

الگوهای پایدار در فضای ناپایدار (ناپایداری تورینگ و بالن بوس)

عادل سپهر: استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران*

ندا محسنی: دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

وصول: ۱۳۹۲/۲/۲۶ پذیرش: ۱۳۹۳/۱/۲۲، صص ۳۰-۱۷

چکیده

تئوری شکل‌گیری الگوها از طریق انشعابات تورینگ نقش مهمی در بررسی دلایل ظهور الگوهای فضایی منظم و پیش-بینی ظهور آن‌ها در سیستم‌های زیستی، شیمیایی و فیزیکی دارد. از آنجا که پیچیدگی حاکم بر سیستم‌های اکوژئومورفیک (ژئوسیستم)، پیش‌بینی پاسخ آن‌ها را در برابر آشوب‌ها بسیار مشکل می‌کند، در دو دهه اخیر، ورود تئوری ناپایداری تورینگ به حیطه اکوژئومورفولوژی، زمینه‌ای برای ارائه انواع مدل‌های کنشی-انتشاری فراهم آورده است، تا براساس قوانین حاکم بر سیستم‌های تورینگ به تشریح دلایل، شرایط و مکانیزم‌های تاثیرگذار در ظهور پیچیدگی‌های اکوسیستمی پرداخته و بدین طریق امکان پیش‌بینی رفتار سیستم‌های آشوب زده فراهم گردد. با این رویکرد، در مقاله حاضر با هدف بررسی تاثیر شرایط تورینگ در ظهور ساختارهای پیچیده در سیستم‌هایی اکوژئومورفیک (با تاکید بر اکوسیستم‌های نیمه‌خشک)، به معرفی مدل کنشی-انتشاری ریتکرک پرداخته شده است. نتایج مدل نشان می‌دهد که اکوسیستم‌های نیمه‌خشک بسته به میزان و وسعت تنش‌تحمیلی به دو روش به تغییرات میزان بارش پاسخ می‌دهند: تغییر در بایومس پوشش گیاهی که این تغییرات بصورت ظهور الگوهای ناپایدار در فضای تورینگ دیده شده است و دیگر راه، تطبیق طول موج الگوها با تغییرات بارش، که چنین تغییری در فضای بالن بوس ظاهر می‌شود. چنین نتایجی می‌تواند بخوبی پاسخگوی این سوال باشند که چگونه چنین سیستم‌هایی به روش‌های غیرخطی به تغییرات محیطی پاسخ می‌دهند، تا آنجا که تغییرات تدریجی در طول زمان به تخریب سریع و ناگهانی در وضعیت سیستم منجر گردد.

واژه‌های کلیدی: فضای ناپایداری تورینگ، خودتنظیمی، فیدبک وابسته به مقیاس، الگوهای تورینگ، بالن بوس.

۱- مقدمه

ساکن (Spatial regular stationary patterns) خواهد شد. او چنین سیستم‌هایی را سیستم‌های کنشی-انتشاری (Reaction-diffusion) نامید. وی معتقد بود که انتشار و واکنش‌های شیمیایی در سیستمی با وضعیت اولیه همگن و پایدار منجر به شکل‌گیری الگوهای شیمیایی در طول زمان خواهد شد. سیستم‌های کنشی-انتشاری تورینگ، مدل‌های ریاضیاتی مرکب از مجموعه معادلات دیفرانسیل

در سال ۱۹۵۲ آلن تورینگ (Allen Turing)، ریاضیدان انگلیسی بر مبنای یک مدل ریاضی، نظریه‌ای در ارتباط با ظهور ساختارهای منظم در سیستم‌های شیمیایی مطرح نمود. وی عنوان کرد که کنش و انتشار در چنین سیستم‌هایی در شرایطی خاص منجر به گذر سیستم از وضعیت همگن (Homogeneous state) و پایدار اولیه به سمت وضعیتی همراه با شکل‌گیری الگوهای فضایی منظم و

دینامیک گیاه و آب مطرح شد. بعد از آن محققان دیگری مدل کلاسمیر را توسعه دادند و نحوه ظهور الگوها را در زمین‌های مسطح بررسی و پیش‌بینی کردند. هیلرزلمبرز و همکاران (۲۰۰۱)، ریتکرک و همکاران (۲۰۰۲ و ۲۰۰۴) مکانیزم اصلی در ظهور الگوها را تضاد نفوذ آب بین مناطق متراکم از پوشش گیاهی و بخش‌های فاقد پوشش عنوان کرده‌اند. هاردنبرگ و همکاران (۲۰۰۱) و در پژوهش دیگر مرن و همکاران (۲۰۰۴)، مدلی را براساس دینامیک پوشش گیاهی و دینامیک آب زیرزمینی در تشکیل الگوها ارائه نمودند. همچنین کوپل و همکاران (۲۰۱۲) و (۲۰۰۵) و ورمون و همکاران (۲۰۱۰) از طریق مدل‌های کنشی - انتشاری به تشریح دلایل ظهور الگوهای منظم در بسترهای صدفی سواحل مرجانی، اکوسیستم‌های تالابی و الگوهای حاصل از رسوبات جزر و مدی پرداختند.

سوال کلیدی که در این مقاله سعی در یافتن پاسخی برای آن هستیم، این است که آیا می‌توان تئوری تورینگ در زمینه شکل‌گیری ساختارهای منظم در سیستم‌های شیمیایی را به دلایل و شرایط ظهور انواع الگوهای مکانی در سیستم‌های اکوژئومورفیک تعمیم داد؟ در این راستا، قبل از ورود به بحث، به شرح کلیاتی از چارچوب این تئوری و نحوه ظهور ساختارها و الگوهای منظم در سیستم‌های تورینگ پرداخته شده است.

۱-۱- تئوری تورینگ: سیستم‌های فعالساز - بازدارنده^۴

سیستم‌های تورینگ، سیستم‌های کنشی - انتشاری مرکب از دو ماده اصلی هستند، یکی فعالسازها که منجر به تولید و تکثیر خودشان می‌شوند (فیدبک مثبت) و دیگری بازدارنده‌ها که منجر به افت عملکرد فعالسازها در سیستم می‌گردند (فیدبک منفی). نحوه انتشار و تعامل بین آن‌ها زمینه ایجاد ناپایداری

مشتق جزئی نیمه خطی^۱ بوده، که قادر به توضیح و پیش‌بینی دلایل و روند شکل‌گیری الگوهای فضایی منظم در انواع سیستم‌ها هستند. سیستم‌های کنشی - انتشاری تورینگ ماهیتا در شیمی کاربرد دارند. با این وجود، این گونه مدل‌ها می‌توانند عملکرد چنین فرایندهای دینامیکی را در سیستم‌های غیر شیمیایی نیز بخوبی توصیف کنند. مثال‌هایی از این نوع سیستم‌ها را می‌توان در زیست‌شناسی، فیزیولوژی، فیزیک و اکولوژی شاهد بود. مانند الگوهای موجود بر روی پوست حیوانات، الگوهای حاصل از رشد تومورها، الگوی ژن‌ها، الگوهای حاصل از رشد باکتری‌ها، الگوهای دندردیتی در حالت انجماد، الگوی کریستال‌های مایع، آنژیوژن‌ها^۲ و مورفوژن‌ها^۳.

از آنجا که پیچیدگی حاکم بر سیستم‌های دینامیک از جمله ژئوسیسستم‌ها (سیستم‌های اکوژئومورفیک)، پیش‌بینی پاسخ آن‌ها را در برابر اعمال آشوب‌ها بسیار مشکل می‌کند، در این راستا در سال‌های اخیر با ورود تئوری تورینگ به حیطه اکوژئومورفولوژی، محققان بسیاری با ارائه مدل‌های کنشی - انتشاری، دلایل ظهور پیچیدگی‌های سیستمی را از طریق قوانین تورینگ بررسی کرده و از این طریق توانسته‌اند به پیش‌بینی رفتار سیستم‌های تحت آشوب و در معرض خطر بپردازند. مدل‌های کنشی - انتشاری، بهترین روش برای درک رفتار غیرخطی اکوسیستم‌های خودتنظیم هستند. تمامی این مدل‌ها، الگوهای منظم شکل گرفته در انواع اکوسیستم‌ها را نتیجه ناپایداری شبه تورینگ عنوان کرده‌اند. اولین و کلی‌ترین مدل‌ها در این زمینه مدل کلاسمیر (۱۹۹۹) است. بعدها شرانت (۲۰۰۵ و ۲۰۰۷) آنالیزهای گسترده‌ای در زمینه ظهور الگوهای پوشش گیاهی در اکوسیستم‌های خشک براساس مدل کلاسمیر انجام داد. این مدل برای بررسی الگوهای منظم روی دامنه‌ها براساس

