

ارزیابی شاخص‌های مورفودینامیک تپه‌های برخانی (مطالعه‌ی موردی: ریگ چاه‌جام)

عبدا. سیف - استادیار ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان
سید حجت موسوی* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان

پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۴/۱۵ تأیید نهایی: ۱۳۹۰/۹/۱۷

چکیده

مخاطرات محیطی و به‌هدر رفتن منابع طبیعی، از جمله علل ایجاد راهکارهای مدیریت بحران‌های زیست‌محیطی هستند. یکی از مهم‌ترین چالش‌های محیطی نواحی جنوبی کویر حاج علی‌قلی، هجوم ماسه‌های روان در قالب تپه‌های برخانی به مراکز سکونت، راه‌های ارتباطی و تأسیسات زیربنایی است. برخان‌ها بر اساس ویژگی‌های باد غالب منطقه و قابلیت اندک دسترسی به ماسه نشئت می‌گیرند که هلالی شکل بوده و از ماسه‌ی روان تشکیل شده‌اند. هدف از این پژوهش، ارزیابی شاخص‌های مورفودینامیک تپه‌های برخانی ریگ چاه‌جام با کمک روش‌های تجربی، ریاضی و آماری است. برای این کار، نخست برای تعریف شاخص پایداری چشم‌انداز برخان، میزان شار ماسه در محدوده‌ای مشخص به ابعاد ارتفاع و عرض برخان با استفاده از معادله‌های تجربی مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای تبیین شاخص پایداری، مهم‌ترین شاخص‌های مورفومتری ۱۵ برخان به‌روش نمونه‌برداری طولی اندازه‌گیری شد و با تحلیل آنها از راه آزمون‌های آماری، به رابطه‌سنجی و ارزیابی مدل پایداری اقدام شد. نتایج حاکی از تبیین مدل‌های پایداری و پایداری سامانه برخان است. مدل پایداری دربردارنده‌ی میزان ورود و خروج انرژی و ماده به درون چشم‌انداز برخان بوده که در نتیجه‌ی این فرآیند، یک ساختار جریان‌ی شکل می‌گیرد. ساختار جریان‌ی نیز بیان‌کننده‌ی تعادل و پایداری چشم‌انداز برخان در طول زمان است. همچنین نتایج حاصل از بررسی مدل پایداری نشان می‌دهد که گروه برخان‌هایی با مقدار جابه‌جایی سالانه‌ی بیشتر از ۱۲ متر با داشتن حداکثر تعداد و بالاترین میزان جابه‌جایی، کمترین پایداری را دارند. بنابراین نیازمند بیشترین توجه و ضرورت‌های برنامه‌ریزی برای تثبیت ماسه‌های روان و مدیریت محیطی برخان‌های رونده هستند.

کلیدواژه‌ها: برخان، مورفودینامیک، شاخص پایداری، شاخص پایداری، ریگ چاه‌جام.

مقدمه

ژئومورفولوژی سیستمی به شناسایی فرم و فرایندهای ژئومورفیک و روابط بین آنها استوار است. کارایی این دیدگاه در هنگامی که روابط دوسویه‌ی خطی و غیرخطی میان اجزا و عناصر سامانه وجود دارد، از اهمیت بالایی برخوردار است (رامشت، ۱۳۸۵: ۸۰). سیستم مورد مطالعه در این پژوهش، تپه‌های برخانی ریگ چاه‌جام در جنوب کویر حاج علی‌قلی بوده که از نوع سیستم‌های طبیعی و باز هستند و در سطوح مختلف می‌توانند مدل‌سازی شوند.

نمای جانبی برخان یک ساختار آبرودینامیکی به نسبت هموار و هواگرد را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که وقتی از بالا به برخان نگریسته می‌شود، به شکل هلالی با دو بازویی نمایان می‌شود که امتداد آنها جهت باد را نشان می‌دهند. (Hersen, ۲۰۰۴: ۵۰۷). خط‌الرأس برخان، آن را به دو دامنه تقسیم می‌کند: یکی دامنه‌ی روبه‌باد و دیگری دامنه‌ی بادپناه (محمودی، ۱۳۸۳: ۲۶۱). به دلیل وجود لایه‌های جریان هوا در طول خط‌الرأس، سلول بزرگی از جریان باد در پای دامنه بادپناه تشکیل شده و سرعت باد به‌طور شگرفی در این ناحیه کاهش می‌یابد (Hersen, ۲۰۰۴: ۵۰۷). کشیدگی برخان در امتداد بازوها نشان از حداکثر سرعت باد در این منطقه بوده (محمودی، ۱۳۸۳: ۲۶۱) که نتیجه‌ی تغذیه و انتقال ماسه از پیکره‌ی اصلی به این بخش است. بنابراین، ورودی ماسه کمابیش از خط‌الرأس به سمت دامنه‌ی بادپناه کاهش می‌یابد. این در حالی است که تپه‌ی برخانی به‌عنوان یک تله‌ی ماسه‌ای شناخته شده است. به‌طور کلی، برخان شکل هلالی خود را از فرایندهای غیرخطی به‌دست می‌آورد (Hersen, ۲۰۰۴: ۵۰۷).

تپه‌های برخانی درک‌ل کارایی متفاوتی نسبت به عوارض ماسه‌ای دیگر در به دام انداختن ماسه و انرژی باد در قسمت پیکره‌ی اصلی و از دست دادن آن در قسمت بازوها دارند. ساختار سه‌بعدی آنها همراه با حرکت‌های جانبی، ضمن حفظ شکل هلالی و افزایش حجم و اندازه، حاکی از نوعی جریان متناوب ماده و انرژی است که در بردارنده‌ی نوعی روند و جریان انتقالی به درون چشم‌انداز برخان است (موسوی، ۱۳۸۸: ۹۶).

برای محاسبه‌ی میزان ورودی و خروجی ماده و انرژی به درون سیستم برخان (تعادل و پایداری برخان) از محاسبه‌ی میزان شار ماسه در محدوده‌ای مشخص به ابعاد ارتفاع و عرض برخان استفاده شده است. شار ماسه یک شاخص فیزیکی مهم برای درک بهتر میزان ورودی و خروجی ماده و انرژی به سیستم برخان است که نمی‌تواند به‌طور محلی و موضعی از ارزش اشباع شده‌ی جریان باد فراتر رود. جریان اشباع شده‌ی ماسه و طول اشباع آن، به شدت تحت تأثیر سرعت و شدت برشی باد است. به‌گفته‌ای، جریان اشباع شده یک کارکرد رو به رشد از سرعت و شدت برشی باد است (Sauer mann et al., ۲۰۰۳: ۲۵۳). در مجموع، مورفولوژی سه‌بعدی برخان را می‌توان به دو بخش کلی؛ یعنی پیکره‌ی اصلی برخان و بازوها تقسیم کرد که جریان ورودی از راه پیکره‌ی اصلی به برخان وارد و خروج آن با بازوها انجام می‌شود. این عامل نقش مهمی را در بیان حالت تعادل و پایداری و ناپایداری برخان برعهده دارد.

برای ارزیابی شاخص پایایی برخان از میزان جابه‌جایی سالانه‌ی آن استفاده شده است. عوارض برخانی از ماسه‌ی روان تشکیل شده و در امتداد باد غالب با نگهداری شکل هلالی و سه‌بعدی خود جابه‌جا می‌شوند. بنابراین از مهم‌ترین ویژگی این عارضه پویایی و حرکت‌های جانبی آن با روند مشخص سالانه است. میزان جابه‌جایی تپه‌های برخانی براساس الگوهای زمانی و مکانی، متفاوت و گوناگون است. شناخت این الگوها و ارزیابی شاخص پایایی برخان بینش

جدیدی در ارتباط با مورفودینامیک برخان در اندیشه‌ی پژوهشگران و برنامه‌ریزان برای مدیریت بحران‌های محیطی ایجاد می‌کند.

هجوم ماسه‌های روان در قالب تپه‌های برخانی، یکی از مهم‌ترین مخاطرات محیطی بیشتر مناطق ایران و از جمله منطقه‌ی مطالعاتی شمرده می‌شود. پویایی برخان‌ها موجب می‌شود، سالانه مقادیر زیادی ماسه‌ی روان، اراضی کشاورزی، مراکز سکونتی و شریان‌های ارتباطی را در کام خود فرو برده و سبب نابودی آنها، مهاجرت روستاییان و خسارات اقتصادی فراوانی شود. این مسائل موجب اجرا نشدن طرح‌های محرومیت‌زدایی، همانند ساخت راه‌های ارتباطی و اجرای طرح‌های عمرانی و کشاورزی شده و بر فقر اقتصادی میان ساکنان منطقه می‌افزاید و در نهایت منجر به مهاجرت آنها به نقاط شهری پیرامون می‌شود. بنابراین، شناخت و بررسی دقیق ویژگی‌های مورفودینامیکی تپه‌های برخانی محدوده‌ی مطالعاتی در چارچوب شاخص‌های پایداری و پایایی و تحلیل علمی ویژگی‌های آنها می‌تواند در مدیریت بحران‌های محیطی منطقه و استفاده بهینه از منابع طبیعی آنها بسیار مفید باشد.

