



انجمن علمی مدیریت و کنترل مناطق بیابان ایران
Iranian Scientific Association of Smart Management and Creativity (SASMC)

سومین همایش ملی فرسایش بادی و طوفان های گرد و خبار

دانشگاه نیریز ۲۶-۲۵ دی ماه ۱۳۹۲



دانشگاه نیریز

امیرالمؤمنین علی (ع): علم، عمل را فرمای خوانند اگر اجابت کند می ماند و گرنه از صفحه جان آدمی کوچ می کند

(نسخ البلاغه - حکمت ۳۶۶)

بدین وسیله گواهی می شود سرکار خانم ندامت محسنی

و همکار: عادل سپهر

در سومین همایش ملی فرسایش بادی و طوفان های گرد و خبار که در دی ماه ۱۳۹۲ توسط دانشگاه نیریز و انجمن علمی مدیریت و کنترل مناطق بیابانی ایران برگزار گردید شرکت و مقاله خود را با عنوان "تحلیل مدل شکل گیری تپه های ماسه ای حاصل از باد های یک جهته با استفاده از محادلات دینفرانیل معمولی" ارائه نمودند. توفیق روز افزون شما را در پی بیشتر اهداف علمی کشور عزیزمان جمهوری اسلامی ایران از خداوند تبارک و تعالی مسئلت داریم.



محمد زارع اهرنابی

دبیر سومین همایش ملی فرسایش بادی و طوفان های گرد و خبار
انجمن علمی مدیریت و کنترل مناطق بیابان ایران

محمد رضا اختصاصی

دبیر علمی همایش و نائب رئیس انجمن علمی مدیریت و کنترل مناطق بیابانی ایران



وزارت نیرو
شرکت سهامی مدیریت منابع آب



پژوهشگاه ملی تحقیقات منابع آب
سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی



تحلیل مدل شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای حاصل از بادهای یک جهت با استفاده از معادلات دیفرانسیل معمولی

ندا محسنی¹، عادل سپهر²

1- دانشجوی دکتری ژئومرفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه فردوسی مشهد

neda.mohseni@stu.um.ac.ir

2- استادیار گروه مدیریت مناطق خشک و بیابانی، دانشکده منابع طبیعی و محیط زیست، دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

جابجایی ذرات ماسه به وسیله باد در مقیاس زمانی، فرآیندی کاهشی با دینامیک غیر خطی است. در حالی که تحول تپه‌های ماسه‌ای، پدیده‌ای خود تنظیم در شکل‌گیری سیستم‌های پیچیده ژئومورفیک (ژئوسیستم‌ها) محسوب می‌شود. در سال‌های اخیر تحلیل‌های زیادی از دینامیک غیرخطی فرم‌های حاصل از عملکرد باد، در قلمروهای بیابانی صورت گرفته است. مدل‌های حاصل از معادلات دیفرانسیل معمولی (ODE) و جزئی (PDE)، از جمله روش‌های کمی در تحلیل شکل‌گیری و دینامیک شکل‌های مختلف تپه‌های ماسه‌ای می‌باشند. هدف از این مقاله، تحلیل مدل شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای حاصل از بادهای یک جهت با استفاده از معادلات دیفرانسیل معمولی است. لذا، سعی شده است تا با تشریح مدل مذکور و تحلیل روابط ریاضی حاکم بر دینامیک تپه‌های ماسه‌ای، روند انتقال فرم‌های متفاوت حاصل از بادهای یک جهت، بحث شود. نتایج حاصل از این مدل، نشان می‌دهد، کاهش حجم ماسه و جریانات افقی آن در طول زمان، باعث تغییر تپه‌های ماسه‌ای عرضی - افقی به سمت فرم‌های عرضی - موجی شده، به طوری که ادامه روند کاهشی ماسه، سبب تغییر اشکال موجی به برخان می‌گردد. همچنین دینامیک اشکال انتقالی، به صورت نقاط انشعابی بر روی منحنی‌های غیرخطی قابل توجیه و بررسی است. این مقاله می‌تواند در توسعه مدل‌های دیفرانسیل و تحلیل دینامیک فرم‌های تپه‌های ماسه‌ای در قلمروهای بیابانی ایران مورد استفاده قرار گیرد.

