

## پیش‌بینی آماری پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی

محسن گرامی،\* عباس سیوندی‌پور، هادی تقدیسی

دانشکده مهندسی عمران دانشگاه سمنان

تاریخ: دریافت ۹۰/۱۲/۱۴ پذیرش ۹۱/۸/۱۴

### چکیده

پیش‌بینی محل وقوع زلزله‌های آتی همراه با تعیین درصد احتمال رخداد، می‌تواند در کاهش خطرات ناشی از زلزله بسیار سودمند باشد. تعیین محل‌های پیش‌بینی شده، سبب افزایش توجه به طراحی، به‌سازی لرزه‌ای و ارزیابی قابلیت اعتمادپذیری سازه‌های موجود در این مکان‌ها می‌شود. در پیش‌بینی زمان وقوع زلزله فرضیه‌ها و نظریه‌های گسترده‌ای مطرح است. هنوز شیوه‌ای دقیق برای پیش‌بینی زمان رخداد زلزله‌های آتی مورد تأیید قرار نگرفته است. در مورد پیش‌بینی بزرگی زلزله، بررسی‌های گسترده‌ای انجام شده است، ولی در زمینه پهنه‌بندی مکان رخداد زلزله احتمالی هنوز هیچ پژوهشی صورت نگرفته است. در این پژوهش با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی خود سازمان یافته، در استان‌های سمنان و قم، مکان‌هایی که احتمال رخداد زلزله آتی وجود دارد، پیش‌بینی شده است. شبکه‌های عصبی مصنوعی انتخاب شده در این تحقیق، با دریافت الگوهای ورودی قادر به استخراج مشخصات الگوهای پیچیده‌ای از داده‌های ورودی (کاتالوگ زمین لرزه‌ها) است. سپس با پژوهش‌های آماری انجام شده، نقشه پهنه‌بندی مکان زلزله احتمالی ترسیم شده است. برای انجام این کار مشخصات زلزله‌های رخ داده بین سال‌های ۱۹۰۳ تا ۲۰۱۲ در استان‌های مورد نظر از پایگاه‌های مختلف لرزه‌ای جمع‌آوری شد. با توجه به نقشه‌های به‌دست آمده، بیش‌ترین احتمال وقوع زلزله در استان قم، در منطقه مرکزی این استان با احتمال ۳۱/۶ درصد و در استان سمنان در محدوده شمالی این استان با احتمال ۲۸/۹ درصد پیش‌بینی شده است.

**واژه‌های کلیدی:** پیش‌بینی زلزله، نقشه پهنه‌بندی، خطر زلزله، شبکه عصبی مصنوعی، بررسی‌های آماری

abbas.sivandi@gmail.com

\*نویسنده مسئول

## مقدمه

سه شاخص اصلی یک زلزله شامل زمان، بزرگی و محل وقوع از جمله عدم قطعیت‌هایی هستند که همواره در پژوهش‌های محققان مورد توجه بوده است. در بررسی قابلیت اعتمادپذیری لرزه‌ای سازه عدم قطعیت‌های زلزله نقش اساسی دارد. در پیش‌بینی مؤلفه زمان رخداد زلزله، هنوز روشی قابل اطمینان که دارای دقت مطلوب باشد تأیید نشده است. در سال‌های اخیر زلزله‌شناسان و مهندسان زلزله برای کاهش خطرات ناشی از زلزله، پژوهش‌های خود را در زمینه پیش‌بینی زلزله، بر روی شاخص‌های بزرگی و محل وقوع زلزله متمرکز کرده‌اند. برآورد درصد احتمال وقوع زلزله‌های آتی در مناطق پیش‌بینی شده، می‌تواند در افزایش توجه به طراحی سازه‌ها در مکان‌های پیش‌بینی شده و همچنین به‌سازی لرزه‌ای سازه‌های موجود در این محل‌ها نقش اساسی داشته باشد [۱]، [۲]، [۳]، [۴]. در سال‌های اخیر برای پیش‌بینی مؤلفه‌های زلزله از شیوه‌های گوناگونی از جمله تحلیل داده‌های لرزه‌ای [۲]، کنترل پیش‌نشان‌گرها [۳]، کنترل مختصات جغرافیایی [۴]، مدل‌های آماری احتمالاتی [۵]، شبکه‌های عصبی [۶] و ... استفاده شده است. یاماشینا در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش‌های آماری، به پیش‌بینی زلزله‌های ژاپن پرداخت. تحقیقات وی بر اساس این فرضیه بود که یک جفت زلزله متوالی با بزرگی یک‌سان ممکن است از سیگنال یک زلزله بزرگ قریب‌الوقوع باشند. وی در پژوهش خود دو گروه زلزله با احتمال وقوع ۱۰ تا ۲۰ درصد و ۲۰ تا ۳۰ درصد را پیش‌بینی کرد. درصد موفقیت پیش‌بینی‌های وی با استفاده از آزمون جابه‌جایی زمان، ۲۰٪ برای گروه اول و ۳۴٪ برای گروه دوم بود [۷]. اشتري جعفری در سال ۲۰۱۰ در تحقیقات خود به پیش‌بینی زلزله بزرگ آینده تهران با حداکثرسازی چگالی احتمالاتی شرطی با استفاده از ۶ مدل آماری پرداخت [۸]. عادل‌ی و پناکات در سال ۲۰۰۹ یک شبکه عصبی احتمالاتی برای پیش‌بینی بزرگی زلزله‌های بین ۴/۵ تا ۶ ریشتر پیشنهاد کردند [۹]. کولاس و همکاران در سال ۲۰۰۹ با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی با کنترل گاز رادون مدلی برای پیش‌بینی زلزله ارائه کردند. در مدل آن‌ها از داده‌های ۱۴۷ زمین لرزه استفاده شد که دارای میانگین خطای ۳/۲٪ بود [۱۰]. مختاری در سال ۲۰۱۰ با استفاده از پیش‌نشان‌های زلزله و کنترل داده‌های لرزه‌ای منطقه شمال ایران به پیش‌بینی زلزله‌های محتمل در این منطقه پرداخت [۲].