هدف از این پژوهش تعریف و تبیین شاخص مورفودینامیک پایداری برخان با استفاده از محاسبه‌ی شار ماسه، از راه معادله‌های ریاضی و تجربی مطرح شده از سوی پژوهشگران دیگر، محاسبه‌ی میزان ورود و خروج ماده و انرژی به درون سیستم برخانی و تشریح حالت‌های مختلف آن است. همچنین تلاش شده است تا با استفاده از میزان سرعت سالانه‌ی برخان‌های مطالعاتی در بازه‌ی زمانی یک ساله و مقایسه‌ی آنها به روش آماری، شاخص مورفودینامیک پایایی برخان نیز، تعریف و تشریح شود. با استفاده از نتایج به‌دست‌آمده، می‌توان به درک درستی از ویژگی‌های مورفودینامیک، مورفولوژی سه‌بعدی و رفتارهای دیگر این ناهمواری در مدیریت برپایه‌ی نگرش سیستمی مناطق بیابانی رسید. بنابراین، نتایج کسب‌شده می‌تواند در طرح‌های تثبیت ماسه‌های روان برخان‌ها و شناسایی مناطق بحرانی فرسایش بادی سازنده باشد.

پیشینه‌ی مطالعاتی

تپه‌های برخانی، ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع تپه‌های ماسه‌ای هستند که شکل هلالی دارند (محمودی، ۱۳۸۳: ۲۶۱). اگر باد غالب در بیشتر طول سال به‌طور دائم در جهت یکسان بوزد و در آن منطقه، ماسه به‌اندازه‌ی کافی برای پوشش کامل سطح زمین وجود نداشته باشد، برخان ایجاد می‌شود (El belrhiti and Douady, ۲۰۱۰: ۱). مطالعات شکل‌شناسی بسیاری روی برخان‌ها انجام شده است، به‌گونه‌ای که نخستین مطالعات کمی در رابطه با تپه‌های برخانی و روابط شکل‌شناسی آنها از سوی بگنالد^۱ در صحرای کبیر آفریقا (۱۹۴۱: ۱۲۶) و فینکل^۲ (۱۹۵۹: ۶۱۴) در جنوب پرو انجام شد. مطالعات در مورد شبیه‌سازی رقومی برای پیش‌بینی جابه‌جایی و دگرگونی تپه‌های برخانی و شکل دقیق آنها را هووارد و مورتن^۳ (۱۹۷۸: ۳۰۷)، ویپرمن و گراس^۴ (۱۹۸۶: ۳۱۹) انجام دادند. هسپ و هاستینگز^۵ (۱۹۹۸: ۱۹۳) با بررسی روابط

۱. Bagnold

۲. Finkel

۳. Howard & Morton

۴. Wippermann & Gross

۵. Hesp & Hastings

میان ارتفاع و عرض برخان‌های بیابان نامیبیا، این روابط را به‌عنوان عوامل کنترل‌کننده‌ی شکل سه‌بُعدی برخان معرفی کردند. گی^۱ (۱۹۹۹: ۲۷۳) با مطالعه‌ی جابه‌جایی تپه‌های برخانی جنوب پرو بیان داشت که سرعت حرکت برخان با اندازه‌ی آن نسبت معکوس دارد. هرمان و سایرمان^۲ (۲۰۰۰: ۲۴) تپه‌های ماسه‌ای مراکش را مطالعه و مدل‌هایی را برای جابه‌جایی و پویایی سطح بستر آنها ارائه کرده‌اند. سایرمان و همکاران^۳ (۲۰۰۳: ۲۴۵) سرعت باد و میزان حمل ماسه روی تپه‌های برخانی را بررسی و اختلاف عمده میان جریان‌های بادی اشباع شده و نشده از ماسه را بیان کرده‌اند. وانگ و همکاران^۴ (۲۰۰۶: ۴۰۵) با بررسی برخان‌های شمال غرب چین با استفاده از نظریه‌های هندسی بیان کردند که ارتفاع برخان با عرض آن تناسب دارد و خط‌الرأس را می‌توان به‌وسیله‌ی شکل یک‌سه‌می توصیف کرد. دانیل و هوگز^۵ (۲۰۰۷: ۶۳۸) شکل‌شناسی برخان‌های استرالیا و ارتباط آنها با نوع رژیم فصلی باد منطقه را بررسی و بیان داشتند که این تپه‌ها سالانه ۱۰ تا ۱۵ متر در به‌سمت غرب جابه‌جا می‌شوند. هس^۶ (۲۰۰۸: ۶) حرکت گروهی تپه‌های برخانی جنوب پرو را مطالعه و بیان کرده است که با ویژگی‌های چینه‌شناسی این تپه‌ها، می‌توان تغییرات پالئوزیست‌محیطی منطقه را بازسازی کرد. نگارش و لطیفی (۱۳۸۷: ۴۳) ویژگی‌های ژئومورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای دشت سیستان را ارزیابی کرده و با ارائه‌ی داده‌هایی در رابطه با ویژگی‌های مورفومتری برخان‌ها، به مدل‌سازی روابط آنها پرداخته و با بیان میزان جابه‌جایی فصلی و سالانه‌ی تپه‌ها، عوامل مؤثر بر حرکت‌های آنها را نیز بررسی کرده‌اند. موسوی (۱۳۸۸) آثار مورفومتری برخان‌ها را بر پایداری آنها در ریگ چاه‌جام ارزیابی کرده و با روش رگرسیون ساده و چندگانه، مدل‌های آماری برای محاسبه‌ی حجم، محیط، مساحت، میزان جابه‌جایی ارائه و نوع روابط بین مؤلفه‌های مورفومتری و مورفولوژی برخان‌ها را گزارش کرده است.

موقعیت محدوده‌ی مورد مطالعه

محدوده‌ی مورد بررسی این پژوهش، منطقه‌ی برخانی ریگ چاه‌جام است که در بخش جنوب‌شرقی تا جنوبی کویر حاج علی‌قلی گسترده شده است. کویر حاج علی‌قلی یک چاله‌ی رسوبی - ساختمانی است که در جنوب دامغان و جنوب‌غربی شاهرود واقع شده و هم‌اکنون تحت تأثیر فرایندهای مختلف شکل‌زایی قرار دارد. مهم‌ترین فرایندهای مورفوزن موجود در جنوب این چاله از نوع فرسایش بادی بوده که به‌دلیل کمبود پوشش گیاهی و ریزش‌های جوئی بر دیگر فرایندها حاکمیت دارد و می‌توان انواع رخساره‌های فرسایشی بادی را در این منطقه مشاهده کرد. ریگ چاه‌جام با وسعت حدود ۲۵۲۶۰ هکتار، یکی از مهم‌ترین ریگ‌های موجود در حاشیه‌ی کویر حاج علی‌قلی است که به‌شکل نواری نامرتب در امتداد جنوب‌غربی تا جنوب‌شرقی این کویر با طول ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر کشیده شده است (احمدی، ۱۳۸۷: ۳۲۸). از غالب‌ترین عوارض ماسه‌ای این ریگ می‌توان به نبکاها، انواع برخان‌ها (طولی، عرضی، متقارن، نامتقارن)، سیف و تپه‌های ماسه‌ای

۱. Gay

۲. Herrmann & Sauermann

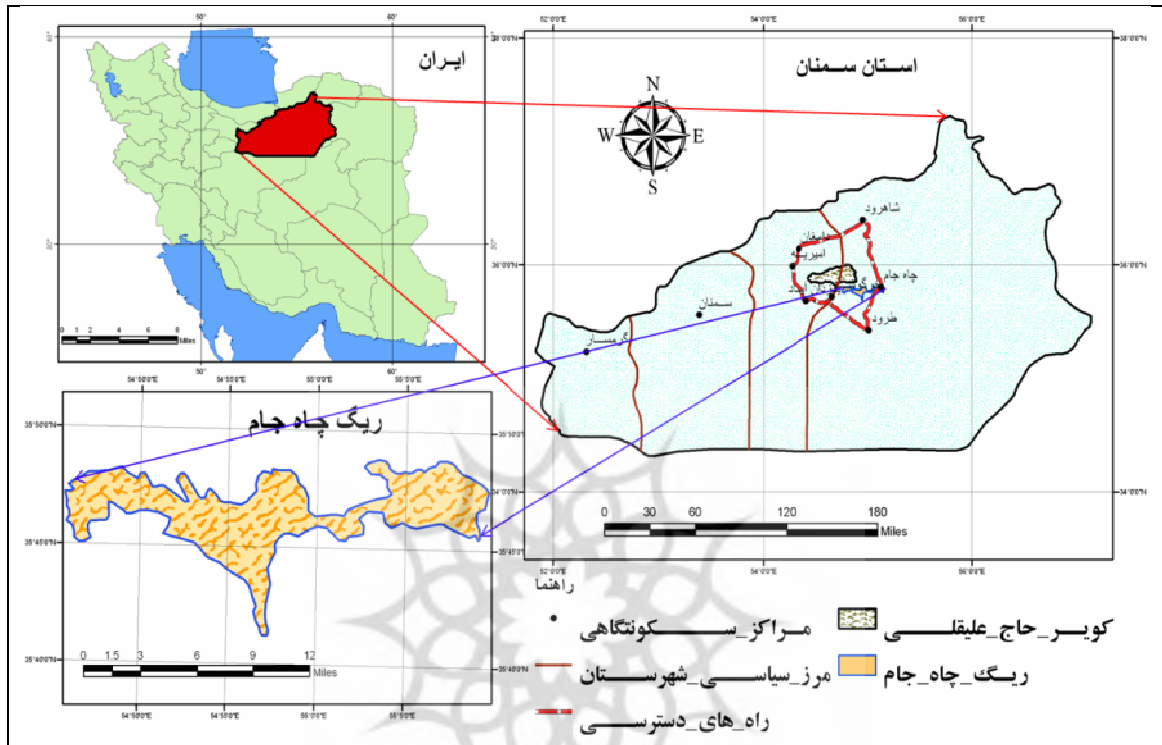
۳. Sauermann et al

۴. Wang et al

۵. Daniell & Hughes

۶. Hesse

طولی و عرضی اشاره کرد. این ریگ در محدوده‌ای به عرض ۳۵ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۵ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی و طول ۵۵ درجه تا ۵۶ درجه و ۱۰ دقیقه شرقی واقع شده است (شکل شماره ۱).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی محدوده‌ی مطالعاتی