واژه‌های کلیدی: بادهای یک جهت؛ سیستم‌های پیچیده؛ تپه‌های ماسه‌ای؛ نقاط انشعاب.

مقدمه

پیچیدگی¹، از مهم‌ترین ویژگی ژئوسیستم‌ها و چشم‌اندازهای بادی است. به طور کلی بررسی تغییرات لندفرم‌های بادی، از جمله تپه‌های ماسه‌ای به کمک شاخص‌های مرفومتریک انجام می‌شود، در حالی که جابجایی رسوبات در قالب مدل‌ها و روابط دینامیک مورد بررسی قرار می‌گیرند (Bass., 2007). فرسایش بادی باعث شکل‌گیری انواع مختلفی از فرم‌های تپه‌های ماسه‌ای نظیر برخان، تپه‌های ماسه‌ای ستاره‌ای - ای شکل، تپه‌های طولی و عرضی می‌شود. عوامل متعددی مانند؛ تداوم جهت باد و حجم ماسه‌های موجود در ایجاد این اشکال نقش دارند. برای مثال برخان‌های هلالی، بسته به میزان ماسه‌های موجود در امتداد بادهای یک جهت و تپه‌های عرضی عمود بر جهت بادهای غالب منطقه شکل می‌گیرند. در حالی که تپه‌های طولی و ستاره‌ای به ترتیب

1 - Complexity

حاصل بادهای دو جهته و چند جهته می‌باشند (Cook & et al., 1993). بنابراین، اشکال ساده تپه‌های ماسه‌ای در طول زمان به صورت فرم‌های منظم‌تری ظاهر می‌شوند و این وضعیت تا زمانی که رژیم بادی در یک منطقه تغییر نکند، پایدار خواهد ماند (Kocurek & Ewing., 2005). در سال‌های اخیر گسترش مدلسازی‌های عددی، بررسی تحول تپه‌های ماسه‌ای و توجیه فرایندهای دینامیکی جابجایی آن‌ها را تسهیل کرده است. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی دینامیکی و یا استفاده از سلول‌های خودکار خودتنظیم¹ برای شبیه‌سازی شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای متاثر از وجود پوشش گیاهی از آن جمله‌اند (Bass & Nield., 2007). از طریق این مدل‌ها می‌توان شکل‌گیری اشکال مختلف حاصل از جابجایی رسوبات را به خوبی پیش‌بینی کرد. همچنین مطالعات مربوط به تحلیل‌های کمی تپه‌های ماسه‌ای، عمدتاً بر روی فرایندهای مرفودینامیک آن‌ها متمرکز شده است. به طوریکه می‌توان از مدل‌های ریاضی ODE و PDE² برای شبیه‌سازی اشکال تپه‌های ماسه‌ای نام برد (Nishimori & Ouchi., 1993). نیا³ و همکاران (2010)، مدل شکل‌گیری ساختار تپه‌های ماسه‌ای⁴ (DS) را مطرح کردند، که ترکیبی از معادلات دیفرانسیل معمولی⁵ (ODE) می‌باشد. در این مدل هر کدام از معادلات دیفرانسیل، بیانگر دینامیک مقاطع عرضی دو بعدی⁶ (2D-CSc) تپه‌های ماسه‌ای در ارتباط با دو عامل اصلی شکل‌گیری آن‌ها شامل میزان ماسه و قدرت باد می‌باشد. این مدل قادر به شبیه‌سازی سه نوع از رایج‌ترین اشکال تپه‌های ماسه‌ای عرضی - افقی، عرضی - موجی و برخان با توجه به حجم ماسه و قدرت باد است. همچنین روند تغییر فرم‌های تپه‌های ماسه‌ای را با در نظر گرفتن تغییر پارامترهای موثر در شکل‌گیری آن‌ها، از طریق تحلیل نقاط انشعابی بر روی نمودار غیرخطی بررسی می‌کند (Niiya & et al., 2012). در این پژوهش سعی شده است، تحلیلی از مدل دیفرانسیلی مذکور در دینامیک شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای حاصل از بادهای یک جهته انجام شود. بررسی دینامیک فرم‌های تپه‌های بادی و مقایسه شکل‌گیری فرم‌های مشابه در اکوسیستم‌های خشک ایران از اهداف اصلی مقاله حاضر است.

