تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، سال دوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۹٤
صفحات ۱٦-۱

بررسی آشفتگی در الگوی خطر سیلاب در تهران

منیژه قهرودی تالی، دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران[۱]
خه‌بات درفشی، دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه شهید بهشتی تهران

دریافت مقاله: ۹۳/۱۰/۱۴ پذیرش نهایی: ۹۴/۰۲/۲۳

چکیده

سیلاب اگرچه خود مخاطره‌ای محسوب می‌شود، بی‌نظمی‌هایی در الگوهای آن رخ می‌دهد که حاکی از تغییر ماهیت آن است. بی‌نظمی‌های الگوی سیلاب که شاهدی بر کیاس یا آشوب در سیستم رخداد آن است از طریق هندسه‌ی فرکتالی یا برخالی قابل مطالعه است. حوادث رخ داده در تغییرات مکانی سیلاب‌ها در ۵۰ سال اخیرِ تهران حاکی از وقوع بی‌نظمی در الگوی پراکنش سیلاب است. در این پژوهش، بر مبنای داده‌های ۲۷ ایستگاه هواشناسی در دوره‌ی آماری ۲۰۰۹- ۱۹۹۸ و با مدل کریجینگِ تابع گوس، میزان بارش شهر تهران تهیه گردید. با روش SCS (CN) برای کاربری‌های گوناگون شهر تهران، میزان شماره‌ی منحنی و روان‌آب محاسبه شد. با استفاده از متغیرهای مسیل‌های طبیعی شهر، شبکه‌های ارتباطی، کاربری اراضی شهری، سازه‌های شهری، توزیع تراکم جمعیتی و شرایط ارتفاعی و مدل سلسله‌مراتبی نقشه‌ی پتانسیل خطر سیلاب در پنج رده خطر در تهران تهیه شد. همچنین، برای بررسی آشفتگی در الگوی سیلاب در تهران از دو مدل فرکتالی محیط ـ مساحت و تعداد ـ مساحت در ۱۲ حوضه‌ی نمونه و در رده‌های آسیب‌پذیری استفاده گردید. بالاتر بودن میزان D_{AP} و D_P از عدد یک بیانگر افزایش کیاس یا بی‌نظمی در الگوی خطر سیلاب شهر تهران است و این آشفتگی از رده خطر خیلی کم به سمت رده خطر خیلی زیاد افزایش می‌یابد. بنابراین، افزایش آشفتگی هم‌زمان با بزرگ شدن مخاطره‌ی سیلاب بیانگر این است که امکان پیش‌بینی نحوه‌ی گسترش سیلاب و تعیین مناطق در معرض خطر فراهم نیست.

واژگان کلیدی: تهران، سیلاب، آشفتگی، مدل.

۱. نویسنده مسئول: Email: m-ghahroudi@sbu.ac.ir

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

مقدمه

در طبیعت و فرآیندهای حاکم بر آن نظم و کیاس (آشوب) مشهود است. پدیده‌های طبیعی در حالت معمول نوعی نظم دارند. چنان‌چه به هر دلیلی شرایط عادی بر هم خورد، بی‌نظمی و آشوب رخ می‌دهد. سیلاب مخاطره‌ای است طبیعی که از الگوهای خاصی پیروی می‌کنند، الگوهایی که بیانگر همراهی و ترکیب عوامل مداخله‌گر است. رخداد کیاس در مخاطره‌های طبیعی روند پیش‌بینی‌پذیری آن‌ها را تغییر می‌دهد. به عبارت دیگر، سیلاب اگرچه خود مخاطره‌ای محسوب می‌شود، بی‌نظمی در الگوهای آن رخ می‌دهد که حاکی از تغییر ماهیت آن است. بی‌نظمی‌های الگوی سیلاب که شاهدی بر بی‌نظمی یا آشوب در سیستم رخداد آن است از طریق هندسه‌ی فرکتالی یا برخالی قابل مطالعه است (بهرامی دراسله، ۱۳۸۰). هندسه‌ی فرکتال مناسب‌ترین ابزار ریاضی برای توصیف و تبیین کیاس یا بی‌نظمی و آشفتگی پدیده‌های پیچیده‌ی طبیعی با استفاده از شاخص‌های اعتمادپذیر است. بنابراین، مفاهیم فرکتالی می‌تواند برای مدل‌سازی و تعیین تغییرات هندسی نواحی در معرض خطر استفاده شود (قهرودی و خدری، ۱۳۹۲). در سال ۲۰۰۴، زمانی که مندلبروت هندسه‌ی فرکتالی را با عنوان هندسه‌ی طبیعت معرفی کرد، توجه بسیاری از پژوهشگران به این هندسه‌ی نوین جلب شد. از آن زمان تاکنون پژوهشگران توانستند پدیده‌های پیچیده‌ی طبیعی را به‌خوبی با این هندسه مدله کنند. از طرفی، رفتار فیزیکی بسیاری از فرایندهای طبیعی نیز با بهره‌گیری از روابط هندسه‌ی فرکتالی پیش‌بینی‌پذیر است (Lovejoy, ۱۹۸۲). مخاطرات طبیعی از جمله سیلاب‌ها بیشتر از قانون توانی[۱] (فرکتال) آماره‌های اندازه ـ فراوانی تبعیت می‌کنند (Malamud et al, ۲۰۰۶: ۱۶۸). از روش های موجود برای بررسی وجود فرکتال‌ها در مجموعه‌ای داده، برآورد ابعاد و میزان فراوانی آن است که می تواند میزان بی‌نظمی یا تغییرپذیری مشخصه‌ای را توسط توزیع داده‌های آن بیان نماید (Mandelbrot et al,۱۹۸۴). رفتار فرکتالی در واقع رفتاری است که در طبیعت و هر چیزی وجود دارد که متمایل به حالت تعادلی است. طبیعت اگرچه در ذات خود هوشمند نیست، تغییرات خارجی آن را به سمتی سوق می‌دهد که تغییر خارجی مذکور را خنثی کند (کرم، ۱۳۸۹). فرکتال قابلیت توجیه بسیاری از اجسام موجود در طبیعت را دارد که به‌طور نامنظم شکل گرفته‌اند یا پدیده‌هایی که از نظر فضایی هم‌شکل و منطبق بر هیچ کدام از ترکیبات هندسه‌ی اقلیدسی نیستند. آن‌ها به صورت الگویی هندسی تعریف می‌شود که در مقیاس‌های همیشه کوچک‌تر برای ایجاد اشکال نامنظم تکرار می‌شود، سطوحی که با هندسه‌ی کلاسیک نمی‌توان نشانشان داد. مدل فرکتال ابزاری برای توصیف طبیعت مجموعه‌های فرکتالی فراهم می‌کند، مانند محاسبه‌ی بعد فرکتالی آن و مدل‌سازی ارتباطات بین مجموعه‌های فرکتال یا بین مجموعه‌های فرکتالی و غیرفرکتالی (Cheng, ۱۹۹۴:۲۶۸). تا قبل از شروع قرن بیستم، هندسه‌ی اقلیدسی پاسخگوی بیشتر پرسش‌ها درباره‌ی پدیده‌های طبیعی و غیرطبیعی بود. اما این شاخه از ریاضیات فقط برای توصیف پدیده‌هایی کاربرد دارد که شکلی منظم و بعد صحیح داشته باشند. در اواخر قرن بیستم، هادوروف و بیسکوویچ بعضی از خواص اساسی پدیده‌هایی که ابعاد غیرعادی داشتند بررسی کردند. همچنین، مندلبروت اهمیت و ارتباط بین فرکتال‌ها و پدیده‌های فیزیکی و سایر علوم را در کتاب خود به نام *هندسه‌ی فرکتالی در طبیعت* به‌تفصیل بررسی کرد. مندلبروت اولین مدل محیط ـ مساحت را در ۱۹۷۷ برای ارزیابی محیط‌ها و مساحت‌های درون مجموعه‌ای از پدیده‌های شکل‌یافته‌ی منظم

