



"Fractal Analysis of Geometric Turbulence in Clay Microforms of the Eshtehard Plain Using the Perimeter-Area Model"

Rana Norouzi¹ , Sayyid Morovat Eftekhari² , Ali Amadabadi³

1. (Corresponding Author) Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, University of Kharazmi Tehran, Iran.

Email: ra.norouzi@yahoo.com

2. Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran.

Email: Eftekhari@khu.ac.ir

3. Department of Geomorphology, Faculty of Geographical Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran

Email: ahmadabadi@khu.ac.ir

Article Info

Article Type:

Research Article

Article History:

Received:

29 Nov 2025

Received in revised form:

18 Jan 2026

Accepted:

15 Mar 2026

pp.117-136

Keywords:

Eshtehard Plain,
Fractal,
Microform,
Perimeter-Area Model,
Mud Cracks.

ABSTRACT

Desert plains such as the Eshtehard Plain, owing to their distinctive geomorphological settings and high sensitivity to human activities and climatic variability, are prone to surface instabilities. This study applies fractal analysis to quantify geometric turbulence and complexity in clay-salt microforms (especially mud cracks) as short-term recorders of environmental change, using the perimeter-area model. Fieldwork was conducted in winter 1403 (2024/2025), during which 403 microforms were photographed; 208 samples with clearly identifiable boundaries were selected for analysis. Microform area (A) and perimeter (P) were measured with AutoCAD, and the perimeter-area fractal dimension (DAP) was computed; logarithmic P-A plots and correlation coefficients were used to evaluate the degree of geometric turbulence and surface instability associated with subsidence. Results show DAP values between 1.60 and 1.90 (mean = 1.75) with a correlation coefficient exceeding 0.96, indicating pronounced geometric complexity, disordered surface patterns, and significant geomorphological instability in the Eshtehard Plain, consistent with Imre's (2006) classification and implying a high subsidence risk. Compared with similar studies (e.g., Gavkhuni Playa and Howz-e Soltan), the elevated DAP suggests a shift in the morphogenetic system and a transition toward a new spatial/ecosystem phase, closely linked to intensive groundwater abstraction, persistent water-table decline, high salinity of surface water resources, and expansion of evaporative zones.

Cite this article: norouzi,R. , eftekhary,M. and ahmadabadi,A. (2026). "Fractal Analysis of Geometric Turbulence in Clay Microforms of the Eshtehard Plain Using the Perimeter-Area Model".. *Quantitative Geomorphological Research*, 14(4). 117-136.

Doi: [10.22034/gmpj.2025.542549.1577](https://doi.org/10.22034/gmpj.2025.542549.1577)

Extended Abstract

Introduction

Desert plains such as the Eshtehard Plain, due to their unique geomorphological characteristics and susceptibility to human activities and climatic changes, are among the areas sensitive to surface instabilities. Clay microforms, particularly mud cracks, serve as suitable tools for examining geometric turbulences and geomorphological dynamics owing to their recording of short-term environmental changes. Fractal analysis, as an advanced method for identifying complex and non-linear patterns, provides a more precise understanding of these changes. The present study aims to conduct a fractal analysis of the geometric turbulence in clay microforms of the Eshtehard Plain using the perimeter-area model, in order to investigate patterns of surface instability and their relationships with the region's geomorphological processes.

Methodology

This research was conducted in the winter of 1403 in the Eshtehard Plain to examine the geometric complexity and turbulence pattern of surface microforms. Images were captured from 403 clay-salt microforms, and 208 cases with distinct boundaries were selected. The area (A) and perimeter (P) of these microforms were precisely measured using AutoCAD software. The perimeter-area fractal model was applied to calculate the fractal dimension (DAP). The data were analyzed by plotting logarithmic charts of perimeter and area, along with calculating the correlation coefficient, to evaluate the level of geometric turbulence and surface instabilities resulting from subsidence.

Results and discussion

The results revealed that DAP values range from 1.60 to 1.90, with a mean of 1.75 and a correlation coefficient exceeding 0.96, indicating high geometric complexity and turbulence in the clay microforms of the Eshtehard Plain. These values align with

Imre's (2006) classification and suggest significant geomorphological instability and a high risk of subsidence in the region. The increased DAP, compared to similar studies (e.g., Gavkhuni Playa and Howz-e Soltan), reflects a transformation in the morphogenetic system and a transition to a new ecosystem. These patterns are closely linked to human activities, such as groundwater extraction, and climatic changes.

Conclusion

The Eshtehard Plain, identified as one of Iran's critical regions in terms of groundwater resources, is increasingly susceptible to geomorphological instabilities. The plain's complete reliance on groundwater, coupled with persistent declines in the water table, high salinity of surface water resources, and the expansion of evaporative zones, has led to significant structural turbulence at the surface. This study employs the perimeter-area fractal model to analyze the geometry of clay microforms in the study area, providing an index of surface turbulence. The obtained DAP values, ranging from 1.60 to 1.90 with a mean exceeding 1.75 and a correlation coefficient above 0.96 between the logarithm of perimeter and area, indicate a complex, disordered, and unstable surface pattern. Consistent with findings from Gavkhuni Playa and Howz-e Soltan (Ghahroudi et al., 2014, 2015), this fractal pattern reflects the region's transition to unstable geomorphological conditions and the emergence of a new spatial structure phase, resulting from the disruption of natural equilibria. If sustained, this phase could signify a transformation in the region's ecosystem. The geometric analysis portrays the observed turbulence not merely as surface forms but as an external manifestation of profound instability in the region's geological and climatic systems. The persistence of these conditions underscores the need for complementary interdisciplinary studies, including sediment core sampling for facies analysis, paleoclimatic and palynological studies to reconstruct past vegetation, and chemical analysis of surface and subsurface soils

(e.g., salinity, EC, pH, and nutrients). Furthermore, re-evaluating the perimeter-area model in future years and comparing results will likely enhance the model's validity and reliability. Additionally, modeling subsidence risks and analyzing associated morphological changes in the coming years will be a valuable and effective step toward developing management strategies for the Eshtehard Plain aquifer. Neglecting these issues could lead to severe consequences, some of which have been highlighted.

Funding

There is no funding support.

Authors' Contribution

The first author (PhD candidate) was responsible for conceptualization, methodology development, data collection, and drafting the original manuscript. The co-authors (supervisors) provided supervision, critical review, and final approval of the manuscript. All authors have agreed on all aspects of the work.

Conflict of Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Acknowledgments

The authors would like to express their sincere gratitude to the scientific consultants for their valuable insights and guidance throughout the course of this research.

تحلیل فرکتالی آشفته‌گی هندسی میکروفرم‌های گلی در دشت اشتهارد با استفاده از مدل محیط-مساحت

رعنا نوروزی^۱✉، سید مروت افتخاری^۲، علی احمدآبادی^۳

۱- نویسنده مسئول، گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: ra.norouzi@yahoo.com

۲- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: Eftekhari@khu.ac.ir

۳- گروه ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. رایانامه: ahmadabadi@khu.ac.ir

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی	دشت‌ها، دریاچه‌های کویری، پلایاها و لندفرم‌های مشابه آن در بسیاری از مناطق خشک و نیمه خشک، در نتیجه فعالیت‌های انسانی دچار اختلال و آشفته‌گی شدند. دشت اشتهارد به‌عنوان یکی از این محیط‌های حساس، با توجه به فرایندهای ژئومورفولوژیکی فعال و تغییرات سطحی پویا، نیازمند تحلیل‌های کمی نوین برای درک الگوهای آشفته‌گی سطحی است. تحت تأثیر فرایندهای ژئومورفولوژیکی فعال و تغییرات سطحی، از حساسیت بالایی برخوردار است. هدف این پژوهش، تحلیل الگوی هندسی و میزان آشفته‌گی میکروفرم‌های گلی در دشت اشتهارد با بهره‌گیری از مدل فرکتالی محیط-مساحت به عنوان یک ابزار شبیه‌سازی آشفته‌گی‌های ناپایدار سطحی است. این منطقه با وجود دارا بودن ویژگی‌های ژئومورفولوژیکی منحصربه‌فرد، تاکنون مطالعه فرکتالی مستقلاً را به خود ندیده است. به همین منظور، طی زمستان ۱۴۰۳، از ۴۰۳ میکروفرم سطحی تصویربرداری شد که از میان آن‌ها، ۲۰۸ فرم با مرزهای مشخص انتخاب و مساحت و محیط آن‌ها با دقت اندازه‌گیری شد. سپس با استفاده از رابطه لگاریتمی محیط و مساحت، بعد فرکتالی (DAP) برای هر فرم محاسبه و تحلیل شد. نتایج نشان داد مقادیر DAP در محدوده ۱.۶۰ تا ۱.۹۰ قرار دارند که بیانگر سطح بالای آشفته‌گی هندسی و پیچیدگی ساختاری در منطقه است. مقدار میانگین DAP برابر با ۱.۷۵ و ضریب همبستگی بالا (بیش از ۰.۹۶)، حاکی از اعتبار بالای مدل و تطابق داده‌ها با شرایط ناپایدار منطقه است. این الگوها بازتابی از تحول پویای سطح زمین و ناپایداری‌های ژئومورفولوژیکی در دشت اشتهارد به شمار می‌روند و می‌توانند به‌عنوان شاخص مؤثر در مطالعات مخاطرات محیطی و تغییرات اکولوژیکی مورد استفاده قرار گیرند.
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۰۸ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۰/۲۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۲۴ صص: ۱۱۷-۱۳۶	
واژگان کلیدی: دشت اشتهارد، فرکتال، میکروفرم، مدل محیط-مساحت، ترک‌های گلی	

استناد: نوروزی، رعنا، افتخاری، سید مروت و احمدآبادی، علی. (۱۴۰۴). تحلیل فرکتالی آشفته‌گی هندسی میکروفرم‌های گلی در دشت اشتهارد با استفاده از مدل محیط-مساحت. پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، ۱۴(۴)، ۱۱۶-۱۳۶.

