

## سه‌بندی منابع رسوبات تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از دو مدل ترکیبی مورد استفاده در روش انگشت-نگاری رسوب (مطالعه موردی: منطقه‌ی جازموریان، جنوب استان کرمان)

مجتبی دولت‌کردستانی - دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی، گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس.  
حمید غلامی\* - عضو هیات علمی گروه مهندسی منابع طبیعی، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس.  
سیدجواد احمدی - استاد پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.  
Desmond Walling - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه اکستر، اکستر، انگلستان.  
ابوالحسن فتح‌آبادی - عضو هیات علمی گروه مرتع و آبخیزداری، دانشکده‌ی کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه گنبد کاووس، گنبد، ایران.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۰      تأیید نهایی: ۱۳۹۶/۰۹/۱۵

### چکیده

روش انگشت‌نگاری رسوب همراه با مدل‌های ترکیبی یک رویکرد رایج در کمی نمودن سهم منابع رسوبات به‌ویژه رسوبات آبی می‌باشد ولی در زمینه رسوبات بادی تحقیقات اندکی انجام شده است. در این تحقیق، دو مدل ترکیبی کالینز و هوگس مورد استفاده در انگشت‌نگاری رسوب به منظور کمی نمودن سهم منابع رسوبات تپه‌های ماسه‌ای در منطقه جازموریان، جنوب کرمان بکار برده شد. بدین منظور پس از تعیین جهات باد و تهیه نقشه زمین‌شناسی، اقدام به نمونه‌برداری از منابع بالقوه تپه‌های ماسه‌ای شامل پهنه‌های ماسه‌ای (Qs)، رسوبات آبرفتی ریزدانه و بستر خشک‌روها (Qal)، رسوبات مخروط افکنه‌ها و پادگانه‌ها (Qt) و ترکیب رس و نمک (Qc)؛ و از مناطق رسوب یا تپه‌های ماسه‌ای (Qsd) گردید. به طوری که ۵۸ نمونه سطحی از منابع بالقوه تپه‌های ماسه‌ای شامل ۷ نمونه از Qs، ۲۵ نمونه از Qal، ۵ نمونه از Qt و ۲۱ نمونه از Qc؛ و ۱۴ نمونه از مناطق رسوب (Qsd) برداشت گردید و پس از آماده‌سازی نمونه‌ها، غلظت ده عنصر (Li, Ni, Cu, Co, Cr, Ga, Mn, P, Ba, Sr) اندازه‌گیری شد. به منظور تفکیک منابع تپه‌های ماسه‌ای، از یک فرآیند آماری دو مرحله‌ای شامل تست‌های کروسکال والیس و آنالیز تابع تشخیص گام به گام استفاده گردید که چهار ردیاب شامل Cr, Li, Ni و Co به عنوان ردیاب‌های بهینه انتخاب شدند و به عنوان پارامترهای ورودی به مدل‌های ترکیبی مورد استفاده قرار گرفتند. سهم‌های ارائه شده برای منابع تپه‌های ماسه‌ای توسط هر دو مدل مشابه هم بدست آمد و منابع Qs و Qal به عنوان منابع غالب برای ۱۴ نمونه تپه ماسه‌ای شناخته شدند. همچنین بر طبق نتایج، مقادیر GOF محاسبه شده برای مدل کالینز (با بالاترین مقدار GOF برابر ۹۹/۹۵ درصد) بالاتر از مدل هوگس (با بالاترین GOF برابر ۹۹/۹۶ درصد) محاسبه شد که نشان‌دهنده کارایی بالای این مدل در منشایابی رسوبات تپه ماسه‌ای می‌باشد. به طور کلی، استفاده از روش انگشت‌نگاری رسوب با مدل ترکیبی کالینز برای کمی نمودن سهم منابع تپه‌های ماسه‌ای فعال در سایر مناطق پیشنهاد می‌گردد.

واژگان کلیدی: مدل‌های ترکیبی، انگشت‌نگاری رسوب، ردیاب بهینه، جازموریان.

