

## شناسایی الگوی مکانی زلزله‌های غرب ایران به روش فیبوناچی

سید رضا مهرنیا\*

دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، ایران

(تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۹/۲۵ - تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۱۰/۱۶)

### چکیده

در ۱۲ نوامبر ۲۰۱۷ میلادی (۲۱ آبان ۱۳۹۶ خورشیدی)، زلزله مهیبی با بزرگی ۷/۳، مناطق غرب ایران در حوالی شهرهای مرزی ازگله، سرپل ذهاب و قصر شیرین را به شدت تکان داد و موجب کشته شدن بیش از ۶۰۰ نفر و آسیب مالی و جانی صدها تن در استان کرمانشاه شد. در این تحقیق با بهره‌گیری از پایگاه اطلاعات لرزه‌ای سازمان زمین‌شناسی آمریکا و کاتالوگ زمین‌لرزه‌های استان کرمانشاه (۲۰۱۷ - ۱۹۰۰ میلادی)، پیش‌بینی بازنگرانه با استناد به مفهوم و نتایج سری اعداد فیبوناچی ارائه شده و در پی آن، مخاطرات منطقه از دیدگاه مکانی با تأکید بر شناسایی و معرفی پتانسیل‌های لرزه‌ای غرب ایران بررسی شده است. کاربرد توالی فیبوناچی برای دستیابی به سازوکار توزیع غیرخطی زلزله‌ها، سابقه دارد، اما نتایج این پژوهش به‌طور مشخص بیانگر وجود روابط مکانی بین زلزله‌های سده گذشته با پیدایش چشمه لرزه‌ای اخیر در ازگله است. همچنین براساس دستاوردهای این تحقیق، توزیع پس‌لرزه‌های رویداد ۷/۳ ازگله در اشکال مارپیچی و گنومون طلایی انجام گرفته و آرایش مکانی داده‌های کاتالوگ به شکل مثلث طلایی (با زاویه رأس ۳۶ درجه) و دایره طلایی (با کمان ۱۳۷/۵ درجه) بوده است. بدین ترتیب با استفاده از روش فیبوناچی، ضمن اثبات طبیعی بودن منشأ زمین‌لرزه‌های غرب ایران، نظم رویدادهای ثبت‌شده از سال ۱۹۰۰ میلادی تا کنون بررسی شده و شواهدی دال بر پیش‌بینی مکانی زلزله‌های این استان ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** استان کرمانشاه، الگوی مکانی، توالی فیبوناچی، زلزله.

## مقدمه

لئوناردو فیبوناچی، ریاضیدان مشهور ایتالیایی در سال ۱۲۰۲ میلادی، الگوریتم ساده و کاربردی خود را برای تولید یک توالی نامتناهی از مجموعه اعداد طبیعی معرفی کرد [۱]. امروزه توالی مذکور را با نام سری فیبوناچی می‌شناسیم که کاربردهای متعددی در حل مسائل علوم زمین، نجوم و زیست‌شناسی دارد. توزیع و تکوین اغلب پدیده‌های طبیعی (از قبیل کانون زلزله‌ها و ریزگردها، توفان‌ها و جریان‌های اقیانوسی)، تابع سری فیبوناچی است و پیش‌بینی بخشی از فرایند توزیع با استفاده از مفهوم نسبت طلایی و اشکال هندسی منتظم میسر می‌شود. به‌طور پیش‌فرض، اولین، دومین و سومین جمله این سری با اعداد ۰، ۱ و ۱ آغاز شده و جملات بعدی براساس فرمول زیر محاسبه می‌شوند:

$$F_n = F_{(n-1)} + F_{(n-2)} \quad (1)$$

که در آن، منظور از  $F_n$ ، جمله  $n$  ام فیبوناچی است و مقادیر  $F_{(n-1)}$  و  $F_{(n-2)}$  به ترتیب، دو جمله ماقبل جمله  $n$  ام هستند.

با توجه به رابطه بالا، سری متعارف فیبوناچی به شرح زیر معرفی می‌شود:

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

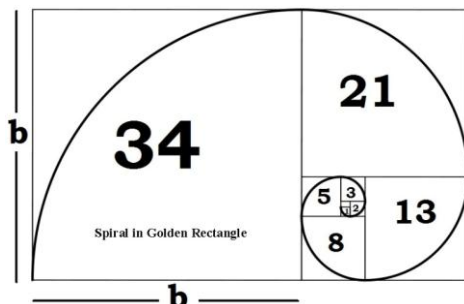
ویژگی این سری، افزاز کمیت ثابت  $1/618$  است، که به‌عنوان نسبت طلایی ( $\phi$ ) شناخته و به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۱].

$$\phi = F_n / F_{(n-1)} \quad (2)$$

مستطیل طلایی، متداول‌ترین شکل طبیعی با مؤلفه‌های متناظر است که در ارتباط مستقیم و معنادار با نسبت طلایی است [۲]. تابع توزیع مستطیل طلایی به‌صورت ماریچچ رسم می‌شود و شعاع این ماریچچ ( $r$ )، متناسب با طول ضلع چهارضلعی اولیه ( $b$ ) است؛ بنابراین می‌توان نوشت:

$$r = \exp(b, \theta), \quad [b = 2 / \pi \ln(\phi)] \quad (3)$$

شکل ۱، تابع ماریچچ حاصل از سری عددی فیبوناچی را نشان داده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، این تابع با استفاده از خواص مستطیل طلایی به‌دست آمده و کمیت  $\phi$ ، عامل پیدایش مؤلفه‌های متناظر در این توزیع است [۱، ۲].



