

# تحلیل خطر لرزه‌های شهر کرمان با تأکید بر کاربرد GIS در ریزپهنه‌بندی مقدماتی درجه ۲

رضا حسن زاده<sup>۱،۳\*</sup>، احمد عباس نژاد<sup>۲</sup>، اکبر علوی<sup>۲</sup> و ابراهیم شریفی تشرینی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه علوم محیطی، پژوهشکده علوم محیطی، مرکز بین‌المللی علوم، تکنولوژی پیشرفته و علوم محیطی، کرمان، ایران.  
<sup>۲</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران.  
<sup>۳</sup> مرکز مطالعات مدیریت بحران شهرداری کرمان، کرمان، ایران.  
<sup>۴</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۳۸۷/۰۹/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۲/۱۴

## چکیده

در این پژوهش، لرزه‌خیزی شهر کرمان بررسی شده است. شهر کرمان در حاشیه شمالی دشت کرمان که یک فروزمین (گرابن) فشاری است قرار دارد و گسل‌های متعددی در محدوده شهر، مرز کوه و دشت و مناطق نزدیک شهر قرار دارند که تعدادی از آنها می‌توانند موجب بروز زلزله‌های حتی قوی‌تر از ۷ ریشتر شوند. تاکنون زلزله‌های تاریخی و سده بیستم متعددی در نزدیکی شهر کرمان رخ داده‌اند که باعث آسیب جزیی آن شده‌اند. خطر زلزله به روش احتمالاتی و تحلیلی برای شهر کرمان بررسی شد، براساس ارزیابی خطر زلزله با روش تحلیلی، شتاب ناشی از ۱۵ قطعه گسل می‌تواند در کرمان بیش از ۰/۲g باشد. شدت ناشی از گسل‌های کرمان - زنگی آباد، شمال کرمان و اختیار آباد می‌تواند به ۹ مرکالی اصلاح شده (IX MMI) برسد. برای تعیین میزان خطر نواحی مختلف شهری، مطالعات ریزپهنه‌بندی درجه ۲ تشدید جنبش زمین صورت گرفت. از تلفیق نقشه‌های دوره چیره میکروترمور و نوع رسوبات در سیستم GIS نقشه ریزپهنه‌بندی میزان تشدید جنبش نیرومند زمین در شهر کرمان و مناطق اطراف تهیه شد که با توجه به ستبرای زیاد رسوبات سست جوان در محدوده این شهر و تشدید ناشی از آنها به ۱۰/۵ مرکالی اصلاح شده (X+ MMI) هم خواهد رسید. بر اساس نقشه خطر به دست آمده از شهر کرمان (نقشه ریزپهنه‌بندی میزان تشدید جنبش زمین) میزان خطر در بخش‌های مرکزی، باختری و همچنین بخش‌هایی از جنوب شهر به شدت افزایش می‌یابد که سازه‌های موجود در این بخش‌ها در اثر زلزله احتمالی به شدت ویران خواهند شد.

**کلیدواژه‌ها:** لرزه‌خیزی، ریزپهنه‌بندی، سامانه اطلاعات جغرافیایی، جنبش نیرومند زمین، نقشه خطر، کرمان.

\* نویسنده مسئول: رضا حسن زاده

E-mail: Hassanzadeh22@yahoo.com

## ۱- مقدمه

شهر کرمان در جنوب خاور ایران، در محدوده‌ای با طول جغرافیایی ۱۴۲° ۳۰' تا ۱۹۲° ۳۰' و عرض جغرافیایی ۵۷° ۷' تا ۵۷° ۵۷' شمالی واقع شده است. جمعیت آن اندکی بیش از ۶۰۰ هزار نفر برآورد شده و بزرگ‌ترین شهر در جنوب خاور کشور است. این شهر با ارتفاع ۱۷۰۰ تا ۱۸۰۰ متر از سطح دریا در حاشیه شمال خاوری دشت کرمان قرار گرفته است (شکل ۱).

## ۲- زمین‌شناسی

دشت کرمان یک چاله زمین‌ساختی از نوع فروزمین فشاری است (عباس‌نژاد، ۱۳۸۳) و به لحاظ زمین‌شناسی به ایران مرکزی تعلق دارد. تماس آن با کوه‌های اطراف معمولاً از نوع گسلی است. بسیاری از این گسل‌ها فعال هستند و شهر را کم‌وبیش تهدید می‌کنند. اگر چه بسیاری از کوه‌های اطراف شهر کرمان از جنس سنگ‌آهک‌های کرتاسه هستند (Hukriede et al., 1962; Dimitrijevic, 1973) ولی بر اساس شواهد مربوط به بررسی‌های ژئوفیزیکی و حفاری (عباس‌نژاد، ۱۳۷۷ و CITRA, 1965) در محل فعلی شهر کرمان توالی پیوسته‌ای از رسوبات میوسن تا کواترن وجود دارد که ستبرای آن به بیش از ۲۰۰ متر می‌رسد (شکل ۲). رسوبات میوسن از جنس کنگلومرای سرخ و لایه‌های رسی-مارنی هستند که توسط لایه‌های رسی، سیلتی و مارنی پلیوسن پوشیده شده‌اند. رسوبات کواترن از آبرفت‌های ریز رسی همراه با لایه‌های نازک آبرفت درشت (بوژه به سمت ارتفاعات خاور شهر) و لایه‌های سیلتی-ماسه‌ای تشکیل شده است (Kajar, 1996). براساس شواهد موجود، در زیر شهر کرمان رسوبات میوسن به‌طور دگر شیب روی سنگ‌آهک‌های کرتاسه و احتمالاً در برخی نقاط روی شیل‌های ژوراسیک قرار گرفته‌اند. مهندسین مشاور راکشاب (۱۳۵۷) سنگ کف دشت و شهر کرمان را لایه‌های رسی-سرخ میوسن در نظر گرفته‌اند که کم‌وبیش با گچ و نمک همراه هستند. این سنگ‌ها فرسایش‌پذیرند و بنابراین به‌ندرت رخنمون‌هایی از آنها در

## ۳- ارزیابی خطر زمین‌لرزه

اگر چه تاکنون مطالعات کاملی در زمینه زلزله‌خیزی محدوده شهر کرمان صورت نگرفته است، اما کارشناسان بسیار هر یک به نحوی، به زلزله‌خیزی آن پرداخته‌اند. یغمایی (۱۳۷۰ و ۱۳۷۱) با روش تحلیلی زلزله‌خیزی شهر کرمان را بررسی کرده است، به باور او گسل‌های شمال کرمان و باغین تهدید کننده اصلی شهر کرمان هستند، او طول گسل شمال کرمان را ۴۰ کیلومتر و کمترین فاصله آنرا تا شهر ۱۵ کیلومتر در

Donovan (1973) و Naumoski (1985)، همگی به نقل از پورکرمانی و آرین، (۱۳۷۶) شتاب زمین لرزه ناشی از هر گسل بر شهر کرمان محاسبه شد (جدول ۲). جدول ۲ مشخص می‌سازد که شتاب ناشی از زمین لرزه‌های مرتبط با ۱۵ گسل می‌تواند در کرمان بیش از  $0.2g$  باشد که می‌تواند حد شروع تخریب در نظر گرفته شود. از این میان، شتاب زمین لرزه مربوط به گسل‌های کرمان - زنگی آباد، شمال کرمان و اختیار آباد به دلیل نزدیکی آنها با شهر کرمان قابل توجه است و به ترتیب به  $0.43g$ ،  $0.37g$  و  $0.33g$  می‌رسد. با توجه به ارتباط شتاب با شدت (در مقیاس MMI)، شدت زمین لرزه ناشی از آنها حدود IX MMI خواهد بود. فرایند استفاده از GIS برای محاسبه بیشترین شتاب و شدت در شکل ۸ آمده است. البته به دلیل سبتری زیاد رسوبات سست رسی - سیلنی در زیر شهر کرمان، امکان تقویت جنبش نیرومند زمین و افزایش شدت زمین لرزه تا حدود X MMI وجود دارد که می‌تواند بخش اعظم شهر را تخریب کند.

