

## تحلیل هندسی فرکتالی زلزله ملارد (۲۹ آذر ۹۶)

سید رضا مهرنیا\*

دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ایران

(دریافت ۱۳۹۶/۱۰/۱۴ - پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۱۴)

### چکیده

در ۲۰ دسامبر ۲۰۱۷ میلادی (۲۹ آذر ۱۳۹۶ خورشیدی)، زلزله متوسطی در عمق ۱۵ کیلومتری زمین و با بزرگای ۵/۱، شرق استان البرز در حوالی شهرهای ملارد- مشکین‌دشت را تکان داد که موجب مصدومیت تعدادی از ساکنان محلی و تشویش خاطر استان‌های مجاور شد. در این تحقیق با بهره‌گیری از کاتالوگ پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی ایران، رویدادهای لرزه‌ای ملارد-تهران در بازه زمانی ۲۰۱۷ - ۱۹۶۴ میلادی استخراج و به روش هندسی فرکتالی تحلیل شده است، راهکار ارائه شده در این تحقیق، مبتنی بر مطالعه توزیع مکانی چشمه‌های سطحی براساس تغییرات نسبت‌های طلایی بوده و هدف اصلی آن، ارزیابی مکانی این رویداد در ارتباط با لرزه‌خیزی غرب تهران است. نتایج تحقیق بیانگر آن است که توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های شرق استان البرز از اشکال مارپیچی تبعیت می‌کند و تعدادی از رویدادها دارای رابطه هندسی معنادار با رومرکز اصلی ملارد هستند. همچنین با استفاده از روش شبکه‌بندی ایزومتریک، سناریوی القای لرزه‌ای این سامانه بر روی گسل شمال تهران با تأکید بر مکان هندسی پس‌لرزه‌ها بررسی شد. در مجموع زلزله ملارد برد مکانی معناداری بر روی گسل شمال تهران نداشت، ولی احتمال توزیع آن به سمت غرب وجود دارد (رخداد پس‌لرزه‌ها برای تکمیل چرخه هندسی آن اجتناب‌ناپذیر است).

**واژه‌های کلیدی:** تحلیل هندسی، فرکتال، مارپیچ زلزله، ملارد.

## مقدمه

پیدایش مارپیچ زلزله‌ها براساس سری اعداد فیبوناچی است [۱] و توسط زلزله‌شناسان متعددی ارزیابی شده است [۲]. این توالی دارای الگوریتمی ساده و در عین حال کاربردی برای حل مسائل علوم زمین است. براساس بررسی‌ها [۳]، توزیع برخی از زلزله‌ها از تابع مارپیچ فیبوناچی تبعیت می‌کند که به‌عنوان پیش‌نشانگر هندسی برای تحلیل خطر زمین‌لرزه‌ها مدنظر است. سازوکار این توزیع، مبتنی بر خودساماندهی کانون زمین‌لرزه‌ها با تبعیت از اشکال خاص هندسی است که به‌دلیل افزایش نسبت‌های طلایی به‌وجود آمده‌اند. سه جمله اول این سری به‌ترتیب اعداد صفر، ۱ و ۱ هستند و جملات بعدی مطابق رابطه محاسبه می‌شوند.

$$Fn = F(n-1) + F(n-2) \quad (1)$$

در این رابطه،  $Fn$  جمله  $n$  ام توالی فیبوناچی است و مقادیر  $F(n-1)$  و  $F(n-2)$  به‌ترتیب دو جمله پیش از جمله  $n$  ام هستند.

با توجه به رابطه ۱، سری متعارف فیبوناچی به‌شرح زیر معرفی می‌شود:

$$1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, 89, 144, \dots, Fn$$

ویژگی این سری، برقراری نسبت مشخصی در سری نامتناهی فیبوناچی است که به نسبت

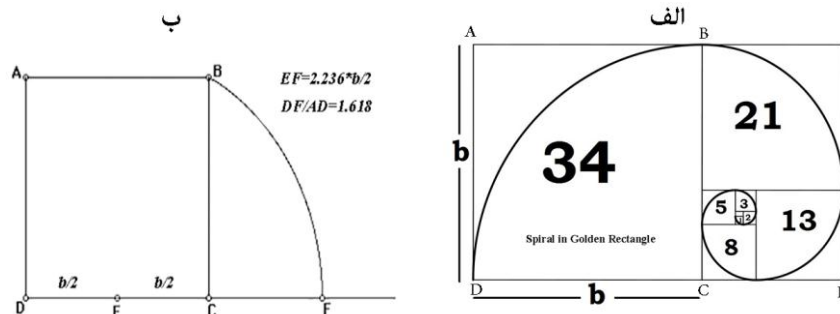
طلایی معروف است [۱].

$$\varphi = Fn / F(n-1) = 1/618 \quad (2)$$

در رابطه بالا، منظور از  $\varphi$  همان نسبت طلایی است که به‌شکل مثلث، مستطیل و دایره در سطح توزیع زلزله‌ها تشخیص داده می‌شود. در بیشتر این شکل‌ها، نسبت ثابت  $1/618$  برقرار است، اما برخی دیگر (نظیر گنومون و مستطیل تصادفی)، به‌ترتیب دارای مقادیر ثابت  $0/618$  و  $1/131$  هستند [۲]. در بین اشکال هندسی با خاصیت طلایی، تابع توزیع مستطیل از بیشترین کاربرد برای حل مسائل علوم زمین برخوردار است و به‌طور مشخص، سازوکار پیدایش مارپیچ‌های زلزله را بیان می‌کند [۳]. شعاع مارپیچ‌ها ( $R$ )، متناسب با طول ضلع چهارضلعی اولیه ( $b$ ) و زاویه انحنای  $\theta$  است و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$R = \text{Exp}(b.\theta), [b = 2/\pi \text{Ln}(\varphi)] \quad (3)$$

در شکل ۱ الف، نمونه‌ای از توزیع مارپیچی حاصل از توالی فیبوناچی براساس پیدایش مستطیل‌های طلایی نشان داده شده است. کمیت  $\varphi$ ، عامل اصلی این توزیع است و تحولات هندسی - مکانی رویدادهای طبیعی را رقم می‌زند [۳].



