

مدل سازی برآورد حجم تپه‌های برخانی (مطالعه موردی: برخان‌های منطقه چاه‌جام)

عباسعلی ولی: استادیار ژئومورفولوژی، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه کاشان
سیدحجت موسوی*: دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اصفهان

چکیده

یکی از مهم‌ترین راه‌کارهای مدیریتی مناطق خشک و نیمه‌خشک، شناخت و به‌کارگیری اصول محیطی حاکم بر رفتار ماسه‌های متحرک به ویژه تپه‌های برخانی است. برخان‌ها یکی از رایج‌ترین اشکال تراکم بادی بوده که از کنش متقابل جریان باد و بستر ماسه نشأت می‌گیرند. تحرک و پویایی این عوارض در مناطق تحت استیلا، کانون تهدید و بحران مراکز سکونتی و ارتباطی بوده و حجم رسوبات، شاخصی از میزان جابجایی آن محسوب می‌گردد؛ بنابراین دستیابی به میزان حجم برخان می‌تواند به عنوان شاخصی در جهت شناخت رفتار، نحوه عملکرد و تعیین وضعیت سیستم برخانی عمل نماید. هدف از این پژوهش مدل‌سازی برآورد حجم تپه‌های برخانی جنوب کویر حاج علی‌قلی با استفاده از مولفه‌های مورفومتری آن‌ها و از طریق روش تحلیل آماری رگرسیون غیرخطی ساده و چندگانه است. نتایج مدل‌سازی حاکی از ارتباط معنی‌دار توانی بین مولفه‌های عرض، طول، ارتفاع و مساحت با حجم برخان می‌باشد که حداکثر ارتباط معنی‌دار توانی بین حجم و مساحت برخان با ضریب تبیین ۰/۹۹۳ و انحراف معیار برآورد ۰/۱۶۹ وجود دارد. نتایج مدل‌سازی رگرسیون غیرخطی چندگانه نیز حاکی از روابط معنی‌دار پارامترهای مورفومتری برخان جهت محاسبه حجم آن می‌باشد که حداکثر ارتباط معنی‌دار حاصل‌ضرب بین حجم با مولفه‌های مساحت و ارتفاع با ضریب تبیین ۰/۹۹۹ وجود دارد، بنابراین در صورت دستیابی به یکی از پارامترهای مورفومتری، می‌توان حجم برخان را با استفاده از مدل‌های توانی ارائه شده، برآورد کرد و در صورت دستیابی به دو مولفه، حجم برخان را از طریق مدل‌های مناسب غیرخطی حاصل‌ضرب با دقت بیش‌تری محاسبه نمود.

واژگان کلیدی

حجم برخان، چاه‌جام، تحلیل آماری، مدل‌سازی، پارامتر مورفومتری

۱- مقدمه

هر یک از پدیده‌های گوناگون ژئومورفیک، ویژگی‌های خود را از دینامیک نیروهای بیرونی و درونی محیطی به دست می‌آورند. اگر تغییری در کم‌و کیف دینامیک محیط حاصل آید، با ایجاد ویژگی‌های متفاوت محیطی در سطح زمین، پدیده‌های ژئومورفیک با تغییر در شکل ظاهری خود روبرو شده و نتیجه این تغییرات افزایش خسارات ناشی از پویایی آن‌ها بر اجتماعات انسانی است.

بین سیستم‌های رسوبی که از لحاظ مقدار بار رسوبی فقیر و غنی هستند، تشکیلات متفاوتی از تپه‌های ماسه‌ای می‌توان مشاهده نمود. بر خان‌ها یکی از اشکال تراکمی ماسه‌های بادی هستند که از مشخصه‌های سیستم‌های رسوبی فقیر در محیط‌های بیابانی محسوب می‌شوند (Daniell and Hughes, 2007: 639). این تپه‌ها، هلالی شکل بوده و در انتهای خود به دو بازو ختم می‌شوند. امتداد بازوها جهت باد غالب را نشان داده و حاکی از حداکثر سرعت باد در این قسمت می‌باشد (محمودی، ۱۳۸۳: ۲۶۱). این تپه‌های هلالی شکل از دو دامنه با شیب‌های متفاوت تشکیل شده‌اند که حداکثر شیب متعلق به دامنه بادپناه به واسطه ی سقوط دانه‌های رسوبی در اثر نیروی فشار باد و نیروی کششی جاذبه است (Hersen, 2004: 507). دامنه روبه‌باد با شیب کم‌تری نسبت به دامنه بادپناه به وسیله خط‌الرأس از آن جدا می‌شود (Sauermann, 2000: 48). تغییر در جهت باد و برخورد بر خان‌ها با یکدیگر سبب ناپایداری در اندازه و شکل بر خان‌ها می‌شود. بر خان‌های کوچک‌تر عموماً به دلیل حرکت سریع‌تر با بر خان‌های بزرگ‌تر برخورد کرده و یا بر روی آن‌ها سوار می‌شوند. این عامل سبب ناپایداری در سیستم بر خان شده و جریان‌ات رسوبی بین بر خان‌ها تغییر می‌کند که نهایتاً مکانیسم برداشت سطحی ماسه بر دیگر فرآیندهای بادی غلبه کرده و موجب پخش دوباره رسوبات بادی و یا ایجاد یک بر خان جدید می‌گردد (Daniell and Hughes, 2007: 640).

از مهم‌ترین ویژگی این تپه‌ها می‌توان به پویایی آن‌ها ضمن حفظ شکل ظاهریشان اشاره کرد. میزان حرکت آن‌ها تابعی از سرعت باد، اندازه بر خان و مورفولوژی سه بُعدی آن است. بدین معنی که برای بادهایی با سرعت و شدت مشابه، سرعت جابجایی بر خان با مورفولوژی سه بُعدی آن رابطه عکس دارد (Mousavi et al., 2010: 98). این مشخصه‌ی بر خان‌ها سبب می‌شود که در صورت فراهم بودن شرایط محیطی، پیشروی سالانه آن‌ها در بلند مدت بسیاری از سازه‌های طبیعی و انسانی را با تهدید جدی مواجه کرده و یا آن‌ها را به طور کامل نابود سازد.

خصوصیات شکل‌شناسی بر خان متأثر از عوامل مختلف زمانی و مکانی است (Hugenholtz, et al., 2008: 2). یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شکل‌شناسی بر خان، حجم رسوبات بادی بوده که تابعی از شکل سه بُعدی و خصوصیات مورفومتری بر خان، نظیر طول، عرض، ارتفاع و مساحت می‌باشد. بر خان‌هایی که دارای شکل سه بُعدی کوچک‌تر و حجم رسوبات کم‌تری هستند از پایداری نسبی کم‌تری برخوردارند (موسوی و همکاران، ۱۳۸۹: ۱۱۶). بنابراین حجم بر خان از عوامل مهم و بنیادی در برآورد میزان پایداری و کنترل آن محسوب می‌شود. هم‌چنین محاسبه حجم بر خان، با در نظر گرفتن مدیریت و برنامه‌ریزی محیطی با توجه به دیدگاه سیستمی، برای محاسبه میزان ورود و خروج ماده (دانه‌های ماسه) و انرژی (نیروی باد) به درون سیستم بر خان شرط لازم و ضروری است که در نتیجه آن امکان مطالعه و شناسایی عملکرد و رفتار بر خان در طول مسیر حرکت وجود دارد. بنابراین نتایج حاصل از این پژوهش در مدیریت ریسک و بحران مناطق بیابانی مثمرتر بوده و هم‌چنین در طرح‌های تثبیت ماسه‌های روان، شناسایی مناطق بحرانی فرسایش بادی، شناخت رفتار و عملکرد چشم‌انداز بر خانی سازنده می‌باشد.

