Kharazmi University

Spatial Analysis Environmental Hazards

Online ISSN: 2588-5146

Homepage: https://khu.ac.ir

Assessing Seismic Resilience of Urban Water Distribution Networks: A Case Study of Sanandaj, Iran

Shaida Sharifi [1] | **Hadi Nayyeri** [2]✉ | **Abdullah Nosrati** [3]

1. Academic Staff in Geomorphology Department, Faculty of Natural Recourses, University of Kurdistan, Iran. E-mail: shaidashrifi1987@gmail.com
2. Corresponding Author, Academic Staff in Geomorphology Department, Faculty of Natural Recourses, University of Kurdistan, Iran. E-mail: h.nayeri@uok.ac.ir
3. Academic Staff in Geomorphology Department, Faculty of Natural Recourses, University of Kurdistan, Iran. E-mail: ab.nosraty@gmail.com

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 20 May 2025
Accepted 27 December 2025
Published online 07 January 2025

Keywords:
Seismic resilience,
Peak ground velocity (PGV),
Water distribution network,
Analytical hierarchy process,
Geographi information systems.

ABSTRACT

Objective: "This research assesses the seismic resilience and vulnerability of Sanandaj's water distribution network in Feizabad and Baharan districts using the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Geographic Information Systems (GIS).

Methods: It aims to pinpoint vulnerability factors and suggest resilience-enhancing measures. Data from 40 active faults (>10 km) within a 70-km radius were used to map Peak Ground Velocity (PGV, 35-39 cm/s) via attenuation models and Spline interpolation in GIS. Geological and soil data came from geotechnical studies, and pipe details (material and diameter) were sourced from the Kurdistan Water Authority's GIS unit. AHP assigned weights to PGV (0.460), pipe material (0.243), pipe diameter (0.182), and geology (0.112) for vulnerability analysis.

Results: Findings indicate Feizabad's network is 81% low vulnerability (low PGV, steel pipes, Quaternary alluvium), with 1.2% highly vulnerable (asbestos pipes, shale). Baharan has 34% high vulnerability (high PGV, asbestos pipes, shale), with 13% low vulnerability, reflecting lower resilience. High PGV, asbestos pipes, small diameters (<100 mm), and shale soils drive vulnerability.

Conclusions: As Sanandaj's first seismic network analysis, this study offers a basis for mitigation, recommending flexible pipes and early warning systems, and provides a replicable model for similar regions.

Cite this article: Sharifi, Sh., Nayyeri, H., & Nosrati, A. (2025). Assessing Seismic Resilience of Urban Water Distribution Networks: A Case Study of Sanandaj, Iran. *Spatial Analysis Environmental Hazards*, 12 (4), 97-116. http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.4

© The Author(s)

Publisher: Kharazmi University

DOI: http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.4

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]

[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Rapid urbanization in Iran, where 75% of people live in cities, underscores the need for resilient water distribution networks, especially in earthquake-prone areas. Sanandaj, a city of 530,000 in Kurdistan Province, faces heightened seismic risks due to its proximity to active faults, challenging topography, and outdated infrastructure. Managed by state water authorities, these networks are critical yet vulnerable, with failures risking water shortages and public health crises. Seismic resilience—defined by a system's ability to endure and recover from earthquakes—depends on structural integrity, geological stability, and operational capacity. Key parameters like PGV and PGA influence pipe damage, yet studies in Iran often focus on major cities, overlooking places like Sanandaj. This research bridges this gap by analyzing the seismic resilience of Sanandaj's water network in Feizabad and Baharan, using AHP and GIS to assess vulnerability and recommend improvements.

Methods

The study combines AHP and GIS to evaluate Sanandaj's water network resilience. Data included: (1) seismic profiles of 40 active faults (>10 km) within 70 km, extracted from Geological Survey of Iran maps (1:100,000 scale); (2) soil and geological data from geotechnical surveys (211 boreholes, 9 wells); and (3) network specifications (pipe materials: asbestos, steel, polyethylene, ductile iron; diameters: 32-800 mm) from the Kurdistan Water Authority's GIS database, targeting Feizabad and Baharan. PGV and PGA were computed using calibrated attenuation models, with fault lengths (10-37.11 km) yielding magnitudes of 5.98-6.67 Richter. A 274-cell grid (1×1 km) was created in ArcGIS 10.8, and Spline interpolation (RMSE=0.0235) produced PGV/PGA maps. AHP weighted PGV, pipe material, diameter, and geology, with consistency (IR<0.1) ensured. GIS overlaid these weights to classify network vulnerability.

Results

PGV ranges from 35-39 cm/s and PGA from 0.346-0.358 g across Sanandaj, intensifying near southwestern faults. Feizabad's network shows 81% low vulnerability (37,550 m), tied to low PGV (~36 cm/s), large steel pipes, and Quaternary alluvium, with only 1.2% (564 m) highly vulnerable due to asbestos pipes in shale. Baharan, however, has 34% (16,978 m) high vulnerability from high PGV (38-39 cm/s), asbestos pipes, and shale, with 13% (6,766 m) low vulnerability, indicating weaker resilience. AHP ranks PGV highest (0.460), followed by pipe material (0.243), diameter (0.182), and geology (0.112), aligning with findings that seismic motion and brittle materials increase damage (e.g., Toprak & Taskin, 2007). The GIS maps reflect fault proximity, enhancing reliability. This localized approach outperforms broader studies by leveraging specific data effectively.

Conclusion

This first-of-its-kind study in Sanandaj highlights Feizabad's high resilience and Baharan's susceptibility, driven by PGV, pipe type, and geology. It validates AHP-GIS as a robust tool for seismic resilience assessment. Mitigation strategies—replacing asbestos with flexible pipes and installing early warning systems—can reduce vulnerability and ensure water availability post-earthquake. This framework is adaptable to other seismic zones, aiding urban planning and infrastructure protection.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

Keywords: Seismic resilience, Peak ground velocity (PGV), Water distribution network, Analytical hierarchy process, Geographi information systems.

Author Contributions

The following statements should be used "Conceptualization, Second author and Third author; methodology, Second author; software, Second author; validation, Second author; formal analysis, Second author; investigation Third author; resources, Third author; data curation, First author; writing-original draft preparation, First author; writing-review and editing, Third author; visualization, Second author; Third author; supervision, Third author; project administration, Third author. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript."

Data Availability Statement

"Not applicable".

Acknowledgements

We would like to thank the Honorable Vice Chancellor for Research of the University of Kurdistan for the financial support in carrying out this research.
We would like to thank the Honorable Reviewers for providing structural and scientific comments.

Ethical considerations

The authors have observed ethical principles in conducting and publishing this scientific research, and this is confirmed by them.

Funding

This article was financially supported by the Vice Chancellor for Research of the University of Kurdistan. This research was financially supported by the University of Kurdistan, Faculty of Natural Resources, in the form of a student thesis research by First author.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

دانشگاه خوارزمی

تحلیل فضایی مخاطرات محیطی

شاپا الکترونیکی: ۵۱۴۶- ۲۵۸۸

Homepage: https://khu.ac.ir

ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهری در برابر زلزله (مطالعه موردی شهر سنندج)

شیدا شریفی [۱] | هادی نیری [۲]✉ | عبدالله نصرتی [۳]

۱. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: shaidashrifi1987@gmail.com

۲. نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: ab.nosraty@gmail

۳. گروه ژئومورفولوژی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران. رایانامه: h.nayeri@uok.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:
مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۰۶
تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۱۰/۱۷

کلیدواژه‌ها:
آسیب‌پذیری،
بیشینه سرعت زمین،
تاب‌آوری شبکه توزیع آب،
تحلیل سلسله‌مراتبی،
سیستم اطلاعات جغرافیایی.

هدف: این پژوهش با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی و با بهره گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی به ارزیابی تاب‌آوری و آسیب‌پذیری شبکه توزیع آب مناطق فیض‌آباد و بهاران شهر سنندج در برابر زلزله پرداخته تا عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری این شبکه را شناسایی کرده و راهکارهایی برای افزایش تاب‌آوری این زیرساخت حیاتی ارائه دهد.

روش پژوهش: پارامترهای تأثیرگذار در تاب آوری این شبکه شامل بیشینه سرعت زمین که با استفاده از داده‌های ۴۰ گسل با طول بیشتر از ۱۰ کیلومتر در شعاع ۷۰ کیلومتری سنندج و به‌کارگیری روابط کاهندگی در محیط (GIS) و روش درونیابی اسپلاین استخراج گردید. ویژگی‌های زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی، خاک، از نقشه‌های ژئوتکنیک و زمین شناسی و داده‌های قطر و جنس لوله‌ها از واحد مدیریت آبفای کردستان استخراج گردید. جهت ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه روش تحلیل سلسله‌مراتبی با وزن‌دهی به معیارهای بیشینه سرعت زمین، زمین‌شناسی، خاک، جنس و قطر لوله‌ها به‌ترتیب با وزن‌های ۴۶۰/ ، ۱۱۲/ ، ۲۴۳/ و ۱۸۲/ استفاده شد و سیستم اطلاعات جغرافیایی برای اعمال این وزن‌ها و تهیه نقشه‌های آسیب‌پذیری به‌کار گرفته شد.

یافته‌ها: نتایج نشان می‌دهد که توزیع پیوسته بیشینه سرعت زمین در محدوده شهر سنندج در دامنه ۳۵ تا ۳۹ سانتی‌متر بر ثانیه است. و ۸۱ درصد لوله‌های فیض‌آباد به دلیل بیشینه سرعت زمین پایین، لوله‌های فولادی با قطر بزرگ، و خاک آبرفت کواترنر در طبقه آسیب‌پذیری کم و تنها ۱/۲ به دلیل لوله‌های آزبستی با قطر کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و خاک شیل در طبقه آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار دارند، که نشان‌دهنده تاب‌آوری بالای این منطقه است. اما در بهاران ۳۴ درصد از شبکه به دلیل بیشینه سرعت زمین بالا، لوله‌های آزبستی، و بستر شیل سنندج در طبقه آسیب‌پذیری خیلی زیاد و ۱۳درصد در طبقه آسیب‌پذیری کم قرار دارد که نشان‌دهنده تاب‌آوری کمتر این منطقه است. عوامل مؤثر بر افزایش آسیب‌پذیری شامل مقدار بالای، جنس آزبستی لوله‌ها، قطر کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر و قرارگیری در بستر شیل خاکستری سنندج هستند.این مطالعه، برای نخستین بار در سنندج، تحلیل آسیب‌پذیری شبکه توزیع آب در برابر زلزله را انجام داده است. نتایج آن می‌تواند مبنایی برای کاهش آسیب‌پذیری، برنامه‌ریزی اضطراری، و مقاوم‌سازی سیستم توزیع آب باشد.

نتیجه‌گیری: پیشنهاداتی مانند استفاده از لوله‌های انعطاف‌پذیر، تقویت مخازن و اجرای سیستم‌های هشدار سریع زلزله، می‌تواند تاب‌آوری این زیرساخت حیاتی را افزایش داده و از اختلالات جدی در تأمین آب شرب جلوگیری کند. این پژوهش همچنین چارچوبی برای مطالعات مشابه در دیگر شهرهای با شرایط مشابه فراهم می‌کند.

استناد: شریفی، شیدا؛ نیری، هادی؛ و نصرتی، عبدالله (۱۴۰۴). ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهری در برابر زلزله (مطالعه موردی شهر سنندج). *تحلیل فضایی مخاطرات محیطی*، ۱۲ (۴)، ۹۷-۱۱۶. http//doi.org/10.66224/jsaeh.12.4.4

ناشر: دانشگاه خوارزمی

© نویسندگان

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

مقدمه

با افزایش شهرنشینی، تأمین خدمات اساسی مانند آب آشامیدنی و فاضلاب اهمیت بیشتری پیدا کرده است. در ایران ۷۵ درصد جمعیت در شهرها زندگی می‌کنند و زیرساخت‌های شهری نقش کلیدی در زندگی شهروندان دارند. احداث، نگهداری و به‌روزرسانی این زیرساخت‌ها بسیار هزینه‌بر بوده و آسیب‌دیدگی آن‌ها تأثیرات گسترده‌ای بر جامعه خواهد داشت.

