

کاربرد سنجش از دور و مدل ریاضی فراکتال در بررسی رفتار و تغییرات لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس

شکور سلطانی* - دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تهران.
منیژه قهرودی تالی - استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.
سیدحسین صدوق - استاد دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۴ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴

چکیده

ارزیابی رفتار ژئومورفولوژی رودخانه یکی از موارد تعیین‌کننده و گامی مهم در مدل‌سازی ریاضی تغییرات لندفرم‌های آن می‌باشد. بررسی الگوی جریان در بازه‌های پیکان‌رودی و واحدهای ژئومورفیک رودخانه ارس، فرآیندهای تشکیل‌دهنده و روند تغییر آن‌ها به دلایل متعددی در مطالعات ژئومورفولوژی رودخانه‌ای دارای اهمیت است و باعث آشنایی هر چه بهتر مهندسی رودخانه با روند تغییرات می‌شود. هدف اصلی این پژوهش پیاده‌سازی بعد فراکتالی تغییرات ژئومورفولوژی مسیر رودخانه ارس است. با بهره‌گیری از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم حداکثر احتمال، لایه لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی محیط رودخانه ارس برای دو دوره زمانی در چهار کلاس لندفرم کانال، پوینت بار، دشت سیلابی، پادگانه رودخانه‌ای و مخروط افکنه تهیه شد؛ سپس از مدل‌های فراکتالی محیط - مساحت و تعداد تجمعی - مساحت برای بیان رفتار ریاضی این لندفرم‌ها استفاده گردید. تغییرات مقدار DAP (محیط - مساحت) برای لندفرم‌های مورد بررسی در محیط رودخانه ارس در دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸ نشان داد که مقادیر DAP همه لندفرم‌های مورد بررسی (به غیر از پوینت بار) در سال ۲۰۱۸ کوچک‌تر از DAP لندفرم‌ها در سال ۱۹۸۷ می‌باشد. بنابراین، الگوی ژئومتری لندفرم‌های رودخانه‌ای ارس در سال ۱۹۸۷ نامنظم‌تر و پیچیده‌تر از سال ۲۰۱۸ است. در مورد لندفرم پوینت بار، این مقدار در سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۱۹۸۷ افزایش پیدا کرده است که نشان از منظم‌تر شدن الگوی این لندفرم دارد. تغییرات مقدار D (تعداد تجمعی - مساحت) برای لندفرم‌های مورد بررسی در محیط رودخانه ارس نشان داد که مقادیر آن در سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۱۹۸۷ افزایش پیدا کرده است که این افزایش D می‌تواند یا بیانگر اجزای کم با اندازه بزرگ باشد و یا اجزای بیش‌تر با اندازه کوچک. با توجه به بررسی تصاویر ماهواره‌ای Landsat مورد استفاده در این پژوهش برای استخراج لندفرم‌های ژئومورفولوژی رودخانه‌ای در رود ارس طی سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸، رفتار بیکسلی لندفرم‌ها به‌گونه‌ای است که نشان از بزرگ‌تر شدن لندفرم‌های بررسی شده دارد. البته باید در مورد کانال رودخانه به این نکته اشاره نمود که با توجه به کاهش دبی و در نتیجه کاهش عرض کانال، می‌توان در مورد کاهش مساحت آن اظهار نظر نمود.

واژگان کلیدی: لندفرم ژئومورفولوژیکی، سنجش از دور، فراکتال، رودخانه ارس.

مقدمه

دیدگاه فراکتال^۱ سعی دارد با بکارگیری قواعد ساده تغییرات مقیاس، به شبیه‌سازی رفتار پیچیده سیستم‌ها بپردازد. فراکتال یا رفتار فراکتالی در واقع رفتاری است که در طبیعت و هرچیزی وجود دارد که متمایل به داشتن حالت تعادلی است. طبیعت اگرچه به ذات خود هوشمند نیست، اما تغییرات خارجی که بر طبیعت اعمال می‌شود، آن را به سمتی سوق می‌دهد که تغییر خارجی مذکور را خنثی می‌کند؛ به عبارت دیگر، چرخه اکوسیستم خودش را اصلاح می‌کند. به همین دلیل یکی از معانی که برای رفتار فراکتالی قائل می‌شوند، تغییر رفتار برای رسیدن به تعادل کلی است (بهرامی در اسله، ۱۳۸۰؛ کرم، ۱۳۸۹؛ قهرودی تالی و علی‌نوری، ۱۳۹۴). در نگاه اول، تغییرات لندفرم‌های محیط رودخانه‌ای و همچنین مورفومتری رودخانه فوق‌العاده پیچیده به نظر می‌رسد؛ زیرا مشخص است که دو عارضه دقیقاً مشابه نمی‌باشند و از نظر بعضی جزئیات با یکدیگر تفاوت دارند. لندفرم‌های منحصر به فرد محیط رودخانه‌ای و نیز مورفومتری آن‌ها از ترکیب اجزایی نتیجه شده‌اند که امکان شناخت آن‌ها را میسر می‌سازد. اما به خاطر اینکه در هریک از اشکال پیچیده، اجزای اصلی تشکیل‌دهنده آن‌ها اساساً شبیه به هم می‌باشند، می‌توان آن‌ها را به روش سیمتاتیک بررسی و سپس طبقه‌بندی کرد. مطابق نظریه فراکتال که به معنای نظم در بی‌نظمی شناخته می‌شود، پدیده‌ای طبیعی همچون رودخانه که در ظاهر دارای پیچیدگی و بی‌نظمی است، می‌توان با استفاده از روابطی در قالب هندسه درختان فراکتالی آن را منظم و براساس روال و منطق خاصی تعریف کرد (Ariza et al., 2013: 86).

تعیین بعد فراکتال اهمیت زیادی در شناخت رفتار و پیش‌بینی تغییرات مسیر رودخانه دارد. با اندازه‌گیری و محاسبه بعد فراکتالی می‌توان اطلاعات زیادی درباره طول از شعبات و سرچشمه‌های یک رود و همچنین شاخه‌هایی از رودخانه که امکان بررسی آن‌ها به هردلیلی وجود ندارد، دست یافت. از سوی دیگر می‌توان با استفاده از خاصیت فراکتالی پیش‌بینی کرد که یک رودخانه در طی سالیان دراز چگونه تغییر مسیر داده و بنابراین عوارض و پیامدهای تغییر مسیر آن را دنبال نمود. همچنین می‌توان چگونگی انتقال و نوع رسوب توسط رودها را با توجه به این مورد که هر شاخه رودخانه از چه مناطقی سرچشمه و یا عبور می‌کند، در نظر گرفت. یکی دیگر از مواردی که به کمک خاصیت فراکتال می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد، کنترل میزان دبی رودخانه می‌باشد (Phillips, 2002: 144). از آنجا که لندفرم‌های ژئومورفولوژیک دارای اشکال و اندازه و ابعاد خاصی است، نحوه آرایش فضایی این اشکال نسبت به یکدیگر تعیین‌کننده بسیاری از فاکتورهای مؤثر و یکسان در شکل‌گیری آن‌هاست که با دقت در آن‌ها شاید بتوان فاکتورهای مؤثر را شناسایی کرد. در این پژوهش، از دو مدل محیط - مساحت^۲ و تعداد - مساحت^۳ هندسه فراکتالی برای تفسیر رفتار تغییرات لندفرم‌های ژئومورفولوژیک محیط رودخانه ارس استفاده شد. به این ترتیب که در ابتدا لندفرم‌های این محیط رودخانه‌ای شامل کانال^۴، پوینت بار^۵، دشت سیلابی^۶، پادگانه رودخانه‌ای^۷ و مخروط افکنه^۸ برای دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸ با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Landsat و تکنیک‌های سنجش از دور استخراج و ویژگی‌های مورفومتری آن‌ها بررسی

1. Fractal

2. Perimeter-Area Fractal

3. Number-Area Model

4. Channel

5. Point Bar

6. Flood Plain

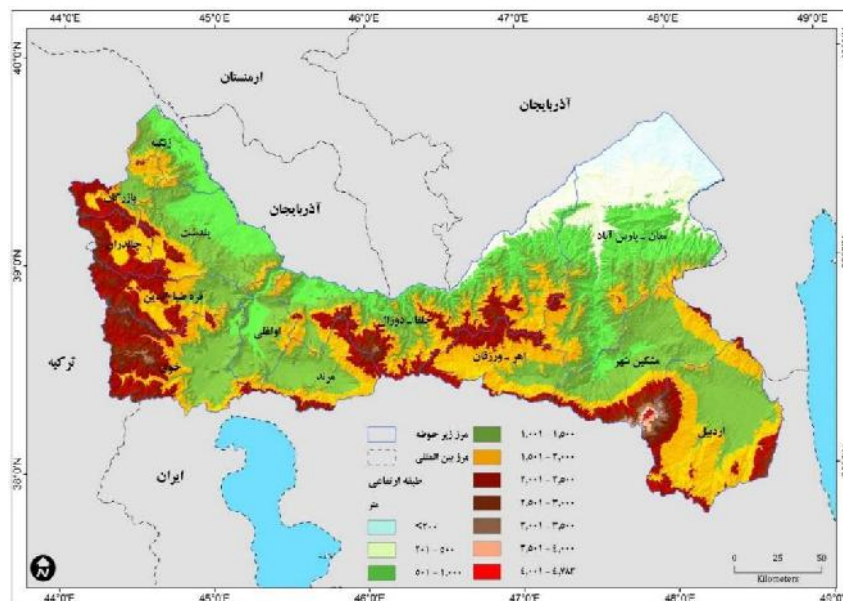
7. Fluvial Terrace

8. Alluvial Fan

شد. سپس این ویژگی‌های مورفومتری در قالب مدل‌های محیط - مساحت و تعداد - مساحت هندسه فراکتالی بررسی و الگوی رفتار و تغییرات آن‌ها با استفاده از ابعاد فراکتالی بدست آمد.