#### ۴-۲ ریز پهنه‌بندی درجه ۲ شهر کرمان

تحت تأثیر شرایط زمین شناسی در محدوده شهر (شکل ۲) و تشدید ناشی از آن، رقم شدت زمین لرزه می‌تواند کم و بیش افزایش یابد. زمین لرزه‌های بسیاری از جمله زمین لرزه سال ۱۹۸۵ مکزیکو سیتی و زمین لرزه سال ۱۳۶۹ رودبار نمونه‌هایی از تشدید ناشی از تأثیر شرایط محل و در نتیجه لزوم مطالعات ریزپهنه‌بندی محدوده شهرها را نشان می‌دهند. به منظور تعیین تأثیر شرایط زمین در نقاط مختلف یک محدوده، نقشه‌های ریزپهنه‌بندی تهیه می‌شوند. در مطالعات ریز پهنه‌بندی تأثیر شرایط محل بر حرکت زمین، گسیختگی دامنه‌ها و روانگرایی مورد توجه قرار می‌گیرند. این سه متغیر در سه درجه متفاوت (درجات ۱، ۲ و ۳) قابل انجام هستند که از درجه ۱ به ۳، دقت کار، حجم و دقت داده‌های مورد نیاز و میزان هزینه‌ها افزایش می‌یابد (I. S. S. M. F. E., 1993).

از آنجا که تهیه نقشه ریزپهنه‌بندی درجه ۳ شهر کرمان نیاز به اعتبار زیاد و بررسی‌های ژئوتکنیکی دقیق دارد و در عین حال دقت نقشه‌های ریزپهنه‌بندی درجه ۱ بسیار کم است بنابراین مطالعات ریز پهنه‌بندی درجه ۲ شهر صورت گرفت. در ریزپهنه‌بندی، تأثیر شرایط محل از روش تقویت حرکت (جنبش) زمین، گسیختگی دامنه‌ها و روانگرایی مورد توجه قرار می‌گیرد که در این مطالعه هر سه متغیر ارزیابی شده است.

#### ۴-۱ خطر حرکات دامنه‌ای

یکی از جنبه‌های رایج آسیب لرزه‌ای، گسیختگی دامنه‌ها در تمامی سطوح شیب‌دار در هنگام وقوع زمین لرزه است که در اثر آن آسیب وارد می‌شود. در بسیاری از زمین لرزه‌های قوی، بویژه زمین لرزه سال ۱۳۶۹ رودبار گسیختگی‌های دامنه‌ای به شدت صورت گرفتند و از این نظر مشکلات بسیاری به وجود آمد.

شهر کرمان به‌طور عمده در سطح دشت (پلاپای) کرمان توسعه یافته است. بنابراین با توجه به شکل ۹ شیب زمین در محدوده این شهر کمتر از  $10^\circ$  است و خطر گسیختگی دامنه‌ها و آسیب ناشی از آن مطرح نیست. در اثر وقوع زمین لرزه، تنها ممکن است ریزش‌هایی در دامنه کوه‌های مسجد صاحب الزمان که در حاشیه خاوری شهر کرمان قرار دارند صورت گیرند که بر اساس مشاهدات صحرائی نمی‌تواند آسیب عمده‌ای وارد کنند.

#### ۴-۲ خطر روانگرایی

در صورتی که در محلی سطح آب‌های زیر زمینی بالا بوده، رسوبات سست ماسه‌ای وجود داشته و شدت زمین لرزه هم از حدود VI MMI بالاتر باشد خطر روانگرایی مطرح خواهد بود، به طوری که ممکن است روانگرایی در هنگام زمین لرزه موجب آسیب به ساختمان‌ها و افزایش اثرات زمین لرزه شود (Wang & Tim Law, 1994). گسل‌های بسیاری در نزدیکی شهر کرمان وجود دارند که می‌تواند زمین لرزه‌های قوی‌تر از VII ریشتر ایجاد کنند. شدت ناشی از آنها در شهر کرمان تا به IX MMI

نظر گرفته است، براساس مطالعات وی، وقوع زمین لرزه ۷ ریشتری در محدوده این گسل امکان‌پذیر است که در این صورت نتیجه می‌گیرد در شهر کرمان شدت آن VI MMI خواهد بود. یغمایی (۱۳۷۱) طول گسل باغین را ۷۳ کیلومتر و کمترین فاصله آن را با شهر کرمان ۲۰ کیلومتر برآورد کرده است، بر اساس این بررسی‌ها، وقوع زلزله در سطح این گسل می‌تواند با شدت VII MMI در شهر کرمان احساس شود. شاه‌پسندزاده و حیدری (۱۳۷۵) نزدیک‌ترین گسل تهدید کننده شهر کرمان را گسل کوه‌بان معرفی کرده‌اند. براساس این مطالعات، طول قطعه‌ای از این گسل که در نزدیکی شهر کرمان قرار دارد ۸۰ کیلومتر و وقوع زلزله  $7/6$  ریشتری توسط آن امکان‌پذیر است که در این صورت شدت آن در شهر کرمان بیش از IX MMI خواهد بود. آل‌طه و شرکتی (۱۳۷۵) نیز با استفاده از نرم افزار، خطر زمین لرزه به روش احتمالاتی برای شهر کرمان را محاسبه کرده‌اند. زارع (۱۳۷۴) و ریاضی و همکاران (۱۳۸۴) نیز لرزه‌خیزی این شهر را به عنوان بخشی از یک محدوده وسیع‌تر بررسی کرده‌اند. تاکنون زمین لرزه‌های بسیاری باعث خرابی ساختمان‌ها در شهر کرمان شده‌اند، به عنوان مثال زمین لرزه ۲۸ دی ماه ۱۲۴۲ (متناسب به گسل کوه‌بان) آسیب قابل توجهی به شهر کرمان وارد ساخت. زمین لرزه ۲ خرداد ۱۲۷۶ چترود نیز باعث تخریب ساختمان‌ها و کشته شدن چند نفر شد. حتی زمین لرزه ۳۱ شهریور ۱۳۰۲ لاله‌زار که به گسل رفسنجان نسبت داده می‌شود و مرکز آن با شهر کرمان ۹۰ کیلومتر فاصله داشته است باعث آسیب دیدگی برخی از ساختمان‌های کرمان و زخمی شدن ۲ نفر شد (عباس نژاد و داستانپور، ۱۳۷۸). شدت زمین لرزه ۷ ریشتری ۶ مرداد ۱۳۶۰ سیرج در شهر کرمان حدود VII MMI بود که موجب تخریب برخی از ساختمان‌های قدیمی و فرسودگی شهر شد، به طوری که بخشی از سقف بازار و مسجد حاج آقا علی در کرمان فرو ریخت (ظهوریان ایزدپناه و همکاران، ۱۳۶۴).