شکل ۱ الف) توزیع مارپیچ شکل حاصل از مستطیل طلایی (فیبوناچی)؛ ب) روش محاسبه و تبدیل شبکه ایزومتریک به مستطیل طلایی

همچنین مطابق شکل ۱ ب، تغییر مساحت چهارضلعی‌ها طبق قواعد فیبوناچی انجام می‌گیرد، به طوری که در چهارضلعی اولیه (ایزومتریک به طول  $b$ )، افزایش نسبت طول به صورت حاصل ضرب  $b/2$  در ثابت عددی  $۲/۲۳۶$  است و به گسترش ابعاد و تشکیل مستطیل طلایی (الف) منجر می‌شود.

در عمل، توزیع مکانی اغلب زلزله‌ها (مقیاس جهانی و ناحیه‌ای) سبب پیدایش اشکال هندسی خاصی می‌شود که به طور معمول از واحدهای مثلثی با زوایای رأس  $۳۶$  درجه و  $۱۰۸$  درجه به وجود آمده‌اند [۴]. همه سه ضلعی‌هایی که در طبیعت تشکیل می‌شوند از نوع متساوی‌الساقین هستند. اگر زاویه بین دو ساق آنها حدود  $۳۶$  درجه باشد، مثلث را طلایی و اگر این زاویه  $۱۰۸$  درجه باشد، مثلث را گنومون می‌نامند [۴]. در مثلث طلایی نسبت طلایی  $۱/۶۱۸$  و در گنومون نسبت  $۰/۶۱۸$  برقرار است [۲]. برای مثال، در فعالیت‌های پس‌لرزه‌ای کرمانشاه (رویداد ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ از گله) شاهد پیدایش گنومون‌های متعددی در غرب و شمال غربی رویداد اصلی از گله بودیم که نظیر آنها در پس‌لرزه‌های ملارد نیز مشاهده شده است. همچنین از دوران واحد هندسی توزیع زمین‌لرزه‌ها (سه ضلعی)، به اشکال ده ضلعی (دکاگون) و دایره طلایی می‌رسیم که از بیشینه تقارن در بین اشکال متناظر برخوردارند [۴-۶]. در توزیعی دورانی خودساماندهی شده، دو کمان مشاهده می‌شود که یکی از آنها مقابل به زاویه  $۱۳۷/۵$  درجه بوده و کمان مکمل (بزرگ‌تر) مقابل به زاویه  $۲۲۲/۵$  درجه است. همواره نسبت طول کمان بزرگ‌تر به کوچک‌تر مساوی  $۱/۶۱۸$  است.

### مراحل تحلیل‌های هندسی - فرکتالی

بازنگری در الگوی توزیع زمین‌لرزه‌ها، بخشی از فرایند تشخیص پتانسیل‌های لرزه‌ای یک منطقه است و در صورت برخورداری از پایگاه اطلاعات مکانی منسجم، امکان شناسایی و تحلیل خطر سامانه‌های لرزه‌زمین‌ساختی را فراهم می‌کند. مطالعات در این تحقیق صرفاً از نظر مکانی است و شامل مباحث بزرگا و زمان وقوع زلزله نمی‌شود. دیر زمانی است که متخصصان علوم زمین با چالش پیش‌بینی زلزله‌ها روبه‌رو هستند [۴]. در مقایسه، روش‌های ریاضی و آماری به‌دلیل تبعیت از قوانین احتمالات، بیش از سایر تکنیک‌ها برای پیش‌بینی زلزله‌ها به‌کار رفته‌اند [۵]. به‌طور کلاسیک، مراحل ارزیابی کاتالوگ شامل استخراج داده‌ها و خوشه‌بندی آنها براساس شاخص‌های آماری چندمتغیره است و تغییر کمیت‌های توزیع، نقش مؤثری در هم‌افزایی داده‌ها دارند. توالی فیبوناچی، سازوکار توزیع ذاتی داده‌ها را براساس الگوی پیدایش اشکال متناظر بیان می‌کند، اما تشخیص حدود اثر این توزیع تنها با استفاده از توابع فرکتال امکان‌پذیر است [۶-۸]. در واقع یک خوشه‌بندی طبیعی دارای دو معیار توزیع مکانی و شعاع اثر توزیع است که برای تحلیل هندسی آن علاوه‌بر روش فیبوناچی، از معادله‌نمایی عیار-مساحت استفاده می‌شود [۸]. از آنجا که خوشه‌بندی طبیعی رومرکز زلزله‌ها تحت تأثیر هر دو معیار است، تحلیل زلزله‌های ملارد به روش ترکیبی هندسی-فرکتال انجام گرفته است [۷، ۸].

تحلیل هندسی-فرکتال به‌عمل‌آمده در این تحقیق به‌ترتیب شامل مراحل زیر است:

- استخراج کاتالوگ در بازه زمانی میان‌مدت (۵۳ سال) و برآزش آن با لایه گسل‌های منطقه در محیط جی آی اس؛
- تعیین حدود اثر رویدادها و استخراج الگوهای هندسی اشکال منتظم براساس فعالیت‌های لرزه‌ای منطقه؛
- تعیین سلول واحد شبکه ایزومتریک با هدف دستیابی به توزیع ماریچ زلزله ملارد؛
- تحلیل هندسی کاتالوگ براساس سازوکارهای پیش، حین و پس از رویداد اصلی؛
- به‌کارگیری معادله عیار-مساحت (فرکتال) با هدف شناسایی و تفکیک جوامع متناظر با رومرکز زلزله‌های دستگاهی و تعیین حدود سرهای منظم-تصادفی؛
- ارائه نقشه پیش‌دآوری از وضعیت پتانسیل‌های لرزه‌ای و تحلیل خطرهای احتمالی آن برای گسل شمال تهران.

