

## جداسازی محیط‌های بیابانی بر پایه آستانه‌های اکوزئومورفیک

زهرا عبدالله‌زاده<sup>۱</sup>، عادل سپهر<sup>۲\*</sup>، علیرضا راشکی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مدیریت مناطق بیابانی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۲/۱۵

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۴/۳/۱۴

### چکیده

تفکیک محیط‌های بیابانی از غیربیابانی اغلب به دلیل تنوع بالای الگوهای پوشش گیاهی، خاک و سنگ در مجاورت یکدیگر دشوار است. مطالعه روند تغییرات اکولوژیک و ژئومورفولوژیک یک منطقه می‌تواند در تعیین آستانه‌های اکوزئومورفیک به منظور تفکیک محیط‌های بیابانی از غیربیابانی بر پایه پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و پتانسیل‌های فرسایش‌پذیری ملاک عمل قرار گیرد. به طوری که بر اساس نسبت پتانسیل‌های فوق میزان تاب‌آوری و ارتجاعیت اکولوژیک اکوسیستم دچار تغییر می‌شود. هدف از این پژوهش جداسازی محیط‌های بیابانی در بخشی از استان خراسان رضوی بر پایه مرزهای اکوزئومورفیک می‌باشد. لذا در این پژوهش، با استفاده از چهار نقشه لیتولوژی، پوشش گیاهی، رده‌بندی خاک و نقشه هم‌بارش، تغییرات نسبت پتانسیل‌های فرسایش-پذیری و برگشت‌پذیری مورد مطالعه قرار گرفته است. در ابتدا با انتخاب منطقه‌ای محدود در سطح استان که از لحاظ گرادیان اقلیمی و ارتفاعی بیانگر شیب تغییرات باشد، چهار نقشه فوق تفکیک گردید. از داده‌های رقومی TM/ETM و نقشه‌های زمین‌شناسی و خاک در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰۰ در تولید نقشه‌های مذکور استفاده شده است. به منظور ارزیابی صحیح‌تر این جداسازی، پیاده‌سازی یک طبقه‌بندی نظارت نشده بر روی تصویر سنجنده MODIS از منطقه مطالعاتی، به خوبی روند تغییرات عوامل اکوزئومورفیک را همگام با تغییرات چهار نقشه فوق نشان می‌دهد. بررسی تغییرات اکولوژیک و ژئومورفولوژیک همگی در یک راستا روند تغییر نسبت پتانسیل‌های فرسایشی و برگشت‌پذیری را در منطقه مطالعاتی تأیید کردند. نتایج پژوهش مشخص‌کننده دو آستانه یا گذر اکوزئومورفیک در منطقه مورد بررسی می‌باشد، گذر اکوزئومورفیک از منطقه غیربیابانی به نیمه‌بیابانی و گذر اکوزئومورفیک نیمه‌بیابانی به محیط بیابانی تفکیک شدند.

**واژه‌های کلیدی:** محیط‌های بیابانی، فرسایش‌پذیری، برگشت‌پذیری، آستانه‌های اکوزئومورفیک.

## مقدمه

آستانه‌های بیابان، مرزهای باریکی از ناپایداری در حدفاصل مناطق خشک و نیمه خشک به شمار می‌روند (شوشانی، ۲۰۱۲). این ناپایداری‌ها که بازخورد پاسخ‌های غیرخطی سیستم‌های اکوزئومورفیک به نیروهای محرک محیطی می‌باشند را می‌توان تابعی از میزان ارتجاع‌پذیری اکوسیستم در قبال تنش‌های ورودی به آن در نظر گرفت. اغلب به دلیل تنوع بالای الگوهای پوشش زمینی نظیر پوشش گیاهی، خاک و سنگ، شناسایی و تفکیک این مناطق از یکدیگر بسیار دشوار است و به سختی می‌توان چنین تشخیص داد که در وضعیت فعلی یک اکوسیستم، کدام منطقه در وضعیت بیابانی، غیر بیابانی یا عبور از وضعیتی به وضعیت دیگر است که تحت عنوان مناطق گذار یا مناطق آستانه بیابان شناسایی می‌شوند. بنابراین مناطق باریک آستانه، به عنوان مناطق گذار یا انتقال از یک منطقه غیر بیابانی به یک منطقه بیابانی یا بالعکس توصیف شده که معمولاً ناپایداری‌های اکوزئومورفیک قابل توجهی را شامل می‌شوند (هولینگ، ۱۹۷۳؛ شفر و همکاران، ۲۰۰۱). این مناطق به دلیل آشفتگی‌ها و ناعادلی‌های دینامیکی بر اساس مدل‌های دینامیک غیرخطی کیرکبی (۱۹۹۵) و تورنس (۱۹۸۵) که نشان‌دهنده روند بی‌ثبات و ناپایدار در رابطه بین پوشش گیاهی و فرسایش خاک در مناطق گذر یا مناطق آستانه در بیابان می‌باشند، می‌تواند حدفاصل بین دو وضعیت بیابان و غیر بیابان تعریف شوند که کوچکترین اختلال و آشفتگی داخلی یا خارجی می‌تواند اکوسیستم را به وضعیت حداکثر فرسایش و تخریب با حداقل پوشش گیاهی (بیابان)، سرازیر کند. اگر ارتجاع‌پذیری فراتر از نیروهای مختل‌کننده وارده باشد، سیستم توان برگشت به وضعیت حداکثر تراکم پوشش گیاهی با کم‌ترین آثار فرسایشی (منطقه غیر بیابانی) را

خواهد داشت (فیلیپس، ۲۰۰۳). این پیش‌بینی‌ها در سال‌های اخیر در مطالعات میدانی آبراهامز و همکاران (۱۹۹۵) و پویگدفابرگاس و سانچز (۱۹۹۶) تأیید و اثبات شده‌اند. ناپایداری در مناطق گذر اکوسیستم‌ها، در درون خود تعامل دو پتانسیل برگشت‌پذیری یا احیا و فرسایش‌پذیری یا تخریب اکوسیستم را در بردارد. هر چه توان برگشت‌پذیری یک اکوسیستم بعد از اختلال و آشوب وارد شده به شرایط طبیعی اولیه بیشتر باشد، می‌توان ارتجاع-پذیری بیشتری را در بازیابی شرایط نرمال برای سیستم قائل شد. همچنین با غلبه پتانسیل‌های فرسایش‌پذیری، میزان ارتجاع‌پذیری سیستم تا حد زیادی در برابر تنش‌های محیطی کاسته شده و اکوسیستم غیربیابانی در گذار از یک آستانه بحرانی به فرم یک منطقه بیابانی در خواهد آمد. در تعریف این مفاهیم می‌توان چنین بیان کرد که پتانسیل برگشت‌پذیری متأثر از عوامل اکوزئومورفیک منطقه، بیانگر توان محیط در بازیابی شرایط اولیه بعد از برطرف شدن اختلالات وارد شده می‌باشد، در حالیکه پتانسیل فرسایشی در جهت معکوس با روند برگشت اکوسیستم به شرایط اولیه، توان تخریب محیط را در نتیجه وجود عوامل مخرب فرسایشی بیان می‌کند، آنچه می‌تواند تحت تأثیر میزان پوشش گیاهی و یا ویژگی‌های ذاتی مثل لیتولوژی، خاک و اقلیم درجات متفاوتی از حساسیت‌پذیری به فرسایش و تخریب را در اکوسیستم بروز دهد. کاربرد چنین دیدگاهی را می‌توان در مطالعات شوشانی (۲۰۱۲) در فلسطین اشغالی مشاهده کرد که بر پایه توان برگشت‌پذیری و فرسایش‌پذیری در الگوهای پوشش لکه‌ای، اقدام به شناسایی و تفکیک آستانه‌های اکوزئومورفیک بیابانی در طول یک گرادیان اقلیمی نموده است. همچنین وی در مطالعات خود اثبات کرد که شناسایی و تعیین دقیق مناطق گذر اکوسیستمی

می‌کنند که پتانسیل برگشت‌پذیری حتی در سطوح بسیار پایین، تا حد زیادی می‌تواند در انعطاف‌پذیری سیستم مؤثر بوده و گذار سیستم از آستانه‌های بحرانی را به تعویق بیندازد. لذا بر طبق مطالعات فوق می‌توان پوشش گیاهی را مؤثرترین عامل در ارتجاع‌پذیری یک اکوسیستم در نظر گرفت. تأثیر پوشش گیاهی به عنوان یک عامل اکولوژیک، با افزایش عمق دامنه ارتجاع‌پذیری اکوسیستم می‌تواند تاب‌آوری محیط را در برابر اختلالات محیطی افزایش دهد و زمان برگشت‌پذیری محیط به شرایط اولیه را کوتاه‌تر نماید. لذا کاهش در میزان پوشش گیاهی و یا تغییر در نوع پوشش منطقه می‌تواند ملاک تحلیل توان و زمان برگشت‌پذیری محیط در قبال تنش‌های ورودی قلمداد شود. میزان تاب‌آوری اکوسیستم‌ها و توان برگشت‌پذیری آن‌ها بعد از بروز اختلال در سیستم، می‌تواند از طرفی به عنوان شاخصی جهت جداسازی مناطق بیابانی از غیر بیابانی در نظر گرفته شود و از طرف دیگر، به عنوان یک شاخص هشداردهنده در ارتباط با نزدیکی این مناطق به یک آستانه بحرانی و برگشت‌ناپذیر مورد بررسی قرار گیرد. از سویی دیگر، در مطالعات سودینگ و هویز (۲۰۰۹)، ارتجاع‌پذیری می‌تواند به عنوان عاملی در دینامیک رفتاری از سوی اکوسیستم معرفی می‌شود و حتی تغییر ارتجاع-پذیری سیستم در طول زمان ممکن است دینامیک‌های گوناگونی از اکوسیستم‌ها را در گام-های زمانی متفاوت به ارمغان داشته باشد. در سال-های اخیر، اهمیت مطالعه اکوسیستم‌ها از نقطه نظر میزان ارتجاع‌پذیری و پتانسیل فرسایش‌پذیری آن-ها از جنبه‌های مختلف بررسی شده است. در این پژوهش دیدگاه تفکیک‌پذیری اکوسیستم‌های بیابانی از غیربیابانی بر اساس توان برگشت‌پذیری و میزان تاب‌آوری یا ارتجاعیت آن‌ها مورد بحث و تحلیل قرار گرفته و نشان داده شده است که چطور

