



ISSN 2345 - 4997

GRIBGeodynamics Research
International Bulletin

An Investigation of Chaos in Micro-Landforms in the Gavkhooni Wetland

Manijeh Ghahroudi Tali^{1*}, Ladan Khedri Gharibvand²¹ Associate Professor, Department of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (M-Ghahroudi@sbu.ac.ir)² Ph.D. Student, Department of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran (L_khedri@sbu.ac.ir)

*Corresponding Author (M-Ghahroudi@sbu.ac.ir)

Article History:

Revised: Apr. 09, 2014

Received: Feb. 08, 2014

Accepted: Jun. 16, 2014

Reviewed: Feb. 22, 2014

Published: Sep. 16, 2014

ABSTRACT

Iranian wetlands are the remaining parts of rainlake quaternary that most of them drain the arid and semi-arid areas. Reducing water input to the wetlands has caused morphological changes whose effects can be traced in the micro landforms. In this study, in order to investigate the pattern of micro landforms, Gavkhooni wetland which is located in southeastern Isfahan was studied by a fractal model. The data was taken from field observations. In order to measure the fractal geometry, three field observations were done in the spring, summer and fall of 1392 and 35 clay microforms were chosen after rainfall in spring and fall. 20 microforms were randomly selected from among the microforms which were well developed in terms of boundary and then, their dimensions were accurately calculated and plotted. The results of the study showed that the DAP which was calculated based on the fractal model of the perimeter-area includes values between 1.3-1.4. This is indicative of a drastic change of the clay microforms. Moreover, the logarithmic graph of the fractal model shows that there is a linear relationship between the perimeter logarithm and area logarithm of the selected forms, so that the obtained correlation coefficient R^2 is greater than 0/98. The increase in the turbulence of Gavkhooni wetland is indicative of the evolution in the forming system and its transformation into a new ecosystem.

Keywords: Wetland, Fractal Model, Micro-Landform, Ghavkhooi

بررسی آشفتگی در میکرولندفرم‌های تالاب گاوخونی

منیژه قهرودی تالی^{۱*}، لادن خدری غریبوند^۲^۱ دانشیار، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، نگارنده رابط (M-Ghahroudi@sbu.ac.ir)^۲ دانشجوی دکتری، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران (L_khedri@sbu.ac.ir)

تاریخ داوری: ۱۳۹۲/۱۲/۳

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۱۱/۱۹

تاریخچه انتشار مقاله

تاریخ انتشار: ۱۳۹۳/۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۳/۲۶

تاریخ اصلاحات: ۱۳۹۳/۱/۲۰

چکیده

تالاب‌های ایران باقیمانده دریاچه های بارانی کواترنری می باشند، که اغلب آنها حوضه‌های نواحی خشک و نیمه خشک را زهکشی می کنند. کاهش میزان آب ورودی به تالاب‌ها، سبب ایجاد تحولات شکل‌زایی در آنها شده است که آثار آن در میکرولندفرم‌ها قابل ردیابی است. در این پژوهش تالاب گاوخونی در جنوب شرق اصفهان، توسط مدل‌سازی فرکتالی برای تعیین الگوی حاکم بر میکروفرم‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. داده‌های تحقیق از مشاهدات میدانی برداشت شده است. به منظور اندازه‌گیری فرکتال‌های هندسی، سه دوره مشاهدات میدانی در بهار، تابستان و پاییز ۱۳۹۲ انجام شد و تعداد ۳۵ میکروفرم رسی در بهار و پاییز، بعد از بارندگی انتخاب شد. از کل نمونه‌ها ۲۰ عدد از میکروفرم‌ها که از لحاظ مرزی به خوبی توسعه یافته بودند، به طور تصادفی انتخاب و ابعاد آنها به طور دقیق محاسبه و ترسیم گردید. نتایج به دست آمده از این تحقیق نشان داد که، D_{AP} محاسبه شده بر اساس مدل فرکتالی محیط - مساحت، مقادیری بین ۱/۳ تا ۱/۴ را شامل می‌شود، که گویای شدت تغییر میکروفرم‌های گلی و تمایل آنها به افزایش آشفتگی و بی‌نظمی دارد. نمودار لگاریتمی مدل فرکتالی نیز نشان می‌دهد، که یک ارتباط خطی بین لگاریتم محیط و لگاریتم مساحت فرم‌های مورد

نظر وجود دارد، به طوری که ضریب همبستگی R_2 به دست آمده بزرگتر از ۰/۹۸ می‌باشد. افزایش آشفتگی در تالاب گاوخونی، حاکی از تحول سیستم شکل‌زایی آن و تبدیل تالاب به اکوسیستمی جدید می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تالاب، مدل فرکتال، میکرو لند فرم، گاوخونی.