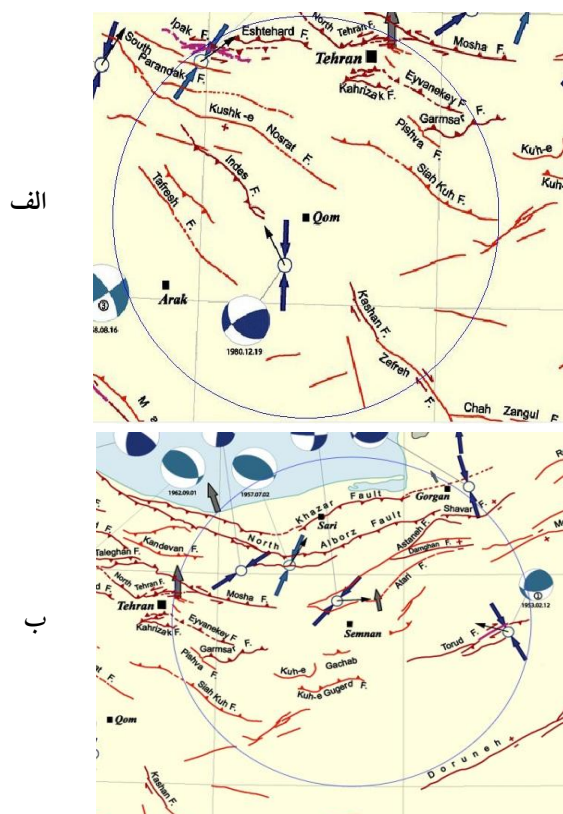
موسترا و همکاران در سال ۲۰۱۰ با استفاده از سیگنال‌های الکتریکی لرزه‌ای و شبکه‌های عصبی مصنوعی به پیش‌بینی بزرگی زلزله‌های بزرگ‌تر از ۵/۲ ریشتر در کشور یونان پرداختند [۳]. علامه‌زاده در سال ۲۰۰۸ با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی به بررسی پیش‌یابی توزیع پس لرزه‌های زلزله بم پرداخت [۱۱]. با توجه به این‌که الگوهای لرزه‌ای، قبل از وقوع زمین لرزه‌های بزرگ به‌طور دقیق مشخص نیست، نیاز به مدل‌های آماری پیشرفته نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی انکارناپذیر است. با توجه به این‌که ساختارهای متنوع موجود در زمین سبب تضعیف موج و ایجاد ماهیت تصادفی و غیرقطعی در سیگنال‌های لرزه‌ای می‌شود، برای شناسایی الگوی سیگنال‌های لرزه‌ای باید به شکلی غیرسیستماتیک با مسائل برخورد کرد. برتری و توانایی روش‌های مدرن مبتنی بر استدلال تقریبی است و می‌تواند به شکلی غیر مستقیم با مسائل برخورد کنند. در مقایسه با متدهای کلاسیک شناسایی الگو، طراحی شبکه‌های عصبی، به‌طور مستقیم وابسته به داده‌های حقیقی است، به‌همین خاطر این طراحی‌ها به مدل آزاد معروفند. در کاربردهای مؤلفه‌های وابسته به زمان، نظیر کاتالوگ زمین لرزه‌ها، الگوهای جدید را می‌توان جای‌گزین الگوهای قدیمی کرد. در این پژوهش مشخصات زلزله‌های بزرگ‌تر از ۴/۵ ریشتر رخ داده در استان‌های قم و سمنان بین سال‌های ۱۹۰۳ تا ۲۰۱۲ از پایگاه‌های مختلف لرزه‌ای جمع‌آوری شده است. با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی کوهونن<sup>۱</sup> به پیش‌مکان‌یابی زلزله بزرگ احتمالی در استان‌های قم و سمنان پرداخته شده است. دلیل انتخاب شبکه عصبی کوهونن این است که این شبکه‌ها قادرند حجم زیادی از اطلاعات ورودی (مانند کاتالوگ زمین لرزه) را به‌طور هم‌زمان و به‌صورت موازی دسته‌بندی کنند و الگوهای لرزه‌ای را به‌خوبی تشخیص دهند. استفاده از شبکه‌های عصبی کوهونن به‌دلیل وجود مدل‌های آماری در الگوریتم درونی سبب شده است بر خلاف اغلب روش‌های آماری نیازی به فرضیه‌های زیاد نداشته باشد. سپس با توجه به بررسی آماری انجام شده درصد احتمال وقوع زلزله در هر منطقه از استان‌های مورد نظر ارزیابی شد. پس از بررسی آماری داده‌های پیش‌بینی شده، نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی در استان‌های مورد نظر ترسیم گردیده است.

---

۱. Kohonen

## خصوصیات ژئوفیزیکی و لرزه‌خیزی منطقه

برای اختصاص داده‌های لرزه‌ای به شبکه عصبی، خصوصیات دقیق لرزه‌ای منطقه، مورد نیاز است. محدوده بررسی شده استان قم دارای شعاع ۱۵۰ کیلومتری (شامل استان‌های قم، سمنان، تهران، اراک و اصفهان) است. محدوده بررسی شده برای استان سمنان دارای شعاع ۲۰۰ کیلومتری (شامل استان‌های مازندران، گلستان، یزد و تهران) است. در شکل ۱ گسل‌های فعال موجود در محدوده بررسی شده در استان‌های مورد نظر نشان داده شده است.

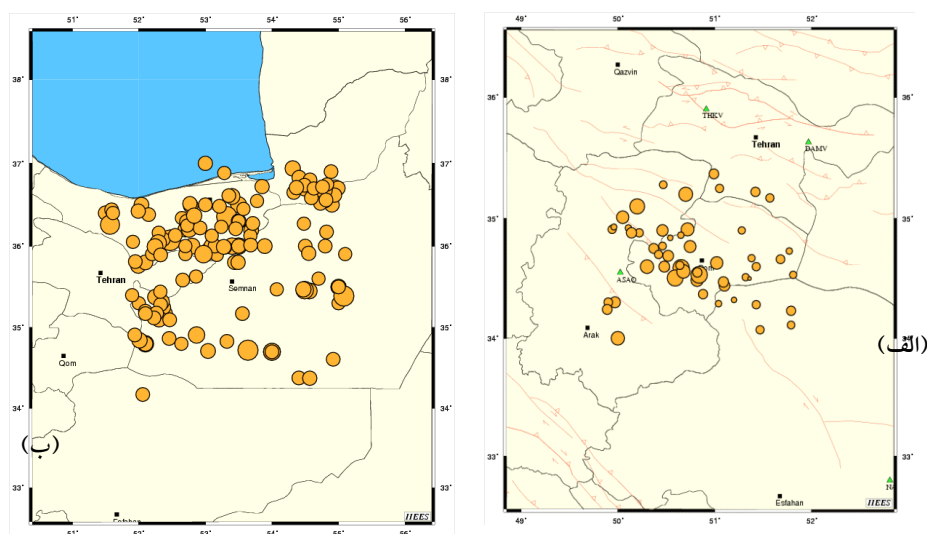


شکل ۱. گسل‌های فعال موجود در محدوده انتخابی برای الف) استان قم و ب) استان سمنان سابقه و مشخصات زلزله‌های بزرگ‌تر از ۴/۵ ریشتر رخ داده در استان‌های قم و سمنان از سال ۱۹۰۳ تا ۲۰۱۲ استخراج شد. برای استخراج داده‌های لرزه‌ای از پایگاه‌های مختلف استفاده شده است. مشخصات زلزله‌های مورد نظر در جدول‌های ۱ و ۲ به ترتیب برای استان‌های قم و سمنان نشان داده شده است.