1 Semi-linear partial differential equations

2 Angiogenesis

3 morphogenesis

4 Activator-inhibitor systems

ماده A و I در مقادیر مختلف در سطح سیستم انتشار می‌یابند. تورینگ نشان داد که اگر انتشار I در سطح سیستم به عنوان عامل بازدارنده، سریعتر از ماده A (عامل فعالساز) باشد، در این شرایط تعامل و کنش بین A و I باعث ایجاد الگوهای فضایی منظم خواهد شد. در واقع شکل‌گیری این الگوها از یک طرف ناشی از تعامل بین این دو عامل و از طرف دیگر به دلیل سرعت انتشار و پراکنش بیشتر عامل بازدارنده نسبت به عامل فعالساز است. سرعت زیاد انتشار ماده بازدارنده در سطح سیستم باعث افزایش زمان موردنیاز برای تولید ماده فعالساز می‌گردد و در نهایت این فرایند منجر به پراکنش محلی^۲ فعالساز A می‌شود. در صورتیکه عامل بازدارنده به دلیل سرعت بالای انتشارش در مقیاس بسیار وسیع در کل سیستم پخش خواهد شد. اثرات فیدبک ماده فعالساز A و بازدارنده I در سطح سیستم به شدت وابسته به مقیاس عملکردی آنها در فضای موردنظر است: فیدبک مثبت ناشی از فعالیت ماده فعالساز، فقط در فواصل کوتاه و در مقیاس‌های کوچک و محدود عمل می‌کند. در حالی که عملکرد فیدبک منفی ناشی از فعالیت ماده بازدارنده در مقیاسی وسیع و در فواصل طولانی‌تر صورت می‌گیرد. به همین دلیل به تئوری تورینگ، اصطلاحاً "تئوری فیدبک وابسته به مقیاس" و به الگوهای ناشی از آن "الگوهای تورینگ" گفته می‌شود. از بین رفتن پایداری حاکم بر سیستم، به دلیل اعمال فرایند انتشار، در اصطلاح "ناپایداری تورینگ"^۳ یا ناپایداری حاصل از انتشار^۴ نامیده می‌شود. عملکرد فرایند انتشار و به تبع آن شکل‌گیری تدریجی الگوها همزمان با تحمیل آشوب، به نوعی پاسخ خودتنظیم سیستم با هدف مقابله با تنش است.

تورینگ و شکل‌گیری الگوهای فضایی منظم را در انواع سیستم‌های پیچیده شیمیایی، فیزیکی، زیستی و اکولوژیکی فراهم می‌آورد (نئوبرتا، کسول و موری، ۲۰۰۲: ۴۰۱، گودا، ریک و سیلبر، ۲۰۱۴: ۷۰۱، کفی، اپینگا و دیروترو، ۲۰۱۰: ۲۵۷، میازوکی، هری و هارا، ۲۰۱۳). در معادلات ۱ و ۲ به مدل کنشی - انتشاری تورینگ در زمینه پیش‌بینی ظهور الگوهای فضایی حاصل از انتشار اشاره شده است:

(۱) معادله فعالساز

$$\frac{\partial A}{\partial t} = D_A \nabla^2 U + f(A, I)$$

(۲) معادله بازدارنده

$$\frac{\partial I}{\partial t} = D_I \nabla^2 V + g(A, I)$$

در این معادلات: A و I، به ترتیب معرف ماده فعالساز و بازدارنده در سطح یک سیستم و DA و DI، به ترتیب ضریب انتشار عناصر فعالساز و بازدارنده هستند. عبارات f(A, I) و g(A, I)، عبارات واکنشی هستند که بصورت غیرخطی عمل می‌کنند. این معادلات، ترکیبی از انتشارات خطی همراه با روابط متقابل غیرخطی بین متغیرها بوده و نشان می‌دهند که چگونه انتشار و واکنش ناشی از ارتباط متقابل بین متغیرها باعث ظهور الگوهای فضایی منظم در سیستم‌های پیچیده می‌شود و از این طریق به بررسی مکانیزم موثر در ظهور الگوها و منشأ خودتنظیمی آنها می‌پردازند (دانکرلی، ۱۹۹۷: ۱۰۳، کلاسمیر، ۱۹۹۹: ۱۸۲۶، هیلرزلمبرز، ریتکرک، بش، دی کرون، ۲۰۰۱: ۵۰، ریتکرک، برجت، لنگولد، هیلرزلمبرز، کوپل، کومار، پرینز و دیروس، ۲۰۰۲: ۵۲۴).

تورینگ عنوان کرد که یک ماده شیمیایی A از طریق واکنش خودتجزیگی^۱ از یک طرف باعث تولید و تکثیر بیشتر خود شده و از طرف دیگر باعث فعال شدن یک عامل بازدارنده I نیز در سیستم می‌شود که در تعارض و رقابت با عامل اول است. به همین دلیل ماده A، نقش یک فعالساز را در سیستم ایفا می‌کند. دو

2 Local diffusion

3 Turing instability

4 diffusion-driven instability

1 Autocatalysis

۲-۱- الگوهای تورینگ در ژئوسیستم

بعد از اولین مشاهدات عکس‌های هوایی حاشیه صحرای افریقا در دهه ۱۹۵۰، الگوهای پوشش‌های گیاهی، هدف مطالعاتی بسیاری از محققان قرار گرفت (مک فدین، ۱۹۵۰: ۱۹۹). علت اصلی تمرکز اکولوژیست‌ها و ژئومورفولوژیست‌ها در دهه‌های اخیر بر روی مطالعات مدلسازی و شبیه‌سازی ساختار الگوها در انواع اکوسیستم‌ها، به نوعی پیش‌بینی روند تغییر وضعیت حاکم بر سیستم است (کلاسمیر، ۱۹۹۹: ۱۸۲۶، کفی، ریتکرک، آلدوس، پیویو، پاپاناستاسیس، الیچ و دیروتر، ۲۰۰۷: ۲۱۳، متکفسکی و ولپرت، ۱۹۹۳: ۲۶۵). اینکه چرا و چگونه حضور الگوهای تورینگ در چنین اکوسیستم‌هایی می‌تواند نشانه‌ای از ظهور تغییرات کاتاسترف (فروپاشی ناگهانی) در سیستم باشد.

ژئوسیستم‌های را می‌توان سیستم‌های اکوژئومورفیک با شرایط فیدبک وابسته به مقیاس در نظر گرفت، آنچه قابل قیاس با سیستم‌های فعالساز - بازدارنده‌ای هستند که برای اولین بار توسط تورینگ مطرح شد. از این میان، اکوسیستم‌های خشک به عنوان نمونه‌ای از این سیستم‌ها، مرکب از عناصر زیستی و محیطی هستند که تعامل بین آن‌ها می‌تواند منجر به ظهور فیدبک‌های متنوع بین متغیرهای سیستم گردد. از ویژگی‌های اصلی چنین مناطقی، وجود هتروژنیته‌های پوششی بصورت همجواری بخش‌هایی با تراکم پوششی زیاد در کنار بخش‌های خالی از پوشش گیاهی است (دهربس، ولنتین و تانگوی، ۲۰۰۱: ۱، لژیون، تیلیدی و کتران، ۲۰۰۲: ۹۰۱، تانگوی و لدویگ، ۲۰۰۱: ۲۰). این شرایط منجر به تجمع محلی آب و سایر منابع در مناطقی با تراکم بالای پوشش گیاهی (فیدبک‌های مثبت کوچک مقیاس به عنوان عامل فعالساز) و کمبود دسترسی به آب در بخش‌های دورتر و فاقد پوشش (فیدبک‌های منفی بزرگ مقیاس به عنوان عامل بازدارنده، ناشی از رقابت بین گیاهان برای دسترسی به منابع) و در نهایت ایجاد تضاد در

ظرفیت نفوذ آب در خاک می‌گردد. این فیدبک‌های وابسته به مقیاس در طول زمان زمینه شکل‌گیری الگوها را در هنگام وقوع آشوب فراهم می‌آورند (ریتکرک و کوپل، ۲۰۰۸: ۱۶۹، کوپل، بوما و هرمن، ۲۰۱۲: ۹۶۲، ریتکرک، دکر، دیروتر و کوپل، ۲۰۰۴: ۱۹۲۶). چنین فیدبک‌هایی، می‌توانند توجیعی برای پاسخ غیرخطی سیستم‌های پیچیده به تغییر شرایط محیطی باشند. بدین معنا که تغییرات تدریجی در شرایط محیطی در طول زمان، منجر به تلفات شدید در میزان بهره‌دهی محیط و تغییر ناگهانی چشم‌انداز به سمت وضعیت‌های الگوشده می‌شود.