هدف از این پژوهش دستیابی به مدل‌های مناسب جهت برآورد حجم رسوبات بادی ناهمواری بر خان است. برای دستیابی به این هدف، از طریق روابط آماری ساده و چندگانه بین پارامترهای مورفومتری بر خان، مدل‌های تخمین

رسوب آن تعیین گردید و با توجه به ارزش رجحانی فاکتورهای سنجش دقت مدل، مدل‌های مناسب معرفی شد. معیار مدل‌سازی حجم برخان به کمک مدل برآورد حجم هرم صورت گرفته است. با توجه به این که در برآورد حجم، هرم سطح قاعده و ارتفاع برخان مدّ نظر است و از آنجایی که محاسبه‌ی دقیق سطح و حجم برخان نیز بسیار زمان‌بر و دشوار است، یکی از اهداف این تحقیق ارائه مدل‌های دقیق تخمین حجم به کمک مولفه‌های قابل اندازه‌گیری برخان می‌باشد تا بتوان در صورت دستیابی به حداقل یکی از مولفه‌های طول، عرض، ارتفاع و مساحت برخان، به سهولت و با دقت مناسب حجم آن را برآورد نمود.

۲- پیشینه‌ی تحقیق

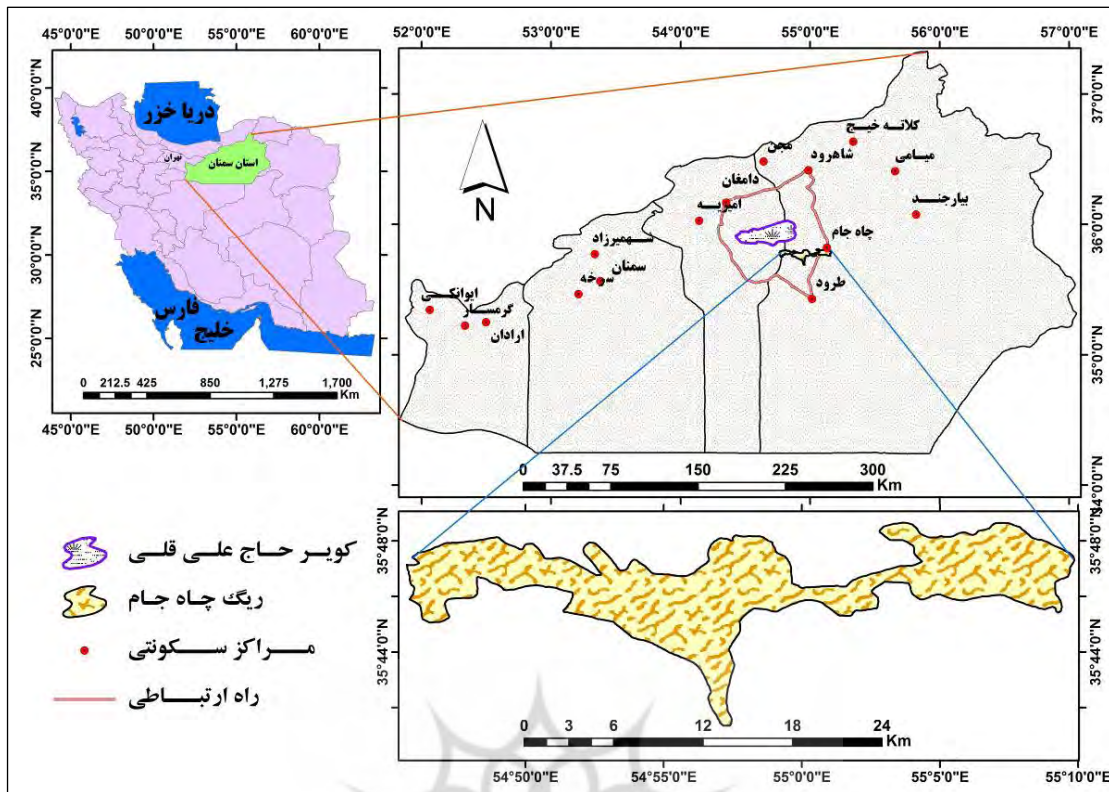
تپه‌های برخانی، ساده‌ترین و رایج‌ترین نوع تپه‌های ماسه‌ای هستند که شکل هلالی دارند (محمودی، ۱۳۸۳: ۲۶۱)، اگر باد در اغلب طول سال به طور دائم در جهت یکسان بوزد و در آن مکان ماسه به اندازه کافی جهت پوشاندن کامل سطح وجود نداشته باشد، برخان ایجاد می‌گردد (Sauer mann et al., 2000: 47)، (El belrhiti and Douady, 2010: 1). شکل هندسی برخان شبیه به سهمی بوده (Wang et al., 2007: 407)، که انحناى آن از رأس یک بازو شروع شده، تا حداکثر ارتفاع در دامنه بادپناه رسیده و به راس بازوی دیگر ختم می‌گردد (موسوی و همکاران، ۱۳۸۹: ۸۴). پژوهش‌های متعددی توسط متخصصین بر روی برخان‌ها صورت گرفته است، به‌طوری‌که اولین مطالعات در رابطه با تپه‌های برخانی و بررسی شکل‌شناسی آن‌ها توسط Douglass (۱۹۰۹: ۳۴)، Barclay (۱۹۱۷: ۵۳) و Finkel (۱۹۵۹: ۶۱۴) در جنوب پرو و Bagnold (۱۹۴۱: ۱۹۴) در صحرای کبیر آفریقا انجام گرفت. مطالعات در مورد شبیه‌سازی‌های رقومی برای شکل‌شناسی، پیش‌بینی تحرکات و دگرگونی‌های تپه‌های برخانی توسط Howard and Morton (۱۹۷۸: ۳۰۷)، Wippermann and Gross (۱۹۸۶: ۳۱۹)، Anton and Vincent (۱۹۸۶: ۱۸۷)، Anthonsen et al. (۱۹۹۶: ۶۳) صورت گرفت.