۱. مقدمه

مجموعه داده، از روش‌های بررسی آن مجموعه می‌باشد؛ اگرچه این مجموعه داده می‌تواند به طور کامل آشفتنه باشد. فرکتال به عنوان یک الگوی هندسی تعریف می‌شود که در مقیاس‌های همیشه کوچکتر، برای ایجاد اشکال نامنظم و سطوحی که توسط هندسه کلاسیک نمی‌تواند نشان داده شود، تکرار می‌شود. یک مدل فرکتال، ابزاری برای توصیف طبیعت مجموعه‌های فرکتالی، مانند محاسبه بُعد فرکتالی آن و مدل‌سازی ارتباطات بین مجموعه‌های فرکتال، یا بین مجموعه‌های فرکتالی و غیر فرکتالی فراهم می‌کند (Cheng, 1994). اولین مدل محیط-مساحت توسط مندلبروت در سال ۱۹۷۷ برای ارزیابی محیط‌ها و مساحت‌های درون یک مجموعه از پدیده‌های شکل یافته منظم، ایجاد شد. این به اصطلاح مدل جزیره-شکاف برای بررسی هندسه مناطق ابری و برای مشخص کردن درجه پیچیدگی اشکال ابرها مورد استفاده قرار گرفت (Lovejoy, 1982)، همچنین برای اندازه‌گیری سطوح شکستگی روی قطعات فلز استفاده شد (Mandelbrot et al., 1984). اگرچه، مدل گاهی در آزمایشات مشابه نتایج متناقض ارائه می‌داد (Goodchild, ۱۹۹۸)، بنابراین یک مدل توسعه یافته توسط Lovejoy و Schertzer در ۱۹۹۱ از نقطه نظر مولتی فرکتالی ایجاد شد. 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 Cheng در ۱۹۹۵ پیشنهاد شد. این مدل عمومی برای جدا کردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی از زمینه (Cheng, 1995) با مشخص کردن توزیع اثر عناصر بر روی سطوح کانی‌ها (Zhang et al., 2001) و با الگوهای مدل آبراه‌ای (Cheng et al., 2001) به کار برده شد. علاوه بر این، مدلی برای مشخص کردن تغییر شکل دانه‌های کوارتز در انواع مختلف میلونیت‌های دارای درجات مختلف متامورفیسم

بیشتر تالاب‌های ایران، حوضه‌های انتهایی در قلمرو خشک و نیمه‌خشک با میانگین بارندگی کم می‌باشند. این تالاب‌ها در دوره‌های بارانی در کوتاه‌تر شکل گرفته‌اند و تدام آنها از طریق رودها و مسیل‌های وارده به آنها می‌باشد. در حال حاضر به دلیل کاهش آب ورودی به آنها، تحول جدیدی بر آنها حاکم شده است. این تحولات جدید سبب ایجاد میکروفرم‌هایی شده است، که شاهدهی بر بی‌نظمی یا آشوب در سیستم شکل‌زایی حاضر و گذر آن به سیستمی پلایا گونه می‌باشد (قهرودی، ۱۳۹۱)، که توسط هندسه فرکتالی یا برخالی قابل مطالعه است. هندسه فرکتال مناسب‌ترین ابزار ریاضی جهت توصیف بی‌نظمی و آشفتگی پدیده‌های پیچیده طبیعی، با استفاده از پارامترهای قابل اعتماد می‌باشد؛ بنابراین، مفاهیم فرکتالی می‌تواند برای مدل‌سازی و تعیین تغییرات هندسی نواحی در معرض خطر مورد استفاده قرار گیرد (Martino et al., 2007). با معرفی هندسه فرکتالی توسط مندلبروت در سال ۲۰۰۴ به عنوان هندسه طبیعت، توجه بسیاری از پژوهشگران به این هندسه نوین جلب گردید. از آن زمان تاکنون، پژوهشگران توانسته‌اند هندسه پدیده‌های پیچیده طبیعی را به خوبی با این هندسه مدل نمایند و از طرفی رفتار فیزیکی بسیاری از فرآیندهای طبیعی نیز با بهره‌گیری از روابط هندسه فرکتالی قابل پیش‌بینی می‌باشد.

