استفاده از روش برخال برای تعیین چگالی بوگه لوح‌سنگی در منطقه چارک (جنوب ایران)

سید رضا مهرنیا[۱*]، وحید ابراهیم‌زاده اردستانی[۲] و اصغر تیموریان[۳]

[۱] دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
[۲] موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران، ایران
[۳] دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۶/۱۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۱/۹/۲۸)

چکیده

روش متداول برای تعیین چگالی لوح سنگی، استفاده از الگوی نتلتون با هدف سنجش میدان گرانی مستقل از نشیب و فرازهای ساختمانی است که به‌طور موردی و به‌دلیل ضخامت زیاد پوسته در زاگرس چین‌خورده (جنوب ایران)، موجب افزایش خطا در خلال فرایند تصحیح می‌شود. از این‌رو تعیین مکان هندسی بی‌هنجاری‌ها نیازمند سنجش دقیق‌تر تغییرات گرانی به روش‌های غیرخطی است که پس از جمع‌آوری اطلاعات زمین مرجع و درون‌یابی داده‌ها، رابطه برخالی (فراکتالی) پراش‌مسافت با هدف تقریب چگالی لوح سنگی محاسبه می‌شود. نتیجه این تحقیق، دستیابی به کمیت‌های مستقل از روند هم‌ایستایی گوشته در سازندهای رسوبی منسوب به تاقدیس چارک است که به‌دلیل بهره‌گیری از تابع‌های نمایی در شناسایی مولفه‌های گرانشی متناظر، درحکم روشی نوین برای تقریب چگالی ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب در بخشی از میادین نفتی استان هرمزگان پیشنهاد شده است.

واژه‌های کلیدی: چارک، چگالی لوح سنگی، برخال، گرانی‌سنجی، میدان نفتی

Application of fractal methods to determine the Bouguer density in Charak Region (South of Iran)

Seyed Reza Mehrnia[1*], Vahid Ebrahimzadeh Ardestani[2] and Asghar Teymoorian[3]

[1] *Payam Noor University, Tehran, Iran*
[2] *Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran*
[3] *Tehran Science & Research Unit, Islamic Azad University, Iran*

(Received: 3 September 2011, accepted: 18 December 2012)

Summary

A common method to determine the Bouguer density value as a random variable independent from topographic alternations has been introduced by Nettleton algorithm. During the correction processes, it may casually be accompanied by unexpected errors, for example in the folded region of Zagros, as a result of crustal thickening processes in the Southern regions of Iran. Sedimentary sequences in Charak-Namakin anticlines are known as important geological units which have been selected for prospecting oil related reservoirs by the National Iranian Oil Company. Gravimetric datasets have been acquired by this company through systematic land surveys in a total of 776 stations. The main

[*]Corresponding author: r_mehrniya@pnu.ac.ir [*]نگارنده رابط:

target areas along Charak - Namakin salt domes are geographically located between 54.00 - 54.30 degrees of longitudes and 27.00 - 28.45 degrees of latitudes. Both Asmari (Oligocene) and Pabdeh - Gurpi formations (early Cenozoic) contain limestones with gray marls intercalations as a potentially valuable facies for hosting of hydrocarbore reservoirs under ascending movements of the Paleozoic formations in diapiric systems. Hormoz series (Cambrian) containing gypsum and other related evaporates play the main roles for oil trapping processes after arriving the emigrant volatiles to the permeable layers nearby brecciated structures. Determination of the optimum Bouguer density so that it is only related to Charak geological impressions is an important procedure which associates a number of gravimetric anomalies with probable oil trap locations. It means that Bouguer anomalies are comfortable geophysical quantities for density estimations according to statistical techniques. Although a linear method such as Nettleton correction can be used for density estimations, some abnormal thickening of the crust may increase in topographic disturbances and subsequently cause stochastic behaviors of the gravity values which cannot be interpreted by Euclidean geometry. Therefore, nonlinear analyses such as power law functions can be used to calculate the fractal dimensions as non-Euclid variables related to self similar peculiarities of the gravimetric values which are theoretically assumed to be spatially independent from crustal interactions with heavy masses of the lithosphere. According to Mark and Aronson, two fractal-based interpretations corresponding to gravimetric anomalous regions have been carried out by applying a variance – distance logarithmic equation in Free Air and Bouguer georeferred datasets, respectively. This research is an attempt to study the Brownian surfaces as unique area indicators to cumulative appearances of the gravimetric similarities above Charak sedimentary formations. Given the iteration processes on the log-log plots, some Bouguer anomalies have been recognized to be independent from topographic alternations in the ranges of 6.44-10.24 km distances from backgrounds. As a result, an averaged density value equal to 2.4 kgm^{-3} was calculated for Charak lithological occurrences by a stepwise fractal analysis of the total density assumptions (1.8-2.4 kgm^{-3}). The fractal result was subsequently compared with the statistical result considered to be in a range of 2.3-2.4 kgm^{-3} as optimum density values for the Hormozgan Region after obtaining a new ratio of Bouguer regression versus the Bouguer Poisson coefficient (R^2P) among estimation processes.

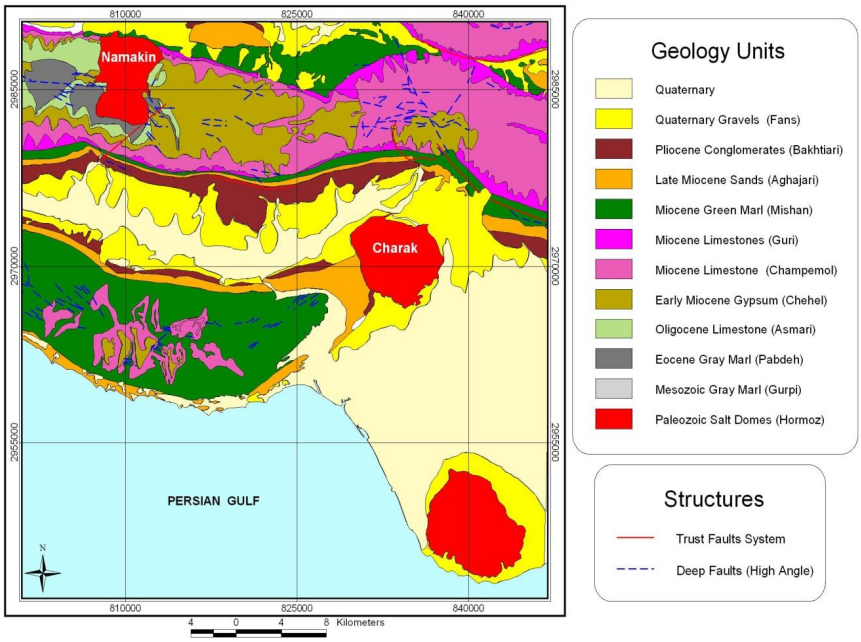
Key words: Bouguer density, Charak, fractal, gravimetric, oil field

۱ مقدمه

مطابق شکل۱، ناحیه چارک با گستره طولی $54^{o}00^{/}$ تا $54^{o}30^{/}$ و عرض جغرافیایی $27^{o}00^{/}$ تا $28^{o}45^{/}$ بخشی از حوزه نفت‌خیز جنوب زاگرس در استان هرمزگان است که به‌دلیل وضعیت زمین‌ساختی مناسب از جمله تعدد رخنمون‌های گنبدی‌شکل ناشی از پدیده بالاآمدگی رسوبات تبخیری پالئوزوئیک از قابلیت پیدایش ذخایر هیدروکربور در سنگ میزبان کربناتی برخوردار است (فرمانی،۱۳۸۲). مناطق مستعد در حوزه نفت‌خیز چارک– نمکین متشکل از رخساره‌های آهکی منسوب به الیگوسن (سازند آسماری) و مارن‌های خاکستری اوایل سنوزوئیک (سازندهای پابده و گورپی) است که اغلب در بخش تحتانی فرازهای تاقدیسی‌شکل روستای نمکین (شمال غرب نقشه) و گنبد نمکی چارک (در مرکز و شرق نقشه) قرار گرفته‌اند. سنگ میزبان ذخایر نفتی در اغلب موارد با پوش‌سنگ تبخیری سری هرمز (کامبرین) و واحدهای سیلتی– مارنی منسوب به سازند آغاجاری احاطه شده است (فرمانی ،۱۳۸۲). براساس شواهد لرزه‌نگاشتی (باند پهن و تله سایزمیک)، متوسط عمق موهو در گستره زاگرس چین‌خورده ۴۵ کیلومتر است (کاویانی، ۲۰۰۳؛

یمینی فرد و هاتزفلد، ۲۰۰۸) و تعدیل اختلاف ارتفاع ناشی از نشیب و فرازهای ساختمانی (تاقدیس و ناودیس متوالی در رژیم تافروژنیک سنوزوئیک) برای اِعمال تصحیحات گرانی ضرورت دارد. ازآنجاکه سنجش تغییرات گرانی در سنگ میزبان و پوش‌سنگ تبخیری همراه آن، به‌منزلهٔ ملاکی برای پی‌جویی تله‌های ساختمانی و تعیین موقعیت مکانی ذخایر نفتی محسوب می‌شود؛ لذا افزایش خطا در تعیین وضعیت رخساره‌های زیرسطحی، دستیابی به مخازن احتمالی را ناممکن می‌سازد. بنابراین اصلاح الگوی بی‌هنجاری‌ها و برآورد چگالی حاصل از تغییرات لوح سنگی برای پی‌جویی مقدماتی میادین نفتی (به‌روش گرانی‌سنجی) ضرورت دارد (فرمانی، ۱۳۸۲).

