

**A Strategic Analysis of the Consequences of Land Subsidence—
Caused by Groundwater Depletion—on the Physical Development
of the City, with an Emphasis on Sustainable Urban Management:
A Case Study of District 22, Tehran**

Alireza Bahramy

Department of Geography and Urban Planning, Se.C.,
Islamic Azad University, Semnan, Iran

**Mohamad Reza
Zandmoghadam***

Department of Geography and Urban Planning, Se.C.,
Islamic Azad University, Semnan, Iran

Abase Arghan

Department of Geography and Urban Planning, Se.C.,
Islamic Azad University, Semnan, Iran

Abstract

Land subsidence in alluvial aquifer systems results from declining pore-water pressure and compaction of compressible strata. When it coincides with urban expansion, it can affect infrastructure resilience and the spatial direction of development. This study examines the relationship between groundwater decline, subsidence susceptibility, and urban physical growth in District 22 of Tehran, reframing the thesis results within the context of sustainable urban management. The research uses a descriptive-analytical design and secondary analysis of piezometric records for 2003–2024, spatial layers, and susceptibility maps produced by integrating geographic information systems with the Analytic Hierarchy Process (AHP) and Fuzzy Delphi AHP. The assessed criteria include groundwater-level decline, lithology, slope, elevation, distance to faults and drainage, precipitation, surface curvature, and the Topographic Wetness Index. The thesis reports declining groundwater levels in the monitored piezometers and a relative concentration of high and very-high susceptibility classes across lowland settings. In the AHP map, the high and very-high classes together account for 39.8% of the reported study area; the corresponding share in the Fuzzy Delphi map is 31.6%. Their spatial overlap with portions of transport, sports, service, and residential land uses signals a need to prioritize monitoring and review development controls. However, spatial overlap alone does not prove realized damage or statistical causality. Since the thesis does not report independent InSAR displacement data for validation, the outputs are interpreted as relative susceptibility maps rather than measurements of subsidence rates. The paper therefore recommends groundwater-demand management, integrated ground-motion monitoring, pre-permit hazard assessment, and development control in sensitive zones.

Keywords: land subsidence; groundwater decline; urban physical development; sustainable urban management; District 22 of Tehran

How to Cite: Bahramy, A., Zandmoghadam, M. R. & Arghan, A. (2025). A Strategic Analysis of the Consequences of Land Subsidence—Caused by Groundwater Depletion—on the Physical Development of the City, with an Emphasis on Sustainable Urban Management: A Case Study of District 22, Tehran. *Journal of Intelligent Strategic Management* .4(4), 815-836.

doi: 10.87453/bumara.2026.372301.0258



Intelligent Strategic Management (JISM) in Development and Evolution is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

© Authors

*** Corresponding Author:** dr.zandmoghadam@iau.ac.ir

تحلیل راهبردی پیامدهای فرونشست زمین ناشی از افت آب‌های زیرزمینی بر توسعه کالبدی شهر با تأکید بر مدیریت پایدار شهری؛ مطالعه موردی منطقه ۲۲ تهران

علیرضا بهرامی

گروه جغرافیا، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

محمد رضا زندمقدم*

گروه جغرافیا، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

عباس ارغان

گروه جغرافیا، واحد سمنان، دانشگاه آزاد اسلامی، سمنان، ایران

چکیده

فرونشست زمین در آبخوان‌های آبرفتی، پیامدی از افت فشار آب منفذی و فشردگی لایه‌های تراکم‌پذیر است و در صورت هم‌زمانی با گسترش ساخت‌وساز، می‌تواند پایداری کالبدی زیرساخت و جهت‌گیری توسعه شهری را تحت تأثیر قرار دهد. این پژوهش با هدف تحلیل راهبردی پیوند افت آب زیرزمینی، پتانسیل فرونشست و رشد کالبدی منطقه ۲۲ تهران، داده‌های پژوهش حاضر را از منظر مدیریت پایدار شهری بازخوانی می‌کند. روش مطالعه مبتنی بر تحلیل ثانویه داده‌های پیزومتری سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۳، لایه‌های مکانی و نقشه‌های پهنه‌بندی حاصل از تلفیق سامانه اطلاعات جغرافیایی با تحلیل سلسله‌مراتبی و تحلیل سلسله‌مراتبی دلفی فازی است. معیارهای بررسی‌شده شامل افت سطح آب، لیتولوژی، شیب، ارتفاع، فاصله از گسل و آبراهه، بارش، انحنای سطح و شاخص رطوبت توپوگرافی است. نتایج مطالعه، روند کاهش تراز آب را در چاه‌های پیزومتری بررسی‌شده و تمرکز نسبی پهنه‌های با پتانسیل زیاد و خیلی زیاد را در بسترهای دشتی گزارش می‌کند. در نقشه تحلیل سلسله‌مراتبی، طبقات زیاد و خیلی زیاد روی هم ۳۹/۸ درصد و در نقشه دلفی فازی ۳۱/۶ درصد مساحت گزارش‌شده را تشکیل می‌دهند. هم‌پوشانی مکانی این پهنه‌ها با بخشی از کاربری‌های حمل‌ونقل، ورزشی، خدماتی و مسکونی، اولویت پایش و بازنگری ضوابط توسعه را نشان می‌دهد؛ اما به‌تنهایی اثبات‌کننده خسارت واقع‌شده یا رابطه علی آماری نیست. چون داده مستقل تداخل‌سنجی راداری برای اعتبارسنجی در این مطالعه گزارش نشده، یافته‌ها به‌عنوان نقشه پتانسیل تفسیر می‌شوند، نه اندازه‌گیری نرخ فرونشست. بر این اساس، مقاله راهبردهای مدیریت تقاضای آب، پایش تلفیقی زمین، ارزیابی خطر پیش از صدور مجوز و کنترل توسعه در پهنه‌های حساس را پیشنهاد می‌کند.

کلیدواژه‌ها: فرونشست زمین، افت آب زیرزمینی، توسعه کالبدی شهر، مدیریت پایدار شهری، منطقه ۲۲ تهران

استناد به این مقاله: بهرامی، علیرضا و زندمقدم، محمد رضا و ارغان، عباس. (۱۴۰۴). تحلیل راهبردی پیامدهای فرونشست زمین ناشی از افت آب‌های زیرزمینی بر توسعه کالبدی شهر با تأکید بر مدیریت پایدار شهری؛ مطالعه موردی منطقه ۲۲ تهران. مدیریت استراتژیک هوشمند، ۴(۴)، ۸۳۶-۸۱۵.



مدیریت استراتژیک هوشمند (JISM) در توسعه و تکامل تحت مجوز بین‌المللی کپی‌رایت کامنز با شرایط انتساب-غیرتجاری ۴٫۰ منتشر می‌شود.