جدول ۱. زلزله‌های بزرگ‌تر از ۴/۵ ریشتر رخ داده در استان قم

| No. | Date | lat   | long  | Mag    | Ref. | No. | Date | lat   | long  | Mag    | Ref. |
|-----|------|-------|-------|--------|------|-----|------|-------|-------|--------|------|
| 1   | 1937 | 34.8  | 52.1  | mb:5.5 | ISS  | 13  | 1968 | 35.06 | 50.16 | mb:5.2 | EHB  |
| 2   | 1951 | 34.8  | 52.1  | mb:5   | ISS  | 14  | 1970 | 35.13 | 50.76 | mb:4.8 | EHB  |
| 3   | 1954 | 35.3  | 52    | M:4.5  | CP   | 15  | 1971 | 34.64 | 50.36 | mb:4.7 | EHB  |
| 4   | 1960 | 34.5  | 50.5  | M:5.1  | FS   | 16  | 1975 | 35.62 | 50.26 | mb:4.7 | EHB  |
| 5   | 1962 | 35.56 | 49.72 | mb:5.6 | EHB  | 17  | 1977 | 34.84 | 52.01 | mb:5.3 | EHB  |
| 6   | 1962 | 35.6  | 49.9  | mb:4.5 | BCIS | 18  | 1979 | 35.2  | 52.1  | mb:4.6 | ISC  |
| 7   | 1962 | 35.62 | 50.06 | mb:5.5 | EHB  | 19  | 1979 | 34.87 | 52.45 | mb:4.6 | EHB  |
| 8   | 1962 | 35.53 | 50.06 | M:5    | NOW  | 20  | 1980 | 34.47 | 50.65 | Mw:6.2 | EHB  |
| 9   | 1963 | 35.7  | 49.9  | M:5.5  | NAB  | 21  | 1980 | 34.43 | 50.63 | Mw:5.7 | EHB  |
| 10  | 1963 | 33.59 | 51.54 | mb:4.5 | NOW  | 22  | 1982 | 34.74 | 50.98 | mb:4.5 | ISC  |
| 11  | 1964 | 35.52 | 50.18 | mb:5.1 | EHB  | 23  | 1982 | 35.11 | 52.31 | MS:5.4 | EHB  |
| 12  | 1967 | 35.4  | 51.9  | mb:4.5 | ISC  | 24  | 1985 | 34.47 | 50.69 | mb:4.7 | ISC  |

| No. | Date | lat   | long  | Mag    | Ref.  |
|-----|------|-------|-------|--------|-------|
| 25  | 1988 | 34.48 | 50.79 | mb:4.5 | ISC   |
| 26  | 1988 | 34.41 | 50.25 | mb:4.5 | ISC   |
| 27  | 1988 | 35.38 | 52.25 | Mw:5.2 | EHB   |
| 28  | 1988 | 35.17 | 52.26 | mb:4.9 | EHB   |
| 29  | 1988 | 35.12 | 52.23 | mb:4.7 | ISC   |
| 30  | 1993 | 35.17 | 52.1  | mb:4.6 | EHB   |
| 31  | 2003 | 35.17 | 50.5  | mb:4.7 | EHB   |
| 32  | 2005 | 34.17 | 52.06 | ML:4.6 | IIEES |
| 33  | 2007 | 34.52 | 50.84 | ML:5.6 | IIEES |
| 34  | 2007 | 34.91 | 51.94 | ML:4.6 | IIEES |



شکل ۲. نقشه لرزه‌خیزی برای زلزله‌های بزرگ‌تر از ۴/۵ ریشتر برای (الف) استان قم (ب) استان سمنان