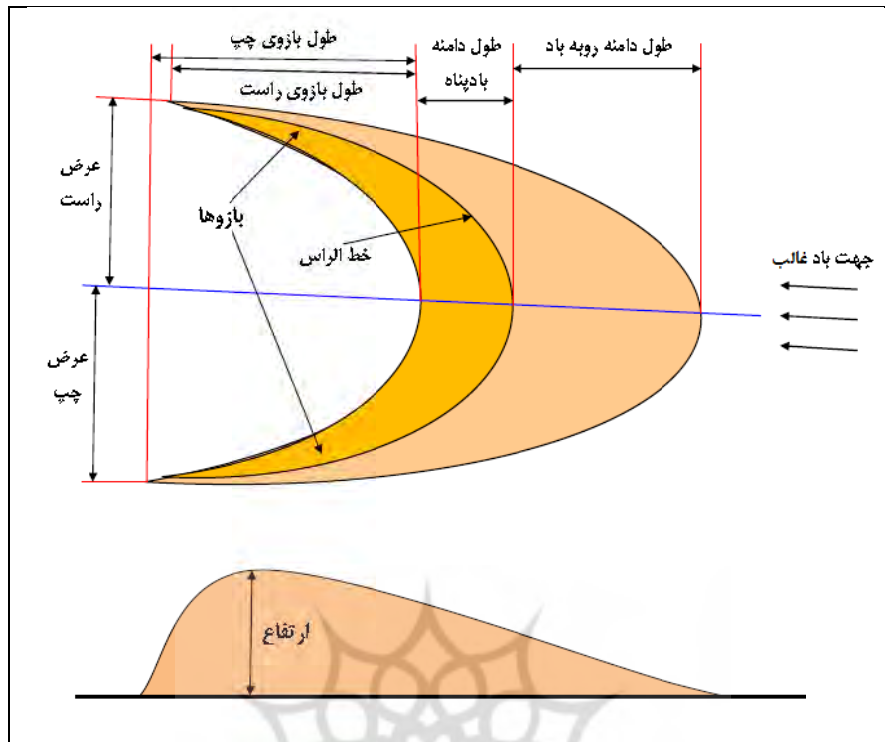
مواد و روش‌ها

ابتدا به کمک تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث^۱ و نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ محدوده‌ی مطالعاتی تعیین و مورد بررسی قرار گرفت. سپس برای دستیابی به اهداف مراحل زیر طی شده است.

اندازه‌گیری مؤلفه‌های مورفومتری برخان

نمونه‌برداری و اندازه‌گیری مؤلفه‌های مورفومتری برخان‌های مطالعاتی از راه بررسی میدانی مستقیم به منطقه انجام شد. نمونه‌برداری از برخان‌ها در امتداد ۱۰ ترانسکت انجام گرفت که کمابیش کل مساحت ریگزار را پوشش می‌دهد. مهم‌ترین مؤلفه‌های مورفومتری برخان که مورد اندازه‌گیری قرار گرفت، عبارت‌اند از: ارتفاع (h)؛ عرض کامل برخان (W)؛ عرض پهلوی راست (W_a)؛ عرض پهلوی چپ (W_b)؛ طول کامل برخان (L)؛ طول بازوی راست (L_a)؛ طول بازوی چپ (L_b)؛ طول دامنه‌ی روبه‌باد (L_o) و طول دامنه‌ی بادپناه (L_s) (شکل شماره ۲).

۱. Google Earth



شکل ۲. توضیح تصویری مؤلفه‌های مورفومتری برخان

محاسبه‌ی میزان شار ماسه^۱

برای بیان شاخص پایداری برخان و تعیین میزان ورودی و خروجی به درون سیستم برخانی از روش محاسبه‌ی شار ماسه استفاده شده است. پژوهشگران بسیاری میزان شار ماسه در تپه‌های برخانی را با مباحث ریاضیاتی محاسبه و هر کدام معادله‌ای را ارائه کرده‌اند. فری برگر^۲ (۱۹۷۹) برای محاسبه‌ی پتانسیل انتقال ماسه توسط تپه برخانی، معادله‌ی لتائو و لتائو^۳ (۱۹۷۸) را به کار گرفت و مقادیر آن را به صورت واحدهای برداری بیان کرد. در حالی که آرنس و همکاران^۴ (۲۰۰۴) از معادله‌ی کاوامورا^۵ (۱۹۵۱) استفاده کرده و مقادیر آن را به مترمکعب در هر متر بیان داشتند. معادله‌ی کاوامورا (۱۹۵۱) یکی از چندین معادله‌ی اصلاح شده‌ی بگنالد (۱۹۴۱) است که شدت برشی و شدت آستانه‌ی باد را برای محاسبه‌ی میزان انتقال ماسه به کار می‌گیرد. بنابراین برای محاسبه‌ی شار ماسه، ابتدا باید به بررسی شیوه‌ی محاسبه‌ی شدت برشی و شدت برشی آستانه‌ی باد پرداخته و سپس شار ماسه را با استفاده از آنها محاسبه و ارزیابی کرد. محاسبه‌ی شدت برشی باد با روابط زیر انجام می‌شود:

۱. Sand flux
۲. Fryberger
۳. Lettau & Lettau
۴. Arens et al
۵. Kawamura

$$u_* = \frac{\sqrt{t}}{\rho} \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

به شرطی که $t = p u_*^2$ (چورلی و همکاران، ۱۳۷۹: ۴۲۴).

در این رابطه:

u_* : سرعت برشی باد به سانتی‌متر بر ثانیه؛

t : متوسط کشش به‌ازای واحد سطح در هر ناحیه؛

p : چگالی هوا.

$$u_* = k \frac{V(Z_a) - Vt(Z_f)}{\ln(Z_a / Z_f)} \quad \text{رابطه‌ی (۲)}$$

به شرط اینکه $u_* > u_{*t}$ باشد (Bagnold, ۱۹۴۱; Craig, ۲۰۰۰).

در این رابطه:

$V(Z_a)$: شدت باد مشاهده شده در ارتفاع بادسنج (Z_a) است؛

$Vt(z_f)$: شدت نرمال آستانه در ارتفاع کانونی است.

سرعت آستانه‌ی فرسایشی (u_{*t}) عبارت است از سرعتی که ذرات رسوبی شروع به حرکت می‌کنند. این سرعت به

قطر ذره بستگی دارد و با رابطه‌ی شماره‌ی ۳ محاسبه می‌شود (Bagnold, ۱۹۴۱):

$$u_{*t} = A \frac{\sqrt{(\rho_p - \rho_a)gd}}{\rho_a} \quad \text{رابطه‌ی (۳)}$$

در این رابطه:

A : یک ضریب تجربی و برابر با ۰/۰۸ برای تأثیر آستانه؛

ρ_p : چگالی ذرات ماسه به‌صورت کیلوگرم در مترمکعب؛

ρ_a : چگالی هوا به‌صورت کیلوگرم در مترمکعب؛

G : مقدار نیروی جاذبه؛

d : قطر ذرات ماسه در منطقه‌ی مطالعاتی است.

سپس شدت نرمال آستانه ($Vt(z)$) در ارتفاع مشخص (برای نمونه، ارتفاعی که بادسنج به‌کار گرفته شده) با

رابطه‌ی شماره‌ی ۴ محاسبه می‌شود (Hugenholtz et al., ۲۰۰۸: ۴).

$$Vt(z) = \frac{u_{*t}}{k} \ln\left(\frac{Z}{Z_o}\right) \quad \text{رابطه‌ی (۴)}$$

به شرطی که $Z > Z_o$ باشد.

در این رابطه:

Vt : تأثیر شدت نرمال آستانه در ارتفاع Z است؛

u_{*t} : تأثیر شدت برش آستانه است که با استفاده از رابطه‌ی شماره‌ی ۳ محاسبه می‌شود؛

k : ضریب ثابت ون کارمن^۱ و برابر ۰/۴ است؛

Z_0 : ضریب زبری و برابر با ۰/۰۳۳۳۳۳۳۳ ام قطر ذرات است.

$$VK = 46/5 \sqrt{14d} + 0/600 \quad (\text{محمودی، ۱۳۸۴: ۳۳})$$

در این رابطه:

VK : شدت نرمال آستانه برشی برحسب متر بر ثانیه؛

d : قطر ذرات بر حسب میلی‌متر است.

