرب	مدیریت توسعه صنعت (توسعه صنایع آب صفر) در دشت اصفهان-برخوار	اصلاح قیمت آب و انرژی پمپاژ آب (برق/سوخت) برای چاه‌ها و تعرفه گذاری پلکانی	استاندارد الزام بازچرخانی آب خاکستری در ساختمان های جدید	حذف و جایگزینی چاه های غیرمجاز فضای سبز در آبخوان اصفهان برخوار
۵۵	استاندارد الزام بازچرخانی آب خاکستری در ساختمان های جدید	جایگزینی کولرهای آبی با کولرهای گازی یا کولرهای سلولوزی	توقف توسعه کشاورزی و صنایع کشاورزی و صرفا ارتقا به سمت کاهش مصرف آب	تأمین کامل آب شرب و بهداشت از منابع سطحی	جایگزینی مصرف مجاز فضای سبز شهری با پساب	تغذیه مصنوعی آبخوان با پساب
۵۶	الزام کارواش ها به تصفیه و بازچرخانی آب	استاندارد الزام بازچرخانی آب خاکستری در ساختمان های جدید	توقف توسعه مسکونی (الحاق زمین و افزایش طبقات) قبل از تعیین محل تامین آب	اصلاح و تعدیل پروانه چاه های کشاورزی	برچسب گذاری و رتبه بندی مصرف آب تجهیزات خانگی	جایگزینی مصرف مجاز فضای سبز شهری با پساب
۵۷	تعرفه پلکانی آب صنعتی بر اساس مصرف واقعی	الزام کارواش ها به تصفیه و بازچرخانی آب	جایگزینی تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل موجود	تعیین تکلیف چاه های غیرمجاز شرب در آبخوان اصفهان برخوار	بارورسازی ابرها (در محدوده بالادست حوضه)	بارورسازی ابرها (در محدوده بالادست حوضه)
۵۸	دریافت تعرفه آزاد از چاه های دارای تغییر کاربری آب زیرزمینی	تعرفه پلکانی آب صنعتی بر اساس مصرف واقعی	ایجاد بازار و بانک آب در آبخوان	توقف هر گونه مجوز کف شکی و جابجایی	کاهش پروانه صنایع و جایگزینی مصرف صنایع بزرگ با آب دریا و پساب	توسعه سیستم های آبیاری نوین بدون توسعه سطح
۵۹	نقض پذیر کردن معابر و پیاده‌روها و استفاده از سطوح متخلخل	اصلاح قیمت آب و انرژی پمپاژ آب (برق/سوخت) برای چاه‌ها و تعرفه گذاری پلکانی	کاهش پروانه صنایع و جایگزینی مصرف صنایع بزرگ با آب دریا و پساب	کاهش پروانه های بهره برداری فضای سبز (روی کاغذ)	سامانه ذخیره و بازیابی رواناب در سرشاخه های سیلابی در شمال آبخوان و اقدامات آبخیزداری	گسترش کشت گلخانه ای و همزمان کنترل سطح

