The 1st International Conference of IALE-Iran
30-31 October 2013, Isfahan University of Technology, Iran
web: www.Iale.Iran.iut.ac.ir/conference. Email:Iale.Iran@of.iut.ac.ir

IALE-Iran Certificate of Participation

The organizing committee of the 1st International Conference of IALE-Iran is pleased to award this certificate to

Adel Sepehr

In recognition of contribution to the presentation entitled

Klausmeier Reaction-Diffusion Equation in Vegetation Pattern Formation of Arid Ecosystems

In the 1st International Conference of IALE-Iran, Isfahan University of Technology,
30-31 October, 2013

Nasrollah Mahboobi Soofiani
Conference Chair

Sima Fakheran
Scientific Committee Chair
President of IALE Iran

The 1st International Conference of IALE-Iran
30-31 October 2013, Isfahan University of Technology, Iran
نخستین کنفرانس بین المللی
اکولوژی سیمای سرزمین
۸ و ۹ آبان ۱۳۹۱، دانشگاه صنعتی اصفهان، ایران
Web: www.Iale.Iran.iut.ac.ir/conference, Email:Iale.Iran@of.iut.ac.ir

معادله کنشی– انتشاری کلاسمیر در شکل گیری الگوهای پوشش گیاهی اکوسیستم های خشک

عادل سپهر[1]

چکیده

شکل‌گیری الگوهای هندسی را می‌توان در طیف وسیعی از سیستم‌های فیزیکی، شیمیایی و زیستی (اکوسیستم) شاهد بود. الگوهایی چون اشکال نقطه ای در پوست ببر و الگوی نواری در پوست گورخر نمودی از الگوهای منظم در جهان خلقت است. مشابه چنین الگوهایی را می‌توان در الگوهای پوشش گیاهی، ریپل مارک‌ها و الگوهای هیدروگرافی در مناطق خشک جستجو کرد. برهم کنش فرایندهای هیدروژئومورفیک و فرایندهای بادی، تکامل سیمای سرزمین را در این نواحی عهده‌دار بوده است. هدف از این پژوهش تحلیل دینامیک الگوهای پوشش گیاهی تحت روابط کنشی – انتشاری غالب بر شکل‌گیری این الگوها در مناطق خشک است. در این مقاله با استفاده از معادله PDE کلاسمیر، ساختار الگوهای پوشش در مناطق خشک تحلیل شده است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برهم کنش فرایندهای اکوژئومورفولوژیکی و رقابت دسترسی به آب، دینامیکی از الگوهای منظم و پراکنده را در مرز محیط‌های نیمه خشک تا بیابانی رقم زده است. همچنین مشخص شد که در شرایط رطوبتی کم، الگوهای نقطه‌ای و در اکوسیستم‌های با بارش زیاد، الگوهای نواری شکل می‌گیرد. نتایج این پژوهش می‌تواند راهگشای تدوین مدل ریاضی شکل‌گیری الگوهای پوشش در اکوسیستم‌های خشک و نیمه‌خشک ایران باشد.

واژگان کلیدی: دینامیک غیرخطی، الگوهای پوشش گیاهی، PDE، کنشی- انتشاری

مقدمه

مناطق خشک و نیمه خشک در حدود ۳۰٪ از مساحت کره زمین را در برگرفته‌اند. در این مناطق سیستم‌های اکوهیدروژئومورفیک با بازخوردهای قوی در مقیاس‌های کوچک تا وسیع به چشم می‌خورد. اکوسیستم‌های نیمه خشک، اکوسیستم‌هایی با بارش متوسط سالانه ۲۵۰ تا ۵۰۰ میلی‌متر هستند و بطور مشخص در مرز محیط‌های بیابانی یافت می‌شوند. از طرف دیگر اکوسیستم‌های سبزتر از قبیل ساوانا، علفزارها و جنگل‌ها، در سمت دیگر محیط‌های بیابانی واقع شده‌اند. ترکیب گونه‌های گیاهی از یک اکوسیستم به دیگر اکوسیستم بسیار متنوع هستند و ترکیبی از گراس ها، درختچه‌ها، بوته‌زارها و درختان را تشکیل می‌دهند. شکل‌گیری الگوهای پوشش گیاهی صرفا مربوط به تیپ خاک منطقه نیست، بلکه مکانیزم‌های درون گونه‌ای و بر هم کنش گیاه و آب در سال‌های اخیر مورد توجه محققان بوده است (Klausmeier, 1999).