Hesp and Hastings (۱۹۹۸: ۱۹۳) با بررسی روابط بین ارتفاع و عرض برخان، این روابط را به عنوان عوامل کنترل‌کننده شکل سه‌بُعدی برخان معرفی کرده‌اند. Gay (۱۹۹۹: ۲۷۳) با مطالعه‌ی جابه‌جایی تپه‌های برخانی جنوب پرو بیان داشت که سرعت حرکت برخان با اندازه آن نسبت معکوس دارد. Sauer mann et al. (۲۰۰۰: ۴۷) با مطالعه‌ی تپه‌های برخانی جنوب مراکش یک مدل برای شکل برخان ارائه داده‌اند که بر اساس آن می‌توان اختلافات بین برخان‌ها و ویژگی پایداری آن‌ها را تعریف کرد. Herrmann and Sauer mann (۲۰۰۰: ۲۴) با مطالعه‌ی تپه‌های ماسه‌ای مراکش مدل‌هایی را برای تحرکات و پویایی سطح بستر آن‌ها ارائه کرده‌اند. Forman and Pierson (۲۰۰۳: ۱۸۹) به بررسی در مورد تعیین زمان ایجاد و سن‌یابی تپه‌های ماسه‌ای در منطقه آیداهو در غرب آمریکا پرداخته‌اند. Sauer mann (۲۰۰۳: ۲۴۵) سرعت باد و میزان حمل ماسه را بر روی تپه‌های برخانی بررسی نموده و اختلافات عمده بین جریان‌های بادی اشباع شده و نشده از ماسه را بیان کرده‌اند. Havholm and Running (۲۰۰۵: ۸۴۷) به بررسی خصوصیات رسوب‌شناسی، چینه‌شناسی و محیطی تپه‌های ماسه‌ای هولوسن میانی و تعیین سن آن‌ها در منطقه‌ی جنوب‌غربی مانیتوبا در کانادا پرداخته‌اند. Wang et al. (۲۰۰۷: ۴۰۵) با بررسی برخان‌های شمال‌غرب چین از طریق تئوری‌های هندسی بیان نموده‌اند که ارتفاع برخان با عرض آن تناسب دارد و خط‌الرأس را می‌توان با استفاده از شکل یک سهمی توصیف کرد. Daniell and Hughes (۲۰۰۷: ۶۳۸) شکل‌شناسی برخان‌های استرالیا و ارتباط آن‌ها با نوع رژیم فصلی بادهای منطقه‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند. Hugenholtz et al. (۲۰۰۸: ۱۳) ضمن مطالعه‌ی الگوهای موقت و فضایی حمل رسوبات بادی بر روی تپه‌های سهمی شکل، میزان ورودی و خروجی و نرخ انتقال

مقدار ماسه را با توجه به متغیرهای اقلیمی منطقه بر روی تپه‌های برخانی بررسی کرده‌اند. Vali et al. (۲۰۰۸: ۴۱۱) خصوصیات شکل‌شناسی و تحرکات تپه‌های ماسه‌ای را با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در بیابان پاتاگونا در آرژانتین بررسی نموده و وجود این میدان ماسه‌ای را در نتیجه گردش عمومی هوا و خصوصیات خط ساحل بیان کرده‌اند. El belhiti and Douady (۲۰۱۰: ۱) وضعیت تعادل و ناتعادلی تپه‌های برخانی را در صحرای مراکش مورد مطالعه قرار داده و بیان داشتند که این عوارض در بلند مدت دارای تعادل و در کوتاه مدت دارای ناتعادلی هستند، زیرا زمان کافی برای رسیدن به حالت تعادل را ندارند. محمودی (۱۳۸۴: ۱) پویایی تپه‌های ماسه‌ای جاسک را با استفاده از روش RS و GIS در ارتباط با ویژگی‌های اقلیمی و قدرت حمل رسوب توسط باد بررسی کرده و به شناسایی عوامل موثر بر جابه‌جایی آن‌ها پرداخته است. نگارش و لطیفی (۱۳۸۷: ۴۳) خصوصیات ژئومورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای دشت سیستان را ارزیابی کرده و با ارائه داده‌هایی در رابطه با خصوصیات مورفومتری برخان‌ها، به مدل‌سازی روابط آن‌ها پرداخته‌اند. موسوی (۱۳۸۸: ۱) مورفومتری برخان‌های ریگ چاه‌جام واقع در جنوب کویر حاج علی‌قلی را بررسی نموده و با استفاده از تحلیل‌های آماری، روابط بین آن‌ها را مدل‌سازی کرده است.

۳- منطقه مطالعاتی

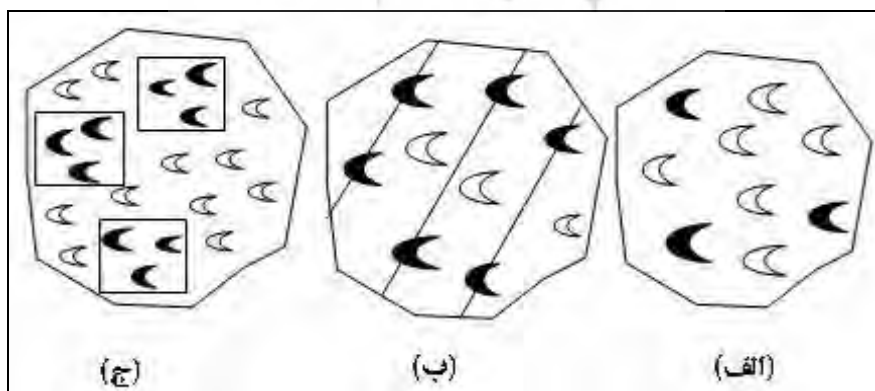
محدوده‌ی مطالعاتی این پژوهش، منطقه برخانی چاه‌جام می‌باشد که در قسمت جنوب‌شرقی تا جنوبی حوضه آب‌خیز دامغان و کویر حاج علی‌قلی گسترده شده است. آبخیز دامغان منطقه‌ای مستطیلی شکل می‌باشد که با مساحت ۱۸۷۰۰ کیلومتر مربع در دامنه‌های جنوب و جنوب‌شرقی کوهستان‌های البرز قرار گرفته است. این ناحیه به صورت چاله‌ای مستقل بین رشته‌کوه البرز و دشت کویر گسترده شده و همانند محورهای اصلی کوهستان البرز در این منطقه، جهت شمال‌شرقی - جنوب‌غربی دارد. رشته‌کوه البرز در قسمت شمال با حداکثر ارتفاع ۳۹۰۸ متر بر این دشت مسلط است (کلینسلی، ۱۳۸۱: ۷۲). کوهستان‌های جنوبی نیز با حجم و ارتفاع کم‌تر (۲۳۱۹ متر) نسبت به بخش شمالی، چاله‌ی دامغان را از حوضه‌ی آبگیر کویر بزرگ جدا می‌کند، در حالی که پست‌ترین نقطه با ۱۰۶۰ متر ارتفاع مربوط به کویر حاج علی‌قلی می‌باشد. این کویر یک چاله رسوبی - ساختمانی بوده (احمدی، ۱۳۸۷: ۳۲۸) که در اطراف آن به دلیل کمبود پوشش گیاهی و ریزش‌های جوئی اندک، سیستم‌های شکل‌زای بادی بر دیگر فرایندها حاکمیت دارند و می‌توان انواع رخساره‌های فرسایش بادی را در این منطقه مشاهده نمود. از مهم‌ترین عوارض ژئومورفیک این منطقه می‌توان به نیکاه‌ها، انواع برخان‌ها (طولی، عرضی، متقارن، نامتقارن)، سیف و تپه‌های ماسه‌ای طولی و عرضی اشاره نمود. محدوده‌ی مطالعاتی با وسعت حدود ۲۵۲۶۰ هکتار در حاشیه جنوب و جنوب‌شرقی کویر حاج علی‌قلی با امتداد شمال‌غربی - جنوب‌شرقی کشیده شده و در موقعیت جغرافیایی 54° و $45'$ تا 55° و $10'$ طول شرقی و 35° و $40'$ تا $50'$ عرض شمالی قرار دارد (شکل ۱).