به منظور بررسی روند رخداد زمین لرزه در ابعاد مختلف و به روش آماری - احتمالاتی، ۴۳۷ زمین لرزه روی داده در سال‌های ۱۹۰۷ تا ۲۰۰۵ در شعاع ۳۰۰ کیلومتری شهر کرمان که بزرگی آنها بیش از ۴ ریشتر بوده است بررسی شد. بر اساس این مطالعه، مقدار ضرایب a و b به ترتیب  $5/128$  و  $0.5955$  به دست آمد (شکل ۴). سپس، با توجه به این ضرایب اندازه زمین لرزه‌های با دوره برگشت مختلف محاسبه شد (جدول ۱). خاطر نشان می‌سازد با توجه به طول قطعه گسل‌های اطراف شهر کرمان، تنها گسل نایبند می‌تواند زمین لرزه در حد ۸ ریشتر را ایجاد کند. زمین لرزه ناشی از دیگر گسل‌ها در حد  $7/2$  تا ۷ ریشتر هستند. وقوع ۴۰ زمین لرزه بیش از ۶ ریشتر در طی یک دوره ۹۲ ساله در شعاع ۳۰۰ کیلومتری شهر کرمان گواه بر این پیش‌بینی هستند. در عین حال، نمودار دوره بازگشت و احتمال وقوع زمین لرزه‌های با اندازه‌های مختلف نیز رسم شد (شکل ۵).

خاطر نشان می‌سازد که ریاضی و همکاران (۱۳۸۴) وضعیت لرزه‌خیزی گستره‌ای به شعاع ۱۵۰ کیلومتر نسبت به شهر کرمان را بررسی کرده و مقادیر a و b را به ترتیب  $2/93$  و  $0.86$  به دست آورده‌اند. این در حالی است که (Ashtari- Jafari et al. (2004) به ترتیب مقادیر  $5/31$  و  $0.73$  را برای a و b برآورد کرده‌اند (شعاع محاسبه اعلام نشده است). با روش تحلیلی نیز می‌توان خطر زمین لرزه در یک محل را ارزیابی کرد. به این منظور، نقشه گسل‌ها و چشمه‌های لرزه‌زا تا شعاع ۲۰۰ کیلومتر نسبت به شهر کرمان بر اساس نقشه‌های زمین شناسی، تصاویر ماهواره‌ای و عکس‌های هوایی تهیه شد. فرایند استفاده از GIS در تهیه چشمه‌های لرزه‌زا در شکل ۶ نشان داده شده و نقشه حاصل از آن در شکل ۷ مشخص است. در عین حال، قطعات مختلف هر گسل شناسایی و طول هر قطعه تعیین شد. سپس، کمترین فاصله هر قطعه با شهر کرمان اندازه‌گیری و با داشتن طول گسل‌ها بر اساس روابط (Crouse (1991)، Nowroozi (1985) و (Slemmons (1982) و Mohajer-Ashjai & Nowroozi (1985)، همگی به نقل از پورکرمانی و آرین، (۱۳۷۶) اندازه زمین لرزه‌ای که می‌تواند ایجاد کنند، محاسبه شد. در مرحله آخر، با استفاده از روابط (Esteva & Villaverde (1973

منحنی دوره تناوب میکروترمورها برای هر نوع خاک سطحی شکل خاصی دارد. ضرایب تشدید به دست آمده از آنها می‌توانند برای برآورد میزان تشدید حرکات زمین در اثر زمین‌لرزه‌های شدید مورد استفاده قرار گیرند. رسوبات بخش‌های مشخصی از طیف میکروترمورها را تقویت می‌کنند که تابع ویژگی‌های دینامیکی رسوب است. دوره تناوب میکروترمورها معمولاً تحت تأثیر شرایط لایه‌بندی رسوب نیز قرار می‌گیرد. میزان تشدید آنها در رسوبات نرم بیشتر است. معمولاً تشابه خوبی میان دوره تناوب چیره میکروترمورها و دوره تناوب چیره امواج لرزه‌ای به چشم می‌خورد (روستایان، ۱۳۷۹). این نوع مطالعات برای شهرهای زیادی از جمله بارسلونا (Alfero et al., 2002)، دینار ترکیه (Ansal et al., 2002) و کاراکاس (Duval et al., 2002) صورت گرفته است. مطالعات میکروترموری شهر کرمان توسط روستایان (۱۳۷۹) و با استفاده از دستگاه ثبتات Kinmetrics SSR-I و لرزه‌سنج‌های کوتاه دوره Kinmetrics SS-1 صورت گرفته است. سنجش‌ها در ۵۳ نقطه انجام شده که از آن میان ۳۹ ثبت مناسب به دست آمده است. دوره تناوب چیره و دامنه بیشینه میکروترمورها با استفاده از طیف چگالی توان (PDS) تعیین و با استفاده از نرم افزار Pitsa مورد پردازش قرار گرفته است. برای تحلیل، از روش طیفی مؤلفه‌های افقی به قائم (معروف به روش ناکامورا) استفاده شده است، در این مطالعات دوره تناوب چیره میکروترمورها در دو محدوده ۰/۰۵ ثانیه و ۱/۲۵ تا ۱/۷۵ ثانیه تمرکز یافته که مورد اول احتمالاً معرف بازتاب سنگ کف لرزه‌ای کم‌ژرفا (ستبرای کم آبرفت) و مورد دوم بیانگر ژرف بودن سنگ کف لرزه‌ای است (روستایان، ۱۳۷۹). در شکل ۱۴ نقشه پهنه‌بندی دوره تناوب چیره میکروترمورها در شهر کرمان به نقل از روستایان (۱۳۷۹) درج شده است. براساس این نقشه دوره تناوب چیره در محدوده جنوبی شهر حوالی محله ابوذر و همچنین در بخش باختری شهر حوالی میدان آزادی، بلوار جمهوری، جاده تهران و راه‌آهن بیش از ۱/۵ ثانیه است. بنابراین در این مناطق میزان تشدید جنبش نیرومند زمین (به دلیل بالا بودن ستبرای رسوبات) زیادتر خواهد بود. دوره تناوب چیره میکروترمورها از خاور به باختر و از شمال به جنوب شهر افزایش می‌یابد، بنابراین ستبرای آبرفت در بخش‌های خاوری و شمالی کم و در بخش‌های باختری و جنوبی شهر زیاد است. میزان تشدید جنبش نیرومند زمین متأثر از نوع رسوبات هم هست، به طوری که در خاک‌های ریز دانه بیشتر از انواع درشت دانه است. به عنوان مثال، بر اساس اطلاعات ارائه شده توسط برگی (۱۳۸۲)، میزان افزایش شدت زمین‌لرزه در سطح زمین نسبت به شدت مبنا در پی‌سنگ در خاک‌های رسی، لوم و لوم ماسه‌ای ۱/۶، در ماسه‌ها ۱/۵ و در آبرفت‌های درشت ۱/۴ در نظر گرفته می‌شود. نقشه پهنه‌بندی نوع رسوبات محدوده شهر کرمان در شکل ۱۴ ارائه شده است که تلفیقی از نقشه ستون‌های زمین‌شناسی حفر شده در شهر، نقشه رسوب‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی و مطالعات میدانی نگارندگان است. با تلفیق داده‌های میکروترموری و رسوب‌شناسی (شکل‌های ۱۴ و ۱۵) در سامانه اطلاعات جغرافیایی (GIS)، نقشه ریزپهنه‌بندی میزان تشدید جنبش زمین در شهر کرمان تهیه شد (شکل ۱۶).

در این نقشه محدوده‌هایی که دوره چیره میکروترمورها بیش از ۱/۵ ثانیه و جنس رسوبات رسی و سیلتی بوده است، بیشترین میزان تشدید را دارند و به عنوان محدوده با «پتانسیل تشدید بالا» در نظر گرفته شده‌اند. محدوده‌هایی که دوره تناوب چیره میکروترمورها در حد ۱/۵ تا ۱/۵ ثانیه و جنس رسوبات ماسه‌ای یا رسی و رسی-سیلتی بوده است، به عنوان «پتانسیل تشدید متوسط» معرفی شده‌اند و در پایان، محدوده‌هایی که در آنها دوره تناوب چیره میکروترمورها کمتر از ۱ ثانیه بوده، بدون در نظر گرفتن جنس رسوبات به عنوان «پتانسیل تشدید کم» تلقی شده‌اند.