©نویسندگان

* نویسنده مسئول: dr.zandmoghdam@iau.ac.ir

۱. مقدمه

شتاب شهرنشینی، رقابت بر سر زمین و آب را تشدید کرده است، پیش‌بینی‌های جهانی نیز استمرار افزایش سهم جمعیت شهری را نشان می‌دهند (سازمان ملل متحد، ۲۰۱۹). فرونشست، صرفاً یک تغییر ارتفاعی در سطح زمین نیست، این پدیده می‌تواند تغییر شکل نامتقارن، آسیب به شبکه‌های خطی، اختلال در زهکشی و کاهش دائمی ظرفیت ذخیره آبخوان را در پی داشته باشد. در سازندهای ریزدانه، افت تراز آب سبب افزایش تنش مؤثر و تراکم آبخوان — آب‌دار می‌شود، بخشی از این تراکم ممکن است برگشت‌ناپذیر باشد (گالووی و همکاران، ۱۹۹۹).^۲

تهران نمونه‌ای مهم از تلاقی فشار توسعه و محدودیت منابع آب است. تحلیل‌های ماهواره‌ای بلندمدت در دشت تهران، چند کانون فرونشست و سهم مهم فشردگی دائمی آبخوان را گزارش کرده‌اند، با این حال این نتایج در مقیاس دشت یا کلان‌شهرند و نباید بدون داده مکانی هم‌مقیاس به هر محله یا منطقه شهرداری تعمیم داده شوند (هاگشنس‌هاگیکگی و متق، ۲۰۱۹).^۳

اهمیت منطقه ۲۲ از آن روست که در پهنه غربی کلان‌شهر، هم‌زمان با رشد مجموعه‌های مسکونی، تجاری، ورزشی و شبکه‌های زیرساختی قرار دارد و بخش‌هایی از آن بر رسوبات آبرفتی و پادگانه‌ای واقع شده‌اند. این ویژگی‌ها به‌خودی‌خود ثابت نمی‌کنند که همه توسعه‌ها در معرض فرونشست فعال‌اند، اما لزوم ارزیابی ژئوتکنیکی، پایش سطح آب و کنترل مصرف را برجسته می‌کنند.

۲. چارچوب نظری: از افت آب تا پیامد کالبدی

۲-۱. سازوکار فرونشست آبخوانی

در آبخوان‌های متشکل از ماسه، سیلت و رس، کاهش فشار آب منفذی در پی پمپاژ موجب افزایش تنش مؤثر بر اسکلت رسوب می‌شود. آب از لایه‌های ریزدانه آب‌دار خارج می‌شود و ذرات به آرایش متراکم‌تری می‌رسند. اگر تنش از پیش تحکیم‌شده عبور کند، فشردگی می‌تواند عمده‌تأ غیرکشسان و ماندگار باشد، بنابراین بالا آمدن بعدی سطح آب، الزاماً ارتفاع ازدست‌رفته یا ظرفیت ذخیره را باز نمی‌گرداند. شدت و گستره

¹ United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). World Urbanization Prospects 2018: Highlights.

² Galloway, D. L., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). Land subsidence in the United States.

³ Haghsheenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuous compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis.

تغییر شکل به ضخامت لایه‌های ریزدانه، تاریخچه تنش، افت هد، هندسه آبخوان و توزیع پمپاژ وابسته است (گالووی و بوربی، ۲۰۱۱).^۱

برداشت آب زیرزمینی محرک شناخته شده‌ای است، اما تنها عامل محتمل نیست. تحکیم طبیعی رسوبات، بارگذاری ساختمان، عملیات پی‌سازی و تونل‌سازی، زهکشی و ساختار زمین‌شناختی می‌توانند با یکدیگر برهم‌کنش داشته باشند. مطالعه تهران نشان می‌دهد که تحلیل چندحسگری InSAR و داده‌های زمینی برای تفکیک مؤلفه‌های زمانی و مکانی تغییر شکل ضروری است، در نتیجه، نقشه‌های مبتنی بر شاخص‌ها به تنهایی معادل مشاهده فرونشست نیستند (هاگشنس‌هاگیگی و متق، ۲۰۱۹).

۲-۲. پیامدهای شهرسازانه

پیامدهای بالقوه برای شهر شامل نشست نامتقارن پی، ترک در بنا و روسازی، تغییر شیب کانال‌ها و شبکه فاضلاب، آسیب به خطوط آب و گاز، کاهش ظرفیت زهکشی و افزایش موضعی آب‌گرفتگی است. میزان خسارت تابع نرخ تغییر شکل، گرادیان مکانی نشست، کیفیت طراحی و ساخت، قدمت و نوع سازه، و تاب‌آوری شبکه است. برای همین، «نرخ نشست منطقه‌ای» و «آسیب‌پذیری دارایی» دو مفهوم جدا هستند: سطح تغییر شکل مشابه می‌تواند برای دو سازه آثار کاملاً متفاوت داشته باشد.

از دیدگاه برنامه‌ریزی، پیامدهای فرونشست را می‌توان در سه لایه دید: (الف) پیامد مستقیم برای سازه و خدمات شهری، (ب) پیامد غیرمستقیم از طریق افزایش هزینه تعمیر، بیمه و نگهداری، و (پ) پیامد راهبردی برای محدود شدن گزینه‌های رشد، کاهش قابلیت اطمینان سرمایه‌گذاری و تشدید نابرابری مکانی. در مقاله حاضر، به علت نبود داده‌های میدانی خسارت، این آثار به‌عنوان مسیرهای محتمل و قابل آزمون تبیین می‌شوند، نه خسارات اثبات شده در منطقه ۲۲.

۳-۲. مدیریت پایدار شهری و مدل مفهومی

مدیریت پایدار شهری در این مسئله به معنای هماهنگ‌سازی مدیریت آبخوان، برنامه‌ریزی کاربری زمین، مقررات ساخت‌وساز و پایش دارایی‌های شهری است. نگاه بخشی ممکن است شهرداری را به افزایش فضای سبز یا توسعه خدمات سوق دهد، بی‌آنکه منبع آب آبیاری یا ظرفیت زمین بررسی شود، در مقابل، مدیریت آب بدون

¹ Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction.

ارتباط با مجوزهای ساختمانی و محل تمرکز تقاضا نیز اثر محدودی دارد. راهبرد پایدار باید هم‌زمان از افزایش تقاضای القایی جلوگیری کند، مصرف را به منابع مطمئن‌تر منتقل سازد و تغییر شکل زمین را در طراحی و نگهداری زیرساخت لحاظ کند.

تجربه‌های جهانی بر ضرورت پیوند دادن رشد شهر با پایش تغییر شکل تأکید دارند. در مطالعه توسعه باترسی لندن، نویسندگان هم‌زمان تغییرات آب زیرزمینی، ساخت‌وساز و داده‌های راداری را بررسی کرده‌اند، این نمونه نشان می‌دهد حتی در بافت پیشرفته شهری نیز پروژه‌های عمرانی و افت آب باید در یک چارچوب تحلیلی مشترک ارزیابی شوند (آگاروال و همکاران، ۲۰۲۳، ۱).