یا آستانه‌های اکوزئومورفیک می‌تواند به درستی با تغییرات موجود بر روی نقشه‌های پراکنش اکولوژیکی گونه‌های گیاهی، نقشه لیتولوژی، خاک و نقشه نوسانات بارش آن منطقه مطابقت داشته باشد. از جنبه‌های دیگر، می‌توان افت پتانسیل برگشت‌پذیری را که تابعی از ارتجاع‌پذیری اکوسیستمی است، به عنوان شاخصی در جهت نزدیکی یک اکوسیستم به حد وقوع آستانه‌های بحرانی جهت ورود به وضعیت جدید در نظر گرفت. داکوس و همکاران (۲۰۱۴)، میزان افت ناگهانی در سرعت برگشت‌پذیری را در محدوده‌هایی از اکوسیستم به عنوان شاخصی در نظر می‌گیرند که به عنوان یک علامت هشدار دهنده، از نزدیکی یک سیستم به نقاط سرازیری یا تغییر وضعیت خبر می‌دهد. این افت سرعت برگشت‌پذیری اغلب با افزایش واریانس و خودهمبستگی در سیستم همراه است. سپهر و همکاران (۲۰۱۴) نیز با فرض وابستگی دامنه ارتجاع‌پذیری اکوسیستم‌ها به ویژگی‌های ذاتی نظیر فرسایش‌پذیری خاک، فرسایش‌دهندگی باران، شیب و پوشش زمینی به محاسبه دامنه ارتجاع‌پذیری در اکوسیستم‌های شکننده استان خراسان رضوی پرداختند و در نهایت اثبات کردند که بیش از ۴۴٪ سطح استان را اکوسیستم‌هایی با حساسیت‌پذیری بالا به بیابان‌زایی تشکیل می‌دهند. همچنین مطالعات آن‌ها نشان داد که پوشش گیاهی مهم‌ترین عامل در افزایش پتانسیل برگشت-پذیری اکوسیستم‌ها در برابر تنش‌های محیطی می‌باشد. بستلمیر و همکاران (۲۰۱۳)، توان برگشت‌پذیری را در اکوسیستم‌های مستعد بیابان-زایی در یکی از بیابان‌های چین، شاخصی در جهت میزان انعطاف‌پذیری اکوسیستم در گذار از آستانه-های بحرانی قلمداد می‌کنند و با اندازه‌گیری معیار-هایی نظیر میزان پوشش گیاهان علفی و اندازه لکه-های پوشش گیاهی و خاک بایر، چنین نتیجه‌گیری

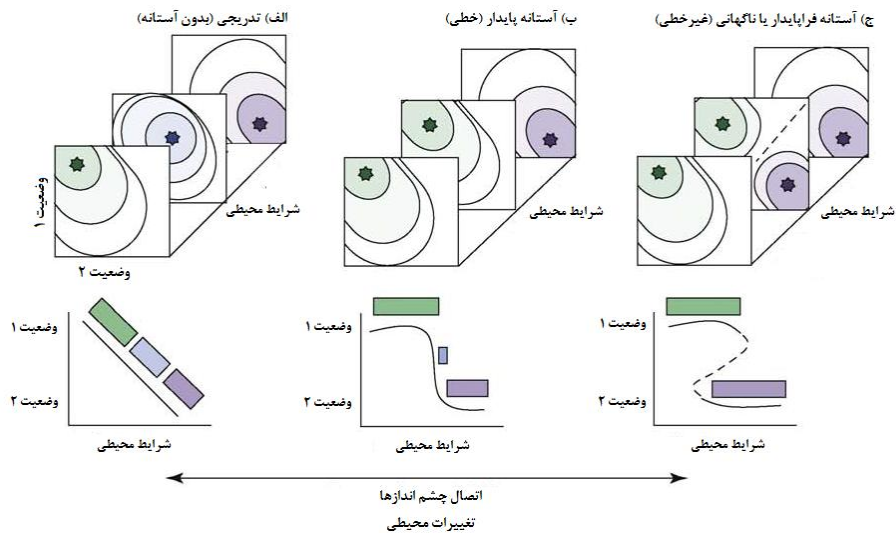
یک تغییر ناگهانی و اغلب غیرقابل انتظار به بار خواهد آورد. از آن پس می‌توان گفت سیستم وارد یک وضعیت جدید شده است. به عنوان مثال گذار یک اکوسیستم از وضعیت غیر بیابانی به فرم یک محیط کاملاً بیابانی. از دیدگاه اکولوژیک، آستانه‌ها زمانی اتفاق می‌افتند که یک اثر ماشه‌ای (اختلال یا آشفتگی موقت و زودگذر با تأثیرات طولانی مدت)، کشش بازخوردهای منفی را از یک منطقه جذب به حوزه جذب دیگر تغییر دهند (شکل ۱ ب و ج). این اختلالات در سیستم‌های اکوزئومورفیک اغلب آشفتگی‌های بلند مدت غیرزیستی هستند که خصوصیات مکانی را تغییر داده و یا تعدیل می‌کنند، مانند آستانه‌های شکست شیب که حجم زیادی از مواد به پایین دامنه منتقل می‌شوند و توده فرو ریخته هرگز به روی دامنه باز نخواهند گشت (فیلیپس، ۲۰۱۳). همچنین اختلالات کوتاه مدت - تری هستند که تغییرات درون ساختارهای زیستی داخل جوامع را باعث می‌شوند و توان برگشت‌پذیری هنوز قادر به بازگشت سیستم به شرایط اولیه را دارا می‌باشد، مانند تغییر نوع پوشش گیاهی در مراتع از فرم علفی‌های چندساله به یکساله و حالت عکس آن در شرایط برگشت‌پذیری و احیا اکوسیستم (بریسک و همکاران، ۲۰۰۶). فعل و انفعالات پیچیده اغلب در شکل بازخوردهای مثبت، می‌تواند با تشدید و تقویت اثر تغییرات کوچک، وضعیت سیستم را به سرعت دچار تغییر کرده و به حد گذر از یک آستانه بحرانی نزدیک نمایند. قبل از عبور از یک وضعیت آستانه، متغیرهای کلیدی یا اصلی سیستم، با نمایش افزایش تغییرپذیری و بروز الگو-های جدید (که از نظر آماری با افزایش انحراف معیار اثبات می‌شوند) و افت شدید در سرعت برگشت‌پذیری و در نتیجه کاهش توان ارتجاع-پذیری سیستم، حتی بعد از برطرف شدن آشوب قابل پیش‌بینی می‌باشند (ونس و شفر، ۲۰۰۷).

بر پایه چیرگی نسبت پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و فرسایش‌پذیری در مناطق گذر بیابانی می‌توان به شناسایی و تفکیک اکوسیستم‌های بیابانی از غیر بیابانی پرداخت.

**دیدگاه خطی و غیر خطی در دینامیک اکوسیستم-**  
 ها: در مطالعه دینامیک اکوسیستم‌ها، دو دیدگاه متفاوت و پارادایم فکری مبنای مطالعه بوده است. رویکرد خطی و پیوسته و دیگری رویکرد غیرخطی در تحلیل دینامیک اکوسیستم‌ها. از دیدگاه مدل-های دینامیکی خطی و پیوسته، تغییر در محیط، منجر به تغییرات تدریجی هماهنگ، متناسب و مورد انتظار در شکل‌گیری لندفرم‌ها یا ترکیبات گونه‌ای می‌شود. همچنین افزایش یا کاهش در میزان محرک‌های محیطی در طول زمان، منجر به ایجاد مسیرهای پاسخ مشابه صعودی و یا نزولی در سیستم می‌گردد. در این نوع دینامیک رفتاری، مسیر ایجاد تغییر و مسیر پاسخ سیستم به محرک-ها، مسیری دوطرفه و یکسان خواهد بود. چنین تفکری را می‌توان در مطالعات ژئومورفولوژیست تفکر تدریجی، دیویس و اصل فرسایش تدریجی وی در قالب چرخه فرسایش جستجو کرد. در چنین سیستم‌هایی، امکان بازگشت و توان برگشت‌پذیری سیستم در بازیابی شرایط اولیه در مناطق گذر اکوسیستمی بالاست (شکل ۱ الف). اما در تفکر غیرخطی، تغییرات در شرایط محیطی تا حدی که فراتر از دامنه ارتجاع‌پذیری سیستم نرود، منجر به تغییرات کوچک در عملکرد سیستم و یا ترکیب گونه‌ها می‌شود. این اصل را می‌توان در ساختار فکری ژئومورفولوژیست‌هایی همچون گیلبرت و اندیشه‌های کاتاستروفیک چوم و لیچی یافت. ادامه این تغییرات کوچک، کم‌کم با کاهش توان ارتجاع-پذیری سیستم در قبال اختلالات محیطی، وضعیت سیستم را به نزدیکی یک آستانه بحرانی رسانده و از آن پس غلبه این نیروها بر ارتجاع‌پذیری سیستم،

ممکن است چندین حوزه جذب یا منطقه گذر در داخل یک وضعیت وجود داشته باشد. در این حالت الگوهایی از هر دو وضعیت قبلی و بعدی سیستم در منطقه مشاهده می‌شود. به‌عنوان مثال، در مناطق گذر بیابانی که حفاصل بین اکوسیستم‌های غیر بیابانی و بیابانی قرار دارند، می‌توان حضور هر دو نوع حالت پوششی را مشاهده کرد. مثلاً لکه‌های پوشش گیاهی که توسط محیطی بایر و بدون پوشش احاطه شده‌اند و یا در سیستم‌های ژئومورفیک، مناطق حمل رسوب در حد واسط مناطق برداشت و مناطق ترسیب، شامل هر دو الگوهای فرسایشی و انباشت می‌باشند (مانند شکل-گیری ریپل‌مارک‌ها در مناطق حمل). در چنین سیستم‌هایی با وقوع آستانه‌های ناگهانی، در صورت غلبه پتانسیل‌های برگشت‌پذیری، مسیر بازگشت سیستم می‌تواند کاملاً متفاوت از مسیر تغییر وضعیت آن باشد.