## مقدمه

برداشت، انتقال و ته‌نشینی رسوبات بوسيله باد، فرآیندهای بادی، همه اجزاء سیستم زمین تحت تاثیر قرار می‌دهد و پیوندهای بیژئوشیمیایی بین اتمسفر، هیدروسفر، بیوسفر و پدوسفر ایجاد می‌کند (فیلد<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۰). باد، فاکتور فرساینده اصلی در سرزمین‌های خشک جهان محسوب می‌شود که حدود ۴۰ درصد از سطح خشکی‌های جهان را پوشش می‌دهد. در مقیاس جهانی، حدود ۵۴۹ میلیون هکتار از اراضی کره زمین تحت تاثیر فرسایش بادی می‌باشند (لال<sup>۲</sup>، ۲۰۰۱) که دارای اثرات درون منطقه‌ای<sup>۳</sup> و برون منطقه‌ای<sup>۴</sup> متعددی می‌باشد. پس به منظور کاهش این اثرات فرسایش بادی، نیازمند شناسایی مناطق منبع و برآورد سهم آنها در تولید رسوب می‌باشد.

در سطح کشور حدود ۱۳ میلیون هکتار ماسه‌زار در مناطق مسکونی، روستاها و حاشیه شهرها و یا اراضی کشاورزی وجود دارد که بیش از ۵ میلیون هکتار از آن تپه‌های ماسه‌ای فعال و نیمه فعال تشکیل می‌دهند که هر ساله به دلیل نامشخص بودن منشأ برداشت فرسایش بادی، به وسعت آن اضافه می‌گردد (احمدی، ۱۳۸۷). یک روش رایج در کمی نمودن سهم منابع رسوبات آبی و تشخیص منابع آنها استفاده از رویکرد انگشت‌نگاری همراه با مدل‌های ترکیبی می‌باشد. رویکرد انگشت‌نگاری رسوب برای اولین بار در سال ۱۹۹۷ توسط کالینز<sup>۵</sup> و همکاران به منظور تعیین سهم منابع رسوب در بریتانیا مورد استفاده قرار گرفت. در طی دو دهه‌ی گذشته، محققان زیادی مانند راسل<sup>۶</sup> و همکاران، (۲۰۰۱)؛ هویسمان<sup>۷</sup> و همکاران، (۲۰۱۳)؛ بروسینسکی<sup>۸</sup> و همکاران، (۲۰۱۴)؛ کالینز و همکاران، (۲۰۱۰)؛ کالینز و والینگ<sup>۹</sup>، (۲۰۰۷)؛ والینگ و همکاران، (۱۹۹۹)؛ کالینز و همکاران، (۱۹۹۸)؛ دیوریکس<sup>۱۰</sup> و همکاران، (۲۰۱۰)؛ وولی<sup>۱۱</sup> و همکاران، (۲۰۱۳)؛ چن<sup>۱۲</sup> و همکاران، (۲۰۱۶)؛ پالازون<sup>۱۳</sup> و همکاران، (۲۰۱۶)؛ استون<sup>۱۴</sup> و همکاران، (۲۰۱۴)؛ حدادچی<sup>۱۵</sup> و همکاران، (۲۰۱۳)؛ حدادچی و همکاران، (۲۰۱۴)؛ نصرتی<sup>۱۶</sup> و همکاران، (۲۰۱۱) و کالینز و همکاران، (۲۰۱۳) به منظور تعیین سهم منابع رسوبات آبی در یک حوضه آبخیز از روش انگشت‌نگاری استفاده نمودند. انگشت‌نگاری رسوب شامل دو فرض اصلی می‌باشد: الف) منابع بالقوه رسوب می‌توانند بر پایه‌ی خصوصیات فیزیکی، ژئوشیمیایی و بیژئیک آنها یا ردیاب‌ها تفکیک گردند، ب) مقایسه نمونه‌های رسوب و منبع با استفاده از خصوصیات آنها یا ردیاب‌ها اجازه‌ی تعیین اهمیت منابع رسوب می‌دهد (والینگ، ۲۰۰۵). در روش انگشت‌نگاری از خصوصیات مختلفی مانند عناصر ژئوشیمیایی، ایزوتوپ‌ها، عناصر آلی، رنگ، کانی‌شناسی می‌توان استفاده نمود (کالینز و همکاران، ۱۹۹۷). تاکنون هفت مدل ترکیبی در روش انگشت‌نگاری رسوبات آبی مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که عبارتند از مدل ترکیبی کالینز و همکاران، (۱۹۹۷)؛ اسلاتری و همکاران، (۲۰۰۰)؛ موتا و همکاران، (۲۰۰۳)؛ هوگس و