یکی از اساسی‌ترین این زیر ساختها شبکه توزیع آب شهری است که در کشورهای مختلف بر اساس شرایط اقتصادی، سیاسی و طبیعی توسط دولت‌ها یا بخش خصوصی مدیریت می‌شوند در ایران، این وظیفه بر عهده شرکت‌های دولتی آبفا است که علاوه بر تأمین آب، مسئولیت نگهداری و مدیریت این سیستم‌ها را نیز بر عهده دارند. افزایش جمعیت و گسترش شهرنشینی، ارزیابی و تقویت تاب‌آوری این شبکه‌ها را به یکی از چالش‌های اصلی مدیریت شهری تبدیل کرده است ازاین‌رو، اقدامات پیشگیرانه و افزایش تاب‌آوری این شبکه‌ها در برابر حوادثی مانند زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (موسوی و همکاران، ۲۰۱۴؛ میرزایی و همکاران، ۲۰۰۲).

تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهری شامل توانایی این شبکه در مقابله با تنش‌های طبیعی و انسانی است. عملکرد این سیستم در برابر بحران‌ها به میزان مقاومت اجزا، ویژگی‌های فیزیکی بستر و توان مدیریتی آن بستگی دارد (ابراهیمی و همکاران، ۲۰۱۷).

پژوهش‌های متعددی به تحلیل پایایی و تاب‌آوری شبکه‌های آب شهری در برابر بلایای طبیعی، به‌ویژه زلزله، پرداخته‌اند. این مطالعات از روش‌های پیشرفته مانند مدل‌سازی هیدرولیکی، سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی (GIS)، شبکه‌های عصبی و تحلیل‌های آماری استفاده کرده‌اند. پارامترهای لرزه‌ای مانند بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV) و تغییر شکل دائمی زمین (PGD) به‌عنوان شاخص‌های کلیدی در ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌ها مورد توجه قرار گرفته‌اند. برخی پژوهش‌ها بر توسعه مدل‌های شکست گره، تحلیل فرایند شکست آبشاری و روند بازیابی شبکه تمرکز داشته‌اند، در حالی که دیگر مطالعات به بررسی تأثیر تغییر اقلیم، فرسودگی زیرساخت‌ها و استراتژی‌های مقاوم‌سازی پرداخته‌اند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که بهبود تاب‌آوری شبکه‌های آب شهری نیازمند رویکردهای جامع، ترکیبی از تحلیل‌های فنی و مدیریتی، و استفاده از داده‌های دقیق و ابزارهای پیشرفته است که به مدیران شهری و سازمان‌های مرتبط کمک می‌کند تا برنامه‌هایی برای افزایش ایمنی و تاب‌آوری شبکه آب تدوین کرده و در مواقع بحران اقدامات مناسبی انجام دهند.

در شرایط اضطراری ناشی از بلایای طبیعی، آسیب به سیستم تأمین آب می‌تواند پیامدهای جدی مانند آلودگی آب، شکست لوله‌ها، آسیب به سازه‌ها، کمبود آب و فروپاشی کل سیستم را به همراه داشته باشد. در این میان، زمان اقدام در مراحل اولیه چرخه بلایا بسیار مهم است، زیرا اقدامات پیشگیرانه و کاهش‌دهنده می‌توانند با تقویت سیستم، آسیب‌پذیری آن را کاهش دهند. در شرایط عادی نیز، سیستم‌های تأمین آب به علت خرابی تجهیزات، شکست لوله‌ها و جیره‌بندی ناشی از کمبود منابع، رشد کنترل‌نشده شهری، کمبود زیرساخت‌های مناسب ممکن است دچار اختلال شوند؛ اما در زمان بروز بلایا، قرارگیری اجزای سیستم در مناطق پرخطر، این آسیب‌پذیری را به شدت افزایش می‌دهد.

تحلیل آسیب‌پذیری اجزای مختلف سیستم تأمین آب شامل سیستم انتقال، مخازن، پمپ‌ها و شبکه توزیع از منظر تأثیر تغییرات حجم و فشار آب و مقاومت فنی بر اساس جنس لوله‌ها چدنی، فولادی، سیمانی، PE، PVC از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. تحلیل آسیب‌پذیری اجزای مختلف سیستم آبرسانی (انتقال، مخازن، پمپ‌ها، شبکه توزیع) در کشورهای مختلف انجام شده است، اما اغلب مطالعات متمرکز بر تنها خصوصیات فیزیکی شبکه و پارامترهای هیدرولیکی آن بوده است،و توجه کافی به تاب‌آوری این شبکه‌ها در برابر زلزله، به‌ویژه در شهرهای کوچک و متوسط، نشده است (هوکسترا[1] و همکاران، ۲۰۱۸). در ایران اگرچه مطالعاتی در این زمینه برای شهرهایی مانند تهران (عظیمی و همکاران، ۲۰۲۰)، قزوین (شادابفر[2] و همکاران،۲۰۲۳)، صدرا (نریمان و همکاران، ۲۰۲۱) انجام شده، اما برای شهر سنندج چنین ارزیابی‌هایی صورت نگرفته است.

[1] - Hoekstra

[2] - Shadabfar

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

شهر سنندج مرکز استان کردستان در غرب ایران با جمعیت ۵۳۰ هزار نفر (مرکز آمار ایران، ۱۳۹۵) و مساحت ۱۴۴ کیلومترمربع (مرکز ملی کارتوگرافی ایران، ۱۳۹۳)، به دلیل شرایط توپوگرافی خاص، قرارگیری در کنار گسل‌های فعال، لغزش زمین، توسعه روی رسوبات ناپایدار و فرسودگی شبکه توزیع آب، نیازمند ارزیابی دقیق تاب‌آوری است. مشکلاتی مانند آلودگی منابع، قطع آب و برق پمپ‌ها و شکستگی‌های متعدد شبکه نیز در این شهر بیش از میانگین کشوری رخ می‌دهد ازاین‌رو، بررسی تاب‌آوری شبکه آب سنندج امری ضروری است.این تحقیق با تحلیل عوامل تأثیرگذار مانند طول و موقعیت گسل‌ها، لیتولوژی، بیشینه سرعت وشتاب لرزه‌ای، با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مدلی کمی در برآورد آسیب‌پذیری شبکه توزیع آب شهری را توسعه خواهد داد.

اهداف اصلی تحقیق تحلیل آسیب‌پذیری اجزای شبکه توزیع آب شهری سنندج (که به دلیل شرایط خاص توپوگرافی، قرارگیری در مجاورت گسل‌های متعدد، در معرض ریسک‌های بالایی قرار دارد می باشد) با تهیه نقشه‌های توزیع پارامترهای جنبشی زلزله شامل بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) جنس و قطر لوله‌ها، لیتولوژی و خاک و ترکیب و وزن دهی این عامل‌ها با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، و ارائه مدلی عملی برای ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب با استفاده از عوامل مزبور است. این پژوهش با توجه به نبود مطالعات جامع در این حوزه، تلاش دارد تا نقشه‌های پهنه‌بندی خطر زلزله و قابلیت تاب‌آوری شبکه را در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی تدوین کند. نتایج این پژوهش می‌تواند از طریق ارائه نقشه‌ها، جداول و گزارش‌های دقیق، به مسئولان و مدیران شهری به مدیران شهری در اتخاذ تدابیر مقاوم‌سازی، بهبود طراحی شبکه و افزایش تاب‌آوری زیرساخت‌ها در برابر بلایای طبیعی کمک کند و همچنین الگویی برای مطالعات مشابه ارائه دهد.

پیشینه پژوهش

۱. پیشینه تجربی

بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) نقش کلیدی در ارزیابی اثرات لرزه‌ای بر این سیستم‌ها دارند. تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) نیز به‌عنوان روشی برای تصمیم‌گیری چندمعیاره، برای وزن‌دهی به عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری و تاب‌آوری این شبکه‌ها به کار گرفته شده است.

پژوهش‌های متعددی رابطه بین بیشینه سرعت زمین (PGV) و شکستگی لوله‌های شبکه آب شهری را بررسی کرده‌اند. این مطالعات نشان می‌دهند که (PGV) به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی آسیب‌پذیری لوله‌ها در برابر زلزله عمل می‌کند.

در ایران نیز مطالعات متعددی به بررسی تأثیر پارامترهای لرزه‌ای مانند بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) بر شبکه‌های آب شهری پرداخته‌اند.

مطالعات داخلی در حوزه ارتباط بیشینه سرعت زمین (PGV) و شبکه توزیع آب شهری در ایران نشان‌دهنده توجه به این پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای است. حسینی و صادقیان (۱۳۸۸) در مطالعه‌ای با عنوان "ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای خطوط لوله آب در تهران"، (PGV) را به‌عنوان عامل کلیدی در مناطق آبرفتی تهران معرفی کردند. زارعی وهمکاران (۱۳۹۶) در مقاله "ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای سیستم‌های تأمین آب مبتنی بر AHP"، با استفاده از (AHP)، نقش برجسته (PGV) را در شکست لوله‌ها در خاک‌های نرم تأیید کردند. یزدآبادی و کبیری (۲۰۰۹) با "ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای شبکه‌های آب شهری در اصفهان"، (PGV) را با وزن ۰/۴۷به‌عنوان معیار اصلی در شبکه توزیع آب اصفهان بررسی و آسیب‌پذیری لوله‌های ضعیف‌تر را در (PGV) بالا نشان دادند.

قاسمی و همکاران (۱۴۰۰) در "ارزیابی تاب‌آوری لرزه‌ای خط انتقال آب جنوبی تهران با استفاده از تحلیل‌های GIS"، تأثیر (PGV) (cm/s 35-40) را بر خطوط انتقال و به‌صورت غیرمستقیم شبکه توزیع تحلیل کردند. عزیزی و همکاران (۱۳۹۶) نیز در "تحلیل شکست لوله‌ها در شبکه‌های آبرسانی روستایی خراسان جنوبی"، ارتباط (PGV) بالا (cm/s ۳۵<) با نرخ شکست لوله‌های آزبستی را تأیید کردند. این مطالعات به‌طور کلی بر اهمیت (PGV) در کنار جنس لوله، قطر و شرایط خاک تأکید دارند و نشان می‌دهند که (PGV) به‌ویژه در مناطق آبرفتی، به دلیل جابه‌جایی‌های زمین، تأثیر قابل‌توجهی بر آسیب‌پذیری شبکه‌های آب دارد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

عبدالله‌زاده و همکاران در سال ۱۳۹۷ در مطالعه "مکان‌یابی پهنه‌های خطرپذیر بحران‌های کیفی شبکه آب‌رسانی شهری با استفاده از تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) (مطالعه موردی: تهران) به‌طور غیرمستقیم به (PGV) به‌عنوان بخشی از عوامل لرزه‌ای پرداختند. آنها با استفاده از AHP، وزن ۰/۴۰ را به عوامل لرزه‌ای شامل (PGV) اختصاص دادند و نشان دادند که در مناطق با (PGV) بالا و خاک آبرفتی، آسیب‌پذیری شبکه توزیع آب تهران افزایش می‌یابد. این پژوهش بیشتر بر کیفیت آب متمرکز بود، اما تحلیل لرزه‌ای آن نشان‌دهنده تأثیر قابل‌توجه (PGV) بر پایداری شبکه در شرایط زلزله بود.پریش (۱۳۹۴) در مروری بر اثر زلزله بر شبکه توزیع آب به این نتیجه رسید که بیشترین شکست لوله‌ها در لوله‌های با قطر ۰ تا ۱۰۰ میلی‌متر رخ می‌دهد و لوله‌های آزبستی بیشترین آسیب‌پذیری را دارند.

به‌طور کلی، این مطالعات داخلی نشان‌دهنده روند روبه‌رشدی در استفاده از (PGV) به‌عنوان معیاری کلیدی در ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های آب هستند. حسینی و صادقیان (۱۳۸۸) پایه‌ای برای تحلیل (PGV) در مناطق آبرفتی گذاشتند، زارعی و همکاران (۱۳۹۶) آن را با (AHP) به‌صورت نظری گسترش دادند، و یزدآبادی و کبیری‌سمانی (۲۰۰۹) کاربرد عملی آن را در شبکه توزیع شهری نشان دادند. قاسمی و همکاران (۱۴۰۰) تحلیل فضایی را افزودند، عزیزی و همکاران (۱۳۹۶) بر جنس لوله تمرکز کردند، و عبدالله‌زاده و همکاران (۱۳۹۷) آن را در کنار عوامل کیفیتی بررسی نمودند. با این حال، شکاف‌هایی مانند کمبود مطالعات جامع در مقیاس شبکه‌های توزیع شهری، استفاده محدود از داده‌های واقعی زلزله در ایران، و تمرکز بیشتر بر خطوط انتقال به‌جای شبکه‌های توزیع مشهود است. این پژوهش‌ها بر اهمیت (PGV) در کنار جنس لوله (آزبست شکننده‌تر، پلی‌اتیلن مقاوم‌تر)، قطر (لوله‌های بزرگ‌تر پایدارتر)، و شرایط خاک (آبرفت آسیب‌پذیرتر) تأکید دارند، اما نیاز به تحقیقات گسترده‌تر با داده‌های میدانی و مدل‌سازی پیشرفته‌تر را نشان می‌دهند تا بتوان نتایج را در مدیریت ریسک و بهسازی شبکه‌های آب شهری ایران به‌کار برد.