بر اساس نظر کرایگ^۲ (۲۰۰۰) شدت نرمال آستانه (Vt) در ارتفاع استقرار بادسنج و در ارتفاع کانونی Z_f که در حدود ۰/۰۱ متر برای تپه‌های ماسه‌ای نرمال است، محاسبه می‌شود.

روابط محاسبه شار ماسه به شرح روابط زیر هستند (Lettau and Lettau, ۱۹۷۸):

$$q(u_*) = C \frac{\rho_{air}}{g} u_*^2 (u_* - u_{*f}) \quad (\text{رابطه‌ی ۶})$$

$$q(u_*) = C \frac{\rho_{air}}{g} u_* (u_* - u_{*f}) (u_* + 7.6u_{*f} + 2.05) \quad (\text{Sorensen, ۱۹۹۱: ۷۸})$$

در رابطه‌ی شماره‌ی ۶، ضریب مؤلفه $C = 4/1$ و در رابطه‌ی شماره‌ی ۷، ضریب مؤلفه $C = 0/48$ است که از تناسبات این روابط با داده‌های تونل باد محاسبه شده است.

$q(u_*)$: مقدار شار ماسه در محدوده‌ی تپه ماسه‌ای است؛

g : مقدار نیروی جاذبه که برابر 980 cm s^{-2} است؛

u_* : سرعت برشی باد در سطح خاک به سانتی‌متر در هر ثانیه؛

u_{*f} : سرعت آستانه‌ی برشی به سانتی‌متر در هر ثانیه در وضعیت آستانه برای انتقال ماسه؛

ρ_{air} : چگالی هوا و برابر $0/00122$ گرم در هر سانتی‌متر مکعب است.

رابطه‌ی شماره‌ی ۶ تنها در جریان‌های دور از قلّه و پایین تپه تناسب خوبی را با واقعیت ارائه می‌دهد، در حالی که رابطه‌ی شماره‌ی ۷ برای تمام قسمت‌های تپه با واقعیت تناسب دارد. براساس رابطه‌ی شماره‌ی ۷ شار در پایین تپه اشباع نشده است و سپس از پایین تپه به سمت قلّه‌ی آن به‌طور یکنواختی افزایش می‌یابد، این فقط یک اختلاف کمی نیست، بلکه منجر به پیش‌بینی‌های کاملاً مختلف در ارتباط با ارتفاع یافتن جریان از ابتدای تپه می‌شود (Sauer mann et al., ۲۰۰۳: ۲۵۳).

اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی برخان

میزان جابه‌جایی تپه‌های برخانی مطالعاتی به‌روش پیکه‌کوبی با پیکه‌های چوبی به ارتفاع ۷۰ سانتی‌متر در بررسی‌های میدانی و در یک بازه‌ی زمانی یک‌ساله (از ۱۳۸۷/۱/۱۰ تا ۱۳۸۸/۱/۱۰) انجام گرفته است. بدین‌گونه که در ابتدا، این

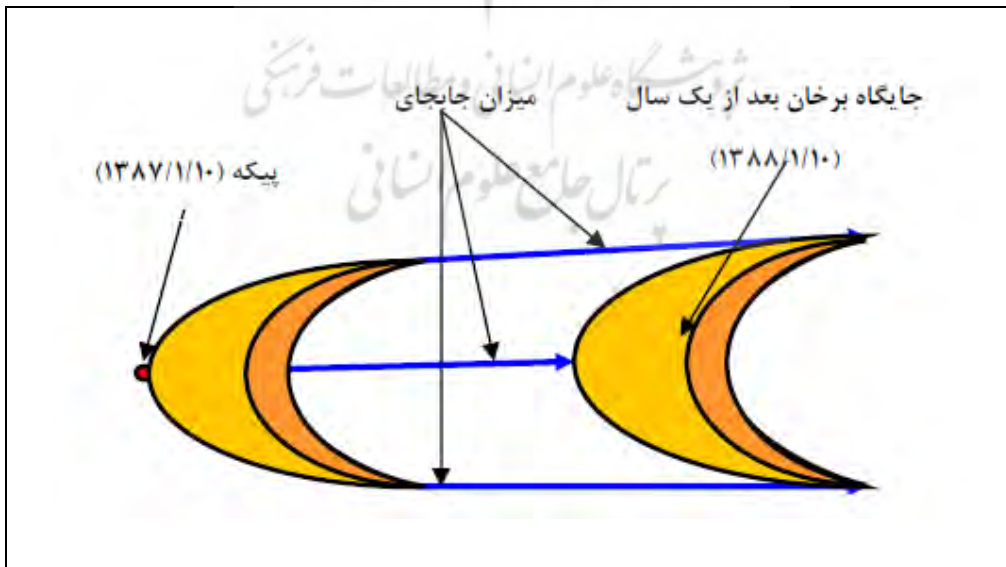
۱. Von Karman

۲. Craig (۲۰۰۰)

عارضه به‌واسطه‌ی مؤلفه‌ی ارتفاع و استفاده از روش آزمون مقایسه‌ی میانگین به ۵ گروه عمده تقسیم شد که این گروه‌ها کمابیش تمام اندازه‌ی برخان‌های موجود در محدوده‌ی مطالعاتی را پوشش می‌دهند. سپس برای هر گروه، سه برخان به‌عنوان برخان اصلی برای اندازه‌گیری ویژگی‌های مورفومتری و مورفودینامیک با پیکه‌کوبی انتخاب شد که در مجموع، یک جامعه‌ی آماری ۱۵ عضوی را شامل می‌شود (جدول شماره ۱). سپس با مراجعات میدانی، ۱۵ برخان از خاص‌ترین تپه‌های برخانی منطقه شناسایی و در تاریخ ۱۳۸۷/۱/۱۰ پیکه‌کوبی شدند. برای انجام این عمل برای هر برخان یک پیکه و در قسمت ابتدایی دامنه روبه‌باد آن نصب شد. برای شناسایی دقیق پیکه‌های چوبی در بازگشت‌های بعدی، موقعیت ریاضی آنها با کمک از دستگاه GPS تعیین مختصات و ثبت شد تا در هنگام دوره‌ی اندازه‌گیری بتوان آن را به‌آسانی ردیابی و شناسایی کرد. درنهایت، در تاریخ ۱۳۸۸/۱/۱۰ موقعیت برخان‌های مورد نظر نسبت به پیکه‌های کار گذاشته شده، مشخص شد و میزان جابه‌جایی آنها در بازه‌ی زمانی یک‌ساله در دوره‌ی مطالعاتی، مورد اندازه‌گیری مستقیم قرار گرفت (شکل شماره ۳).

جدول ۱. مشخصات گروه‌بندی برخان‌های مطالعاتی بر اساس مؤلفه‌ی ارتفاع

شماره‌ی گروه	۱	۲	۳	۴	۵
دامنه‌ی ارتفاعی	کمتر از ۳ متر	۳ تا ۶ متر	۶ تا ۹ متر	۹ تا ۱۲ متر	بیشتر از ۱۲ متر
تعداد نمونه	۳	۳	۳	۳	۳



شکل ۳. روش اندازه‌گیری میزان جابه‌جایی برخان

یافته‌های تحقیق

در محدوده‌ی مطالعاتی، برخان‌های بسیاری دیده می‌شود که کمابیش بیشتر آنها فرم و شکل مشابهی دارند. به‌طور کلی برخان‌های این منطقه، ارتفاعی بین ۱/۲۰ تا ۱۷/۹۰ متر، طولی بین ۱۹/۵ تا ۳۰۷/۸۵ متر و عرضی بین ۶/۳ تا ۱۶۵/۶ متر دارند (جدول شماره ۲).

جدول ۲. مشخصات آماری مؤلفه‌های مورفومتری و مورفودینامیک برخان‌های مطالعاتی

مؤلفه*	دامنه	حداقل	حداکثر	میانگین	انحراف معیار	چولگی
ارتفاع	۱۶/۷۰	۱/۲۰	۱۷/۹۰	۵/۸۰۲	۳/۷۶۸	۱/۲۴۴
عرض	۱۵۹/۳۰	۶/۳۰	۱۶۵/۶۰	۶۰/۱۰۷	۳۷/۹۳۰	۰/۹۶۶
طول	۲۸۸/۸۰	۱۹/۵۰	۳۰۷/۸۵	۹۴/۶۷۰	۶۵/۱۴۱	۱/۱۳۴
محیط	۲/۹۹ E ۴	۸۱/۲۰	۳۰۸۲۴/۵۱	۵/۰۸۱۳ E ۳	۵۹۰۷/۲۱۵	۲/۱۲۱
مساحت	۹/۲۵ E ۴	۷۵/۱۵	۱۰۳۸/۱۵	۳/۲۷۲۵ E ۳	۲۰۶/۵۷۱	۱/۲۴۳
حجم	۶/۴۴ E ۴	۷/۹۴	۶۴۳۷۹/۳۰	۷/۸۵۲۴ E ۳	۱۲۸۰۸/۶۰۳	۲/۵۳۹
جابه‌جایی	۱۴/۵۰	۲/۳۰	۱۶/۸۰	۹/۹۴۶	۳/۷۵	-۰/۱۴۳

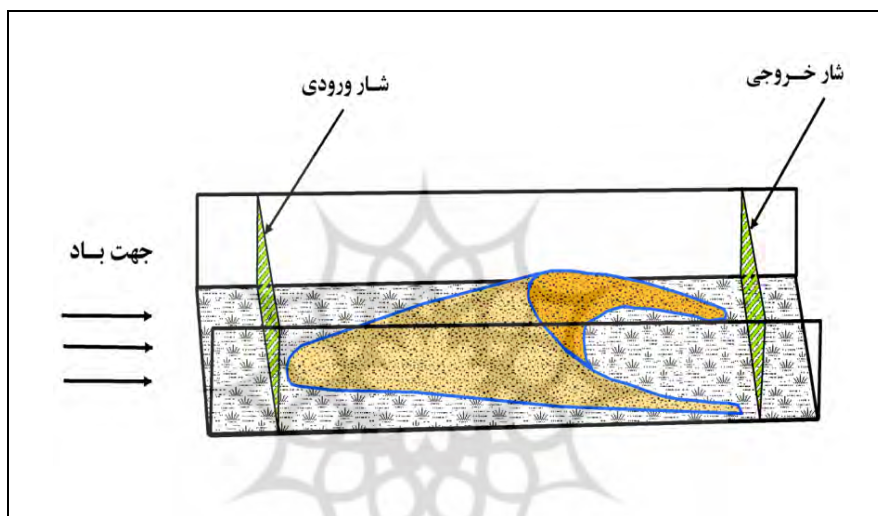
* واحد ارتفاع، طول، عرض، محیط و جابه‌جایی به متر، واحد مساحت به مترمربع و واحد حجم به مترمکعب است.

