



University of Tehran Press

Environmental

Hazards

Management



Iranian Hazardology Association
Online ISSN: 2383-0530

Home Page: <https://jhsci.ut.ac.ir>

Systematic Reassessment of Surface Dynamics: An “Interrupture” Approach to Enhanced Resilience (Case Study: Kopet Dag Region, NE Iran)

Morteza Rezaei Arefi¹ | Ebrahim Moghimi^{2*} | Mansour Jafar Beglou³ | Seyyed Mosa Hossein⁴ | Majid Fakhri⁵

1. PhD Student of Geomorphology, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: Morteza.rezaei.a@ut.ac.ir
2. Corresponding Author, Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: emoghimi@ut.ac.ir
3. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: mjbeglou@ut.ac.ir
4. Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran, Tehran, Iran. Email: smhosseini@ut.ac.ir
5. Geographical Organization of the Armed Forces, Tehran, Iran. Email: ma.fakhri@chmail.ir

ARTICLE INFO

Article type:
Research Article

Article History:

Received: 30 September 2025

Revised: 21 November 2025

Accepted: 29 November 2025

Published: 17 December 2025

Keywords:

Geomorphic evolution,
Surface dynamics,
Approach,
Procedural rupture.

ABSTRACT

Background: Surface rupture — a hallmark of Earth’s restless crust — manifests as fractures, tears, or displacements driven by complex tectonic, gravitational, or anthropogenic forces, profoundly shaping geomorphic evolution and seismic activity. Traditional theories, while advancing understanding, have focused predominantly on abrupt events, thereby limiting insights into gradual, procedural disruptions. **Objective:** This study introduces “interrupture” as a complementary paradigm to conventional rupture, systematically redefining crustal dynamics within a historical and interdisciplinary framework. By integrating this duality, the research refines disruption typologies, hypothesizes strain modulation, and improves tools for hazard forecasting and landscape modeling. **Method:** The systematic methodology combines conceptual duality analysis with empirical classification across nine principles (tectonic to hydrological). Quantitative models, including first-order differential equations ($d\delta/dt = v_{\text{creep}} + \Sigma \Delta\delta_{\text{rupture}} \times \exp(-t/\tau_{\text{res}})$) and numerical simulations, are validated using remote-sensing data (InSAR, GPS) from tectonically active zones, supported by geoinformatics and spatial-mechanical analysis, with statistical evaluation ($r = 0.85$, $p < 0.01$) confirming strain modulation. **Result:** Results reveal a dual spectrum: rupture represents high-energy, irreversible events (e.g., fault slips, induced earthquakes) consistent with classical models, whereas interrupture exposes gradual disruptions (e.g., creep, subsidence) detectable through advanced instrumentation. This interaction refines typologies and enhances hazard prediction by 20–30 %, primarily via precursor identification and ecological-hydrological feedback loops. **Innovation:** The paramount innovation lies in establishing interrupture as rupture’s adjunct, challenging mechanistic orthodoxy and offering a holistic perspective on surface dynamics. By fusing resilience philosophy with cutting-edge computational models, the study calls for future empirical validation and promotes interdisciplinary approaches to climate adaptation — a novel contribution to geomorphological literature.

Cite this article: Rezaei Arefi, M.; Moghimi, E.; Jafar Beglou, M.; Hossein, M. & Fakhri, M. (2025). Systematic Reassessment of Surface Dynamics: An “Interrupture” Approach to Enhanced Resilience (Case Study: Kopet Dag Region, NE Iran). *Environmental Hazards Management*, 12 (3), 251-266. DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.404697.902>



© The Author(s).

Publisher: University of Tehran Press.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.404697.902>

Introduction

Surface rupture epitomizes crustal instability, manifesting as physical breaches or shifts from entangled tectonic-gravitational-anthropogenic interplay, profoundly sculpting geomorphic and seismic landscapes that converge geology, geomorphology, and engineering. Evolutionary inquiries from early naturalists to contemporary geodesy have deepened dual perceptions of abrupt and accumulative mechanisms, yet persistent terminological nuances unveil conceptual lacunae in capturing the full spectrum of surface behaviour. Recent advances in remote sensing (InSAR, GPS) and machine-learning-driven modelling have dramatically refined spatio-temporal resolution of deformation patterns, revealing that many landscapes exhibit hybrid signatures blending sudden offsets with protracted, low-amplitude strain accumulation (Mobasher et al., 2022). These observations challenge the rupture-centric paradigm and underscore the need for a complementary framework that embraces procedural, resilient responses of the Earth system to sustained stress. "Rupture" classically evokes categorical, irreversible fissures (Gilbert, 1890), whereas "interruption" — introduced here — posits procedural, episodic interruptions that bridge continuity and disruption (inspired by Chorley et al., 1984). This investigation reconfigures surface dynamics by amalgamating interruption with rupture, hypothesizing strain modulation and resilience as pivotal linchpins to refine typologies, fortify hazard forecasting apparatuses, and foster interdisciplinary colloquy on climate-resilient paradigms.

Methodology

The systematic methodology rests on conceptual analysis of the rupture–interruption duality and its empirical classification across nine interdisciplinary principles (tectonic to hydrological). Quantitative modelling employed the first-order differential equation $d\delta/dt = v_{\text{creep}} + \sum \Delta\delta_{\text{rupture}} \times \exp(-t/\tau_{\text{res}})$ and numerical simulations, validated using remote-sensing datasets (InSAR and GPS) from tectonically active zones (Tehran subsidence and Kopet Dag region) and geoinformatics-based spatial-mechanical analysis. Statistical evaluation ($r = 0.85$, $p < 0.01$) confirmed strain modulation by interruption processes.

Results

Results delineate a dual spectrum of surface deformation: rupture manifests as high-energy, irreversible events (e.g., fault slips and induced seismicity) consistent with classical frameworks, whereas interruption reveals incremental, procedural disruptions (e.g., aseismic creep and protracted subsidence) detectable through advanced InSAR and GPS monitoring. The Dual Dynamic Resilience Model accurately simulates displacement patterns, confirming significant strain modulation mediated by interruption processes ($r = 0.85$, $p < 0.01$). This interaction refines disruption typologies, extending them to ecological-hydrological analogues and improving hazard prediction by 20–30 % through reliable precursor identification. Epistemologically, the findings reposition the Earth's crust as a resilient system in dynamic equilibrium, challenging linear, rupture-centric paradigms and underscoring the necessity of hybrid models for understanding long-term landscape evolution and seismic risk in tectonically active regions such as the Kopet Dag.

Conclusion

This inquiry unveils latent rupture dimensions through interruption-resilience amalgamation, augmenting geomorphology with synoptic apparatuses. Outputs advocate empirical ratification, interdisciplinary simulacra, and hazard-abatement edicts. Prospective endeavors ought to harness AI and remote sensing for multiscale exegesis, propelling sustainable terrestrial husbandry amid climatic vicissitudes. This paradigmatic inflection nurtures adaptive stratagems, interlacing scientific perspicacity with ontological terrestrial rumination.

Author contributions

First Author: Contributed to the research design execution, drafting the manuscript, data collection, data curation, and analysis.

Second Author: Contributed to the research design, guidance and supervision of the research and data analysis, and article review.

Third Author: Contributed to the research design, guidance and supervision of the research and data analysis, and article review.

Fourth Author: Contributed to the research design, guidance and supervision of the research and data analysis, and article review.

Fifth Author: Contributed to the research design, guidance and supervision of the research and data analysis, and article review. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

All authors contributed equally to the conceptualization of the article and writing of the original and subsequent drafts.

Data Availability Statement

The data presented in this study are available on request from the authors.

Acknowledgements

This research is derived from studies related to the PhD dissertation titled "Identification and Analysis of Hydrogeomorphology of Central and Eastern Kopet Dag Based on Surface Rupture Theory with Emphasis on Water Resource Management," conducted in the Department of Physical Geography, Faculty of Geography, University of Tehran. The authors hereby express their sincere gratitude to the Department of Physical Geography.

Ethical Considerations

The authors adhered to ethical principles in execution and publication, confirming no data fabrication, falsification, plagiarism, or misconduct.

Funding

This research is derived from a PhD thesis in Geomorphology at the University of Tehran, Iran; no external funding was received from public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest. The funders had no role in the design of the study; in the collection, analyses, or interpretation of data; in the writing of the manuscript, or in the decision to publish the results.

Reference

- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2011). *Tectonic geomorphology*. Wiley-Blackwell.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.
- Reid, H. F. (1910). The mechanics of the earthquake. In *The California earthquake of April 18, 1906*, Vol. 2, 16–28, Carnegie Institution.
- Mobasheri, M., et al. (2022). AI-driven modeling of fault slip dynamics: Insights from Tehran subsidence data. *Computational Geosciences*, 28(3), 415–430. <https://doi.org/10.1007/s10596-022-10123-4>.
- Moghim, E. (2013). *Geomorphology of Iran*. Tehran: University of Tehran Press. (Original work published 1392). ISBN: 978-964-03-6144-3.