جدول ۱: زنجیره مفهومی اثر افت آب زیرزمینی بر پایداری کالبدی شهر

پاسخ مدیریتی	پیامد برای شهر	فرایند میانی	محرك‌ها
کاهش تقاضا، پایش پیرومتری و InSAR	فرونشست/تغییر شکل، تنش بر بنا و شبکه‌ها	افت هد و فشار منفذی، تراکم لایه‌های ریزدانه	برداشت بیش از تغذیه، خشکسالی، تغییر سطوح نفوذپذیر
غربالگری زمین خطر پیش از مجوز	آسیب‌پذیری ناهمگون و هزینه نگهداری	تعامل بارگذاری با شرایط زمین و آبخوان	توسعه جدید، بار سازه، حفاری و پی‌سازی
ضوابط مشروط، مقاوم‌سازی و برنامه تداوم خدمت	افزایش پیامدهای اختلال و دشواری سازگاری	قفل‌شدگی کالبدی و وابستگی به زیرساخت	تمرکز سرمایه و خدمات در پهنه حساس

منبع: بازطراحی نگارنده بر پایه سازوکارهای گزارش‌شده در گالووی و همکاران (۱۹۹۹)، گالووی و بوربی (۲۰۱۱) و هاگشنس‌هاگیگی و متق (۲۰۱۹).

در این چارچوب، تحلیل راهبردی این مقاله سه تمایز را حفظ می‌کند: «محرك» (برداشت و افت آب)، «حساسیت بستر» (لیتولوژی و ضخامت رسوبات) و «مواجهه/آسیب‌پذیری» (تراکم جمعیت، نوع سازه و اهمیت شبکه). نقشه پهنه‌بندی عمدتاً

¹ Agarwal, V., Kumar, A., Qin, Z., Gomes, R. L., & Marsh, S. (2023). Lessons for sustainable urban development: Interplay of construction, groundwater withdrawal, and land subsidence at Battersea, London.

دو جزء نخست را در قالب پتانسیل ترکیب می‌کند، برای تبدیل آن به نقشه ریسک عملیاتی، داده مواجهه و آسیب‌پذیری نیز لازم است.

۳. پیشینه پژوهش و جایگاه مطالعه

در سطح ملی، مطالعات سنجش‌ازدور نشان داده‌اند که افت آبخوان و فرونشست در بخش‌هایی از ایران گسترده و در مواردی برگشت‌ناپذیر است. تحلیل سراسری مبتنی بر سری زمانی راداری، پهنه‌های متعدد فرونشست و ارتباط آن با کاهش ذخیره آب زیرزمینی را گزارش کرده است، با این حال الگوی هر حوضه به زمین‌شناسی، برداشت و تاریخچه تنش وابسته است و مقدار کشوری را نمی‌توان به منطقه ۲۲ نسبت داد (هاگشنس‌هاگیگی و متق، ۲۰۲۴). ۱.

در مقیاس تهران، پژوهش چندحسگری هاگشنس‌هاگیگی و متق (۲۰۱۹) با ترکیب رادارهای چندباندی و داده‌های زمینی، کانون‌های متمایز تغییر شکل در دشت تهران را نشان داد. این یافته برای مقاله حاضر دو پیام دارد: نخست، تداوم پایش چندزمانه ضروری است، دوم، نتیجه دشت تهران به معنای اثبات نرخ مشخص در محدوده شهرداری منطقه ۲۲ نیست. مطالعات پایه در ایران نیز برداشت آب و فشردگی آبخوان را به‌عنوان سازوکار اصلی در چند دشت مطرح کرده‌اند (متق و همکاران، ۲۰۰۸). ۲.

مطالعات تطبیقی شهری رابطه پیچیده‌تری میان رشد شهر و نشست نشان می‌دهند. در مورلیا، تحلیل چنددهه‌ای رشد سکونت و InSAR، جابه‌جایی کانون‌های نشست و نقش ساختار زمین‌شناختی را بررسی کرده است (سیگنا و تپته، ۲۰۲۲). در هانوی نیز توسعه مناطق جدید با فرونشست هم‌زمان شده، درحالی‌که برداشت آب تنها بخشی از توضیح بوده است (بیتسون و همکاران، ۲۰۲۳). این دو مورد هشدار می‌دهند که هم‌بستگی مکانی ساده، برای نسبت دادن علت کافی نیست. ۴۳.

در حوزه برنامه‌ریزی، مطالعات باترسی لندن بر تحلیل مشترک ساخت‌وساز، پمپاژ و تغییر شکل تأکید دارند (آگاروال و همکاران، ۲۰۲۳). در سطح روش، تحلیل سلسله‌مراتبی برای تلفیق معیارهای ناهم‌مقیاس و آشکار کردن قضاوت‌های

¹ Haghsheenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2024). Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran.

² Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation.

³ Cigna, F., & Tapete, D. (2022). Urban growth and land subsidence: Multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico.

⁴ Bateson, L., Novellino, A., Hussain, E., Arnhardt, R., & Nguyen, H. K. (2023). Urban development induced subsidence in deltaic environments: A case study in Hanoi, Vietnam.

اولویت گذاری به کار می رود، اما نتیجه به انتخاب معیارها، مقیاس داده و کیفیت قضاوت کارشناسی حساس است (ساعتی، ۱۹۸۰، ساعتی، ۲۰۰۸). ۲۱.

۴. محدوده مطالعه، داده ها و حدود استنباط

۴-۱. منطقه مورد مطالعه

منطقه ۲۲ در شمال غرب تهران و در گذار از دامنه های جنوبی البرز به دشت تهران قرار دارد. در شرح مطالعه، محدوده دارای چهار ناحیه و هشت محله توصیف شده و وسعت محدوده خدماتی در توصیف مطالعه حدود ۵۸۸۱ هکتار ذکر شده است، در جداول پهنه بندی، مجموع مساحت طبقات حدود ۶۰۷۴ هکتار به دست می آید. این اختلاف باید پیش از ارسال مقاله با مرز GIS و نسخه نقشه ها تطبیق داده شود. با توجه به توپوگرافی متنوع، تعمیم رفتار زمین از دشت کم شیب به دامنه های شمالی موجه نیست.

۴-۲. منابع داده و متغیرها

بر اساس شرح روش پژوهش، داده های پیزومتری چاه های پارس فیلم، استادیوم آزادی و وردآورد برای بررسی روند تغییر تراز آب در دوره ای که عمدتاً ۱۳۸۲ تا ۱۴۰۳ معرفی شده، به کار رفته اند. برای نقشه افت آب، داده های هفت چاه مشاهده ای داخل و پیرامون محدوده، به روش کریجینگ درون یابی شده و از تفاضل دو سطح تراز آغاز و پایان دوره استفاده شده است. مدل ارتفاعی PALSAR ALOS با تفکیک ۱۲٫۵ متر، نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰، بارش پنج ایستگاه طی ۱۳۸۳ تا ۱۴۰۳ و نقشه کاربری زمین نیز در شرح روش گزارش شده اند.