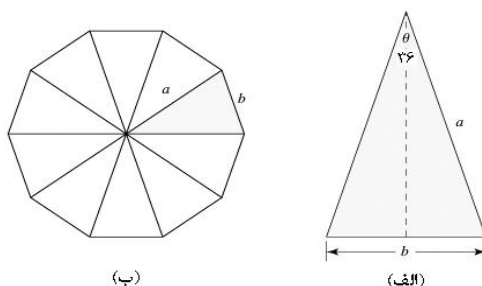
شکل ۱. تابع مارپیچ حاصل از مستطیل طلایی که تغییر مساحت آن براساس الگوریتم سری فیبوناچی است

در شکل ۱، تغییر مساحت چهارضلعی‌ها طبق قواعد فیبوناچی است و چهارضلعی اولیه دارای ابعاد متناظر به طول  $b$  است. اغلب پدیده‌های زمین‌شناسی و جغرافیایی، از توزیع مارپیچ با اعداد صحیح یا حقیقی تبعیت می‌کنند؛ از این‌رو کاربرد خواص نسبت طلایی در تحلیل مکانی پدیده‌های طبیعی، دارای توجیه منطقی و مبتنی بر مفاهیم هندسی اقلیدسی و فرکتال است.

مثلث و ده‌ضلعی طلایی دو نوع دیگر از اشکال هندسی با ابعاد متناظر و مرتبط با نسبت طلایی هستند که از آنها برای درک رابطه مکانی دو یا چند پدیده استفاده می‌شود [۳، ۴]. مطابق شکل ۲- الف، مثلث طلایی، یک سه‌ضلعی متساوی‌الساقین است که زاویه بین دو ساق آن  $(\theta)$ ،  $36^\circ$  درجه و نسبت طول ساق مثلث  $(a)$  به قاعده آن  $(b)$ ، همان نسبت طلایی است.

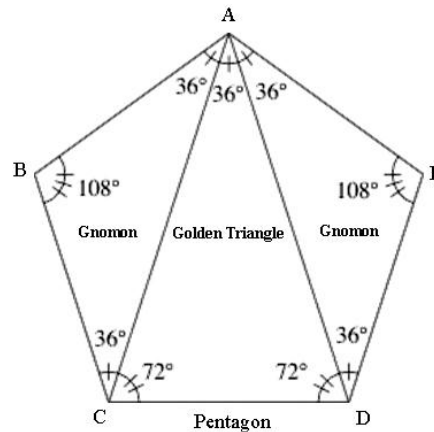
$$a/b = \varphi, (\theta = 36^\circ) \quad (۴)$$

همچنین این مثلث مبنای تولید ده‌ضلعی طلایی است که از بیشینه تقارن با خواص شبیه دایره طلایی برخوردار است (شکل ۲- ب).



شکل ۲. الف) مثلث طلایی با ساق‌های مساوی و زاویه  $36^\circ$  درجه بین دو ساق؛ ب) ده‌ضلعی منظم متشکل از ده واحد مثلث طلایی

گنومون طلایی، نوع خاصی از مثلث متساوی‌الساقین با خواص طلایی است که مطابق شکل ۳، زاویه بین ساق‌های آن ۱۰۸ درجه است و نسبت طول ساق به طول قاعده آن، با استفاده از رابطه ۵ به دست می‌آید [۴، ۱].

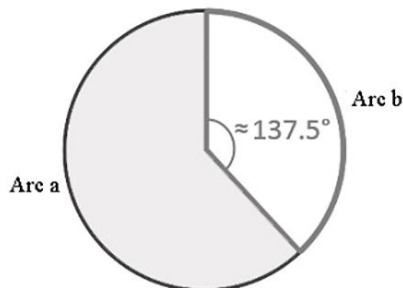


شکل ۳. مثلث و گنومون طلایی در ساختار پنج‌ضلعی منتظم (طراحی هندسی مبتنی بر سری فیبوناچی)

با توجه به شکل ۳، هر پنج‌ضلعی که براساس توالی فیبوناچی تولید شده باشد، از یک مثلث طلایی با زاویه ۳۶ درجه (ACD) و دو گنومون طلایی با زوایای رأس ۱۸۰ درجه برخوردار است (ABC, AED) [۵، ۶]. این اشکال از معمول‌ترین توزیع‌های هندسی در طبیعت‌اند که از برگ درختان، صدف نرم‌تنان و استقرار کهکشان‌ها تا پیدایش کانون زلزله‌های مخرب را در بر می‌گیرند [۴، ۶]. برخلاف مثلث طلایی، مقدار نسبت طلایی در گنومون یک واحد کمتر از  $\phi$  است و به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود (انتخاب نسبت‌ها براساس شکل ۳) [۴]:

$$AB/AC = AE/AD = \phi - 1, (\theta = 108^\circ) \quad (5)$$

در شکل ۴، دایره منحصربه‌فردی با عنوان دایره مرجع فیبوناچی (طلایی) رسم شده که از اشکال هندسی مرتبط با این توالی بوده و به اختصار دایره مرجع نامیده می‌شود. این دایره کاربردهای متعددی در علوم زیستی [۳، ۷] و کامپیوتر [۸، ۹] دارد و در این تحقیق به‌عنوان محدوده اثر کانون‌های لرزه‌ای غرب ایران مشاهده و ترسیم شده است.