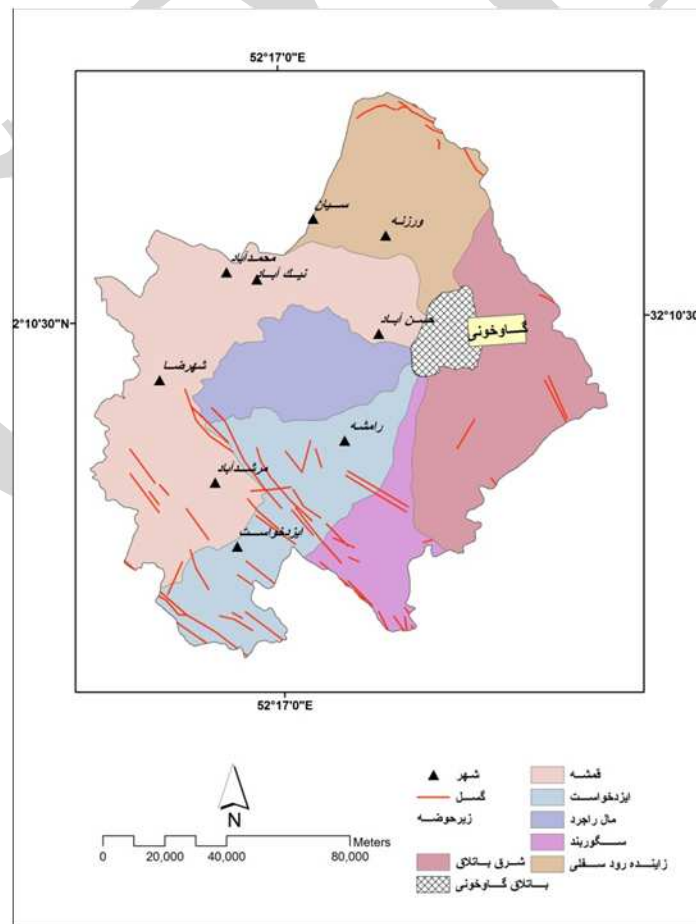
مخاطرات طبیعی زیادی از قانون توانی (فرکتال) آماره‌های اندازه-فراوانی تبعیت می‌کنند (Malamud and Turcotte, 2006). روش معمول جهت بررسی وجود فرکتال‌ها در یک مجموعه داده، برآورد ابعاد آن است. ابعاد اغلب، میزان بی‌نظمی یا تغییرپذیری مشخصه‌ای را توسط توزیع داده‌ها تفسیر می‌کنند (Sivakumar, 2000). بنابراین برآورد ابعاد

میان اکوسیستم آبی با خشکی) واقع شده و انعکاسی از شرایط حاکم بر این دو بوم‌سازگان است. گاوخونی در انتهای‌ترین قسمت حوضه آبریز زاینده‌رود، واقع در زیر حوضه گاوخونی قرارداد (نجاری و رزنه، ۱۳۸۲). این تالاب از نظر موقعیت جغرافیایی در ۳۲ درجه و ۰۸ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۳۰ دقیقه عرض شمالی و ۵۲ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۲ دقیقه طول شرقی و در فاصله ۱۴۰ کیلومتری جنوب شرقی اصفهان قرار دارد و به شکل یک گلابی از شمال به جنوب کشیده شده است، که به علت خشکی و کمبود آب، به طور کلی تا شعاع ده‌ها کیلومتر خالی از سکنه است. در سمت غرب آن تپه‌های ماسه‌ای روان قرار دارد که از فاصله چند کیلومتری شهر رزنه آغاز می‌شود و تا نزدیکی جنوب شرقی روستای خارا از توابع بخش جرقویه ادامه دارد. جبهه شرقی تالاب مجاور کوه‌های شیرکوه و کوه‌های ندوشن قرار دارد و در جنوب آن پهنه وسیعی از اراضی نمک‌زار واقع شده است (شکل ۱).