تعریف و ارزیابی شاخص پایداری^۱

مفهوم پایداری در چشم‌انداز به دوره‌ی زمانی گفته می‌شود که سامانه دوره‌ی زندگی و کارکرد خود را حفظ کرده و این دوره را با حفظ حداکثر میزان بهره‌وری می‌پیماید. تا هنگامی که انرژی مورد نیاز حفظ چشم‌انداز تأمین شود و جریان متعادل ماده در سیستم انجام گیرد، همواره سیستم پایدار می‌ماند. در یک سیستم باز، انرژی از بیرون سیستم به داخل آن وارد می‌شود و هم‌زمان جریان ماده در درون آن به گردش درمی‌آید. چشم‌انداز ناهمواری‌های مناطق خشک نیز تابع همین قوانین هستند. اگر ورودی به سیستم بیش از خروجی باشد، سیستم در روند روبه‌رشد قرار می‌گیرد و اگر بین آنها توازن بیابان برقرار شود، سیستم به حالت تعادل می‌رسد؛ اما هنگامی که جریان ورودی کمتر از خروجی باشد، سیستم رو به فرسودگی می‌رود. در سیستم برخانی، اگر حجم تپه معادل توده یا ماده‌ی انباشته شده در سیستم در نظر گرفته شود و وضعیت چشم‌انداز را در زمان‌های مختلف بررسی کرده و به کمک شاخص‌هایی سنجیده شود، آنگاه می‌توان با مقایسه‌ی وضعیت دو دوره‌ی زمانی، گرایش یا روند چشم‌انداز را تحلیل کرد. تعیین گرایش یا روند چشم‌انداز از اهمیت بالایی برخوردار است؛ چراکه این روند بیانگر تغییرات رخ داده در سیستم بوده و می‌توان این تغییرات را ریشه‌یابی و مدیریت کرد تا دلیل وقوع آن مشخص شود. برای مثال، آیا دلیل تغییرات طبیعی یا مصنوعی، در ازای دخالت و دستکاری در سیستم یا سیستم‌های همجوار است؟ بنابراین بررسی وضعیت و روند چشم‌انداز، ابزار معاینه‌ی فنی سیستم قلمداد می‌شود. در این پژوهش برای بیان شاخص پایداری برخان از روش محاسبه‌ی میزان شار ماسه استفاده شده است. بدین‌گونه

۱. Stability index

که ابتدا باید میزان شار ماسه را در محدوده‌ای مستطیلی شکل به ابعاد عرض و ارتفاع برخان در ابتدای دامنه روبه‌باد به‌عنوان ورودی (q_i) و قسمت جلوی بازوهای برخان به‌عنوان خروجی (q_o) سیستم برخانی با استفاده از روابط (۱) تا (۷) محاسبه کرد (شکل شماره ۴). با محاسبه‌ی این دو عامل در زمان‌های یکسان و به‌طور متناوب و مداوم در دوره‌های زمانی معین بلندمدت، می‌توان میزان ورودی و خروجی به درون سیستم برخانی را تعیین کرد. سپس با روابطی که در تناسبات بین مقادیر q_o و q_i وجود دارد، احتمال وقوع سه حالت مختلف وجود دارد که در بردارنده‌ی پایداری و ناپایداری چشم‌انداز برخان است.



شکل ۴. روش محاسبه‌ی شار ماسه در تپه‌های برخانی

با محاسبه‌ی شار ماسه، امکان حاکمیت حالت‌های زیر بین میزان خروجی و ورودی ماده و انرژی به سیستم برخان وجود دارد:

حالت اول

در حالت اول ممکن است $q_i = q_o$ باشد. بنابراین نسبت میزان ورودی به میزان خروجی سیستم برابر با یک است (رابطه‌ی ۸). این حالت بیانگر نوعی تعادل و برابری میان ورودی و خروجی و فرم و فرآیند است که در نهایت به پایداری سیستم برخانی منجر می‌شود. در این وضعیت با ورود انرژی به درون سیستم، جریان ماده به گردش درآمده و چشم‌انداز برخان با حفظ کارکرد و بهره‌وری خود تا زمان برقراری این تعادل پایدار خواهد ماند.

$$\frac{q_i}{q_o} = 1 \quad \text{(رابطه‌ی ۸)}$$

حالت دوم

در حالت دوم ممکن است $q_i > q_o$ باشد. بنابراین، نسبت میزان ورودی به میزان خروجی سیستم بیشتر از یک است (رابطه‌ی ۹). این وضعیت نمایانگر نوعی نابه‌سامانی جریانی و در پی آن، بی‌تعادلی بین ورودی و خروجی و فرم و فرآیند

است که در نهایت به ناپایداری سیستم برخانی منجر می‌شود. بدین‌گونه که تپه‌ی برخانی به تله‌ای برای به‌دام انداختن ذرات ماسه تبدیل شده و از دیدگاه فیزیکی در وضعیت رشد و توسعه قرار دارد.

$$\frac{q_i}{q_o} > 1 \quad \text{رابطه‌ی ۹}$$

حالت سوم

در حالت سوم ممکن است $q_i < q_o$ باشد. بنابراین نسبت میزان ورودی به میزان خروجی سیستم کمتر از یک است (رابطه‌ی ۱۰). این وضعیت بیانگر نوعی نابه‌سامانی جریانی و در پی آن، بی‌تعادلی میان ورودی و خروجی و فرم و فرآیند است که در نهایت به ناپایداری سیستم برخانی منجر می‌شود. بدین معنی که مورفولوژی سه‌بُعدی برخان، به دلیل افزایش نسبی مقدار خروجی رو به کاهش است و چشم‌انداز برخانی به‌سوی فرسوده شدن و نابودی پیش می‌رود.

$$\frac{q_i}{q_o} < 1 \quad \text{رابطه‌ی ۱۰}$$

رابطه‌سنجی بین مؤلفه‌های مورفومتري برخان با میزان جابه‌جایی آن

برای تعیین نوع و شدت ارتباط بین مؤلفه‌های مورفودینامیک و مورفومتري برخان، انواع روش‌های رگرسیون ساده‌ی خطی و غیرخطی و رگرسیون چندمتغیره آزموده و از بین روابط رگرسیونی، روابطی با ارزش و برتری بالاتر انتخاب شد. به‌گونه‌ای که در این پژوهش بهترین روابط از توابع ساده‌ی خطی، توانی و نمایی پیروی می‌کند. به‌همین دلیل، در این قسمت تنها به بازگویی روابط ساده‌ی خطی و توانی اکتفا شده است (جدول شماره‌ی ۳ و شکل شماره‌ی ۵). روش مدل‌سازی و رابطه‌سنجی به کمک نرم‌افزار SPSS و با استفاده از مدل آنالیز رگرسیون انجام شده است.

جدول ۳. نتایج حاصل از رابطه‌سنجی میان مؤلفه‌های مورفومتري و میزان جابه‌جایی برخان‌های مطالعاتی

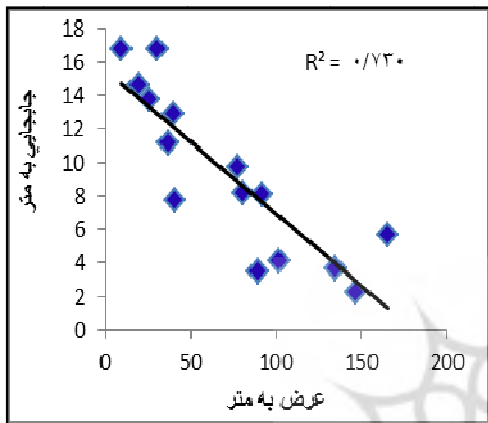
مؤلفه	نوع رابطه	ضریب همبستگی	ضریب تعیین*	ضریب تعیین تعدیل شده	انحراف معیار خطای برآورد	سطح معناداری	معادلات*
ارتفاع	نمایی	۰/۹۵۶	۰/۹۱۵	۰/۹۱۳	۰/۱۳۳	۰/۰۰۰	$D=17/786 e^{-0/115} H$
عرض	خطی	۰/۸۵۴	۰/۷۳۰	۰/۷۲۴	۱/۹۶۷	۰/۰۰۰	$D=-0/084W + 15/025$
طول	نمایی	۰/۹۳۲	۰/۸۶۹	۰/۸۶۶	۰/۱۶۵	۰/۰۰۰	$D=16/858 e^{-0/006} L$
محیط	نمایی	۰/۹۳۲	۰/۸۶۹	۰/۸۶۶	۰/۱۶۵	۰/۰۰۰	$D=17/559 e^{-0/002} P$
مساحت	نمایی	۰/۸۹۹	۰/۸۰۹	۰/۸۰۵	۰/۲۰۰	۰/۰۰۰	$D=12/781 e^{-6/881} A$
حجم	نمایی	۰/۹۱۵	۰/۸۳۸	۰/۸۳۵	۰/۱۸۴	۰/۰۰۰	$D=12/869 e^{-4/511} V$

* ارتباط معنادار در سطح احتمال خطای کمتر از یک درصد ($\alpha \leq 0/1$).