در جدول ۱، موقعیت مکانی نمونه‌های به‌دست آمده از مقاطع گرانی به‌همراه تغییرات چگالی مرتبط با رخنمون‌های رسوبی چارک لحاظ شده است. براساس سوابق موجود، پیمایش‌های سطحی و منظم منطقه با ثبت تغییرات گرانی در ۷۷۶ ایستگاه و به‌موازات مقاطع اکتشافی L27 -L18 به‌عمل آمده است (فرمانی، ۱۳۸۲)، پس از تصحیح داده‌های گرانی، بیشینه و کمینه بی‌هنجاری بوگه به‌ترتیب ۲۴/۳۱۱- میلی‌گال و ۵۰/۳۶۷- میلی‌گال محاسبه شده که با رخساره مارنی-کربناتی (مقدار بیشینه) و سازندهای کنگلومرایی (مقدار کمینه) مطابقت مکانی نسبی دارد. در اغلب مناطق خُرد شده، تغییرشکل‌های کاتاکلاستیکی پیش از کاهش بی‌هنجاری بوگه مشاهده می‌شود. چگالی نسبی در بخش‌های متفاوت سازند آسماری (درحکم میزبان ذخایر هیدروکربوری) در مقایسه با سایر واحدهای رسوبی افزایش دارد و به‌طور محسوسی در مجاورت گنبدهای نمکی و ساختمان‌های گُسلی اطراف تاقدیس نوسان دارد. در تحقیقات پیشین از روش نتلتون (تلفورد و همکاران، ۱۹۸۹) برای تعدیل اثر لوح سنگی استفاده شده و چگالی هر مقطع هم‌زمان با درج تصحیحات هوای آزاد و تغییرات عرض جغرافیایی، در رابطه تعیین بی‌هنجاری بوگه به‌کار رفته است. با توجه به جدول۱، میانگین تغییرات چگالی بدون در نظر گرفتن



شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی منطقه چارک– نمکین واقع در استان هرمزگان (شرکت ملی نفت ایران، فرمانی، ۱۳۸۲). آهک آسماری (الیگوسن) و مارن‌های خاکستری‌رنگ گورپی(اواخر مزوزوئیک)، نقش میزبانی ذخایر نفت را در حوزه چین‌خورده زاگرس ایفا می‌کنند و طی پدیده گنبدی‌شدن رسوبات تبخیری پالئوزوئیک رخنمون یافته‌اند.

ضریب لوح سنگی در فرازهای تاقدیسی شکل منطقه، ۲/۲۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب است که علی‌رغم مطابقت نسبی با چگالی به‌دست آمده از رخنمون‌های آهکی–مارنی سازند آسماری (۲/۳۲ تا ۲/۳۶)، شاخص دقیقی برای بررسی تغییرات گرانی در سنگ میزبان ذخایر نفتی قلمداد نمی‌شود. همچنین با توجه به تعدد نشیب و فرازهای ساختمانی در واحدهای زیرسطحی منطقه چارک، استفاده از الگوی نتلتون برای تصحیح اثرات لوح سنگی سودمند نیست (مارک و آرونسون ، ۱۹۸۴) و ضخامت قابل‌توجه پوسته در این بخش از زاگرس چین‌خورده، احتمال بروز خطای ناشی از ملاحظات توپوگرافی را افزایش می‌دهد. بنابراین عملیات تعیین چگالی و سنجش بی‌هنجاری‌ها در حوزه نفت‌خیز چارک نیازمند بهره‌گیری از روش‌های مستقل از تغییر ضخامت پوسته است که برای تحقق آن، از رهیافت پیشنهادی تورارینسون و مگنوسون (۱۹۹۰) به‌منظور دستیابی به تابع‌های برخال با شاخص توزیع نمایی در کمیت‌های هم‌توان (خودتشابه‌های گرانی) استفاده شده است.

۲ رهیافت استفاده از تابع‌های برخال در تحقیقات گرانی‌سنجی

۲-۱ نظریه آشوب و کاربرد آن در سنجش‌های برخالی

از دیدگاه نظری، ارزیابی تغییرات گرانی در مناطقی که استعداد کافی برای پیدایش ذخایر هیدروکربوری دارند؛ نیازمند بهره‌گیری از روش‌های مبتنی بر نظریه آشوب (Chaos theory) است که در آن با استناد بر مفهوم تابع‌های تکرارپذیر(Recursive Functions)، شاخص توزیع‌پذیری کمیت‌ها در مطابقت مکانی با حاشیه

جدول ۱. تعیین چگالی لوح سنگی به روش نمونه برداری و سنجش دستگاهی در منطقه چارک. (منبع : گزارش شرکت ملی نفت ایران، فرمانی، ۱۳۸۲).

Profiling No.	Coordinate (deg)		Stratum	Lithology	Density (g/cm3)
	Long.	Lat.			
L18	54°36′48.2″	26°31′48.6″	Bakhtiari Fm.	Conglomerates & Sandstone	1.87
L18					1.90
L18					1.90
L19					1.89
L19					1.86
L20	54°17′13.1″	26°47′46.0″	Mishan Fm.	Green Marl	2.14
L20					2.12
L21					2.13
L22					2.07
L22					2.14
L23	54°16′57.4″	26°48′05.9″	Aghajari Fm.	Sandstone & Marl	2.03
L24					2.02
L25					2.04
L26	53°38′17.8″	27°05′02.0″	Bangestan Grp.	Limestone	2.45
L26					2.39
L27					2.41
L28					2.45
L29					2.39
L30	53°38′18.6″	27°04′57.3″			2.44
L31					2.43
L32					2.43
L33					2.45
L34					2.44
L35	53°37′43.3″	27°04′18.3″	Asmari - Gurpi Fm.	Limestone - Gray Marl	2.36
L36					2.32
L37					2.32

محیط‌های آشوبناک (Edge of chaos) محاسبه و درقالب معادلات برخال بیان شود (تورکت، ۱۹۹۷). به‌عبارت‌دیگر، تغییر در کمیت‌های زمین‌فیزیکی که موجب شکل‌گیری بی‌هنجاری‌های گوناگون در سطوح حاصل از سنجش‌های میدانی می‌شود، ناشی از وجود تفاوتهایی در شکل‌گیری اجزای متناظر (Self-similarities) سطحی است و این فرآیند مقارن با تغییر ماهیت جامعه بی‌هنجار از روند ساده خطی به یک روند پیچیده و آشوبناک است. در چنین شرایطی امکان پیش‌بینی رفتار جامعه به روش‌های سنتی (اقلیدسی) دشوار و در مواردی غیرممکن است. بنابراین طبق پیشنهاد تورکت (۱۹۹۷)، برای اغلب مولفه‌های زمین‌فیزیکی نظیر تغییرات گرانی، مغناطیس، لرزه‌نگاشتی و الکترومغناطیسی، امکان استفاده از روابط برخال برای دستیابی به سطح براونی (brownian Surface) به‌منزلهٔ شاخص هندسی منطبق بر حاشیه محیط‌های آشوبناک وجود دارد و الگوی توزیع غیرخطی بی‌هنجاری‌ها پس از محاسبه ضریب خط تابع‌های لگاریتمی (بُعد برخال) تبیین می‌شود، سنجش بی‌هنجاری‌ها (نظیر تغییرات گرانی) در اغلب روش‌های برخالی دارای سه ویژگی به قرار زیر است:

الف- مستقل بودن بی‌هنجاری از مقیاس مشاهدات و سنجش‌های دستگاهی (Scale independency).

ب- مشتق‌ناپذیری تابع چگالی (Non differentiable function).

ج- برخورداری از مولفه ذاتی (Initial Condition) با الگوی کمیت‌های متناظر.

بدین‌ترتیب کمیت‌های مستقل از مقیاس، امکان الگوبرداری از تغییرات زمین‌فیزیکی را برای گستره‌های مکانی متفاوت به‌وجود می‌آورند و مشتق‌ناپذیری تابع‌ها-، موجبات دستیابی به مولفه ذاتی را درحکم کمیت اولیه موردنیاز برای شکل‌گیری جوامع متناظر فراهم می‌کند.

طبق تحقیقات به عمل آمده (فیفر و ابرت، ۱۹۸۹) روند خطی متغیرها با ورود به وضعیت آشوبناک (Chaotic Status) تغییر می‌کند و مولفه‌های تکرارپذیر (Iterative) جایگزین انواع ساده‌تر (فاقد مولفه ذاتی) می‌شوند. در عمل به‌دلیل پیچیدگی و ابهام‌آمیز بودن مشتق تابع‌های اغتشاشی، استفاده از شاخص‌های آماری (نظیر میانگین و انحراف معیار) برای شناسایی جوامع خودتشابه (Self-similar Population) مناسب نیست و محاسبه بُعد برخالی نقاط هم‌توان بهترین پیشنهاد برای تفکیک جوامع متناظر است. از دیدگاه اقلیدسی، رابطه ابعادی متناسب با تغییرات سطح بی‌هنجاری ثابت و بُعد هندسی همهٔ سطوح مساوی عدد۲ است. درحالی‌که از دید هندسه برخالی، ضریب زاویه متناسب با هر سطح، عددی حقیقی با مقدار بزرگ‌تر از ۲ و کوچک‌تر از ۳ است که برحسب گوناگونی و سازوکار توزیع داده‌ها، امکان پیدایش سطح متعارف براونی را با بیشینه کمیت‌های تکرارپذیر فراهم می‌کند.