چنین کاهشی در ارتجاع پذیری می‌تواند با کوچک شدن یا کم‌عمق شدن حوضه جذب پیرامون وضعیت تعادل اکوسیستم استنباط شود (داکوس، ۲۰۱۱). بررسی ارتباط بین مفاهیم حوزه جذب، ارتجاع پذیری و دینامیک الگوها را می‌توان در پژوهش‌های سپهر (۱۳۹۳a، ۱۳۹۳b) و محسنی و سپهر (۱۳۹۴) جستجو کرد. در دینامیک آستانه-های پایدار خطی (شکل ۱ ب)، مسیر پاسخ که اغلب به‌صورت مشابه با جهت مسیر تغییرات محیطی اتفاق می‌افتد، می‌تواند با غلبه پتانسیل برگشت-پذیری، اکوسیستم را به وضعیت اولیه قبل از وقوع آستانه بازگرداند. در دینامیک آستانه‌های فراپایدار ناگهانی (شکل ۱ ج)، مسیر برگشت‌پذیری در سیستم می‌تواند بسیار متفاوت از مسیر تخریب و تنزیل اکوسیستمی باشد (سودینگ و همکاران، ۲۰۰۴). در چنین مواردی، سیستم حداقل یکبار از حد آستانه‌های بحرانی عبور می‌کند و تغییر حاصله پایدار و دائمی خواهد بود. در چنین آستانه‌هایی،



شکل ۱: انواع دینامیک‌های اکوسیستم. (الف) تغییرات تدریجی (بدون آستانه)، (ب) آستانه‌های پایدار (خطی) با مسیر تغییر و برگشت‌پذیری یکسان و (ج) آستانه‌های فراپایدار یا ناگهانی (غیرخطی) که به دلیل وقوع آستانه‌های بحرانی منجر به تأخیر در برگشت‌پذیری اکوسیستم به شرایط اولیه می‌شود. اشکال بیضوی شکل بیانگر شدت اختلال و آشوب و یا معرف درجه ارتجاع‌پذیری و ستاره‌های درون آن‌ها نشان‌دهنده مناطق گذر یا مناطق جذب هستند (سودینگ و هوبز، ۲۰۰۹).

تغییر رژیم سیستم‌ها و وقوع آستانه اثبات کرد. از طرفی وجود نقاط انشعاب پیش‌بینی روند تحولات در اکوسیستم‌ها را دشوار می‌سازد (کانورسی و همکاران، ۲۰۱۴). فعالیت‌های انسانی و همچنین عوامل تأثیرگذار محیطی می‌توانند فراوانی وقوع آستانه‌ها را تحت تأثیر ارتجاع‌پذیری سیستم‌ها دگرگون کنند که این به نوبه خود می‌تواند دینامیک رفتاری سیستم‌ها را از نوع تدریجی به وضعیت وقوع آستانه‌های خطی پایدار و یا به وضعیت وقوع آستانه‌های ناگهانی تغییر دهد.

منطقه‌ای در جنوب استان خراسان رضوی واقع در بلوک‌های زمین‌شناسی سبزوار و لوت انتخاب شد. گزینش این منطقه به دلیل گرادیان نسبی موجود در وضعیت اقلیمی منطقه مطالعاتی بوده است، بطوریکه می‌توان شیب تغییرات را از سمت یک منطقه بیابانی (با میانگین بارش سالیانه در حدود ۱۲۵ میلی‌متر) در جهت افزایش عرض جغرافیایی تا رسیدن به یک منطقه نیمه‌بیابانی (بارش ۲۵۰-۱۵۰ میلی‌متری) مشاهده نمود (شکل ۲). همچنین گرادیان ارتفاعی منطقه نیز به عنوان عاملی تأثیرگذار در تغییرات اکوژئومورفیک، ملاک انتخاب منطقه مورد مطالعه قرار گرفته است. در واقع انتظار می‌رود عامل ارتفاع جدا از تأثیر خود در تغییرات بارش منطقه، در نوع و میزان پوشش گیاهی تأثیرگذار باشد (شکل ۳). در ابتدا بر پایه عوامل اکولوژی و ژئومورفولوژی موثر در ایجاد چشم‌اندازهای طبیعی، چهار عامل ویژگی سازند و سنگ، نوع خاک، وضعیت پوششی زمین و میزان بارش انتخاب شدند. به گونه‌ای که فرض بر این بود که هم ارز با تغییرات این عوامل، دینامیک محیط‌های اکولوژیک را در منطقه شاهد خواهیم بود. لذا با کمک نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ سازمان زمین‌شناسی شمال شرق کشور مربوط به سال

وجه تمایز دیگر آستانه‌های ناگهانی، وجود نقاط انشعاب یا سرازیری است که منجر به تغییرات ناگهانی در سیستم می‌شود و می‌توان آن را نقطه وقوع آستانه و تغییر کلی وضعیت سیستم تعبیر کرد. هرچند هنوز اختلاف نظرهایی درباره اینکه آیا نقاط سرازیری یا انشعاب منجر به تغییرات برگشت-ناپذیر می‌شوند یا خیر وجود دارد. بنابراین هر نقطه انشعابی در سیستم می‌تواند یک آستانه تلقی گردد، اما هر آستانه‌ای نقطه انشعاب یا سرازیری محسوب نمی‌شود (فیلیپس، ۲۰۱۳). مثلاً در آستانه‌های پایدار خطی نمی‌توان حضور نقاط سرازیری را در

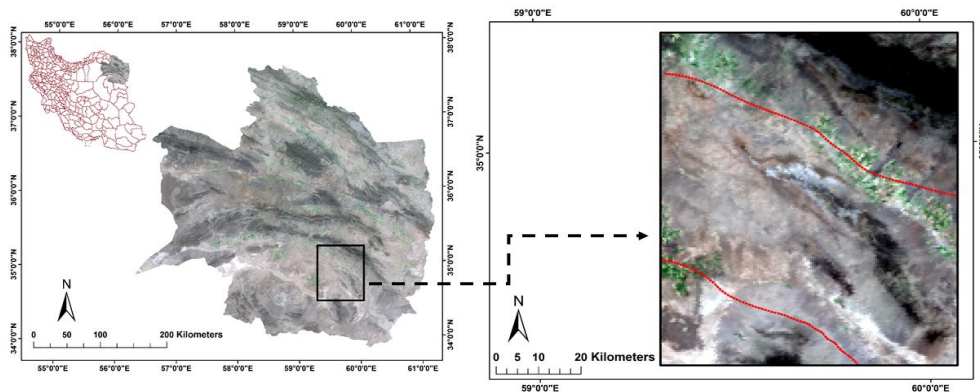
### مواد و روش‌ها

**موقعیت منطقه مطالعاتی:** استان خراسان رضوی با مساحتی در حدود ۱۲۸,۴۳۰ کیلومتر مربع، در برگیرنده وسعت زیادی از مناطق خشک و نیمه-خشک با میانگین بارشی در حدود ۲۱۰ میلی‌متر می‌باشد. ۶۰٪ مساحت استان را مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی در بر گرفته است. از نظر رده‌بندی خاک، بیش‌تر استان شامل خاک‌های اریدی‌سول، لیتوسل و ریگوسل می‌باشد. همچنین به‌لحاظ گرادیان اقلیمی و ارتفاعی نیز هرچه از شمال استان به سمت جنوب پیش می‌رویم، همگام با کاهش ارتفاع از میزان بارش نیز کاسته می‌شود و در عوض فرآیندهای فرسایشی غالب، چهره منطقه را به سیمای یک اکوسیستم بیابانی تغییر می‌دهند. لذا می‌توان این استان را از نظر آسیب‌پذیری به بیابان-زایی و فرآیندهای فرسایشی خاک جزء مناطق مستعد در ایران دانست. در این مطالعه یک محدوده زمین‌شناسی واقع در بلوک زمین‌شناختی لوت و سبزوار، به عنوان نمونه مطالعاتی تفکیک و انتخاب شده است.

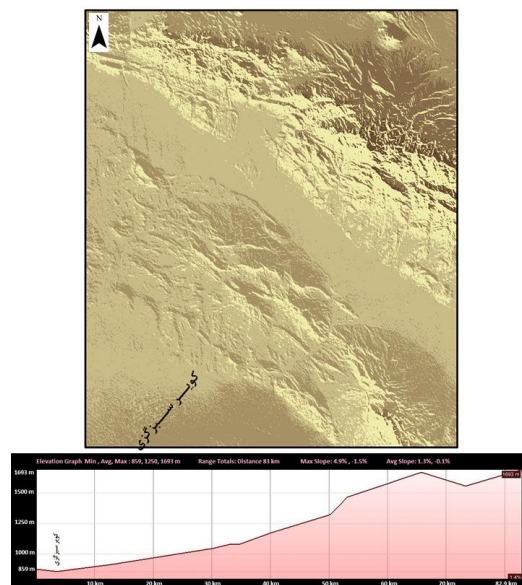
**روش مطالعه:** به منظور تحلیل شرایط اکوسیستم‌های استان بر پایه دیدگاه غیرخطی (hysteresis)،

داده‌های سالانه بارش ایستگاه‌های سینوپتیک استان با استفاده از روش درونیابی IDW درونیابی و نقشه مذکور تولید شد (شکل ۴). سپس تحلیل روند تغییرات اکوژئومورفیک با کمک نقشه‌های مذکور بر پایه دیدگاه غیر خطی صورت گرفت. دینامیک بررسی‌ها بر اساس گذار از محیط‌های غیربیابانی به سمت محیط‌های بیابانی بوده است. در نهایت دو آستانه یا مرز اکوژئومورفیک شامل مرز بین بیابان و نیمه بیابان و مرز بین نیمه بیابان و غیر بیابان در منطقه مورد مطالعه تفکیک و ترسیم گردید.