شکل ۴. دایره مرجع فیبوناچی با کمان مقابل به زاویه مرکزی ۱۳۷/۵ درجه

در بیشتر موارد، شعاع دایره مذکور متناسب با شعاع ده ضلعی منتظم (شکل ۲-ب) بوده و شرط زاویه طلایی ۱۳۷/۵ درجه طبق رابطه ۶ برقرار است.

$$\text{Arc a} / \text{Arc b} = 222.5 / 137.5 = \varphi \quad (۶)$$

بنابراین، سری فیبوناچی مولد انواع مختلفی از اشکال هندسی منتظم است که در همه آنها امکان دستیابی به نسبت طلایی  $\varphi$  یا کسری از آن (گنومون) فراهم شده است. همچنین در وضعیت ایده آل (بیشینه تقارن طبیعی)، نوع خاصی از دایره به وجود می‌آید که از زاویه طلایی ۱۳۷/۵ درجه برخوردار بوده و نسبت طول کمان‌های آن متناسب با ضریب  $\varphi$  است [۵، ۳].

#### پیش‌بینی زلزله‌ها به روش بازنگرانه

پیش‌بینی بازنگرانه زلزله‌ها، یک روش شناخته‌شده و مبتنی بر اصول زمین‌آماري است که کلیه وقایع قبل و بعد از شوک اصلی را بررسی کرده و مدل احتمالی رویدادهای آتی را در فواصل اطمینان مورد نظر ارائه می‌کند [۹]. در روش‌های کلاسیک، مبنای محاسبات این روش، شامل استخراج کاتالوگ و خوشه‌بندی داده‌های لرزه‌ای براساس شاخص‌های مرکزی و پراکندگی است و تغییر آماره‌های توزیع (با تأکید بر مقادیر چولگی و کشیدگی)، تأثیر زیادی در روند هم‌افزایی یا کاهش‌دهی رویدادهای بعدی دارند (در نارایی برآوردهای لرزه‌ای مؤثرند).

در روش‌های پیشرفته، شاخص توزیع ذاتی داده‌ها جایگزین معیارهای محاسباتی متداول شده و خوشه اطلاعات مکانی با استناد بر مفاهیم نظریه آشوب و اصول هندسه فرکتال استخراج می‌شود [۱۰]. سری فیبوناچی و نقش بی‌بدیل آن در پیدایش کانون زمین‌لرزه‌های طبیعی، در زمره روش‌های نوین و مبتنی بر هم‌افزایی کمیت‌های متناظر است که مصادیق آن در اغلب فرایندهای زمین‌شناختی و موضوعات وابسته به علوم و فنون زلزله‌شناسی، مدنظر این تحقیق است [۱۰].

مراحل تحلیل مکانی رویدادهای لرزه‌ای به روش فیبوناچی:

۱. استخراج داده‌ها در دوره زمانی طولانی (با رعایت حد آستانه منطقه‌ای)؛
۲. پردازش داده‌ها به منظور افزایش پیوستگی مکانی در متغیرهای تصادفی؛
۳. تعیین حدود اثر رویدادهای وابسته (تحدید جغرافیایی پارامترهای توزیع)؛
۴. تمرکز و تدقیق مکانی رویدادهای اصلی (پیش‌لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها)؛
۵. استخراج الگوی مکانی متناسب با توزیع داده‌ها به روش فیبوناچی؛
۶. افراز الگوهای هندسی متناظر با نسبت‌های طلایی؛
۷. تفسیر داده‌های کاتالوگ براساس روش فیبوناچی و ذکر دلایل پیدایش رومرکزهای اصلی از نظر مکانی؛
۸. پیش‌بینی احتمالی رویدادهای آتی با تأکید بر فرایند تکرارپذیری رویدادهای متناظر (مبتنی بر نظریه آشوب).

#### مشخصات و سوابق لرزه‌خیزی غرب ایران

مکان جغرافیایی رومرکز زمین‌لرزه‌های تاریخی استان کرمانشاه براساس داده‌های موجود در کاتالوگ سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده آمریکا بوده و در دامنه زمانی ۱۹۰۰ تا روزهای پایانی ۲۰۱۷ میلادی استخراج شده است [۱۲]. براساس نظریه زمین ساخت صفحه‌ای، مناطق غرب و جنوب غربی ایران، به دلیل قرار گرفتن در ناحیه فرورانش اقیانوسی-قاره‌ای، متأثر از چین‌خوردگی‌های عظیم زاگرس است و شاهد جمع‌شدگی پوسته (افزایش تنش) در محل تلاقی صفحات هستیم [۱۱]. گسل‌ها و چین‌خوردگی در رسوبات زاگرس، از نشانه‌های بارز فعالیت‌های زمین‌ساختی در استان کرمانشاه هستند که به دلیل توزیع تنش در واحدهای رسوبی-آواری ادوار گذشته، انشعابات فراوان و اغلب پنهان دارند. سستی سازندهای پی‌سنگی ناشی از عملکرد مستمر و جوان گسلش‌هایی است که به لحاظ مکانی و زمانی با سازوکار فرورانش غرب ایران ارتباط دارند [۱۱]. علاوه بر داده‌های کاتالوگ، سوابق لرزه‌خیزی قبل از ۱۹۰۰ میلادی، مؤید فعالیت‌های زمین‌ساختی بیشتر و تمرکز زلزله‌های تاریخی (هزاره اول میلادی) در اطراف ساختمان‌های زاگرس است [۱۳]. گسل‌های غرب ایران دیرزمانی است که متأثر از تنش‌های زمین‌ساختی زاگرس‌اند. این منطقه از فلات ایران، دارای فعالیت لرزه‌ای ادواری بوده و شواهد آن در تاریخ چندهزار ساله کرمانشاه درج شده است [۱۳]. تعداد و نحوه توزیع زلزله‌ها برای دو دوره زمانی قبل و بعد از ۱۹۰۰ میلادی متفاوت است. در نگاه کلی،