۶۰	ممنوعیت شستشوی پیاده رو و فضاهای باز	ایجاد بازار و بانک آب در آبخوان	تخصیص حداقل آب برای احتیاجات شهر اصفهان و توزیع در مادیها و شبکه های سنتی شهر	بارورسازی ابرها (در محدوده دشت اصفهان برخوار)	بهبود فناوری و بازرخانی آب صنایع و کاهش مصرف آب	بازخريد تخصيص های کشاورزی از رودخانه
۶۱	اصلاح استاندارد الزام نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل (شیر، دوش، فلاش تانک کم مصرف) در ساختمان های جدید	اجرای طرح مدیریت رواناب در شهرها و ایجاد مخازن یا حفر چاه جذبی برای هدایت روانابها به آبخوان	توقف توسعه و تغییر کاربری به خدمات آب بر (گردشگری و ویلایی) در آبخوان قبل از تعیین محل تامین آب	بازخريد پروانه های بهره برداری چاه ها	تأمین کامل آب شرب و بهداشت از منابع سطحی	جایگزینی کولرهای آبی با کولرهای گازی یا کولرهای سلولوزی
۶۲	الزام حفر چاه جذبی در ساختمان ها برای هدایت آب ناودان منازل جدید	برچسب گذاری و رتبه بندی مصرف آب تجهیزات خانگی	بازخريد تخصيص های کشاورزی از رودخانه	حفاظت قانونی از پهنه های تغذیه طبیعی آبخوان	توقف هر گونه مجوز کف شکنی و جابجایی	اجرای سد کوه رنگ ۳ برای جبران کسری های گذشته حوضه زاینده رود
۶۳	تعیین تکلیف چاه های غیرمجاز شرب در آبخوان اصفهان برخوار	نفوذپذیر کردن معابر و پیاده روها و استفاده از سطوح متخلخل	اجرای سد کوه رنگ ۳ برای جبران کسری های گذشته حوضه زاینده رود	دریافت تعرفه آزاد از چاه های دارای تغییر کاربری آب زیرزمینی	بارورسازی ابرها (در محدوده دشت اصفهان برخوار)	نفوذپذیر کردن معابر و پیاده روها و استفاده از سطوح متخلخل
۶۴	ممنوعیت شستشوی ماشین در فضای باز	اصلاح استاندارد الزام نصب تجهیزات کاهنده مصرف آب در منازل (شیر، دوش، فلاش تانک کم مصرف) در ساختمان های جدید	اصلاح قیمت آب و انرژی پمپاژ آب (برق/سوخت) برای چاه ها و تعرفه گذاری پلکانی	بازخريد تخصيص های کشاورزی از رودخانه	حفاظت قانونی از پهنه های تغذیه طبیعی آبخوان	اجرای فاز اول انتقال آب بین حوضه ای ماندگان برای جایگزینی برداشت شرب از رودخانه

۹. بسته سیاستی استان

۱.۹. چشم انداز

کنترل فرونشست دشت اصفهان-برخوار و کاهش نرخ فرونشست به کمتر از ۴ میلی متر در سال
این چشم انداز، جهت گیری کلی بسته سیاستی را نشان می دهد و ناظر بر رساندن شرایط دشت به محدوده قابل قبول فرونشست است. عدد ۴ میلی متر در سال به عنوان حد استاندارد جهانی فرونشست در نظر گرفته شده است.

۲.۹. هدف اصلی

توقف کامل متوسط افت سطح آب زیرزمینی در دشت اصفهان-برخوار



۳.۹. اهداف فرعی

- کاهش ۷۰ میلیون متر مکعب برداشت آب از آبخوان اصفهان-برخوار
- برقراری حداقل جریان آب در رودخانه زاینده‌رود و مادی‌ها در محدوده شهر اصفهان
 - در کوتاه‌مدت: تحقق حداقل ۳ ماه جریان سالانه در محدوده شهر اصفهان و مادی‌ها ظرف دو سال
 - در میان‌مدت: حرکت به سمت تحقق حداقل ۶ ماه جریان سالانه
- افزایش ۵۰ میلیون متر مکعب تغذیه آبخوان از طریق سازوکارهای طبیعی و مصنوعی

۴.۹. بسته راهکارهای کوتاه مدت و فوری (۱ تا ۲ سال)