ارتباط بیشینه سرعت زمین (PGV) و شبکه توزیع آب شهری نشان‌دهنده اهمیت این پارامتر در ارزیابی آسیب‌پذیری و تاب‌آوری است. او راورک، مایکل ج. و لیو، اِکس[1] (۲۰۰۱) در مطالعه خود (PGV) را عامل اصلی جابه‌جایی اتصالات لوله‌ها در شبکه‌های آب معرفی کردند و آن را از PGA متمایز دانستند. توپراک، اِس. و تسکین، اِف[2]. (۲۰۰۷) با تحلیل زلزله کوجالی ۱۹۹۹ ترکیه، نشان دادند که (PGV) در خاک‌های نرم نرخ شکست لوله‌ها را به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌دهد.

وانگ، وای.، او راورک، تی. دی. و اِی. اِم. هال، دبلیو. جِی[3]. (۲۰۱۰) با توسعه توابع شکنندگی، دقت (PGV) را در پیش‌بینی نشت و جابه‌جایی در شبکه‌های توزیع تأیید کردند. فرهمندفر، ، زِ[4] و همکاران، ۲۰۱۸ (PGV) را معیاری مؤثر برای شبکه‌های شهری با جنس‌ها و قطرهای متنوع معرفی نمودند و بر تأثیر نوع خاک تأکید کردند.

لیو، تی[5] و همکاران (۲۰۲۲) در یک پژوهش مروری، (PGV) را با مقادیر بالای۳۵ cm/s به‌عنوان استاندارد آسیب‌شناسی شبکه‌های آب برجسته کردند. چن، اِکس[6] و همکاران (۲۰۲۴) با ترکیب (AHP) و توابع شکنندگی و اختصاص وزن ۰/۵۰ ب (PGV)، آسیب‌پذیری بالای لوله‌های شکننده را در (PGV) بیش از ۴۰ cm/s نشان دادند. توپراک و همکاران (۲۰۱۵) با بررسی زلزله وان ۲۰۱۱، ارتباط (PGV) با نرخ شکست در شبکه‌های توزیع را تأیید کردند. اِگچی، آر. تی[7] و همکاران (۲۰۰۴) نیز (PGV) را برای تحلیل آسیب‌پذیری در مناطق شهری با خاک آبرفتی پیشنهاد دادند. شاداب‌فر[8] و همکاران (۲۰۲۳) در مطالعه‌ای در چین با تمرکز بر شبکه آب قزوین ایران، (PGV) را معیاری کلیدی در مناطق آبرفتی دانستند و نشان دادند که در (PGV) بالای ۳۸ cm/s لوله‌های قدیمی‌تر (مانند چدن) نرخ شکست بیشتری دارند، و از GIS برای تحلیل فضایی استفاده کردند. این پژوهش‌ها

[1] - O'Rourke, M. J., & Liu, X
[2] - Toprak, Selçuk; Taskin, Filiz
[3] - Wang, Y., O'Rourke, T. D., & Hall, J. F.
[4] - Farahmandfar, Z
[5] - Liu, T
[6] - Chen, X
[7] - Eguchi, R. T
[8] - Shadabfar

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

به‌صورت یکپارچه بر نقش (PGV) در جابه‌جایی‌ها و نشت در شبکه‌های توزیع آب تأکید دارند، به‌ویژه در خاک‌های نرم، و همراه با جنس لوله (فولاد مقاوم، آزبست شکننده)، قطر، و شرایط ژئوتکنیکی، آن را معیاری اساسی می‌دانند. این پژوهش‌ها به‌صورت یکپارچه بر نقش (PGV) در جابه‌جایی‌ها و نشت در شبکه‌های توزیع آب تأکید دارند، به‌ویژه در خاک‌های نرم، و همراه با جنس لوله (فولاد مقاوم، آزبست شکننده)، قطر، و شرایط ژئوتکنیکی، آن را معیاری اساسی می‌دانند. با این حال، شکاف‌هایی مانند کمبود مطالعات جامع جهانی همچنان باقی است و نیاز به تحقیقات بیشتری را نشان می‌دهد.

به‌طور خاص، تحقیقاتی مانند مطالعه دونالد بی[1] (۱۹۹۷) و وینان لی[2] و همکاران (۲۰۲۴) از دستورالعمل‌هایی مانند ALA برای تخمین احتمال شکست لوله‌ها بر اساس (PGV) استفاده کرده‌اند و نتایج نشان داده‌اند که با افزایش، (PGV) احتمال شکست لوله‌ها به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. مطالعات دیگری مانند سلچوک توپراک و همکاران (۲۰۰۹) و معتمد باتا[3] و همکاران (۲۰۲۲) نیز تأثیر (PGV) را در مناطق مستعد روان‌گرایی یا شبکه‌های فرسوده بررسی کرده‌اند و تأکید کرده‌اند که (PGV) به‌ویژه در چنین شرایطی نقش مهمی در شکست لوله‌ها ایفا می‌کند. علاوه بر این، پژوهش‌هایی مانند ایوان هالکیویچ و همکاران[4] (۲۰۲۱) و اورازیو جیوستولیس و دانیل لاوسلی[5] (۲۰۱۴) توابع آسیب‌پذیری را بر اساس (PGV) تعریف کرده‌اند و نشان داده‌اند که این پارامتر به‌عنوان یک شاخص کلیدی در پیش‌بینی آسیب‌های موقت و دائمی به لوله‌ها عمل می‌کند. در نهایت، مطالعاتی مانند ژودونگ ژائو[6] و همکاران (۲۰۱۵) و کیان لی[7] و همکاران (۲۰۱۹) نیز بر اهمیت (PGV) در طراحی و مقاوم‌سازی شبکه‌های آب شهری تأکید کرده‌اند و نشان داده‌اند که این پارامتر می‌تواند به‌عنوان معیاری مؤثر در ارزیابی ایمنی لرزه‌ای شبکه‌های خط لوله آب مورد استفاده قرار گیرد. به‌طور کلی، این پژوهش‌ها بر این موضوع تأکید دارند که نقش (PGV) تعیین‌کننده‌ای در شکست لوله‌ها دارد و باید در برنامه‌ریزی‌های آینده برای بهبود تاب‌آوری شبکه‌های آب شهری در برابر زلزله مورد توجه قرار گیرد.

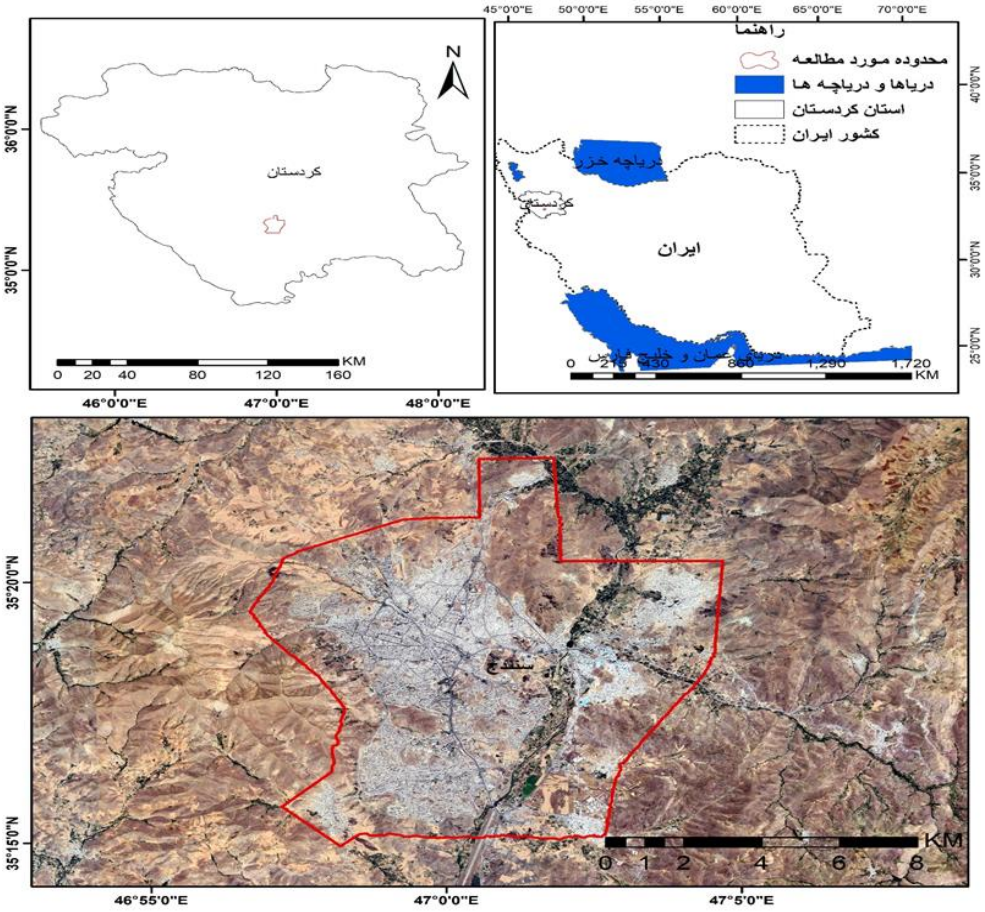
روش‌شناسی پژوهش

۱. قلمرو جغرافیایی مورد مطالعه

این پژوهش با هدف ارزیابی تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهر سنندج که در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۷درجه ۵دقیقه و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۲۲ دقیقه و در ارتفاع متوسط ۱۵۰۰متری از سطح دریا واقع شده است و با استفاده از داده‌های توصیفی و مکانی از طریق روش‌های کتابخانه‌ای، اسنادی و بازدیدهای میدانی وتحلیل چشمه‌های زلزله، استخراج و پهنه‌بندی توزیع پارامترهای جنبشی زمین شامل بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV)، ویژگی‌های زمین‌شناسی و مشخصات فیزیکی شبکه توزیع آب انجام گرفته است (شکل۱).