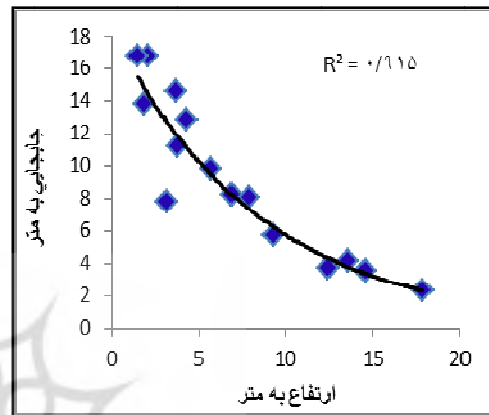
W: عرض به متر؛

D: میزان جابه‌جایی سالانه به متر؛

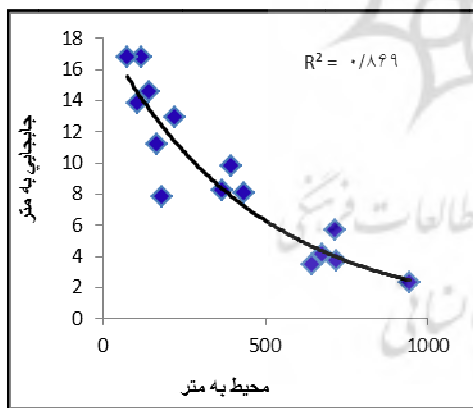
L: طول به متر؛
 A: مساحت به متر مربع؛
 V: حجم به متر مکعب؛
 H: ارتفاع به متر؛
 P: محیط به متر؛
 e: عدد نپرین و برابر ۲/۷۱۸ است.



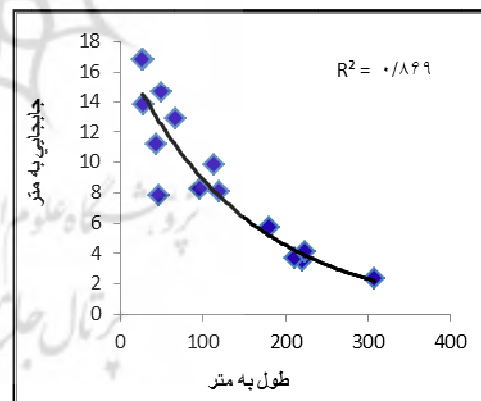
رابطه‌ی معکوس خطی بین میزان جابه‌جایی و عرض



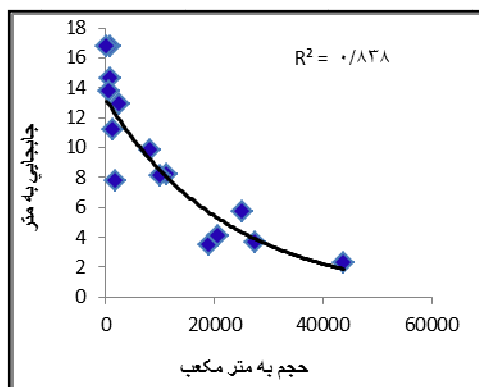
رابطه‌ی معکوس نمایی بین میزان جابه‌جایی و ارتفاع



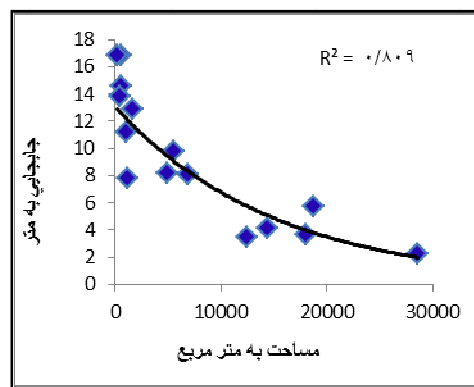
رابطه‌ی معکوس نمایی بین میزان جابه‌جایی و محیط



رابطه‌ی معکوس نمایی بین میزان جابه‌جایی و طول



رابطه‌ی معکوس‌نمایی بین میزان جابه‌جایی و حجم



رابطه‌ی معکوس‌نمایی بین میزان جابه‌جایی و مساحت

شکل ۵. روابط بین میزان جابه‌جایی و مؤلفه‌های مورفومتری برخان‌های مطالعاتی

پیوندهای به‌دست آمده از روابط بین میزان جابه‌جایی و مؤلفه‌های مورفومتری برخان حاکی از روابط ساده‌ی خطی و نمایی با حداکثر ضریب تبیین است، به‌گونه‌ای که روابط ساده‌ی خطی و نمایی بیشترین مقدار ضریب تبیین و کمترین مقدار انحراف معیار برآورد را دارند. نسبت‌های حاصل از رابطه‌سنجی بین میزان جابه‌جایی با مؤلفه‌های مورفومتری برخان حاکی از حداکثر ارتباط معنادار نمایی میزان جابه‌جایی با مؤلفه‌ی ارتفاع با ضریب تبیین ۰/۹۱۵ و انحراف معیار برآورد ۰/۱۳۳ است. بدین معنی که ۹۱/۵ درصد تغییرات میزان جابه‌جایی برخان با مؤلفه‌ی ارتفاع در چارچوب رابطه‌ی نمایی توجیه می‌شود، در حالی که ۸/۵ درصد باقی‌مانده سهم دیگر متغیرهاست.

تعریف و ارزیابی شاخص پایایی^۱

برخان‌ها نخستین ژئوفرم‌های بادی هستند که از ماسه‌ی رونده تشکیل شده و به‌عنوان پویاترین اشکال تراکم بادی به‌شمار می‌آیند. حرکت برخان نتیجه‌ی جابه‌جایی دانه‌به‌دانه‌ی ماسه‌های بادی بر فراز شیب ملایم دامنه‌ی روبه‌باد آن است (زمردیان، ۱۳۸۱: ۱۵۱). اگر ارتفاع برخان به یک حد بحرانی برسد، روی دامنه‌ی بادپناه تپه ریزش ماسه‌ای رخ می‌دهد و دانه‌ها بر اثر نیروی جاذبه به طرف پایین دامنه‌ی روبه‌باد جابه‌جا می‌شوند. به‌گفته‌ی دیگر، دانه‌های ماسه به‌وسیله‌ی نیروی باد از شیب ملایم دامنه‌ی بادپناه تا خط‌الرأس به‌صورت دانه‌به‌دانه، حالت‌های جهشی و غلتان بالا رفته و سپس در اثر نیروی جاذبه به پایین دامنه‌ی بادپناه افت می‌کنند که این عمل موجب تحرک و جابه‌جایی تپه‌ی برخانی می‌شود.

پویایی برخان‌ها تابعی از جریان باد، مورفولوژی تپه، انتقال رسوب‌های بادی و تعاملاتی است که بین آنها انجام می‌شود. تغییرات زمانی و مکانی در میزان انتقال ماسه توسط باد یک عمل کنترل‌کننده‌ی بنیادی برای مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای به‌شمار می‌آید (Lancaster, ۱۹۹۴: ۴۸۳). جابه‌جایی تپه‌های برخانی با عمل فرسایش تخریبی در دامنه‌ی روبه‌باد و رسوب‌گذاری هم‌زمان در دامنه‌ی بادپناه روی می‌دهد (Al-Harthi, ۲۰۰۲: ۳۶۱). مهم‌ترین عواملی

۱. Steady state index

که در میزان انتقال ماسه و مقدار جابه‌جایی برخان‌ها نقش عمده و اساسی دارند عبارت‌اند از: سرعت و شدت برشی باد، ویژگی‌های ذرات ماسه، میزان رطوبت، درصد و نوع پوشش گیاهی و ناهمواری‌های سطح زمین (Hesse & Simpson, ۲۰۰۶). به‌طورکلی میزان سرعت و جابه‌جایی تپه‌های برخانی تابعی از مورفولوژی سه‌بعدی برخان، عناصر اقلیمی منطقه و موانع طبیعی و انسانی موجود در سر راه آنها است.