جدول ۲. زلزله‌های بزرگ‌تر از ۴/۵ ریشتر رخ داده در استان سمنان

| No. | Date | lat   | long  | Mag.   | Ref. | No. | Date | lat   | long  | Mag.   | Ref. |
|-----|------|-------|-------|--------|------|-----|------|-------|-------|--------|------|
| 1   | 1903 | 36.5  | 54.9  | Ms:5   | MEA  | 48  | 1957 | 35.9  | 52.7  | M:4.5  | CCP  |
| 2   | 1917 | 36.94 | 54.31 | Ms:5.3 | AMB  | 49  | 1957 | 35.9  | 52.2  | M:4.5  | CCP  |
| 3   | 1924 | 35.5  | 55    | mb:5   | ISS  | 50  | 1957 | 36.16 | 52.3  | M:4.5  | PT   |
| 4   | 1924 | 37    | 53    | Ms:4.9 | MEA  | 51  | 1957 | 36    | 52.7  | M:4.5  | PT   |
| 5   | 1927 | 34.72 | 53.64 | mb:6.9 | AMB  | 52  | 1958 | 36.13 | 52.55 | mb:4.7 | NOW  |
| 6   | 1927 | 34.7  | 54    | mb:5.2 | ISS  | 53  | 1958 | 36.5  | 53    | M:4.6  | PT   |
| 7   | 1927 | 34.7  | 54    | mb:4.7 | ISS  | 54  | 1958 | 36.21 | 52.76 | mb:4.5 | NOW  |
| 8   | 1927 | 34.7  | 54    | mb:5.7 | ISS  | 55  | 1958 | 36.27 | 52.8  | M:5    | NOW  |
| 9   | 1927 | 34.7  | 54    | mb:5.7 | ISS  | 56  | 1959 | 36.49 | 52.78 | mb:5   | NOW  |
| 10  | 1927 | 34.7  | 54    | mb:4.7 | ISS  | 57  | 1962 | 36.6  | 54.8  | M:4.9  | CCP  |
| 11  | 1928 | 35.5  | 55    | M:5.2  | ISS  | 58  | 1962 | 36.6  | 54.8  | Ms:4.5 | MEA  |
| 12  | 1930 | 35.76 | 51.99 | Ms:5.2 | AMB  | 59  | 1962 | 36.55 | 54.79 | Ms:4.8 | EHB  |
| 13  | 1930 | 35.8  | 52.1  | mb:5   | ISS  | 60  | 1964 | 36.8  | 54.57 | mb:4.6 | ISC  |
| 14  | 1932 | 36.5  | 53.5  | Ms:5.4 | MEA  | 61  | 1965 | 36.17 | 54.82 | mb:4.6 | ISC  |
| 15  | 1935 | 36.36 | 53.32 | mb:6.8 | AMB  | 62  | 1966 | 35.8  | 53.44 | mb:4.9 | ISC  |
| 16  | 1935 | 36.48 | 53.21 | mb:4.7 | NAB  | 63  | 1967 | 35.4  | 51.9  | mb:4.5 | ISC  |
| 17  | 1935 | 36    | 53.1  | Ms:5.4 | MEA  | 64  | 1967 | 36.71 | 54.95 | mb:5.1 | ISC  |
| 18  | 1935 | 36    | 52.8  | Ms:5.4 | MEA  | 65  | 1967 | 36    | 53.89 | mb:5   | ISC  |
| 19  | 1935 | 36    | 53.5  | Ms:5.5 | MEA  | 66  | 1967 | 36.19 | 53.69 | mb:5   | ISC  |
| 20  | 1935 | 36    | 53.4  | Ms:5.6 | MEA  | 67  | 1968 | 36.61 | 53.35 | mb:4.6 | ISC  |
| 21  | 1935 | 36.3  | 53.5  | mb:4.5 | ISS  | 68  | 1968 | 36.72 | 53.85 | mb:4.8 | ISC  |
| 22  | 1935 | 36.3  | 53.5  | Ms:5.1 | MEA  | 69  | 1968 | 35.8  | 53.49 | mb:4.9 | ISC  |
| 23  | 1935 | 36    | 53.5  | Ms:4.9 | MEA  | 70  | 1969 | 36.74 | 54.49 | mb:4.7 | EHB  |
| 24  | 1935 | 36.3  | 53.5  | mb:4.5 | ISS  | 71  | 1971 | 36.2  | 52.76 | mb:5.2 | EHB  |
| 25  | 1937 | 34.8  | 52.1  | mb:5.5 | ISS  | 72  | 1972 | 36.21 | 53.46 | mb:4.6 | ISC  |
| 26  | 1939 | 35.45 | 54.56 | Ms:5.4 | NOW  | 73  | 1972 | 36.51 | 52.77 | mb:4.8 | ISC  |
| 27  | 1940 | 36.5  | 52.04 | M:5    | NOW  | 74  | 1973 | 36.89 | 53.29 | M:4.5  | ISC  |
| 28  | 1942 | 35.3  | 55    | M:4.5  | CCP  | 75  | 1974 | 35.81 | 51.95 | M:4.6  | ISC  |
| 29  | 1944 | 36.7  | 54.5  | mb:5.4 | BER  | 76  | 1974 | 36.22 | 52.92 | mb:4.6 | EHB  |
| 30  | 1944 | 36    | 54.8  | M:4.7  | CCP  | 77  | 1975 | 36    | 53.15 | mb:4.6 | ISC  |
| 31  | 1945 | 35.18 | 52.4  | mb:4.7 | BER  | 78  | 1977 | 34.84 | 52.01 | mb:5.3 | EHB  |
| 32  | 1951 | 34.8  | 52.1  | mb:5   | ISS  | 79  | 1977 | 36.7  | 54.99 | mb:4.9 | ISC  |
| 33  | 1951 | 35.89 | 53.17 | M:4.5  | NOW  | 80  | 1979 | 35.2  | 52.1  | mb:4.6 | ISC  |
| 34  | 1952 | 36.6  | 53.4  | Ms:5.4 | ULM  | 81  | 1979 | 36.34 | 52.65 | mb:4.5 | ISC  |
| 35  | 1952 | 36.65 | 54.33 | Ms:4.6 | NOW  | 82  | 1979 | 34.87 | 52.45 | mb:4.6 | EHB  |
| 36  | 1953 | 35.39 | 55.08 | mb:6.9 | A28  | 83  | 1980 | 35.25 | 52.38 | mb:4.5 | ISC  |
| 37  | 1953 | 35.6  | 54.7  | M:4.5  | CP   | 84  | 1982 | 36.13 | 53.68 | mb:4.5 | ISC  |
| 38  | 1953 | 36.83 | 54.41 | mb:4.8 | BER  | 85  | 1982 | 35.47 | 54.07 | mb:4.5 | EHB  |
| 39  | 1953 | 35.9  | 55.1  | M:4.5  | CP   | 86  | 1982 | 35.11 | 52.31 | MS:5.4 | EHB  |
| 40  | 1953 | 35.5  | 55    | M:4.7  | CP   | 87  | 1983 | 36.04 | 52.29 | Mw:5.5 | EHB  |
| 41  | 1953 | 36    | 54.5  | mb:4.7 | STR  | 88  | 1983 | 35.99 | 52.24 | mb:5.4 | EHB  |
| 42  | 1954 | 35.3  | 52    | M:4.5  | CP   | 89  | 1984 | 36.62 | 54.94 | mb:4.9 | EHB  |
| 43  | 1957 | 34.91 | 52.87 | mb:5.5 | NOW  | 90  | 1985 | 36.27 | 53.71 | mb:4.7 | ISC  |

|    |      |       |       |        |     |    |      |       |       |        |     |
|----|------|-------|-------|--------|-----|----|------|-------|-------|--------|-----|
| 44 | 1957 | 36.4  | 51.5  | Ms:4.8 | MEA | 91 | 1985 | 35.58 | 52.66 | mb:4.7 | EHB |
| 45 | 1957 | 36.07 | 52.47 | mb:7   | AMB | 92 | 1985 | 36.68 | 54.77 | Mw:6.1 | EHB |
| 46 | 1957 | 36.08 | 52.37 | Ms:4.6 | NOW | 93 | 1985 | 36.52 | 54.73 | mb:4.6 | ISC |
| 47 | 1957 | 36.2  | 52.7  | M:5    | PT  | 94 | 1985 | 36.58 | 54.59 | mb:4.7 | ISC |