شکل (۱): موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی

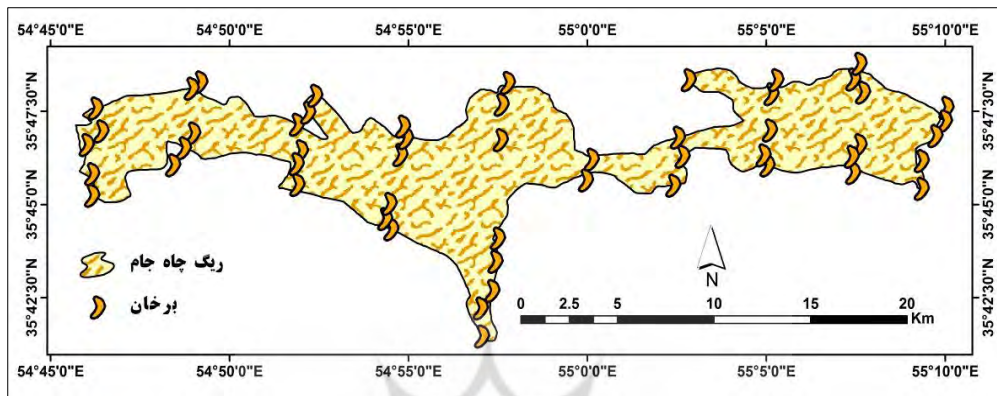
۴- مواد و روش‌ها

نخستین گام در انجام این پژوهش؛ بررسی، تعیین حدود و شناسایی ویژگی‌های محیطی و ژئومورفیک محدوده مطالعاتی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای گوگل ارث، نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و بازدیدهای میدانی است. گام بعدی مراجعات میدانی به منطقه، تعیین موقعیت برخان‌ها، نمونه‌برداری و اندازه‌گیری مولفه‌های مورفومتری آن‌ها از طریق روش طولی می‌باشد. روش و واحدهای نمونه‌برداری رایج در مطالعات میدانی به سه دسته تقسیم می‌شود (Bonham, 1989: 140): الف) روش نقطه‌ای؛ واحد نقطه (شکل ۲؛ الف)؛ روش تک بعدی؛ واحد طول (ترانسکت) (شکل ۲؛ ب)؛ روش دو بعدی؛ واحد پلات (کوادران) (شکل ۲؛ ج)



شکل (۲): انواع روش‌های نمونه‌برداری میدانی

روش نمونه‌برداری در این پژوهش، روش تک بعدی و واحد نمونه‌برداری طولی است، زیرا امکان نمونه‌برداری تصافی برخان‌ها را در کل محدوده‌ی مطالعاتی فراهم می‌سازد، بنابراین برای پوشش کامل منطقه‌ی مطالعاتی ترانسکت‌هایی با استفاده از دستگاه GPS در نظر گرفته شد و طبق شکل (۲؛ ب) تنها برخان‌هایی که با ترانسکت‌های مزبور برخورد کردند، مورد اندازه‌گیری میدانی قرار گرفتند. حجم نمونه‌ی مطالعاتی به موقعیت برخان‌ها نسبت به محل ترانسکت‌های مستقر شده بستگی دارد، که در مجموع ۵۲ برخان مورد اندازه‌گیری و ارزیابی قرار گرفت (شکل ۳).

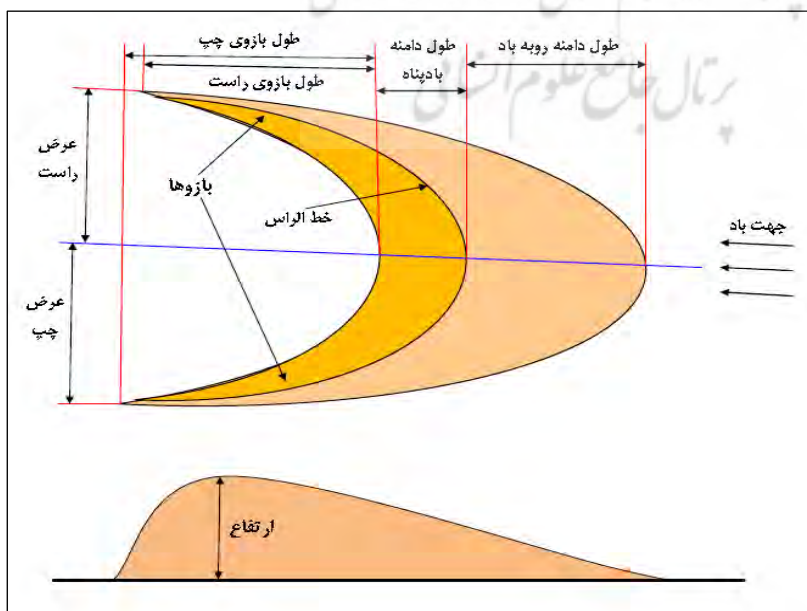


شکل (۳): موقعیت برخان‌های مطالعاتی

مهم‌ترین مولفه‌های مورفومتری برخان که این پژوهش تأکید بیشتری روی آن‌ها دارد، عبارتند از: حجم (V)، طول (L)، ارتفاع (H)، عرض (W) و مساحت (A). نحوه اندازه‌گیری و محاسبه پارامترهای مزبور به صورت اشکال (۴) و (۵) و روابط (۱) تا (۳) می‌باشد:

$$L = L_O + L_S + (L_a + L_b)/2 \quad \text{رابطه (۱) محاسبه طول کامل:}$$

$$W = W_a + W_b \quad \text{رابطه (۲) محاسبه عرض کامل:}$$

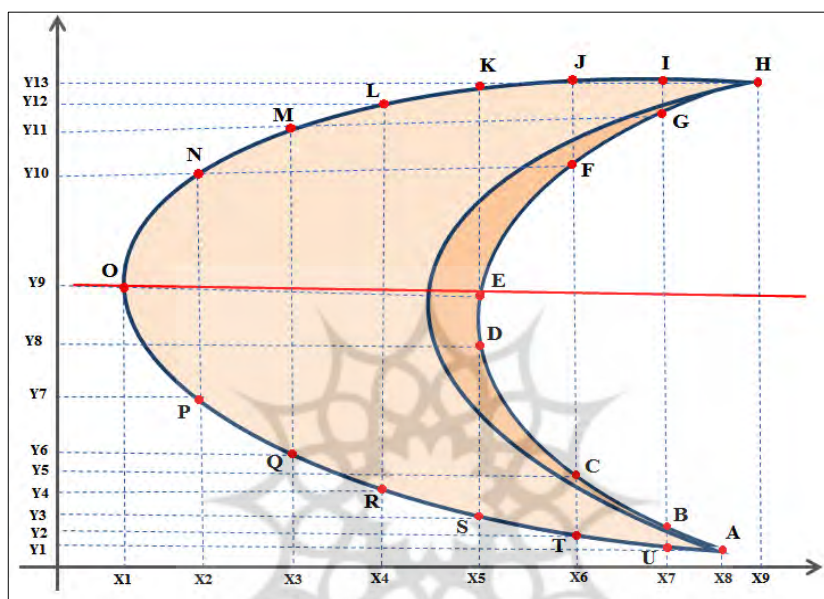


شکل (۴): مهم‌ترین مولفه‌های مورفومتری برخان و مدل اندازه‌گیری آن‌ها: ارتفاع (H)؛ عرض پهلوئی راست (W_a)؛ عرض پهلوئی چپ (W_b)؛ طول بازوی راست (L_a)؛ طول بازوی چپ (L_b)؛ طول دامنه ی روبه‌باد (L_O)؛ طول دامنه‌ی بادپناه (L_S).