مدل شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای (DS)

همانطور که بیان شد مدل DS (شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای) به بررسی فرایند شکل‌گیری تپه‌های عرضی و برخان‌ها که هر دو محصول بادهای غالب (یک جهته) در یک منطقه هستند، می‌پردازد. اساس این مدل شامل تحلیل دو فرایند کلی است: 1- آرایش جانبی مقاطع عرضی دو بعدی تپه‌ها به صورت عمود بر جهت باد با فواصل مشخص.

2- ترکیبی از دو شکل متفاوت از حرکت ماسه؛ شامل حرکت درون ماسه‌ای که بر سطح هر مقطع عرضی دو بعدی⁷ صورت می‌گیرد (شکل 1)، و حرکت بین ماسه‌ای⁸، که جابجایی ماسه بر روی دامنه‌های بادگیر و بادپناه دو مقطع عرضی مجاور می‌باشد (شکل 2)

1-Self-Organization Cellular automaton

2- Partial Differential Equations

3 - Niiya

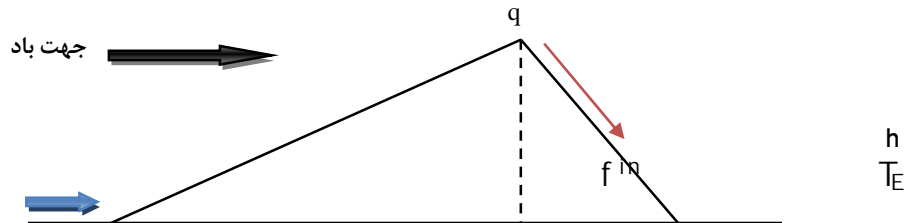
4 - Dune Skeleton Model

5 - Ordinary Differential Equations

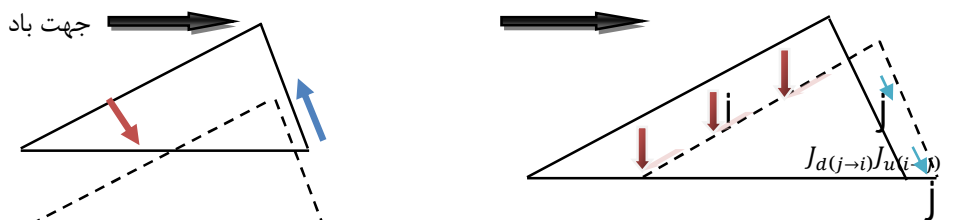
6 - Two-dimensional cross sections

7 - Intra-Sand movement

8 - Inter-Sand movement



شکل 1: جریان ماسه بر سطح مقاطع عرضی دو بعدی تپه. جریان ماسه از سطح قله و راندمان جذب آن در دامنه‌های بادپناه (T_E). پیکان قرمز، موید رسوبگذاری ماسه‌های ریزشی از قله در دامنه‌های بادپناهاست.



شکل 2: جریان ماسه بین دو مقطع عرضی مجاور در دامنه‌های رو به باد ($J_{u(i-j)}$) و دامنه‌های پشت به باد ($J_{d(j-i)}$). پیکان‌های قرمز و آبی نشان دهنده جابجایی ماسه بر سطح دامنه‌ها هستند.

در شکل 1، جریان ماسه بر سطح مقاطع دو بعدی، در امتداد دامنه‌های بادگیر نشان داده شده است. جریان ماسه بر سطح قله به صورت q و در دامنه‌های بادگیر به صورت f^{in} تعریف شده است. مقدار کمی q حاکی از قدرت باد بر سطح تپه بوده و در نهایت، همه ماسه‌های رسیده از دامنه‌های بادگیر (f^{in})، بر روی دامنه‌های بادپناه رسوب خواهند کرد.