منطقه مورد مطالعه

رودخانه ارس، مرز مشترک بین کشورهای جمهوری اسلامی ایران، ترکیه، جمهوری ارمنستان و آذربایجان است (شکل ۱) که به دلیل موقعیت خاص ژئومورفولوژیکی حوضه ارس، دره این رود دارای تغییرات متعددی در طول زمان بوده که عدم انطباق خطوط مرزی و بستر رودخانه ارس را موجب گردیده است. این رودخانه پس از رود کورا مهم‌ترین رود حوضه محسوب می‌شود که آب حوضه آبخیزی به مساحت بالغ بر ۹۷۰۰۰ کیلومتر مربع را جمع‌آوری می‌کند. محدوده مورد مطالعه از نظر ژئومورفولوژی عمدتاً دارای تپه ماهورها و تپه‌های پراکنده و محدوده‌های پست کم ارتفاع می‌باشد و در قسمت‌هایی نیز کوهستان‌های مشرف به دشت‌های هموار وجود دارد. مورفولوژی عمده این محدوده در کل، تحت تاثیر فرآیندهای بیرونی در کوتاه‌تری شکل گرفته است. توپوگرافی تا حدود زیادی در مورفولوژی کانال‌های منطقه مؤثر بوده و تغییرات کانال رودخانه مرزی ارس می‌تواند تحت تاثیر فرآیندهای ژئومورفولوژی رفتار مشخصی داشته باشد. تنوع عوارض ژئومورفولوژی از جمله تپه‌های پراکنده و کوهستان‌های مشرف به دشت‌های هموار می‌تواند در هیدرولوژی شاخه‌های فرعی رودخانه ارس مؤثر بوده و تغییرات بخصوصی را در مورفولوژی اصلی کانال رودخانه ارس داشته باشد. تغییرات مکانی اقلیم به دلیل تغییرات ارتفاع در حوضه رود ارس (۳۰ متر در بخش‌های ساحلی تا ۴۸۰۰ متر در ارتفاعات سبلان) وجود دارد. میانگین بارندگی سالیانه حوضه در ایران ۳۴۰ میلی‌متر بوده که حداکثر آن در بهار (۴۱/۸ درصد) و حداقل آن در تابستان (۸/۹۵ درصد) می‌باشد (National Report of Islamic Republic of IRAN, 2006). حوضه آبریز ارس به دلیل واقع شدن در عرض‌های جغرافیایی بالا و وجود ارتفاعات مختلف دارای ویژگی‌های مناطق معتدل عرض‌های میانی کره زمین بوده و سیستم‌های جوی گوناگون، از جمله توده‌های هوای دریایی قطبی (MII) از سمت غرب و شمال غربی (با منبع رطوبتی مدیترانه و اقیانوس اطلس)، قاره‌ای قطبی (XII) از سمت شمال شرق (از طریق سیبری) و شمال غرب (از طریق اروپا)، قاره‌ای شمالی (XA) با ویژگی‌های بسیار سرد و خشک از سمت شمال و توده هوای مدیترانه‌ای از سمت غرب (از طریق ترکیه، سوریه و عراق) و سودانی از سمت جنوب غربی (از طریق آفریقا) بر آن تأثیرگذار می‌باشند؛ به طوری که منشاء اکثر بارش‌ها، جریان‌های هوای کم فشار گرم و مرطوبی است که به منطقه وارد شده و بخش عمده‌ای از ریزش‌ها را به صورت باران و بخش قابل توجهی را نیز به صورت برف سبب می‌گردند. تغییر حجم رواناب وارد شده از حوضه ارس به دریای مازندران در نتیجه فعالیت‌های انسانی مانند گسترش شهرها و جنگل‌زدایی، تغییرات کاربری اراضی و تخریب ناشی از سیلاب به دلیل گسترش شهرها و بالاخره وقوع سیلاب، جریان گلی و فرسایش کناری در سرتاسر حوضه، اهمیت پایش تغییرات مورفولوژیکی این رودخانه مرزی و تأثیر این تغییرات را بر روابط کشورهای همسایه بارز می‌سازد.



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی حوضه آبخیز رودخانه ارس

مواد و روش‌ها

به منظور بررسی ویژگی‌های فرکتالی لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی محیط رودخانه‌ای حوضه رود ارس از تکنیک‌های سامانه اطلاعات جغرافیایی و سنجش از دور استفاده شده است. بر اساس برسی‌های انجام گرفته و نیاز به تصاویر ماهواره‌ای و مرتبط با هدف پژوهش، تصاویر مربوط به ماهواره Landsat سنجنده‌های TM (لندست ۵) و OLI (لندست ۸) مورد استفاده قرار گرفته است. این تصاویر ماهواره‌ای برای سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸ میلادی تهیه شده و مراحل مطالعه بر روی آن‌ها انجام گرفت. انتخاب مناسب‌ترین داده‌های ماهواره‌ای بایستی با رعایت شرایط اکولوژیک و اقلیم منطقه مورد مطالعه انجام گیرد که در این مورد نکات مهمی که در انتخاب این تصاویر رعایت شده است، عبارتند از:

- میزان پوشش ابر در تصویر (کمتر از ۵ درصد)
- تطابق تصویر با منطقه مورد مطالعه (از آنجایی که تصاویر ETM+ و OLI به صورت تصحیح هندسی با پارامترهای مداری ارایه می‌گردند، لذا با انداختن مرز راقومی حوزه مورد مطالعه بر روی آن به راحتی می‌توان حدود منطقه را شناسایی نمود).
- بررسی هیستوگرام فراوانی بازتاب‌ها در هر باند (Digital Numbers).

آماده‌سازی تصاویر ماهواره‌ای

تصحیح هندسی

معمولاً تصاویر رقومی دارای انحراف‌هایی هستند، به طوری که این گونه تصاویر نمی‌توانند به عنوان نقشه مورد استفاده قرار گیرند. از جمله این انحراف‌ها می‌توان به تغییرات در ارتفاع و سکوی سنجنده، انحنای زمین، جابجایی و پستی و بلندی اشاره کرد. منظور از تصحیح هندسی جبران این انحراف‌هاست. تصاویر مورد استفاده به صورت خام، دارای مختصات تصویری می‌باشند و برای استفاده از آن‌ها به عنوان نقشه، به تصحیح هندسی یا زمین مرجع نمودن^۱ نیاز دارند. در این

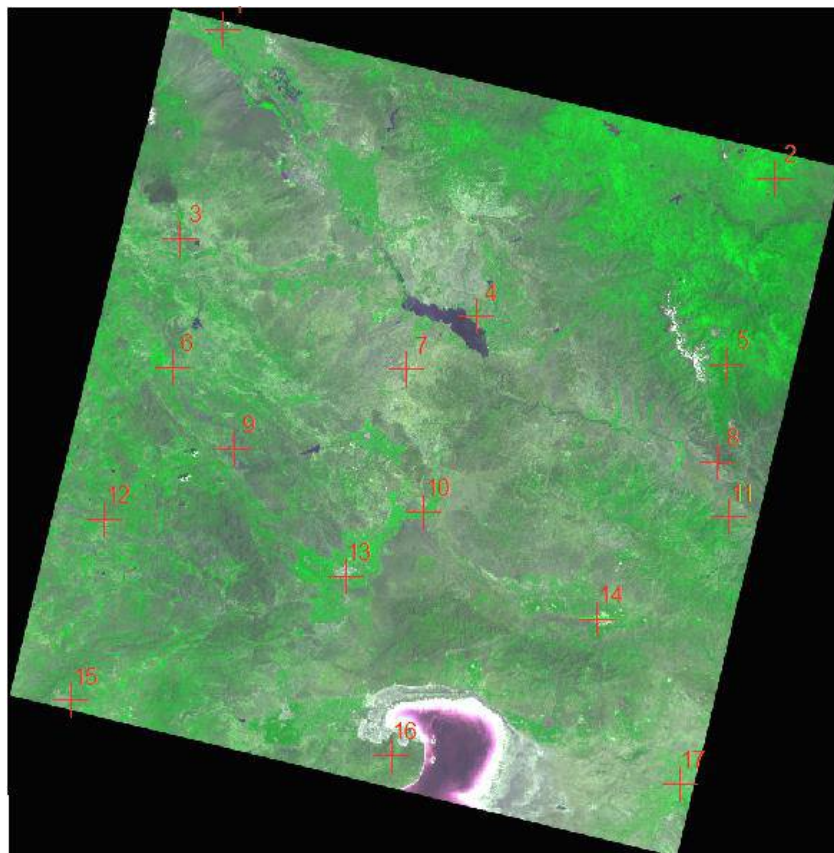
^۱. Georeferencing

را ستا انواع تبدیلات^۱ دو یا سه بعدی می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. تصاویر ماهواره‌ای Landsat در سطوح پایین مورد تصحیحات هندسی قرار گرفته‌اند؛ ولی دقت آن‌ها خیلی کم و در حدود ۵۰۰ متر نسبت به موقعیت واقعی می‌باشد. لذا با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی رقومی ۱:۲۵۰۰۰ که هم دقت بالایی دارد و هم نسبتاً بهنگام می‌باشند، نقاط کنترل زمینی (تقاطع جاده‌ها، رودخانه‌ها در مناطق کوهستانی، تأسیسات موجود و غیره) را انتخاب نموده و نسبت به زمین مرجع نمودن تصاویر با استفاده از نقاط کنترل زمینی اقدام می‌گردد. در رابطه با نقاط کنترل زمینی نکات زیر قابل توجه است:

