

## اثرات تغییرپذیری ادافیک بر دینامیک آستانه‌های تعادلی اکوسیستم خشک

ندا محسنی<sup>۱</sup>، عادل سپهر<sup>۲\*</sup>، سیدرضا حسین زاده<sup>۳</sup>، محمود رضا گلزاریان<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیا، دانشگاه فردوسی مشهد

۲- استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه

فردوسی مشهد

۳- دانشیار گروه جغرافیا، دانشکده ادبیات و علوم انسانی، دانشگاه فردوسی مشهد

۴- استادیار گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فردوسی مشهد

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۸/۹

تأیید نهایی مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۱۴

### چکیده

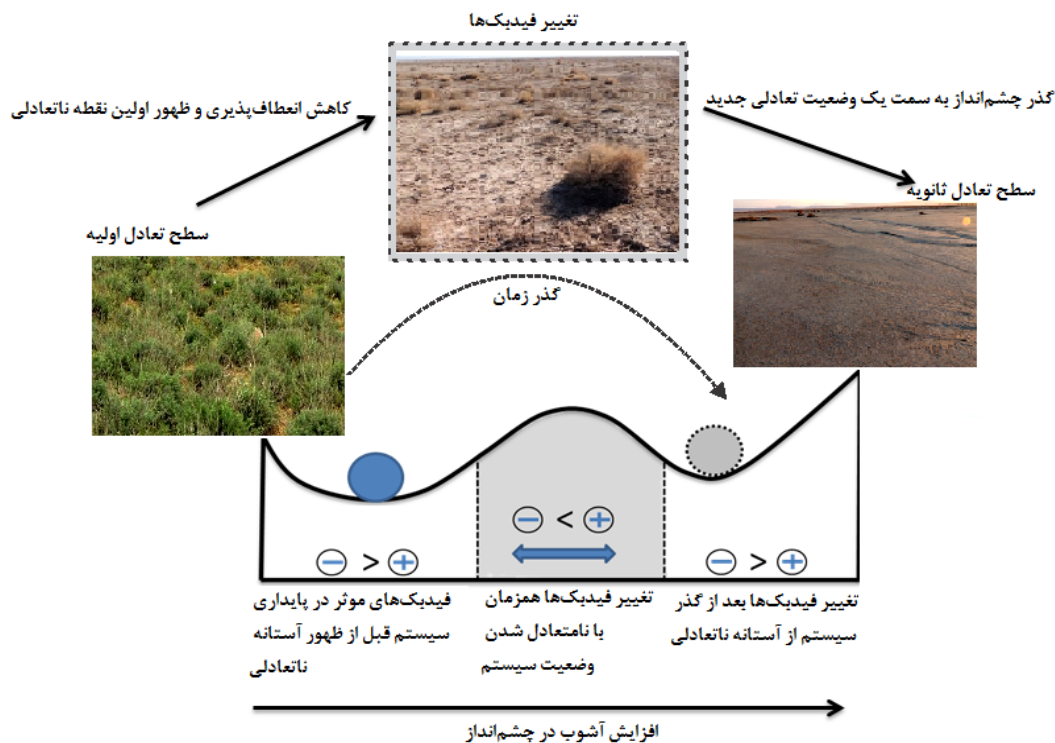
اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک به دلیل عدم تنوع در ساختارها و متغیرهای خود، در معرض وقوع تحولات سریع در ترکیب جوامع گیاهی در پاسخ به تغییرات محیطی هستند. فرایندها و آشوب‌ها با تغییر الگوهای متداول خاک در مقیاس‌های کوچک می‌توانند زمینه ظهور دینامیک‌های بزرگ مقیاسی را در ساختار چشم‌انداز فراهم آورند. شکل‌گیری هتروژنیته‌های پراکنده در ویژگی‌های خاک و به تبع آن تغییرات در توزیع پوشش گیاهی می‌تواند نشانه‌ای از ظهور وضعیت‌های پایدار متناوب (وضعیت همگن پوشش گیاهی و فاقد پوشش) در سطح چشم‌انداز باشد. چنین تضادی از لحاظ توزیع الگوهای خاک و پوشش گیاهی، منجر به ظهور فیدبکی مثبت بین خاک، آب و گیاه می‌شود. فیدبکی که می‌تواند نقش مهمی در روند دینامیک اکوسیستم‌های خشک داشته باشد. افزایش فیدبک‌های مثبت با کاهش انعطاف‌پذیری سیستم، چشم‌انداز را مستعد وقوع گذری برگشت‌ناپذیر به سمت وضعیتی تخریبی خواهند کرد. از آنجا که بررسی فیدبک‌های بین این سه متغیر محیطی می‌تواند در درک دینامیک چشم‌اندازهای خشک و نحوه پاسخ این سیستم‌ها به تغییرات و تنش‌های محیطی موثر باشد، در مقاله حاضر به تشریح اثرات فیدبک‌های مثبت بین آب، خاک و گیاه بر روی روند تحول اکوسیستم‌های خشک پرداخته شده است. نتایج این پژوهش نشان داده است که چگونه ظهور هتروژنیته‌های پراکنده در ویژگی‌های خاک غالب چشم‌انداز با ایجاد فیدبک مثبت بین آب، خاک و گیاه می‌تواند منجر به کاهش انعطاف‌پذیری سیستم، ظهور وضعیت‌های ناعادلی و تسریع روند بیابان‌زایی گردد.

واژه‌های کلیدی: تاب آوری، دینامیک چشم‌انداز، فیدبک مثبت، آستانه‌های تعادل.

## مقدمه

تغییر شرایط اکوسیستم‌ها ناشی از تغییرات اقلیمی، کاهش منابع، کاهش سطح آب‌های زیرزمینی، تخریب زیستگاه و کاهش تنوع زیستی زمینه بروز تغییرات تدریجی و مخربی را در طول زمان فراهم می‌آورد. پاسخ برخی از سیستم‌های دینامیک به آشوب‌های تحمیلی، بصورت تغییراتی آرام و پیوسته و برخی دیگر بصورت تغییرات ناگهانی و غیر پیوسته می‌باشد که اصطلاحاً گذرهای کاتاستروفیک نامیده می‌شوند. در این شرایط، نمودار پاسخ سیستم به تنش‌های محیطی، بصورت منحنی‌های قوسی همراه با چندین نقطه انشعاب می‌باشد. این انشعابات، بیانگر آستانه‌ها یا نقاط ناتعادل در سیستم هستند، جاییکه تغییری کوچک در پارامترهای کنترل‌کننده سیستم می‌تواند منجر به بروز تحولاتی وسیع در رفتار و ساختار آن گردد (داکوس و همکاران، ۲۰۰۸؛ شفر و همکاران، ۲۰۰۹؛ داکوس و همکاران، ۲۰۱۱ و ۲۰۱۲). تغییرات کاتاستروفیک در شرایط محیطی، باعث شکل‌گیری دو وضعیت پایدار متناوب در سیستم شده که توسط یک وضعیت ناپایدار که اصطلاحاً محدوده پایداری دو-جانبه (وضعیت نامتعادل) نامیده می‌شوند، از یکدیگر جدا می‌گردند. ظهور شرایط نامتعادل، نشانه خروج

سیستم از سطح تعادل اولیه و به نوعی پاسخ آن با هدف خودتنظیمی متغیرهایش در برابر تنش‌های محیطی است. وضعیتی که می‌تواند نشانه‌ای از نزدیک شدن سیستم به یک آستانه بحرانی (نقطه تغییر) و تمایل آن به قرارگیری در یک سطح تعادل ثانویه باشد. در چنین شرایطی، بازخورد بین متغیرهای سیستم بدلیل توزیع ناهمگن آن‌ها نسبت به وضعیت تعادل اولیه کاملاً متفاوت می‌گردد (وان نس و شفر، ۲۰۰۷؛ بستلمیر و همکاران، ۲۰۱۱). این شرایط منجر به ظهور الگوهای متفاوتی در ساختارهای سیستم خواهد شد. تا زمانی که سیستم در شرایط تعادل قرار دارد، افزایش فیدبک‌های منفی منجر به حفظ پایداری و تعادل چشم‌انداز در مواجهه با تغییرات محیطی شده، اما در شرایطی که سیستم وارد یک وضعیت نامتعادل می‌شود، توزیع ناهمگن متغیرهای آن منجر به افزایش فیدبک‌های مثبت در سیستم خواهد شد. پیامد ظهور و گسترش چنین فیدبک-هایی، کاهش انعطاف‌پذیری سیستم در برابر تغییر شرایط محیطی و آشوب‌های تحمیلی می‌باشد. این شرایط، سیستم را در آستانه فروپاشی به سمت دومین وضعیت تعادلی قرار خواهد داد. شرایطی که مجدداً بدلیل همگن شدن ساختارهای سیستم، افزایش فیدبک‌های منفی را در پی خواهد داشت (شکل ۱).