ردیف	متولی	راهکار پیشنهادی	همکاران اصلی	هدف عملیاتی
۱	استانداری اصفهان	تشکیل شورای آب استان (ذیل شورای گفتگو)	آب منطقه ای، اتاق بازرگانی	پایش اقدامات تعادل بخشی آبخوان به مدت ۲ سال و پیگیری منظم اجرای برنامه‌ها
		افزایش ضریب نفوذ فناوری در بخش کشاورزی	جهاد کشاورزی، واحد های فناوری	راه اندازی «دشت فناوری» به صورت پایلوت در دشت اصفهان-برخوار و توسعه سامانه های آبیاری هوشمندانه و تصمیم یار مزرعه و سایر فناوری ها با هدف ارتقای شاخص بهره وری فیزیکی و اقتصادی آب.
۲	شرکت آب منطقه ای اصفهان	مدیریت برداشت و انسداد چاه های غیر مجاز	دادستانی، نیروی انتظامی	توقف فوری اضافه برداشت و صیانت از مخزن آبخوان
		نصب کنتور حجمی و پایش برخط چاه ها	شرکت توزیع برق	شفاف سازی بیلان مصرف و تقویت نظارت سیستمی بر برداشت ها
		اصلاح و تعدیل پروانه ها	-	کاهش سقف برداشت های مجاز
		استقرار مدیریت مشارکتی دشت اصفهان-برخوار	سازمان جهاد کشاورزی استان، استانداری	جلب مشارکت بهره برداران و ذی نفعان در تصمیم سازی، اجرا و نظارت بر برنامه های مدیریت آبخوان
		تکمیل فاز اول پروژه انتقال آب جنوب استان	استانداری، حفاظت محیط زیست	ایجاد ظرفیت جایگزین برای کاهش فشار بر آبخوان
۳	آب و فاضلاب	جایگزینی آب دریا و پساب در صنایع بزرگ	وزارت صمت، صنایع بزرگ، شرکت تأمین آب صفه	آزادسازی برداشت سطحی و زیرزمینی
		پویش های فرهنگ سازی و انضباط رفتاری شهروندان	سازمان های مردم نهاد، شهرداری،	تبلیغات شهری، آموزش دانش آموزان و استفاده از مسئولیت اجتماعی صنایع با هدف ارتقای مشارکت اجتماعی، حذف رفتارهای



ردیف	متولی	راهکار پیشنهادی	همکاران اصلی	هدف عملیاتی
۴	وزارت نیرو	اصلاح متوسط مصرف خانگی و برخورد با پرمصرف ها	مسئوIVENایع، آموزش و پرورش	غیرمتناسب با اقلیم (شستشوی پیاده رو، شستشوی ماشین در فضای باز و غیره)
		تخصیص حداقل آب سالیانه برای حفظ پایداری جریان زاینده رود	دادستان	رسیدن متوسط مصرف خانگی به ۱۷۷ لیتر در روز به ازای هر نفر
		تخصیص حداقل آب سالیانه برای توزیع در مادی ها	پیگیری توسط شرکت آب منطقه ای اصفهان و شهرداری	تغذیه مستقیم آبخوان در محدوده شهری از طریق مادی ها به عنوان رگ های تغذیه کننده مستقیم آبخوان زیر شهر
۵	شهرداری ها	ایجاد چاه جذبی و استحصال و جذب آب در شهرها، به ویژه در نقاطی که محل تجمع آب هستند	-	بهره گیری فوری از رواناب های شهری و هدایت آن ها به مسیرهای جذب برای کاهش هدررفت و تقویت تغذیه محلی آبخوان
		جایگزینی پساب با چاه ها		جایگزینی منابع آب زیرزمینی شهرداری ها با پساب تصفیه شده
		تغییر الگوی مدیریت فضای سبز شهری	شرکت آب و فاضلاب شرکت آب منطقه ای	اجرای پروژه های خشک منظر سازی و حذف گونه های آب بر (نظیر چمن) در نقاط غیر ضروری
۶	سازمان جهاد کشاورزی استان	تعیین منبع آبی کلیه اراضی کشاورزی آبخوان اصفهان-برخوار	آب منطقه ای	نظام مند کردن برداشت ها و شناسایی برداشت های غیر مجاز
۷	اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری	اجرای پروژه های آبخیزداری و آبخوان داری در شمال آبخوان	-	مدیریت روان آب ها در سرشاخه های شمالی آبخوان جهت کنترل سیلاب و تقویت لایه های آب دار زیرزمینی.
۸	بخش خصوصی (صنایع متوسط و گلخانه ها)	استحصال آب باران از سطوح عایق و ذخیره یا نفوذ به آبخوان	-	بهره گیری از منابع خرد محلی جهت تغذیه آب باران یا ذخیره



