

خوشه‌بندی فازی روابط کاهندگی در تحلیل خطر لرزه‌ی برای نواحی لرزه‌خیز ایران

زهرا مینایی (دانشجوی کارشناسی ارشد)

علیرضا آذربخت* (استادیار)

دانشکده‌ی فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه اراک

مهندسی عمران شریف، زمستان ۱۳۹۳ (۹۰-۲۹)
دوری ۲ - ۳۰، شماره‌ی ۴/۲، ص. ۹۰-۲۹

با توجه به تأثیر چشم‌گیر روابط کاهندگی در ارزیابی خطرپذیری لرزه‌ی، سازمان‌دهی روابط کاهندگی به گروه‌های مشابه می‌تواند به دریافت اطلاعات ضمنی ناشناخته در میان روابط مختلف منجر شود. به همین منظور در این مطالعه رویکرد خوشه‌بندی فازی^۱ به منزله‌ی روشی کارآمد در زمینه‌ی گروه‌بندی طیف وسیعی از داده‌ها مورد توجه قرار گرفته است. با انتخاب روش خوشه‌بندی فازی C-mean و اصلاح الگوریتم براساس ویژگی‌های روابط کاهندگی، مجموعه‌ی شامل ۴۵ رابطه‌ی منتخب در سراسر جهان به گروه‌های مشابه افزاز شده است. با دراختیار داشتن چنین طبقه‌بندی و با لحاظ کردن شرایط خاص منطقه‌ی مورد مطالعه، می‌توان به مناسب‌ترین مجموعه‌ی روابط در منطقه‌ی مورد نظر دست یافت. این امر در مورد فلات ایران از طریق انطباق مجموعه‌ی داده‌های لرزه‌ی این منطقه بر زیرمجموعه‌های حاصل از خوشه‌بندی مورد بررسی قرار گرفته و بر این اساس روابط تا کاشی (۲۰۰۴) در رخداد‌های پوسته‌ی،^[۱] ژائو (۲۰۰۶) در رخداد‌های پوسته‌ی و داخل صفحه‌ی،^[۲] و زعفرانی (۲۰۰۸ و ۲۰۱۲)^[۳] با مناسب‌ترین انطباق معرفی شده‌اند.

واژگان کلیدی: ارزیابی خطرپذیری لرزه‌ی، روابط کاهندگی، خوشه‌بندی فازی، الگوریتم خوشه‌بندی فازی C-mean، سوابق لرزه‌ی فلات ایران.

۱. مقدمه

در طی سال‌های گذشته تخمین جنبش‌های نیرومند زمین، با استفاده از روابط کاهندگی (GMPEs)^۲ به منزله‌ی یکی از مهم‌ترین و تأثیرگذارترین مباحث در ارزیابی خطرپذیری لرزه‌ی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران واقع شده است. روابط مذکور با گسترش سوابق لرزه‌ی به صورت مداوم بازبینی شده و بدین طریق مدل‌های ریاضیاتی متعددی در جهت توصیف حرکت زمین به‌کار گرفته شده است.^[۵] به دلیل وابستگی این روابط به شرایط خاص تکتونیکی منطقه و نیز تأثیر چشم‌گیر آنان در نتایج حاصل از تحلیل، غالباً توصیه می‌شود در تحلیل خطر لرزه‌ی، از روابط خاص منطقه‌ی مورد مطالعه استفاده شود. لیکن ارائه‌ی رابطه‌ی مناسب، مستلزم وجود اطلاعات کافی و با کیفیت در منطقه‌ی مورد نظر است. در صورت فقدان اطلاعات مذکور، مسئله‌ی عدم وجود رابطه‌ی کاهندگی کارآمد مطرح می‌شود. در چنین شرایطی رویکرد استفاده از روابط سایر مناطق می‌تواند مؤثر واقع شود. اما نخستین موضوع قابل طرح در این رویکرد انتخاب رابطه‌ی کاهندگی مناسب در میان مجموعه‌ی گسترده‌ی روابط است. در این میان سازمان‌دهی طیف وسیعی از روابط کاهندگی به گروه‌های مشابه می‌تواند در انتخاب روابط کاهندگی مناسب

* نویسنده مسئول

تاریخ: دریافت ۱۳۹۱/۱۱/۳، اصلاحیه ۱۳۹۲/۲/۲۴، پذیرش ۱۳۹۲/۳/۲۷.

zahra_miniae@yahoo.com
a-azarbakht@araku.ac.ir

مؤثر واقع شود. با دراختیار داشتن چنین طبقه‌بندی می‌توان بهترین زیرمجموعه را به عنوان مجموعه‌ی روابط جایگزین معرفی کرد. به همین منظور در این مطالعه تجزیه و تحلیل خوشه‌ی که از جمله مطالعات تفصیلی در زمینه‌ی روش‌های گروه‌بندی و طبقه‌بندی اشیاء است، مورد توجه قرار گرفته است.^[۶] در این روش مجموعه‌ی داده‌ها به گروه‌هایی با عنوان خوشه^۳ تفکیک می‌شوند.^[۷] به نحوی که اعضاء هر خوشه به یکدیگر بسیار شبیه باشند و در عین حال بیشترین تمایز را با اعضاء سایر مجموعه‌ها برقرار کنند.^[۸]

علی‌رغم وجود الگوریتم‌های متعدد در خوشه‌بندی، دسته‌بندی‌های ایجاد شده به دو شکل سخت و نرم^۴ ظاهر می‌شوند. در خوشه‌بندی سخت، هر داده به یک و فقط یک خوشه اختصاص می‌یابد، در حالی که در خوشه‌بندی نرم، که به آن خوشه‌بندی فازی نیز اطلاق می‌شود، یک داده می‌تواند با درجات متفاوتی از عضویت به بیش از یک خوشه تعلق یابد.^[۸] علاوه بر آن، از جمله مهم‌ترین مشخصه‌ی الگوریتم‌های خوشه‌بندی فازی استفاده از مجموعه داده‌های بدون برجسب است.^[۶] بدین معنا که برخلاف طبقه‌بندی^۵ که داده‌ها به گروه‌هایی از پیش تعیین شده اختصاص می‌یابند، در خوشه‌بندی هیچ اطلاعی از گروه‌های موجود درون داده‌ها در اختیار نیست. به عبارت دیگر، خوشه‌ها نیز از داده‌ها استخراج می‌شوند و بر دانش پیشین متکی نیستند. از این رومی‌توان تجزیه و تحلیل خوشه‌ی را به منزله‌ی گروه‌بندی بدون ناظر^۶ در نظر گرفت.^[۸]

لازم است تغییراتی در الگوریتم مورد نظر اعمال شود. تغییرات مذکور از آنجا ناشی می‌شوند که هر یک از روابط کاهندگی مطابق با ویژگی‌های خاص خود، در محدوده‌ی مشخصی از پارامترهای لریزه‌ی همچون بزرگای گشتاوری، معیار فاصله و... کاربردی بوده و محدودیت‌های قیدشده از رابطی به رابطی دیگر متغیر باشند. به علاوه پارامترهای مذکور با تعاریف مختلفی در تدوین روابط کاهندگی ظاهر می‌شوند. این موضوع علاوه بر پارامترهای ورودی در ارتباط با نحوه‌ی استفاده از دو مؤلفه‌ی افقی حرکت زمین نیز قابل طرح است. لذا لازم است در جهت ایجاد سازگاری کلی میان روابط کاهندگی، اصلاحات مورد بحث در قسمت آتی انجام گیرند.

۲. خوشه‌بندی فازی

مفهوم خوشه‌بندی فازی در جهت ساخت خوشه‌ها با مرز نامشخص،^[۹] نخستین بار در سال ۱۹۶۵ معرفی شد،^[۱۰] که در آن هر داده با استفاده از یک درجه‌ی عضویت و براساس روابط ۱ الی ۳ به خوشه‌های مختلف اختصاص می‌یابد:

$$u_{ji} \in [0, 1] \quad 1 \leq j \leq C, \quad 1 \leq i \leq N_{ij} \quad (1)$$

$$\sum_{j=1}^C u_{ji} = 1 \quad 1 \leq i \leq N \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N u_{ji} > 0 \quad 1 \leq j \leq C \quad (3)$$

۱.۲. اعمال تغییرات بر الگوریتم خوشه‌بندی FCM
در نخستین گام لازم است، روابط کاهندگی به عنوان داده‌های ورودی در الگوریتم فازی، به شکلی مناسب و با لحاظ کردن ویژگی‌های ذکرشده در بخش پیشین تعریف شوند. به همین منظور ماتریس ورودی SA به صورت رابطه‌ی ۴ شکل می‌گیرد. در این رابطه، SA_1 الی SA_N بیانگر مقادیر پاسخ شتاب طیفی حاصل از روابط کاهندگی برای N رابطه‌ی کاهندگی منتخب هستند. همچنین پارامترهای $M_w, T, R_{JB}, V_{S^*}, \alpha, h, \lambda$ به ترتیب معرف بزرگای گشتاوری، دوره‌ی تناوب مورد استفاده به عنوان ورودی رابطی کاهندگی، فاصله‌ی افقی تا تصویر صفحه‌ی گسیختگی،^۸ متوسط سرعت موج برشی در لایه‌های خاک تا عمق ۳۰ متری از سطح زمین،^۹ زاویه‌ی آزیموت،^{۱۰} عمق کانونی زلزله،^{۱۱} و زاویه‌ی شیب^{۱۲} هستند. همچنین عبارت $(M_w^n, T^n, R_{JB}^n, V_{S^*}^n, \alpha^n, h^n, \lambda^n)$ عبارت است از مقدار پاسخ شتاب طیفی رابطی N ام که با قراردادن مقادیر $M_w^n, T^n, R_{JB}^n, V_{S^*}^n, \alpha^n, h^n, \lambda^n$ در این رابطه حاصل می‌شود و در درایه‌ی $N \times n$ ماتریس SA جای می‌گیرد. همچنین n معرف تعداد ترکیب پارامترهای ورودی در روابط کاهندگی است.