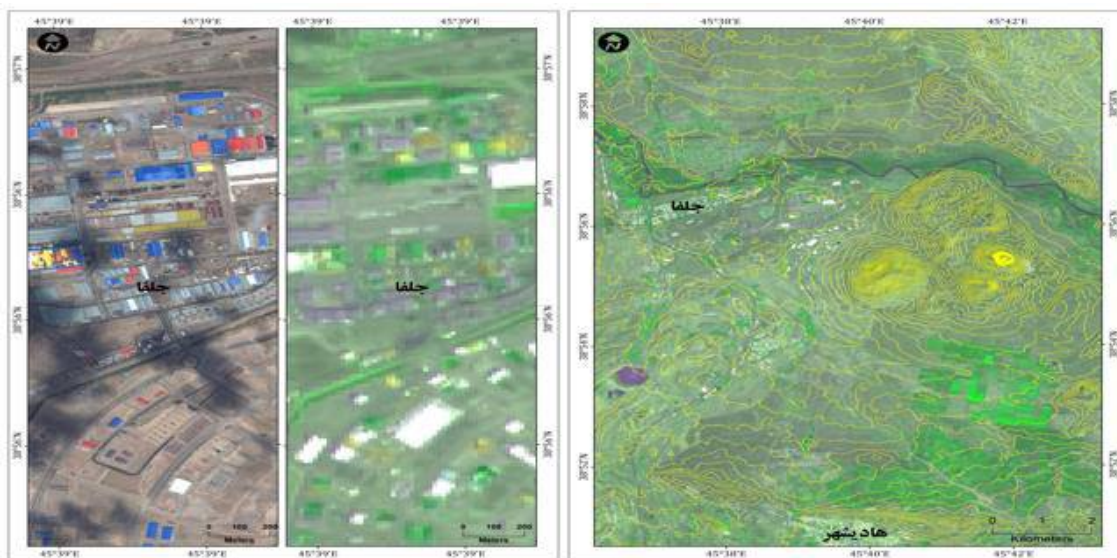
- تعداد نقاط کنترل بستگی مستقیمی به روش و مدل انتخاب شده برای اعمال تصحیحات هندسی دارد.
 - پراکندگی مسطحاتی نقاط باید طوری باشد که کل پیرامون منطقه را پوشش داده و به‌طور یکنواخت در داخل منطقه توزیع شوند. در حالتی که از مدل‌های ریاضی عمومی (Generic) استفاده می‌شوند، بهتر است که نقاط داخل منطقه، به‌صورت مثلث‌های متساوی‌الاضلاع انتخاب گردند.
 - نقاط علاوه بر پراکندگی مسطحاتی، بایستی دارای پراکندگی یکسان ارتفاعی (در ارتفاعات مختل) نیز باشند.
 - نقاط بر روی عوارضی با قابلیت تشخیص و دسترسی آسان (روی تصویر و منبع استخراج مختصات) انتخاب شوند؛ نمونه‌های این عوارض عبارت‌اند از میدان‌ها، تقاطع جاده‌ها و تقاطع عوارض خطی مشخص.
- با توجه به اینکه تصاویر Landsat موجود قبلاً نسبت به شمال توجه شده‌اند، لذا بهتر است که انجام هر نمونه‌گیری مجدد تصویر پس از اتمام مراحل طبقه‌بندی صورت پذیرد تا از تغییرات احتمالی در مقادیر بازتاب‌ها (DNs) اجتناب گردد. در هر صورت، برای فرآیند فوق در این روش بهتر است از روش نزدیک‌ترین همسایه^۲ استفاده شود و ابعاد سلول شبکه نیز ۳۰ متر انتخاب گردد. دقت تصحیحات هندسی بستگی به دقت نقاط کنترل زمینی و تعداد و پراکندگی آن‌ها در سطح تصویر دارد. به این دلیل میزان خطای RMS باید کم‌تر از یک پیکسل و ترجیحاً نیم پیکسل باشد. در نهایت برای کنترل دقت تصحیح هندسی اعمال شده، می‌توان از روش انطباق لایه‌های عوارض خطی موجود در نقشه‌ها نظیر جاده‌ها و آبراهه‌ها با تصاویر تصحیح شده استفاده نمود. در این پژوهش برای تطابق هندسی تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ سازمان نقشه‌برداری کشور و تصاویر ماهواره‌ای GeoEye با قدرت تفکیک مکانی بهتر از ۱ متر استفاده شد. ابتدا تصویر ماهواره‌ای سال ۲۰۱۸ با استفاده از ۱۷ نقطه کنترل زمینی با خطای هندسی نیم پیکسل ($RMS=0.45$) و روش نزدیک‌ترین همسایه تصحیح هندسی شدند. سپس تصاویر سال ۱۹۸۷ بر اساس آن زمین مرجع شدند که خطای هندسی نیم پیکسل بدست آمده برای این تصاویر ۰/۴۳ است. نمونه‌هایی از نحوه انجام زمین مرجع تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

1. Transformations

2. Nearest Neighbor



شکل ۲: نمونه‌ای از نقاط کنترل استخراج شده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و تصویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا



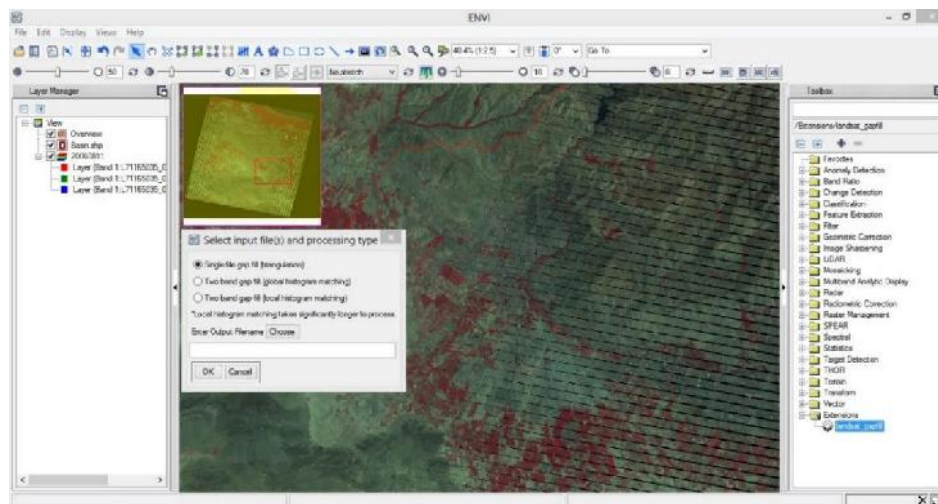
شکل ۳: الف) انطباق خطوط منحنی میزان با تصویر ماهواره‌ای Landsat جهت تصحیح خطای هندسی تصویر؛ ب) تصاویر ماهواره‌ای حوزه رود ارس: منطقه جلفا (سمت راست، تصویر Landsat سال ۲۰۱۸ و سمت چپ، تصویر GeoEye سال ۲۰۱۶ با قدرت تفکیک مکانی به ترتیب ۱۵ و بهتر از یک متر)

تصحیح خطای رادیومتریک

تصاویر دریافت شده از سنجنده‌های فضایی معمولاً نیازمند انجام یکسری تصحیحاتی می‌باشند که در مرحله پیش پردازش و توسط ایستگاه دریافت کننده تصویر و بنا به درخواست کاربر بر روی تصاویر اعمال می‌گردند. مواردی از قبیل بررسی پوشش ابری تصاویر، کنترل کیفیت نمایشی تصاویر تولید شده با رنگ‌های کاذب، نداشتن گپ اطلاعاتی، نبود خطوط جا افتاده بر روی تصویر و اعمال تصحیحات مربوط به نرمال سازی تصاویر جهت استفاده در سیستم از این جمله می‌باشند. تصحیحات رادیومتریک برای بهبود کیفیت رادیومتریک تصاویر، افزایش وضوح و در نتیجه افزایش میزان اطلاعات قابل استخراج از تصاویر مؤثر می‌باشد.

در این مرحله نسبت به اصلاح خطاهای مکانیکی / الکترونیکی که بر اثر نقص در سنجنده یا ایستگاه گیرنده زمینی حادث شده که خود به دلیل دو عامل اساسی زیر می‌باشند:

- اختلال در بعضی قسمت‌های سنجنده یا ایستگاه گیرنده زمینی که این نقص موجب می‌گردد که قسمتی از یک تصویر یا خطی از تصویر به صورت نامتجانس با اطراف خود دارای مقادیر ثابت گردد که اصطلاحاً به آن miss line اطلاق می‌گردد. برای رفع این نقیصه، باید به جای این خط از خط بالا یا پایین و یا میانگین خطوط بالا و پایین استفاده شود.
 - ایجاد تغییر در خروجی سنسورها با ورودی یکسان با فرض اینکه سنسورها طوری کالیبره شده باشند که برای هر ورودی یک خروجی یکسان تولید کنند. برای تصحیح این خط از روش‌های مختلفی مانند استفاده از داده‌های کالیبره شده، تصحیح خطی بودن خط، تطبیق هیستوگرام و یا تبدیل فوریه استفاده می‌شود.
- برای بهبود تصاویر دریافتی از ماهواره Landsat، اصلاح کننده خط پرواز (SLC) به سنجنده جدید اضافه گردید. این اصلاح کننده آینه کوچکی در سنجنده مربوط به تصاویر ETM+ بوده که در ماه می (MAY) سال ۲۰۰۳ از کار افتاده است. این امر موجب شده که در تصاویر دریافتی از این سنجنده بجز بخش مرکزی تصویر سایر قسمت‌ها به صورت ناقص مشاهده گردد. این نقص موجب ایجاد گپ در تصاویر از حدود یک پیکسل در مرکز تصویر تا ۱۲ پیکسل در لبه‌ها می‌گردد. به منظور بهبود این تصاویر ماهواره‌ای پس از مکانیزم شکست خورده سنسور اصلاح خط اسکن از طریق پر کردن شکاف‌ها، استفاده از الگوریتم ارائه شده توسط سازمان زمین‌شناسی و سازمان فضایی آمریکا با نام الگوریتم Gap-Fill است که برای میان‌یابی پیکسل‌های فاقد ارزش است (شکل ۴).



شکل ۴. استفاده از الگوریتم Gap-Fill و تصحیح رادیومتریک تصاویر Landsat

بارزسازی تصاویر ماهواره‌ای

به مجموعه فعالیت‌ها جهت استخراج اطلاعات از تصاویر ماهواره‌ای، بارزسازی گفته می‌شود. از مجموعه تصاویر ماهواره Landsat، سنجنده‌های TM و OLI به ترتیب به دلیل داشتن ۷ و ۱۱ باند مختلف، تصاویر رنگی کاذب زیادی را ارائه می‌دهند و این تصاویر قابلیت زیادی در شناخت عوارض و پدیده‌های مختلف زمینی دارند.

تفسیر و طبقه‌بندی بصری یا چشمی تصاویر با استفاده از داشتن شخص تفسیر کننده در مورد انواع پارامترهای بصری عوارض از قبیل درجه روشنایی یا رنگ (خصوصیات طیفی)، شکل، اندازه، سایه، الگو، بافت و وابستگی مکانی (خصوصیات مکانی) در یک وهله زمانی خاص انجام می‌شود. این عمل به میزان زیادی تجربه و دانش اولیه در مورد تصاویر، عوارض مورد نظر و رفتار طیفی هر عارضه بستگی دارد. یک تحلیلگر تصویر بر روی یک پیکسل منفرد عمل طبقه‌بندی را انجام نمی‌دهد، بلکه ترجیح می‌دهد که به جای آن یک ناحیه کامل را تفسیر کند (نواحی دارای خصوصیات مشابه). به رغم بکارگیری پاره‌ای معیارهای موضوعی و کمی، معمولاً تفسیرهای مرسوم بصری بر مبنای ابتکارات اشخاص است و کم‌تر از الگوریتم‌های آماری تبعیت می‌کنند. بنابراین، نتایج تشخیص آماری الگوها و تکنیک‌های پردازش رقومی تصویر در مقایسه با نتایج حاصل از کار یک مفسر عکس ماهر، ناقص می‌باشند.

تفسیر بصری تصویر بیش‌تر از اینکه به خواندن پیکسل‌های موجود در تصویر مربوط شود، به دیدن تصویر و درک آن مربوط است که هم نیازمند تشخیص عناصر الگویی تصویر (مانند درجه روشنایی، رنگ، اندازه، بافت، شکل، الگو، ارتفاع، سایه) است و هم نیازمند آنالیز و الحاق دانش متنی است. معمولاً با ایجاد ترکیب‌های رنگی مختلف کاذب و حتی حقیقی (RGB: 1,2,3) و با افزایش کنتراست، می‌توان به افزایش صحت و دقت عملیات تفسیر بصری منطقه و عوارض موجود کمک نمود. با یک ترکیب طیفی مناسب، شناختی کلی از پراکندگی واحدهای مختلف پوشش و کاربری اراضی در منطقه به دست می‌آید. در صورت ابهام در تفسیر و تشخیص بعضی از مناطق در روی تصویر ماهواره‌ای، از نقشه‌های موضوعی موجود و باز دیده‌های صحرائی کمک گرفته می‌شود (Bodily, 2004: 56; فاطمی و رضایی، ۱۳۸۵: ۱۲۹).