[۱]. Power-Law

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

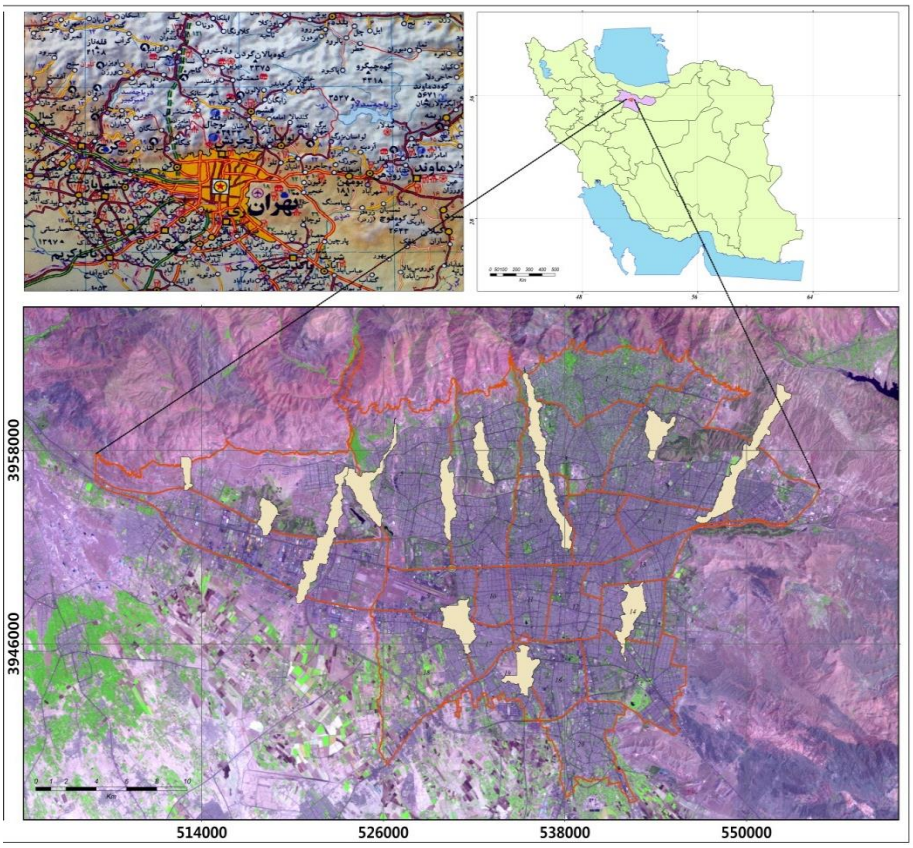
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

ایجاد کرد. این به اصطلاح مدل جزیره ـ شکاف[۱] برای بررسی هندسه‌ی مناطق ابری و برای مشخص کردن درجه‌ی پیچیدگی اشکال ابرها استفاده شد (Lovejoy, ۱۹۸۲). همچنین، برای اندازه‌گیری سطوح شکستگی روی قطعات فلز به کار رفت (Mandelbrot et al, ۱۹۸۴). با وجود این، این مدل گاهی در آزمایش‌های مشابه نتایج متناقض ارائه داده است (Goodchild, ۱۹۸۸). در ۱۹۹۱، مدلی توسعه‌یافته از نظر مولتی فرکتالی ایجاد شد Lovejoy and Schertzer, (۱۹۹۱:۳۱۸). در ۱۹۹۵، مدل عمومی فرکتالی نیز درباره‌ی محیط‌ها و مساحت‌های مجموعه‌های شکل‌یافته‌ی منظم فرکتالی با مساحت فرکتالی (A) و محیط فرکتالی (P) معرفی شد. این مدل عمومی برای جدا کردن آنومالی‌های ژئوشیمیایی از زمینه با مشخص کردن توزیع اثر عناصر در سطوح کانی‌ها و با الگوهای مدل آبراهه‌ای به کار برده شد (Cheng et al, ۲۰۰۱). نمونه‌هایی از کیاس (آشوب) نیز در دره‌های رودهای هنجن و طامه‌ی منطقه‌ی کاشان بررسی شده است (رامشت، ۱۳۸۲). همچنین، الگوی فرکتالی در پلایاهای حوض سلطان و گاوخونی مطالعه شد که نتیجه‌اش در میکرولندفرم‌های موجود در تالاب‌ها گواه بی‌نظمی یا آشوب در سیستم شکل‌زایی حاضر و گذر آن به سیستمی پلایاگونه بود (قهرودی و علی نوری، ۱۳۹۴؛ قهرودی و خدری، ۱۳۹۲).

تهران ــ پایتخت ۲۰۰ ساله‌ی ایرانــ رشد خود را در تبدیل از روستای کوچکی واقع در محدوده‌ی بازار فعلی تا تهران بزرگ امروزی به صورت تدریجی طی نکرده است، بلکه بخش اعظم افزایش مساحت و جمعیت شهر متعلق به ۵۰ سال اخیر است. این شهر در مرکز حوضه‌ی آبریز تهران با وسعت ۲۰۶۴ کیلومتر مربع قرار دارد. علل مهم سیل در شهر تهران توسعه‌ی فیزیکی آن تا ارتفاع ۲۲۰۰ متری، شیب تند مناطق شمالی تهران، اختلاف ارتفاع حدود ۷۰۰ متر بین شمال و جنوب تهران، ساخت و سازهای وسیع و بی‌توجهی به وضعیت اکوسیستم، کاهش قدرت جذب خاک، ناکارآمدی شبکه‌ی فاضلاب و ساخت‌وساز در حریم مسیل‌ها و رودخانه‌هاست، به طوری که آستانه‌های میزان بارش در تولید سیلاب تهران کاهش یافته است(Ghahroudi and Nezammahalleh, ۲۰۱۳) (شهرداری تهران، ۱۳۹۱). بررسی چند سیل به وقوع پیوسته در تهران و توجه به میزان بارش در این سیل‌ها نشان می‌دهد خطر وقوع سیل در تهران با آستانه‌ی بارش حدود ۳۵ تا ۵۰ میلی‌متر امکان‌پذیر است. برای مثال، سیل روز چهارم فروردین ۱۳۷۴ با ۴۲ میلی‌متر بارش، سیل روز ۱۳اسفند ۱۳۶۵ با ۵۲ میلی‌متر بارش، سیل روز دهم اسفند ۱۳۶۶ در منطقه‌ی شمیران تهران با میزان بارش ۴۴ میلی‌متر رخ داده است. همچنین، سیلی سهمگینِ روز یکشنبه چهارم مرداد ۱۳۶۶ (در ساعت یک بعدازظهر، در اوج گرما) در منطقه‌ی شمال تهران اتفاق افتاد که صدها تن گل‌ولای و سنگ را در مسیر رودخانه‌ی گلابدره و جعفرآباد به سمت یکی از میدان‌های اصلی شهر (میدان تجریش) تخلیه کرد و در روز ۲۷ فروردین ۱۳۹۱ سیل در خط ۴ مترو تهران سبب خسارت سنگین به خطوط مترو شد (مرکز مدیریت اطلاعات و حوادث). حوادث رخ داده در تغییرات مکانی سیلاب‌ها در ۵۰ سال اخیر نشان می‌دهد که تحولاتی در تهران در حال وقوع است که می‌تواند سیلاب‌های شهری متفاوت از آنچه به طور طبیعی رخ می‌دهد حادث شود که نتایج آن پیش‌بینی‌پذیر نباشد. در این مقاله به منظور بررسی کیاس و آشفتگی در الگوی سیلاب در تهران از دو مدل فرکتالی محیط ـ مساحت[۲] و تعداد ـ مساحت[۳] استفاده گردید.

۱. Slit- Island
۲. Perimeter-Area Fractal
۳. Number-Area Model

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]



شکل ۱. موقعیت شهر تهران و حوضه‌های مورد مطالعه.

داده ها و روش کار

بر مبنای داده‌های ۲۷ ایستگاه هواشناسی در دوره‌ی آماری ۱۰ ساله (۲۰۰۹- ۱۹۹۸) و با ارزیابی روش‌های گوناگون درون‌یابی با مدل کریجینگِ تابع گوس، لایه ی میزان بارش شهر تهران تهیه گردید. جدول شماره‌ی ۱ ایستگاه‌های استفاده و جدول شماره‌ی ۲ معیارهای آماری بررسی عملکرد و دقت مدل‌های استفاده را نشان می‌دهند. در مدل انتخابی متوسط خطای[۱] درون‌یابی نزدیک صفر، ریشه‌ی متوسط مجذور خطا[۲] در حداقل و همچنین ریشه‌ی میانگین مربع خطای استاندارد[۳] آن نزدیک به یک برآورد شد. با توجه به دستورالعمل آژانس ملی مدیریت اضطرار[۴] (۲۰۰۵)، روش SCS (CN)[۵] برای محدوده‌های بزرگ و با آمار هیدرومتریِ کم مناسب است. از این رو، با استفاده از بارش و بر اساس شماره‌ی منحنی (CN) تعیین شده برای کاربری‌های گوناگون شهر تهران، میزان روان‌آب با معادلات شماره‌ی ۱ و ۲ محاسبه شد. برای کاربری‌های گوناگون شهر تهران مقادیر شماره‌ی منحنی روان‌آب برای نواحی شهری طبق جدول شماره‌ی ۳ برآورد گردید (USDA NRCS, ۱۹۸۶) (قهرودی، ۱۳۸۵). با توجه به جدول شماره‌ی ۳، کم‌ترین CN (عدد ۷۰) برای کاربری فضای سبز و بیش‌ترین میزان آن (عدد ۹۸) مربوط به خیابان‌های آسفالت است. مقدار

۱. Mean Error
۲. Root Mean Square Error
۳. Root Mean Square Standardized
۴. National Emergency Management Agency
۵ The Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN)

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

ذخیره‌ی سطحی خاک (S) با رابطه‌ی شماره‌ی ۲ به دست آمد؛ در معادلات اخیر، محاسبات در سیستم متریک و میزان S نیز به سانتی‌متر تعریف شده است.