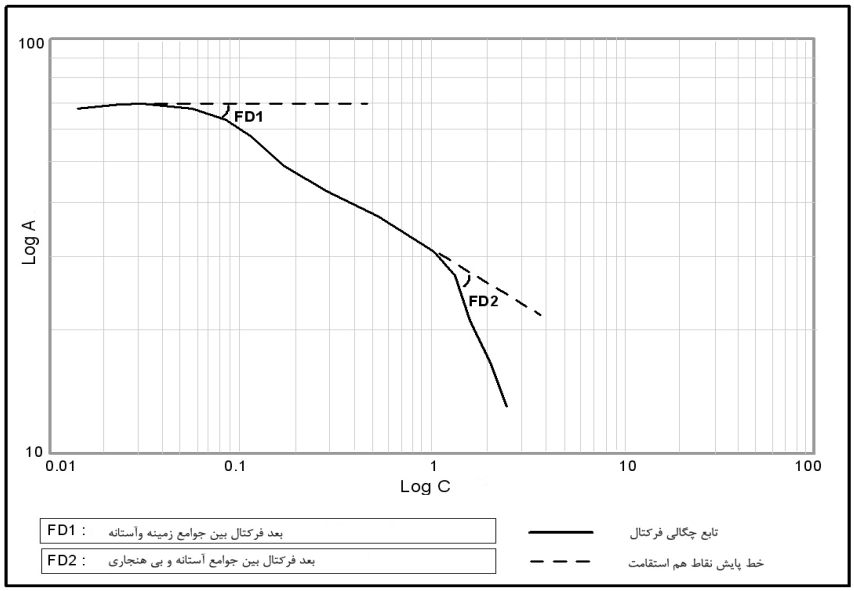
از دیدگاه نظری، تابع‌های برخال برگرفته از روابط توانی (Power law relationships) خاصی هستند که در آنها از ویژگی لگاریتمی کمیت‌های مستقل به‌منظور تعیین بُرد متغیرهای وابسته به توزیع استفاده می‌شود. برای مثال برای دو کمیت مفروض A و C با توان FD، رابطه پیشنهادی به قرار زیر است:

$$A = C^{FD}, \qquad (۱)$$

که A و C به‌ترتیب متعلق به مجموعه‌های بُرد و قلمرو تابع مورد نظرند و FD درحکم کمیت توان این تابع بدون واحد است. شرط لازم برای تبدیل توان FD به ضریب زاویه خط برخال، استفاده از مختصات لگاریتمی در رابطه زیر است:

$$\log(A) = FD \log(C), \qquad (۲)$$

که با توجه به شکل۲، تابع چگالی تغییرات $\log(A)$ برحسب تغییرات $\log(C)$ رسم و ضریب زاویه منتج از



شکل۲. استفاده از تابع چگالی و تغییرات ضریب خط برخال در تفکیک جوامع متناظر واقع در حاشیه محیط‌های آشوبناک. با توجه به تغییر امتداد منحنی برخال، ضرایب خط $FD1$ و $FD2$ محاسبه شده و جوامع زمینه- آستانه و بی‌هنجاری برحسب تغییرات لگاریتمی (C) و (A) متمایز شده‌اند.

پایش خطی نقاط هم‌توان محاسبه شده است. بدیهی است که تغییرات ضریب FD عامل جدایش جوامع متفاوت از یکدیگر و تعدد ضرایب ($FD1$، $FD2$)، حاکی از تغییر رفتار پدیده در رویدادهای آشوبناک است.

۲-۲ سنجش برخالی سطوح بی‌هنجاری با تابع توان مسافت‌پراش

مارک و آرونسون (۱۹۸۴) ، رابطه زیر را برای بررسی تغییرات سطح بی‌هنجاری در روش‌های غیرخطی با استناد بر اصول واریوگرافی داده‌های گرانی معرفی کرده‌اند:

$$E[(Z_p - Z_q)^2] = (d_{pq})^{2H}, \qquad (۳)$$

که Z_p و Z_q به‌ترتیب بیانگر تغییرات گرانی برحسب میلی‌گال در دو نقطه p و q واقع بر سطح بی‌هنجاری و d_{pq} فاصله افقی بین نقاط پیش‌گفته برحسب متر است. چنانچه ملاحظه می‌شود امید ریاضی E در عبارت $(Z_p - Z_q)^2$ با بُعد مسافتی d_{pq} متناسب و رابطه آنها از نوع توانی با توان $2H$ است؛ به‌طوری‌که می‌توان نوشت:

$$2H = 3 - FD. \qquad (۴)$$

با استنباط از مفاهیم آمار کلاسیک، امید ریاضی جمله $E[(Z_p - Z_q)^2]$ به‌دلیل وجود متغیرهای تصادفی با مفهوم پراش حاصل از تغییرات گرانی (Gravity Variance) در نقاط Z_p و Z_q متناسب است. یعنی می‌توان نوشت:

$$E[(Z_p - Z_q)^2] = \sum (Z_i - Z)/N, \qquad (۵)$$

که در عبارت $\sum (Z_i - Z)/N$، منظور از Z_i ، سنجش مولفه‌های گرانی برحسب میلی‌گال و Z میانگین شدت میدان برحسب میلی‌گال برای N برداشت متمایز از سطح بی‌هنجاری است.

نتیجه به‌دست آمده از روابط (۳) ، (۴) و (۵)، موید وجود ارتباط توانی بین پراش حاصل از تغییرات گرانی و مسافت اثر بی‌هنجاری‌ها (Gravity Distance) و توان $2H$ با بُعد برخالی FD متناسب است. شرط لازم برای دستیابی به کمیت‌های مندرج در رابطه (۵)، درون‌یابی زمین‌آماری داده‌های گرانی با هدف ایجاد پیوستگی در شبکه برداشت اکتشافی است و شرط کافی آن، استفاده از

مختصات لگاریتمی برای دستیابی به ضریب زاویه خط FD به‌نحوی است که :

$$\log(V_z) = FD \log(D_z), \qquad (۶)$$

که کمیت‌های $\log(V_z)$ و $\log(D_z)$ به‌ترتیب لگاریتم‌های پراش و فاصله اثر آنها از مرکز بی‌هنجاری است و با رابطه برخالی پراش‌مسافت (رابطه ۶) معرفی می‌شوند. با رسم تابع $\log V - \log D$، تغییرات بُعد برخال FD نشان‌دهنده تمایل جامعه برای شکل‌گیری نقاط هم‌توان است و در پی آن، پیدایش مولفه‌های متناظر در واحد سطح بی‌هنجاری میسر می‌شود (مارک و آرونسون، ۱۹۸۴)؛ به‌طوری‌که برای مقادیر $FD \leq 1$ احتمال شکل‌گیری اجزای متناظر سطحی ضعیف و نشان‌دهنده غالب بودن سازوکارهای خطی (Linear Processes) در روند تکاملی جامعه است (تورکت، ۱۹۹۲). در مواردی که $۱ < FD < ۲$ باشد؛ با وضعیت گذار مواجه هستیم، به‌طوری‌که برخی از کمیت‌ها ویژگی اجزای متناظر دارند اما به‌دلیل کمبود توزیع فضایی مولفه‌های ذاتی، بیشینه تغییرات در بخش زمینه‌ای مشاهده شده و با ورود به حد آستانه محیط آشوبناک تضعیف می‌شوند (تورکت، ۱۹۹۲). در چنین جوامعی، ظهور خصلت‌های شبه‌برخالی (Quasi Fractal) متداول است که به‌نوبه‌خود، احتمال دستیابی به الگوی خودتشابهی را افزایش می‌دهد (مندلبروت، ۲۰۰۲). خواص شبه‌برخالی مخصوص جوامعی است که در آستانه تحولات آشوبناک قرار دارند اما تعدد مولفه‌های متناظر برای ظهور خواص برخالی (تکرارپذیری پدیده‌ها) را ندارند.

بدین‌ترتیب برای جوامع مطلوب (Ideal)، رسیدن به سطح تغییرات متناظر (سطح براونی) الزامی و شکل‌گیری این سطح اغلب با تغییرات بُعد $۲ < FD < ۳$ همراه است (تورارینسون و مگنوسون، ۱۹۹۰). به‌عبارت‌دیگر، رابطه پراش‌مسافت برای آن دسته از نقاط بی‌هنجاری که بُعد برخالی‌شان بین عددهای ۲ و ۳ باشد مصداق دارد. در چنین بُرد پیوسته و معینی از متغیرهای تصادفی نظیر $FD = \{2.01, 2.02, ..., 2.99\}$، سطح بی‌هنجاری در وضعیت مطلوب قرار دارد و دارای بیشترین اجزای متناظر است.