یکی از ویژگی‌های قابل توجه سیستم‌های فعالساز - بازدارنده تورینگ، شکل‌گیری محدوده‌های پایداری دوجانبه^۱ در آن‌ها است. بدین معنا که بسته به شرایط اولیه محیط و ارزش متغیرهای سیستم، دو وضعیت پایدار به طور متناوب در سیستم ظاهر خواهند شد. به طوری که چنین محدوده‌های همیشه در حد وسط این وضعیت‌ها ظاهر می‌شوند (سپهر، ۱۳۹۳: ۱۲۶، ریتکرک، برجت، لنگولد، هیلرلمبرز، کوپل، کومار، پریز و دیروس، ۲۰۰۲: ۵۲۴، موری، ۲۰۰۱، هاردنبرگ، مرن، شاک و زارمی، ۲۰۰۱: ۱۰۱، جاد و سیلبر، ۲۰۰۰: ۴۵، برکمن، بنیائچ و دوول، ۲۰۰۴: ۲۳۹). در سیستم‌هایی با محدوده‌های پایداری دوجانبه، با تغییر تدریجی شرایط بیرونی سیستم، احتمال تغییر ناگهانی یکی از وضعیت‌ها به سمت سایر وضعیت‌های متناوب وجود دارد. که اصطلاحاً به این شرایط، گذرهای غیرپیوسته^۲ و یا کاتاسترفیک گفته می‌شود (شفر، کارپنتر، فلی، فلک و والکر، ۲۰۰۱: ۵۹۱). بنابراین، ظهور چنین محدوده‌هایی در سیستم‌های دینامیک، می‌تواند نشانه‌ای برای پیش‌بینی گذرهای سیستمی باشد.

هدف اصلی از ارائه این مقاله پاسخگویی بدین سوال است که اکوسیستم‌های نیمه‌خشک چگونه به تغییر

1 Bistable area
2 discontinuous transition

حداکثر میزان نفوذ / W_0 ، میزان نفوذ در بخش‌های فاقد پوشش گیاهی / τw ، تلفات رطوبت خاک ناشی از تبخیر و زهکشی / Dw ، ضریب انتشار آب در خاک / R ، میزان بارش / DO ، ضریب انتشار جریان سطحی. عبارات غیرخطی در این مدل‌ها توصیف کننده تعاملات محدود و موضعی بین آب و پوشش گیاهی بوده و عبارات انتشار بیانگر جابجایی و پراکنش متغیرها در کل سیستم هستند. در این مدل میزان نفوذ آب بشدت وابسته به میزان پوشش گیاهی است، به طوری که میزان نفوذ در مناطق پوششی بیشتر از بخش‌های فاقد پوشش گیاهی خواهد بود. در مدل مذکور برای پیش‌بینی شرایط ظهور الگوهای تورینگ، شرایط حاکم بر سیستم مطابق با تئوری تورینگ همگن و پایدار در نظر گرفته شده است (هیلرزلمبرز، ریتکرک، بش، دی کرون، ۲۰۰۱: ۵۰، تورینگ، ۱۹۵۲، موری، ۲۰۰۱). بدین معنا که مقدار همه پارامترها (تراکم گیاه، رطوبت و رواناب) در هر نقطه از مکان یکسان است. آشوب اعمال شده بر سیستم، شاخص خشکی بر مبنای کاهش میزان بارش بوده است. برای ارزیابی تاثیر این پارامتر کنترلی در تغییر متغیرهای سیستم، میزان آن در گام‌های زمانی کوچک تغییر داده شده است. کاهش تدریجی بارش تا آنجا تکرار می‌شود که میزان بارش به یک آستانه بحرانی (بارش کمتر از ۱) برسد، به طوری که در این شرایط کل پوشش همگن موجود در سیستم کاملاً نابود شد. در این شرایط وضعیت همگن سیستم با وقوع کوچکترین آشوب ناپایدار می‌گردد.

۳- نتایج

براساس مدل مذکور، نتایج را در دو بخش مورد بحث قرار داده‌ایم. در مرحله نخست، برای بررسی پاسخ سیستم به تغییرات میزان بارش R ، روند ناپایداری وضعیت همگن پوششی و شرایط آغاز شکل‌گیری الگوها از طریق انشعاب تورینگ براساس نتایج مشابه در کارهای ریتکرک و همکاران (۲۰۰۲)، کفی و همکاران (۲۰۱۰)، سایجر و همکاران (۲۰۱۴) و وان

شرایط محیطی خود پاسخ می‌دهند؟ در این راستا، سعی شده است که شرایط و دلایل ظهور ساختارها و الگوهای منظم با استفاده از انشعابات تورینگ و همچنین روند ناپایداری وضعیت‌های الگوشده با معرفی مدل کنشی - انتشاری ریتکرک، تحلیل شوند.

۲- روش کار

در این پژوهش به منظور بررسی ساختارهای تورینگ در سیستم‌های اکوژئومورفیک، از یک مدل کنشی-انتشاری بر پایه تئوری تورینگ بهره گرفته شده است. مدل ریتکرک از سه معادله دیفرانسیل مشتق جزئی تشکیل شده است که دینامیک سه متغیر اصلی را در اکوسیستم‌های نیمه‌خشک توضیح می‌دهد: دینامیک گیاه، رطوبت خاک و رواناب که به ترتیب در معادلات ۳، ۴ و ۵ آورده شده‌اند (هیلرزلمبرز، ریتکرک، بش، دی کرون، ۲۰۰۱: ۵۰، ریتکرک، برجت، لنگولد، هیلرزلمبرز، کوپل، کومار، پرینز و دیروس، ۲۰۰۲: ۵۲۴):

معادله (۳)

$$\frac{\partial P}{\partial t} = C \times g_{max} \times \frac{W}{W+K_2} \times P - d \times P + D_P \Delta P$$

معادله (۴)

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \alpha \times \rho \times \frac{P+K_2 \times W_0}{P+K_2} - g_{max} \times \frac{W}{W+K_2} \times P - r_w \times W + D_W \Delta W$$

معادله (۵)

$$\frac{\partial O}{\partial t} = R - \alpha \times O \times \frac{P+K_2 \times W_0}{P+K_2} + D_O \Delta O$$

در این معادلات، C ، رشد گیاه به نسبت میزان جذب آب / g_{max} ، حداکثر جذب آب (مقدار تقریبی جذب آب در هر واحد از تراکم بیومس، همراه با افزایش رطوبت خاک) / K_1 ، مقدار نیمه اشباع ناشی از جذب آب (با کاهش مقدار K_1 توانایی گیاهان برای افزایش رشد، تحت تنش‌های آبی (کاهش رطوبت خاک) کاهش می‌یابد). K_2 ، مقدار اشباع ناشی از نفوذ آب / d ، کاهش تراکم گیاه ناشی از مرگ و میر / D_p ، ضریب پراکنش گیاه (برای فرایندهای ایزوتروپیک (فرایندهای فیزیکی مشابه) نظیر باد و فعالیت حیوانات (موریانه‌ها، فاکتور مهمی برای انتشار بذرها در مناطق خشک و نیمه خشک هستند) / \square ،

در استلت و همکاران (۲۰۱۳) ارائه شده است. در گام بعدی با هدف بررسی شرایط ظهور الگوهای تورینگ، تئوری بالن بوس تحلیل شده است.

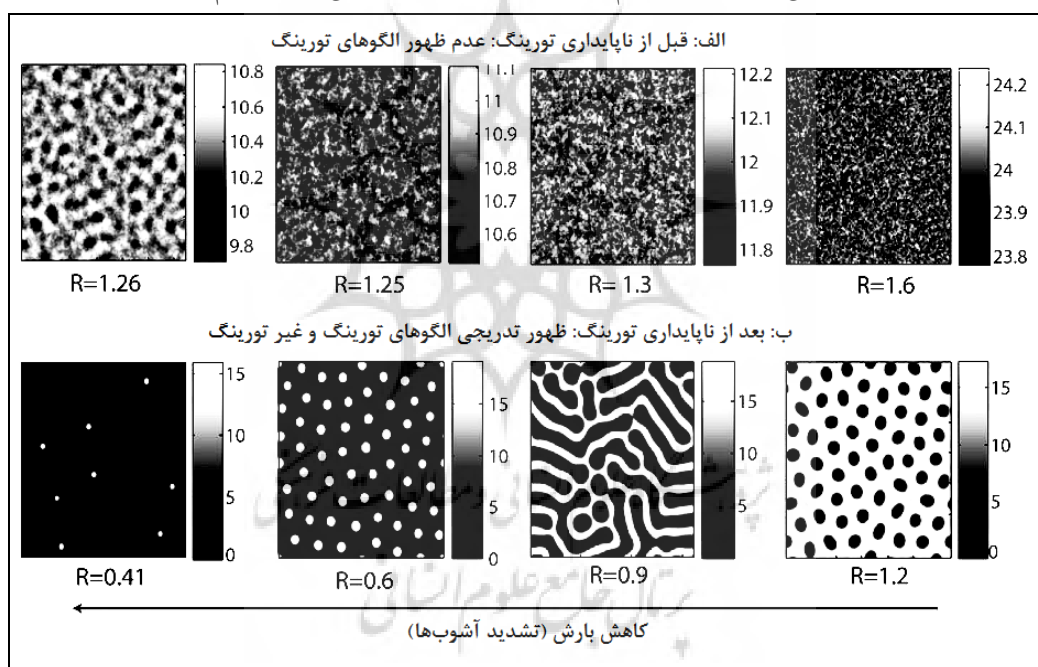
۳-۱- پایداری وضعیت همگن پوشش گیاهی: از وضعیت همگن پوششی به سمت فضای ناپایداری تورینگ