رابطه‌ی ۱: $$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{P} + 0.8S$$

رابطه‌ی ۲: $$S = \left(\frac{2540}{CN}\right) - 25.4$$

جدول ۱. متوسط بارش سالانه‌ی ایستگاه‌های هواشناسی

ایستگاه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	متوسط بارش سالانه
آبعلی	۵۱.۸۸	۳۵.۷۵	۶۲۵.۰۵
چیتگر	۵۱.۱۳	۳۵.۷۰	۲۶۸.۸۸
دوشان تپه	۵۱.۳۳	۳۵.۷۰	۲۵۸.۱۴
فیروزکوه (پل)	۵۲.۸۳	۳۵.۹۲	۲۹۹.۱۳
ژئوفیزیک	۵۱.۳۸	۳۵.۷۵	۳۱۹.۲۵
کرج	۵۰.۹۰	۳۵.۹۲	۲۶۱.۲۳
شمال تهران	۵۱.۶۲	۳۵.۷۸	۴۲۸.۴۶
مهرآباد	۵۱.۳۲	۳۵.۶۸	۲۴۶.۴۱
فیروزکوه	۵۲.۴۰	۳۵.۷۲	۴۱۹.۵۵
همند - آبسرد	۵۲.۰۸	۳۵.۶۵	۳۳۶.۸۵
ممزان	۵۱.۶۸	۳۵.۴۷	۱۴۰.۴۴
اشتهارد	۵۰.۳۷	۳۵.۷۲	۲۰۵.۴۰
استهلاک	۵۱.۷۵	۳۵.۷۵	۴۰۲.۴۸
قلعه حسن‌خان	۵۱.۱۲	۳۵.۷۲	۳۱۴.۳۴
قزل حصار	۵۰.۷۸	۳۵.۸۲	۲۷۰.۰۲
هشتگرد	۵۰.۶۷	۳۵.۹۲	۲۴۵.۶۰
جابون	۵۲.۲۵	۳۵.۶۵	۲۲۲.۱۵
جزینان	۵۰.۷۸	۳۶.۲۵	۵۸۷.۷۴
کندر	۵۱.۱۲	۳۵.۸۵	۴۲۳.۱۸
پالایشگاه	۵۱.۴۳	۳۵.۶۰	۲۱۵.۶۷
پیشوا	۵۱.۷۳	۳۵.۳۰	۱۸۰.۷۶
شمال غرب تهران	۵۱.۲۷	۳۵.۷۵	۳۱۳.۹۸
سیجان	۵۱.۱۲	۳۵.۹۵	۵۱۰.۴۲
سیمین دشت	۵۲.۴۸	۳۵.۵۲	۲۹۰.۰۰
سرخاباد	۵۰.۷۳	۳۵.۹۰	۲۶۴.۹۷
سولقان	۵۱.۲۷	۳۵.۸۳	۴۴۳.۶۳
صومعه کردان	۵۰.۸۳	۳۵.۹۵	۵۹۴.۵۹

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

جدول ۲. معیارهای آماری بررسی عملکرد و دقت مدل‌های استفاده شده در میان‌یابی

Method	IDW *	Radial Basis Function	KRIGING		
			Circular	Spherical	Gaussian
Mean	-۸.۳۷۴	-۱.۸۲	۲.۶۹۶	۲.۵۹۳	۱.۸۱۳
Root-Mean-Square	۱۲۴.۸	۱۱۹.۵	۱۱۸.۵	۱۱۸.۸	۱۱۷.۵
Average Standard Error	-	-	۱۲۰.۶	۱۲۰.۵	۱۲۰.۳
Mean Standardized	-	-	۰.۰۱۶۶	۰.۰۱۸۴۱	۰.۰۱۱۵
Root-Mean-Square Standardized	-	-	۰.۹۹۶۷	۱.۰۰۳	۰.۹۹۹

*توان مدل: ۲/۳۴۸۵

جدول ۳: مقادیر شماره‌ی منحنی برای کاربری‌های گوناگون کلان‌شهر تهران

نوع کابری	شماره‌ی منحنی (CN)
فضای سبز	۷۰
بایر	۸۲
معادن	۸۵
صنعتی	۸۸
نظامی و انتظامی	۹۰
تجاری	۹۲
تأسیسات و تجهیزات شهری	۹۳
مسکونی	۹۵
حمل و نقل و انبار	۹۷
خیابان	۹۸

افزایش حجم روان‌آب و سیلاب، کاهش زمان تمرکز، افزایش دبی حداکثر لحظه‌ای و تغییر کیفیت سیلاب نتیجه‌ی گسترش شهر در حوضه‌های آبریز بالادست و افزایش سطوح نفوذناپذیر است، به طوری که شهرسازی میانگین روان‌آب را از ۲ تا ۶ برابر به زمین‌های طبیعی افزایش داده که پیامد آن گسترش سیلاب‌های شهری است. بنابراین، برای تعریف شاخص‌های مؤثر بر سیلاب شهری تهران، از روابط گوناگون بین عوامل و میزان تأثیرگذاری آن‌ها استفاده گردید. شبکه‌های ارتباطی و سطح زیربنای مسکونی در بخش‌های گوناگون شهر تهران سطوح نفوذناپذیر شهری در نظر گرفته شد. سطح زیربنای مسکونی شامل بخش ساخته شده هر واحد مسکونی در مناطق گوناگون شهر تهران است. برای ایجاد این لایه، ۶۰ درصد از مساحت هر قطعه[1] زمین مسکونی (لایه‌ی کاربری اراضی) به صورت سطح زیربنا در نظر گرفته شد. خیابان‌ها و بزرگراه‌های شهر تهران، با امتدادهای مشخص و خاص خود، متغیرهای مؤثر در سیلاب‌های کوتاه‌مدت و پیش‌بینی‌ناپذیر شهر تهران قلمداد گردید. شبکه‌های شمالی ـ جنوبی عامل تسریع جریان روان‌آب و هدایت آن به سمت بافت مرکزی و جنوب شهر تهران هستند که معضل آب‌گرفتگی را در شیب‌های پایین به وجود می‌آورند. اجرای بزرگراه‌های متعدد در امتداد شرقی ـ غربی نیز، که

[1]. Parcel

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

قطع‌کننده‌ی زهکش‌های عمده شهر هستند، سبب شده کلان‌شهر تهران به‌طور فزاینده‌ای با مسئله‌ی سیلاب‌های شهری پیش‌بینی‌ناپذیر مواجه باشد.

بافت فرسوده به عرصه‌هایی از محدوده‌ی قانونی شهرها اطلاق می‌شود که به دلیل فرسودگی کالبدی، فقدان دسترسی‌های نامناسب، کمبود خدمات و زیرساخت‌های شهری آسیب‌پذیر است و ارزش مکانی، محیطی و اقتصادی نازلی دارد. پیامدهای فرسودگی بافت با کاهش و یا فقدان شرایط زیست‌پذیری و ایمنی و نیز نابسامانی‌های کالبدی، اجتماعی، اقتصادی و خدمات شهری مشهود است. مطابق شاخص‌های مصوب شورای عالی شهرسازی و معماری، وسعت پهنه‌های ناپایدار شهر تهران ۱۴۷۹۲ هکتار بوده که ۳۲۶۸ هکتار آن به دلیل دارا بودن هر سه شرط فرسودگی (ناپایداری، نفوذناپذیری و ریزدانگی) جزو بافت فرسوده مصوب شد. وسعت زیاد بافت‌های فرسوده با تراکم بالای جمعیت و آسیب‌پذیری این بافت در مقابل مخاطرات محیطی، از جمله سیلاب شهری، یکی از مهم‌ترین مسائل شهر تهران است (عرب احمدی، ۱۳۸۶).

آماده‌سازی متغیر تراکم جمعیت بر مبنای آمار جمعیتی نواحی شهر تهران در سال ۱۳۸۸ صورت گرفت. ابتدا فایل نقطه‌ای داده‌های جمعیتی برای هر ناحیه از شهر تهران تهیه گردید. سپس، بر اساس داده‌های نقطه‌ای و از طریق پلیگون‌های تیسن، مشخصه محل‌های اندازه‌گیری نشده با نزدیک‌ترین نقطه داده‌ای منفرد محاسبه شد. بدین ترتیب، لایه‌ای سطحی از جمعیت نواحی شهر تهران به صورت پلیگون‌های چندضلعی تهیه شد.

چون آب‌گرفتگی دهنه‌ی پل‌ها در هنگام بارش‌های شدید از جمله شایع‌ترین معضلات روانآب‌های شهر تهران است، نقشه‌ی مکانی تعداد ۱۲۷ پل روگذر گزارش‌شده‌ی سازمان مشاور فنی و مهندسی شهر تهران تهیه شد. جریان سریع روان‌آب در شیب‌های بالای شمال شهر تهران به همراه کاهش سرعت روان‌آب در شیب‌های پایین جنوب شهر و افزایش احتمال آب‌گرفتگی حاکی از نقش شیب در الگوی سیلاب شهر تهران است. از این رو، ارتفاع و شیب از داده‌ی ارتفاعی سنجنده‌ی استر[۱] استخراج شده است.