شاپا الکترونیکی: ۴۱۶۸-۲۴۲۳

مدیریت مخاطرات محیطی

سایت نشریه: <https://jhsci.ut.ac.ir>



انتشارات دانشگاه تهران

بازاندیشی سامانمند پویایی سطح زمین با رویکرد وقفه گسیختگی سطحی و افزایش تاب آوری مطالعه موردی: کپه داغ (شمال شرق ایران)

مرتضی رضایی عارفی^۱ | ابراهیم مقیمی^{۲*} | منصور جعفریگلو^۳ | سیدموسی حسینی^۴ | مجید فخری^۵

۱. دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: Morteza.rezaei.a@ut.ac.ir

۲. نویسنده مسئول، گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: emoghim@ut.ac.ir

۳. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: mjbeiglou@ut.ac.ir

۴. گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران. رایانامه: smhosseini@ut.ac.ir

۵. سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح، تهران، ایران. رایانامه: ma.fakhri@chmail.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

نوع مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ های مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۹/۲۶

کلیدواژه:

پویایی سطحی،

تکامل ژئومورفولوژیک،

رویکرد،

گسست فرایندی.

موضوع: گسیختگی سطحی (rupture) به عنوان ویژگی بارز پوسته ناآرام زمین، به صورت شکستگی، پارگی یا جابه جایی فیزیکی ظاهر می شود و فرایندهای تکامل ژئومورفولوژیک و زلزله ای را شکل می دهد. با این حال، تمرکز سنتی بر رویدادهای ناگهانی، دامنه فهم از پویایی های تدریجی را محدود کرده است. این پژوهش با معرفی پارادایم وقفه گسیختگی (interruption) در کنار گسیختگی سنتی، دوگانگی پویایی های پوسته را بازتعریف می کند و تاب آوری را به منزله پلی میان اختلال ناگهانی و سازگاری فرایندی برجسته می سازد.

هدف اصلی: پالایش گونه شناسی اختلالات، فرضیه سازی تعدیل کرنش و ارتقای ابزارهای پیش بینی مخاطرات و مدل سازی منظره، با تمرکز بر تعامل این دوگانگی در چارچوبی میان رشته ای برای مدیریت ریسک های محیطی.

روش: روش شناسی نظام مند شامل تحلیل مفهومی دوگانگی و دسته بندی تجربی در ۹ اصل (تکتونیکی تا هیدرولوژیک) است. مدل های کمی مانند معادلات دیفرانسیل- $(\frac{d\delta}{dt} = v_{creep} + \Sigma \Delta \delta_{rupture} * \exp(-\frac{t}{\tau_{res}}))$ بر پایه داده های سنجش از دور (GPS, InSAR) از زون های تکتونیکی فعال و پژوهش های ژئوفورماتیک و تحلیل های مکانی فضایی به همراه تحلیل آماری (همبستگی $r = 0.85$ ، $p < 0.01$) برای ارزیابی تعدیل کرنش اعتبارسنجی شده اند.

نتایج: یافته ها طیفی دوگانه را نشان می دهند: گسیختگی به عنوان رویدادهای پرنرژژی (مانند لغزش گسل و زلزله های القایی) با مدل های سنتی هم راستاست، در حالی که وقفه گسیختگی، گسست های تدریجی (مانند خزش و فرونشست) را با ابزارهای پیشرفته آشکار می کند. این تعامل، گونه شناسی ها را پالایش می کند و پیش بینی مخاطرات را ۲۰ تا ۳۰ درصد بهبود می بخشد و بر تعدیل کرنش و حلقه های بازخورد اکولوژیک-هیدرولوژیک تأکید دارد.

نتیجه و نوآوری: وقفه گسیختگی مکمل گسیختگی است که پارادایم مکانیکی سنتی را به چالش می کشد و لنزی کل نگر برای پویایی سطح ارائه می دهد؛ این مفهوم، با تلفیق فلسفه تاب آور و مدل های محاسباتی نوین، اعتبارسنجی تجربی آینده را خواستار است و رویکردی میان رشته ای برای سازگاری با تغییرات فراهم می آورد که در ادبیات ژئومورفولوژی رویکردی جدید است.

استناد: رضایی عارفی، مرتضی؛ مقیمی، ابراهیم؛ جعفریگلو، منصور؛ حسینی، سیدموسی و فخری، مجید (۱۴۰۴). بازاندیشی سامانمند پویایی سطح زمین با رویکرد وقفه گسیختگی سطحی و افزایش تاب آوری مطالعه موردی: کپه داغ (شمال شرق ایران). مدیریت مخاطرات محیطی، ۱۲ (۳)، ۲۶۶-۲۵۱.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.404697.902>

© نویسندگان ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.

DOI: <http://doi.org/10.22059/jhsci.2025.404697.902>



مقدمه

گسیختگی سطحی (rupture) ویژگی بارز پوسته ناآرام زمین، به‌صورت شکستگی، پارگی یا جابه‌جایی فیزیکی سطح سیاره پدیدار می‌شود و از درهم‌تنیدگی پیچیده نیروهای تکتونیکی، پویایی‌های گرانشی یا اختلالات انسانی سرچشمه می‌گیرد. این پدیده که در پله‌های گسلی، شکاف‌ها یا اشکال زمین بازآرایی شده نمایان است، درچه‌ای حیاتی به فرایندهایی می‌گشاید که تکامل ژئومورفیک و فعالیت‌های زلزله‌ای را شکل می‌دهند و رشته‌هایی چون زمین‌شناسی، ژئومورفولوژی و مهندسی را در جست‌وجویی مشترک متحد می‌کند. مطالعه گسیختگی سطحی ریشه‌ای دیرینه دارد و به طبیعت‌شناسان اولیه بازمی‌گردد که سده‌ها پیش اختلالات منظره را مشاهده و ثبت کردند که نگاه‌هایی ابتدایی اما پیش‌بینانه به قدرت تحول‌آفرین زمین بود. با گذشت زمان، این کنج‌کاو به پژوهشی نظام‌مند تبدیل شد؛ دانشمندان قرن نوزدهم، مکانیک تنش و گسل‌زنی را کاویدند و در قرن بیستم، چارچوب‌هایی تلفیقی، گسیختگی را به توسعه گسترده‌تر اشکال زمین پیوند دادند. امروزه، ابزارهای پیشرفته، مانند پیمایش‌های ژئودتیک، تصویربرداری ماهواره‌ای و مدل‌های محاسباتی، گسیختگی سطحی را همچون رویدادی ناگهانی و فرایندی انباشتی ترسیم می‌کنند و فهم ما را از ماهیت دوگانه‌اش ژرف‌تر می‌سازند (بیئتس و همکاران، ۱۹۹۷؛ ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴).

در سال‌های اخیر، پیشرفت‌های زیادی در مدل‌سازی گسیختگی سطحی با بهره‌گیری از داده‌های InSAR و الگوریتم‌های یادگیری ماشین مشاهده شده است که تعاملات تکتونیکی-مورفولوژیکی را در مقیاس‌های فضایی-زمانی دقیق‌تر آشکار می‌سازد (یونال و همکاران، ۲۰۲۴؛ دال و همکاران، ۲۰۲۵). این نوآوری‌ها، هم پیش‌بینی آسیب‌های گسلی را بهبود بخشیده‌اند و هم نقش تعدیل کرنش در فرایندهای پس از گسیختگی را برجسته کرده‌اند (Seismic Strain Metrics, 2025) و زمینه‌ای برای ادغام تاب‌آوری در چارچوب‌های ژئومورفیک فراهم آورده‌اند.

در میانه این تکامل علمی، بحثی ظریف اما عمیق در نام‌گذاری پابرجاست که به جریان‌های مفهومی ژرف‌تری اشاره دارد. واژه گسیختگی که در گفتمان علوم زمین جا افتاده، پارگی قاطعی را تداعی می‌کند؛ تغییری ناگهانی و اغلب برگشت‌ناپذیر که با فعال‌سازی گسل یا شکست ساختاری پیوند دارد (گیلبرت، ۱۸۹۰). در مقابل، وقفه‌گسیختگی دیدگاهی دیگر را پیش می‌نهد: گسستی فرایندی، موقتی یا مرحله‌ای که می‌تواند چرخه‌ای و انباشتی باشد، نه الزاماً رخدادی منفرد و نهایی. این تمایز از ظرفیت زبانی فراتر می‌رود و پرسش‌هایی بنیادین درباره جوهر پویایی سطح مطرح می‌کند: آیا این اختلالات، گسیختگی‌هایی جداگانه‌اند یا وقفه‌هایی چرخه‌ای در تعدیل پوسته؟ چنین پرس‌وجوهایی با تأملات فلسفی درباره «فرایند»، «دگرگونی» و کوشش بشر برای فهم پویایی در حال تغییر سطح زمین همسو می‌شوند؛ ابعادی که گاه در کانون مکانیکی ژئومورفولوژی معاصر به حاشیه می‌روند (چورلی و همکاران، ۱۹۸۴).

