

پژوهش‌های ژئومورفولوژی کمی، سال هشتم، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۸  
صص. ۸۰-۹۶

## مقایسه شاخص بدون بعد تراکم شبکه زهکش و بعد فراکتال شبکه زهکشی در جداسازی واحد های سنگ

### شناسی ( منطقه مورد مطالعه : حوزه آبخیز تفت، یزد)

ودیعہ برزگری دهج- کارشناس ارشد مهندسی منابع طبیعی- مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه یزد.  
محمد زارع \*- استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد.  
محمد رضا اختصاصی- استاد گروه علوم و مهندسی آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۲۷      تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴

#### چکیده

مطالعات سنگ شناسی و زمین شناسی در مدیریت منابع طبیعی از اهمیت خاصی برخوردار است. تکنیک فراکتال، یکی از تکنیک‌های پر کاربرد جهت انجام مطالعات زمین شناسی و سنگ شناسی می باشد. این تکنیک موجب می گردد پژوهشگر در مدت زمان کوتاه تر به نتایج دقیق تری دست یابد. هدف از این پژوهش، مقایسه ی عملکرد دو تکنیک بدون بعد سازی پارامتر های کمی در ژئومورفولوژی از قبیل شاخص تراکم شبکه زهکشی و بعد فراکتال آنها در جدا سازی و تفکیک واحد های زمین شناسی می باشد. برای شناسایی و تفکیک سه واحد زمین شناسی مورد مطالعه، با استفاده از نقشه زمین شناسی سازمان زمین شناسی کشور و تصاویر ماهواره ای Google Earth و بازدید زمینی، شبکه زهکش در هر واحد زمین شناسی ترسیم شد. سپس با استفاده از نرم افزار Fractalyse و ArcGIS، بعد فراکتال و تراکم آن ها محاسبه گردید. نسبت صحت سنجی و نمودار QQ و زاویه انحراف و ضریب تعیین نیز برای دو تکنیک محاسبه شد. نسبت صحت سنجی در هر دو تکنیک بسیار خوب و شبیه به هم (۰/۹۸، ۰/۹۹، ۰/۹۹) بدست آمد. در تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکش ضریب تعیین در سه واحد زمین شناسی ۰/۸۷، ۰/۹۱ و ۰/۹۱ و زاویه انحراف نیز ۱۷/۰۵، ۱/۴۸ و ۸/۳۷ است. اما در تکنیک تراکم شبکه زهکش در سه واحد زمین شناسی ضریب تعیین ۰/۹۹، ۰/۹۳ و ۰/۹۴ و زاویه انحراف ۰/۲۱، ۲/۴۰ و ۰/۲۲ می باشد. بنابراین با توجه به نتایج بدست آمده تکنیک تراکم شبکه زهکش نسبت به تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکش در شناسایی و تفکیک واحد های زمین شناسی مطالعاتی در حوزه آبخیز تفت واقع در استان یزد، بسیار خوب ارزیابی گردید.

واژگان کلیدی: نمودار QQ، تکنیک فراکتال، تراکم شبکه زهکش، یزد.

## مقدمه

نقشه های زمین شناسی در مدیریت منابع طبیعی، صنعت بویژه ساخت پالایشگاه ها و اکتشاف معادن و سدسازی و تونل سازی و غیره بسیار کاربرد دارد. به دلیل بزرگ مقیاس بودن نقشه های زمین شناسی موجود، می بایست نقشه های زمین شناسی کوچک مقیاس با جزئیات بیشتر ترسیم و تهیه شود. امروزه با استفاده از فن نوین فراکتال و با کمک بازدید زمینی در راستای تکمیل روش های سنتی، می توان به نتایج دقیق تر و در مدت زمان کمتر در مورد تفکیک واحد های زمین شناسی دست یافت.

هندسه فراکتال به مطالعه اجسام با الگوی تکرار شونده با مقیاس یکسان و یا الگوی تکرار شونده با مقیاس های متفاوت در جهات مختلف می پردازد (ماندلبروت<sup>۱</sup> ۱۹۶۷، ماندلبورت ۱۹۷۷، نیکورا<sup>۲</sup> ۱۹۹۱). برخی از پدیده های طبیعی در ظاهر دارای پیچیدگی و بی نظمی هستند؛ همانند آبراهه ها، گسل ها و رودخانه ها (آریزا<sup>۳</sup> و همکاران ۲۰۱۳، تارکوت<sup>۴</sup> ۱۹۹۲). با استفاده از روابط موجود در هندسه فراکتال می توان این پدیده ها را منظم و با منطق خاصی تعریف کرد (آریزا، ۲۰۱۳).

سامیس<sup>۵</sup> و همکاران (۱۹۹۱) الگوی شکستگی میدان ژئوترمال را با شمارش مربع و تکنیک فراکتال بررسی و بعد آن را ۱/۶ تا ۱/۹۵ محاسبه نمودند. نیکورا (۱۹۹۱) با مطالعه ساختار فراکتالی رودخانه ها، بعد فراکتال را برای تشریح ساختار رودخانه ها و شبکه آبراهه ها روش مناسبی دانست. نیکورا و همکاران (۱۹۹۳) با مطالعه در زمینه فراکتال به این نتیجه رسیدند که ایده تکرار الگو در درون خود، در منحنی های پیچیده موجود در طبیعت از جمله رودخانه ها وجود دارد. گوش و دامن<sup>۶</sup> (۱۹۹۳) با روش شمارش مربع و فراکتال، الگوی شکستگی معدن مس آریزونا را بررسی کردند و بعد فراکتال آن را ۱/۳۴ تا ۱/۹۲ محاسبه نمودند. ایدزباد و تپر<sup>۷</sup> (۱۹۹۶) بعد فراکتال شکستگی ساختاری در معدن زغال سنگ سیلسیای شمالی در جنوب لهستان را ۱/۶ محاسبه کردند. برسلین و بلوارد<sup>۸</sup> (۱۹۹۹) داده های سری زمانی بارندگی را با تکنیک فراکتال مطالعه و بررسی کردند. نتایج بسیاری از پژوهشگران نشان می دهد که پراکنش شبکه های رودخانه ای، فراکتالی است (آلن<sup>۹</sup> و همکاران ۱۹۹۵، تارباتون<sup>۱۰</sup> ۱۹۹۶، شن<sup>۱۱</sup> و همکاران ۲۰۰۲). ایسلام و سیواکومار<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۲) آنالیز فراکتالی بر روی رواناب روزانه حوزه لیدنبرگ انجام دادند. من<sup>۱۳</sup> و همکاران (۲۰۰۴) بارش ماهانه ناحیه سی چو آن در چین را با تکنیک فراکتال بررسی نمودند. شانگ و کامه<sup>۱۴</sup> (۲۰۰۵) با استفاده از فراکتال، بار رسوب رودخانه زرد در چین به صورت سری زمانی را بررسی نمودند. موحد و هرمانیس<sup>۱۵</sup> (۲۰۰۸) با آنالیز فراکتالی، دبی جریان رودخانه را بررسی نمودند. دیمری<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۰۹) در مطالعه مهندسی رودخانه ها و الگوی زهکش از بعد فراکتال استفاده کردند. ویو<sup>۱۷</sup> و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از داده های سری زمانی کیفیت آب، از بعد فراکتال در پژوهش خود بهره گرفتند. سیواکومار<sup>۱۸</sup> و همکاران (۲۰۰۹) برای تجزیه و تحلیل سری زمانی بارندگی از آنالیز

<sup>1</sup> Mandelbrot

<sup>2</sup> Nikora

<sup>3</sup> Ariza

<sup>4</sup> Turcotte

<sup>5</sup> Sammis

<sup>6</sup> Ghosh & Daemen

<sup>7</sup> Idziak & Teper

<sup>8</sup> Breslin & Belward

<sup>9</sup> Allen

<sup>10</sup> Tarboton

<sup>11</sup> Shen

<sup>12</sup> Islam & Sivakumar

<sup>13</sup> Men

<sup>14</sup> Shang & Kamae

<sup>15</sup> Movahed & Hermanis

<sup>16</sup> Dimri

<sup>17</sup> Wu

<sup>18</sup> Sivakumar

فراکتالی بهره بردند. اسنو<sup>۱</sup> (۱۹۸۹) و بیوایس و مونتگومتری<sup>۲</sup> (۱۹۹۶) و شن و همکاران (۲۰۱۱) و بی<sup>۳</sup> و همکاران (۲۰۱۲) مسیر و تغییرات رودخانه‌ها و خصوصیات مورفولوژیکی آن‌ها را با بعد فراکتال بررسی نمودند. خوش برش و گشتاسبی (۱۳۸۰) و محسن باقری (۱۳۸۰) بیان کردند که تکنیک فراکتال برای توصیف نحوه شکاف سنگ‌ها و زبری درزه‌ها مناسب است. عدل و مهروند (۱۳۸۳) روابط بین بعد فراکتال حوزه آبخیز و برخی متغیرهای ژئومورفولوژیک و هیدرولوژیک را بررسی نمودند. نتایج نشان داد که بعد فراکتال بالا نشانه‌ی تراکم زهکشی بالا است و نیاز به زمان کمتری برای رسیدن به جریان دائمی دارد. بهالدینی و همکاران (۱۳۸۳) بر روی سنگ‌های آندزیت، پورفیری سرچشمه و دایک هورنبلند مطالعات فراکتالی انجام دادند. پسند و همکاران (۱۳۸۳) هندسه فراکتالی را برای تعیین بعد عوارض خطی همانند آبراهه‌ها و گسل‌ها پیشنهاد دادند. آق‌اتابای و سرکاری نژاد (۱۳۸۳) ماهیت فراکتالی کمربند کوهزایی زاگرس و ساختار سنگ‌های آن در زون سندج-سیرجان را بررسی کردند. شایسته فر و رسا (۱۳۸۴) و اسکندری و همکاران (۱۳۸۷) برای کانی‌سازی از تکنیک فراکتال استفاده کردند.

