

تعیین چشمه‌های لرزه‌ای با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی فازی بهینه

رضوان قاسمی نژاد^۱، رحیم علی‌عباسپور^{۲*} و مسعود مجرب^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی نقشه برداری و اطلاعات مکانی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

^۳ محقق، آزمایشگاه مهندسی زمین، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۷/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۱/۲۴

چکیده

چشمه‌های لرزه‌ای نقش مهمی در برآورد خطر در فرایند تحلیل خطر لرزه‌ای ایفا می‌کنند. انتخاب این مناطق بیشتر بر پایه قضاوت‌های کارشناسان انجام می‌شود و در بیشتر موارد، تعیین چشمه‌های لرزه‌ای توسط چند کارشناس نتایج متفاوت و بحث‌برانگیزی را دربر دارد. از این رو، یکی از عوامل مهم در ایجاد عدم قطعیت در تحلیل خطر می‌تواند به دلیل چگونگی انتخاب چشمه‌ها باشد. نسبت دادن رخداد‌های گذشته به هر چشمه لرزه‌ای مسأله مهم بعدی تحلیل خطر زمین‌لرزه است که این کار نیز توسط قضاوت‌های بصری کارشناسان انجام می‌شود و از آنجایی که گسل مسبب هر رخداد به‌طور واضح مشخص نیست؛ مانند تعیین چشمه‌های لرزه‌ای، این شیوه نتایج مبهمی دارد. در پژوهش حاضر سعی شده است که با استفاده از روش بهینه‌سازی توده ذرات به‌منظور خوشه‌بندی فازی، به‌طور هم‌زمان چشمه‌های لرزه‌ای تعیین شده و رویدادهای لرزه‌ای به گسل‌ها نسبت داده شوند. الگوریتم مورد استفاده بر پایه کمینه‌سازی دو تابع هدف فاصله رویدادها از گسل و مرکز خوشه (مرکز چگالی رویدادها) کار می‌کند. این الگوریتم به دو حالت روی داده‌های ناحیه شمال باختر ایران اعمال شد؛ در حالت اول فاصله مورد محاسبه فاصله اقلیدسی بوده است و در حالت دوم فاصله مالهالانویس در محاسبات در نظر گرفته شدند. برای ارزیابی درستی الگوریتم، از رویدادهایی که از پیش به گسل‌ها نسبت داده شده‌اند استفاده شد. مقایسه خروجی‌های الگوریتم با بانک اطلاعات زمین‌لرزه‌های نسبت داده شده گذشته نشان داد که ۷۹/۲ درصد از این رویدادها با در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی و ۸۷/۵ درصد از این رویدادها با در نظر گرفتن فاصله مالهالانویس به درستی به گسل‌ها اختصاص یافتند که نشان از عملکرد خوب روش پیشنهادی این مطالعه با استفاده از فاصله مالهالانویس دارد. نتایج حاصل نشان می‌دهند که رویکرد پیشنهادی به مهندسی زمین‌لرزه‌شناسی کمک می‌کند تا با عدم قطعیت کمتری در فرایند تحلیل خطر لرزه‌ای افزون بر تعیین چشمه‌ها، زمین‌لرزه‌ها را به گسل‌ها اختصاص دهند.

کلیدواژه‌ها: خوشه‌بندی فازی، بهینه‌سازی توده ذرات (PSO)، تحلیل خطر لرزه‌ای احتمالی (PSHA)، چشمه‌های لرزه‌ای.

*نویسنده مسئول: رحیم علی‌عباسپور

E-mail: abaspour@ut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

یکی از مهم‌ترین هدف‌های مهندسان در تحلیل‌های لرزه‌ای، اطمینان از عملکرد مناسب سازه هنگام رخداد زمین‌لرزه در طول عمر مفید آن است. این در حالی است که موقعیت، اندازه و شدت رخداد لرزه‌ای به‌طور واضح قابل پیش‌بینی نیست. تحلیل خطر احتمالی لرزه‌ای (probabilistic seismic hazard analysis) که اولین بار توسط Cornell (1968) معرفی و سپس توسط McGuire (2004) بهبود داده شد؛ برای ارزیابی عدم قطعیت‌ها در بزرگی و موقعیت رویدادهای لرزه‌ای انجام می‌شود و احتمال روی دادن یک زمین‌لرزه را در منطقه‌ای خاص به دست می‌آورد.

یکی از مراحل بنیادین تحلیل خطر احتمالی لرزه‌ای، معرفی چشمه‌های لرزه‌ای است. چشمه‌های لرزه‌ای موقعیت یا نواحی در زمین هستند که قادر به ایجاد زمین‌لرزه‌های بسیاری هستند و به دو نوع چشمه‌های ناحیه‌ای و چشمه‌های خطی تقسیم‌بندی می‌شوند (McGuire, 2004)؛ چشمه‌های ناحیه‌ای مساحتی از سطح زمین (زون لرزه‌زا) و چشمه‌های خطی، گسل‌ها هستند که در واقع منشأ اصلی بیشتر زمین‌لرزه‌ها هستند. از مراحل مهم دیگر در تحلیل خطر لرزه‌ای، تعیین گسل‌های مسبب رویدادهای لرزه‌ای است و مسئله‌ای که تحلیل خطر لرزه‌ای را با مشکل روبه‌رو می‌کند این است که گسل مسبب بسیاری از زمین‌لرزه‌ها به‌طور واضح مشخص نیست و همچنین روش اختصاص رویدادها به گسل‌ها به‌طور مستقیم روی محاسبه متغیرهای لرزه‌خیزی تأثیر دارد. بنابراین مهم‌ترین بحث در تحلیل خطر، افزون بر تعیین چشمه‌های لرزه‌ای دقیق، تعیین رابطه میان موقعیت زمین‌لرزه‌ها و گسل‌هاست (Ouillon et al., 2008; Spada et al., 2011). این کار معمولاً از راه نظر گروهی از کارشناسان خیره صورت می‌گیرد (Committee and Budnitz, 1997; Musson, 2004) برای نمونه (Coppersmith et al. (2009) با استفاده از این روش به تعیین چشمه‌ها پرداخته‌اند. اگر چه در این روش اطلاعات مختلف در نظر گرفته می‌شوند؛ ولی نتیجه دارای دامنه

تغییرات بالا و عدم قطعیت بسیار است. بنابراین یک روش مناسب برای معرفی مدل چشمه‌های لرزه‌ای مورد نیاز است.

داده‌کاوی به کشف روابط و الگوهای پنهان میان حجم زیادی از داده‌ها می‌پردازد (Zhongbin et al., 2008). از مهم‌ترین روش‌های داده‌کاوی پرکاربرد برای داده‌های لرزه‌ای خوشه‌بندی است که پژوهشگران بسیاری از کاربردهای این روش‌ها به‌منظور تعیین چشمه‌ها بهره برده‌اند. برای نمونه، (Burton and Hall (2014), Burton et al. (2008), Ouillon and Sornette (2011), Wang et al. (2013), Weatherill and Burton (2009) و Woo (1996) را می‌توان نام برد. از سوی دیگر نزدیک‌ترین زمین‌لرزه به یک گسل احتمال بیشتری دارد که به آن گسل نسبت داده شود؛ یعنی دارای درجه عضویت بیشتری به آن گسل است (Ansari et al., 2015). بنابراین استفاده از روش‌های فازی برای خوشه‌بندی داده‌های لرزه‌ای برای تعیین چشمه‌های خطی مناسب‌تر بوده و نتایج منطقی‌تری حاصل خواهد شد.

فلات ایران از جمله مناطق لرزه‌خیز جهان است که نیازمند مطالعات گسترده در زمینه لرزه‌خیزی است. چگونگی توزیع مکانی رویدادها، سازوکار و بزرگای آنها در مناطق مختلف این فلات یکسان نیست، در راستای تعیین چشمه‌های لرزه‌ای برای مناطق مختلف ایران نیز پژوهشگرانی همچون (Mirzaei et al. (1999 and 1998) با قضاوت کارشناسی و (Ansari et al. (2015) با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی مدل‌های چشمه‌های لرزه‌ای خود را ارائه کرده‌اند.

مشکلی که در رابطه با مسئله خوشه‌بندی وجود دارد؛ این است که معمولاً این روش‌ها در پاسخ‌های بهینه محلی گیر می‌کنند و نمی‌توانند پاسخ‌های واقعی را تعیین کنند (Manikandan and Selvarajan, 2014). همچنین به دلیل حساس بودن این روش‌ها به مقادیر اولیه، الگوریتم‌هایی مورد نیاز است که از راه سازوکار جستجوی سراسری به تعیین خوشه‌ها پردازد و به مقادیر اولیه وابسته نباشد (Zhao et al., 2014). در واقع می‌توان مسئله خوشه‌بندی را به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی از نوع سخت

$$A_i = [\rho_i \det(F_i)]^{1/\rho_i} F_i^{-1} \quad \forall \rho_i > 0 \quad (5)$$

استفاده از فاصله ماهالانویس در خوشه‌بندی سبب ایجاد خوشه‌های بیضی‌شکل می‌شود. در این صورت شکل‌های دایره‌ای نیز پشتیبانی می‌شوند؛ زیرا دایره نوعی بیضی است که قطرهای برابر دارد (Grekousis and Thomas, 2012).

اگرچه الگوریتم‌های رایج خوشه‌بندی (مانند k-means (MacQueen, 1967)) به سادگی قابل فهم و پیاده‌سازی هستند؛ اما از گیرکردن در دام پاسخ‌های بهینه محلی رنج می‌برند و نمی‌توانند پاسخ‌های واقعی مسئله را بیابند (Manikandan and Selvarajan 2014)؛ همچنین این روش‌ها به شدت به مقادیر اولیه حساس هستند (Tsai et al., 2014).