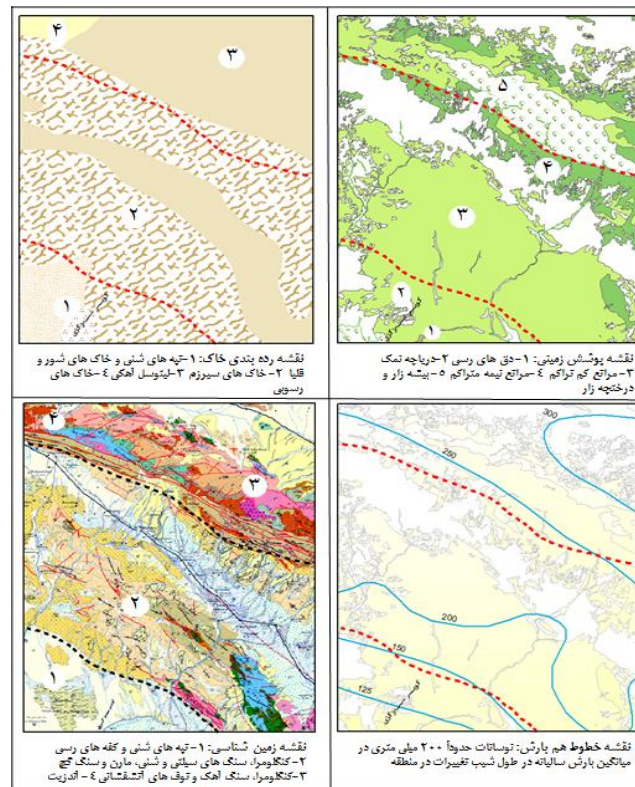
۱۳۸۶، نقشه لیتولوژی منطقه مورد مطالعه تهیه شد. برای تهیه نقشه رده‌بندی خاک از نقشه خاک اداره کل منابع طبیعی و آبخیزداری خراسان رضوی سال ۱۳۸۵ استفاده شده است. بر این اساس عمده خاک‌های منطقه رده‌های شور و قلیایی و لیتوسل در بر گرفت. با استفاده از تصاویر ETM<sup>+</sup> سال ۲۰۱۰ و با ترکیب باندهای ۲-۳-۴، ۱-۳-۵، ۱-۴-۷ و بهره‌گیری از داده‌های Google earth، نقشه پوشش زمین منطقه مطالعاتی تهیه و در چهار کلاس دشت‌های رسی، پلایا، مراتع و درختچه‌زارها تفکیک شد. برای تهیه نقشه خطوط هم‌بارش،



شکل ۲: موقعیت منطقه مورد مطالعه در استان خراسان رضوی در شمال شرقی ایران. نقشه استان با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس مربوط به ماه آگوست سال ۲۰۰۴ تهیه شده است.



شکل ۳: نقشه لایه ارتفاعی منطقه مورد مطالعه به همراه پروفیل طولی. اختلاف ارتفاع از شمال تا جنوب محدوده مطالعاتی به حدود ۸۰۰ متر می‌رسد.

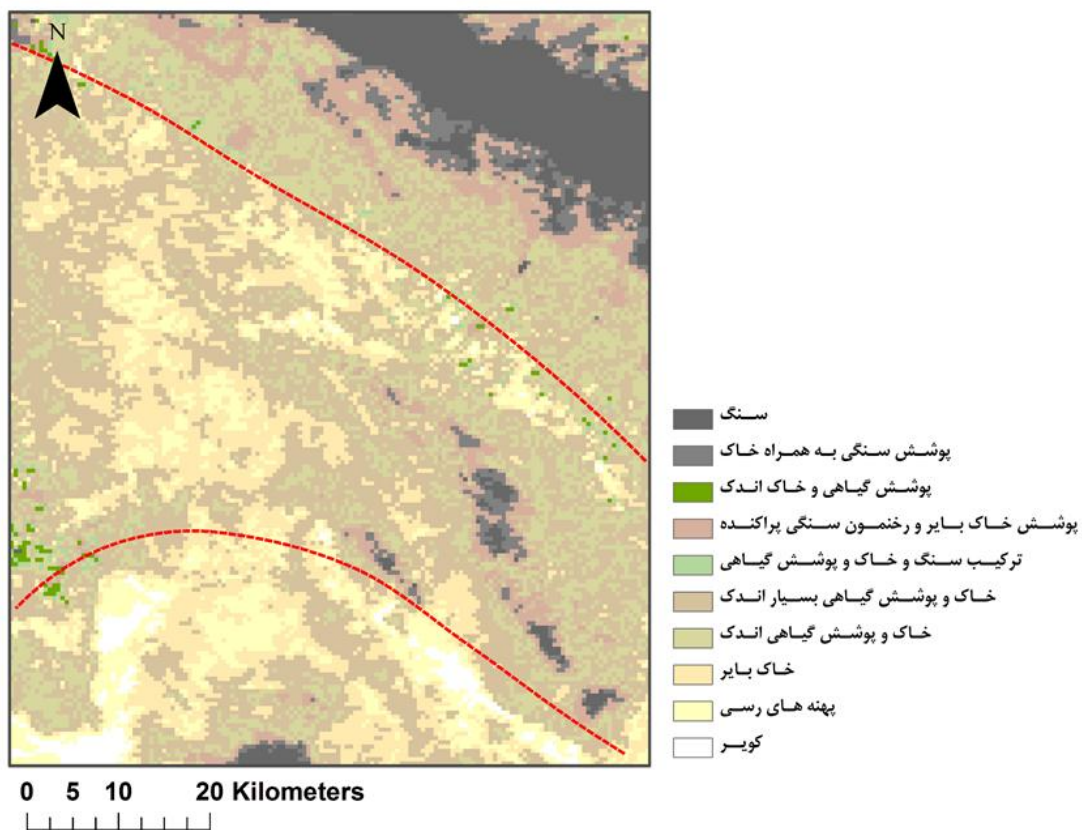


شکل ۴: وضعیت منطقه مطالعاتی در چهار نقشه خاک‌شناسی، زمین‌شناسی، پوشش زمینی و نقشه خطوط هم‌بارش. خطوط منقطع موجود در نقشه‌ها بیانگر مرزهای تقریبی تفکیک محیط‌های بیابانی و نیمه‌بیابانی از یکدیگر هستند.

حساسیت‌پذیری خود نسبت به فرآیندهای فرسایشی و میزان حضور پوشش گیاهی، درجات متفاوتی از ارتجاع‌پذیری را برای اکوسیستم قائل می‌شوند. از طرفی هرچه پوشش گیاهی، خاک و سنگ به طور ناهمگن‌تری در مجاورت یکدیگر قرار داشته باشند می‌توان به عنوان یک منطقه گذر، احتمال بالاتری از وقوع آستانه را انتظار داشت. بنابراین با انجام یک طبقه‌بندی نظارت نشده، منطقه مورد بررسی بر اساس سه پوشش زمینی فوق طبقه‌بندی و در نهایت جداسازی مرزها با اطمینان بیش‌تری حصول یافت (شکل ۵).

در پایان به منظور صحت‌سنجی تفکیک‌پذیری مرزهای فوق لازم بود تا بر اساس پراکندگی سه عامل اکوزئومورفیک اصلی (پوشش گیاهی، پوشش خاک و سنگ) که ملاک تعیین نسبت چیرگی پتانسیل‌های فرسایش‌پذیری و برگشت‌پذیری در این پژوهش می‌باشند، نقشه تقسیم‌بندی منطقه مورد مطالعه بر اساس سه نوع پوشش زمینی فوق انجام گردد. بر این اساس مناطق دارای پوشش گیاهی متراکم‌تر با مقادیر کم‌تری از خاک بایر پتانسیل بالاتری در برگشت‌پذیری محیط و افزایش ارتجاع‌پذیری آن دارند. همچنین ویژگی‌های ذاتی منطقه از قبیل لیتولوژی و خاک بر حسب میزان





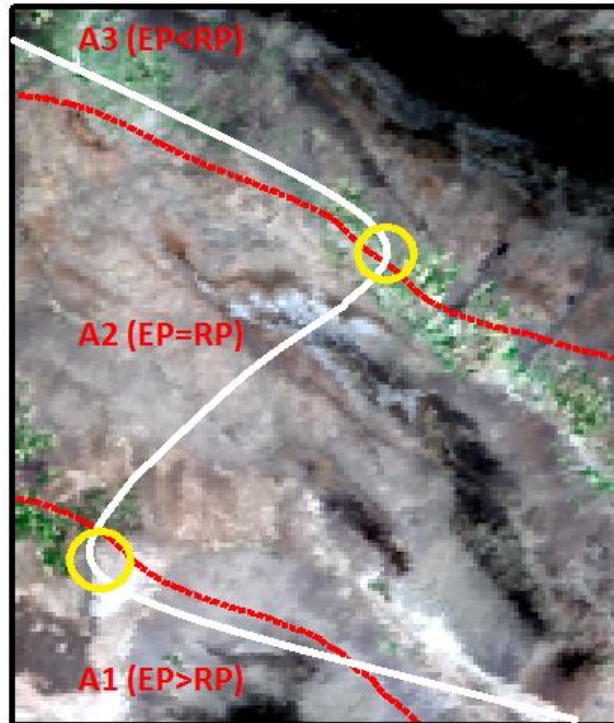
شکل ۵: طبقه‌بندی منطقه مورد مطالعه بر اساس ترکیب پوشش گیاهی (عامل اکولوژیک مؤثر در پتانسیل برگشت-پذیری) و پوشش خاک و سنگ (ویژگی‌های ذاتی) با استفاده از طبقه‌بندی نظارت نشده (تصویر طبقه‌بندی شده متعلق به سنجنده MODIS ماه آگوست سال ۲۰۰۴ می‌باشد). خطوط قرمز رنگ مرزها یا آستانه‌های اکوزئومورفیکی تفکیک شده می‌باشند که انتظار می‌رود تغییرات هم‌جهتی با چهار عامل مورد بررسی داشته باشد.

## نتایج

شنی در منطقه کویری به خاک‌های سیرزمی در منطقه نیمه‌بیابانی و سپس خاک‌های لیتوسلی آهکی و خاک‌های رسوبی در عرض‌های بالاتر کاملاً مشهود می‌باشد. همچنین در نقشه لیتولوژی در منطقه بیابانی تفکیک شده، شاهد وجود کفه‌های رسی و تپه‌های شنی و با گذر به منطقه نیمه‌بیابانی وجود سنگ‌های کنگلومرا به همراه سنگ‌های سیلتی، شنی، مارنی و سنگ گچ در روی نقشه به-چشم می‌خورد. تا جایی که در عرض‌های بالاتر، وجود کنگلومرا به همراه رگه‌هایی از سنگ آهک، توف و آندزیت دیده می‌شود. در نقشه خطوط هم-بارش منطقه نیز می‌توان تغییر ۱۷۵ میلی‌متری در

در بررسی‌های انجام شده به ترتیب روند تغییرات در نقشه پوشش زمینی از فرم یک دریاچه کویری و دق‌های رسی پیرامون آن در یک اکوسیستم کاملاً بیابانی، با بالا رفتن عرض جغرافیایی با گذار از یک آستانه به فرم مراتع کم‌تراکم تغییر شکل می‌دهند و به تدریج با گذر از آستانه بعدی مراتع کم‌تراکم جای خود را به مراتع نیمه‌متراکم و در عرض‌های بالاتر به جنگل‌های تنک و بیشه‌زارهای متراکم‌تر می‌دهند (با میانگین بارش ۳۰۰ میلی‌متر). بررسی دو نقشه دیگر وجود این گرادیان را در طول منطقه تأیید می‌کند. در نقشه رده‌بندی خاک نیز تغییر رده‌های خاک از خاک‌های شور و قلیا و تپه‌های

میانگین بارش سالانه را از ۱۲۵ میلی‌متر در منطقه کویری تا ۳۰۰ میلی‌متر در ارتفاعات بالاتر مشاهده نمود.