نیکویی و همکاران (۱۳۸۷) از بعد فراکتال برای مطالعه مهندسی رودخانه‌ها و الگوی زهکش و درخشان و همکاران (۱۳۸۸) برای تجزیه و تحلیل سری زمانی بارندگی استفاده نمودند. همچنین قدم پور و طالب بیدختی (۱۳۹۰) برای بررسی مسیر رودخانه‌ها و خصوصیات مورفولوژیکی آن‌ها از بعد فراکتال بهره گرفت. قدم پور و طالب بیدختی (۱۳۹۰) و اختصاصی (۱۳۹۰) نیز بیان کردند که هندسه فراکتال، مطالعه اجسام با الگوی تکرار شونده با مقیاس یکسان و یا الگوی تکرار شونده با مقیاس‌های متفاوت در جهات مختلف است.

ملک شاهی و همکاران (۱۳۹۱) بعد فراکتال و دبی متوسط رودخانه‌های استان لرستان را محاسبه نموده و روابط بین بعد فراکتال و دبی متوسط سالانه را بدست آوردند. فتاحی و جهانگیری (۱۳۹۳) فراکتال دو پدیده شبکه رودخانه و سری زمانی جریان در رودخانه را بررسی نمودند. براساس نتایج، بعد فراکتال هر دو به سمت مقادیر ثابت متمایل می‌شود. افشار نجفی و همکاران (۱۳۹۴) شکستگی‌های توده گرانیتی در شرق بجنستان را با استفاده از تکنیک فراکتال مطالعه نمودند و بعد فراکتال آن‌ها را ۱/۳۵ بدست آوردند. شایان و همکاران (۱۳۹۴) الگوی آبراهه‌ها، درجه تراکم و موفولوژی آن‌ها را مورد بررسی قرار دادند. جمال آبادی و همکاران (۱۳۹۵) برای بررسی تاثیر تکتونیک فعال بر مورفومتری شبکه زهکشی در ارتفاعات بینالود در استان خراسان رضوی از شاخص‌های فراکتالی استفاده کردند. کرم و صابری (۱۳۹۴) با بررسی آبراهه‌های شمال تهران، اقدام به محاسبه بعد فراکتال و مورفولوژی آن‌ها نمودند. همایون نژاد و شجاعی (۱۳۹۵) تاثیر تغییرات بعد فراکتال در دو حوزه با سازند مختلف (مارن و گرانیت) در ایلام را مورد بررسی قرار دادند. بعد فراکتال گرانیت ۱/۰۵ و مارن ۱/۲۵ بدست آمد. نتایج نشان داد که هرچه تعداد آبراهه در یک حوزه بیشتر باشد بعد فراکتال آن نیز بیشتر است. همچنین برای شناسایی و تفکیک واحد‌های سنگ‌شناسی بعد فراکتال، فن مناسبی است. علیمردی (۱۳۹۵) با مطالعه و بررسی ارتباط بعد فراکتال الگوهای ژئومورفولوژی و سازند‌های زمین‌شناسی در ایلام به این نتیجه رسید که با افزایش تراکم آبراهه در واحد سطح، بعد فراکتال افزایش می‌یابد. همچنین بعد فراکتال در حوزه‌های مطالعاتی مربوط به سازند کواترنری معادل ۱/۶۵ و سازند سروک معادل ۱/۰۶ بدست آمد. ایلدرمی و سپهری (۱۳۹۷) با استفاده از بعد فراکتال شبکه زهکشی، سازند‌های زمین‌شناسی دامنه‌های شمال همدان را تحلیل نمود. براساس نتایج، بیشترین بعد فراکتال ۱/۳۳ و ۱/۳۱ به ترتیب برای سازند‌های هورنفلس کلریت دار و سنگ آهک مارنی که تراکم زهکشی بیشتری دارند، بدست آمد. بنابراین اگر تراکم شبکه زهکشی بالا باشد، بعد فراکتال آن هم بالا است.

<sup>1</sup> Snow

<sup>2</sup> Beauvais & Montgomery

<sup>3</sup> Bi

کرمی و همکاران (۱۳۹۷) برای تحلیل تاثیر تکتونیک فعال در حوضه های زهکش (در حوضه های آبریز شمال تبریز) از شاخص های ژئومورفولوژیک و سلسله مراتبی شبکه زهکشی استفاده نمودند. از جمله شاخص ای مورد استفاده شاخص های تراکم زهکش، فرکانس زهکش، ضریب گردآوری، طول و انشعاب آبراهه، نسبت کشیدگی، نسبت انشعاب و غیره استفاده کردند. هدف از این پژوهش مقایسه عملکرد دو روش در تکنیک فراکتال برای شناسایی و تفکیک سه واحد زمین شناسی در حوزه آبخیز تفت، واقع در استان یزد است.

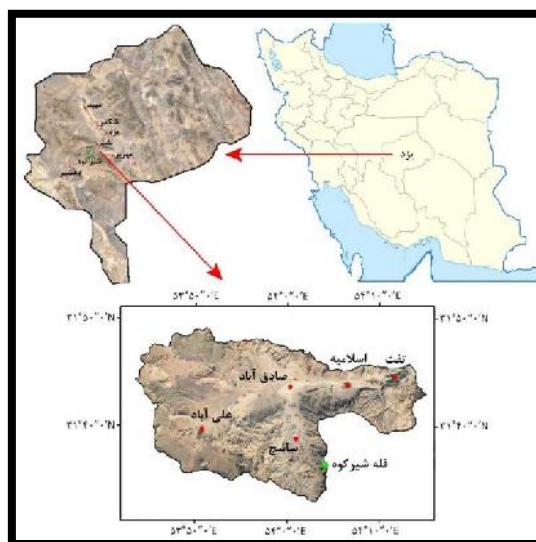
#### منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه حوزه آبخیز تفت با طول شرقی  $38^{\circ} 43' 53''$  تا  $26^{\circ} 14' 54''$  و عرض شمالی  $31^{\circ} 22' 33''$  تا  $06' 49''$  در استان یزد واقع شده است (شکل ۱). متوسط دما و میانگین میزان بارش سالانه به ترتیب  $17/4^{\circ}C$  و  $67$  میلیمتر است. تشکیلات زمین شناسی حوزه آبخیز تفت مربوط به پرکامبرین و دوران اول (پالئوزوئیک) و دوران دوم (مزوزوئیک) و دوران سوم (سنوزوئیک) است. در حوزه مذکور تنوع واحد های زمین شناسی و سنگ شناسی بسیار زیاد است از جمله gd (گرانودیوریت) و  $K^{T-1}$  (آهک تفت).

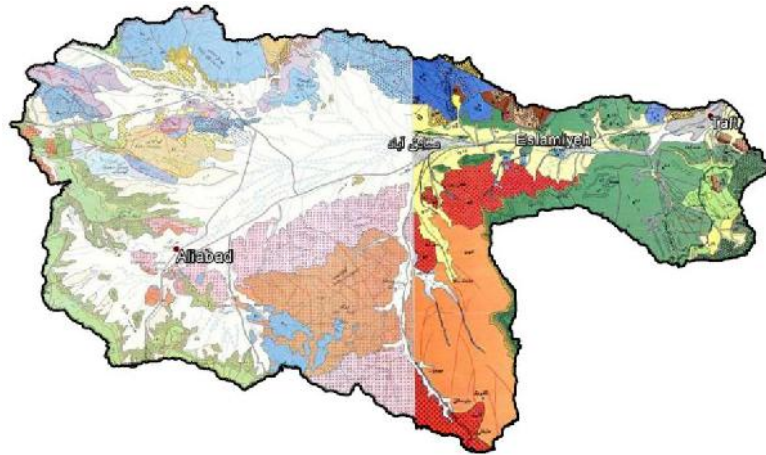
$K^{T-1}$ : سازند آهک تفت متشکل از سنگ آهک است که آهک خاکستری تا کرم رنگ حاوی فسیل های مشخص اربیتولین می باشد که در دوره کرتاسه بالایی به وجود آمده است (برزگری و همکاران، ۱۳۹۳). این سازند حساس به هوازگی شیمیایی می باشد به همین دلیل تیپ های فرسایشی انحلالی (دره کارستی، کانیون های کوچک و چشمه کارستی) در دوره های نیمه مرطوب و مرطوب گذشته به وجود آمده است (احمدی ۱۳۹۰، برزگری و همکاران ۱۳۹۳).