روش‌های بهینه‌سازی به دنبال پاسخ‌های واقعی تحت قیدهای معرفی شده برای مسئله هستند. در هنگام بهینه‌سازی یک سامانه، هدف اصلی یافتن مجموعه‌ای از مقادیر است؛ به طوری که عملکرد کلی سامانه تحت یک سری شرایط به بهترین حالت باشد (Das et al., 2009).

به دلیل اینکه مسائل بهینه‌سازی معمولاً برای رسیدن به پاسخ‌های معقول زمان زیادی برای انجام محاسبات نیاز دارند؛ از نوع NP-complete یا NP-hard به دست می‌آیند (Garey and Johnson, 1979; Welch, 1982). برای حل این گونه مسائل، الگوریتم‌های هوشمند بهینه‌سازی فراابتکاری معرفی شده که بیشتر از طبیعت الهام گرفته شده‌اند (Bianchi et al., 2009). ویژگی‌های آشکار این الگوریتم‌ها یافتن پاسخ‌های بهینه برای یک مسئله در یک زمان محاسباتی محدود (polynomial time) است (Blum and Roli, 2003). پس این روش‌ها می‌توانند نقش حیاتی در یافتن خوشه‌های بهینه داشته باشند.

۲-۲. بهینه‌سازی توده ذرات

بهینه‌سازی توده ذرات (Particle Swarm Optimization (PSO)) یکی از الگوریتم‌های کارآمد هوش جمعی است که از ساده‌سازی و شبیه‌سازی رفتار جمعی حیوانات مانند ماهی‌ها و پرندگان حاصل شده است (Manda et al., 2010). این الگوریتم در ابتدا توسط Eberhart and Kennedy (1995) به عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی جستجوی انطباقی ارائه شد.

در الگوریتم PSO هر یک از پرندگان در دسته خود به طور نمادین به عنوان یک ذره در نظر گرفته می‌شود؛ که این ذرات به منظور یافتن موقعیت‌های بهینه در فضای مسئله در حال جستجو هستند. موقعیت هر ذره در فضای مسئله نشان‌دهنده یک پاسخ بالقوه برای مسئله است. وقتی که یک ذره به موقعیت جدید می‌رود، با استفاده از تابع تناسب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد که یک مقدار کمی از توانایی ذره حاصل می‌شود (Zhao et al., 2014). در خوشه‌بندی PSO هر ذره نماینده برداری از c مرکز خوشه است. موقعیت ذره k ام به صورت زیر در نظر گرفته می‌شود (Manda et al., 2010):

$$X_k = (a_{k1}, a_{k2}, \dots, a_{kc}) \quad (6)$$

که a_{kc} مرکز خوشه k ام برای ذره k ام است. هر یک از مجموعه ذرات با حرکت در سواهای مختلف به صورت تصادفی در فضای مسئله به جستجوی خوشه‌های بهینه می‌پردازند.

به منظور ارزیابی ذرات باید یک تابع تناسب معرفی شود که PSO ضمن بهینه کردن این تابع بهترین موقعیت را برای ذرات بیابد. در هر اجرا در بین همه ذرات، ذره‌ای که دارای بهترین موقعیت است gbest نامیده می‌شود؛ همچنین بهترین موقعیتی که هر ذره در مسیر حرکت خود دارد pbest نام دارد (Chen and Ye, 2004). هر ذره موقعیت جدید خود را تحت تأثیر بهترین موقعیت خود و موقعیت بهترین ذره تغییر می‌دهد که در هر تکرار به صورت زیر تعیین می‌شود (Zhao et al., 2014):

$$V_k^{t+1} = w * V_k^t + c_1 * r_1 * (Pbest_k - X_k^t) + c_2 * r_2 * (Gbest - X_k^t) \quad (7)$$

$$X_k^{t+1} = X_k^t + V_k^{t+1} \quad (8)$$

که V_k^{t+1} سوی حرکت ذره k ام یا به اصلاح سرعت ذره در تکرار بعدی است. مقادیر تصادفی r_1 و r_2 برای اطمینان از اینکه ذرات همه فضای مسئله را جستجو

نمی‌کنند؛ به طوری که پیچیدگی زمانی و محاسباتی محدودی دارند (Tsai et al., 2014). این الگوریتم‌ها برای مسائل بهینه‌سازی چندهدفه بسیار مناسب هستند (Abraham and Jain, 2005). از جمله الگوریتم‌های فراابتکاری، الگوریتم بهینه‌سازی توده ذرات (PSO) است که یکی از روش‌های مناسب برای حل مسائل بهینه‌سازی است که بر پایه قواعد احتمالی و جمعیتی کار می‌کند. بنابراین می‌توان از این الگوریتم برای حل مسئله خوشه‌بندی بهره برد (Zhao et al., 2014).

هدف این مقاله تعیین چشمه‌های لرزه‌ای به همراه تعیین روی داده‌های مربوط به هر چشمه خطی است. به منظور جلوگیری از پاسخ‌های بهینه محلی، از الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات برای حل مسئله چندهدفه خوشه‌بندی فازی استفاده شده است. این الگوریتم روی داده‌های لرزه‌ای شمال باختر ایران اعمال می‌شود. به منظور ارزیابی، نتایج حاصل از الگوریتم با روی داده‌های لرزه‌ای مقایسه می‌شوند که از پیش به گسل‌ها نسبت داده شده‌اند.

در ادامه، روش‌های خوشه‌بندی و بهینه‌سازی معرفی و سپس روش خوشه‌بندی بهینه‌سازی توده ذرات در ادامه این بخش توضیح داده خواهد شد. در بخش بعد روش پیشنهادی ارائه می‌شود و منطقه مورد مطالعه و داده‌های ورودی در بخش بعدی معرفی خواهند شد. روش پیشنهادی روی داده‌های ورودی اعمال و نتایج حاصل از آن در بخش بعدی نشان داده می‌شوند. در پایان نیز نتایج مورد ارزیابی و بحث قرار می‌گیرند.

۲-۲ خوشه‌بندی بهینه

خوشه‌بندی فرایند تخصیص مجموعه داده‌ها به گروه‌های مجزا بر پایه یک سری معیارهاست. هر گروه خوشه نامیده می‌شود و داده‌های موجود در یک خوشه بسیار به هم شبیه و با داده‌های دیگر خوشه‌ها متفاوت هستند (Everitt et al., 2011; Han et al., 2011). پس از اینکه Zadeh (1965) برای اولین بار تئوری فازی را مطرح کرد؛ این تئوری در فرایند خوشه‌بندی نیز به کار برده شد. به این صورت که در حالت فازی هر داده به طور همزمان به همه خوشه‌ها یا کلاس‌ها با درجه عضویت‌های مختلف اختصاص می‌یابد (Ansari et al., 2015). میزان درجه عضویت داده j ام به خوشه i ام با u_{ij} نشان داده می‌شود و از رابطه ۱ به دست می‌آید (Mehdizadeh et al., 2008):

$$u_{ij} = \left[\sum_{k=1}^c \left(\frac{d(x_j, v_i)}{d(x_j, v_k)} \right)^{\frac{1}{M-1}} \right]^{-1} \quad (1)$$

$M > 1$ میزان فازی بودن را کنترل می‌کند و $d(x_j, v_i)$ رابطه میان خوشه i ام (v_i) و داده j ام (x_j) است که می‌تواند فاصله اقلیدسی یا فاصله دیگری مانند فاصله ماهالانویس (Mahalanobis) باشد. هدف بیشتر الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی کمینه کردن تابع هدف رابطه ۲ است.

$$J_m = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^c u_{ij}^M d(x_j, v_i)^2 \quad (2)$$

۲-۱. فاصله ماهالانویس

فاصله ماهالانویس یک فاصله مستقیم شبیه به فاصله اقلیدسی است؛ اما چگالی نقاط موجود در میان فاصله را نیز لحاظ می‌کند. این فاصله از دو جهت با فاصله اقلیدسی متفاوت است. اول اینکه همبستگی میان داده‌ها را نیز در نظر می‌گیرد و دیگر اینکه به مقیاس اندازه‌گیری بستگی ندارد. رابطه مربوط فاصله ماهالانویس به صورت زیر است (Kim et al., 2004):

$$d_{ij}^2 = (x_j - v_i)^T A_i (x_j - v_i) \quad (3)$$

که A_i از ماتریس کوواریانس فازی طبق رابطه‌های ۴ و ۵ به دست می‌آید:

$$F_i = \frac{\sum_{j=1}^n u_{ij}^M (x_j - v_i)(x_j - v_i)^T}{\sum_{j=1}^n u_{ij}^M} \quad (4)$$

- محاسبه ماتریس درجه عضویت U از طریق رابطه (۱).
- محاسبه مقدار تابع هدف J_m با استفاده از رابطه (۲).
- اگر $J_i^{t+1} < J_i^{t+1}$ بود آنگاه $pbest_i$ برابر خواهد بود با $X_i^{(t+1)}$.
- اگر $J_i^{(t+1)} < J_i^{Gbest}$ آنگاه X^{Gbest} برابر خواهد بود با $X_i^{(t+1)}$ و $J_i^{Gbest} = J_i^{(t+1)}$.

پس از پایان همه تکرارها، بهترین پاسخ برابر خواهد بود با $gbest$ و درجه عضویت هر داده به هر خوشه نیز در ماتریس $n \times c U^{Gbest}$ قرار دارد. هر داده به خوشه‌ای تعلق می‌گیرد که بیشترین درجه عضویت به آن خوشه را داشته باشد. X^{Gbest} شامل موقعیت پایانی مراکز خوشه است.