با توجه به این که بیشترین شدت زمین‌لرزه (شدت مبنا) در پی سنگ شهر کرمان در حد ۹ مرکالی اصلاح شده (IX MMI) برآورد می‌شود (شاه‌پسندزاده و حیدری، ۱۳۷۵)، میزان واقعی شدت تحت تأثیر شرایط زمین‌شناسی محلی در محدوده‌های با

خواهد رسید (شاه‌پسندزاده و حیدری، ۱۳۷۵). بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به لحاظ ویژگی‌های لرزه‌شناختی امکان ایجاد روانگرایی در محدوده شهر کرمان وجود دارد. تعیین پتانسیل روانگرایی در اثر زمین‌لرزه یک مسئله پیچیده در زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک است که عوامل زیادی را شامل می‌شود (زمردیان و منصور، ۱۳۸۳). روش‌های بسیاری برای برآورد پتانسیل روانگرایی ارائه شده است که منابعی همچون منتظر القائم (۱۳۷۴)، Wang & Time Law, (1994) و میر محمد حسینی و درخشندی (۱۳۸۳) نمونه‌هایی از آنها را شرح داده‌اند. زمردیان و منصور (۱۳۸۳) روش الگوریتم ژنتیک و زمردیان و باقری (۱۳۸۳) مدل Byrne را برای ارزیابی پتانسیل روانگرایی توضیح داده‌اند.

با توجه به دستور العمل (ISSMFE (1993)، در ریز پهنه‌بندی درجه ۲، پتانسیل روانگرایی براساس معیارهای زمین‌شناسی (بویژه رسوب‌شناسی و آب‌شناسی) و زمین‌ریخت‌شناسی برای هر نقطه مورد ارزیابی قرار گرفته و نقشه ریزپهنه‌بندی تهیه می‌شود. توجه به معیارهای زمین‌ریخت‌شناسی کمک می‌کند که محدوده‌های با رسوبات سست ماسه‌ای-سیلتی آسان‌تر شناسایی شوند.

یکی از مهم‌ترین عوامل محیطی تأثیر گذارنده بر خطر روانگرایی، ژرفای سطح آب‌های زیرزمینی است. براساس تجربیات مربوط به زمین‌لرزه‌های روی داده در نقاط مختلف دنیا، در بسیاری از مواردی که روانگرایی در سطوح صاف و هموار رخ داده، ژرفای آب‌های زیرزمینی بیش از ۳ متر نبوده است. البته در موارد محدودی تا ژرفای حدود ۴ متر هم روانگرایی ایجاد شده است اما هیچ‌گونه روانگرایی در زمین‌های سطحی که ژرفای آب زیرزمینی در آنها بیش از ۵ متر بوده، دیده نشده است (Wang & Time Law, 1994).

در شکل ۱۰ نقشه ژرفای آب زیرزمینی در محدوده شهر کرمان ارائه شده است. با توجه به آن، ژرفای آب از کمتر از ۱۰ متر در شمال شهر، تا حدود ۱۰۰ متر در جنوب باختری شهر متغیر است. البته سطح آب‌های زیرزمینی در شهر کرمان به طور متوسط سالانه ۰/۵ متر بالا می‌آید (احمدی آزادی، ۱۳۸۱) که علت آن تغذیه شدید سفره توسط چاه‌های جاذب فاضلاب شهر کرمان است. در مجموع، با توجه به نرخ بالا آمدن سطح آب‌های زیرزمینی در محدوده شهر کرمان، محدوده‌های با ژرفای آب زیرزمینی کمتر از ۷ متر می‌توانند پتانسیل روانگرایی بالایی داشته باشند (به شرطی که به لحاظ رسوب‌شناسی نیز مناسب باشند). براساس اطلاعات ارائه شده توسط مهندسین مشاور کوانتا و با توجه به شرایط زمین‌ریخت‌شناسی دشت کرمان، نقشه نوع رسوبات سطحی (تا ژرفای حدود ۵ متر) در محدوده این شهر ارائه شده است (شکل ۱۱). در این نقشه محدوده‌های متشکل از رسوبات ماسه‌ای (در صورت بالا بودن سطح آب‌های زیرزمینی) پتانسیل روانگرایی بالایی دارند. بنابراین در سامانه GIS نقاط آماده از نظر ژرفای آب زیرزمینی (شکل ۱۰) و نوع رسوب (شکل ۱۱) تلفیق و نقشه محدوده‌های مستعد به روانگرایی تهیه شده است (شکل ۱۲). این محدوده بخش کوچکی از شهر در حوالی مرکز شهر و بافت قدیم را در بر می‌گیرد.

#### ۴-۳. جنبش زمین

در ریزپهنه‌بندی لرزه‌ای درجه ۲ به منظور ارزیابی میزان تشدید جنبش زمین می‌توان از نتایج آزمایش‌های نفوذ استاندارد (SPT)، طبقه‌بندی زمین بر پایه اطلاعات گمانه‌ها، داده‌های ژئوتکنیکی، سنجش‌های میکروترموری و یا سرعت موج در خاک و رسوب استفاده کرد (I. S. S. M. F. E., 1993). در ارتباط با شهر کرمان از تلفیق یافته‌های مطالعات میکروترمورها و طبقه‌بندی بر پایه اطلاعات گمانه‌ها استفاده می‌شود. فرایند استفاده از GIS برای تهیه نقشه خطر جنبش نیرومند زمین در شکل ۱۳ مشخص است. میکروترمورها لرزش‌های بسیار ضعیف دائمی زمین هستند که در اثر عوامل مختلفی مانند حرکت ترافیک، وزش باد و غیره ایجاد می‌شوند. دامنه آنها معمولاً ۰/۱ تا ۱ میکرون و دوره آنها ۰/۰۵ تا ۲ ثانیه است و به طور عمده به امواج ریلی شباهت دارند.

روانگرایی در محدوده کوچکی از مرکز شهر مطرح است. در عین حال، به علت بالا بودن ستبرای رسوبات سست جوان در زیر شهر که با افزایش دوره تناوب چیره امواج میکروترموری تأیید می‌شود و نیز به علت ریزدانه و سست بودن این رسوبات، خطر تشدید جنبش زمین (بویژه در محدوده‌ای از جنوب و مرکز تا باختر شهر) مطرح است که در اثر آن شدت زمین‌لرزه تا به  $X^+$  MMI هم خواهد رسید. بر اساس نقشه خطر شهر کرمان (نقشه ریزپهنه‌بندی میزان تشدید جنبش زمین) میزان خطر در بخش‌های مرکزی، باختری و همچنین بخش‌هایی از جنوب شهر به شدت افزایش می‌یابد که سازه‌های موجود در این بخش‌ها در اثر زمین‌لرزه احتمالی به شدت ویران خواهند شد.

### سیاسکزاری

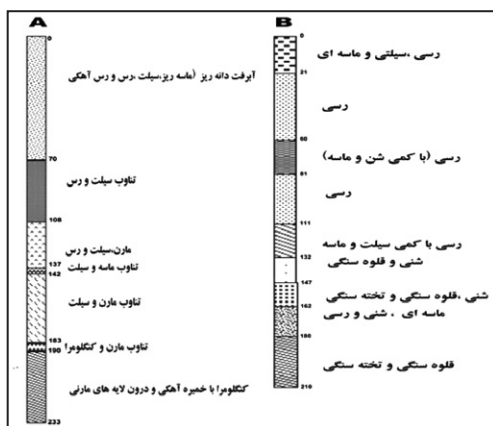
نگارندگان مقاله هم‌کاری مرکز مطالعات مدیریت بحران شهرداری کرمان تشکر می‌کنند.