ادامه جدول ۲

| No. | Date  | lat   | long  | Mag.   | Ref.  |
|-----|-------|-------|-------|--------|-------|
| 95  | 1985  | 36.7  | 54.63 | mb:4.5 | ISC   |
| 96  | 1985  | 36.9  | 54.89 | mb:4.7 | ISC   |
| 97  | 1986  | 36.01 | 53.68 | mb:4.6 | ISC   |
| 98  | 1986  | 34.38 | 54.4  | mb:4.6 | ISC   |
| 99  | 1988  | 35.32 | 52.34 | Mw:5.3 | EHB   |
| 100 | 1988  | 35.38 | 52.25 | Mw:5.2 | EHB   |
| 101 | 1988  | 35.28 | 52.33 | mb:4.6 | EHB   |
| 102 | 1988  | 35.1  | 52.46 | mb:4.7 | ISC   |
| 103 | 1988  | 35.17 | 52.26 | mb:4.9 | EHB   |
| 104 | 1988  | 35.12 | 52.23 | mb:4.7 | ISC   |
| 105 | 1988  | 34.37 | 54.57 | mb:4.8 | ISC   |
| 106 | 1990  | 35.9  | 52.97 | Mw:6   | EHB   |
| 107 | 1990  | 35.99 | 53.29 | mb:4.6 | ISC   |
| 108 | 1990  | 35.91 | 54.55 | mb:4.8 | EHB   |
| 109 | 1990  | 36.13 | 53.1  | mb:4.5 | ISC   |
| 110 | 1991  | 35.44 | 52.32 | mb:4.5 | ISC   |
| 111 | 1991  | 36.23 | 53.24 | mb:4.5 | ISC   |
| 112 | 1991  | 35.99 | 53.27 | mb:5   | ISC   |
| 113 | 1992  | 36.29 | 52.72 | mb:5.1 | EHB   |
| 114 | 1993  | 34.83 | 53.32 | mb:4.7 | ISC   |
| 115 | 1993  | 36.75 | 54.83 | mb:4.5 | EHB   |
| 116 | 1993  | 35.17 | 53.56 | mb:4.6 | EHB   |
| 117 | 1993  | 35.17 | 52.1  | mb:4.6 | EHB   |
| 118 | 1993  | 36.55 | 53.78 | mb:4.5 | ISC   |
| 119 | 1994  | 36.72 | 54.76 | mb:4.7 | ISC   |
| 120 | 1994  | 36.05 | 51.91 | mb:4.5 | ISC   |
| 121 | 1997  | 36.27 | 54.48 | mb:4.5 | EHB   |
| 122 | 1998  | 36.38 | 52.15 | mb:4.6 | EHB   |
| 123 | 1999  | 36.45 | 53.57 | mb:4.5 | EHB   |
| 124 | 2000  | 36.71 | 54.37 | Mw:4.9 | EHB   |
| 125 | 2002  | 36.42 | 51.99 | mb:4.8 | EHB   |
| 126 | /2002 | 35.89 | 52.33 | mb:4.7 | NEIC  |
| 127 | 2003  | 35.63 | 52.86 | mb:4.5 | ISC   |
| 128 | 2003  | 34.61 | 54.92 | mb:4.6 | ISC   |
| 129 | 2004  | 36.26 | 51.57 | Ms:6.4 | EHB   |
| 130 | 2004  | 36.44 | 51.59 | ML:4.6 | IIEES |
| 131 | 2004  | 36.4  | 51.61 | ML:4.5 | IIEES |
| 132 | 2005  | 34.17 | 52.06 | ML:4.6 | IIEES |
| 133 | 2007  | 34.91 | 51.94 | ML:4.6 | IIEES |

|     |      |       |       |        |       |
|-----|------|-------|-------|--------|-------|
| 134 | 2007 | 34.71 | 53.04 | ML:5.1 | IIEES |
| 135 | 2008 | 36.25 | 52.73 | ML:4.5 | IIEES |
| 136 | 2010 | 35.46 | 54.49 | ML:5.9 | IIEES |
| 137 | 2010 | 35.47 | 54.47 | ML:5.2 | IIEES |

### معرفی شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده در این تحقیق

در سال‌های اخیر استفاده از هوش مصنوعی از جمله شبکه‌های عصبی در تحقیقات علمی رشد روز افزونی داشته است. اولین گام در به‌کار گرفتن شبکه‌های عصبی مصنوعی برای هدفی خاص، انتخاب شبکه مناسب است. مدلی از شبکه‌های عصبی مصنوعی که در دسته‌بندی و خوشه‌بندی داده به‌کار می‌رود، شبکه‌های عصبی خودسازمانده<sup>۱</sup> است. این مدل را اولین بار کوهونن معرفی کرد و به مدل کوهونن معروف گردید [۱۲]. هدف اساسی شبکه عصبی خودسازمانده کوهونن، تبدیل الگوی ورودی با ابعاد اختیاری، به الگوی گسسته یک یا دو بعدی است. هنگامی که الگوریتم شبکه عصبی خودسازمانده کوهونن هم‌گرا شد، الگوی مشخصات محاسبه شده با این الگوریتم، مشخصات آماری مهم فضای ورودی را نشان می‌دهد. این خاصیت حاکی از آن است که اگر داده‌های ورودی دارای یک توزیع غیرخطی در فضای ورودی باشد، الگوی خودسازمانده قادر است که بهترین مشخصه‌ها را از طریق خوشه‌بندی، برای تقریب توزیع موجود در داده‌های ورودی انتخاب کند. با توجه به این‌که الگوهای لرزه‌ای قبل از زمین لرزه‌های بزرگ ممکن است به‌وضوح مشخص نباشند، استفاده از تکنیک‌های تشخیص الگو با مدل‌های آماری پیشرفته نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی و مدل‌های بدون سرپرستی نظیر مدل‌های خودسازمان‌یافته برای شناسایی مناطق پرخطر لرزه‌ای پیشنهاد می‌شود. تفکر خودسازمان‌یافتگی توصیف منطقی خوبی برای پدیده‌های بدون مقیاس نظیر زلزله است. برای یافتن تغییرات کلی در سیستم گسلی قبل از وقوع زلزله‌های بزرگ، می‌توان از مدل‌های آماری پیشرفته نظیر شبکه‌های عصبی مصنوعی استفاده کرد. این مدل‌های آماری قادرند سیستم‌های بزرگ را به سیستم‌های کوچک نسبت داده و پس از بررسی زلزله‌های کوچک در منطقه بررسی شده روند تجمع زلزله‌های آینده را تخمین بزنند [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]، [۱۴].

۱. SOFM (Self Organized Feature Map)



## ۱. ساختار الگوریتم کوهونن به‌کارگیری شده

ساختار شبکه کوهونن بر پایه ردیفی از نرون‌ها با جای ثابت است. وزن نرون‌ها هر بار با الگوی ورودی به‌هنگام می‌شود. بزرگی تغییر وزن نرون‌ها وابسته خصوصیات نرون برنده است. بردار  $X$  به‌طور تصادفی از فضای ورودی انتخاب می‌شود. الگوی به‌هنگام شدن نرون‌ها در رابطه ۱ نشان داده شده است.