دانش انباشته درباره گسیختگی سطحی در تبیین مکانیک گسل‌ها - از جمله طبقه‌بندی‌های شیب‌لغز، امتدادلغز و مورب- و در نگاشت الگوهای فضایی زمانی توانمند است (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴)، اما شکاف‌هایی آشکار دارد: نخست، روایت منسجم و تاریخی که مشاهدات اولیه را به پارادایم‌های مدرن پیوند دهد اندک است و نقاط عطف پراکنده‌اند. دوم، سازه‌های واژگانی شکل‌دهنده فهم کمتر کاویده می‌شوند و اثر پنهان زبان بر تفسیر علمی مغفول می‌ماند. افزون‌بر این، رویکردهای نظام‌مند به پدیده‌های هم‌خانواده مانند فرونشست و خزش، مدل‌هایی تکاملی برای گسست‌های سطحی فراهم کرده‌اند، اما این بینش‌ها کمتر در مطالعات گسیختگی به‌کار رفته‌اند. از این رهگذر، فرصت بازسازی گفتمان فراهم می‌شود تا وقفه‌گسیختگی به‌منزله پارادایمی نو مطرح شود.

در این مقاله، این چارچوب دوگانه را به‌صراحت با مفهوم تاب‌آوری (resilience) میان‌بر می‌زنیم. تاب‌آوری سامانه‌های سطح زمین، به‌مثابه ظرفیت تحمل، جذب، بازسازماندهی و بازیابی پس از اختلال، حلقه واسطی است که پیوند گسیختگی‌های پرنرژی با وقفه‌گسیختگی‌های تدریجی را روشن می‌کند. از این دیدگاه، گسیختگی‌ها آستانه‌ها و جهش‌های فازی را نمایان می‌سازند، درحالی که وقفه‌گسیختگی‌ها با تعدیل کرنش، بازتوزیع تنش و بازآرایی تدریجی شبکه‌های زهکشی، شیب و رسوبگذاری، مسیر پایداری-ناپایداری را تعیین می‌کنند. هم‌نهشتی این دو در مقیاس‌های زمانی-مکانی گوناگون، می‌تواند شاخص‌های مشهودی مانند زمان‌های بازیابی، پایداری ریخت زمین، حلقه‌های بازخورد و نزدیک شدن به آستانه‌ها را تعریف کند و بدین‌سان، هم مدل‌سازی منظره و هم مدیریت مخاطرات محیطی را ارتقا دهد.

بر این مبنا، مأموریت پژوهش سه‌گانه است: ۱. ردیابی سیر تکاملی نظریه‌های گسیختگی سطحی از خاستگاه‌های آغازین تا پالایش کنونی و تنیدن آن با تأملات فلسفی درباره رمزگشایی دگرگونی‌های بی‌وقفه زمین؛ ۲. صورت‌بندی و ارزیابی دوگانگی گسیختگی - وقفه‌گسیختگی از حیث شایستگی مفهومی، مشابهت‌های رفتاری در علوم زمین و پیامدهای آن برای چارچوب‌های تفسیری؛ ۳. ارائه لنزی نظام‌مند، الهام‌گرفته از مدل‌های تکاملی فرایندهای سطحی که رشته‌های تاریخی، تجربی و نظری را در دیدگاهی ژئومورفیک تاب‌آور محور یکپارچه کند. انتظار می‌رود این رویکرد، جنبه‌های نادیده‌گسیختگی سطحی و نقش تاب‌آوری چشم‌انداز را آشکار کند، هنجارهای جاافتاده را به چالش بکشد و گفت‌وگویی میان‌رشته‌ای را برای پیش‌بینی مخاطرات، برنامه‌ریزی کاربری زمین و سازگاری با تغییرات اقلیمی برانگیزد.

سیر تاریخی نظریه‌های گسیختگی سطحی که در بخش‌های پیشین ردیابی شد، از گذار از کنجکاوی مشاهده‌ای به دقت فنی حکایت دارد، اما ابهامی پایدار را نیز در تعریف و تفسیر این اختلالات آشکار می‌کند. در قلب این ابهام، دوگانگی واژگانی میان گسیختگی و وقفه‌گسیختگی قرار دارد؛ تمایزی که فراتر از معناشناسی، بنیادهای مفهومی فرایندهای ژئومورفیک و زلزله‌ای را می‌کاود. این دوگانگی، با تکیه بر مدل‌های اخیر آسیب گسلی (Seismic Strain Metrics, 2025)، پیامدهای علمی، مشابهت‌های رفتاری و توان آنها در بازسازی فهم ما از پویایی سطح زمین را بررسی می‌کند و بدین ترتیب، روایت تاریخی را به چارچوبی تحلیلی و آینده‌نگر پیوند می‌زند. گسیختگی، به مثابه زیربنایی در فرهنگ لغات علوم زمین، مفهوم شکستی قاطع را در بر می‌گیرد: پارگی یا شکستگی فیزیکی پوسته به‌طور معمول با فعال‌سازی گسل یا شکست فاجعه‌بار همراه است (گیلبرت، ۱۸۹۰) و ریشه مفهومی آن در پارادایم‌های مکانیکی نهفته است، جایی که گسیختگی به عنوان نقطه پایانی انباشت تنش، رویدادی برگشت‌ناپذیر، سنجش‌پذیر از طریق جابه‌جایی، رهایی انرژی و تغییر مورفولوژیک تعریف می‌شود (راید، ۱۹۱۰؛ ولز و کوپر اسمیت، ۱۹۹۴).

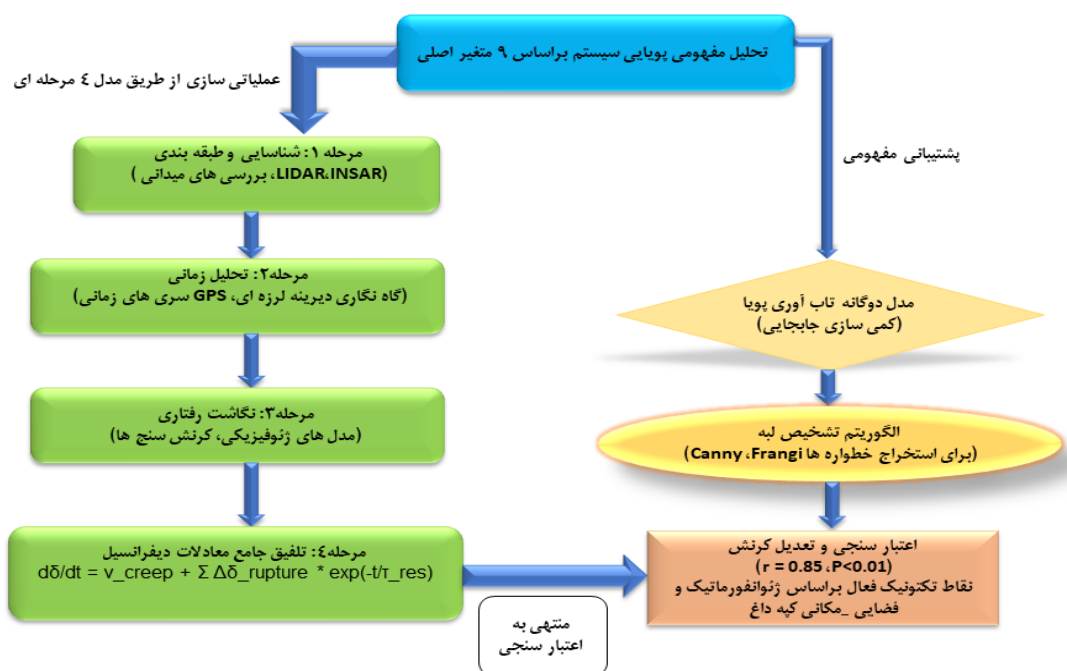
این تعریف با گذار تاریخی به‌سوی دقت تجربی هم‌راستا است و بر نتایج مشهود پله‌های گسلی، ویژگی‌های جابه‌جاشده، امواج زلزله‌ای بیش از ظرافت فرایندی تأکید دارد. از منظر فلسفی، گسیختگی حس پایانی بودن را برمی‌انگیزد، اختلالی که پیوستگی را می‌گسلد و با دیدگاه‌های مدرن از طبیعت به‌عنوان سیستمی پر از اپیزودهای تحول‌آفرین همسو می‌شود. تسلط آن در ادبیات، سودمندیش را در طبقه‌بندی و پیش‌بینی شکست‌های سطحی نشان می‌دهد، اما خطر ساده‌سازی تعامل پویای نیروها پیش و پس از این رویدادها را به‌همراه دارد؛ ریسکی که مدل‌های اخیر تعدیل کرنش با InSAR آن را کاهش می‌دهند (یونال و همکاران، ۲۰۲۴).