۵.۹. بسته راهکارهای میان مدت زیرساختی و تحولی

جدول ۹، بسته‌ای از راهکارهای میان مدت زیرساختی و تحولی را برای بهبود مدیریت منابع آب و کاهش فشار بر حوضه زاینده رود و آبخوان اصفهان-برخوار ارائه می‌کند. در این بسته، مجموعه‌ای از اقدامات اجرایی و نهادی با تعیین متولیان اصلی، نهادهای همکار و اهداف عملیاتی مشخص شده‌اند تا ضمن ارتقای هماهنگی بین بخشی، زمینه لازم برای افزایش بهره‌وری مصرف آب، تقویت تغذیه آبخوان، اصلاح الگوی توسعه و کاهش ناپایداری‌های موجود فراهم شود.

جدول ۹- بسته راهکارهای میان مدت زیرساختی و تحولی

ردیف	متولی	راهکار پیشنهادی	همکارها	هدف عملیاتی
۱	شهرداری‌ها	اصلاح سیستم های آبیاری فضای سبز	-	استفاده بهینه از آب و حذف تلفات و هدررفت آب در فضای سبز شهری
		استفاده از آسفالت جذبی در پروژه‌های بلندمدت و در آسفالت‌های جدید	-	افزایش نفوذپذیری سطوح شهری و کاهش رواناب سطحی در راستای تغذیه تدریجی آبخوان
۲	وزارت نیرو	دائمی نمودن حداقل جریان آب در زاینده رود	پیگیری توسط شرکت آب منطقه‌ای اصفهان	حفظ جریان پایه زاینده رود و پشتیبانی از پایداری هیدرولوژیک و تغذیه مرتبط با آبخوان
۳	شرکت آب منطقه‌ای اصفهان	ایجاد بازار و بانک آب		فراهم سازی سازوکار تخصیص پذیر و منعطف برای مدیریت تقاضا و بازتوزیع بهره‌ور منابع آب
		تکمیل پروژه انتقال آب کوهرنگ ۳		جبران کسری های گذشته حوضه
۴	وزارت صمت	حرکت به سمت صنایع «آب صفر»	صنایع، استانداری	کاهش وابستگی بخش صنعت به منابع آب متعارف و نامتعارف از طریق عدم توسعه صنایع آب بر
۵	سازمان نظام مهندسی	الزام بازچرخانی آب خاکستری، استفاده از تجهیزات کاهنده مصرف، و الزام حفر چاه جذبی برای هدایت آب ناودان در ساختمان‌های جدید	شهرداری‌ها، شرکت آب و فاضلاب	تغییر استاندارد ساخت و ساز برای نسل‌های آینده با هدف کاهش مصرف و افزایش جذب محلی آب



کاهش فشار بر منابع آب حوضه	پیگیری شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، نمایندگان مجلس و استانداری	کاهش تخصیص انتقال آب به خارج از حوضه	وزارت نیرو	۶
----------------------------	--	--------------------------------------	------------	---

۹.۶. الزامات اجرایی بسته سیاستی

تحقق اهداف این بسته مستلزم تبدیل مسئله فرونشست از یک «چالش فنی-آبی» به یک «اولویت نخست حاکمیتی» است. ماهیت فرابخشی این بحران ایجاب می‌کند که اراده واحد و فرماندهی منسجم در سطح ملی و استانی شکل بگیرد؛ چراکه مدیریت تبعات اجتماعی و اجرایی آن به هیچ عنوان در توان یک دستگاه تخصصی (مانند شرکت آب منطقه‌ای) نبوده و نیازمند مشارکت مسئولان تمامی ارکان حاکمیت برای جلوگیری از وقفه در اجرا و توزیع عادلانه هزینه‌های اجتماعی است.

۹.۶.۱. الزامات حقوقی و قانونی

- بهره‌گیری قاطع از ظرفیت‌های قانونی برای انسداد چاه‌های غیرمجاز از جمله آئین نامه بند ۴۰ قانون برنامه هفتم پیشرفت و ایجاد وحدت رویه در نظام قضایی
- اقدام قاطع در قطع برق متمردين از نصب کنتور و تجهیزات اندازه گیری
- تدوین مصوبات استانی تکمیلی جهت ایجاد پشتوانه قانونی برای تصمیمات سخت گیرانه، به گونه‌ای که مسئولیت حقوقی و اجرایی اقدامات، میان تمامی دستگاه‌های نظارتی و حاکمیتی توزیع شود.