نتایج حاصل از شبیه‌سازی مدل مذکور در کارهای بسیاری از محققین از جمله داکوس، ریتکرک، هیلرزلمبرز، کفی و سایجر نشان می‌دهد که چگونه مکانیزم فیدبک وابسته به مقیاس منجر به شکل‌گیری الگوهای پوششی منظم از طریق ناپایداری تورینگ شده است. نتایج نشان داده است که در میزان بارش حدود ۱/۲ الگوهای درزی بروز می‌کنند. به تدریج با کاهش بیشتر بارش به کمتر از ۱ الگوی مارپیچ آشکار و در میزان بارش حدود ۰/۶ الگوهای نقطه‌ای در سیستم ظاهر می‌شوند (شکل ۱-ب). به تدریج با کاهش بیشتر مقدار بارش، نقاط پوششی از یکدیگر فاصله می‌گیرند. با توجه به اینکه میزان بارش در گام‌های زمانی خاص در سیستم به سطح بحرانی خود رسیده (به طوری که پوشش گیاهی قادر به تحمل این شرایط و ادامه حیات نخواهد بود)، با این وجود، زمان ترمیم سیستم قبل از نقطه ناپایداری تورینگ در مدل ریتکرک افزایش یافته است و هنوز آثاری از پوشش گیاهی دیده می‌شود (شکل ۱-الف). این امر ناشی از ظهور تدریجی الگوهای خودتنظیم پوشش گیاهی در مدل است. این رخداد نشان می‌دهد که شکل‌گیری الگوها منجر به افزایش بازدهی گیاهان در مقایسه با وضعیت همگن تحت آشوب (بدون ظهور الگوها) می‌شود. زمانی که میزان بارش به نقطه بحرانی (کمتر از ۱) رسیده است، دسترسی گیاه به آب بسیار محدود شده، پوشش گیاهی قادر به پایداری در برابر این تنش نخواهد بود و اکوسیستم در شرایط دومین نقطه انشعاب تورینگ قرار می‌گیرد. این نقطه انشعاب همان فروپاشی سیستم به سمت وضعیت کاملاً بیابانی است (سپهر، ۱۳۹۳: ۱۲۴، هیلرزلمبرز، ریتکرک، بش، دی

کرون، ۲۰۰۱: ۵۰، ریتکرک، برجت، لنگولد، هیلرزلمبرز، کوپل، کومار، پرینز و دیروس، ۲۰۰۲: ۵۲۴، کفی، اپینگا و دیروتر، ۲۰۱۰: ۲۵۷). بنابراین محدوده‌ای از ارزش متغیرهای مدل که تحت آن مقادیر، الگوها ظاهر می‌شوند، فضای ناپایداری تورینگ و الگوهای شکل گرفته در این محدوده، اصطلاحاً الگوهای تورینگ نامیده می‌شوند. نکته جالب در مطالعات مربوط به مدل مذکور، این است زمانی که میزان نفوذ آب در خاک‌های فاقد پوشش زیاد باشد، در این شرایط، فارغ از وجود پوشش گیاهی، آب می‌تواند در تمامی نقاط سیستم نفوذ کند. در این حالت، به دلیل توزیع همگن آب در سطح سیستم، فیدبک بین پوشش گیاهی و آب بسیار ضعیف است. برعکس، زمانی که میزان نفوذ آب در بخش‌های فاقد پوشش کم باشد، مقدار آب نفوذی، بشدت وابسته به حضور پوشش گیاهی در سیستم خواهد بود. به طوری که در این شرایط میزان نفوذپذیری در خاک‌هایی با تراکم زیاد پوشش گیاهی، افزایش می‌یابد. نتیجه چنین فرایندی، افزایش تضاد نفوذ بین بخش‌های پوششی و فاقد پوشش در سیستم است. در این شرایط، فیدبک مثبت بین آب و پوشش گیاهی بسیار قوی خواهد بود. بنابراین افزایش مقدار W_0 (میزان نفوذ آب در خاک فاقد پوشش)، به معنای عملکرد ضعیف فیدبک مثبت در سیستم بوده و در این شرایط گذر به سمت وضعیت بیابانی، پیوسته (غیرکاتاستروف) خواهد بود. این بدان معناست که هیچ محدوده پایداری دوجانبه‌ای در سیستم ظاهر نخواهد شد. اما زمانی که مقدار W_0 کاهش می‌یابد، شدت فیدبک مثبت در سیستم آنقدر افزایش پیدا می‌کند که باعث ناهمگنی بیشتر سیستم از لحاظ توزیع متغیرها خواهد شد. در این شرایط شاهد ظهور محدوده پایداری دوجانبه در سیستم هستیم. این موضوع نشان می‌دهد که مهم‌ترین عامل در شکل‌گیری چنین محدوده‌هایی و متعاقباً ظهور الگوهای منظم درون آنها، فیدبک‌های مثبت قوی بین گیاه و آب در

وضعیت غیر همگن پایدار تبدیل می‌گردد. شبیه‌سازی مدل نیز نشان داده است که وضعیت ناهمگن ناپایدار از وضعیت ناهمگن پایدار منشأ می‌گیرد (به ترتیب از وضعیت اولیه همگن پایدار به سمت وضعیت همگن ناپایدار و در نهایت وضعیت ناهمگن ناپایدار). زمانی که به دلیل افزایش تدریجی آشوب‌ها، توزیع پوشش بصورت ناهمگن بروز می‌کند، حالت کلونی و اجتماع گیاهی به تدریج، کمتر شده و گیاهان با فواصل زیاد و بصورت مجزا در سیستم پخش می‌شوند (شکل ۱-ب). به طوری که با رسیدن میزان بارش به پائین‌تر از سطح بحرانی، نقاط نیز به تدریج از یکدیگر دورتر شده و در این حالت وضعیت همگن فاقد پوشش (وضعیت بیابانی) در سیستم ظاهر خواهد شد.

مقیاس‌های مکانی متفاوت است. چنین نتایجی بخوبی با تئوری ناپایداری تورینگ در ظهور الگوهای منظم مطابقت دارد؛ بطوریکه الگوها زمانی شکل می‌گیرند که وضعیت سیستم نسبت به آشوب‌های همگن، پایدار باشند، بدین معنا که آشوب‌های تحمیلی بطور یکنواخت در سطح سیستم پراکنده شده باشند، بگونه ای که پایداری سیستم را تحت‌الشعاع قرار ندهند. اما زمانی که با افزایش تنش‌ها، سیستم بطور ناهمگن تحت تاثیر آشوب‌ها قرار بگیرد، توزیع ناهمگن آشوب، موجب پراکنش ناهمگن متغیرهای سیستم شده و در نتیجه وضعیت حاکم ناپایدار می‌گردد. از نقطه نظر ناپایداری تورینگ، وضعیت غیرهمگن ناپایدار به مرور زمان با ظهور تدریجی الگوهای منظم به



شکل ۱: الف: ظهور ساختارهای مکانی پوشش گیاهی قبل از رخداد ناپایداری تورینگ به تناسب کاهش بارش (R). ظهور بسیار کم‌رنگ الگوها قبل از ناپایداری تورینگ. ب: بعد از رخداد ناپایداری تورینگ، ظهور توالی از اشکال منظمی از الگوهای تورینگ و غیرتورینگ: به تناسب کاهش میزان بارش از الگوی گپ، به سمت الگوی لایرنرنت و سپس نقطه-ای. به سمت فروپاشی کامل سیستم، به تدریج از تعداد نقاط پوشش گیاهی کاسته شده و نقاط یا همان گیاهان از یکدیگر فاصله می‌گیرند (داکوس، کفی، ریتکرک، وان نس و شفر، ۲۰۱۱: ۱۵۳).