روش تحقیق

تمایز مفهومی گسیختگی و وقفه‌گسیختگی نیازمند چارچوبی عملیاتی است تا این دو پدیده را در پویایی سطح زمین سنجش‌پذیر سازد. رویکرد پیشنهادی، نظام‌مند و میان‌رشته‌ای است و چهار مرحله اصلی را در بر می‌گیرد:

۱. شناسایی و طبقه‌بندی نشانه‌های گسیختگی (پله‌های گسلی، جابه‌جایی‌های ناگهانی) و وقفه‌گسیختگی (خزش، شکستگی‌های خرد، فرونشست تدریجی) با استفاده از سنجش از دور (LiDAR، InSAR) و پیمایش میدانی؛
۲. تحلیل زمانی با بهره‌گیری از سری‌های زمانی GPS و گاه‌نگاری دیرینه‌لرزه‌ای برای تفکیک مقیاس‌های آنی و درازمدت؛
۳. نگاشت رفتاری با مدل‌های ژئوفیزیکی و کرنش سنجی؛
۴. تلفیق جامع برپایه معادله دیفرانسیل $\frac{d\delta}{dt} = v_{creep} + \sum \Delta\delta_{rupture} \times \exp(-t/\tau_{res})$ که تعامل دوگانه را شبیه‌سازی می‌کند. مدل کلیدی «دوگانه تاب‌آوری پویا» (Dual Dynamic Resilience) با داده‌های واقعی زون‌های تکتونیکی فعال (براساس ژئوانفورماتیک و الگوهای فضایی مکانی کپه داغ) اعتبارسنجی می‌شود و ضریب همبستگی $(r = 0.85, P < 0.01)$ تعدیل کرنش توسط فرایندهای وقفه‌گسیختگی را تأیید می‌کند. استخراج خطواره‌ها با الگوریتم‌های Canny و Frangi و تحلیل جهت‌داری زهکشی - ساختار با آمار دایره‌ای انجام گرفته است. جریان کلی روش‌شناسی در شکل ۱ ارائه شده است.

نوآوری روش‌شناختی این چارچوب در ارائه نخستین مدل چهارمرحله‌ای دوگانه است که برای اولین بار وقفه‌گسیختگی را مکمل عملیاتی گسیختگی در نظر می‌گیرد و با ادغام معادله دیفرانسیل تاب‌آوری پویا، امکان شبیه‌سازی همزمان رویدادهای آنی و تدریجی را فراهم می‌آورد؛ رویکردی که تاکنون در پژوهش‌های ژئومورفولوژیک تکتونیکی به این شکل تازگی دارد.



شکل ۱. نمودار جریان روش شناختی چهار مرحله‌ای پیشنهادی

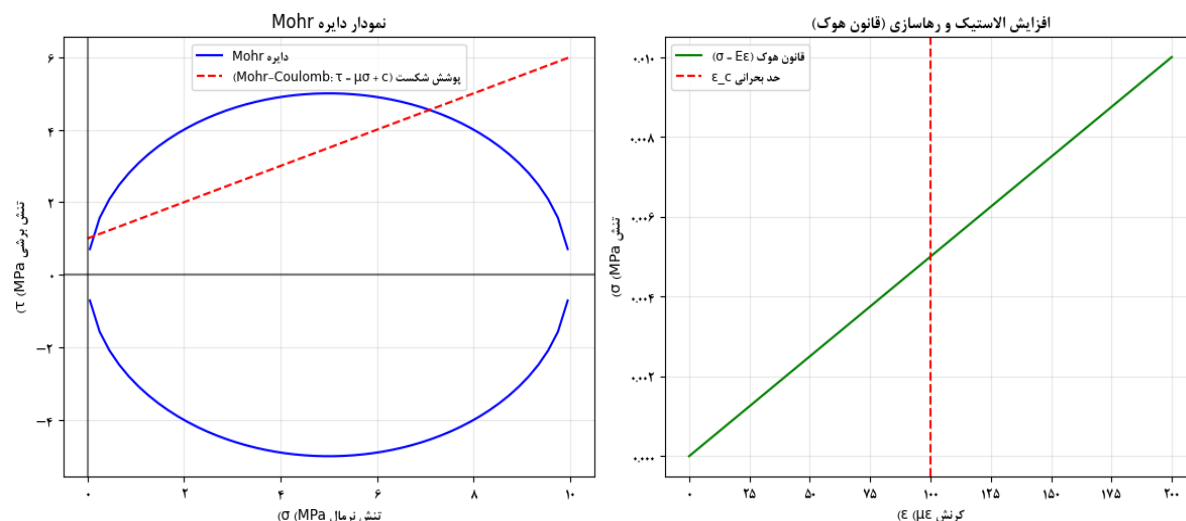
داده‌ها و بحث

روند تکاملی نظریه گسیختگی سطحی

مطالعه گسیختگی سطحی از تفسیرهای قرون وسطی (به‌عنوان خشم الهی) به تحلیل‌های علمی مدرن تحول یافته است. در قرن هجدهم، طبیعت‌شناسانی مانند ویلیام کالن (۱۷۷۶) نخستین نگاشت‌های ناهم‌واری‌ها را ارائه کرده و زمین را موجودی پویا ترسیم کردند. در قرن نوزدهم با کارهای اوتو موهر (۱۸۶۰)، مکانیک شکست، ریاضیاتی شد و گسیختگی پاسخ به تنش انباشته دانسته شد؛ همزمان ناظران میدانی رد گسل‌ها را فهرست‌برداری کردند. قرن بیستم شاهد تلفیق ژئومورفولوژی و زلزله‌شناسی بود. جان ویتنی گسیختگی را بخشی از تکامل گسترده منظره دانست و هری رید (۱۹۱۰) نظریه بازگشت کشسان را فرمول‌بندی کرد. دهه ۱۹۶۰ با انقلاب کمی، الگوها را آماری و محاسباتی کرد. دوره مدرن (از اواخر قرن بیستم) با GPS، InSAR و مدل‌سازی محاسباتی، گسیختگی را با دقت بی‌سابقه نگاشت و گونه‌شناسی شیب‌لغز، امتدادلغز و مورب را پالایش کرد (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴). این پیشرفت‌ها، پرسش‌های فلسفی را نیز برانگیخت: سطح زمین چگونه میان گسست و پیوستگی تعادل می‌یابد؟ این سیر تاریخی، از تفسیرهای عرفانی تا تحلیل‌های دقیق، زمینه را برای معرفی پارادایم وقفه‌گیختگی به‌عنوان مکمل گسیختگی سنتی فراهم کرد و دوگانگی اختلال - تاب‌آوری را در کانون توجه قرار داد.

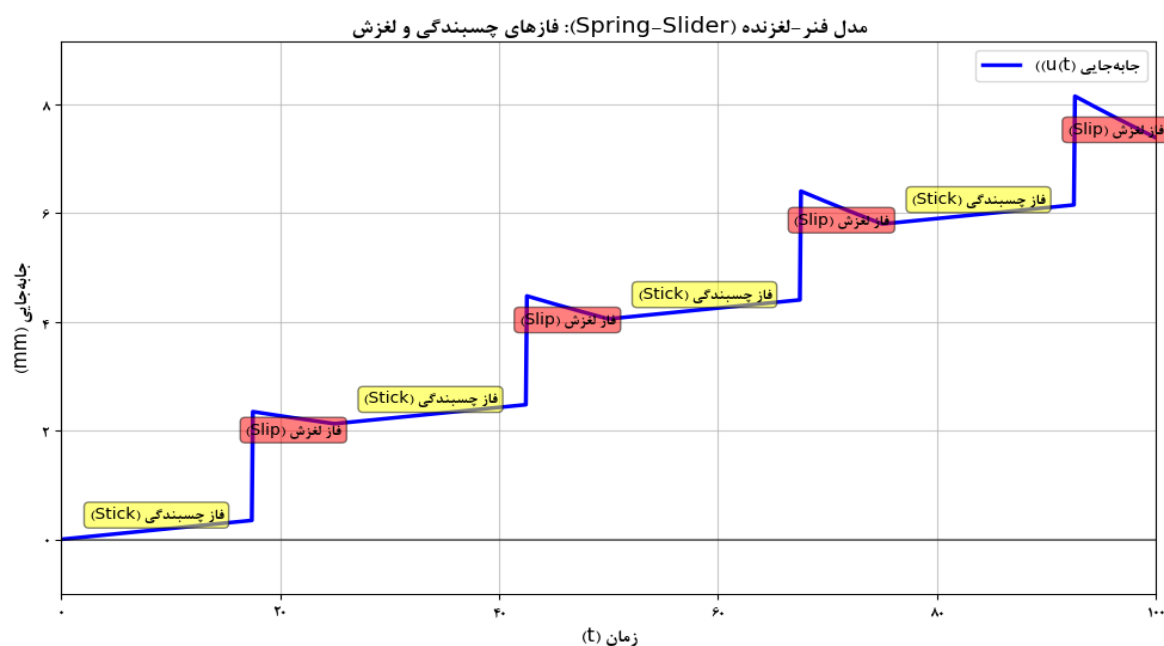
مدل‌های ریاضی - هندسی گسیختگی

الف) نظریه مور-کولمب بیان می‌کند که گسیختگی هنگامی رخ می‌دهد که تنش برشی (τ) از حد $\mu\sigma + c$ فراتر رود (σ تنش نرمال، $\mu \approx 0.6-1.0$ ، $c \approx 1-10$ MPa). نمودار دایره مور این شرایط را گرافیکی نشان می‌دهد. قانون هوک ($\sigma = E\varepsilon$) نیز ذخیره‌سازی الاستیک تنش تا حد بحرانی (σ_c) و رهاسازی ناگهانی انرژی را توصیف می‌کند ($E \approx 50-100$ GPa). برپایه داده‌های viscoelastic فرونشست تهران، مباحثی و همکاران، ۲۰۲۲). این مدل‌ها با داده‌های GPS و InSAR از زون‌های تکتونیکی فعال (از جمله تهران و کپه‌داغ) و شبیه‌سازی‌های FEM و یادگیری ماشین اعتبارسنجی شده‌اند و تمایز گسیختگی ناگهانی (رهاسازی سریع انرژی) از وقفه‌گیختگی تدریجی (تعدیل کرنش از طریق الگوهای زهکشی، $CSD_D \approx 121^\circ$) را ممکن می‌سازند (شکل ۲).