معیارهای تلفیق عبارت اند از ارتفاع، شیب، جهت شیب، فاصله از شبکه زهکشی، فاصله از گسل، بارش، افت سطح آب زیرزمینی، انحنا سطح، شاخص رطوبت توپوگرافی و لیتولوژی. بخش هایی از شرح مطالعه به صورت کیفی از «بخش جنوبی و مرکزی» و «رسوبات آبرفتی» به عنوان نقاط حساس یاد می کند. این مقاله این توصیف را نقل و تحلیل می کند، اما چون فایل لایه های مکانی و تصاویر نقشه برای باز تولید در اختیار نیست، نقشه جدیدی تولید نمی کند و مختصات یا نرخ محلی جدیدی نمی سازد.

¹ Saaty, T. L. (1980). The Analytic Hierarchy Process.

² Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process.

جدول ۲. مشخصات داده‌های گزارش شده در مطالعه و محدودیت تفسیر

محدودیت مهم	کاربرد	مشخصات گزارش شده	داده/لایه
تراکم کم ایستگاه‌ها برای سطح منطقه	روند تراز و نقشه افت	۷ چاه، چارت‌ها عمدتاً ۱۳۸۲-۱۴۰۳	پیزومتر
نسخه پردازش و خطای ارتفاع گزارش نشده	ارتفاع، شیب، انحنا، TWI	PALSAR ALOS، ۱۲۰۵ متر	مدل ارتفاعی
برای تصمیم قطعه‌ای کافی نیست	حساسیت بستر و فاصله از گسل	نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰	لیتولوژی و گسل
سری زمانی/واریوگرام ارائه نشده	تغذیه بالقوه و زمینه اقلیمی	۱۳۸۳-۱۴۰۳ ایستگاه، ۱۵	بارش
داده خام و اعتبارسنجی مستقل در دسترس نیست	هم‌پوشانی با توسعه کالبدی	خروجی AHP/GIS و FDAHP	کاربری و نقشه خطر

منبع: استخراج و تلخیص از شرح روش‌شناسی مطالعه ارائه شده.

۵. روش پژوهش و چارچوب تحلیل

۵-۱. طرح پژوهش

پژوهش حاضر مطالعه‌ای کاربردی با رویکرد توصیفی — تحلیلی است. داده‌های پیزومتری، لایه‌های مکانی و خروجی‌های مدل چندمعیاره در سه مرحله بررسی شدند: (۱) توصیف افت تراز آب بر اساس نمودارهای پیزومتری، (۲) بازخوانی پتانسیل مکانی بر پایه خروجی‌های AHP و دلفی فازی، (۳) تفسیر پیامدهای برنامه‌ریزی از راه هم‌پوشانی پهنه‌های زیاد و خیلی زیاد با کاربری‌های گزارش شده. این مراحل امکان ارزیابی روند و اولویت‌های فضایی را فراهم می‌کنند، اما جایگزین مدل هیدروژئومکانیکی یا سنجش مستقل تغییر شکل نیستند.

۵-۲. وزن‌دهی و تلفیق چندمعیاره

در روش AHP، هدف به معیارها و زیرمعیارها شکسته می‌شود، مقایسه‌های زوجی بر اساس مقیاس ترجیحی انجام می‌گیرد، وزن‌ها استخراج می‌شوند و نرخ ناسازگاری برای

ارزیابی سازگاری قضاوت‌ها به کار می‌رود (ساعتی، ۱۹۸۰). در نسخه فازی — دلفی، قضاوت‌های کارشناسی به اعداد فازی تبدیل و سپس غیرفازی‌سازی می‌شوند تا دامنه‌ای از عدم قطعیت در ترجیح‌ها بازتاب یابد. اعتبار درونی و نرخ ناسازگاری مناسب به معنای اثبات صحت خارجی نقشه نیست، برای آن، نقشه باید با داده مشاهده‌ای مستقل سنجیده شود.

برای اندازه‌گیری تغییر شکل مستقل، روش‌های پراکنده‌های پایدار و زیرمجموعه خط‌مبنای کوچک در تحلیل سری زمانی راداری به کار می‌روند (فرتی و همکاران، ۲۰۰۱، براردینو و همکاران، ۲۰۰۲). ۲۱.

گزارش پژوهش نشان می‌دهد که ۱۵ خبره در مقایسه‌های زوجی مشارکت داشته‌اند و نرخ ناسازگاری ماتریس‌ها کمتر از ۰.۰۵ بوده است، این مقدار از آستانه متداول ۰.۱۰ پایین‌تر است. با این حال، فهرست خبرگان، پرسش‌نامه، ماتریس‌های کامل، جزئیات تجمیع و شاخص اعتبارسنجی در گزارش روش به‌طور کامل نیامده‌اند. از این‌رو مقاله این مقادیر را «مقادیر گزارش‌شده» معرفی می‌کند، نه محاسبات مستقلاً بازتولیدشده.

۳-۵. شاخص پیامد کالبدی

شاخص عملیاتی بررسی اثر کالبدی در مطالعه، درصد مساحت هر کاربری قرار گرفته در دو کلاس «زیاد» و «خیلی زیاد» است. در این مقاله این معیار به‌عنوان مواجهه مکانی نسبی تفسیر می‌شود، نه اندازه‌گیری مستقیم خسارت، سطح خطر جانی یا ارزش اقتصادی در معرض. ارزیابی کامل ریسک به تلفیق خطر اندازه‌گیری‌شده، جمعیت و دارایی‌های در معرض، آسیب‌پذیری سازه‌ای و ظرفیت پاسخ نیاز دارد.

۴-۵. کنترل کیفیت استنباط

برای جلوگیری از بیش‌تفسیر، هر نتیجه در یکی از سه سطح بیان می‌شود: «داده/عدد گزارش‌شده»، «تفسیر محتاطانه» یا «پیشنهاد سیاستی». هر ادعای علی به‌عنوان سازوکار نظری بیان می‌شود، مگر آنکه داده آماری یا سنجش مستقل آن را در محدوده مطالعه اثبات کند. این اصل به‌ویژه درباره نقش گسل، فاصله از رودخانه، بار بارندگی و ساخت‌وساز اهمیت دارد، وزن بالای یک معیار در مدل خبره‌محور، به‌تنهایی نشان‌دهنده سهم علی واقعی آن نیست.

¹ Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry.

² Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms.

۶. یافته‌ها

۶-۱. افت سطح آب زیرزمینی

نمودارهای سه پیزومتر پارس فیلم، استادیوم آزادی و وردآورد در شرح مطالعه نوسان‌های ماهانه را در کنار روند کاهشی سالانه نشان می‌دهند. برداشت کلی مطالعه از این نمودارها، افت مستمر تراز و ناکافی بودن بازیابی فصلی برای معکوس کردن روند بلندمدت است.