۳-۲- پایداری الگوها در فضای ناپایدار: از فضای

ناپایداری تورینگ به سمت فضای بالن بوس^۱

ناپایداری تورینگ همیشه وضعیت همگن سیستم را تحت الشعاع قرار داده و به تدریج با ناپایدار کردن وضعیت همگن تعادلی، سیستم را در معرض اولین نقطه گذر (نقطه انشعاب تورینگ) قرار می‌دهد. در واقع، نقطه انشعاب تورینگ، نقطه آغاز شکل‌گیری الگوها است. این الگوها، ناپایدار بوده و به تدریج با گسترش آشوب‌ها، تغییر و نوسان پیدا می‌کنند. اما شبیه‌سازی مدل، ظهور فضایی کامل از الگوهای پایدار را در وضعیت سیستم نشان داده است که اصطلاحاً بالن بوس نامیده می‌شود (بوس، ۱۹۷۸). محدوده‌ای در فضای پارامترهای سیستم (K, R) که در آن حداقل یک وضعیت متناوب پایدار ظاهر می‌گردد (شکل ۳) (وان در استلت، دثلمن، هک و ردمیچر، ۲۰۱۳: ۳۹). در واقع بالن بوس براساس ظهور وضعیت‌های پایدار در معرض ناپایداری تعریف می‌شود. این فضا، منطقه کاملی از ظهور الگوهای پایدار و دوره‌ای در وضعیت سیستم است، که در مقادیر متفاوتی از پارامترهای کنترل کننده (در اینجا، بارش) سیستم شکل می‌گیرد. یعنی فضای کاملی که در آن الگوهای شکل گرفته در نقطه انشعاب تورینگ به حداکثر گسترش، ثبات و پایداری می‌رسند. در این شرایط با وجود ناپایداری سیستم، شاهد ظهور وضعیتی خواهیم بود که پایداری و ثبات سیستم را تضمین کرده و منجر به تاخیر زمانی^۲ در پاسخ سیستم به تغییرات محیطی و عدم تداوم ناپایداری آن می‌گردد.

همچنانکه سیستم به سمت مرزهای بالن بوس پیش می‌رود، احتمال فروپاشی سیستم نیز بیشتر می‌شود. در مرز بالن بوس، به دلیل ظهور انواع مکانیزم‌های پیچیده ناپایدار کننده، وضعیت الگوشده به تدریج ثبات و پایداری خود را از دست داده تا جائیکه ممکن است

سیستم، در آستانه دومین نقطه گذر (وضعیت همگن بیابانی) قرار بگیرد.

نتایج مدل نشان داده است که دو مکانیزم، زمینه ناپایداری وضعیت الگوشده را در مرز بالن بوس فراهم می‌آورد: ناپایداری قوسی و ناپایداری باند جانبی (در فیزیک، ناپایداری باند جانبی، پدیده‌ای است که به موجب آن یک شکل موجی منظم^۳ تحت تاثیر دینامیک‌های غیرخطی در فضا و زمان، از حالت موجی خارج شده و بصورت طیفی از باندهای جانبی و یا به صورت ردیفی از پالس‌ها^۴ شکسته می‌شود) که بواسطه تغییر در انحنا^۵ مقادیر اولیه متغیرهای سیستم ایجاد می‌شود. بنابراین، زمانیکه الگوهای پایدار در وضعیت سیستم دیده می‌شوند، در این شرایط هیچ انحنایی در مقادیر اولیه متغیرهای سیستم دیده نمی‌شود. اما در شرایطی که میزان بارش بیشتر و بیشتر کاهش یابد، الگوهای موجود، پایداری خود را از دست داده، به طوری که در این شرایط کوچکترین آشوبی می‌تواند منجر به ناپایداری الگوها گردد (سایجر، سایرو، اسپنگا، ردمیچر، دثلمن و ریتکرک، ۲۰۱۴: ۸۱). به منظور درک بهتر این شرایط، فضای بالن بوس براساس شبیه‌سازی مدل ریتکرک در شکل ۲ نشان داده شده است. در این شکل، ناپایداری الگوها و فروپاشی سیستم به سمت وضعیت بیابانی توسط دو مکانیزم مختلف دیده می‌شود: ناپایداری قوسی و ناپایداری باند جانبی. بر این اساس، همچنانکه میزان بارش کاهش می‌یابد، وضعیت همگن پوششی به تدریج پایداری و مقاومت خود را از دست داده و از محدوده بالن بوس فاصله می‌گیرد. در شکل ۳، فضای ناپایداری تورینگ، بصورت خطوط مرزی منقطع نشان داده شده است. در این محدوده، با وجود افزایش تدریجی در پراکنش آشوب‌ها، همچنان تعداد امواج^۵ در وضعیت موجود سیستم ثابت باقی می‌ماند.

3 Periodic wave form

4 Wavetrain

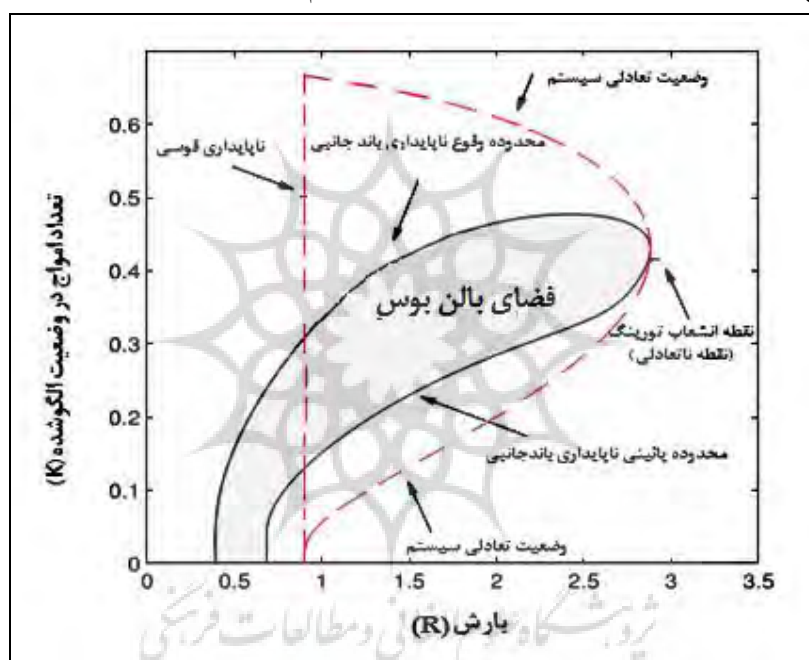
5 Wavenumber

1 Busse balloon

2 hysteresis

امواج آشوب‌هایی است که به سمت نقطه انشعاب تورینگ پیش می‌روند. اما در شرایطی که تنش‌ها تشدید می‌شود، تعداد موج الگوها دیگر با تعداد موج آشوب‌ها برابر نبوده و از یکدیگر فاصله می‌گیرند. این شرایط زمانی اتفاق می‌افتد که وضعیت سیستم به سمت مرزهای بالن بوس پیش می‌رود. در این حالت، الگوها تحت تاثیر مکانیزم‌های ناپایدار کننده موجود در مرز بالن بوس، به تدریج نابود شده، به طوری که پوشش گیاهی بصورت مجزا و نقاط دور از هم در سیستم ظاهر می‌شوند.

این فرایند می‌تواند ناشی از ظهور تدریجی الگوهای تورینگ در وضعیت سیستم باشد. به همین دلیل به این محدوده، فضای پیش‌بینی تورینگ گفته می‌شود. در واقع علت عدم کاهش تعداد امواج در وضعیت سیستم با وجود تشدید آشوب‌ها، ظهور تدریجی الگوهای خودتنظیم تورینگ است. در نتیجه، زمانی که بارش در طول زمان کاهش می‌یابد، وضعیت همگن پوششی نیز ناپایدار شده و الگوها، مستقیماً بعد از نقطه انشعاب تورینگ ظاهر خواهند شد. در این شرایط تعداد امواج (یا پالس‌ها) الگوها برابر با تعداد



شکل ۲: مناطق پایداری و ناپایداری در وضعیت‌های الگوشده براساس کاهش میزان بارش در مدل ریتکرک. خطوط منحنی سیاه، بیانگر محدوده ظهور ناپایداری باند جانبی و فضای بالن، منطقه ظهور الگوهای پایدار یا باس بالن است (فضای خاکستری). خطوط مرزی منقطع، فضای ناپایداری تورینگ (محدوده پیش‌بینی تورینگ) است، جاییکه، انباشتگی آشوب‌ها (کاهش بیشتر و بیشتر بارش) در وضعیت همگن پوششی به تدریج در حال افزایش است. سمت راست فضای تورینگ، وضعیت‌های همگن در برابر آشوب‌های احتمالی، پایدار هستند. در سمت چپ فضای پیش‌بینی تورینگ، در وضعیت‌های همگن متاثر از ناپایداری تورینگ، به دلیل پراکنش شدید آشوب‌ها، نقطه انشعاب قوسی ظاهر می‌شود. بالاترین مقدار بارش که در آن وضعیت همگن پوششی، تحت تاثیر ناپایداری تورینگ قرار می‌گیرد، بصورت نقطه انشعاب تورینگ نشان داده شده است (در استلت، دنلمن، هک و ردمیچر، ۲۰۱۳: ۳۹، سایجر، سایرو، اپینگا، ردمیچر، دنلمن و ریتکرک، ۲۰۱۴: ۸).