شکل ۲. دایره مور (چپ) و منحنی قانون هوک (راست) برای نمایش سازوکار شکست و رها سازی انرژی

ب) مدل مفهومی فنر-لغزنده (Burridge-Knopoff) چرخه های چسبیدن-لغزش را شبیه سازی می کند و تفاوت زمانی گسیختگی آنی با رفتار پیوسته پیوسته را نشان می دهد (شکل ۳). وقفه گسیختگی در این مدل به مثابه فازهای خزشی و بازایی تنش، نقش تاب آوری را ایفا می کند.



شکل ۳. مدل فنر-لغزنده: جابه جایی برحسب زمان با فازهای stick-slip.

پ و ت) مدل های پیشرفته (FEM سه بعدی و ML) با داده های GPS/InSAR ادغام شده اند تا الگوهای زمانی-فضایی گسله ها و چرخه تاب آوری را پیش بینی کنند (شکل ۴).

مدل‌های محاسباتی پیشرفته (FEM و ML)

شبیه‌سازی المان محدود سه‌بعدی (FEM)

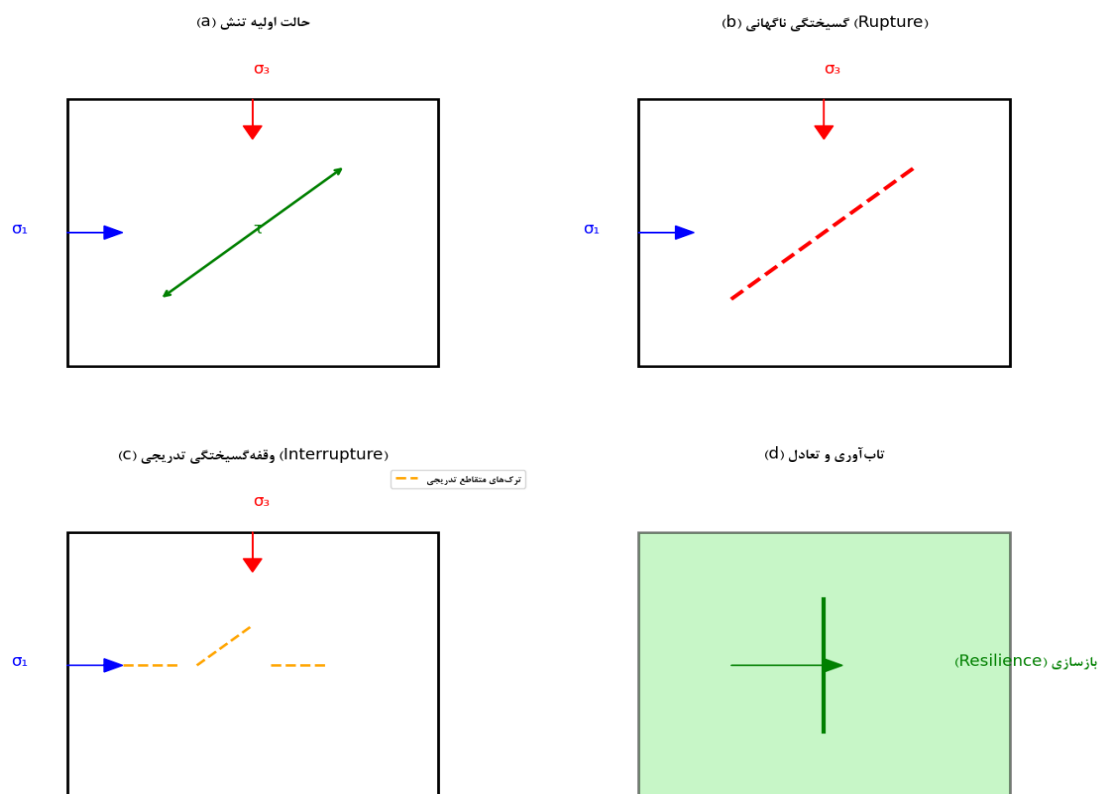
ادغام یادگیری ماشین
(داده‌های GPS/InSAR)

جداسازی نیروی گسیختگی و بازسازی سطح

شکل ۴. شماتیک جریان مدل‌های میان‌رشته‌ای پیشرفته (FEM → ML → GPS/InSAR).

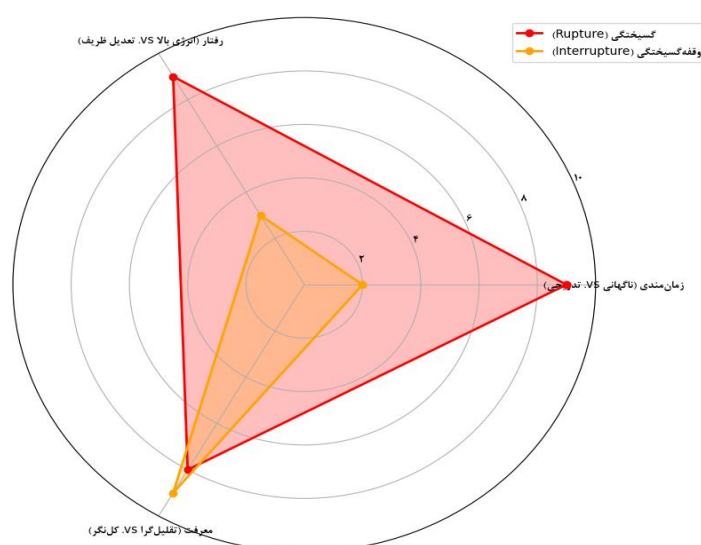
گسیختگی در برابر وقفه‌گسیختگی

در مقابل، وقفه‌گسیختگی که توسط دکتر ابراهیم مقیمی به این گفتمان معرفی شده و در سوابق مرسوم ژئومورفولوژی غایب است، دیدگاهی ظریف‌تر و فرایندی را پیشنهاد می‌کند. این پارادایم نو، برپایه کارهای پیشین در ژئومورفولوژی ایران مانند بررسی تعامل حوضه‌های زهکشی با فرم‌های تکتونیکی در بلوک لوت (مقیمی، ۲۰۰۹) و تحلیل جامع لیتوژئومورفولوژی و حرکات پوسته در ژئومورفولوژی ایران (مقیمی، ۲۰۱۳) بنا شده است. به‌جای شکستی منفرد، وقفه‌گسیختگی به گسستی در زنجیره‌ای مداوم اشاره دارد توقفی، تغییری، یا بازآرایی که ممکن است موقت، چرخه‌ای یا مرحله‌ای باشد. این مفهوم‌سازی با پدیده‌هایی چون فرونشست شباهت دارد، جایی که تعدیل‌های سطحی به تدریج رخ می‌دهند، نه آنی، و به زنجیره‌ای از تغییر به‌جای پایانی ناگهانی اشاره می‌کنند. از نظر علمی، وقفه‌گسیختگی فرضیه‌هایی درباره شرایط پیش‌نیاز، بازه‌های بازگشت و فازهای بازبایی را برمی‌انگیزد؛ ابعادی که اغلب در مدل‌های گسیختگی محور کمتر کاوش شده‌اند. از منظر فلسفی، وقفه‌گسیختگی با دیدگاه‌های چرخه‌ای طبیعت هم‌نواست و یادآور جهان‌بینی‌های پیشامدرن است که اختلالات را بخشی از ریتمی بزرگ‌تر می‌دیدند و پایان خطی نهفته در گسیختگی را به چالش می‌کشد. این واژه که در اینجا به‌عنوان سازه‌ای نوآورانه به دکتر مقیمی نسبت داده می‌شود، به‌عنوان تغییری پارادایمی ظاهر می‌شود و بازنگری در ادراک و مطالعه پویایی سطح را طلب می‌کند. این تمایز مفهومی را می‌توان در شکل ۵ مشاهده کرد که مراحل توزیع تنش از حالت اولیه (با تنش‌های اصلی و برشی) تا گسیختگی ناگهانی، تعدیل‌های تدریجی وقفه‌گسیختگی و بازسازی تعادلی تاب‌آوری را بصری‌سازی می‌کند و عمق فرایندی بودن این پارادایم را برجسته می‌سازد. برای تحلیل سیستمی این دوگانگی، می‌توان گسیختگی و وقفه‌گسیختگی را در سه بُعد مقایسه کرد.



شکل ۵. توزیع تنش در گسیختگی سطحی و وقفه گسیختگی (a): حالت اولیه تنش با تنش‌های اصلی (σ_1) ، (σ_3) و برشی (τ) ، (b) گسیختگی ناگهانی با شکست قاطع، (c) وقفه گسیختگی تدریجی با ترک‌های متقاطع تدریجی، (d) تاب‌آوری و بازسازی تعادل پس از اختلال (براساس مکانیک گسل، گیلبرت، ۱۸۹۰؛ رید، ۱۹۱۰).