براین‌اساس، رابطه پیش‌گفته امکان ارزیابی سطح بی‌هنجاری را با هدف شناسایی و تفکیک الگوهای تکرارپذیر از انواع توزیع شبه برخال و آشوبناک فراهم می‌کند. شکل ۳، مکان هندسی کمیت‌های Z_p و Z_q را در فاصله اثر d_{pq} روی منحنی‌های هم‌شدت فرضی نشان می‌دهد. طبق روش پیشنهادی (مارک و آرونسون، ۱۹۸۴؛ تورارینسون و مگنوسون، ۱۹۹۰)، تغییرات گرانی بین نقاط p و q با رسم دایره‌های هم‌مرکز و تلاقی آنها با سطح‌های هم‌شدت (Isograde Surfaces) قابل محاسبه‌اند. در این تحقیق برای سنجش برخالی داده‌های گرانی، از سامانه تحلیلگر مکانی (Spatial Analyst) تحت نرم‌افزار GIS استفاده شده و عملیات درون‌یابی با هدف تولید نقشه‌های هم‌شدت (Isograde Maps) به روش‌های زمین‌آماری صورت گرفته است. ترتیب دستیابی به کمیت‌های موردنظر و جایگزینی آنها در تابع لگاریتمی پراش‌مسافت (رابطه۶) به قرار زیر است:

- درون‌یابی زمین‌آماری داده‌ها به روش کریجینگ (Kriging)، با هدف تولید نقشه شبکه (Gridded Maps).
- رده‌بندی مجدد داده‌ها (Reclassification) به‌منظور بهنجارسازی متغیرها و استخراج شاخص‌های آماری موردنیاز.
- تولید جدول آماره‌های تصادفی مشتمل بر مقادیر کمّی سطوح بی‌هنجاری (برحسب کیلومتر مربع) و شدت گرانی متناسب با هر سطح (برحسب میلی‌گال) درحکم مولفه‌های هندسی و زمین‌فیزیکی مرتبط با کمیت‌های Z_p ، Z_q و d_{pq} (رابطه ۳).
- پردازش و تکمیل داده‌های جدول به‌منظور دستیابی به کمیت‌های مندرج در رابطه پراش‌مسافت.

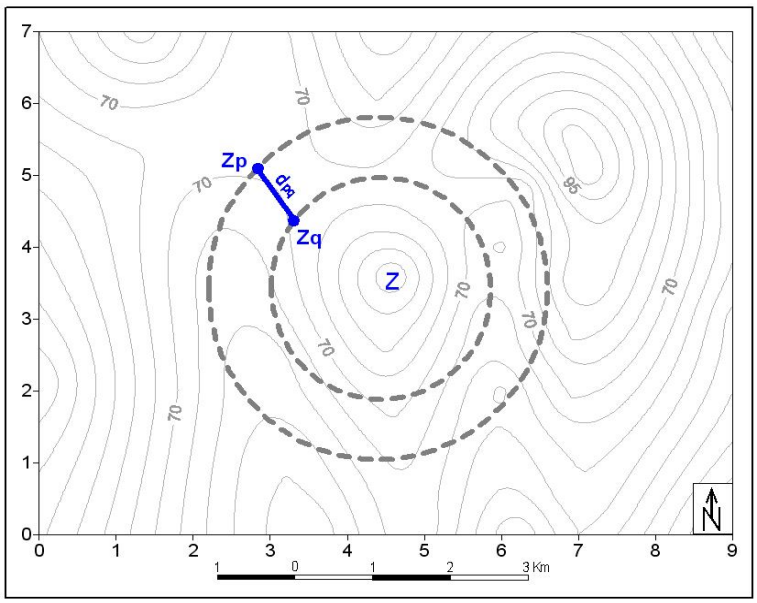
- حل رابطه (۶) و رسم نمودار تغییرات لگاریتمی $\log(V_z)$ در مقابل $\log(D_z)$.
- تعیین نقاط هم‌توان به‌منظور شناسایی جوامع برخال از انواع شبه‌برخال و خطی.
- محاسبه بُعد برخالی نقاط هم‌توان به‌منظور شناسایی روند بی‌هنجاری و مقایسه آن با نحوه توزیع کمیت‌های متناظر در جوامع برخالی، شبه‌برخالی و خطی.
- شناسایی سطح براونی متناسب با توزیع گرانی برحسب تغییرات بُعد برخال (۳ > FD > ۲).

مارک و آرونسون (۱۹۸۴) روشن ساختند که نقاط هم‌توان برآمده از بی‌هنجاری هوای آزاد (Free Air Anomaly)، دارای مولفه گرانشی مستقل از اثرات هم‌ایستایی گوشته است و توزیع گرانی در سطح کمیت‌های متناظر (سطح براونی) ، امکان برآورد چگالی لوح سنگی را در شرایط مطلوب (فاقد اثرات توپوگرافی) فراهم می‌کند. بنابراین، رابطه پراش‌مسافت با دقت قابل‌قبولی مکان هندسی بی‌هنجاری‌ها را بدون در نظر گرفتن نشیب و فرازهای ارتفاعی بررسی می‌کند و خطای تصحیحات لوح سنگی را کاهش می‌دهد.

به‌همین‌ترتیب با دستیابی به نقاط هم‌توان (برآمده از بی‌هنجاری بوگه) و افراز مقادیر تابع به‌ازای چگالی‌های گوناگون، نمودار تغییرات بُعد برخال در مقابل تغییرات چگالی رسم شده و نقطه عطف تابع معرف کمیت چگالی سنگی با حداقل بُعد برخال در سطح براونی است. برای تعیین بی‌هنجاری بوگه متناسب با تغییرات چگالی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$B_{new} = B_{old} + (\rho_{new} - \rho_{old})(0.32562 - 0.0419h) \quad (۷)$$

که منظور از B_{new} و B_{old} به‌ترتیب بی‌هنجاری‌های بوگه مجهول و معلوم برحسب میلی‌گال است و ρ_{new} و ρ_{old} به‌ترتیب چگالی‌های جدید و قدیمی برحسب کیلوگرم بر متر مکعب‌اند و براساس تغییر ارتفاع ایستگاه‌ها از سطح مبنای h (متر) بیان شده‌اند.



شکل۳. برخی از کمیت‌های هندسی به‌کار رفته در رابطه برخالی پراش‌مسافت (نقل از تورارینسون و مگنوسون، ۱۹۹۰). مقادیر Z_p، Z_q و $d\,pq$ در فواصل معینی از نقطه بیشینه (Z) و برحسب مکان تلاقی دایره‌های محاطی با سطوح بی‌هنجاری محاسبه می‌شوند (اختلاف گرانی بین منحنی‌های میزان ۵ میلی‌گال است).

۳ ابهامات موجود در تعیین چگالی لوح سنگی (منطقه چارک)

در سامانه اطلاعات زمین‌فیزیکی منطقه چارک (Charak Geophysical Information System , CGIS) تعداد ۷۷۶ برداشت زمینی منظم وجود دارد که براساس نتایج عرضه شده در گزارش اکتشافی این منطقه (فرمانی، ۱۳۸۲) مقادیر بی‌هنجاری بوگه پس از اِعمال تصحیحات هوای آزاد، جغرافیایی و توپوگرافی (الگوی نتلتون) محاسبه شده‌اند اما به‌دلیل ابهامات موجود در متن گزارش از روابط زیر برای بازیابی تغییرات چگالی پیش‌فرض استفاده کرده‌ایم:

$$\rho s_{46} = \frac{FreeAirS_{46} - BouguerAnomS_{46}}{0.0419h} = \frac{-42.868 + 48.099}{2.274} = 2.3,$$

$$\rho s_{129} = \frac{FreeAirS_{129} - BouguerAnomS_{129}}{0.0419h} = \frac{-41.367 + 44.942}{1.554} = 2.3,$$

$$\rho s_{591} = \frac{FreeAirS_{591} - BouguerAnomS_{591}}{0.0419h} = \frac{-39.889 + 40.738}{0.369} = 2.3,$$

که کمیت‌های ρs_{46} ، ρs_{129} و ρs_{591} به‌ترتیب چگالی‌های محاسبه شده در ایستگاه‌های ۴۶، ۱۲۹ و ۵۹۱ هستند. چنانچه ملاحظه می‌شود، با استفاده از سه کمیت هوای آزاد، بی‌هنجاری بوگه (قبل از تصحیح توپوگرافی) و ارتفاع ایستگاه گرانی‌سنجی، چگالی متوسط منطقه $\rho = ۲/۳$ کیلوگرم بر متر مکعب برآورد می‌شود که همان ρ_{old} در رابطه (۷) است. با جایگزینی ρ_{old} با ρ_{new}، می‌توان به الگوی متفاوتی از تغییرات بی‌هنجاری بوگه (B_{new}) در گستره چارک- نمکین دست یافت، به‌طوری‌که اگر بازه تغییرات چگالی ناشی از گوناگونی سازندها را بین $\rho = ۲/۵۰$ تا $\rho = ۱/۸۰$ در نظر بگیریم، مفاهیم کمّی متعددی از شاخص تغییرات گرانی استنباط می‌شود که به‌نوبه‌خود ابهامات فراوانی را در تفسیر موقعیت مکانی سازندهای مستعد (حاوی ذخایر نفتی) به‌وجود می‌آورد (از این ابهامات در گزارش اکتشافی منطقه چارک- نمکین چشم‌پوشی شده است). بنابراین تعیین چگالی بهینه - به روش‌های غیرخطی و با تاکید بر معادلات برخال، به‌منظور دستیابی به تغییرات گرانی مستقل از نشیب و فرازهای ساختمانی اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

ازآنجاکه تغییرات گرانی منطقه چارک با گوناگونی واحدهای رسوبی و پدیده‌های ساختمانی در حوزه نفت‌خیز زاگرس در ارتباط است؛ بنابراین افزایش خطا در محاسبه چگالی لوح سنگی موجب تقریب نادرست از وضعیت بی‌هنجاری‌ها می‌شود و در پی آن تفسیر نامتعارفی از موقعیت مکانی تله‌های نفتی (Oil Traps) به‌عمل می‌آید. به‌بیان‌دیگر، شرط دستیابی به ذخایر نفت و گاز احتمالی در واحدهای زیرین تاقدیس چارک، شناخت الگوی تغییرات لوح سنگی و تفکیک آن از بازماند گرانشی منسوب به سازندهای مستعد (با تاکید بر آهک آسماری) است که برای دستیابی به این مهم ، از روش تصحیح لوح سنگی بر پایه تغییرات بُعد برخال استفاده شده است.