مساحت برخان بدین گونه محاسبه گردید که نخست بر روی زمین یک دستگاه مختصات برای هر برخان در نظر گرفته شد. سپس بر روی محیط آن تعداد ۲۱ نقطه تعیین مختصات گردید. نقاط برداشت شده با مقیاس ۱:۴۰۰ بر روی کاغذ میلی متری ترسیم (شکل ۵) و نهایتاً مساحت به کمک پلاتی متر اندازه گیری شد. با در نظر گرفتن حجم برخان به صورت نصف حجم هرم (Hesse, 2008: 3)، پس از محاسبه سطح برخان، حجم آن با استفاده از رابطه (۳) محاسبه گردید که در این رابطه S: مساحت برخان و H: ارتفاع برخان است.

$$V = 0.1666S \times H$$

رابطه (۳) محاسبه حجم:



شکل (۵): مختصات نقاط برداشت شده جهت محاسبه مساحت برخان: $A(x_8, y_1), B(x_7, y_2), C(x_6, y_5), \dots$

در نهایت برای ۵۲ برخان مطالعاتی ابعاد مساحت، طول، عرض، ارتفاع و حجم رسوبات بادی با استفاده از موارد فوق تعیین گردید و ماتریس داده‌ها جهت مدل سازی تهیه شد. به طور کلی برخان‌های مطالعاتی دارای مساحتی بین ۸۱/۲ تا $2/99E4$ مترمربع، طولی بین ۱۹/۵ تا ۳۰۷/۸۵ متر، عرضی بین ۶/۳ تا ۱۶۵/۶ متر، ارتفاعی بین ۱/۲ تا ۱۷/۹ متر و حجمی بین ۷/۹۴ تا $6/44E4$ مترمکعب هستند (جدول ۱).

جدول (۱): مشخصات آمار توصیفی برخان‌های مطالعاتی ($N = 52$)

چولگی	انحراف معیار	میانگین	حداکثر	حداقل	دامنه	مؤلفه*
۲/۱۲۱	۵۹۰۷/۲۱۵	$5/0.813E3$	۳۰۸۲۴/۵۱	۸۱/۲۰	$2/99E4$	مساحت
۱/۱۳۴	۶۵/۱۴۱	۹۴/۶۷۰	۳۰۷/۸۵	۱۹/۵۰	۲۸۸/۸۰	طول
۰/۹۶۶	۳۷/۹۳۰	۶۰/۱۰۷	۱۶۵/۶۰	۶/۳۰	۱۵۹/۳۰	عرض
۱/۲۴۴	۳/۷۶۸	۵/۸۰۲	۱۷/۹۰	۱/۲۰	۱۶/۷۰	ارتفاع
۲/۵۳۹	۱۲۸۰۸/۶۰۳	$7/8524E3$	$64379/30$	۷/۹۴	$6/44E4$	حجم

* مساحت به مترمربع؛ طول، عرض و ارتفاع به متر، و حجم به مترمکعب گزارش شده است.

روش مدل‌سازی به کمک تحلیل‌های آماری در محیط نرم افزار SPSS و با استفاده از تکنیک آنالیز رگرسیون انجام شد. برای این منظور ابتدا روش‌های رگرسیون ساده خطی و غیرخطی (توانی، نمایی، لگاریتمی، مکعبی و ...) بین مولفه‌ها آزموده و از بین آن‌ها، روابطی با ارزش رجحانی بالاتر انتخاب گردید. سپس روش‌های رگرسیون غیرخطی چندگانه جهت کشف مدل‌های مناسب برآورد حجم به کار گرفته شد و با استفاده از پارامترهای سنجش مدل، مناسب‌ترین مدل‌ها شناسایی و در نهایت با مقایسه میزان اعتبار آن‌ها، صحت مدل‌های مناسب بر اساس ارزش رجحانی تعیین گردید. نهایتاً نتایج مدل‌سازی حجم برخان با سایر مولفه‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت و برای تک‌تک مولفه‌های مستقل، یک مدل توانی مناسب و برای متغیرهای مستقل به صورت دوتایی، یک مدل غیرخطی حاصل ضرب ارائه شد.

با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه و در سطح بین‌المللی، دستیابی به تحلیل مقایسه‌ای از انواع مدل‌های ساده و پیچیده در کنار یکدیگر اهمیت مدل‌سازی و ارائه مدل‌های گوناگون را که در این پژوهش به آن پرداخته شده است، روشن می‌سازد. علت استفاده از آنالیز رگرسیون ساده خطی و غیرخطی چندگانه و ارائه نتایج آن در این پژوهش، دستیابی به نتایج قابل قبول با درجه مطلوب اعتبار سنجی بوده است. هم‌چنین سادگی روابط آنالیز رگرسیون ساده به پیچیدگی روابط آنالیز رگرسیون چند متغیره، ترجیح داده شده است. لازم به ذکر است که در مدل‌های ساده علاوه بر کم‌تر بودن متغیرهای مدل، معادلات حاصله نیز از سادگی بیش‌تری برخوردارند. معیار ارزش رجحانی سنجش و انتخاب روابط بر اساس پارامترهای حداکثر ضریب تبیین^۱، ضریب همبستگی، ضریب تبیین تعدیل شده^۲، حداقل انحراف معیار خطای برآورد^۳ و سطح معنی‌داری در سطح احتمال خطای کم‌تر یا مساوی یک درصد ($\alpha \leq 0/01$) می‌باشد.

۵- یافته‌های تحقیق

به منظور تعیین نوع و شدت ارتباط بین حجم و مولفه‌های مورفومتری برخان، انواع روش‌های رگرسیون ساده و غیرخطی چندگانه آزموده و از بین روابطی با ارزش رجحانی بالاتر انتخاب گردید. به طوری که در بخش نخست بهترین روابط از توابع ساده توانی پیروی می‌کند، لذا در این قسمت فقط به ذکر روابط ساده توانی اکتفا شده است. نتایج حاصل از بررسی ارتباطات و مدل‌سازی آماری غیرخطی ساده بین حجم با ارتفاع، عرض، طول و مساحت برخان در جداول (۲) و (۳) ارائه شده است. خلاصه‌ی مدل‌های به دست آمده از تحلیل‌های آماری غیرخطی ساده بین مولفه‌های حجم با ارتفاع، طول، عرض و مساحت برخان‌های محدوده مطالعاتی به شرح جدول (۲) می‌باشد که در آن ضریب همبستگی، ضریب تبیین، ضریب تبیین تعدیل شده، انحراف معیار خطای برآورد و سطح معنی‌داری نیز گزارش شده است.