[1] استادیار دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد Email: adelsepehr@um.ac.ir

مطالعه الگوهای پوشش گیاهی عمدتا بر روی نواحی و اکوسیستم‌های خشک، از آنجا که تغییر حالات مکانی- زمانی اکوسیستم را به خوبی نشان می‌دهند، متمرکز شده است. اولین مطالعات در خصوص الگوهای پوشش به سال‌های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ بر می‌گردد. مطالعاتی که توسط مکفادین[۱] (۱۹۵۰)، ورال[۲] (۱۹۶۰)، بولر و هاج[۳] (۱۹۶۴) و گریگ اسمیت و کادویک[۴] (۱۹۶۵) انجام شده است. این مطالعات در سال‌های اخیر رونق چشم‌گیری به خود گرفته است. از آن جمله می‌توان به کارهای کلاسمیر (۱۹۹۹)، ساکو و همکاران (۲۰۰۷)، کفی و همکاران (۲۰۰۷) اشاره داشت.

بسیاری از سیستم‌های طبیعی در الگوهای مختلف زمانی-مکانی یافت می‌شوند. الگوهای دوره‌ای و متناوب[۵]، رایج‌ترین و معمول‌ترین این الگوها در سیستم‌های طبیعی است. این الگوها را می‌توان در مقیاس‌ها و اندازه‌های گوناگون مشاهده کرد. از جمله این الگوها، می‌توان به الگوهای نواری پوشش گیاهی در مناطق حد گذر بیابان (مناطق نیمه خشک) اشاره داشت. در بحث شکل‌گیری الگوها، الگوهای دوره‌ای و تناوبی، معمولا پلی بین الگوهای مرکب و الگوهای همگن می‌باشند. در حقیقت جریان همرفتی فیزیک، الگوی یک پدیده را در طبیعت رقم می‌زند. نقش جریان همرفتی زمانی مشهودتر است که عدد زبری R که بیانگر تغییرات و تفاوت‌های درجه حرارت است از یک مقدار بحرانی R_C تجاوز کند، در این حالت سیال از حالت پایداری خارج می‌شود. بطور کلی برای مقادیر $R > R_c$، محدوده‌ای از مقادیر K تعریف شده است که نمایانگر پایداری یک اکوسیستم است. این محدوده‌های الگوهای پایدار در شرایط آشفتگی و اغتشاش[۶] مفهوم تازه‌ای به خود می‌گیرد. معادلات کنشی- انتشاری[۷]، شاید ساده‌ترین حالت از معادلات PDE[۸] ریاضی هستند که در خلق الگوهای ترکیبی استفاده می‌شوند. روابط پوشش گیاهی، خاک و آب در قالب این روابط مدلسازی می‌شوند. معادلات PDE که در مدلسازی دینامیک الگوهای پوشش گیاهی کاربرد دارند، زیاد هستند.

تورینگ (۱۹۵۲) معادلات کنشی- انتشاری توصیف کننده یک سیستم را که از دو ماده (عنصر) تشکیل شده بود، مطالعه نمود. این عناصر شامل: فعال کننده[۹] که موجبات بازخورد مثبت سیستم را فراهم می‌کند و عنصر دیگری که بازدارنده[۱۰] نام دارد و موجب کند شدن فرآیند فعالیت می‌شود (فیدبک یا بازخورد منفی) می‌باشند. تورینگ نشان داد که زمانیکه اثرات فعال کننده در طول یک دامنه نسبتا کوتاه رخ دهد، اثرات بازدارندگی در طول یک دامنه نسبتا وسیع رخ می‌دهد. به عبارت دیگر هنگامیکه پخش یا انتشار بازدارندگی بسیار سریع‌تر از فعال‌کنندگی صورت می‌گیرد، سیستم می‌تواند در حالت ناپایدار به صورت اغتشاشات (آشفتگی‌های) ناهمگن فضایی مطرح باشد. به عبارتی، یک سیستم آشفته می‌تواند به حالت الگوهای فضایی منظم که در زمان پایدارند (الگوهای ثابت فضایی) تبدیل شود.