۳-۱ اثر پدیده هم‌ایستایی در تغییرات گرانی هوای آزاد

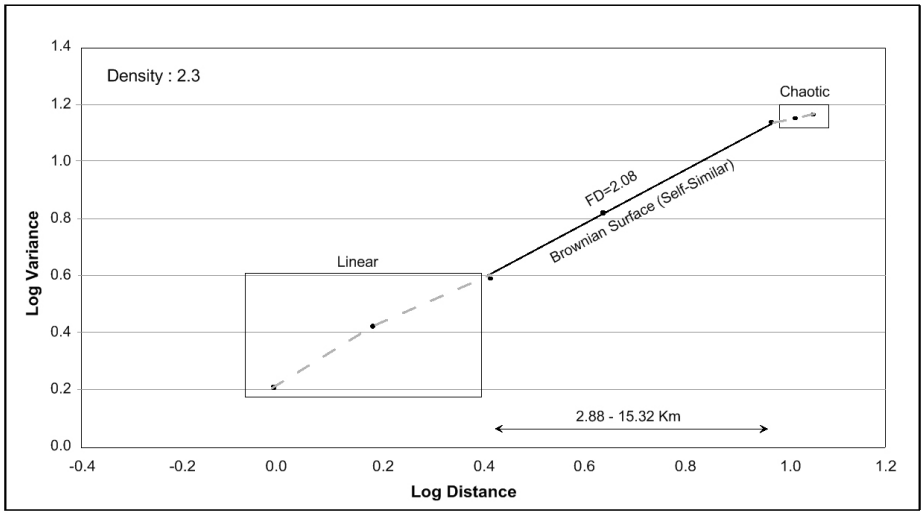
نخستین مرحله از پردازش داده‌های گرانی، استفاده از بی‌هنجاری هوای آزاد تحت رابطه پراش‌مسافت است که با هدف شناسایی کمیت‌های مستقل از پدیده هم‌ایستایی گوشته و در فاصله معینی از سطح توزیع متناظر میدان گرانی (سطح براونی) صورت گرفته است. مطابق نمودار شکل۴، کرنش گرانی (Gravity Strain) حاصل از برآمدگی رسوبات سنوزوئیک در فاصله گنبدهای چارک

– نمکین دارای رفتار دوگانه‌ای است که بخشی از آن با پیدایش سطح تغییرات متناظر (جامعه برخال با بعد ۲/۰۸) همراه است و بخش دیگر از نشیب و فرازهای منطقه تأثیر می‌پذیرد (جامعه آشوبناک با بُعد مخالف ۲/۰۸). به‌عبارت‌دیگر، نقاط هم‌توان منتج از تغییرات هوای آزاد، بیانگر توزیع گرانی با خصوصیات مشابه است و تکرارپذیری در مولفه ذاتی شدت میدان مستقل از مقیاس بی‌هنجاری خواهد بود. یعنی نقاطی که در فواصل ۱۵/۳۲ – ۲/۸۶ کیلومتر از حدود زمینه‌ای قرار دارند، هم‌زمان با ظهور کمیت‌های متناظر (در سطح براونی)، تغییرات میدان گرانی در گستره چارک- نمکین را به دو جامعه با روند تغییرات غیرخطی تفکیک می‌کنند. از بین این جوامع، فقط نقاط هم‌توان با ضریب خط ۲/۰۸ منسوب به تغییرات لوح سنگی‌اند و برای محاسبه بی‌هنجاری بوگه پیشنهاد می‌شوند. نتایج به‌دست آمده از بررسی تغییرات هوای آزاد با استفاده از رابطه پراش‌مسافت، موید آن است که :

الف- اگرچه اِعمال تصحیحات توپوگرافی در گستره چارک- نمکین ضرورت دارد اما استفاده از الگوی نتلتون به‌دلیل ضخامت زیاد پوسته و تغییر ماهیت گرانی (به‌ویژه در فواصل بیش از ۱۵ و کمتر از ۲ کیلومتر) مجاز نیست و باعث افزایش اُریبی در برآورد موقعیت مکانی بی‌هنجاری‌ها می‌شود.

ب- توزیع توانی گرانی و رابطه آن با پیدایش مولفه‌های متناظر که دارای ویژگی مستقل بودن کمیت‌ها از مقیاس سنجش‌های میدانی هستند، بر اولویت استفاده از روش‌های غیرخطی نظیر تابع‌های برخال می‌افزاید.

ج- تابع چگالی حاصل از رابطه پراش‌مسافت، شامل دو جامعه برخالی (نقاط هم‌توان در آستانه محیط آشوبناک با بُعد برخال ۲/۰۸) و غیر برخال (نقاط پراکنده با بُعد برخال مخالف ۲/۰۸) است که با توجه به تعداد کمیت‌های متناظر و مسافت اثر آنها در سطح توزیع گرانی، استفاده از خواص خودتشابهی میدان گرانی برای دستیابی به الگوی تغییرات لوح سنگی و کاهش اثرات توپوگرافی امکان‌پذیر است.



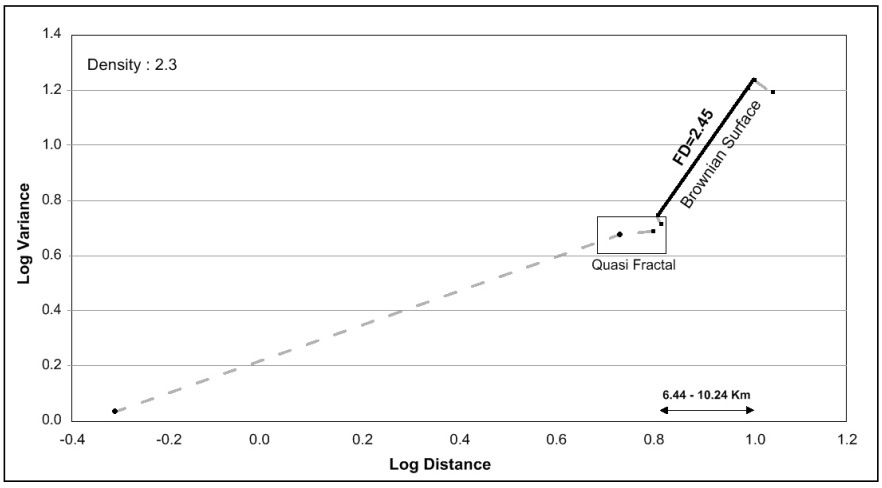
شکل ۴. تابع برخالی پراش‌مسافت برای تغییرات بی‌هنجاری هوای آزاد در گستره چارک – نمکین (با فرض چگالی ۲/۳).ظهور جامعه برخال با بُعد ۲/۰۸ =FD بیانگر تغییرات گرانی مستقل از پدیده هم‌ایستایی در گوشته فوقانی است. روی محور طول‌ها (Log Distance): مولفه‌های متناظر در فاصله ۲/۸۸ تا ۱۵/۳۲ کیلومتر از زمینه بی‌هنجاری قرار دارد و در خارج از آن ، توزیع نامتعارف شدت میدان به‌دلیل تبعیت از عوامل ساختمانی (توپوگرافی) تشدید می‌شود (وضعیت آشوبناک).

۲-۳ الگوی توزیع‌پذیری غیرخطی ناشی از بی‌هنجاری بوگه

پس از بررسی بی‌هنجاری هوای آزاد و شناسایی تغییرات گرانی مستقل از اثرات ارتفاعی ایستگاه‌ها، رابطه پراش‌مسافت برای بی‌هنجاری بوگه با چگالی متوسط ۲/۳ $= \rho$ تشکیل و نتایج آن طبق نمودار شکل ۵ داده شده است. براساس نمودار فوق، حد آستانه بوگه با پیدایش نقاط کم‌توان (همبستگی جزیی) در جامعه شبه‌برخال با ضریب خط ۲ > FD همراه است که در پی آن کمیت‌های متناظر با استقرار در سطح براونی و پایش مولفه‌های خودتشابه (بُعد برخال ۲/۴۵) آشکار می‌شوند. فاصله اثر نقاط هم‌توان بین ۶/۴۴ تا ۱۰/۲۴ کیلومتر از آستانه بی‌هنجاری برآورد شده است. طی این فاصله، تقریب ناأریبی از کمیت چگالی بدون در نظر گرفتن اثرات ارتفاعی و تغییرات ناشی از چین‌خوردگی رسوبات سنوزوئیک (میزبان ذخایر نفتی در زاگرس جنوبی) امکان‌پذیر است. اما با کاهش همبستگی در نقاط انتهایی جامعه (بُعد برخالی مخالف ۲/۴۵)، شاخص تکرارپذیری مولفه‌های ذاتی ضعیف می‌شود و رفتار آشوبناک (غیرقابل پیش‌بینی) در الگوی تغییرات لوح سنگی چارک- نمکین به‌چشم می‌رسد. بنابراین، تعیین چگالی به‌روش اندازه‌گیری تغییرات لوح سنگی (سنجش بی‌هنجاری بوگه) تنها در فاصله اثر محدودی از سطوح هم شدت گرانی امکان‌پذیر است که برای دستیابی به نتایج مورد اطمینان، محاسبه شاخص‌های آماری بوگه برحسب تغییرات چگالی منطقه (۲/۵۰ تا ۱/۸۰) ضرورت دارد.