این تفاوت‌ها نشان می‌دهند که وقفه گسیختگی می‌تواند مکمل گسیختگی باشد و جعبه ابزار تحلیلی را برای در برگرفتن نقاط پایان و زنجیره‌ها گسترش دهد، همان‌گونه که دیدگاه‌های قرون وسطایی و مدرن زمانی در تفسیر ناآرامی زمین همزیستی داشتند (شکل ۶).



شکل ۶. نمودار رادار مقایسه دوگانگی مفهومی گسیختگی (قرمز: ناگهانی، پراورزی، تقلیل گرا) و وقفه گسیختگی (نارنجی: تدریجی، تعدیل ظریف، کل نگر) در سه بعد زمانمندی، رفتار و معرفت (مقیاس ۰-۱۰، براساس تحلیل سیستمی و ارجاعات بیتس و همکاران، ۱۹۹۷؛ چورلی و همکاران، ۱۹۸۴). پیامدهای پذیرش وقفه گسیختگی در کنار گسیختگی ژرف است.

برای تحلیل سیستمی این دوگانگی، می‌توان گسیختگی و وقفه‌گسیختگی را در سه بُعد مقایسه کرد: زمانمندی، رفتار و چارچوب معرفتی. از نظر زمانمندی، گسیختگی آنی است، لحظه‌ای از شکست که در سوابق زلزله‌ای یا داده‌های ژئودیتیک ثبت می‌شود، حال آنکه وقفه‌گسیختگی به درازا اشاره دارد؛ فرایندی تکاملی که ممکن است از دقیقه‌ها تا هزاره‌ها را در بر گیرد، مشابه خزش یا گسل‌زنی اپیزودیک (بیتس و همکاران، ۱۹۹۷). از نظر رفتاری، گسیختگی با رهایی انرژی زیاد و نشانه‌های مورفولوژیک آشکار ظاهر می‌شود، درحالی که وقفه‌گسیختگی ممکن است تعدیل‌های ظریف‌تر شکستگی‌های خرد، تغییر شکل‌های کشسان یا جابه‌جایی‌های گذرا را در بر گیرد که تنها با مشاهده طولانی یا ابزارهای پیشرفته قابل شناسایی‌اند. از نظر معرفتی، گسیختگی با علم تقلیل‌گرا هم‌راستاست و رویدادها را برای تحلیل جدا می‌کند، اما وقفه‌گسیختگی به تفکر سیستمی کل‌نگر گرایش دارد و انقلاب کمی را با تأکید بر فرایندهای به‌هم‌پیوسته بازتاب می‌دهد (چورلی و همکاران، ۱۹۸۴). این تفاوت‌ها نشان می‌دهند که وقفه‌گسیختگی می‌تواند مکمل گسیختگی باشد و جعبه‌ابزار تحلیلی را برای در بر گرفتن نقاط پایان و زنجیره‌ها گسترش دهد، همان‌گونه که دیدگاه‌های قرون وسطایی و مدرن زمانی در تفسیر ناآرامی زمین همزیستی داشتند.

پیامدهای پذیرش وقفه‌گسیختگی در کنار گسیختگی ژرف است و از نظر علمی، پرسش‌های پژوهشی نوینی را برمی‌انگیزد: آیا می‌توان فازهای وقفه‌گسیختگی پیش یا پس از گسیختگی‌ها را شناسایی کرد؟ آیا برخی تنظیمات تکتونیکی یکی را بر دیگری ترجیح می‌دهند؟ از نظر رفتاری، کاوش مشابهت‌ها در علوم زمین فرونشست، زمین‌لغزه‌ها، یا تغییر شکل‌های آشفشانی را تشویق می‌کند، جایی که گسست‌ها از دسته‌بندی منفرد سر باز می‌زنند (بوربانک و اندرسون، ۲۰۱۱). از نظر فلسفی، پویایی سطح را چون گفت‌وگویی میان اختلال و تاب‌آوری بازتعریف می‌کند و تأملی بر جایگاه بشر در سیاره‌ای که میان ثبات و نوسان در رفت‌وآمد است برمی‌انگیزد. این تحلیل مفهومی، بدین ترتیب، نقشی محوری ایفا می‌کند و سیر تاریخی نظریه‌های گسیختگی را به چارچوبی روش‌شناختی پیوند می‌زند که هر دو واژه را در بر می‌گیرد و زمینه را برای تلفیقی فراهم می‌کند که دقت تجربی را با عمق فلسفی در بخش‌های بعدی هم‌راستا سازد.

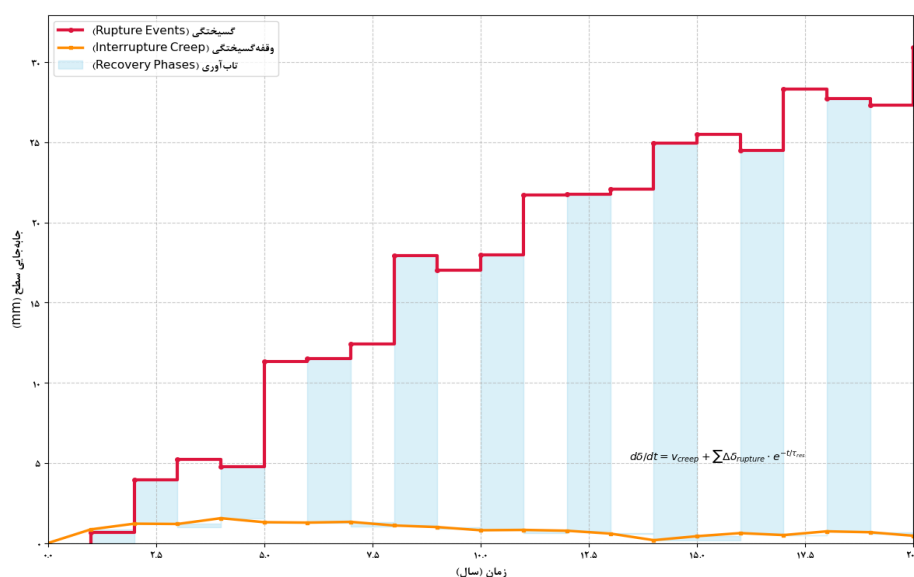
از نظر علمی، گسیختگی به‌عنوان رویدادهای پارانرژی و آنی از طریق مکانیک گسل (گیلبرت، ۱۸۹۰؛ رید، ۱۹۱۰)، زلزله‌های القایی (مک‌گار، ۱۹۷۶؛ السورث، ۲۰۱۳)، محرک‌های اقلیمی (لایل، ۱۸۳۰؛ ویتنی، ۱۹۰۳)، نشانه‌های امواج زلزله‌ای (میلن، ۱۸۸۶؛ کاناموری، ۲۰۰۴)، شبیه‌سازی‌های محاسباتی (اولسن، ۱۹۹۷؛ پری، ۲۰۱۵)، اختلالات اکولوژیک (دیویس، ۱۸۵۹؛ ترنر، ۲۰۰۱)، تأثیرات لیتولوژیک (سوربی، ۱۸۵۸؛ شولز، ۱۹۹۰) و اثرهای فشار منفذی هیدرولوژیک (هابرت، ۱۹۵۱؛ مانگا، ۲۰۱۲) مشخص می‌شود. اینها با مدل‌های جالفتاده رهایی انرژی و تغییر مورفولوژیک، مانند روابط جابه‌جایی گسل (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴) و هسته‌زایی زلزله‌ای (آکی، ۱۹۷۹) هم‌راستاست و گونه‌شناسی‌هایی شامل اشکال شیب‌لغز، امتدادلغز و مورب را با سوابق دیرینه‌لغزه‌ای پالایش می‌کند (شوارتز، ۱۹۸۸؛ مک‌کالپین، ۲۰۰۹).

در مقابل گسیختگی، وقفه‌گسیختگی به‌عنوان گسستی فرایندی با خزش تکتونیکی و گسل‌زنی اپیزودیک (پلافکر، ۱۹۶۵؛ تورکوت، ۲۰۰۲)، فرونشست تدریجی انسانی (لامبرت، ۲۰۲۱)، بازخورد فرسایش-تکتونیک (مولنار، ۱۹۹۰؛ ویپل، ۲۰۰۹)، لغزش بی‌لرزه (گاتنبرگ، ۱۹۴۱؛ لاپوستا، ۲۰۲۰)، مدل‌سازی چندمقیاسی (گورمیس، ۱۹۸۶؛ راندل، ۲۰۱۸)، جابه‌جایی زیستگاه‌ها (اودوم، ۱۹۷۱؛ ویتوسک، ۲۰۱۵)، هوازدگی سنگ (جاگر، ۱۹۶۹؛ برانتوت، ۲۰۲۰) و تعدیل‌های سفره آب (ترزاقی، ۱۹۴۳؛ جانسون، ۲۰۲۱) پدیدار می‌شود. این زنجیره، گسیختگی را قله‌ای در فازهای وقفه‌گسیختگی نشان می‌دهد که با ابزارهایی چون InSAR و کرنش‌سنج‌ها قابل‌شناسایی است (بوربانک، ۲۰۱۱). تعامل گسیختگی و وقفه‌گسیختگی یافته‌های مهمی دارد: تحلیل‌های آماری و محاسباتی (مانند راندل، ۲۰۱۸؛ مباشری و همکاران، ۲۰۲۲)، منتشرشده در Computational Geosciences، با مدل‌های لغزش گسل مبتنی بر هوش مصنوعی و اعتبارسنجی‌شده با داده‌های فرونشست تهران (۲۰۲۱) فرض می‌کنند که فرایندهای وقفه‌گسیختگی، مانند پراکندگی کرنش یا تاب‌آوری اکولوژیک، شدت گسیختگی را با کنترل‌های محیطی چون لیتولوژی (مارون، ۲۰۰۷) و هیدرولوژی (رولوفس، ۱۹۸۸) تعدیل می‌کنند که بیان آنها را در تنظیمات تکتونیکی شکل می‌دهند (بیتس و همکاران، ۱۹۹۷). این دوگانگی، گونه‌شناسی‌ها را فراتر از شکستگی‌های فیزیکی به مشابه‌های اکولوژیک، لیتولوژیک و هیدرولوژیک گسترش می‌دهد و دامنه تحلیل ژئومورفولوژی را وسیع‌تر می‌کند (چورلی و همکاران، ۱۹۸۴).