$K^S$ : هم ارز سازند سنگستان در دوره کرتاسه پایینی به وجود آمده که متشکل از کنگلومرا و سنگ ماسه خاکستری تا خاکستری تیره است.

gd: گرانودیوریت جز سنگ های نفوذی است و بعد از ژوراسیک به وجود آمده است.



شکل ۱: موقعیت حوزه آبخیز تفت (منطقه مورد مطالعه) در استان یزد



LEGEND

Geological Period	Unit Code	Description (English)	Description (Persian)
QUATERNARY	Q <sup>4</sup>	Alluvium (younger terraces and gravel fans)	پهنه‌های آبرفتی جوان و ماسه‌زار آبرفت
	Q <sup>3</sup>	Alluvium (older terraces and gravel fans)	پهنه‌های آبرفتی قدیمی و ماسه‌زار آبرفت
	Q <sup>2</sup>	Fairly consolidated conglomerate	کنگلومرا با سنگ‌های متوسط
	Q <sup>1</sup>	Red loess, sandstone, sandy shale, conglomerate	کنگلومرا با سنگ‌های درشت و ماسه‌زار قرمز رنگ
TERTIARY	E <sup>40</sup>	Sandstone with intercalated grey silt	ماسه‌زار با ماسه‌زار آبی خاکستری رنگ
	E <sup>31</sup>	Curly to pink thick-bedded to massive conglomerate	کنگلومرا ... آبی تا صورتی تا ضخیم تا ماسه‌زار خاکستری
	E <sup>1</sup>	Grey, thin to well bedded aluvial limestone	آهک متوسط تا نازک لایه، خاکستری، رنگ آبی تا سفید
MESOZOIC	K <sup>40</sup>	Grey to greenish grey marl, shale, marly limestone (GARREN ZANJER FM.)	آهک ماسه‌زار، مارل و شیل به رنگ خاکستری تا ماسه‌زار شیل به سبز (سازنده قرمز زانجری)
	K <sup>30</sup>	White limestone	سنگ‌های کربناته غیر قابل تاشی
	K <sup>20</sup>	Well to thick bedded grey limestone (TAFT FM.)	آهک متوسط تا ضخیم لایه، خاکستری رنگ [آهک تخت]
	K <sup>10</sup>	Yellow to grey dolomite	دولومیت و دولومیت آهکی
	K <sup>0</sup>	Grey to dark grey sandstone and conglomerate (PANGENIAN FM. EQUIVALENT)	کنگلومرا و سنگ ماسه‌زار خاکستری تیره (هم ارز سازنده سنگستان)
	J <sup>40</sup>	Shale and sandstone (SHEMESHAN FM.)	شیل و ماسه‌زار سنگ (سازنده شمشک)
PALEOZOIC	T <sup>40</sup>	Dark grey massive limestone (white-blue MEMBER EQUVALENT)	آهک تیره، این مرکز خاکستری تیره (هم ارز عضو جوفهر، خانی)
	T <sup>30</sup>	White massive limestone	آهک تیره ای سفید رنگ
	T <sup>20</sup>	Yellowish grey dolomite	دولومیت خاکستری مایل به زرد
	T <sup>10</sup>	Dark grey sandy shale	شیل ماسه‌زار خاکستری تیره
PRECAMBRIAN	g <sup>1</sup>	Granitic grey paper shale	شیل ریزه ای خاکستری مایل به سبز
	g <sup>2</sup>	Alternation of shale, quartz siltstone, sandstone, limestone, slightly metamorphic (MAYBAND FM.)	تغییر شیل، سنگ ماسه‌زار، آهک و کوارتز (سازنده مایبند)
	d <sup>1</sup>	Yellowish grey thick bedded dolomite (MAMAL FM.)	دولومیت، سنگ‌های لایه ضخیم خاکستری مایل به زرد (سازنده ممال)
	d <sup>2</sup>	Grey to yellowish grey dolomitic limestone and limestone	آهک و آهک دولومیتی بزرگ خاکستری تا ماسه‌زار شیل به زرد (سازنده ده‌آل)

INTRUSIVE ROCKS	سنگ‌های نفوذی
g: Basic dykes	دیگ‌های بازیکی
gd: Granodiorite (Post Cretaceous)	گد: گرانودیوریت (بعد از کرتاسه)
g-df: Granite to granodiorite	گرانیت تا گرانودیوریت (SHIRKUH INTRUSIVE ROCKS)
gd: Granodiorite	گرانودیوریت (POST MIDDLE JURASSIC)

شکل ۲: نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه (سازمان زمین شناسی کشور - مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰)

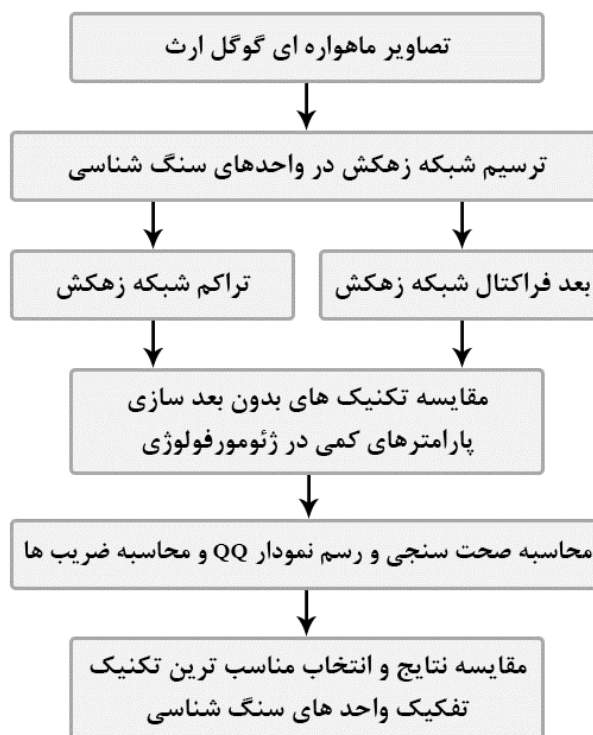
جدول ۱: مشخصات واحد های زمین شناسی و سنگ شناسی در حوزه آبخیز تفت

سنگ شناسی	واحد زمین شناسی	دور	دوره	عصر (دوران)	ائون
نهشته های آبرفتی جوان و بادبزنی آبرفت	$Q^{t2}$		کواترنری	سنوزوئیک (دوران سوم)	فانروزوئیک
نهشته های آبرفتی قدیمی و بادبزنی آبرفت	$Q^{t1}$				
نهشته های بستر رودخانه	$Q^{al}$				
-----			نئوژن	ترشیاری	
آندزیت با میانه لایه هایی از توف خاکستری رنگ	$E^{an}$	ائوسن	پالئوژن		
تناوب کنگلومرا و سنگ ماسه به رنگ خاکستری تیره	$E^c$				
مارن ارغوانی رنگ	$E^m$		پالئوسن		
-----					
آهک مارنی، مارن و شیل به رنگ خاکستری تا خاکستری مایل به سبز (سازند دره زنجیر)	$K^{dz}$		کرتاسه بالایی	مزوزوئیک (دوران دوم)	
آهک متوسط تا سبتر لایه، خاکستری رنگ (آهک تفت)	$K^{t-1}$				
دولومیت و دولومیت آهکی	$K^{t-d}$				
آهک خاکستری رنگ (سازند تفت)	$K_t$				
ماسه سنگ و کنگلومرای خاکستری تا خاکستری تیره (سازند سنگستان)	$K^s$				
آهک تخریبی خاکستری مایل به زرد	$K_s^1$				
شیل و ماسه سنگ دانه ریز، ارغوانی رنگ	$K_s^{sh}$				
شیل، ماسه سنگ، ماسه سنگ کوارتزیتی (سازند شمشک)	$J_s$		ژوراسیک		
آهک توده ای سفید رنگ	$TR_n^{11}$		تریاس		
دولومیت خاکستری مایل به زرد	$TR_n^d$				
شیل ماسه ای خاکستری رنگ	$TR_n^{sh}$				
دولومیت چگالی در پایینی قهوه ای رنگ و در بخش بالایی زرد رنگ (سازند شتری)	$TR^{sh}$				
دولومیت سبتر لایه خاکستر مایل به زرد	$P_j^d$		پرمین	پالئوزوئیک (دوران اول)	
آهک و آهک دولومیتی خاکستری تا خاکستری مایل به زرد	$P_j^l$				
ماسه سنگ کوارتزیتی روشن رنگ	$PL^c$				
شیل ماسه ای، کوارتز آرنایت و سنگ ماسه با میان لایه هایی از دولومیت آهکی	$D$		دونین		
-----			کامبرین		
دولومیت خاکستری مایل به زرد - کهار	$P \in_k^d$				پر کامبرین
گرانودیوریت	gd		سنگ های نفوذی		
گرانیت تا گرانودیوریت	g-gd				