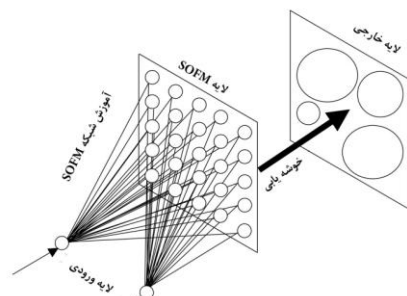
$$i^* = \arg_i \min d_i(w_i, x^k) \quad (1)$$

در این رابطه  $w_i$  وزن نرون  $i$ ام است. زمانی که نرون برنده پیدا شد، وزن نرون  $i$ ام بر طبق رابطه ۲ به‌هنگام می‌شود.

$$w_{i+1} = w_{i0} + \Delta w_i = w_{i0} + \rho \cdot \Phi(r_i, r_i^*) (x^k - w_{i0}) \quad (2)$$

در این رابطه  $\rho$  نسبت آموزش و  $\Phi(r_i, r_i^*)$  یک تابع همسایگی است [۱۲]، [۱۳].

شبکه عصبی انتخاب شده در این تحقیق برای پیش‌مکان‌یابی دارای ساختار ۹ در ۹ با توپولوژی دو بعدی با ۸۱ نرون برای بردارهای ورودی است. ورودی شبکه عصبی استفاده شده، مختصات جغرافیایی (طول و عرضی) زلزله‌ها بر پایه بزرگا (محلی، حجمی و گشتاوری) است. شبکه برای ۱۰۰۰ تکرار آموزش دیده است، پس از این دوره آموزشی، شبکه بر اساس توپولوژی بردارهای ورودی سازمان‌دهی می‌شود. سرانجام پس از تکمیل تعداد تکرارها شبکه بر روی کل فضای ورودی گسترش می‌یابد. ساختار شبکه عصبی به‌کار رفته در این تحقیق در شکل ۳ نشان داده شده است.

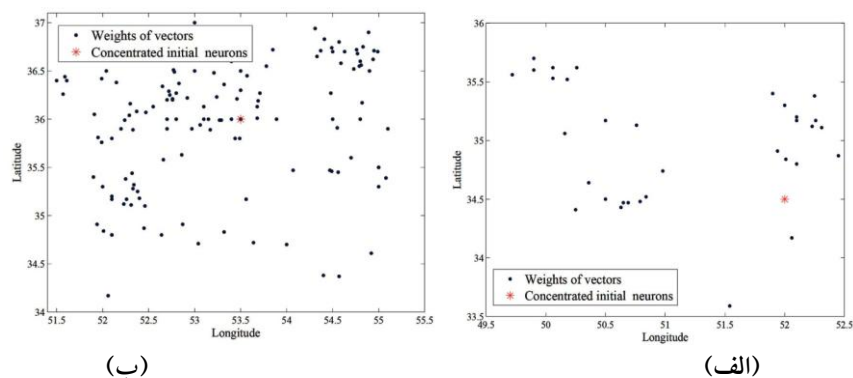


شکل ۳. ساختار شبکه عصبی کوهونن استفاده شده در این تحقیق

مطابق شکل ۳، شبکه عصبی مصنوعی استفاده شده در این تحقیق، نقشه‌ای به‌وجود می‌آورد که در شبکه‌ای دو بعدی مرتب شده است و با تنظیم وزن‌هایی که از ورودی مشترک گره‌ها به گره خروجی می‌رود. گره‌های خروجی به‌شدت با اتصالات محلی به هم متصل شده است.

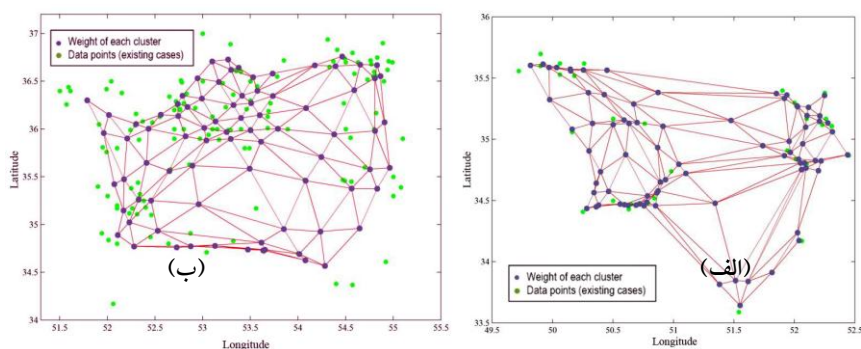
## ۲. روند آموزش و هم‌گرایی وزن‌های نرون‌ها

هر زمین‌لرزه بزرگ، احتمال رویداد زمین‌لرزه‌های بعدی را در یک فاصله از چشمه لرزه‌زا و برای یک دوره زمانی تغییر می‌دهد. ارزیابی احتمال خطر زمین‌لرزه برای دوره زمانی مشخص، تنها تا رخداد زمین‌لرزه بزرگ بعدی اعتبار دارد و بعد از رخداد یک زمین‌لرزه بزرگ‌تر از ۴/۵ باید محاسبات انجام شده را تجدید کرد. این نگرش آماری، عموماً از خوشه‌ای شدن زلزله‌ها در زمان یا تغییر در شرایط زمین‌شناسی و زمین‌ساختی نشأت می‌گیرد. در شکل ۴ داده‌های استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی مورد نظر نشان داده شده است. این داده‌ها شامل مشخصات جغرافیایی (طول و عرض) زلزله‌های رخ داده در استان‌های مورد نظر است.



شکل ۴. داده‌های استفاده شده برای آموزش شبکه عصبی الف) استان قم ب) استان سمنان

شکل ۵ نشان‌دهنده رفتار الگوریتمیک شبکه عصبی به کار رفته از نظر توپولوژی نرون‌ها در حین آموزش است.



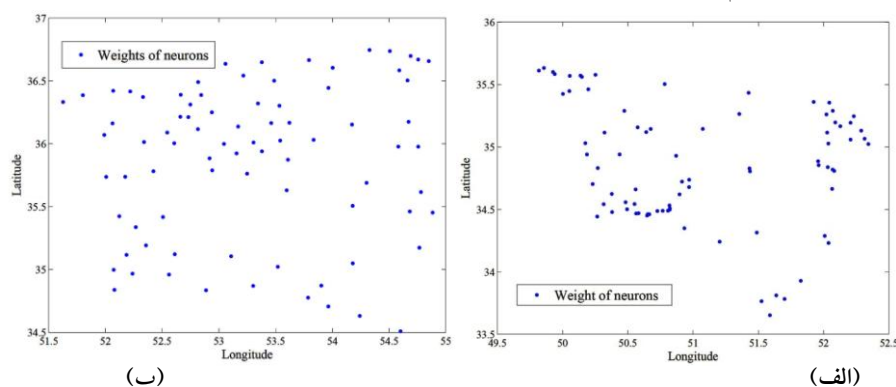
شکل ۵. نحوه هم‌گرایی در شبکه عصبی برای پیش‌بینی زمین‌لرزه‌ها در الف) استان قم ب) استان سمنان

با توجه به شکل ۵، نرون‌ها شروع به حرکت به سمت گروه‌های آموزشی مختلف می‌کنند و سبب هم‌گرا شدن شبکه عصبی می‌شوند. با وجود حجم فزاینده اطلاعات، عمل بازیابی و خلاصه کردن داده‌های ورودی، معیار خوبی از تابع چگالی احتمال داده‌های ورودی فراهم آورده است.