## سوابق لرزه‌خیزی شرق استان البرز

رومرکز زلزله‌های استان البرز (با تأکید بر رویدادهای لرزه‌ای اخیر در ملارد)، براساس کاتالوگ دستگاهی این منطقه جمع‌آوری شد. جنوب رشته‌کوه البرز تحت تأثیر گسل‌هایی است که در برابر تنش‌های مکانیکی صفحه فرورو مقاومت می‌کنند و از استعداد لرزه‌خیزی پنهان با دوره بازگشت میان‌مدت برخوردارند [۹]. سازوکار کانونی اغلب زلزله‌های این منطقه از نوع امتدادلغز با جابه‌جایی صفحات در اثر نیروهای فشارشی است [۹]. در این تحقیق، تعدادی از گسل‌های لرزه‌زای البرز و تهران به‌منظور توصیف دقیق پدیده‌ها و ارتباط مکانی زلزله‌ها با عوامل زمین‌ساختی منطقه، استخراج و با یافته‌های کاتالوگ مطابق شدند. همچنین براساس تاریخ لرزه‌خیزی قبل از ۱۹۰۰ میلادی، تعداد زلزله‌های هزاره اول میلادی در نواحی گسل‌خورده میانی بیش از مشاهدات کنونی بوده است [۹]. صرف‌نظر از خطای مستندات تاریخی، مقایسه کاتالوگ دستگاهی با شواهد تاریخی گویای فعالیت بیشتر گسل‌های این منطقه و تعدد زمین‌لرزه‌های حوزه مورد مطالعه در ادوار گذشته است [۱۰]. همچنین براساس مندرجات جدول ۱، سوابق لرزه‌خیزی ملارد براساس آخرین زمین‌لرزه‌های دستگاهی ثبت‌شده در استان البرز (از ۱۹۶۴ میلادی تاکنون با بزرگای بیش از ۴)، مربوط به سال‌های ۲۰۱۳ میلادی (با بزرگای ۵/۷)، ۱۹۹۸ میلادی (با بزرگای ۵/۶) و ۱۹۶۷ میلادی (با بزرگای ۵/۶) است. با توجه به مختصات درج‌شده در این جدول، برخی از رویدادها در فاصله نه‌چندان دور از چشمه لرزه‌ای ملارد قرار دارند.

جدول ۱. زمین‌لرزه‌های دستگاهی ثبت‌شده در استان البرز - به مرکزیت ملارد و به شعاع ۳۰ کیلومتر با بزرگای بیش از ۲/۹ (IEES 1964-2017).

Date	Lon.	Lat.	Depth (km)	Mag.
<u>12/03/1998</u>	50.972	36.064	46	mb:4.3
<u>02/22/2006</u>	50.45	35.98	14	ML:3.9
<u>05/28/2006</u>	50.99	35.37	15	ML:3.4
<u>03/14/2007</u>	50.98	35.67	33	ML:3
<u>12/20/2017</u>	50.932	35.686	14	ML:5.1

براساس گزارش ایستگاه شتاب‌نگاری استان البرز، فعال شدن چشمه لرزه‌زای ملارد در عمق حدود ۱۵ کیلومتر، آخرین و بزرگ‌ترین رویداد طبیعی این منطقه است که با بزرگای ۵/۱ و شتاب محلی ۵۱ سانتی‌متر بر مجذور ثانیه در شامگاه ۲۹ آذر ۱۳۹۶ خورشیدی (بیستم

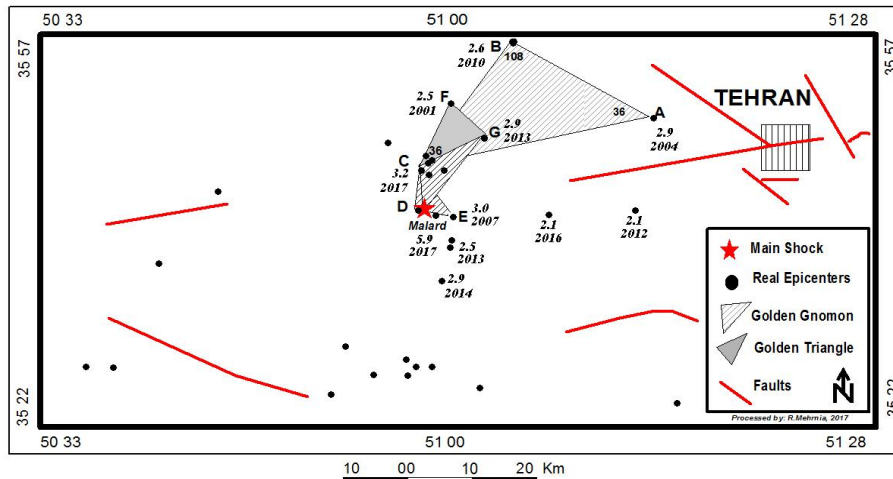
دسامبر ۲۰۱۷) به وقوع پیوست [۱۱]. در جدول ۲، پیش‌لرزه‌های ملارد چندان محسوس نبوده‌اند (حداکثر بزرگای ۲/۹، دو روز قبل از شوک اصلی در شمال ملارد)، اما تعدد آنها در نزدیکی رویداد اصلی و حدود ۴۸ ساعت قبل از آن شایان توجه است. نظر به شدت زمین‌لرزه و خاستگاه آن انتظار می‌رود پس‌لرزه‌های این رویداد در بازه زمانی کوتاه‌مدت خاتمه یابد (اگرچه از نظر تحلیل‌های هندسی، امکان ادامه فعالیت‌های پس‌لرزه‌ای وجود دارد). عامل ساختمانی این زمین‌لرزه در ارتباط با فعالیت‌های گسل ماهدشت است که به طول تقریبی ۴۰ کیلومتر و به‌صورت شرقی-غربی بین گسل‌های شمال تهران و اشتها در امتداد یافته است و توان لرزه‌خیزی متوسطی دارد.