۳-۳ تعیین چگالی به روش آماری (کلاسیک)

برای تعیین چگالی لوح سنگی در منطقه چارک، از روش‌های آماری متداول (مانلی، ۱۹۹۰) برای استخراج شاخص‌های مرکزی و پراکندگی و مقایسه آماره‌ها با متغیرهای نسبی استفاده شده که نتایج آن مطابق جدول۲ است. کمیت‌های این جدول با استفاده از رابطه (۷) و تحت نرم‌افزار Excel برای ۷۷۶ داده گرانی محاسبه شده‌اند. بیشینه و کمینه چگالی به‌ترتیب ۲/۵ و ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب انتخاب شده که با توجه به سوابق مندرج در جدول۱، با چگالی به‌دست آمده از سازندهای آسماری (۲/۳۲) و بختیاری (۱/۸۷) مطابقت دارد.



شکل۵. تابع برخالی پراش‌مسافت برای تغییرات بی‌هنجاری در گستره چارک – نمکین (با فرض چگالی ۲/۳). نقاط هم‌توان با بُعد برخال ۲/۴۵ = FD بیانگر تغییرات گرانی وابسته به اثرات لوح سنگی هستند. روی محور طول‌ها (Log Distance): شاخص تغییرات لوح سنگی منسوب به فاصله ۶/۴۴ تا ۱۰/۲۴ کیلومتر از آستانه بی‌هنجاری است و برای ابعاد دیگر (۲/۴۵ ≠FD)، توزیع شبه‌برخال و الگوی آشوبناک به‌ترتیب در حدود آستانه و مقادیر بیشینه بی‌هنجاری مشاهده می‌شوند.

جدول ۲. شاخص‌های آماری موردنیاز برای مقایسه تغییرات بی‌هنجاری بوگه به‌ترتیب اِعمال چگالی‌های متفاوت در منطقه چارک. ردیف ششم جدول ، مبتنی بر مشخصات زمین‌فیزیکی و شاخص‌های آماری عرضه شده ازسوی شرکت ملی نفت ایران (فرمانی، ۱۳۸۲) است که در آن چگالی متوسط سنگ‌های منطقه، ۲/۳ کیلوگرم بر متر مکعب گزارش شده است.

No	density (Kg/m3)	Bouguer Anomaly (mgal)				Bouguer Vs. Elevation		R2P Ratio
		Average	Min	Max	StDev	Pearson Coef.	Regression (R2)	
1	1.8	-37.107	-50.441	-7.634	7.979	0.912	0.832	0.9122807
2	1.9	-37.998	-50.426	-11.104	7.111	0.888	0.789	0.88851351
3	2	-38.889	-50.411	-14.405	6.271	0.853	0.729	0.85463072
4	2.1	-39.779	-50.396	-17.707	5.472	0.802	0.644	0.80299252
5	2.2	-40.670	-50.381	-21.009	4.734	0.724	0.524	0.72375691
6	2.3	-41.561	-50.367	-24.311	4.090	0.602	0.363	0.60299003
7	2.4	-43.452	-50.352	-27.612	3.593	0.418	0.174	0.41626794
8	2.5	-43.342	-50.354	-30.914	3.308	0.163	0.026	0.1595092

روش آماری مورد استفاده در این تحقیق شامل محاسبه ضریب پیرسون و تعیین چولگی(Skewness) حاصل از توزیع بی‌هنجاری بوگه در مقابل تغییر ارتفاع نقاط گرانی بوده و کرانه‌های حقیقی آن بین مقادیر ۱ و ۱- است. برای حالتی که ضریب پیرسون صفر است، توزیع متغیرها در وضعیت کاملا عادی (نرمال) است ؛ اما برای مواردی که ضریب پیرسون مخالف صفر می‌شود ، علامت آن تعیین‌کننده سمت چولگی خواهد بود (مثبت برای چولگی به راست و منفی برای چولگی به چپ). با توجه به تغییرات به‌دست آمده برای ضریب پیرسون ، بیشترین چولگی در بی‌هنجاری حاصل از چگالی ۱/۸ کیلوگرم بر متر مکعب و کمترین آن در بی‌هنجاری به‌دست آمده از چگالی ۲/۵ کیلوگرم

بر متر مکعب مشاهده می‌شود. همچنین با محاسبه همبستگی بین تغییرات بی‌هنجاری بوگه و ارتفاع نقاط برداشت گرانی، کمیت‌های لازم برای سنجش آماری مولفه‌های زمین‌فیزیکی (گرانی و چگالی) و مقایسه آن‌ها با متغیرهای هندسی منطقه (ارتفاع و تغییرات توپوگرافی) احراز شده‌اند. در این رابطه از متغیر نسبی جدیدی برای سنجش رگرسیون خطی داده‌ها برحسب تغییرات ضریب پیرسون آنها استفاده شده که در جدول۲ به نام آماره R^2P معرفی شده است.

این آماره یک متغیر نسبی با بُرد پیوسته صفر تا یک است که در آن، افراز مقادیر صفر، نیم و یک برحسب رابطه کمیت های R^2 (مجذور همبستگی دادها) و P (ضریب پیرسون) دارای مفاهیم متفاوتی است. رابطه پیشنهادی برای محاسبه این کمیت به‌منظور بررسی تغییرات بی‌هنجاری بوگه به قرار زیر است:

$$R^2P = [\mathrm{Re}g(Bvs\Delta h)/[Pears(Bvs\Delta h)], \qquad (۸)$$

که R^2P به‌منزلهٔ آماره موردنظر (بدون واحد) و عبارت‌های $\mathrm{Re}g(Bvs\Delta h)$ و $Pears(Bvs\Delta h)$ به‌ترتیب برای محاسبه ضرایب همبستگی و پیرسون بی‌هنجاری بوگه (برحسب میلی‌گال) در مقابل تغییرات ارتفاع (Δh برحسب متر) منطقه مورد بررسی درج شده‌اند. لازم به ذکر است که در این تحقیق، مفاهیم استنباط شده از تغییرات R^2P صرفاً با هدف بررسی تغییرات گرانی و ارتباط آن با چگالی لوح سنگی منطقه چارک تفسیر شده

و مسئولیتی در قبال برداشت‌های مشابه از سایر کمیت‌های زمین‌فیزیکی متوجه نگارنده نیست.

طبق تعریف، پیش‌شرط استفاده از آماره R^2P، تعیین نوع و مقدار همبستگی بین کمیت‌های R^2 و P است که به‌صورت ضریب رگرسیون خطی $R^2(R^2P)$ قابل محاسبه است. براساس آماره‌های موجود (جدول۲)، همبستگی ضریب پیرسون با رگرسیون خطی بی‌هنجاری‌ها مساوی ۰/۹۶ است که بیانگر رابطه معنی‌دار بین دو متغیر R^2 و P است. به‌عبارت‌دیگر، در منطقه چارک به‌ازای افزایش چولگی بی‌هنجاری‌ها، همسویی تغییرات لوح سنگی با ارتفاع ایستگاه‌های گرانی افزایش می‌یابد و میدان گرانشی بازماند متاثر از نشیب و فرازهای ساختمانی خواهد بود (تبعیت بی‌هنجاری از اثرات توپوگرافی). به‌همین‌ترتیب با کاهش چولگی بی‌هنجاری‌ها، همسویی تغییرات ارتفاع با پدیده‌های ناشی از تغییرات لوح سنگی تضعیف می شود و گرانی بازماند به‌طور نسبی مستقل از اثرات توپوگرافی خواهد بود. براین‌اساس، آماره R^2P برآوردکننده نااُریبی از تغییرات چگالی منطقه مورد بررسی است و به‌ازای مقدار ۰/۵ برای R^2P، بهترین گزینه را برای تعیین آن به روش آماری به‌دست می‌دهد.

با توجه به مندرجات جدول۲، به‌ازایR^2P = ۰/۹۱۲ همبستگی تغییرات لوح سنگی و ارتفاع نقاط برداشت بیش از حد انتظار است و علی‌رغم چولگی خوب داده‌های گرانی، انتخاب چگالی ۱/۸ به‌منزلهٔ کمیت مستقل از اثرات ارتفاعی منطقه صحیح نیست. این قاعده برای چگالی‌های ۱/۹ تا ۲/۲ نیز صدق می‌کند ولی به‌ازای R^2P = ۰/۶۰۲ و R^2P = ۰/۴۱۶ با توجه به تقریب نسبت ۱/۲ ، شرایط مناسب برای جدایش تغییرات لوح سنگی از تغییرات توپوگرافی فراهم شده که در پی آن چگالی‌های ۲/۳ و ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب درحکم گزینه‌های مطلوب پیشنهاد می‌شوند. کمیت انتهایی این جدول R^2P = ۰/۱۵۹ است که علی‌رغم همبستگی بسیار ضعیف بی‌هنجاری با تغییرات ارتفاعی ایستگاه‌ها (مستقل بودن میدان گرانی از اثرات توپوگرافی) به‌دلیل کوچک بودن ضریب پیرسون (کمبود چولگی ناشی از نبود توزیع بی‌هنجاری) فاقد معیارهای لازم برای انتخاب چگالی بهینه است.