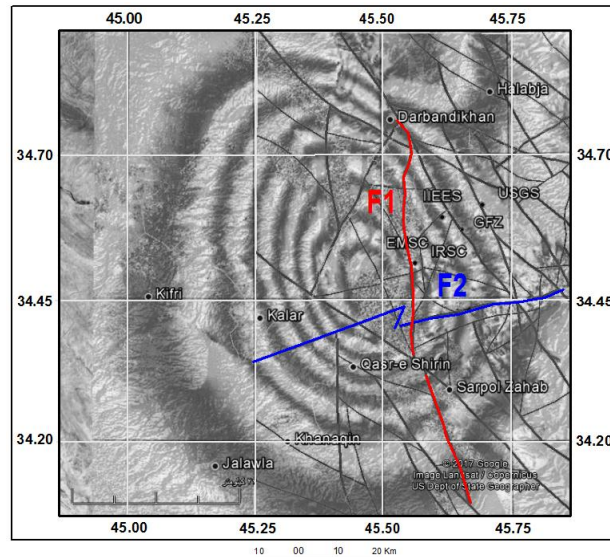
مناطق فعال گسلی، در همهٔ ادوار متأثر از سازوکارهای دینامیکی زاگرس بوده‌اند و رویداد اخیر ازگله-سرپل ذهاب، بر بازاحیایی سامانه‌های لرزه‌زای غرب ایران دلالت دارد. براساس مندرجات جدول ۱، قبل از رویداد ازگله، آخرین زمین‌لرزه‌های دستگاهی ثبت‌شده در استان کرمانشاه (۱۹۶۴ به بعد)، مربوط به سال‌های ۲۰۱۳ (با بزرگی ۵/۷)، ۱۹۹۸ (با بزرگی ۵/۶) و ۱۹۶۷ (با بزرگی ۵/۶) است. با توجه به مختصات درج‌شده در این جدول، برخی از رویدادها در فاصله‌ای نه‌چندان دور از چشمهٔ لرزه‌زای ازگله قرار دارند (شعاع اثر ۵۰ کیلومتر).

جدول ۱. زمین‌لرزه‌های دستگاهی ثبت‌شده در غرب ایران با بزرگی بیش از ۴/۹ [۱۲]

عمق (کیلومتر)	بزرگا	عرض جغرافیایی	طول جغرافیایی	تاریخ رویداد (میلادی)
۱۴	۵/۶	۳۴ ۰۶۷	۴۵ ۶۵۶	۱۹۶۷
۱۵	۵/۶	۳۳ ۱۸۳	۴۶ ۲۶۶	۱۹۹۸
۱۴	۵/۷	۳۴ ۳۵۰	۴۵ ۴۸۰	۲۰۱۳
۱۸	۷/۳	۳۴ ۸۷۷	۴۵ ۸۴۱	۲۰۱۷

سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های غرب ایران از نوع امتدادلغز با شیب متوسط به سمت شرق است که به دلیل تغییرات ارتفاعی زاگرس، موجب لغزش‌های شدید و بارز می‌شود. زلزلهٔ اخیر منطقهٔ ازگله، دارای لغزش‌های شدید افقی و قائم بود که موجب وارد شدن خسارات جانی و مالی شد.

فعال شدن چشمهٔ لرزه‌زای ازگله (در عمق ۱۸ کیلومتری زمین)، آخرین و مخرب‌ترین رویداد زمین‌ساختی این منطقه محسوب می‌شود که زلزله‌ای به بزرگی ۷/۳ ریشتر و شتاب محلی  $g$  ۰/۵ را در شامگاه ۲۱ آبان ۱۳۹۶ خورشیدی (دوازدهم نوامبر ۲۰۱۷) به‌وجود آورد و موجب تخریب شهرهای مرزی استان کرمانشاه شد [۱۲]. تنها پیش‌لرزهٔ دستگاهی ثبت‌شده از این رویداد با بزرگی ۴/۷ و در دامنهٔ زمانی کمتر از یک ساعت (قبل از شوک اصلی) رخ داد. با توجه به وضعیت سازندهای زمین‌شناسی، شرایط خاستگاه و سازوکار کانونی زلزله، پیش‌بینی می‌شود که تعداد پس‌لرزه‌های این رویداد زیاد و دورهٔ زمانی آنها طولانی‌مدت باشد. گسل‌های پیشانی کوهستان (MFF) و زاگرس مرتفع (HZF) ارتباط مکانی نزدیکی با زلزلهٔ اخیر داشتند و براساس شواهد به‌دست‌آمده از نقشه‌های زمین‌شناسی و تصاویر ماهواره‌ای (اینترفروگرام)، برخی از خطواره‌های گسلی (نظیر F1 و F2 در شکل ۵) به‌عنوان عوامل ساختمانی مرتبط با چشمهٔ اصلی معرفی شده‌اند [۱۲].