۹.۶.۲. الزامات مالی

- تأمین منابع اعتباری برای اجزای کلیدی بسته، از جمله:
 - نصب کنتورهای هوشمند و ابزار اندازه گیری؛
 - توسعه زیرساخت تصفیه پساب با استاندارد مصارف فضای سبز شهری؛
 - اجرای طرح‌های تغذیه آبخوان؛
 - پشتیبانی از برنامه‌های جبرانی، معیشتی و اجتماعی؛

۹.۶.۳. الزامات حکمرانی و نهادی

- تشکیل شورای تعادل بخشی آبخوان اصفهان - برخوار: استقرار یک سازوکار رسمی برای هماهنگی بین‌دستگاهی، حل تعارضات منافع، پایش شاخص‌های کلیدی و ایجاد نظام پاسخگویی شفاف برای تمامی دستگاه‌ها.

- **همگرایی و انسجام راهبردی دستگاه‌های استانی:** هم‌راستایی کامل دستگاه‌های متولی (کشاورزی، صنعت، محیط‌زیست، شهرداری‌ها و ...) در اتخاذ جهت‌گیری واحد. هرگونه تصمیم بخشی یا متعارض، به معنای شکست کل بسته سیاستی خواهد بود.
- تصریح می‌گردد که کنترل فرونشست یک «مأموریت مشترک حاکمیتی» است و دستگاه‌های اجرایی تخصصی به تنهایی قادر به مدیریت تبعات و هزینه‌های اجتماعی آن نیستند.

۹.۶.۴. الزامات اجتماعی، سیاسی

- **پشتیبانی حاکمیتی و مدیریت تعارضات اجتماعی:** با توجه به اصطکاک‌های اجتماعی ناشی از محدودسازی‌ها، مشارکت مستقیم نهادهای قضایی، سیاسی، انتظامی و امنیتی برای پشتیبانی از اجرای قانون و مدیریت صلح‌آمیز تعارضات محلی در چارچوب رویکردهای اقناعی و پیشگیرانه ضروری است.
- **تسهیلات دشت فناوری:** ارائه جایگزین‌های معیشتی، تسهیلات ارتقای بهره‌وری و برنامه‌های بازآفرینی شغلی برای بهره‌برداران.
- **مسئولیت‌پذیری عمومی:** اقدامات حوزه مصرف خانگی صرفاً با هدف ارتقای سرمایه اجتماعی و پذیرش همگانی سیاست‌ها دنبال می‌شود و نباید تمرکز را از اقدامات اصلی (مدیریت برداشت کلان) منحرف کند.

۹.۶.۵. الزامات فنی و زیست‌محیطی

- **کنترل کیفیت کنتورها و نظارت بر مجریان نصب:** نظارت دقیق و مستمر بر کنتورسازان و شرکت‌های نصاب/پیمانکار نصب کنتورهای هوشمند (از مرحله تأمین تا نصب و بهره‌برداری) برای جلوگیری از خرابی، دستکاری یا خطای عملکرد؛ همراه با الزام به خدمات پس از نصب، رسیدگی فوری به خرابی‌ها، تعمیر/تعویض در بازه زمانی مشخص و ثبت همه رویدادها در سامانه پایش
- کلیه اقدامات مرتبط با تغذیه مصنوعی، پخش سیلاب، چاه‌های جذبی/تزریقی و استفاده از پساب باید با رعایت استانداردهای کیفیت آب و ارزیابی ریسک آلودگی و پایش کیفی مستمر انجام شود.