اگرچه از نظر آماری، چگالی ۲/۳ نسبت به چگالی ۲/۴، برآوردکننده مناسبی برای سنجش تغییرات لوح سنگی منطقه چارک است اما براساس روش پیشنهادی این تحقیق، انتخاب چگالی بهینه به روش‌های غیرخطی و با تاکید بر معادلات برخال صورت می‌گیرد؛ زیرا در نگرش نوین به مسائل علوم زمین، ملاحظات مبنی بر سنجش مولفه‌های ذاتی و شناخت الگوهای تکرارپذیر وجود دارد که در اصول نظری خود با کمیت‌های مستقل از مقیاس در ارتباط است و دقت کافی برای ارزیابی متغیرهای زمین‌فیزیکی دارد (مندلبروت، ۲۰۰۶).

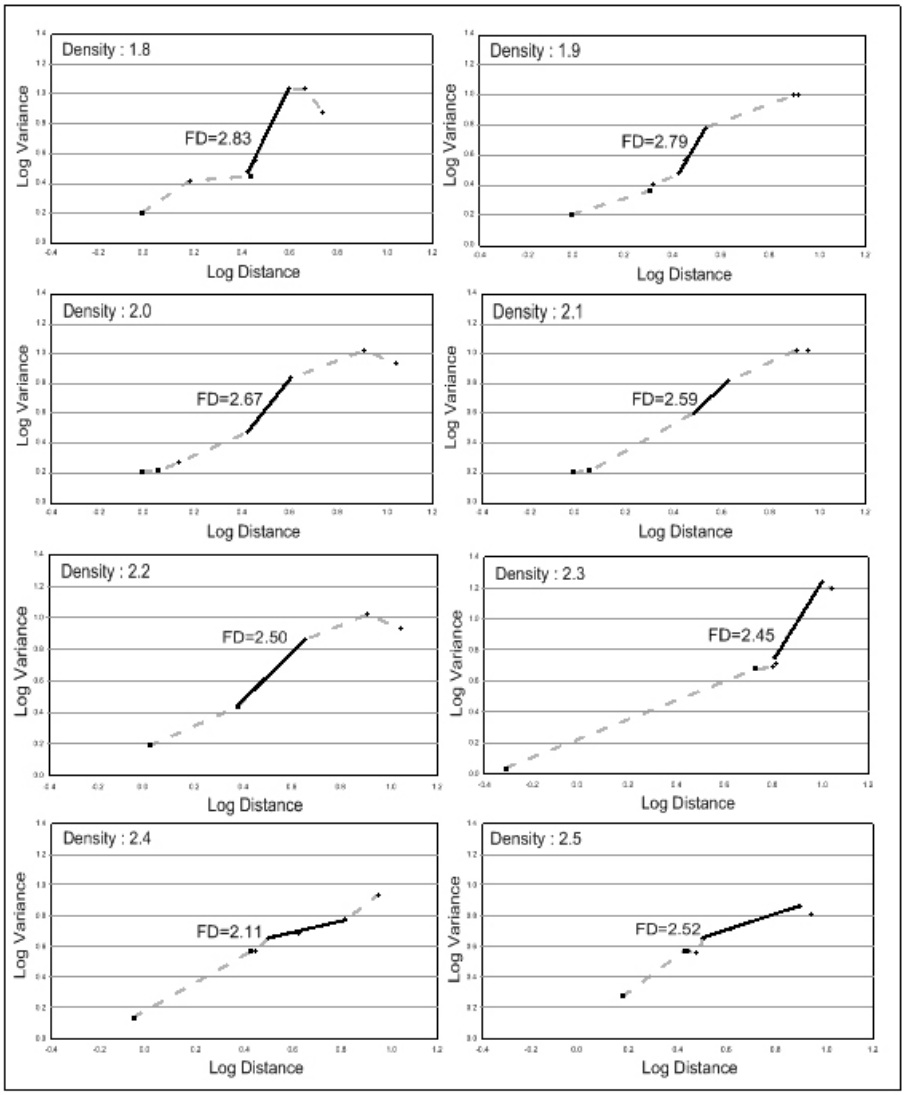
۳-۴ تعیین چگالی به‌روش برخال

پیش فرض استفاده از روش برخال، ارزیابی توزیع غیرخطی داده‌های گرانی در قالب تابع‌های توان است (تورکت، ۱۹۹۷) که پیش‌ازاین با رابطه پراش‌مسافت معرفی شده است (رابطه ۶). به‌دلیل تنوع رخساره‌های رسوبی و تغییرات چگالی در سازندهای مستعد منطقه، بی‌هنجاری بوگه به‌ازای چگالی‌های متفاوت (۱/۸ تا ۲/۵ کیلوگرم بر متر مکعب) محاسبه (رابطه ۷) و به روش کریجینگ درون‌یابی شده است. بدین‌ترتیب مراحل دستیابی به متغیرهای Z_p، Z_q و d_{pq} (رابطه ۵) به‌ازای هربار تغییر در چگالی متوسط منطقه، تکرار و از نتایج آن به منظور رسم تابع‌های برخال استفاده می‌شود.

در شکل۶، نمودارهای حاصل از تابع‌های برخالی پراش‌مسافت به‌ازای چگالی‌های متفاوت (۲/۵ – ۱/۸) ملاحظه می‌شوند. در اینجا نیز مانند شکل ۵، همبود کمیت‌های متناظر (نقاط هم‌توان) موجب پیدایش جوامع

متفاوت می‌شود و ابعاد برخالی با تغییرات سطح براونی ($۲ < FD < ۳$)، امکان شناسایی بی‌هنجاری بوگه را در وضعیت مستقل از تغییرات ارتفاعی منطقه فراهم کرده است. چنانچه ملاحظه می‌شود، بیشینه بُعد برخال منسوب به تغییرات لوح سنگی در چگالی ۱/۹ کیلوگرم بر متر مکعب و کمترین آن متعلق به بی‌هنجاری حاصل از چگالی ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب است.

براساس روش پیشنهادی مارک و آرونسون (۱۹۸۴)، چنانچه تغییرات بُعد برخال را در مقابل تغییرات چگالی قرار دهیم، شبه تابع درجه دومی به‌دست می‌آید که روی آن، مکان هندسی چگالی بهینه منطبق بر نقطه‌عطف تابع (yield point) خواهد بود (کوچک‌ترین بُعد در سطح مولفه‌های متناظر). بنابراین در تاقدیس منطقه چارک، چگالی ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب به‌دلیل $FD_{\min} = ۲/۱۱$



شکل۶. تابع‌های برخالی پراش‌مسافت برای تغییرات چگالی ۱/۸ تا ۲/۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب در گستره چارک- نمکین. خطوط ممتد معرف نقاط هم‌توان با شاخص گرانی متناظر در واحد سطح توزیع است که از نظر مکانی با حاشیه محیط‌های آشوبناک مطابقت دارند (تظاهرات غیرخطی با توزیع برخال). خطوط غیرممتد معرف جوامع با توزیع غیربرخال یا شبه‌برخال است و نقاط واقع بر این خطوط فاقد شرایط لازم برای پیدایش کمیت‌های متناظر در واحد سطح براونی هستند.

درحکم کمیت مستقل از نشیب‌وفرازهای ساختمانی (لوح سنگی) انتخاب و نمودار آن مطابق شکل ۷ رسم شده است.

مقایسه نتایج آمار کلاسیک (جدول ۲) با روش برخال، موید آن است که انتخاب چگالی ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب با کاهش توام ضرایب همبستگی و پیرسون همراه است و وضعیت مناسبی را برای مستقل بودن چگالی لوح سنگی از تغییرات توپوگرافی منطقه فراهم می‌کند. بنابراین با پذیرش فرض $۰/۴ \leq R^2P \leq ۰/۵$ درحکم معیاری برای سنجش آماره‌های متناسب با بی‌هنجاری بوگه تعدیل شده (Optimized Bouguer)، ارتباط داده‌های آماری با نتایج بررسی‌های برخالی به اثبات می‌رسد. بدین‌ترتیب با استفاده از روش‌های آماری، چگالی لوح سنگی منطقه چارک بین ۲/۳ تا ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب تقریب و پس از دستیابی به الگوی توزیع غیرخطی در تغییرات میدان گرانی (روش برخال)، عدد ρ_{final} = ۲/۴۰ کیلوگرم بر متر مکعب درحکم چگالی متوسط بهینه پیشنهاد می‌شود.