۴- منطقه مورد مطالعه و داده‌های ورودی

منطقه مورد مطالعه، شمال باختر ایران در نظر گرفته شده است. این منطقه در محدوده دایره‌ای با شعاع تقریبی ۳۲۰ کیلومتر از نقطه‌ای با مختصات جغرافیایی $20^{\circ} 46'$ و $42^{\circ} 38'$ درجه به عنوان مرکز آن قرار گرفته و جزو ایالت لرزه‌زمن ساختی باختری و آذربایجان است (شکل ۲). این منطقه به‌ویژه ناحیه مرکزی آن در قرن‌های گذشته زمین‌لرزه‌های بسیاری را تجربه کرده است و جزو مناطق با لرزه‌خیزی بالا به شمار می‌رود که بیشتر زمین‌لرزه‌ها با بزرگی $2/5$ تا 3 در آن رخ می‌دهند. بیشترین ژرفای زمین‌لرزه‌ها ۳۰ کیلومتر است و بیشتر زمین‌لرزه‌های بزرگ در ژرفاهای ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر رخ داده است. خردزمین‌لرزه‌های ثبت شده توسط شبکه‌های لرزه‌نگاری محلی از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۰۷ نشان می‌دهند که نرخ لرزه‌خیزی منطقه بالاست که همخوانی خوبی میان زمین‌لرزه‌ها و گسل‌های اصلی در منطقه وجود دارد.

۴-۱. رویدادهای لرزه‌ای

اطلاعات مربوط به لرزه‌خیزی فلات ایران به دو صورت رویدادهای تاریخی و دستگاهی در دسترس هستند. زمین‌لرزه‌های تاریخی مربوط به دوره زمانی پیش از سال ۱۹۰۰ هستند که توسط پژوهشگرانی چون (Berberian and Ambraseys and Melville, 1976) و همچنین (Ambraseys and Melville, 1982) بر پایه اطلاعات به دست آمده از کتاب‌های تاریخی، سفرنامه‌ها و اسناد پراکنده گزارش شده‌اند. زمین‌لرزه‌های دستگاهی مربوط به پس از سال ۱۹۰۰ هستند که توسط دستگاه‌ها به ثبت رسیده‌اند که مسلماً نسبت به رویدادهای تاریخی دقت بیشتری دارند (Ghodrati Amiri et al., 2008). با این حال رویدادهای دستگاهی نیز می‌توانند دارای خطاهای گوناگونی باشند. در منطقه شمال باختری ایران از دید رویدادهای تاریخی اطلاعاتی غنی وجود دارد؛ زیرا این منطقه زمین‌لرزه‌های مخرب تاریخی بسیاری را تجربه کرده است و این رویدادها به‌طور پیوسته به ثبت رسیده‌اند (Ambraseys and Melville, 1982). رویدادهای لرزه‌ای مورد استفاده در این مقاله، از کاتالوگ (Shahvar et al., 2013) گرفته شده است. این کاتالوگ دارای اطلاعات مربوط به رویدادهای دستگاهی با بزرگای بیشتر از ۴ در بازه زمانی سال ۱۹۰۰ تا ۲۰۱۱ است. این کاتالوگ از ادغام اطلاعات دو کاتالوگ محلی و هفت مؤسسه بین‌المللی حاصل شده است. شکل ۲ رویدادهای موجود در کاتالوگ را برحسب بزرگای نشان می‌دهد.

۴-۲. گسل‌های منطقه

مهم‌ترین گسل این منطقه گسل شمال تبریز است که یکی از ساختارهای خطی ایران به شمار می‌آید که در طول ۱۰۰ کیلومتری از کوه‌های میشو (در باختر) تا بستان‌آباد (در خاور) قابل‌ردیابی است. دیگر گسل‌های مهم این منطقه عبارت‌اند از گسل چالدران، تسوج، سنکوار، نخجوان، دشت مغان، سلماس (در ۹۰ کیلومتری شمال ارومیه قرار دارد). گسل تالش که مرز پوسته اقیانوسی خزر و کوه‌های تالش است؛ از حدود رشت شروع می‌شود و تا ماکو ادامه دارد. گسل بزقوش در جنوب اردبیل قرار گرفته است و روند خاوری-باختری دارد. نقشه مربوط به گسل‌های منطقه در شکل ۲ نشان داده شده است. رویدادهای لرزه‌ای که به برای ارزیابی الگوریتم به کار خواهند رفت از مطالعات (Berberian, 2014) استخراج شده است که تاریخ این رویدادها در جدول ۱ ارائه شده است.

می‌کنند؛ مورد استفاده قرار می‌گیرند. مقادیر ثابت c_1 و c_2 که ضرایب شتاب نامیده می‌شوند؛ میزان تأثیر $pbest$ و $gbest$ را کنترل می‌کنند. وزن اینرسی w نیز کنترل‌کننده میزان تأثیر سرعت اخیر ذره است. الگوریتم PSO پس از انجام تعداد مشخصی تکرار که همان بیشینه تعداد تکرارها (t_{max}) است؛ متوقف می‌شود که این مقدار باید طوری انتخاب شود که مقدار تابع هدف همگرا شود و تغییر چندانی در آن ایجاد نشود (Runkler and Katz, 2006).

۳- روش پیشنهادی

در این نوشتار تعیین چشمه‌های لرزه‌ای و همچنین اختصاص رویدادها به گسل‌ها با استفاده از روش‌های خوشه‌بندی، با دو تابع هدف روبه‌روست که عبارتند از: فاصله رویدادهای لرزه‌ای تا مرکز تجمع آنها (مراکز خوشه‌ها) و همچنین فاصله رویدادها تا گسل‌ها. این دو تابع هدف باید کمینه شوند. از سوی دیگر، در صورتی که ترکیبی از این دو تابع (برای نمونه میانگین آنها) کمینه شود، هر یک از این دو تابع نیز کمینه خواهند شد. بنابراین فاصله میانگین این دو تابع در نظر گرفته می‌شود که با استفاده از آن میزان درجه عضویت رویدادها به هر خوشه و به دنبال آن مقدار تابع J_m در رابطه ۲ به دست می‌آید. با معرفی تابع J_m به‌عنوان تابع تناسب الگوریتم خوشه‌بندی PSO، می‌توان آن را بهینه کرد و در عین حال خوشه‌بندی فازی را برای داده‌ها انجام داد؛ به این روش هم از برتری خوشه‌بندی فازی استفاده می‌شود و هم با استفاده از بهینه‌سازی PSO، بهترین پاسخ به دست می‌آید. شکل ۱ فلوجارت مربوط به الگوریتم پیشنهادی را نشان می‌دهد. در ادامه مراحل الگوریتم پیشنهادی به‌طور خلاصه بیان شده‌اند:

در ابتدا مقادیر مربوط متغیرهای مورد نیاز الگوریتم یعنی وزن اینرسی w ، ضرایب شتاب c_1 ، c_2 و همچنین ضریب فازی M انتخاب و بیشینه تعداد تکرارها (t_{max})، تعداد ذرات (P) و همچنین تعداد خوشه‌ها (C) تعیین می‌شود. (Eberhart and Shi, 2000) پیشنهاد کردند که ضرایب w ، c_1 ، c_2 و M می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$W = \chi, c_1 = \chi\phi_1, c_2 = \chi\phi_2 \quad (9)$$

که ϕ_1 و ϕ_2 دو مقدار ثابت مثبت هستند؛ به طوری که $\phi = \phi_1 + \phi_2 \geq 4$ و χ با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$\chi = \frac{2}{\phi - 2 + \sqrt{\phi^2 - 4\phi}} \quad (10)$$

اگر $\phi_1 = \phi_2 = 2.05$ در نظر گرفته شود؛ آنگاه ضریب χ برابر خواهد بود با 0.7298. با احتساب این مقادیر بیشتر پاسخ‌های حاصل از الگوریتم بهترین مقدار را خواهند داشت (Merkle and Blum, 2008).

بخش‌بندی از راه افزایش مقدار ضریب M ماهیت فازی تری به خود می‌گیرد و تاکنون هیچ تئوری بنیادینی برای تعیین مقدار بهینه M وجود ندارد (George and Bo, 2008). در این مقاله مانند بسیاری از مسائل عملی دیگر مقدار M برابر با ۲ در نظر گرفته می‌شود. تعداد ذرات برابر با ۶۰ ذره و بیشینه تعداد تکرارها، ۱۰۰ تکرار جایی که تابع هدف همگرا می‌شود؛ تعیین شد. از آنجا که هدف تعیین رویدادهای مربوط به هر گسل و معرفی چشمه‌های لرزه‌ای است تعداد خوشه‌ها برابر با تعداد گسل‌های منطقه در نظر گرفته می‌شود.

در مرحله بعد الگوریتم، متغیرهای X ، V و $pbest$ برای هر ذره و متغیر $gbest$ برای توده ذرات مقداردهی اولیه می‌شوند. به طوری که برای هر ذره k ، مقدار اولیه X_k یک ماتریس $c \times 2$ خواهد بود که شامل طول جغرافیایی و عرض جغرافیایی c مرکز خوشه است که به صورت تصادفی در فضای مسئله تعریف می‌شوند. مقدار اولیه V_k یک ماتریس صفر است که اندازه برابر با ماتریس X_k دارد. مقدار اولیه برای $pbest_k$ برابر با ماتریس اولیه X_k است و مقدار اولیه $gbest$ برابر با بینهایت در نظر گرفته می‌شود. سپس در هر تکرار t برای هر ذره k اعمال زیر انجام می‌شوند:

- به‌روزرسانی مقدار سرعت برای تکرار بعد با استفاده از رابطه (۷).
- به‌روزرسانی متغیر X که شامل مراکز خوشه در هر ذره است با استفاده از رابطه (۸).
- محاسبه فاصله هر رویداد تا هر گسل و فاصله آن رویداد تا مرکز هر خوشه و محاسبه میانگین این دو فاصله.