جدول ۲. فعالیت‌های لرزه‌ای گسل ماهدشت، ۱۸ روز قبل از زلزله ملارد در فاصله نزدیک به رومرکز اصلی (IEES 1964-2017).

Date	Lon.	Lat.	Depth (km)	Mag.
<u>12/02/2017</u>	50.935	35.733	15	ML:2.7
<u>12/09/2017</u>	50.935	35.765	17	ML:3.2
<u>12/10/2017</u>	50.939	35.748	15	ML:2.5
<u>12/12/2017</u>	50.93	35.741	14	ML:2.9
<u>12/18/2017</u>	50.94	35.738	14	ML:2.9
<u>12/18/2017</u>	50.798	35.409	6	ML:2.3
<u>12/19/2017</u>	50.944	35.753	15	ML:2.2
<u>12/20/2017</u>	50.932	35.686	14	ML:5.1

#### تحلیل هندسی - فرکتالی زلزله ملارد

براساس داده‌های کاتالوگ، طی نیم قرن گذشته، شاهد سکون نسبی در لرزه‌خیزی منطقه تحقیق بوده‌ایم. از این‌رو توزیع مکانی چشمه‌ها به‌صورت آرام و خزشی صورت گرفته و منظم بوده است. با توجه به کمبود داده‌های لرزه‌ای، زمین‌لرزه‌هایی با بزرگای بیش از ۲ استخراج شده‌اند تا جزئیات دقیق‌تری از تحولات لرزه‌خیزی منطقه را نشان دهند. همچنین شاخص توزیع هندسی رومرکزها با استفاده از روش مثلث‌بندی آغاز و در ادامه به شبکه‌بندی مستطیل (توزیع مارپیچ) ختم شده است. مطابق شکل ۲، کانون‌های سطحی، سه گنومون و یک مثلث طلایی تشکیل داده‌اند که بیانگر ارتباط هندسی آنها با رویداد اصلی و پیش‌لرزه‌های این منطقه است.

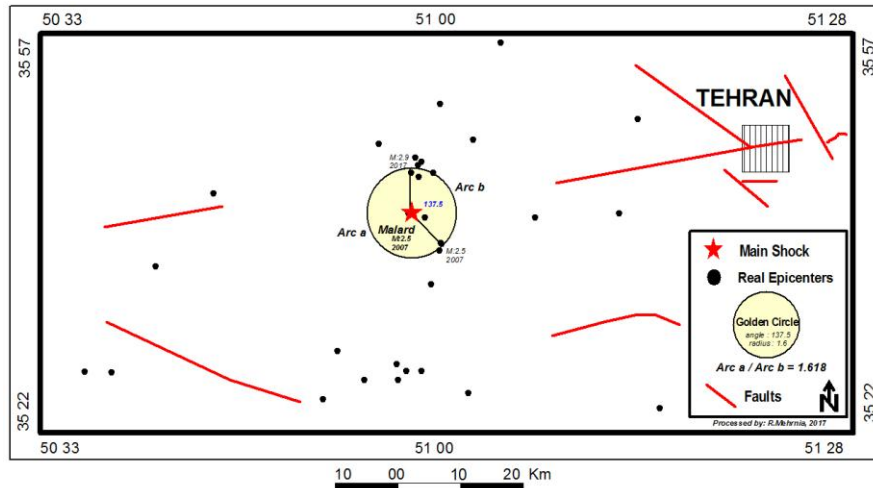


شکل ۲. مشاهده گنومون‌ها و مثلث طلایی در کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ملارد (استان البرز)

مثلث ABC بزرگ‌ترین گنومون این منطقه است که با زاویه ۱۰۸ درجه، رومرکز A (در غرب تهران) را به رومرکز C (یکی از رویدادهای لرزه‌ای پیش از ملارد در نهم دسامبر ۲۰۱۷) متصل کرده است. این ارتباط از نوع هندسی است و صحت و سقم آن بعد از دستیابی به تابع توزیع ماریپیچ مشخص می‌شود. به جز این مورد، دو الگوی مثلثی دیگر با ابعاد کوچک‌تر و نزدیک به رومرکز اصلی ملارد مشاهده شدند که با اسامی CGD و CDE روی شکل مشخص شده‌اند. در همه گنومون‌های ملارد، نسبت طلایی ۰/۶۱۸ برقرار است. نکته شایان توجه این است که به طور معمول تشکیل گنومون‌ها با توزیع پس‌لرزه‌ها مقارن است؛ اما در این رویداد، رومرکز زلزله‌های قبلی نیز به صورت گنومون ظاهر شده‌اند که نیازمند توجه و تعمق در این زمینه است همچنین مثلث CFG با ساق‌های برابر و زاویه رأس ۳۶ درجه، نمونه‌ای از توزیع سه‌ضلعی کاملاً متقارن (با خواص طلایی) در منطقه تحقیق است.

مطابق شکل ۳، رومرکز زلزله ملارد در مرکز دایره مرجع به شعاع ۱/۶ (برحسب مقیاس نقشه) قرار گرفته و مراکز سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۷ میلادی با زاویه ۱۳۷/۵ درجه (زاویه طلایی)، هم‌استقامت با محیط دایره‌اند. بنابراین از دیدگاه هندسی، رومرکز شوک اصلی ملارد در مرکز دایره مرجع است و به‌عنوان شعاع شبکه‌بندی ایزومتریک انتخاب می‌شود. در این دایره، نسبت طول کمان بزرگ‌تر (Arc a) به طول کمان کوچک‌تر (Arc b) معادل نسبت طلایی ۱/۶۱۸ است.

$$Arc a / Arc b = ۲۲۲.۵ / ۱۳۷.۵ = \varphi \quad (۴)$$



شکل ۳. مؤلفه‌های هندسی و موقعیت مکانی دایره مرجع فیبوناچی در کاتالوگ زمین‌لرزه‌های ملارد (استان البرز)