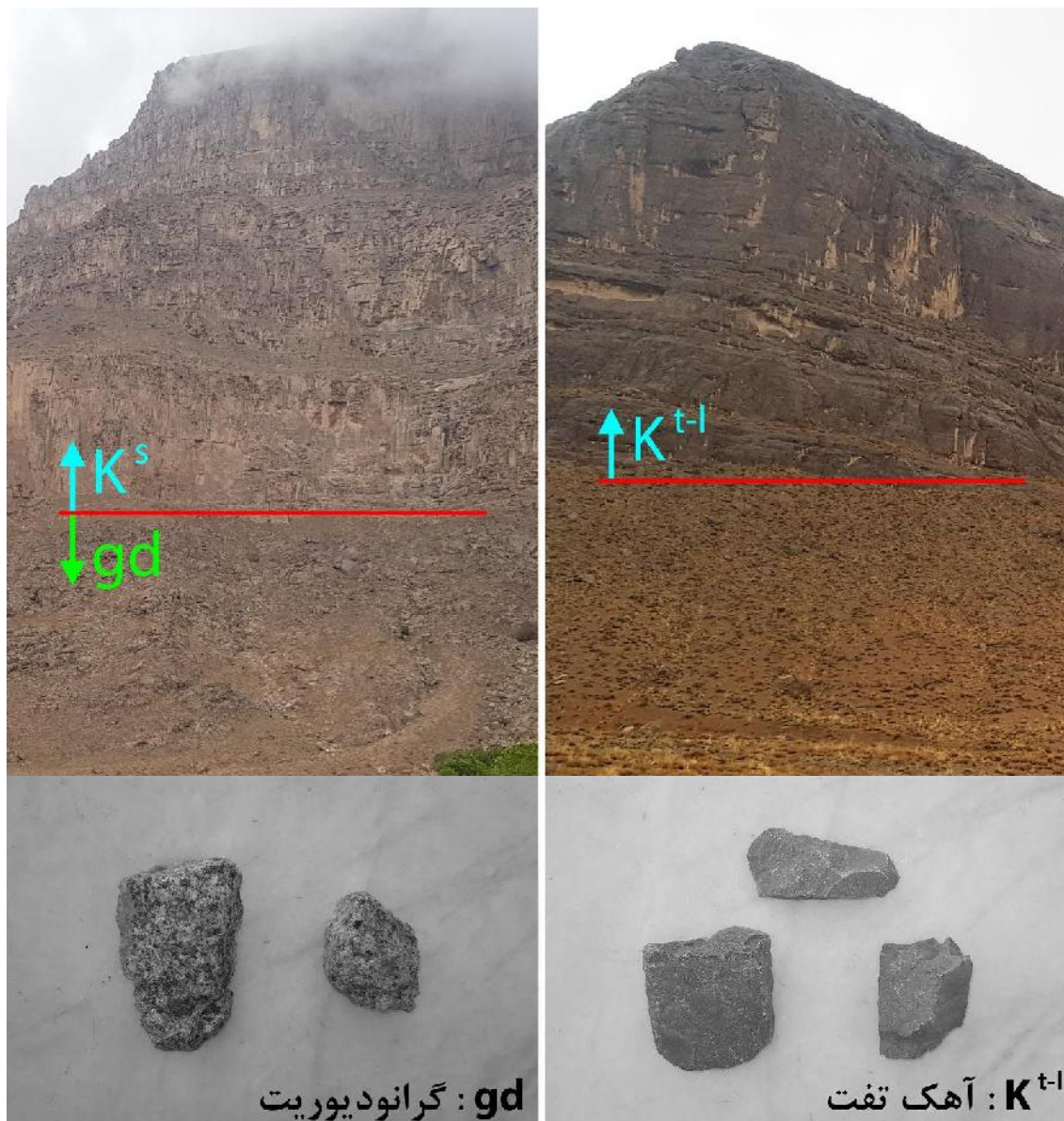
## مواد و روش‌ها

در این پژوهش، نقشه زمین‌شناسی تهیه شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور با مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ (شکل ۲) و تصاویر ماهواره ای در نرم‌افزار گوگل ارث مورد بهره‌برداری قرار گرفت. شکل ۳، نمودار جریان مراحل مختلف این پژوهش را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار جریان مراحل مختلف پژوهش

**تکنیک‌های بدون بعد سازی پارامترهای کمی در ژئومورفولوژی (شاخص تراکم شبکه زهکشی و بعد فراکتال آن‌ها):**  
 در این پژوهش در حوزه آبخیز تفت، سه واحد زمین‌شناسی  $K^{-1}$  (آهک تفت) و  $gd$  (گرانودیوریت) و  $K^S$  (کنگومرا و سنگ ماسه خاکستری تا خاکستری تیره و شیل) انتخاب گردید و مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در نرم‌افزار گوگل ارث، با استفاده از هم‌پوشانی نقشه زمین‌شناسی سازمان و تصاویر ماهواره ای، بین رنگ سنگ‌ها در تصاویر و نوع واحد زمین‌شناسی در نقشه زمین‌شناسی و بازدید زمینی (شکل ۴)، تطابق داده شد. براساس آن‌ها و بازدید زمینی در هر واحد زمین‌شناسی در منطقه مورد مطالعه ۱۰ پلات  $2 \times 2$  کیلومتر (نمونه‌ها) جدا شد. سپس در خارج از منطقه مورد مطالعه نیز در هر واحد زمین‌شناسی ۱۰ پلات  $2 \times 2$  کیلومتر (آزمون‌ها) جدا گردید. سپس با استفاده از نرم‌افزار گوگل ارث و بازدید زمینی، آبراهه‌ها در هر پلات با دقت بالا (۱ متر) ترسیم شد.



شکل ۴: تصاویر منطقه و بازدید زمینی و سنگ ها

#### الف) بعد فراکتال شبکه زهکش

در ادامه برای فراکتال گیری، هرکدام از نقشه های شبکه زهکش (پلات ها) به صورت جداگانه وارد نرم افزار Fractalyse می شود. خروجی این نرم افزار اعدادی است که یکی از آن ها بعد فراکتال آن خطوط است. این عدد (بعد فراکتال) بین عدد ۱ و ۲ می باشد. بعد فراکتال برای شبکه های زهکش از نرم افزار ذکر شده، بدست آمد.

#### ب) شاخص تراکم شبکه زهکش

سپس به منظور بررسی صحت مساحت ۴ کیلومتر مربعی هر پلات، مساحت هر پلات با کمک نرم افزار ArcGIS 10.2 محاسبه شد. همچنین طول شبکه هم در هر پلات محاسبه شد. سپس با استفاده از رابطه ۱ تراکم شبکه زهکش در هر پلات بدست آمد.

$$(1) \quad (Km) \text{ مساحت پلات} / (Km) \text{ طول شبکه زهکش} = \text{تراکم شبکه زهکش}$$



روش‌های مقایسه‌ی کارایی تکنیک‌های بدون بعد سازی پارامترهای کمی در ژئومورفولوژی (شاخص تراکم شبکه زهکشی و بعد فراکتال آن‌ها) در جداسازی واحد‌های زمین‌شناسی در هر کدام از تکنیک‌ها (شاخص تراکم شبکه زهکش و بعد فراکتال آن‌ها) دو روش مقایسه صورت گرفت که به شرح زیر می‌باشد:

تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکش:

الف) روش نسبت صحت سنجی:

در هر واحد زمین‌شناسی، بعد فراکتال شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های نمونه میانگین‌گیری شد. همچنین برای پلات‌های آزمون نیز بعد فراکتال شبکه‌های زهکش بدست آمده، میانگین‌گیری گردید. سپس برای محاسبه‌ی نسبت صحت سنجی در هر واحد زمین‌شناسی از رابطه ۲ کمک گرفته شد.

(۲) آزمون / نمونه = نسبت صحت سنجی بعد فراکتال شبکه زهکش در هر واحد زمین

شناسی

نمونه: میانگین بعد فراکتال شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های نمونه

آزمون: میانگین بعد فراکتال شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های آزمون

ب) روش مقایسه نمونه و آزمون با کمک نمودار QQ و معادله خط و ضریب تعیین و زاویه انحراف:

در هر واحد زمین‌شناسی، بین بعد فراکتال شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های نمونه و بعد فراکتال شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های آزمون، نمودار QQ ترسیم گردید. در آخر معادله خط و ضریب تعیین و زاویه انحراف آن‌ها نیز محاسبه شد.

تکنیک تراکم شبکه زهکش:

الف) روش نسبت صحت سنجی:

در هر واحد زمین‌شناسی، تراکم شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های نمونه و همچنین پلات‌های آزمون میانگین‌گیری گردید. سپس برای محاسبه‌ی نسبت صحت سنجی در هر واحد زمین‌شناسی از رابطه ۳ کمک گرفته شد.