بدین ترتیب مطابق با رابطه‌ی ۴ ماتریسی تشکیل می‌شود که هر سطر آن به یک رابطه‌ی کاهندگی خاص و هر ستون آن به یک ترکیب خاص از پارامترهای ورودی اختصاص می‌یابد. نکته‌ی قابل توجه دیگر در ارتباط با رابطه‌ی ۴ آن است که در کلیه‌ی روابط، فاصله‌ی افقی تا تصویر صفحه‌ی گسیختگی (R_{JB})، به عنوان معیار فاصله مورد توجه قرار گرفته است و چنانچه در تدوین رابطی، از دیگر تعاریف این پارامتر استفاده شده باشد؛ روابط تبدیل ارائه‌شده در پژوهشی در سال ۲۰۱۱ در یکسان‌سازی پارامتر فوق به‌کار گرفته شده است.^[۱۲] این موضوع در ارتباط با تعاریف مختلف به‌کارگیری دو مؤلفه‌ی افقی نیز صادق است. بدین ترتیب که با استفاده از روابط تبدیل ارائه‌شده در پژوهش دیگری در سال ۲۰۰۶ و با مینا قراردادن میانگین هندسی دو مؤلفه‌ی افقی^{۱۳} کلیه روابط کاهندگی با تعریف مشابه لحاظ می‌شوند.^[۱۳] بدین ترتیب روابط کاهندگی به ازاء ترکیب مختلف پارامترهای ورودی محاسبه و نیز سازگاری لازم از نظر تعریف پارامترهای مذکور فراهم شده است. لیکن با توجه به اینکه هر رابطه در محدوده‌ی معینی از پارامترهای ورودی قابل کاربرد

در این روابط، متغیرهای C, N و u_{ji} به ترتیب بیانگر تعداد داده‌ها، تعداد خوشه‌ها، و درجه‌ی عضویت داده‌ی i ام به خوشه‌ی j ام هستند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طبق روابط ۱ و ۲، هر داده با درجه‌ی عضویتی بین ۰ و ۱ به تمامی خوشه‌ها تخصیص می‌یابد و مجموع درجات عضویت داده به خوشه‌های مختلف برابر با عدد ۱ است. همچنین با اعمال رابطه‌ی ۳ از ایجاد خوشه‌ی تهی ممانعت می‌شود.^[۸] در بیان مفهوم خوشه‌بندی فازی براساس ویژگی‌های فوق الگوهای متعددی ارائه شده است، که از جمله پرکاربردترین آنها می‌توان به الگوریتمی با عنوان خوشه‌بندی به روش C-mean (FCM)^۷ اشاره کرد. در این روش، که نسخه‌ی نهایی آن در سال ۱۹۸۱ ارائه شده است،^[۱۱] به هر خوشه، نقطه‌ی به‌عنوان مرکز خوشه اختصاص می‌یابد و بدین ترتیب درجه‌ی عضویت هر نمونه به خوشه‌های مختلف متناسب با فاصله‌ی آن تا مراکز مذکور تعیین می‌شود. به نحوی که هر چه نمونه به مرکز یک خوشه نزدیک‌تر باشد، درجه‌ی عضویت بیشتری نسبت به آن خوشه خواهد داشت. اما نکته‌ی قابل توجه آن است که در روش FCM، خوشه‌بندی فقط به توزیع داده‌ها بستگی دارد و مستقل از مراکز خوشه‌هاست. به عبارت دیگر، پس از تعیین تعداد خوشه‌ها، مراکز خوشه‌ها و نیز درجه‌ی عضویت نمونه‌ها با دنبال کردن الگوریتم خوشه‌بندی و بدون دخالت کاربر حاصل می‌شود. این ویژگی مهم‌ترین مشخصه‌ی خوشه‌بندی به روش FCM به‌شمار می‌رود، که مبنای انتخاب در این مطالعه نیز واقع شده است. لیکن در جهت دست‌یابی به اهداف مطالعه‌ی پیش‌رو مبنی بر خوشه‌بندی روابط کاهندگی و نیز لحاظ کردن مفهوم فیزیکی روابط کاهندگی،

$$SA = \begin{bmatrix} SA_1 \\ SA_2 \\ \vdots \\ SA_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} SA_1(M_w^n, T^n, R_{JB}^n, V_{S^*}^n, \alpha^n, h^n, \lambda^n) & \dots & SA_1(M_w^n, T^n, R_{JB}^n, V_{S^*}^n, \alpha^n, h^n, \lambda^n) \\ SA_2(M_w^n, T^n, R_{JB}^n, V_{S^*}^n, \alpha^n, h^n, \lambda^n) & \dots & SA_2(M_w^n, T^n, R_{JB}^n, V_{S^*}^n, \alpha^n, h^n, \lambda^n) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ SA_N(M_w^n, T^n, R_{JB}^n, V_{S^*}^n, \alpha^n, h^n, \lambda^n) & \dots & SA_N(M_w^n, T^n, R_{JB}^n, V_{S^*}^n, \alpha^n, h^n, \lambda^n) \end{bmatrix} \quad (4)$$

بعدی به صورت مجموع فواصل میان کلیدی مؤلفه‌های آنها و مطابق با رابطه ۸ محاسبه می‌شود:^[۸]

$$D_{Man}(X, Y) = \sum_{i=1}^P |x_i - y_i| \quad (۸)$$

• که در آن x_i و y_i به ترتیب مؤلفه‌ی i ام X و Y هستند. با توجه به تعریف فاصله‌ی منهن و در جهت تأثیر داده‌های متناظر با NaN در این مطالعه، رابطه‌ی ۹ به عنوان معیار فاصله مورد استفاده قرار می‌گیرد:

$$D_{Manw}(Sa_N, C_c) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i |Sa_N^i - C_c^i|}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (۹)$$

در رابطه‌ی ۹، $D_{Manw}(Sa_N, C_c)$ بیانگر فاصله‌ی میان رابطه‌ی N ام و مرکز خوشه‌ی C ام است. همچنین پارامتر w_i در مواردی که مؤلفه‌ی i ام، رابطه‌ی کاهندگی و یا مرکز خوشه‌ی موردنظر متناظر با NaN باشند، معادل با عدد صفر لحاظ شده است و چنانچه هر دو دارای مقدار عددی معین باشند، برابر با عدد ۱ در نظر گرفته می‌شود. بدین ترتیب با استفاده از معیار تشابه معرفی شده، می‌توان ماتریس فاصله را مطابق با رابطه‌ی ۱۰ تشکیل داد:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^n w_i |Sa_1^i - C_1^i|}{\sum_{i=1}^n w_i} & \dots & \frac{\sum_{i=1}^n w_i |Sa_N^i - C_N^i|}{\sum_{i=1}^n w_i} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\sum_{i=1}^n w_i |Sa_1^i - C_c^i|}{\sum_{i=1}^n w_i} & \dots & \frac{\sum_{i=1}^n w_i |Sa_N^i - C_c^i|}{\sum_{i=1}^n w_i} \end{bmatrix} \quad (۱۰)$$

که در آن، درایه‌ی $C \times N$ بیانگر فاصله‌ی میان رابطه‌ی کاهندگی N ام و مرکز خوشه‌ی C ام است. بدین ترتیب با استفاده از رابطه‌ی ۱۰ و با توجه به تعریف تابع هدف معرفی شده در سال ۱۹۸۱^[۱۱]، مبنی بر مجموع کلیدی فواصل میان داده‌ها و مراکز خوشه‌ها، تابع هدف در هر مرحله به صورت رابطه‌ی ۱۱ بیان می‌شود:

$$J_{FCM}(U, C) = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^C u_{ij}^m \cdot D_{Manw}(Sa_j, C_i) \\ = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^C u_{ij}^m \cdot D_{ij}^j \quad 1 < m \quad (۱۱)$$

در رابطه‌ی ۱۱، D_{ij} درایه‌ی $j \times i$ از ماتریس D است.

• از آنجا که ماتریس درجه‌ی عضویت ارائه شده در رابطه‌ی ۵ ماتریسی است که به صورت تصادفی انتخاب شده و بنابراین با مقادیر حقیقی متفاوت است، الگوریتم خوشه‌بندی فازی در طی یک فرایند تکراری، از طریق محاسبه‌ی دوباره‌ی ماتریس درجه‌ی عضویت به بهینه‌سازی تابع هدف می‌پردازد. این امر با استفاده از رابطه‌ی ۱۲ انجام می‌گیرد:

$$U_{new} = \begin{bmatrix} \frac{D_{11}^{-\frac{1}{m-1}}}{\sum_{i=1}^C D_{i1}^{-\frac{1}{m-1}}} & \dots & \frac{D_{1N}^{-\frac{1}{m-1}}}{\sum_{i=1}^C D_{iN}^{-\frac{1}{m-1}}} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{D_{C1}^{-\frac{1}{m-1}}}{\sum_{i=1}^C D_{i1}^{-\frac{1}{m-1}}} & \dots & \frac{D_{CN}^{-\frac{1}{m-1}}}{\sum_{i=1}^C D_{iN}^{-\frac{1}{m-1}}} \end{bmatrix} \quad (۱۲)$$

است، لذا ممکن است برخی از درایه‌ها در ماتریس SA فاقد عددی به عنوان طیف شبه شتاب باشند. چنین درایه‌هایی در ماتریس با عبارت NaN^{۱۴} نمایش داده می‌شوند، که مبین عدم وجود داده در این حالت است.

پس از تشکیل ماتریس ورودی فرایند تکراری الگوریتم FCM مطابق با الگوریتم ارائه شده در سال ۱۹۸۱^[۱۱]، با اعمال تغییرات لازم به این شرح دنبال می‌شود:

• در نخستین گام پس از انتخاب تعداد خوشه‌ها، ماتریس درجه‌ی عضویت اولیه‌ی U ، به صورت تصادفی و مشابه با رابطه‌ی ۵ شکل می‌گیرد:

$$U = \begin{bmatrix} u_{11} & \dots & u_{1N} \\ \vdots & & \vdots \\ u_{C1} & \dots & u_{CN} \end{bmatrix} \quad 0 \leq u_{CN} \leq 1 \quad (۵)$$

که در آن، u_{CN} درجه‌ی عضویت داده‌ی N ام به مرکز خوشه‌ی C ام است.