ناپایدار ظاهر می‌شوند. بنابراین الگوهای تورینگ، الگوهای ناپایدار و گذرا هستند. اما الگوهای پایدار، فراتر از نقطه انشعاب تورینگ شکل می‌گیرند. چنین

فضای پیش‌بینی تورینگ و فضای بالن بوس فقط تاحدی با یکدیگر همپوشانی دارند. بخش وسیعی از الگوها در فضای پیش‌بینی تورینگ، بصورت الگوهای

الگوهای مستقیمی از وضعیت‌های همگنی که تحت تاثیر ناپایداری تورینگ قرار گرفته‌اند، شکل نمی‌گیرند. زیرا نتایج مدل نشان داد که الگوهای پایدار ظاهر شده در فضای بالن بوس، در مقادیر بارشی بالاتر از نقطه انشعاب تورینگ ظاهر می‌شوند. به طوری که ظهور تدریجی بالن بوس قبل از نقطه انشعاب تورینگ، می‌تواند هشدار برای وقوع نزدیک ناپایداری تورینگ در وضعیت سیستم باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد تا زمانی که شرایط بیرونی در محدوده ظهور الگوهای پایدار در محدوده بالن بوس ثابت مانده و تغییر نکند، تغییری در تعداد موج الگوها نیز دیده نخواهد شد. اما همانطور که در شکل ۲ نیز دیده می‌شود، زمانی که میزان بارش کاهش می‌یابد، افزایش نقصان بارش باعث پیشروی وضعیت سیستم به سمت مرزهای بالن شده و در این شرایط اعمال مکانیزم‌های ناپایدار کننده، می‌تواند منجر به گذر سیستم به سمت دومین وضعیت تعادلی (وضعیت بیابانی) گردد، در این شرایط مرز بالن بوس شیب تندتری بخود می‌گیرد (در استلت، دثلمن، هک و ردمیچر، ۲۰۱۳: ۳۹، سایجر، سایرو، اپینگا، ردمیچر، دثلمن و ریتکرک، ۲۰۱۴: ۸).

۴- بحث

نتایج مدل احتمال رخداد چهار وضعیت را در سیستم تورینگ نشان می‌دهد: وضعیت همگن پوششی و عدم ظهور محدوده پایداری دوجانبه (شکل ۳-د، فضای سیاه)، وضعیت همگن پوششی و ظهور محدوده پایداری دوجانبه (شکل ۳-د، فضای سبز تیره)، ظهور الگوهای تورینگ و عدم ظهور محدوده پایداری دوجانبه (شکل ۳-د، فضای قرمز) و ظهور الگوهای غیرتورینگ به همراه ظهور محدوده پایداری دوجانبه (شکل ۳-د، فضای سبز روشن). الگوهای تورینگ پیش‌بینی شده در این مدل، همیشه در یک محدوده کوچک تحت سخت‌ترین شرایط محیطی شکل می‌گیرند (شکل ۳-ه). در اینجا شاهد ظهور الگوهای تورینگ تحت دو شرایط متفاوت هستیم: یکی در

حدوسط وضعیت همگن پوششی و وضعیت همگن فاقد پوشش، جاییکه این دو شرایط به عنوان دو وضعیت پایدار متناوب در سیستم ظاهر می‌شوند (شکل ۳-ب، مورد ۳، سمت چپ خط چین)، چنین شرایطی به معنای قرارگیری سیستم در معرض وقوع گذری کاتاستروف و غیرپیوسته است. دیگری، در شرایطی که الگوهای تورینگ تنها وضعیت پایدار حاکم بر سیستم هستند. این بدان معناست که در این شرایط محدوده پایداری دوجانبه در سیستم ظاهر نشده، در نتیجه الزام وضعیت بیابانی به عنوان دومین وضعیت متناوب پایدار در سیستم وجود نخواهد داشت (شکل ۳-ب مورد ۳، سمت راست خط چین). این شرایط به معنای وقوع گذری پیوسته^۱ در سیستم خواهد بود. در حالت اول، شاهد دو نقطه انشعاب در سیستم هستیم: اولین نقطه انشعاب تورینگ از وضعیت همگن پوششی به سمت ظهور الگوها است (شروع محدوده ناپایداری تورینگ که الزام در این شرایط شاهد ظهور محدوده پایداری دوجانبه نخواهیم بود، این شرایط آغاز ناپایداری سیستم بوده و هنوز آشوب‌ها وسعت زیادی ندارند). چنین وضعیتی در فضای بالن بوس ظاهر می‌شود. الگوهای تورینگ در این محدوده در شرایطی ظاهر می‌شوند که وضعیت همگن سیستم همچنان پایدار است. دومین نقطه انشعاب را می‌توان از محدوده ظهور الگوهای تورینگ به سمت الگوهای غیرتورینگ دانست (در این شرایط شدت و وسعت آشوب‌ها در سیستم افزایش یافته است، به طوری که سیستم در برابر آشوب‌های ناهمگن، ناپایدار شده است). این شرایط لزوماً همراه با شکل‌گیری محدوده‌های پایداری دوجانبه در سیستم خواهد بود، در چنین شرایطی الگوها به سمت مرزهای بالن بوس پیش می‌روند، جاییکه اعمال انواع مکانیزم‌های ناپایدار کننده، منجر به ناپایداری الگوها شده، به طوری که تداوم این شرایط، سیستم را در معرض وقوع گذری غیرپیوسته به سمت دومین

^۱ continuous transition

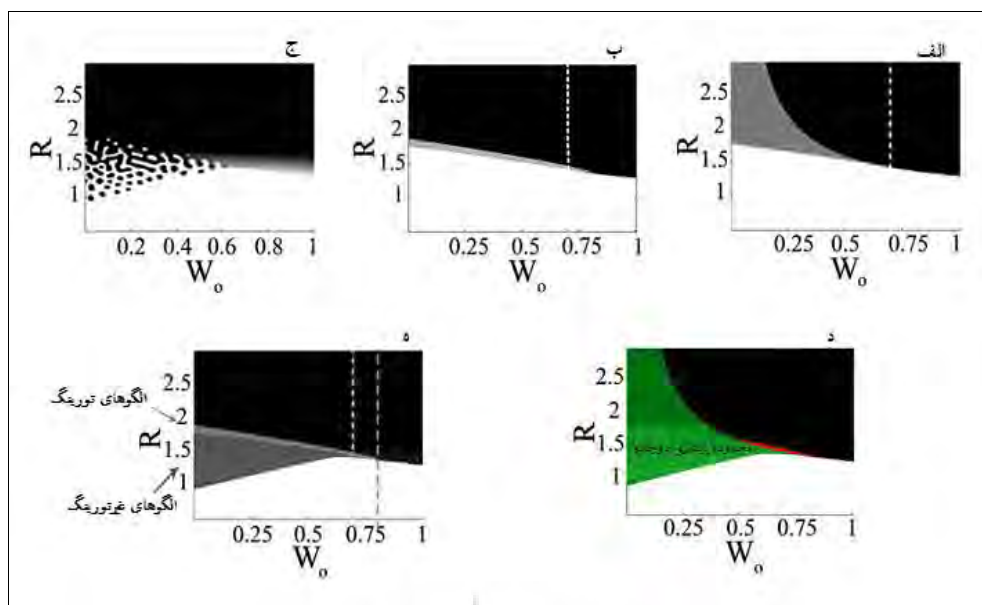
وضعیت پایدار قرار می‌دهد. بنابراین محدوده پایداری دوجانبه بخشی از فضای ناپایداری تورینگ است که بدنبال تشدید آشوب‌ها و تغییر وضعیت سیستم از حالت پایدار همگن به ناپایدار ناهمگن، به تدریج در سیستم ظاهر می‌شود. در شرایطی که سیستم در فضای تورینگ قرار دارد، اگر آشوب‌ها و تنش‌های تحمیلی کاهش یابد، سیستم می‌تواند با بازسازی و ترمیم ساختارهای خود مانع ظهور محدوده ناپایداری دوجانبه گردد.