با توجه به خصوصیات سخت‌افزاری سیستم‌های کامپیوتری و امکان نمایش همزمان سه باند طیفی بر روی نمایشگرها، باید ترکیبی از تصاویر را انتخاب نمود که بیش‌ترین اطلاعات ممکن در زمینه‌ی مورد نظر را برای مفسر تأمین نماید. بدین ترتیب باید برای ساختن تصویر نهایی از باندهایی استفاده شود که کم‌ترین همبستگی^۱ اطلاعاتی را داشته باشند. این کار از طریق انجام آنالیز ماتریس همبستگی^۲ انجام می‌شود. البته با توجه به تجربه و کاربرد می‌توان جهت انتخاب مناسب‌ترین باندها اقدام نمود.

با توجه به اینکه انتخاب بهترین ترکیب باندی از طریق مقایسه چشمی مشکل و وقت گیر است، لذا برای این کار بر اساس همبستگی و واریانس بین باندها به انتخاب بهترین ترکیب سه تایی باندها پرداخته شد. در واقع ترکیب‌های باندی که از اطلاعات (انحراف معیار) و تکرار کم (همبستگی کم بین باندها) برخوردار بودند، انتخاب شدند. در بسیاری از موارد، مواد مختلف موجود در طبیعت با پدیده‌های گوناگون بازتاب‌های طیفی مشابهی دارند که در چنین حالتی، تصویری با کنتراست نسبتاً کم به دست می‌آید. در تصاویر TM و ETM+ درجه روشنایی پیکسل‌ها می‌تواند در دامنه ۰-۲۵۵ و در تصاویر OLI در دامنه ۰-۶۵۵۳۵ قرار گیرد. اما عملاً در بسیاری از موارد درجه روشنایی تصاویر در دامنه محدودتری قرار می‌گیرد. با توجه به آنالیز ماتریس همبستگی برای تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده در این پژوهش، مشخص شد که بهترین ترکیب باندی برای تصاویر TM (سال ۱۹۸۷) باندهای ۴، ۵ و ۷ و برای تصاویر OLI (سال ۲۰۱۸) باندهای

1. Correlation

2. Correlation Matrix

۲، ۳ و ۴ می‌باشند؛ این باندها در تصاویر ذکر شده دارای کمترین همبستگی در میان همه باندها هستند (جدول‌های ۱ و ۲) و بنابراین بیشترین داده‌ها را منعکس می‌سازند.

جدول ۱: ماتریس آنالیز همبستگی باندهای تصویر ماهواره‌ای Landsat TM سال ۱۹۸۷

باند	۱	۲	۳	۴	۵	۷
۱	۱	۰٫۹۹	۰٫۹۲	۰٫۹۱	۰٫۹۶	۰٫۹۵
۲	۰٫۹۹	۱	۰٫۹۹	۰٫۸۹	۰٫۹۷	۰٫۹۷
۳	۰٫۹۲	۰٫۹۹	۱	۰٫۸۵	۰٫۹۶	۰٫۹۸
۴	۰٫۹۱	۰٫۸۹	۰٫۸۵	۱	۰٫۹۲	۰٫۸۴
۵	۰٫۹۶	۰٫۹۷	۰٫۹۶	۰٫۹۲	۱	۰٫۹۸
۷	۰٫۹۵	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۸۴	۰٫۹۸	۱

جدول ۲: ماتریس آنالیز همبستگی باندهای تصویر ماهواره‌ای Landsat OLI سال ۲۰۱۸

باند	۱	۲	۳	۴	۵	۷
۱	۱	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۰٫۹۷	۰٫۸۸	۰٫۹۴
۲	۰٫۹۹	۱	۰٫۹۹	۰٫۹۸	۰٫۸۶	۰٫۹۳
۳	۰٫۹۹	۰٫۹۹	۱	۰٫۹۹	۰٫۸۶	۰٫۹۴
۴	۰٫۹۷	۰٫۹۸	۰٫۹۹	۱	۰٫۸۰	۰٫۹۳
۵	۰٫۸۸	۰٫۸۶	۰٫۸۶	۰٫۸۰	۱	۰٫۸۵
۷	۰٫۹۴	۰٫۹۳	۰٫۹۴	۰٫۹۳	۰٫۸۵	۱

طبقه‌بندی و استخراج لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی

نسبت باندها^۱

تقسیم و نسبت مقادیر پیکسل‌ها در باندهای مختلف یکی از تکنیک‌های معتبر برای حذف تأثیر برخی پدیده‌ها در تصویر و تشخیص عوارض خاص در کاربری‌های مختلف سنجش از دور است. به عنوان مثال در تصاویر ماهواره‌ای ETM+، از نسبت‌های Band 4/ Band 3 برای شناخت وضعیت و تراکم پوشش گیاهی، Band 4/ Band 1 برای استخراج مرز منابع آبی (دریا، دریاچه، آب بندان، هور، باطلاق، مرداب و ...)، Band 7/ Band 5 برای تشخیص کانی‌های رسی و سنگ‌های دگرگونی هیدروترمال، Band 3/ Band 1 برای تشخیص اکسید آهن و Band 5/

^۱. Band Ratio

Band 4 برای کانی‌های آهن استفاده می‌شود. همچنین برای تشخیص پوشش گیاهی (نوع و تراکم)، می‌توان از انواع شاخص‌های پوشش گیاهی نظیر (NDVI)^۱، (RVI)^۲ یا (SAVI)^۳ استفاده نمود.

طبقه‌بندی نظارت شده^۴

در این نوع طبقه‌بندی تصاویر، پیکسل‌ها بر اساس میزان روشنایی باندهای مختلف با استفاده از الگوریتم خاص، در طبقات مشخصی قرار می‌گیرند. سپس با شناخت موجود از منطقه، طبقات شناسایی شده و صحت جداسازی واحدهای مورد نظر بررسی می‌شود. در صورت قابل قبول بودن این مرحله، هر طبقه شناسایی و گویا می‌شوند. طبقه‌بندی تصاویر با این روش با استفاده از باندهایی که کم‌ترین هبستگی را دارند انجام می‌گیرد. پیکسل‌ها در این نوع طبقه‌بندی باید در حدود ۱۰ الی ۲۰ طبقه مختلف قرار گیرند (این کار به روش سعی و خطا با تغییر پارامترهای مختلف انجام می‌شود). سپس با بررسی هر طبقه، واحدهای طبقه‌بندی شده گویا شده و همزمان محدوده‌ی هر یک به‌طور جداگانه ذخیره می‌شود.

طبقه‌بندی نظارت شده^۵

در این روش، طبقه‌بندی تصویر از طریق مقایسه مقادیر و مشخصات طیفی هر پیکسل با مشخصات از پیش تعیین شده انجام می‌شود. به این منظور، به اطلاعاتی تحت عنوان مناطق نمونه یا تعلیمی^۶ نیاز است که باید از طریق دانش قبلی نسبت به منطقه‌ی مورد بررسی یا از طریق مشاهدات زمینی تأمین گردند. در مواردی که دانش کافی نسبت به منطقه و نوع پوشش‌های موجود در آن وجود نداشته باشد، انجام مشاهدات زمینی و جمع‌آوری اطلاعات با رعایت موارد زیر ضروری است:

- تعداد پیکسل نمونه‌های مشاهده شده برای هر طبقه باید حداقل ۱۰ برابر و حداکثر ۱۰۰ برابر تعداد باندهای مورد استفاده در طبقه‌بندی باشد. بدین ترتیب در هنگام استفاده از هر هفت باند تصاویر ماهواره‌ای Landsat OLI، نمونه‌های تعلیمی باید دربرگیرنده حداقل ۷۰ پیکسل و حداکثر ۷۰۰ پیکسل باشد.
- هر منطقه نمونه یا تعلیمی باید دارای پوشش یکسان بوده (شامل یکی از طبقات تعیین شده باشد) و ابعاد آن متناسب با وسعت منطقه، نوع پوشش و لندفرم و همچنین تغییرات طیفی هر کلاس مورد مطالعه باشد.
- توزیع و پراکندگی نمونه‌ها باید به گونه‌ای باشد که سطح منطقه مورد بررسی (یا فریم تصویر، هر کدام کوچک‌تر باشد) را به‌طور همگن پوشش دهد.
- زمان مراجعه به زمین برای جمع‌آوری نمونه‌ها باید به نحوی باشد که با زمان اخذ تصویر اختلاف زیادی نداشته باشد. در صورت عدم امکان مراجعه در همان سال، با حصول اطمینان از عدم وجود تغییرات زیاد در پوشش گیاهی و لندفرم‌ها، می‌توان در مدت مشابه سال (یا سال‌های بعد) نسبت به این کار اقدام نمود.
- بهتر است موقعیت نمونه‌ها از قبل بر روی تصویر مشخص شود تا از پراکندگی و چگالی مناسب این نمونه‌ها اطمینان حاصل گردد. بدین منظور می‌توان با استفاده از یک طبقه‌بندی نظارت نشده، موقعیت مناسب برای بررسی کلاس‌های مختلف بر روی زمین را مشخص نمود.

1. Normalized Difference Vegetation Index

2. Ratio Vegetation Index

3. Soil Adjusted Vegetation Index

4. Unsupervised Classification

5. Supervised Classification

6. Sample and Training Area

- در هنگام مشاهده‌ی زمینی، موقعیت هندسی مناطق تعلیمی باید بر روی تصاویر مشخص شده و مختصات آن توسط گیرنده‌ی GPS دستی برداشت گردد. این عمل متضمن کیفیت مناسب عملیات نمونه‌برداری است. در این نوع طبقه‌بندی تصاویر، طبقات مورد نظر نبایستی با یکدیگر همپوشانی طیفی داشته باشند؛ زیرا در این صورت جداسازی عوارض به‌طور قابل اعتماد ممکن نخواهد بود. با استفاده از امکانات نرم‌افزارهای پردازش رقومی تصاویر ماهواره‌ای می‌بایست پراکندگی نمونه‌ها و به خصوص میانگین و واریانس آن‌ها در فضای دو بعدی بررسی و اصلاحات لازمه صورت پذیرد. در عمل، بعضی از کلاس‌ها ممکن است همپوشانی طیفی زیادی با یکدیگر داشته باشند. در این صورت کلاس‌های همپوشان نمی‌توانند به روش طبقه‌بندی طیفی از همدیگر تفکیک شوند. راه حل عملی برای تفکیک این کلاس‌ها، استفاده از روش طبقه‌بندی ترکیبی^۱، استفاده از تصاویر با ترکیب طیفی یا زمانی دیگر و با استفاده از داده‌ها و اطلاعات جانبی می‌باشد که معمولاً این روش به روش طبقه‌بندی دانش پایه^۲ معروف است (Liu et al., 2002: 258).