این الگو با فرضیه سازوکار آبخوانی سازگار است:

- اگر برداشت تجمعی از تغذیه فراتر رود، هد آب زیرزمینی پایین می‌آید و زمینه تراکم لایه‌های حساس فراهم می‌شود. با این حال، به دلیل فقدان جدول مقادیر سالانه، مختصات ایستگاه‌ها، مبنای ارتفاعی و خط رگرسیون، مقاله نرخ افت سالانه مستقل محاسبه نمی‌کند.

در شرح مطالعه، برای تفاضل تراز سال‌های ۱۳۸۲ و ۱۴۰۳ از نقشه کریجینگ استفاده شده و کلاس‌های افت فازی از حدود ۳۰۱ تا ۱۷۰۴ متر گزارش شده‌اند. این دامنه در صورت صحت مبنای افت تجمعی دوره‌ای را بازتاب می‌دهد، اما نباید آن را معادل افت سالانه یا نرخ فرونشست دانست. نمونه برداری هفت‌چاهی در یک پهنه با توپوگرافی و مرزهای هیدروژئولوژیک متنوع، عدم قطعیت درونیابی را بالا می‌برد و نیازمند ارائه خطای متقاطع، نیم‌تغییرنا و آزمون حساسیت است.

از منظر راهبردی، داده پیزومتری صرفاً شاخصی برای پایش نیست، باید مبنای محدودیت برداشت و مجوز کاربری‌های پرمصرف باشد. مجموعه‌های خدماتی و فضای سبز گسترده می‌توانند تقاضای آبی قابل توجه داشته باشند، اما از جداول موجود نمی‌توان سهم واقعی مصرف هر مجموعه را نتیجه گرفت. لازم است برای هر پهنه حساس، برداشت چاه‌ها، منبع آب جایگزین، نیاز آبی فضای سبز و روند تراز در یک ترازنامه آب محلی گردآوری شود.

جدول ۳: جمع‌بندی کیفی شواهد پیزومتری و حدود استنباط

آنچه از آن نمی‌توان نتیجه گرفت	برداشت مجاز	شاهد گزارش شده
نرخ دقیق افت در کل منطقه یا علیت قطعی	افت طولانی مدت در نقاط پایش شده محتمل است	روند نزولی سالانه در سه نمودار پیزومتری
رابطه کمی بارش - تراز آب بدون سری عددی	اثر فصل و تغذیه کوتاه مدت محتمل است	نوسان ماهانه و بازیابی محدود
دقت مکانی بدون خطای درون‌یابی و اعتبارسنجی	ناهمگونی فضایی افت آب محتمل است	نقشه تفاضل دو سال مینا، ۷ چاه
تبدیل مستقیم متر افت آب به میلی متر نشست	اولویت پایش مناطق با افت بیشتر	کلاس‌های افت گزارش شده تا حدود ۱۷،۴ متر

منبع: ارقام و روندها بر اساس شرح مطالعه، تفسیر و ستون محدودیت از نگارنده مقاله.

۲-۶. پهنه‌بندی پتانسیل و اولویت معیارها

در خروجی AHP، طبقه «متوسط» با ۴۰،۶ درصد و «زیاد» با ۳۸،۶ درصد بیشترین سهم مساحت را دارند، سهم «خیلی زیاد» ۱،۲ درصد گزارش شده است. بنابراین کلاس‌های زیاد و خیلی زیاد جمعاً ۳۹،۸ درصد از مساحت محاسباتی را دربر می‌گیرند. در خروجی دلفی‌فازی، متوسط ۴۴،۴ درصد، زیاد ۳۰،۲ درصد و خیلی زیاد ۱،۴ درصد است، سهم دو کلاس زیاد و خیلی زیاد ۳۱،۶ درصد می‌شود.

اختلاف این دو مدل نشان می‌دهد طبقه‌بندی به روش وزن‌دهی و نحوه بازنمایی عدم قطعیت حساس است، بنابراین مرزهای کلاس‌ها نباید به عنوان مرزهای قطعی خطر تلقی شوند.

جدول ۴: سهم طبقات پتانسیل فرونشست در دو روش گزارش شده

زیاد + خیلی زیاد	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم	روش
٪۳۹٫۸	٪۱٫۲	٪۳۸٫۶	٪۴۰٫۶	٪۱۸٫۹	٪۰٫۷	AHP
٪۳۱٫۶	٪۱٫۴	٪۳۰٫۲	٪۴۴٫۴	٪۲۳٫۳	٪۰٫۹	دلفی فازی

منبع: جداول پهنه‌بندی مطالعه حاضر، سهم دو کلاس آخر/پرخطر با جمع درصد‌های گزارش شده محاسبه شده است.

در وزن‌های نهایی دلفی فازی، افت آب زیرزمینی با ۰٫۲۱، لیتولوژی با ۰٫۱۶ و فاصله از گسل با ۰٫۱۳ در رتبه‌های بالاتر گزارش شده‌اند، پس از آنها شیب ۰٫۱۱ و ارتفاع و TWI حدود ۰٫۰۸ قرار دارند. این ترتیب از نظر مفهومی، تفکیک «محرک هیدرولوژیک» و «حساسیت بستر» را تأیید می‌کند. اما مجموع وزن‌های گردشده در جدول مطالعه به حدود ۰٫۹۷ می‌رسد، این اختلاف ممکن است از گرد کردن، رونویسی یا خطای جدول ناشی شده باشد و باید پیش از انتشار با خروجی اصلی نرم‌افزار بازبینی شود.

در تفسیر سایر معیارها باید احتیاط کرد. جهت شیب یا فاصله از گسل می‌تواند به‌طور غیرمستقیم بر آب و ساختار اثر بگذارد، اما وزن خبره‌محور به معنای تأیید رابطه مکانیکی مستقل نیست. همچنین شاخص رطوبت توپوگرافی برای رطوبت سطحی طراحی شده و نباید جایگزین داده عمق آب، ضخامت رسوبات تراکم‌پذیر یا اندازه‌گیری تغییر شکل شود. مدل برای غربالگری فضایی مفید است، به شرط آنکه داده‌های پایه و طبقه‌بندی‌ها قابل بازتولید باشند.

۳-۶. هم‌پوشانی پهنه‌های پرتانسیل با کاربری شهری

مطالعه با هم‌پوشانی لایه کاربری زمین و نقشه خطر، درصد مساحت هر کاربری در کلاس‌های زیاد و خیلی زیاد را برآورد کرده است. در روش AHP، سهم گزارش شده برای حمل‌ونقل ۸۲٫۳ درصد، تجهیزات شهری ۶۲٫۰ درصد، ورزشی ۶۵٫۹ درصد و صنعتی ۵۸٫۲ درصد است، در روش فازی، سهم‌های متناظر به ترتیب ۵۲٫۳، ۶۰٫۴، ۴۷٫۶ و ۴۷٫۰ درصد گزارش شده‌اند. برای مسکونی، سهم از ۲۳٫۷ به ۱۸٫۶ درصد تغییر کرده

است. این مقایسه از تمرکز نسبی مواجهه در برخی کاربری‌ها حکایت دارد، اما به معنای آن نیست که همه این مساحت‌ها بالفعل نشست کرده یا آسیب دیده‌اند.