Doi: 10.22034/gmpj.2025.542549.1577

مقدمه

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، پهنه‌های وسیعی از جمله دشت‌ها، دریاچه‌های کویری و پلایاها تحت فشارهای بی‌سابقه فعالیت‌های انسانی، دچار تخریب ساختاری و عملکردی شده‌اند. بر اساس پژوهش‌های جدید (مانند برنامه محیط زیست ملل متحد^۱، ۲۰۲۲)، برداشت‌های معدنی شتابان و اختلال در رژیم‌های هیدرولوژیکی (نظیر کاهش آب‌ورودی و تغییر الگوی جریان) به‌عنوان مهم‌ترین عوامل دگرگونی شتابنده در این ژئوسیستم‌های حساس عمل کرده‌اند. این تغییرات نه‌تنها تعادل مورفودینامیک سطحی را بر هم زده، بلکه بازسازی طبیعی چهره زمین را با اختلال مواجه ساخته است. این دگرگونی‌های محیطی، بستری را برای تغییرات ساختاری در میکروفرم‌های سطحی فراهم آورده‌اند. بر اساس دیدگاه‌های نوین ژئومورفولوژی سیستم‌های پیچیده، این تغییرات را می‌توان تجلی‌ای از رفتار آشوب‌گونه^۲ یا بی‌نظمی در سیستم شکل‌زایی دانست که در حال گذار به وضعیتی جدید است (فیلیپس^۳، ۲۰۲۲). تحلیل چنین سیستم‌های پیچیده‌ای از طریق هندسه فرکتالی، که قادر به کمی‌سازی ویژگی‌های خودتشابهی^۴ و پیچیدگی است، امکان‌پذیر می‌باشد (مندلبرت^۵، ۱۹۸۲؛ گودی و وایلز^۶، ۲۰۲۲). میکرولندفرم‌ها، به‌ویژه شبکه‌های ترک گلی^۷ به‌عنوان آرشيوهای طبیعی با حساسیت بالا عمل می‌کنند که تغییرات کوتاه‌مدت ناشی از مداخلات انسانی و فشارهای محیطی را با وضوح ثبت می‌نمایند (وگل و همکاران^۸، ۲۰۲۰). با توجه به تشدید تغییرات اقلیمی (مانند خشکسالی‌های ممتد) و اثرات تجمعی فعالیت‌های انسانی در مناطق خشک، و همچنین حساسیت ذاتی این ریزریخت‌ها، بررسی الگوهای هندسی حاکم بر آن‌ها پنجره‌ای به سوی درک تحولات سیستم می‌گشاید. از آنجا که میکرولندفرم‌ها به دلیل مقیاس کوچک خود در تعامل مستقیم و پیوسته با فرآیندهای اکولوژیکی و ژئومورفیک پیرامون قرار دارند، تغییرات را با دقت بالایی در مورفولوژی خود منعکس کرده و به‌عنوان آزمایشگاه‌های طبیعی ایده‌آلی برای پایش و مطالعه پویایی‌های سطح زمین عمل می‌کنند (اوپنگ^۹ و همکاران، ۲۰۱۵).

در چند دهه اخیر، تحلیل فرکتالی به‌عنوان روشی توانمند برای شناسایی ساختارهای پیچیده، غیرخطی و نامنظم در سامانه‌های ژئومورفولوژیکی، جایگاه ویژه‌ای در علوم زمین پیدا کرده است. ماهیت پویای بسیاری از فرآیندهای سطح زمین، از جمله فرونشست زمین، به گونه‌ای است که نمی‌توان آن‌ها را صرفاً با مدل‌های کلاسیک تبیین کرد. این در حالیست که با تشدید روند فرونشست زمین ناشی از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی در بسیاری از دشت‌های کشور، به‌ویژه در دشت‌های نیمه‌خشک و خشک مانند دشت اشتهارد، نیاز به تحلیل‌های ژئومورفولوژیکی عمیق‌تر که فراتر از روش‌های سنتی باشد، به‌شدت احساس می‌شود. روش‌های کلاسیک در مدل‌سازی خطر، اگرچه قادر به شناسایی نواحی پرریسک هستند، اما توان تبیین و درک ماهیت پیچیده تغییرات سطحی و هندسه مرزهای زمین‌ساختی را ندارند. در این میان، ورود مفاهیم پیشرفته‌ای همچون "فرکتال" و تحلیل "بعد فرکتالی"، امکان بازخوانی دقیق‌تر ساختارهای سطح زمین را از منظر هندسی، آماری و زیست‌محیطی فراهم کرده است در واقع مخاطرات طبیعی زیادی از قانون توانی (فرکتال) آماره‌های انداز – فراوانی تبعیت می‌کنند (قهرودی تالی و درفشی، ۲۰۱۵). این در حالیست مطالعات متعددی مؤید آن است که

1 UNEP

2 Chaotic

3 Phillips

4 Self-similarity

5 Mandelbrot

6 Goudie & Viles

7 Desiccation crack patterns

8 Vogel

9 Ewing

استفاده از بعد فرکتالی در بررسی هندسه پدیده‌های سطحی مانند ترک‌های سطحی، خطوط گسله و فرم‌های پلیگونی، امکان تحلیل دقیق‌تری از ساختارهای زمین‌شناختی و دینامیک تحول آن‌ها را فراهم می‌سازد. مندلبروت اولین مدل محیط-مساحت را در سال ۱۹۹۷ برای ارزیابی محیط‌ها و مساحت‌های درون یک مجموعه از پدیده‌های شکل یافته منظم، ایجاد کرد. این به‌اصطلاح مدل جزیره شکاف برای بررسی هندسه مناطق ابری و برای مشخص کردن درجه پیچیدگی اشکال ابرها مورد استفاده قرار گرفت (لویجوی، ۱۹۸۲). همچنین برای اندازه‌گیری سطوح شکستگی روی قطعات فلز توسط مندلبرت و همکاران (۱۹۸۴) استفاده شد. اگرچه، مدل گاهی در آزمایش‌های مشابه نتایج متناقض ارائه می‌داد (گودچیلد^۱، ۱۹۸۸)؛ بنابراین یک مدل توسعه‌یافته توسط لویجوی و اسپرترز^۲ در ۱۹۹۱ از نقطه‌نظر مالی فرکتالی ایجاد شد. در سال ۱۹۹۲ نیز سین و همکاران از هندسه فرکتالی برای محاسبه پارامترهای حوضه آبریز استفاده کردند. یک مدل عمومی فرکتالی نیز، در ارتباط با محیط‌ها و مساحت‌های مجموعه‌های شکل یافته منظم فرکتالی، با مساحت فرکتالی (A) و محیط فرکتالی (P)، بعدها توسط چنگ در (۱۹۹۵) پیشنهاد شد. این مدل عمومی برای جدا کردن آنومالی‌های ژئو

شیمیایی از زمینه توسط چنگ در (۱۹۹۵) مورد استفاده قرار گرفت. نمونه‌هایی از آشوب نیز در دره‌های رودهای هنجن و طامه منطقه کاشان بررسی شده است (رامشت، ۲۰۰۳). همچنین، الگوی فرکتالی در پلایاهای حوضه سلطان و گاو خونی بررسی شد که نتیجه‌اش در میکرو لندفرم‌های موجود در تالاب‌ها، گواه بی‌نظمی یا آشوب در سیستم شکل‌زایی حاضر و گذر آن به سیستمی پلایاگونه بود (قهرودی و همکاران، ۲۰۱۵ و ۲۰۱۴). نتایج بررسی فرکتال در الگوی سیلاب تهران نشان داد که به دلیل بی‌نظمی‌های رخ داده در تهران، استفاده متغیرهای موثر در بهینه‌سازی مسیر سیلاب تهران قابل استفاده نیست (قهرودی و درفشی، ۲۰۱۵).

در سال‌های اخیر، تئوری فرکتال به‌عنوان چارچوبی قدرتمند برای تحلیل کمی ریخت‌شناسی پدیده‌های طبیعی در مطالعات ژئومورفولوژی و هیدرولوژی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در این راستا، مصطفی‌زاده و همکاران (۱۴۰۲) با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای، الگوی فرکتالی پیکان‌رودهای رودخانه قره‌سو در استان اردبیل را بررسی کردند و ابعاد فرکتال بین ۱٫۸۵ تا ۲٫۲۳ را محاسبه نمودند که نشان‌دهنده درجات مختلف خودتشابهی و تأثیر شیب و دخالت‌های انسانی بر ریخت‌شناسی رودخانه است. در مطالعه‌ای دیگر، علمی‌زاده و همکاران (۱۴۰۱) با به‌کارگیری روش هورتون-استرالر، بعد فرکتال رودخانه زرنه‌رود را حدود ۱٫۹۸ برآورد کردند و آن را شاخصی برای تراکم زهکشی و پویایی مسیر رودخانه معرفی نمودند. همچنین، علیمزادی و همکاران (۱۳۹۷) با تعیین ابعاد فرکتال شبکه هیدروگرافی، رابطه معناداری بین افزایش عدد فرکتال (از ۱٫۰۶ تا ۱٫۶۵) و حساسیت سازندهای زمین‌شناسی به فرسایش نشان دادند و نقش مؤثر ویژگی‌های سنگ‌شناسی در شکل‌گیری الگوهای زهکشی را تأیید کردند. در مجموع، این پژوهش‌ها گویای قابلیت بالای هندسه فرکتال در کمی‌سازی، تحلیل و پیش‌بینی ریخت‌شناسی رودخانه‌ها، شبکه‌های آبراهه‌ای و حساسیت زمین‌شناسی است که می‌تواند مبنایی برای مدل‌سازی دقیق‌تر فرآیندهای دینامیکی محیطی قرار گیرد.