شکل ۵. خطواره‌های احتمالی مرتبط با رویداد لرزه‌ای ازگله براساس شواهد اینترنتی و گرام [۱۲]

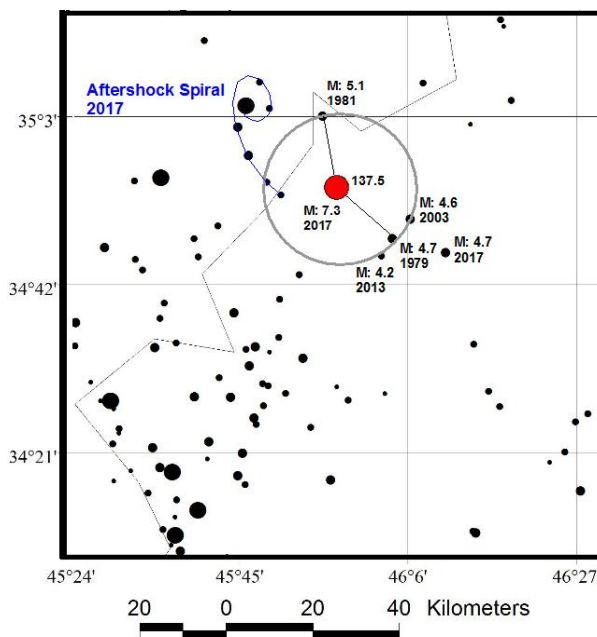
### تحلیل مکانی مخاطرات لرزه‌ای غرب ایران

براساس کاتالوگ سازمان زمین‌شناسی آمریکا، در یک قرن گذشته شاهد پایداری نسبی در فعالیت‌های زمین‌ساختی و لرزه‌خیزی غرب ایران بوده‌ایم. از این رو توزیع مکانی چشمه‌های لرزه‌ای به صورت آرام و خزشی صورت می‌گیرد و از نظم هندسی خاصی تبعیت می‌کند. در این تحقیق، برای اولین بار، رویدادهای لرزه‌ای غرب ایران با بزرگی بیش از  $3/5$  ارزیابی شده و براساس توالی اعداد فیبوناچی تحلیل شده‌اند. برای پیاده‌سازی مکان هندسی رومرکزهای لرزه‌ای از نرم‌افزار Arc GIS و بسته نرم‌افزاری Spatial Analyst استفاده شد. با توجه به وسعت جغرافیایی منطقه تحقیق و کمبود چشمه‌های لرزه‌ای بزرگ طی یک قرن گذشته (جدول ۱)، استفاده از الگوی هندسی مستطیل طلایی، احتمال خطای نوع اول را افزایش می‌دهد. در چنین مواقعی (کمبود توالی‌های لرزه‌ای و تغییرات ناگهانی در نقاط اکسترمم تابع)، به شناسایی و استفاده از واحد هندسی مناسب با خواص طلایی نیازمندیم. بنابراین در گام نخست، به مطالعه و شناسایی انواع سه‌ضلعی و دایره مرجع با شعاع تأثیر کمتر از ۵۰ کیلومتر در اطراف کانون زمین‌لرزه ازگله اقدام شد. نتایج بررسی‌ها به شرح زیر است:

۱. مطابق شکل ۶، کانون سطحی رویداد ازگله در مرکز دایره‌ای به شعاع تقریبی ۲۰ کیلومتر قرار داشته و در این شعاع با دو رویداد پیشین (مربوط به سال‌های ۱۹۷۹ و ۱۹۸۱) ارتباط



هندسی معناداری دارد. زاویه تقریبی بین این دو رویداد نسبت به کانون اصلی رویداد ازگله،  $137/5$  درجه و معادل زاویه طلایی در دایره مرجع فیبوناچی است. این موضوع بیانگر نقش اعداد فیبوناچی در آرایش رویدادهای لرزه‌ای غرب ایران است که به صورت مستقل از زمان و متأثر از عوامل زمین‌ساختی (مکانی) به وجود آمده‌اند. شایان ذکر است که ابتدا و انتهای کمان طلایی توسط دو رویداد با بزرگی متوسط (بیش از  $4/5$ ) مشخص شده است.

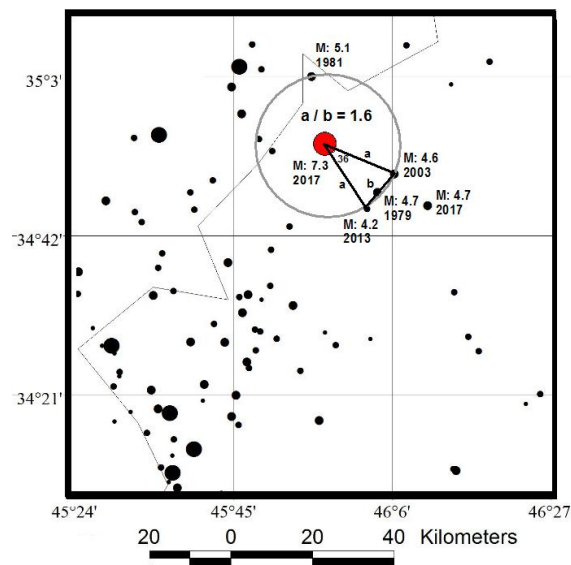


شکل ۶. تکوین دایره طلایی (مرجع فیبوناچی، شکل ۴) و توزیع مارپیچ (شکل ۱) در کاتالوگ زمین‌لرزه‌های غرب ایران (۱۹۰۰ تا ۲۰۱۷). نقطه قرمز، معرف رومرکز زلزله ویرانگر ازگله و خط ممتد آبی معرف توزیع پس‌لرزه‌ها در نوامبر و دسامبر ۲۰۱۷ است.