(Wang et al., 2006) و برای تعیین کمیت توزیع فراوانی و بی‌نظمی دانه‌های اسفالریت، در زون‌بندی‌ها به کار برده شد (Wang et al., 2008). مدل‌های فرکتالی برای تفکیک بین فازهای مختلف کانی‌های کاسیتريت در نمونه‌های سنگی نیز استفاده شده است (Zuo et al., 2008). در این مقاله، از مدل عمومی محیط-مساحت، برای مورفومتری الگوی میکروفرم‌ها در تالاب گاوخونی استفاده شده است.

۲. منطقه مورد مطالعه

تالاب گاوخونی یکی از ۱۳۲۸ تالاب جهان است که در کنوانسیون بین‌المللی ۱۹۷۵ رامسر به عنوان تالاب بین‌المللی شناخته شد. شرایط خاص جغرافیایی، طبیعی و زیست‌محیطی، و سه فاکتور هیدرولوژیکی، مورفولوژیکی و اکولوژیکی، این تالاب را از کمیاب‌ترین تالاب‌های کره زمین قرار داده است، که از نظر علمی برای محققین حائز اهمیت است. تالاب گاوخونی در آستانه ورود به کویر (مرز



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه

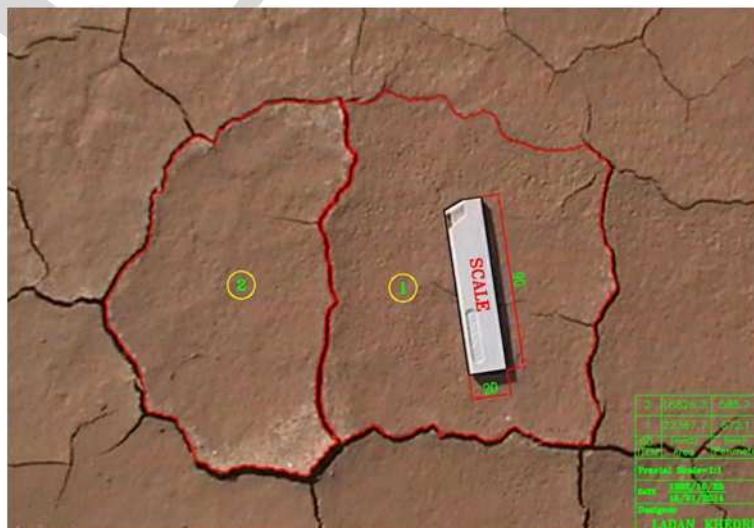
۳. مواد و روش‌ها

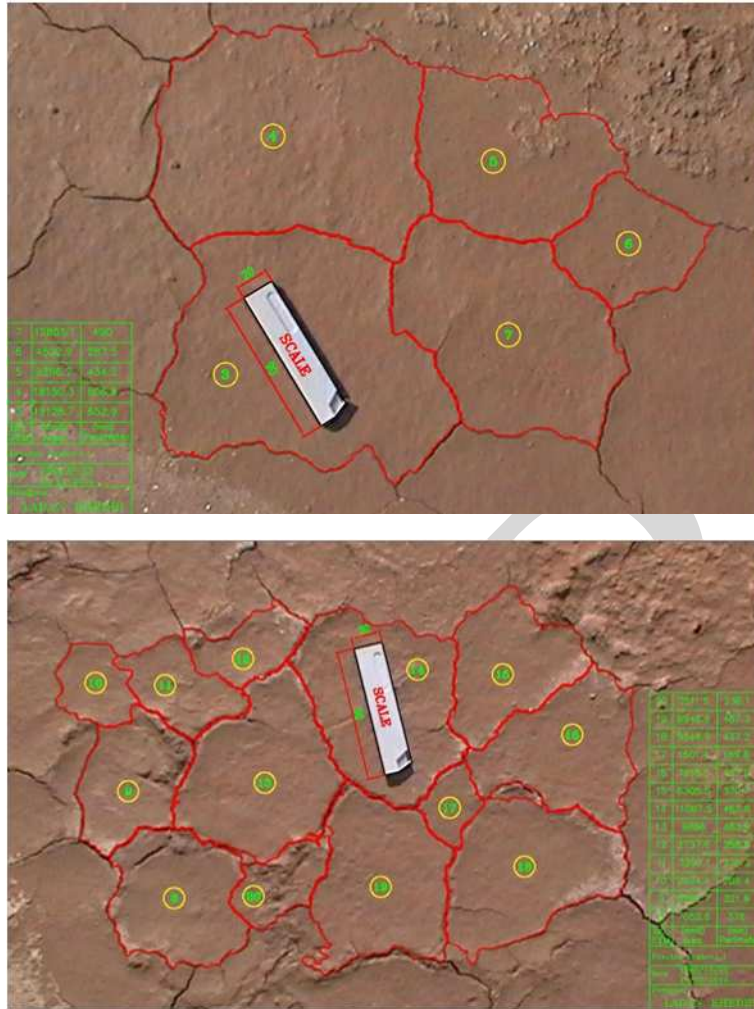
گاوخونی، مدل فرکتال محیط-مساحت به کار برده شد. برای انجام محاسبات مورد نیاز، از تصاویر تهیه شده از ترک‌های گلی منطقه استفاده شد. برای استفاده از مدل فرکتالی، نیاز به داشتن اطلاعات مورفومتری موجود در منطقه می‌باشد، که بر این اساس، از کل نمونه‌ها ۲۰ عدد از میکروفرم‌ها که از لحاظ مرزی به خوبی توسعه یافته بودند انتخاب شده، و در محیط نرم‌افزار اتوکد، محیط (P) و مساحت (A) آنها به طور دقیق محاسبه گردید (شکل ۳).