### پیش‌بینی مکان وقوع زلزله احتمالی

توان چشمه‌های لرزه‌زا برای ایجاد زمین‌لرزه بر اساس سابقه لرزه‌خیزی، میزان جنبش تکتونیکی و ابعاد گسل‌های موجود در این چشمه‌ها تعیین می‌شود. با داشتن سر چشمه‌های لرزه‌زا، با استفاده از خاصیت تجرید در شبکه عصبی کوهونن می‌توان گفت احتمال رخداد زمین‌لرزه در چشمه‌های خوشه شده به مراتب بیش‌تر است. در مدل‌های شبکه عصبی، یکی از الگوهای موردنظر که شناسایی آن‌ها مورد نظر است مکان خوشه‌ها است که راه حل تقریبی را برای یافتن نواحی لرزه‌زا و مناطق پرخطر ارائه می‌دهد. بنا بر این کاملاً بدیهی است که پس از شناسایی مناطق پرخطر لرزه‌ای منطقه عدم قطعیت کاهش پیدا کرده و ناحیه پیش‌بینی شده کوچک‌تر شود. بنا بر این، اگر ناحیه اعلان خطر تعیین شده با الگوریتم شبکه عصبی کوهونن منحصراً به چشمه‌های بالقوه زمین‌لرزه در آن ناحیه محدود شود، عدم قطعیت مکانی الگوریتم کاهش یافته و ناحیه پیش‌بینی شده کوچک‌تر می‌شود [۱۰]، [۱۱]، [۱۲].

در شکل ۶ مشخصات مکانی شامل طول و عرض جغرافیایی زلزله‌های پیش‌بینی شده با شبکه عصبی در استان‌های قم و سمنان نشان داده شده است.



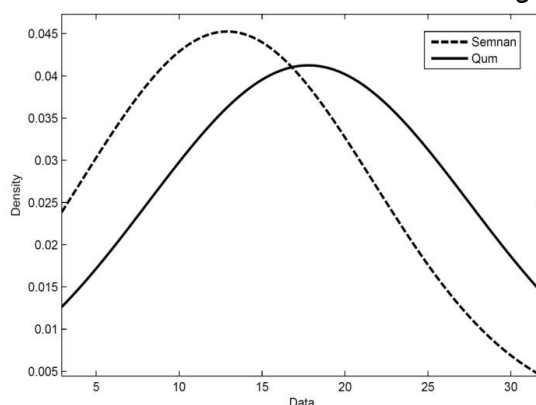
شکل ۶. داده‌های پیش‌بینی شده شبکه عصبی برای پیش‌یابی زمین‌لرزه‌ها در الف) استان قم  
ب) استان سمنان

### ترسیم نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی

پس از پیش‌بینی مکان وقوع زلزله احتمالی با شبکه‌های عصبی، داده‌های پیش‌بینی شده توسط تحلیل‌های آماری پردازش شدند. برای تحلیل داده‌ها از تابع چگالی احتمال و تابع احتمال تجمعی استفاده شد. تابع چگالی احتمال داده‌های آماری از رابطه ۳ به دست می‌آید.

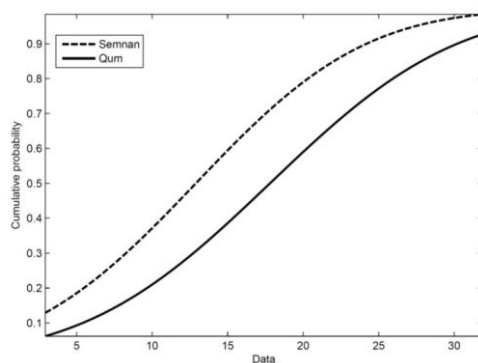
$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-(x-\mu)^2/(2\sigma^2)} \quad (3)$$

$\sigma^2$  نشان‌دهنده واریانس و  $\mu$  نشان‌دهنده میانگین است. تابع چگالی احتمالی داده‌های لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده در شکل ۷ نشان داده شده است.

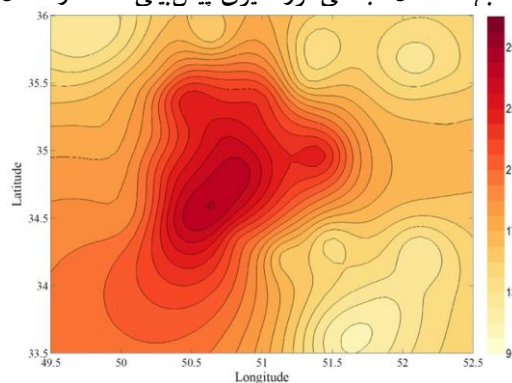


شکل ۷. مقایسه تابع چگالی احتمال لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده در استان‌های مورد نظر

میانگین داده‌های احتمالی، پیش‌بینی شده برای استان قم ۱۷/۸ و واریانس داده‌ها ۹۳/۵۳ است. برای استان سمنان نیز این مقادیر به ترتیب ۱۲/۸۱ و ۷۷/۶۹ است. تابع احتمال تجمعی درصد لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده برای استان‌های مورد نظر در شکل ۸ نشان داده شده است. نسبت مقدار احتمال تجمعی پیش‌بینی شده برای استان سمنان نسبت به استان قم در تمام احتمال‌های پیش‌بینی شده بیش‌تر است. برای داده‌های پیش‌بینی شده کم‌تر از ۱۶/۸٪، مقدار تابع چگالی احتمال برای استان سمنان بیش‌تر از استان قم است. بعد از تحلیل داده‌های آماری در شکل‌های ۹ و ۱۰ نقشه پهنه‌بندی درصد لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده برای استان‌های قم و سمنان نشان داده شده است. در نمودارهای نشان داده شده کانتورهای رنگی بیان‌گر درصد احتمال رخداد زلزله است.