۵- نتایج اجرای الگوریتم پیشنهادی

منطقه مورد مطالعه بیش از سیزده گسل به همراه بیش از ۸۱۰ رویداد لرزه‌ای با $M_w \geq 4$ دارد (شکل ۸). برای جلوگیری از اختصاص اشتباه رویدادها به گسل‌های حاشیه محدود و مورد مطالعه، گسل‌های حاشیه‌ای که در خارج از محدوده مورد مطالعه قرار دارند نیز در نظر گرفته شدند. از آنجایی که معمولاً تجمع شماری از رویدادها در راستای یک خط نشان از وجود یک گسل در آن منطقه دارد (Ouilleon et al., 2008)؛ در این مورد، استفاده از الگوریتم‌های خوشه‌بندی دارای خوشه‌های بیضی شکل در مناطقی که زمین‌لرزه‌ها به خوبی در راستای گسل‌ها قرار گرفته‌اند؛ پیشنهاد می‌شود. در واقع بیضی ساده‌ترین شکل هندسی است که انعطاف کافی برای خوشه‌های خطی شکل و دایره‌ای شکل دارد؛ بنابراین این امکان وجود دارد که خوشه‌های خطی شکل در مناطقی که رویدادها در راستای گسل توزیع شده‌اند و همچنین خوشه‌های مدور در مناطق با لرزه‌خیزی همگن که حاصل سیستم پیچیده گسلی هستند شناسایی شود. به منظور بررسی تأثیر فاصله اقلیدسی و فاصله ماحالانویس بر نتایج، الگوریتم به دو حالت اجرا شد؛ در حالت اول فاصله اقلیدسی رویدادها تا مراکز خوشه و در حالت دوم فاصله ماحالانویس رویدادها تا مراکز خوشه در نظر گرفته شدند. الگوریتم روی داده‌ها در هر دو حالت اعمال شد و رویدادها افزون بر خوشه‌بندی، به گسل‌های مربوط نیز اختصاص داده شدند. شکل‌های ۳ و ۴ شمار زمین‌لرزه‌های نسبت داده شده به هر گسل را به ترتیب با در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی و فاصله ماحالانویس توسط الگوریتم در این منطقه نشان می‌دهند. به منظور نمایش چشمه‌ها، خوشه‌های حاصل از الگوریتم به همراه گسل‌های منطقه در شکل‌های ۵ و ۶ با رنگ‌های مختلف رسم شدند.

۶- ارزیابی و بحث

ماهیت داده‌های لرزه‌ای و حجم بالای داده، پردازش و تصمیم‌گیری در این حوزه را تا اندازه‌ای سخت کرده است. از این رو استفاده از روش‌های هوشمند به عنوان یکی از روش‌های کارآمد، نتایج قابل قبولی در تحلیل‌ها و گرفتن تصمیمات به همراه داشته است. کارایی یک روش و الگوریتم توسط رهیافت‌های ارزیابی کنترل می‌شود. در اینجا دو مرحله ارزیابی خواهیم داشت. اول اینکه خود الگوریتم برای داده‌های واقعی همگرا شده و توابع هزینه به صورت بهینه کمینه شده‌اند. در مرحله بعد نیاز است تا نتایج از دید لرزه‌زمین‌ساختی و با توجه به ماهیت داده‌ها کنترل شود. از این رو باید از داده‌هایی بهره جست که توسط یک فرایند علمی به گسل‌ها نسبت داده شده‌اند. در این مطالعه برای تعیین درستی اجرای الگوریتم یک تابع تناسب به صورت ترکیبی از دو تابع هزینه تعریف شد. این تابع سعی در کاهش فاصله رویدادها از گسل و چگالی لرزه‌خیزی دارد که به صورت دینامیکی در حال تغییر است.

شکل‌های ۷ و ۸ به ترتیب کاهش تابع تناسب را با افزایش تعداد تکرارها برای حالت استفاده از فاصله اقلیدسی و حالت استفاده از فاصله ماحالانویس نشان می‌دهند. در واقع فاصله رویدادها تا گسل و فاصله رویدادها تا مرکز تجمع آنها تا حد امکان کمینه شده است که بیانگر این است که پاسخ‌های بهینه در هر دو حالت حاصل شده‌اند.

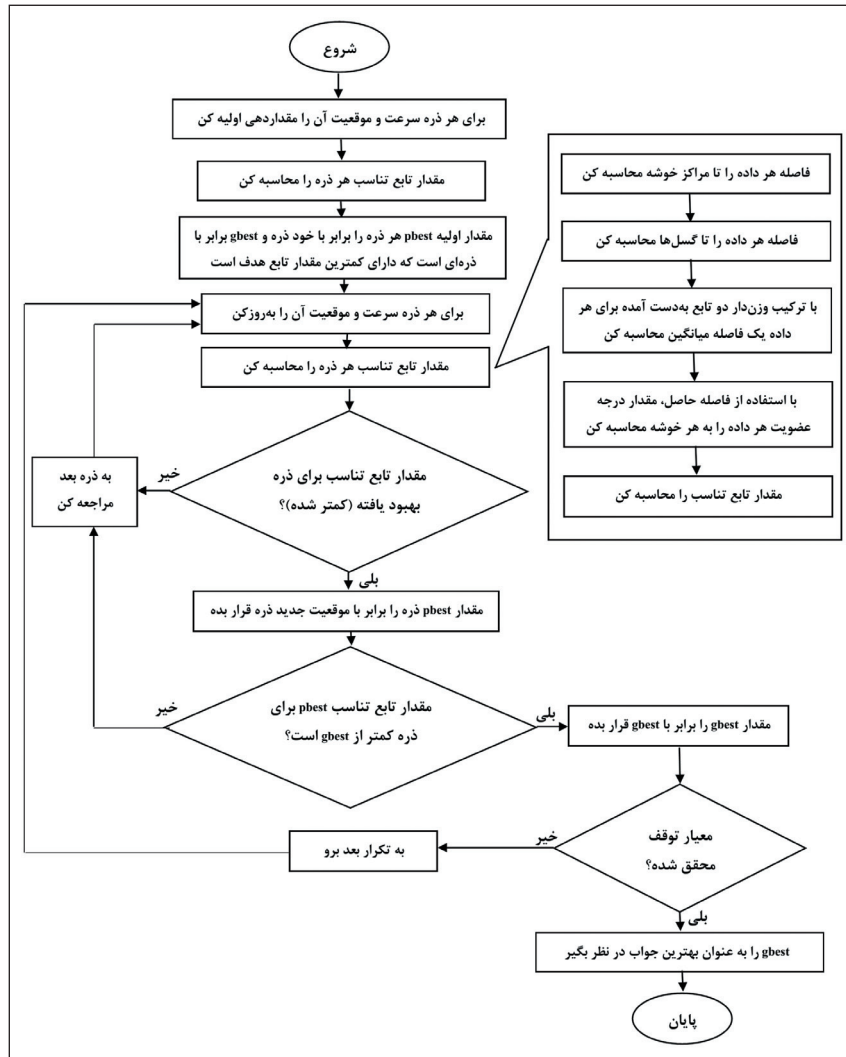
در بخش درستی‌سنجی خروجی الگوریتم از مطالعات (Berberian 2014) استفاده شد. ۲۴ رخداد لرزه‌ای منطقه مورد مطالعه به عنوان رویدادهای ارزیابی در نظر گرفته شدند. این رویدادها به همراه دیگر رویدادهای موجود در کاتالوگ لرزه‌ای برای منطقه شمال باختر ایران به عنوان ورودی به الگوریتم داده شدند و سپس گسل مربوط به هر یک از این رویدادها تعیین شد. رویدادهای نسبت داده شده به هر گسل توسط الگوریتم برای چهار گسل اول که دارای بیشترین درجه عضویت هستند و رویدادهای تعیین شده توسط (Berberian 2014) برای رویدادهای ارزیابی با در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی و فاصله ماحالانویس به ترتیب در جدول‌های ۲ و ۳ فهرست شده‌اند. هر رویداد به گسلی تعلق می‌گیرد که دارای بیشترین درجه عضویت باشد.

مقایسه نتایج الگوریتم با مطالعات (Berberian 2014) نشان می‌دهد که اگر فاصله اقلیدسی در محاسبات در نظر گرفته شود؛ ۷۹/۲ درصد و اگر فاصله ماحالانویس در محاسبات در نظر گرفته شود؛ ۸۷/۵ درصد از رویدادهای ارزیابی منطقه دارای بیشترین درجه عضویت توسط الگوریتم به درستی به گسل‌ها نسبت داده شده‌اند. بدین معنی که در برخی جاها به دلیل پیچیدگی روندهای گسلی امکان نسبت دادن دقیق توسط الگوریتم با خطا همراه است؛ به عنوان نمونه برای گسل‌های موازی با شیب‌های تقریباً یکسان. بنابراین سعی شد تا درجه عضویت‌های بعدی نیز بررسی شود. پس برای رویدادهایی که گسل مسبب آنها به درستی تعیین نشده است؛ دومین گسل که بیشترین درجه عضویت را دارد به عنوان گسل مسبب آن رویداد در نظر گرفته می‌شود. در این حالت با مقایسه نتیجه حاصل با نتایج (Berberian 2014)، ۸۷/۵ درصد از رویدادهای ارزیابی برای فاصله اقلیدسی و ۹۵/۸ درصد برای فاصله ماحالانویس به درستی به گسل‌ها اختصاص می‌یابند. در صورتی که به همین ترتیب روند ادامه یابد؛ برای چهارمین گسل منطقه به ۱۰۰ درصد می‌رسد. جدول ۴ مقادیر درصد اختصاص درست رویدادها را به گسل‌های مطابق با (Berberian 2014) برای چهار گسل اول نشان می‌دهد که دارای بیشترین درجه عضویت هستند.