پتانسیل تشدید بالا، متوسط و کم به ترتیب در حد  $X^+$ ،  $X$  و  $X^-$  مرکالی اصلاح شده برآورد می‌شود.

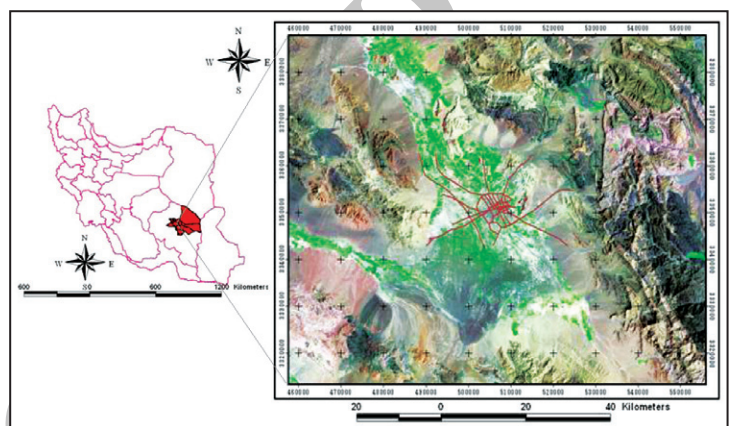
### ۵- نتیجه‌گیری

تحلیل خطر لرزه‌ای شهر کرمان با روش‌های احتمالاتی و تحلیلی مشخص می‌سازد که شهر کرمان در یکی از فعال‌ترین واحدهای لرزه‌زمین‌ساختی ایران واقع شده و گسل‌های فعال بسیاری در نزدیکی این شهر قرار دارند. شدت ناشی از زمین‌لرزه‌های مرتبط با گسل‌های کرمان-زنگی آباد، شمال کرمان و اختیارآباد به دلیل مجاورت این گسل‌ها با شهر کرمان در حدود IX MMI برآورد می‌شود.

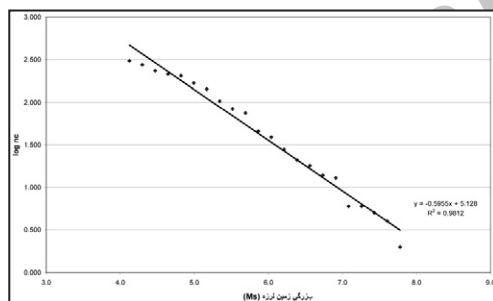
ریز پهنه‌بندی درجه ۲ لرزه‌ای شهر کرمان نشان از این دارد که خطر گسیختگی دامنه‌ای ناشی از زمین‌لرزه در محدوده شهر کرمان کم‌ویش منتفی است، اما خطر ایجاد



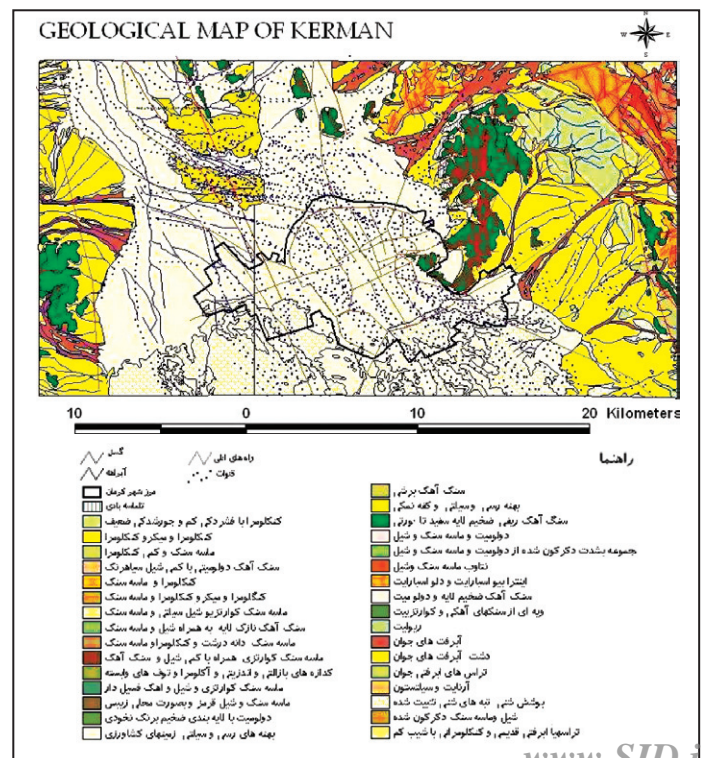
شکل ۲- (A) ستون زمین‌شناسی چاه اکتشافی طاهر آباد (CITRA, 1965) (B) ستون زمین‌شناسی چاه شماره یک شرکت تعاونی چند منظوره دانشگاه باهر (عباس نژاد، ۱۳۷۷).



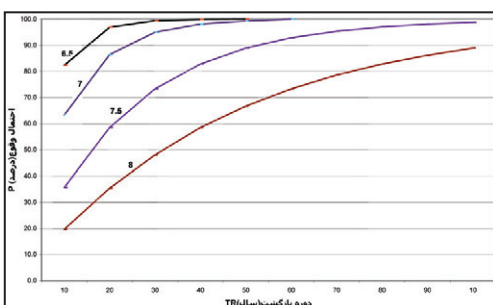
شکل ۱- موقعیت شهر کرمان در حاشیه شمال‌خاوری دشت کرمان.



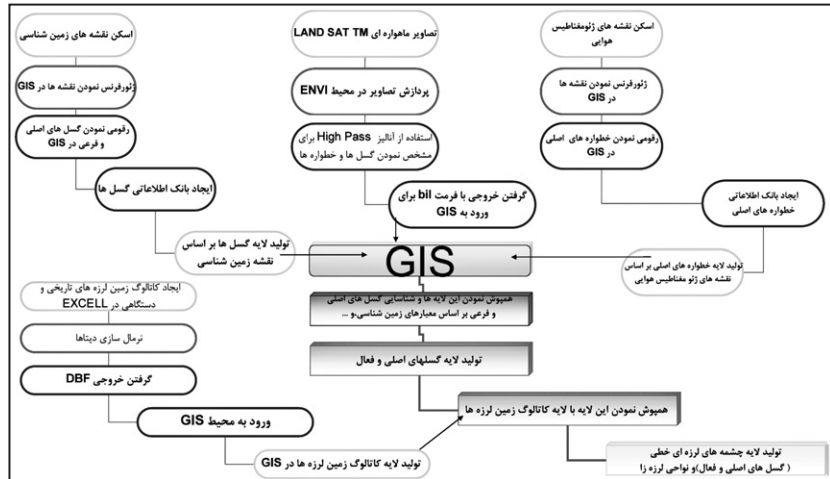
شکل ۴- نمودار رابطه میان بزرگی زمین‌لرزه و لگاریتم فراوانی تجمعی