۲. بعد از پیدایش چشمه لرزه‌ای ازگله، فعالیت‌های پسین این سامانه به صورت زلزله‌های متوالی با بزرگی متوسط ادامه دارد. از دیدگاه نظری، پس‌لرزه‌های طبیعی تمایل زیادی به ایجاد اشکال هندسی منظم با خواص فیبوناچی دارند [۱۴]. نمود عملی چنین نظریه‌ای در پس‌لرزه‌های شمال غربی ازگله مشهود است. بر روی شکل ۶، توزیع مارپیچی این رویدادها با خط ممتد آبی نشان داده شده است. این الگو به‌طور منحصربه‌فردی بیانگر نظم ذاتی حاکم بر

رویداد ازگله بوده (منشأ طبیعی) و محصول تبادل و توازن انرژی درونی زمین در خلال فرایندهای ژئودینامیکی است (جابه‌جایی در شیب‌ها و پایانه‌های گسلی).

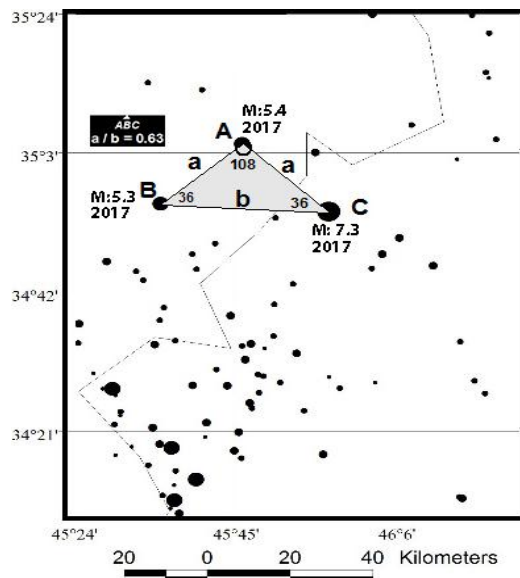
۳. مطابق شکل ۷، واحد سازنده دایره مرجع، یک سه‌ضلعی به طول قاعده  $b$  با ساق‌های برابر  $a$  است که نسبت طول ساق به طول قاعده برابر  $1/618$  و زاویه رأس آن  $36$  درجه است (شکل ۲-الف).



شکل ۷. ظهور مثلث طلایی با دو ساق برابر (a) و قاعده (b) در کاتالوگ زمین‌لرزه‌های غرب ایران (۱۹۰۰-۲۰۱۷). رویداد ازگله با نقطه قرمز در رأس این مثلث قرار دارد. این مثلث مبنای پیدایش دایره مرجع در شکل ۶ است.

مثلث طلایی شکل ۷، واحد سازنده دایره مرجع در زمین‌لرزه‌های غرب ایران است. به طوری که شعاع اثر دایره با طول ساق مثلث متناظر بوده و بیانگر قاعده‌مندی توزیع زمین‌لرزه‌ها از سال ۱۹۰۰ تا کنون است.

۴. در شکل ۸، نظم هندسی دیگری به صورت پیدایش گنومون طلایی (شکل ۳) مشاهده می‌شود که به طور مشخص در الگوی توزیع زلزله‌های اخیر کرمانشاه (شوک اصلی و پس‌لرزه‌های بزرگ‌تر از ۵) و پیرامون چشمه لرزه‌زای ازگله پدید آمده است. در این سه‌ضلعی، زاویه رأس ساق‌های متناظر،  $108$  درجه بوده و نسبت طول ساق به طول قاعده گنومون، یک واحد کمتر از نسبت طلایی است (بیانگر منشأ طبیعی رویداد اصلی و پس‌لرزه‌ها) [۱۴، ۱۵].



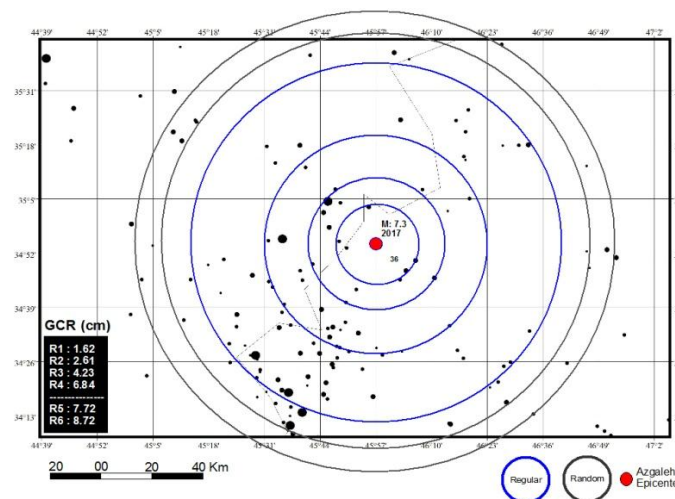
شکل ۸. پیدایش گنومون طلایی با دو ساق برابر (a) و قاعده (b) مربوط به شوک اصلی و پس‌لرزه‌های ازگله

۵. با توجه به تحلیل‌های مکانی به‌عمل‌آمده از رویداد لرزه‌ای ازگله، امکان تعیین شعاع اثر گام‌به‌گام زمین‌لرزه‌های این ناحیه براساس مندرجات کاتالوگ و با رعایت توالی اعداد فیبوناچی (توزیع طبیعی چشمه‌های لرزه‌زا) براساس مندرجات جدول ۲ است.