برخی مدل‌های فعال کننده- بازدارنده، شامل فعال کننده کوتاه دامنه و بازدارنده بلند دامنه، می‌توانند یک دامنه وسیع از الگوهای منظم را که در طبیعت قابل مشاهده‌اند، ایجاد کنند (کلاسمیر، ۱۹۹۹). یک مورد خاص از سیستم‌های فعال- بازدارنده تحت عنوان زیر سیستم‌های فعال- تهی شده[۱۱] معروفند. در این سیستم‌ها، اثرات بازدارندگی نتیجه‌ای از تخلیه یک زیر سیستم، که در طول تولید یک فعال کننده مصرف شده است، می‌باشد (Meinhardt, 1995).

---

[1] - Macfadyen
[2] - Worrall
[3] - Boaler and Hodge
[4] - Greig-Smith & Chadwick
[5] - Periodic Pattern
[6] - Turbulent
[7] - **Reaction-diffusion**
[8] - Partial Differential Equations
[9] - Activator
[10] - Inhibitor
[11] - Activator - depleted substrate

در یک اکوسیستم، گیاهان می‌توانند محیط خود را در جهت افزایش جریان منابع به سمت خود تغییر دهند، این امر منجر به تجمع و تمرکز محلی این منابع در یک نقطه می‌شود. برداشت منابع حیات از محیط‌های پیرامون و حرکت این منابع به سمت گیاه منجر به خالی شدن و تخلیه منبع در نقاط دورتر از گیاه می‌شود. این مورد خاص از روابط متقابل زیر سیستم فعال-تهی، به عنوان مکانیزم منبع-تمرکز[1] شناخته شده است. ون هاردنبرگ و همکاران (۲۰۰۱)، در مطالعه بررسی تنوع الگوهای پوشش گیاهی و بیابانی شدن اراضی، مدلی جدید برای شکل گیری الگوهای پوشش گیاهی معرفی کردند. مدل ارائه شده در این پژوهش، مرزهای گذر از خاک لخت در بارش اندک تا پوشش یکدست و همگن در بارش زیاد را در قالب الگوهای نقطه‌ای، نواری، دایره‌ای و متراکم پیش‌بینی می‌کند. بر اساس مدل این مطالعه، طبقه‌بندی خشکی و تعیین محدوده بیابان‌زایی امکان‌پذیر است. کلاسمیر (۱۹۹۹) در پژوهشی جهت بررسی الگوهای منظم و نامنظم پوشش گیاهی در مناطق خشک، یک مدل اکولوژیکی از دینامیک گیاه و آب بر پایه روابط اکوژئومورفیک ارائه کرد. مدل کلاسمیر مشخص می‌کند که الگوهای منظم نتیجه‌ای از ناپایداری تورینگ[2] است. همچنین الگوهای نامنظم، زمانیکه دینامیک اکولوژیکی، تغییرپذیری توپوگرافیک کوچک مقیاس را تقویت می‌کند، ظهور می‌یابند.

در این مقاله سعی شده است تا با تحلیل فرایندهای حاکم بر الگوهای پوششی و با تاکید بر مدل کنشی- انتشاری کلاسمیر، شکل گیری این الگوها در ارتباط با فرایندهای اکوژئومورفیک بحث و تحلیل شود.

مواد و روش‌ها[3]

روش کار این پژوهش در قالب بررسی الگوهای پوشش گیاهی بوسیله تصاویر Google Earth در مناطق خشک و نیمه خشک جهان و مطالعه میدانی شکل‌گیری این الگوها در دامنه خشک و نیمه خشک استان خراسان رضوی صورت گرفته است. با استفاده از معادله کنشی- انتشاری کلاسمیر، برهم کنش فرایندهای حاکم بر شکل‌گیری الگوها و بازخوردهای (فیدبک) موجود در دینامیک الگوها برای دامنه‌های نیمه خشک و خشک بررسی شده است. اندازه‌گیری رطوبت خاک، سرعت جریان و نفوذپذیری و ارتباط با آن با بیومس با اندازه‌گیری تراکم پوشش جهت بررسی بازخورد روابط حاکم صورت گرفت.

یافته‌ها و بحث

بحث درباره شکل‌گیری الگوها در دو قالب تحلیل الگوهای پوششی و بررسی معادله کنشی-انتشاری کلاسمیر بر شکل‌گیری این الگوها صورت گرفته است.

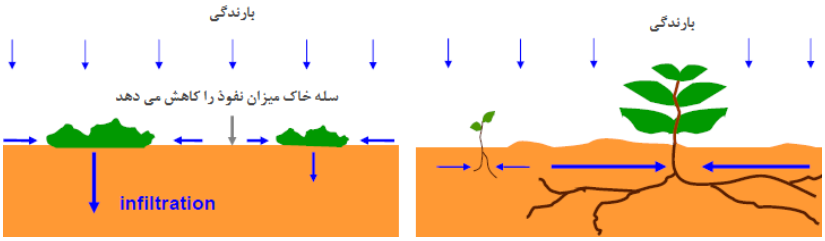
تحلیل معادله کنشی- انتشاری کلاسمیر

ساده‌ترین مدل استفاده شده برای توصیف اکوسیستم‌های نیمه خشک مدل کلاسمیر است. مدل کلاسمیر از جمله اولین مدل‌های دینامیکی بین آب سطحی و پوشش گیاهی در یک اکوسیستم کنشی-انتشاری است. کلاسمیر یک مدل مفهومی دو عنصره جهت توصیف الگوهای اکوسیستم‌های نیمه خشک ارائه کرد که این دو عنصر شامل عنصر آب (u) و عنصر بیومس پوشش گیاهی (v) می‌باشد (رابطه ۱).

[1] - Resource-Concentration
[2] - Turing-like instability
[3] - این مقاله بخشی از نتایج پژوهش‌های مربوط به دینامیک فروپاشی و مدلسازی تعادل‌های غیر خطی در اکوسیستم‌های نیمه خشک که توسط نویسنده مقاله در حال انجام است.

$$\begin{cases} u_t = k_0 u_x + k_1 - k_2 u - k_3 k_5 u v^2; \\ v_t = d_v v_{xx} - k_4 v + k_5 u v^2 \end{cases} \quad (1)$$

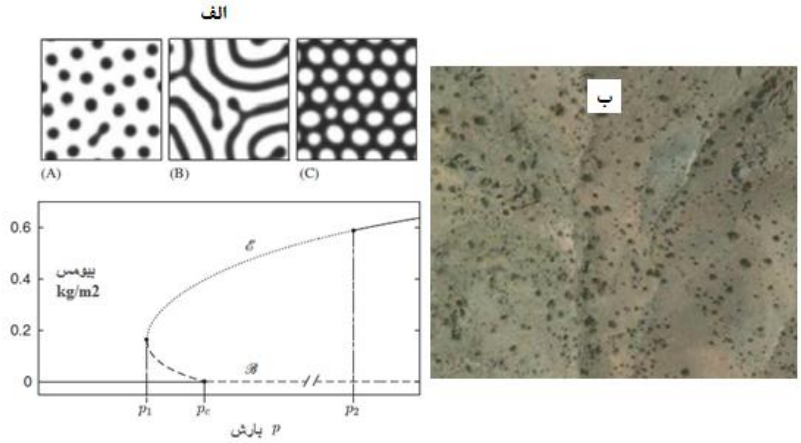
بر اساس رابطه مذکور، رقابت برای دسترسی به آب، موجب شکل‌گیری بیومس‌های گیاهی و نیز الگوهای مختلف این بیومس ها خواهد شد. تشکیل الگوهای پوشش گیاهی نتیجه‌ای از بازخورد مثبت در مقیاس‌های کوچک است. تشکیل این الگوها در مناطق خشک به دسترسی به آب برای پوشش در این مناطق برمی‌گردد. با افزایش آب قابل دسترسی برای لکه‌های پوشش، الگوهای پوشش شکل می‌گیرند. دسترسی آب به میزان بارش، ویژگی‌های خاک، توپوگرافی و عوامل مشابه دیگر بستگی دارد که در تشکیل الگوهای فضایی موثرند. در شکل ۱، نقش بارش، نفوذ جریان و عوامل مانع در میزان نفوذ پذیری در دینامیک الگوهای رویشی نشان داده شده است.