• چنانچه رابطه‌ی ۴ مختصراً به صورت رابطه‌ی ۶ نوشته شود، با استفاده از ماتریس درجه‌ی عضویت در مرحله‌ی قبل، مختصات مراکز خوشه‌ها مطابق با رابطه‌ی ۷ محاسبه می‌شوند:

$$SA = \begin{bmatrix} Sa_1 \\ Sa_2 \\ \vdots \\ Sa_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Sa_1^1 & \dots & Sa_1^N \\ Sa_2^1 & \dots & Sa_2^N \\ \vdots & & \vdots \\ Sa_N^1 & \dots & Sa_N^N \end{bmatrix} \quad (۶)$$

$$C = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{i=1}^N u_{1i}^m \cdot Sa_i^1}{\sum_{i=1}^N u_{1i}^m} & \dots & \frac{\sum_{i=1}^N u_{1i}^m \cdot Sa_i^N}{\sum_{i=1}^N u_{1i}^m} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\sum_{i=1}^N u_{ci}^m \cdot Sa_i^1}{\sum_{i=1}^N u_{ci}^m} & \dots & \frac{\sum_{i=1}^N u_{ci}^m \cdot Sa_i^N}{\sum_{i=1}^N u_{ci}^m} \end{bmatrix} \quad 1 < m < \infty \quad (۷)$$

این تذکر لازم است که در الگوریتم ارائه شده در پژوهشی در سال ۱۹۸۱^[۱۱]، یک عدد حقیقی بزرگتر از ۱ است و در این مطالعه برابر با عدد ۲ لحاظ شده است. همانطور که گفته شد، برخی از درایه‌های ماتریس SA در رابطه‌ی ۶ فاقد عدد و به عبارتی NaN هستند، بنابراین لازم است اثر چنین درایه‌هایی در محاسبه‌ی مراکز خوشه‌ها در رابطه‌ی ۷ لحاظ شود. به همین منظور مقادیر متناظر با NaN، در محاسبه‌ی عبارت $\frac{\sum_{i=1}^N u_{ci}^m \cdot Sa_i^j}{\sum_{i=1}^N u_{ci}^m}$ معادل با عدد صفر در نظر

گرفته می‌شوند، زیرا عملاً در مورد چنین درایه‌هایی، عددی برای انجام محاسبات ریاضی وجود ندارد. با توجه به بی‌تأثیر بودن درایه‌های فوق لازم است درجه‌ی عضویت متناظر با آنها نیز از محاسبات خارج شوند، لذا در عبارت $\sum_{i=1}^N u_{ci}^m$ ، درجه‌ی عضویت متناظر با چنین داده‌هایی نیز معادل با عدد صفر در نظر گرفته می‌شود.

• پس از تعیین ماتریس درجه‌ی عضویت و مراکز خوشه‌ها لازم است با توجه به ویژگی خاص روابط کاهندگی، معیار تشابه مناسبی معرفی شود. با توجه به هدف این مطالعه، مبنی بر یافتن تشابه و عدم تشابه میان مقادیر طیف شتاب حاصل از روابط کاهندگی مختلف در این مطالعه فاصله‌ی منهن مورد توجه قرار گرفته است. براساس تعریف، فاصله‌ی منهن میان دو داده‌ی X و Y در فضای P

۳. برخلاف بخش دوم تابع $y_2 = 0$ نیز دارای مقادیر عددی است. لذا مراکز خوشه‌ها از ۲ تابع دیگر فاصله گرفته است و در فاصله‌ی نزدیکتری نسبت به $y_2 = 0$ واقع شده‌اند.

۴. کلیه‌ی توابع فاقد عدد هستند، از این رولازم است در بخش مذکور مراکز خوشه‌ها نیز مقادیری متناظر با NaN را به خود اختصاص دهند. همانطور که در شکل ۲ مشاهده می‌شود، نتایج حاصل این مهم را تأیید می‌کند.

چهار بخش توصیف‌شده صحت عملکرد الگوریتم اصلاح‌شده را در جهت خوشه‌بندی روابط کاهندگی تأیید می‌کنند. از این رو این الگوریتم می‌تواند به صورت کارآمد در جهت اهداف این مطالعه به کار گرفته شود. بدین ترتیب در ادامه به خوشه‌بندی مجموعه‌ی روابط منتخب پرداخته شده است.

۳. خوشه‌بندی روابط کاهندگی با استفاده از الگوریتم

اصلاح‌شده FCM

۱.۳. برگزیدن روابط کاهندگی

به‌منظور انتخاب روابط کاهندگی کارآمد در نخستین گام لازم است روابط ارائه‌شده در مناطق مختلف مورد مطالعه و بررسی قرار گیرند. در این مسیر، گزارش ارائه‌شده در سال ۲۰۱۱،^[۱۴] که شامل کلیه روابط کاهندگی ارائه‌شده بین سال‌های ۱۹۶۴ الی ۲۰۱۰ در نقاط مختلف دنیاست، به‌کار گرفته شده است. علیرغم وجود چنین گستره‌ی وسیعی، در این مطالعه به بررسی مجموعه‌ی روابط ۱۵ سال اخیر اکتفا شده است. لیکن وجود محدودیت‌هایی به این شرح به حذف بخشی از روابط در این بازه‌ی زمانی منجر شده است:

- شماری از محدودیت‌ها در طی به‌کارگیری روابط تبدیل، به منظور سازگاری میان روابط کاهندگی مختلف در طول فرایند خوشه‌بندی حاصل می‌شوند. برای مثال در این مطالعه با مینا قراردادن میانگین هندسی دو مؤلفه‌ی افقی و با استفاده از رابطه‌ی ارائه‌شده در پژوهشی در سال ۲۰۰۶،^[۱۴] به تبدیل سایر روش‌های به‌کارگیری مؤلفه‌های افقی پرداخته شده است؛ و لذا، از روابطی که فاقد رابطه‌ی تبدیل در این زمینه‌اند، صرف‌نظر شده است.
- الزام همسان‌سازی پارامترهای ورودی و به موجب آن استفاده از روابط تبدیل در طول فرایند خوشه‌بندی، سطحی از عدم اطمینان را با خود به همراه دارد. بدین منظور در جهت کاهش چنین عدم اطمینانی، کلیه‌ی روابط براساس معیار بزرگای گشتاوری انتخاب شده‌اند. لحاظ‌کردن چنین شرایطی به نوبه‌ی خود به حذف گروهی از روابط منجر می‌شود. لیکن در این میان، فقط رابطه‌ی ارائه‌شده‌ی قدرتی در سال ۲۰۱۰،^[۱۵] که از جمله روابط حائز اهمیت در کشور ایران است، از این اصل مستثناء شده است و علیرغم استفاده از معیار گشتاور سطحی در این رابطه با بهره‌گیری از روابط تبدیل مناسب،^[۱۵] از حذف آن صرف‌نظر می‌شود.
- به‌عنوان آخرین محدودیت در برگزیدن روابط کاهندگی، از انتخاب روابط کاهندگی که منحصر به‌منظور تخمین جنبش‌های نیرومند زمین در نزدیکی منبع لرزه‌یی^{۱۵} ارائه شده‌اند، اجتناب شده است.

براساس محدودیت‌ها و قیود شرح داده‌شده، در این مطالعه مجموعه‌ی متشکل از ۴۵ رابطه‌ی کاهندگی انتخاب شده است. در جدول ۱، روابط منتخب همراه با محدوده‌ی قابل کاربرد پارامترهای لرزه‌یی، نوع گسلش و نیز نحوه‌ی به‌کارگیری مؤلفه‌های افقی در تدوین رابطه‌ی کاهندگی ارائه شده است.

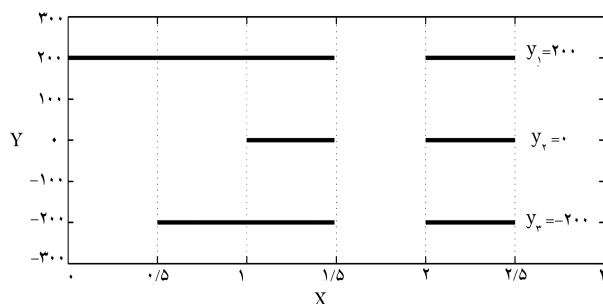
که این ماتریس جایگزین ماتریس عضویت در رابطه‌ی ۵ شده است و مجدداً عملیات توصیف‌شده تکرار می‌شود. این مراحل تا هنگامی که تفاضل دو تابع هدف متوالی کمتر از حد آستانه شود، ادامه می‌یابد. این تذکر لازم است که در این مطالعه حد آستانه‌ی معادل با عدد 10^{-5} در نظر گرفته شده است. بنابراین در آخرین مرحله رابطه‌ی ۱۳ را خواهیم داشت:

$$|(J_{FCM})_J - (J_{FCM})_{J-1}| < 10^{-5} \quad (13)$$

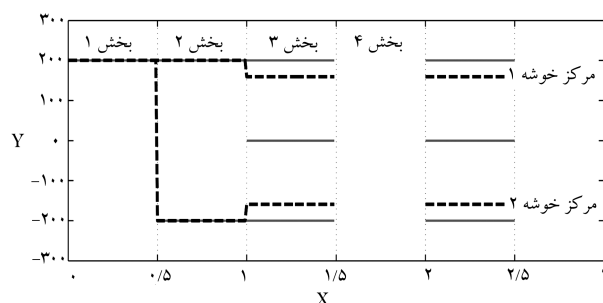
با خاتمه‌ی مراحل بیان‌شده، مجموعه‌ی روابط کاهندگی براساس میزان شباهت در مقدار طیف شتاب و با استفاده از ماتریس درجه‌ی عضویت به زیرمجموعه‌های معین افراز می‌شوند. همچنین مرکز زیرمجموعه‌های حاصل را می‌توان به‌عنوان نماینده‌ی هر خوشه معرفی کرد. اما پیش از به‌کارگیری الگوریتم اصلاح‌شده‌ی مذکور در جهت خوشه‌بندی روابط کاهندگی، نحوه‌ی عملکرد الگوریتم اصلاح‌شده در طبقه‌بندی ۳ تابع فرضی (y_1, y_2, y_3) مطابق با شکل ۱ به نمایش گذاشته شده است. این تذکر لازم است که به منظور لحاظ‌کردن ویژگی روابط کاهندگی، توابع منتخب پیوسته است و در برخی از نقاط فاقد مقدار عددی هستند. بدین ترتیب چنانچه توابع مذکور با استفاده از الگوریتم اصلاح‌شده به ۲ زیرمجموعه تفکیک شوند، نتیجه‌ی حاصل مطابق شکل ۲ است.