در شبیه‌سازی مدل، برخی از الگوها بخصوص الگوهای مارپیچ و نقطه‌ای در خارج از محدوده ناپایداری تورینگ ظاهر شده‌اند (شکل ۳-ج). به چنین الگوهایی، اصطلاحاً الگوهای غیرتورینگ گفته می‌شود. در واقع الگوهای تورینگ و الگوهای غیر تورینگ هر دو الگوهایی با ساختارهای منظم هستند که بر اثر ناپایداری‌های حاصل از انتشار در سیستم-های کنشی - انتشاری شکل می‌گیرند. اما محدوده ظهورشان در سیستم و شرایطی که تحت آن شکل می‌گیرند، متفاوت است. الگوهای تورینگ (شامل الگوهای همگن پوشش گیاهی و الگوهای درزی) زمانی شکل می‌گیرند که با وجود اعمال آشوب، همچنان شرایط اولیه حاکم بر سیستم پایدار و همگن بوده، به طوری که آشوب‌ها و تنش‌های تحمیلی، توزیع و پراکنش یکسان و همگنی در سطح سیستم دارند. در این شرایط الزاماً وضعیت همگن بیابانی به عنوان وضعیت متناوب در سیستم دیده نمی‌شود. اما در شرایطی که تنش‌ها و آشوب‌های حاکم بر سیستم تشدید شده، به طوری که با توزیع غیریکنواخت خود در سطح سیستم منجر به ناهمگنی و ناپایداری متغیرهای چشم‌انداز گردند، الگوهای غیر تورینگ

بدنبال الگوهای تورینگ ظاهر خواهند شد (شکل ۳-ه). از آنجا که الگوهای غیر تورینگ در بدترین شرایط محیطی ظاهر می‌شوند، به همین دلیل حتماً وضعیت همگن بیابانی به عنوان دومین وضعیت پایدار متناوب در امتداد این الگوها ظاهر می‌شود (مقایسه شکل ۳-الف، ه). بنابراین می‌توان گفت فضای شکل‌گیری الگوهای تورینگ و غیرتورینگ کاملاً از یکدیگر متفاوتند. الگوهای تورینگ در فضای ناپایداری تورینگ ظاهر می‌شوند و ظهور این شرایط الزاماً به معنای شکل‌گیری محدوده پایداری دوجانبه در سیستم ناست. در صورتی‌که، الگوهای غیرتورینگ متعلق به محدوده پایداری دوجانبه در سیستم هستند (شکل ۳-د، فضای سبز). در نتیجه ظهور این الگوها به معنای قرارگیری سیستم در معرض وقوع حتمی گذری غیرپیوسته به سمت دومین وضعیت پایدار متناوب در سیستم خواهد بود (مورد ۴). دلیل این تفاوت آن است که ارزش و مقدار متغیرهای سیستم، در شرایطی که منجر به ظهور الگوهای غیر تورینگ می‌شوند بسیار پائین‌تر از ارزش متغیرها در فضای ناپایداری تورینگ است. در نتیجه الگوهای تورینگ در شرایطی که پارامترهای کنترلی سیستم مانند بارش به نزدیکی آستانه بحرانی کاهش یابند، همیشه به سمت الگوهای غیر تورینگ کشیده می‌شوند. هر چند محدوده شرایطی که تحت آن الگوهای غیرتورینگ شکل می‌گیرند بسیار کوچک است، اما ظهور این الگوها در بدترین شرایط محیطی، منجر به مقاومت سیستم در برابر آشوب‌ها و تاخیر در فروپاشی سیستم خواهد شد. این شرایط در سمت راست خط چین‌های سفید در شکل ۳ اتفاق می‌افتد.

وضعیت پایدار قرار می‌دهد. بنابراین محدوده پایداری دوجانبه بخشی از فضای ناپایداری تورینگ است که بدنبال تشدید آشوب‌ها و تغییر وضعیت سیستم از حالت پایدار همگن به ناپایدار ناهمگن، به تدریج در سیستم ظاهر می‌شود. در شرایطی که سیستم در فضای تورینگ قرار دارد، اگر آشوب‌ها و تنش‌های تحمیلی کاهش یابد، سیستم می‌تواند با بازسازی و ترمیم ساختارهای خود مانع ظهور محدوده ناپایداری دوجانبه گردد.

در شبیه‌سازی مدل، برخی از الگوها بخصوص الگوهای مارپیچ و نقطه‌ای در خارج از محدوده ناپایداری تورینگ ظاهر شده‌اند (شکل ۳-ج). به چنین الگوهایی، اصطلاحاً الگوهای غیرتورینگ گفته می‌شود. در واقع الگوهای تورینگ و الگوهای غیر تورینگ هر دو الگوهایی با ساختارهای منظم هستند که بر اثر ناپایداری‌های حاصل از انتشار در سیستم-های کنشی - انتشاری شکل می‌گیرند. اما محدوده ظهورشان در سیستم و شرایطی که تحت آن شکل می‌گیرند، متفاوت است. الگوهای تورینگ (شامل الگوهای همگن پوشش گیاهی و الگوهای درزی) زمانی شکل می‌گیرند که با وجود اعمال آشوب، همچنان شرایط اولیه حاکم بر سیستم پایدار و همگن بوده، به طوری که آشوب‌ها و تنش‌های تحمیلی، توزیع و پراکنش یکسان و همگنی در سطح سیستم دارند. در این شرایط الزاماً وضعیت همگن بیابانی به عنوان وضعیت متناوب در سیستم دیده نمی‌شود. اما در شرایطی که تنش‌ها و آشوب‌های حاکم بر سیستم تشدید شده، به طوری که با توزیع غیریکنواخت خود در سطح سیستم منجر به ناهمگنی و ناپایداری متغیرهای چشم‌انداز گردند، الگوهای غیر تورینگ



شکل ۳: ظهور الگوهای پوشش گیاهی تورینگ و غیرتورینگ در مدل ریتکرک. الف: دیاگرامی از ظهور محدوده پایداری دوجانبه بین وضعیت همگن پوششی (فضای سیاه) و وضعیت همگن بیابانی (فضای سفید). ب: دیاگرامی از ظهور محدوده ناپایداری تورینگ: محدوده سیاه، وضعیت همگن پوششی، محدوده خاکستری، محدوده ظهور الگوهای تورینگ، محدوده سفید، وضعیت همگن فاقد پوشش، د: دیاگرام محدوده پایداری دوجانبه از ترکیب وضعیت دیاگرام‌های الف و ج. فضای سیاه، وضعیت همگن پوششی بدون شکل‌گیری محدوده پایداری دوجانبه. کل فضای سبز، محدوده پایداری دوجانبه در وضعیت سیستم شبیه‌سازی شده. فضای سبز تیره، ظهور دو وضعیت پایدار متناوب (وضعیت همگن پوششی و وضعیت همگن بیابانی). فضای قرمز، به معنای ظهور الگوهای تورینگ در خارج از محدوده پایداری دوجانبه (در واقع قبل از ظهور محدوده پایداری دوجانبه) و فضای سبز روشن، ظهور الگوهای تورینگ و غیرتورینگ همراه با وضعیت همگن بیابانی. ه: محدوده‌های ظهور الگوهای تورینگ و غیرتورینگ از ترکیب شرایط سیستم در دیاگرام‌های ب و ج. فضای سیاه، وضعیت همگن پوششی. خاکستری روشن، پیش‌بینی الگوهای تورینگ در شبیه‌سازی مدل و محدوده خاکستری تیره، ظهور الگوهای غیرتورینگ. سمت چپ خط‌چین، محدوده گذر غیرپیوسته یا کاتاستروف (به معنای ظهور محدود پایداری دوجانبه) و سمت راست خط‌چین، محدوده گذر پیوسته به موازات کاهش بارش (کفی، اپینگا و دیروترو، ۲۰۱۰: ۲۵۷).