دو نکته اساسی در تقارن هندسی شوک اصلی ملارد مستتر است. نکته اول در خصوص شکل‌گیری گنومون‌های پیش از شوک اصلی است (شکل ۲) و نکته دوم درباره شعاع دایره طلایی است (شکل ۳) که تحقیقاً معادل ثابت عددی  $1/618$  است (تقارن بالا در توزیع سطحی زلزله‌ها). به عبارت دیگر، مکان هندسی شوک اصلی، مرکز تقارن دایره مرجع است و همزمان با آن، موجب تکوین مثلث‌های طلایی شده است. با درج چنین مواردی می‌توان به پیش‌نشانگری هندسی رویدادهای آینده این منطقه امیدوار بود، زیرا اگر چشمه‌های اصلی، مرکز تقارن دایره‌های طلایی بوده و با سه ضلعی‌های منتظم در ارتباط باشند، تعیین مکان هندسی آنها قبل از وقوع زلزله اصلی امکان‌پذیر خواهد بود. تعیین پارامترهای هندسی شبکه ایزومتریک پس از تعیین شعاع آغازین (تقریب شعاع دایره مرجع در شکل ۳) و محاسبه توالی‌های بعدی، مطابق جدول ۳ انجام گرفته است.



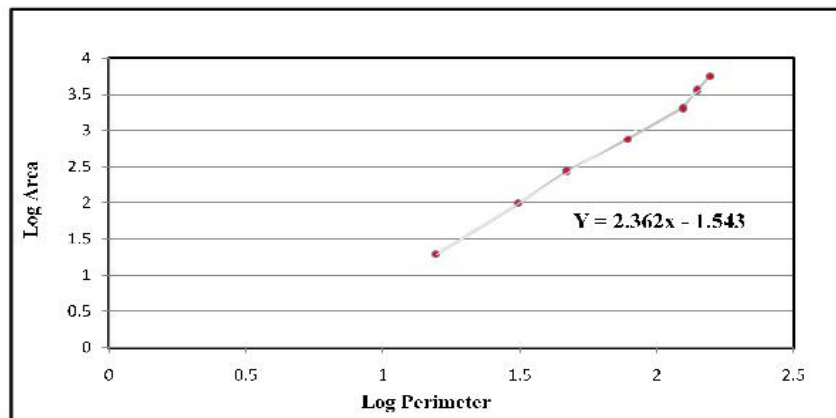
جدول ۳. تخمین پارامترهای هندسی توزیع پس لرزه‌ها و تفکیک آنها به دو سری منظم و تصادفی به روش فرکتال (۲۵ کیلومتر از رومرکز زلزله ملارد)

Grids	Inradius Geometry (Scale : 1:500000)					Fractals			Fibonacci	
	Radius		Prm (Km)	Area (Km <sup>2</sup> )	Cum-Area (Km)	Log Prm	Log Cum Area	Dimensions	GR	Orders
	Map (Cm)	Ground (Km)								
1	0.5	2.5	15.7	19.625	19.625	1.195899652	1.292809665	<2.2	nd	Regular
2	1	5	31.4	78.5	98.125	1.496929648	1.99177967		2	
3	1.5	7.5	47.1	176.625	274.75	1.673020907	2.438937701		1.5	
5	2.5	12.5	78.5	490.625	765.375	1.894869657	2.883874272		1.66667	
8	4	20	125.6	1256	2021.375	2.098989639	3.30564689		1.6	
9	4.5	22.5	141.3	1589.625	3611	2.150142162	3.557627488	>3	1.125	Random
10	5	25	157	1962.5	5573.5	2.195899652	3.746128005		1.11111	

در این جدول، پنج شعاع اول، به صورت قاعده‌مند (تقریب عدد ۱/۶) و دو شعاع انتهایی به صورت تصادفی (تقریب عدد ۱/۱۳) انتخاب شده‌اند که مبنای این دسته‌بندی، نتایج تقریب فرکتال برحسب تغییرات محیط در مقابل مساحت است. معادله محیط - مساحت، یک رابطه تمام‌لگاریتمی برای بررسی توزیع نمایی دو کمیت هندسی با خواص متناظر است که اولین بار توسط مندلبروت مطرح و به صورت زیر بیان شده است [۱۵].

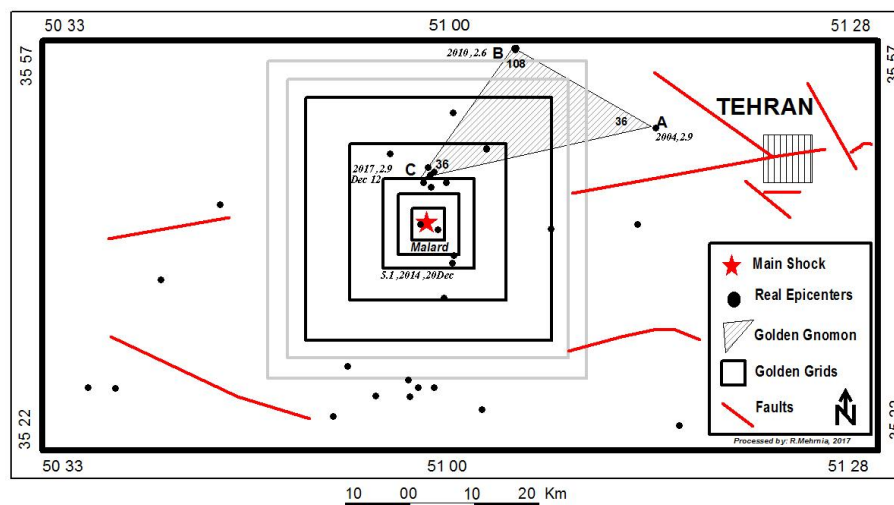
$$\text{Log (Area)} = \beta \text{Log (Perimeter)} \quad (5)$$

چنانکه ملاحظه می‌شود، مبنای تفکیک سری‌های منظم از تصادفی، تغییرات بعد فرکتال  $\beta$  است و مقادیر آن پس از رسم تابع لگاریتمی مساحت  $\text{Log (Area)}$  در مقابل محیط  $\text{Log (Perimeter)}$  مطابق نمودار شکل ۴ به دست آمده‌اند.