در چند دهه اخیر، تحلیل فرکتالی برای شناسایی ویژگی‌های غیرخطی و پیچیدگی در فرونشست و ساختارهای ژئومورفولوژیک، کاربرد گسترده‌ای یافته است. به عنوان نمونه، کوبین^۳ و همکاران (۲۰۲۴) با بررسی نشست ناشی از حفاری مترو در چین نشان دادند که بعد فرکتالی منحنی‌های نشست زمین، در صورت کاهش تعداد پایش، افت می‌کند؛

1 Slit- Island
2 Mandelbrot
3 Qin

امری که دقت تحلیل‌های غیرخطی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. آنان روشی ترکیبی شامل درون‌یابی^۱ و پالایش موجک^۲ و ارائه کردند که دقت محاسبه بعد فرکتالی را تا ۱۳ درصد افزایش داد. در مطالعه‌ای دیگر، وانگ^۳ و همکاران (۲۰۲۲) از بعد فرکتالی (DAP) به عنوان شاخصی برای سنجش پیچیدگی مرزهای فرونشست بهره بردند. نتایج حاکی از آن بود که افزایش DAP در نواحی با فعالیت انسانی شدیدتر قابل مشاهده است. همچنین یانگ^۴ و همکاران (۲۰۲۲) نیز در زمینه نشست ناشی از استخراج معادن، نشان دادند که با افزایش عمق، مقدار بعد فرکتالی کاهش یافته و بیانگر افزایش آشفستگی ساختاری و ریسک زمین‌شناختی است. در همین راستا، ژانگ^۵ و همکاران (۲۰۲۱) با تحلیل شبکه ترک‌های ناشی از استخراج زغال‌سنگ، دریافتند که مقدار بعد فرکتالی در عمق‌های میانی به بیشینه مقدار خود (۱.۴۱~) می‌رسد و سپس کاهش می‌یابد، که این امر می‌تواند نشانه‌ای از حداکثر بی‌نظمی هندسی و احتمال شروع ناپایداری سطحی و احتمال افزایش ریسک فرونشست باشد. در حوزه مدل‌سازی ژئومورفولوژیکی، سان^۶ و همکاران (۲۰۲۴) با بهره‌گیری از معیارهای فرکتالی برای انتخاب ویژگی‌های ورودی در مدل‌های پیش‌بینی هوشمند، توانستند دقت مدل را تا ۲۵ درصد افزایش دهند. با وجود این دستاوردها، تاکنون پژوهشی میان‌مدت که تحلیل فرکتالی ساختارهای ژئومورفولوژیکی مانند میکرولندفرم‌های پلیگون در پهنه‌های فرونشست‌زده (مانند دشت اشتهارد) را با رویکرد مورفودینامیکی و هدف تحلیل رفتار گذار سیستم بررسی کند، انجام نشده است. پژوهش حاضر این خلأ را با تأکید بر تحلیل مورفودینامیکی و محاسبه بعد فرکتالی پرچالش، پر خواهد کرد از این رو مدل فرکتالی محیط – مساحت به عنوان یک شاخص جهت بررسی تغییرات در ناپایداری ژئومورفولوژیکی و به مثابه یک ابزار شبیه‌سازی آشفستگی ناپایداری‌های سطحی برای قدم‌های اولیه شناخت شرایط منطقه مورد استفاده قرار گرفت. عبارتی هدف این پژوهش، بررسی میزان تغییرات ایجاد شده در میکروفرم‌های دشت اشتهارد بوده که برای اولین بار در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفته است که براساس آن می‌توان به وضعیت کلی منطقه دست یافت و پیامدهای احتمالی ناشی از فرونشست و کاهش آب زیرزمینی و تغییرات اکولوژیکی آن را بررسی کرد.

مواد و روش‌ها

دشت اشتهارد در حوضه آبریز رودخانه شور و در جنوب استان البرز با وسعتی معادل ۴۶۱ کیلومتر مربع در بین عرض جغرافیایی ۳۳° ۳۷' ۳۵" الی ۳۵° ۵۲' ۳۵" شمالی و طول جغرافیایی ۲۶° ۱۸' ۵۰" الی ۲۹° ۵۹' ۵۰" شرقی واقع گردیده است و در هفتاد کیلومتری غرب شهرستان کرج است که از شمال به ارتفاعات حلقه دره و محدوده شهرستان نظرآباد، از جنوب به ارتفاعات جارو و قزل‌باش، از شرق به رودخانه شور و از غرب به بومین الزهرا منتهی می‌شود. دشت اشتهارد در منطقه کم ارتفاع که مانند دشتی باریک و کشیده است، میان ارتفاعات شمالی و جنوبی قرار دارد و میانگین ارتفاعی آن از سطح دریای آزاد ۱۱۹۰ متر است. ۷۲ درصد از مساحت منطقه را سازند کواترنر، ۵۰ درصد آن را خاک آریدی سول و ۲۸ درصد خاک پلایا دربرگرفته هست که نسبت به تغییرات رطوبت بشدت حساس هستند (نوروزی و همکاران، ۱۴۰۵). از لحاظ زمین‌شناسی منطقه اشتهارد جزئی از مناطق آتشفشان‌های سنوزوئیک ایران است (آقاباتی، ۱۳۸۴) که در منطقه سازند کهن