به منظور اندازه‌گیری فرکتال‌های هندسی، سه دوره مشاهدات میدانی در بهار و پاییز ۱۳۹۲ بعد از بارندگی مستمر انجام شد و تعداد ۳۵ میکروفرم رسی انتخاب شد. زمان بعد از باران از این نظر انتخاب شد، که املاح نمکی محلول در روی رس‌ها شسته شود (قهرودی و همکاران ۱۳۹۱). همچنین در تیرماه ۱۳۹۲ نیز تالاب‌ها برای مشاهده میکروفرم‌های تثبیت شده مورد بررسی قرار گرفت که شکل ۲ نمونه از آن را نشان می‌دهد. برای بررسی الگوی فرکتالی حاکم بر میکروفرم‌های ژئومورفولوژیکی در پلاهای



شکل ۲. نمونه میکروفرم رسی در تیرماه ۱۳۹۲





شکل ۳. تصاویر موقعیت و حدود میکروفرم‌های گلی انتخابی

اگر تنها مجموعه‌ای با "مساحت نرمال" با $D_A = 2$ بررسی شود، $D_{AP} = D_P$ خواهد شد، بنابراین مدل (۱) شکل اصلی توسعه یافته توسط Mandelbrot (1982) می‌باشد.

اگر $2 < D_A$ باشد، در این حالت $D_{AP} > D_P$ می‌شود. برای تعیین توان D_{AP} محیط-مساحت، مجموعه داده‌های A و P ترسیم شده به صورت مقیاس $\log - \log$ ، رابطه خطی بین $\log A$ و $\log P$ را نشان می‌دهد، که می‌تواند توسط یک خط راست با روش حداقل مربعات^۱ برازش داده شود. شیب رگرسیون خطی می‌تواند به عنوان $\frac{1}{\nu} D_{AP}$ تخمین زده شود:

$$\log P = C + \frac{1}{\nu} D_{AP} \log A \quad (3)$$

مدل فرکتال محیط-مساحت یک مدل ریاضی در ارتباط با محیط (P) و مساحت (A) فرکتال‌های شکل یافته به طور مشابه می‌باشد. این مدل به صورت زیر بیان شده است (Cheng, 1995):

$$P \propto A^{\frac{1}{\nu} D_{AP}} \quad (1)$$

که در آن P محیط ترکهای گلی، A مساحت ترکهای گلی و ν نشان دهنده تناسب می‌باشد. D_{AP} توان محیط-مساحت می‌باشد که می‌تواند به صورت زیر نشان داده شود، که D_A و D_P به ترتیب ابعاد فرکتالی محیط (P) و مساحت (A) می‌باشند:

$$\nu D_P / D_A = D_{AP} \quad (2)$$

هستند. در این پژوهش روش box-counting به کار گرفته شده است و DA و DP از طریق رابطه ۵ و ۶ بدست آمده است (Cheng, 1995).