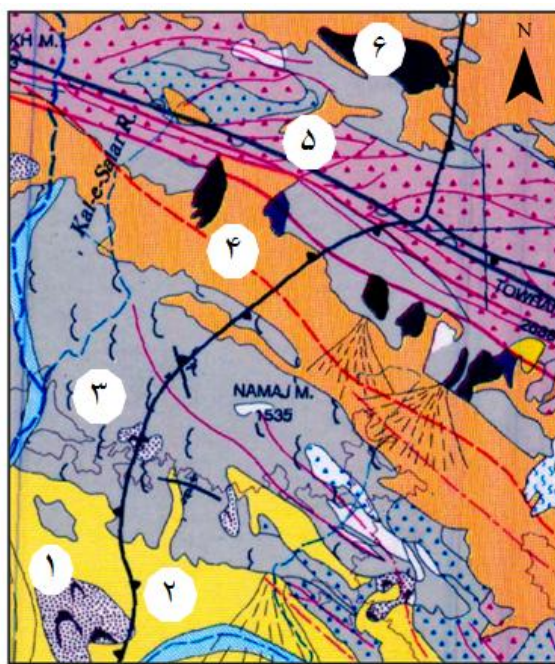
شکل ۶: تفکیک محیط بیابانی (Area<sub>1</sub>)، نیمه بیابانی (Area<sub>2</sub>) و غیربیابانی (Area<sub>3</sub>) در منطقه مورد مطالعه. دایره-های زرد رنگ بیانگر نقاط سرازیری یا محل وقوع آستانه‌ها و تغییر وضعیت اکوسیستمی هستند. در هر منطقه (A<sub>1</sub>, A<sub>2</sub>, A<sub>3</sub>) تعامل پتانسیل‌های فرسایشی (EP) و برگشت‌پذیری (RP) نشان داده شده است.

پوشش خاک بایر و شوره‌زارهای بیابانی). در نهایت در ارتفاعات بالاتر (شکل ۶ A<sub>3</sub>)، پوشش درختچه-زارها و گیاهان پایای چندساله نمونه‌ای از غلبه پتانسیل‌های احیا و برگشت‌پذیری به نیروهای فرساینده محیطی می‌باشد. آنچه مهم است این است که منطقه A<sub>2</sub> (حدواسط) را می‌توان مرحله گذر ژئومورفیک تلقی نمود. تغییر در انرژی‌های سیستم بدنبال آشوب‌های محیطی ناشی از اقلیم و فعالیت‌های انسانی، می‌تواند موجب تغییر در محدوده جذب سیستم، کاهش ارتجاع پذیری و در نهایت فروپاشی اکوسیستم به منطقه بیابانی شود.

در بررسی منطقه مورد بررسی، منطقه کاملاً بیابانی (شکل ۶-A<sub>1</sub>)، می‌تواند به‌وضوح غلبه پتانسیل‌های فرسایش‌پذیری را به نیروهای برگشت‌پذیری اکوسیستمی بازگو نماید. گستره وسیعی از سطوح بایر بدون پوشش گیاهی و شوره‌زارها بدون شک سطح بالایی از عملکرد پتانسیل‌های فرسایشی را در محیط به همراه دارد. اکوسیستم نیمه‌بیابانی حد واسط را (شکل ۶ A<sub>2</sub>)، بدون دخالت عوامل انسانی می‌توان تعادلی از نیروهای فرسایشی و احیایی دانست که پتانسیل بالایی در گرایش به هر دو وضعیت بهبود (فرم بیشه‌زار و مراتع متراکم) و وضعیت فروپاشی اکوسیستمی دارند (وضعیت

نقشه‌های لیتولوژی، به درستی گواه تغییر نوع سازندها از سازندهای آهکی به سمت سازندهای گچی درست در جهت تغییر از سمت مناطق نیمه-بیابانی به سمت مناطق بیابانی می‌باشد. همچنین بررسی روند تغییرات در نقشه ژئومورفولوژی منطقه نیز به خوبی ارتباط لندفرم‌های ژئومورفیک با الگوی پوشش گیاهی را اثبات می‌نماید. به طوری که در منطقه بیابانی عدم حضور پوشش گیاهی با تقویت فرآیندهای فرسایش بادی و عوامل تخریب محیطی، لندفرم‌هایی از نوع شوره‌زارهای بایر و تپه‌های ماسه‌ای را در چشم‌انداز منطقه بروز می‌دهد (شکل ۷ منطقه ۱ و ۲). ویژگی‌های ذاتی این مناطق نظیر شوری خاک و نوع سنگ‌های حساس به فرسایش در غیاب پوشش گیاهی (عامل اکولوژیک مؤثر در افزایش توان برگشت‌پذیری)، نرخ تخریب محیط را تسریع بخشیده است.

بررسی مرزهای تفکیک شده بر اساس یک طبقه-بندی نظارت نشده، به خوبی جهت تغییرات را همگام با تغییر ویژگی‌های اکولوژیک (پوشش-گیاهی) و ویژگی‌های ذاتی (لیتولوژی، خاک و اقلیم) منطقه تأیید می‌نماید. این نتایج با مطالعات شوشانی (۲۰۱۲) در بررسی-های مشابه بر روی چهار نقشه پراکنش اکولوژیکی گونه‌های گیاهی، نقشه لیتولوژی، خاک و نقشه نوسانات بارش، از لحاظ روند تغییرات اکوزئومورفیک هماهنگی دارند. به طوری که تغییر گونه‌های گیاهی درست در جهت تغییر وضعیت اکوسیستم از منطقه نیمه خشک به خشک به ترتیب مطابق با تغییر نوع گونه‌های گیاهی از فرم گیاهان پایای علفی به سمت گونه‌های بوته‌ای کوتاه چوبی نظیر آرتمیسیا، آناباسیس یا زیگوفیلوم می‌باشد. همچنین تغییر نوع سازندهای زمین‌شناسی در



نقشه ژئومورفولوژی: ۱- تپه‌های شنی ۲- کفه‌های رسی  
۳- بدلندها ۴- دشت‌های آبرفتی ۵- سنگهای آتشفشانی و  
دایک‌ها ۶- پادگانه‌های آبرفتی

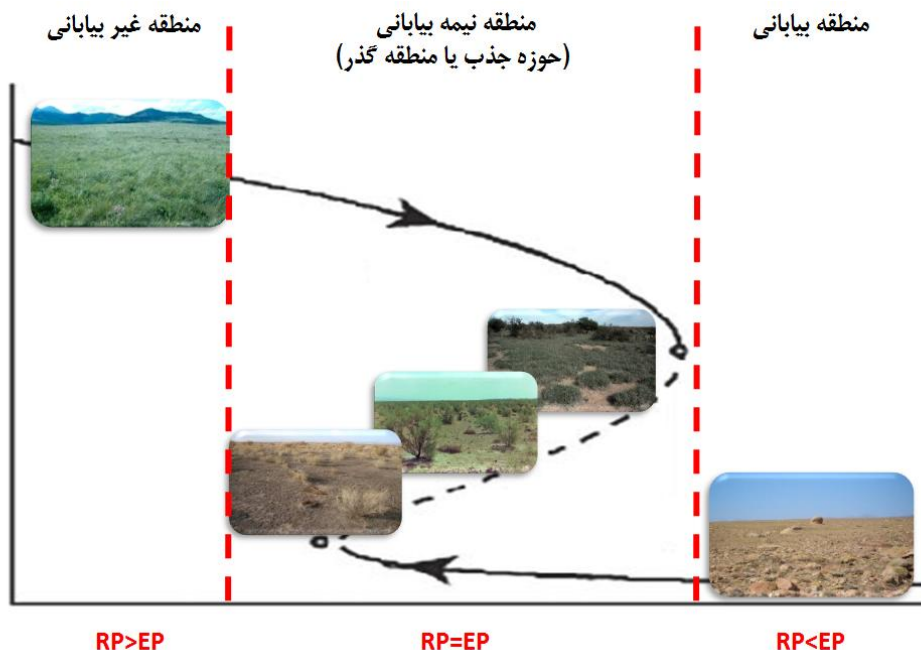
شکل ۷: نقشه ژئومورفولوژی منطقه. ارتباط لندفرم‌ها با پوشش گیاهی

## بحث

تحلیل دیدگاه دینامیک غیرخطی در اکوسیستم‌های بیابانی خراسان رضوی: در اکوسیستم‌های شکننده مناطق خشک منطقه مورد مطالعه، پاسخ مؤلفه‌های پوشش سطح زمین به عوامل ناپایدار کننده و اختلالات ورودی به سیستم، اغلب از نوع پاسخ‌های غیرخطی خواهد بود و نمی‌توان ارتباط بین تغییرات محیطی و پاسخ‌های چشم‌انداز را عیناً یک روند خطی و تدریجی قلمداد کرد. این موضوع می‌تواند تأیید کننده نتایج ریچاردز و کلیفورد (۲۰۱۱) در وجود دینامیک‌های غیرخطی در اکوسیستم‌های خشک باشد. به دیگر سخن می‌توان رفتارهای غیرخطی و غیر قابل پیش‌بینی را انتظار داشت که با شکل‌گیری الگوهای غیرقابل انتظار در حد فاصل مناطق گذر اکوسیستمی یا همان مناطق جذب در اکوسیستم‌های استان نمود ظاهری می‌یابند. بنابراین چنین استنباط می‌شود که در اکوسیستم‌های خشک و بیابانی خراسان رضوی، دینامیک‌های رفتاری اغلب از نوع رفتارهای آستانه ناگهانی یا فراپایدار هستند. تأیید و اثبات این دیدگاه را در ژئومورفولوژی، در مطالعات فیلیپس (۲۰۰۳) که آستانه‌ها را یکی از منابع رفتارهای غیرخطی و ناگهانی قلمداد می‌کند نیز می‌توان یافت. از دیدگاه اکولوژیکی، آنچه که دینامیک‌های آستانه را شکل می‌دهند، ارتباط متقابل و مکانیسم‌های بازخوردی بین پوشش سطح زمین (گیاه، خاک و سنگ) و عوامل اقلیمی در ارتباط با فرآیند‌های فرسایشی است. تغییر فرم یک علفزار با پوشش علفی با کم‌ترین میزان خاک بایر و آثار فرسایشی، به یک بوته‌زار چوبی با سطح وسیعی از خاک بایر و فرسایش یافته، نتیجه رفتارهای غیرخطی گونه‌های گیاهی در پاسخ به نیروهای محرک و مخرب محیطی، نظیر سرعت بالای باد، دمای زیاد و نوسانات بارش قلمداد می‌شود. در واقع