شکل ۴. نمودار محیط - مساحت تابع فرکتال برای تعیین تغییرات بعد  $\beta$  و تفکیک سری‌های منظم از تصادفی در زلزله ملارد (جدول ۳)

با توجه به طولانی بودن دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های البرز مرکزی، استفاده از روش فرکتال، امکان تدقیق سری‌های منظم را فراهم می‌کند و از خطای سیستماتیک ناشی از تداخل سری‌های تصادفی می‌کاهد (روش ابداعی این تحقیق). با اعمال پارامترهای جدول ۳ در نقشه پایه زمین‌لرزه‌های ملارد، شبکه‌های ایزومتریک منطقه با رعایت اصول فیبوناچی مطابق شکل ۵ ترسیم شده‌اند.

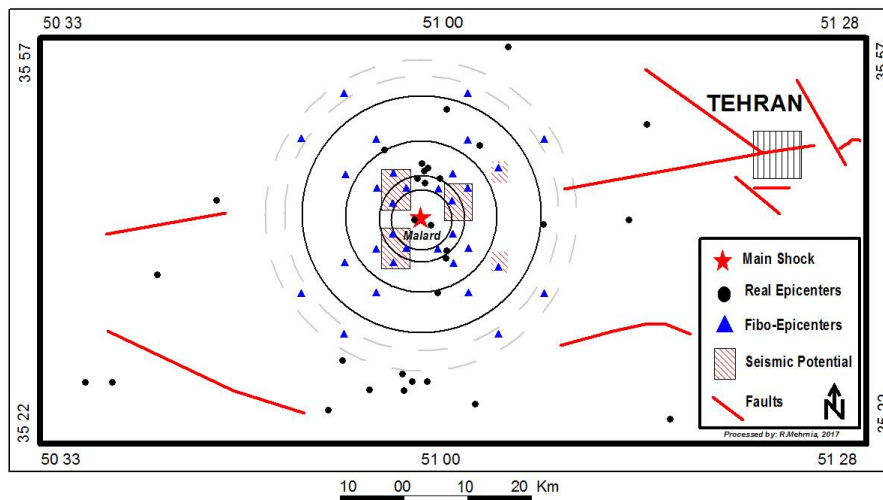


شکل ۵. شبکه‌بندی ایزومتریک زلزله‌های ملارد (۲۰۱۷-۱۹۶۴ میلادی) براساس شعاع اثر دایره مرجع (شکل ۴) و مندرجات جدول ۳

در شکل ۵، علاوه بر شبکه‌بندی ناحیه اثر رویدادهای لرزه‌ای، موقعیت مکانی گنومون ABC باز رسم شده است تا برد هندسی شبکه‌ها نسبت به نقطه A (به‌عنوان نزدیک‌ترین رومرکز به گسل شمال تهران) مشخص شود. دو شبکه بیرونی که به رنگ خاکستری رسم شده‌اند، معرف سری تصادفی‌اند (در توالی تصادفی، نسبت طلایی حدود ۱/۱۳ است) [۱۲]. همچنین شبکه‌های درونی که با رنگ تیره رسم شده‌اند، بیانگر توالی منظم در این سری‌اند که در همه آنها نسبت طلایی ۱/۶۱۸ برقرار بوده و بعد فرکتال نشان‌دهنده توزیع منظم در سطح براونی است (بین ۲ تا ۲/۵). چنانکه ملاحظه می‌شود، فاصله رومرکز A تا C بیش از حد مورد انتظار برای ارتباط هندسی - مکانی بین این دو چشمه است و این سازوکار از احتمال القای لرزه‌ای ملارد بر روی گسل‌های شمال تهران می‌کاهد. از دیدگاه نظری، شبکه‌های درونی برای

تحلیل مکانی داده‌های لرزه‌ای لرزه‌ای کیفیت می‌کنند؛ از این رو با رسم شبکه‌های تصادفی (بیرونی)، احتمال خطای سیستماتیک کاهش یافته است. این بدان معناست که زلزله‌های ملارد اثر هندسی معناداری بر گسل شمال تهران ندارند و گنومون ABC، در حال حاضر غیرفعال است. افزایش محسوس بعد فرکتال در محدوده سری تصادفی نشانه‌ای از بی‌نظمی است و احتمال رخداد پس‌لرزه‌های ملارد در این نواحی ضعیف است.

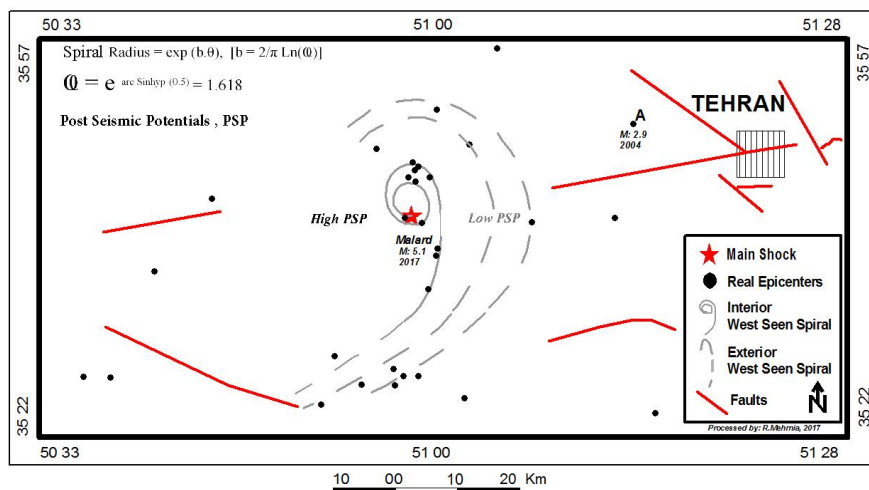
مطابق شکل ۶، با تعیین محل تلاقی امتدادهای اضلاع ایزومتریک، موقعیت هندسی نقاط لرزه‌زا براساس سری‌های منظم و تصادفی فیبوناچی شناسایی می‌شوند [۱۴-۱۲]. در این سازوکار، نقاطی به دست می‌آیند (آبی‌رنگ) که برخی از آنها منطبق بر رومرکز زلزله‌ها و برخی دیگر فاقد انطباق هندسی لازم‌اند.