$$D_p = 1 - \lim \left(\frac{\log P(\delta)}{\log \delta} \right) \quad (5)$$

$$D_A = 2 - \lim \left(\frac{\log P(\delta)}{\log \delta} \right) \quad (6)$$

داده‌های P و A بر روی کاغذ لگاریتمی ترسیم و ارتباط خطی بین لگاریتم محیط و لگاریتم مساحت بدست آمده؛ توان محیط و مساحت D_{AP} از طریق برازش خطی مستقیم با استفاده از روش کوچک‌ترین مربعات تعیین شود که شیب این خط برآوردی از $\frac{1}{2D_{AP}}$ است (Cheng, 1995) (رابطه ۷).

$$\log P = C + \frac{1}{2} D_{AP} \log A \quad (7)$$

مدل فرکتال تغییرات شکل میکروفرم‌های گلی را در پلایای گاوخونی مشخص نمود و D_{AP} مقادیر هر کدام از آنها محاسبه گردید. مقادیر به دست در این تحقیق بازه‌ای بین ۱/۳ و ۱/۴ داشت، که D_{AP} بیان‌کننده بی‌نظمی در محیط این تالاب می‌باشد (جدول ۱).

جدول ۱. مقادیر محیط (P)، مساحت (A) و D_{AP} میکروفرم‌های گلی

sample	P (mm)	A (mm ²)	D _{AP}
1	672.1	22367.7	1.30
2	585.7	16826.3	1.31
3	652.9	19128.7	1.31
4	606.8	18150.3	1.31
5	434.2	9296.2	1.33
6	287.5	4522.9	1.35
7	490	12855.1	1.31
8	376	7052.6	1.34
9	321.8	5262.7	1.35
10	209.4	2324.4	1.38
11	276.3	3297.1	1.39
12	258.6	2737.6	1.40
13	483.9	9856	1.34
14	462.8	11067.5	1.32

اگر $D_{AP} = 2$ باشد، پس $P \propto A$ بوده و تغییرات محیط با نرخ مشابه با مساحت می‌باشد. به عبارت دیگر محیط مانند مساحت عمل می‌کند، به طوری که D_{AP} می‌تواند در درجه اول، بی‌نظمی محیط را مشخص کند (Wang et al, 2006). روش‌های دیگری برای مشخص کردن تغییرات شکل وجود دارد. به عنوان مثال، از سمی واریوگرام برای مشخص کردن ویژگی‌های ناهمسانگردی استفاده می‌شود و یا تکنیک‌های (GIS) تغییرناپذیری مقیاس را تعمیم می‌دهد (Lovejoy and Schertzer, 1991). علاوه بر این، پیچ و خم مرز توسط D_p اساس $D_{AP} = 2D_p / D_A$ ، در صورتی که D_A توسط روش‌های دیگر نظیر روش جعبه شمارش محاسبه شده باشد، می‌تواند مشخص شود (Wang et al, 2006).

در مجموع D_{AP} دامنه‌ای از ۱ تا ۲ دارد؛ اگر D_{AP} برابر ۱ باشد آنگاه $P \propto A^{1/5}$ مجموعه‌های شکل گرفته منظمی را مانند مربع‌ها یا دایره‌ها نشان می‌دهد. ارزش بالاتر DAP، فشردگی بیش‌تر شکل را بیان می‌کند و اگر DAP برابر ۲ باشد آنگاه $P \propto A$ برقرار می‌شود. بر این اساس، با افزایش ارزش D_{AP} از ۱ به سمت ۲ بر میزان آشفتگی و بی‌نظمی محیط نسبت به مساحت پدیده مورد بررسی افزوده می‌شود، که نشان دهنده‌ی افزایش آشفتگی در رویداد پدیده می‌باشد.