پس از مرحله نمونه‌برداری و با حصول اطمینان از صحت نمونه‌های برداشت شده، طبقه‌بندی کل تصویر انجام می‌شود. الگوریتم‌های مختلفی برای این مرحله وجود دارد که روش مناسب باید با توجه به امکانات موجود در نرم‌افزار، صحت عملیات و با در نظر گرفتن کم‌ترین خطا انتخاب شود. معمولاً استفاده از روش طبقه‌بندی حداکثر احتمال^۳ و با در نظر گرفتن احتمالات اولیه مساوی، به دلیل تئوری قوی آماری آن توصیه می‌شود.

طبقه‌بندی ترکیبی نظارت شده و نظارت نشده

نکته اصلی در این روش، تفاوت بین کلاس‌های اطلاعاتی و کلاس‌های طیفی است. بر اساس تحقیقات انجام شده، طبقه‌بندی ترکیبی جهت افزایش دقت نتایج طبقه‌بندی و جداسازی کلاس‌های طیفی از کلاس‌های اطلاعاتی به دو روش اصلی زیر امکان‌پذیر می‌باشد:

- **روش اول:** ابتدا چند منطقه حاوی نمونه‌های زمینی بر روی تصاویر انتخاب می‌شوند، به‌طوری‌که هر کدام از آن‌ها شامل بیش از یک نوع پوشش باشند. سپس طبقه‌بندی طیفی به روش طبقه‌بندی نظارت نشده انجام شده و پارامترهای آماری از قبیل میانگین‌ها و واریانس‌ها استخراج می‌شوند. با استفاده از این داده‌ها، طبقه‌بندی نظارت شده بر اساس حداکثر احتمال برای کل تصویر انجام می‌گردد.
- **روش دوم:** نمونه‌های زمینی یا آزمایشی از نقاط همگن برای هر کلاس انتخاب می‌گردند. بر روی این نقاط طبقه‌بندی نظارت نشده انجام می‌گردد تا کلاس‌های طیفی مشخص گردند. پارامترهای آماری از روش نظارت نشده استخراج گردیده تا به روش طبقه‌بندی نظارت نشده بر اساس حداکثر احتمال، کل تصویر طبقه‌بندی گردد.

با هدف تفکیک لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی محیط رودخانه ارس از روش طبقه‌بندی نظارت شده با الگوریتم حداکثر احتمال استفاده شده است. این روش طبقه‌بندی از داده‌هایی مانند میانگین متوسط‌های برآورد^۴ و واریانس‌های طبقات استفاده می‌کند که بعداً به‌منظور احتمال‌های برآورد بکار برده می‌شوند. الگوریتم حداکثر احتمال فرض می‌کند که احتمال‌های برآورد برای همه طبقات برابر هستند و هیستوگرام باندهای ورودی جهت بدست دادن یک خروجی دقیق، دارای توزیع نرمال می‌باشند. این روش متوسط، واریانس‌ها و تغییرپذیری در ارزش‌های طیفی هر کلاس را به‌عنوان

1. Hybrid Classification

2. Knowledge Based Image Classification

3. Maximum Likelihood

4. Means of Estimating Averages

مجموعه‌ای از داده‌های زمینی به دست می‌دهد؛ بنابراین، نیازمند داده‌های زمینی دقیق است. مزیت اصلی این روش آمار مبنا بودن آن است که برآوردی از هم‌پوشانی نواحی را فراهم می‌کند (Suriya and Mudgal, 2011).

انتخاب نمونه‌های تعلیمی مورد نیاز برای طبقه‌بندی لندفرم‌های رودخانه‌ای در منطقه جهت طبقه‌بندی با استفاده از اطلاعات جنبی و بر روی تصویر رنگی مرکب (RGB: ۲، ۳ و ۴) برای تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸ صورت گرفت. برای این منظور در بستر رودخانه ارس به فراخور سهم هر لندفرم در منطقه مورد مطالعه تعداد مناسبی نمونه تعلیمی با استفاده از برسی Google Earth، تصویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بهتر از یک متر و نقشه کاربری تهیه شده توسط مرکز داده‌های علوم زمین و همچنین تصاویر رنگی مرکب انتخاب گردیدند. در انتخاب نمونه‌های تعلیمی سعی شد که این نمونه‌های تعلیمی از پراکنش مناسب برخوردار بوده و معرف خوبی برای طبقات مورد نظر باشند.

با بهره‌گیری از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم حداکثر احتمال، لایه لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی محیط رودخانه ارس برای دو دوره زمانی در چهار کلاس لندفرم کانال، پوینت بار، دشت سیلابی، پادگانه رودخانه‌ای و مخروط افکنه تهیه گردیدند.

مدل فراکتالی لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی

هندس‌ه فراکتال مناسب‌ترین ابزار ریاضی جهت توصیف بی‌نظمی و آشفتگی پدیده‌های پیچیده طبیعی با استفاده از پارامترهای قابل اعتماد می‌باشد (قهرودی و درفشی، ۱۳۹۴: ۲)؛ بنابراین، مفاهیم فراکتالی می‌تواند برای مدل‌سازی و تعیین تغییرات هندسی نواحی در معرض خطر مورد استفاده قرار گیرد (Martino et al., 2013: 3951؛ قهرودی و خدری، ۱۳۹۲: ۴۶). با معرفی هندسه فراکتالی توسط مندلبرت به عنوان هندسه طبیعت، توجه بسیاری از پژوهشگران به این هندسه نوین جلب گردید. از آن زمان تاکنون پژوهشگران توانسته‌اند هندسه پدیده‌های پیچیده طبیعی را به خوبی با این هندسه مدل نمایند و از طرفی رفتار فیزیکی بسیاری از فرآیندهای طبیعی نیز با بهره‌گیری از روابط هندسه فراکتالی قابل پیش‌بینی باشد.

روش معمول جهت بررسی وجود فراکتال‌ها در یک مجموعه داده برآورد ابعاد آن است؛ ابعاد اغلب میزان بی‌نظمی یا تغییرپذیری مشخصه‌ای را توسط توزیع داده‌ها تفهیر می‌کنند (Sivakumar, 2000: 728). بنابراین، برآورد ابعاد مجموعه داده از روش‌های بررسی آن می‌باشد؛ هرچند این مجموعه داده می‌تواند به‌طور کامل آشفتگی باشد. فراکتال مدل‌های ریاضی مختلفی دارد که در این پژوهش از مدل‌های محیط - مساحت و تعداد - مساحت استفاده شده که در ادامه تشریح می‌شوند.

مدل فراکتالی محیط - مساحت

فراکتال محیط - مساحت مدلی ریاضی جهت نشان دادن ارتباط بین محیط (P) و مساحت (A) فراکتال‌های مشابه شکلی می‌باشد (Cheng, 1995; Cheng et al., 2001; Wang et al, 2006). این مدل از طریق رابطه ۱ بدست می‌آید.

$$P \propto A^{1/2D_{AP}} \quad \text{رابطه ۱}$$

که در آن P محیط و A مساحت اجزای یک پدیده است؛ "α" نیز "نسبت به" تعریف شده است. D_{AP} نمای ارتباط قانون توانی می‌باشد که از رابطه $D_{AP} = 2D_P/D_A$ بدست می‌آید، D_P و D_A بترتیب ابعاد فراکتالی محیط و مساحت

هستند. زمانیکه روش box-counting بکار گرفته شود D_A و D_P می‌تواند از طریق رابطه ۲ بدست آید (Cheng, 1995).

$$D_p = 1 - \lim_{\delta \rightarrow 0} \left(\frac{\log P(\delta)}{\log \delta} \right) \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$D_A = 2 - \lim_{\delta \rightarrow 0} \left(\frac{\log A(\delta)}{\log \delta} \right)$$

اگر داده‌های P و A بر روی کاغذ لگاریتمی ترسیم و ارتباط خطی بین لگاریتم محیط و لگاریتم مساحت بدست آید، توان محیط و مساحت D_{AP} می‌تواند از طریق برازش خطی مستقیم با استفاده از روش کوچک‌ترین مربعات^۱ تعیین شود (رابطه ۳). شیب این خط برآوردی از D_{AP} است (Cheng, 1995):

$$\log P = \quad \text{(رابطه ۳)} \\ C + 1/2 D_{AP} \log A$$

C عدد ثابت می‌باشد. در مجموع D_{AP} دامنه‌ای از ۱ تا ۲ دارد؛ اگر D_{AP} برابر ۱ باشد آنگاه $p \propto A^{0.5}$ مجموعه‌های شکل گرفته 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 شده و رفتار محیط با مساحت یکی می‌گردد. بنابراین، با افزایش ارزش D_{AP} از ۱ به سمت ۲ میزان آشفتگی و بی‌نظمی محیط نسبت به مساحت پدیده مورد بررسی افزوده می‌شود که نشان‌دهنده افزایش آشفتگی در رویداد پدیده و ابعاد هندسی آن می‌باشد. مقدار D_P از طریق رابطه $D_P = 0.5 D_{AP}$ محاسبه می‌شود؛ به‌طور کلی D_P ‌های بزرگ‌تر بی‌نظمی بیش‌تری را نشان می‌دهند.

مدل فراکتالی تعداد - مساحت

این مدل می‌تواند با استفاده از ارتباط بین تعداد تجمعی و مساحت اجزای متعلق به پدیده‌ای از طریق رابطه ۴ مشخص شود.

$$N(\geq A) \propto A^{-D} \quad \text{(رابطه ۴)}$$

که در آن A مساحت اجزای پدیده و N تعداد تجمعی اجزا با مساحتی بیش‌تر از A می‌باشد. جهت تعیین توان D برای مجموعه داده $N(>A)$ و A ، ضریب شیب رگرسیون خطی می‌تواند استفاده شود (رابطه ۵).