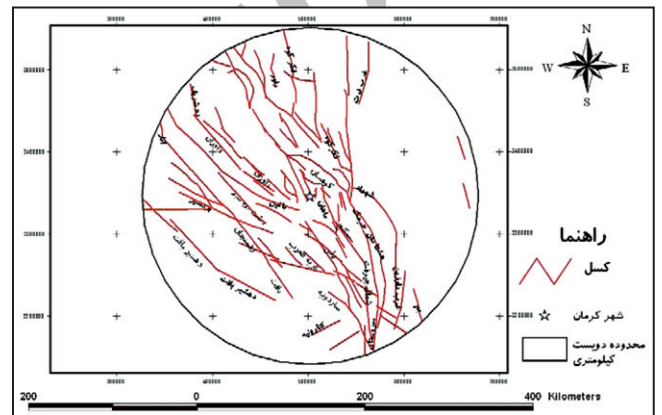
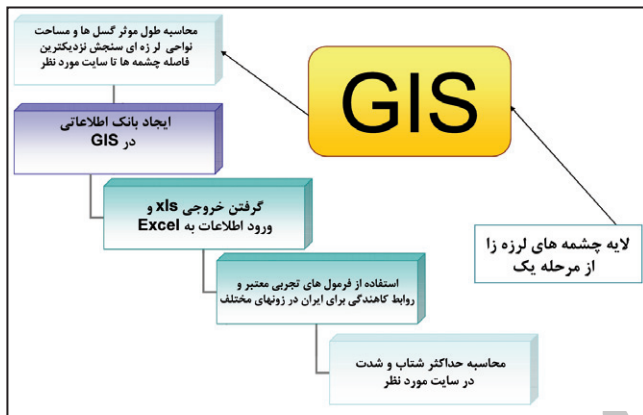
شکل ۳- نقشه زمین‌شناسی شهر کرمان و حومه (Azizan et al., 1999).



شکل ۵- نمودار دوره بازگشت و احتمال وقوع زمین‌لرزه‌های با بزرگی مختلف در شعاع ۳۰۰ کیلومتری از شهر کرمان.

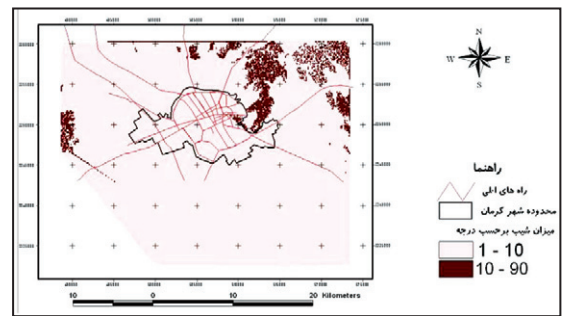
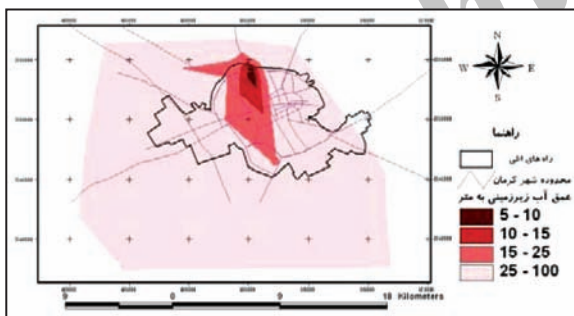


شکل ۶- فرایند استفاده از GIS برای تعیین چشمه‌های لرزه‌زا.



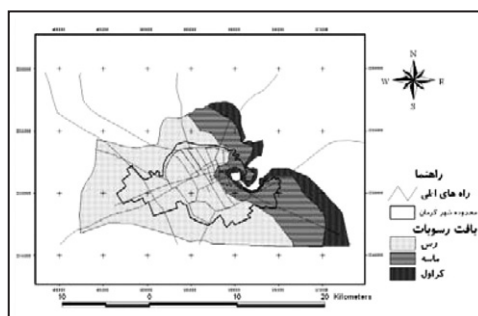
شکل ۸- فرایند استفاده از GIS در محاسبه بیشترین شتاب و شدت در سایت.

شکل ۷- نقشه مهم‌ترین گسل‌ها تا شعاع ۲۰۰ کیلومتری شهر کرمان (حسن زاده و عباس نژاد، ۱۳۸۵).

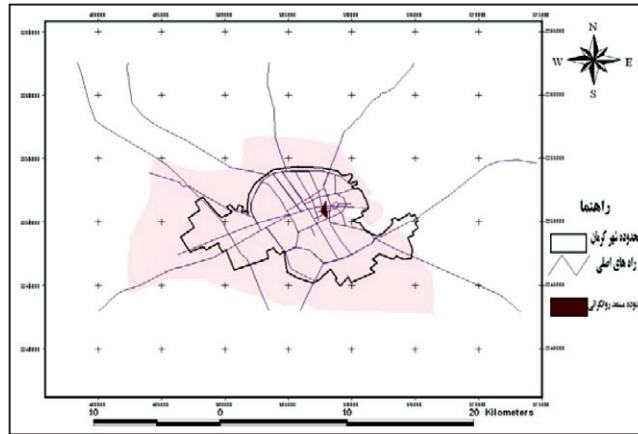


شکل ۱۰- نقشه ژرفای آب زیرزمینی در شهر (شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، ۱۳۸۳).

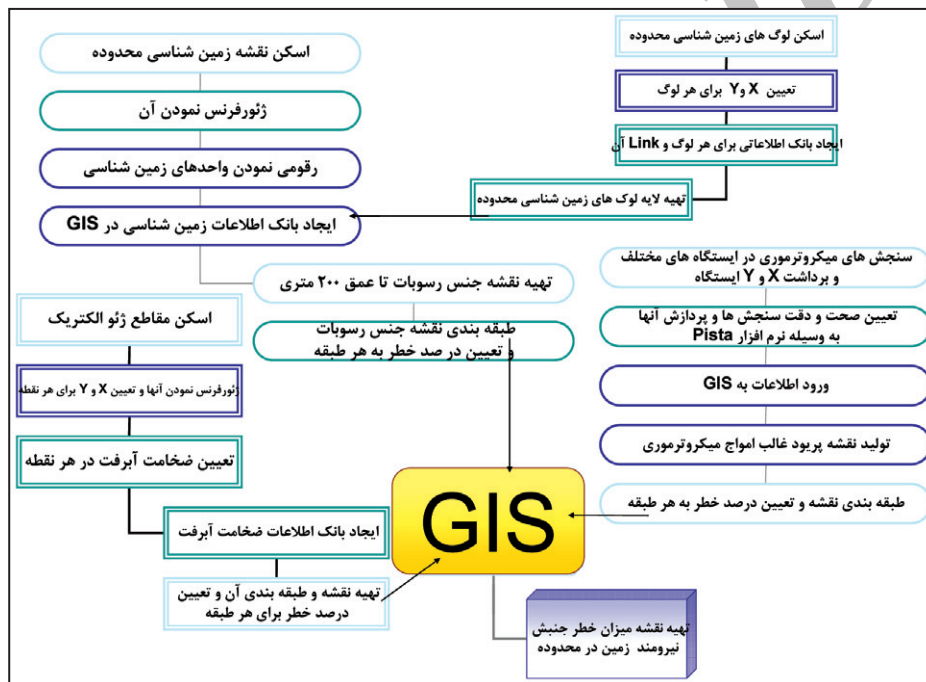
شکل ۹- نقشه شیب شهر کرمان و حومه.



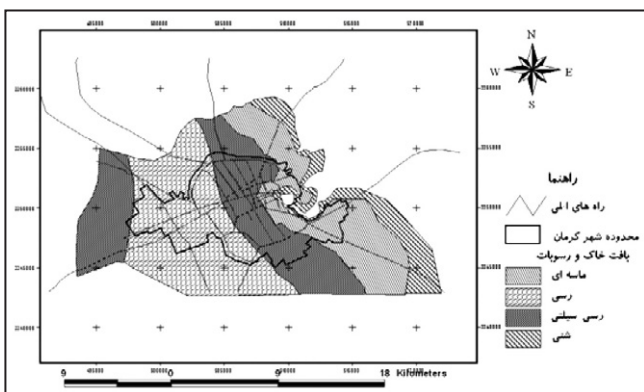
شکل ۱۱- نقشه بافت رسوبات سطحی تا ژرفای حدود ۵ متر در محدوده شهر کرمان و حومه.