همانطور که مشاهده می‌شود، در شکل ۲، چهار بخش قابل تشخیص است که در بیان خصوصیات آنها می‌توان به این نکات اشاره کرد:

۱. فقط یکی از توابع معرفی‌شده دارای مقادیر عددی است، لذا مرکز کلیه‌ی خوشه‌ها بر تابع مفروض انطباق یافته است.
۲. تابع $y_2 = 0$ فاقد مقادیر عددی است و به‌عبارت دیگر در این محدوده مقادیری متناظر با NaN اختیار کرده است. بر همین اساس مراکز خوشه‌ها بر ۲ تابع موجود دیگر انطباق یافته‌اند.



شکل ۱. معرفی ۳ تابع فرضی y_1, y_2, y_3 به منظور نمایش نحوه‌ی عملکرد الگوریتم خوشه‌بندی اصلاح‌شده.



شکل ۲. خوشه‌بندی ۳ تابع فرضی به ۲ زیرمجموعه با استفاده از الگوریتم خوشه‌بندی اصلاح‌شده.

جدول ۱. روابط کاهندگی منتخب همراه با محدوده‌ی کاربردی پارامترهای لرزه‌یی.

ردیف	رابطه کاهندگی	بزرگای گشتاوری	معیار فاصله	سرعت موج برشی	عمق کانونی	نوع گسلش	مؤلفه‌ی افقی	مرجع
پوسته‌یی								
[۱۷]	آبراهامسون و سیلوا ۱۹۹۷ (crustal)	۴٫۴-۷٫۴	۰٫۱-۲۲۰	۱۵۰-۱۰۰۰	۰-۱۰۰	Ng, S^h, R^i	GM ^a	[۱۷]
[۱۸]	بور و اتکینسون ۲۰۰۸ (crustal)	۵-۸	۰-۲۰۰	۱۸۰-۱۲۰۰	۲-۳۱	N,S,R	GMRotID ^{a,b}	[۱۸]
[۱۹]	کمپیل و بزرگنیا ۲۰۰۸ (crustal)	۴-۸٫۵	۰-۲۰۰	۰-۱۰۰۰	۰-۳۰	N,S,R	GMRotID ^o	[۱۹]
[۲۰]	آبراهامسون و سیلوا ۲۰۰۸ (crustal)	۵-۸٫۵	۰-۲۰۰	۰-۱۰۰۰	۰-۳۰	N,S,R	GMRotID ^o	[۲۰]
[۲۱]	چیو و یانگز ۲۰۰۸ (crustal)	۴-۸٫۵	۰-۲۰۰	۰-۱۰۰۰	۰-۱۹	N,S,R	GMRotID ^o	[۲۱]
[۲۲]	ایدریس ۲۰۰۸	۴٫۵-۷٫۷	۰-۲۰۰	۴۵۰-۹۰۰	۰-۳۰	N,S,R	AMxy ^c	[۲۲]
فرو رانشی								
[۲۳]	یونگز* ۱۹۹۷ (interface)	۵-۸٫۲	۱۰-۵۰۰	۰-۱۰۰۰	۲۵-۵۰	N	GM	[۲۳]
[۲۳]	یونگز ۱۹۹۷ (interslab)	۵-۸٫۲	۱۰-۵۰۰	۰-۱۰۰۰	۵۰-۱۰۰	N	GM	[۲۳]
[۲۴]	اتکینسون و بور ۲۰۰۳ کاسکادیا (inslab)	۵-۸٫۳	۰-۲۰۰	۰-۱۰۰۰	۵۰-۱۰۰	N	Random ^d	[۲۴]
[۲۴]	اتکینسون و بور ۲۰۰۳ (inslab)	۵-۸٫۳	۰-۲۰۰	۰-۱۰۰۰	۵۰-۱۰۰	N	Random	[۲۴]
[۲۴]	اتکینسون و بور ۲۰۰۳ ژاپن (inslab)	۵-۸٫۳	۰-۲۰۰	۰-۱۰۰۰	۵۰-۱۰۰	N	Random	[۲۴]
[۲۴]	*اتکینسون و بور ۲۰۰۳ کاسکادیا (interface)	۵-۸٫۳	۰-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۲۵-۵۰	N	Random	[۲۴]
[۲۴]	*اتکینسون و بور ۲۰۰۳ (interface)	۵-۸٫۳	۰-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۲۵-۵۰	N	Random	[۲۴]
[۲۴]	*اتکینسون و بور ۲۰۰۳ ژاپن (interface)	۵-۸٫۳	۰-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۲۵-۵۰	N	Random	[۲۴]
جهانی								
[۲۵]	کوهن ۲۰۰۹	۵٫۶-۷٫۹	۰-۲۰۰	۲۰۰-۱۵۰۰	۰-۱۰/۱۳	N,S,R	GM	[۲۵]
کالیفرنیا								
[۲۶]	*فیلد ۲۰۰۰	۴-۷٫۵	۰-۱۵۰	۱۸۰-۱۵۰۰	۰-۱۰۰	N,S,R	GM	[۲۶]
[۲۷]	گودا ۲۰۰۸	۵-۷٫۴	۰-۱۰۰	۰-۱۰۰۰	۰-۱۰۰	N,S,R	GM	[۲۷]
[۲۸]	هونگ ۲۰۰۹a	۵-۷٫۴	۰-۱۰۰	۰-۱۰۰۰	۰-۱۰۰	N,S,R	GM	[۲۸]
اروپا و خاورمیانه								
[۲۹]	امبرسبز ۲۰۰۵	۵-۷٫۵	۰-۱۰۰	۱۸۰-۱۰۰۰	۱-۳۰	N,S,R	Envxy ^e	[۲۹]
[۳۰]	آکار و بومر ۲۰۱۰	۵-۷٫۶	۰-۱۰۰	۰-۱۰۰۰	۰-۱۰۰	N,S,R	GM	[۳۰]
ایتالیا								
[۳۱]	*ببندی ۲۰۰۹a	۴٫۶-۶٫۹	۱-۱۹۰	۱۸۰-۷۶۰	۲-۲۹	N,S,R	GM	[۳۱]
[۳۲]	*ببندی ۲۰۰۹b	۴٫۶-۶٫۹	۰-۱۸۳	۱۸۰-۷۶۰	۲-۳۰	N,S,R	Envxy	[۳۲]
[۳۳]	*ببندی ۲۰۱۰	۴٫۶-۶٫۹	۱-۱۰۰	۱۸۰-۱۰۰۰	۱٫۵-۲۹	N,S,R	Envxy	[۳۳]
ژاپن								
[۱]	تا کاهاشی ۲۰۰۴ (interface)	۵-۸٫۳	۰٫۳-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۰-۱۲۰	N,S,R	GM	[۱]
[۱]	تا کاهاشی ۲۰۰۴ (crustal)	۵-۸٫۳	۰٫۳-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۰-۲۵	N,S,R	GM	[۱]
[۲]	ژائو ۲۰۰۶ (crustal)	۵-۸٫۳	۰-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۰-۲۵	N,S,R	GM	[۲]
[۲]	ژائو ۲۰۰۶ (interface)	۵-۸٫۳	۰-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۱۰-۵۰	N,S,R	GM	[۲]
[۲]	ژائو ۲۰۰۶ (interslab)	۵-۸٫۳	۰-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۱۵-۱۶۰	N,S,R	GM	[۲]
ترکیه								
[۳۴]	گولکان و کالکان (۲۰۰۶)	۵-۷٫۵	۰-۱۵۰	۲۰۰٫۴۰۰٫۷۰۰	۰-۱۰۰	N,S,R	GM	[۳۴]
[۳۵]	کالکان و گولکان ۲۰۰۴	۴-۷٫۵	۰-۲۵۰	۲۰۰٫۴۰۰٫۷۰۰	۰-۱۰۰	N,S,R	GM	[۳۵]
[۳۶]	اوزبی ۲۰۰۴	۵-۷٫۴	۵-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۵-۲۵	N,S	GM	[۳۶]
[۳۷]	آکار و کاکانان ۲۰۱۰	۵-۷٫۶	۰-۲۰۰	۱۸۰-۱۰۰۰	۰-۵۰	N,S,R	GM	[۳۷]
ایران								
[۳۸]	خادمی ۲۰۰۲	۳٫۴-۷٫۴	۰-۱۸۰	۰-۱۰۰۰	۰-۱۰۰	N,S,R	Envxy	[۳۸]
[۳۹]	قاسمی ۲۰۰۹	۵-۷٫۴	۰-۱۰۰	۰-۱۰۰۰	۵-۲۲	N,S,R	GMRotID ^o	[۳۹]
[۱۵]	قدرتی ۲۰۱۰ (البرز)	۴-۷٫۷	۵-۲۰۰	۰-۱۰۰۰	۵-۵۹	N,S,R	Envxy	[۱۵]
[۱۵]	قدرتی ۲۰۱۰ زاگرس	۴-۷٫۷	۵-۲۰۰	۰-۱۰۰۰	۵-۵۹	N,S,R	Envxy	[۱۵]

ادامه جدول ۱. روابط کاهندگی منتخب همراه با محدوده‌ی کاربردی پارامترهای لرزه‌ی.