(۳) آزمون / نمونه = نسبت صحت سنجی تراکم شبکه زهکش در هر واحد زمین

شناسی

نمونه: میانگین تراکم شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های نمونه

آزمون: میانگین تراکم شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های آزمون

ب) روش مقایسه نمونه و آزمون با کمک نمودار QQ و معادله خط و ضریب تعیین و زاویه انحراف:

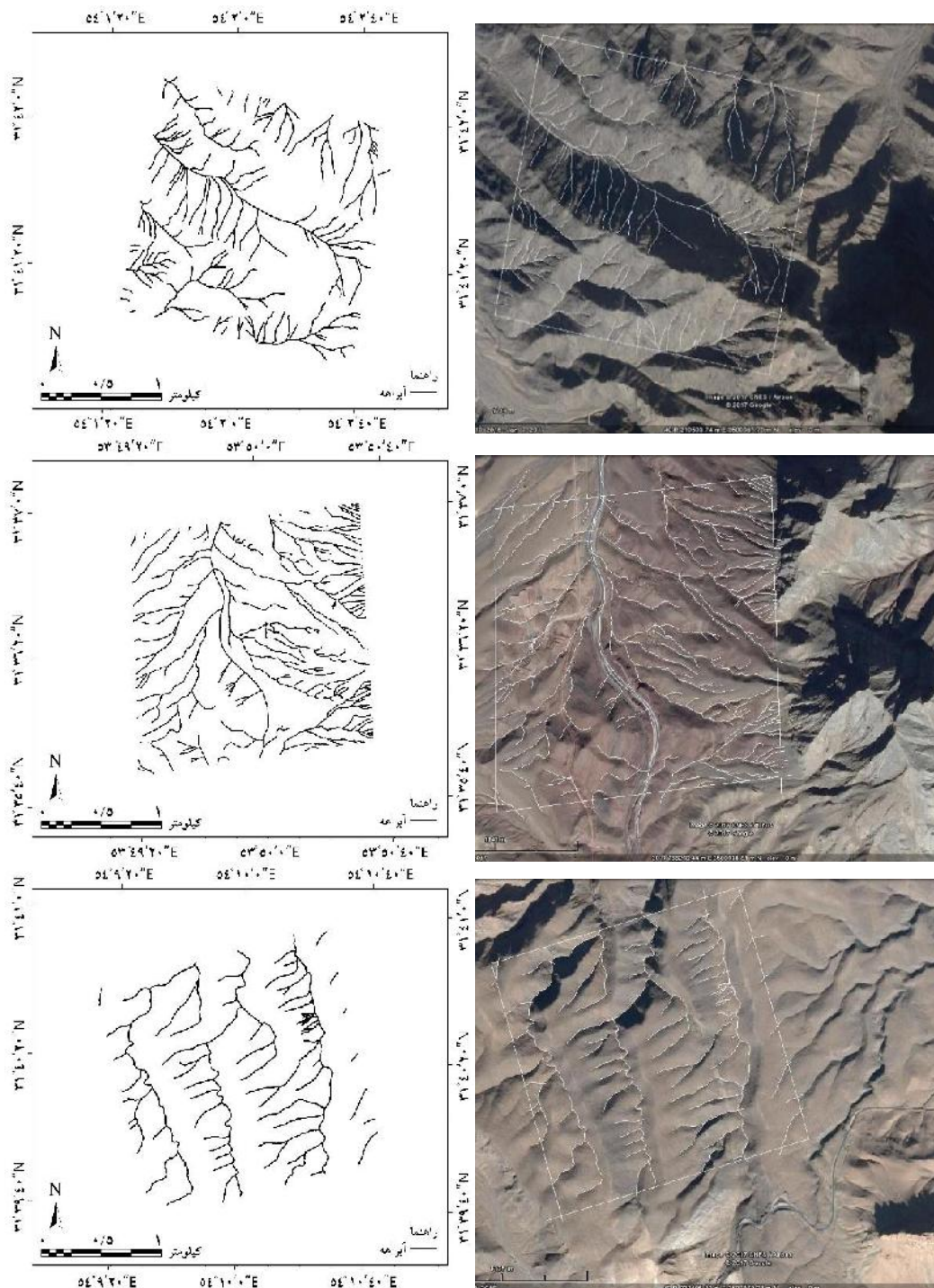
در هر واحد زمین‌شناسی، بین تراکم شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های نمونه و تراکم شبکه‌های زهکش مربوط به پلات‌های آزمون، نمودار QQ ترسیم گردید. در آخر معادله خط و ضریب تعیین و زاویه انحراف آن‌ها نیز محاسبه گردید.

بنابراین با انجام این دو روش مقایسه (مورد الف و ب)، کارایی دو تکنیک مورد مقایسه قرار می‌گیرد.

## نتایج و بحث

-تکنیک‌های بدون بعد سازی پارامترهای کمی در ژئومورفولوژی در جداسازی واحد‌های زمین‌شناسی

برای هر یک از واحد‌های زمین‌شناسی مورد مطالعه، یک شبکه زهکش به عنوان نمونه، ارائه شده است (شکل ۵).



شکل ۵- ترسیم شبکه زهکش با استفاده از تصاویر گوگل ارث و شکل پلات آبراهه ها با دقت ۱ متر - الف) gd (گرانودیوریت) -  
 ب)  $K^S$  (کنگلومرا و ماسه سنگ) - ج)  $K^{t-1}$  (آهک تفت)

هر شبکه زهکش با توجه به واحد های زمین شناسی و حساسیت آن ها به فرسایش، الگوی خاصی به خود می گیرد. الگوی شبکه زهکش در واحد زمین شناسی مطالعاتی (gd ،  $K^S$  ،  $K^{t-1}$ ) عموماً به صورت شاخه درختی و راست گوشه ای است.

### بعد فراکتال شبکه زهکش

بعد فراکتال شبکه زهکش در ترکیب ماسه سنگ و کنگلومرا نسبت به آهک و گرانودیوریت بیشتر است (جدول ۲). همچنین تعداد و انشعاب آبراهه در ترکیب ماسه سنگ و کنگلومرا بالاتر است. بنابراین، هرچه تعداد آبراهه در یک حوزه آبخیز بیشتر باشد، بعد فراکتال شبکه زهکش آن هم بیشتر است. بعد فراکتال  $K^{t-1}$  (آهک تفت)  $1/22$  تا  $1/27$ ، بعد فراکتال  $gd$  (گرانودیوریت)  $1/32$  تا  $1/34$  و بعد فراکتال  $K^S$  (ماسه سنگ و کنگلومرا)  $1/43$  تا  $1/44$  متغیر است.

جدول ۲- بعد فراکتال شبکه زهکش در واحد های زمین شناسی در نمونه و آزمون

واحد زمین شناسی	شماره پلات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	میانگین بعد فراکتال
$K^S$	آزمون	۱/۴۳۱	۱/۴۴۴	۱/۴۴۸	۱/۴۳۶	۱/۴۴۳	۱/۴۴۴	۱/۴۴۷	۱/۴۳۸	۱/۴۴۰	۱/۴۴۵	۱/۴۴۱۶
	نمونه	۱/۴۳۷	۱/۴۴۲	۱/۴۴۴	۱/۴۳۸	۱/۴۴۰	۱/۴۴۳	۱/۴۴۶	۱/۴۳۹	۱/۴۴۱	۱/۴۴۴	۱/۴۴۱۴
$gd$	آزمون	۱/۳۲	۱/۳۴۳	۱/۳۳۳	۱/۳۲۹	۱/۳۳۲	۱/۳۴۱	۱/۳۴۳	۱/۳۳۸	۱/۳۳۵	۱/۳۴۳	۱/۳۳۶
	نمونه	۱/۳۱۸	۱/۳۴۱	۱/۳۲۵	۱/۳۲۸	۱/۳۳۰	۱/۳۴۰	۱/۳۴۲	۱/۳۳۹	۱/۳۳۶	۱/۳۴۱	۱/۳۳۴
$K^{t-1}$	آزمون	۱/۲۲۱	۱/۲۶۶	۱/۲۷۰	۱/۲۳۴	۱/۲۳۷	۱/۲۴۲	۱/۲۴۹	۱/۲۵۶	۱/۲۶۱	۱/۲۶۴	۱/۲۵۰
	نمونه	۱/۲۳۴	۱/۲۵۷	۱/۲۶۵	۱/۲۳۲	۱/۲۳۵	۱/۲۴۰	۱/۲۴۸	۱/۲۵۳	۱/۲۵۹	۱/۲۶۳	۱/۲۴۹

### شاخص تراکم شبکه زهکش

تراکم شبکه زهکش در  $K^S$  (ماسه سنگ و کنگلومرا) بیشتر از تراکم شبکه زهکش در دو واحد زمین شناسی دیگر است (جدول ۳). تعداد آبراهه در  $K^S$  بیشتر بوده بنابراین، تراکم شبکه زهکش در آن نیز بیشتر است. هرچه تعداد و انشعاب آبراهه در یک حوزه بیشتر باشد، تراکم شبکه زهکش آن بیشتر و بعد فراکتال آن نیز بیشتر است. همچنین نتایج علیمرادی (۱۳۹۵) نیز نشان داد که با افزایش تراکم آبراهه ها در یک سطح، بعد فراکتال نیز افزایش می یابد. تراکم شبکه زهکش  $K^{t-1}$  (آهک تفت)  $5/2$  تا  $6/1$  تراکم شبکه زهکش  $gd$  (گرانودیوریت)  $9/0$  تا  $9/8$  و تراکم شبکه زهکش  $K^S$  (ماسه سنگ و کنگلومرا)  $11/3$  تا  $13/4$  است.