شکل ۱: تاثیر تغییر فیدبک‌های سیستم به تناسب افزایش آشوب بر روی کاهش انعطاف‌پذیری و دینامیک اکوسیستم‌های خشک. از چپ به راست: تا زمانی که سیستم در شرایط متعادل قرار دارد، افزایش فیدبک‌های منفی، زمینه پایداری سیستم را در برابر آشوب فراهم می‌آورند (محل قرارگیری گوی آبی). افزایش تدریجی آشوب‌ها بواسطه ظهور مکانیزم‌هایی خاص، با تغییر نوع فیدبک‌ها (افزایش فیدبک‌های مثبت)، زمینه کاهش انعطاف‌پذیری و نامتعادل شدن وضعیت سیستم را فراهم آورده (محدوده‌های خط چین)، بطوریکه ادامه این روند، سیستم را مستعد وقوع گذری برگشت‌ناپذیر به سمت یک وضعیت تعادلی جدید خواهد کرد (محل قرارگیری گوی خاکستری). در این شرایط مجدداً افزایش فیدبک‌های منفی موجب ثبات سیستم شده، اما بدلیل از بین رفتن انعطاف‌پذیری سیستم ناشی از نابودی تنوع اجزای آن، نوع پایداری، متفاوت با شرایط اولیه خواهد بود.

(بوته‌زارها) و فاقد پوشش می‌باشند. یکی از ویژگی‌های شاخص اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک، توزیع ناهمگن پوشش گیاهی بصورت لکه‌های گیاهی (تناوبی از موزائیک‌های فاقد پوشش گیاهی در حدفاصل لکه‌های پوششی) می‌باشد. این ویژگی عمدتاً در ارتباط با الگوهای ناهمگن رطوبت خاک مرتبط با توزیع پوشش گیاهی می‌باشد. چنین تضادی

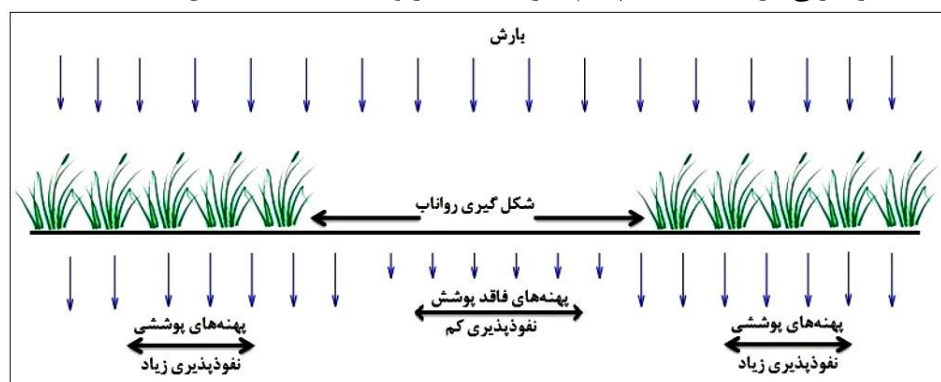
مناطق خشک و نیمه‌خشک با اشغال بیش از یک سوم سطح خشکی‌ها و وابستگی حیات بیش از ۲ میلیارد نفر از کل جمعیت دنیا، از حساس‌ترین سیستم‌های دینامیک نسبت به آشوب‌ها و تغییرات محیطی هستند. این اکوسیستم‌ها در معرض وقوع گذرهای کاتاستروفیک از وضعیت‌هایی با پوشش متراکم (علفزارها) به سمت پهنه‌هایی با خاک‌های تخریبی

در طول زمان می‌گردد. بطوریکه می‌توان گفت تغییر فیدبک‌های سیستم می‌تواند عاملی تعیین کننده در سنجش میزان پایداری و انعطاف‌پذیری چشم-اندازهای خشک و نیمه خشک باشد. ظهور فیدبک-های مثبت، نشانه شکل‌گیری دو وضعیت پایدار متناوب (وضعیت‌هایی با توزیع همگن پوشش گیاهی و وضعیت‌های با توزیع همگن خاک‌های فاقد پوشش) در چشم‌انداز است. تشدید فیدبک‌های مثبت بین خاک و گیاه (ناشی از ناهمگن‌تر شدن توزیع پوشش گیاهی)، منجر به ظهور محدوده ناعادلی (یعنی شرایط مرزی بین دو وضعیت پایدار متناوب پوششی و فاقد پوشش) در سیستم خواهد شد. در چنین شرایطی نابودی تدریجی ساختارهای پوشش گیاهی در پاسخ به افزایش آشوب‌ها منجر به افزایش سطح خاک‌های فاقد پوشش شده و سیستم را در معرض گذر به سمت یک وضعیت تعادلی جدید (وضعیت بیابانی) قرار می‌دهد (شکل ۱) (ریترک و وان دی کاپل، ۱۹۹۷؛ شفر و همکاران، ۲۰۰۱؛ زنگ و همکاران، ۲۰۰۴). ویژگی‌های خاک مانند بافت خاک، عمق خاک، میزان تجمع کربنات کلسیم و سایر املاح محلول، که در مقیاس‌های مکانی متفاوت تغییر می‌کنند، عاملی تعیین کننده در تغییر روند انعطاف-پذیری چشم‌انداز بوده و اثرات چشم‌گیری بر روی میزان دسترسی گیاهان به منابع دارند (همرلک و همکاران، ۲۰۰۰؛ مایستر و همکاران، ۲۰۰۳).

هتروژنیته‌های مکانی در ویژگی‌های خاک ناشی از وقوع آشوب‌های محیطی (مانند فرایندهای بادی یا هیدرولوژیک) می‌توانند یک فاکتور کلیدی در ظهور فیدبک‌های مثبت و متعاقبا شکل‌گیری وضعیت‌های متفاوت همراه با الگوهای ناهمگن پوشش گیاهی در اکوتون‌ها باشند (مک آلف، ۱۹۹۴؛ لوید و همکاران، ۲۰۰۰؛ دی هربرس و همکاران، ۲۰۰۱). در چنین

در الگوی پراکنش رطوبت خاک، عاملی تعیین کننده در ظهور فیدبک مثبت بین خاک و گیاه است (ددریکا و همکاران، ۲۰۰۶ و ۲۰۰۷). خاک‌هایی با پوشش گیاهی متراکم در مقایسه با خاک‌هایی با تراکم گیاهی کم‌تر و یا خالی از پوشش، از پتانسیل بیشتری برای جذب آب و حفظ رطوبت برخوردارند. بنابراین افزایش تراکم پوشش گیاهی تاثیر مثبتی بر روی الگوی رطوبت خاک خواهد داشت، بطوریکه می‌تواند نفوذناپذیری خاک‌های مانند خاک‌هایی رسی - شنی که ذاتا عملکرد ضعیفی در جذب و نگهداشت آب دارند را جبران نموده و به ثبات و پایداری وضعیت-های پوششی کمک کنند (گرین، ۲۰۰۱). زمانی که چشم‌انداز در شرایط متعادل پایدار با وضعیت پوششی همگن قرار دارد، نفوذپذیری بالای خاک ناشی از تراکم گیاهان، منجر به پایداری پوشش گیاهی و متعاقبا افزایش انعطاف‌پذیری چشم‌انداز می‌شود. همچنانکه با افزایش آشوب‌ها، پوشش گیاهی، کاهش می‌یابد، توزیع خاک‌های فاقد پوشش افزایش یافته و اتصال آن‌ها در طول زمان، منجر به ظهور پهنه‌های وسیعی از خاک‌های تخریبی خواهد شد. در این شرایط، کاهش نفوذپذیری خاک، کاهش پایداری گیاهان را در پی خواهد داشت. از طرفی دیگر، جابجایی آب و رسوبات از پهنه‌های فاقد پوشش (ناشی از تجمع آب و تشکیل رواناب بدلیل عدم نفوذپذیری خاک) به سمت قسمت‌هایی با تراکم بیشتر پوشش گیاهی منجر به تشدید دینامیک ساختارهای ناهمگن پوشش گیاهی در سطح چشم‌انداز می‌گردد (شکل ۲) (آگی و سالوا، ۱۹۹۹؛ ریترک و همکاران، ۲۰۰۴؛ لدوگ و همکاران، ۲۰۰۵). ظهور فیدبک‌های مثبت بین خاک و گیاه ناشی از گسترش هتروژنیته (ناهمگنی) در توزیع متغیرهای زیستی و غیر زیستی، منجر به دینامیک موقعیت‌های مختلف یک اکوتون

شرایطی این الگوها می‌توانند انعکاسی از ظهور هتروژنیتهای بسیار جزئی در خاک غالب چشم‌انداز ناشی از افزایش آشوب‌ها و متعاقبا قرارگیری سیستم در وضعیت‌های نامتعادل باشند.