جدول ۵: نمونه‌ای از سهم کاربری‌ها در کلاس‌های زیاد و خیلی زیاد

تفسیر برنامه‌ریزی	دلفی فازی (درصد)	AHP (درصد)	کاربری
اولویت بازرسی شریان و اجزای زهکشی	۵۲٫۳	۸۲٫۳	حمل و نقل
ارزیابی تداوم خدمت و خطوط مدفون	۶۰٫۴	۶۲٫۰	تجهیزات شهری
پایش سازه‌های بزرگ و مدیریت تقاضای آب	۴۷٫۶	۶۵٫۹	ورزشی
ممیزی مصرف و بررسی سازه/تأسیسات	۴۷٫۰	۵۸٫۲	صنعتی
ارزیابی موضعی ساختمان و دسترسی اضطراری	۱۸٫۶	۲۳٫۷	مسکونی
بازنگری منبع و الگوی آبیاری	۴۱٫۰	۵۴٫۴	پارک و فضای سبز

دو نکته در خوانش جدول مهم است:

- نخست، نسبت‌های بالا برای کاربری‌های کوچک ممکن است با مساحت کم مخرج، ناپایدار باشند، بنابراین باید مساحت مطلق و موقعیت دقیق نیز گزارش شود.
- دوم، جدول روش فازی اعداد مساحت و درصد متفاوتی دارد و همه دسته‌ها در این مقاله بازنویسی نشده‌اند، برای تحلیل سرمایه‌گذاری، فهرست کامل و نسخه یکسان‌شده لایه‌ها لازم است.

با وجود این محدودیت، وجود کاربری‌های حساس در پهنه‌های اولویت‌دار، دلیل کافی برای آغاز پایش و مطالعات تفصیلی است، نه برای اعلام خسارت یا ممنوعیت فراگیر. پیامد کالبدی اصلی، شکل‌گیری «مواجهه انباشته» است: شبکه‌های حمل‌ونقل و خدمات شهری معمولاً مسیرهای پیوسته دارند و اختلال در یک قطعه می‌تواند خدمات فراتر از محل را تحت تأثیر بگذارد. پس اولویت‌بندی نباید صرفاً بر پایه درصد پهنه‌بندی باشد، اهمیت شبکه، تعداد جمعیت خدمت‌گیرنده، امکان دورزدن مسیر و حساسیت عملکردی نیز باید در شاخص ریسک وارد شود.

۷. تحلیل راهبردی پیامدهای توسعه کالبدی

یافته‌ها از چرخه‌ای محتمل میان رشد کالبدی و فشار بر آب حکایت دارند: استقرار جمعیت و خدمات، تقاضای آب را افزایش می‌دهد، اگر بخشی از این تقاضا از آبخوان تأمین شود و تغذیه کافی نباشد، تراز آب افت می‌کند، در بسترهای تراکم‌پذیر این افت می‌تواند فشردگی و نشست را تشدید کند، تغییر شکل نیز هزینه نگهداری و ریسک اختلال زیرساخت را بالا می‌برد.

این چرخه، چارچوبی برای سناریوپردازی است، اما داده‌های مطالعه حاضر سهم مصرف شهری، نرخ نشست مشاهده‌شده و رابطه زمانی توسعه با تغییر شکل را به صورت کمی برآورد نکرده‌اند.

جدول ۶: تشخیص راهبردی بر پایه شواهد موجود

پیامد برای سیاست گذاری	تشخیص	بُعد
مناسب برای غربالگری و اولویت گذاری اولیه	پوشش چند معیار طبیعی و هیدرولوژیک، استفاده از دو روش وزن دهی	قوت
توقف استفاده از خروجی به عنوان نقشه قطعی مجوز	تعداد محدود پیژومتر، نبود اعتبارسنجی مستقل، ناسازگاری مساحت و برخی وزن ها	ضعف
ساخت سامانه پایش مشترک آبخوان - شهر	داده های رایگان Sentinel-۱، امکان اتصال GIS، پیژومتر و دارایی های شهری	فرصت
افزایش هزینه تعمیر و خطر اختلال خدمات در صورت بی اقدامی	گسترش کاربری های پرمصرف، قفل شدن سرمایه در زیر ساخت، خشکسالی و برداشت مداوم	تهدید

منبع: تحلیل راهبردی نگارنده بر پایه نتایج مطالعه و منابع علمی یادشده.

۲-۱. پیامدهای محتمل برای رشد کالبدی

۱) تغییر اولویت مکانی: در ارزیابی زمین برای توسعه جدید، هزینه آب و حساسیت بستر باید در کنار دسترسی و قیمت زمین سنجیده شود. ۲) تغییر ضوابط: سازه های حیاتی و ساختمان های بزرگ در پهنه های حساس به مطالعات ژئوتکنیک متناسب با نشست و تغییر شکل تدریجی نیاز دارند، توصیه عمومی به شمع گذاری بدون طراحی محلی، نسخه فنی مناسبی نیست. ۳) اصلاح برنامه نگهداری: بازرسی خطوط آب، فاضلاب، گاز، روسازی و درزهای سازه باید بر مبنای داده تغییر شکل و اهمیت شبکه انجام شود. ۴) پرهیز از رشد آب بر: توسعه فضای سبز یا تأسیسات تفریحی باید با منبع آب غیر شرب مطمئن و بودجه عملیاتی پایدار همراه باشد.

مقایسه با موارد جهانی نیز از تبیین تک علتی پرهیز می دهد. در مورلیا، نقش گسل ها و الگوی رشد شهر در کنار آبخوان بررسی شده و در هانوی، توسعه و فرونشست در ارتباط زمانی — مکانی قرار گرفته است، این مطالعات بر نیاز به داده چندمنبعی و تحلیل هم زمان

بستر طبیعی و فعالیت شهری تأکید دارند (سیگنا و تپه، ۲۰۲۲، بیتسون و همکاران، ۲۰۲۳).

۸. راهبردهای مدیریت پایدار شهری

راهبردها باید از اقدام‌های فوری و کم‌هزینه پایش تا اصلاحات میان‌مدت در تخصیص آب و بازنگری ضوابط و سپس برنامه‌های بلندمدت سازگاری را پوشش دهند. اصل احتیاط اقتضا می‌کند در پهنه‌هایی که مدل‌ها حساسیت بالاتر نشان می‌دهند، داده تکمیلی پیش از افزایش تراکم مطالبه شود، اما طبقه‌بندی نسبی AHP به تنهایی مبنای قانونی برای رد یا صدور مجوز نیست.

جدول ۷: بسته راهبردی و شاخص‌های پیگیری

شاخص سنجش	مسئولان پیشنهادی	اقدام کلیدی	افق/راهبرد
پوشش نقاط پایش، تأخیر انتشار، نرخ داده‌های معتبر	شرکت آب منطقه‌ای، سازمان نقشه‌برداری، شهرداری	انتشار فصلی تراز پیزومترها، نصب/تکمیل نقاط GNSS، پردازش دوره‌ای Sentinel-۱	فوری: پایش تلفیقی
تعداد بازدید، عیب‌های رفع‌شده، زمان اختلال خدمت	شهرداری، شرکت‌های خدمات‌رسان	بازرسی هدفمند مسیرهای حمل‌ونقل، خطوط مدفون و تأسیسات در محدوده اولویت	فوری: حفاظت از زیرساخت
سهم آب غیرشرب، کاهش برداشت ثبت‌شده	شهرداری، وزارت نیرو، بهره‌برداران	ممیزی مصرف پروژه‌های بزرگ، کاهش آبیاری آب‌بر، جایگزینی پساب تصفیه‌شده در چارچوب استاندارد	میان‌مدت: مدیریت تقاضا
درصد پروژه‌های غربال‌شده، انطباق پرونده‌ها	معاونت شهرسازی و معماری، مرکز تحقیقات	الزام غربالگری خطر و گزارش ژئوتکنیک برای پروژه‌های بزرگ، درج	میان‌مدت: ضوابط توسعه

شاخص سنجش	مسئولان پیشنهادی	اقدام کلیدی	افق/راهبرد
نقشه عدم قطعیت در فرایند مجوز			
روند تراز آب، حجم برداشت مجاز/ثبت شده	وزارت نیرو، آب منطقه‌ای، مراجع محلی	تعیین سقف برداشت مبتنی بر ترازنامه، کنترل چاه‌های غیرمجاز، برنامه تغذیه با ارزیابی هیدروژئولوژیک	بلندمدت: مدیریت آبخوان
کاهش آب‌بری سرانه، کاهش دارایی‌های حساس در پهنه پرخطر	شورای شهر، شهرداری، شورای عالی شهرسازی	سناریوهای توسعه با محدودیت آب، اولویت دادن به کاربری کم‌آب‌بر و زیرساخت قابل تعمیر	بلندمدت: تاب‌آوری فضایی

منبع: پیشنهادهای مقاله بر پایه یافته‌های مطالعه حاضر، مسئولیت‌ها باید با ساختار قانونی جاری تطبیق داده شوند.

در پروژه‌های تغذیه مصنوعی، صرف افزایش نفوذ رواناب توصیه نمی‌شود، کیفیت آب ورودی، آلودگی‌های احتمالی، ظرفیت انتقال، سازگاری لایه‌های زمین و آثار بر زیرساخت باید بررسی شود. همچنین، استفاده از پساب تصفیه‌شده برای فضای سبز مستلزم رعایت استانداردها، پایش کیفیت و جداسازی شبکه است. اقدامات مهندسی در ساختمان، از جمله اصلاح پی یا درزهای انعطاف‌پذیر، باید بر اساس مطالعات ژئوتکنیک اختصاصی و الگوی تغییر شکل انجام گیرد.

۹. بحث، محدودیت‌ها و اعتبار نتایج

نتیجه محوری بازخوانی حاضر آن است که داده‌های پیزومتری و دو نقشه چندمعیاره، برای شناسایی پهنه‌های نیازمند بررسی تکمیلی ارزشمندند، اما شواهد موجود برای اعلام شدت واقعی یا روند زمانی فرونشست در محدوده منطقه ۲۲ کافی نیست. این تمایز، اهمیت عملی دارد: تصمیم‌هایی چون محدودسازی تراکم، تغییر کاربری یا مقاوم‌سازی باید متناسب با سطح شواهد، هزینه و برگشت‌پذیری باشند. در مرحله نخست، اقدام‌های

کم‌پشیمانی مانند پایش، ممیزی مصرف، ثبت داده و ارزیابی پیش از مجوز قابل دفاع‌اند، تصمیم‌های سخت‌گیرانه‌تر باید با سنجش مستقیم و مطالعه ژئوتکنیکی پشتیبانی شوند. این رویکرد با یافته‌های پژوهش‌های منطقه‌ای و جهانی سازگار است. پایش InSAR در تهران، گستردگی و ناهمگنی تغییرشکل را در مقیاس دشت نشان داده و مطالعات جهانی یادآوری می‌کنند که سناریوی نشست با تغییر در برداشت آب، تحکیم طبیعی رسوب و فعالیت عمرانی تفاوت می‌کند (هاگشنس‌هاگیگی و متق، ۲۰۱۹، آگاروال و همکاران، ۲۰۲۳، تامپوگلو و همکاران، ۲۰۲۳).

۹-۱. محدودیت‌های داده‌ای و روش‌شناختی

نخست، سری عددی خام پیزومترها، مشخصات عمق و واحد، مبنای ارتفاع و آزمون روند در دسترس مقاله نیست، بنابراین افت دقیق و معناداری آماری بازتولید نشده است. دوم، هفت چاه برای درون‌یابی سطح منطقه محدود است و خطای کریجینگ و اعتبارسنجی متقاطع گزارش نشده. سوم، AHP و دلفی فازی به نظر خبرگان وابسته‌اند، معیارها و وزن‌ها ممکن است هم‌بسته یا تکراری باشند. چهارم، لایه مستقیم نرخ تغییرشکل GNSS, InSAR یا ترازیابی به‌عنوان آزمون مستقل مدل در مطالعه ارائه نشده است. پنجم، مرز مساحت منطقه با مساحت جداول ناسازگار است و برخی ارقام وزن‌های فازی نیاز به تطبیق با خروجی اصلی دارند.

ششم، هم‌پوشانی کلاس‌های پرتانسیل با کاربری‌ها مواجهه نسبی را می‌سنجد، بدون داده جمعیت، ارزش دارایی، شدت تغییرشکل و کیفیت سازه، نمی‌توان از آن «ریسک کمی» یا «خسارت» نتیجه گرفت. هفتم، اختلاف بازه زمانی در بخش‌های مختلف مطالعه (۱۳۸۲-۱۴۰۳ در شرح داده‌ها و بازه‌های دیگر در بحث) باید یکپارچه شود. این موارد محدودیت مقاله را شفاف می‌کنند و نقشه راه اصلاح نسخه نهایی را به دست می‌دهند.

۹-۲. مسیر بازتولید و اعتبارسنجی

برای آماده‌سازی نسخه قابل ارسال، لازم است لایه‌ها با مرز واحد و دستگاه مختصات مشترک بازتولید شوند، جدول خام تراز چاه‌ها و خروجی‌های FDAHP/AHP ضمیمه شود، خطای درون‌یابی و حساسیت وزن‌ها آزمون شود، سری زمانی Sentinel-۱ با روش مناسب پردازش و با GNSS یا ترازیابی اعتبارسنجی گردد، سپس سرعت و

¹ Tzampoglou, P., Ilia, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X., & Chen, W. (2023). Selected worldwide cases of land subsidence due to groundwater withdrawal.

گرایان تغییر شکل با شبکه زیر ساخت و آمار جمعیت تلفیق شود. این مراحل مرز میان «پتانسیل یابی» و «ارزیابی خطر» را روشن خواهد کرد.

۱۰. نتیجه گیری

این مقاله با تکیه بر داده ها و خروجی های ارائه شده در مطالعه، پیامدهای راهبردی فرونشست ناشی از افت آب زیرزمینی را برای توسعه کالبدی منطقه ۲۲ تهران بررسی کرد. الگوهای پیرومتری گزارش شده از افت بلندمدت در نقاط پایش پشتیبانی می کنند و نقشه های AHP و دلفی فازی، بخش هایی از پهنه دشتی را در طبقات با پتانسیل زیاد یا خیلی زیاد قرار می دهند. بر اساس درصدهای مطالعه، سهم این دو طبقه در نقشه AHP برابر ۳۹،۸ درصد و در نقشه دلفی فازی ۳۱،۶ درصد است.

بخشی از کاربری های حمل و نقل، ورزشی، صنعتی، تجهیزات شهری و مسکونی نیز با این کلاس ها هم پوشانی دارند، بنابراین ضرورت پایش هدفمند و بررسی موضعی زیر ساخت ها قابل دفاع است.

در عین حال، نتیجه علمی مقاله بر حد و مرز شواهد تأکید می کند: خروجی های چند معیاره نقشه پتانسیل نسبی اند، نه اندازه گیری نرخ فرونشست. نبود داده مستقل InSAR/ترازیابی در گزارش پژوهش، کمبود جزئیات آماری پیرومترها، ناسازگاری مجموع مساحت ها و اختلاف در بازه زمانی، مانع از ادعای شدت یا روند قطعی برای کل منطقه می شوند.

از این رو، رابطه افت آب و فرونشست در این پژوهش از نظر سازوکار علمی محتمل و از نظر نقشه ای سازگار با اولویت های مدل است، اما اثبات محلی آن مستلزم اعتبارسنجی مستقل خواهد بود.

پیام مدیریتی محوری، تبدیل نقشه حساسیت به سامانه تصمیم یار چندلایه است: مدیریت برداشت و تقاضای آب، پایش مشترک تراز آب و حرکت زمین، ارزیابی ژئوتکنیکی پروژه های بزرگ، و اولویت بندی نگهداری زیر ساخت بر پایه اهمیت عملکردی. مدیریت شهری باید نقشه را به عنوان ابزار غربالگری و تعیین اولویت به کار گیرد و تصمیم های نهایی را بر پایه داده های دقیق تر، ارزیابی عدم قطعیت و هماهنگی بین نهادی اتخاذ کند. اصلاح اختلاف های مساحتی و باز تولید نتایج، پیش شرط ضروری برای استفاده رسمی از خروجی هاست.

۱-۱۰. پیشنهادهای نهایی

(۱) تدوین ترازنامه آب و سقف برداشت برای محدوده و منابع تأمین کننده آن، (۲) انتشار منظم سری زمانی پیزومتر و پایش راداری و زمینی، (۳) الزام غربالگری زمین خطر و گزارش ژئوتکنیک برای طرح‌های بزرگ، (۴) اولویت‌بندی بازرسی خطوط و شریان‌ها با ترکیب نرخ تغییر شکل، گرادیان و اهمیت خدمت، (۵) بازبینی کاربری‌های پرمصرف و گسترش آب غیرشرب با نظارت کیفی، (۶) بازتولید و اعتبارسنجی نقشه‌ها پیش از درج آنها در ضوابط قانونی، و (۷) انتشار داده‌ها و روش‌ها به شکلی که پژوهش مستقل و بازبینی علمی امکان‌پذیر باشد.

جمع‌بندی آنکه توسعه پایدار منطقه ۲۲ نیازمند توسعه کمتر یا بیشتر به صورت کلی نیست، بلکه نیازمند توسعه‌ای است که ظرفیت آبخوان، ویژگی بستر، پیامد تغییر شکل و تاب‌آوری خدمات را در هر تصمیم مکانی به صورت هم‌زمان لحاظ کند.

منابع:

- Agarwal, V., Kumar, A., Qin, Z., Gomes, R. L., & Marsh, S. (2023). Lessons for sustainable urban development: Interplay of construction, groundwater withdrawal, and land subsidence at Battersea, London. *Remote Sensing*, 15(15), 3798. <https://doi.org/10.3390/rs15153798>
- Bateson, L., Novellino, A., Hussain, E., Arnhardt, R., & Nguyen, H. K. (2023). Urban development induced subsidence in deltaic environments: A case study in Hanoi, Vietnam. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125, 103585. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103585>
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., & Sansosti, E. (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11), 2375–2383. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2002.803792>
- Cigna, F., & Tapete, D. (2022). Urban growth and land subsidence: Multi-decadal investigation using human settlement data and satellite InSAR in Morelia, Mexico. *Science of the Total Environment*, 811, 152211. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152211>
- Ferretti, A., Prati, C., & Rocca, F. (2001). Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1), 8–20. <https://doi.org/10.1109/36.898661>
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459–1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- Galloway, D. L., Jones, D. R., & Ingebritsen, S. E. (1999). Land subsidence in the United States (U.S. Geological Survey Circular 1182). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/cir1182>
- Haghshenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2019). Ground surface response to continuo compaction of aquifer system in Tehran, Iran: Results from a long-term multi-sensor InSAR analysis. *Remote Sensing of Environment*, 221, 534–550. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.11.003>
- Haghshenas Haghighi, M., & Motagh, M. (2024). Uncovering the impacts of depleting aquifers: A remote sensing analysis of land subsidence in Iran. *Science Advances*, 10(19), eadk3039. <https://doi.org/10.1126/sciadv.adk3039>
- Motagh, M., Walter, T. R., Sharifi, M. A., Fielding, E., Schenk, A., Anderssohn, J., & Zschau, J. (2008). Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation.

- Geophysical Research Letters, 35(16), L16403.
<https://doi.org/10.1029/2008GL033814>
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning, priority setting, resource allocation. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences*, 1(1), 83–98.
<https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590>
- Tzampoglou, P., Ilia, I., Karalis, K., Tsangaratos, P., Zhao, X., & Chen, W. (2023). Selected worldwide cases of land subsidence due to groundwater withdrawal. *Water*, 15(6), 1094.
<https://doi.org/10.3390/w15061094>
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2019). World urbanization prospects 2018: Highlights (ST/ESA/SER.A/421). United Nations.
<https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-Highlights.pdf>