جدول ۳: تراکم شبکه زهکش (1/km) در واحد های زمین شناسی در نمونه و آزمون

واحد زمین شناسی	شماره پلات	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	میانگین تراکم شبکه
$K^S$	آزمون	۱۱/۸۰	۱۱/۳۶	۱۳/۲۵	۱۱/۷۲	۱۱/۶۹	۱۱/۶۰	۱۱/۵۴	۱۱/۸	۱۱/۴۳	۱۱/۳۷	۱۱/۷۸
	نمونه	۱۱/۷۱	۱۱/۳۱	۱۳/۴۰	۱۱/۷۰	۱۱/۶۶	۱۱/۶۲	۱۱/۵۷	۱۱/۵۱	۱۱/۴۵	۱۱/۳۰	۱۱/۷۲
$gd$	آزمون	۹/۱۱	۹/۸۵	۹/۶۰	۹/۶۲	۹/۶۷	۹/۷۰	۹/۷۳	۹/۶۶	۹/۳۴	۹/۵۳	۹/۵۸
	نمونه	۹/۰۰	۹/۷۰	۹/۷۰	۹/۶۰	۹/۶۵	۹/۶۸	۹/۷۱	۹/۶۴	۹/۲۲	۹/۴۶	۹/۵۴
$K^{t-1}$	آزمون	۵/۶۴	۶/۱۷	۵/۲۴	۵/۵۶	۵/۶۳	۵/۶۸	۵/۷۷	۵/۷۹	۵/۸۲	۵/۹۰	۵/۷۲
	نمونه	۵/۷۰	۵/۹۹	۵/۴۷	۵/۵۱	۵/۵۹	۵/۶۷	۵/۷۰	۵/۷۵	۵/۸۴	۵/۸۸	۵/۷۱

مقایسه کارایی تکنیک های بدون بعد سازی پارامترهای کمی در ژئومورفولوژی (شاخص تراکم شبکه زهکشی و بعد فراکتال آن ها) در جداسازی واحد های زمین شناسی

### الف) نسبت صحت سنجی:

براساس جدول ۴، مقادیر نسبت صحت سنجی برای بعد فراکتال شبکه زهکش و شاخص تراکم شبکه زهکش در هر سه واحد زمین شناسی، بسیار بالا بوده و نتایج بسیار شبیه به هم است.

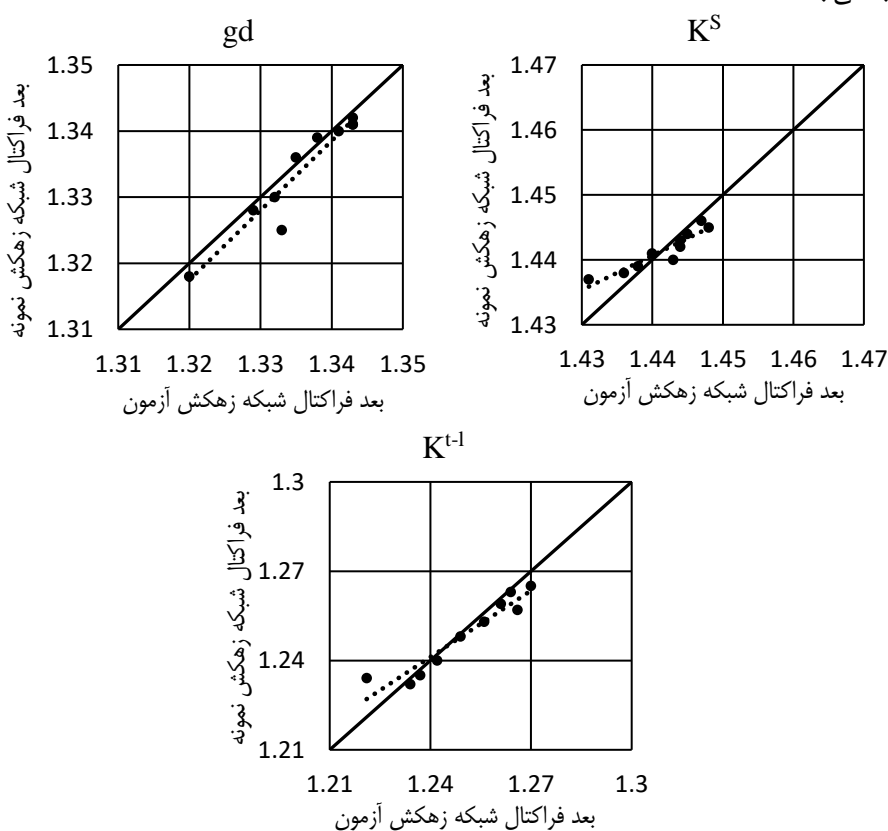
جدول ۴: نسبت صحت سنجی دو تکنیک در سه واحد زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

نوع تکنیک	واحد زمین‌شناسی	$K^S$	gd	$K^{t-1}$
بعد فراکتال شبکه زهکش		۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹
تراکم شبکه زهکش		۰/۹۹	۰/۹۸	۰/۹۹

ب) مقایسه نمونه و آزمون با کمک نمودار QQ و معادله خط و ضریب تعیین و زاویه انحراف:

### بعد فراکتال شبکه زهکش

بر اساس شکل ۶ و جدول ۵ ضریب تعیین و زاویه انحراف در هر یک از واحد های زمین‌شناسی، بالا است. ولی در عین حال زاویه انحراف در  $K^S$  زیاد می‌باشد.



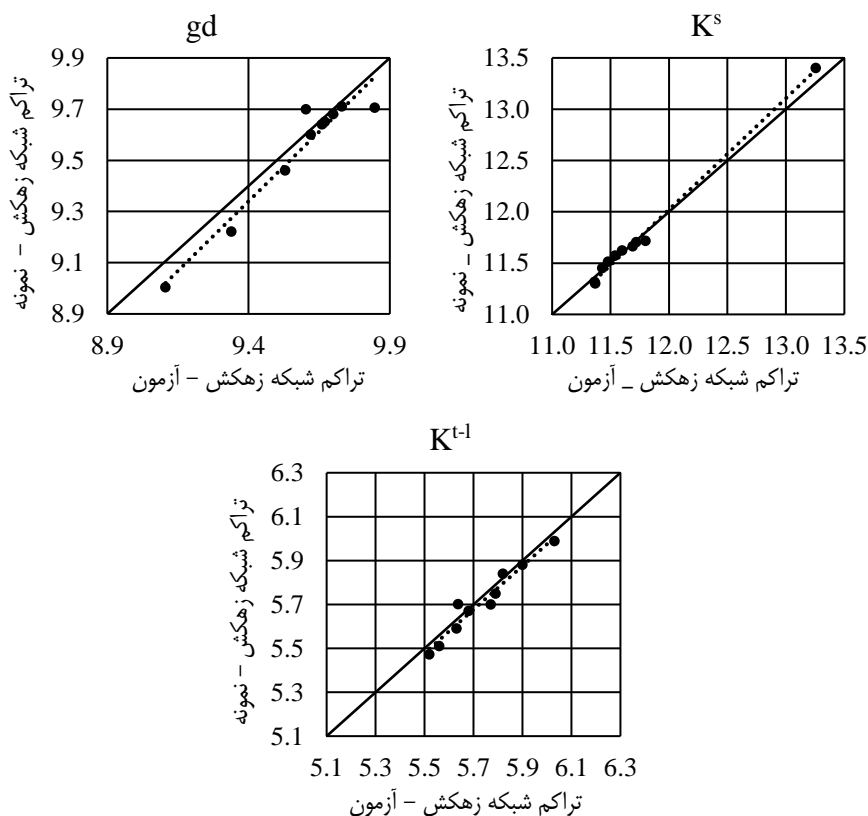
شکل ۶: نمودار QQ بعد فراکتال شبکه زهکش در سه واحد زمین‌شناسی

جدول ۵: معادله خط و ضریب تعیین و زاویه نمودارها و زاویه انحراف در محدوده نمونه و آزمون در تفکیک سه واحد زمین‌شناسی مختلف به کمک بعد فراکتال شبکه زهکش

واحد زمین‌شناسی	معادله خطی	R2	زاویه نمودار (درجه)	زاویه انحراف (درجه)
$K^S$	$Y = 0.5307 X + 0.6765$	۰/۸۷	۲۷/۹۵	+۱۷/۰۵
gd	$Y = 1.0532 X - 0.0727$	۰/۹۱	۴۶/۴۸	-۱/۴۸
$K^{t-1}$	$Y = 0.7436 X + 0.3191$	۰/۹۱	۳۶/۶۳	+۸/۳۷
خط انطباق	$Y = X$	۱	۴۵	۰

### تراکم شبکه زهکش

بر اساس شکل ۷ و جدول ۶، ضریب تعیین و همچنین زاویه انحراف در هریک از واحد های زمین شناسی، بسیار مناسب است. ضریب تعیین ( $R^2$ ) در هر سه واحد زمین شناسی در تراکم شبکه زهکش بیشتر از ضریب تعیین در هر سه واحد زمین شناسی در بعد فراکتال شبکه زهکش است.