1 Interpolation

2 Wavelet denoising

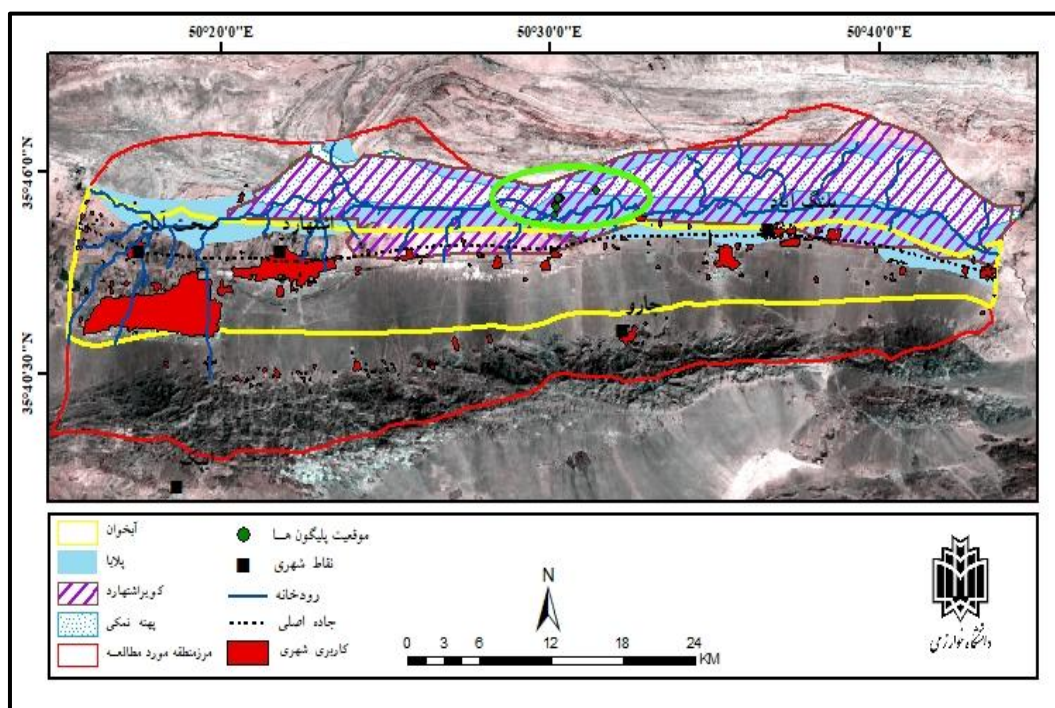
3 Wang

4 Yang

5 Zhang

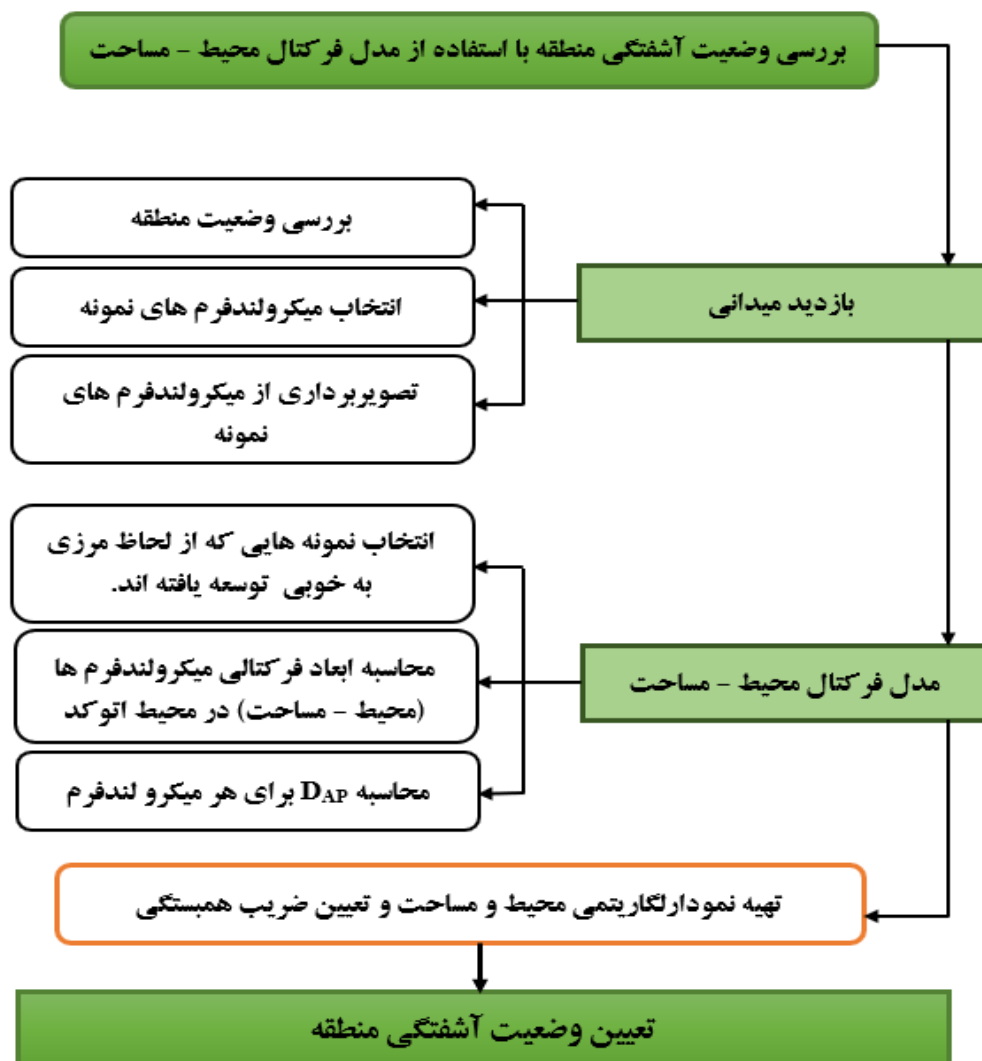
6 Sun

تفسیر پیامدهای ژئومکانیکی ناشی از فرونشست زمین^۱ که به‌طور عمده از برداشت بی‌رویه آب‌های زیرزمینی نشأت می‌گیرد فراهم می‌سازد و امکان ارزیابی آسیب‌پذیری مورفولوژیک منطقه را افزایش می‌دهد. به‌منظور شناخت دقیق شرایط منطقه و انتخاب میکرولندفرم‌های مناسب برای تحلیل، در زمستان ۲۰۲۴، با پیمایش در بخش مرطوب از ۴۰۳ فرم کوچک گلی - نمکی تصویربرداری شد. انتخاب فصل زمستان به این دلیل بوده که در اثر بارندگی، املاح نمک موجود روی میکرو فرم‌ها شسته شده و به راحتی قابل بررسی باشند (شکل ۲). برای بررسی الگوهای فرکتالی حاکم بر میکرو لندفرم‌ها ژئومورفولوژیک در دشت اشتهارد و برای انجام محاسبات، از تصاویر تهیه شده از ترک‌های گلی منطقه استفاده شد و مدل فرکتالی محیط - مساحت به کار برده شد. از بین ۴۰۳ نمونه، ۲۰۸ عدد از میکروفرم‌ها که از لحاظ مرزی به خوبی توسعه یافته بودند (شکل ۴) انتخاب و ابعاد آنها (محیط (P) و مساحت (A)) بطور دقیق در نرم افزار اتوکد محاسبه شد. این مقدار بیانگر میزان پیچیدگی مرز هر عارضه نسبت به سطح آن بوده و شاخصی برای سنجش میزان آشفستگی هندسی می‌باشد. سپس نمودارهای لگاریتمی محیط و مساحت که بیانگر ارتباط خطی بین لگاریتم محیط و لگاریتم مساحت میکرو لندفرم‌های منطقه است ترسیم می‌گردد و داده‌های آماری محاسبه می‌شود (شکل ۵) که در نهایت با استفاده از مقادیر DAP و تحلیل نمودارهای ترسیمی، وضعیت آشفستگی سطح منطقه بررسی شد. به‌طور کلی، افزایش مقدار DAP در نواحی خاص همانند دشت اشتهارد می‌تواند بیانگر حضور تغییرات مورفولوژیکی ناشی از نشست زمین، ترک‌خوردگی‌ها و ناپایداری سطحی باشد. فرآیند تحلیل، با هدف تعیین وضعیت آشفستگی منطقه براساس مراحل زیر اجرا گردید (شکل ۳).



شکل ۲: موقعیت میکرو لندفرم‌های نمونه (هم پوشانی میکرو لندفرم‌های گلی نمونه با کویر اشتهارد، پهنه نمکی، پایا)

1 Land subsidence



شکل ۳: مراحل بررسی فرکتالی میکرو لندفرم ها و تعیین وضعیت آشفتگی منطقه

مدل فرکتال محیط-مساحت (DAP): پل ارتباطی فرکتال و فرم زمین

یکی از مدل‌های پرکاربرد در محاسبه بعد فرکتالی در علوم زمین، مدل محیط-مساحت (Dimensional Area-Perimeter) یا (DAP) است. مدل فرکتال محیط-مساحت یک مدل ریاضی در ارتباط با محیط (P) و مساحت (A) فرکتال‌های شکل یافته مشابه است. این مدل به صورت معادله (۱) بیان شده است (چانگ، ۱۹۹۵):

که در آن P محیط و A مساحت و α نشان دهنده نسبت است. D_{AP} توان محیط-مساحت است، که می‌تواند به صورت معادله (۲) نشان داده شود که D_A و D_P برای ایجاد کلی محیط (P) و مساحت (A) می‌باشند:

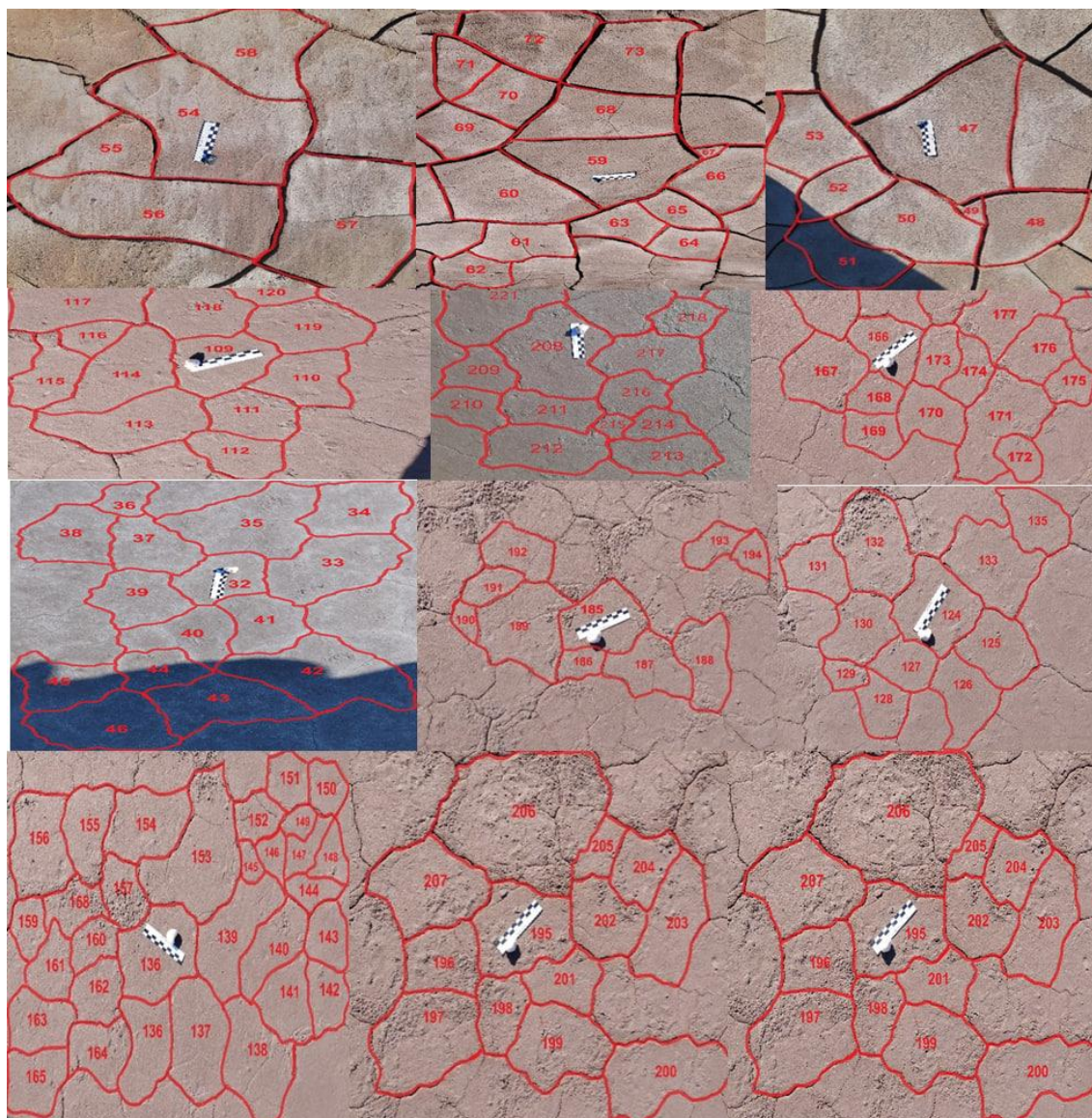
اگر تنها مجموعه ای با مساحت نرمال با $DA = 2$ بررسی شود، $D_{AP} = D_P$ خواهد شد. بنابراین معادله (۳) شکل اصلی توسعه یافته توسط مندلبرت (۱۹۸۴) است. اگر $2 < D_A$ باشد، در این حالت $D_A > D_P$ خواهد شد. برای تعیین D_{AP} محیط و مساحت، مجموعه داده های A و P ترسیم شده و به صورت مقیاس $\log - \log$ ، رابطه خطی بین $\log A$ و $\log P$ را نشان می