شبکه‌ی زهکشی، رودخانه‌ها و مسیل‌های شهری دارای مسائل و مشکلات عمده‌ای هستند، از جمله محدود شدن آن‌ها به کانال اصلی و همچنین ساخت و ساز در محدوده‌ی اطراف کانال است. بنابراین، افزایش خطرهای سیلاب به دلیل کاهش محدوده‌ی عبور روان‌آب رخ می‌دهد. فعالیت‌های انسانی تأثیرهای انکارناپذیری در رودخانه‌ها و مسیل‌های شهر تهران داشته که در سیستم هیدرولوژیکی و هندسه‌ی رودخانه تغییرات فراوانی داشته‌اند (مهندسین مشاور جهاد تحقیقات آب و انرژی، ۱۳۹۱).

برای درک رابطه‌ی بین عوامل فوق از ضریب همبستگی غیر پارامتریک کندال[۲] استفاده شده است (مهدوی و طاهرخانی، ۱۳۸۳، ۱۶۶). این ضریب همبستگی با حرف یونانی τ (تاو) نمایش داده و از طریق رابطه‌ی ۳ تعریف می‌شود:

رابطه‌ی ۳: $$\tau = \frac{2S}{N(N-1)}$$

که در آن S مجموع ضرایب همبستگی جفت و جور شده‌ی عوامل مورد نظر است. استفاده از روش کندال با توجه به ماهیت رتبه‌ای بودن داده‌ها صورت گرفته است. رتبه‌های مورد نظر بر اساس ارتباط نظری متغیرها و سیلاب تهیه شده است (جدول ۴).

[۱] ASTER
[۲]. Kendal

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

جدول ۴. ضرایب همبستگی کندال برای متغیرهای مؤثر در سیلاب تهران

متغیر	سطح زیربنای مسکونی	تقاضل بارش و روان‌آب	جمعیت	شبکه‌ی ارتباطی		ارتفاع	شبکه‌ی آبراهه	کاربری اراضی	پل	بافت فرسوده	شیب
				شمالی جنوبی	شرقی غربی						
ضریب همبستگی	۰/۴۲	-۰/۳۳	۰/۵۲	-۰/۴۲	-۰/۰۷	-۰/۱۱	۰/۱۶	۰/۳۴	-۰/۱۴	۰/۵۱	-۰/۱۲
سطح معناداری*	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰.۰۰۱	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰	۰/۰۰

* در سطح کمتر از ۰/۰۰۱ معنادار است.

برای تهیه‌ی نقشه‌ی پتانسیل خطر سیلاب با استفاده از ۸ متغیر فوق از مدل سلسله‌مراتبی[۱] استفاده شده است. برای تعیین وزن کلی و ارجحیت متغیرهای به کار گرفته شده در پتانسیل خطر و تبدیل آن‌ها به مقادیر کمی از قضاوت‌های شفاهی (نظر کارشناسی) استفاده شد. بر اساس نظرهای کارشناسی، ماتریسی به ابعاد ۸×۸ ایجاد و اولویت‌بندی متغیرها نسبت به هدف (پتانسیل خطر) بر مبنای مقایسه‌ی دو به دو سنجیده شد (جدول ۵) (صالحی و همکاران، ۱۳۹۲).

برای محاسبه‌ی مقادیر و بردار ویژه، ستون‌ها با هم جمع و هر سلول ماتریس بر جمع ستون مربوط تقسیم شد که این عمل برای نرمال کردن ماتریس صورت گرفت. مرحله‌ی بعدی محاسبه‌ی میانگین سطرهای ماتریس است که از آن به منزله‌ی وزن نسبی استفاده شد. وزن معیار برای عامل فاصله از شبکه‌ی ارتباطی با جهت شمالی ـ جنوبی ۰/۳۳۱۳، فاصله از شبکه‌ی ارتباطی با جهت شرقی ـ غربی ۰/۲۳۰۷، سطح زیربنای مسکونی ۰/۱۵۷۲، کاربری اراضی ۰/۱۰۵۹، فاصله از پل ۰/۰۷۰۹، شیب ۰/۰۴۷۷، تراکم شبکه‌ی آبراهه ۰/۰۳۲۷ و ارتفاع ۰/۰۲۳۶ محاسبه گردید. از متغیر بافت فرسوده به دلیل عدم توزیع مناسب و تمرکز در محدوده‌های خاص صرف‌نظر شد

جدول ۵. ماتریس متغیرهای مؤثر در تهیه‌ی نقشه‌ی پتانسیل خطر سیلاب

متغیر	فاصله از شبکه‌ی ارتباطی (شمالی ـ جنوبی)	فاصله از شبکه‌ی ارتباطی (شرقی ـ غربی)	سطح زیربنای مسکونی	کاربری اراضی	فاصله از پل	شیب	تراکم شبکه‌ی آبراهه	ارتفاع
فاصله از شبکه‌ی ارتباطی (شمالی ـ جنوبی)	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸
فاصله از شبکه‌ی ارتباطی (شرقی ـ غربی)	۰.۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
سطح زیربنای مسکونی	۰.۳۳	۰.۵	۱	۲	۳	۴	۵	۶
کاربری اراضی	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۵	۱	۲	۳	۴	۵
فاصله از پل	۰.۲	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۵	۱	۲	۳	۴
شیب	۰.۱۶	۰.۲	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۵	۱	۲	۳
تراکم شبکه‌ی آبراهه	۰.۱۴	۰.۱۶	۰.۲	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۵	۱	۲
ارتفاع	۰.۱۲	۰.۱۴	۰.۱۶	۰.۲	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۵	۱

CR = ۰ *

[۱] Analytic Hierarchy Process (AHP)

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

پس از محاسبه و تهیه‌ی نقشه‌ی آسیب‌پذیری کلان‌شهر تهران در مقابل سیلاب محدوده‌ی مورد نظر به زیرحوضه‌های هیدرولوژی تقسیم شد و ۱۲ حوضه به صورت تصادفی انتخاب شد و از دو مدل فرکتالی محیط ـ مساحت و تعداد ـ مساحت استفاده گردید.

فرکتال محیط ـ مساحت مدلی ریاضی برای نشان دادن ارتباط بین محیط (P) و مساحت (A) فرکتال‌های مشابه شکلی است (Cheng, ۱۹۹۵; Wang et al, ۲۰۰۶). این مدل از طریق رابطه‌ی شماره‌ی ۴ به دست می‌آید:

رابطه‌ی ۴: $$P \propto A^{1/2D_{AP}}$$

که در آن P محیط و A مساحت اجزای پدیده‌ای است؛ «$\propto$» نیز «نسبت به» تعریف شده است. D_{AP} توان ارتباط قانون توانی است که از رابطه‌ی $D_{AP} = ۲D_P/D_A$ به دست می‌آید؛ D_A و D_P به ترتیب ابعاد فرکتالی محیط و مساحت هستند. زمانی که روش box-counting به کار گرفته شود D_A و D_P می‌تواند از طریق روابط شماره‌ی ۵ و ۶ به دست آید (Cheng, ۱۹۹۵):

رابطه‌ی ۵: $$Dp = 1 - \lim(\frac{LogP(\delta)}{Log\delta})$$

رابطه‌ی ۶: $$DA = 2 - \lim(\frac{LogA(\delta)}{Log\delta})$$

داده‌های P و A برروی کاغذ لگاریتمی ترسیم و ارتباط خطی بین لگاریتم محیط و لگاریتم مساحت به دست آمد؛ توان محیط و مساحت D_{AP} می‌تواند از طریق برازش خطی مستقیم با استفاده از روش کوچک‌ترین مربعات[۱] تعیین شود. شیب این خط برآوردی از D_{AP} ۱/۲ است (Cheng, ۱۹۹۵) (رابطه‌ی ۷).

رابطه‌ی ۷: $$Log\ P = C + ۱/۲D_{AP}logA$$

که C عدد ثابت است. در مجموع D_{AP} دامنه‌های از ۱ تا ۲ دارد؛ اگر D_{AP} برابر ۱ باشد آنگاه رابطه‌ی شماره‌ی ۶ برقرار می‌شود و مجموعه‌های شکل گرفته‌ی منظمی را مانند مربع‌ها یا دایره‌ها نشان می‌دهد. ارزش بالاتر D_{AP} فشردگی بیشتر شکل را بیان می‌کند و اگر D_{AP} برابر ۲ باشد آنگاه $P \propto A$ برقرار می‌شود. بر این اساس، با افزایش ارزش D_{AP} از ۱ به سمت ۲ بر میزان آشفتگی و بی‌نظمی محیط نسبت به مساحت پدیده مورد بررسی افزوده می‌شود که نشان‌دهنده‌ی افزایش آشفتگی در رویداد پدیده است. مقدار D_P از طریق رابطه‌ی $D_P = ۰.۵\ D_{AP}\ D_A$ محاسبه می‌شود.