ردیف	رابطه کاهندگی	بزرگای گشتاوری	معیار فاصله	سرعت موج برشی	عمق کانونی	نوع گسلش	مؤلفه‌ی افقی	مرجع
۳۷	صفاری ۲۰۱۲ (ایران مرکزی)	۵-۷٫۳	۱۵-۱۳۵	۱۷۵-۱۰۰۰	۷-۲۷	S,R	GM	[۴۰]
۳۸	صفاری ۲۰۱۲ (زاگرس)	۵-۶٫۵	۱۵-۱۳۵	۱۷۵-۱۰۰۰	۷-۲۷	S,R	GM	[۴۰]
۳۹	زعفرانی ۲۰۰۸	۵٫۲-۷٫۴	۰-۲۰۰	۰-۱۰۰۰	۳-۳۲	N,S,R	GM	[۲]
۴۰	زعفرانی ۲۰۱۲ (زاگرس)	۴٫۴-۷٫۵	۰-۲۰۰	۲۰۰-۱۰۰۰	۰-۱۰۰	N,S,R	GM	[۴۳]
هند								
۴۱	*شماره ۲۰۰۹	۵-۷	۰-۱۰۰	۰-۱۰۰۰	۵-۵۰	S,R	GM	[۴۱]
ارواسیا								
۴۲	*فوکوشیما ۲۰۰۳	۵٫۵-۷٫۴	۰-۲۳۵	۰-۱۰۰۰	۳-۳۰	S	Both ^f	[۴۲]
تایوان								
۴۳	لین و لی ۲۰۰۸ (interface)	۵٫۳-۸٫۱	۲۰-۳۰۰	۰-۱۰۰۰	۴-۳۰	N,S,R	GM	[۴۳]
۴۴	لین و لی ۲۰۰۸ (interslab)	۴-۶٫۷	۴۰-۶۰۰	۰-۱۰۰۰	۴۰-۱۶۰	N,S,R	GM	[۴]
ترکیه غربی								
۴۵	*آکیول ۲۰۰۹	۴-۶٫۴	۱۵-۲۰۰	۳۶۰-۷۵۰	۴-۳۲	N,S,R	Envxy	[۴۴]

^a: میانگین هندسی طیف شتاب حاصل از دو مؤلفه‌ی افقی،

^b: تقریبی از میانگین هندسی طیف شتاب حاصل دو مؤلفه‌ی افقی با در نظر گرفتن تمامی جهات،

^c: میانگین حسابی طیف شتاب حاصل از دو مؤلفه‌ی افقی،

^d: انتخاب یکی از طیف‌های شتاب حاصل از دو مؤلفه‌ی افقی به صورت تصادفی،

^e: انتخاب بزرگ‌ترین مقدار طیف شتاب حاصل از دو مؤلفه‌ی افقی در هر دوره‌ی تناوب،

^f: استفاده از طیف شتاب حاصل از دو مؤلفه‌ی افقی به صورت مستقل،

^g: گسلش نرمال، ^h: گسلش امتداد لغز، ⁱ: گسلش معکوس،

*: روابط مرزی در طول فرایند خوشه‌بندی که با درجه عضویت‌های مساوی به کلیه‌ی خوشه‌ها اختصاص می‌یابند.

جدول ۲. معرفی محدوده‌ی پارامترهای لرزه‌ی در تشکیل ماتریس ورودی.

محدوده	پارامتر لرزه‌ی
$M_W \in \{5, 6, 7\}$	بزرگای گشتاوری
$T \in \left\{ \begin{matrix} 0/1, 0/1, 0/2, 0/3, 0/4, 0/5, \\ 0/6, 0/7, 0/8, 0/9, 1, 1/5, 2 \end{matrix} \right\}$	دوره‌ی تناوب (ثانیه)
$R_{JB} = \{50, 150, 200\}$	معیار فاصله (کیلومتر)
$V_{S20} \in \{200, 300, 400, 700\}$	سرعت موج برشی (متر بر ثانیه)
$\alpha \in \left\{ \begin{matrix} -180^\circ, -120^\circ, -60^\circ, \\ 0^\circ, 60^\circ, 120^\circ, 180^\circ \end{matrix} \right\}$	زاویه‌ی آزمون (درجه)
$h \in \left\{ \begin{matrix} 10/13, 11/35, \\ 30, 50, 75, 100 \end{matrix} \right\}$	عمق کانونی (کیلومتر)
$\lambda \in \{-90^\circ, 0^\circ, 90^\circ\}$	زاویه‌ی شیب (درجه)

تعیین مقادیر عمق کانونی آن است که در تدوین تعدادی از روابط موسوم به نسل جدید روابط کاهندگی ^{۱۷}(NGA) از عمق کانونی به عنوان پارامتر ورودی استفاده نشده است، لیکن پارامتر مذکور با استفاده از روابط تبدیل ارائه شده در پژوهشی در سال ۲۰۱۱ قابل محاسبه است.^[۱۲] بر این اساس، علاوه بر اعماق متداول ۳۰، ۵۰، ۷۵ و ۱۰۰ کیلومتر به عنوان عمق کانونی، مقادیر ۱۰/۱۳ و ۱۱/۳۵ نیز در تشکیل ماتریس ورودی لحاظ می‌شوند. همچنین با توجه به مقادیر زاویه‌ی شیب

۲.۳. معرفی ماتریس ورودی جهت خوشه‌بندی روابط کاهندگی

منتخب

با توجه به رابطه‌ی ۴ لازم است مقادیر پارامترهای $h, \alpha, V_{S20}, R_{JB}, T, M_W$ به عنوان پارامترهای ورودی در طول فرایند خوشه‌بندی تعیین شوند. به همین منظور و با هدف، پوشش دادن مقادیر متداول و پرکاربرد در استفاده از روابط کاهندگی، مقادیر پارامترهای ورودی مطابق با جدول ۲ مورد توجه قرار گرفته است.

این تذکر لازم است که در تعیین پارامتر متوسط سرعت موج برشی مطابق با جدول ۲، از طبقه‌بندی ارائه شده توسط مرکز تحقیقات مهندسی زلزله‌ی پاسیفیک^{۱۶} استفاده شده است. بر این اساس نوع خاک منطقه به گروه‌هایی به این قرار تقسیم می‌شود:

- خاک نوع B: $76 \text{ m/s} < V_{S20}$
- خاک نوع C: $36 \text{ m/s} < V_{S20} < 76 \text{ m/s}$
- خاک نوع D: $18 \text{ m/s} < V_{S20} < 36 \text{ m/s}$
- خاک نوع E: $V_{S20} < 18 \text{ m/s}$

با توجه به آنکه در این مطالعه از بررسی خاک‌های بسیار نرم و بسیار سخت صرف نظر شده است، از این رو مقادیر پارامتر V_{S20} مربوط به خاک‌های نوع B و E در بازه‌ی معرفی شده نادیده گرفته شده‌اند. از سوی دیگر، به منظور پوشش مناسب پارامتر V_{S20} ، مقادیر مربوط به مرز بالا و پایین خاک‌های گروه C و D در تشکیل ماتریس ورودی مورد توجه قرار گرفته است. همچنین نکته‌ی قابل توجه در

در جدول ۲، سه نوع گسلس متداول نرمال امتداد لغز و معکوس به ترتیب معادل با زاویه‌ی شیب 0° ، 90° و 90° درجه در فرایند خوشه‌بندی روابط کاهندگی مورد توجه قرار گرفته است.^[۱۱] با توجه به توضیحات ذکرشده، تعداد کل ترکیب پارامترهای ورودی برابر با ۵۸۹۶۸ حالت منظور و ماتریس ورودی SA به صورت ماتریسی با $N = 45$ سطر و $m = 58968$ ستون تشکیل می‌شود. با تشکیل چنین ماتریسی می‌توان با انتخاب تعداد خوشه‌ها به طبقه‌بندی روابط کاهندگی اقدام کرد.

$$V_{XB} = \frac{J_{FCM}}{N \min \|C_i - C_j\|^2} \quad 1 \leq i < j \leq C \quad (15)$$

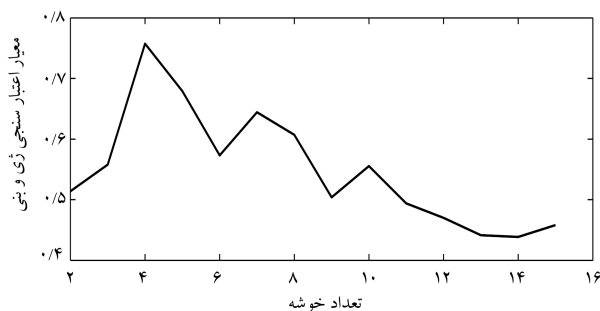
همان‌طور که مشاهده می‌شود، این معیار علاوه بر درجات عضویت از سایر پارامترها از جمله مقادیر داده‌ها و مراکز خوشه‌ها نیز بهره می‌گیرد، و در خوشه‌بندی ۳۴ رابطه‌ی کاهندگی به خوشه‌های مختلف محاسبه شده است (شکل ۴). از آنجا که مقادیر کمتر این معیار منطبق با خوشه‌بندی بهینه است، از این رو در این مطالعه، خوشه‌بندی ۳۴ رابطه‌ی کاهندگی به ۱۴ خوشه به‌عنوان افزاینده مناسب روابط کاهندگی معرفی شده است. این تذکر لازم است که با توجه به آنکه داده‌های مرزی با درجه‌ی عضویت‌های تقریباً یکسان به خوشه‌های مختلف اختصاص می‌یابند، پس از اتمام الگوریتم خوشه‌بندی و در ارائه‌ی نتایج می‌توان بر اساس درجات عضویت به انتقال این قبیل روابط به نزدیک‌ترین خوشه‌ی موجود اقدام کرد. این امر در ارتباط با روابط ارائه‌شده در پژوهش‌هایی در سال‌های ۲۰۰۴^[۳۶]، ۲۰۰۸^[۳۷] و ۲۰۱۲^[۳۸] در منطقه‌ی البرز و ایران مرکزی صورت گرفته است. بدین ترتیب نتایج مطابق با جدول ۳ ارائه شده است. این جدول شامل روابط کاهندگی اختصاص‌یافته به هر خوشه و نیز درجه‌ی عضویت هر یک از آنهاست.

از سوی دیگر با توجه به آنکه مراکز خوشه‌ها می‌توانند به‌منزله‌ی نماینده‌ی هر خوشه ایفاء نقش کنند، در توصیف نتایج حاصل از خوشه‌بندی ارائه‌شده در جدول ۳، نموداری مطابق با شکل ۵ ترسیم شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، به دلیل اختلاف چشم‌گیر دو خوشه شامل روابط ارائه‌شده در سال ۲۰۰۲^[۳۸]، ۲۰۰۴^[۳۶] با روابط سایرین، چنین خوشه‌های مجزایی در طول فرایند خوشه‌بندی شکل می‌گیرند. لیکن به منظور درک تمایز میان سایر خوشه‌ها و انتخاب مجموعه‌ی روابط کارآمد در منطقه‌ی مورد نظر، انطباق سوابق لرنه‌ی منطقه‌ی مورد مطالعه و مختصات مراکز خوشه‌های مختلف الزامی است. بررسی این موضوع در ارتباط با مجموعه‌ی داده‌های فلات ایران در بخش ۳.۳ صورت گرفته است.