دهد که می‌تواند توسط یک خط راست با روش حداقل مربعات برازش داده شود. شیب رگرسیون خطی می‌تواند به عنوان بر پایه $DAP^{(1/2)}$ معادله (۳)، تخمین زده شود:

جدول ۱: معادلات فرکتال

$P \propto A^{1/(2DAP)}$	معادله ۱
$2D_P/D_A = D_{AP}$	معادله ۲
$\log P = C + (1/2) D_{AP} \log A$	معادله ۳

اگر $D_{AP} = 2$ باشد، پس $P \propto A$ بوده و تغییرات محیط با نرخی مشابه با مساحت است. به عبارت دیگر محیط مانند مساحت عمل می‌کند، به طوری که D_{AP} می‌تواند بی‌نظمی محیط را مشخص کند (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶). در مجموع، DAP دامنه‌ای از ۱ تا ۲ دارد. اگر $D_{AP}=1$ باشد، آنگاه $P \propto A^{(1/2)}$ مجموعه‌های شکل گرفته‌ی منظمی را مانند مربع‌ها یا دایره‌ها را نشان می‌دهد. اما ارزش بالاتر DAP ، فشردگی بیشتر شکل را بیان می‌کند و اگر DAP برابر ۲ باشد آنگاه $P \propto A$ برقرار می‌شود. براین اساس، با افزایش ارزش DAP از ۱ به سمت ۲ بر میزان آشفتگی و بی‌نظمی محیط نسبت به مساحت پدیده مورد بررسی افزوده می‌شود که نشان دهنده افزایش آشفتگی در رویداد پدیده است (وانگ و همکاران، ۲۰۰۶).



شکل ۴: میکرولندفرم‌های (پلیگونی گلی) انتخابی در دشت اشتهارد

بحث و یافته‌ها

تحلیل کلی مدل محیط-مساحت و تفسیر DAP

پس از بررسی مدل فرکتال، نتایج حاصل از اندازه‌گیری ابعاد فرکتالی محیط – مساحت روی میکروفرم‌های گلی، در جدول ۲ نمایش داده شده است. در این پژوهش بررسی مدل فرکتال، تغییرات شکل میکروفرم‌های گلی را در دشت اشتهارد مشخص کرد و DAP هر کدام از میکروفرم‌ها محاسبه شد. مقادیر DAP به دست آمده در این تحقیق بین ۱۶۰ تا ۱۹۰ است که با استناد به دسته‌بندی علمی ایمره^۱ (۲۰۰۶)، تحلیل‌های زیر استخراج شد (جدول ۲) که مقدار میانگین

1 Imre

بعد فرکتالی DAP برابر ۱.۷۵ نیز نشانگر آشفته‌گی هندسی بسیار بالا است که در راستای ریسک زیاد تا خیلی زیاد منطقه قابل تفسیر است. همچنین نمودار لگاریتمی محیط و مساحت ترسیم شده و مقدار ضریب همبستگی آن مشخص کرد که ارتباط خطی بین لگاریتم محیط و لگاریتم مساحت میکروفرم‌های گلی برقرار است، بطوری که ضریب همبستگی R^2 بدست آمده بزرگتر از ۰.۹۶ است (شکل ۵). این مقادیر نشان‌دهنده همبستگی بالا و بسیار قوی بین لگاریتم محیط و مساحت است که اعتبار مدل فرکتالی محیط-مساحت را در داده‌های ما به‌خوبی تأیید می‌کند. عبارتی این همبستگی بالا نشان‌دهنده صحت و قابلیت اعتماد مدل محیط-مساحت برای تحلیل هندسه میکرولندفرم‌ها در منطقه مورد مطالعه است. این مدل، می‌تواند به عنوان یک شاخص قدرت‌مند برای تشخیص سطح آشفته‌گی، پیچیدگی و ناپایداری زمین در مقیاس‌های کوچک (میکرولندفرم‌ها) باشد به‌ویژه در مناطق فرونشست‌خیز کاربرد گسترده‌ای دارد. در نتیجه، نتایج مدل فرکتالی محیط-مساحت، آشفته‌گی ساختاری و ناپایداری ژئومورفولوژیکی منطقه را با دقت بالایی نشان می‌دهند.

جدول ۱: تحلیل علمی بعد فرکتالی میکرولندفرم‌های دشت اشتهارد (DAP) ایمره (۲۰۰۶)

بازه DAP	تفسیر هندسی	تفسیر ژئومورفولوژیکی	تحلیل وضعیت منطقه (دشت اشتهارد)
۱.۰۰ - ۱.۱۰	مرزهای بسیار ساده	ساختار پایدار، بدون آشفته‌گی قابل توجه	در داده‌های ما بسیار کم است ← منطقه پایدار در نظر گرفته می‌شود.
۱.۱۰ - ۱.۳۰	پیچیدگی متوسط	ناپایداری اولیه، تغییرات ملایم، آغاز فرونشست یا نشست احتمالی	سهم قابل توجهی از داده‌ها در این بازه‌اند ← نشانه ناپایداری جزئی.
۱.۳۰ - ۱.۵۰	مرزهای نسبتاً پیچیده	آشفته‌گی هندسی بالا (آشفته‌گی متوسط تا شدید)، نشست‌های موضعی، شکاف‌ها و ترک‌ها	بخش زیادی از میکرولندفرم‌ها در این رنج قرار دارند ← ریسک بالا.
۱.۵۰ >	مرزهای بسیار بی‌نظم و آشوبناک	آشفته‌گی شدید (تغییرات ساختاری زیاد، ترک‌های متراکم، ناپایداری شدید، خاک سست، فرونشست فعال)	داده‌های بالای ۱.۵ نشانگر آشفته‌گی شدید ژئومورفولوژیکی هستند

جدول ۲: مقادیر محیط (P)، مساحت (A) و DAP میکرولف‌فرم‌های انتخابی (پلیگون گلی) دشت اشتهارد

DAP	Perimeter(cm)	Area(cm ²)		DAP	Perimeter(cm)	Area(cm ²)	
1.731	290.56	396.82	۴۲	1.76۵	138.75	251.11	۱
1.809	85.17	101.39	۴۳	1.814	193.03	194.44	۲
1.618۱	131.6	183.48	۴۴	1.78۱	46.47	41.24	۳
1.800	95.87	137.31	۴۵	1.763	337.75	428.31	۴
1.801	55.47	83.92	۴۶	1.727	600.29	659.42	۵
1.663	49.4	75.54	۴۷	1.79۴	442.56	563.99	۶
1.63۹	701.69	674.69	۴۸	1.731	77.26	114.81	۷
1.69۵	119.79	112.71	۴۹	1.867	209.45	355.01	۸
1.709	104.42	144.42	۵۰	1.889	69.89	101.1	۹
1.771	278.94	254.25	۵۱	1.715	172.47	254.45	۱۰
1.73۲	147.39	162.2	۵۲	1.837	245.19	558.07	۱۱
1.896	157.79	207.87	۵۳	1.75۹	179.21	212.26	۱۲
1.63۱	134.64	171.69	۵۴	1.770	379.8	669.88	۱۳
1.66۳	123.25	227.28	۵۵	1.87۸	241.38	285.94	۱۴
1.648	186.36	374.61	۵۶	1.621	41.02	47.32	۱۵
1.79۶	224.6	277.44	۵۷	1.626	137.75	149.86	۱۶
1.67۶	148.6	182.08	۵۸	1.606	72.53	95.31	۱۷
1.7۴۰	67.4	96.93	۵۹	1.8۵۰	47.49	61.41	۱۸
1.673	295.27	272.62	۶۰	1.833	81.94	97.04	۱۹
1.64۸	139.24	139.74	۶۱	1.861	288.32	336.12	۲۰
1.633	97.8	166.18	۶۲	1.893	139.33	203.76	۲۱
1.79۷	138.96	123.92	۶۳	1.8۴۰	95.16	82.48	۲۲
1.641	75	62.47	۶۴	1.738	224.06	498.9	۲۳
1.65۹	438.67	395.82	۶۵	1.834	403.22	654.83	۲۴
1.710	61.16	98.19	۶۶	1.635	184.75	162.87	۲۵
1.846	77.45	76.07	۶۷	1.79۲	444.79	634.12	۲۶
1.629	53.47	57.53	۶۸	1.643	122.39	163.6	۲۷
1.851	338.85	396.74	۶۹	1.88	295.46	390.6	۲۸
1.62۹	141.99	123.17	۷۰	1.756	415.04	568.85	۲۹
1.89۳	178.63	198.76	۷۱	1.724	77.54	76.45	۳۰
1.740۶	260.62	263.09	۷۲	1.679	77.78	123.97	۳۱
1.893	130.34	121.58	۷۳	1.832	232.06	411.46	۳۲
1.781	570.11	611.95	۷۴	1.73۷	84.86	94.56	۳۳
1.82۲	55.92	65.92	۷۵	1.770	265.76	261.49	۳۴
1.61۲	268.45	504.84	۷۶	1.60۶	191.89	241.37	۳۵
1.68۵	133.53	185.42	۷۷	1.785	35.77	44.47	۳۶
1.636	635.81	650.94	۷۸	1.78۴	459.76	571.03	۳۷
1.688	246.37	495.78	۷۹	1.785	266.2	294.36	۳۸
1.63۶	59.45	66.41	۸۰	1.883	204.37	357.96	۳۹
1.695	55.71	75.87	۸۱	1.804	37.41	42.71	۴۰
1.731	55.62	58.7	۸۲	1.70۸	138.75	251.11	۴۱