شکل ۲: شماتیکی از فیدبک مثبت گیاه- خاک در چشم‌اندازهای خشک: تاثیر ساختارهای ناهمگن اکولوژیک در تغییر فرایندهای هیدرولوژیک.

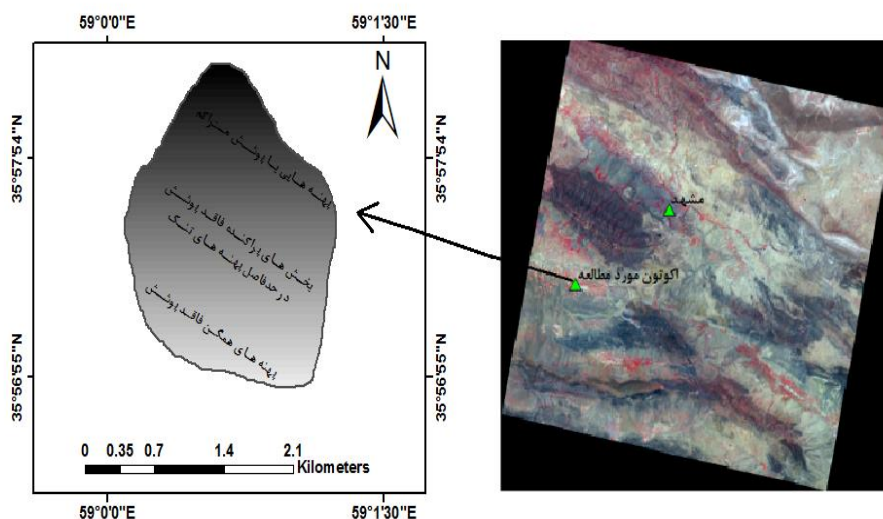
نوعی پاسخ سیستم به تغییر شرایط محیطی خود هستند. اما سوالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که آیا شکل‌گیری چنین ساختارهایی، همانطور که بسیاری از مدل‌های خودتنظیمی اذعان داشته‌اند (هیل رایز لمبرز و همکاران، ۲۰۰۱؛ ریتکرک و همکاران، ۲۰۰۴؛ گاتال و جایپراکاش، ۲۰۰۷)، ناشی از ظهور فرایند خودتنظیمی مکانی پوشش گیاهی با هدف پایداری در برابر آشوب‌ها است و یا می‌توانند معلول هتروژنیتهای در متغیرها و اجزای درونی سیستم باشند؟ در این راستا با ذکر یک مثال موردی براساس نتایج مطالعات میدانی بر روی یک اکوتون خشک در خراسان رضوی سعی شده است به این سوالات پاسخ داده شود که آیا توزیع نامتقارن ساختارهای پوشش گیاهی در موقعیت‌های مختلف یک اکوتون می‌تواند ناشی از ظهور و گسترش هتروژنیتهای در ویژگی‌های خاک غالب چشم‌انداز باشد؟ و آیا اساسا هتروژنیتهای خاک می‌تواند دلیلی برای ظهور وضعیت‌های پایدار متفاوت در اکوسیستم‌های خشک باشد؟

مطالعات اندکی درباره تعاملات بین هتروژنیتهای خاک و پوشش گیاهی در ظهور فیدبک‌های مثبت و دینامیک چشم‌اندازهای خشک انجام شده است. راوی و همکاران (۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) براساس مطالعات میدانی و تجربی به بررسی دلایل و شرایط ظهور الگوهای پوشش گیاهی حلقه‌ای در اکوسیستم‌های خشک پرداختند. نتایج مطالعات آن‌ها نشان می‌دهد که چگونه فرایندهای بادی با ایجاد تغییرات جزئی در ویژگی‌های خاک می‌توانند دلیلی برای ظهور چنین الگوهایی باشند. منگار و بستلمیر (۲۰۰۶) اذعان داشتند که هتروژنیتهای در ویژگی‌های خاک و عوامل ژئومورفیک مانند میکروتوپوگرافی‌ها می‌توانند دلیلی برای ظهور تغییرات در ساختارهای پوشش گیاهی در مناطق خشک باشند. ددریکا و همکاران (۲۰۰۶) و (۲۰۰۷) به بررسی نقش فیدبک‌های بین خاک و گیاه در ظهور الگوهای مکانی پوشش گیاهی و تاثیرات آن در وقوع احتمالی گذرهای کاتاستروفیک پرداختند. این موضوع غیر قابل انکار است که ساختارهای منظم و نامنظم پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های خشک به

### منطقه مورد مطالعه

به منظور بررسی این موضوع که آیا هتروژنیتی خاک می‌تواند مرزی بین موقعیت‌های مختلف اکوتون از لحاظ توزیع ناهمگن ساختارهای پوشش گیاهی ایجاد کند، مطالعات میدانی بر روی یک اکوتون خشک واقع در دشت نیشابور در خراسان رضوی انجام شد. موقعیت قرارگیری منطقه و بخش‌های مختلف آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در اکوتون مطالعه شده توالی از بخش‌هایی با پوشش همگن تا پهنه‌های تخریبی و خالی از پوشش در حد فاصل بخش‌هایی با پوشش تنک به سمت پهنه‌های همگن فاقد پوشش

گیاهی دیده شده است. اقلیم منطقه، نیمه‌خشک تا خشک با متوسط بارندگی سالانه ۲۴۷ میلی‌متر و گونه‌های گیاهی غالب منطقه شامل *Aeliema* می‌باشند. این گیاهان نسبت به شوری و خشکی مقاوم بوده و در خاک‌های عمیق تا نیمه‌عمیق شور و حتی فاقد شوری با بافت سبک تا سنگین دشت‌های بیابانی و استپ‌های نیمه‌خشک دیده می‌شوند. از لحاظ طبقه‌بندی بافت سطحی خاک، خاک غالب اکوتون در گروه خاک‌های لومی - رسی قرار دارد.



شکل ۳: موقعیت اکوتون مطالعه شده بر روی تصویر ETM سال ۲۰۰۵ با ترکیب رنگی ۲-۳-۴ و بخش‌های مختلف آن از لحاظ توزیع ساختارهای پوشش گیاهی.