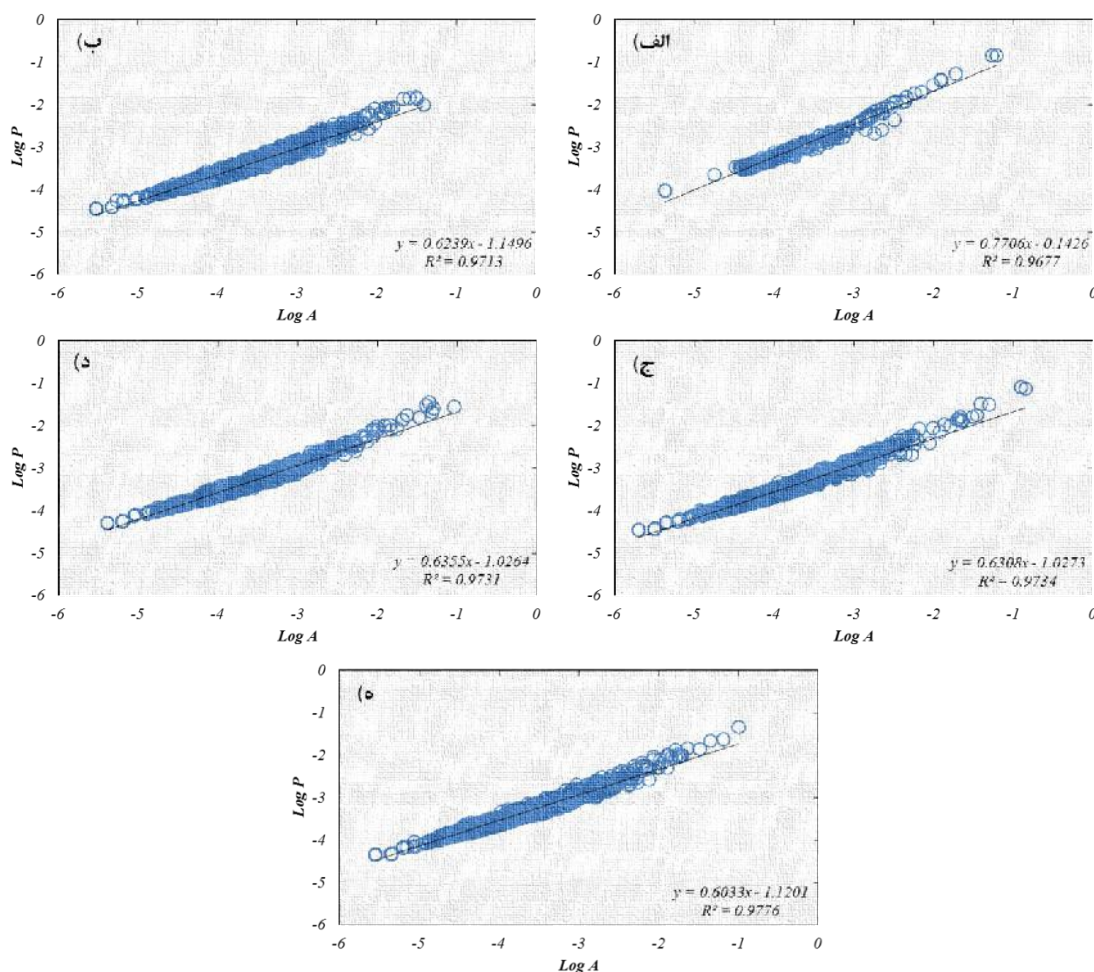
$$\log N(>A) = C - D \log A \quad \text{(رابطه ۵)}$$

ارزش توان، میزان تغییر تعداد اجزا و اندازه آن‌ها را تعیین می‌کند؛ D بزرگ‌تر اجزای کم با اندازه بزرگ یا اجزای بیش‌تر با اندازه کوچک را نشان می‌دهد. بهره‌گیری از مدل‌های فراکتالی ایجاد شده برای تفسیر نظم موجود در رفتار رودخانه ارس و لندفرم‌های ایجاد شده توسط این رودخانه، نیازمند تبدیل متغیر لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی به لایه رقمی است؛ این تبدیل بر مبنای ارزش پیکسل‌های هر لندفرم صورت می‌گیرد. در ادامه از طریق لایه ایجاد شده، با محاسبه محیط و مساحت هر لندفرم برای دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸ و بردن آن‌ها به مقیاس لگاریتمی امکان اجرای مدل‌های فراکتالی بالا فراهم شد.

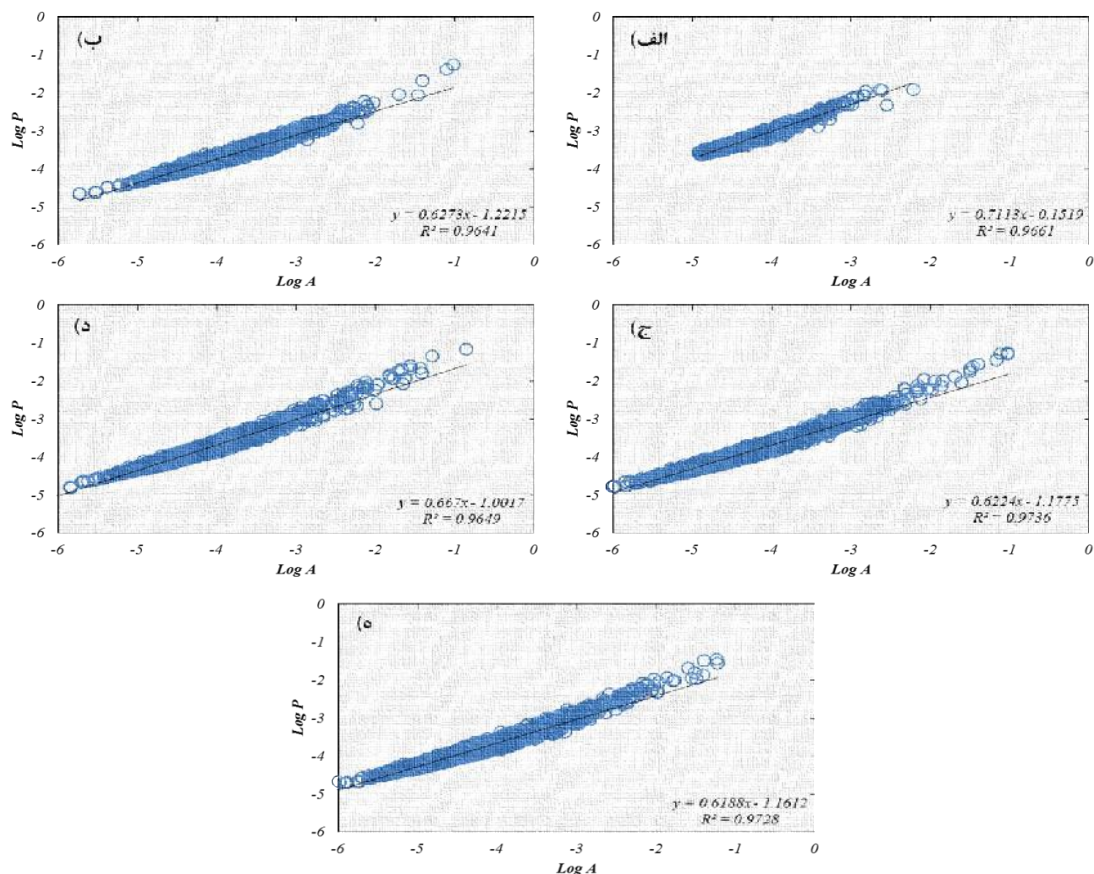
¹. Least Squares

یافته‌های پژوهش

با توجه به تغییرات لندفرم‌های ژئومورفولوژی به‌ویژه در محیط‌های فعال رودخانه‌ای، فهم الگوی این تغییرات در مقیاس زمانی چندین ده ساله و ارتباط آن با مدیریت منابع آب در حوضه‌های آبخیز، به‌ویژه حوضه‌های مرزی بین‌المللی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این پژوهش، با بکارگیری مدل‌های فراکتالی سعی در بررسی بی‌نظمی‌های ژئومتری لندفرم‌های محیط رودخانه ارس در بازه زمانی ۳۱ ساله شد. لندفرم‌های کانال، پوینت بار، دشت سیلابی، پادگانه رودخانه‌ای و مخروط افکنه در قلمرو جریانی رودخانه ارس برای دو سال ذکر شده استخراج و ابعاد ژئومتری آن‌ها مشخص شد. این ابعاد با مدل‌های کمی محیط - مساحت و تعداد تجمعی - مساحت به مقادیر فراکتالی D_{AP} و D_A تبدیل شده و الگوی تغییرات با زبان ریاضی فراکتالی بیان شد. توان D_{AP} محیط و مساحت لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس 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؛ به‌گونه‌ای که همه ضرایب همبستگی مربع (R^2) بالاتر از ۰/۹۶ هستند (شکل‌های ۵ و ۶). بنابر این همبستگی خطی مناسب میان لگاریتم مساحت و لگاریتم محیط لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی محیط رودخانه‌ای ارس در سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸، می‌توان ژئومتری این لندفرم‌ها را بر اساس هندسه فراکتالی تفسیر نمود.

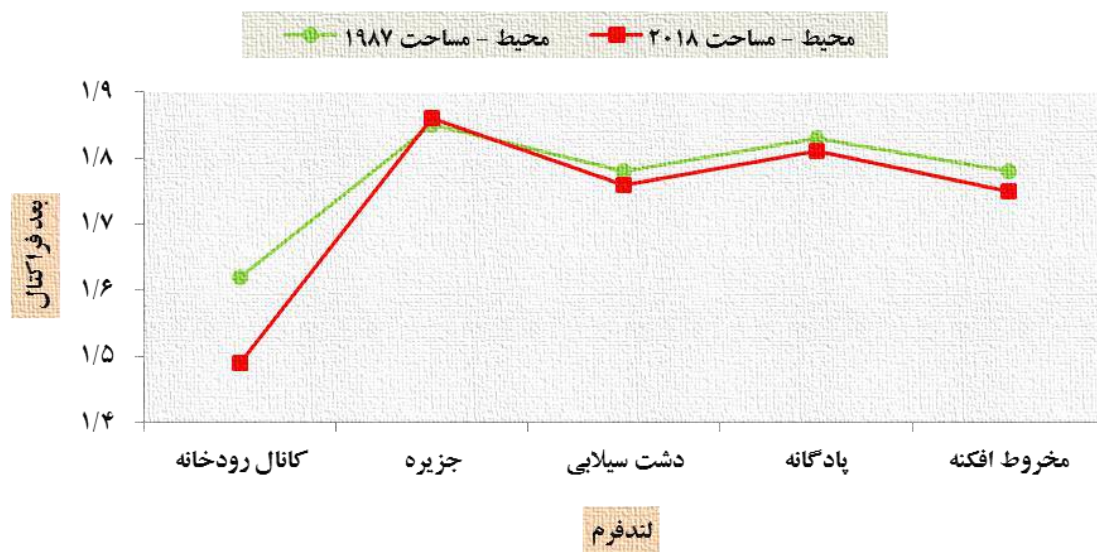


شکل ۵. نمودار لگاریتمی محیط - مساحت لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس در سال ۱۹۸۷؛ (الف) کانال رودخانه، (ب) پوینت بار کانال رودخانه، (ج) دشت سیلابی، (د) پادگانه رودخانه‌ای و (ه) مخروط افکنه