جدول ۲. محاسبه شعاع دوایر فیبوناچی به‌همراه کمیت‌های هندسی و نسبت‌های طلایی به مرکز زلزله ازگله

توالی فیبوناچی	نسبت طلایی	مشخصات هندسی دایره مرجع		شعاع دایره مرجع	
		مساحت (کیلومتر مربع)	محیط (کیلومتر)	روی زمین (کیلومتر)	روی نقشه (سانتیمتر)
منظم	۱/۶۱	۳۲۱۵	۱۲۵	۲۰	۱/۶۲
	۱/۶۲	۸۴۹۰	۲۰۰	۳۲	۲/۶۱
	۱/۶۲	۲۲۱۵۵	۵۲۷	۸۴	۶/۸۴
	۱/۱۲	۲۸۳۸۵	۵۹۶	۹۵	۷/۷۲
	۱/۱۳	۳۵۹۴۹	۶۷۱	۱۰۷	۸/۷۲
تصادفی					

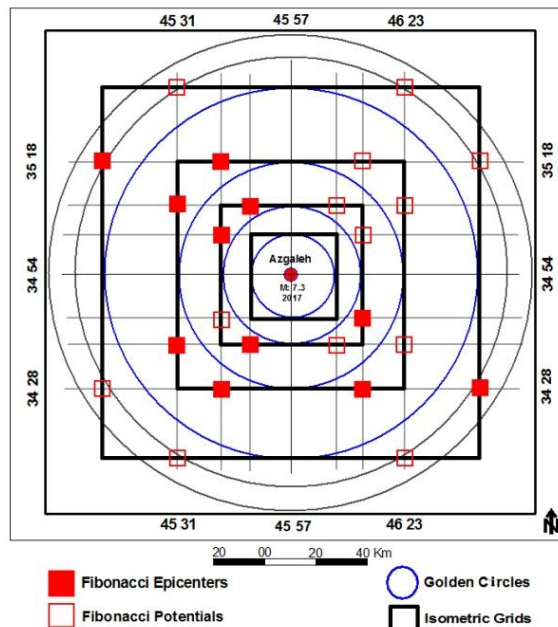
در جدول ۲، شعاع اثر زمین‌لرزه‌های غرب ایران به‌روش تقریب شعاع دایره‌های طلایی و اعمال ضرایب ثابت فیبوناچی تعیین شده است. چهار شعاع اول، به‌صورت قاعده‌مند (۱/۶۲) و دو شعاع پایانی به‌صورت تصادفی (۱/۱۳) انتخاب شده‌اند [۱۵]. با توجه به طولانی شدن دوره بازگشت زلزله‌های بزرگ و افزایش احتمال آریبی شدن توزیع مکانی چشمه‌های لرزه‌زا (در فواصل دور)، از معیارهای تصادفی برای تعیین شعاع اثر پس‌لرزه‌ها استفاده شده است [۱۶]. شکل ۹، نتیجه اعمال کمیت‌های به‌دست‌آمده از جدول ۲ است که دوایر طلایی آن براساس کاتالوگ زمین‌لرزه‌های غرب ایران (به مرکزیت رویداد ازگله) رسم شده‌اند. این شکل بر روی نقشه پایه توزیع زلزله‌ها با شبکه‌بندی ۲۰ کیلومتر پیاده شد تا دوایر طلایی با دقت بیشتری انتخاب شود.



شکل ۹. توزیع مکانی زمین‌لرزه‌های غرب ایران در اطراف رویداد لرزه‌ای ازگله. دایره‌های آبی براساس نسبت ۱/۶۱۸ و دایره‌های خاکستری برحسب ضریب تصادفی ۱/۱۳ به‌دست آمده‌اند (محاسبه شعاع دوایر مطابق جدول ۲ است).

در شکل ۹، مکان هندسی اغلب زلزله‌ها که در فاصله کمتر از ۵۰ کیلومتر از شوک اصلی هستند، منطبق بر حواشی دایره‌های طلایی بوده و با زاویه ۳۰ تا ۶۰ درجه در اطراف چشمه اصلی توزیع شده‌اند. شعاع دایره‌ها تا فاصله ۸۵ کیلومتری ازگله ادامه دارد و بعد از آن به توالی تصادفی تبدیل شده است [۱۵، ۶].

۶. نتایج پیش‌بینی بازنگرانه در مخاطرات لرزه‌ای غرب ایران، مطابق شکل ۱۰ ارائه می‌شود.



شکل ۱۰. شناسایی کانون‌های سطحی موجود و بالقوه در اطراف چشمه لرزه‌زای ازگله به روش فیبوناچی. این آرایه با استفاده از شبکه‌های ایزومتریک و تعمیم آنها به مستطیل‌های طلایی به‌دست آمده است.

در شکل ۱۰، برای شناسایی کانون‌های بالقوه، از شبکه ایزومتریک مماس بر دایره‌های طلایی استفاده شده است. چنانکه ملاحظه می‌شود، این شبکه‌ها به صورت سلول‌های مربعی، دایره‌های طلایی هر مرحله را احاطه کرده‌اند (مرجع رسم سلول‌ها، مندرجات شکل ۹ و جدول ۲ است). در ادامه، محل تلاقی شبکه‌های همسایگی مشخص شده و رومرکزهای موجود (مربع‌های توپر) و نیز موقعیت تقریبی چشمه‌های بالقوه (مربع‌های توخالی) مشخص شده‌اند. با مقایسه شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان به انطباق معنادار داده‌های کاتالوگ بر نتایج این تحقیق پی برد. توزیع زمین‌لرزه‌ها در یک قرن گذشته، منطبق بر سری فیبوناچی بوده است و اشکال طلایی در پس‌لرزه‌های رویداد ازگله مشاهده می‌شوند.