۴. بحث و نتایج

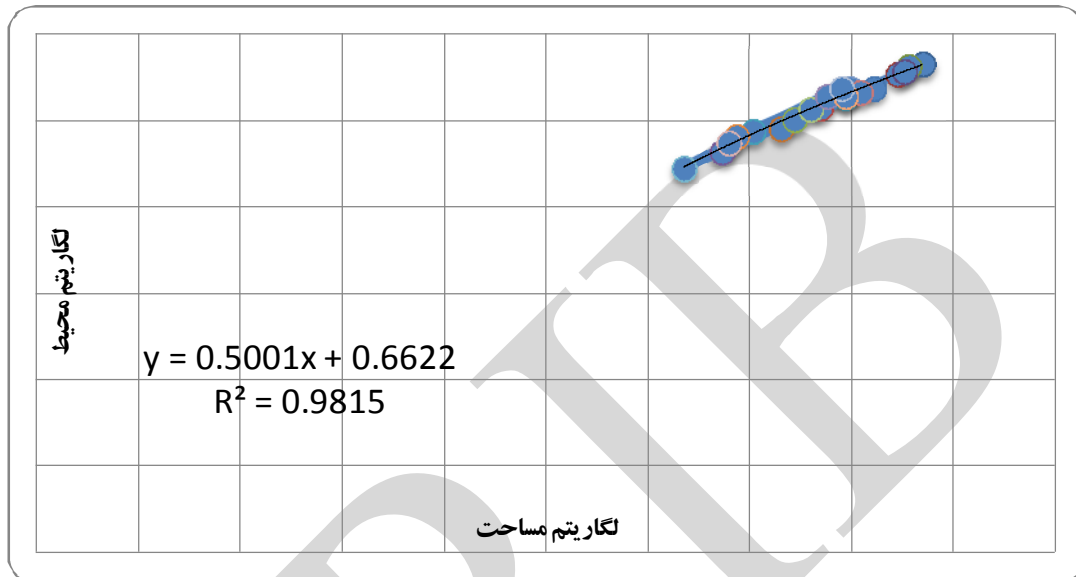
فرکتال محیط-مساحت مدلی ریاضی جهت نشان دادن ارتباط بین محیط (P) و مساحت (A) فرکتال‌های مشابه شکلی می‌باشد (Cheng, 1995; Wang et al, 2006). این مدل از طریق رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P \propto A^{\frac{1}{2} D_{AP}} \quad (4)$$

که در آن P محیط و A مساحت اجزای یک پدیده است؛ \propto نیز نسبت به "تعریف شده است. D_{AP} توان ارتباط قانون توانی می‌باشد که از رابطه $D_{AP} = 2D_p / D_A$ بدست می‌آید، D_p و D_A بترتیب ابعاد فرکتالی محیط و مساحت

شکل (۴) نمودار لگاریتمی محیط و مساحت و مقدار ضریب همبستگی آنها را نشان می‌دهد. این نمودار بیانگر ارتباط خطی بین لگاریتم محیط و لگاریتم مساحت میکروفرم‌ها گلی می‌باشد، به طوری که ضریب همبستگی R_2 به دست آمده بزرگتر از $0/98$ می‌باشد.

sample	P (mm)	A (mm ²)	D _{AP}
15	370.7	6305.5	1.35
16	437.9	7618.5	1.36
17	169.8	1501.4	1.40
18	437.2	9346.9	1.33
19	487.3	8946.6	1.36
20	236.1	2511.5	1.40



شکل ۴. نمودار لگاریتمی محیط - مساحت میکروفرم گلی

۵. نتیجه‌گیری

سبب به هم خوردن نظم بیولوژیکی شده است که نتیجه آن تحول سیستم شکل‌زایی آن و تبدیل تالاب به اکوسیستمی جدید می‌باشد.

منابع

قهرودی تالی م. (۱۳۹۱) پلایاها، تشدید کننده ریزگردها در ایران. همایش ژئومرفولوژی و زیستگاه انسان (فرصت‌ها و محدودیت‌ها)، انجمن ایرانی ژئومرفولوژی، تهران.

قهرودی تالی م.، میرزاخانی ب. و عسکری آ. (۱۳۹۱) پدیده کویرزایی در تالاب‌های ایران، مطالعه موردی: تالاب میقان. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، شماره چهارم، صص ۳۶-۲۱.