همانطور که اندازه و تراکم گونه‌های گیاهی چوبی در طول زمان در نتیجه بالا رفتن بازخوردهای مثبت در منطقه افزایش پیدا می‌کند، عوامل غالب فرسایشی، رفتارهای غیرخطی گونه‌های چوبی را افزایش داده تا جایی که منجر به شکل‌گیری الگوهای پوشش لکه‌ای و نواری مرکب از گونه‌های بوته‌ای چوبی و خاک بایر در منطقه خواهد شد (پیترز و همکاران، ۲۰۰۴). به عبارتی در اکوسیستم‌های شکننده خراسان رضوی با شرایط حساسیت و آسیب‌پذیری بالا به تغییرات محیطی، بازخوردهای مثبت تأثیر پتانسیل‌های فرسایشی را نسبت به پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و تاب‌آوری محیط تقویت کرده، لذا در چنین شرایطی تداوم فرآیندهای فوق، سیستم را تا نزدیکی نقاط سرزیری و تغییر کامل وضعیت کنونی و گذار از یک آستانه بحرانی پیش می‌برد. به دنبال کاهش شدید در توان برگشت‌پذیری و بازخوردهای خودسازنده منفی و غلبه پتانسیل‌های فرسایش-پذیری بر فرآیندهای برگشت‌پذیری، سیستم در یک تغییر ناگهانی وارد فاز جدیدی از تعادل می‌شود که ممکن است در چشم‌انداز یک منطقه بیابانی ظهور کند (شکل ۸). به عبارتی در تحلیل بروز چهره‌های بیابانی در اکوسیستم‌های استان خراسان رضوی بر پایه دینامیک‌های غیرخطی، می‌توان اذعان داشت که با کاهش ارتجاع‌پذیری اکوسیستم غیر بیابانی در برابر تنش‌های طبیعی یا انسانی، وضعیت اکوسیستم کم‌کم به شرایطی نزدیک می‌شود که اختلالات هرچند کوچک محیطی وضعیت تعادل فعلی اکوسیستم غیر بیابانی را به نفع فرآیندهای فرسایشی بر هم زده و در گذار از یک آستانه بحرانی که تحت عنوان مناطق گذر شناخته می‌شوند، اکوسیستم وارد وضعیت بیابانی خواهد شد. این تغییرات که اغلب بسیار بزرگ و ماندگار هستند، تحت تأثیر پاسخ‌های پیچیده و

غیرخطی پوشش گیاهی منطقه در تعامل با نیروهای اقلیمی و مکانیسم بازخوردی بین آنها ایجاد می‌شوند. همچنین در محدوده وقوع آستانه که تحت عنوان مناطق جذب یا گذر شناخته می‌شوند نیز الگوهایی شکل می‌گیرند که با مطالعه آن‌ها می‌توان به وضعیت بعدی اکوسیستم پی برد.



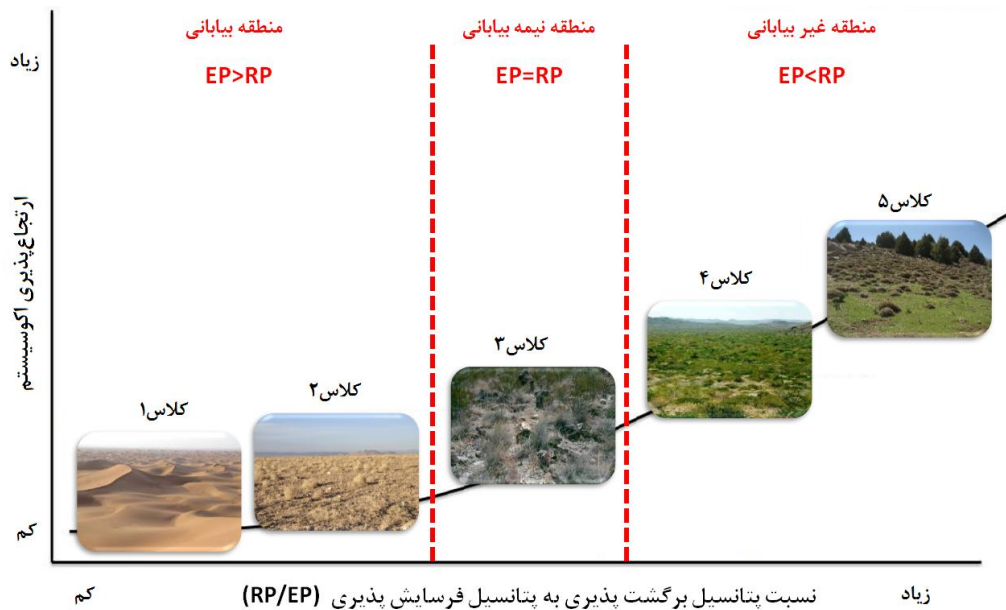
شکل ۸: شکل‌گیری الگوهای متفاوت پوشش در مناطق گذر اکوسیستمی خراسان رضوی در تناسب با پتانسیل‌های برگشت‌پذیری (RP) و فرسایش‌پذیری (EP). وقوع رفتارهای آستانه‌ای در چنین سیستم‌هایی به معنای شروع تغییر الگوهای رفتاری متفاوت سیستم‌ها به دنبال ایجاد ناپایداری و اختلال در وضعیت تعادل فعلی تا رسیدن به وضعیت تعادلی جدید قلمداد می‌شود.

شود. منظور از پتانسیل معکوس برگشت‌پذیری، کاهش توان ارتجاع پذیری و افزایش فرسایش‌پذیری است. در نقطه مقابل توان معکوس فرسایش‌پذیری، افزایش پوشش سطحی و بالا بردن توان برگشت‌پذیری اکوسیستم و کاهش فرسایش است. بر این اساس می‌توان مناطق بیابانی، غیر بیابانی و مناطق گذر بین این دو محیط را با توجه به الگوهای پوششی خاک، گیاه و سنگ در استان خراسان رضوی، در پنج کلاس طبقه‌بندی کرد (شکل ۹). به طوری که مناطقی با پوشش یکنواخت تپه‌های شنی و شوره‌زارهای نمکی بدون هیچ پوشش گیاهی تحت عنوان کلاس (۱) به عنوان یک

تحلیل ارتباط پوشش گیاهی با پتانسیل‌های معکوس برگشت‌پذیری و فرسایش در خراسان رضوی: در مطالعات دینامیک اکوسیستم‌های مناطق خشک و بررسی ارتجاع‌پذیری آن‌ها، هنوز فقدان مطالعه و تعیین ارتباط بین شکل‌گیری الگوهای خاک و پوشش گیاهی چشم‌انداز در پایداری و بالا رفتن توان تاب‌آوری اکوسیستم به خوبی مشخص نشده است (ون‌هاردنبرگ و همکاران، ۲۰۰۱؛ پویو و همکاران، ۲۰۰۶؛ کفی و همکاران، ۲۰۰۷). ارتباط بین الگوهای پوشش با شکل‌گیری آستانه‌ها می‌تواند از نقطه‌نظر پتانسیل‌های فرسایشی و برگشت‌پذیری مورد بحث واقع

نمای بسیار پراکنده‌ای از سنگ لخت در منطقه است. در نهایت، کلاس (۵) بیشه‌زارهای متراکمی را شامل می‌شود که بیش‌تر تحت تسلط پوشش‌های گیاهی چندساله و درختچه‌زارها بوده و به‌ندرت می‌توان لکه‌هایی از خاک بایر را در این مناطق مشاهده کرد. کلاس (۴) و (۵) را می‌توان به‌عنوان مناطق غیربیابانی در نظر گرفت. بر این اساس، در یک منطقه خشک می‌توان الگوهای پوششی فوق‌را در گذر زمان تحت‌تأثیر دامنه ارتجاع‌پذیری اکوسیستم مشاهده کرد.

اکوسیستم کاملاً بیابانی شناخته می‌شود. کلاس (۲) مربوط به مناطقی از بیابان است که وجود لایه کم عمقی از خاک شرایط رویش پوشش گیاهان مقاوم به خشکی را فراهم کرده و اغلب در چشم‌انداز مراتع بیابانی کم‌تراکم به چشم می‌خورند. در این کلاس پوشش گیاهی بسیار تنک و بیش‌تر خاک بایر و سنگ به چشم می‌خورد. کلاس (۳) را می‌توان مناطق گذار اکوسیستمی یا مناطق نیمه‌بیابانی قلمداد کرد که ترکیبی از پوشش ناهمگن سنگ، خاک و پوشش گیاهی در کنار هم شناخته می‌شوند. کلاس (۴) شامل چشم‌اندازی از مراتع نیمه-متراکم و متراکم و لکه‌های کوچکی از خاک بایر و



شکل ۹: تفکیک مناطق مختلف اکوسیستم‌های منطقه مطالعاتی (خراسان رضوی) به نسبت پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و فرسایشی. غلبه پتانسیل‌های برگشت‌پذیری بر پتانسیل‌های فرسایشی در شکل‌گیری الگوهای مختلف پوشش مؤثر است.