### نتیجه‌گیری

بر روی نقشه پایه زمین‌لرزه‌های غرب ایران که در محیط GIS با مقیاس ۱/۱۲۰۰۰۰۰ تهیه شده است (شکل‌های ۶ تا ۹)، مکان هندسی زلزله ازگله از ویژگی‌های خاصی برخوردار است

که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از: پیدایش دایره و مثلث طلایی به‌عنوان واحد اصلی توزیع لرزه‌ها و پس‌لرزه‌ها در شعاع کمتر از ۲۰ کیلومتر به‌همراه پیدایش گنومون طلایی به‌عنوان یکی از نشانه‌های طبیعی بودن چشمه لرزه‌زای ازگله.

همچنین در شعاع اثر کمتر از ۸۵ کیلومتر از شوک اصلی، توالی زلزله‌ها ناشی از توالی عادی در فیبوناچی بوده و تغییر شعاع دایره‌های مرجع به‌صورت منظم و مطابق با نسبت طلایی است؛ درحالی که در فواصل بیش از ۸۵ کیلومتر، سری فیبوناچی به‌صورت تصادفی توزیع شده و ضریب  $1/13$  جایگزین ضریب  $1/618$  شده است.

پیش‌بینی بازنگرانه به روش فیبوناچی، نتیجه ارائه یک مدل ابداعی در این پژوهش است که اولین بار در کاتالوگ زمین‌لرزه‌های غرب ایران اعمال شده و با استفاده از نگاشت‌های منطقه‌ای، مکان هندسی زلزله ازگله به‌عنوان مبدأ تحولات لرزه‌خیزی غرب ایران بررسی شده است. شواهد به‌دست‌آمده بیانگر ضرورت پیدایش چشمه لرزه‌زای ازگله است. دلایل ارائه‌شده در این تحقیق عبارت‌اند از مطابقت مرکز تقارن دایره مرجع با رومرکز شوک اصلی و توزیع مارپیچی پس‌لرزه‌ها در خلال پیدایش اشکال طلایی (گنومون). در واقع کانون زلزله ازگله در مرکز شبکه ایزومتریکی قرار دارد که به‌طور تقریبی با الگوی توزیع مستطیل‌های طلایی متناسب است. تحقیقاً رومرکز زلزله ازگله منطبق بر شبکه ایزومتریک به شعاع  $2X$  است که به تبعیت از قواعد فیبوناچی، منشأ توزیع کانون‌های سطحی با ضریب  $\sqrt{5}X$  بوده است. تأثیر این ضریب در فواصل نزدیک به چشمه لرزه‌زا معنادار است، اما با افزایش فاصله از رویداد اصلی، امکان بروز خطا در تعیین موقعیت کانون‌های سطحی افزایش می‌یابد. یعنی مکان هندسی کانون‌های فیبوناچی دارای مطابقت نسبی با پس‌لرزه‌های منطقه است و نقاط بالقوه آن، مستعد رویدادهای آتی هستند.

### 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. pp. 159-163.
- [3]. Ball, K.M. (2003). *Strange Curves, Counting Rabbits and other Mathematical Explorations*. 8: Fibonacci Rabbits Revisited. Princeton NJ. Princeton University Press. p. 165.
- [4]. 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.
- [5]. Pappas, T. (1989). *The Golden Rectangle , The Joy of Mathematics*. San Carlos. CA: Wide World Publ./Tetra. pp. 102-106.
- [6]. Kabai, S. (2002). *Mathematical Graphics I: Lessons in Computer Graphics Using Mathematica* .Püspökladány. Hungary: Uniconstant. p. 79.
- [7]. Werner, M.J. (2011). “Earthquake Forecasting based on Data Assimilation: Sequential Monte Carlo Methods”. *Nonlinear Process in Geophysics*. 18,pp. 49-79.
- [8]. Sgrina V; Conti L. (2012). “A Deterministic Approach to Earthquake prediction” *International Journal of Geophysics* .Vol. 2012. Article ID 406278,pp. 1-20.
- [9]. Turcotte, D.D. (1997). *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*. New York. Cambridge University. Cambridge University Press. p. 397. 2nd Edition.
- [10]. Belyakov A. (2013). “Probabilistic Factors as a Possible Reason of the Stability of Planetary and Electronic Orbits” , *Progress in Physics* Vol.3,pp. 56-57.
- [11]. Berberian, M. (2014). “Earthquakes and Coseismic Surface Faulting on the Iranian Plateau” . Elsevier. 978-0-444-63297-5. Volume 17 - 1st Edition.
- [12]. Department of the Interior, U.S. Geological Survey (USGS). (2017). Official Report on A magnitude 7.3 earthquake struck Iran near the border with Iraq on November 12, 2017at 9:18 pm local time. 1:18 pm Eastern Standard Time., <https://www.usgs.gov/news/magnitude-73-earthquake-iraniraq-border>.
- [13]. Ambraseys, N.N. and Melville, C.P. (1982). *A History of Persian Earthquakes*. New York. Cambridge University. Cambridge University Press. p. 150. 1st Edition.
- [14]. Kagan, Y.Y. (2002). “Aftershock Zone Scaling” . *Bulletin of American Seismological Society*. Volume 92. pp. 641-655
- [15]. Viswanath D. (2000). “Mathematics of Computation, Random Fibonacci Sequences and the Number 1.131988” , *American Mathematical Society*. Volume 69. No 231,pp. 1131-1155.
- [16]. Boucouvalas A. C. ; Gkasios M. ; Keskebes A. ; Tselikas NT. (2014) . “Leading Time Domain Seismic Precursors” 2<sup>nd</sup> Intern. Conf. on Remote Sensing and Geoinformation of the Environment (RSCy2014) Proc SPIE Vol.9229, 92291H, Paphos. Cyprus.