نسبت رسوبگذاری ماسه‌های روی قله¹ در امتداد دامنه‌های بادپناه (T_E)، راندمان جذب ماسه² (رسوب ماسه)، نامیده می‌شود (Momiji & Warren., 2000). بنابراین میزان T_E به صورت رابطه 1 برآورد می‌گردد:

$$T_E(h) = \frac{h}{1+h} \quad (1)$$

$T_E =$ میزان رسوبگذاری در دامنه‌های بادپناه

$h =$ ارتفاع تپه ماسه‌ای بر حسب متر است.

در شکل 2، جریان ماسه بین دامنه‌های بادگیر $J_{u(i-j)}$ و دامنه‌های بادپناه $J_{d(j-i)}$ دو مقطع عرضی مجاور (i, j) نشان داده شده است. با در نظر گرفتن جریانات ماسه، دینامیک مختصات (X_i, h_i) مقاطع عرضی دو بعدی به صورت معادلات دیفرانسیل معمولی (ODE) 2 و 3 تعریف می‌شود:

1 - Crest

2 - Sand trapping efficiency

$$\frac{dx_i}{dt} = \frac{1}{h_i} [q (BT_E (h_i) + C) + \sum (BJ_d (j \rightarrow i) + CJ_{u(i \rightarrow j)}) - C f_i^{in}] \quad (2)$$

$$\frac{dh_i}{dt} = \frac{A}{h_i} [q (T_E (h_i) - 1) + \sum (J_d(j \rightarrow i) - J_u(i \rightarrow j)) + f_i^{in}] \quad (3)$$

در این روابط:

x_i, h_i = دینامیک تغییرات قله هر مقطع عرضی

T_E = میزان رسوبگذاری در دامنه‌های بادپناه

$J_d(j \rightarrow i)$ = جریان ماسه روی دامنه‌های بادپناه دو مقطع عرضی مجاور

$J_u(i \rightarrow j)$ = جریان ماسه روی دامنه‌های بادگیر دو مقطع عرضی مجاور

f_i^{in} = جریان ماسه در دامنه‌های بادگیر

q = جریان ماسه بر سطح قله

A, B, C = به ترتیب، شامل اعداد ثابت $\frac{1}{10}, \frac{4}{5}, \frac{1}{5}$ که بیانگر نیمرخ واقعی از مقاطع عرضی تپه‌ها می‌باشند.

شبهه سازی‌های صورت گرفته براساس معادلات فوق، حاکی از سه فرم متفاوت از تپه‌های ماسه‌ای عرضی - افقی، عرضی - موجی و برخان بوده که شکل‌گیری هر یک از این اشکال، بستگی به متوسط ارتفاع اولیه مقاطع عرضی دو بعدی (در ارتباط با حجم ماسه) h ، میزان ماسه‌های موجود بر سطح قله q و ضریب پخش ماسه در دامنه‌های بادگیر D_u دارد.

بحث و نتیجه‌گیری

در ساده‌ترین حالت مدل DS، تغییرات 4 متغیر در نظر گرفته می‌شود، D_d, D_u, H_0 که به ترتیب شامل، حجم نهایی ماسه، ضریب انتشار ماسه در دامنه‌های بادگیر، ضریب انتشار ماسه در دامنه‌های بادپناه و جریان ماسه بر سطح قله می‌باشد. آنالیز معادلات 4 و 5 در مدل DS، شکل‌گیری دو نقطه معین را نشان می‌دهد. اولی: نقاط مستقیم که با S_F شناخته می‌شوند و زمانی شکل می‌گیرند که، $h_1 = h_2, y = 0$ باشد، دومی، نقاط موجی یا W_F است، و در شرایط $y \neq 0, h_1 \neq h_2$ وجود می‌آیند. بنابراین، نقاط مستقیم فقط در سه محدوده شکل می‌گیرند: زمانی که میزان جریان ماسه بر سطح قله q ، ضریب انتشار ماسه در دامنه‌های بادگیر D_u و ضریب انتشار ماسه در دامنه‌های بادپناه D_d به حداکثر برسد. این پارامترها به شدت بر پایداری نقطه S_F و شکل‌گیری W_F تاثیر می‌گذارند.