شکل ۶. تبدیل شبکه ایزومتریک (شکل ۷) به مستطیل طلایی براساس روش امتداد اضلاع و تعیین نقاط تلاقی شبکه‌های مجاور (نقاط آبی) در کاتالوگ زلزله‌های ملارد (۲۰۱۷-۱۹۶۴ میلادی)؛ مناطق هاشورخورده، پتانسیل پس‌لرزه‌ای دارند.

نقاط منطبق بر کاتالوگ زلزله‌های ملارد، نقش خود را در توالی فیبوناچی ایفا کرده و شرایط لازم را برای پیدایش شوک اصلی به وجود آورده‌اند. در مقابل نقاطی که در توزیع فیبوناچی پدیدار شدند، اما در کاتالوگ، فاقد مصادیق لرزه‌زایی‌اند، به‌عنوان پتانسیل‌های لرزه‌ای منطقه قلمداد می‌شوند [۱۴، ۱۳]. بر روی شکل ۶، برخی از پتانسیل‌های لرزه‌ای منطقه ملارد به‌صورت چهارضلعی‌های هاشورخورده معرفی شده‌اند. اغلب پتانسیل‌ها در دوایر نزدیک به

شوک اصلی قرار دارند که به مرور زمان و با ادامه پس‌لرزه‌های منطقه، ظاهر خواهند شد. اما برخی از آنها در فواصل دور از رومرکز اصلی قرار دارند و احتمال تکمیل فاز پس‌لرزه‌های ضعیف است. با توجه به فاصله آخرین شعاع سری تصادفی از گسل شمال تهران و شرایط زمین‌ساختی گسل ماهدشت، رویداد ۲۹ آذر ۹۶ ارتباط هندسی معناداری با گسل‌های غربی و شمال غربی تهران ندارد و فرایند القای لرزه‌ای ملارد- تهران، فاقد وجاهت هندسی است. به‌منظور درک صحیح و مصور از نحوه پراکندگی رومرکزهای لرزه‌ای ملارد، الگوی توزیع مارپیچی زلزله‌ها مطابق شکل ۷ ارائه شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، سمت کاو این مارپیچ رو به غرب (West Seen) و سمت کوژ آن رو به شرق است. این مارپیچ از دو بخش داخلی و بیرونی تشکیل شده که در بخش داخلی آن، شوک اصلی ملارد به‌همراه تعدادی از پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌های این ناحیه مشاهده می‌شوند. از دیدگاه هندسی، بخش مرکزی مارپیچ از تقارن بیشتری برخوردار است. بخش بیرونی این مارپیچ، از تقارنی برخوردار بوده و متشکل از رومرکزهای پراکنده است. هاله بیرونی به دو زیربخش میانی و خارجی تقسیم می‌شود. مبنای این دسته‌بندی، نتایج فرکتال و سری‌های موجود در جدول ۳ است. با توجه به ناپایداری بخش بیرونی، احتمال وقوع پس‌لرزه‌هایی در برخی از نقاط پتانسیل وجود دارد که با فرایند تکمیل اجزای بیرونی مارپیچ مرتبطانند.



شکل ۷. توزیع مارپیچی زمین‌لرزه‌های ملارد (استان البرز) در شعاع ۲۵ کیلومتری از شوک اصلی ۲۹

آذر ۱۳۹۶

### نتیجه‌گیری

بر روی نقشه پایه زمین‌لرزه‌های استان البرز (مقیاس ۱/۵۰۰۰۰۰) که در محیط GIS و با تأکید بر رویدادهای آذرماه ۱۳۹۶ تهیه شده است، مکان هندسی شوک اصلی ملارد از ویژگی‌های خاصی به‌شرح زیر برخوردار است:

- خودساماندهی زلزله‌های منطقه به‌صورت مثلث‌های طلایی و دایره مرجع در فواصل ۵ تا ۲۵ کیلومتر از رومرکز رویداد اصلی نمود دارد که نشان‌دهنده منشأ طبیعی و تقارن زیاد در مراحل قبل و بعد از شوک اصلی ملارد است. در واقع این شوک در مرکز دایره‌ای قرار گرفته که تحت زاویه ۱۳۷/۵ درجه، و با شعاع مرجع ۱/۶ (برحسب مقیاس خطی نقشه‌ها) از بیشینه تقارن هندسی نسبت به رومرکزهای اطراف خود برخوردار است. این شوک به‌همراه تعدادی از فعالیت‌های پیشین منطقه، موجب ظهور گنومون‌هایی با خواص طلایی شده که بزرگ‌ترین آنها پیش‌لرزه‌ای در شمال ملارد را به رومرکز زلزله خفیفی در غرب تهران (۲/۹، ۲۰۰۴ میلادی) متصل می‌کند. این مثلث به‌دلیل فاصله زیاد رومرکزهایش و قرار گرفتن در سری تصادفی (طبق محاسبات فرکتال)، غیرفعال باقی مانده است و ارتباط مکانی معناداری با توزیع مارپیچی زلزله ملارد ندارد.