DAP	Perimeter(cm)	Area(cm ²)		DAP	Perimeter(cm)	Area(cm ²)	
1.887	45.5	43.49	124	1.724	388.69	395.06	83
1.793	187.85	279.22	125	1.619	574.03	590.38	84
1.727	61.95	59.52	126	1.808	38.99	49.36	85
1.782	101.75	89.95	127	1.770	241.33	227.51	86
1.606	711.9	684.98	128	1.680	86.97	96.37	87
1.690	167.44	340.59	129	1.757	346.05	591.29	88
1.798	44.04	51.09	130	1.628	136.89	145.59	89
1.687	301.06	663.31	131	1.773	352.08	522.08	90
1.7854	66.96	87.11	132	1.879	326.9	536.36	91
1.729	56.45	81.05	133	1.696	96.5	99.21	92
1.641	42.93	42.06	134	1.800	52.42	69.71	93
1.689	276.1	435.61	135	1.639	66.33	86.51	94
1.771	293.18	556.81	136	1.815	332.47	514.31	95
1.777	129.6	202.15	137	1.687	109.64	167.52	96
1.772	175.27	263.6	138	1.655	207.27	306.64	97
1.796	108.8	165.04	139	1.776	93.54	106.29	98
1.796	44.93	50.23	140	1.606	308.22	345.39	99
1.729	132.42	261.62	141	1.849	59.95	56.28	100
1.869	370.3	694.26	142	1.601	274.16	281.51	101
1.710	145.22	201.71	143	1.803	369.71	420.35	102
1.731	255.53	320.59	144	1.681	523.72	658.89	103
1.868	41.39	51.76	145	1.820	249.43	454.69	104
1.842	175.85	333.66	146	1.889	167.53	240.6	105
1.811	45.68	67.36	147	1.675	75.57	89.72	106
1.630	83.38	71.49	148	1.772	79.35	132.24	107
1.876	387.84	626.89	149	1.778	139.09	172.73	108
1.814	46.91	48.46	150	1.772	61.16	72.56	109
1.899	290.29	274.29	151	1.667	183.53	185.51	110
1.645	253.67	552.92	152	1.886	271.59	242.65	111
1.860	260.92	254.19	153	1.734	48.29	50.91	112
1.649	461.68	658.84	154	1.854	160.12	245.92	113
1.785	279.27	565.4	155	1.810	127.09	245.8	114
1.637	52.54	61.98	156	1.689	62.04	52.74	115
1.854	62.29	58.28	157	1.844	59.92	51	116
1.842	98.98	122.01	158	1.719	293.38	542.57	117
1.770	123.62	105.08	159	1.864	470.58	576.38	118
1.722	42.31	49.36	160	1.774	39.79	56.86	119
1.620	240.28	260.73	161	1.864	42.42	57.47	120
1.809	64.5	79.75	162	1.808	42.5	55.53	121
1.736	413.39	436.43	163	1.818	66.02	88.5	122
1.817	54.83	58.25	164	1.750	56.03	45.31	123

D _{AP}	Perimeter(cm)	Area(cm ²)	
1.860	48.26	72.8	166
1.892	60.23	97.94	167
1.857	52.25	75.92	168
1.603	234.46	543.83	169
1.708	290.86	660.17	170
1.819	63.72	63.32	171
1.651	129.16	157.95	172
1.756	73.2	70.85	173
1.616	219.4	204.55	174
1.660	42.1	42.79	175
1.605	319.62	364.65	176
1.838	360.06	403.18	177
1.667	44.26	51.98	178
1.704	65.77	91.97	179
1.878	67.76	98.18	180
1.811	97.41	145.76	181
1.609	37.47	45.86	182
1.649	307.44	604.65	183
1.786	55.68	48.37	184
1.773	256.79	278.51	185
1.671	119.4	226.68	186
1.880	215.73	369.75	187
1.784	199.25	439.68	188
1.760	243.97	337.24	189
1.777	286.13	413.94	190
1.819	282.56	288.58	191
1.693	112.63	164.64	192
1.719	292.42	303.68	193
1.663	534.6	501.07	194
1.656	48.16	71.2	197
1.883	80.88	76.71	198
1.822	308.1	400.71	199
1.747	40.58	43.9	200
1.668	71.6	88.13	201
1.676	405.86	447.11	202
1.617	260.59	316.31	203
1.730	468.34	511.86	204
1.693	552.25	553.41	205
1.808	86.3	93.69	206
1.713	594.05	553.24	207
1.654	186.98	224.66	208

جهت بررسی این آشفستگی، آماره‌های محیط - مساحت میکرو لندفرم‌های گلی را به ۳ رده آشفستگی کم، متوسط و زیاد در میکرو لندفرم‌های منطقه تقسیم کردیم. ارزش D_{AP} نیز با افزایش از رده ۱ تا ۳ به ترتیب ۱.۶۵، ۱.۷۵، ۱.۸۴ است (جدول ۳). با توجه به بالاتر بودن D_{AP} از عدد ۱.۵، می‌توان به این نتیجه رسید که میکرو لندفرم‌های گلی اشتهارد در هر سه رده الگوی آشفته دارد. افزایش آشفستگی در دشت اشتهارد حاکی از تحول سیستم شکل‌زایی آن و تبدیل آن به اکوسیستم جدید است. مدل‌های فرکتالی ارائه شده در این بررسی، ارزش خود را برای نشان دادن طبیعت پیچیده پدیده‌های شکل یافته نامنظم، نشان می‌دهند و می‌توانند برای پدیده‌های نامنظم در محیط‌های دیگر نیز مورد استفاده قرار گیرند. درواقع میزان بعد فرکتالی (DAP) در بازه ۱.۶۰ تا ۱.۹۰، همراه با تمرکز بالای نمونه‌ها در رده آشفستگی زیاد، بازتابی از **برهم‌ریختگی نظم پیشین در ساختار میکرو لندفرم‌ها** است. برخلاف وضعیت‌های ایستا و پایدار که با بعد فرکتالی پایین مشخص می‌شوند، الگوی غالب در اشتهارد، یادآور **سیستمی در آستانه دگرگونی** است، دقیقاً همانند آنچه در گذار یک اکوسیستم از تعادل به بی‌تعادلی دیده می‌شود.



شکل ۵. نمودار لگاریتمی محیط - مساحت میکرو لندفرم‌های گلی دشت اشتهارد

۳. رده بندی آماره‌های محیط - مساحت آشفستگی میکرو لندفرم‌های گلی در دشت اشتهارد

ردۀ آشفستگی	Max	Min	Mean	STD	بعد فرکتالی محیط - مساحت (DAP)
زیاد	۱.۹	۱.۸۱	۱.۸۴	۰.۰۳۲۴	دره آشفته
متوسط	۱.۷۹	۱.۶۹	۱.۷۵	۰.۰۲۸۳	
کم	۱.۶۹	۱.۶	۱.۶۵	۰.۰۲۸۵	

نتیجه‌گیری

دشت اشتهارد به‌عنوان یکی از مناطق بحرانی کشور از منظر منابع آب زیرزمینی، در معرض ناپایداری‌های ژئومورفولوژیکی فزاینده‌ای قرار دارد. وابستگی کامل این دشت به منابع آب زیرزمینی، افت مستمر سطح ایستابی، شوری بالای منابع سطحی و گسترش پهنه‌های تبخیری، زمینه‌ساز آشفته‌گی ساختاری در سطح زمین شده است. پژوهش حاضر با استفاده از مدل فرکتالی محیط-مساحت، به بررسی هندسه میکروفرم‌های گلی در منطقه مورد مطالعه پرداخت تا شاخصی از میزان آشفته‌گی سطحی ارائه دهد. مقادیر به‌دست‌آمده برای DAP در بازه ۱۶۰ تا ۱۹۰، و میانگین بالای ۱۰۷۵، به‌همراه ضریب همبستگی بالای ۰.۹۶ بین لگاریتم محیط و مساحت، بیانگر وجود الگویی پیچیده، بی‌نظم و ناپایدار در سطح زمین است. مطابق با شواهد مشابه در پلایای گاوخونی و حوض سلطان (قهرودی و همکاران، ۲۰۱۴ و ۲۰۱۵)، این الگوی فرکتالی، بازتابی از گذار منطقه به شرایط ژئومورفولوژیکی ناپایدار و مواجهه با یک فاز جدید ساختار فضایی است؛ فازی که از گسست تعادل‌های طبیعی ناشی شده و در صورت تداوم، می‌تواند نشان‌دهنده‌ی تحول در ماهیت اکوسیستم منطقه باشد. تحلیل هندسی انجام‌شده، آشفته‌گی موجود را نه صرفاً در قالب اشکال سطحی، بلکه به‌عنوان نمود بیرونی یک ناپایداری عمیق در سیستم زمین‌شناسی و اقلیمی منطقه معرفی می‌کند. تداوم این شرایط، ضرورت مطالعات بین‌رشته‌ای مکمل (نمونه برداری مغزه ای رسوبی، جهت تحلیل تغییرات رخساره ای، بررسی پالئوکلیمایی و گرده شناسی به منظور بازسازی پوشش گیاهی گذشته، تحلیل شیمیایی خاک‌های سطحی و عمقی (شوری، EC pH و مواد مغذی و....) را برای فهم دقیق‌تر روندهای محیطی و پتانسیل تحول اکولوژیکی منطقه برجسته می‌سازد. این درحالیست که پیشنهاد بررسی دوباره این مدل (محیط - مساحت) در سال‌های آتی در این منطقه و مقایسه نتایجشان، مطمئنان صحت بالایی بر اعتبار این مدل و نتایج آن خواهد داشت از طرفی مدل‌سازی ریسک فرونشست و تحلیل تغییرات مورفولوژیکی ناشی از آن در سال‌های آینده، اقدامی مفید و مؤثر در جهت ارائه راهکارهای مدیریتی بر آبخوان دشت اشتهارد است چون عدم توجه به آن می‌تواند پیامدهای ناگواری را دامن زند که به مواردی از آن اشاره شده است.