شکل ۱: نقش عوامل بازدارنده محیطی در شکل گیری الگوهای رویشی

جهت بررسی این فیدبک، میزان بارش‌های مختلف در دامنه‌های نیمه خشک و خشک خراسان رضوی در ارتباط با تغییرات پوشش بررسی شد. نتایج این پژوهش در ارتباط با رقابت گیاه در دریافت آب و همچنین گرادیان بارش و تغییرات پوشش گیاهی مشخص کرد که سه حالت الگوی رویشی در مقادیر متفاوت بارش قابل مشاهده است. مطابق شکل ۲ (الف)، اگر P_c ،P_1 و P_2 را به ترتیب معرف شرایط متفاوت بارش از میزان بارش حداقل تا حداکثر در نظر بگیریم، سه الگوی متفاوت بر حسب گرادیان بارش قابل تشخیص است. اگر میزان $P>P_c$ باشد، این شرایط عمدتا معرف مناطق خشک و فراخشک است و الگوهای پوشش از نوع نقطه‌ای (Spots) است. در این شرایط بیومس نیز در حداقل است. شکل ۲ (ب)، نمونه‌ای از این نوع الگو را در خراسان جنوبی و در مناطق خشک بیرجند نشان می‌دهد. برای $P>P_1$، الگوهای پوشش به سمت رقابت کم‌تر برای آب پیش می‌روند و الگویی نواری شکل (Stripes) را نشان می‌دهند. برای مناطق با بارش زیاد و در شرایطی که $P_1<P<P_2$ الگوها به سمت الگوهای یکنواخت که نشان از حداقل رقابت برای دریافت آب است پیش می‌روند. این تغییرات در شکل ۲ به وضوح نشان داده شده است.

دیاگرام انشعابات در شکل ۲ نشاندهنده الگوهای یکنواخت و منظم و نیز ویژگی‌های پایداری است. دو الگوی اصلی در این دیاگرام انشعاب دیده می شود. الگوی نقطه‌ای برای شرایط بارش اندک و الگوی نواری در شرایط بارش زیاد.



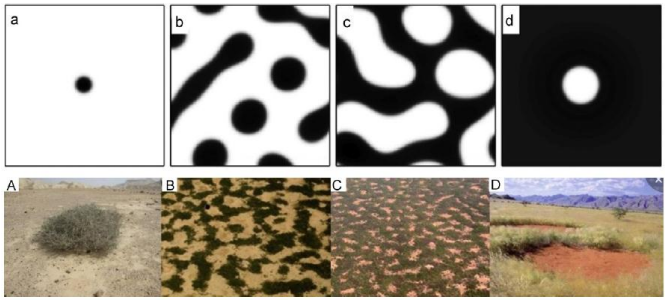
شکل ۲: الف) ارتباط بین گرادیان بارش و دینامیک الگوهای پوشش گیاهی، ب) الگوی پوششی نقطه‌ای در خراسان جنوبی حاصل از رقابت شدید برای دسترسی به آب

الگوهای حلقه‌ای، مثال دیگری از الگوهای پوشش در اکوسیستم‌های خشک می‌باشند. اما چه ارتباطی بین این دو شکل از الگوها در نواحی خشک است. مطالعات پژوهشگر تا کنون نشان داده است که می‌توان شاخص تحت عنوان شاخص حلقه برای شکل‌گیری این الگوها در مناطق خشک بصورت رابطه ۲ ارائه نمود.

$$\Delta = \frac{b\,max - b\,core}{b\,max} \qquad (۲)$$

در این رابطه b_{max} معرف حداکثر تراکم بیومس در لکه و b_{core} معرف تراکم بیومس در مرکز لکه پوشش می‌باشد. $\Delta = 0$ منتهی به الگوهای نقطه‌ای با حداکثر تراکم بیومس در مرکز لکه و $\Delta = 1$ به الگوهای حلقه ای شکل ($b_{core} = 0$) منجر خواهد شد. مقادیر حدواسط $0 < \Delta < 1$ به الگوهای حلقه‌ای کشیده می‌انجامد. در شکل ۳، دینامیک الگوهای پوشش بر حسب میزان دسترسی به منابع حیات نشان داده شده است. همانطور که گفته شد الگوهای نواری مرز گذر مناطق خشک و مرطوب هستند.

بطور کلی نتایج این پژوهش نشان داده است که همانطور که کلاسمیر در بررسی‌های خود به فیدبک بین آب-بیومس اشاره داشته است، رقابت در دریافت آب می‌تواند یکی از عوامل اصلی در دینامیک الگوهای رویشی در مناطق خشک باشد. مع الوصف، آنچه مهم است این است که خاک، نفوذپذیری و شرایط ژئومورفولوژیکی از عوامل مهمی هستند که در کنش با گیاه، دینامیکی از الگوهای نقطه‌ای تا همگن را در مناطق خشک بوجود می‌آورند که این موضوع در تحقیقات آتی در حال مدلسازی است.