- براساس شواهد هندسی و با تأکید بر تغییرات بعد فرکتال، شعاع دایره مرجع منطبق بر مرکز مارپیچ زلزله بوده و از نظم هندسی معناداری تا فاصله ۲۰ کیلومتر از شوک اصلی برخوردار است. بعد از فاصله مذکور، الگوی توزیع زلزله‌ها حالت تصادفی می‌یابد و ارتباط هندسی خود را با مرکز زلزله ملارد از دست می‌دهد (ضریب ۱/۱۳ جایگزین ضریب ۱/۶۱۸ می‌شود). از این‌رو ارائه الگوی اولیه از این توزیع، نتیجه مدل ابداعی پژوهش حاضر است که اولین بار و با استناد به منطق ارائه‌شده در متن تحقیق، در کاتالوگ زلزله‌های استان البرز اعمال شده است.

- مطابق شکل ۷، مارپیچ زلزله ملارد رو به غرب و به‌موازات نصف‌النهارات گسترش یافته است (West Seen Meridian Spiral). ابعاد این مارپیچ از نوع متوسط، طول آن ۳۵ تا ۴۰ کیلومتر و عرضش ۲۵ تا ۳۰ کیلومتر است. هاله بیرونی مارپیچ (بخش شرقی) دارای روند تصادفی است و از نظر هندسی، تمایلی برای گسترش به سمت طول‌های جغرافیایی بیشتر ندارد. همچنین بخش چشمگیری از هاله بیرونی آن فاقد نگاشت لرزه‌ای است و احتمال تکمیل آن در خلال فعالیت‌های پس‌لرزه‌ای میان‌مدت وجود دارد (به‌ندرت و در درازمدت شاهد تخلیه انرژی در بخش‌های بیرونی این مارپیچ خواهیم بود). همچنین با توجه به طول گسل ماهدشت

(حدود ۴۰ کیلومتر) و نظم چشمه‌های لرزه‌زای درون ماریچ، احتمال رخداد زلزله بزرگ‌تر منتفی است، اما تنش‌های مکانیکی آن با نگاه به غرب (اشتهارد) به‌طور خزننده و کند ادامه خواهد داشت. این مناطق بر روی شکل ۷ با واژه High PSP معرفی شده‌اند. احتمال افزایش پس‌لرزه‌ها در بخش شرقی ماریچ ملارد به‌مراتب کمتر از غرب آن است (شکل ۷، Low PSP). ماریچ مورد نظر، نمونه بارزی از توزیع قاعده‌مند زمین‌لرزه‌های استان البرز است که با توجه به ابعاد و مؤلفه‌های هندسی آن، امکان پیش‌داوری پتانسیل‌های لرزه‌ای منطقه را فراهم آورده است. مؤلف امیدوار است با تحقیقات مشابه در دیگر مناطق کشور، پیش‌بینی مکانی زمین‌لرزه‌های مخرب با تأکید بر پیش‌نشانگرهای هندسی امکان‌پذیر شود.

### منابع

- [1]. Livio, M. (2002), "The Golden Ratio: The Story of Phi, the World's Most Astonishing Number". New York: Broadway Books, p. 85.
- [2]. Schoen, R. (1982). "The Fibonacci Sequence in Successive Partitions of a Golden Triangle." *Fib. Quart.* 20, 159-163, 1982.
- [3]. Pappas, T. (1989). "The Golden Rectangle." *The Joy of Mathematics*. San Carlos, CA: Wide World Publ./Tetra, pp. 102-106.
- [4]. Kagan, Y.Y. (2002). "Aftershock Zone Scaling", *Bull. of American Seismological Society*, Volume 92, 641-655
- [5]. Turcotte, D.D. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, New York, Cambridge University, Cambridge University Press, p397, 2nd Edition.
- [6]. Kimberling, C. (1991). "A New Kind of Golden Triangle." In *Applications of Fibonacci Numbers: Proceedings of the Fourth International Conference on Fibonacci Numbers and Their Applications*, Wake Forest University (Ed. G. E. Bergum, A. N. Philippou, and A. F. Horadam). Dordrecht, Netherlands: Kluwer, pp. 171-176.
- [7]. Werner, M.J. (2011). "Earthquake Forecasting based on Data Assimilation: Sequential Monte Carlo Methods", *Nonlinear Process in Geophysics*, 18, 49-79.
- [8]. Kabai, S. (2002). "Mathematical Graphics I: Lessons in Computer Graphics Using Mathematica". Püspökladány, Hungary: Uniconstant, p. 79.
- [9]. Berberian, M. (2014). "Earthquakes and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau", Elsevier, 978-0-444-63297-5, Volume 17 - 1st Edition.
- [10]. Ambraseys, N.N., and Melville, C.P. (1982). *A History of Persian Earthquakes*, New York, Cambridge University, Cambridge University Press, p150, 1st Edition.
- [11]. Iranian Seismological Center, Institute of Geophysics, University of Tehran. (2017). Official Report on A magnitude 5.1 earthquake struck Alborz Province near Malard district, December, 20, 2017 at 23:27 pm local time, [http://irsc.ut.ac.ir/newsview\\_fa.php?&eventid=129954&network=earth\\_ismc\\_\\_](http://irsc.ut.ac.ir/newsview_fa.php?&eventid=129954&network=earth_ismc__)

- 
- [12]. Viswanath D. (2000). "Mathematics of Computation, Random Fibonacci Sequences and the Number" 1.131988, American Mathematical Society, Volume 69, No 231, 1131-1155.
- [13]. Sgrina V., Conti L., (2012). "A Deterministic Approach to Earthquake prediction" International Journal of Geophysics Vol. 2012, Article ID 406278, 1-20.
- [14]. Boucouvalas A C., Gkasios M, Keskebes A, Tselikas NT, (2014). "Leading Time Domain Seismic Precursors" 2ndIntern. Conf. on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2014) Proc SPIE Vol.9229, 92291H, Paphos, Cyprus.
- [15]. Mandelbrot B.B., (2003). "The Fractal Geometry of Nature" W.H. Freeman and Company Press, YALE University, New York, USA, 466P.