پیامدهای احتمالی افزایش آشفته‌گی فرکتالی در دشت اشتهارد:

۱. از زوال ساختار به زایش سیستم نو

افزایش آشفته‌گی هندسی در میکروفرم‌های گلی دشت اشتهارد، تنها یک پیام ریاضی نیست، بلکه نشانه‌ای ژرف از ورود منطقه به مرحله انتقالی در سیستم ژئومورفولوژیکی و اکولوژیکی آن است نوعی ناپایداری که غالباً در آستانه‌ی تغییر سیستم‌های طبیعی مشاهده می‌شود.

۲. بی‌ثباتی سطحی و تسریع فرونشست زمین:

در محیطی با خاک‌های فشرده‌شونده، حضور نمک، بافت ریزدانه، و افت ۷۳ سانتی‌متری سطح آب زیرزمینی، هرگونه تغییر در ساختار سطحی (نظیر آشفته‌گی در الگوی ترک‌های گلی) مستقیماً منجر به تشدید نرخ نشست زمین می‌شود.

افزایش بعد فرکتالی یعنی مرزهای پلیگون‌ها پیچیده‌تر شده‌اند، یعنی کشش‌های سطحی و موضعی بیشتر شده‌اند، یعنی نقاط ضعف و شکست بالقوه برای فرونشست، بیشتر و فعال‌تر شده‌اند.

۳. تضعیف یکپارچگی اکولوژیکی :

پلیگون‌های گلی معمولاً ساختاری منظم و نیمه‌بسته ایجاد می‌کنند که می‌تواند رطوبت سطحی را حفظ کند؛ اما با افزایش D_{AP} و درهم‌ریختگی فرم‌ها، این ساختار دستخوش فروپاشی می‌شود. در نتیجه، منطقه در معرض افزایش تبخیر، کاهش پایداری رطوبتی و از بین رفتن کارکرد طبیعی ذخیره‌سازی سطحی قرار می‌گیرد. این وضعیت، بستر را برای تبدیل از یک واحد نیمه‌پایدار به یک اکوسیستم شکننده فراهم می‌کند.

۴. بازآرایی دینامیک رسوب‌گذاری و رخساره‌ای :

با افزایش پیچیدگی در فرم‌های سطحی و ایجاد الگوهای جدیدی از رواناب، تمرکز نمک و رسوب‌گذاری، ممکن است واحدهای رسوبی جدیدی در سطح منطقه شکل بگیرند که ترکیب آن‌ها غالباً شامل سولفات‌ها مانند ژپس باشد. آنچه اکنون مشاهده می‌شود، می‌تواند نخستین نشانه‌های شکل‌گیری رخساره‌های جدیدی از نوع سولفات‌ها یا ماسه‌بادی تبخیری باشد. این تغییر در رخساره، به مثابه "پیشروی زون سولفات"، پیش‌تر در حوض سلطان نیز مشاهده شده و می‌تواند نشانگر تحول تدریجی در سیستم رسوب‌گذاری و مورفولوژی زمین باشد عبارتی تحول در شکل‌زایی یعنی تحول در الگوهای توزیع مواد، یعنی احتمال شکل‌گیری واحدهای مورفولوژیک جدید در آینده نزدیک.

۵. ورود به فاز نامتعادل زمین‌ریخت‌شناسی (Morphodynamic Instability):

در حالت پایدار، بعد فرکتالی در بازه‌ای مشخص نوسان می‌کند. اما وقتی D_{AP} از حد آستانه عبور می‌کند، سیستم وارد فاز می‌شود که تغییرات در آن نه بازگشت‌پذیر، بلکه تصاعدی و سامانه‌ای (systemic) است این یعنی منطقه ممکن است به سمت یک فاز تازه از تکامل سطحی حرکت کند که در آن دیگر فرآیندهای غالب قبلی (مثل ترک‌خوردگی منظم گلی) جای خود را به الگوهای جدید بدهند، که در آن باد، تبخیر و نشست، نقش‌های تعیین‌کننده‌تری خواهند داشت.

در نتیجه: تحول آشفتگی در میکرولندفرم‌های گلی اشتهارد، نشانه‌ی یک ناپایداری ژرف در سیستم زمین‌ریخت‌شناسی منطقه است. ناپایداری‌ای که می‌تواند مقدمه‌ی گذار از یک سیستم رسوبی نیمه‌پایدار به یک اکوسیستم باز و شکننده باشد؛ جایی که نه فقط شکل‌ها، بلکه فرایندهای حاکم بر زمین تغییر خواهند کرد و این پژوهش می‌تواند به عنوان قدم‌های اولیه، جهت شناخت وضعیت منطقه حائز اهمیت باشد.

پیشنهادها برای پژوهش‌های آتی:

۱. پایش تغییرات زمانی شاخص فرکتال D_{AP} در میکرولندفرم‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (فصلی یا سالانه) و هم‌زمان‌سازی آن با داده‌های پایش مستقیم فرونشست (مثلاً داده‌های InSAR ماهواره‌ای مانند Sentinel-1 و داده‌های ترازیبی دقیق یا لیزر اسکن زمینی LiDAR) پیشنهاد می‌شود. این رویکرد امکان شناسایی همبستگی زمانی بین افزایش D_{AP} (افزایش آشفتگی سطحی) و نرخ فرونشست اندازه‌گیری‌شده را فراهم می‌کند. در واقع، D_{AP} می‌تواند به عنوان یک پروکسی (شاخص نماینده) با وضوح بالا برای مناطق فاقد داده‌های پایش مستقیم و پرهزینه فرونشست عمل کند. این مقایسه مستقیم، اعتبار کاربردی مدل فرکتال را به صورت کمی و در بستر واقعی بحران فرونشست ثابت می‌کند.

۲. ورود DAP به عنوان پارامتر هندسی مستقل در مدل‌سازی ریسک فرونشست^۱

ارزش افزوده اصلی پژوهش ما زمانی است که شاخص DAP به عنوان یک لایه اطلاعاتی مستقل وارد مدل‌های رایج ارزیابی ریسک فرونشست شود. در مطالعات آتی، نقشه پراکنش مکانی DAP در کنار لایه‌های متعارف مؤثر بر فرونشست (مانند افت سطح آب زیرزمینی، ضخامت آبرفت، شوری خاک، کاربری اراضی و تراکم چاه‌ها) وارد مدل‌های یادگیری ماشین (مانند Random Forest یا XGBoost) شود. این کار دو دستاورد دارد:

* سنجش سهم واقعی آشفستگی هندسی سطحی در پیش‌بینی مناطق پرریسک.

* ارزیابی اینکه آیا افزودن این پارامتر جدید دقت پیش‌بینی مدل را نسبت به مدل‌های سنتی فاقد این پارامتر افزایش می‌دهد یا خیر. این یک اعتبارسنجی قوی و کاربردی برای یافته‌های فرکتال ما در چارچوب مهندسی مخاطرات خواهد بود.

۲. پایش زمانی-مکانی با داده‌های سنجش از دور:

استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا (مانند Sentinel-2, PlanetScope) و تکنیک‌های تداخل سنجی راداری (InSAR) برای ردیابی تغییرات مکانی-زمانی الگوهای فرکتالی میکروفرم‌ها در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت (مثلاً فصلی) پیشنهاد می‌گردد. این امر امکان شناسایی نقاط بحرانی و آستانه‌های تغییر سیستم را فراهم می‌کند.

۳. ارتباط سنجی کمی با پارامترهای هیدروژئولوژیک و ژئوتکنیکی:

انجام مطالعات میدانی برای اندازه‌گیری همزمان سطح آب زیرزمینی، خصوصیات فیزیکی-شیمیایی خاک (مانند رطوبت، شوری، بافت) و مقاومت برشی خاک به همراه محاسبه DAP در همان نقاط پیشنهاد می‌شود. این داده‌ها امکان استخراج روابط رگرسیونی چندمتغیره و ایجاد مدل‌های علی-توصیفی را برای تبیین دقیق‌تر مکانیزم‌های مؤثر بر آشفستگی سطحی فراهم می‌کنند.

۴. مقایسه سیستماتیک با دیگر محیط‌های رسوبی:

انجام پژوهش‌های تطبیقی در پدیده‌های مشابه (مانند گاوخونی، حوض سلطان) و دشت‌های فرونشستی دیگر (مانند دشت ورامین یا رفسنجان) برای بررسی میزان تعمیم‌پذیری الگوهای فرکتالی مشاهده‌شده در اشتهارد ضروری است. این مقایسه می‌تواند به استخراج الگوهای جهانی یا مشخصه‌های وابسته به زمینه در رفتار سیستم‌های خشک کمک کند.

۵. توسعه مدل‌های فیزیک-محاسباتی :

توسعه مدل‌های عددی چندمقیاسی^۲ که بتوانند همزمان فرآیندهای خزش خاک، تشکیل ترک‌های گلی و تغییرات فشار منفذی را شبیه‌سازی کرده و خروجی هندسی آن‌ها (مانند DAP) را با مشاهدات میدانی مقایسه کنند، گامی بلند در جهت تبیین مکانیزم‌های درونی پدیدآورنده الگوهای فرکتالی خواهد بود.