گیاهی (منطقه غیر بیابانی) و یا پوشش یکنواخت سنگ لخت در بیابان‌های سنگی و یا شن‌زار یا شوره‌زارهای بایر (منطقه بیابانی مطلق) شاهد بود. این ادعا را می‌توان از نقطه نظر تناسب بین پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و فرسایشی تحلیل

از دیدگاه تغییر پذیری مکانی بالا در مناطق خشک استان، جایی که لکه‌های سنگ لخت، خاک بایر و پوشش گیاهی به نسبت زیاد و نزدیک‌تری با یکدیگر ترکیب شده باشند، فراوانی وقوع آستانه‌ها را می‌توان بیش‌تر از مناطقی با پوشش همگن

پوشش همگن تپه‌های شنی و شوره‌زارهای بایر در منطقه بیابانی خراسان رضوی). بنابراین جایگاه وقوع آستانه در بین کلاس‌های فوق را می‌توان جایی در نظر گرفت که ارتجاع‌پذیری اکوسیستم به حدی کاهش یافته است که کوچکترین محرک محیطی منجر به پاسخ‌های بزرگ و ماندگار در اکوسیستم شود (فاگره و همکاران، ۲۰۰۹). با تغییر شرایط محیطی به نفع پتانسیل‌های فرسایشی، چه تحت تأثیر عوامل طبیعی و چه با دخالت عوامل انسانی، کم‌کم شرایط وقوع یک تغییر کاتاستروفیک در اکوسیستم فراهم می‌شود و به راحتی شاهد تبدیل یک منطقه گذر (شکل ۹ کلاس ۳، شکل ۶ A<sub>2</sub>) به یک محیط کاملاً بیابانی (شکل ۹ کلاس ۱ و ۲، شکل ۶ A<sub>1</sub>) خواهیم بود. در مناطقی از استان که تحت تأثیر شرایط محیطی نامطلوب، نظیر رژیم بارش نامنظم و ناکافی و یا آتش‌سوزی-های مکرر قرار دارند، دخالت عوامل انسانی نظیر چرای بیش از حد دام، بوته‌کشی و قطع درختان، شرایط وقوع آستانه‌های کاتاستروفیک غیرقابل بازگشت را سریع‌تر فراهم می‌نماید. به عبارت دیگر، مطالعه و تحقیق در ارتباط با وقوع آستانه‌ها، در حقیقت جستجو برای تغییرات الگوهای نزدیکی است که نشان‌دهنده پاسخ‌های پایدار و بزرگ هستند. این امر تفاوت بزرگ و معناداری بین روند تغییرات مکانی می‌باشد. با این مفهوم می‌توان چنین ادعا نمود که وقوع آستانه در وضعیتی از اکوسیستم‌های منطقه مطالعاتی اتفاق خواهد افتاد، که پتانسیل‌های فرسایش‌پذیری و برگشت‌پذیری در مجاورت یکدیگر و با اختلاف کمی از یکدیگر در بطن الگوهای پوشش منطقه نهفته باشند. در چنین وضعیتی از اکوسیستم که توصیف‌کننده مناطق گذر نیز هستند، غلبه پتانسیل‌های فرسایش‌پذیری در الگوهای لکه‌ای یا نواری شکل گرفته، همراه با احتمال افزایش در اتصال سطوح سنگی و خاک بایر

نمود. به عبارت دیگر، در مناطقی که اکوسیستم‌های خراسان رضوی به وضعیت تعادلی و پایداری دست پیدا کرده باشد (خواه در چشم‌انداز یک منطقه کاملاً بیابانی و خواه در فرم یک منطقه غیر بیابانی)، نسبت بین پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و فرسایش به نفع یکی از این دو تا حد زیادی تغییر می‌کند، تا جایی که نیروهای محیطی قوی نیز گاهاً قادر به تغییر ناگهانی در وضعیت فعلی سیستم نخواهند بود (با فرض اینکه تنها تنش‌های محیطی طبیعی در این تغییر وضعیت دخیل هستند و از تأثیر فرآیند-های انسانی چشم‌پوشی شود). به عنوان مثال، در مناطق کاملاً بیابانی و تخریب شده (شکل ۹ کلاس ۱ و ۲، شکل ۶ A<sub>1</sub>)، مکانیسم‌های بازخوردی مثبت به حدی فرآیندهای فرسایشی را تقویت کرده‌اند که حتی وقوع بارش‌های مداوم در طول یک فصل یا بیش‌تر باز هم نمی‌تواند وضعیت اکوسیستم را از حالت بیابانی مطلق به فرم یک اکوسیستم غیر بیابانی در منطقه مطالعاتی تغییر دهد. در چنین وضعیتی پاسخ‌های اکوسیستم به صورت کاملاً موقتی شاید چهره‌ظاهری اکوسیستم را تا برطرف شدن تنش محیطی به طور محدود تغییر دهد. از سوی دیگر نیز در مناطق غیر بیابانی استان با پوشش متراکم گیاهی (شکل ۹ کلاس ۴ و ۵، شکل ۶ A<sub>3</sub>)، پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و احیا دامنه تاب‌آوری و ارتجاع‌پذیری اکوسیستم‌های استان را به حدی تقویت نموده است که فرآیندهای فرسایشی دوره‌ای و نیروهای محرک اقلیمی نظیر وقوع خشکسالی در یک فصل یا حتی در یک دوره سالانه نمی‌تواند وضعیت منطقه را در یک تغییر ناگهانی به فرم یک منطقه کاملاً بیابانی بدل نماید. در چنین وضعیتی‌های تعادلی، اغلب الگوهای خاصی در چشم‌انداز اکوسیستم دیده نمی‌شوند و پوشش‌ها به‌طور همگنی سطح زمین را می‌پوشاند (پوشش گیاهی متراکم در مناطق غیر بیابانی و

در چنین وضعیتی، اکوسیستم با چشم‌اندازی از پوشش مناسب گیاهی می‌تواند توصیف‌کننده یک منطقه غیر بیابانی با غلبه پتانسیل‌های برگشت-پذیری و احیا باشد (شکل ۹ کلاس ۴ و ۵، شکل ۶ A<sub>3</sub>). در این وضعیت اکوسیستم به دلیل داشتن توان احیای بالا، سرعت بازگشت کوتاه و زمان پاسخ طولانی‌تری نسبت به آشفتگی‌های محیطی دارد. در نقطه مقابل، مناطق بیابانی مطلق با تسلط کامل فرآیندهای فرسایشی، در قبال نیروهای وارده محیطی باز هم در تغییر وضعیت تعادل خود به وضعیت جدید، زمان پاسخ طولانی‌تر و سرعت بازگشت کم‌تری به وضعیت فعلی خود دارند. اما در حساس‌ترین و آسیب‌پذیرترین وضعیت اکوسیستمی (شکل ۹ کلاس ۳، شکل ۶ A<sub>2</sub>)، به دلیل نزدیکی تناسب میان پتانسیل‌های فرسایشی و برگشت‌پذیری، در اینجا حد تنش‌های ورودی به سیستم نقش بسیار مهمی را در جهت‌دهی اکوسیستم به سمت وضعیت تعادلی جدید ایفا می‌کند. چنانچه غلبه پتانسیل‌های برگشت‌پذیری نسبت به فرآیندهای فرسایشی بیش‌تر باشد یعنی سیستم هنوز در فاصله دورتری تا نقاط سرازیری و تغییر وضعیت کامل سیستم قرار دارد. در چنین شرایطی، الگوهای لکه‌ای بیش‌تر به سمت تراکم لکه‌های پوشش گیاهی پیش می‌روند تا لکه‌های سنگ و خاک بایر. در وضعیت متضاد، دامنه ارتجاع-پذیری اکولوژیکی سیستم بسیار محدودتر شده و سیستم در وضعیت نزدیک‌تری به وقوع آستانه‌های بحرانی و نقاط انشعاب قرار خواهد داشت. در این حالت سیستم به‌دنبال کوچکترین اختلال وارد فاز جدید تعادلی می‌شود (ورود به منطقه بیابانی). بنابراین کاهش سرعت برگشت‌پذیری سیستم به شرایط اولیه را بعد از برطرف شدن تنش‌های وارد شده، می‌توان به عنوان هشدار در جهت نزدیکی سیستم به وقوع یک آستانه بحرانی قلمداد کرد. در

و کاهش در اندازه بوته‌های گیاهی در نتیجه افزایش جریان فرسایندهای رواناب‌ها، متناسب با شیب توپوگرافی و تشدید سرعت فرسایندهای باد خواهد بود (آکین و همکاران، ۲۰۰۹؛ پویگدفابرگاس، ۲۰۰۵؛ پویو و همکاران، ۲۰۰۶؛ لودویگ و همکاران، ۲۰۰۵). در سمت دیگر، پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و احیا در الگوی پوشش لکه‌ای و نواری، مرتبط با افزایش اندازه بوته‌ها، تراکم پوشش گیاهی و افزایش اتصال بین لکه‌ها و در نتیجه افزایش راندمان بهره‌وری از رواناب‌های سطحی و بارش و در نتیجه غلبه و تسلط لکه‌های پوشش گیاهی در مناطق خاک بایر خواهد بود. در منطقه مورد بررسی، بدون شک بیش‌ترین احتمال وقوع آستانه را می‌توان در نزدیکی مرزهای جدا شده انتظار داشت و علت آن را می‌توان در ناهمگنی بیشتر در پوشش خاک، سنگ و پوشش گیاهی این مناطق دانست. در این مناطق که می‌توان آن‌ها را گذارهای اکوسیستمی نامید، محیط در حال تغییر از یک وضعیت غیربیابانی به نیمه بیابانی (A<sub>3</sub> به A<sub>2</sub> یا بالعکس) و یا گذر از یک محیط نیمه بیابانی به یک محیط کاملاً بیابانی (A<sub>2</sub> به A<sub>1</sub> یا بالعکس) می‌باشد. بنابراین آستانه در جایی تعریف می‌شود که تفاوت بین تغییرات این پتانسیل‌ها به طور قابل توجه و معناداری افزایش پیدا کند (شوشانی، ۲۰۱۲). کاربرد مفاهیم ارتجاع‌پذیری اکوسیستم‌ها و به دنبال آن پتانسیل‌های برگشت‌پذیری و فرسایشی، می‌توانند دیدگاهی برای تفکیک و جداسازی مناطق بیابانی از غیر بیابانی به‌شمار آید. در مناطقی از استان خراسان رضوی که غلبه پتانسیل‌های برگشت‌پذیری نسبت به توان فرسایشی بالاتر باشد، سیستم با داشتن دامنه ارتجاعیت بالا در مدت زمان کم‌تری بعد از وارد شدن تنش‌های محیطی قابلیت بازگشت به شرایط تعادل اولیه را خواهد داشت (زمان برگشت‌پذیری).