۳.۳. ارزیابی خوشه‌بندی روابط کاهندگی بر سوابق لرنه‌ی فلات ایران

پس از خوشه‌بندی روابط کاهندگی به منظور برگزیدن مجموعه‌ی روابط مناسب با سوابق لرنه‌ی فلات ایران، مجموعه‌ی مشتمل بر ۷۸ شتاب‌نگاشت از ۲۸ رخداد ثبت



شکل ۴. معیار اعتبارسنجی ارائه‌شده در سال ۱۹۹۱^[۱۶]، در خوشه‌بندی ۳۴ رابطه‌ی کاهندگی به خوشه‌های مختلف.

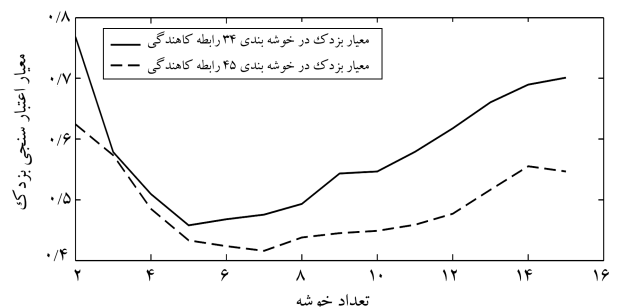
۳.۳. خوشه‌بندی روابط کاهندگی منتخب

در فرایند خوشه‌بندی روابط کاهندگی پس از تشکیل ماتریس ورودی لازم است به انتخاب تعداد خوشه‌ها مبادرت ورزید. اما از آنجا که نمی‌توان در ارتباط با وجود خوشه‌های متمایز در میان مجموعه‌ی روابط تصمیم قطعی اتخاذ کرد، لذا خوشه‌بندی با لحاظ کردن تعداد خوشه‌های متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاکی از آن است که برخی از روابط در کلیه‌ی حالات در حکم داده‌های مرزی است و با درجه‌ی عضویت‌های نسبتاً مساوی به گروه‌های مختلف اختصاص می‌یابند. با توجه به آنکه این قبیل روابط قابلیت تخصیص به هیچ‌یک از مراکز را با درجه‌ی عضویت مناسب به نمایش نمی‌گذارند، حذف روابط فوق می‌تواند در جهت رسیدن به خوشه‌بندی بهینه مؤثر واقع شود. روابط مذکور با علامت ستاره در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. این تذکر لازم است که در این میان بسیاری از روابط فلات ایران و روابط NGA نیز از جمله داده‌های مرزی به شمار می‌روند. لیکن به جهت موضوع مورد بحث در این مطالعه مبنی بر برانزندی روابط کاهندگی فلات ایران و نیز اهمیت قابل توجه روابط NGA به‌عنوان روابط قابل کاربرد در کلیه‌ی ساختمان‌ها، در این مرحله از حذف روابط نام‌برده خودداری شده است. بدین ترتیب با حذف روابط مرزی و تکرار مجدد الگوریتم خوشه‌بندی، مجموعه‌ی تقلیل‌یافته از روابط کاهندگی به گروه‌های جدید افزاینده می‌شود.

لیکن نکته‌ی حائز اهمیت انتخاب خوشه‌بندی بهینه از میان افزایش‌های موجود است. به همین منظور از معیار اعتبارسنجی ارائه‌شده در سال ۱۹۹۱ استفاده شده است.^[۱۱] این معیار بر اساس رابطه‌ی ۱۴ به بررسی نتایج حاصل از خوشه‌بندی می‌پردازد. به نحوی که مقادیر بالاتر معیار فوق به معنای افزاینده مناسب‌تر روابط کاهندگی است.

$$V_{PC} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^C \sum_{j=1}^N u_{ij}^2 \quad (14)$$

نتایج این معیار در خوشه‌بندی ۴۵ و ۳۴ رابطه‌ی کاهندگی به خوشه‌های مختلف در شکل ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خوشه‌بندی مجموعه‌ی



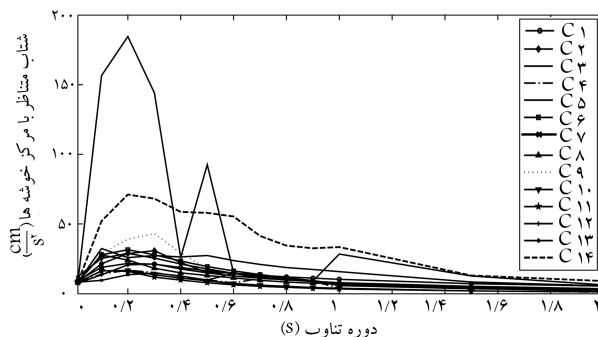
شکل ۳. معیار اعتبارسنجی ارائه‌شده در سال ۱۹۹۱^[۱۱]، در خوشه‌بندی ۴۵ و ۳۴ رابطه‌ی کاهندگی به خوشه‌های مختلف.

جدول ۳. نتایج حاصل از خوشه‌بندی روابط کاهندگی به ۱۴ خوشه.

تعداد خوشه‌ها = ۱۴					
ردیف	رابطه‌ی کاهندگی	درجه‌ی عضویت	ردیف	رابطه‌ی کاهندگی	درجه‌ی عضویت
خوشه‌ی ۱			خوشه‌ی ۸		
۱	(crustal) [۱۷] ۱۹۹۷	۱٫۰۰	۳۱	[۱۱] ۲۰۰۴	۰٫۲۰
			۳۲	[۱۷] ۲۰۱۰	۰٫۲۳
			۳۶	[۱۵] ۲۰۱۰	۰٫۹۹
خوشه‌ی ۲			خوشه‌ی ۹		
۳	(crustal) [۱۹] ۲۰۰۸	۰٫۹۸	۴	(crustal) [۲۰] ۲۰۰۸	۰٫۹۴
۵	(crustal) [۲۱] ۲۰۰۸	۰٫۱۹	۳۵	(الیرز) [۱۵] ۲۰۱۰	۰٫۲۰
۱۰	(in slab) [۱۸] ۲۰۰۳	۱٫۰۰	۴۴	(interslab) [۲۳] ۲۰۰۸	۱٫۰۰
خوشه‌ی ۳			خوشه‌ی ۱۰		
۱۷	[۲۷] ۲۰۰۸	۰٫۷۰	۲۴	(interface) [۱] ۲۰۰۴	۰٫۹۸
۱۸	[۲۸] ۲۰۰۹	۰٫۶۸	۲۷	(interface) [۲] ۲۰۰۶	۰٫۹۲
۳۰	[۲۴] ۲۰۰۴	۰٫۹۲			
خوشه‌ی ۴			خوشه‌ی ۱۱		
۹	(in slab) کاسکادیا [۲۴] ۲۰۰۳	۱٫۰۰	۲۵	(crustal) [۱] ۲۰۰۴	۰٫۸۶
۴۳	(interface) [۲۳] ۲۰۰۸	۰٫۹۹	۲۶	(crustal) [۲] ۲۰۰۶	۰٫۸۷
			۲۸	(interslab) [۲] ۲۰۰۶	۱٫۰۰
خوشه‌ی ۵			خوشه‌ی ۱۲		
۳۳	[۳۸] ۲۰۰۲	۱٫۰۰	۲	(crustal) [۲۴] ۲۰۰۸	۱٫۰۰
			۸	(interslab) [۲۳] ۱۹۹۸	۱٫۰۰
خوشه‌ی ۶			خوشه‌ی ۱۳		
۱۱	(in slab) ژاپن [۲۴] ۲۰۰۳	۱٫۰۰	۳۹	[۲] ۲۰۰۸	۰٫۲۲
۱۵	[۲۵] ۲۰۰۹	۰٫۹۶	۴۰	[۲] ۲۰۱۲ (زاگرس)	۱٫۰۰
۳۷	[۴۰] ۲۰۱۲ (ایران مرکزی)	۰٫۱۰			
۳۸	[۴۰] ۲۰۱۲ (زاگرس)	۰٫۴۰			
خوشه‌ی ۷			خوشه‌ی ۱۴		
۶	[۲۲] ۲۰۰۸	۰٫۳۶	۲۹	[۳۴] ۲۰۰۲	۱٫۰۰
۱۹	[۲۹] ۲۰۰۵	۰٫۵۱			
۲۰	[۳۰] ۲۰۱۰	۰٫۹۹			
۳۴	[۳۹] ۲۰۰۹	۰٫۱۵			

شده با لحاظ کردن مقادیر پارامترهای ورودی فرایند خوشه‌بندی مطابق با جدول ۲، مورد توجه قرار گرفته است. شتاب‌نگاشت‌های مورد استفاده توسط شبکه‌ی شتاب‌نگاری ایران (ISMN) که از سال ۱۹۷۳ شروع به کار کرده و توسط مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن (BHRC) اداره می‌شود، ثبت شده‌اند. در جدول ۴، فهرستی از رخداد‌های منتخب و اطلاعات مربوط به هر یک ارائه شده است.

در این مطالعه، به منظور ارزیابی میزان انطباق خوشه‌های مختلف با مجموعه داده‌های معرفی شده از دو معیار خطا موسوم به معیارهای ریشه میانگین مربعات خطا^{۲۰} و میانگین مطلق خطا^{۲۱} و نیز معیار ضریب تعیین^{۲۲} استفاده شده است. معیارهای خطا، شاخص‌هایی هستند که جهت ارزیابی صحت پیش‌بینی مراکز خوشه‌ها استفاده می‌شوند و مقادیر کمتر این معیارها نمایانگر پیش‌بینی دقیق‌تر مقادیر مشاهده شده هستند. در مقابل، مقادیر بالای معیار ضریب تعیین در یک خوشه،



شکل ۵. مختصات مراکز خوشه‌ها با مشخصات: $h = 30 \text{ m}$, $\lambda = 0^\circ$, $M_w = 6$ و $R_{JB} = 150 \text{ km}$, $V_{S30} = 700 \text{ m/s}$, $\alpha = 0^\circ$.

جدول ۴. رخدادهای فلات ایران مورد استفاده در مطالعه.