۱۰. مراجع:

- Ahmadi, A. and Yousefi, A. (۲۰۲۶) 'Diagnosing groundwater governance using Network of Action Situations and Social Network Analysis: A case of an over-exploited aquifer in Iran', *Environmental Science & Policy*, ۱۷۸, ۱۰۴۳۵۶. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2026.104356>.
- Ahmadi Beni, F., Entezari, M., Sadeghi, A. and Salehi, A. (۲۰۲۴) 'Quantifying land subsidence and its nexus with groundwater depletion in Isfahan-Borkhar Plain: An integrated approach using



- radar interferometry and spatial bivariate relationships', *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, ۳۵, ۱۰۱۲۴۸. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101248>.
- Deltares (n.d.) *Sinking cities: An integrated approach towards solutions*. Available at: <https://cms.deltares.nl/assets/common/downloads/Sinking-cities-۱.pdf> (Accessed: ۲۹ August ۲۰۲۶).
 - Ghasemi, N., Khosravi, I. and Bahrami, A. (۲۰۲۶) 'Predictive modeling of InSAR-based land subsidence susceptibility via ANFIS: Application to the Isfahan-Borkhar Plain', *Natural Hazards Research*. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2026.07.002>.
 - Goorabi, A., Karimi, M., Yamani, M. and Perissin, D. (۲۰۲۰) 'Land subsidence in Isfahan metropolitan and its relationship with geological and geomorphological settings revealed by Sentinel-۱A InSAR observations', *Journal of Arid Environments*, ۱۸۱, ۱۰۴۲۳۸. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104238>.
 - Ohenhen, L.O., Zhai, G., Lucy, J., Werth, S., Carlson, G., Khorrami, M., Onyike, F., Sadhasivam, N., Tiwari, A., Ghobadi-Far, K., Sherpa, S.F., Lee, J.-C., Zehsaz, S. and Shirzaei, M. (۲۰۲۵) 'Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises', *Nature Cities*, ۲(۶), pp. ۵۴۳-۵۵۴. doi: 10.1038/s44284-025-00240-y.
 - Planet Anomaly (۲۰۲۴) 'Visualized: Which Coastal Cities Are Sinking the Fastest?', *Visual Capitalist*, ۱ March. Available at: <https://www.visualcapitalist.com/cp/visualized-which-coastal-cities-are-sinking-the-fastest/> (Accessed: ۲۹ August ۲۰۲۶).
 - Rafiee, M., Ajalloeian, R., Dehghani, M. and Mahmoudpour, M. (۲۰۲۲) 'Artificial neural network modeling of the subsidence induced by overexploitation of groundwater in Isfahan-Borkhar Plain, Iran', *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, ۸۱(۵), ۱۷۰. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10664-022-02646-7>.
 - Sharifi, A., Khodaei, B., Ahrari, A., Hashemi, H. and Haghighi, A.T. (۲۰۲۴) 'Can river flow prevent land subsidence in urban areas?', *Science of the Total Environment*, ۹۱۷, ۱۷۰۵۵۷.
 - بیت‌اللهی، علی و همکاران (۱۴۰۱) فرونشست زمین در اصفهان و اطراف آن. تهران: مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی.
 - پایاب، مهسا و صیاف هیوا، (۱۴۰۱) تأثیر فرونشست بر زیرساخت‌ها و راهکارهای کنترل این اثرات، مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی، دفتر مطالعات زیربنایی، <https://rc.majlis.ir/fa/report/show/1755269>
 - شرکت آب منطقه‌ای اصفهان، مدیریت حفاظت و بهره‌برداری منابع آب زیرزمینی، داده‌های منابع و مصارف آب
 - شرکت رهاب آذر محیط زیست (۱۴۰۴) بررسی فرونشست زمین در اثر بهره‌برداری از منابع آب زیرزمینی با استفاده از روش ترکیبی مدل عددی-تحلیلی سلسله‌مراتبی و رادار اینترفرومتری. گزارش مطالعاتی، واحد مطالعات شرکت آب منطقه‌ای اصفهان.
 - شرکت مهندسین مشاور بنیان زمین پایدار (۱۴۰۱) بررسی و مدل‌سازی فرونشست شهر اصفهان. گزارش شهرداری اصفهان.