برای تعریف شاخص پایایی، میزان جابه‌جایی سالانه‌ی ۱۵ برخان بر اساس آزمون مقایسه‌ی میانگین به ۵ گروه تقسیم شد. برای وارد کردن میزان جابه‌جایی صفر که برابر با پایایی کامل است، این گروه به گروه‌های پیش افزوده شد که در جمع شامل ۶ گروه می‌شود. سپس میزان پایایی هر کدام بر این اساس تعیین شده است. حداکثر میزان جابه‌جایی اندازه‌گیری شده در طی سال نمونه‌برداری برابر با $۱۶/۸۰$ و حداقل آن برابر با $۲/۳۰$ است. این گروه‌بندی برای منطقه‌ی مطالعاتی با تغییرات غیرمعنادار ویژگی‌های محیطی کارایی دارد و در صورت تغییرات مشابه و غیرمعنادار مشخصه‌های محیطی برای مناطق دیگر کارایی نخواهد داشت. در غیر این صورت، باید برای تعیین وضعیت‌های پایایی برخان مدل‌ها و گروه‌بندی‌های جدیدی طراحی شود (جدول شماره‌ی ۴).

جدول ۴. گروه‌بندی حالت‌های پایایی برخان‌های مطالعاتی (D: میزان جابه‌جایی سالانه به متر)

شماره‌ی گروه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دامنه‌ی جابه‌جایی	$D = 0$	$0 >> D 3$	$3 >> D 6$	$6 >> D 9$	$9 >> D 12$	$12 > D$
وضعیت پایایی	پایایی کامل	پایایی متوسط	پایایی خیلی کم	ناپایایی	ناپایایی زیاد	ناپایایی کامل
تعداد برخان	۰	۱	۴	۳	۲	۵

بر اساس نتایج جدول شماره‌ی ۴، گروه ۶ با داشتن بیشترین تعداد برخان و بیشترین میزان جابه‌جایی سالانه، کمترین پایایی را دارد. بنابراین بیشترین توجه و الزامات برنامه‌ریزی را برای تثبیت ماسه و مدیریت محیطی برخان‌های متحرک و ماسه‌های روان می‌طلبد. گروه‌های دیگر نیز به ترتیب اولویت همین روال را با اهمیت کمتری دنبال می‌کنند.

بحث و نتیجه‌گیری

اساس تحلیل‌های ژئومورفولوژی سیستمی بر اندازه‌گیری فرایندها و رابطه بین فرم و فرایند استوار شده و با مشاهده‌های صحرائی، تلاش در ارائه‌ی مدل‌هایی دارد که بتواند حالت پایداری سیستم چشم‌انداز را تبیین کند. پایداری در چشم‌اندازهای ژئومورفویک، خود بازتابی از وجود نوعی تعادل شمرده می‌شود. در واقع، مفهوم تعادل در دیدگاه سیستمی به نوعی ارتباط خاص حاکم بر روابط بین فرم و فرایند گفته می‌شود. در این دیدگاه تعادل ژئومورفیک تعیین‌کننده‌ی یک ارتباط معین میان جریان‌های ورودی و خروجی سیستم یا رابطه‌ی فرم در یک دستگاه شکل‌زایی خاص است (رامشت، ۱۳۸۵: ۸۰). بر اساس چنین مفهومی تغییرات لندفرم‌ها در طول زمان، اگرچه نوسان‌هایی دارد، ولی این نوسان‌ها در محدوده‌ی میانگینی خاص قرار می‌گیرد، به‌گونه‌ای که هرگز نمی‌توان تعادل را به مفهوم پایداری کامل دانست. در واقع،

هنگامی که گفته می‌شود بین فرم و فرایند تعادل برقرار است، این بدین معنی نیست که هیچ‌گونه تغییری در چشم‌انداز وجود ندارد، بلکه نوعی گرایش در پایداری فرم‌ها دیده می‌شود، اگرچه نوسان‌هایی نیز وجود دارد؛ ولی این نوسان‌ها پیرامون محور خاصی انجام می‌گیرد (Howard, ۱۹۸۲: ۳۲۳). بنابراین عواملی که منجر به تغییر بین جریان‌های ورودی و خروجی و ناپایداری در یک سیستم می‌شود با عناوین پس‌خوراند مثبت، آستانه‌ها و بی‌نظمی‌های جبری بیان می‌شود. نتایج حاصل از بررسی چشم‌اندازهای ژئومورفیک از دیدگاه سیستمی نشان می‌دهد که می‌توان رابطه‌ی بین ورودی و خروجی یا فرم و فرایند را در یک سیستم ژئومورفیک نشان داد و از این راه به بیان مفاهیم حالت‌های تعادل و پایداری در چشم‌اندازهای ژئومورفیک پرداخت (Langbein & Leonold, ۱۹۶۴: ۷۹۲).

از مهم‌ترین ویژگی‌های برخان‌ها نگهداری مورفولوژی سه‌بعدی و شکل هلالی در هنگام حرکت است و حتی اغلب حجم آن نیز افزایش می‌یابد. مراحل مختلف تشکیل برخان، خود دلیل ثابتی بر این گفته و تشریح روش دگرگونی و تکامل آن است. مراحل تشکیل کامل برخان شامل چهار دوره است که عبارت‌اند از: بوکلیه، بوکلیه‌ی برخانی، برخان ناقص و برخان کامل (احمدی، ۱۳۸۷: ۳۵۰) که هر کدام ویژگی‌های مخصوص به خود دارند؛ اما باید توجه داشت که همراه با مراحل تشکیل برخان، ویژگی تحرک جزء خصایص جدایی‌ناپذیر آن است، ضمن اینکه در هنگام مراحل تکامل و تحرک، شکل هلالی و سه‌بعدی خود را حفظ کرده و بر میزان حجم آن افزوده می‌شود. این تکامل و افزایش حجم موجب کاهش میزان جابه‌جایی آن می‌شود. بدین‌گونه که در شرایط برابر اقلیمی، پوشش گیاهی و ناهمواری‌های سطح زمین، هر اندازه برخان، مورفولوژی سه‌بعدی کوچکتری داشته باشد، از میزان جابه‌جایی بیشتر و پایایی کمتری برخوردار است.

چنانچه تمامی عوامل شکل‌گیری تپه‌ی برخانی ثابت باشد، اندازه‌ی ابعاد تپه به زمان وابسته است. به بیانی دیگر، تپه‌های برخانی با ابعاد و اشکال متفاوت، نتیجه‌ی کارکرد عوامل گوناگون در مدت زمان هستند. بررسی‌ها نشان داده که برای تشکیل برخانی به ابعاد یک متر، یک سال زمان لازم است. بنابراین برخانی با ارتفاع ۱۰۰ متر، دست‌کم ده‌ها هزار سال تحت تأثیر عوامل و حوادث گوناگون قرار گرفته است. در حالی که برخان‌های کوچک در زمان کمتری شکل گرفته و می‌توانند طی زمان اندکی از بین بروند (احمدی، ۱۳۸۷: ۳۳۶). بنابراین افزایش سن برخان‌ها، با افزایش حجم و شکل سه‌بعدی آنها همراه است و در مقابل میزان جابه‌جایی آنها کاهش می‌یابد تا جایی که به حداقل ممکن رسیده و به صفر نزدیک می‌شود. میزان جابه‌جایی صفر برابر با حالتی است که ارتفاع برخان به حدی رسیده که دیگر نیروی باد قادر به تغییر در شکل و ابعاد برخان نبوده و نمی‌تواند آن را جابه‌جا کند. میزان جابه‌جایی حداقل (صفر و یا نزدیکترین عدد به آن) نشان از حداکثر مورفولوژی سه‌بعدی و کامل‌ترین شکل برخان در شرایط ثابت اقلیمی، پوشش گیاهی و ناهمواری‌های سطح زمین است. این خود دلیل محکمی بر بیشترین حالت ثبات و بی‌تحرکی نسبی برخان است.

شکل برخان بازتابنده‌ی مجموعه‌ای پویا از فرایندهایی است که این فرایندها به سوی هدف معینی که همان تشکیل چشم‌انداز برخانی است، جهت‌گیری کرده و در این راستا سازمان یافته‌اند. توسعه و تکامل چشم‌انداز برخان نتیجه‌ی اعمال پس‌خوراند‌های بسیار میان فرم و فرایند است. این پس‌خوراند‌ها منجر به تغییرات ساختاری در جریان ماده و انرژی می‌شود، به بیانی دیگر، کنش و واکنش‌های ساختاری و کارکردی، سیستم چشم‌انداز را توسعه می‌دهد.

برخان یک سیستم باز طبیعی است که در آن انرژی و ماده مبادله می‌شود که در نتیجه‌ی این مبادله، یک ساختار ورودی و خروجی به درون سیستم برخان شکل می‌گیرد. ورودی به درون سیستم از راه پیکره‌ی اصلی برخان و خروجی در نتیجه‌ی از دست دادن ماسه و انرژی باد در قسمت بازوها انجام می‌شود. محاسبه‌ی میزان ورودی و خروجی سیستم برخان از روش محاسبه‌ی شار ماسه در ابتدای دامنه‌ی روبه‌باد و انتهای بازوهای برخان امکان‌پذیر است. بنابراین می‌توان با کمک روابط و تناسبات بین مقادیر ورودی و خروجی شار ماسه‌ی موجود در سیستم برخان، یک شاخص پایداری برای آن تعریف کرد و آن را مورد ارزیابی قرار داد. بر اساس این شاخص، برخان پایدار به برخانی گفته می‌شود که میزان ورودی و خروجی آن با هم برابر و پیرامون یک محور متوسط در گردش باشد. در مقابل اگر مقدار ورودی بیشتر از خروجی باشد، سیستم برخانی در حال ناپایداری با روند روبه‌رشد و توسعه همراه است؛ ولی اگر میزان خروجی بیش از میزان ورودی باشد، سیستم برخانی در حال ناپایداری با روند رو به تحلیل و نابودی همراه خواهد بود.