ردیف	تاریخ رخداد	بزرگی گشتاوری	عمق کانونی	گسل*	تعداد شتاب نگاشت‌ها
۱	۱۹۷۹/۱۱/۲۷	۷/۱	۱۰	۱	۵
۲	۱۹۹۴/۰۶/۲۰	۵/۸	۹	۲	۲
۳	۱۹۹۷/۰۲/۲۸	۶	۹	۱	۱
۴	۱۹۹۹/۰۸/۲۱	۵	۲۵	۲	۲
۵	۱۹۹۹/۰۵/۰۶	۵/۷	۱۰	۲	۱
۶	۱۹۹۹/۱۰/۳۱	۵/۲	۱۵	۲	۱
۷	۲۰۰۲/۰۴/۲۴	۵/۴	۲۵	۲	۳
۸	۲۰۰۲/۰۶/۲۲	۶/۴	۱۰	۱	۸
۹	۲۰۰۲/۱۲/۲۴	۵/۲	۲۰	۲	۲
۱۰	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۵/۸	۱۰	۲	۲
۱۱	۲۰۰۳/۰۷/۱۰	۵/۷	۱۵	۲	۲
۱۲	۲۰۰۳/۰۸/۲۱	۵/۶	۲۰	۱	۲
۱۳	۲۰۰۳/۱۱/۲۸	۵	۲۵	۱	۱
۱۴	۲۰۰۴/۰۵/۲۸	۶/۳	۲۷	۱	۵
۱۵	۲۰۰۴/۱۰/۰۷	۵/۶	۳۰	۱	۹
۱۶	۲۰۰۵/۰۱/۱۰	۵/۳	۳۲	۱	۷
۱۷	۲۰۰۵/۰۲/۲۲	۶/۳	۱۰	۱	۳
۱۸	۲۰۰۵/۱۱/۲۷	۵/۹	۱۲	۲	۶
۱۹	۲۰۰۶/۰۳/۳۰	۵/۱	۲۰	۲	۱
۲۰	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۶/۱	۱۲	۲	۳
۲۱	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	۵/۱	۲۶	۲	۲
۲۲	۲۰۰۶/۰۶/۲۸	۵/۸	۱۲	۲	۲
۲۳	۲۰۰۸/۰۵/۰۵	۵/۲	۱۲	۲	۱
۲۴	۲۰۰۸/۰۹/۱۰	۶/۱	۱۲	۲	۱
۲۵	۲۰۰۸/۰۹/۱۷	۵/۲	۱۲	۲	۲
۲۶	۲۰۰۸/۱۲/۰۷	۵/۴	۱۲	۲	۱
۲۷	۲۰۰۸/۱۲/۰۸	۵/۱	۱۲	۲	۲
۲۸	۲۰۰۸/۱۲/۰۹	۵	۱۴	۲	۱

*: ۱ و ۲ به ترتیب مربوط به گسل‌های ایران مرکزی و زاگرس هستند.

توانمندی بیشتر خوشه را در تطبیق با داده‌های مشاهده‌شده نشان می‌دهد. معیارهای مذکور براساس روابط ۱۶ الی ۱۸ محاسبه شده‌اند:

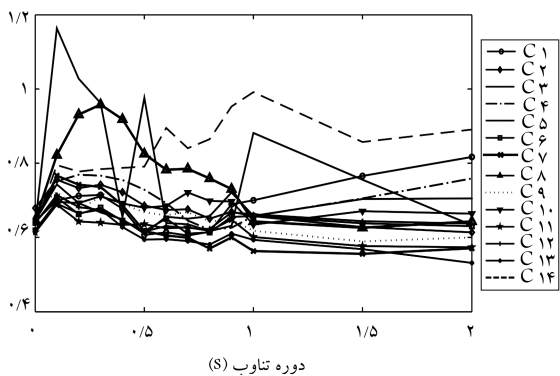
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (X_{obs} - X_{pre})^2}{N}} \quad (16)$$

$$MAE = \frac{\sum |X_{obs} - X_{pre}|}{N} \quad (17)$$

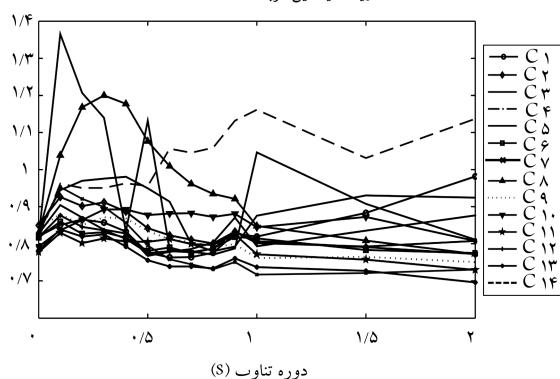
$$R^2 = \frac{\sum (X_{obs})^2 - \sum (X_{obs} - X_{pre})^2}{\sum (X_{obs})^2} \quad (18)$$

که در این روابط، X_{obs} مقدار مشاهده‌شده رخداد، X_{pre} مقدار پیش‌بینی شده توسط روابط معادل با مختصات خوشه‌ها و N تعداد شتاب‌نگاشت‌هاست.^[۴۵] نتایج حاصل از محاسبات ارائه‌شده در شکل ۶ به نمایش گذاشته شده است. با توجه به نتایج معیارهای فوق می‌توان به انتخاب مجموعه‌ی روابط مطلوب اقدام کرد.

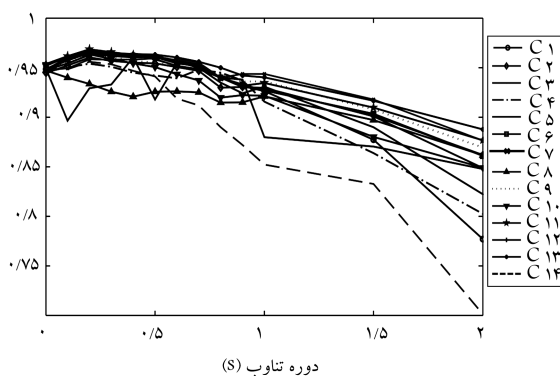
میانگین مطلق خطا (MAE)



ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)



معیار ضریب تعیین (R-squared)



شکل ۶. نتایج حاصل از معیارهای خطا و ضریب تعیین در انطباق خوشه‌بندی با داده‌های فلات ایران.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، روابط کاهش‌دهنده در خوشه‌های ۵ و ۱۴ و نیز خوشه‌ی ۸ در دوره‌های تناوب پایین بیشترین میزان خطا را به خود اختصاص داده‌اند. با توجه به درجه‌ی عضویت ارائه‌شده در جدول ۳، این خوشه‌ها به ترتیب مبین روابط ارائه‌شده در سال ۲۰۰۲،^[۳۸] و رابطه‌ی ارائه‌شده در سال ۲۰۱۰،^[۱۵] در منطقه‌ی زاگرس هستند. به‌علاوه روابط تخصیص‌یافته به خوشه‌های ۱۱، ۱۳ و نیز روابط موجود در خوشه‌ی ۷ در دوره‌های تناوب بالا دارای کمترین خطا در انطباق با مجموعه‌ی داده‌های لرزه‌ی فلات ایران هستند. خوشه‌های مذکور نماینده‌ی روابط ارائه‌شده در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲،^[۳۳] در سال ۲۰۰۴ در رخداد‌های پوسته‌ی،^[۱] در سال ۲۰۰۶ در رخداد‌های پوسته‌ی و

درون صفحه‌یی،^[۲] و نیز رابطه‌ی ارائه شده در سال ۲۰۱۰،^[۳۰] هستند. بدین ترتیب این روابط بیشترین انطباق را با مجموعه‌ی رخدادهای لرزه‌یی فلات ایران به نمایش گذاشته‌اند. همچنین نکته‌ی حائز اهمیت آن است که روابط ارائه شده در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲،^[۳] هر دو براساس داده‌های فلات ایران تدوین شده‌اند، و نسبت به سایر روابط از جمله روابط NGA نتایج بهتری را به همراه داشته‌اند. این موضوع با نتایج پژوهش انجام شده در سال ۲۰۱۲،^[۴۶] نیز مطابقت داشته است.

۴. نتیجه‌گیری

با توجه به کاربرد گسترده‌ی روابط کاهندگی در ارزیابی خطرپذیری لرزه‌یی و نیز عدم وجود رابطه‌ی مناسب در برخی ساختگاه‌ها، در این مطالعه استفاده از روابط سایر مناطق مورد توجه قرار گرفته و روشی برای انتخاب رابطه‌ی کاهندگی جایگزین معرفی شده است. روش پیشنهادی براساس طبقه‌بندی روابط به زیر مجموعه‌های مشابه استوار است. اما با توجه به ویژگی روابط کاهندگی، افراز روابط به مجموعه‌های کاملاً مجزا صحیح نیست، لذا رویکرد الگوریتم فازی مورد توجه قرار گرفته است. در الگوریتم فازی، هر رابطه‌ی کاهندگی با یک درجه‌ی عضویت که عددی بین ۰ و ۱ است، به گروه‌های مختلف تعقیق پیدا می‌کند. هر چه رابطه‌ی موردنظر نسبت به

یک دسته دارای شباهت بیشتری باشد، دارای درجه‌ی عضویت بالاتری نسبت به آن مجموعه است. اما از میان روش‌های متعدد خوشه‌بندی، در این مطالعه الگوریتم خوشه‌بندی C-mean انتخاب شده است، زیرا نتایج حاصل فقط به توزیع داده‌ها بستگی دارد و مستقل از مراکز خوشه‌هاست. همچنین متناسب با ویژگی خاص روابط کاهندگی، تغییرات لازم در الگوریتم اعمال شده است. سپس مجموعه‌یی مشتمل بر ۴۵ رابطه‌ی کاهندگی تحت فرایند الگوریتم اصلاح شده قرار گرفته‌اند. با تجزیه و تحلیل نتایج حاصل به منظور دستیابی به خوشه‌بندی برتر، روابط مرزی از مجموعه‌ی روابط منتخب حذف و به بررسی دوباره‌ی مجموعه‌ی تقلیل یافته از روابط تحت الگوریتم خوشه‌بندی پرداخته شده است. در نهایت، خوشه‌بندی ۳۴ رابطه‌ی کاهندگی به ۱۴ خوشه به‌عنوان افراز مناسب روابط کاهندگی معرفی شده است. سپس به منظور تعیین مجموعه‌ی روابط مناسب در فلات ایران با استفاده از معیارهای خطا و معیار ضریب تعیین انطباق خوشه‌های مختلف با سوابق لرزه‌یی این منطقه بررسی شده است. نتایج حاکی از آن است که روابط ارائه شده در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۱۲^[۳] در رخدادهای پوسته‌یی و درون‌صفحه‌یی،^[۲] و نیز ۲۰۰۴ در رخدادهای پوسته‌یی،^[۱] بیشترین انطباق را با منطقه‌ی موردنظر به همراه دارند و در مقابل روابط ارائه شده در سال ۲۰۰۲،^[۳۸] تفاوت چشم‌گیری را به نمایش می‌گذارند. لیکن نکته‌ی حائز اهمیت آن است که نتیجه‌ی حاصل در این مطالعه به مجموعه‌ی روابط کاهندگی منتخب و نیز حذف روابط مرزی وابسته است و پژوهش بیشتر در این مورد به مطالعات آینده موکول می‌شود.