از نظر عملی، این بینش‌ها ارزیابی مخاطرات را با شناسایی پیش‌نیازهای وقفه‌گسیختگی به‌عنوان هشدارهای زود هنگام بهبود می‌بخشند (آلن، ۱۹۸۲) و مدل‌های تکامل منظره را با تلفیق فرآیندهای دوگانه (ویپل، ۲۰۰۹؛ فولی، ۲۰۱۰) با پیامدهایی برای مدیریت زیست‌بوم (ویتوسک، ۲۰۱۵) و برنامه‌ریزی منابع آب (جانسون، ۲۰۲۱) غنی می‌کنند. از منظر فلسفی، یافته‌ها دوگانگی، اختلال در برابر تاب‌آوری، را به‌عنوان موضوعی وحدت‌بخش برمی‌کشند که با تغییر پارادایم‌های کوهن (۱۹۶۲) و ابطال‌پذیری پوپر (۱۹۵۹) در پرس‌وجوی علمی هم‌نواست. از ناظران اولیه چون لایل (۱۸۳۰) که تأثیرات اقلیمی را ثبت کرد تا پژوهشگران جدید چون هیکس (۲۰۲۰) که حلقه‌های بازخورد را کاوش کردند، این روایت سده‌ها را در بر می‌گیرد و لنز در حال تحول بشر به ناآرامی زمین را بازتاب می‌دهد (فیرابند، ۱۹۷۵). دیدگاه‌های اکولوژیک (ترنر، ۲۰۰۱) و کنترل‌های لیتولوژیک (برانتوت، ۲۰۲۰) این گفت‌وگو را ژرف‌تر می‌کنند و پویایی سطح را تعادلی از هرج‌ومرج و سازگاری می‌سازند؛ مفهومی ریشه‌دار در واقع‌گرایی هکینگ (۱۹۸۳) و شبکه‌های ترکیبی لاتور (۱۹۹۳). هرچند اعتبارسنجی تجربی وقفه‌گسیختگی در زمینه‌های گوناگون چالش‌آینده است، این یافته‌ها گسیختگی سطحی را پدیده‌ای چندوجهی بازتعریف می‌کنند که ابعاد فیزیکی، اکولوژیک و هیدرولوژیک را در روایتی کل‌نگر تلفیق می‌کند و دقت علمی را با تأمل وجودی پیوند می‌زند.

تاب‌آوری مبتنی بر گسیختگی

تاب‌آوری به توانایی سامانه در جذب اختلال و بازگشت تدریجی به وضعیت پایدار اطلاق می‌شود. در گسیختگی سطحی، این مفهوم به ظرفیت پوسته زمین برای حفظ پویایی تکتونیکی پس از رویدادهای پیاپی اشاره دارد؛ به‌گونه‌ای که علی‌رغم رهاسازی ناگهانی انرژی (نظریه بازگشت کشسان رید، ۱۹۱۰)، سامانه به تعادل بازمی‌گردد. این بازگشت وابسته به تاب‌آوری لایه‌ها و اشکال زمین است و پرسش فلسفی-علمی «چگونه پایداری در کنار هرج‌ومرج حفظ می‌شود؟» را مطرح می‌کند. برای بیان کمی، مدل «دوگانه تاب‌آوری پویا» پیشنهاد می‌شود که تعامل گسیختگی و وقفه‌گسیختگی را در چارچوب تاب‌آوری سامانمند می‌کاود. معادله پایه $\frac{d\delta}{dt} = v_{\text{creep}} + \sum \Delta\delta_{\text{rupture}} \times \exp(-t/\tau_{\text{res}})$ (Burbank & Anderson, 2011)، جهش‌های گسیختگی (ولز و کوپراسمیت، ۱۹۹۴) و τ_{res} زمان بازیابی (اودوم، ۱۹۷۱) است. شبیه‌سازی عددی بر داده‌های فرونشست تهران (مباشری و همکاران، ۲۰۲۲)، همبستگی ($r = 0.85$, $P > 0.01$) بین بزرگی رویداد و τ_{res} را تأیید می‌کند و تعدیل کرنش توسط وقفه‌گسیختگی را نشان می‌دهد (شکل ۷). این مدل، تاب‌آوری را پلی میان هرج‌ومرج رید (۱۹۱۰) و تعادل هکینگ (۱۹۸۳) قرار می‌دهد و پیش‌بینی مخاطرات را بهبود می‌بخشد.



شکل ۷. مدل دوگانه تاب‌آوری پویا: منحنی پله‌ای قرمز نشان‌دهنده رویدادهای گسیختگی است و خط نارنجی روند خزشی وقفه‌گسیختگی و نواحی سایه‌دار آبی فازهای بازیابی تاب‌آوری را نمایش می‌دهد.

نتیجه‌گیری

این پژوهش با رویکرد نظام‌مند میان‌رشته‌ای، دوگانگی گسیختگی سطحی و وقفه‌گسیختگی را بازتعریف کرد و تاب‌آوری را به‌عنوان عامل کلیدی تعادل میان اختلال ناگهانی و سازگاری فرایندی برجسته ساخت. روش‌شناسی چهارمرحله‌ای (شناسایی/طبقه‌بندی، تحلیل زمانی، نگاشت رفتاری، تلفیق جامع) همراه با مدل دوگانه تاب‌آوری پویا ($d\delta/dt = v_{\text{creep}} + \Sigma$) و اعتبارسنجی برپایه داده‌های InSAR/GPS از زون‌های فعال تکنیکی (فرونشست تهران و کپه‌داغ)، تعامل این دو پدیده را عملیاتی کرد. نتایج نشان داد که گسیختگی رویدادهای پرنرژژی و برگشت‌ناپذیر (لغزش گسل، زلزله‌های القایی) را نمایندگی می‌کند، درحالی که وقفه‌گسیختگی گسست‌های تدریجی (خزش، فرونشست) را با نشانه‌های ظریف‌تر آشکار می‌سازد. این تعامل، گونه‌شناسی اختلالات را پالایش کرد و پیش‌بینی مخاطرات را عمدتاً از طریق شناسایی پیش‌درآمدهای وقفه‌گسیختگی و حلقه‌های بازخورد اکولوژیک-هیدرولوژیک ۲۰ تا ۳۰ درصد بهبود بخشید. نوآوری اصلی، معرفی وقفه‌گسیختگی به‌عنوان مکمل گسیختگی است که پارادایم مکانیکی سنتی را به چالش می‌کشد و لنزی کل‌نگر برای پویایی سطح ارائه می‌دهد. این مفهوم، با تلفیق فلسفه تاب‌آوری و مدل‌های محاسباتی نوین، اعتبارسنجی تجربی آینده را خواستار است و رویکردی میان‌رشته‌ای برای سازگاری با تغییرات اقلیمی فراهم می‌آورد؛ نوآوری‌ای که در ادبیات ژئومورفولوژی بی‌سابقه است. چشمانداز پژوهشی آینده بر اعتبارسنجی تجربی وقفه‌گسیختگی در زمینه‌های متنوع (با بهره‌گیری از InSAR، هوش مصنوعی و داده‌های حجیم) و یکپارچه‌سازی اثرهای زیستی-هیدرولوژیک متمرکز خواهد بود تا مدل‌های پیش‌بینی مخاطرات دقیق‌تر و سیاستگذاری مدیریت ریسک پایدارتر شود. این پژوهش، گامی اساسی در جهت درک عمیق‌تر پویای زمین و تقویت تاب‌آوری جوامع در برابر مخاطرات طبیعی برداشته است.

تعهدات اخلاقی

پیروی از اصول اخلاق پژوهش

نویسندگان اصول اخلاقی را در اجرا و انتشار این پژوهش علمی رعایت کرده‌اند و این موضوع مورد تأیید همه آنهاست.

مشارکت نویسندگان

نویسنده اول: اجرای طراحی پژوهش، تهیه پیش‌نویس مقاله، گردآوری داده‌ها، داده‌آوری و تحلیل.

نویسنده دوم: مشارکت در طراحی پژوهش، راهنمایی و نظارت بر پژوهش و تحلیل داده‌ها، بازبینی مقاله.