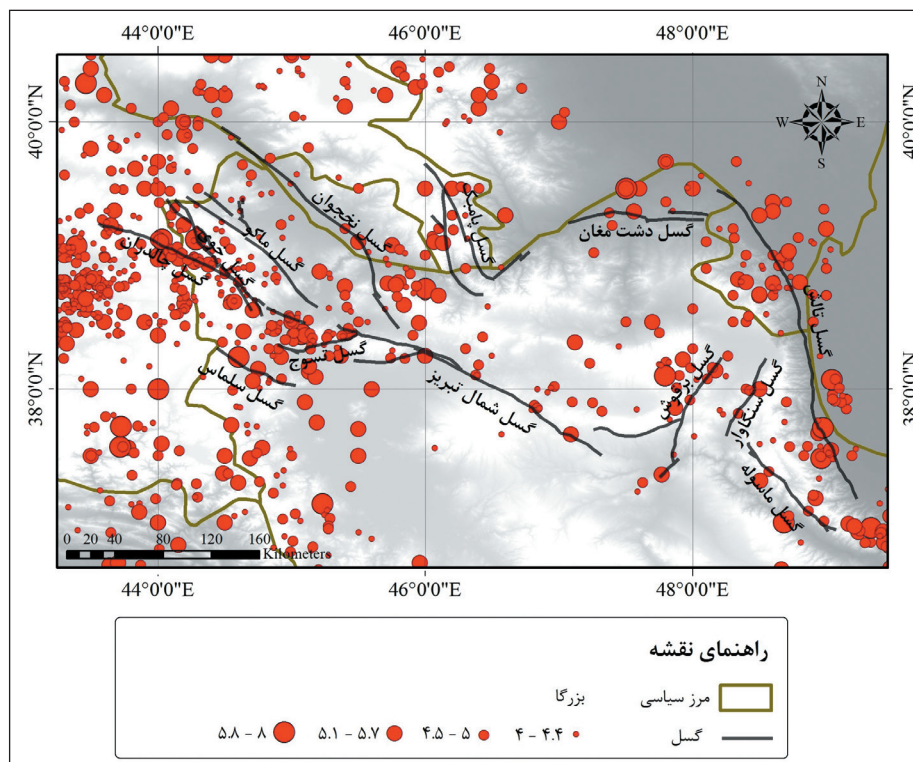
بنابراین عدم قطعیت حاصل از ارزیابی که برای اولین تخصیص به گسل‌ها به دست آمده؛ ممکن است به عدم قطعیت موجود در تعیین موقعیت مراکز زمین‌لرزه‌ها، بزرگای و ژرفای زمین‌لرزه‌ها، همچنین موقعیت، طول گسل‌ها و دوبعدی بودن فرایند مطالعه مربوط باشد. همچنین احتمال اینکه عدم قطعیت در نسبت داده رویدادهای لرزه‌ای به گسل‌ها در مطالعات (Berberian 2014) وجود داشته باشد نیز انکارناپذیر است.

۷- نتیجه‌گیری

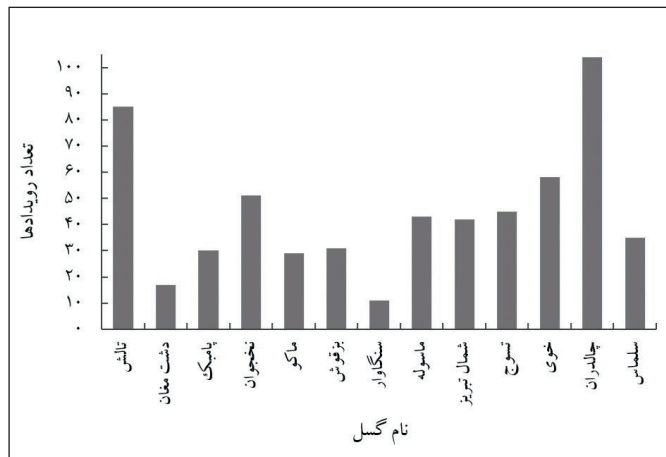
اصولاً تعیین چشمه‌های لرزه‌ای به‌ویژه چشمه‌های خطی و تعیین زمین‌لرزه‌های هر چشمه، یکی از مراحل چالش‌برانگیز در تحلیل خطر زمین‌لرزه به‌ویژه تحلیل خطر احتمالی زمین‌لرزه است. تحلیل و اختصاص حجم بالای داده‌های لرزه‌ای به چشمه‌های خطی کاری دشوار و همراه با عدم قطعیت‌های بسیار است. از این رو استفاده از روش‌های هوشمند با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های الگوریتم، بسیار کارآمد و تأثیرگذار است. نکته قابل توجه در کاربرد روش‌های هوشمند در تمایز داده‌های لرزه‌ای، نزدیک شدن نتایج و خروجی مطالعات گوناگون در یک محدوده یکسان است. بنابراین عدم قطعیت‌های ناشی از قضاوت‌های کارشناسی به مراتب کاهش خواهد یافت. خوشه‌بندی به عنوان یک روش داده کاوی، ابزار مناسبی برای دست‌یابی به تصمیمات بهتر است. از این رو در مطالعه حاضر، الگوریتم فازی PSO برای خوشه‌بندی و اختصاص زمین‌لرزه‌ها به گسل‌ها از راه کمینه کردن دو تابع هدف، مورد استفاده قرار گرفت. این الگوریتم بر روی داده‌های منطقه شمال باختری ایران اعمال شد؛ در اجرای الگوریتم یک‌بار فاصله اقلیدسی و بار دیگر فاصله ماحالانویس در محاسبات در نظر گرفته شد. وقتی که نتایج الگوریتم با رویدادهای از پیش معلوم مقایسه شود؛ در صورت استفاده از فاصله اقلیدسی ۷۹/۲ درصد از رویدادها و در صورت استفاده از فاصله ماحالانویس ۸۷/۵ درصد از رویدادها به درستی به گسل‌ها اختصاص می‌یابند که درصد بهتر برای فاصله ماحالانویس نشان‌دهنده این است که فاصله ماحالانویس کارایی بهتری نسبت به فاصله اقلیدسی برای داده‌های لرزه‌ای دارد. بنابراین استفاده از الگوریتم فازی PSO سبب دست‌یابی به نتایج یکنواخت در فرایند تعیین چشمه‌های لرزه‌ای می‌شود. در پایان می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از الگوریتم حاضر کمک شایانی به کاهش عدم قطعیت قضاوت کارشناسی و در نتیجه کاهش عدم قطعیت در تحلیل خطر خواهد داشت. بنابراین می‌توان با اجرای این الگوریتم اختلاف نظرات کارشناسی را به کمترین مقدار رساند که خود به نتایج نزدیک‌تر در چند مطالعه تحلیل خطر زمین‌لرزه برای یک نقطه مشخص می‌انجامد.



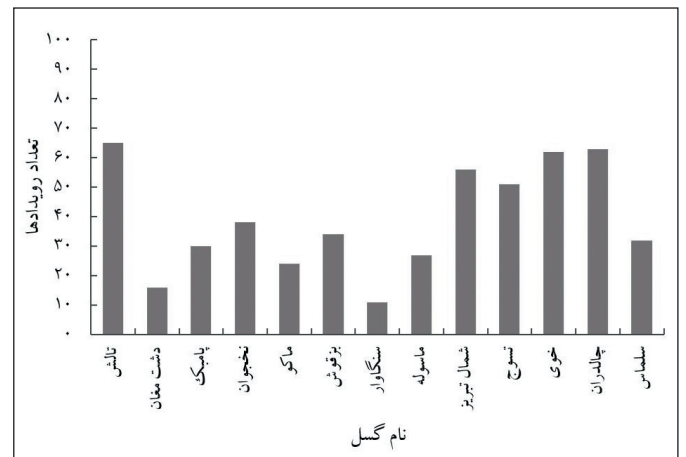
شکل ۱- فلوچارت روش پیشنهادی.



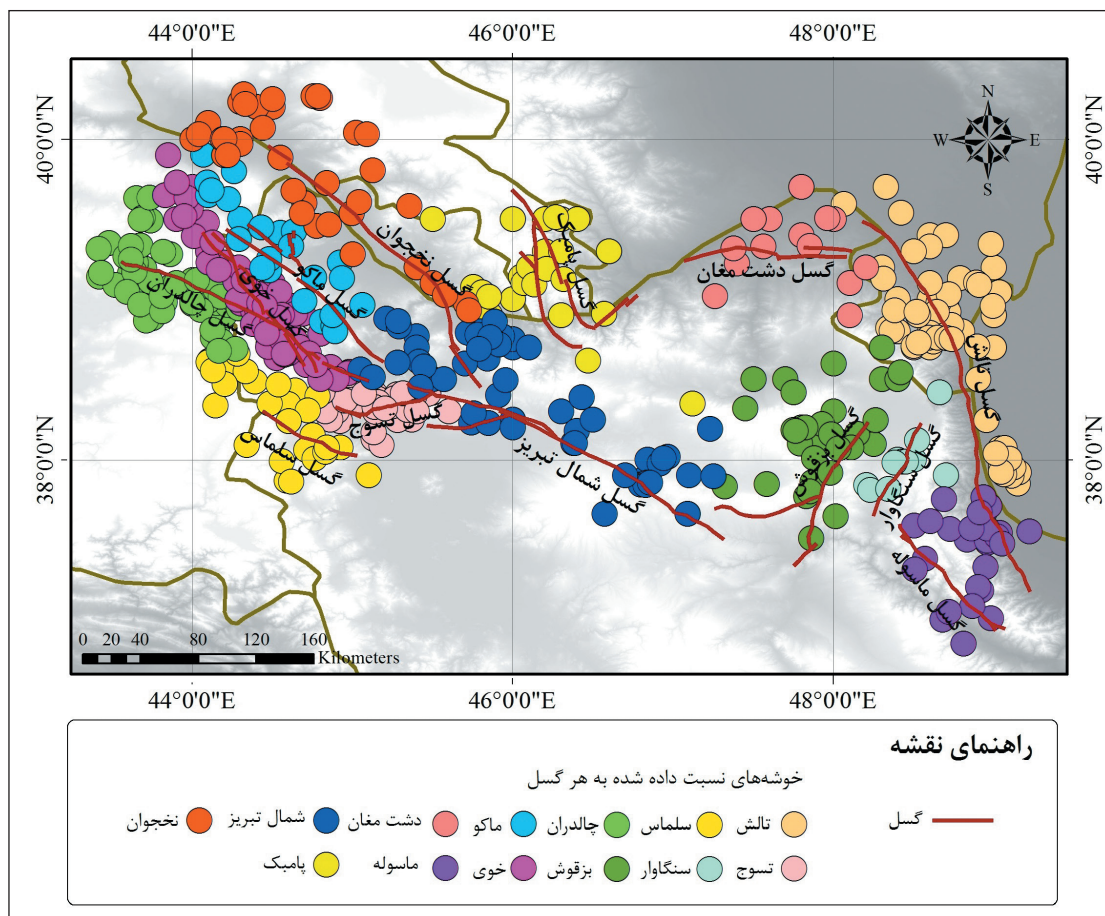
شکل ۲- نقشه گسل‌های منطقه به همراه توزیع زمین‌لرزه‌ها برحسب بزرگای.