### مواد و روش‌ها

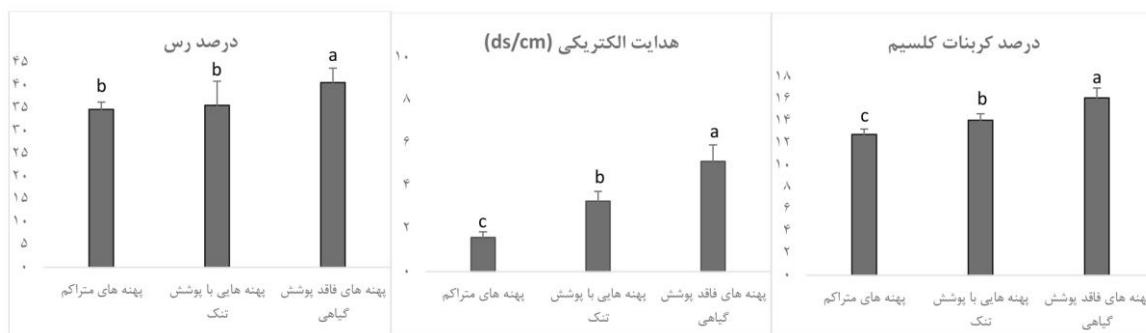
برای تعیین میزان تفاوت‌ها در ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی در امتداد اکوتون، منطقه مطالعه شده براساس تغییرات مشهود از لحاظ میزان تراکم پوشش گیاهی به سه بخش، پهنه‌هایی با پوشش همگن،

بخش‌های پراکنده فاقد پوشش در حدفاصل بخش-های تنک (محدوده‌های حدواسط) و همچنین پهنه-های همگن فاقد پوشش در امتداد آن‌ها تقسیم شد (شکل ۳). موقعیت‌های انتخابی از لحاظ شیب (هموار)، بافت خاک و میزان دسترسی گیاهان به آب و همچنین نوع گونه‌های گیاهی کاملاً در شرایط

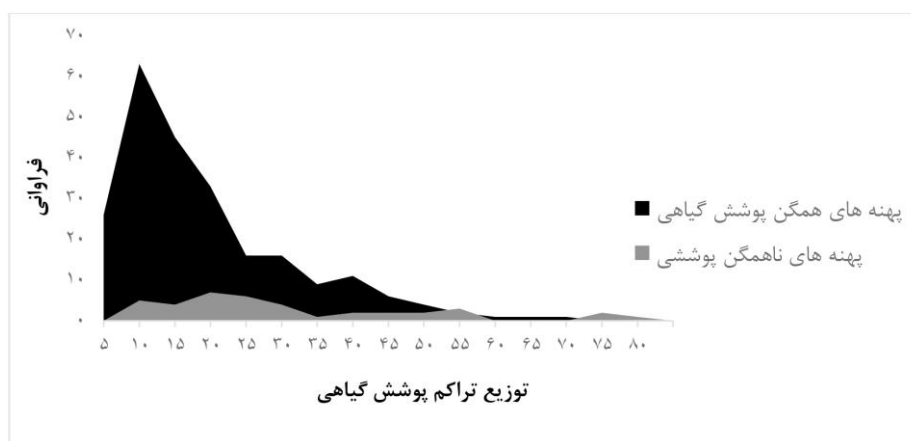
### نتایج

نتایج حاصل از مطالعات میدانی و آنالیزهای آماری از ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی در اکوتون مطالعه شده نشان داده است که تغییر ساختار پچ‌های پوشش گیاهی بوضوح مرتبط با تغییرات جزئی در ویژگی‌های خاک در موقعیت‌های مختلف اکوتون بوده است. به عبارتی دیگر، ظهور تفاوت‌های جزئی در ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک، بصورت یک مرز نامرئی، بخش‌های مختلف اکوتون را از یکدیگر جدا کرده است. نتایج آنالیزهای آماری مربوط به ویژگی‌های خاک در شکل ۴ نشان داده شده است. برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک (درصد رس، کربنات کلسیم و میزان هدایت الکتریکی) بطور معناداری ( $P < 0.00$ ) در موقعیت‌های مختلف اکوتون با یکدیگر متفاوت بوده‌اند. بیشترین درصد تجمع سطحی  $\text{CaCO}_3$  در بخش‌های فاقد پوشش در مقایسه با بخش‌های تنک و متراکم دیده شده است. همچنین بیشترین میزان EC، متعلق به خاک‌های تخریبی فاقد پوشش در مقایسه با سایر موقعیت‌ها بوده است. از لحاظ توزیع اندازه ذرات (درصد شن، رس و سیلت) فقط درصد رس، تفاوت معناداری را در بخش‌های مختلف (بیشترین میزان آن در بخش‌های فاقد پوشش و بعد در محدوده‌های تنک) نشان داده است. میزان رس، پارامتری تعیین کننده در الگوی توسعه ریشه گیاهان و همچنین در ظرفیت نگهداشت آب خاک می‌باشد. در شکل ۵ نیز، روند تغییرات معنادار پوشش گیاهی ( $P < 0.00$ ) از لحاظ توزیع تراکم در موقعیت‌های مختلف اکوتون نشان داده شده است.

یکسان قرار داشتند. نمونه‌برداری‌ها در هر موقعیت بطور تصادفی در امتداد ۸ ترانسکت ۲۰ متری صورت گرفت. امتداد هر ترانسکت با فاصله ۱۰ متر، به دو پلات ۵\*۵ متر تقسیم شد. در چهار گوشه هر پلات، نمونه‌های خاک از عمق ۰-۲۰ سانتی‌متر برای برآورد بافت خاک (درصد شن، رس و سیلت) به دلیل اثراتشان بر روی میزان نفوذپذیری و نگهداشت آب خاک و حساسیت این ذرات نسبت به فرسایش، درصد تجمع کربنات کلسیم ( $\text{CaCO}_3$ ) بدلیل تاثیر بازدارندگی آن بر روی نفوذپذیری خاک و همچنین ممانعت از رشد گیاه (هنسی و همکاران، ۱۹۸۳؛ لاجدا و اشلیزنگر، ۱۹۸۸) و همچنین میزان هدایت الکتریکی (EC) جمع‌آوری شدند. از آنجا که در مناطق خشک، ویژگی‌های بافت سطحی خاک، فاکتوری کلیدی در میزان نفوذپذیری، تجمع رواناب، پایداری و مقاوت گیاهان می‌باشد، عمق ۰-۲۰ برای نمونه‌برداری انتخاب شد (همرلک و همکاران، ۲۰۰۳؛ مایستر و همکاران، ۲۰۰۳). همچنین در هر پلات، توزیع تراکم پوشش گیاهی به منظور بررسی ارتباط خاک-گیاه محاسبه شد. بعد از اتمام نمونه‌برداری و انجام آزمایشات مربوطه، برای مقایسه ارزش فاکتورهای خاک اندازه‌گیری شده بین موقعیت‌های مختلف، آنالیز مقایسه میانگین صورت گرفت. مقایسات در سطح اطمینان ۹۵٪ انجام شد و در صورت وجود تفاوت معنادار ( $P < 0.05$ ) در هر کدام از فاکتورها، آزمون تکمیلی توکی نیز در ادامه صورت گرفت. همچنین آزمون T مستقل برای محاسبه تفاوت در توزیع تراکم پوشش گیاهی بین بخش‌هایی متراکم و تنک انجام شد. برای انجام محاسبات آماری از نرم افزار SAS نسخه 9.3 استفاده شده است.



شکل ۴: مقایسه میانگین + خطای استاندارد روند تغییرات برخی از ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک در موقعیت‌های مختلف اکوتون به تناسب تغییر در توزیع پچ‌های پوشش گیاهی براساس نتایج آزمون توکی.



شکل ۵: توزیع فراوانی تراکم پوشش گیاهی در پهنه‌های همگن پوششی و بخش‌هایی با توزیع ناهمگن پوشش گیاهی بصورت موزائیک‌هایی از پچ‌های تنک و پچ‌های فاقد پوشش.

شد. در حالی که در پهنه‌های فاقد پوشش گیاهی، نفوذپذیری کمتر آب و از دست رفتن رطوبت سطحی ناشی از تبخیر، مانع از رشد گیاه شده و در نتیجه زمینه‌ای برای اعمال بیشتر فرسایش و تخریب خاک فراهم می‌آورد.

تغییرات متقابل خاک و پوشش گیاهی هم در مقیاس‌های زمانی بسیار طولانی همزمان با تحول چشم‌اندازهای کواترنری و همچنین در مقیاس زمانی کوتاه همگام با توسعه بیابان‌زایی در اکوسیستم‌های خشک خراسان رضوی در چندین دهه اخیر اتفاق

### بحث

توزیع نامتقارن الگوی خاک و فیدبک‌های مثبت بین خاک- گیاه ناشی از آن: ارتباط متقابل بین خاک و پوشش گیاهی، موضوعی غیر قابل انکار است. از یک طرف تاثیرات خاک بر روی پایداری پوشش گیاهی از لحاظ تامین آب و سایر منابع موردنیاز گیاه، از طرفی دیگر تاثیر گیاهان بر روی پایداری و حفظ تعادل خاک. اساساً تجمع پوشش گیاهی بدلیل سایه اندازی گیاهان منجر به افزایش رطوبت سطحی خاک می‌شود. این شرایط به نوبه خود پایداری و مقاومت بیشتر گیاهان را در شرایط محیطی نامناسب سبب خواهد



تفاوت در حساسیت خاک‌ها نسبت به سخت شدگی و یا انواع فرایندهای فرسایشی، می‌تواند دلیلی برای ظهور چنین دینامیک‌هایی باشد. در سال‌های اخیر مطالعات نظری مختلف اثبات کرده‌اند که ظهور الگوهای منظم و نامنظم پوشش گیاهی ناشی از فرایند خودتنظیمی با هدف مقابله و مقاومت سیستم‌های باز در برابر آشوب‌های محیطی و رسیدن به نقطه حداکثر انتروپی که هدف غایی تمامی سیستم‌های دینامیک (مانند اکوسیستم‌ها) است، می‌باشد (هیل رایز لمبرز و همکاران، ۲۰۰۱؛ وان هاردنبرگ و همکاران، ۲۰۰۱؛ ریتکرک و همکاران، ۲۰۰۲؛ وان دی کاپل و ریتکرک، ۲۰۰۴؛ کفی و همکاران، ۲۰۰۷؛ ریتکرک و وان دی کاپل، ۲۰۰۸). اما سوال اینجاست که فرایند خودتنظیمی چگونه و از چه طریقی نمود خارجی پیدا می‌کند؟ نتایج برخی از مطالعات تجربی نشان داده است بسیاری از فرایندها و آشوب‌ها (مانند فرایندهای هیدروائولین) با ظهور هتروژنیتهای جزئی در الگوی متداول خاک غالب چشم‌انداز منجر به فعال شدن فیدبک‌های مثبت بین خاک و گیاه و متعاقب آن ظهور ساختارهای نامنظم پوشش گیاهی (پهنه‌های فاقد پوشش در بین بخش‌های متراکم) می‌شوند (ددریکا و همکاران، ۲۰۰۷؛ راوی و همکاران، ۲۰۰۷). آنالیز آزمایشات مربوط به فاکتورهای فیزیکی خاک (درصد شن، رس و سیلت) و برخی از خصوصیات شیمیایی خاک (مانند، درصد کربنات کلسیم، میزان هدایت الکتریکی) در اکوتون مطالعه شده، نشان داده است، علیرغم اینکه هیچ تفاوتی از لحاظ بافت خاک در منطقه دیده نمی‌شود و خاک غالب آن عموماً لومی-رسی است، ظهور تفاوت‌های جزئی در مقیاس‌های کوچک در برخی از ویژگی‌های خاک غالب چشم‌انداز منجر به ظهور دینامیکی بزرگ مقیاس از ساختارهای ناهمگن پوشش گیاهی بصورت

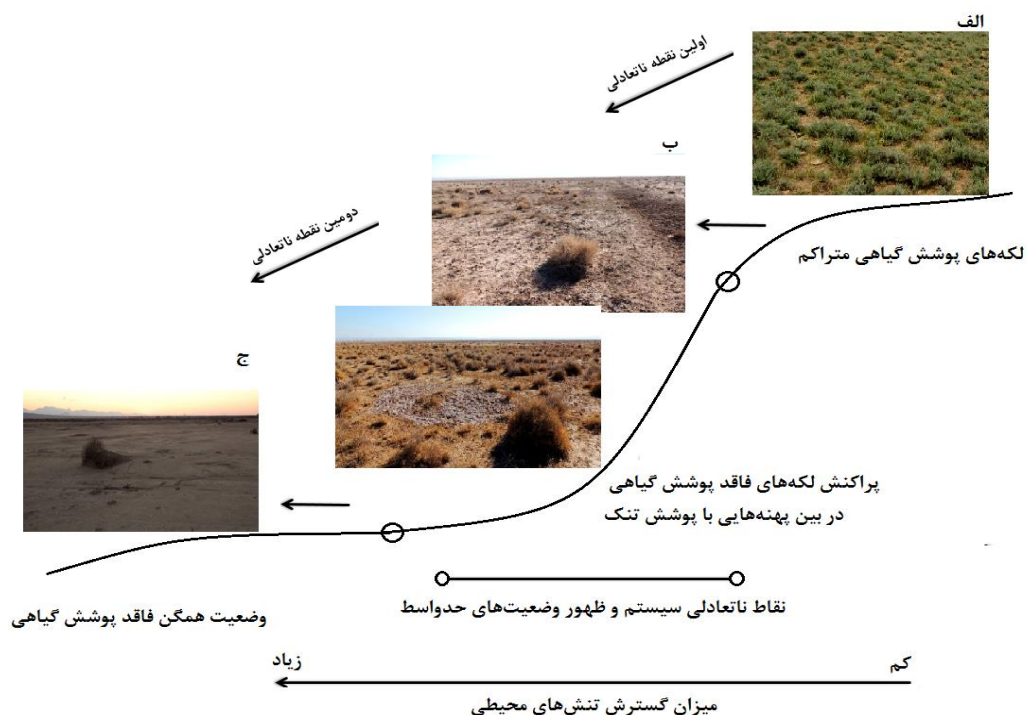
افتاده است. تشدید گرما و کاهش بارندگی در دهه-های اخیر، افزایش سطح چرا در منطقه، تغییرات مربوط به کاربری اراضی و استحصال بی‌رویه از آب-های زیرزمینی که خود منجر به وقوع سوبسیدنس-های شدید و گسترده در منطقه شده است، زمینه‌ای برای تخریب خاک و ظهور هتروژنیتهای پراکنده و متعاقباً شکل‌گیری ساختارهای ناهمگن پوشش گیاهی فراهم آورده است. همچنانکه که تخریب خاک و پوشش گیاهی، بیشتر و بیشتر می‌شود، افزایش فرایندهای فرسایشی به مرور زمان منجر به تغییرات اکوژئومورفیک از علفزارهای متراکم به سمت بوته‌زارهای پراکنده همراه با توسعه خاک‌های تخریبی با سطوح تجمعی از املاح می‌گردد. با افزایش تدریجی هتروژنیتهای خاک، تضاد بین بخش‌های پوششی و فاقد پوشش بیشتر شده و فرصتی برای تشدید فیدبک‌های مثبت خاک-گیاه در سطح چشم‌انداز فراهم می‌آورند. فیدبک‌هایی که به نوبه خود روند فرایندهای هیدرولوژیک را در سطح چشم‌انداز تغییر می‌دهند. قسمت‌های متراکم از پوشش گیاهی در اکوتون مطالعه شده می‌تواند گواهی بر این ادعا باشد که علیرغم اینکه کل چشم‌انداز تحت تاثیر آشوب‌های بیرونی (بطور مثال از لحاظ میزان چرا) قرار دارد با این وجود، آثار کمتری از تخریب پوشش گیاهی در این بخش در مقایسه با سایر بخش‌ها دیده شده است. چنین پایداری نسبت به بیابان‌زایی در قسمتی از چشم‌انداز می‌تواند ناشی از ظهور فیدبک‌های مثبت بین خاک، گیاهان و میزان دسترسی به آب در مقیاس کل چشم‌انداز باشد. تجمع رواناب بر روی خاک‌های تخریبی فاقد پوشش و حرکت آب به سمت مناطق متراکم از گیاه و نفوذ در این قسمت، تفاوت در میزان سازگاری گونه‌های مختلف گیاهی (که البته در منطقه مطالعه شده دیده نشده است) و همچنین

خاک و در نتیجه پایداری گیاهان فراهم آورده است. از طرف دیگر، چنین توزیع ناهمگنی از الگوی خاک و متعاقبا پوشش گیاهی در سطح اکوتون منجر به تغییر فرایندهای هیدرولوژیک (دینامیک رواناب) در سطح چشم‌انداز شده است. در این شرایط تجمع جریانات سطحی در قسمت‌های فاقد پوشش گیاهی بدلیل عدم نفوذپذیری خاک و حرکت رواناب به سمت بخش‌هایی متراکم‌تر (نفوذپذیری بیشتر بدلیل پوشش بیشتر)، زمینه‌ای برای توزیع نامتقارن آب و سایر منابع موردنیاز گیاه فراهم آورده است. مکانیزمی اکولوژیک که از یک طرف شرایطی برای پایداری و مقاومت گیاهان در برابر آشوب فراهم می‌آورد و از طرف دیگر منجر به افزایش عدم تقارن در توزیع پوشش گیاهی و در نتیجه تشدید فیدبک‌های مثبت در سطح چشم‌انداز می‌شود. در نتیجه بخش‌های با پوشش گیاهی کمتر، بدلیل دسترسی محدودتر به منابع، بتدریج نابود شده ولی بخش‌هایی با پوشش متراکم‌تر بدلیل جذب بیشتر آب و سایر منابع، پایداری خود را تا حدی حفظ خواهند کرد. بر این اساس، الگوها و ساختارهای متفاوت پوشش گیاهی می‌توانند شاخصی زیستی از میزان تغییر و توسعه فرایندهای غیر زیستی نظیر فرایندهای هیدرولوژیک (دینامیک رواناب) در چشم‌اندازهای خشک باشند. ظهور فیدبک‌های مثبت ناشی از افزایش هتروژنیتهی خاک نشان می‌دهد که ویژگی‌های خاک می‌توانند هم علت و هم معلول فرایندهای اکولوژیک (ساختار پوشش گیاهی) باشند. به عبارتی دیگر، هتروژنیتهی خاک از یک طرف علت ظهور پیچ‌های نامنظم در چشم‌انداز است و از طرف دیگر ظهور چنین ناهمگنی در ویژگی‌های خاک می‌تواند معلول حضور و یا عدم حضور پوشش گیاهی باشد.

توالی از بخش‌های پوششی همگن تا بخش‌های تخریب شده (محدوده‌های تنک و خالی از پوشش) و در نهایت قسمت‌های همگن فاقد پوشش شده است. پهنه‌های فاقد پوشش که بطور پراکنده در بین بخش‌هایی با پوشش تنک قرار گرفته بودند، عمدتاً بیشترین تجمع سطحی کربنات کلسیم، همچنین بیشترین میزان درصد رس را نسبت به قسمت‌هایی با پوشش همگن، به خود اختصاص داده بودند. شاید بتوان گفت که تجمع سطحی کربنات کلسیم و همچنین میزان رس، موثرترین فاکتورها در پایداری و عدم پایداری پیچ‌ها بوده است. این نتایج نشان می‌دهد که فرایندهای ژئومورفیک (مانند فرایندهای هیدروائولین) با ظهور تغییرپذیری‌های پراکنده و البته معنادار در ویژگی‌های خاک در موقعیت‌های مختلف اکوتون می‌توانند منجر به ظهور وضعیت‌های متفاوتی در سطح چشم‌انداز گردند. تجمع پراکنده کربنات کلسیم و همچنین سایر املاح در لایه‌های سطحی خاک، زمینه‌ای برای ظهور فیدبک‌های مثبت بین خاک و گیاه در سطح اکوتون فراهم آورده است. با افزایش EC و بالا رفتن میزان شوری خاک، از یک طرف مرگ و میر گیاهان افزایش یافته و از طرفی دیگر با غیرقابل نفوذ شدن ذرات خاک ناشی از تجمع سطحی کربنات کلسیم، زمینه‌ای برای تجمع جریانات سطحی و شکل‌گیری رواناب فراهم آمده است. همچنین، زمانی که تراکم پوشش گیاهی کاهش می‌یابد، ظرفیت نگهداشت آب نیز کمتر شده و رطوبت خاک بواسطه تبخیر، بیشتر و بیشتر از دست می‌رود. این شرایط منجر به گسترش سطح خاک‌های فاقد پوشش در طول زمان خواهد شد. در صورتی که در پهنه‌هایی با پوشش متراکم، عدم وجود لایه تجمعی کربنات کلسیم و در نتیجه افزایش پوشش گیاهی، شرایط مساعدی برای نفوذپذیری آب، افزایش رطوبت

که همه قسمت‌های خاک چشم‌انداز به یک اندازه مستعد بروز تغییرات نخواهند بود (بستلمیر و همکاران، ۲۰۰۶). همین ویژگی، شرایط را برای ظهور وضعیت‌های پایدار متناوب در سیستم مساعد می‌کند. بر این اساس، احتمالاً فقط تکه‌های پراکنده و ناهمگنی از خاک چشم‌انداز (بخش‌های فاقد پوشش که بطور پراکنده در حفاصل بخش‌های تنک دیده شده‌اند)، مستعد وقوع گذری بحرانی به سمت وضعیت تخریبی در طول زمان خواهند بود. از آنجا که دو طرف اکوتون (بخش‌های با پوشش متراکم و بخش‌های همگن فاقد پوشش در امتداد آن) از لحاظ ساختاری (مانند تفاوت‌های جزئی در ویژگی‌های خاک و تراکم پوشش گیاهی) با یکدیگر متفاوت بوده‌اند، می‌توانند بعنوان وضعیت‌های پایدار متناوب در نظر گرفته شوند که توسط بخش‌هایی با پوشش تنک و خاک‌های تخریبی پراکنده در حدواسط آن‌ها (بعنوان وضعیت‌های نامتعادل یا محدوده‌های پایداری دوجانبه) از یکدیگر جدا می‌شوند (شکل ۶).

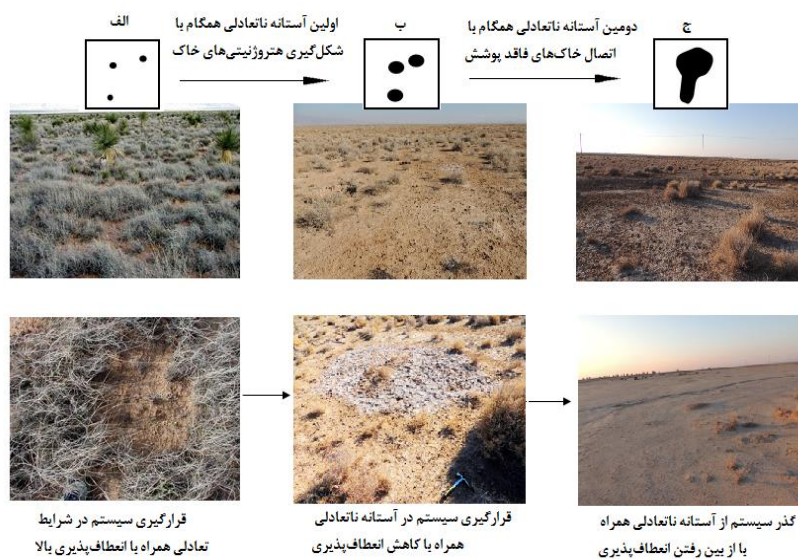
تأثیر هتروژنیتهای خاک در ظهور وضعیت‌های پایدار متناوب در چشم‌انداز: ظهور هتروژنیتهای پراکنده در الگوی رایج خاک و فعال شدن فیدبک‌های مثبت بین خاک و گیاه ناشی از آن، با ظهور ساختارهای ناهمگن پوشش گیاهی می‌تواند دلیلی برای نامتعادل شدن شرایط سیستم و نشانه‌ای از ظهور وضعیت‌های پایدار متناوب در اکوسیستم‌های خشک باشد (بستلمیر و همکاران، ۲۰۰۶؛ منگار و بستلمیر، ۲۰۰۶؛ راوی و همکاران، ۲۰۱۰). تغییرات بسیار جزئی در ویژگی‌های خاک غالب چشم‌انداز، بشدت انعطاف‌پذیری اکوسیستم‌ها را تحت‌تأثیر قرار می‌دهد (مایستر و همکاران، ۲۰۰۳). در منطقه مطالعه شده روند تحول الگوهای پوشش گیاهی و توزیع نامتقارن آن‌ها بوضوح تحت‌تأثیر هتروژنیتهای خاک علیرغم همگن بودن بافت غالب خاک منطقه بوده است (شکل ۶). بر این اساس می‌توان گفت که هتروژنیتهای خاک می‌تواند شاخصی غیرمستقیم برای اندازه‌گیری کیفی میزان انعطاف‌پذیری اکوسیستم‌های خشک باشد. ظهور هتروژنیتهای خاک بدان معناست



شکل ۶: روند تغییر تراکم پوشش گیاهی به تناسب افزایش هتروژنیتهی خاک و ظهور وضعیت‌های تعادلی متفاوت بصورت موزائیکی از لکه‌های متراکم پوشش گیاهی در کنار لکه‌های فاقد پوشش.

اتصال خاک‌های فاقد پوشش در طول زمان با از بین بردن اولین وضعیت پایدار (وضعیت همگن پوششی)، اکوسیستم را در یک وضعیت تعادلی جدید (وضعیت بیابانی) متفاوت با شرایط قبلی‌اش قرار خواهد داد (شکل ۷).

قطعا گسترش تدریجی هتروژنیتهی‌های خاک با تشدید فیدبک‌های مثبت بین گیاه و میزان دسترسی به آب، الگوهای ناهمگن خاک و پوشش گیاهی را تبدیل به الگوهایی همگن از خاک‌های تخریبی و فاقد پوشش در سطح چشم‌انداز خواهد کرد. بطوریکه



شکل ۷: دیگرامی مفهومی از روند تغییر پایداری چشم‌انداز به تناسب افزایش هتروژنیتهای خاک. دایره‌ها بیانگر شروع شکل‌گیری هتروژنیتهای خاک در شرایط تعادلی سیستم (تصویر الف)، کاهش انعطاف‌پذیری سیستم همزمان با گسترش خاک‌های هتروژن (تصویر ب) و از بین رفتن انعطاف‌پذیری سیستم و اتصال خاک‌های تخریبی در مواجهه با افزایش آشوب‌ها (تصویر ج) در طول زمان هستند.

چشم‌انداز می‌شوند (پرینگل و تنلی، ۲۰۰۳). بنابراین فرایند خودتنظیمی و ظهور هتروژنیتهای خاک هیچکدام به تنهایی نمی‌توانند توجیهی برای ظهور الگوهای پوشش گیاهی بعنوان نشانه‌ای از قرارگیری سیستم در وضعیت‌های نامتعادل و رخداد نزدیک گذرهای بحرانی باشند. چنین دیدگاه اکوژئومورفیک از شکل‌گیری الگوها می‌تواند بیانگر تاثیر تعاملات قوی بین فرایندهای اکولوژیک (مانند تاثیر گیاهان بر روی روند تخریب و فرسایش خاک) و ژئومورفیک (مانند تغییرات ویژگی‌های خاک) در دینامیک و گذر بین وضعیت‌های پایدار متناوب در چشم‌اندازهای خشک باشد. نتایج این پژوهش نیز مانند برخی از مطالعات در این زمینه می‌تواند (بستلمیر و همکاران، ۲۰۰۶؛ راوی و همکاران، ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸) موید این موضوع باشد که دینامیک ساختارهای خودتنظیم

ظهور چنین وضعیت‌های نامتعادل (که نشانه آن پراکنش خاک‌های تخریبی با تجمع سطحی کربنات‌ها و سایر املاح در منطقه مورد مطالعه است) می‌تواند زنگ خطری اکولوژیک برای پیش‌بینی احتمال وقوع گذر بیابانی در صورت گسترش هتروژنیتهای خاک باشند. قطعا شکل‌گیری ساختارهای ناهمگن پوشش گیاهی ناشی از فرایند خودتنظیمی گیاهان به منظور مقابله با تنش‌های تحمیلی است. اما ظهور این فرایند در مقیاس‌های متعدد مانند ظهور یک اکوتون با الگوهای پوشش گیاهی نامنظم (منطقه مطالعه شده) ناشی از تحمیل آشوب‌هایی مانند تغییرات اقلیمی، فرایندهای بادی، فرایندهای هیدرولوژیک و یا فعالیت‌های آنتروپوژنیک است که با تخریب و تغییر تدریجی ویژگی‌های خاک منجر به توزیع ناهمگن پوشش گیاهی و ظهور فرایند خودتنظیمی در سطح

پوشش گیاهی در چشم‌اندازهای خشک می‌تواند ناشی از ظهور فیدبک‌های مثبت بین خاک و گیاه بدلیل ظهور هتروژنیتی در ویژگی‌های خاک باشد.

**نتیجه گیری**

بارزترین شکل تخریب در اکثر مناطق خشک و نیمه خشک دنیا بروز تغییرات و دگرگونی در ترکیب جوامع گیاهی آن‌ها می‌باشد (بطور مثال تغییر علفزارها به سمت بوته‌زارها). ظهور چنین تغییراتی می‌تواند ناشی از تعاملات پیچیده بین فاکتورهای متعددی نظیر عوامل اقلیمی، آشوب‌های انسانی و یا فرایندهای ژئومورفیک با متغیرهای سیستم باشد (راوی و همکاران، ۲۰۱۰). بسیاری از فرایندهای مسلط در مناطق خشک با ایجاد تغییرات جزئی در ویژگی‌ها و الگوی غالب خاک چشم‌انداز منجر به ظهور فیدبک‌های مثبت بین آب و پوشش گیاهی شده و زمینه بروز تغییراتی بزرگ مقیاس را در ساختار چشم‌انداز فراهم می‌آورند. ظهور هتروژنیتی‌های خاک و افزایش فیدبک‌های مثبت در اکوتون مطالعه شده می‌تواند بیانگر شکل‌گیری دو ویژگی مهم در اکوسیستم‌های خشک باشد: ظهور وضعیت‌های پایدار متفاوت و نزدیک شدن سیستم به نقطه فروپاشی. از آنجا که خاک، مهمترین منبع تامین آب و سایر منابع برای رشد گیاه است (منگار و بستلمیر، ۲۰۰۶)، همچنین برخی از مولفه‌های خاک (مانند کربنات کلسیم و

رس) فاکتورهای تعیین کننده در میزان نفوذپذیری خاک، نگهداشت آب خاک و متعاقبا پایداری گیاهان هستند (مک آلف، ۱۹۹۴؛ جایل و گراسمن، ۱۹۹۷)، قطعاً هرگونه تغییری در ویژگی‌های آن منجر به بروز تغییراتی وسیع در ساختارهای پوششی گیاهی خواهد شد. زمانی که هتروژنیتی‌های خاک در سطح چشم‌انداز گسترش یابند، ناهمگنی در توزیع پوشش گیاهی نیز بتدریج افزایش خواهد یافت. ادامه این روند منجر به نزدیک‌تر شدن واحدهای پوششی مجاور و تجمع گیاهان در یک بخش از چشم‌انداز و تخریب گیاهان و ظهور خاک‌های فاقد پوشش در بخش دیگری از چشم‌انداز (شکل‌گیری وضعیت‌های پایدار متفاوت) می‌شود. در نهایت افزایش سطح خاک‌های فاقد پوشش و اتصال خاک‌های هتروژن همزمان با تشدید آشوب‌ها، منجر به گذر سیستم به سمت شرایط بیابانی خواهد شد. نتایج ما نیز می‌تواند گواهی بر این ادعا باشد که هر چند توزیع نامتقارن پوشش گیاهی و ظهور ساختارهای متفاوتی از آن، قطعاً ناشی از وقوع فرایند خودتنظیمی مکانی گیاهان به منظور پایداری در برابر اختلالات محیطی است، اما نمود بیرونی این فرایند می‌تواند ناشی از تاثیر هتروژنیتی‌های ژئومورفیک از جمله هتروژنیتی در ویژگی‌های خاک غالب چشم‌انداز باشد. بطویکه ظهور آن با افزایش فیدبک‌های مثبت بین آب و گیاه، می‌تواند زمینه نامتعادل شدن وضعیت چشم‌انداز را در طول زمان فراهم آورد.

پوشش گیاهی در چشم‌اندازهای خشک می‌تواند ناشی از ظهور فیدبک‌های مثبت بین خاک و گیاه بدلیل ظهور هتروژنیتی در ویژگی‌های خاک باشد.

### نتیجه گیری

بارزترین شکل تخریب در اکثر مناطق خشک و نیمه خشک دنیا بروز تغییرات و دگرگونی در ترکیب جوامع گیاهی آن‌ها می‌باشد (بطور مثال تغییر علفزارها به سمت بوته‌زارها). ظهور چنین تغییراتی می‌تواند ناشی از تعاملات پیچیده بین فاکتورهای متعددی نظیر عوامل اقلیمی، آشوب‌های انسانی و یا فرایندهای ژئومورفیک با متغیرهای سیستم باشد (راوی و همکاران، ۲۰۱۰). بسیاری از فرایندهای مسلط در مناطق خشک با ایجاد تغییرات جزئی در ویژگی‌ها و الگوی غالب خاک چشم‌انداز منجر به ظهور فیدبک‌های مثبت بین آب و پوشش گیاهی شده و زمینه بروز تغییراتی بزرگ مقیاس را در ساختار چشم‌انداز فراهم می‌آورند. ظهور هتروژنیتی‌های خاک و افزایش فیدبک‌های مثبت در اکوتون مطالعه شده می‌تواند بیانگر شکل‌گیری دو ویژگی مهم در اکوسیستم‌های خشک باشد: ظهور وضعیت‌های پایدار متفاوت و نزدیک شدن سیستم به نقطه فروپاشی. از آنجا که خاک، مهمترین منبع تامین آب و سایر منابع برای رشد گیاه است (منگار و بستلمیر، ۲۰۰۶)، همچنین برخی از مولفه‌های خاک (مانند کربنات کلسیم و

### منابع

-Aguiar, M.R. and Sala, O.E., 1999. Patch structure, dynamics and implications for the functioning of arid ecosystems, Trends in Ecology and Evolution, v. 14, p. 273–277.

-Bestelmeyer, B.T., Waed, J.P. and Havstad, K.M., 2006. Soil-geomorphic heterogeneity governs patchy vegetation dynamics at an arid ecotone, Ecology, v. 87, p. 963-973.

- Bestelmeyer, B.T., Ellison, A.M., Fraser, W.R., Gorman, K.B., Holbrook, S.J., Laney, C.M., Ohman, M.D., Peters, D.B.C., Pillsbury, F.C., Rassweiler, A., Schmitt, R.J. and Sharma, S., 2011. Analysis of abrupt transitions in ecological systems, *Ecosphere*, v. 2, p. 1-26.
- Dakos, V., Scheffer, M., Van Nes, E.H., Brovkin, V., Petoukhov, V. and Held, H., 2008. Slowing down as an early warning signal for abrupt climate change, *PNAS*, v. 105, p. 14308-14312.
- Dakos, V., 2011. Expecting the Unexpected: Indicators of resilience as early-warning signals for critical transitions, Ph.D thesis. Wageningen University, The Neaderland, 163 p.
- Dakos, V., Carpenter, S., Brock, W., Ellison, A., Guttal, V., Ives, A., Kéfi, S., Livina, V., Seekell, D., Van Nes, E. and Scheffer, M., 2012. Methods for detecting early warnings of critical transitions in time series illustrated using simulated ecological data, *PLoS ONE*, v. 7, p. 1-20.
- d'Herbe's, J.M., Valentin, C., Tongway, D.J. and Leprun, J.C., 2001. Banded vegetation patterns and related structures, *Ecological Studies*, v. 149, p. 1-19.
- D'Odorico, P., Laio, F. and Ridolfi, L., 2006. Patterns as indicators of productivity enhancement by facilitation and competition in dryland vegetation, *Geophysical Research (Biogeosciences)*, v. 111, p. G03010.
- D'Odorico, P., Caylor, K., Okin, G.S. and Scanlon, T.M., 2007. On soil moisture-vegetation feedbacks and their possible effects on the dynamics of dryland ecosystems, *Journal of Geophysical Research*, v. 112, p. G04010.
- Guttal, V. and Jayaprakash, C., 2007. Impact of noise on bistable ecological systems, *Ecological Modelling*, v. 201, p. 420-428.
- Greene, R.S. B., Valentin, C. and Esteves, M., 2001. Runoff and erosion processes, in banded vegetation patterning in arid and semiarid environment, edited by D. J. Tongway, C. Valentin, and J. Seghieri, Springer, New York, p. 52-77.
- Hennessy, J.T., Gibbens, R.P., Tromble, J.M. and Cardenas, M., 1983. Water properties of caliche, *Journal of Range Management*, v. 36, p. 723-726.
- Hamerlynck, E.P., McAuliffe, J.R. and Smith, S.D., 2000. Effects of surface and sub-surface soil horizons on the seasonal performance of *Larrea tridentate* (creosotebush), *Journal of Functional Ecology*, v. 14, p. 596-606.
- HilleRisLambers, R., Rietkerk, M., van den Bosch, F., Prins, H.H. and de Kroon, H.T., 2001. Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems, *Ecology*, v. 82, p. 50-61.
- Kéfi, S., Rietkerk, M., van Baalen, M. and Loreau, M., 2007. Local facilitation, bistability and transitions in arid ecosystems, *Theoretical Population Biology*, v. 71, p. 367-379.
- Lajtha, K. and Schlesinger, W.H., 1988. The effect of CaCO<sub>3</sub> on the uptake of phosphorus by two desert shrub species, *Journal of Botanical Gazette*, v. 149, p. 328-334.
- 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.
- Lloyd, K.M., McQueen, A.A.M., Lee, B.J., Wilson, R.C.B., Walker, S. and Wilson, J.B., 2000. Evidence on ecotone concepts from switch, environmental and anthropogenic ecotones, *Vegetation Science*, v. 11, p. 903-910.
- McAuliffe, J. R., 1994. Landscape evolution, soil formation, and ecological

- patterns and processes in Sonoran desert bajadas, *Journal of Ecological Monographs*, v. 64, p. 111–148.
- Maestre, F.T., Cortina, J., Bautista, S., Bellot, J. and Vallejo, R., 2003. Small-scale environmental heterogeneity and spatio-temporal dynamics of seedling establishment in a semiarid degraded ecosystem, *Ecosystems*, v. 6, p. 630–643.
- Monger, H.C. and Bestelmeyer, B.T., 2006. The soil-geomorphic template and biotic change in arid and semi-arid ecosystems, *Journal of Arid Environments*, v. 62, p. 207-218.
- Ravi, S., D'Odorico, P. and Okin, G.S., 2007. Hydrologic and aeolian controls on vegetation patterns in arid landscapes, *Geophysical Research Letters*, v. 34, p. L24S23.
- Ravi, S., D'Odorico, P., Wang, L. and Collins, S., 2008. Form and function of grass ring patterns in arid grasslands: the role of abiotic controls, *Oecologia*, v. 158, p. 545-555.
- Ravi, S., Breshears, D.D., Huxman, T.E. and D'Odorico, P., 2010. Land degradation in drylands: Interactions among hydrologic–aeolian erosion and vegetation dynamics, *Geomorphology*, v. 116, p. 236-245.
- Rietkerk, M. and van de Koppel, J., 1997. Alternate stable states and threshold effects in semi-arid grazing systems, *Oikos*, v. 79, p. 69-76.
- Rietkerk, M., Boerlijdt, M.C., Langevelde, F.V., Hillerislamper, R., Van de Koppel, J., Kumar, L., Prins, H.H. and de Roos, A.M., 2002. Self-Organization of Vegetation in Arid Ecosystems, *The American Naturalist*, v. 160, p. 524 -530.
- Rietkerk, M., Dekker, S., de Ruiter, C.P.C. and Van de Koppel, J., 2004. Self-organized patchiness and catastrophic shifts in ecosystems, *Science*, v. 305, p. 1926–1929.
- Rietkerk, M. and van de Koppel, J., 2008. Regular pattern formation in real ecosystems, *Trends in Ecology & Evolution*, v. 23, p. 169-175.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C. and Walker, B.H., 2001. Catastrophic shifts in ecosystems, *Nature*, v. 413, p. 591–596.
- Scheffer, M., Bascompte, J., Brock, W.A., Brovkin, V., Carpenter, S.R., Dakos, V., Held, H., Van Nes, E.H., Rietkerk, M. and Sugihara, G., 2009. Early-warning signals for critical transitions, *Nature*, v. 461, p. 53-59.
- 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, p. 198101-1-198101-4.
- Zeng, X., Shen, S.S.P. and Dickinson, R.E., 2004. Multiple equilibrium states and the abrupt transitions in a dynamical system of soil water interacting with vegetation, *Geophysical Research Letters*, v. 31, p. L05501.