[1] - Donald B
[2] - Li, Weinan
[3] - Bata, Mo'Tamad
[4] - Halkijevic, Ivan
[5] - Laucelli, Daniele; Giustolisi, Orazio
[6] - Zhao, Xudong
[7] - Li, Qian

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

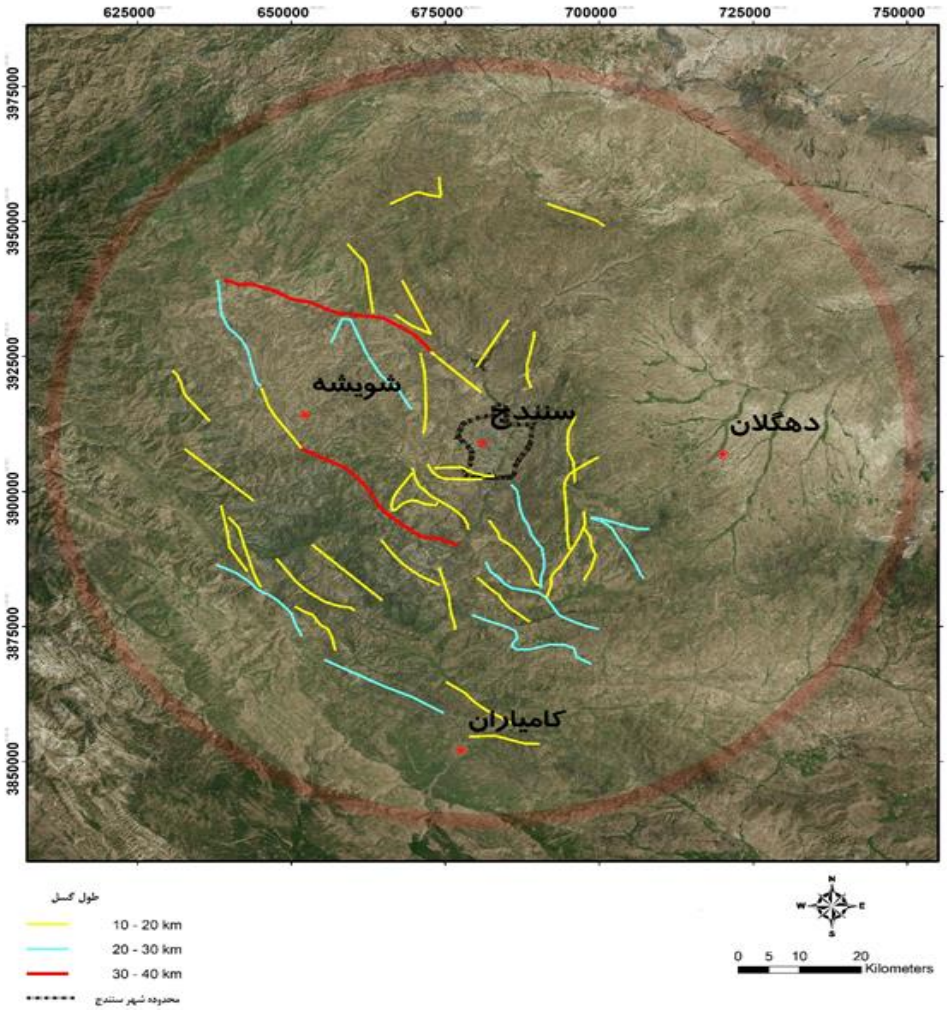


شکل۱. موقعیت محدوده مورد مطالعه در استان کردستان و کشور ایران

۲.داده‌ها و روش کار

داده‌های موردنیاز در سه دسته اصلی شامل چشمه‌های زلزله، زمین‌شناسی و خاک، و شبکه توزیع آب که معیارهای انتخاب آن‌ها بر اساس ارتباط مستقیم با اهداف کاربردی پژوهش، دسترسی‌پذیری منابع، دقت داده‌ها، و قابلیت استفاده در تحلیل‌های فضایی و مدل‌سازی تعیین شد.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]



شکل ۲. توزیع گسل‌های با طول بیش از ۱۰ کیلومتری واقع در شعاع ۷۰ کیلومتری سنندج

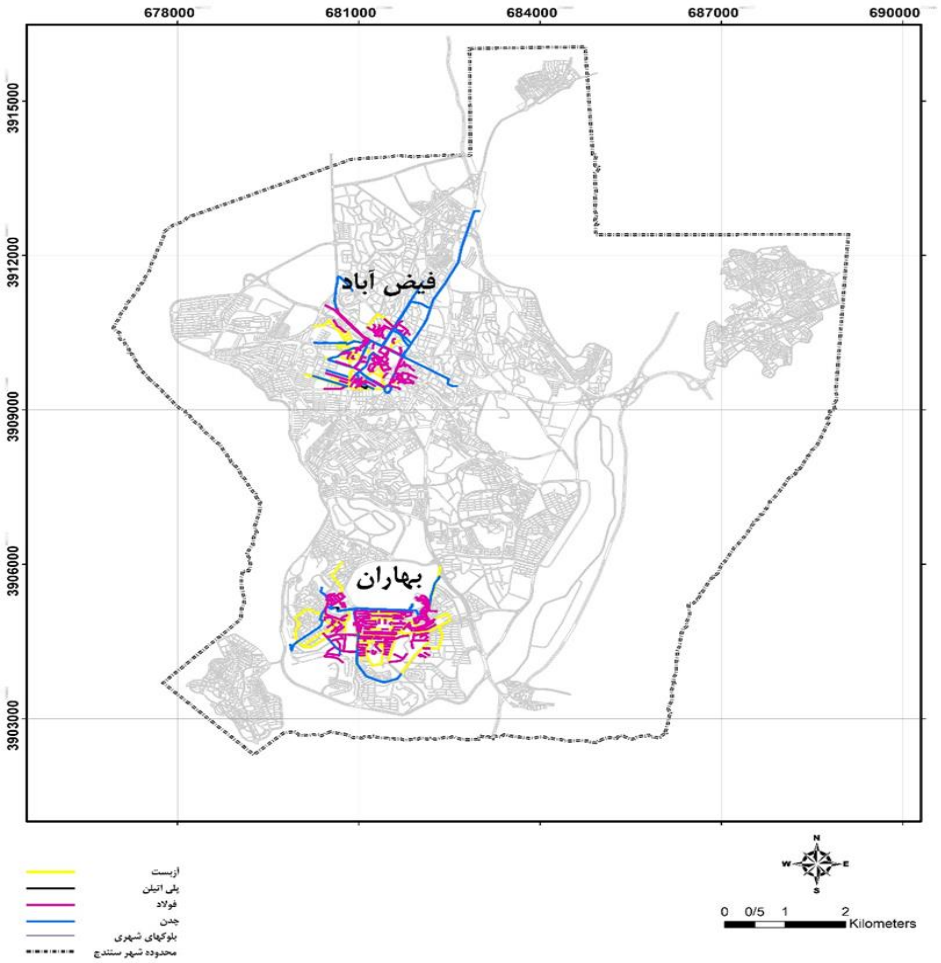
با توجه به تعدا زیاد گسل‌ها در پوسته زمین برای مطالعات مرتبط با زلزله فقط گسل‌های فعال در محاسبات دخالت داده می شوند گسل‌های فعال، گسل‌هایی هستند که در بازه‌های زمانی مشخص (مانند ۱۱،۰۰۰ سال گذشته) فعالیت داشته‌اند و و یا بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ ساختمان معیار انتخاب گسل‌های فغال که گسل‌های با طول بیش از ۱۰ کیلومتر را گسل فعال محسوب کرد مطابق آیین‌نامه ۲۸۰۰ گسلهای با طول بیش از ۱۰ کیلومتر وتوان لرزه‌زایی قابل‌توجه (لرزه زایی>۴ ریشتر)، و قرارگیری در شعاع ۷۰ کیلومتری مرکز سنندج مبنای انتخاب گسل‌های فعال قرار گرفت که در نهایت با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی کشور (مقیا س ۱:۱۰۰،۰۰۰، برگه سنندج) و مطالعات سنجش‌ازدور ۴۰گسل با طول ۱۰ تا ۳۷/۱۱ کیلومتر شناسایی ومختصات، طول، و نوع گسل‌ها با رقومی‌سازی در ArcGIS جهت انجام تحلیل های فضایی استخراج طول گسل و فاصله آن تا ساختگاه (شبکه‌های توزیع آب) در محاسبات بیشینه شتاب و سرعت زمین برای کاهش آسیب‌پذیری زیرساخت‌های ، داده‌های زمین‌شناسی و خاک نیز به دلیل تأثیر بر انتقال امواج لرزه‌ای و پایداری شبکه از ترکیب نقشه زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی و مطالعات ژئوتکنیکی محدوده شهر سنندج که توسط صمدیان و فاخر (۱۳۹۸)که بااستفاده از ۲۱۱ گمانه ژئوتکنیکی و ۹ چاه کنترلی گردآوری شدند؛ تهیه گردید(شکل-۲). این منابع به ترتیب برای پوشش منطقه‌ای و جزئیات محلی انتخاب شدند.

نقشه محدوده شهری سنندج و شبکه معابر از نقشه های۱/۲۰۰۰ پایه شهری استخراج گردید.

مشخصات شبکه توزیع آب مناطق فیض‌آباد و بهاران سنندج شامل نقشه شبکه توزیع و اطلاعات توصیفی از جمله جنس لوله (آزبست، چدن، پلی‌اتیلن و فولاد)، قطر (۳۲-۸۰۰ میلی‌متر) از واحد GIS مدیریت آبفای کردستان اخذ گردید (شکل ۳).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

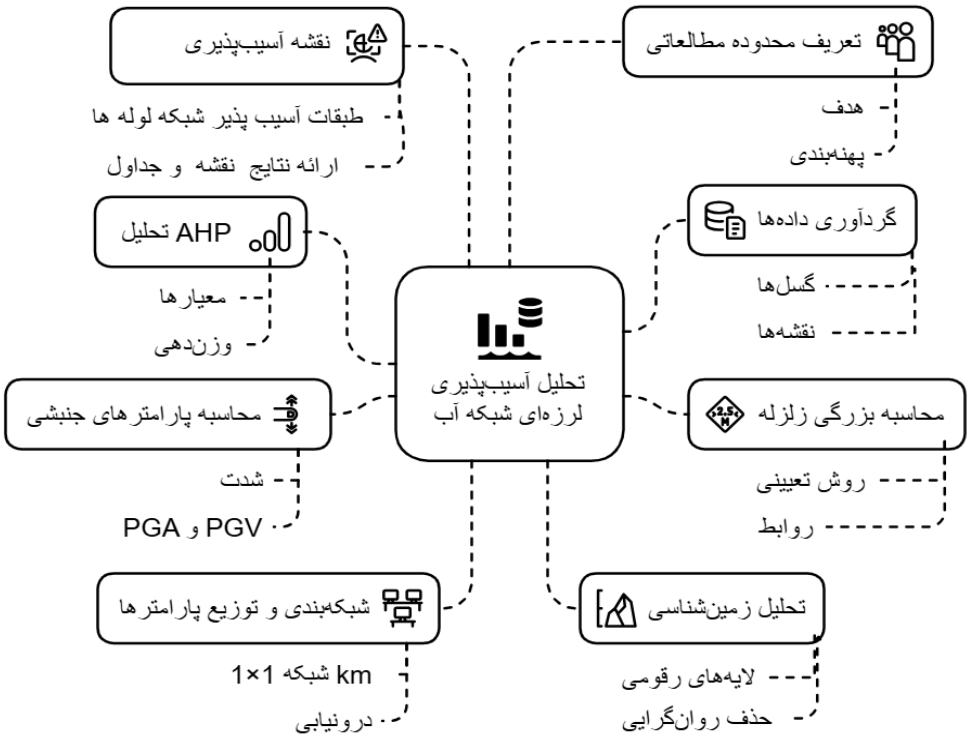
با توجه به اهداف پروژه ومکان محور بودن مطالعات از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به‌عنوان رویکردی چندمعیاره برای وزن‌دهی عوامل مؤثر بر تاب‌آوری شبکه و جهت انجام مراحل آماده ساری ، استخراج ، تحلیل و ارائه نتایج از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) درمحیط نرم افزاری (ARCGIS10.8) استفاده گردید.



شکل ۳. نقشه توزیع و جنس لوله ها شبکه توزیع آب بهاران و فیض آباد سنندج

ارزیابی آسیب‌پذیری فیزیکی شبکه‌های توزیع آب شهری در برابر زلزله فرایندی چندمرحله‌ای است که نیازمند گردآوری داده‌ها، محاسبه پارامترهای لرزه‌خیزی و تحلیل رفتار شبکه در برابر پارامترهای جنبشی زمین مانند بیشینه شتاب زمین (PGA) و بیشینه سرعت زمین (PGV) است. در این بخش، دو روش اصلی یعنی تهیه نقشه‌های توزیع پارامترهای جنبشی زمین و تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به‌صورت جامع و با جزئیات تشریح می‌شوند. این روش‌ها برای تحلیل فضایی پارامترهای جنبشی و وزن‌دهی به عوامل مؤثر بر آسیب‌پذیری و تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهر سنندج به کار گرفته شدند.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]



شکل ۴ . نمودار روش تحقیق

این فرایند با شناسایی چشمه‌های زلزله درمحدوده موردمطالعه در شعاع ۷۰ کیلومتری مرکز شهر سنندج تعریف شد، زیرا این شعاع با توجه به سوابق تاریخی زلزله‌ها، توزیع گسل‌ها، و استانداردهای لرزه‌خیزی (مانند آیین‌نامه ۲۸۰۰) گسل‌های فعال بر اساس معیارهایی چون طول بیش از ۱۰ کیلومتر، سوابق لرزه‌ای، و شواهد زمین‌ساختی از نقشه‌های زمین‌شناسی سازمان زمین‌شناسی کشور (مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰ برگه سنندج) و مطالعات سنجش‌ازدور استخراج و شناسایی شدند (جدول۱).