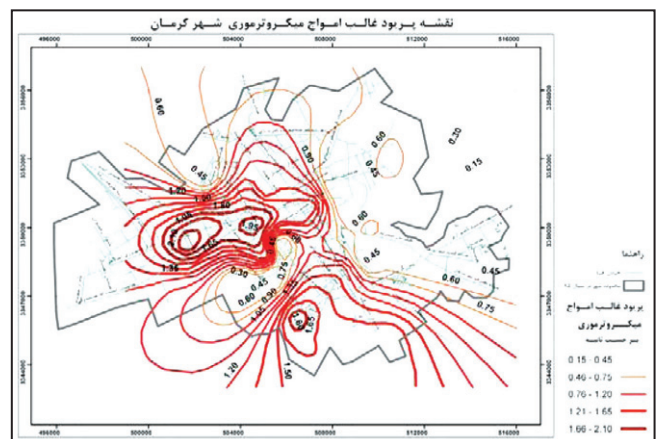
شکل ۱۲- نقشه محدوده مستعد به روانگرایی در شهر کرمان (بر اساس این نقشه تنها محدوده بسیار کوچکی در حوالی مرکز شهر کرمان مستعد روانگرایی است).



شکل ۱۳- فرایند استفاده از GIS برای تهیه نقشه خطر جنبش نیرومند زمین.



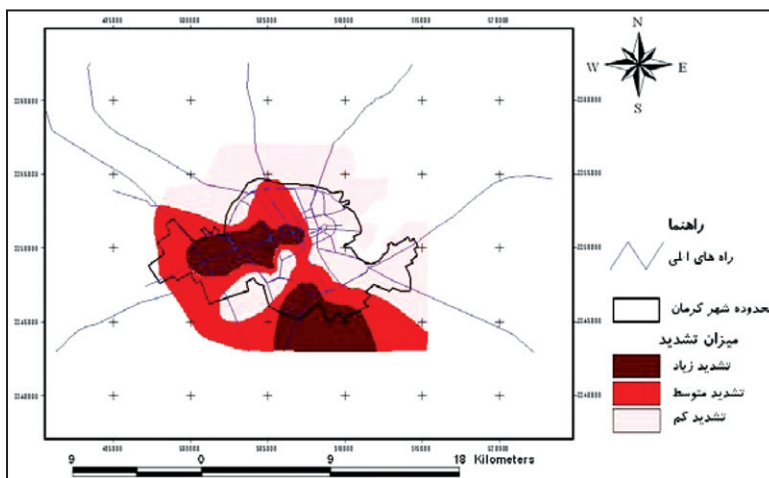
شکل ۱۵- نقشه پهنه‌بندی نوع رسوبات چیره در شهر کرمان و مناطق اطراف تا سنگ کف (زرفا تا ۲۰۰ متر).



شکل ۱۴- نقشه پهنه‌بندی دوره تناوب چیره امواج میکروترومردر شهر کرمان (روستایان، ۱۳۷۹).

جدول ۱- محاسبه بزرگی زمین‌لرزه‌ها برای دوره‌های بازگشت مختلف در محدوده‌ای به شعاع ۳۰۰ کیلومتر به مرکزیت شهر کرمان.

| دوره بازگشت (سال) TR | بزرگی زمین‌لرزه (Ms) |
|----------------------|----------------------|
| ۵                    | ۶/۴                  |
| ۱۰                   | ۶/۹                  |
| ۱۵                   | ۷/۲                  |
| ۲۵                   | ۷/۵                  |
| ۵۰                   | ۸/۰                  |



شکل ۱۶- نقشه ریزپهنه‌بندی میزان تشدید جنبش زمین در شهر کرمان و مناطق اطراف، (عباس‌نژاد و حسن‌زاده، ۱۳۸۵).

جدول ۲- اسامی گسل‌هایی که شتاب زمین‌لرزه ناشی از آنها در شهر کرمان می‌تواند بیش از  $g/2$  باشد

| ردیف | نام گسل           | طول گسل (Km) | فاصله گسل با شهر (Km) | بزرگی (Ms) | میانگین شتاب در سایت |
|------|-------------------|--------------|-----------------------|------------|----------------------|
| ۱    | کرمان - زنگی آباد | ۳۰           | در زیر شهر            | ۶/۶        | ۰/۴۳ g               |
| ۲    | شمال کرمان        | ۲۴           | ۵                     | ۶/۷        | ۰/۳۸ g               |
| ۳    | اختیار آباد       | ۴۵           | ۱۶                    | ۷          | ۰/۳۳ g               |
| ۴    | ماهان             | ۴۳           | ۱۶                    | ۷          | ۰/۳۲ g               |
| ۵    | صاحب الزمان       | ۱۱           | ۱                     | ۶/۳        | ۰/۳۱ g               |
| ۶    | کوهبنان ۸         | ۳۳           | ۱۴                    | ۶/۹        | ۰/۳۱ g               |
| ۷    | باغین             | ۵۸           | ۲۲                    | ۷/۱        | ۰/۲۹ g               |
| ۸    | ده نو - ده ذکا    | ۳۲           | ۱۷                    | ۶/۸        | ۰/۲۸ g               |
| ۹    | بایینی - گوادر    | ۶۹           | ۳۱                    | ۷/۲        | ۰/۲۴ g               |
| ۱۰   | کوهبنان ۹         | ۸۵           | ۳۴                    | ۷/۳        | ۰/۲۴ g               |
| ۱۱   | ده بالا - کینگان  | ۱۶           | ۱۵                    | ۶/۵        | ۰/۲۴ g               |
| ۱۲   | جوپار             | ۵۲           | ۲۸                    | ۷/۱        | ۰/۲۳ g               |
| ۱۳   | داوران ۱          | ۳۷           | ۲۵                    | ۶/۹        | ۰/۲۳ g               |
| ۱۴   | ناینند جنوبی      | ۱۳۴          | ۴۹                    | ۷/۶        | ۰/۲۰ g               |

## کتابنگاری

آل طه، ب. و شرکتی، ش.، ۱۳۷۵- گزارش نهایی طرح تحقیقاتی مطالعه لرزه‌خیزی و سایش‌موتکتونیک شهر کرمان، جلد های ۱ و ۲، ۳ دانشگاه آزاد اسلامی واحد زرنند. احمدی افزادی، ع.ا.، ۱۳۸۱- مدل آب‌های زیرزمینی دشت کرمان با تأکید بر راه‌حل‌های مدیریتی جهت مقابله با بالا آمدگی سطح آب‌های زیرزمینی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید چمران اهواز، ۱۸۵ ص.

برگی، خ.، ۱۳۸۲- اصول مهندسی زلزله، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم.

پور کرمانی، م. و آربن، م.، ۱۳۷۶- سایش موتکتونیک و لرزه زمین ساخت، مهندسی مشاور دزآب.

حسن‌زاده، ر. و عباس‌نژاد، ا.، ۱۳۸۵، تحلیل خطر لرزه‌ای شهر کرمان با روش‌های احتمالاتی و تحلیلی، چکیده مقالات دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ تا ۱۵ شهریورماه ۱۳۸۵، ص ۲۸۴.

حسن‌زاده، ر.، ۱۳۸۵- بررسی شرایط و مسائل زمین‌شناسی شهری کرمان با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان. مهندسین مشاور راکشاد، ۱۳۵۷- گزارش مرحله اول طرح تأمین آب بیست ساله کرمان.