$$\frac{dy}{dt} = qB \left(\frac{T_E(h_2(h_1))}{h_2(h_1)} - \frac{T_E(h_1)}{h_1} \right) + C \left(q - f_1^{in} \right) \left(\frac{1}{h_2(h_1)} - \frac{1}{h_1} \right) - 2(BJ_d(2 \rightarrow 1) + CJ_u(1 \rightarrow 2)) \left(\frac{1}{h_2(h_1)} + \frac{1}{h_1} \right) \quad (4)$$

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{A}{h_1} [q(T_E(h_1) - 1) + 2(J_{d(2 \rightarrow 1)} - J_{u(1 \rightarrow 2)} + f_1^{in})] \quad (5)$$

x_1, h_1, x_2, h_2 = چهار متغیر اصلی در مدل DS، که هر کدام مختصات قله دو مقطع عرضی جانبی را نشان می‌دهند.

T_E = میزان رسوبگذاری در دامنه‌های بادپناه.

$J_{u(i \rightarrow j)}, J_{d(j \rightarrow i)}$ = جریان ماسه روی دامنه‌های بادپناه و بادگیر دو مقطع عرضی مجاور.

A, B, C = به ترتیب، شامل اعداد ثابت $\frac{1}{5}, \frac{4}{5}, \frac{1}{10}$ ، بیانگر نیمرخ واقعی از مقاطع عرضی تپه‌ها.

f^{in} = جریان ماسه در دامنه‌های بادگیر

q = جریان ماسه بر سطح قله

بنابراین با توجه به شکل 3، تحت شرایط مذکور شکل‌گیری فرم‌های متفاوت تپه‌های ماسه‌ای به صورت زیر اتفاق می‌افتد:

1- در شرایطی که S_F پایدار باشد، شاهد تشکیل فرم تپه‌های ماسه‌ای عرضی - افقی خواهیم بود. این مرحله از سیستم تحت عنوان فاز ST شناخته می‌شود.

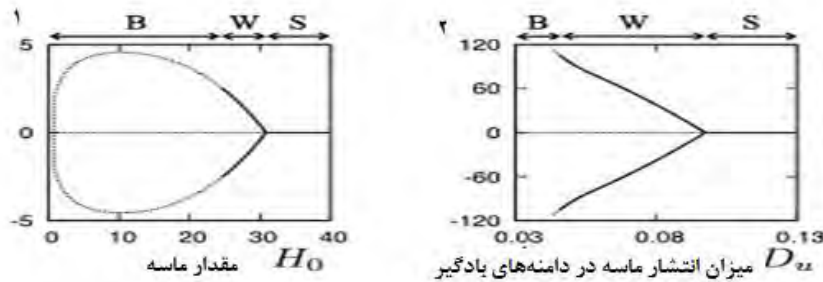
2- اگر S_F به دلیل تغییرات حاصل در پارامترهای مذکور، ناپایدار گردد، W_F به صورت نقاط پایدار ظاهر می‌شود. این وضعیت در آنالیز دیاگرام‌انحرافات¹، بیانگر انتقال از فرم عرضی به سمت فرم‌های پایدار موجی بوده، که به این مرحله از سیستم، فاز WT می‌گویند (شکل 4).

3- در نهایت اگر WT نیز به دلیل تغییر شرایط حاکم بر سیستم، ناپایدار شود، گذر از فرم موجی به برخان اتفاق افتاده، که از این مرحله، فاز B یاد می‌کنند. در فاز B، هیچ نقطه مشخص پایداری وجود ندارد، به همین دلیل، برخان‌های منفرد نیز در شبیه‌سازی مدل DS، ناپایدار بوده و به تدریج در طول زمان تحلیل می‌روند.



شکل 3: روند تغییر شکل فرم‌های تپه ماسه‌ای، از فرم تپه‌های عرضی - افقی به تپه‌های موجی و برخان (Niya & et al., 2013).

در شکل 4، مدل شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای (DS)، مکانیزم انتقال یک فرم تپه‌ماسه‌ای را به سایر فرم‌ها از طریق آنالیز نقاط انشعاب نشان می‌دهد. این مدل، دو مقطع عرضی دو بعدی را در نظر می‌گیرد که هر کدام معرف تعداد زیادی مقاطع عرضی هستند.