برای تعریف شاخص پایایی از میزان و روند جابه‌جایی سالانه استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که بین میزان جابه‌جایی سالانه‌ی برخان و مؤلفه‌های مورفومتری آن، روابط معکوس‌نمایی و خطی وجود دارد. با کمک روابط ارائه‌شده می‌توان به‌سادگی و دقت کافی میزان جابه‌جایی سالانه‌ی برخان‌های مطالعاتی را با استفاده از مؤلفه‌های مورفومتری محاسبه کرد. بر اساس شاخص پایایی، برخان‌های منطقه‌ی مطالعاتی به ۶ گروه تقسیم شده‌اند که از این میان، گروه ۶ با بیشترین تعداد برخان و بیشترین میزان جابه‌جایی سالانه، کمترین پایایی را داشته است، به‌عبارتی با ناپایایی کامل روبه‌رو است و بیشترین توجه و اقدامات برنامه‌ریزی را برای تثبیت ماسه و مدیریت محیطی برخان‌های متحرک و ماسه‌های روان می‌طلبد.

منابع

- Ahmadi, H., ۲۰۰۸, **Applied Geomorphology (Desert-Wind Erosion)**, Vol. II, ۳rd Edition, University of Tehran Press, Tehran.
- Al-Harathi, A., ۲۰۰۲, **Geohazard Assessment of Sand Dunes between Jeddah and Al-Lith, Western Saudi Arabia**, Environmental Geology, Vol. ۴۲, PP. ۳۶۰-۳۶۹.
- Arens, S. M., Slings, Q., De Vries, C. N., ۲۰۰۴, **Mobility of a Remobilized Parabolic Dune in Kennemerland, the Netherlands**, Geomorphology, Vol. ۵۹, PP. ۱۷۵-۱۸۸.
- Bagnold, R.A., ۱۹۴۱, **The Physics of Blown Sand and Desert Dunes**, Methuen, London.
- Chorley, R. J., Schumm, S. A., & Sugden, D. E., ۲۰۰۵, **Geomorphology (Fluvial, Coastal and Wind Processes)**, Translated by: Ahmad Motamed, Vol. III, ۳rd Edition, Samt Publication, Tehran.
- Craig, M.S., ۲۰۰۰, **Aeolian Sand Transport at the Lanphere Dunes, Northern California**, Earth Surface Processes and Landforms, Vol. ۲۵, PP. ۲۳۹-۲۵۳.
- Daniell, J., Hughes, M., ۲۰۰۷, **The Morphology of Barchan-shaped Sand Banks from Western Torres Strait, Northern Australia**, Sedimentary Geology, Vol. ۲۰۲, PP. ۶۳۸-

۶۵۲.

- El belrhiti, H., Douady, S., ۲۰۱۰, **Equilibrium Versus Disequilibrium of Barchan Dunes**, Journal of Geomorphology, Vol. ۱۲۵, No. ۴, PP. ۵۵۸-۵۶۸.
- Finkel, H.J., ۱۹۵۹, **The Barchans of Southern Peru**, Journal of Geology, Vol. ۶۷, PP. ۶۱۴-۶۴۷.
- Fryberger, S. G., ۱۹۷۹, **Dune form Sand Wind Regime**, In: McKee, E. D., (Ed.), A Study of Global Sand Seas, Professional Paper, No.۱۰۵۲, US Geological Survey, Washington, PP. ۱۳۷-۱۶۹.
- Gay, S.P., ۱۹۹۹, **Observations Regarding the Movement of Barchan Sand Dunes in the Nazca to Tanaca Area of Southern Peru**, Geomorphology, Vol. ۲۷, PP. ۲۷۹-۲۹۳.
- Herrmann, H.J., Sauerman, G., ۲۰۰۰, **The Shape of Dunes**, Physical A ۲۸۳, PP. ۲۴-۳۰.
- Hersen, P., ۲۰۰۴, **On the Crescentic Shape of Barchan Dunes**, the European Physical Journal, Vol. ۳۷, PP. ۵۰۷-۵۱۴.
- Hesp, P., Hastings, K., ۱۹۹۸, **Width, Height and Slope Relationships and Aerodynamic Maintenance of Barchans**, Geomorphology, Vol. ۲۲, PP. ۱۹۳-۲۰۴.
- Hesse, P.P., Simpson, R.L., ۲۰۰۶, **Variable Vegetation Cover and Episodic Sand Movement on Longitudinal Desert Sand Dunes**, Geomorphology, Vol. ۸۱, PP. ۲۷۶-۲۹۱.
- Hesse, R., ۲۰۰۸, **Do Swarms of Migrating Barchan Dunes Record Pale Environmental Changes? A Case Study Spanning the Middle to Late Holocene in the Pampa de Jaguay, Southern Peru**, Geomorphology, Vol. ۴۷, PP.۱-۶.
- Howard, A.D., Morton, J.B., Gad-El-H & M., Pierce, D.B., ۱۹۷۸, **Sand Transport Model of Barchan Dune Equilibrium**, Journal of Sedimentology, No. ۲۵, PP. ۳۰۷-۳۳۸.
- Hugenholtz, C.H., Wolfe, S.A., Walker, I.J., Moorman, B.J., ۲۰۰۸, **Spatial and Temporal Patterns of Aeolian Sediment Transport on an Inland Parabolic Dune, Bigstick Sand Hills, Saskatchewan, Canada**, Geomorphology, Vol. ۷۷, PP. ۱- ۱۳.
- Kawamura, R., ۱۹۵۱, **Study of Sand Movement by Wind**, Reports of Physical Sciences Research Institute of Tokyo University ۵(۳-۴), PP. ۹۵-۱۱۲ (in Japanese, Translated in, ۱۹۶۴ as University of California Hydraulics Engineering Laboratory Report, HEL-۲-۸, ۹۹-۱۰۸, Berkeley, CA, PP.۱-۳۸).
- Lancaster, N., ۱۹۹۴, **Dune Morphology and Dynamics**, In: Abrahams, Parsons Eds., Geomorphology of Desert Environments, Chapman & Hall, London.
- Langbein, W.B. and Leonold, L. B., ۱۹۶۴, **Quasi-equilibrium States in Channel Morphology**, Vol. ۲۶۲, PP. ۷۸۲-۷۹۴.
- Lettau, K., Lettau, H., ۱۹۶۹, **Bulk Transport of Sand by the Barchans of the Pampa de La Joya in Southern Peru**, Zeitschrift fur Geomorphology, N. ۱۳- ۲, PP. ۱۸۲-۱۹۵.
- Mahmoudi, F. A., ۲۰۰۴, **Dynamic Geomorphology**, ۲nd Edition, University of Payam-Noor

Publication, Tehran.

- Mahmoudi, S.H., ۲۰۰۵, **Investigation of Physical Variations of Sand Dunes in the East Jask (Monitoring of Sand Dunes Using RS and GIS in the Time Period (۱۹۹۰-۲۰۰۴))**, Faculty of Literature and Humanities, M.A. Thesis, University of Isfahan, Isfahan.
- Mousavi, S.H., ۲۰۰۹, **The Assessment of Effectiveness Barchan Morphometry on Stabilities (Case study: Erg Chah Jam)**, M.A. Thesis, Faculty of Literature and Humanities, University of Isfahan, Isfahan.
- Negaresh, H., & Latifi, L., ۲۰۰۸, **Geomorphologic Analysis of the Advancing Trend of Sand Dunes in East Sistan Plain in Recent Droughts**, Iranian Journal of Geography and Development, No. ۱۲, PP. ۴۳-۶۰.
- Ramesht, M. H., ۲۰۰۶, **Symbols and Images in Geomorphology**, ۱st Edition, Samt Publication, Tehran.
- Sauermann, G., Andrade, J. S., Maia, L. P., Costa, U. M. S., Araujo, A. D., Herrmann, H.J., ۲۰۰۳, **Wind Velocity and Sand Transport on a Barchan Dune**, Geomorphology, Vol. ۵۴, PP. ۲۴۵-۲۵۵.
- Sauermann, G., Rognon, P., Poliakov, A., Herrmann, H.J., ۲۰۰۰, **The Shape of the Barchan Dunes of Southern Morocco**, Geomorphology, Vol. ۳۶, PP. ۴۷-۶۲.
- Sørensen, M., ۱۹۹۱, **An analytic Model of Wind-blown Sand Transport**, Acta Mech., Vol. ۱, PP. ۶۷-۸۱.
- Wang, Z.T., Chen Tao, S., Wen Xie, Y., Hui Dong, G., ۲۰۰۷, **Barchans of Minqin: Morphometry**, Geomorphology, Vol. ۸۹, PP. ۴۰۵-۴۱۱.
- Wippermann, F.K., Gross, G., ۱۹۸۶, **The Wind-induced Shaping and Migration of an Isolated Dune: A Numerical Experiment**, Journal of Boundary-Layer Meteorol, No. ۳۶, PP. ۳۱۹-۳۳۴.
- Zomorrodian, M. J., ۲۰۰۴, **Geomorphology of Iran (Climatic Processes and External Dynamics)**, Vol. II, ۲nd Edition, Publication of Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad.