

## پایداری محیط در ژئوسیستم‌ها با رویکرد به مخاطرات و تحلیل‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای (مطالعه موردی: سیستم دریاچه‌ای ارومیه)



امیر صفاری\*

دانشیار و عضو هیأت علمی گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی

سعید رحیمی‌هرآبادی (Email: Std\_s.rahimi@khu.ac.ir)

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی

سعید گودرزی‌مهر (Email: Goodarzi.saeed@ut.ac.ir)

کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، گروه سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران

هادی کریمی (Email: Hadi.karimi22@Gmail.com)

دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۸/۲۴ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۹/۲۶)

### چکیده

یکی از موضوعات محوری در ژئومورفولوژی سیستمی، شناسایی روند تغییرات در اشکال سطح زمین است. در حال حاضر در این دیدگاه تلاش بر این است که سطح پایداری ژئوسیستم‌ها، مرز تغییرات، ناپایداری و نیز پیش‌بینی واکنش فرم‌ها و فرایندهای سطح زمین شناسایی شود. این نوشتار بر آن است که در چارچوب دیدگاه ژئومورفولوژی سیستمی، پارادایم‌های تعادل، آستانه‌ها و مخاطرات محیطی را با هدف ادراک راهکارهای کاهش مخاطرات مبتنی بر منابع کتابخانه‌ای و تحلیل‌های آماری و داده‌های ماهواره‌ای مورد بررسی تطبیقی قرار دهد. در این راستا ابتدا هر کدام از این عناصر، به‌شکل مجزا و سپس با ارتباط مفهومی بررسی شد. در این تحقیق، وضعیت سیستم دریاچه ارومیه به‌کمک تحلیل‌های آماری و سنجش از دور از قبیل تحلیل مولفه‌های اصلی، ترکیب باندی کاذب و بررسی پروفیل تغییرات انعکاس آب دریاچه در طی سال‌های ۱۹۸۷ (دوره تعادل دریاچه)، ۱۹۹۸، ۲۰۰۷ (حد آستانه) و ۲۰۱۱ (مرگ اکوسیستم و فروپاشی) مطالعه شد. نتایج این تحقیق نشان داد هر ژئوسیستم در مراحل مختلف از تغییرات محیطی، تحت تأثیر کاربری‌های انسانی در وضعیت‌های مختلفی قرار می‌گیرد، به‌طوری که با شناسایی شرایط تعادل (پایداری عناصر ژئوسیستم)، آستانه‌ها (مرز تغییرات ژئوسیستم)، مخاطرات محیطی (ناسازگاری) و بلایا (وقوع مخاطره)، می‌توان روند تغییرات ژئوسیستم‌ها را ارزیابی و مدیریت کرد. در این رویکرد، پایداری ژئوسیستم‌ها تحت تأثیر مراحل یادشده قرار دارد و ضروری است شاخص‌های مؤثر بر هر یک از مراحل مذکور به‌کمک تکنیک‌های متعدد ارزیابی، مانند تکنیک‌های سنجش از دور و بررسی‌های میدانی مطالعه شود. نتایج تحلیل تصاویر ماهواره‌ای حاکی از تغییرات محسوس در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۱۱ نسبت به سال‌های ۱۹۸۷ و ۱۹۸۸ است. نتایج حاصل از روش‌های استفاده‌شده براساس این تصاویر، به‌خوبی روند تغییرات را در سال‌های بررسی‌شده نشان می‌دهد و می‌تواند ابزاری مفید در جهت شناخت بهتر تغییرات رخ داده در این محیط‌ها باشد.

**واژه‌های کلیدی:** آستانه‌های بحرانی، تعادل ژئومورفیک، سنجش از دور، سیستم‌های ژئومورفیک، مخاطرات محیطی.

## مقدمه

یکی از موضوعات محوری در مطالعات ژئومورفولوژی، شناسایی روند تغییرات در فرایندها و اشکال سطحی است [۳۵]. ژئومورفولوژیست‌هایی مانند دیویس، پنک و... با مطرح کردن مدل‌هایی در زمینه چرخه‌های فرسایش، تلاش داشته‌اند که تعادل ژئومورفیک را بر اثر تغییرات دوره‌ای به اثبات برسانند و نیز به پیش‌بینی واکنش‌های فرم‌ها و فرایندهای سطح زمین در برابر دگرگونی‌های اقلیمی و سایر تغییرات محیطی بپردازند [۴۰]. اما باید در نظر داشت که چگونگی روند تغییرات در پدیده‌های ژئومورفیک، اعم از تدریجی یا در اثر وقوع بحران‌های ناگهانی، حاکی از عملکرد فرایندهای طبیعی است. این رخدادها و تغییرات می‌توانند سبب بروز ناپایداری در مقیاس بزرگ مانند ابعاد قاره‌ای، یا کوچک مانند حوضه‌های آبریز باشند که در نهایت، روند سیستم‌ها را به سوی تعادل و پایداری هدایت می‌کنند. ژئومورفولوژی در مقیاس وسیعی با فعالیت انسان‌ها و مسائل آنها در ارتباط است. مسائل ژئومورفیک برای دستیابی به مدیریت محیط و تعادل، باید متناسب با دینامیک محیط و با در نظر گرفتن نقش عوامل مورفوتیک تنظیم شود. به همین دلیل، مطالعات ژئومورفیک نیازمند تعریف مفاهیمی اساسی برای فراهم آوردن اطلاعات دقیق از مورفودینامیک محیط و شناخت مناطق باثبات و ناپایدار و محاسبه حد پایداری ژئوسیستم‌هاست و در این صورت می‌تواند در زمینه‌های مختلف برنامه‌ریزی‌های محیطی به کار گرفته شود [۱۱]. در دیدگاه سیستمی یا جریان ماده و انرژی، تحلیل‌های ژئومورفیک براساس رابطه میان فرم و فرایند صورت می‌گیرد [۱۰]. استفاده از تحلیل سیستمی، در پژوهش‌های ژئومورفیک، به‌عنوان نوعی روش‌شناسی مناسب می‌تواند در رسیدن به نتایج مورد نظر کمک کند، زیرا به‌مثابه چارچوب روش‌شناسی در ارزیابی و مدیریت سیستم‌های ژئومورفولوژی مطرح است [۲۱].

با توجه به اهمیت این دیدگاه، در طی دهه‌های گذشته مطالعات متعددی با رویکرد کاهش مخاطرات محیطی در سطح جهان صورت پذیرفته است. به‌طور کلی مفاهیم تعادل، آستانه‌ها و واکنش‌های محیطی از مطالعات شیوم<sup>۱</sup> [۴۲] در زمینه مفاهیم و کاربرد آستانه‌های ژئومورفیک و واکنش‌های پیچیده در حوضه‌های زهکشی شروع شده است. استراکل<sup>۲</sup> به بررسی واکنش‌های ژئومورفیک در برابر تغییرات محیطی و اقلیمی با تأکید بر وضعیت اقلیم دیرینه و تحلیل آستانه‌های هیدرولوژیک پرداخت [۴۴]. هانسوم<sup>۳</sup> به تحلیل حساسیت و واکنش‌های

---

1. Schumm  
2. Starkel  
3. Hansom

کوتاه‌مدت و بلندمدت و حد آستانه‌های سیستم‌های ساحلی به تغییرات محیطی به‌ویژه افزایش سطح آب دریاها پرداخت [۳۶]. چورچ<sup>۱</sup> آستانه‌های ژئومورفیک در سیستم‌های رودخانه‌ای و رفتار رودخانه‌ها را بررسی کرد [۳۲]. فیلیپس به‌منظور بررسی دیدگاه تکاملی ژئومورفیک، به تحلیل آستانه‌ها و رفتار سیستم‌های غیرخطی در واکنش‌سنجی لندفرم‌ها در برابر تغییرات محیط پرداخت [۴۰]. در ایران نیز در حال حاضر از نظر جایگاه کاربردی، موضوعات تعادل و آستانه‌ها، مطالعات کمتری را به خود اختصاص داده است. رامشت به بررسی مفهوم تعادل به‌عنوان عامل توازن و پایداری در دیدگاه‌های عمده فلسفی در ژئومورفولوژی یعنی دیدگاه دیویسی، فرایندی و سیستمی پرداخت [۱۰]. مختاری واکنش سیستم مخروط‌افکنه‌ای پرسیان در کوه‌های کیامکی شمال‌غرب و آستانه آن را در برابر تغییر اقلیم بررسی کرد [۲۵].