اکوسیستم دچار ناپایداری و بی‌ثباتی می‌شود و سیستم به یک وضعیت جایگزین یا یک وضعیت متناوب دیگر جهش پیدا می‌کند. در این مقاله، بر پایه این تفکر، آستانه‌های اکوژئومورفیک مبنای جداسازی محیط‌های بیابانی از غیر بیابانی در استان خراسان رضوی قرار گرفت. تحلیل‌ها مشخص کننده مرزی بارز از تغییرات ویژگی‌های اکولوژیک و ژئومورفیک در اکوسیستم‌های استان می‌باشد. همچنین استفاده از الگوریتم‌های طیفی نشان می‌دهد که عوامل اکولوژیکی (پوشش گیاهی) و ویژگی‌های ذاتی منطقه (خاک و لیتولوژی) با تغییر نسبت پتانسیل‌های فرسایشی و برگشت پذیری، سطوح متفاوتی از ارتجاع پذیری را در اکوسیستم ایجاد می‌کنند که در نهایت در غالب محیط‌های فرسایش یافته بیابانی یا محیط‌های غیربیابانی نمود می‌کنند. در این پژوهش نشان داده شد که پارادیم رفتارهای غیرخطی و گسسته در برگشت پذیری اکوسیستم پس از تغییرات، دینامیکی از چهره‌های بیابانی و غیر بیابانی را رقم زده است. همچنین مشخص شد که شیب این تغییرات در راستای تغییرات شرایط اکوژئومورفیک منطقه است، به گونه‌ای که می‌توان مرزهای اکوژئومورفیک مشخصی را در هر محیط اکولوژیک نشان داد.

#### سپاسگزاری:

این مقاله بخشی از پژوهش‌های پایان نامه کارشناسی ارشد (طرح پژوهشی ۳۱۶۲۷-۳) می‌باشد که با حمایت‌های معنوی-مادی معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه فردوسی مشهد انجام یافته است.

(نوآوری در حوزه دانش ژئومورفولوژی)، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۵، شماره ۱، ص ۵۱-۶۴.

مناطق گذر اکوسیستم، به دلیل بی‌ثباتی‌های موجود در وضعیت پوشش تحت تأثیر نوسانات پتانسیل‌های معکوس برگشت پذیری و فرسایشی، اغلب می‌توان شاهد شکل‌گیری الگوهای لکه‌ای و نواری در پوشش گیاهی و خاک این مناطق بود. بنابراین مناطق گذر را می‌توان به عنوان مرزهای وقوع آستانه‌های اکوژئومورفیک در نظر گرفت و با شناسایی آن‌ها مرز بین مناطق غیر بیابانی، نیمه-بیابانی و بیابانی را تعیین نمود. تفکیک مرزهای اکوسیستم بر اساس پتانسیل‌های برگشت پذیری و فرسایشی می‌تواند کاربرد جدیدی از این دیدگاه به حساب آید و در جهت مدیریت صحیح مناطق بیابانی و کاهش توسعه مرزهای بیابانی و روند بیابانزایی مورد عمل قرار گیرد.

#### نتیجه‌گیری

دیدگاه استفاده شده در این پژوهش دینامیک آستانه‌های غیر پیوسته و غیرخطی (Hysteresis) است، آنچه بازگو می‌کند تغییرات در شرایط محیطی منجر به تغییرات کوچک در عملکرد سیستم و یا ترکیب گونه‌ها می‌شود، تا جایی که سیستم به نزدیکی یک آستانه بحرانی برسد و از آن پس یک تغییر ناگهانی در سیستم به دنبال وارد شدن کوچکترین نیرو منجر به ورود سیستم به وضعیت تعادلی جدید شود. از دیدگاه اکولوژیک، آستانه‌ها زمانی اتفاق می‌افتند که یک اثر ماشه‌ای (اختلال یا آشفتگی موقت و زودگذر با تأثیرات طولانی مدت)، کشش بازخوردهای منفی را از یک منطقه جذب به حوزه جذب دیگر تغییر دهد. در نقاط انشعاب یک اکوسیستم، وضعیت فعلی

#### منابع

سپهر، ع.، ۱۳۹۳ (a). ژئوسیستم‌های نامتعادل: تحلیل قوانین لیپانوف در شکل‌گیری الگوها

محسنی، ن. و سپهر، ع.، ۱۳۹۴. الگوهای پوششی خود تنظیم: علائم پیش‌آگاهی در پیش‌بینی گذرهای اکوسیستمی، مجله محیط‌شناسی، در دست چاپ.

- Abrahams, A.D., Parsons, A.J. and Wainwright, J., 1995. Effects of vegetation change on interrill runoff and erosion, Walnut Gulch, southern Arizona, *Geomorphology*, v. 13, p. 37-48.
- Bestelmeyer, B.T., Duniway, M.C., James, D.K., Burkett, L.M. and Havstad, K.M., 2013. A test of critical thresholds and their indicators in a desertification-prone ecosystem, more resilience than we thought, *Ecol Lett*, v. 16, p. 339-45.
- Briske, D.D., Fuhlendorf, S.D. and Smeins, F., 2006. A unified framework for assessment and application of ecological thresholds, *Rangeland Ecology & Management*, v. 59, p. 225-236.
- Conversi, A., Dakos, V., Gardmark, A., Ling, S., Folke, C., Mumby, P.J., Greene, C., Edwards, M., Blenckner, T., Casini, M., Pershing, A. and Mollmann, C., 2014. A holistic view of marine regime shifts, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 370, 20130279.
- Dakos, V., Carpenter, S.R., Van Nes, E.H. and Scheffer, M., 2014. Resilience indicators: prospects and limitations for early warnings of regime shifts, *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 370, 20130263.
- Dakos, V., Kefi, S., Rietkerk, M., Van Nes, E.H. and Scheffer, M., 2011. Slowing down in spatially patterned ecosystems at the brink of collapse, *Am Nat*, v. 177, 153-66.
- Fagre, D., Charles, C., Allen, C., Birkeland, C., Chapin, F., Groffman, P., Guntenspergen, G., Knapp, A., Mcguire, A. and Mulholland, P., 2009. Thresholds of climate change in ecosystems, A report by the U.S. Climate Change Science Program and the Subcommittee on Global Change Research.
- Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems, *Annual review of ecology and systematics*, p. 1-23.

-سپهر، ع.، ۱۳۹۳ (b). پایداری دو جانبه و فروپاشی کاتاستروفیک: تحلیل ترمودینامیکی پدیده بیابان-زایی، مجله جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۵، شماره ۲، ص ۱۱۹-۱۳۲.

- Kefi, S., Rietkerk, M., Alados, C.L., Pueyo, Y., Papanastasis, V.P., Elaich, A. and De Ruiter, P.C., 2007. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems, *Nature*, v. 449, p. 213-217.
- Kirkby, M., 1995. Modelling the links between vegetation and landforms, *Geomorphology*, v. 13, p. 319-335.
- Ludwig, J.A., Wilcox, B.P., Breshears, D.D., Tongway, D.J. and Imeson, A.C., 2005. Vegetation patches and runoff-erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes, *Ecology*, v. 86, p. 288-297.
- Okin, G.S., Parsons, A.J., Wainwright, J., Herrick, J.E., Bestelmeyer, B.T., Peters, D.C. and Fredrickson, E.L., 2009. Do changes in connectivity explain desertification? *BioScience*, v. 59, p. 237-244.
- Peters, D.P., Pielke, R.A., Bestelmeyer, B.T., Allen, C.D., Munson-Mcgee, S. and Havstad, K.M., 2004. Cross-scale interactions, nonlinearities and forecasting catastrophic events, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, v. 101, p. 15130-15135.
- Phillips, J.D., 2003. Sources of nonlinearity and complexity in geomorphic systems, *Progress in Physical Geography*, v. 27, p. 1-23.
- Phillips, J.D., 2013. Global tipping points, Some lessons from studies of thresholds in geomorphology, *Global and Planetary Change*.
- Pueyo, Y., Alados, C.L. and Barrantes, O., 2006. Determinants of land degradation and fragmentation in semiarid vegetation at landscape scale, *Biodiversity & Conservation*, v. 15, p. 939-956.
- Puigdefábregas, J., 2005. The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands, *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 30, p. 133-147.

- Puigdefábregas, J. and Sánchez, G., 1996. Geomorphological implications of vegetation patchiness on semi-arid slopes, *Advances in hillslope processes*, v. 2, p. 1027-1060.
- Richards, K. and Clifford, N.J., 2011. The nature of explanation in geomorphology, *The SAGE Handbook of Geomorphology*, London: SAGE, p. 36-58.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C. and Walker, B., 2001. Catastrophic shifts in ecosystems, *Nature*, v. 413, p. 591-596.
- Sepehr, A., Zucca, C. and Nowjavan, M.R., 2014. Desertification Inherent Status Using Factors Representing Ecological Resilience, *British Journal of Environment and Climate Change*, v. 4, p. 279-291.
- Shoshany, M., 2012. Identifying Desert Thresholds by Mapping Inverse Erodibility and Recovery Potentials in Patch Patterns Using Spectral and Morphological Algorithms, *Land Degradation & Development*, v. 23, p. 331-338.
- Suding, K.N., Gross, K.L. and Houseman, G.R., 2004. Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology, *Trends in Ecology & Evolution*, v. 19, p. 46-53.
- Suding, K. N. and Hobbs, R.J., 2009. Threshold models in restoration and conservation: a developing framework, *Trends Ecol Evol*, v. 24, p. 271-9.
- Thornes, J., 1985. The ecology of erosion. *Geography*, v. 70, p. 222-235.
- Van Nes, E.H. and Scheffer, M., 2007. Slow recovery from perturbations as a generic indicator of a nearby catastrophic shift, *The American Naturalist*, v. 169, p. 738-747.
- Von Hardenberg, J., Meron, E., Shachak, M. and Zarmi, Y., 2001. Diversity of vegetation patterns and desertification, *Physical Review Letters*, v. 87, 198101.