۴ نتیجه‌گیری

این تحقیق در ذیل معرفی روش‌های آماری و رهیافت استفاده از روابط غیرخطی در تعیین چگالی لوح سنگی منطقه چارک، به بررسی نتایج هر بخش مبادرت کرده که در اینجا فقط به ذکر مهم‌ترین آنها بسنده می‌شود:

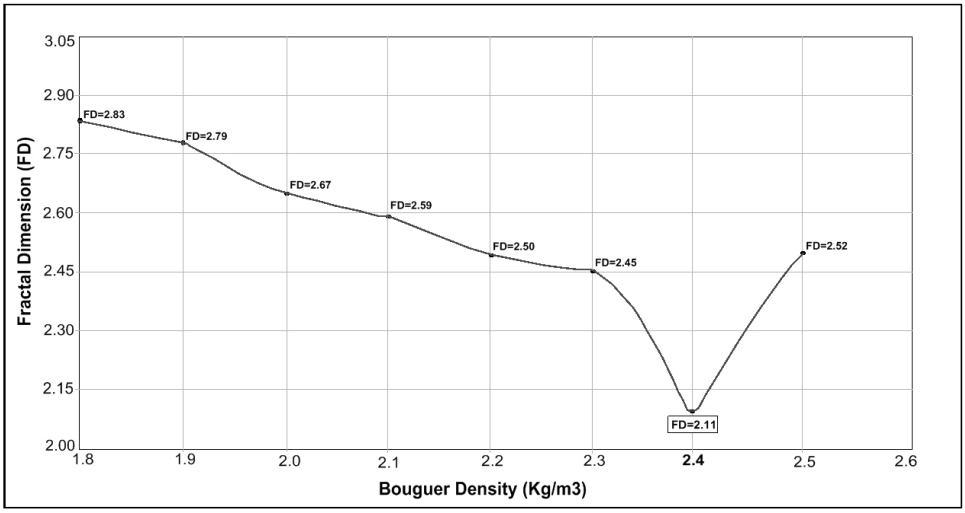
- بررسی توزیع برخالی داده‌های گرانی با هدف ارزیابی تغییرات لوح سنگی در گستره چارک - نمکین، به‌دلیل استفاده از کمیت‌های متناظر و تاکید بر خواص خودتشابهی حاصل از سنجش‌های میدانی، امکان برآورد چگالی را در وضعیت مستقل از نشیب و فرازهای ساختمانی فراهم می‌کند که در مقایسه با الگوی تصحیحاتی نتلتون، نتایج دقیق‌تر و مبتنی بر شاخص‌های آماری دارد.

- در این تحقیق، تغییرات لوح سنگی چارک به دو روش آمار کلاسیک و برخال به‌طور جداگانه ارزیابی شده و نتایج آن با استفاده از مفهوم کمیت R^2P مقایسه شده‌اند. بدین‌ترتیب با پذیرش فرض $۰/۴ \leq R^2P \leq ۰/۵$ گزینه مناسب به‌منظور انتخاب چگالی متوسط منطقه پیشنهاد شده است.

- در سنجش آماری داده‌های گرانی، از نسبت R^2P درحکم ملاکی برای ارزیابی تغییرات لوح سنگی چارک استفاده شد که پس از بررسی مقادیر پیش‌فرض ۱/۸ تا ۲/۵ کیلوگرم بر متر مکعب، چگالی متوسط منطقه ۲/۳ کیلوگرم بر متر مکعب (با تقریب ۰/۱) برآورد شده است.

- در روش برخال با استفاده از رابطه پراش‌مسافت رهیافت نوینی برای بررسی تغییرات میدان گرانی معرفی شده است. در این رابطه، دستیابی به بُعد $FD \geq ۲$ معرف حضور مولفه‌های متناظر در سطح براونی است که به‌نوبه‌خود با ظهور الگوهای تکرارپذیر در سطوح بی‌هنجاری در ارتباط است و تغییرات میدان گرانی در آستانه محیط‌های آشوبناک را نشان می‌دهد.

- این تحقیق با استناد به روش پیشنهادی مارک و آرونسون، امکان بررسی تغییرات بوگه برحسب چگالی‌های متفاوت را فراهم کرده و از نتایج آن برای دستیابی به اثرات لوح سنگی منطقه چارک استفاده کرده است. بدین‌ترتیب شرایط بهینه‌ای برای استفاده از تحلیل‌گر مکانی GIS فراهم شده و متعاقبا با افزایش دقت در تقریب زمین‌آماری داده‌ها مواجه هستیم. نتیجه چنین فرایندی، دستیابی به کمیت ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب درحکم چگالی لوح سنگی در گستره چارک - نمکین است. لذا انتظار می‌رود که بی‌هنجاری بوگه ناشی از چگالی ۲/۴، مستقل از نشیب و فرازهای ساختمانی زاگرس باشد و به‌لحاظ هندسی، سطح کافی برای پیدایش خودتشابه‌های گرانی داشته باشد.



شکل۷. نمودار تغییرات بی‌هنجاری بوگه در مقابل تغییرات بُعد برخالی منتج از چگالی سازندهای رسوبی در گستره چارک- نمکین. مرجع تغییرات بُعد برخال مبتنی بر نتایج به‌دست آمده از رابطه پراش‌مسافت در نمودارهای شکل ۶ است. طبق روش مارک و آرونسون (۱۹۸۴)، عدد ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب درحکم چگالی لوح سنگی چارک با بُعد برخال ۲/۱۱ (بُعد کمینه) انتخاب شده است.

- تابع توانی حاصل از تغییرات هوای آزاد (شکل۴)، موید آن است که برآیند نیروی گرانی در گستره چارک- نمکین در فاصله اثر مولفه‌های متناظر (۲/۸۸ تا ۱۵/۳۲ کیلومتر) مستقل از پدیده هم‌ایستایی گوشته بوده و خارج از این فاصله، متاثر از نشیب و فرازهای ساختمانی زاگرس است. بنابراین تخصیص چگالی ۲/۳ یا ۲/۴ کیلوگرم بر متر مکعب، دارای محدودیت مکانی بوده و بر خلاف روش‌های معمول نیازمند ملاحظات برخال در تفسیر رفتار میدان گرانی است.

- تابع نمایی حاصل از رفتار بی‌هنجاری بوگه (شکل۵)، موید آن است که تغییرات مستقل از نشیب‌وفرازهای ساختمانی در منطقه چارک فقط در فواصل ۱۰/۲۴ – ۶/۴۴ کیلومتر از آستانه بی‌هنجاری مشاهده شده و در سایر نقاط، تحت‌تاثیر عوامل توپوگرافی است. به‌همین‌ترتیب استفاده از چگالی‌های متفاوت (۱/۸ تا ۲/۵ کیلوگرم بر متر مکعب)، موجب تعدد فواصل و در پی آن پیدایش تغییراتی در روند توزیع بی‌هنجاری شده که برخلاف روش‌های معمول نیازمند بهره‌گیری از الگوی غیرخطی برای تعیین چگالی لوح سنگی به روش برخال است.

- رسم نمودار تغییرات بوگه در مقابل تغییرات بُعد برخال (شکل ۷) ، حاکی از مطابقت الگوی پیشنهادی مارک و آرونسون با یافته‌های گرانی در منطقه چارک است. براین‌اساس، کمیت $FD_{\min} = ۲/۱۱$ در نقطه‌عطف تابع قرار دارد و برآوردکننده ناأریبی از چگالی متوسط منطقه خواهد بود (۲/۴کیلوگرم بر متر مکعب). همچنین تعیین چگالی به روش برخال با تغییرات آماره $۰/۵ \le R^2P \le ۰/۴$ مطابقت دارد و احتمال دستیابی به نتایج موردنظر، پس از درون‌یابی تغییرات گرانی (به روش‌های زمین‌آماری) افزایش می‌یابد. لذا اگر بیشینه و کمینه نقاط بی‌هنجاری به روش کریجینگ و با رعایت شاخص‌های هندسی مندرج در شبکه برداشت داده‌های گرانی محاسبه شوند، حدود بی‌هنجاری‌ها منطبق بر فاصله اثر تغییرات هوای آزاد شده و بازماند گرانی در برخی از سازندهای رسوبی مستقل از اثرات توپوگرافی خواهد بود. چنین مناطقی برای ادامه فعالیت‌های اکتشافی به‌منظور دستیابی به ذخایر نفتی در گستره چارک – نمکین پیشنهاد می‌شوند.

منابع

تلفورد، دبلیو، جلدارت، ال.، شریف، ار. و کیز، دی.، ۱۹۸۹، ژئوفیزیک کاربردی، ترجمه: زمردیان، ح.، حاجب حسینیه، ح.، انتشارات دانشگاه تهران، ۱، ۶۹۶.

فرمانی، ف، ۱۳۸۲، گزارش اکتشافات گرانی در منطقه چارک – نمکین، شرکت ملی نفت ایران، ۱۲۹.

مانلی، بی.، ۱۹۹۰، آشنائی با روش های آماری چند متغیره، ترجمه: مقدم، م.، انتشارات پیشتاز علم، ۲۵۷.

Kaviani, K., 2003, Moho depth variations beneath Central Zagros (Iran), inferred from teleseismic Receiver functions: EGS - AGU - EUG Joint Assembly, Abstracts from the meeting held in Nice, France, abstract #10373.

Mandelbrot, B., 2002, The Fractal Geometry of Nature: 21st Printing, W. H. Freeman and Company, New York, 468 pp.

Mark, D., and Aronson, P., 1984, Scale-dependent fractal dimension of topographic surfaces: An empirical investigation, with application in geomorphology and computer mapping: Mathematical Geology, **16**(7), 671-683.

Pfeiffer and Obert, 1989, Fractals: Basic Concepts and Terminology: D. Anvir edition, John Wiley and Sons, Chi Chester, 11-43.

Thorarinsson, F., and Magnusson, G., 1990, Bouguer density determination by fractal analysis: Geophysics, **55**(7), 932-935.

Turcotte, D., 1997, Fractals and Chaos in Geology and Geophysics: 2nd edition, Cambridge Univ. Press., 398 pp.

Yamini Fard, F., and Hatzfeld, D., 2008, Seismic Structure beneath Zagros-Makran Transition Zone (Iran) from Teleseismic Study: Seismological Evidence for under thrusting and Buckling of the Arabian Plate beneath Central Iran: JSEE, **2**(15), 236 – 252.