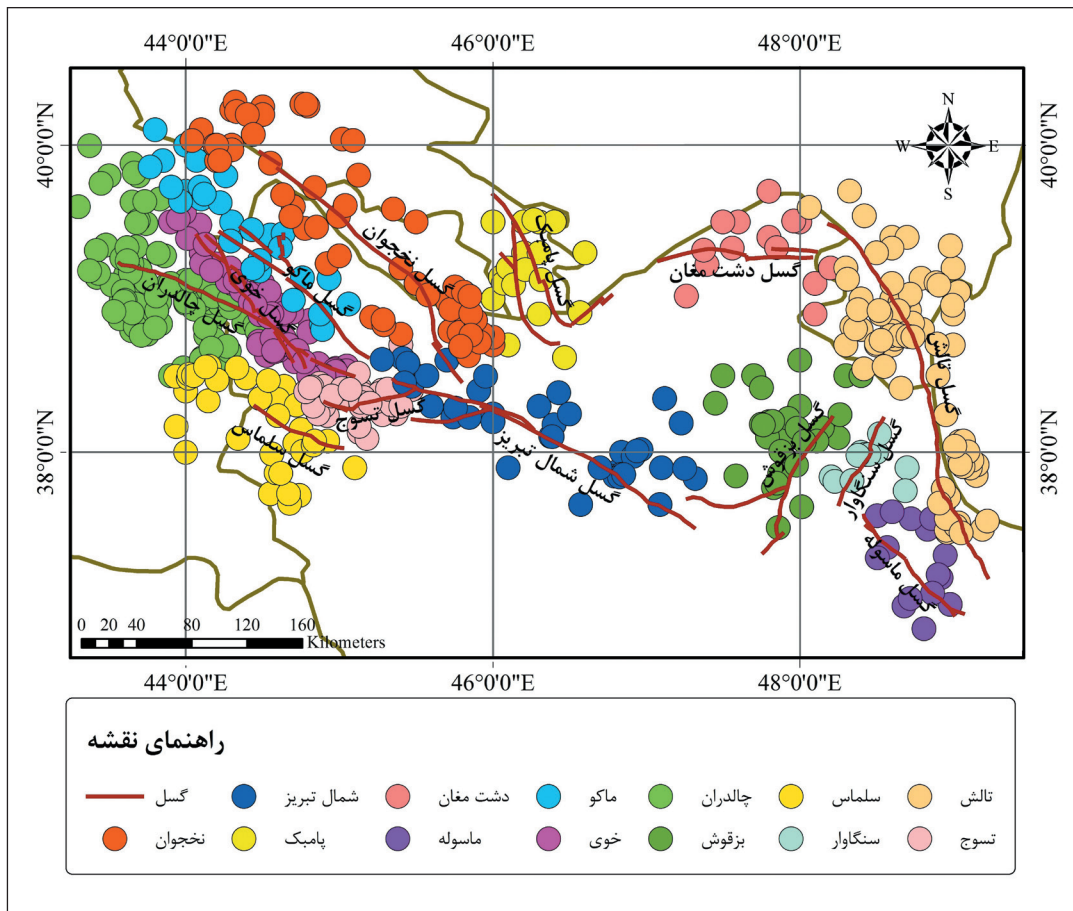
شکل ۴- تعداد زمین‌لرزه‌های نسبت داده شده به هر گسل توسط الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن فاصله ماهالانویسی.



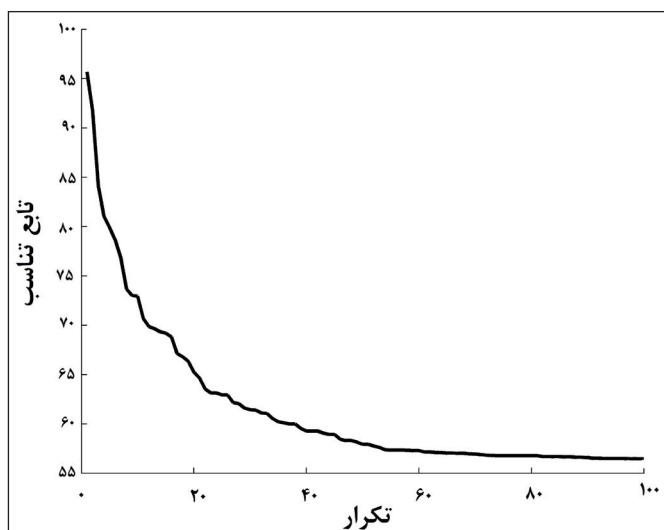
شکل ۳- تعداد زمین‌لرزه‌های نسبت داده شده به هر گسل توسط الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی.



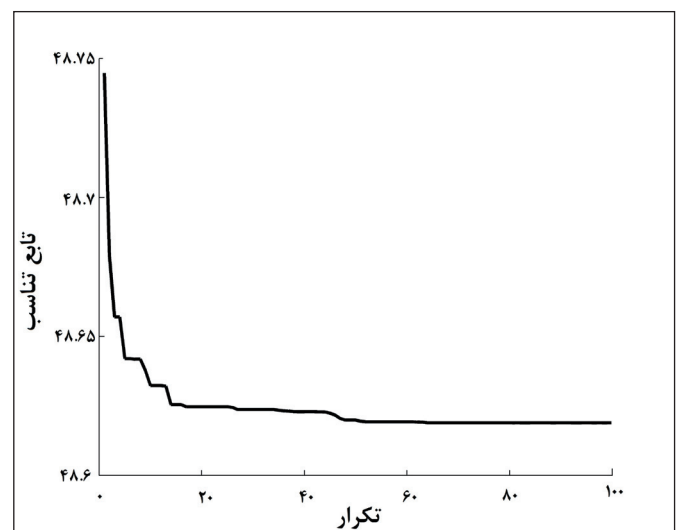
شکل ۵- چشمه‌های لرزه‌ای و رویدادهای نسبت داده شده به هر گسل توسط الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی.



شکل ۶- چشمه‌های لرزه‌ای و رویدادهای نسبت داده شده به هر گسل توسط الگوریتم پیشنهادی با در نظر گرفتن فاصله مایلانویس.



شکل ۸- کاهش تایع تناسب با افزایش تعداد تکرارها در فرایند اجرای الگوریتم با در نظر گرفتن فاصله مایلانویس.



شکل ۷- کاهش تایع تناسب با افزایش تعداد تکرارها در فرایند اجرای الگوریتم با در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی.

جدول ۱- رویدادهای نسبت داده شده به گسلی محدوده مورد مطالعه توسط (Berberian, 2014).

نام گسل	تالش	بزقوش	سنگاوار	شمال تبریز	تسوج	خوی	چالدران	سلماس
تاریخ رویدادهای نسبت داده شده به گسل	۱۹۱۳/۴/۱۶	۱۸۷۹/۳/۲۲	۱۸۶۳/۱۲/۳۰	۱۶۴۱/۲/۵	۱۸۰۷/۷/۱۱	۱۸۴۰/۷/۲	۱۶۹۶/۴/۱۴	۱۹۳۰/۵/۶
	۱۹۷۸/۱۱/۴		۱۸۹۶/۱/۴	۱۷۲۱/۴/۲۶	۱۸۰۸/۶	۱۸۴۳/۴/۱۸	۱۹۷۶/۱۱/۲۴	۱۹۳۰/۵/۸
	۱۹۸۰/۵/۴			۱۷۸۰/۱/۸	۱۸۵۷/۹/۶	۱۹۰۰/۲/۲۴	۱۹۸۸/۴/۲۰	
	۱۹۹۸/۷/۹			۱۷۸۶/۱۰		۱۹۷۰/۳/۱۴		
				۱۹۶۵/۲/۱۰				

جدول ۲- رویدادهای نسبت داده شده به هر گسل توسط الگوریتم با در نظر گرفتن فاصله اقلیدسی برای چهار گسل اول که دارای بیشترین درجه عضویت هستند و رویدادهای نسبت داده شده توسط (Berberian, 2014).