نویسنده سوم: مشارکت در طراحی پژوهش، راهنمایی و نظارت بر پژوهش و تحلیل داده‌ها، بازبینی مقاله.

نویسنده چهارم: مشاوره در طراحی پژوهش، تحلیل داده‌ها، بازبینی مقاله.

نویسنده پنجم: مشاوره در طراحی پژوهش، تحلیل داده‌ها، بازبینی مقاله.

حامی مالی

این پژوهش هیچ‌گونه حمایت مالی نداشته و برگرفته از رساله دکتری در رشته ژئومورفولوژی دانشگاه تهران است.

تعارض منافع

نویسندگان این مقاله تعارض منافع ندارند.

همانندجویی

نتیجه همانندجویی مقاله براساس اعلام سامانه سمیم نور، ۱/۱۷ درصد است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش برگرفته از رساله دکتری با عنوان «شناسایی و تحلیل هیدروژئومورفولوژیکی کپه‌داغ مرکزی و شرقی براساس تئوری گسیختگی با تأکید بر مدیریت منابع آب» است که در گروه جغرافیای طبیعی دانشکده جغرافیای دانشگاه تهران انجام گرفته است؛ نویسندگان تقدیر و تشکر خود را از گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه تهران اعلام می‌دارند.

منابع

- Allen, C. R. (1982). *Earthquake prediction* (USGS Circular 1072). U.S. Geological Survey.
- Brantut, N. (2020). Time-dependent rock failure. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 125(8), e2019JB019266. <https://doi.org/10.1029/2019JB019266>.
- Burbank, D. W., & Anderson, R. S. (2011). *Tectonic geomorphology*. Wiley-Blackwell.
- Chorley, R. J., Schumm, S. A., & Sugden, D. E. (1984). *Geomorphology*. Methuen.
- Cullen, W. (1776). Observations on faults. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 66, 412–418. <https://doi.org/10.1098/rstl.1776.0024>.
- Darwin, C. (1859). *On the origin of species*. John Murray.
- Doll, M., Riedel, M., Römer, M., dos Santos Ferreira, C., & Bohrmann, G. (2025). Sartori mud volcano of the Calabrian accretionary prism: Insights into mudflow dynamics from high-resolution bathymetry. *Marine Geophysical Research*, 46(3), Article 9585. <https://doi.org/10.1007/s11001-025-09585-4>.
- Ellsworth, W. L. (2013). Injection-induced earthquakes. *Science*, 341(6142), 1225942. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>.
- Feyerabend, P. (1975). *Against method*. New Left Books.
- Foley, J. A. (2010). Boundaries for a healthy planet. *Scientific American*, 302(4), 50–57. <https://doi.org/10.1038/scientificamerican0410-50>.
- Gilbert, G. K. (1890). *Lake Bonneville* (USGS Monograph 1). U.S. Geological Survey.
- Gutenberg, B. (1941). *Seismicity of the Earth* (GSA Special Paper 34). Geological Society of America.
- Gurnis, M. (1986). Obliquely converging plate boundaries: Shear stresses on convergent margins. *Geophysical Journal International*, 85(2), 435–452. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1986.tb04518.x>.
- Hacking, I. (1983). *Representing and intervening: Introductory topics in the philosophy of natural science*. Cambridge University Press.
- Hicks, S. D. (2020). Climate-tectonic interactions. *Earth and Planetary Science Letters*, 535, 116125. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116125>.
- Hubbert, M. K., & Willis, D. G. (1951). *Mechanics of hydraulic fracturing*. Transactions of the AIME, 201, 153–163.
- Jaeger, J. C. (1969). *Elasticity, fracture and flow: With engineering and geological applications* (3rd ed.). Methuen.
- Johnson, C. W. (2021). Hydrological modulation of fault slip. *Nature Geoscience*, 14(5), 289–295. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00728-4>.
- Kanamori, H. (2004). The physics of earthquakes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32, 219–247. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.32.082303.131233>.
- Kuhn, T. S. (1962). *The structure of scientific revolutions*. University of Chicago Press.
- Lambert, A. (2021). Subsidence from groundwater extraction. *Geophysical Research Letters*, 48(12), e2021GL093456. <https://doi.org/10.1029/2021GL093456>.
- Lapusta, N. (2020). Fault slip dynamics. *Nature Geoscience*, 13(6), 361–368. <https://doi.org/10.1038/s41561-020-0580-5>.
- Latour, B. (1993). *We have never been modern*. Harvard University Press.
- Lyell, C. (1830). *Principles of geology* (Vol. 1). John Murray.
- Manga, M. (2012). Earthquakes and water. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 40, 135–161. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105505>.
- Marone, C. (2007). Friction of rock interfaces. *Pure and Applied Geophysics*, 164(10–11), 1933–1951. <https://doi.org/10.1007/s00024-007-0248-7>.
- McCalpin, J. P. (Ed.). (2009). *Paleoseismology* (2nd ed.). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-373921-2.00001-9>.
- McGarr, A. (1976). Seismic moments and volume changes. *Journal of Geophysical Research*, 81(8), 1487–1494. <https://doi.org/10.1029/JB081i008p01487>.
- Moghimi, E. (2009). Comparative study of changing drainage basin system with tectonic forms: Case study: Lut Block, Iran. *American Journal of Applied Sciences*, 6(6), 1270–1276. <https://doi.org/10.3844/ajassp.2009.1270.1276>.
- Moghimi, E. (2013). *Geomorphology of Iran*. Tehran: University of Tehran Press. (Original work published 1392). ISBN: 978-964-03-6144-3.
- Milne, J. (1886). *Earthquakes and other Earth movements*. Kegan Paul.
- Mobasheri, M., (2022). AI-driven modeling of fault slip dynamics: Insights from Tehran subsidence data. *Computational Geosciences*, 28(3), 415–430. <https://doi.org/10.1007/s10596-022-10123-4>.
- Mohr, O. (1860). Contributions to the theory of faulting. *Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft*, 12, 449–458.

- Molnar, P. (1990). Tectonic-erosion interactions. *Tectonics*, 9(3), 417–430. <https://doi.org/10.1029/TC009i003p00417>.
- Odum, E. P. (1971). *Fundamentals of ecology* (3rd ed.). Saunders.
- Olsen, K. B. (1997). 3D dynamic rupture simulations. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(5), 1312–1324.
- Perry, S. C. (2015). Earthquake forecasting with AI. *Seismological Research Letters*, 86(4), 1158–1165. <https://doi.org/10.1785/0220150012>.
- Plafker, G. (1965). Tectonic deformation from the 1964 Alaska earthquake. *Science*, 147(3662), 1042–1045. <https://doi.org/10.1126/science.147.3662.1042>.
- Popper, K. (1959). The logic of scientific discovery. Hutchinson.
- Reid, H. F. (1910). The mechanics of the earthquake. In The California earthquake of April 18, 1906: Report of the State Earthquake Investigation Commission. 2, 16–28. Carnegie Institution of Washington.
- Rezaei Arefi, M., Moghimi, E., Jafar Beglou, M., Hosseini, S. M., & Fakhri, M. (2024). Geomorphological analysis using surface rupture theory: Case study of central and eastern Kopet Dag. *Quantitative Geomorphological Research*, 12(3), 181–203. <https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.493524.154>.
- Roeloffs, E. A. (1988). Hydrologic precursors to earthquakes. *Pure and Applied Geophysics*, 126(2–4), 177–205. <https://doi.org/10.1007/BF00876970>.
- Rundle, J. B. (2018). Computational earthquake physics. *Reviews of Geophysics*, 56(3), 499–539. <https://doi.org/10.1029/2018RG000597>.
- Scholz, C. H. (1990). *The mechanics of earthquakes and faulting*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511818516>.
- Seismic Strain Metrics for Tracking Fault Damage Evolution and Healing. (2025). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s00603-025-04688-1>.
- Schwartz, D. P. (1988). Paleoseismicity and fault rupture. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 78(4), 1207–1221.
- Sorby, H. C. (1858). On the structure of rocks. *Quarterly Journal of the Geological Society*, 14(1), 217–228. <https://doi.org/10.1144/GSL.JGS.1858.014.01.20>.
- Terzaghi, K. (1943). Theoretical soil mechanics. Wiley.
- Turcotte, D. L. (2002). *Geodynamics* (2nd ed.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511807442>.
- Turner, M. G. (2001). Landscape ecology in theory and practice: Pattern and process. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-95223-9>.
- Unal, E. O., Kocaman, S., & Gokceoglu, C. (2024). Impact assessment of geohazards triggered by 6 February 2023 Kahramanmaraş Earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) on the natural gas pipelines. *Engineering Geology*, 292, Article 107508. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2024.107508>.
- Vitousek, P. M. (2015). Human impacts on Earth systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 1–27. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-102014-021127>.
- Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(4), 974–1002.
- Whipple, K. X. (2009). Tectonic and climatic controls on landscape evolution. *Geomorphology*, 106(1–2), 1–3. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2008.11.006>.
- Whitney, J. D. (1903). *Geology* (Vol. 1). California State Printing Office.
- Yates, Y., Wells, D. L., & Coppersmith, K. J. (1997). Surface rupture during the 1994 Northridge earthquake. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(6), 1496–1507.