این نوشتار می‌کوشد در راستای دیدگاه ژئومورفولوژی سیستمی، پارادایم‌های تعادل، آستانه‌های بحرانی و مخاطرات محیطی مبتنی بر پایداری محیط در سیستم‌های ژئومورفولوژی را بررسی کند. هدف چنین مطالعاتی، کاربردی کردن و جهت‌دهی مطالعات ژئوسیستم‌ها به پایداری و مدیریت محیط است. زیرا ژئوسیستم‌ها مانند سیستم‌های دریاچه‌ای، ساحلی و... در روند تغییرات محیطی و تکامل خود در وضعیت فعالیت‌های تکتونیکی، تغییرات اقلیمی و فعالیت‌های انسانی (آنتروپوژنیک) سه حالت عمده را پیش رو دارند و پشت سر می‌گذارند. به‌عقیده نگارندگان، ادراک وضعیت‌های متعدد ژئوسیستم‌ها در بستر تغییرات محیطی و مدل‌سازی‌های کمی و کیفی به‌منظور بازسازی شرایط محیطی فعلی و آتی، گام مهمی در تحقق پایداری محیط از منظر ژئومورفولوژی محسوب می‌شود. از این رو در این پژوهش با طرح برخی از رویکردها به‌کمک تحلیل داده‌های ماهواره‌ای، سعی شده است این مفاهیم بررسی شود. به‌این ترتیب پس از مطالعه جداگانه تعادل<sup>۲</sup> و طبقه‌بندی آن در سیستم‌های ژئومورفولوژی، آستانه‌های ژئومورفیک<sup>۳</sup> (آستانه‌های تغییر و آستانه‌های بحران) و مخاطرات محیطی<sup>۴</sup>، تلاش شده است ارتباط موضوعی میان سه مفهوم بنیادی یادشده ایجاد شود. بنابراین هدف و ضرورت این تحقیق، سوق دادن مطالعات ژئومورفولوژی نظری به ژئومورفولوژی کاربردی در راستای تحقق پایداری محیط‌های طبیعی است. در این راستا دریاچه ارومیه و اکوسیستم آن به‌طور موردی در چارچوب دیدگاه یادشده و با استفاده از برخی تکنیک‌های سنجش از دور بررسی شده است.

1. Church
2. Equilibrium
3. Geomorphic Thresholds
4. Environmental Hazards

## روش‌شناسی

این پژوهش از نوع کاربردی است و با روش توصیفی - تحلیلی اجرا شده است. به‌منظور تحلیل مفهومی رویکردهای نظری ژئومورفولوژی، گردآوری اطلاعات با استفاده از منابع کتابخانه‌ای و پایگاه‌های اینترنتی انجام پذیرفت. به‌این ترتیب با ارزیابی تحقیقات انجام‌گرفته تلاش شد رویکردهای مورد اشاره به‌کمک منابع یادشده تجزیه‌وتحلیل شود. در ادامه به‌کمک داده‌ها و تکنیک‌های سنجش از دور، مفاهیم کاربردی این رویکردها بررسی شد. در این راستا از تصاویر ماهواره‌ای TM5 استفاده و داده‌های آن تا مرحله رادینانس تصحیح شد. یکی از روش‌های مناسب برای آشکارسازی تغییرات پدیده‌هایی از این دست، بررسی چگونگی تغییرات انعکاسی در طول موج‌های مناسب است. مطابق بررسی‌هایی که علوی‌پناه و همکاران [۲۲] با تهیه پروفیل طیفی آب دریاچه ارومیه از تصاویر لندست در دو طرف میان‌گذر انجام دادند، در این تحقیق نیز از پروفیل طیفی در طول دریاچه ارومیه (شمال به جنوب آن) استفاده شد. اما برای نمایش بهتر چگونگی این تغییرات، نمودار تغییرات انعکاس آب، در باند ۳ لندست و در طی چهار سال ۱۹۹۸، ۲۰۰۷ و ۲۰۱۱ تهیه شد تا مشخص شود تغییرات بازتابی که تحت تأثیر تغییرات غلظت مواد موجود در آب، عمق و پارامترهای دیگر مرتبط با آب است، در دو طرف میان‌گذر دریاچه به چه نحوی بوده است. البته باید توجه داشت زمانی که از نمودار طیفی حاصل از تصاویر چهار سال استفاده می‌شود، بخشی از تغییرات ثبت‌شده، ناشی از وضعیت‌های متفاوت اتمسفری و تهیه تصویر است و به تغییرات دریاچه ارتباط ندارد و حضور این مقادیر اجتناب‌ناپذیر است، اما به‌رحال بخش عمده‌ای از این تغییرات ثبت‌شده، ناشی از تغییرات خود پدیده تحت بررسی در گذر زمان است. در روش تحلیل مؤلفه‌های اصلی نیز با توجه به نمودار مقادیر ویژه به‌دست‌آمده و شکست اصلی این نمودار، سه باند اول حاصل از این تبدیل که حاوی بیشترین اطلاعات بودند، برای ساخت تصویر کاذب رنگی استفاده شدند تا تغییرات بازتابی رخ داده در همه بخش‌های دریاچه و نه صرفاً یک پروفیل بررسی شود. این تصویر می‌تواند تا حد مناسبی جزئیات تغییرات املاح آب دریاچه را نشان دهد؛ گرچه کاهش عمق نیز می‌تواند در آن مؤثر باشد. نمایش کلی تغییرات انعکاس آب در تصویر کاذب رنگی (۵-۲-۱) RGB تولید و برای هر یک از سال‌های بررسی نشان داده شد. مطابق مطالعات پیشین در این دریاچه، که برای مثال علوی‌پناه و همکاران از ترکیب باندهای ۱-۳-۷ استفاده کرده بودند [۲۲]، در این مطالعه ترکیب باندهای RGB125، به‌همراه فیلتر خطی برای نمایش تغییرات استفاده شد.

## بحث و یافته‌ها

### تحلیل رویکردهای نظری ژئوسیستم‌ها مبتنی بر پایداری محیط

#### - رویکرد تعادل در ژئوسیستم‌ها

آنچه از واژه تعادل در ژئومورفولوژی کلاسیک مطرح می‌شود، به‌نوعی بیانگر دو حالت تعادلی در فرایندهای ژئومورفیک است: تعادل پویا یا دینامیک در تفکر گیلبرت و تعادل ایستایی در تفکر دیویس [۱۷]. اساساً گرایش به سمت تعادل دینامیک در همه ژئوسیستم‌ها که مبتنی بر نظرهای گیلبرت است، به‌نوعی بازخورد منفی بین فرایندها در جهت جبران شرایط به‌سمت حالت پایداری است. در ژئومورفولوژی می‌توان تعادل را برابری بیلان انرژی در چشم‌انداز، در ارتباط با همترازی نیروهای تخریبی و نیروهای تراکمی در واحد زمان دانست. پاسخ‌های خطی و غیرخطی ژئوسیستم‌ها در مقیاس زمانی، دگرگونی لندفرم‌ها را در چشم‌اندازهای ژئومورفیک به‌همراه دارد. چنین دگرگونی‌هایی که بازتاب واکنش ژئوسیستم‌ها به‌سمت حفظ پایداری است، تنوعی از لندفرم‌ها و فرایندهای ژئومورفیک را رقم می‌زند [۱۷]. واژه تعادل در ژئومورفولوژی، سابقه‌ای تقریباً طولانی دارد. این واژه هم در ژئومورفولوژی دیویسی و هم در دیدگاه‌های کاتاستروفیسم و سیستمی به‌کار گرفته شده است، اگرچه از نظر مفهومی در هر یک از دیدگاه‌ها دارای تفاوت‌های ماهوی است [۱۰].

تعادل در ژئومورفولوژی دیویسی، به‌دلیل تسلط زمان یا دوره در تحول ناهمواری‌ها به‌عنوان یک متغیر زمانی است که با گذشت زمان بر چشم‌اندازهای ژئومورفیک تحمیل می‌شود [۲۳]. در دیدگاه کاتاستروفیسم (تصادفی)، به‌دلیل غلبه فرایندهای تغییر اقلیم، تکتونیک و آنتروپوژنیک در تحول ناهمواری‌ها، تعادل به‌عنوان حاکمیت یک فرایند غالب یا تعادل بین نیروهای عمل‌کننده فرایندها توصیف می‌شود [۹]. در عین حال آستانه‌های ژئومورفیک حاکمیت هرکدام از فرایندها را نشان می‌دهد [۱۰].

در دیدگاه ژئومورفولوژی سیستمی، به‌دلیل تسلط پارادایم فرم و فرایند مبتنی بر سیستم‌های جریان انرژی، تعادل رابطه معینی از نحوه ارتباط فرم و فرایند در یک سیستم شکل‌زایی می‌شود [۱۰]. به‌عبارت دیگر در این دیدگاه تعادل مطابق با نظر چورلی و کندی، حالتی از یک سیستم است دارای پسخوراند منفی بین فرم و فرایند [۱۰]. در دیدگاه سیستمی تعادل ژئومورفیک تبیین‌کننده ارتباطی معین، میان ورودی و خروجی یا فرم یک سیستم شکل‌زایی است [۹]. از این‌رو تعادل در این دیدگاه از پیچیدگی‌های خاصی برخوردار است و

برای ادراک آن، به طبقه‌بندی انواع تعادل در سیستم‌های ژئومورفولوژی نیازمندیم؛ تعادل در هشت نوع مختلف طبقه‌بندی می‌شود (شکل ۱) [۳۱]:

تعادل ایستا	
تعادل با ثبات و پایا (بازگشت به وضع قبل)	
تعادل ناپایدار ایجاد سطح تعادل جدید بعد از یک آشفتنی	
تعادل فر ا پایدار برخورد با آستانه‌ها و ایجاد سطح تعادل جدید	
تعادل یکنواخت لحظه‌ای در دوره‌های طولانی مدت و حول یک میانگین مشخص	
تعادل ترمودینامیکی تحلیل تحولات فرم سطحی	
تعادل دینامیک خروجی بیشتر از ورودی در طی دوره پایدار	
تعادل شبه پایدار اثر آستانه‌ها در روند تغییرات تعادل دینامیک	

شکل ۱. طبقه‌بندی تعادل‌های هشتگانه بر مبنای نظر چورلی و کندی [۳۱] به نقل از الورفلت [۳۳]

۱. تعادل ایستا<sup>۱</sup>: در یک ژئوسیستم درحالت ایستا، یعنی در یک دوره زمانی، هیچ تغییری پذیر روی نمی‌دهد [۳۰]. این تعادل در مقیاس فضایی و زمانی بسیار کوتاه (چندساعته) وجود دارد، مانند الگوی مستقیم رودخانه‌ای؛
۲. تعادل باثبات و پایا<sup>۲</sup>: این نوع تعادل بعد از یک اختلال مختصر، به برگشت به وضع سابق تمایل دارد. این نوع تعادل زمانی است که یک سیستم به‌طور دائم حول یک تعادل میانگین مشخص در نوسان باشد [۲۴]، مانند الگوهای پیچانرودی در سیستم‌های رودخانه‌ای و تناوبی از سطح تعادل در رفتار رودخانه‌ها؛
۳. تعادل ناپایدار (پایاسازی)<sup>۳</sup>: این تعادل وقتی روی می‌دهد که آشفتگی کوچکی درون یک سیستم ژئومورفیک روی دهد و سپس به سمت یک سطح تعادل جدید حرکت کند [۳۸]، مانند الگوی شریانی در سیستم‌های رودخانه‌ای و تناوبی از سطح تعادل در رفتار رودخانه‌ها که توسط موانع سنگی به‌عنوان یک آشفتگی در بستر رودخانه‌ها قرار می‌گیرد؛
۴. تعادل فراپایدار<sup>۴</sup>: تعادل فراپایدار زمانی روی می‌دهد که یک سیستم با آستانه‌هایی داخلی و بیرونی و در نتیجه، با حالت جدیدی از حاکمیت فرایندهای ژئومورفیک روبه‌رو می‌شود [۲۴]، مانند وقوع یک بارش سیل‌آسا بیش از حد دبی متوسط در یک سیستم رودخانه‌ای یا عملکرد سونامی در سیستم‌های ساحلی [۳۷]؛
۵. تعادل یکنواخت لحظه‌ای<sup>۵</sup>: این نوع تعادل پیرامون مقدار متوسط ثابتی در نوسان است که ناشی از عمل متقابل چرخه‌های پسخوراند در سیستم یا «تصرف» سیستمی پیچیده است [۳۱]. از این‌رو این تعادل به‌طور دائمی در حالت میانگین، دارای نوسان است، مانند تغییرات دائمی شیب بستر رودخانه با استفاده از سیستم جریان انرژی در سیستم رودخانه‌ای [۴۵]؛ یا شرایط نسبتاً ثابت انرژی موج در سیستم‌های ساحلی [۳۷]؛
۶. تعادل ترمودینامیک<sup>۶</sup>: در این نوع تعادل برخی ژئوسیستم‌ها به حداکثر آنتروپی گرایش دارند [۳۸]. آنتروپی رفتار توزیع انرژی است که افزون بر تعیین کمیت انرژی، کیفیت انرژی را اندازه‌گیری می‌کند و این کیفیت، اندازه‌گیری بی‌نظمی در یک سیستم است و از این‌رو، حد بی‌نظمی را در محیط نشان می‌دهد [۲۸]. به‌طور کلی این نوع تعادل، بیشتر متأثر از دیدگاه دیویسی است، زیرا تنها بر تحلیل فرم‌های ارضی تأکید دارد؛ مثال: یک سیستم کوهستانی در

1. Static equilibrium
2. Stable equilibrium
3. Unstable equilibrium
4. Metastable equilibrium
5. Steady state equilibrium
6. Thermodynamic equilibrium

رسیدن به حالت تعادل خود تحت تأثیر بالآمدگی تکتونیک، گرایش به حالت حداکثر خود (دشتگون) دارد؛

۷. تعادل دینامیکی<sup>۱</sup>: این تعادل به عنوان نوسانات متعادل پیرامون یک میانگین در نظر گرفته می‌شود که در جهت مشخص و قطعی تغییر می‌کنند [۲۴] و موقعیتی است که نوسانات، پیرامون اندازه‌های متوسط قرار دارد که خود پیوسته در طول زمان تغییر می‌کند. این عمل نتیجه تغییرات کنترل شده خارجی در مقدار واردات (افزایش رواناب در دامنه‌ها، تخلیه رودخانه‌ها و...) است. بنابراین تعادل دینامیکی را مترادف تعادل متوسط متغیر می‌دانند [۳۱]، مانند واکنش تدریجی یک سیستم ساحلی به تغییر اقلیم و افزایش سطح آب [۳۷]؛

۸. تعادل شبه پایدار<sup>۲</sup>: این نوع تعادل به اثر آستانه‌ها در ژئوسیستم‌ها اشاره دارد. به این صورت که اگر تعادل دینامیکی با یک آستانه برخورد کند، حالت سیستم تغییر می‌کند و نوسانات سیستم، حول میانگین جدید به وجود خواهد آمد [۲۴]، مانند تحول سیستم‌های فرسایشی در کواترنر در نتیجه تغییرات سیستم‌ها از یخچال‌ها به جنب یخچالی.

#### - رویکرد آستانه‌ها در ژئوسیستم‌ها

آستانه‌های ژئومورفیک از مفاهیم اساسی در تئوری سیستمی است [۳۰]، زیرا کاربردهای بسیاری در شناخت تغییرات ژئوسیستم‌ها دارد. توجه به زمان آستانه‌ها، به منظور درک تغییرات زمانی، به علت اینکه آنها شرایط مرزی در وقوع تغییرات را نشان می‌دهند و عملکرد فرایندها را تعیین می‌کنند، بسیار ارزشمند است [۳۹].

در ژئومورفولوژی سیستمی، به دلیل پیچیدگی بخش‌های مختلف سیستم‌های زهکشی (مانند پادگانه‌ها، سیستم‌های آبرفتی و...)، شناخت واکنش‌های محیطی ژئوسیستم‌ها در برابر متغیرهای بیرونی مانند اقلیم، تکتونیک، تغییرات ایزوستاتیک و تغییرات آنتروپوژنیک کاربری زمین از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. اگرچه مطالعات میدانی در درک بهتر این سیستم‌ها، نقش مهمی در دستیابی به اطلاعات بیشتر در این زمینه دارد، ارزیابی جامع واکنش‌های سیستم‌های ژئومورفیک در برابر تأثیر فرایندها، نیازمند مطالعه آستانه‌هاست [۴۲]. واژه آستانه که شیوم و فاربریچ در سال ۱۹۸۰ آن را به حیطة مطالعات ژئومورفولوژی وارد کردند، معرف لحظه‌ای است که یک سیستم به عامل بیرونی مانند بروز تغییرات اقلیمی، تکتونیک و فعالیت‌های انسانی واکنش نشان می‌دهد [۳]. به‌طور کلی آستانه‌ها جداکننده حالت‌های متفاوت یک سیستم از یکدیگرند. در واقع با وقوع آستانه، فرایندهای سیستم‌های ژئومورفیک

1. Dynamic equilibrium  
2. Dynamic metastable



تغییر پیدا می‌کند [۳۸]. در این وضعیت، تغییرات زیادی در سطح زمین، بدون تغییر عوامل کنترل‌کننده خارجی از قبیل سطح اساس، تغییرات آب‌وهوایی و فعالیت‌های انسانی و بهره‌برداری از زمین وجود دارد [۴۱]. مفهوم آستانه‌های ژئومورفیک بیانگر وضعیتی است که عملکرد یک فرایند به‌ویژه در صدد رساندن سیستم به تعادل جدید است که این وضعیت، از ناحیه‌ای به ناحیه دیگر در رابطه با ویژگی‌های محلی و نحوه ترکیب عوامل با یکدیگر متفاوت است. زمان انعکاس این تغییرات در رفتار سیستم، معرف زمان آستانه‌هاست [۳]. به این ترتیب، بحران‌های محیطی در مقیاس سازوکار تحول ناهمواری‌ها هرچه باشند، سرانجام به تغییرات قطعی ساختمان سیستم‌های شکل‌زایی منجر می‌شوند. این تغییرات به حدی است که شیوم استدلال می‌کند به دلیل تسلط آستانه‌ها در سیستم‌های ژئومورفیک، لندفرم‌ها تحت تأثیر شرایط ناپایداری قرار می‌گیرند و واکنش‌های پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند [۴۰].

حد آستانه با علل داخلی و خارجی ارتباط دارد. آستانه ممکن است از عوامل خارجی تأثیر پذیرد. برای مثال وقوع تغییرات شدید اقلیمی و در نتیجه تغییرات اساسی در دینامیک بیرونی زمین سبب اضمحلال پوشش گیاهی می‌شود و زمین را در معرض فرسایش قرار می‌دهد و در نتیجه فرم زمین را با گذشته متمایز می‌کند [۵]. شیوم [۴۱] آستانه‌های ژئومورفیک را به دو دسته داخلی (درونی) و خارجی (بیرونی) طبقه‌بندی کرده است [۳۸]. تفاوت اصلی آنها این است که آستانه‌های درونی سبب تغییر ساختار سیستم‌ها نمی‌شوند، ولی آستانه‌های بیرونی تحت تأثیر متغیرهای بیرونی، درون یک سیستم ژئومورفیک را دچار تغییر و دگرگونی می‌کنند [۳۳]. یک سیستم ژئومورفیک تنها با تغییر متغیرهای بیرونی با آستانه‌های خارجی مواجه خواهد شد، مانند واکنش سیستم‌های رودخانه‌ها، یخچال‌ها و مواردی از این دست به تغییرات اقلیمی یا تکتونیک که سبب خواهد شد فرایندهای مؤثر بر سیستم ژئومورفیک تغییر کرده و خود را با شرایط جدید سازگار کند [۴۰]. زمانی که حد آستانه در نتیجه عملکرد فرایندهای بیرونی روی می‌دهد، آستانه بیرونی یا خارجی نامیده می‌شود [۳۰]. شاید شناخته‌شده‌ترین سرعت آستانه‌های بیرونی مربوط به میزان الگوی جابه‌جایی و اندازه رسوبات باشد. در این راستا با افزایش پیوسته سرعت فرایند رسوبگذاری، سرعت حد آستانه به حد مربوط به جابه‌جایی رسوب می‌رسد و با کاهش تدریجی سرعت، سرعت آستانه نیز متوقف می‌شود [۳۴]. آستانه‌های داخلی مربوط به خود سیستم‌اند. یعنی تغییر متغیرهای داخل سیستم موجب رویارویی سیستم با وضعیت آستانه خواهد شد. برای مثال چرای بی‌رویه در حوضه آبریز، وضعیت فرسایش و رسوب را بر هم خواهد زد [۳۸] یا اینکه رسوبات متراکم سیستم‌های رودخانه‌ای در اثر شیب‌های تند آستانه‌ای به حالت عدم تعادل در می‌آیند و پدیده‌های

فرسایشی را افزایش می‌دهند [۵]. سیستم‌های ژئومورفیک مانند سیستم‌های رودخانه‌ای، دامنه‌ای، ساحلی، بادی و... از حساسیت زیادی به فرایندها و سیستم‌های شکل‌زایی برخوردارند و الگوی شکل‌گیری و تکامل آنها به‌دقت توسط حد آستانه‌های ژئومورفیک از قبیل اقلیم و هوازگی، بالآمدن سطح آب دریاها، و تغییرات انسانی در کاربری اراضی کنترل می‌شوند؛ از این‌رو وضعیت تعادل از حالت یکنواخت به حالت‌های دیگر تغییر پیدا می‌کند [۷]. به‌طور کلی حد آستانه، گرایش دارد در پدیده‌های ژئومورفیک جدید به تعادل دست یابد [۵]. با توجه به موارد مذکور می‌توان گفت رمز درک تحول چشم‌اندازهای ژئومورفولوژی با تعیین آستانه و بروز تغییرات عمده در ارتباط است. در این مورد می‌توان به بروز آشفتگی در سطوح دامنه‌ها، فرسایش سیرک‌ها و تشکیل آبشارها در مسیر رودخانه‌ها اشاره کرد [۳].

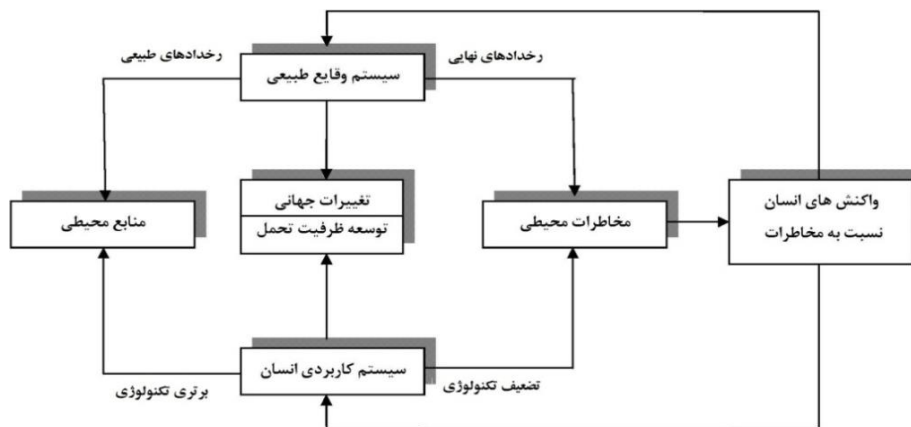
در طبقه‌بندی دیگر، آستانه‌های ژئومورفیک را می‌توان در دو بخش اصلی مطالعه کرد [۱۳]:

۱. آستانه‌های تغییر، که در مطالعات تعادل و طبقه‌بندی انواع تعادل استفاده می‌شود و به‌طور کلی به مفهوم تغییر حالت یک فرایند تعادلی به فرایند تعادلی دیگر است؛ ۲. آستانه‌های بحرانی، که در حال حاضر به‌دلیل اغتشاشات محیطی ناشی از عامل آنتروپوژنیک و مداخلات ناشی از تغییرات انسانی، سبب تغییر فرایند یک حالت تعادلی به فرایندهای مخاطره‌زا و به‌عبارت دیگر تغییر از منابع محیطی به مخاطرات محیطی می‌شود. آنچه بیشتر در زمینه پایداری محیط مطرح شده است، مربوط به آستانه‌های بحرانی و مرز وقوع مخاطرات محیطی است. به‌طور کلی فرایندهای طبیعی از قبیل تکتونیک، تغییر اقلیم و بالآمدن سطح آب دریاها و تغییرات ناشی از مداخلات ناآگاهانه انسان در واحدهای ژئومورفولوژیک به‌گذر از حد تعادل در سیستم‌ها می‌انجامد و بحران‌های محیطی یا حوادث ناگوار غیر مترقبه‌ای را به‌وجود می‌آورد. بررسی و تحلیل آستانه‌های بحرانی به شناخت و درک بیشتر ژئومورفولوژیست‌ها درباره مخاطرات محیطی در ژئوسیستم‌ها بسیار کمک می‌کند.

#### - مخاطرات محیطی در ژئوسیستم‌ها

مفهوم خطر اغلب «فرایندها، موقعیت‌ها و واکنش‌هایی تعریف می‌شود که توانایی وارد آوردن خسارت بر چیزهای ارزشمند برای انسان را دارد» [۱۹]. در حالت کلی اصطلاح خطر دارای دو معنای متفاوت است [۲۰]. فرایندهای طبیعی که به‌طور بالقوه خسارت‌زا هستند و حالت یا وضعیت تهدیدکننده‌ای که احتمال رویداد آن وجود دارد؛ نتیجه و پیامد رویداد خطر می‌تواند بزرگ یا کوچک و در عین حال مستقیم یا غیرمستقیم باشد. بدیهی است این نتایج به ارزش و سطح اهمیت آنها بستگی دارد [۱۹]. وقوع مخاطرات محیطی به درجه آسیب‌پذیری کشورها و

واکنش انسان‌ها نسبت به مخاطرات محیطی بستگی دارد. اصولاً هدف از کاهش خطر، تلاش به‌منظور ایجاد روندی در کاهش یافتن دوره‌های بلندمدت مخاطرات بر سیستم‌های انسانی و نیز رسیدن به توانایی پیشگیری معقولانه مخاطرات است [۴۳]. بر این اساس مخاطرات محیطی، حاصل ناسازگاری فرایندهای طبیعت با سیستم‌های انسانی است (شکل ۲).



شکل ۲. مخاطرات محیطی و تقابل وقایع طبیعی و سیستم‌های کاربردی انسان [۴۳]

مخاطرات محیطی، تنوع وسیعی از انواع مخاطرات است که رویدادهای طبیعی، حوادث تکنولوژیک (ساخته دست انسان) و وقایع اجتماعی (رفتارهای انسانی) را در بر می‌گیرد [۶]. اما در عمل تفکیک مخاطرات محیطی کار بسیار پیچیده‌ای است، زیرا مخاطرات محیطی، مؤلفه‌های طبیعی و انسانی را به‌صورت توأم در خود دارند [۱۳]. برای مثال مخاطرات ناشی از سیلاب می‌تواند نتیجه مؤلفه‌های طبیعی مانند تغییرات عناصر اقلیمی و افزایش فراوانی توفان و نیز مؤلفه‌های انسانی به‌ویژه زهکشی زمین یا تخریب و نابودی پوشش گیاهی باشد [۱]. اصولاً این فرایندها، به‌دنبال عدم تعادل موقتی در اجزای سیستم محیط طبیعی رخ می‌دهند و در مقیاس زمانی طولانی، پدیده‌هایی عادی به‌شمار می‌روند [۱۲]. از سوی دیگر، مخاطرات محیطی را می‌توان در دو دسته مخاطرات تدریجی با منشأ عمدتاً آب‌وهوایی و مخاطرات ناگهانی (کاتاستروفیک) با منشأ زمینی مطالعه کرد. پاسخ‌های خطی یک ژئوسیستم به تغییرات تدریجی یا پاسخ‌های غیرخطی به تغییرات ناگهانی، به توانایی ژئوسیستم در حفظ پایداری و رسیدن به تعادل بستگی دارد [۱۶].

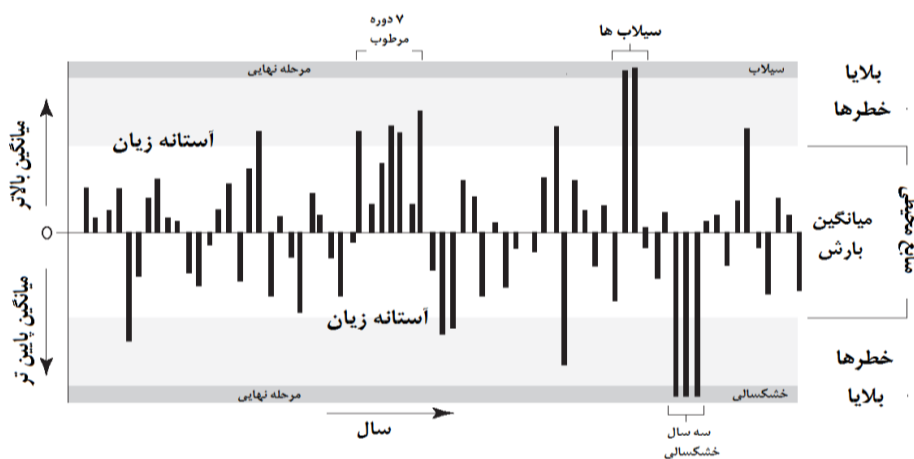
### - پایداری محیط در ژئوسیستم‌ها: تعادل، آستانه‌ها و مخاطرات محیطی

ژئوسیستم‌ها مرزهای مشخص و محسوس دارند و از غیر خود متمایزند. این مرزها را تناوب و توالی دوره‌های زمانی به شکل فراکتالی مشخص می‌کنند و تحول آنها به شکل سیستم‌های دینامیکی غیرخطی و اغلب پیچیده صورت می‌گیرد. برحسب حساسیت درونی ژئوسیستم‌ها، ویژگی آستانه در واکنش به تغییرات و نیز شدت و مدت اثرگذاری عوامل خارجی، زمان واکنش، زمان پاسخ و زمان آرامش در آنها متفاوت است. گاهی تغییری کوچک در عناصر اولیه یکی از بخش‌های ژئوسیستم، آن را به واکنش وامی‌دارد و سبب آشفتگی مقطعی می‌شود [۱۸].

باتوجه به مباحث مطرح‌شده در زمینه تعادل، آستانه‌های بحرانی و مخاطرات محیطی، شناخت ویژگی پایداری سیستم‌های ژئومورفیک یا خاصیت انعطاف‌پذیری اکوسیستم تا حدی مهم است که هر فعالیت یا اقدامی که بدون شناخت اثر فعالیت در پایداری اکوسیستم صورت پذیرد، عملاً نوعی ناپایداری اکوسیستم را به دنبال دارد. از طرفی ویژگی سیستم‌های باز (تحمل آشفتگی‌های سیستمی) که موجب ایجاد شرایط و فرم‌های یکنواخت‌تر در اکوسیستم می‌شود، این امکان را مهیا می‌کند که براساس شناخت این ویژگی‌ها، اکوسیستم بیشتر یا کمتر انعطاف‌پذیر را شناسایی و مدیریت پایدار را در سیستم‌ها لحاظ کرد. به‌طور کلی هر اقدامی برای کاهش خطر، کم‌هزینه‌تر از اقداماتی است که برای بهبود وضعیت بعد از خطر صورت می‌گیرد. این بینش هم‌اکنون در کشورهای توسعه‌یافته به کار گرفته می‌شود، چراکه پیش‌بینی و پیشگیری، نتایج مطلوب‌تری دارد. افزایش هزینه بهبود وضعیت محیط یا افزایش هزینه بهبود آسیب‌دیدگی افراد و جوامع، به شکست برنامه‌ها و اقدامات کاهش آسیب و به دنبال آن افزایش فقر منجر می‌شود.

در حال حاضر هر نوع اقدامی برای نجات دریاچه ارومیه تردیدآمیز است، زیرا پایداری ساختاری دریاچه آسیب دیده است. ترمیم آسیب‌های دریاچه بسیار پرهزینه و زمان‌بر است. مقاوم‌سازی و پایداری ساختاری کاهش مخاطرات بر این نکته تأکید دارد که این اقدامات از ابتدا باید در راستای پایداری محیط باشد تا آثار سوء مخاطرات کاهش یابد و هزینه‌ها کمتر شود [۲۷]. از طرفی یکی از راهکارهای ادراک پایداری محیط، تعریف دقیق اصطلاحات حوزه مخاطره‌شناسی و پایداری محیط است. واقعیت مهم‌تر این است که مفهوم مخاطره با دیگر مفاهیم نزدیک خود آنچنان به اشتباه آمیخته شده است که در نوشته‌ها و استنادات به جای یکدیگر به کار برده می‌شوند، مانند خطر، بحران، مصیبت یا بلا [۲۶]؛ این در حالی است که هر کدام از مفاهیم مذکور، دربردارنده شرایطی منحصر به خود است و می‌توان این مفاهیم را در راستای روندی تکاملی تبیین کرد.

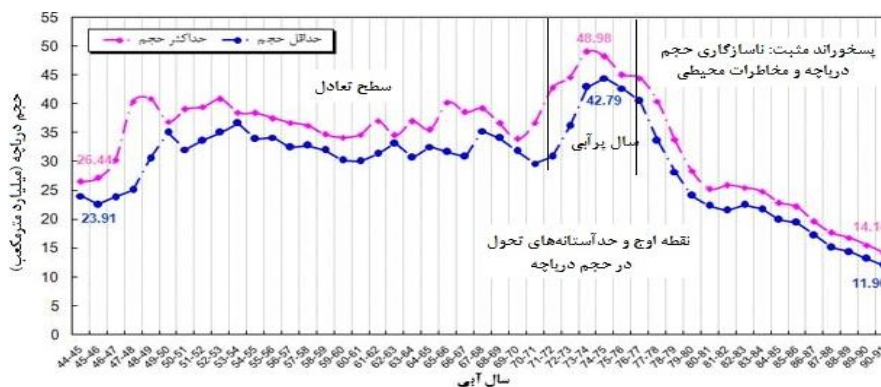
مطابق شکل ۳، سیستم‌های ژئومورفیک ممکن است بسته به روند تغییرات محیطی (تغییرات اقلیمی، بهره‌برداری و مدیریت انسانی، مسائل تکتونیک و...) در وضعیت‌های مختلفی قرار گیرند: در مرحله اول سیستم‌های ژئومورفیک در صورت برقراری روند حالت تعادل و روند میانگین بارش و سایر حالت‌های تعادلی، به‌عنوان منابع محیطی در دسترس سیستم‌های کاربردی انسانی قرار خواهند گرفت؛ که می‌توان آن را پایداری محیط نیز تعریف کرد. از سوی دیگر، تعادل در مقیاس‌های زمانی و مکانی متنوعی شامل کوتاه‌مدت و بلندمدت روی می‌دهد و بنابراین سطح تعادل و پایداری نیز متناسب با نوع مقیاس آن مدنظر قرار می‌گیرد. در مرحله دوم تحت عنوان آستانه‌های بحرانی مرز بین حالت تعادل و مخاطره محیطی است که هشدار برای جابه‌جایی مرز منابع محیطی به مخاطرات محیطی است و خارج شدن از حالت تعادل قلمداد می‌شود. مرحله مخاطرات محیطی و تغییرات محیطی، ناسازگاری سیستم‌های طبیعی و سیستم‌های انسانی را به‌دنبال خواهد داشت. در آخرین مرحله، بلایای محیطی یعنی پدیده‌هایی همچون سیلاب‌ها و خشکسالی‌ها و خسارات ناشی از آنها چشمگیر خواهد بود. از این‌رو پیش‌بینی درک حالت تعادلی و پایداری آن در سیستم‌های ژئومورفیک و پیش‌بینی حد آستانه‌ها و مدیریت محیطی سیستم‌ها نگرشی نو در تفسیر پایداری و شناخت ظرفیت‌های محیطی سیستم‌ها محسوب شده و گام مهمی از سوی جغرافیدانان و ژئومورفولوژیست‌ها در راستای تحقق پایداری محیط تلقی می‌شود.



شکل ۳. حساسیت به خطر محیطی به‌صورت تابع متغیر بودن عناصر طبیعی و درجه تحمل محیطی، حالت میانگین بارش به‌عنوان مبنا و اساس، مرحله آستانه‌های زیان، مرحله خطر و بلایا به‌عنوان مرحله نهایی [۴۳]

### تغییرات ژئوسیستم دریاچه ارومیه و پایداری محیط

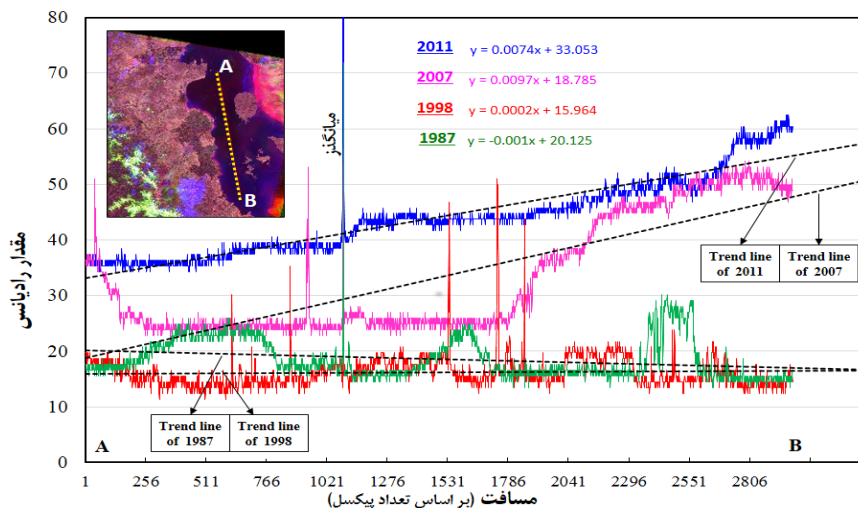
دریاچه ارومیه بزرگ‌ترین و شورترین دریاچه دائمی ایران و یکی از دریاچه‌های فوق‌اشباع از نمک دنیاست. این دریاچه به دلیل برخورداری از ارزش‌های اکولوژیک و منحصر به فرد، به‌عنوان یکی از تالاب‌های بین‌المللی در کنوانسیون رامسر ثبت شده است. متأسفانه به‌رغم اهمیت بسیار زیاد، سطح آن در سال‌های اخیر در نتیجه تأثیرات توأم عوامل طبیعی و انسانی کاهش یافته است [۲۹]. دریاچه ارومیه همانند دریاچه‌های آرال و مهارلو، از جمله محیط‌های دریاچه‌ای است که در سال‌های گذشته به‌شدت تحت تأثیر شرایط اقلیمی قرار گرفته و رو به نابودی است [۱۶] (شکل‌های ۷ و ۸). این دریاچه در دوره‌ای در حالت تعادل و در حکم منابع محیطی و سازگاری سیستم‌های انسانی و طبیعی، قابلیت بهره‌برداری داشت. در دوره‌ای، اغتشاشات محیطی و عبور از حد آستانه‌ها، هشداردهی و بازگشت به حد تعادل را ضرورت بخشید. به دلیل عدم رعایت معیارها و شرایط آستانه‌ها و اعمال پسخوراند مثبت با اقدامات توسعه اقتصادی در حوضه، از جمله راهسازی بر سطح دریاچه، توسعه سدسازی، افزایش حفر چاه‌ها و کف‌شکنی چاه‌های آب برای دسترسی به آب بیشتر، افزایش سطح زیر کشت محصولات آبی و تغییر نوع کشت از دیم به آبی؛ و عوامل طبیعی از جمله گرمایش جهانی، کاهش بارندگی و افزایش تبخیر از سطح دریاچه و جلوگیری مؤثر از برقراری توازن و تعادل طبیعی در بیلان آب، یک مخاطره محیطی جبران‌ناپذیر در شمال غرب ایران پدید آمده است [۲]. در حال حاضر به دلیل بی‌توجهی به معیارهای پایداری محیط، این دریاچه وارد مرحله مرگ اکوسیستم و مخاطرات محیطی شده است و مسائلی همچون هجوم ریزگردها و سایر بلایای محیطی را در پی خواهد داشت که خسارات متعددی را بر پهنه محیط زیست کشور تحمیل خواهد کرد (شکل ۴).



شکل ۴. تغییرات حداکثر و حداقل حجم دریاچه ارومیه در دوره آماری ۱۳۴۵ تا ۱۳۹۱

در زمینه تغییرات ژئوسیستم دریاچه ارومیه، تاکنون تحقیقات متنوعی از زوایای گوناگون صورت پذیرفته است. در این بخش به منظور بازنمایی مناسب تراز روند پایداری محیط در سطح دریاچه ارومیه با رویکرد تعادل و عدم تعادل، از تکنیک‌های سنجش از دور شامل تحلیل مؤلفه‌های اصلی، ترکیب باندی کاذب و تغییرات انعکاس آب استفاده شد.

با توجه به پروفیل AB که بر روی باند سوم لندست و در امتداد شمال به جنوب میان‌گذر زده شد، دو نوع تغییر در انعکاس آب در باند ۳ لندست مشاهده می‌شود: نخست اینکه انعکاس آب دریاچه از سال ۱۹۸۷ تا ۲۰۰۷ به طور کلی و در تمامی بخش‌ها افزایش یافته و در برخی نواحی دریاچه این اختلاف بسیار بیشتر است که می‌تواند رابطه مستقیم با افزایش املاح به خصوص نمک در آب دریاچه یا کاهش عمق داشته باشد (انعکاس آب با افزایش املاح آن بیشتر می‌شود). دسته دوم تغییرات در شیب پروفیل طیفی مشاهده می‌شود. در سال ۱۹۸۷ شیب تغییرات از نقطه A به B، منفی و نزدیک به صفر بود که تنها سال با شیب منفی در بین چهار سال بررسی شده است. این بدان معناست که بخش‌های جنوبی انعکاس کمتری داشته‌اند که ممکن است ناشی از کاهش مواد معلق آب یا افزایش عمق باشد. در سه سال بعد شیب انعکاس‌ها روند مثبت پیدا کرد، یعنی فرایند ذکر شده معکوس شد و این بار نواحی‌ای از دریاچه که در شمال میان‌گذر قرار دارند، انعکاس کمتری نشان دادند (ناشی از عمق بیشتر یا مواد معلق کمتر) (شکل ۵).



شکل ۵. تغییرات طیفی سطح دریاچه در باند ۳ لندست (TMS5) (۱۹۸۷ تا ۲۰۱۱)

از طرفی روند تغییرات شیب نیز در طی سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۱ بیشتر شد که نشان‌دهنده تشدید وضعیت یادشده است. همچنان که مشاهده می‌شود، این وضعیت به‌ویژه از سال ۲۰۰۷ به بعد به‌وضوح روند تغییرات سطح آب دریاچه و مرزهای ژئوسیستم را از حالت تعادلی به عدم تعادل نشان می‌دهد (شکل ۶). بنابراین کوچک‌ترین تغییرات به‌ویژه تغییرات آنتروپوژنیک در سیستم‌های نامتعادل، واکنش و پاسخ‌های شدیدی را از سیستم در بر خواهد داشت. که موجب مرگ اکوسیستم این دریاچه شده است.

### تحلیل مؤلفه‌های اصلی

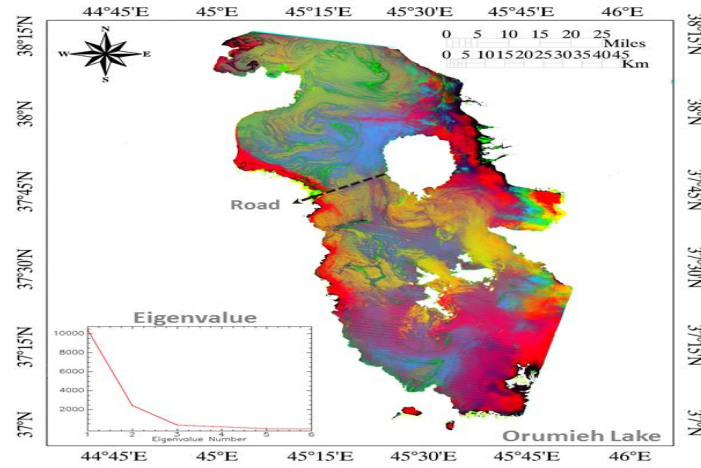
براساس مطالعات، با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در یک دوره چهارده‌ساله، احداث جاده شهید کلانتری تغییراتی در فرایند رسوبگذاری طبیعی ایجاد کرده که علاوه بر مختل کردن نظم طبیعی چرخه آب و پراکنش ته‌نشینی مواد معلق، سبب تغییراتی در روند طبیعی و وضعیت اکولوژیکی ژئوسیستم دریاچه شده است [۱۲].

با تبدیل مؤلفه‌های اصلی و استفاده از فیلترهای مناسب، تصویر شکل ۶ برای سال ۱۹۹۸ به‌دست آمده که یک تصویر سه‌باندی PCA(321) شده است. این تصویر نحوه تغییرات انعکاس‌های آب را نشان می‌دهد. همان‌طور که پیشتر بیان شد، این تغییر در نتیجه تغییر مواد محلول در آب است. به‌نظر می‌رسد نواحی قرمز بیشترین حجم مواد معلق را دارد و بعد از آن نواحی زرد و در نهایت نواحی آبی حجم کمتری از مواد را داراست. البته این تفسیر نیازمند مشاهدات میدانی و اندازه‌گیری آزمایشگاهی مواد معلق آب است، اما با توجه به سال تصویر (۱۹۹۸) به‌نظر می‌رسد اطلاعات میدانی کافی در این زمینه وجود نداشته باشد. با این حال مقایسه این روش با سایر روش‌ها که همگی حاکی از روند خشکی از جنوب به شمال دریاچه‌اند، نتایج این روش را معتبرتر می‌کند.

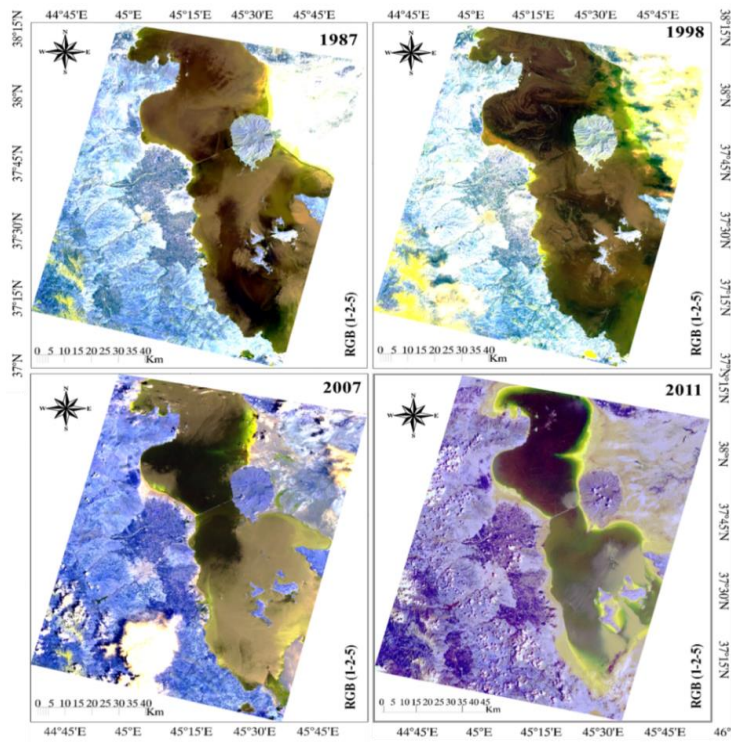
### ترکیب بانندی کاذب و تغییرات انعکاس آب

با توجه به تصویر کاذب رنگی RGB (1-2-5) شکل ۷، به‌نظر می‌رسد آب دریاچه در سال ۱۹۹۸ افزایش چشمگیری داشت (حد آستانه) و به‌نوعی در دوران اوج اکوسیستم یا مرز هشدار (آستانه‌ها) قرار گرفت و برعکس در سال ۲۰۰۷ بسیار کمتر شد (شکل‌های ۷ و ۸). به‌طوری‌که می‌توان گفت روند فروپاشی، مخاطرات و مرگ اکوسیستم از این دوره آغاز شد و به‌نوعی از حالت پایداری پا به عرصه ناپایداری نهاد. این روند کاهشی در سال ۲۰۱۱ نیز ادامه داشت و به کاهش شدید آب دریاچه در بخش جنوبی میان‌گذر منجر شد. این تصویر نواحی دارای انعکاس سطحی آب متفاوت - که ناشی از غلظت آب و تا حدی تغییرات عمق است - را نشان می‌دهد.





شکل ۶. روند تغییرات طیفی سطح دریاچه ارومیه در سال ۱۹۹۸



شکل ۷. تغییرات سطح دریاچه ارومیه بر روی تصاویر ماهواره‌ای لندست



شکل ۸. نوسان سطح آب دریاچه ارومیه از تعادل تا مرگ سیستم در جزیره مشت عثمان

### نتیجه‌گیری

پایداری محیط با رویکرد کاهش مخاطرات در سیستم‌های ژئومورفیک، نیازمند شناخت و ارزیابی ظرفیت‌های محیطی پدیده‌ها در برابر واکنش‌های ناشی از تغییر اقلیم و گرمایش جهانی، فعالیت‌های تکتونیک، فعالیت‌های انسانی و عامل آنتروپوژنیک است که آستانه‌ها را به‌عنوان مرز تغییرات از پایداری و تعادل تا وقوع مخاطرات محیطی پدیدار می‌کند. بنابراین شناخت آستانه‌ها سبب می‌شود که ظرفیت تحمل محیط شناسایی شود و براساس آن، برنامه‌ریزی‌های محیطی با هدف کاهش وقوع مخاطرات انجام گیرد. در این راستا مطالعات تاریخی - تجربی که مبنای مطالعاتی ژئومورفولوژی است، بهترین راهبرد برای پیش‌بینی و جلوگیری از تبدیل منابع محیطی به مخاطرات و بلایای محیطی خواهد شد، چراکه عرصه‌های مطالعاتی از سوی جغرافیدان‌ها و ژئومورفولوژیست‌ها تنها قبل از وقوع مخاطرات و بلایا مؤثر خواهد بود. به‌طور کلی رسالت جغرافیدانان عصر حاضر، مدیریت پیش از بحران و پیش‌بینی ناسازگاری‌های ناشی از روابط انسان و محیط در فضای جغرافیایی است. این مهم تنها در صورت شناسایی شاخص‌های مؤثر در وقوع حد آستانه‌ها و پیش‌بینی واکنش پایداری ژئوسیستم‌ها و جلوگیری از وقوع شرایط بحرانی امکان‌پذیر است. در این نوشتار با بررسی تعادل، آستانه‌های بحران و مخاطرات محیطی، مشخص شد که پایداری محیط، در ارتباط با وجود سطح تعادل در روند تغییرات سیستم‌های ژئومورفیک است. در این راستا شناسایی وضعیت مرز تغییرات از منابع به مخاطرات، گام مهمی در اجرایی کردن آثار کاهش مخاطرات خواهد بود. نتایج به‌دست‌آمده از تصاویر ماهواره‌ای لندست از سال ۱۹۸۸ تا ۲۰۱۱ با استفاده از روش‌های تحلیل مؤلفه‌های

اصلی، ترکیب کاذب بانندی اشاره شده و چگونگی تغییرات انعکاسی ثبت شده بر مبنای باند سوم این سنجنده در شمال و جنوب میان گذر، به خوبی روند کاهش آب دریاچه و به موازات آن افزایش املاح و کاهش عمق در بخش‌های مختلف دریاچه را نشان می‌دهد. با توجه به وضعیت فرایند مخاطرات در سطح دریاچه ارومیه و گذر آن از حد آستانه تحت تأثیر گرمایش جهانی و فعالیت‌های آنتروپوژنیک، این سیستم دریاچه‌ای امروزه به فرایندی مخاطره‌زا تبدیل شده است و ضروری است سطح تعادل جدیدی برای وضعیت این محیط تعریف شود. در این راستا، کارشناسان نظرهای متعددی را مطرح کرده‌اند، از جمله دو نظر متفاوت: ۱. خشک کردن و تغییرات محیط از دریاچه به کویر (پارک اکوتوریستی) و نگرش کویر بودن این منطقه؛ و ۲. احیای آن توسط آبیگری از رودخانه ارس و دریای کاسپین. اقدام دوم اگرچه وضعیت کشاورزی را تا حدودی ترمیم می‌کند، بی‌توجهی به وضعیت آستانه‌های بحرانی در رودخانه ارس، مقدمه‌ای بر شروع سطح مخاطرات برای این رودخانه و دریای کاسپین خواهد بود. بنابراین اعمال اقدامات کارشناسی شده مطابق دیدگاه متخصصان مختلف علوم زمین، کشاورزی و هیدرولوژی، به‌ویژه اعمال رویکرد حوضه‌ای در جهت دستیابی به سطح تعادل جدید برای این منطقه ضروری است. در این میان سازماندهی طرح‌های منابع آب و کشاورزی در حوضه آبریز دریاچه، بررسی تغییرات انعکاسی آب دریاچه با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای در دوره‌های زمانی مختلف، بازنگری کلیه پروژه‌های منابع آب در دست اقدام و بهره‌برداری در حوضه آبریز دریاچه متناسب با در نظر گرفتن ظرفیت محیطی و تقویت و توسعه فعالیت‌های آبخیزداری در سطح حوضه آبخیز دریاچه از جمله اقدامات مؤثر در این راستاست.

## منابع

- [۱]. اسمیت، کیت (۱۳۸۲). *مخاطرات محیطی*، ترجمه ابراهیم مقیمی و شاپورگودرزی‌نژاد، تهران: انتشارات سمت.
- [۲]. اصغری زمانی، اکبر. (۱۳۹۲). *ارزیابی تغییرات سطح دریاچه ارومیه به‌عنوان چالش عمیق زیست محیطی، فراروی منطقه شمال غرب ایران، فضای جغرافیایی*، سال سیزدهم، شماره ۴۱: ۹۱-۷۷.
- [۳]. بیاتی خطیبی، مریم. (۱۳۸۶). *مفهوم زمان، طیف‌ها و مقیاس‌های آن در پژوهش‌های ژئومورفولوژی (بانگاهی تحلیلی بر مفهوم زمان در سیستم‌های طبیعی)*، رشد آموزش جغرافیا، دوره بیست‌ودوم، شماره ۲، زمستان ۱۳۸۶: ۱۶-۳.

- [۴]. جهادی طرقي، مهناز. حسين زاده، سيدرضا (۱۳۹۰). واكنش سيستم‌هاي رودخانه‌اي به وقايع سيلابي بزرگ، نمونه موردی: رودخانه مادرسو، پژوهش‌هاي فرسايش محيطی، شماره ۴: ۸۶-۶۹.
- [۵]. چورلی، ريچارد جی، شوم، استانلی، سون، ديويدي اي (۱۳۸۰). ژئومورفولوژی، جلد اول (ديدگاه‌ها)، ترجمه احمد معتمد و ابراهيم مقيمی، تهران: انتشارات سمت. چاپ دوم.
- [۶]. حسين زاده، سيدرضا (۱۳۸۳). برنامه‌ريزی شهری همگام با مخاطرات طبيعی، جغرافيا و توسعه ناحیه‌اي، شماره سوم، پاییز و زمستان ۱۳۸۳.
- [۷]. حسين زاده، محمدمهدی. رحيمي‌هرآبادی، سعيد (۱۳۹۲). مفهوم آستانه‌ها در ژئومورفولوژی، سپهر، پاییز ۱۳۹۲، شماره ۸۷: ۸۱-۷۷.
- [۸]. رامشت، محمدحسين (۱۳۸۴). نقشه‌هاي ژئومورفولوژی، تهران: انتشارات سمت.
- [۹]. رامشت، محمدحسين. توانگر، منوچهر (۱۳۸۱). مفهوم تعادل در دیدگاه‌هاي ژئومورفولوژی، تحقيقات جغرافيايي، شماره ۵۴۲: ۹۴-۷۹.
- [۱۰]. رامشت، محمدحسين (۱۳۸۲). نظریه کياس در ژئومورفولوژی، جغرافيا و توسعه، بهار و تابستان ۱۳۸۲: ۳۶-۱۳.
- [۱۱]. رجایی، عبدالحمید (۱۳۷۳). ژئومورفولوژی کاربردی در برنامه‌ريزی و عمران ناحیه‌اي، تهران: انتشارات قومس.
- [۱۲]. رجایی، عبدالحمید (۱۳۸۱). تحليل برخی حوادث مختل‌کننده محیط از دیدگاه جغرافيايي طبيعی، جغرافيايي طبيعی، شماره ۱.
- [۱۳]. رحيمي‌هرآبادی، سعيد. هدائي‌آرانی، مجتبی (۱۳۹۳). آسیب‌شناسی مطالعات ژئوسیستم‌ها و ضرورت آن در پایداری محیط (مورد: ارگ بلند در منطقه آران و بيدگل)، مجموعه مقالات همایش علوم جغرافيايي ايران، مؤسسه جغرافيايي دانشگاه تهران.
- [۱۴]. رحيمي‌هرآبادی، سعيد (۱۳۹۰). مخاطرات ژئومورفولوژیک دره سفیدرود و تأثیر آن بر توسعه شهری رودبار، دانشگاه تهران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد در رشته جغرافيايي طبيعی گرایش ژئومورفولوژی، به راهنمایی دکتر ابراهيم مقيمی.
- [۱۵]. روشن، غلامرضا. محمدنژاد، وحید (۱۳۹۱). پیش‌بینی تغییرات هیدرولوژیک تراز آب دریاچه ارومیه با رویکرد به طرح‌هاي فرضی متفاوت گرمایش جهانی در دهه‌هاي آینده، پژوهش‌هاي ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳، زمستان ۱۳۹۱: ۸۸-۶۹.

- [۱۶]. سپهر، عادل (۱۳۹۱). *هبوط و عروج اکوسیستمی: پارادایم ارتجاع اکوسیستمی و پارادوکسی به‌نام توسعه پایدار*، مجموعه مقالات اولین کنفرانس ملی راهکارهای دستیابی به توسعه پایدار در بخش‌های کشاورزی، منابع طبیعی و محیط زیست.
- [۱۷]. سپهر، عادل (۱۳۹۱). *وراثت ژئومورفولوژیک: مخاطرات محیطی و تنوع زمینی*، همایش ملی ژئومورفولوژی و زیستگاه انسان، انجمن ایرانی ژئومورفولوژی.
- [۱۸]. شریفی، محمد. رامشت، محمدحسین. رفیعیان، مجتبی. قویدل، یوسف (۱۳۹۲). *هویت مکان و ادراک آن با رویکرد ژئوسیستمی*، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، سال ۲۴، پیاپی ۵۰، شماره ۲: ۱-۲۲.
- [۱۹]. صمدزاده، رسول (۱۳۹۰). *مخاطرات ناپایداری‌های دامنه‌ای در رویکرد کارآمد خطر و خطرپذیری*، رشد آموزش جغرافیا، دوره بیست‌وششم، شماره ۱، پاییز ۱۳۹۰: ۵۹-۵۰.
- [۲۰]. صمدزاده، رسول. رنجبر، محسن (۱۳۸۹). *مخاطرات ژئومورفولوژیک دره فرونشستی ماکو*، جغرافیا (انجمن جغرافیای ایران)، دوره جدید، سال هشتم، شماره ۲۴، بهار ۱۳۸۹.
- [۲۱]. عشقی، ابوالفضل (۱۳۸۳). *تحلیل سیستمی به‌عنوان یک الگوی پایه در روش تحقیق ژئومورفولوژی*، رشد آموزش جغرافیا، سال نوزدهم: ۲۹-۲۲.
- [۲۲]. علوی‌پناه، سیدکاظم. خدائی، کمال. جعفریگللو، منصور (۱۳۸۴). *مطالعه کارایی داده‌های ماهواره‌ای در بررسی کیفیت آب در دو سوی میان‌گذر دریاچه ارومیه*، پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۳: ۶۹-۵۷.
- [۲۳]. کک، رژه (۱۳۷۸). *ژئومورفولوژی (جلد دوم: ژئومورفولوژی اقلیمی)*، ترجمه فرج‌الله محمودی، تهران: انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم.
- [۲۴]. محمدنژاد، وحید (۱۳۹۰). *تحلیل مقایسه‌ای تحول مخروط‌افکنه‌های دامنه جنوبی البرز شرقی (دامغان تا گرمسار)*، دانشگاه تهران، رساله دکتری در رشته جغرافیای طبیعی گرایش ژئومورفولوژی، به راهنمایی دکتر مجتبی یمانی.
- [۲۵]. مختاری، داود (۱۳۸۸). *واکنش سیستم‌های مخروط‌افکنه‌ای به تغییرات اقلیمی کوآترنری*، مطالعه موردی: سیستم مخروط‌افکنه‌ای پرسیان در شمال‌کوه‌کیامکی، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۹۵، زمستان ۱۳۸۸: ۱۹۴-۱۷۶.
- [۲۶]. مقیمی، ابراهیم (۱۳۸۸). *آموزش مهندسی در بستر مخاطره شناسی در قرن ۲۱*، مجموعه مقالات کنفرانس آموزش مهندسی در ۱۴۰۴.
- [۲۷]. مقیمی، ابراهیم (۱۳۹۳). *دانش مخاطرات*، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

- [۲۸]. مقیمی، ابراهیم. باقری سیدشکری، سجاد. صفرراد، طاهر (۱۳۹۱). پهنه‌بندی خطر وقوع زمین لغزش با استفاده از مدل آنتروپی (مطالعه موردی: تاکدیس نثار زاگرس شمال غربی)، پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۹، بهار ۱۳۹۱: ۷۷-۹۰.
- [۲۹]. مهسافر، حمید. مکنون، رضا. ثقفیان، بهرام (۱۳۸۹). اثرات تغییر اقلیم بر بیلان آبی دریاچه ارومیه، تحقیقات منابع آب، سال هفتم، شماره ۱، زمستان و بهار ۱۳۸۹.
- [30]. Charlton, R. (2008). *Fundamentals of Fluvial Geomorphology*, Routledge Pub.
- [31]. Chorley, R., J. Kennedy, B. A. (1971). *Physical Geography: A Systems Approach*, London: Prentice-hall International.
- [32]. Church, M. (2002). *Geomorphic Thresholds in Riverine Landscapes*, Freshwater Biology No, 47, pp, 541-557
- [33]. Elverfeldt K, V. (2012), *System Theory in Geomorphology*, Challenges, Epistemological Consequences and Practical Implications.
- [34]. Goudie, A.S. (2004). *Encyclopedia of Geomorphology (Vol 1, A-I)*, Routledge Pub, Second Edition.
- [35]. Gutierrez, M., Sese, M. V. H., (2001). *Multiple Talus Flatirons, Variations of Scarp Retreat Rates and the Evolution of Slopes in Almazan Basin (Semi- Arid Central Spain)*. *Geomorphology*, No38, pp. 19-29.
- [36]. Hansom, J.D. (2001). *Coastal sensitivity to environmental change: a view from the beach*, *Catena*, No, 42. pp. 291-305.
- [37]. Haslet, S, K. (2011). *Coastal Systems*, London & New York, Routledge Interdictions' to Environment Series.
- [38]. Huggett, R, J. (2007). *Fundamentals of Geomorphology*, Routledge Pub, Second Edition.
- [39]. Huggett, R, J. (2009). *Physical Geography: The Key Concepts*, Routledge pub.
- [40]. Phillips, J.D. (2006). *Evolutionary Geomorphology: Thresholds and Nonlinearity in Landform Response to Environmental Change*, *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, No, 3, pp, 365-394
- [41]. Schumm S, A. (1979). *Geomorphic Thresholds. The Concept and Its Applications*. *Trans Inst Br Geographer* 4(4): pp. 85-515.
- [42]. Schumm, S.A. (1973). *Geomorphic Thresholds and Complex Response of Drainage Systems*. In Morisawa, *Fluvial Geomorphology*. New York: Binghamton, pp. 299-310.
- [43]. Smith, K. Petley, N. (2009). *Environmental Hazards Assessing and Reducing Disaster*, Routledge Pub, Fifth Edition.
- [44]. Starkel, L. (1998). *Geomorphic Response to Climatic and Environmental Changes Along a Central Asian Transect During the Holocene*, *Geomorphology*, No. 23, pp. 293-30.
- [45]. Witherick, M. Ross, S, Small, J (2001). *A Modern Dictionary of Geography*, Oxford University Press Inc., New York.