شکل ۳: دینامیک الگوهای پوشش در مناطق خشک، نیمه خشک و مرطوب، نقطه‌ای (a)، نواری-نقطه‌ای (b)، نواری-همگن (c)، همگن (d)

نتیجه‌گیری

شکل‌گیری الگوها نتیجه‌ای از بازخوردهای بین آب-بیومس و بیومس-ژئومورفیک است. این بازخوردها دینامیک از الگوهای نقطه‌ای تا همگن را در مناطق خشک تا مرطوب‌تر رقم زده است. کلاسمیر مدل کنشی – انتشاری از این بازخورد را در قالب معادله مشتقات جزئی (PDE) ارائه کرد. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که گرادیان بارش و نفوذپذیری از عوامل حیاتی اصلی در شکل‌گیری الگوها در مناطق خشک و در ایران می‌باشند.

قدردانی

این پژوهش بخش از تحقیقات صورت گرفته در راستای طرح پژوهشی شماره ۱۵/۲۸۷۴۰ که با حمایت مادی – معنوی مدیریت ارتباط علمی دانشگاه و جامعه دانشگاه فردوسی مشهد و معاونت علمی- فناوری ریاست جمهوری (بنیاد ملی نخبگان) در حال انجام است. نویسنده بر خود لازم می‌داند از کلیه یاری دهندگان طرح در بخش‌های مذکور تشکر و قدردانی نماید.

مراجع

1) Klausmeier, C.A. 1999. Regular and irregular patterns in semiarid vegetation. Science 284, 1826–1828.
2) Macfadyen, W. A. 1950. Vegetation patterns in the semi-desert plains of British Somaliland, Geogr. J., 116, 199 – 210.
3) Worrall, G. A. 1960. Patchiness in vegetation in the northern Sudan, J. Ecol., 48, 107 – 115.
4) Boaler, S. B., and C. A. H. Hodge. 1964. Observations on vegetation arcs in the Northern Region, Somali Republic, J. Ecol., 52, 511 – 544.
5) Greig-Smith, P., and M. J. Chadwick. 1965. Data on pattern within plant communities. III. Acacia-Capparis semi-desert scrub in the Sudan, J. Ecol., 53, 465 – 474
6) Saco, P.M., Willgoose, G.R., Hancock, G.R. 2006. Ecogeomorphology and vegetation patterns in arid and semi-arid regions. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 3, 2559–2593.
7) Kéfi, 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 449, 213–216.
8) Turing AM. 1952. The chemical basis of morphogenesis. Philos Trans R Soc Lond B 237, 37–72
9) Meinhardt, H. 1982. Models of Biological Pattern Formation, Academic, London
10) Von Hardenberg, J., E. Meron, M. Shachak, and Y. Zarmi. 2001. Diversity of vegetation patterns and desertification, Phys. Rev. Lett., 87 (19), 198101-1–198101-4

Klausmeier Reaction-Diffusion Equation in Vegetation Pattern Formation of Arid Ecosystems

1129

Adel Sepehr *

* **Assistant Professor at Ferdowsi University of Mashhad (FUM), Mashhad, Iran**
Email: adelsepehr@um.ac.ir

Abstract

Regular pattern formation occurs in a variety of physical, chemical, and biological systems. Most illustrative examples are the typical markings found on animal coats, such as spots on leopards or stripes on zebras. The hydrographic, vegetation and ripple mark patterns are same regular and irregular patterns found in the arid ecosystems. The landscape evolution is consequence of hydro-geomorphic and aeolian process feedbacks in these ecosystems. The main purpose of this article is analyzing vegetation pattern dynamics in the arid ecosystems under reaction-diffusion mathematical relationships. In this article, the vegetation patterns dynamics have been analyzed under Klausmeier reaction-diffusion equation. The results indicated the feedbacks of ecogeomorphic-biomass and water competition have been caused vegetation pattern dynamics in arid ecosystems. Also, it was distinguished that formation of spot patterns is in the low rainfall conditions and strip patterns formed in the ecosystems with high precipitation amount. The results of this research can be helpful to develop mathematical model of vegetation pattern formations in the arid and semi-arid ecosystems of Iran.

Keywords: non-linear dynamics, vegetation patterns, PDE, reaction diffusion.