رابطه‌ی ۸: $$P \propto A^{0.5}$$

مدل تعداد ـ مساحت با استفاده از ارتباط بین تعداد تجمعی و مساحت اجزای متعلق به پدیده‌ای از طریق رابطه‌ی شماره‌ی ۷ مشخص می‌شود:

رابطه‌ی ۹: $$N(\geq A) \propto A^{-D}$$

که در آن A مساحت اجزای پدیده و N تعداد تجمعی اجزا با مساحتی بیشتر از A است. به منظور تعیین توان D برای مجموعه داده‌ی N(>A) و A، ضریب شیب رگرسیون خطی می‌تواند استفاده شود (رابطه‌ی ۱۰).

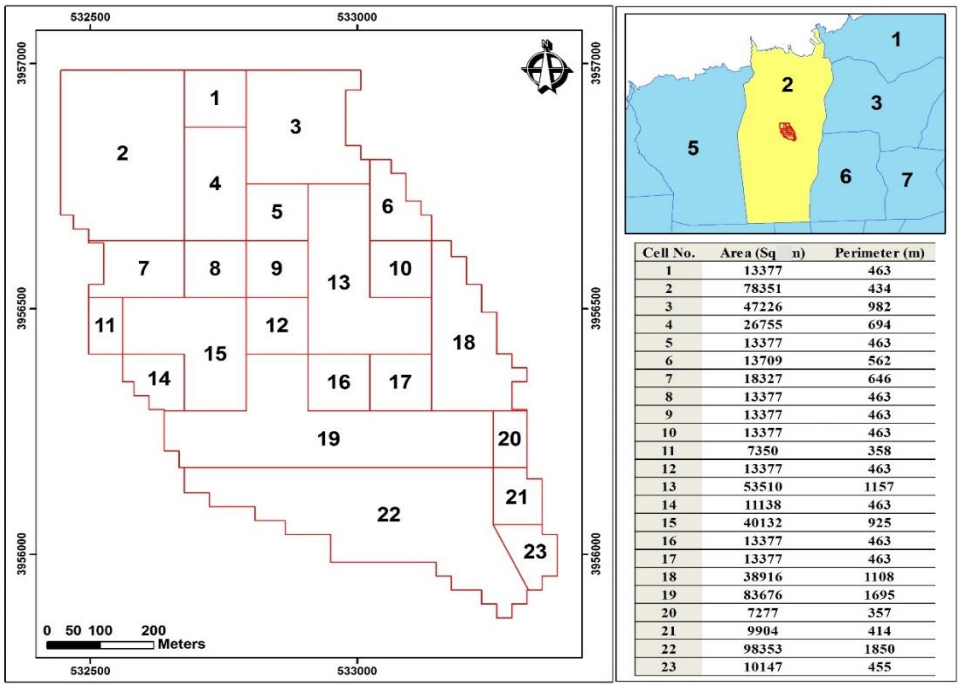
رابطه‌ی ۱۰: $$Log\ N\ (>A) = C - D\ log\ A$$

ارزش توان میزان تغییر تعداد اجزا و اندازه‌ی آن‌ها را تعیین می‌کند؛ D بزرگ‌تر اجزای کم با اندازه‌ی بزرگ یا اجزای بیش‌تر با اندازه‌ی کوچک را نشان می‌دهد.

۱. Least Squares

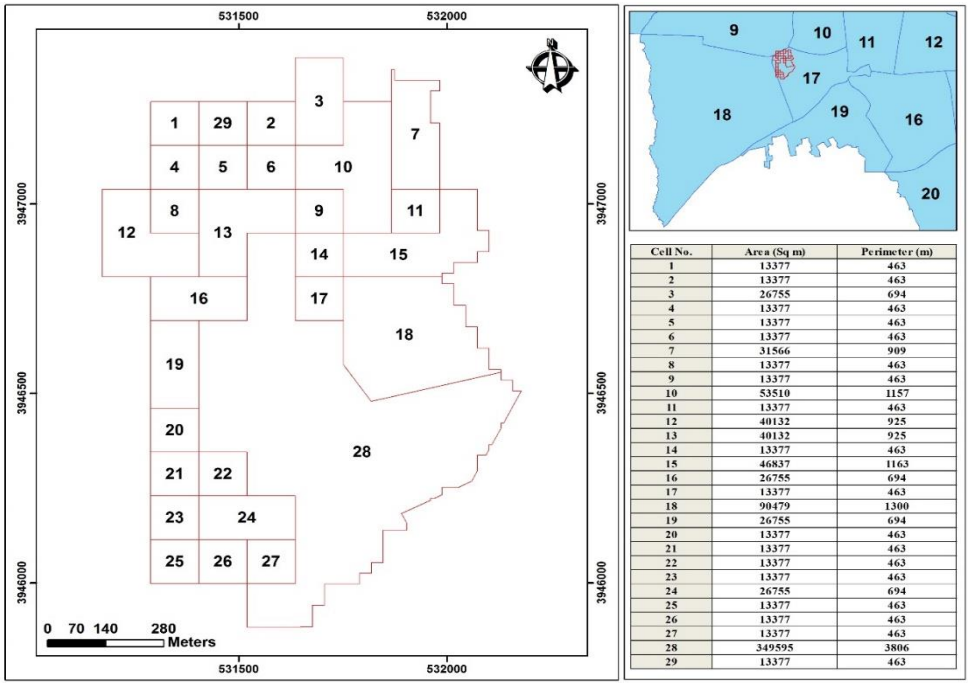
[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]



Cell No.	Area (Sq m)	Perimeter (m)
1	13377	463
2	78351	434
3	47226	982
4	26755	694
5	13377	463
6	13709	562
7	18327	646
8	13377	463
9	13377	463
10	13377	463
11	7350	358
12	13377	463
13	53510	1157
14	11138	463
15	40132	925
16	13377	463
17	13377	463
18	38916	1108
19	83676	1695
20	7277	357
21	9904	414
22	98353	1850
23	10147	455

شکل ۲. حوضه‌ی نمونه‌ی واقع در منطقه‌ی ۲ شهر تهران.



Cell No.	Area (Sq m)	Perimeter (m)
1	13377	463
2	13377	463
3	26755	694
4	13377	463
5	13377	463
6	13377	463
7	31566	909
8	13377	463
9	13377	463
10	53510	1157
11	13377	463
12	40132	925
13	40132	925
14	13377	463
15	46837	1163
16	26755	694
17	13377	463
18	90479	1300
19	26755	694
20	13377	463
21	13377	463
22	13377	463
23	13377	463
24	26755	694
25	13377	463
26	13377	463
27	13377	463
28	349595	3806
29	13377	463

شکل ۳. حوضه‌ی نمونه‌ی واقع در منطقه‌ی ۱۷ شهر تهران.

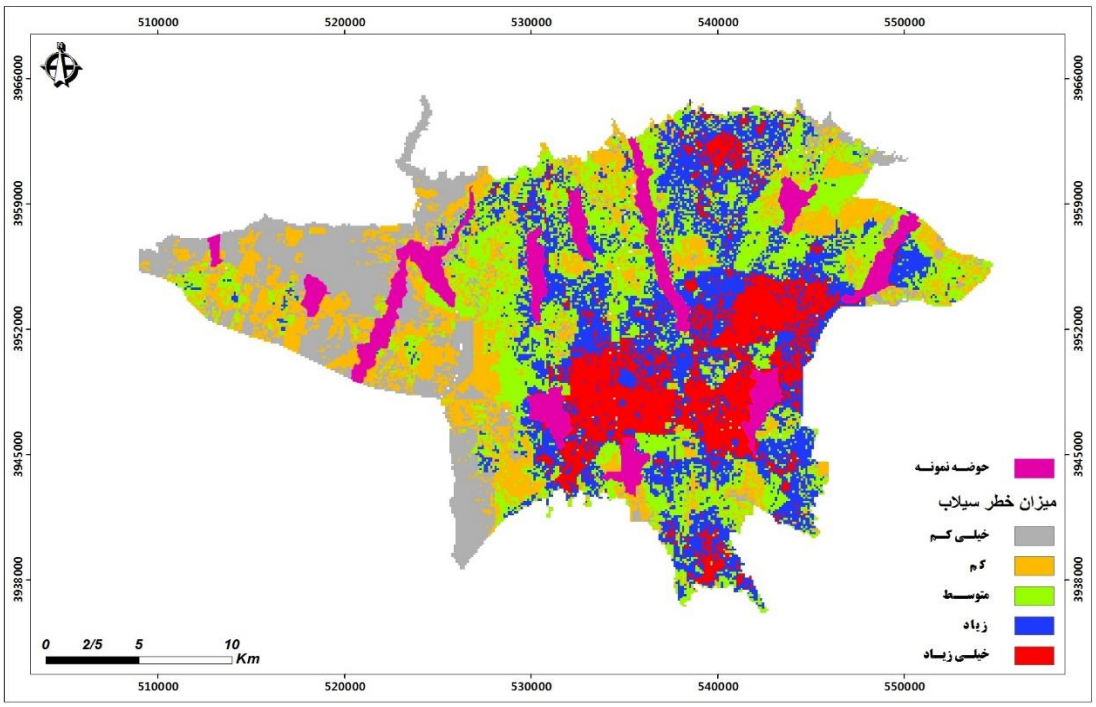
شرح و تفسیر نتایج

هنگامی‌که تهران یا شمال تهران با بارندگی متوسط تا شدید روبه‌روست، سیلاب در سطح گستره‌ی شهر جاری می‌شود، اما عملکرد آن بر اساس میزان تغییر یا تخریب مسیل‌های طبیعی شهر، چگونگی اجرای شبکه‌های ارتباطی (جهت شمالی ـ جنوبی یا شرقی ـ غربی)، تفاوت در کاربری اراضی/ پوشش اراضی، تفاوت در الگوی سازه‌های شهری،