1 Land Subsidence Susceptibility Mapping

2 Multiscale Numerical Models

منابع

- آقاباتی، سیدعلی. (۱۳۸۳). زمین‌شناسی ایران، نشر سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ص ۵۵۶.
- سازمان زمین‌شناسی. (۱۳۸۴). بررسی علت فرونشست زمین و آسیب‌های وارده به ساختمانهای مسکونی شهرک طالقانی - شهر اشتهارد، سازمان زمین‌شناسی کشور.
- علمی زاده، هیوا، ماه پیکر، امید، سعادت‌مند و مریم. (۱۳۹۷). بررسی نظریه‌ی فرکتال در ژئومورفولوژی رودخانه‌ای: مطالعه‌ی موردی زیرنه‌رود. پژوهشهای ژئومورفولوژی کمی، ۳(۲)، ۱۳۰-۱۴۱.
- علیمردادی، مهتاب، اختصاصی، محمدرضا، تازه، مهدی و کریمی، حاجی. (1397). محاسبه‌ی بُعد فراکتال سازندهای زمین‌شناسی و بررسی ارتباط آن با حساسیت سازندها. پژوهش‌های جغرافیایی طبیعی. doi: 10.22059/jphgr.2018.234333.1007060, 50(2), 241-253.
- کردوانی، پرویز. (۱۳۸۱). منابع و مسائل آب در ایران جلد اول، نشر دانشگاه تهران.
- مصطفی‌زاده، رئوف؛ اسفندیاری، فریبا؛ ناصری، احمد؛ عیبات، احمد و ادهمی، مریم. (۱۴۰۲). تعیین الگوی فرکتالی در بازه‌ای از رودخانه قره‌سو استان اردبیل. هیدروژئومورفولوژی 10(37): 77-97. doi: 10.22034/hyd.2023.57428.1700
- نوروزی، رعنا؛ افتخاری، سید مروت؛ احمدآبادی، علی. (۱۴۰۴). فرونشست دشت‌های ممنوعه بحرانی (منطقه مورد مطالعه: دشت اشتهارد). نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی، ۴(۵۷)، ۶۶-۸۹. <https://doi.org/10.61186/jgs.25.78.24>
- Alidoost, F., & Arefi, H. (2024). Vertical Accuracy Assessment and Improvement of Five High-Resolution Open-Source Digital Elevation Models Using ICESat-2 Data and Random Forest: Case Study on Chongqing, China. Remote Sensing, 16(11), 1903. <https://doi.org/10.3390/rs16111903>
- Arabameri, A., Rezaei, K., & Blaschke, T. (2019). Land-Subsidence Spatial Modeling Using the Random Forest Data-Mining Technique. In Spatial Modeling in GIS and R for Earth and Environmental Sciences (pp. 113-129). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815226-3.00006-5SpringerLink+1PubMed+1ResearchGate+1ScienceDirect+1>
- Cheng Q. The Perimeter–Area Fractal Model and Its Application to Geology. Math Geol Journal; 1995; 27(1):6
- Cheng Q, Russell H, Sharpe D, Kenny F, Qin P. GIS-based statistical and fractal / multifractal analysis of surface stream patterns in the Oak Ridge’s Moraine. Computer Geoscience Journal; 2001; 27(5):513-526.
- Dong, X., Zhang, Q., & Yan, J. (2025). Evaluating Machine Learning-Based Approaches in Land Subsidence Susceptibility Mapping. Land, 13(3), 322. <https://doi.org/10.3390/land13030322>
- Ewing, R. C., & Kocurek, G. A. (2019). Aeolian and subaqueous bedforms in dynamic equilibrium: Scaling using fractal dimensions. Earth Surface Processes and Landforms, 44(2), 541-553.
- Galloway, D. L., & Burbey, T. J. (2011). Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. Hydrogeology Journal, 19(8), 1459–1486. <https://doi.org/10.1007/s10040-011-0775-5>
- Ghahroudi Tali M, Alinoori K. Hazards Tracing Hoz-e Soltan Playa through Investigating Chaos in Micro-landforms. Iranian Journal of Hazards Science; 2015; 1 (2):241-252
- Ghahroudi Tali M, Derafshi K. The study of chaos in the flood risk pattern of Tehran. Environmental Spatial Analysis Disaster Journal; 2015; 7 (2):1-16.
- Ghahroudi Tali M, khedri gharibvand L. The Investigation of Chaos in Micro-Landforms in the Gavkhooni Everglade. Geodynamics Research International Bulletin (GRIB) Journal; 2014; 2 (3):44-51.
- Goodchild M F. Lake on fractal surfaces: a null hypothesis for lake-rich landscapes. Math Geol Journal; 1988; 20(6):15–630.
- Herrera-García, G., et al. (2021). The global risk of land subsidence. Nature Sustainability, 4(7), 671–679. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00690-1>

- Imre, A. R., & Bogaert, J. (2006). The fractal dimension as a measure of the complexity of vegetation patterns. *Ecological Complexity*, 3(3), 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2006.02.001>
- Ku, C.-Y., & Liu, C.-Y. (2023). Land subsidence modeling using an artificial neural network with GIS in Yunlin County, Taiwan. *Scientific Reports*, 13, 4207. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31390-5>
- Lovejoy S. Area–perimeter relation for rain and cloud areas. *Science Journal*; 1982; 216(4542):185-187
- Mandelbrot B B, Passoja D E, Paullay A J. Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature Journal*; 1984; 308 (5961): 721.
- Naghbi, S. A., Ahmadi, K., & Kalantar, B. (2024). Land subsidence risk assessment using GIS fuzzy logic spatial modeling in Varamin aquifer, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 83(2), Article 115. <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11532-4>
- Ohenhen, L. O., Zhai, G., Lucy, J., Lee, J.-C., Zehsaz, S., & Shirzaei, M. (2025). Land subsidence risk to infrastructure in US metropolises. *Nature Cities*. <https://doi.org/10.1038/s44284-025-00240-y>
- Phillips, J. D. (2022). *Chaos, fractals, and geomorphology: A review and synthesis*. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 46(4), 456-478.
- Qin, Y., He, P., Zhang, J., & Xie, L. (2024). The Fractal Characteristics of Ground Subsidence Caused by Subway Excavation. *Applied Sciences*, 14(12), 5327. <https://doi.org/10.3390/app14125327>
- Rahmati, O., Samadi, M., Pourghasemi, H. R., & Zeinivand, H. (2019). Land subsidence modelling using tree-based machine learning algorithms. *Science of the Total Environment*, 672, 239–252. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03>
- Rajabi, A. M., Edalat, A., Abolghasemi, Y., & Khodaparast, M. (2024). Ground subsidence modeling using Sentinel-1A SAR data and artificial neural network in Aliabad Plain, Iran. *Journal of Mountain Science*, 21(3), 589–603. <https://doi.org/10.1007/s11629-023-8470-2>
- Ramesht M H. Hazards Tracing Hoz-e Soltan Playa through Investigating Chaos in Microlandforms. *Geography and Development Iranian Journal*; 2003; 1 (1):13-36
- Sun, T., Liu, Y., Wu, K., Zhang, H., Zhang, J., Jiang, X., Lin, Q., & Feng, M. (2024). Fractal-Based Multi-Criteria Feature Selection to Enhance Predictive Capability of AI-Driven Mineral Prospectivity Mapping. *Fractal and Fractional*, 8(4), 224. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8040224>
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). *Global Environmental Outlook 6: Regional assessments for West Asia and North Africa*. Nairobi, Kenya: UNEP.
- Vogel, H. J., et al. (2020). *Quantitative morphology of desiccation cracks in soils: A fractal approach*. *Geoderma*, 374, 114424.
- Wang Z, Cheng Q, Cao L et al. Fractal modelling of the microstructure property of quartz mylonite during deformation process. *Math Geol Journal*; 2006; 39(1):53
- Yang, K., Hu, Z. Q., Liang, Y. S., Fu, Y. K., Yuan, D. Z., Guo, J. X., et al. (2022). Automated extraction of ground fissures due to coal mining subsidence based on UAV photogrammetry. *Remote Sensing*, 14, 1071. <https://doi.org/10.3390/rs14051071>
- Yu, B., Xing, H., & Yan, J. (2024). Susceptibility assessment of multi-hazards using random forest–back propagation neural network coupling model: A Hangzhou city case study. *Scientific Reports*, 14, 21783. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71053-7>
- Yu, B., Xing, H., & Yan, J. (2024). Susceptibility assessment of multi-hazards using random forest–back propagation neural network coupling model: A Hangzhou city case study. *Scientific Reports*, 14, 21783. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-71053-7>

- Zhan, Y., Zhang, Y., Zhang, J., Xu, J., Chen, H., Liu, G., & Wan, Z. (2025). Ground subsidence risk assessment using AHP and entropy weight method in Shanghai Municipality. *Scientific Reports*, 15(1), 7339. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-91109-6>
- Zhao, Y. X., Xu, D., Sun, B., Jiang, Y. D., Zhang, C., & He, X. (2021). Investigation on ground fissure identification using UAV infrared remote sensing and edge detection technology. *Journal of China Coal Society*, 46, 624–637. <https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.xr20.1948>
- Zhou, Y., Wang, Y., & Li, X. (2023). Integrating SBAS-InSAR and Random Forest for Identifying Land Subsidence Areas in the North China Plain. *Remote Sensing*, 15(5), 830. <https://doi.org/10.3390/rs15050830MDPI>