شکل ۷: نمودار QQ تراکم شبکه زهکش در سه واحد زمین شناسی

جدول ۶: معادله خط و ضریب تعیین و زاویه نمودارها و زاویه انحراف در محدوده نمونه و آزمون در در تفکیک سه واحد زمین شناسی مختلف به کمک تراکم شبکه زهکش

واحد زمین شناسی	معادله خطی	$R^2$	زاویه نمودار (درجه)	زاویه انحراف (درجه)
$K^S$	$Y = 0.9926 X - 1.0845$	۰/۹۹	۴۴/۷۹	+۰/۲۱
gd	$Y = 1.0874 X - 0.8813$	۰/۹۳	۴۷/۴۰	-۲/۴۰
$K^{t-1}$	$Y = 0.9924 X + 0.0199$	۰/۹۴	۴۴/۷۸	+۰/۲۲
خط انطباق	$Y = X$	۱	۴۵	۰

### بحث و نتیجه گیری

نتایج نشان داد که تعداد و انشعاب آبراهه در  $K^S$  بیشتر از دو واحد دیگر بوده و تراکم و بعد فراکتال شبکه زهکش در آن نیز بیشتر است. هرچه تعداد و انشعاب آبراهه در یک حوزه بیشتر باشد، تراکم شبکه زهکش آن بیشتر و همچنین بعد فراکتال آن نیز بیشتر است. همچنین نتایج علیمردادی (۱۳۹۵) نیز نشان داد که با افزایش تراکم آبراهه ها در یک سطح، بعد فراکتال نیز افزایش می یابد.



نتایج همایون نژاد و شجاعی (۱۳۹۵) نیز نشان داد که هرچه تعداد و تغییرات آبراهه بیشتر باشد، بعد فراکتال آن نیز بیشتر می شود. در هر دو تکنیک های بدون بعد سازی پارامترهای کمی در ژئومورفولوژی (بعد فراکتال شبکه زهکش، تراکم شبکه زهکش)، نسبت صحت سنجی بسیار خوب و شبیه به هم بدست آمده است. نسبت صحت سنجی در هر دو تکنیک برای سه واحد زمین شناسی  $K^{t-1}$ ،  $gd$ ،  $K^S$  به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۸ و ۰/۹۹ است. بنابراین در این مقایسه، هر دو تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکش و تراکم شبکه زهکش برای شناسایی و تفکیک سه واحد زمین شناسی مطالعاتی کارآ هستند.

بر اساس نتایج روش دوم مقایسه با استفاده از نمودار های QQ، در تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکش، ضریب تعیین در سه واحد زمین شناسی ۰/۸۷، ۰/۹۱ و ۰/۹۱ می باشد. در صورتی که در تکنیک تراکم شبکه زهکش در سه واحد زمین شناسی  $K^S$  و  $gd$  و  $K^{t-1}$  ضریب تعیین به ترتیب ۰/۹۹، ۰/۹۳ و ۰/۹۴ و بیشتر از بعد فراکتال شبکه زهکش بدست آمد (جدول ۷). هرچه این عدد به ۱ نزدیک تر باشد به معنی نتیجه بهتر است. همچنین در تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکش، زاویه انحراف در سه واحد زمین شناسی  $K^S$  و  $gd$  و  $K^{t-1}$  به ترتیب ۱۷/۰۵+، ۱/۴۸- و ۸/۳۷+ است. ولی در تکنیک تراکم شبکه زهکش در سه واحد زمین شناسی زاویه انحراف ۲۱/۰+، ۲/۴۰- و ۲۲/۰+ می باشد. زاویه انحراف هر چه به صفر نزدیک تر باشد زاویه انحراف در تراکم شبکه زهکش بسیار کمتر (به معنای بهتر بودن) است. بنابراین تکنیک تراکم شبکه زهکش، بهترین تکنیک بدون بعد سازی پارامترهای کمی در ژئومورفولوژی برای شناسایی و تفکیک سه واحد زمین شناسی مطالعاتی است. نتایج روش دوم مقایسه، نشان داد که تکنیک تراکم شبکه زهکش نسبت به تکنیک بعد فراکتال شبکه زهکش برای شناسایی و تفکیک سه واحد زمین شناسی و سنگ شناسی مطالعاتی  $K^S$  ( ماسه سنگ و کنگلومرا) و  $gd$  (گرانودیوریت) و  $K^{t-1}$  (آهک تفت) در منطقه مورد مطالعه مناسب تر و بهتر می باشد.

جدول ۷- مقایسه دو تکنیک بدون بعد سازی پارامترهای کمی در ژئومورفولوژی در این پژوهش

نوع تکنیک	پارامتر	$K^S$	$gd$	$K^{t-1}$
بعد فراکتال شبکه زهکش	زاویه انحراف	۱۷/۰۵+	۱/۴۸-	۸/۳۷+
	ضریب تعیین	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۹۱
تراکم شبکه زهکش	زاویه انحراف	۲۱/۰+	۲/۴۰-	۲۲/۰+
	ضریب تعیین	۰/۹۹	۰/۹۳	۰/۹۴

### منابع

- آق اتابای، مریم؛ سرکاری نژاد، خلیل، ۱۳۸۳، ماهیت فراکتالی (ناوردائی مقیاسی Scale Invariance) دوبلکس های منطقه هنشک، زون سندنج - سیرجان، هشتمین همایش انجمن زمین شناسی ایران.
- احمدی، حسن، ۱۳۹۰، ژئومورفولوژی کاربردی جلد ۱ (فرسایش آبی)، انتشارات دانشگاه تهران.
- اختصاصی، محمد رضا، ۱۳۹۰، جزوه درسی ژئومورفولوژی کمی، دانشکده منابع طبیعی و کویر شناسی دانشگاه یزد.
- اسکندری، سعید؛ مدنی، سید حسن؛ رسولی، وامق؛ تخم چی، بهزاد، ۱۳۸۷، تعیین نقاط بهینه حفاری های آتی در معدن شماره ۳ گل گهر سیرجان با استفاده از شبیه سازی متوالی گوسی - فراکتالی، نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره سوم، شماره ۵، صص. ۱۱-۱۹.
- افشار نجفی، صادق؛ رحیمی، بهنام؛ احمدی روحانی، ریحانه؛ قائمی، فرزین، ۱۳۹۴، مطالعه الگوهای آماری و فراکتالی آرایه شکستگی های توده گرانیته شرق بجستان بر پایه روش های دورسنجی. دومین کنگره بین المللی زمین شناسی کاربردی دانشگاه آزاد اسلامی مشهد، گروه زمین شناسی.
- ایلدرمی، علیرضا؛ سپهری، مهدی، ۱۳۹۷، فرسایش پذیری سازند های زمین شناسی با استفاده از تحلیل بعد فراکتال شبکه زهکشی (مطالعه موردی: دامنه های شمالی همدان)، مجله ژئومورفولوژی کمی. سال ششم، شماره ۴، صص. ۸۷-۷۰.