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

یکسان نبودن توزیع تراکم جمعیتی در سطح شهر و حتی سطح زندگی اجتماعی ـ اقتصادی محله‌های شهری تهران یکسان نیست. بنابراین، الگوی توزیع مکانی خطر سیلاب در شهر تهران در این پژوهش بررسی شده است. نتایج پهنه‌بندی خطر سیلاب در تهران در ۵ رده در شکل ۴ نشان داده شده است.

نتایج مدل محیط ـ مساحت خطر سیلاب برای ۵ رده‌ی خطر در شکل شماره‌ی ۵ نشان داده شده است. این شکل ترسیم محیط و مساحت پلیگون‌های خطر سیلاب در مقیاس لگاریتمی است. نتایج به دست آمده ارتباط خطی بین لگاریتم‌های محیط و مساحت را بیان می‌کند که گواه ارتباط توانی بین آن‌هاست. جدول شماره‌ی ۶، شاخص های آماری محیط و مساحت خطر سیلاب کلان‌شهر تهران در ۵ رده و جدول شماره‌ی ۷، مشخصه‌های به دست آمده از مدل محیط ـ مساحت خطر سیلاب را در حوضه‌های نمونه نشان می‌دهد.



شکل.۴: پهنه‌بندی خطر سیلاب در تهران و حوضه‌های نمونه.

جدول ۶. شاخص های آماری فرکتال‌های محیط ـ مساحت

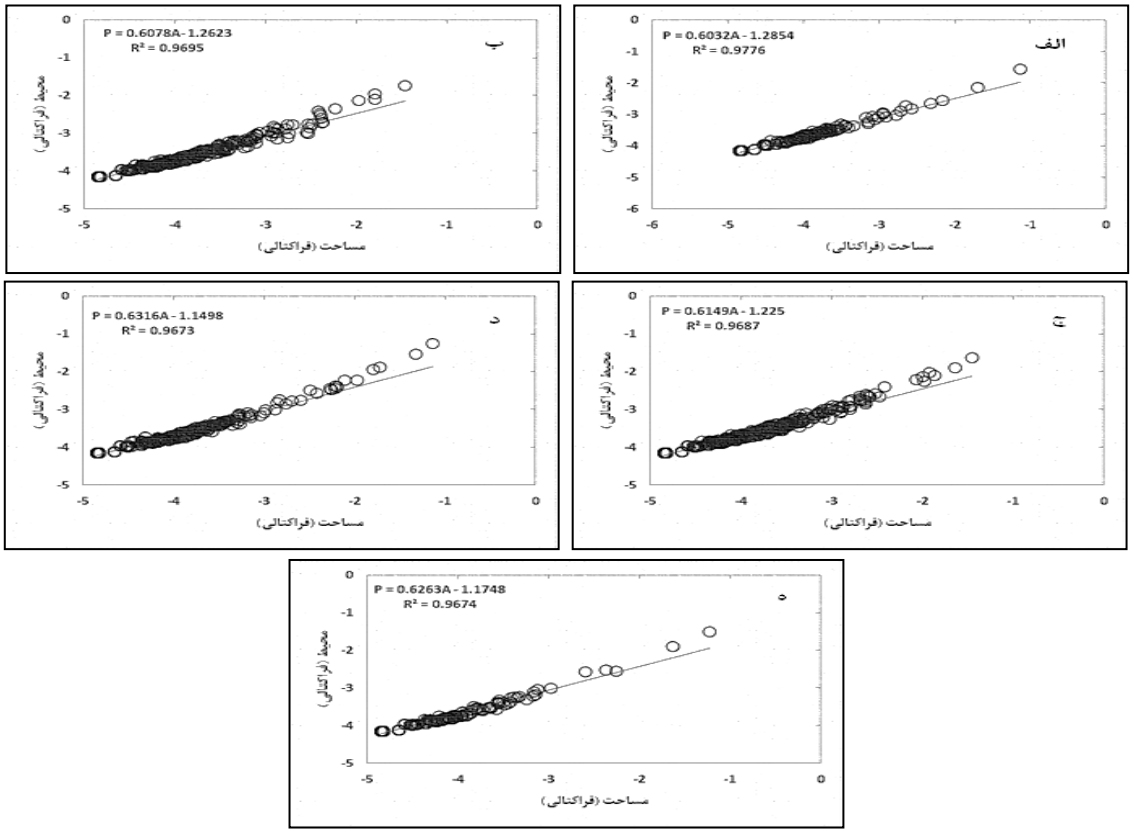
رده‌ی خطر	مساحت (Km^2)				محیط (Km)				محیط فرکتالی	مساحت فرکتالی
	Max	Min	Mean	Std	Max	Min	Mean	Std		
خیلی کم	۸۸.۱۷	۰.۰۱	۰.۴۶	۵.۶۴	۱۷۹.۹	۰.۴۳	۱.۷۲	۱۱.۶۴	۰.۱۵۱	۰.۰۸۷
کم	۲۳.۳۵	۰.۰۱	۰.۱۴	۱.۰۵	۱۱۱.۱	۰.۴۳	۱.۲۸	۵.۲۹	۰.۱۷۳	۰.۲۱۵
متوسط	۵۹.۷۲	۰.۰۱	۰.۱۷	۲.۰۲	۴۴۴.۳	۰.۴۳	۱.۶۶	۱۴.۶۴	۰.۲۵۵	۰.۳۰۸
زیاد	۲۱.۱۴	۰.۰۱	۰.۱۳	۰.۹۹	۱۵۲.۰	۰.۴۳	۱.۴۱	۶.۶۰	۰.۲۳۴	۰.۲۷۲
خیلی زیاد	۳۳.۹۸	۰.۰۱	۰.۳۵	۲.۷۸	۱۲۹.۱	۰.۴۳	۲.۱۷	۱۱.۱۵	۰.۱۸۸	۰.۱۱۷
مجموع	-	-	-	-	-	-	-	-	۱	۱

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

جدول ۷. مشخصه‌های به دست آمده از مدل فرکتالی

رده‌ی خطر	$1/2D_{AP}$	D_{AP}	D_A	D_P	R^2
خیلی کم	۰.۶۰۳	۱.۲۰۶	۱.۸۰۰	۱.۰۸۶	۰.۹۷۸
کم	۰.۶۰۸	۱.۲۱۶	۱.۷۹۰	۱.۰۸۸	۰.۹۷۰
متوسط	۰.۶۱۵	۱.۲۳۰	۱.۷۸۸	۱.۱۰۰	۰.۹۶۹
زیاد	۰.۶۳۲	۱.۲۶۳	۱.۷۸۹	۱.۱۳۰	۰.۹۶۷
خیلی زیاد	۰.۶۴۶	۱.۲۹۳	۱.۷۹۱	۱.۱۵۸	۰.۹۶۷



شکل ۵. نمودار لگاریتمی محیط ـ مساحت رده‌های خطر سیلاب (نمودارهای الف، ب، ج، د و ه به ترتیب برای رده‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد)

.