Berberian	درجه عضویت حاصل از الگوریتم								
	گسل چهارم		گسل سوم		گسل دوم		گسل اول		
	نام	درجه	نام	درجه	نام	درجه	نام	درجه	
تالش	سنگاوار	۰/۰۶۶	بزقوش	۰/۰۷	دشت مغان	۰/۱۵	تالش	۰/۰۶	۱۹۱۳/۴/۱۶
تالش	بزقوش	۰/۰۹	تالش	۰/۱۶	سنگاوار	۰/۲۱	ماسوله	۰/۳۷	۱۹۷۸/۱۱/۴
تالش	بزقوش	۰/۱۱	ماسوله	۰/۱۴	سنگاوار	۰/۲۵	تالش	۰/۳۴	۱۹۸۰/۵/۴
تالش	دشت مغان	۰/۱۰	بزقوش	۰/۱۸	سنگاوار	۰/۱۹	تالش	۰/۳۹	۱۹۹۸/۷/۹
بزقوش	شمال تبریز	۰/۰۳	ماسوله	۰/۰۹	سنگاوار	۰/۱۲	بزقوش	۰/۶۰	۱۸۷۹/۳/۲۲
سنگاوار	تالش	۰/۰۰۲	ماسوله	۰/۰۰۳	بزقوش	۰/۰۰۸	سنگاوار	۰/۹۸	۱۸۶۳/۱۲/۳۰
سنگاوار	تالش	۰/۰۱	ماسوله	۰/۰۵	بزقوش	۰/۰۹	سنگاوار	۰/۸۳	۱۸۹۶/۱/۴
شمال تبریز	سلماس	۰/۰۱۹	پامبک	۰/۰۲	تسوج	۰/۰۵	شمال تبریز	۰/۴۵	۱۶۴۱/۲/۵
شمال تبریز	بزقوش	۰/۰۳	تسوج	۰/۰۴	پامبک	۰/۰۶	شمال تبریز	۰/۴۲	۱۷۲۱/۴/۲۶
شمال تبریز	پامبک	۰/۰۲	نخجوان	۰/۰۳	تسوج	۰/۰۹	شمال تبریز	۰/۶۰	۱۷۸۰/۱/۸
شمال تبریز	نخجوان	۰/۰۱۶	سلماس	۰/۰۲	شمال تبریز	۰/۳۰	تسوج	۰/۵۶	۱۷۸۶/۱۰
شمال تبریز	ماسوله	۰/۰۴	سنگاوار	۰/۰۵	بزقوش	۰/۰۹	شمال تبریز	۰/۳۰	۱۹۶۵/۲/۱۰
تسوج	سلماس	۰/۰۲۹	خوی	۰/۰۳	شمال تبریز	۰/۰۸	تسوج	۰/۷۹	۱۸۰۷/۷/۱۱
تسوج	شمال تبریز	۰/۱۲	سلماس	۰/۱۳	تسوج	۰/۲۴	خوی	۰/۲۵	۱۸۰۸/۶
تسوج	خوی	۰/۰۱	سلماس	۰/۰۲	شمال تبریز	۰/۱۲	تسوج	۰/۷۸	۱۸۵۷/۹/۶
خوی	نخجوان	۰/۰۵	ماکو	۰/۱۹	چالدران	۰/۲۰	خوی	۰/۴۲	۱۸۴۰/۷/۲
خوی	ماکو	۰/۰۹	سلماس	۰/۱۹۹	تسوج	۰/۲۱	خوی	۰/۲۲	۱۸۴۳/۴/۱۸
خوی	شمال تبریز	۰/۰۸	خوی	۰/۱۵	سلماس	۰/۲۶	تسوج	۰/۲۸	۱۹۰۰/۲/۲۴
خوی	ماکو	۰/۱۲	تسوج	۰/۱۴	سلماس	۰/۱۵	خوی	۰/۳۲	۱۹۷۰/۳/۱۴
چالدران	سلماس	۰/۰۰۷	ماکو	۰/۰۲	خوی	۰/۰۷	چالدران	۰/۸۸	۱۶۹۶/۴/۱۴
چالدران	سلماس	۰/۰۱	ماکو	۰/۰۵	خوی	۰/۲۶	چالدران	۰/۶۲	۱۹۷۶/۱۱/۲۴
چالدران	سلماس	۰/۰۳	ماکو	۰/۰۵	خوی	۰/۱۸	چالدران	۰/۶۴	۱۹۸۸/۴/۲۰
سلماس	چالدران	۰/۰۰۶	خوی	۰/۰۱	تسوج	۰/۰۲	سلماس	۰/۹۴	۱۹۳۰/۵/۶
سلماس	سلماس	۰/۰۷	خوی	۰/۱۴	شمال تبریز	۰/۱۶	تسوج	۰/۵۰	۱۹۳۰/۵/۸

جدول ۳- رویدادهای نسبت داده شده به هر گسل توسط الگوریتم با در نظر گرفتن فاصله ماحالانویس برای چهار گسل اول که دارای بیشترین درجه عضویت هستند و رویدادهای نسبت داده شده توسط (Berberian, 2014).

Berberian	درجه عضویت حاصل از الگوریتم								تاریخ رویداد
	گسل چهارم		گسل سوم		گسل دوم		گسل اول		
	درجه	نام	درجه	نام	درجه	نام	درجه	نام	
تالش	۰/۰۴	سنگاوار	۰/۰۵	بزقوش	۰/۱۴	دشت مغان	۰/۵۸	تالش	۱۹۱۳/۴/۱۶
تالش	۰/۰۸	بزقوش	۰/۱۵	سنگاوار	۰/۱۶	ماسوله	۰/۳۴	تالش	۱۹۷۸/۱۱/۴
تالش	۰/۰۶	ماسوله	۰/۰۷	بزقوش	۰/۱۰	سنگاوار	۰/۵۶	تالش	۱۹۸۰/۵/۴
تالش	۰/۰۶	سنگاوار	۰/۰۷	دشت مغان	۰/۰۸	بزقوش	۰/۶	تالش	۱۹۹۸/۷/۹
بزقوش	۰/۰۷	شمال تبریز	۰/۰۸	ماسوله	۰/۱۰	سنگاوار	۰/۴۳	بزقوش	۱۸۷۹/۳/۲۲
سنگاوار	۰/۰۷	ماسوله	۰/۱۳	تالش	۰/۱۶	بزقوش	۰/۴۴	سنگاوار	۱۸۶۳/۱۲/۳۰
سنگاوار	۰/۰۶	تالش	۰/۰۸	ماسوله	۰/۱۷	بزقوش	۰/۵	سنگاوار	۱۸۹۶/۱/۴
شمال تبریز	۰/۰۴	سلماس	۰/۰۴	نخجوان	۰/۰۶	تسوج	۰/۳	شمال تبریز	۱۶۴۱/۲/۵
شمال تبریز	۰/۰۳۴	تسوج	۰/۰۳۹	پامبک	۰/۰۴	بزقوش	۰/۵۲	شمال تبریز	۱۷۲۱/۴/۲۶
شمال تبریز	۰/۰۱	پامبک	۰/۰۲	نخجوان	۰/۰۳	تسوج	۰/۸	شمال تبریز	۱۷۸۰/۱/۸
شمال تبریز	۰/۰۳	سلماس	۰/۰۴	خوی	۰/۱۹	تسوج	۰/۴۶	شمال تبریز	۱۷۸۶/۱۰
شمال تبریز	۰/۰۴	سنگاوار	۰/۰۴۴	ماسوله	۰/۰۸	بزقوش	۰/۴۰	شمال تبریز	۱۹۶۵/۲/۱۰
تسوج	۰/۰۳	سلماس	۰/۰۵۲	شمال تبریز	۰/۰۵۳	خوی	۰/۷۴	تسوج	۱۸۰۷/۷/۱۱
تسوج	۰/۰۸	ماکو	۰/۰۹	سلماس	۰/۲۰	تسوج	۰/۳۲	خوی	۱۸۰۸/۶
تسوج	۰/۰۵	سلماس	۰/۰۷	خوی	۰/۲	شمال تبریز	۰/۴۰	تسوج	۱۸۵۷/۹/۶
خوی	۰/۰۸	نخجوان	۰/۱۷	چالدران	۰/۱۸	ماکو	۰/۲۲	خوی	۱۸۴۰/۷/۲
خوی	۰/۰۸	چالدران	۰/۱۲	سلماس	۰/۱۹	تسوج	۰/۲۶	خوی	۱۸۴۳/۴/۱۸
خوی	۰/۰۷	چالدران	۰/۱۴	سلماس	۰/۱۹	خوی	۰/۲۸	تسوج	۱۹۰۰/۲/۲۴
خوی	۰/۰۸	سلماس	۰/۰۹	چالدران	۰/۱۲	تسوج	۰/۳۷	خوی	۱۹۷۰/۳/۱۴
چالدران	۰/۰۲	سلماس	۰/۰۳	ماکو	۰/۰۶	خوی	۰/۷۸	چالدران	۱۶۹۶/۴/۱۴
چالدران	۰/۰۳	سلماس	۰/۰۶	ماکو	۰/۱۴	خوی	۰/۶۲	چالدران	۱۹۷۶/۱۱/۲۴
چالدران	۰/۰۵	سلماس	۰/۰۷	ماکو	۰/۱۳	خوی	۰/۵۳	چالدران	۱۹۸۸/۴/۲۰
سلماس	۰/۰۳	چالدران	۰/۰۵	خوی	۰/۰۸	تسوج	۰/۷	سلماس	۱۹۳۰/۵/۶
سلماس	۰/۰۶	شمال تبریز	۰/۰۹	سلماس	۰/۲	خوی	۰/۳۸	تسوج	۱۹۳۰/۵/۸

جدول ۴- درصد اختصاص صحیح رویدادها را به گسل‌های مطابق با (Berberian, 2014) برای چهار گسل اول.

درصد رویدادهای درست نسبت داده شده			
چهارمین گسل	سومین گسل	دومین گسل	اولین گسل
%۱۰۰	%۹۵/۸	%۸۷/۵	%۷۹/۲
%۱۰۰	%۱۰۰	%۹۵/۸	%۸۷/۵

References

- Abraham, A. and L. Jain, L., 2005- Evolutionary Multiobjective Optimization, Springer London, p1-6.
- Ambraseys, N. and Melville, C., 1982- A History of Persian Earthquakes Cambridge Univ, Press, New York.
- Ansari, A., Firuzi, E. and Etemadsaeed, L., 2015- Delineation of Seismic Sources in Probabilistic Seismic-Hazard Analysis Using Fuzzy Cluster Analysis and Monte Carlo Simulation, Bulletin of the Seismological Society of America 2191-2174, V. 4, p. 105.
- Berberian, M., 2014- Earthquakes and coseismic surface faulting on the Iranian Plateau a historical, social and physical approach, Elsevier.
- Berberian, M., 1976- Seismotectonic map of Iran, Geological Survey.
- Bianchi, L., Dorigo, M., Gambardella, L. and Gutjahr, W., 2009- A survey on metaheuristics for stochastic combinatorial optimization, V. 8(2), p. 239-287.
- Binu, D., 2015- Cluster analysis using optimization algorithms with newly designed objective functions, Expert Systems with Applications, V. 42(14), p. 5848-5859.
- Blum, C. and Roli, A., 2003- Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison, ACM Comput, Surv, V. 35(3), p. 268-308.
- Burton, P. and Hall, T., 2014- Segmentation of the Sumatran fault, Geophysical Research Letters, V. 41(12), p. 4149-4158.
- Burton, P., Weatherill, G., Karnawati, D. and Pramumijoyo, S., 2008- Seismic hazard assessment and zoning in Java: new and alternative probabilistic assessment models, International Conference on Earthquake Engineering and Disaster Mitigation, Jakarta.