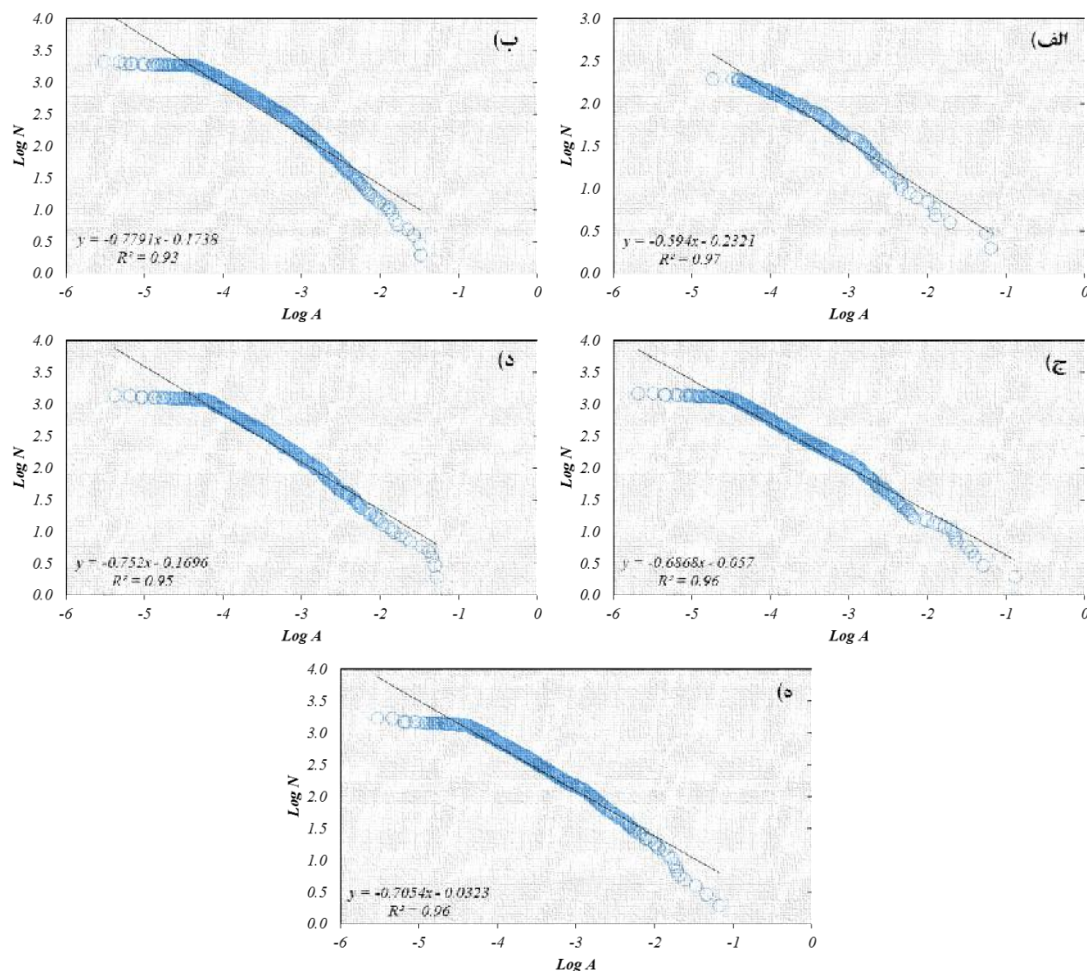
شکل ۶. نمودار لگاریتمی محیط - مساحت لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس در سال ۲۰۱۸؛ (الف) کانال رودخانه، (ب) پوینت بار کانال رودخانه، (ج) دشت سیلابی، (د) پادگانه رودخانه‌ای و (ه) مخروط افکنه

شکل ۷ تغییرات مقدار D_{AP} را برای لندفرم‌های مورد بررسی در محیط رودخانه ارس در دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. با توجه به شکل، مقدار این مشخصه فراکتالی برای لندفرم کانال رودخانه از $1/62$ در سال ۱۹۸۷ به $1/49$ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم پوینت بار کانال رودخانه از $1/84$ در سال ۱۹۸۷ به $1/86$ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم دشت سیلابی از $1/78$ در سال ۱۹۸۷ به $1/76$ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم پادگانه رودخانه‌ای از $1/83$ در سال ۱۹۸۷ به $1/81$ در سال ۲۰۱۸ و برای لندفرم مخروط افکنه از $1/78$ در سال ۱۹۸۷ به $1/75$ در سال ۲۰۱۸ تغییر پیدا کرده است. با توجه به این مقادیر، D_{AP} همه لندفرم‌های مورد بررسی (به غیر از پوینت بار) در سال ۲۰۱۸ کوچک‌تر از D_{AP} لندفرم‌ها در سال ۱۹۸۷ می‌باشد. بنابراین، الگوی ژئومتری لندفرم‌های رودخانه‌ای ارس در سال ۱۹۸۷ نامنظم‌تر و پیچیده‌تر از سال ۲۰۱۸ است. در مورد لندفرم پوینت بار، این مقدار در سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۱۹۸۷ افزایش پیدا کرده است که نشان از منظم‌تر شدن الگوی این لندفرم دارد.



شکل ۷. مقایسه ابعاد فراکتالی (DAP) لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس در سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸

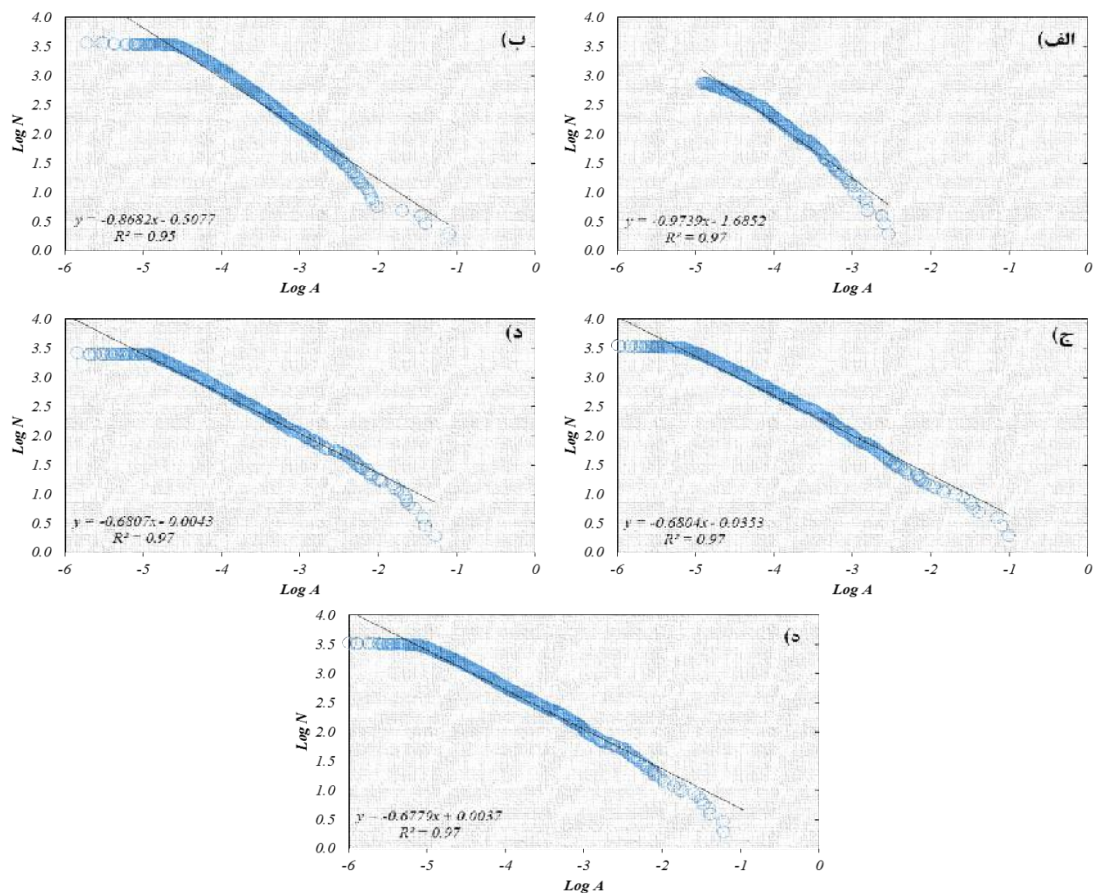
در ادامه از طریق مدل تعداد - مساحت نیز ابعاد فراکتالی لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی مورد بررسی در بستر رودخانه ارس بررسی گردید. توان D که میزان تغییر تعداد تجمعی پلیگون‌های لندفرم‌های استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای را منعکس می‌سازد، از طریق دیاگرام لگاریتمی برای هر کدام از لندفرم‌ها محاسبه شد که نمودار لگاریتمی آن برای سال ۱۹۸۷ در شکل ۸ و برای سال ۲۰۱۸ در شکل ۹ آورده شده است. نتایج نشان می‌دهد که ارتباط خطی بین لگاریتم‌های تعداد تجمعی و مساحت با ضرایب R^2 بالاتر از ۰/۹۲ برای هر دو سال وجود دارد. شکل ۱۰ تغییرات مقدار D را برای لندفرم‌های مورد بررسی در محیط رودخانه ارس در دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. با توجه به شکل، توان D (که از رابطه $\text{Log } N(>A) = C - D \log A$ بدست می‌آید) تعداد تجمعی - مساحت برای لندفرم کانال رودخانه از ۱/۸۳ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۱۹ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم پوینت بار از ۲/۵۴ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۶۶ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم دشت سیلابی از ۲/۴ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۶۵ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم پادگان از ۲/۳۸ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۵۸ در سال ۲۰۱۸ و برای مخروط افکنه از ۲/۴۵ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۹۹ در سال ۲۰۱۸ تغییر پیدا کرده است؛ این افزایش مقدار D می‌تواند یا بیانگر اجزای کم با اندازه بزرگ باشد و یا اجزای بیش‌تر با اندازه کوچک. با توجه به بررسی تصاویر ماهواره‌ای Landsat مورد استفاده در این پژوهش برای استخراج لندفرم‌های ژئومورفولوژی رودخانه‌ای در رود ارس طی سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸، رفتار پیکسلی لندفرم‌ها به‌گونه‌ای است که نشان از بزرگ‌تر شدن لندفرم‌های بررسی شده دارد. البته باید در مورد کانال رودخانه به این نکته اشاره نمود که با توجه به کاهش دبی و در نتیجه کاهش عرض کانال، می‌توان در مورد کاهش مساحت آن اظهار نظر نمود.