جدول ۱. مشخصات گسلهای شناسایی شده محدوده مورد مطالعه

ردیف	گروه	طول	تعداد
۱	۱	۰/۱ – ۲ کیلومتر	۲۹
۲	۲	۲/۱ – ۱۰ کیلومتر	۱۲۳
۳	۳	۱۰/۱ – ۴۰ کیلومتر	۵۵

در مطالعات لرزه‌خیزی، محاسبه بزرگی زلزله (Ms) و شدت (IR) به‌عنوان شاخص‌های کلیدی برای درک توان لرزه‌زایی چشمه‌های زلزله و اثرات آن‌ها در فواصل مختلف از اهمیت بسزایی برخوردار است. بزرگی زلزله، که معمولاً بر اساس روابط تجربی وابسته به طول گسل محاسبه می‌شود، نشان‌دهنده انرژی آزادشده در کانون زلزله است، در حالی که شدت، اثرات محلی زلزله را بر اساس مقیاس مرکالی اصلاح‌شده (MMI) توصیف می‌کند. پس از شناسایی گسل‌های فعال ، توان لرزه‌زایی آن‌ها با استفاده از چهاررابطه تجربی (جدول ۱) ومیانگین این مقادیر به‌عنوان بزرگای پایه هر گسل ثبت شد. این روابط برای ۵۵ گسل فعال با طول ۱۰ تا ۳۷/۱۱ کیلومتر اعمال شدند و دامنه بزرگی بین ۵/۹۸ تا ۶/۶۷ریشتر به‌دست آمد (جدول ۲) بعضی از گسل ها در داخل یک یک پیکسل قرار می گرفتند؛ بنابراین در مجموع ۴۰ گسل جهت تحلیل باقی ماند.

جدول ۲. روابط تجربی برآورد بزرگای زلزله استفاده شده در پژوهش

شماره	رابطه	فرمول
۱	سلمونز	Ms = 4.07 + 0.98 log (L)
۲	مهاجر اشجعی و نوروزی	Ms = 4.20 + 1.02 log (L)
۳	ولز و کوپر اسمیت	Ms = 4.10 + 1.05 log (L)

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

شماره	رابطه	فرمول
۴	آمبرزیس و ملویل	Ms = 4.30 + 0.95 log (L)

شدت زلزله در مقیاس مرکالی با رابطه آمبرزیس و ملویل (رابطه ۱) محاسبه شد، که در آن (IO) شدت زلزله در مقیاس مرکالی و (Ms) بزرگای گسل است.

رابطه۱ $Io = 1.3Ms + (0.0)$

با توجه به اثرشدت زلزله بر میزان آسیب دیدگی تاسیسات و ضرورت برآورد آن که با افزایش فاصله از چشمه زلزله، میزان آن به دلیل کاهندگی امواج لرزه‌ای کاهش می‌یابد که این کاهش تحت تأثیر عواملی نظیر فاصله، شرایط زمین‌شناسی، و ساختار زیرسطحی منطقه قرار دارد. استفاده از روابط کاهندگی برای مدل‌سازی این کاهش ضروری است، زیرا این روابط امکان برآورد دقیق شدت در محل‌های دورتر از کانون را فراهم می‌کنند و به تحلیل مکان‌مبنا در ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها، مانند شبکه‌های توزیع آب، کمک می‌کنند. در این پژوهش، شدت در فواصل مختلف با استفاده از رابطه کاهندگی چاندرا و همکاران محاسبه شد که برای فواصل کمتر از ۱۲۰ کیلومتر و ضرایب آن بر اساس خم‌های هم‌لرزه زلزله‌های ایران کالیبره شده‌اند، که آن را برای شرایط زمین‌شناسی منطقه سنندج–سیرجان قابل‌اعتماد می‌سازد. ضرورت استفاده از این رابطه در این است که شدت به‌صورت مستقیم قابل اندازه‌گیری در هر نقطه نیست و مدل‌سازی کاهندگی، تخمین دقیق اثرات زلزله در فواصل مختلف را ممکن می‌سازد، به‌ویژه در مناطقی با گسل‌های متعدد و پراکنده مانند محدوده مطالعاتی این پژوهش. با افزایش فاصله از چشمه زلزله، شدت کاهش می‌یابد و این کاهش با رابطه کاهندگی چاندرا و همکاران مدل‌سازی شد (پورکرمانی و آرین، ۱۹۹۷) (رابطه ۲). این رابطه به‌صورت زیر است.

رابطه ۲

$$IR = Io+6.453-0.00121R-4.960\log(R+20)$$

IR: شدت در محل موردنظر (مقیاس مرکالی)

Io: شدت در کانون زلزله

R: فاصله از گسل (کیلومتر)

محاسبه بزرگی و شدت زلزله، همراه با استفاده از روابط کاهندگی، پایه‌ای برای تخمین پارامترهای جنبشی فراهم می‌کند. رابطه چاندرا به دلیل کالیبراسیون محلی و انطباق با فواصل کوتاه، ابزار مناسبی برای مدل‌سازی کاهش شدت است، در حالی که روابط تریفوناک و بریدی شدت را به (PGA) و (PGV) مرتبط می‌سازند، که برای ارزیابی آسیب‌پذیری حیاتی‌اند.

سپس، پارامترهای جنبشی زمین شامل بیشینه شتاب افقی (PGA) و بیشینه سرعت افقی (PGV) با استفاده از روابط تجربی تریفوناک و بریدی (رابطه ۴) و (رابطه ۵) که شدت را به‌صورت خطی به شتاب و سرعت مرتبط می‌سازند،وبه دلیل سادگی، قابلیت اطمینان، و انطباق با داده‌های مشاهده‌ای، ابزارهایی حیاتی برای ارزیابی اثرات دینامیکی زلزله بر سازه‌ها و زیرساخت‌ها محسوب می‌شوند تخمین زده شدند

(PGA) که بیانگر شتاب حداکثری زمین در طی رویداد لرزه‌ای است، به‌طور مستقیم با نیروهای وارد بر سازه‌ها ارتباط دارد، در حالی که (PGV)، به‌عنوان معیاری از سرعت جابجایی ذرات، با آسیب‌پذیری خطوط لوله و سیستم‌های توزیع مرتبط است. این پارامترها، به‌ویژه در تحلیل آسیب‌پذیری شبکه‌های زیرساختی، از اهمیت بسزایی برخوردارند، زیرا اثرات مخرب زلزله بر این سیستم‌ها به‌طور مستقیم به بزرگی شتاب و سرعت امواج وابسته است.

رابطه ۴ $Logah = 0.041+0.3\ Io$

ah: شتاب افقی (cm/s^2)

رابطه ۵ $logVh =0.63+0.25\ Io$

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

Vh: سرعت افقی(cm/s)

یافته‌های پژوهش

۱. تحلیل فضایی پارامترهای جنبشی زمین در شهر سنندج

تحلیل فضایی پارامترهای جنبشی زمین، به‌عنوان یکی از مراحل کلیدی در ارزیابی مخاطرات لرزه‌ای و آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها، امکان درک توزیع مکانی شدت زلزله (IR)، بیشینه شتاب افقی (PGA)، و بیشینه سرعت افقی (PGV) را فراهم می‌کند. در این پژوهش، برای دستیابی به توزیع پیوسته این پارامترها در سطح شهر سنندج، محدوده مطالعاتی به شبکه‌ای منظم با سلول‌های ۱×۱ کیلومتری تقسیم شد که در مجموع شامل ۲۷۴ سلول (۱۵ ردیف × ۱۸ ستون) بود. این شبکه‌بندی، با هدف تحلیل مکان‌مبنا و افزایش دقت در تخمین اثرات زلزله در مقیاس محلی، به‌ویژه برای شبکه توزیع آب، انجام شد. فاصله هر سلول از نزدیک‌ترین گسل فعال با استفاده از ابزار Point Distance در نرم‌افزار ArcGIS محاسبه گردید که خروجی آن یک ماتریس فاصله با ابعاد ۴۰ گسل (به‌عنوان چشمه‌های اصلی زلزله) و ۲۷۴ سلول بود. برای هر سلول، شدت زلزله (IR) بر اساس کمترین فاصله (R) از گسل و بیشترین شدت کانونی (Io) تعیین شد و سپس مقادیر (PGA) و (PGV) با استفاده از روابط تجربی محاسبه شدند. این داده‌ها به‌صورت گسسته تولید شدند و مقادیر شدت (IR)، شتاب (PGA)، و سرعت (PGV) که برای هر یک از ۲۷۴ سلول محاسبه شده بودند، به‌عنوان داده‌های ورودی در فرآیند درونیابی استفاده شدند. برای تبدیل آن‌ها به سطوح پیوسته و تهیه نقشه‌های توزیع فضایی، سه روش درونیابی متداول شامل معکوس فاصله وزنی (IDW)، کریجینگ، و اسپلاین مورد بررسی و مقایسه قرار گرفتند.دقت هر روش با استفاده از شاخص میانگین مربعات خطا (RMSE) ارزیابی شد که معیاری استاندارد برای سنجش انحراف مقادیر تخمینی از مقادیر واقعی است. فرمول (RMSE) به‌صورت زیر است:

رابطه ۵

$$RMSE = \sqrt{{}^{2}(\hat{}_{i}Z - {}_{i}Z)\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{n}}$$

Zi: مقدار واقعی

Z^i: مقدار تخمینی

n: تعداد نقاط

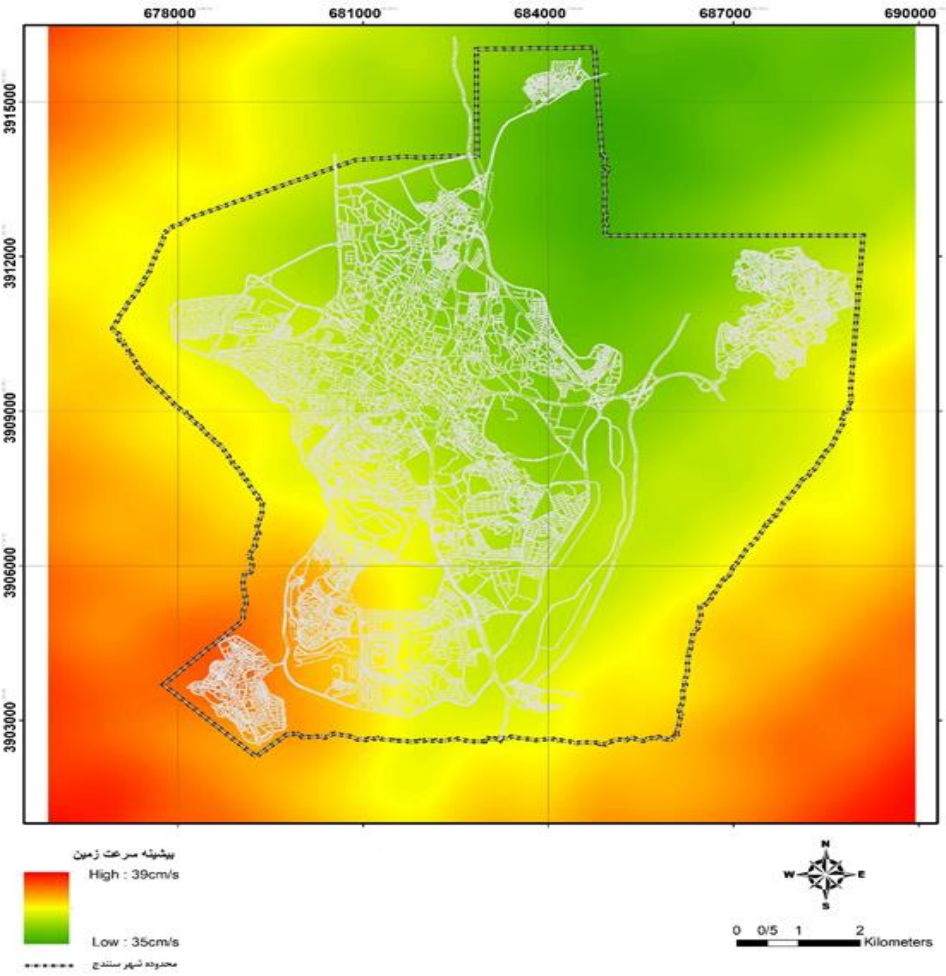
نتایج ارزیابی مقایسه دقت روشهای درونیابی در محدوده شهر سنندج در (جدول ۳) ارائه شده است:

جدول۳. مقایسه دقت روش‌های درونیابی

روش درونیابی	IDW	Kriging	Spline
RMSE	۰/۰۳۰۵	۰/۸۹	۰/۰۲۳۵

با توجه به نتایج ارزیابی، حاصل از مقایسه روشهای درونیابی روش اسپلاین با (RMSE=.0235) و دقت بالاتر برای تهیه نقشه نهایی توزیع فضایی شدت انتخاب شد. این دقت بالا به‌دلیل منظم بودن داده‌ها و بدون تغییرات ناگهانی مناسب است، با ماهیت تغییرات تدریجی پارامترهای جنبشی در منطقه سازگار است. .نتایج درونیابی عامل دامنه شدت زلزله بین (VIII تا VII) مقیاس مرکالی برای کل عرصه شهر سنندج محاسبه و تهیه گردید. بعد از محاسبه شدت زلزله برای عرصه شهر سنندج بر اساس روابط تجربی تریفوناک و بردی توزیع پارامترهای جنبشی بیشینه شتاب زمین (PGA) را بین (.30 g -.35 g) وبیشینه سرعت زمین (35cm/s- 39cm/s) برآورد گردید (شکل ۵).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]



شکل ۵. توزیع بیشینه سرعت زمین (PGV) در محدوده شهر سنندج

همپوشانی نقشه‌های تهیه شده توزیع پارامترهای جنبشی با نقشه توزیع گسلهای منطقه سنندج تطابق وهمخوانی برآورد این پارامترها با نزدیکی به گسلها را ارائه میدهد. بر اساس نتیجه برآوردها مقادیر شدت ، بیشینه سرعت و بیشینه شتاب از جنوب غربی شهر سنندج که به گسل‌های فعال نزدیک‌تر است، به سمت شمال و شمال غربی که در فاصله دورتری از گسل‌ها دارند روندی کاهشی دارد.