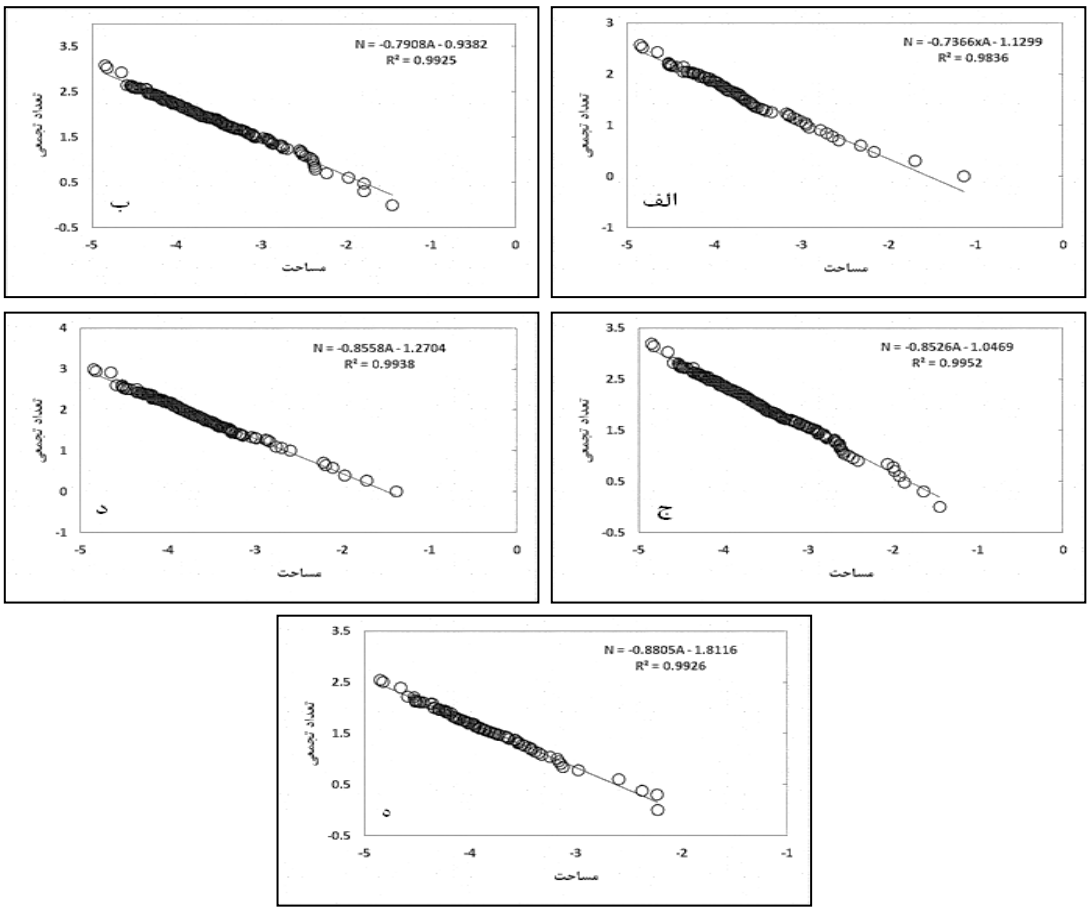
توان D_{AP} محیط ـ مساحت رده‌های خطر سیلاب از طریق روش کوچک‌ترین مربع‌ها محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که ارتباط خطی بین لگاریتم‌های محیط و مساحت وجود دارد که ارتباط قانون توانی بین آن‌ها را بیان می‌کند. همه‌ی ضرایب همبستگی مربع (R^2) بالاتر از ۰/۹۶ هستند. شیب خط معادله در رده‌های سیلاب به ترتیب ۰/۶۰۳، ۰/۶۰۸، ۶۱۵، ۰/۶۳۲ و ۰/۶۴۶ است که روندی افزایشی دارد. به تبع آن ارزش D_{AP} نیز با افزایش از رده ۱ تا ۵ به ترتیب ۱/۲۰۶، ۱/۲۱۶، ۱/۲۳، ۱/۲۶۳ و ۱/۲۹۳ است. با توجه به بالاتر بودن D_{AP} از عدد ۱، می‌توان به این نتیجه رسید که الگوی خطر سیلاب شهر تهران در هر پنج رده الگوی آشفته دارد.

D_A به دست آمده برای رده‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد به ترتیب از ۱/۸، ۱/۷۹، ۱/۷۸۸، ۱/۷۸۹ به ۱/۷۹۱ افزایش پیدا می‌کند. بر مبنای رابطه‌ی $D_P = 0.5\ D_{AP}\ D_A$، ابعاد فرکتالی رده‌های خطر به دست آمد

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]
[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

که نتیجه‌ی آن ۱/۰۸۶، ۱/۰۸۸، ۱/۱، ۱/۱۳ و ۱/۱۵۸ است. این افزایش بیانگر این است که آشفتگی خطر سیلاب بر مبنای مدل محیط ـ مساحت فرکتالی، از رده‌ی خطر خیلی کم به سمت رده‌ی خیلی زیاد بیشتر می‌شود. بنابراین، با افزایش میزان خطر ارزش‌های D_{AP} و D_P نیز بیشتر شده که آشفتگی بیش‌تر الگوی خطر سیلاب را با افزایش رده (میزان) آن نشان می‌دهد.

نتایج مدل تعداد ـ مساحت نیز آشفتگی سیلاب در پنج رده‌ی خطر را نشان می‌دهد. D، که میزان تغییر تعداد تجمعی پلیگون‌های خطر سیلاب و ناحیه را منعکس می‌سازد، از طریق نمودار لگاریتمی برای رده‌های خطر محاسبه شد (شکل ۶). نتایج نشان می‌دهد که ارتباط خطی بین لگاریتم‌های تعداد تجمعی و مساحت با ضرایب R^2 بالاتر از ۰/۹۸ وجود دارد. توان D (که از رابطه‌ی $\text{Log N (>A)} = C - D \log A$ به دست می‌آید) تعداد تجمعی مساحت برای رده‌های خطر به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۹، ۰/۸۵، ۰/۸۶ و ۰/۸۸ به دست آمده است؛ این افزایش بیانگر کوچک‌تر شدن اندازه‌ی پلیگون‌های خطر از رده‌ی خیلی کم به سمت رده‌ی خیلی زیاد است. به عبارتی، با افزایش رده‌ی خطر، پلیگون‌های آن کوچک‌تر می‌شود. این وضعیت حاکی از افزایش آشفتگی الگوی خطر سیلاب با افزایش میزان آن است. زمانی که پلیگون‌های خطر اندازه‌ی کوچکی داشته باشند به این معناست که الگو و ارزش خطر در بعد مکانی به شدت متغیر است و همین متغیر بودن مکانی آشفتگی الگوی آن را بیان می‌کند.



شکل ۶. نمودار لگاریتمی تعداد تجمعی و مساحت رده‌های خطر سیلاب (نمودارهای الف، ب، ج، د و ه به ترتیب برای رده‌های خطر خیلی کم، کم، متوسط، زیاد و خیلی زیاد).

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

نتیجه گیری

الگوی رخداد پدیده‌های طبیعی و حتی مخاطرات طبیعی در حالت معمول از نوعی نظم برخوردارند. چنان‌چه به هر دلیلی شرایط طبیعی رخداد آن بر هم خورد، بی‌نظمی و کیاس(آشوب) رخ می‌دهد. سیلاب مخاطره‌ای طبیعی است که از الگوهای خاصی پیروی می‌کند، الگوهایی که از روابط بین عوامل آن تولید می‌شود. رخداد کیاس در پدیده‌ی سیلاب روند قابل پیش‌بینی آنان را تغییر می‌دهد. به عبارت دیگر، سیلاب اگرچه خود یک مخاطره یا بی‌نظمی هیدرولوژیکی محسوب می‌شود، لیکن بی‌نظمی در الگوهای رخداد آن می‌تواند حاکی از تغییر ماهیت آن باشد. تبیین کیاس یا بی‌نظمی و آشفتگی در مخاطره‌ی سیلاب با هندسه‌ی فرکتال قابل ردیابی است، رخداد سیلاب در تهران به آستانه‌ی رخداد بارندگی وابسته است. اما الگوی گستردگی آن در تهران به منزله‌ی مخاطره به عوامل دیگری بستگی دارد که در پژوهش اخیر مسیل‌های طبیعی شهر، شبکه‌های ارتباطی (جهت شمالی ـ جنوبی یا شرقی ـ غربی)، کاربری اراضی شهری، سازه‌های شهری، توزیع تراکم جمعیتی و شرایط ارتفاعی در نظر گرفته شده است. با توجه به عوامل اخیر ۵ رده‌ی خطر رخداد سیلاب در تهران محاسبه شده است. در حالی که شکل شماره‌ی ۵ ارتباط توانی بین ابعاد محیط و مساحت را نشان می‌دهد، فرکتال‌های با افزایش رده‌ی خطر افزایش می‌یابد، به طوری که ارزش D_{AP} نیز با افزایش از رده‌ی خطر خیلی کم تا خیلی زیاد به ترتیب ۱/۲۰۶، ۱/۲۱۶، ۱/۲۳، ۱/۲۶۳ و ۱/۲۹۳ است. در حالت کلی، بالاتر بودن D_{AP} از عدد ۱ بیانگر افزایش کیاس یا بی‌نظمی در الگوی خطر سیلاب شهر تهران است. D_A به دست آمده برای رده‌های خطر خیلی کم، تا خیلی زیاد به ترتیب از ۱/۸، ۱/۷۹، ۱/۷۸۸، ۱/۷۸۹ به ۱/۷۹۱ افزایش پیدا می‌کند. بر مبنای رابطه‌ی $D_p = 0.5\ D_{AP}\ D_A$ ابعاد فرکتالی رده‌های خطر به دست آمد که نتیجه‌ی آن ۱/۰۸۶، ۱/۰۸۸، ۱/۱، ۱/۱۳ و ۱/۱۵۸ است. این افزایش بیانگر این است که آشفتگی خطر سیلاب بر مبنای مدل محیط ـ مساحت فرکتالی، از رده‌ی خطر خیلی کم به سمت رده خیلی زیاد بیشتر می‌شود. بنابراین، با افزایش میزان خطر ارزش‌های D_{AP} و D_P نیز بیشتر شده که آشفتگی بیشتر الگوی خطر سیلاب را با افزایش رده (میزان) آن نشان می‌دهد. نتایج مدل تعداد ـ مساحت نیز آشفتگی سیلاب در پنج رده‌ی خطر را نشان می‌دهد. تعداد تجمعی مساحت برای رده‌های خطر به ترتیب ۰/۷۴، ۰/۷۹، ۰/۸۵، ۰/۸۶ و ۰/۸۸ به دست آمده است. این افزایش بیانگر کوچک‌تر شدن اندازه‌ی پلیگون‌های خطر از رده‌ی خیلی کم به سمت رده‌ی خیلی زیاد است. به عبارتی، با افزایش رده‌ی خطر پلیگون‌های آن کوچک‌تر می‌شود. این وضعیت حاکی از افزایش آشفتگی الگوی خطر سیلاب با افزایش میزان آن است. زمانی که پلیگون‌های خطر اندازه‌ی کوچکی داشته باشند به این معناست که الگو و ارزش خطر در بعد مکانی به شدت متغیر است و همین متغیر بودن مکانی آشفتگی الگوی آن را بیان می‌کند. به بیانی دیگر نتایج تحلیل فرکتالی حوضه‌های نمونه در پهنه‌های سیلابی شهر تهران بیانگر حضور الگوی کیاسی است که اگر امکان پیش‌بینی بارش‌های سیل‌آسا هم در تهران فراهم باشد، پیش‌بینی نحوه‌ی گسترش سیلاب و مناطق در معرض خطر فراهم نیست. اگر به سوابق سیلاب در تهران توجه شود، شروع سیلاب همیشه از دره‌های شمالی تهران مانند دربند، کن و یا گلابدره بوده است، اما الگوی تخریب ناشی از آن هیچ گاه یکسان نبوده است. اگرچه به طور نظری متغیرهای استفاده در این پژوهش در الگوی توزیع سیلاب نقش مهمی دارند، پیش‌بینی و استفاده از آن در بهینه‌سازی مسیر سیلاب امکان پذیر نیست. در نتیجه، با این‌که به طور مکرر این پدیده در تهران مورد بررسی قرار گرفته و طرح‌های متعدد برای آن اجرا شده است، اما همچنان پدیده‌ی سیلاب برای تهران مخاطره‌آمیز و پیش‌بینی‌ناپذیر و مهارنشدنی محسوب می‌شود.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