- Chen, C. and Ye, F., 2004- Particle swarm optimization algorithm and its application to clustering analysis, Networking, Sensing and Control, IEEE International Conference on .
- Committee, S. and Budnitz, R., 1997- Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: guidance on uncertainty and use of experts, US Nuclear Regulatory Commission Washington, DC.
- Coppersmith, K., Youngs, R. and Sprecher, C., 2009- Methodology and main results of seismic source characterization for the PEGASOS Project, Switzerland, Swiss Journal of Geosciences, V. 102(1), p. 91-105.
- Cornell, C., 1968- Engineering seismic risk analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, V. 8(5), p.1583-1606.
- Das, S., Abraham, A. and Konar, A., 2009- Metaheuristic Pattern Clustering – An Overview, Metaheuristic Clustering, Springer Berlin Heidelberg, V. 178, p. 1-62.
- Eberhart, R. and Kennedy, J., 1995- A new optimizer using particle swarm theory, Proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science, V. 1, p. 39-43.
- Eberhart, R. and Shi, Y., 2000- Comparing inertia weights and constriction factors in particle swarm optimization, Evolutionary Computation, Proceedings of the 2000 Congress on.
- Everitt, B., Landau, S., Leese, M. and Stahl, D., 2011- Optimization Clustering Techniques, Cluster Analysis, John Wiley and Sons, p. 111-142.
- Garey, M. and Johnson, D., 1979- Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness, San Francisco, LA, Freeman.
- George, J. K. and Bo, Y., 2008- Fuzzy sets and fuzzy logic, theory and applications.
- Ghodrati Amiri, G., Razeghi, H., Razavian Amrei, S., Aalae, H. and Rasouli, S., 2008- Seismic hazard assessment of Shiraz, Iran, Journal of Applied Sciences, V. 8, p. 38-48.
- Grekousis, G. and Thomas, H., 2012- Comparison of two fuzzy algorithms in geodemographic segmentation analysis: The Fuzzy C-Means and Gustafson–Kessel methods, Applied Geography, V. 34, p. 125-136.
- Han, J., Kamber, M. and Pei, J., 2011- Data mining: concepts and techniques: concepts and techniques, Elsevier.
- Kim, Y., Kim, D., Lee, D. and Lee, K., 2004- A cluster validation index for GK cluster analysis based on relative degree of sharing, Information Sciences, V. 168, p. 225-242.
- MacQueen, J., 1967- Some methods for classification and analysis of multivariate observations, Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability, V. 1(14), p. 281-297.
- Manda, K., Hanuman, A., Satapathy, S., Chaganti, V. and Babu, A., 2010- A Software Tool for Data Clustering Using Particle Swarm Optimization, Swarm, Evolutionary, and Memetic Computing, Springer Berlin Heidelberg, V. 6466, p. 278-285.
- Manikandan, P. and Selvarajan, S., 2014- Data Clustering Using Cuckoo Search Algorithm (CSA), Proceedings of the Second International Conference on Soft Computing for Problem Solving (SocProS 2012), December 28-30, 2012, Springer, p. 1275-1283.
- Maulik, U., Bandyopadhyay, S. and Mukhopadhyay, A., 2011- Multiobjective Genetic Algorithms for Clustering: Applications in Data Mining and Bioinformatics, Springer Science and Business Media.
- McGuire, R., 2004- Seismic hazard and risk analysis, Earthquake engineering research institute.
- Mehdizadeh, E., Sadi-Nezhad, S. and Tavakkoli-Moghaddam, R., 2008- Optimization of fuzzy clustering criteria by a hybrid PSO and fuzzy c-means clustering algorithm, Iranian Journal of Fuzzy Systems, V. 5(3), p. 1-14.
- Merkle, D. and Blum, C., 2008- Swarm Intelligence: Introduction and Application, Springer Verlag GmbH.
- Mirzaei, N., Gao, M. and Chen, Y., 1999- Delineation of potential seismic sources for seismic zoning of Iran, Journal of Seismology, V. 3(1), p. 17-30.
- Mirzaei, N., Mengtan, G. and Yuntai, C., 1998- Seismic source regionalization for seismic zoning of Iran: major seismotectonic provinces, Journal of Earthquake Prediction Research, V. 7, p.465-495.
- Musson, R., 2004- Objective validation of seismic hazard source models, 13th World Conference on Earthquake Engineering 2492.
- Ouillon, G., Ducorbier, C. and Sornette, D., 2008- Automatic reconstruction of fault networks from seismicity catalogs: Three-dimensional optimal anisotropic dynamic clustering, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, V. 113(B1).
- Ouillon, G. and Sornette, D., 2011- Segmentation of fault networks determined from spatial clustering of earthquakes, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, V. 116(B2).
- Runkler, T. and Katz, C., 2006- Fuzzy Clustering by Particle Swarm Optimization, Fuzzy Systems, IEEE International Conference on.
- Shahvar, M., Zare, M. and Castellaro, S., 2013- A Unified Seismic Catalog for the Iranian Plateau (1900–2011), Seismological Research Letters, V. 84(2), p. 233-249.
- Spada, M., Wiemer, S. and Kissling, E., 2011- Quantifying a Potential Bias in Probabilistic Seismic Hazard Assessment: Seismotectonic Zonation with Fractal Properties, Bulletin of the Seismological Society of America, V. 101(6), p. 2694-2711.
- Tsai, C., Huang, W. and Chiang, M., 2014- Recent Development of Metaheuristics for Clustering, Mobile, Ubiquitous, and Intelligent Computing. Springer Berlin Heidelberg, V. 274, p. 629-636.
- Wang, Y., Ouillon, G., Woessner, J., Sornette, D. and Husen, S., 2013- Automatic reconstruction of fault networks from seismicity catalogs including location uncertainty, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, V. 118(11), p. 5956-5975.
- Weatherill, G. and Burton, P., 2009- Delineation of shallow seismic source zones using K-means cluster analysis, with application to the Aegean region, Geophysical Journal International, V. 176(2), p. 565-588.
- Welch, W., 1982- Algorithmic complexity: three NP- hard problems in computational statistics, Journal of Statistical Computation and Simulation, V. 15(1), p. 17-25.
- Woo, G., 1996- Kernel estimation methods for seismic hazard area source modeling, Bulletin of the Seismological Society of America, V. 86(2), p. 353-362.
- Zadeh, L., 1965- Fuzzy sets, Information and Control, Elsevier, V. 8(3), p. 338-353.
- Zhao, M., Tang, H., Guo, J. and Sun, Y., 2014- Data Clustering Using Particle Swarm Optimization, Future Information Technology, Springer Berlin Heidelberg, V. 309, p. 607-612.
- Zhongbin, O., Jing, H. and Keliang, Z., 2008- Data Mining for Seismic Exploration, Web Intelligence and Intelligent Agent Technology.

Delineation of seismic sources using an optimized fuzzy clustering

R. Ghasemi Nejad¹, R. A. Abbaspour^{2*} and M. Mojarab³

¹M.Sc. Student, School of Surveying and Geospatial Information Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

²Assistant Professor, School of Surveying and Geospatial Information Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

³Researcher, Geo-engineering laboratory, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2016 October 16

Accepted: 2017 February 12

Abstract

Seismic source zones have an important role in hazard assessment in probabilistic seismic hazard analysis. These zones are often determined according to judgments by the experts and in most cases, seismic source delineations by several experts across a specific region typically leads to non-uniform and controversial results. Thus, most of the uncertainty in probabilistic seismic hazard analysis can be related to the delineation of seismic sources. Another problem of probabilistic seismic hazard analysis is the way earthquakes are visually taken by experts to relate with the seismic sources. Even though it is well known that earthquakes happen on faults, the causative fault of a given earthquake is not precisely constrained, so that makes unconstrained the realization and assessment of seismic risks by experts. This paper attempts to determine seismic sources and associate events to faults using a fuzzy particle swarm optimization clustering algorithm. The algorithm works based on the minimization of two objective functions: distance of events from fault, and distance of events from their center of density (i.e. cluster center). The algorithm is applied by two approaches to the seismic data acquired from northwest of Iran; the distance was Euclidean in the first approach and Mahalanobis in the second one. In order to test reliability of the algorithm, its performance was evaluated based on the events assigned to the faults by previous researchers. Comparing associated earthquakes to faults by the algorithm in northwest of Iran with known and documented earthquakes revealed that 79.2% of the events are correctly induced by faults considering the Euclidean distance approach. In the case of using Mahalanobis distance, 87.5% of the events were properly reproduced, implying its higher efficiency. Final results show that this methodology will help seismological engineers take a step forward in hazard analysis by determining seismic sources and assigning earthquakes to different active faults.

Keywords: Fuzzy Clustering, Particle Swarm Optimization (PSO), Probabilistic Seismic Hazard Analysis (PSHA), Seismic Sources.

For Persian Version see pages 61 to 70

*Corresponding author: R. A. Abbaspour; E-mail: abaspour@ut.ac.ir