جدول (۲): نتایج حاصل از رابطه سنجی بین حجم و مولفه‌های مورفومتری برخان‌های مطالعاتی

مولفه	نوع رابطه	ضریب همبستگی	ضریب تبیین	ضریب تبیین تعدیل شده	انحراف معیار خطای برآورد	سطح معنی داری
عرض و حجم	توانی	۰/۹۶۲	۰/۹۲۴	۰/۹۲۳	۰/۵۳۸	۰/۰۰۰
طول و حجم	توانی	۰/۹۷۴	۰/۹۴۹	۰/۹۴۸	۰/۴۴۵	۰/۰۰۰
ارتفاع و حجم	توانی	۰/۹۸۳	۰/۹۶۶	۰/۹۶۵	۰/۳۶۳	۰/۰۰۰
مساحت و حجم	توانی	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳	۰/۹۹۲	۰/۱۶۹	۰/۰۰۰

^۱ - R. Square

^۳ - Adjusted R. Square.

^۴ - Std. Error of Estimate.

ارتباطات به دست آمده از روابط حجم با مولفه‌های مورفومتری برخان، حاکی از حداکثر ارتباط معنی‌دار توانی حجم با مساحت برخان با ضریب تبیین ۰/۹۹۳ و خطای برآورد ۰/۱۶۹ می‌باشد. این در حالی است که سایر روابط ارائه شده در جدول (۲) نیز دارای اعتبار می‌باشند و ضریب تبیین و خطای استاندارد قابل قبولی از نظر سطح معنی‌داری دارند. وجود ارتباطات بین حجم با طول و عرض و ارتفاع برخان نیز به شرح جدول (۲) می‌باشد.

جهت ارائه مدل‌های توانی که شکل کلی معادلات آن به صورت رابطه (۴) می‌باشد، دو پارامتر مقدار ثابت و توان معادله مدنظر است، بنابراین ضرایب و روابط کشف شده بین حجم با مولفه‌های طول، عرض، ارتفاع و مساحت برخان‌های مطالعاتی و آزمون سطح معنی‌داری ضرایب در جدول (۳) گزارش شده است.

$$Y = b_0 * X^{b_1} \quad \text{رابطه (۴)} \quad (b_0: \text{مقدار ثابت و } b_1: \text{توان})$$

جدول (۳): ضرایب روابط موجود بین حجم و مولفه‌های مورفومتری برخان‌های مطالعاتی

مولفه	ضرایب معادله	مقدار ضریب	انحراف معیار	مقدار t	سطح معنی‌داری
عرض و حجم	مقدار ثابت	۰/۰۴۲	۰/۰۱۹	۲/۲۸۰	۰/۰۲۷
	توان	۲/۷۴۸	۰/۱۱۱	۲۴/۷۴۳	۰/۰۰۰
طول و حجم	مقدار ثابت	۰/۰۱۵	۰/۰۰۶	۲/۵۵۰	۰/۰۱۴
	توان	۲/۷۲۰	۰/۰۰۹	۳۰/۳۵۹	۰/۰۰۰
ارتفاع و حجم	مقدار ثابت	۱۵/۱۷۷	۲/۰۰۹	۷/۲۶۳	۰/۰۰۰
	توان	۳/۰۶۷	۰/۰۸۲	۳۷/۲۵	۰/۰۰۰
مساحت و حجم	مقدار ثابت	۰/۰۲۵	۰/۰۰۳	۷/۱۶۴	۰/۰۰۰
	توان	۱/۴۴۹	۰/۰۱۸	۸۱/۶۲۶	۰/۰۰۰

نتایج حاصل از بررسی ارتباطات و مدل‌سازی‌های آماری غیرخطی چندگانه بین حجم با عرض، طول، ارتفاع و مساحت برخان‌های مطالعاتی به شرح جدول (۴) است که شکل کلی معادلات آن از رابطه (۵) تبعیت می‌کند.

$$Y = b_0 * X_1 * X_2 \quad \text{رابطه (۵)}$$

(b_0 : ضریب حاصل ضرب، X_1 و X_2 : متغیرهای مستقل و Y : متغیر وابسته)

جدول (۴): نتایج حاصل از مدل‌سازی غیرخطی چندگانه حجم برخان‌های مطالعاتی با روابط خاص

مولفه	معادله *	ضریب حاصل ضرب (b_0)	ضریب تبیین
حجم با طول و عرض	$V = b_0 * W * L$	۱/۲۹۹	۰/۸۷۶
	$V = b_0 * W^2 * L$	۰/۰۱	۰/۸۸۷
	$V = b_0 * W * L^2$	۰/۰۰۶	۰/۹۹۵
حجم با ارتفاع و عرض	$V = b_0 * W * H$	۲۱/۸۹۷	۰/۸۷۱
	$V = b_0 * W^2 * H$	۱/۷۹	۰/۹۱۲
	$V = b_0 * W * H^2$	۱/۷۷۲	۰/۹۹۴
حجم با مساحت و	$V = b_0 * W * A$	۰/۰۱۶	۰/۸۸۷

مولفه	معادله*	ضریب حاصل ضرب (bo)	ضریب تبیین
عرض	$V = b_o \times W^{\gamma} \times A$	0.1×10^{-9}	۰/۷۹۵
	$V = b_o \times W \times A^{\gamma}$	$7/55 \times 10^{-7}$	۰/۸۳۹
حجم با طول و مساحت	$V = b_o \times A \times L$	۰/۰۱	۰/۹۹۵
	$V = b_o \times A^{\gamma} \times L$	$3/99 \times 10^{-7}$	۰/۸۳۳
	$V = b_o \times A \times L^{\gamma}$	$3/66 \times 10^{-5}$	۰/۹۱۵
حجم با ارتفاع و مساحت	$V = b_o \times H \times A$	۰/۷۷	۰/۹۹۹
	$V = b_o \times H^{\gamma} \times A$	۰/۰۱۱	۰/۹۲۶
	$V = b_o \times H \times A^{\gamma}$	$6/9 \times 10^{-6}$	۰/۸۴۳
حجم با طول و ارتفاع	$V = b_o \times L \times H$	۱۲/۳۱۲	۰/۹۱۷
	$V = b_o \times L^{\gamma} \times H$	۰/۰۵۲	۰/۹۴۵
	$V = b_o \times L \times H^{\gamma}$	۰/۸۷۵	۰/۹۳۵

* W: عرض به متر، L: طول به متر، H: ارتفاع به متر، A: مساحت به مترمربع، V: حجم به مترمکعب.

ارتباطات به دست آمده از روابط غیرخطی چندگانه حجم با مولفه‌های مورفومتری برخان، حاکی از حداکثر ارتباط معنی‌دار حاصل ضرب حجم با پارامترهای ارتفاع و مساحت با حداکثر ضریب تبیین ۰/۹۹۹ می‌باشد. این در حالی است که سایر ضرایب تبیین روابط غیرخطی چندگانه مولفه حجم برخان که به شرح جدول (۴) می‌باشد، سطح قابل قبولی را از لحاظ معنی‌داری روابط نشان می‌دهد.