شکل 4: دیاگرام انشعاب از نقاط معین، بر اساس تغییر یک پارامتر. در تصویر 1، پارامتر H_0 (مقدار ماسه) و برای تصویر 2، پارامتر D_{22} (میزان انتشار ماسه در دامنه‌های بادگیر) تغییر کرده است. خطوط پیوسته و نقطه چین‌ها، به ترتیب موبد، نقاط پایدار و ناپایدار بوده و پیکان‌های B, W, S به ترتیب بیانگر، فازهای WT, ST و B می‌باشند، که خود معرف انواع متفاوتی از فرم‌های تپه‌های ماسه‌ای هستند (Niiya & et al., 2012).

جمع‌بندی

در مقاله حاضر، مرفودینامیک تپه‌های ماسه‌ای از دیدگاه فرآیندهای دینامیک غیرخطی، در قالب تحلیل مدل DS بحث شده است. در مدل شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای از طریق معادلات دیفرانسیل معمولی، روند تحول اشکال بادی با لحاظ دو متغیر (قدرت باد و میزان ماسه) تحلیل، و مکانیزم انتقال فرم‌های تپه‌های ماسه‌ای حاصل از بادهای یک جهته، بررسی شده است. نتایج بدست آمده با سیر تحول اشکال تپه‌های ماسه‌ای در بسیاری از قلمروهای بیابانی ایران، تطابق دارد. دیاگرام انشعابات بوضوح، انتقال بین سه فرم متفاوت تپه‌های ماسه‌ای شامل تپه‌های عرضی - افقی، عرضی - موجی و برخان را نشان می‌دهد.

نتایج موبد آن است که با کاهش میزان ماسه و ضریب انتشار آن بر روی دامنه‌های بادگیر، S_F (فرم عرضی - افقی) ناپایدار شده و به صورت فرم موجی (W_F) درمی‌آید، متعاقباً با کاهش بیشتر فاکتورهای مذکور، W_F (فرم موجی) نیز پایداری خود را از دست داده و تغییر به فاز B (برخان) اتفاق می‌افتد.

بنابراین افزایش جریان ماسه بین دامنه‌های بادپناه و بادگیر دو مقطع عرضی مجاور، پایداری تپه‌های عرضی را تضمین کرده، در حالی که کاهش میزان جریان ماسه در هر مقطع عرضی، فرم موجود را ناپایدار نموده، به طوری که تغییر شکل به سمت برخان اتفاق می‌افتد، در نهایت، افزایش ناپایداری‌ها زمینه تحلیل (روند کاهش) اشکال ماسه‌ای را در مقیاس زمانی فراهم می‌آورند.



منابع

-Baas, A.C.W. (2007). Complex systems in aeolian geomorphology. *Journal of Geomorphology*, Volume 91, 311-331.

-Baas, A.C.W., & Nield, J.M. (2007). Modelling vegetated dune landscapes, *Geophysical Research Letters*, Vol34.

-Cooke, R.U., Warren, A., & Goudie, A. (1993). *Desert Geomorphology: UCL (University College London) Press*. p 346-347.

-Kocurek, G., & Ewing, R.C. (2005). Aeolian dune field self-organization implications for the formation of simple versus complex dune-field patterns. *Journal of Geomorphology*, Volume 72.94-105.

-Momiji, H., & Warren, A. (2000). Relations of sand trapping efficiency and migration speed of transverse dunes to wind velocity. *Journal of Earth Surface Processes and Landforms* 25, 1069-1084.

-Niiya, H., Awazu, A., & Nishimori, H. (2010). Three-dimensional dune skeleton model as a coupled dynamical system of two-dimensional cross sections. *Journal of The Physical Society of Japan*, Volume 79, No. 6, 063002.

-Niiya, H., Awazu, A., & Nishimori, H. (2012). Bifurcation analysis of the transition of dune shapes under a unidirectional wind. *Physics Letters*.108, 158001.

-Niiya, H., Awazu, A., & Nishimori, H. (2013). Stability of transverse dunes against perturbations: A theoretical study using dune skeleton model. *Journal of Aeolian Research*, Volume 9, 63-68.

-Nishimori, H., & Ouchi, N. (1993). Formation of ripple patterns and dunes by wind-blown sand. *Physical Review Letters*, vol. 71, no. 1, pp. 197-200.