منابع

بهرامی دراسله، رضا، ۱۳۸۰. *ناحیه‌بندی بافت تصویر با استفاده از فراکتال‌ها*، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، بخش مهندسی دانشگاه تربیت مدرس تهران.

رامشت، محمد حسین، ۱۳۸۲. نظریه‌ی کیاس در ژئومورفولوژی، مجله‌ی *جغرافیا و توسعه*، ۳۶-۱۳.

سازمان پیشگیری و مدیریت بحران، ۱۳۹۲./tdmmo.tehran.ir.

مرکز مدیریت اطلاعات و حوادث، سازمان مدیریت بحران، http://www.ndmo.ir/fa/sazman/etelaat/

شهرداری تهران، ۱۳۹۱. *گزارش ویژگی‌ها، مسائل و راهبردهای توسعه‌ی شمال شهر تهران*.

صالحی، اسماعیل، یوسف رفیعی، محمد رضا فرزاد بهتاش و محمد تقی آقابابایی. ۱۳۹۲. پهنه‌بندی خطر سیلاب شهری با استفاده از GIS و فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (مطالعه موردی: تهران). *محیط شناسی*، **۳۹(۳)** : ۱۸۸-۱۷۹.

عرب احمدی، مریم. ۱۳۸۶. آشنایی با بافت فرسوده شهری و نحوه‌ی شکل‌گیری آن‌ها، *ماهنامه‌ی شهرداری‌ها*، **۸۱**: ۱۶-۲۱.

فرزادبهتاش، محمدرضا، محمدتقی آقابابایی و مروارید محمدامینی. ۱۳۸۹. بررسی وضعیت رود دره‌ی فرحزاد (قبل و بعد از سازماندهی). *دانش شهر*، **۱۵**: ۴۰-۱.

قهرودی تالی، منیژه. ۱۳۸۵. ارزیابی مدل SCS-CN در تخمین روان‌آب (مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبخیز سد امیرکبیرِ کرج). مجله‌ی علمی ـ پژوهشی *جغرافیا و توسعه*، **۷**: ۱۸۵-۱۹۹.

----------، ۱۳۸۹. تأثیر حوضه‌های بالادست تهران بر رخداد سیلاب در مناطق مسکونی تهران (مطالعه موردی: تأثیر حوضه‌ی فرحزاد در منطقه‌ی ۲ تهران)، *کنفرانس ملی مدیریت سیلاب‌های شهری*،۱۳-۱۱ مرداد ۱۳۸۹، دانشگاه تربیت مدرس.

----------، لادن خدری غریبوند. ۱۳۹۲. بررسی آشفتگی در میکرولندفرم‌های تالاب گاوخونی، مجله‌ی پژوهشی *زمین پویا*، **۲**: ۴۴-۵۱.

----------، خدیجه علی نوری. ۱۳۹۴. ردیابی مخاطرات پلایای حوض سلطان با بررسی آشفتگی در میکرولندفرم‌ها. *دانش مخاطرات*، **۱ (۲)**: ۲۴۱-۲۵۲.

کرم، امیر. ۱۳۸۹. نظریه آشوب، فرکتال (برخال) و سیستم‌های غیر خطی در ژئومورفولوژی. فصل‌نامه‌ی *جغرافیای طبیعی*، **۸** : ۶۷-۸۲.

مهدوی، مسعود و مهدی طاهرخانی.۱۳۸۳. *کاربرد آمار در جغرافیا*. تهران، نشر قومس.

مهندسین مشاور جهاد تحقیقات آب و انرژی (JWERC)،۱۳۹۱. *طرح جامع حفاظت و احیای منابع طبیعی شمال تهران و شمیرانات (البرز جنوبی)*، گزارش هیدرولوژی.

Cheng, Q. ۱۹۹۵. The perimeter–area fractal model and its application to geology. Mathematical Geology, ۲۷**(۱)**:۶۹–۸۲.

Cheng, Q.; H. Russell D. Sharpe, F. Kenny, and P. Qin, ۲۰۰۱. GIS-based statistical and fractal / multifractal analysis of surface stream patterns in the Oak Ridge's Moraine. Computer Geoscience, ۲۷(۵):۵۱۳–۵۲۶.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]

Cheng, Q. ۱۹۹۴, Multifractal modeling and spatial analysis with GIS: Gold potential estimation in the Mitchel-Sulphurets area, Northwestern British Columbia, Ph.D. thesis, University of Ottawa, Ottawa.

Ghahroudi Tali, M., M. Nezammahalleh, ۲۰۱۳. Urban flooding management using the natural drainage system case study: Tehran, capital of Iran. IAHS-AISH publication, ۱۷۴-۱۸۰.

Goodchild MF, ۱۹۸۸. Lake on fractal surfaces: a null hypothesis for lake-rich landscapes. Math Geol ۲۰(۶):۱۵–۶۳۰.

Lovejoy S, ۱۹۸۲. Area–perimeter relation for rain and cloud areas. Science ۲۱۶(۴۵۴۲):۱۸۵–۱۸۷

Lovejoy S, D. Schertzer, ۱۹۹۱. Multifractal analysis techniques and the rain and cloud fields. From ۱۰–۳ Dordrecht.

Malamud, D., Bruc. Turcotte L., Donald. ۲۰۰۶. The applicability of power-law frequency statistics to floods. Journal of Hydrology, ۳۲۲: ۱۶۸-۱۸۰.

Mandelbrot BB, ۱۹۸۳. The fractal geometry of nature (updated and augmented edition). Freeman, New York.

Mandelbrot BB, DE. Passoja, AJ. Paullay, ۱۹۸۴. Fractal character of fracture surfaces of metals. Nature۳۰۸ (۵۹۶۱):۷۲۱–۷۲۲.

National Emergency Management Agency (NEMA), Disaster Impact Assessment Manual, Seoul, Korea, ۲۰۰۵.

USDA TR۵۵ ۱۹۸۶, Urban Hydrology for Small Watersheds, United States, Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Conservation Engineering Division, Technical Release ۵۵ June ۱۹۸۶.

Wang Z, Q. Cheng, L.Cao, ۲۰۰۶. Fractal modeling of the microstructure property of quartz mylonite during deformation process. Math Geol ۳۹(۱): ۵۳-۶۸.

[Downloaded from system.khu.ac.ir on 2026-11-04]

[DOI: 10.18869/acadpub.jsaeh.2.2.1]