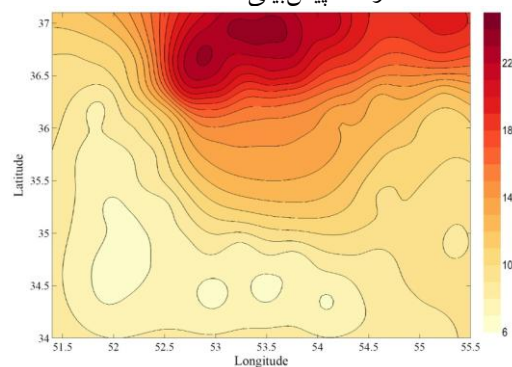


شکل ۸. مقایسه تابع احتمال تجمعی لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده در استان‌های مورد نظر



شکل ۹. نقشه پهنه‌بندی درصد لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده برای استان قم

از نقشه‌های پهنه‌بندی درصد لرزه‌خیزی می‌توان نتیجه گرفت که، بیش‌ترین احتمال وقوع زلزله در استان قم، در منطقه مرکزی این استان با احتمال  $31/6$  درصد و در استان سمنان در محدوده شمالی این استان با احتمال  $28/9$  درصد پیش‌بینی شده است



شکل ۱۰. نقشه پهنه‌بندی درصد لرزه‌خیزی پیش‌بینی شده برای استان سمنان

### نتیجه‌گیری

در پیش‌بینی زمان رخداد زلزله، هنوز روشی قابل اطمینان با دقت مطلوب تأیید نشده است. در سال‌های اخیر زلزله‌شناسان و مهندسين زلزله برای کاهش خطرات ناشی از زلزله، پژوهش‌های خود را در زمینه پیش‌بینی زلزله، روی عدم قطعیت‌ها، بزرگی و محل وقوع زلزله متمرکز کرده‌اند. در مورد پیش‌بینی بزرگی زلزله پژوهش‌های گسترده‌ای انجام شده است، ولی در زمینه پهنه‌بندی خطر رخداد زلزله احتمالی هنوز هیچ پژوهشی صورت نگرفته است. در زمینه پیش‌بینی مؤلفه‌های زلزله هر روش فقط قادر به پیش‌بینی فقط یک مؤلفه از سه مؤلفه اصلی زلزله (زمان، بزرگی، مکان) است که مؤلفه مورد نظر با توجه به تعیین حدودی ثابت برای سایر مؤلفه‌های زلزله قابل پیش‌بینی است، از همین رو در این پژوهش مکان و احتمال وقوع زلزله‌های بزرگ پیش‌بینی شده است و برای پیش‌بینی زمان وقوع زلزله می‌توان از روش‌های دیگر و یا نتایج سایر تحقیقات استفاده کرد. برآورد درصد احتمال وقوع زلزله‌های آتی در مناطق مورد نظر می‌تواند در افزایش توجه به طراحی سازه‌ها در مکان‌های پیش‌بینی شده و همچنین به‌سازی لرزه‌ای سازه‌های موجود در این محل‌ها نقش اساسی داشته باشد. در این تحقیق، در اولین گام برای تهیه نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی، مشخصات زلزله‌های رخ داده در بین سال‌های ۱۹۰۳ تا ۲۰۱۲ در استان‌های سمنان و قم از پایگاه‌های مختلف لرزه‌ای جمع‌آوری گردید. در این پژوهش با استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی خود سازمان یافته، مکان‌های احتمال رخداد زلزله آتی، پیش‌بینی شد. شبکه‌های عصبی مصنوعی انتخاب شده این ویژگی را دارد که رفتار خود را با توجه به محیط (ورودی‌ها-خروجی‌ها) به گونه‌ای تغییر دهد که پاسخ مناسب را تولید کند. این شبکه‌های عصبی مصنوعی قادرند حجم زیادی از اطلاعات ورودی (مانند کاتالوگ زمین لرزه) را به‌طور هم‌زمان و به‌صورت موازی دسته‌بندی کنند و پاسخ واقعی حتی به داده‌های ناقص، مغشوش و پراکنده بدهند و الگوهای لرزه‌ای را به‌خوبی تشخیص دهند. پس از پیش‌بینی مکان‌های وقوع زلزله، با بررسی‌های آماری انجام شده، نقشه پهنه‌بندی خطر زلزله احتمالی ترسیم گردید. با توجه به نقشه‌های به‌دست آمده، بیش‌ترین

احتمال وقوع زلزله در استان قم، در منطقه مرکزی این استان با احتمال  $31/6$  درصد و در استان سمنان در محدوده شمالی این استان با احتمال  $28/9$  درصد پیش‌بینی شده است.

### منابع

1. You-Po S., Qing-Jie Z., "Application of ANN to Prediction of Earthquake Influence", Second International Conference on Information and Computing Science, Vol. 2 (2009) 234-237.
2. Mokhtari M., "Earthquake prediction activities and Damavand earthquake precursor test site in Iran", Nat Hazards 52 (2010) 351-368.
3. Moustra M., Avraamides M., Christodoulou C., "Artificial neural networks for earthquake prediction using time series magnitude data or Seismic Electric Signals", Expert Systems with Applications 38 (2011) 15032-15039.
4. Borghi A., Aoudia A., Riccardo E. M. R., Barzaghi R., "GPS monitoring and earthquake prediction: A success story towards a useful integration", Tectonophysics 465 (2009) 177-189.
5. Ferraes S. G., "A probabilistic prediction of the next strong earthquake in the Acapulco-San Marcos segment, Mexico", Geofis. Int. 44(2005) 347-353.
6. Ni H., Yin H., "Self-organizing mixture autoregressive model for nonstationary time series prediction", International Journal of Neural Systems, 18 (2008) 469-480.
7. Yamashina K., "Trial of earthquake prediction in Japan and a statistical test of time-shift", Journal of Tectonophysics 417 (2006) 169-182.

8. Ashtari Jafari M., "Statistical prediction of the next great earthquake around Tehran, Iran", *Journal of Geodynamics* 49 (2010) 14-18.
9. Adeli H., Panakkat A., "A probabilistic neural network for earthquake magnitude prediction", *Neural Networks* 22 (2009) 1018-1024.
10. Kulahc F., Inceoz M., Dogru D., Aksoy E., Baykara O., "Artificial neural network model for earthquake prediction with radon monitoring", *Applied Radiation and Isotopes* 67 (2009) 212-219.
11. Allameh Zadeh M., "Prediction of aftershocks pattern distribution using self organizing feature maps", 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, August 1-6 (2004).
12. Kohonen T. "The self-organizing map", *Neurocomputing* 21 (1998) 1-6.
13. Ghosh-Dastidar S., Adeli H., "Wavelet-clustering-neural network model for freeway incident detection", *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18 (2003) 325-338.
14. MATLAB R2010a, Users Manual, The Math Works, Inc., (2010).