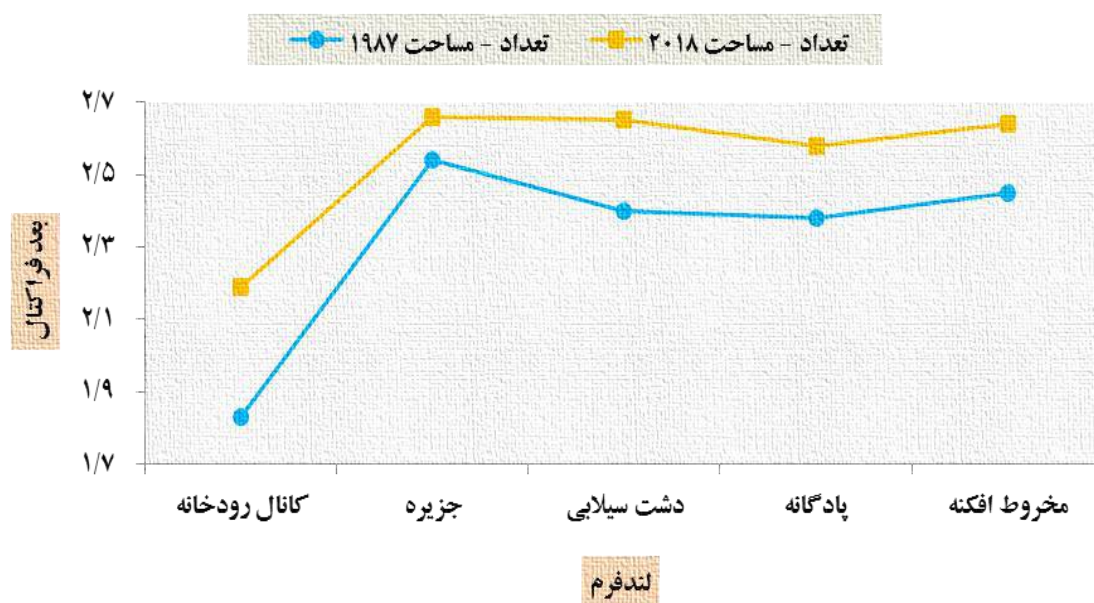
شکل ۸. نمودار لگاریتمی تعداد - مساحت لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس در سال ۱۹۸۷؛ (الف) کانال رودخانه، (ب) پوینت بار کانال رودخانه، (ج) دشت سیلابی، (د) پادگانه رودخانه‌ای و (ه) مخروط افکنه

بحث و نتیجه‌گیری

با بهره‌گیری از روش طبقه‌بندی نظارت شده و الگوریتم حداکثر احتمال، لایه لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی محیط رودخانه ارس برای دو دوره زمانی در چهار کلاس لندفرم کانال، پوینت بار، دشت سیلابی، پادگانه رودخانه‌ای و مخروط افکنه تهیه گردیدند. تغییرات مقدار DAP برای لندفرم‌های مورد بررسی در محیط رودخانه ارس در دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸ نشان داد که مقدار این مشخصه فراکتالی برای لندفرم کانال رودخانه از $1/62$ در سال ۱۹۸۷ به $1/49$ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم پوینت بار کانال رودخانه از $1/84$ در سال ۱۹۸۷ به $1/86$ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم پادگانه رودخانه‌ای از $1/83$ در سال ۱۹۸۷ به $1/81$ در سال ۲۰۱۸ و برای لندفرم مخروط افکنه از $1/78$ در سال ۱۹۸۷ به $1/75$ در سال ۲۰۱۸ تغییر پیدا کرده است. با توجه به این مقادیر، DAP همه لندفرم‌های مورد بررسی (به غیر از پوینت بار) در سال ۲۰۱۸ کوچک‌تر از DAP لندفرم‌ها در سال ۱۹۸۷ می‌باشد. بنابراین، الگوی ژئومتری لندفرم‌های رودخانه‌ای ارس در سال ۱۹۸۷ نامنظم‌تر و پیچیده‌تر از سال ۲۰۱۸ است. در مورد لندفرم پوینت بار، این مقدار در سال ۲۰۱۸ نسبت به سال ۱۹۸۷ افزایش پیدا کرده است که نشان از منظم‌تر شدن الگوی این لندفرم دارد.



شکل ۹. نمودار لگاریتمی تعداد - مساحت لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس در سال ۲۰۱۸؛ (الف) کانال رودخانه، (ب) پوینت بار کانال رودخانه، (ج) دشت سیلابی، (د) پادگانه رودخانه‌ای و (ه) مخروط افکنه



شکل ۱۰. مقایسه ابعاد فراکتالی (D) لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی رودخانه ارس در سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸

تغییرات مقدار D را برای لندفرم‌های مورد بررسی در محیط رودخانه ارس در دو سال ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸ نشان داد که توان D تعداد «تجمعی - مساحت» برای لندفرم کانال رودخانه از ۱/۸۳ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۱۹ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم پوینت بار از ۲/۵۴ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۶۶ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم دشت سیلابی از ۲/۴ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۶۵ در سال ۲۰۱۸، برای لندفرم پادگانه از ۲/۳۸ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۵۸ در سال ۲۰۱۸ و برای مخروط افکنه از ۲/۴۵ در سال ۱۹۸۷ به ۲/۹۹ در سال ۲۰۱۸ تغییر پیدا کرده است، این افزایش مقدار D می‌تواند یا بیانگر اجزای کم با اندازه بزرگ باشد و یا اجزای بیشتر با اندازه کوچک. با توجه به بررسی تصاویر ماهواره‌ای Landsat مورد استفاده در این پژوهش برای استخراج لندفرم‌های ژئومورفولوژی رودخانه‌ای در رود ارس طی سال‌های ۱۹۸۷ و ۲۰۱۸، رفتار پیکسلی لندفرم‌ها به‌گونه‌ای است که نشان از بزرگ‌تر شدن لندفرم‌های بررسی شده دارد. البته باید در مورد کانال رودخانه به این نکته اشاره نمود که با توجه به کاهش دبی و در نتیجه کاهش عرض کانال، می‌توان در مورد کاهش مساحت آن اظهار نظر نمود.

این الگوهای فراکتالی به‌دست آمده می‌تواند در پیش‌بینی رفتار رودخانه و به تبع آن تغییرات لندفرم‌های رودخانه‌ای به‌منظور مدیریت منابع آب در سطح حوضه آبخیز رود ارس مؤثر باشد. با توجه به مقادیر کمی به‌دست آمده از پیاده‌سازی مدل‌های فراکتالی «محیط - مساحت» و تعداد تجمعی - مساحت، می‌توان گفت که لندفرم‌های ژئومورفولوژیکی مسیر رودخانه ارس طی سال‌های ۱۹۸۷ تا ۲۰۱۸ به سمت الگویی نامنظم‌تر حرکت کرده و از نظر بعد مساحتی در حال بزرگ‌تر شدن هستند. بر اساس نتایج مدل فراکتالی پیاده شده در مورد لندفرم‌های رودخانه ارس طی ۳۱ سال اخیر، روند و الگوی تغییرات به سمت نامنظم‌تر شدن آنها است. با توجه به نتایج بدست آمده از بررسی تغییرات مورفولوژی بستر رودخانه‌های ارس هم تحت تأثیر تنوع ژئومورفولوژیکی خود و سایر عوامل و متغیرهای متنوع، پیوسته از نظر ابعاد، شکل، راستا و الگو در حال تغییر و تحول اند شرایط مورفولوژیکی رود ارس و مداخلات انسانی سبب شده که بیشترین فرسایش و تغییرات آن به سمت ایران بوده و میزان تغییرات نیز از بالادست به سمت پایین (ایران) رو به افزایش باشد. و دره این رود دارای تغییرات متعددی در طول زمان بوده که عدم انطباق خطوط مرزی و بستر رودخانه ارس را موجب گردیده است.

منابع

- بهرامی دراسله، ر. (۱۳۸۰). ناحیه‌بندی بافت تصویر با استفاده از فراکتال‌ها. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، بخش مهندسی دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۵۳ ص.
- فاطمی، ب.، و رضایی، ی. (۱۳۸۵). مبانی سنجش از دور. چاپ دوم، انتشارات آزاده، ۲۵۰ ص.
- قهرودی تالی، م.، و خدیری غریبوند، ل. (۱۳۹۲). بررسی آشفتگی در میکرو لندفرم‌های تالاب گاوخونی. مجله پژوهشی زمین پویا، ۲: ۴۴-۵۱.
- قهرودی تالی، م.، و درفشی، خ. (۱۳۹۴). بررسی آشفتگی در الگوی خطر سیلاب در تهران. تحلیل فضایی مخاطرات محیطی، ۲(۲): ۱-۱۶.
- قهرودی تالی، م.، و علی‌نوری، خ. (۱۳۹۴). ردیابی مخاطرات پلاهای حوض سلطان با بررسی آشفتگی در میکرو لندفرم‌ها. دانش مخاطرات، ۱(۲): ۲۴۱-۲۵۲.
- کرم، ا. (۱۳۸۹). نظریه آشوب (برخال) و سیستم‌های غیر خطی در ژئومورفولوژی. فصل‌نامه جغرافیای طبیعی، ۸: ۶۷-۸۲.
- 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
- Bodily, J. (2002). Protocol Development at the Golden Spike National Histories Site for Soil Survey Updates. *Applied Remote Sensing*, 27(12): 478-499.
- Cheng, Q. (1995). The perimeter-area fractal model and its application to geology. *Mathematical Geology*, 27 (1): 69-82.

- Cheng, Q., Russell, D., Sharpe, F., Kenny, and P. Qin. (2001). GIS-based statistical and fractal / multifractal analysis of surface stream patterns in the Oak Ridge's Moraine. *Computer Geoscience*, 27(5):513-526.
- Di Martino, G., Poggi, G., Riccio, D., and Verdoliva, L. (2013). Effects of Despeckling on the Estimation of Fractal Dimension from SAR Images. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Melbourne, Australia*, 21-26: 3950-3953.
- Liu, D., Mausel, P., Brondizio, E., and Moran, E. (2004). Change Detection Techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12): 2365-2401.
- National Report of Islamic Republic of Iran. (2006). *Trans boundary Diagnostic Analysis Aras River Basin*. 8. Rangzan, K. M., Toolae Nezhad, M., and Piraste, S. (2002). Study the effects of rivers migration on civil structure in Khuzestan plain using satellite data. *Proc. Of 6th International Conference of river engineering in Ahvaz*, 169-181.
- Phillips, J. D. (2002). Interpreting the fractal dimension of river networks, In: LAM, N. S. N., DECOLA, L. (eds.): *Fractals in Geography*. PTR Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 142-157.
- Sivakumar, B. (2000). Fractal analysis of rainfall observed in two different climatic regions. *Hydrological Sciences Journal*, 45(5): 727-738.
- Suriya, S., and Mudgal, B.V. (2012). Impact of urbanization on flooding: The Thirusoolam sub watershed-A case study. *Journal of Hydrology*, 412-413: 210-219.
- Wang, J. P. M., Rich, K. P., Price and Kittle, W. D. (2004). Relations between NDVI and Tree Productivity in the Central Great Plains. *International Journal of Remote Sensing*, 25(16): 3127-3138.