- 1 . Field
- 2 . Lal
- 3 . On-site effects
- 4 . Off-site effects
- 5 . Collins
- 6 . Russell
- 7 . Huisman
- 8 . Brosinsky
- 9 . Walling
- 10 . Devereux
- 11 . Voli
- 12 . Chen
- 13 . Palazon
- 14 . Stone
- ۱۵ . Haddadchi
- ۱۶ . Nosrati

همکاران، (۲۰۰۹)؛ کالینز اصلاح شده، (۲۰۱۰)؛ مدل لندور و اصلاح شده آن که توسط دیوریکس و همکاران، (۲۰۱۰) و جلیس<sup>۱</sup> و همکاران، (۲۰۱۰) معرفی شده‌اند.

اگر چه مطالعات زیادی در ارتباط با ماسه‌های بادی دوره کواترنر وجود دارد که بیشتر آنها بر روی پیدایش<sup>۲</sup> اشکال تپه‌ها، ساختمان‌های رسوبی، کروئولوژی نهشته‌های تپه‌ها به عنوان یک شاخص اقلیم‌های گذشته<sup>۳</sup> کواترنر تمرکز نموده‌اند (موس<sup>۴</sup>، ۲۰۱۷). جالب اینجاست که مطالعات کمتری به منظور شناخت منشأ رسوب بادی انجام شده است و بیشتر مطالعات فرض نموده‌اند که یک سنگ یا رسوب در اطراف به عنوان منبع اولیه برای رسوب بادی عمل می‌کند. چندین مطالعه استثنایی در این خصوص شامل مطالعات منابع تپه‌های ماسه‌ای کواترنر در شمال غربی مکزیک و جنوب غربی آمریکا (موس و همکاران، ۲۰۰۳؛ شیت و همکاران، ۲۰۱۱)، در جنوب غربی دریای ماسه‌ای نامیب آفریقا (گارزانتی<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۱۲) می‌باشد. غیرمعمول بودن مطالعات منشأ تپه‌ها در ژئومورفولوژی بادی<sup>۶</sup> مربوط به زمان بر بودن تکنیک‌های مورد نیاز و احتمال بروز خطا از سوی متصدی (در خصوص فلزات سنگین)، هزینه بر بودن (بعضی از تکنیک‌های ژئوشیمیایی)، یا نیاز به دستگاه‌های پیچیده (بیشتر تکنیک‌های ایزوتوپی) می‌باشد (موس، ۲۰۱۷). خوشبختانه تعدادی مطالعه به منظور کمی نمودن سهم منابع رسوبات بادی از روش انگشت‌نگاری رسوب همراه با مدل‌های ترکیبی، مورد استفاده قرار دادند که می‌توان به غلامی و همکاران، (۱۳۹۳)؛ غلامی و همکاران، (۱۳۹۴)؛ غلامی و همکاران، (۲۰۱۷ a,b) و لیو<sup>۷</sup> و همکاران، (۲۰۱۶) غلامی و همکاران، (۱۳۹۶)؛ دولت کردستانی و همکاران، (۱۳۹۷) اشاره نمود. به عنوان مثال، غلامی و همکاران، (۲۰۱۷a) به منظور تعیین سهم منابع رسوبات بادی در دشت یزد- اردکان از مدل کالینز استفاده نمودند و استفاده از آن در مناطق دیگر که وجود تپه‌های ماسه‌ای فعال مشکلاتی برای مناطق هم‌جوار ایجاد می‌کنند توصیه نمودند.

وجود تپه‌های ماسه‌ای فعال در منطقه‌ی جازموریان، جنوب استان کرمان و هجوم به اراضی کشاورزی مشکلات متعددی ایجاد کرده است. بنابراین کنترل و تثبیت آنها مستلزم شناسایی دقیق و اولویت‌بندی منابع از نظر تامین سهم رسوب برای تپه‌های ماسه‌ای در منطقه می‌باشد. هدف از این تحقیق، استفاده از دو مدل ترکیبی کالینز و هوگس به منظور کمی نمودن سهم منابع تپه‌های ماسه‌ای در منطقه جازموریان و ارزیابی نتایج حاصل از این مدل‌ها با استفاده از نیکویی برازش (GOF<sup>۸</sup>) می‌باشد.