روستایان، م.، ۱۳۷۹- تعیین پریرود طبیعی ریزلرزه‌های زمین در شهر کرمان با استفاده از میکروترمورها (لرزه‌های خفیف)، وزارت صنایع و معادن، مدیریت زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی منطقه جنوب خاوری (کرمان).

ریاضی، ز.، قیطانچی، م. ر. و خدیوی، ش.، ۱۳۸۴- بررسی لرزه‌خیزی در گستره کرمان، بیست و چهارمین گردهمایی علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی کشور. زارع، م.، ۱۳۷۴- مطالعه لرزه زمین‌ساخت و تحلیل خطر زمین‌لرزه در گستره طرح تأمین آب دراز مدت کرمان، مهندسین مشاور هلیل آب.

- زمردیان، س. م. ع. و باقری، ع. ر.، ۱۳۸۳- معرفی مدلی برای پیش‌بینی جابه‌جایی جانبی ناشی از روانگرایی، مجموعه مقالات همایش زلزله، ۱۰-۱۱ تیرماه ۱۳۸۳، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۲۹۸-۳۰۶.
- زمردیان، س. م. ع. و منصوری، ا.، ۱۳۸۳- برآورد پتانسیل روانگرایی خاک‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک، مجموعه مقالات همایش زلزله، ۱۰-۱۱ تیرماه ۱۳۸۳، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ص ۲۹۱-۲۹۷.
- شاه‌پسندزاده، م. و حیدری، م.، ۱۳۷۵- بررسی مقدماتی لرزه‌خیزی، لرزه‌زمین‌ساخت و خطر رویداد زمین‌لرزه- گسلش در پهنه استان کرمان، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله، ۲۱ ص.
- شرکت سهامی آب منطقه‌ای کرمان، ۱۳۸۳- گزارش مطالعات آب دشت کرمان - باغین، امور مطالعات پایه منابع آب، ص ۱۷۸.
- ظهوریان ایزد پناه، ع. ا.، مهاجر اشجعی، ا.، کبیری، ا.، و حسینیان قمصری، م.، ۱۳۶۴- گسترش خسارات پس‌لرزه‌های دو زلزله مخرب ۱۳۶۰ شرق کرمان، نشریه فیزیک زمین و فضا، جلد ۱۳-۱۴، شماره ۱-۲، ص ۳۷-۷۲.
- عباس‌نژاد، ا. و داستانی‌پور، م.، ۱۳۷۸- زلزله‌ها و زلزله‌خیزی استان کرمان، سازمان مسکن و شهرسازی استان کرمان، انتشارات خدمات فرهنگی کرمان، ۲۵۵ ص.
- عباس‌نژاد، ا.، ۱۳۸۳- حفرة فروکش کارستی در اختیار آباد - شمال باختری کرمان، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، سال یازدهم شماره ۵۱-۵۲، ص ۲۸-۳۵.
- عباس‌نژاد، ا.، ۱۳۷۷- گزارش حفاری چاه آب شماره ۱ زمین‌های کشاورزی کارکنان، شرکت تعاونی چند منظوره کارکنان دانشگاه شهید باهنر کرمان.
- عباس‌نژاد، ا. و حسن‌زاده، ر.، ۱۳۸۵- ریزپهنه‌بندی درجه ۲ و ارزیابی اثرات زلزله بر شهر کرمان با استفاده از GIS، چکیده مقالات دهمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳ تا ۱۵ شهریورماه ۱۳۸۵، ص ۲۸۲.
- میر محمد حسینی، س. م. و درخشندی، م.، ۱۳۸۳- راهنمای مقاوم‌سازی زمین‌های سست در برابر روانگرایی، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر (ترجمه مؤسسه تحقیقات سواحل و بنادر وزارت ترابری ژاپن، ۱۹۹۳).
- منظر القائم، س.، ۱۳۷۴- حرکت‌های زمین و روانگرایی خاک در حین زلزله، مؤسسه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله.
- یغمائی، م. ع.، ۱۳۷۱- طرح مطالعه لرزه‌خیزی استان کرمان، جلد اول، وزارت معادن و فلزات، شرکت توسعه علوم زمین.

## References

- Alfaro, A., Pujades, L. G., Goula, X., Susagna, T., Navarro, M. Sanchez, J. & Lanas, J.A., 2002- Preliminary Map of Soils Predominant Periods in Barcelona using Microtremors, in :Earthquake Microzoning ed. by A. Roca and C. Oliveira , pp 2499-2511, Birkhauser Verlag, Berlin.
- Ansal, A. M., Iyisan , R. & Qullu, H., 2002- Microtremor Measurements for The Microzonation of Dinar , in: Earthquake Microzoning , ed. By A.Roca and C.Oliveira,pp 2525-2542, Birkhouser Verlag,Berlin.
- Ashtari- Jafari, M., AKasheh, B, Fatemi, J. & Pas, F., 2004- Seismicity of Kerman , International Conference on Earthquake(A Memorial of Bam Disastar) , December 28- 30 , 2004 , kerman.
- Azizan, H., Shahraki, A. & Seifouri, S., 1999- Kerman geological map (1:100,000), Geological Survey of Iran.
- CITRA, 1965- Etude sur le Development del utilisation Des Eaux sou terraines Dans La zone De Kerman.
- Crouse, C. B., 1991 - Ground Motion Attenuation Equation for Earthquakes on Cascadia Subduction Zones. Earthquake Spectra 7(2): 201-236
- Dimitrijevic, M. D.,1973- Geology of Kerman region , G.S.I , report no. yu/52, 334p.
- Donovan, N. C., 1973 - A statistical evaluation of strong motion data including the Feb. 9,1971, San Fernando earthquake. Proc., 5WCEE, Rome, Italy, 1: 1252-1261.
- Duval, A. M., Vidal, S., Meneroud, J. P., singer, A., De Santis, F., Ramos, C., Romero, G., Rodriguez, R., Pernia, A., Reyes, N. & Griman, C., 2002, Caralos , Venezuela , Site Effect Determination with Microtremors in:Earthquake Microzoning , ed. by: A. Roca and C. Oliveira, p.p 2513-2523 Birkhauser , Berlin.
- Esteva, L. & Villaverde, R., 1973 - Seismic risk, design spectra and structural reliability. Proceedings of Fifth World Conference on Earthquake Engineering, 2: 2586-2596.
- Huckreide, R., kursten, M. & Venzlaff, I. T., 1962- Zur geologie des Gebietes zwischen Kerman and Sagand (Iran), Hannover Bundesanstact for Boden for schung 197 pp.
- I . S. S. M. F. E., 1993- The Techinal Committee for Earthquake Geotechnical Engineering , Tc4 , of The International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mannal for zonation on Seismic Geotecnical Hazards.
- Kajar, M. H., 1996- the history of the kerman basin during the Neogene and Quaternary , G.S.I. Regional Center for S.E.Iran (Kerman).74 pp.
- Nowroozi, A. A. & Mohajer-Ashjai. A., 1985- Fault movements and tectonics of eastern Iran: boundaries of the Lut plate. Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society 83(1): 215-237.
- Nowroozi, A. A, 1985- Empirical relations between magnitudes and fault parameters for earthquakes in Iran, Bulletin of the Seismological Society of America, 75(5):1327-1338
- Slemmons, D. B., 1982- Relationship between total fault length, surface rupture length and maximum displacement and earthquake magnitude, Abstract Earthquake Note 53, 66.
- Wang, j.G.Z.Q. & Tim Law, K., 1994- Sitting in Earthquake Zones, A.A. Balkema , London.
- Yousefi, E. & J. L., Friedberg, 1978- Aeromagnetic Map or Kerman Area,G.S.I.