- باقری، محمد علی، ۱۳۸۰، مدل‌سازی سطوح درزه‌ها با استفاده از هندسه‌ی فراکتال، پنجمین همایش انجمن زمین‌شناسی ایران.
- برزگری، ودیعه؛ زندوانیان، اعظم؛ میری، زهرا؛ واعظی زاده، سپیده، ۱۳۹۳، مطالعات جامع زمین‌شناسی و ژئومورفولوژی حوزه آبخیز رستم آباد-اشکذر، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد.
- بهالدین، مجتبی؛ کریمی نسب، سعید؛ منصور، حمید، ۱۳۸۳، توصیف قابلیت انفجار توده‌سنگ به کمک بعد فراکتال، دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- پسند، سید علی؛ خانلری، غلامرضا؛ محمدی، سید داوود، ۱۳۸۳، کاربرد هندسه فراکتال در اکتشاف گسل‌ها (مطالعه موردی تونل‌های گلاب)، کنفرانس بین‌المللی زلزله (یادواره فاجعه بم).
- جمال آبادی، جواد؛ زنگنه اسدی، محمد علی؛ فاتحی، زهرا؛ رباط سرپوشی، مریم، ۱۳۹۵، بررسی تأثیر تکتونیک در ویژگی‌های کمی شبکه‌های زهکشی (مطالعه موردی: حوضه‌های بار، بقیع و قلعه میدان در دامنه جنوبی رشته کوه بینالود)، مجله ژئومورفولوژی کمی. سال چهارم، شماره ۴، صص. ۸۷-۱۰۳.
- خوش برش، امیر رحیم؛ گشتاسبی، کامران، ۱۳۸۰، مدل‌سازی فراکتالی شاخص کیفیت سنگ (RQD) الگویی مناسب جهت توصیف کیفی سنگ‌ها، اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.
- درخشان، حسن؛ عابدینی، محمد جواد؛ طالب بیدختی، ناصر، ۱۳۸۸، تجزیه بارندگی به کمک ایده فراکتالی بودن خصوصیات درونی و بیرونی آن، پنجمین همایش ملی علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان.
- شایان، سیاوش؛ یمانی، مجتبی؛ یادگاری، منیژه، ۱۳۹۴، مورفولیتولوژی توده الوند و نقش آن در مورفومتری و الگوی شبکه زهکشی، مجله ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۳، صص. ۱-۱۶.
- شایسته فر، محمد رضا؛ رسا، ایرج، ۱۳۸۴، تحلیل داده‌های چند متغیره کانسار سرب و روی قنات مروان کرمان، مجله علوم زمین، دوره ۱۵، شماره ۵۷، صص. ۱۳۴-۱۴۵.
- عدل، ایرج؛ مهروند، صمد، ۱۳۸۳، بعد فرکتالی و مشخصات هیدرولوژیکی حوزه‌های آبخیز، اولین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف.
- علیمراد، مهتاب، ۱۳۹۵، بررسی ارتباط پارامترهای کمی و بعد فراکتال الگوهای ژئومورفولوژی و سازندهای زمین‌شناسی در ارتباط با شاخص‌های هیدرولوژی و رسوب (مطالعه موردی: حوزه‌های آبخیز استان ایلام)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه یزد.
- فتاحی، محمد هادی؛ جهانگیری، حسن، ۱۳۹۳، بررسی ارتباط ویژگی‌های برخال شبکه‌ی رودخانه و سری‌های زمانی جریان رودخانه، مجله‌ی مهندسی منابع آب، دوره هفتم، شماره ۲۰، صص. ۱-۹.
- قدم پور، زهرا؛ طالب بیدختی، ناصر، ۱۳۹۰، محاسبه بعد فراکتالی در رودخانه‌های پیچانرودی با استفاده از روش شمارش جعبه‌ای، ششمین کنگره ملی مهندسی عمران.
- کرم، امیر؛ صابری، میترا، ۱۳۹۴، محاسبه ی بعد فرکتال در حوضه‌های زهکشی و رابطه ی آن با برخی خصوصیات ژئومورفولوژیکی حوضه (مطالعه موردی: حوضه‌های آبریز شمال تهران). مجله ژئومورفولوژی کمی، سال چهارم، شماره ۳، صص. ۱۵۳-۱۶۷.
- کرمی، فریبا؛ رجبی، معصومه؛ ابادری، کلثوم، ۱۳۹۷، تحلیل ناهنجاری‌های شبکه زهکشی و ارتباط آن با تکتونیک فعال در حوضه‌های آبریز شمال تبریز، مجله ژئومورفولوژی کمی، سال هفتم، شماره ۱، صص. ۳۰-۴۷.

- ملکشاهی، محمد؛ طالبی، علی؛ ثبوتی، سیران، ۱۳۹۱، بررسی روابط خطی و غیرخطی بین بعد فراکتال و دبی متوسط سالانه (مطالعه موردی رودخانه‌های استان لرستان)، سومین همایش ملی مدیریت جامع منابع آب، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی.
- نیکویی، احسان؛ حیدری، مهدی؛ طالب بیدختی، ناصر؛ حکمت زاده، علی اکبر، ۱۳۸۷، هندسه فراکتالی در مهندسی رودخانه: ایده‌ها، مفاهیم اساسی و دستاوردها، چهارمین کنگره ملی مهندسی عمران، دانشگاه تهران.
- همایون نژاد، ایمان؛ شجاعی، سعید، ۱۳۹۵، کاربرد علم فراکتال در ارزیابی حوزه آبخیز (مطالعه موردی: حوزه آبریز دویرج)، سومین همایش و نمایشگاه محیط زیست و بحران‌های پیش رو (با محوریت کمبود آب و آلودگی‌های شهری و صنعتی).
- Allen, M., Brown, G.J., Miles, N.J., 1995. *Measurement of Boundary Fractal Dimensions: Review of Current Techniques. Powder Technology*, 84(1): 1-14.
- Ariza, V. A., Jiménez-Hornero, F., Gutiérrez de Ravé, E., 2013. *Multi-fractal analysis applied to the study of the accuracy of DEM-based stream derivation. Geomorphology*. (197): 85-95.
- Beauvais, A., Montgomery, D.R., 1996. *Influence of Valley Type on the Scaling Properties of River Plan Forms. Water Resour.* (32): 1441-1448.
- Bi, L., He, H., Wei, Z., Shi, F., 2012. *Fractal properties of landform in the Ordos Block and surrounding areas, China. Geomorphology* (175): 151-162.
- Breslin M.C. Belward, J.A. 1999. *Fractal dimensions for rainfall time, Mathematics and Computers in Simulation* (48): 437-446
- Dimri, V.P., Ravi Prakash, M. and Chamoli, A., 2009. *Seismicity of Doon Valley, North West Himalaya, India: A Fractal Approach. EGU General Assembly Conference Abstracts*. (11).
- Ghosh, A. And Daemen, J.K., 1993. *Fractal Characteristics of Rock Discontinuities. Eng. Geol.* (34): 1-9.
- Idziak, A. and Teper, L., 1996. *Fractal Dimension of Faults Network in the Upper Silesian Coal Basin (Poland): Preliminary Studies. J. of Pu. Appl. Geophys.* 147(2).
- Islam, M. N., Sivakumar, B., 2002. *Characterization and Prediction of Runoff dynamics: A Nonlinear Dynamics View, Advances in Water Resources*. (25): 179-190.
- Mandelbrot, B., 1967. *How long is the coast of Britain Statistical self-similarity and fractal dimension. Science*. (156): 636-638.
- Mandelbrot, B.B., 1977. *Fractals: Form, Chance and Dimension. W.H. Freeman and Co, San Francisco, CA*.
- Men, B., Zhao, X., Liang, C., 2004. *Chaotic Analysis on Monthly Precipitation on Hills Region in Middle Sichuan of China, Nature and Science*. 2(2): 45-51.
- Movahed, M. S. Hermanis, E. 2008. *Fractal analysis of river flow fluctuations, Physica A*. (387): 915-932
- Nikora, V. I., 1991. *Fractal Structures Of River Plan Forms. Water Resour. Res.* 27(6).
- Nikora, V.I., Sapozhnikov, V.B., 1993. *River network fractal geometry and its computer simulation. Water Resources Research*. (29): 3565-3575.
- Sammis, C.G., An, L.J., Ershaghi, I., 1991. *Three Dimensional of The Fracture Network at The Geysers Geothermal Field. Paper presented at the 17<sup>th</sup> Annual Workshop Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA, 29-31 January*.
- Shang P. and kamae S. 2005. *Fractal Nature of Time Series in the Sediment Transport Phenomenon. Chaos Solutions & Fractals* 26: 997-1007.
- Shen, X.H., Zou, L.J., Li, H.S., 2002. *Successive Shift boxcounting Method for Calculating Fractal Dimension and Its Application in Identification of Fault. Acta Geol. Sin.-Engl.* 76: 257-263.

- Shen, X.H, L.J. Zou, G.F. Zhang, N. Su, W.Y. Wu, S.F. Yang. 2011. *Fractal Characteristics of the Main Channel of Yellow River and Its Relation to Regional Tectonic Evolution. Geomorphology*, 127: 64-70.
- Sivakumar, B., Berndtsson, R., Olsson, J., Kawamura, A., 2009. *Dynamic of Monthly RainfallRunoff Process at the Gota Basin: A Search for Chaos, Chaos, Solitons and Fractals*, 41: 368-379.
- Snow, R.S., 1989. *Fractal Sinuosity of Stream Channels. Pure Appl. Geophys*, 131, 99-109.
- Tarboton, D.G., 1996. *Fractal River Networks, Horton's Laws and Tokunaga Cyclicity. J. Hydrol*, 187: 105-117.
- Turcotte, D.L., 1992. *Fractal and Chaos in Geology and Geophysics. Geophysics Combridge University Press, Combridge: 121.*
- Wu, J., Lu, J., Wang, J., 2009. *Application of Chaos and Fractal Models to Water uality Time Series Prediction, Environmental Modeling & Software*, 24: 632-636.