۶- بحث و نتیجه‌گیری

اساس تحلیل‌های ژئومورفولوژی کارکردی بر مبنای دیدگاه سیستمی صورت می‌گیرد. رویکرد سیستمی ابزاری سودمند و کارآمد جهت مدیریت، پژوهش و برنامه‌ریزی سیستم‌ها، خصوصاً سیستم‌های پیچیده طبیعی است (رامشت، ۱۳۸۵: ۸۰). تجزیه و تحلیل سیستمی به شناخت جنبه‌های مختلف سیستم، چگونگی کارکرد اجزای تشکیل دهنده آن، نحوه و میزان ارتباط بین آن‌ها به منظور دستیابی به مبنایی برای طراحی و اجرای یک سیستم بهینه است. این رویکرد شامل نظریه‌ها و تکنیک‌های مطالعه، توصیف و پیش‌بینی رفتار سیستم می‌باشد که از روش‌های پیشرفته آماری و ریاضی بهره می‌گیرد و پایه آن را یک استراتژی فراگیر حل مسئله تشکیل می‌دهد (محمد رضایی، ۱۳۸۲: ۱۶). سیستم مورد مطالعه در این پژوهش چشم‌انداز برخانی در جنوب کویر حاج علی‌قلی است. برخان‌ها از نوع سیستم‌های طبیعی و باز بوده که در سطوح مختلف قابل مدل‌سازی هستند. از آن جایی که رفتار ناهمواری‌ها در مقابل فرآیندهای مختلف تابعی از فرم آن‌ها می‌باشد، لذا در برخان نیز مانند سایر اشکال ناهمواری‌های بادی، پارامترهای شکل‌شناسی ناهمواری در تعیین رفتار و عملکرد آن تاثیر بالایی دارد (موسوی، ۱۳۸۸: ۵۷). در محدوده مطالعاتی، برخان‌های متعددی می‌توان مشاهده نمود که تقریباً اکثر آن‌ها شکل مشابهی دارند (شکل ۶).



شکل (۶): تصویری از تپه‌ی برخانی محدوده مطالعاتی

یکی از مهم‌ترین پارامترها در بررسی شکل ناهمواری‌ها، اندازه و فرم سه بُعدی آن‌ها است. با توجه به این که عامل حجم ناهمواری بهترین شاخص اندازه و فرم سه بُعدی برخان می‌باشد، لذا مدل‌سازی آن از جایگاه مهمی در تحلیل‌های آماری مورفولوژی برخان برخوردار است. با توجه به نتایج پژوهش حاضر، مدل‌های متعددی جهت این مهم طراحی و ارائه شده است که محاسبه نسبتاً دقیق و سریع حجم را با استفاده از مولفه‌های مورفومتری برخان به صورت تک متغیره و دو متغیره فراهم می‌سازد. نتایج مدل‌سازی غیرخطی ساده بین حجم با مولفه‌های ارتفاع، طول، عرض و مساحت برخان‌های مطالعاتی که از جداول (۲) و (۳) استخراج شده، حاکی از معادلات (۶) تا (۹) می‌باشد.

$$V = 0.042 W^{2/748} \quad \text{معادله (۶) رابطه توانی بین عرض و حجم برخان:}$$

$$V = 0.015 L^{2/720} \quad \text{معادله (۷) رابطه توانی بین طول و حجم برخان:}$$

$$V = 15/177 H^{3/067} \quad \text{معادله (۸) رابطه توانی بین ارتفاع و حجم برخان:}$$

$$V = 0.025 A^{1/449} \quad \text{معادله (۹) رابطه توانی بین مساحت و حجم برخان:}$$

از مقایسه‌ی نتایج استخراج شده از آنالیز رگرسیون غیرخطی چندگانه و روابط جدول (۴) بهترین روابط جهت مدل‌سازی حجم برخان به صورت معادلات (۱۰) تا (۱۵) می‌باشد که در آن ابتدا بین پارامترهای مشترک مناسب‌ترین مدل بر اساس حداکثر ضریب تبیین مشخص گردید، سپس از بین آن‌ها مناسب‌ترین روابط بر اساس ارزش رجحانی فاکتورهای سنجش دقت مدل، معرفی شده‌اند.

$$V = 0.006 \times W \times L^2 \quad \text{معادله (۱۰) برآورد حجم برخان بر اساس طول و عرض:}$$

$$V = 1/772 \times W \times H^2 \quad \text{معادله (۱۱) برآورد حجم برخان با استفاده از ارتفاع و عرض:}$$

$$V = 0.016 \times W \times A \quad \text{معادله (۱۲) برآورد حجم برخان از طریق مساحت و عرض:}$$

$V = 0/01 \times A \times L$	معادله (۱۳) برآورد حجم برخان با استفاده از مساحت و طول:
$V = 0/77 \times H \times A$	معادله (۱۴) برآورد حجم برخان از طریق مساحت و ارتفاع:
$V = 0/052 \times L2 \times H$	معادله (۱۵) برآورد حجم برخان بر اساس ارتفاع و طول:

با مقایسه نتایج جدول (۴) و روابط (۱۰) تا (۱۵) جهت محاسبه‌ی حجم برخان بر اساس روابط غیرخطی چندگانه معادلات (۱۰)، (۱۳) و (۱۴) به علت دارا بودن حداکثر ضریب تبیین و حداقل خطای برآورد نسبت به دیگر معادلات ارجحیت دارند و مناسب‌ترین مدل‌های برآورد حجم برخان با استفاده از روش‌های غیرخطی چندگانه محسوب می‌شوند. با استفاده از این مدل‌ها می‌توان از طریق پارامترهای طول، عرض، ارتفاع و مساحت به سادگی حجم برخان را برآورد نمود که نیازی به معادلات پیچیده ریاضی ندارد.

مقایسه نتایج تحقیقات مشابه موید دستیابی به معادلات گوناگون است، به‌طوری‌که Lima et al. (۲۰۰۲):
 (۴۸۹) ضمن بررسی میدان‌های ماسه‌ای منطقه لایونی در مراکش برای محاسبه حجم برخان معادله W^3 $V = 0/05$ را ارائه کرده‌اند (W : عرض برخان). در این رابطه برخان به صورت مکعب مربعی با اضلاع و ارتفاعی برابر عرض برخان فرض شده و حجم آن از طریق به توان سه رساندن عرض و حاصل ضرب جواب در ضریب ثابت $0/05$ محاسبه شده است. Hesse (۲۰۰۸: ۳) با مطالعه برخان‌های پامپادجاگویا در جنوب پرو برای محاسبه حجم آن رابطه $V = 0/1666 w^2 \times h$ را ارائه می‌دهد (h : ارتفاع و W : عرض برخان) که جهت ارائه آن نصف حجم هرم را مبنا قرار داده است، با این تفاوت که برای محاسبه مساحت برخان، آن را به صورت مربعی با اضلاعی برابر عرض فرض نموده و مساحت را از طریق به توان دو رساندن عرض محاسبه کرده است. با توجه به تحقیقات انجام شده در این زمینه، دستیابی به تحلیل مقایسه‌ای از انواع مدل‌های ساده و پیچیده در کنار یکدیگر اهمیت مدل‌سازی و ارائه مدل‌های گوناگون جهت محاسبه حجم برخان را که در این پژوهش به آن پرداخته شده است، روشن می‌سازد.