آسیب‌پذیری تاسیسات و شبکه توزیع آب نه تنها ناشی از پارامترهای جنبشی زمین نظیر (PGA) و (PGV) بلکه از ازویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی و ویژگی های شبکه لوله های توزیع آب به‌عنوان عواملی کلیدی در تکمیل این تحلیل مطرح می‌شوند.در محدوده مورد پژوهش این ویژگی‌ها، به‌طور خلاصه، نشان‌دهنده تأثیر عمیق موقعیت دره‌ای شهر سنندج، گسل‌های فعال، و تنوع واحدهای سنگی شامل شیل (۷۰ درصد)، سنگ‌آهک، آندزیت، و رسوبات آبرفتی کواترنری بر ساختار خاک و پتانسیل لرزه‌ای منطقه هستند. این واحدها، همراه با توپوگرافی ناهموار، فعالیت رودخانه قشلاق، و شرایط اقلیمی، لایه‌های رسی عمیق (تا ۴۰ متر در مرکز شهر)، شن و ماسه رودخانه‌ای (تا ۲۵ متر)، و رس هوازده را شکل داده‌اند. با وجود سطح ایستابی عمیق‌تر از ۷ متر که قابلیت روان‌گرایی را کاهش می‌دهد، لایه‌های آبرفتی مرکزی همچنان در برابر زلزله آسیب‌پذیرند. این خصوصیات، که با استفاده ازنقشه های زمین شناسی و مطالعات ژئوتکنیکی صمدیان و فاخر (۱۳۹۸) در محیط سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) رقومی‌سازی شده‌اند، امکان تحلیل دقیق‌تر مخاطرات زلزله و آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها را فراهم می‌کنند و مکملی اساسی برای پارامترهای جنبشی در ارزیابی جامع ریسک لرزه‌ای محسوب می‌شوند.

همانگونه که بیان شد ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه‌های توزیع آب در برابر زلزله به عوامل متعددی وابسته است که از جمله آن‌ها، علاوه بر پارامترهای جنبشی زمین، ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی و زمین‌شناسی، جنس و قطر لوله‌ها به‌عنوان مشخصات فیزیکی

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

کلیدی مطرح می‌شوند. جنس لوله‌ها، که تعیین‌کننده مقاومت در برابر تنش‌های لرزه‌ای و رفتار شکست است، تأثیر مستقیمی بر نرخ تعمیر و پایداری شبکه دارد، قطر لوله‌ها نیز با میزان فشار داخلی و ظرفیت انتقال سیال مرتبط است.

جدول ۴ . مشخصات شبکه لوله های توزیع آب مناطق فیض آباد و بهاران سنندج

منطقه فیض‌آباد					
نوع لوله	تعداد	طول	کوچک‌ترین قطر	بزرگ‌ترین قطر	منطقه
آزبست	۳۸	۱۰۷۹۷	۸۰	۲۵۰	فیض‌آباد
پلی‌اتیلن	۱۹۰	۲۳۱۲۳	۳۲	۱۱۰	فیض‌آباد
چدن	۲۸	۱۹۹۹۳	۱۰۰	۸۰۰	فیض‌آباد
فولاد	۲	۱۹۲	۶۰	۶۰	فیض‌آباد
منطقه بهاران					
آزبست	۴۰	۱۶۹۸۹	۱۰۰	۲۵۰	بهاران
پلی‌اتیلن	۱۷۱	۲۵۵۴۷	۳۲	۲۰۰	بهاران
چدن	۹	۷۷۵۶	۲۵۰	۷۰۰	بهاران
فولاد	۴	۲۴۱	۳۰۰	۵۰۰	بهاران
جمع	۴۸۲	۱۰۴۶۳۸	۳۲	۸۰۰	

در این پژوهش، به دلیل محدودیت‌های دسترسی به داده‌ها، تنها دو بخش از شبکه توزیع آب شهر سنندج، یعنی مناطق فیض‌آباد و بهاران، برای تحلیل انتخاب شدند. مشخصات فیزیکی موردنیاز برای ارزیابی نرخ تعمیر، شامل جنس لوله‌ها (آزبست، پلی‌اتیلن، چدن، و فولاد)، قطر لوله‌ها (از ۳۲ تا ۸۰۰ میلی‌متر)، و طول کل در محیط، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) استخراج گردید (جدول ۴). این داده‌ها، که از واحد GIS مدیریت آبفای استان کردستان گردآوری شده‌اند، نشان‌دهنده تنوع قابل‌توجه در ویژگی‌های فیزیکی شبکه هستند و پایه‌ای برای تحلیل آسیب‌پذیری لرزه‌ای در این مناطق فراهم می‌کنند.

۱-۲. تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

در این پژوهش، برای ارزیابی پایداری شبکه توزیع آب شهر سنندج در برابر زلزله، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) استفاده شد که ابزاری مؤثر برای تصمیم‌گیری چندمعیاره است. (AHP) با تجزیه مسائل پیچیده به سلسله‌مراتب ساده، وزن‌دهی به معیارها و بررسی سازگاری قضاوت‌ها، امکان تحلیل دقیق و نظام‌مند تأثیر عوامل مختلف بر آسیب‌پذیری را فراهم می‌کند (قدشیپور[1]، ۲۰۰۸). این مطالعه با تمرکز یر ارزیابی شبکه توزیع آب شهری در دسترس دو منطقه فیض‌آباد و بهاران و فرآیند (AHP) در سه مرحله اصلی شامل ساخت سلسله‌مراتب، محاسبه وزن‌ها، و ارزیابی سازگاری اجرا گردید تا وزن نهایی معیارها و نرخ آسیب‌پذیری شبکه تعیین شود.

نخستین گام در AHP، طراحی ساختار سلسله‌مراتبی است که هدف، معیارها، و گزینه‌ها را به‌صورت گرافیکی نمایش می‌دهد. سلسله‌مراتب این پژوهش از نوع وظیفه‌ای انتخاب شد، زیرا عناصر آن به‌صورت اعتباری و بر اساس نقش آنها در سیستم آسیب‌پذیری تعریف می‌شوند، برخلاف سلسله‌مراتب ساختاری که بر ارتباطات فیزیکی مبتنی است (قدشیپور[2]، ۲۰۰۸). این ساختار در سه سطح سازمان‌دهی شد:

فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) در این پژوهش با ساخت سلسله‌مراتب سه‌سطحی آغاز شد:سطح اول یا تعیین هدف (آسیب‌پذیری/تاب‌آوری)، سطح دوم معیارها (PGV)، جنس لوله، قطر لوله، زمین‌شناسی)، بر اساس دستورالعمل ALA، سطح سوم گزینه‌ها (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد) انتخاب و سازمان دهی گردید (شکل ۷).

[1] - Ghodsipoor
[2] - Ghodsipoor

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

جدول ۵. وزن زیرطبقات معیارها در تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP)

معیار	زیرطبقه	وزن نرمالیزه
بیشینه سرعت زمینPGV	زیاد (37-39Cm/s)	۰/۶۸۷
	متوسط (36-37 Cm/s)	۰/۲۵۸
	کم (35-36 Cm/s)	۰/۰۶۲۰
زمین‌شناسی	آبرفت رودخانه‌ای	۰/۶۵۲
	آبرفت کواترنر	۰/۲۵۰
	شیل	۰/۰۹۶
جنس لوله	فولاد	۰/۵۹۷
	پلی‌اتیلن	۰/۱۶۷
	چدن	۰/۱۸۸
	آزبست	۰/۰۴۵
قطر لوله	بزرگ (>500 mm)	۰/۶۴۱
	متوسط (200-500 mm)	۰/۱۹۴
	کوچک (50-200 mm)	۰/۱۱۵
	خیلی کوچک (<50 mm)	۰/۰۴۸

وزن نسبی هر یک از عوامل مؤثر بر تاب‌آوری شبکه توزیع آب شهری بر اساس طبقات مختلف (خیلی کم، کم، متوسط، زیاد، خیلی زیاد) محاسبه شده است. این وزن‌ها از طریق مقایسه‌های زوجی و با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) به دست آمده‌اند. وزن نسبی هر عامل نشان‌دهنده اهمیت نسبی آن در ایجاد آسیب‌پذیری یا تاب‌آوری شبکه است. (جدول –۵).

در فرآیند تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) [1]، بررسی سازگاری قضاوت‌های انجام‌شده در مقایسه‌های زوجی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا تضمین می‌کند که قضاوت‌های کیفی از نظر منطقی سازگار و فاقد تناقض‌های اساسی هستند. برای ارزیابی سازگاری، با محاسبه بزرگترین مقدار ویژه[2] (λ_max)، شاخص ناسازگاری[3] (I.I) و نرخ ناسازگاری[4] (IR) به دست می‌آید. نرخ ناسازگاری کمتر از ۰/۱ به عنوان حد قابل قبول در نظر گرفته می‌شود. در این پژوهش، نرخ ناسازگاری برای تمامی عوامل از جمله بیشینه سرعت زمین (PGV) جنس لوله، قطر لوله و زمین‌شناسی کمتر از ۰/۱ محاسبه شد که نشان‌دهنده سازگاری قضاوت‌ها و عدم نیاز به تجدید نظر است. این بررسی نه تنها دقت و اعتبار نتایج را افزایش می‌دهد، بلکه از خطاهای انسانی جلوگیری کرده و اطمینان می‌دهد که تصمیم‌گیری‌ها بر اساس منطق صحیح و بدون تناقض انجام شده‌اند (جدول۶).

جدول ۶. ماتریس سازگاری معیارها

معیار	λ_max	I.I	I.R	حد قابل قبول	سازگاری
(PGV)	۳/۱۲	۰/۰۶	۰/۱	≤۰/۱	تأیید
زمین‌شناسی	۲/۹۹۹	−۰/۵۰۰	۰/۰۳	≤۰/۱	تأیید
قطر لوله	۴/۰۳۸	۰/۰۱۲	۰/۰۱۳	≤۰/۱	تأیید
جنس لوله	۴/۴۸	۰/۰۱۶	/۰۱۷	≤۰/۱	تأیید

پس از محاسبه وزن‌های نسبی و شاخص سازگاری در فرآیند ارزیابی آسیب‌پذیری لرزه‌ای شبکه توزیع آب شهر سنندج، وزن‌های نهایی معیارها به‌عنوان ابزاری کلیدی برای تعیین میزان تاب‌آوری یا آسیب‌پذیری شبکه در برابر زلزله به‌کار گرفته شدند. این وزن‌ها، که از مقایسه زوجی معیارها و نرمالیزه‌سازی آن‌ها با روش میانگین حسابی استخراج شدند اهمیت نسبی هر عامل را در ایجاد آسیب‌پذیری یا تقویت پایداری شبکه به‌صورت کمی بیان می‌کنند. نتایج نشان داد که بیشینه سرعت افقی زمین (PGV) با

[1] - Analytic Hierarchy Process (AHP)

[2] - Largest Eigenvalue

[3] - Inconsistency Index

[4] - Inconsistency Ratio

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

وزن نهایی ۰/۴۶ به‌عنوان تأثیرگذارترین معیار شناخته شد، که نشان‌دهنده نقش برجسته این پارامتر جنبشی در ایجاد تنش‌های لرزه‌ای بر لوله‌های مدفون است. جنس لوله با وزن ۲۴۳/ و قطر لوله با وزن ۱۸۲/ در مراتب بعدی قرار گرفتند و بر اهمیت ویژگی‌های فیزیکی شبکه در پاسخ به زلزله تأکید کردند، در حالی که ویژگی‌های زمین‌شناسی با وزن ۱۱۲/ کمترین تأثیر را داشت (جدول ۷)

جدول ۷. وزن نهایی معیارها در ارزیابی آسیب‌پذیری

معیار	وزن نهایی
(PGV)	۰/۴۶۰
جنس لوله	۰/۲۴۳
قطر لوله	۰/۱۸۲
زمین‌شناسی	۰/۱۱۲

در این پژوهش، عوامل مؤثر بر تاب‌آوری یا آسیب‌پذیری شبکه توزیع آب شهری در دو بخش اصلی مورد بررسی قرار گرفتند:

الف) مشخصات طبیعی بستر دفن لوله‌ها شامل پارامترهای جنبش زمین مانند بیشینه سرعت زمین (PGV) و بیشینه شتاب زمین (PGA)، مشخصات خاک، زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی،

$$W_{\text{بخش}} = \sum_{i=1}^{n} (w_i \times w_{i,\text{طبقه}})$$

ب) مشخصات فیزیکی شبکه شامل جنس و قطر لوله‌ها. از میان پارامترهای جنبشی زمین، بیشینه سرعت زمین (PGV) بیشترین تأثیر را بر آسیب‌پذیری لوله‌ها دارد، در حالی که بیشینه شتاب زمین (PGA) بر مخازن و پمپ‌ها تأثیرگذار است.

برای ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه، از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) برای هر بخش از شبکه استفاده شد. به عبارت دیگر، وزن نهایی هر عامل از مجموع حاصل‌ضرب وزن نسبی هر زیرعامل در وزن نهایی آن عامل به دست می‌آید. (رابطه ۶)

که در آن:

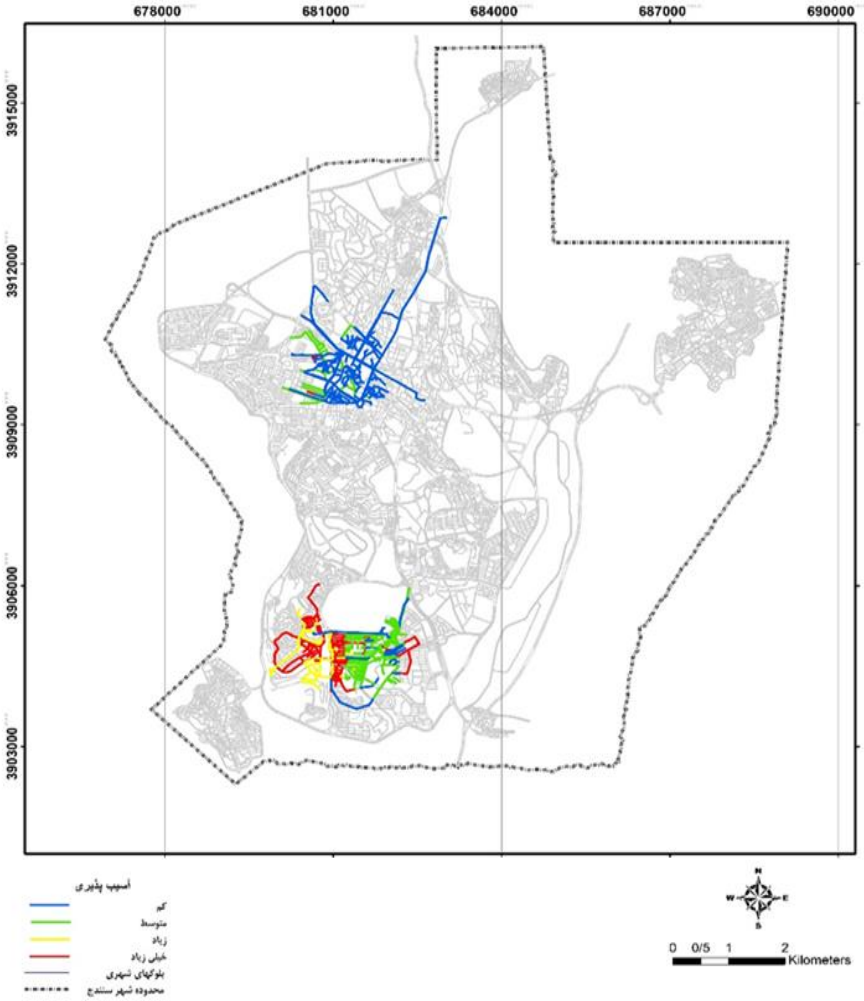
- W بخش: وزن نهایی بخش مورد نظر.
- Wi: وزن نهایی عامل ii ام
- wi طبقه: وزن نسبی طبقه مربوط به عامل iiام (به عنوان مثال، وزن طبقه (PGV)، وزن طبقه جنس لوله و غیره.
- n: تعداد عوامل مؤثر (در این پژوهش، (n=4)

وزن‌های نهایی در بازه ۱۱۱/ تا ۶۴۳/ قرار گرفت و در چهار طبقه شامل خیلی کم، کم، متوسط و زیاد دسته‌بندی شد و براین اساس شبکه توزیع آب مناطق بهاران و فیض آباد از جهت تاب آوری و آسیب پذیری طبقه بندی و نتایج بصورت نقشه ارائه شد (شکل ۶).

نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه توزیع آب شهری در دو منطقه فیض‌آباد و بهاران شهر سنندج نشان‌دهنده تفاوت‌های قابل توجهی در سطح تاب‌آوری و آسیب‌پذیری این دو منطقه است. در منطقه فیض‌آباد، حدود ۸۰/۹۶ درصد از شبکه لوله‌ها دارای سطح آسیب‌پذیری کم است که عمدتاً شامل لوله‌هایی با جنس فولاد، قطر ۱۵۰ میلی‌متر و قرارگیری در بستری با خاک آبرفت کواترنر است. این ترکیب عوامل باعث شده است که این منطقه از تاب‌آوری بالایی برخوردار باشد. تنها ۱/۲۱ درصد از شبکه در این منطقه دارای آسیب‌پذیری خیلی زیاد است که شامل لوله‌های آزبست با قطر ۹۰ میلی‌متر در بستری با خاک شیل سنندج است. در مقابل، منطقه بهاران به دلیل درصد بالای لوله‌های با جنس آزبست ۳۴ درصد و قطر ۹۰ میلی‌متر و قرارگیری در بستری با خاک شیل سنندج، از آسیب‌پذیری بالایی برخوردار است. تنها ۱۳/۷۱ درصد از شبکه در این منطقه دارای سطح آسیب‌پذیری کم است که شامل لوله‌های فولاد با قطر ۱۵۰ میلی‌متر است. این یافته‌ها نشان می‌دهد که منطقه فیض‌آباد به دلیل ترکیب مناسب

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

جنس لوله‌ها، قطر مناسب و بستر خاک مقاوم، از تاب‌آوری بالایی برخوردار است، در حالی که منطقه بهاران به دلیل درصد بالای لوله‌های آسیب‌پذیر و بستر خاک نامناسب، نیاز فوری به اقدامات کاهش آسیب‌پذیری دارد (جدول ۸).



شکل ۶. نقشه آسیب پذیری شبکه توزیع آب بهاران و فیض آباد شهر سنندج

جدول ۸ . نتایج ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه لوله‌های توزیع آب مناطق فیض‌آباد و بهاران شهر سنندج

منطقه	آسیب‌پذیری	طول (متر)	درصد
فیض‌آباد	کم	۳۷۵۵۰	۸۰/۹۶
	متوسط	۸۰۶۴	۱۷/۳۸
	زیاد	-------	--------
	خیلی زیاد	۵۶۴	۱/۲۱
بهاران	کم	۶۷۶۶	۱۳/۷۱
	متوسط	۱۶۳۷۴	۳۲/۷۹
	زیاد	۹۲۱۲	۱۸/۴۴
	خیلی زیاد	۱۶۹۷۸	۳۴/۰۰

جدول ۹. ویژگی‌های شبکه لوله‌های توزیع آب بر اساس طبقات آسیب‌پذیر و عامل‌های ارزیابی

PGV (cm/s)	جنس خاک	جنس لوله	قطر (میلی‌متر)	درصد	طول (متر)	آسیب‌پذیری
۳۶	آبرفت کواترنر	فولاد	۱۵۰	۴۶	۴۴۱۳۶	کم
۳۷	آبرفت کواترنر	چدن – پلی‌اتیلن	۱۶۰	۲۶	۲۴۴۳۸	متوسط
۳۸	شیل سنندج	پلی‌اتیلن	۱۰۰	۱۰	۹۲۱۲	زیاد

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

PGV (cm/s)	جنس خاک	جنس لوله	قطر (میلی‌متر)	درصد	طول (متر)	آسیب‌پذیری
۳۸/۵	شیل سنندج	آزبست	۹۰	۱۸	۱۷۵۲۴	خیلی زیاد

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

نتایج این پژوهش نشان داد که شبکه توزیع آب شهر سنندج در برابر زلزله از منظر پارامترهای جنبشی زمین دارای الگویی ناهمگن است؛ شدت زلزله از (VIII) در جنوب غربی، که در مجاورت گسل‌های فعال قرار دارد، به (VII) در شمال شرقی کاهش می‌یابد، بیشینه شتاب زمین در بازه ۳۰/ تا ۳۵۸/ (g) و بیشینه سرعت زمین (PGV) در دامنه ۳۵/۶ تا ۳۹/۶ سانتی‌متر بر ثانیه نوسان دارد. نقطه قوت برجسته این مطالعه، رویکرد خلاقانه در محاسبه (PGV) است که از طریق شناسایی ۴۰ گسل فعال در شعاع ۷۰ کیلومتری با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی (مقیاس ۱:۱۰۰،۰۰۰)، تخمین توان لرزه‌زایی آن‌ها، تعدیل شدت زلزله در مقیاس (MMI) با مدل کاهندگی بومی‌شده، و تبدیل آن به (PGV) با روش‌های تجربی معتبر انجام شد، که این فرآیند چندمرحله‌ای، دقت پیش‌بینی را با تکیه بر داده‌های محلی به‌طور قابل‌توجهی افزایش داد. برای ترسیم نقشه‌های پیوسته، داده‌های گسسته با بهره‌گیری از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) و درونیابی به روش (Spline) با خطای (RMSE =۰/۰۲۳۵) تحلیل شد که به دلیل سازگاری با تغییرات تدریجی پارامترها، دقیق‌ترین نمایش فضایی (PGV) را ارائه داد. ارزیابی آسیب‌پذیری شبکه با روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) و وزن‌دهی به معیارها(PGV460/، جنس لوله: ۰/۲۴۳، قطر لوله: ۰/۱۸۲، زمین‌شناسی: ۰/۱۱۲) انجام شد، و استفاده از (GIS) برای اعمال این وزن‌ها به‌صورت مکان‌مبنا، تحلیل را به سطحی پیشرفته ارتقا داد؛ منطقه فیض‌آباد با ۸۱ درصد شبکه در طبقه آسیب‌پذیری کم ناشی از (PGV) پایین حدود 36 cm/s، لوله‌های فولادی با قطر بزرگ، و خاک آبرفت کواترنر تاب‌آوری چشمگیری از خود نشان داد، در حالی که تنها ۱/۲ درصد آن (لوله‌های آزبستی با قطر کوچک در خاک شیل) در طبقه آسیب‌پذیری خیلی زیاد قرار گرفت؛ در مقابل، منطقه بهاران با ۳۴ درصد شبکه در طبقه آسیب‌پذیری خیلی زیاد به دلیل (PGV) بالا در بازه 39- 38 cm/s، لوله‌های آزبستی، و خاک شیل و تنها ۱۴ درصد در طبقه کم، شکنندگی بیشتری را آشکار ساخت. تلفیق (GIS) و (AHP) در تهیه نقشه آسیب‌پذیری، با ارائه دیدگاهی بصری و دقیق از توزیع ریسک، نه‌تنها تفاوت‌های تاب‌آوری را برجسته کرد، بلکه چارچوبی پیش‌بینانه برای مداخلات هدفمند در بهاران فراهم آورد. در مقایسه با مطالعات داخلی، این پژوهش نسبت به کامرانزاد و حسینی و زارع (۱۳۹۸)، که تحلیلی کلی از (PGV) در تهران ارائه کردند، با محاسبه دقیق (PGV) مبتنی بر داده‌های محلی و مدل‌سازی کاهندگی، و به علوی و همکاران (۱۳۹۷)، که نرخ شکست لوله ها را بدون تحلیل فضایی به‌کار بردند، با ادغام عملی (AHP) و (GIS) و درونیابی (Spline)، رویکردی جامع‌تر و کاربردی‌تر عرضه کرد؛ همچنین در برابر کبیری‌سمانی و همکاران (۱۴۰۲)، که ارزیابی شبکه آب اصفهان را بدون تأکید بر درونیابی پیشرفته انجام دادند، این مطالعه با روش محاسبه (PGV) و نقشه‌سازی مکان‌مبنا، نوآوری قابل‌ملاحظه‌ای دارد. در قیاس با پژوهش‌های خارجی، نسبت به او راورک و لیو (۲۰۰۱)، که (PGV) را در زلزله‌های بزرگ بررسی کردند، این پژوهش با محاسبه پیش‌بینانه (PGV) بدون نیاز به داده‌های رویداد واقعی، و نسبت به توپراک و تسکین (۲۰۰۷)، که بر تحلیل پس از زلزله متمرکز بودند، با ارائه چارچوبی پیشگیرانه و بومی‌سازی‌شده برای شرایط سنندج (گسل‌ها، خاک شیل، توپوگرافی)، متمایز است؛ همچنین در برابر چن و همکاران (۲۰۲۴)، که (AHP) را با داده‌های گسترده تلفیق کردند، این مطالعه با محاسبه خلاقانه (PGV)، درونیابی پیشرفته (Spline)، و بهره‌برداری از (GIS) برای ارائه نقشه‌های آسیب‌پذیری، چارچوبی پیشرو و انعطاف‌پذیر برای شهرهای با منابع داده‌ای محدود خلق کرده است که نه‌تنها بر برنامه‌ریزی پیشگیرانه تأکید دارد، بلکه با ارائه راهکارهایی مانند جایگزینی لوله‌های انعطاف‌پذیر و سیستم‌های هشدار سریع، از محدودیت‌های مطالعات متکی بر داده‌های وسیع فراتر می‌رود و الگویی نوین برای مدیریت ریسک لرزه‌ای در زیرساخت‌های حیاتی پیشنهاد می‌دهد.

ملاحظات اخلاقی

نویسندگان در انجام و انتشار این پژوهش علمی، اصول اخلاقی را رعایت کرده‌اند و این امر مورد تأیید آنهاست.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

مشارکت نویسندگان

مقاله حاصل پایان‌نامه کارشناسی ارشد نویسنده اول می باشد، مشارکت نویسندگان در مقاله تقریباً به شکل زیر می‌باشد:

نویسنده اول: تهیه و آماده‌سازی نمونه‌ها، انجام آزمایش و گردآوری داده‌ها، انجام محاسبات، تجزیه و تحلیل آماری داده‌ها، تحلیل و تفسیر اطلاعات و نتایج، تهیه پیشنویس مقاله.

نویسنده دوم: استاد راهنمای پایاننامه، طراحی پژوهش، نظارت بر مراحل انجام پژوهش، بررسی و کنترل نتایج، اصلاح، بازبینی و نهایی‌سازی مقاله.

نویسنده سوم: استاد مشاور پایاننامه، مشارکت در طراحی پژوهش، نظارت بر پژوهش، مطالعه و بازبینی مقاله.

تعارض منافع

بنا بر اظهار نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارد.

حامی مالی

مقاله حاضر با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه کردستان انجام شد. حمایت مالی از این پژوهش از طرف دانشگاه کردستان، دانشکده منابع طبیعی در قالب پژوهانهٔ پایاننامه دانشجویی شیدا شریفی انجام شده است.

سپاسگزاری

از معاونت محترم پژوهشی دانشگاه کردستان به خاطر حمایت مالی در اجرای پژوهش حاضر سپاسگزاری می‌شود. همچنین از داوران محترم به خاطر ارائه نظرهای ساختاری و علمی سپاسگزاری می‌شود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

References

Abdollahzadeh, A., & Shahriar, S. (2018). Locating high-risk zones of quality crises in urban water supply networks using AHP analysis (Case study: Tehran water supply network). *Journal of Passive Defense Science and Technology*, 9 (2), 15–28. (in Persian)

Alavi, S. M., Masoud, M., & Karimi, E. (2018). Assessing the resilience of urban water network infrastructure against earthquakes (Case study: District 2 of Tehran). *Human Geography Research Quarterly*, 50 (4), 977–991. (in Persian) https://doi.org/10.22059/jhgr.2018 .228869 .1007424

Azimi, H., Amin-Salehi, F., Ghorbani-Nia, Z., & Norouz, A. (2020). Selecting suitable locations for emergency water supply reservoirs after an earthquake using the AHP method (Case study: District 5 of Tehran). *Journal of Sustainable Environmental Research*, 1 (2), 93–110.

Azizi, M., Eghbali, V., & Yazdani, J. (2017). Analysis of pipe failures in rural water supply networks [Conference presentation]. First National Conference on Water Consumption and Waste Management, Tehran, Iran.

Bata, Mo'Tamad H., Carriveau, R., Ting, & David, S. K. (2022). Urban water supply systems resilience under earthquake scenario. *Scientific Reports*, 1-14 .

Chen, X., Zhang, Y., Liu, S., & Wang, J. (2024). Seismic vulnerability assessment of water pipelines using (AHP) and fragility functions. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 23(1), 155-168.

Donald B, Ballantyne. (1997). Reliability and restoration of water supply systems for fire suppression and drinking following earthquakes. New York: National Institute of Standards and Technology.

Ebrahimi, A., Mortaheb, M. M., Hasani, N., & Sadrolsadat, S. A. (2017). A conceptual framework for assessing the resilience of urban water distribution networks [Conference presentation]. 1st International Congress on Interdisciplinary Research in Urban Planning and Architecture, Tabriz, Iran.

Eguchi, R. T., El-Naggar, M. H., & Hall, J. F. (2004). Seismic vulnerability analysis of urban water systems in alluvial zones. *Journal of Earthquake Engineering*, 8(3), 321-340.

Farajmandfar, Z., Piratla, K. R., & Andress, N. (2018). Seismic vulnerability of urban water networks with diverse pipe materials. *Water Resources Management*, 32(6), 1895-1910.

Halkijevic, I., Vouk, D., Mostečak, H., Posavčić, H. (2021). Damage assessment of water supply networks due to seismic events using vulnerability functions. *Građevinar*,73(7)737-749.

Hoekstra, A.Y., Buurman, J., Van, G., & Kees, C. H. (2018). Urban water security: A review. Environmental Research Letters, 13, 1-15.

Hosseini, M., & Sadeghian, S. (2009). Arzyabi-ye asibpazin-ye larzeh'i-ye khuthut-e luleh-ye ab dar Tehran [Seismic vulnerability assessment of water pipelines in Tehran]. *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*, 11 (3), 123–135.

Kamranzad, F., Memarian, H., & Zare, M. (2020). Earthquake risk assessment for Tehran, Iran. *International Journal of Geo-Information*, 9 (7), 430. https://doi.org/10.3390 /ijgi9070430

Laucelli, D., & Giustolisi, O. (2014). Vulnerability assessment of water distribution networks under seismic action. *Journal of Water Resources Planning and Management*, (6)141 .

Li, Q., Guo, E., & Yu, T. (2019). Study on seismic safety evaluation of water supply pipeline networks. *Cluster Computing*, 22, 6647-665.

Li, W., Mazumder, R. K., Bastidas-Arteaga, E., Li, Y. (2024). Seismic performance evaluation of corroded water distribution systems considering firefighting. *Journal of Water Resources Planning*, 1-22.

Liu, T., Zhang, L., Wang, M., & Zhou, M. (2022). A review of seismic resilience metrics for water distribution systems. *Scientific Reports*, 12(1), 1-15.

Mirzaei, N., & Gheytanchi, M. R. (2002). Basic parameters of earthquakes in Iran. Daneshnegar.

Mousavi Bafrouei, S. H., Mirzaei, N., Shabani, E., & Eskandari Ghadi, M. (2014). Seismic hazard zoning in Iran and estimating peak ground acceleration for provincial capitals. *Physics of the Earth and Space*, 40 (4), 15–38. https://doi.org/10.22059/jesphys.2014.52404

Nariman, A., Fattahi, M. H., Talebbeydokhti, N., & Sadeghian, M. S. (2021). Assessment of hydraulic resilience and return time of Sadra city water distribution network under earthquake. *Iran-Water Resources Research*, 17 (2), 204–221.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]

O'Rourke, M. J., & Liu, X. (2001). Seismic design of buried pipelines. National Earthquake Engineering Simulation Consortium.

Permanent Committee for Revising the Iranian Code of Practice for Seismic Resistant Design of Buildings. (2014). Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (Standard No. 2800, 4th ed.). Road, Housing and Urban Development Research Center.

Rahimkhani, A., Ghodrati Amiri, G., & Mohammadpour Lima, M. (2009). Seismic evaluation of buried pipelines under the effect of peak ground velocity (PGV) [Conference presentation]. Second Conference on Oil and Gas Pipelines, Razi International Conference Center, Tehran, Iran.

Samadian, B., & Fakher, A. (2019). Providing geological and geotechnical information for the construction site of Sanandaj city. *Journal of Engineering Geology*, 13 (1), 1–20.

Shadabfar, M., Zhang, Zh., & Li, Y. (2023). Seismic vulnerability assessment of water supply networks in Qazvin, Iran. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 171,108954.

Sheikhali, M., Asadollahfardi, G., & Emamzadeh, S. S. (2020). Vulnerability assessment of water supply facilities using the integrated RAMCAP and AHP method. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, 52 (5), 1205–1220.

Shojaeian, A., Farahani, S., Behnam, B., & Mashayekhi, M. R. (2021). Seismic resilience assessment of Tehran's southern water transmission pipeline using GIS-based analyses. *Numerical Methods in Civil Engineering*, 6(2), 93-106. https://doi.org/10.52547/nmce.6.2.93

Statistical Center of Iran. (2016). Results of the 2016 National Population and Housing Census: Tehran. Statistical Center of Iran.

Toprak, S., Nakirek, M., Koç, A., & Katakli, H. (2015). Seismic damage assessment of water networks: Van earthquake case study. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 14(3),455-468.

Toprak, S., &Taskin, F. (2007). Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking. *Natural Hazards*, 40(1),1-24 .

Toprak, S., Taskin, F., & Koc, A. C. (2009). Prediction of earthquake damage to urban water distribution systems: A case study for Denizli, Turkey. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 68, 499-510.

Wang, Y., O'Rourke, T. D., & Hall, J. F. (2010). Fragility functions for water distribution systems under seismic loading. *Earthquake Spectra*, 26(4), 1161-1181.

Yazdabad, H., Kabiri-Samani, A. R., & Ghaffari, M. (2018). Seismic behavioral fragility curves of concrete cylindrical water tanks for sloshing cracking and wall bending. *Earthquakes and Structures*, 14(2), 95-102.

Yousefparish, Y. (2015, December 14). Investigating the effect of earthquake on urban water distribution networks [Conference presentation]. International Conference on Research in Science and Technology, Kuala Lumpur, Malaysia.

Zhao, X., Chen, Zh., Gong, H. (2015). Effects comparison of different resilience enhancing strategies for municipal water distribution network: A multidimensional approach. *Mathematical Problems in Engineering*,1-16.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-03]
[DOR: 20.1001.1.24237892.1404.12.4.6.9]
[DOI: 10.66224/jsaeh.12.4.4]