پانویس‌ها

1. fuzzy clustering
2. ground motion prediction equations
3. cluster
4. hard and soft clustering
5. classification
6. unsupervised classification
7. fuzzy C-mean clustering
8. horizontal distance to the surface projection of the rupture (Joyner-Boore distance), R_{JB} .
9. time-averaged shear-wave velocity over the top ۳۰ meters of the subsurface, $V_{S_{r0}}$.
10. Azimuth angle
11. focal depth
12. rake angle
13. geometric mean of the two horizontal components
14. not-a-number
15. near-source ground motion attenuation relationship
16. Pacific earthquake engineering research center
17. next generation attenuation
18. Iran strong motion network
19. building and housing research center
20. root mean square error
21. mean absolute error
22. coefficient of determination

منابع (References)

1. Takahashi, T. and et al. "Attenuation models for response spectra derived from Japanese strong-motion records accounting for tectonic source types", *13th World Conference on Earthquake Engineering*, paperNO. 1271 (2004).
2. Zhao, J. and et al. "Attenuation relations of strong ground motion in Japan using site classification based on predominant period", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(3), pp. 898-913 (2006).
3. Zafarani, H., Mousavi, M., Noorzad, A.S. and Ansari, A. "Calibration of the specific barrier model to Iranian plateau earthquakes and development of physically based attenuation relationships for Iran", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **28**(7), pp. 550-576 (2008).
4. Zafarani, H. and Soghra, M. "Simulation of ground motion in the Zagros region, Iran using the specific barrier model and stochastic method", *Bull. Seismol. Soc. Am.*, **102**(5), pp. 2031-2045 (2012).
5. Elnashai, A.S. and Di Sarno, L., *Earthquake Characteristics in Fundamentals of Earthquake Engineering*, Wiley, pp. 366 (2008).

6. Jain, A.K., *Algorithms for Clustering Data: Prentice Hall Advanced Reference Series*, Prentice Hall College Div. (1988).
7. Hoepfner, F., Klawonn, F., Kruse, R. and Runkler, T., *Fuzzy Cluster Analysis: Methods For Classification Data Analysis And Image Recognition*, John Wiley & Sons, LTD (2000).
8. Gan, G., Ma, C. and Wu, J., *Data Clustering: Theory, Algorithms, and Applications*, American Statistical Association and the Society for Industrial and Applied Mathematics (2007).
9. Sato-Ilic, M.C. and Jain, L., *Innovations in Fuzzy Clustering: Theory and Applications*, Springer, **205**, 152 p. (2006).
10. Zadeh, L.A. "Fuzzy sets", *Information and Control*, **8**(3), pp. 338-353 (1965).
11. Bezdek, J., *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithm*, Plenum Press (1981).
12. Kaklamanos, J.G., Baise, L.M. and Boore, D. "Technical note: Estimating unknown input parameters when implementing the NGA ground-motion prediction equations in engineering practice", *Earthquake Spectra*, **27**(4), pp. 1219-1235 (2011).
13. Beyer, K. and Bommer, J. "Relationships between median values and between aleatory variabilities for different definitions of the horizontal component of motion", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **96**(4A), pp. 1512-1522 (2006).
14. Douglas, J., *Ground Motion Estimation Equations 1964-2010*, Pacific Earthquake Engineering Research Center College of Engineering, University of California, Berkeley (2011).
15. Ghodrati Amiri, G., Khorasani, M., Hessabi, R. and Razavian Amiri, S.A. "Ground-motion prediction equations of spectral ordinates and arias intensity for Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, **14**(1), pp. 1-29 (2010).
16. Xie, X.L. and Beni, G. "A validity measure for fuzzy clustering", *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions*, **13**(8), pp. 841-847 (1991)
17. Abrahamson, N.A. and Silva, W.J. "Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes", *Seismological Research Letters*, **68**(1), pp. 94-127 (1997).
18. Boore, D.M. and Atkinson, G.M. "Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 sec and 10.0 sec.", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 99-138 (2008).
19. Campbell, K.W. and Bozorgnia, Y. "NGA ground motion model for the geometric mean horizontal 139 component of PGA, PGV, PGD and 5% damped linear elastic response spectra for periods ranging from 0.01 to 10 sec.", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 139-171 (2008).
20. Abrahamson, N.A. and Silva, W.J. "Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 67-97 (2008).
21. Chiou, B.S. and Youngs, Y.Y. "An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 173-215 (2008).
22. Idriss, I.M. "An NGA empirical model for estimating the horizontal spectral values generated by shallow crustal earthquakes", *Earthquake Spectra*, **24**(1), pp. 217-242 (2008).
23. Youngs, R.R., Chiou, S.-J., Silva, W.J. and Humphrey, J.R. "Strong ground motion attenuation relationships for subduction zone earthquakes", *Seismological Research Letters*, **68**(1), pp. 58-73 (1997).
24. Atkinson, G.M. and Boore, D.M. "Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to cascadia and other regions", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **93**(4), pp. 1703-1729 (2003).
25. Kuehn, N.M., Scherbaum, F. and Riggelsen, C. "Deriving empirical ground-motion models: Balancing data constraints and physical assumptions to optimize prediction capability", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(4), pp. 2335-2347 (2009).
26. Field, E.H. "A modified ground-motion attenuation relationship for southern california that accounts for detailed site classification and a basin-depth effect", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **90**(6B), pp. 209-221 (2000).
27. Goda, K. and Hong, H.P. "Spatial correlation of peak ground motions and response spectra", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(1), pp. 354-365 (2008).
28. Hong, H.P., Zhang, Y. and Goda, K. "Short note: Effect of spatial correlation on estimated ground-motion prediction equations", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(2A), pp. 928-934 (2009).
29. Ambraseys, N.N., Douglas, J., Sarma, S.K. and Smit, P.M. "Equations for the estimation of strong ground motions from shallow crustal earthquakes using data from europe and the middle east: Horizontal peak ground acceleration and spectral acceleration", *Bulletin of Earthquake Engineering*, **3**(1), pp. 1-53 (2005).
30. Akkar, S. and Bommer, J.J. "Empirical equations for the prediction of PGA, PGV and spectral accelerations in Europe, the mediterranean region and the middle east", *Seismological Research Letters*, **81**(2), pp. 195-206 (2010).
31. Bindi, D., Luzi, L. and Pacor, F. "Interevent and interstation variability computed for the Italian accelerometric archive (ITACA)", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **99**(4), pp. 2471-2488 (2009a).
32. Bindi, D., Luzi, L., Pacor, F., Sabetta, F. and Massa, M. "Towards a new reference ground motion prediction equation for Italy: Update of the sabetta-pugliese (1996)", *Bull. Earthquake Eng.*, **7**(3), pp. 591-608 (2009c).
33. Bindi, D., Luzi, L., Mass, M. and Pacor, F. "Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian accelerometric archive (ITACA)", *Bull. Earthquake Eng.*, **8**(5), pp. 1209-1230 (2010).

34. Gülkan, P. and Kalkan, E. "Attenuation modeling of recent earthquakes in Turkey", *Journal of Seismology*, **6**(3), pp. 397-409 (2002).
35. Kalkan, E. and Gulkan, P. "Site-dependent spectra derived from ground motion records in Turkey", *Earthquake Spectra*, **20**(4), pp. 1111-1138 (2004).
36. Ozbeya, C., Saria, A., Manuela, L., Erdikb, M. and Fahjanb, Y. "An empirical attenuation relationship for Northwestern Turkey ground motion using a random effects approach", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **24**, pp. 115-125 (2004).
37. Akkar, S. and Cagnan, Z. "A local ground-motion predictive model for Turkey, and its comparison with other regional and global ground-motion models", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **100**(6), pp. 2978-2995 (2010).
38. Khademi, M.H. "Attenuation of peak and spectral acceleration in the persian plateau", *12th European Conference on Earthquake Engineering*, p. 330 (2002).
39. Ghasemi, H., Zare, M., Fukushima, Y. and Koketsu, K. "An empirical spectral ground-motion model for Iran", *Journal of Seismology*, **13**(14), p. 499-515 (2009).
40. Saffari, H. and et al. "Updated PGA, PGV, and spectral acceleration attenuation relations for Iran", *Earthquake Spectra*, **28**(1), pp. 257-276 (2012).
41. Sharma, M.L., Douglas, J., Bungam, H. and Kotadia, J. "Ground-motion prediction equations based on data from the Himalayan and Zagros regions", *Journal of Earthquake Engineering*, **13**(8), pp. 1191-1210 (2009).
42. Fukushima, Y., Berge-Thierry, C., Volant, PH., Griot-Pommera, D. and Cotton, F. "Attenuation relationship for west eurasia determined with recent near fault records from California, Japan, and Turkey", *Journal of Earthquake Engineering*, **7**(4), pp. 573-598 (2003).
43. Lin, P. and Lee, Ch. "Ground-motion attenuation relationships for subduction-zone earthquakes in north-eastern Taiwan", *Bulletin of the Seismological Society of America*, **98**(1), pp. 220-240 (2008).
44. Akyol, N. and Karagoz, O. "Empirical attenuation relationships for western Anatolia", *Turkey. Turkish Journal of Earth Sciences*, **18**(3), pp. 351-382 (2009).
45. Turchin, P., Grinin, L., de Munck, V.C. and Korotayev, A., *History and Mathematics: Historical Dynamics and Development of Complex Societies*, Scientific Literature and Textbooks, URSS (2007).
46. Mousavi, M., Ansari, A., Zafarani, H. and Azarbakht, A. "Selection of ground motion prediction models for seismic hazard analyzes in Zagros region, Iran", *Journal of Earthquake Engineering*, **16**(8), pp. 1-24 (2012).