قهرودی تالی م.، لشکری ح. و حسینی ز. (۱۳۹۰) کاربرد تکنیک PCA و شاخص OIF در شناسایی کانی‌های تبخیری در پلایاها مطالعه موردی: دریاچه مهارلو. *مجله مطالعات جغرافیایی مناطق خشک*. (۳)۱، صص ۳۶-۲۱. سبزوار.

نجاری ح.، (۱۳۸۲) تالاب بین‌المللی گاوخونی اصفهان، انتشارات سازمان حفاظت از محیط زیست، ۱۵۵ صفحه.

مدل‌های فرکتالی، برای نشان دادن طبیعت پیچیده پدیده‌های شکل یافته نامنظم و تعیین الگوریتم میکروفرم‌ها و بررسی تغییرات شکل و درجه بی‌نظمی آنها مورد استفاده قرار می‌گیرد. نتایج تحلیل در D_{AP} محاسبه شده بر اساس مدل فرکتالی محیط - مساحت، مقادیری بین $1/3$ تا $1/4$ را شامل شده است، که گویای شدت تغییر میکروفرم‌های گلی و تمایل آنها به افزایش آشفتگی و بی‌نظمی می‌باشد. افزایش آشفتگی‌های اخیر در تالاب گاوخونی، احتمالاً به علت خشکسالی و کاهش جریان آب بوده است، زیرا بررسی تحولات کوتاه‌تر در حوضه‌های انتهایی نشان داده است که تحول سیستم شکل‌زایی آنها به پلایا به علت تغییرات ژئوشیمیایی کانی‌های محلول آن بوده است که آن هم به علت کاهش منابع ورودی آب رخ می‌دهد (قهرودی و همکاران، ۱۳۹۰). تغییرات کانیهای محلول به نوبه خود

Cheng Q. (1994) *Multi-fractal modeling and spatial analysis with GIS: Gold potential estimation in the Mitchel-Sulphurets area, Northwestern British Columbia*, Ph.D. thesis, University of Ottawa, Ottawa, 268 pp.

Cheng Q. (1995) The perimeter–area fractal model and its application to geology. *Math Geology*, 27 (1), 69–82.

Cheng Q., Russell H., Sharpe D., Kenny F. & Qin P. (2001) GIS-based statistical and fractal / multifractal analysis of surface stream patterns in the Oak Ridge's Moraine. *Computer & Geoscience*, 27 (5), 513–526.

Goodchild MF (1988) Lake on fractal surfaces: a null hypothesis for lake-rich landscapes. *Math Geology*, 20 (6), 15–630.

Lovejoy S (1982) Area–perimeter relation for rain and cloud areas. *Science* 216(4542):185–187.

Lovejoy S, Schertzer D (1991) Multifractal analysis techniques and the rain and cloud fields from 10–3 Dordrecht, p. 318.

Mandelbrot BB (1977) *Fractals: form, chance, and dimension*. Freeman, San Francisco, p. 365.

Mandelbrot, B B (1982) *The fractal geometry of nature*: Freeman, New York, 468 p. 347.

Mandelbrot BB (1983) *the fractal geometry of nature* (updated and augmented edition). Freeman, New York, p.468.

Mandelbrot BB, Passoja DE, Paullay AJ (1984) Fractal character of fracture surfaces of metals. *Nature*308(5961):721–722.

Mandelbrot B. B. (2004) *Fractals and chaos, the Mandelbrot set and beyond*, Springer, Selecta v. C., 308 pp.

Zuo R, Cheng Q, Xia Q (2009) Application of Fractal Models to Distinguish between Different Mineral Phases. *Math Geoscience*, 41, 71–80, Available from: DOI 10.1007/s11004-008-9191-3.

Wang Z., Cheng Q. & Cao L. (2006) Fractal modeling of the microstructure property of quartz mylonite during deformation process. *Math Geology*, 39(1), 53–68.

Wang Z, Cheng Q, Xu D & Dong Y (2008) Fractal modeling of sphalerite banding in JindingPb–Zn deposit, Yunnan, Southwestern China. *Journal China University Geoscience*, 19(1), 77–84.

Zhang Z, Mao H & Cheng Q (2001) Fractal geometry of element distribution on mineral surface. *Math Geology*, 33(2), 217–228.