۷- فهرست منابع

- (۱) احمدی، حسن، ۱۳۸۷، ژئومورفولوژی کاربردی (بیابان - فرسایش بادی)، چاپ سوم، جلد دوم، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- (۲) رامشت، محمد حسین، ۱۳۸۵، نقشه‌های ژئومورفولوژی (نمادها و مجازها)، چاپ دوم، تهران: انتشارات سمت.
- (۳) کلینسلی، دانیل، ۱۳۸۱، کویرهای ایران (خصوصیات ژئومورفولوژیکی و پالئوکلیماتولوژی آن)، مترجم: عباس پاشایی، چاپ اول، تهران: انتشارات سازمان جغرافیایی نیروهای مسلح.
- (۴) محمدرضایی، شهریار، ۱۳۸۲، رویکرد سیستمی به تجزیه و تحلیل اکو سیستم‌ها، چاپ اول، تهران: سازمان حفاظت محیط زیست.
- (۵) محمودی، شبهنم، ۱۳۸۴، بررسی تغییرات طبیعی تپه‌های ماسه‌ای شرق جاسک (پیمایش تپه‌های ماسه‌ای به وسیله RS و GIS در بازه زمانی (۱۳۶۹ - ۱۳۸۳))، پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان.
- (۶) محمودی، فرج‌الله، ۱۳۸۳، ژئومورفولوژی دینامیک، چاپ ششم: تهران، انتشارات دانشگاه پیام‌نور.
- (۷) موسوی، سیدحجت، ۱۳۸۸، ارزیابی تأثیرات مورفومتری برخان‌ها بر پایداری آن‌ها (مطالعه موردی: ریگ چاه جام)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، رشته جغرافیای طبیعی، اصفهان: دانشگاه اصفهان.
- (۸) موسوی، سیدحجت؛ معیری، مسعود و عباسعلی ولی، ۱۳۸۹، تلفیق مدلسازی ریاضی و آماری برخان (مطالعه موردی: ریگ چاه جام)، مجله‌ی پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، شماره ۷۳، صص ۸۳-۹۶.
- (۹) موسوی، سیدحجت؛ ولی، عباسعلی و مسعود معیری، ۱۳۸۹، تأثیر مولفه‌های مورفومتری برخان بر میزان جابجایی آن (مطالعه موردی: ریگ چاه جام)، مجله‌ی جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، شماره ۳۸ (۲)، صص ۱۰۱-۱۱۸.
- (۱۰) نگارش، حسین و لیلا لطیفی، ۱۳۸۷، تحلیل ژئومورفولوژیکی روند پیشروی تپه‌های ماسه‌ای شرق دشت سیستان در خشکسالی‌های اخیر، مجله‌ی جغرافیا و توسعه، شماره ۱۲، صص ۴۳-۶۰.
- (11) Anthonson, K.L., Clemmensen, L.B., Jensen, J.H., 1996, *Evolution of a dune from crescentic to parabolic form in response to short-term climatic changes - Rabjerg- Mile, Skagen-Odde, Denmark*, *Journal of Geomorphology*, No. 17, Pp. 63-77.
- (12) Anton, D., Vincent, P., 1986, *Parabolic dunes of the Jafurah Desert, Eastern Province, Saudi Arabia*. *Journal of Arid Environments*, No. 11, Pp. 187-198.
- (13) Bagnold, R.A., 1941, *The Physics of Blown Sand and Desert Dunes*, Methuen, London. Pp. 90-189.
- (14) Barclay, W. S., 1917, *Sand dunes in the Peruvian Desert*. *Geogr. J.* 49, Pp. 53-56.
- (15) Bonham, C.D., 1989, *Measurement for Terrestrial Vegetation*, John wiley & Sons, Inc.
- (16) Daniell, J., Hughes, M., 2007, *The morphology of barchan-shaped sand banks from western Torres Strait, northern Australia*, *Journal of Sedimentary Geology*, No. 202, Pp. 638-652.
- (17) Douglass, A. E., 1909, *The crescentic dunes of Peru*. *Appalachia* 12, Pp. 34-45.
- (18) El belrhiti, H., Douady, S., 2010, *Equilibrium versus disequilibrium of barchan dunes*, *Journal of Geomorphology*, 03416, Pp. 1-11.
- (19) Finkel, H.J., 1959, *The barchans of southern Peru*, *Journal of Geology*, No. 67, Pp.614-647.
- (20) Forman, S.L., Pierson, J., 2003, *Formation of linear and parabolic dunes on the eastern Snake River Plain, Idaho in the nineteenth century*. *Geomorphology* 56: Pp. 189-200.

- (21) Gay, S.P., 1999. *Observations regarding the movement of barchan sand dunes in the Nazca to Tanaca area of southern Peru*. *Journal of Geomorphology*, No. 27, Pp. 279–293.
- (22) Havholm, K.G., Running, IV, G.L., 2005, *Stratigraphy, sediment logy and environmental significance of late mid-Holocene dunes, Lauder Sand Hills, glacial lake Hind Basin, southwestern Manitoba*. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 42, Pp. 847–863.
- (23) Herrmann, H.J., Sauerman, G., 2000, *The shape of dunes*, *Journal of Physical A*, No. 283, Pp. 24–30.
- (24) Hersen, P., 2004, *On the crescentic shape of barchan dunes*, *The European Physical Journal B*, No. 37, Pp. 507–514.
- (25) Hesp, P., Hastings, K., 1998, *Width, height and slope relationships and aerodynamic maintenance of barchans*, *Journal of Geomorphology*, No. 22, Pp. 193–204.
- (26) Hesse, R., 2008, *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*, *Journal of Geomorphology*, 02747, Pp. 1 – 6.
- (27) Howard, A.D., Morton, J.B., Gad-El-H& M., Pierce, D.B., 1978. *Sand transport model of barchan dune equilibrium*. *Journal of Sedimentology*, No. 25, Pp. 307-338.
- (28) Hugenholtz, C.H., et al., 2008, *Spatial and temporal patterns of aeolian sediment transport on an inland parabolic dune, Bigstick Sand Hills, Saskatchewan, Canada*, *Journal of Geomorphology*: 02707, Pp. 1- 13.
- (29) Lima, A.R., Sauermann, G., Herrmann, H.J., Kroy, K., 2002, *Modeling a dune field*. *Journal of Physical A*, 310, Pp. 487 – 500.
- (30) Mousavi, S.H., Dorgouie, M., Vali, A.A., Pourkhosravani, M., & Arab Ameri A.R., 2010, *Statistical Modeling of Morphological Parameters of Barchan Dunes (Case Study: Chah Jam Erg in South of Haj Ali GHoli Playa, in Central Part of Semnan Province, IRAN)*, *Journal of Geography and Geology*, Vol. 2, No. 1; Pp. 98-113.
- (31) - Sauermann, G., Andrade, J. S., Maia, L. P., Costa, U. M. S., Araujo, A. D., Herrmann, H.J., 2003. *Wind velocity and sand transport on a barchan dune*. *Journal of Geomorphology*, No. 54, Pp. 245 – 255.
- (32) Sauermann, G., Rognon, P., Poliakov, A., Herrmann, H.J., 2000, *The shape of the barchan dunes of Southern Morocco*, *Journal of Geomorphology*, No. 36, Pp. 47–62.
- (33) Valle, H.F.del., Rostagon, F.R, C.M., Coronato, F.R., Bouza, P.J., Blanceo, P.D., 2008, *Sand dune activity in north-eastern Patagonia*, *Journal of arid Environment*, No. 72, Pp. 411-422.
- (34) Wang, T.Z., Chen Tao, S., Wen Xie, Y., Hui Dong, G., 2007, *Barchans of Minqin: Morphometry*, *Journal of Geomorphology*, No. 89, Pp. 405-411.
- (35) Wippermann, F.K., Gross, G., 1986. *The wind-induced shaping and migration of an isolated dune: A numerical experiment*, *Journal of Boundary-Layer Meteorol*, No. 36, Pp. 319–334.