۵- جمع‌بندی

نقطه انشعاب تورینگ شکل می‌گیرند، الگوهای ناپایدار بوده و از این رو ممکن است در شبیه‌سازی مشاهده نشوند. اما مدل، ظهور فضایی را در مقادیر مشخصی از میزان بارش در وضعیت سیستم نشان می‌دهد که اصطلاحاً فضای بالن بوس نامیده می‌شود. برخلاف الگوهای ظاهر شده در نقطه انشعاب تورینگ، الگوهای شکل‌گرفته در این محدوده، الگوهای پایدار با گسترش و فراوانی زیاد می‌باشند، به طوری که منشا ظهور این الگوها، الگوهای ناپایدار اولیه در نقطه انشعاب تورینگ بوده، که به تدریج به دلیل انطباق طول موج این الگوها با شرایط محیطی و آشوب‌های تحمیلی به ثبات و پایداری می‌رسند. ظهور این الگوهای پایدار منجر به پیدایش وضعیتی جدید (وضعیت الگوشده یا همان فضای بالن بوس) در

در این پژوهش ظهور الگوها و دگرگونی سیستم اکوژئومورفیک بر پایه مدل ریتکرک و با کمک قواعد تورینگ تحلیل و بحث شده است. نتایج مدل نشان داده است که اکوسیستم‌های نیمه‌خشک به دو روش به تغییرات میزان بارش پاسخ می‌دهند: (۱): تغییر در بایومس پوشش گیاهی (این تغییر بصورت ظهور الگوهای ناپایدار در فضای تورینگ دیده می‌شود) و (۲): از طریق تطبیق طول موج الگوها با تغییرات بارش (چنین تغییری در فضای بالن بوس رخ می‌دهد). همچنین مدل نشان داده است که نقطه انشعاب تورینگ، زیر مرحله خطرناک و بحرانی بوده و فقط علامتی برای پیش‌بینی وقوع خطری نزدیک در وضعیت سیستم است. از طرف دیگر، الگوهایی که در

- arid ecosystems, *Theoretical Ecology*, Vol. 3, pp. 257-269.
- K'efi, S., Rietkerk, M., Alados, C.L., Pueyo, Y., Papanastasis, V.P., Elaich, A., de Ruiter, P.C., 2007, Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems, *Nature*, Vol. 449, PP. 213-217.
- Klausmeier, C. A., 1999, Regular and irregular patterns in semiarid vegetation, *Science*, Vol. 284, pp. 1826-1828.
- Lejeune, O., Tlidi, M., Couteron, P., 2002, Localized vegetation patches: A self-organized response to resource scarcity, *physical review*, Vol. 66, pp. 010901-4.
- Matkowsky, B. J., Volpert, V. A., 1993, Stability of plane wave solutions of complex Ginzburg-Landau equations, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 51, PP. 265-281.
- Macfadyen, W., 1950, Vegetation patterns in the semi-desert plains of British Somaliland, *The Geographical Journal*, Vol. 116, No. 4, pp. 199-211.
- Meron, E., Gilad, E., von Hardenberg, J., Shachak, M., Zarmi, Y., 2004, Vegetation patterns along a rainfall gradient, *Chaos, Solitons & Fractals*, Vol. 19, PP. 367-376.
- Miyazako, H., Hori, Y., Hara, Sh., 2013, Turing Instability in Reaction-Diffusion Systems with a Single diffuser: Characterization Based on Root Locus, 52nd IEEE Conference on Decision and Control, Florence, Italy.
- Murray, J.D., 2001, *Mathematical biology: I. An introduction*, Springer, New York.
- Neuberta, M.G., Caswell, H., Murray, J.D., 2002, Transient dynamics and pattern formation: reactivity is necessary for Turing instabilities, *Mathematical Biosciences*, Vol. 175, PP. 1-11.
- Reitkerk, M., Boerlijst, M.C., Langevelde, F.V., Hillerislambers, R., Van de Koppel, J., Kumar, L., Prins, H.H., de Roos, A.M., 2002, Self-Organization of Vegetation in Arid Ecosystems, *The American Naturalist*, Vol. 160, NO, 4, PP. 524 -530.
- Rietkerk, M., Dekker, S.C., de Ruiter, P.C., Van de Koppel, J., 2004, Self-Organized Patchiness and Catastrophic Shifts in Ecosystems, *Science*, Vol. 305, pp. 1926 - 1929 .
- Rietkerk, M., van de Koppel, J., 2008, Regular pattern formation in real ecosystems. *Trends in Ecology*, Vol. 23, PP, 169-175.
- Sherratt, J.A., 2005, An analysis of vegetation stripe formation in semi-arid landscapes, سیستم می‌شود. همچنین نتایج مدل نشان داده است که ناپایداری وضعیت‌های الگوشده و فروپاشی سیستم به سمت دومین وضعیت تعادلی (بیابان‌زایی) تحت تاثیر دو مکانیزم مختلف ناپایدار کننده (ناپایداری قوسی و ناپایداری باندجانبی) در مرزهای بالن بوس اتفاق می‌افتد.
- منابع**
- سپهر، ع.، ۱۳۹۳، پایداری دوجانبه و فروپاشی کاتاستروفیک: تحلیل ترمودینامیکی پدیده بیابان-زایی، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۵۴ (۲)، ۱۱۹-۱۳۲.
- Borckmans, P., Benyaich, K., Dewel, G., 2004, Spatial bistability: a chemical idiosyncrasy?, *International Journal of Quantum Chemistry*, Vol. 98, PP, 239-247.
- Busse, F., 1978, Non-linear properties of thermal convection, *Reports on Progress in Physics*, Vol. 41, PP.1929-1967.
- Dakos, V., Kefi, S., Rietkerk, M., Van Nes, E., Scheffer, M., 2011, Slowing Down in Spatially Patterned Ecosystems at the Brink of Collapse, *The American Naturalist*, Vol. 177, No. 6, pp. 153 - 166.
- d'Herbes, J. M., Valentin, C., Tongway, D. J., 2001, Banded vegetation patterns and related structures in Banded vegetation patterning in arid and semiarid environments; ecological processes and consequences for management, *Ecological studies* 149, Springer-Verlag, New York, USA, pp.1-19.
- Dunkerley, D. L., 1997, Banded vegetation: development under uniform rainfall from a simple cellular automation model, *Plant Ecology*, Vol. 129, PP. 103-111.
- Gowda, K., Riecke, H., Silber, M., 2014, Transitions between patterned states in vegetation models for semiarid ecosystems, *Physical review*, Vol. 89, PP. 022701-8.
- HilleRisLambers, R., Rietkerk, M., van den Bosch, F., Prins, H. H.T., de Kroon, H., 2001, Vegetation pattern formation in semi-arid grazing systems, *Ecology*, Vol. 82, pp. 50-61.
- Judd, S. L., Silber, M., 2000, Simple and superlattice Turing patterns in reaction-diffusion systems: bifurcation, bistability, and parameter collapse, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, Vol. 136, PP. 45-65.
- K'efi, S., Eppinga, M.B., de Ruiter, P.C., 2010, Bistability and regular spatial patterns in

- organization in estuarine ecosystems, *Experimental Biology*, Vol. 215, PP. 962-967.
- Van de Koppel, J., Rietkerk, M., Dankers, N., Herman, P.M.J., 2005, Scale-Dependent Feedback and Regular Spatial Patterns in Young Mussel Beds, *The american naturalist*, Vol. 165, No. 3, PP. 67-77.
- Van der Stelt, S., Doelman, A., Hek, G., Rademacher J. D.M., 2013, Rise and fall of periodic patterns for a Generalized Klausmeier-Gray-Scott model, *Nonlinear Science*, Vol. 23, N.1, PP. 39-95.
- Von Hardenberg, J., Meron, E., Shachak, M., Zarmi, Y., 2001, Diversity of vegetation patterns and desertification, *physical review Letter*, Vol. 87, No. 19, PP. 198101-4.
- Weerman, E. J., Van de Koppel, J., Eppinga, M. B., Montserrat, F., Liu, Q. X., Herman, P. M. J., 2010, Spatial self-organization on intertidal mudflats through biophysical stress divergence, *The american naturalist*, Vol. 176, PP. 15-32.
- Mathematical Biology, Vol. 51, pp.183-197.
- Sherratt, J.A., Lord, G.J., 2007, Nonlinear dynamics and pattern bifurcations in amodel for vegetation stripes in semi-arid environments, *Theoretical Population Biology*, Vol. 71, PP.1-1.
- Scheffer, M., Carpenter, S., Foley, J.A., Folke, C., Walker, B., 2001, Catastrophic shifts in ecosystems, *Nature*, Vol. 413, PP. 591-596.
- Siteur, K., Siero, E., Eppinga, M.B., Rademacher, J.D.M., Doelman, A., Rietkerk, M., 2014, Beyond Turing: The response of patterned ecosystems to environmental change, *Ecological Complexity*, Vol. 20, PP. 81-96.
- Tongway, D. J., Ludwig, J. A., 2001, Theories on the origins, maintenance, dynamics, and functioning of banded landscapes, in *banded vegetation patterning in arid and semiarid environments: ecological processes and consequences for management*, *Ecological studies* 149, Springer-Verlag, New York, USA, pp. 20-31.
- Turing, A. M., 1952, The chemical basis of morphogenesis, *Biological Sciences*, Vol. 237, No. 64, pp.37-72.
- Van de Koppel, J., Bouma, T.J., Herman, P. M. J., 2012, The influence of local- and landscape-scale processes on spatial self-