## مواد و روش‌ها

### منطقه مورد مطالعه

جازموریان فرورفتگی وسیعی در جنوب شرقی ایران، واقع در ارتفاع بین ۳۶۰-۵۰۰ متر از سطح دریا است. جازموریان در مختصات جغرافیایی ۵۸ درجه ۵۰ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۱۹ دقیقه طول شرقی و ۲۷ درجه و ۱۶ دقیقه تا ۲۷ درجه و ۲۲ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. که طول آن تقریباً ۲۸۰-۳۰۰ کیلومتر (از کهنوج تا ایرانشهر) و عرض آن ۸۰-۱۴۰ کیلومتر دارای شکل بیضوی است. رشته کوه‌های آتشفشانی در شمال شرق (جبال بارز)، جازموریان را از کویر لوت جدا می‌کند. میزان بارندگی سالانه در قسمت غربی حوضه حدود ۲۰۰ میلی‌متر و در سایر قسمت‌ها کمتر از ۱۰۰ میلی‌متر می‌باشد

۱ . Gellis

2 . Genesis

3 . Paleoclimate

4 . Muhs

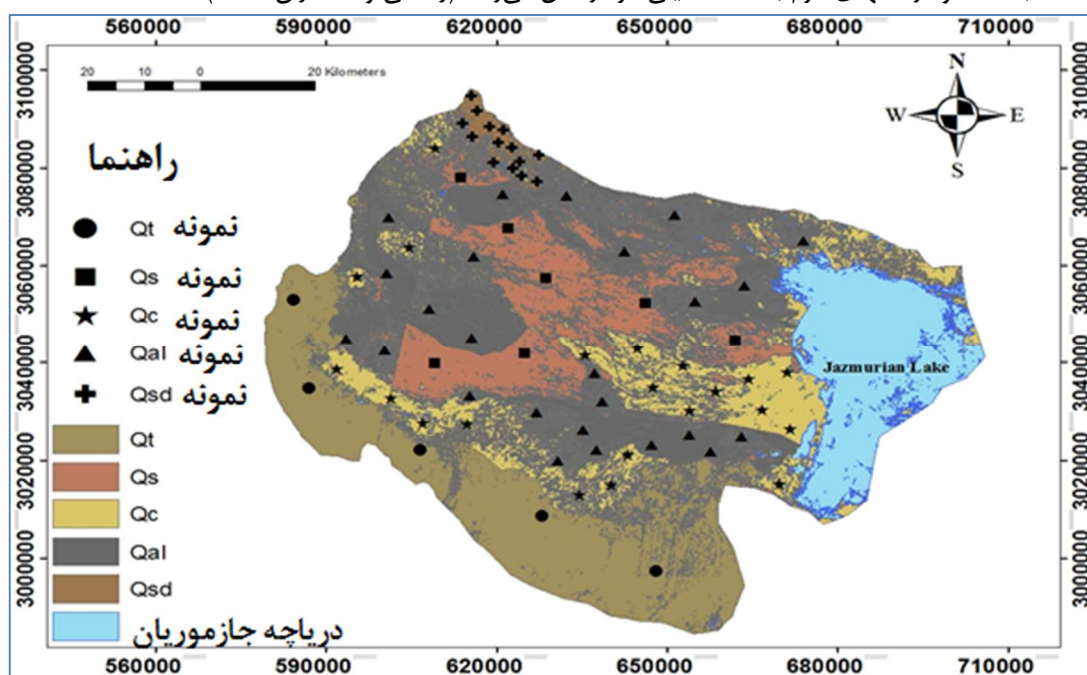
5 . Garzanti

6 . Aeolian geomorphology

7 . Liu

8 . Goodness of Fit

(راشکی<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۱۷). در شکل ۱ موقعیت منطقه جازموریان نشان داده شده است. مساحت منطقه مورد مطالعه ۸۰۵۰ کیلومتر مربع می‌باشد که ۱۴۴۳ کیلومتر مربع از پهنه‌های ماسه‌ای (Qs)، ۱۸۸۷ کیلومتر مربع از رسوبات آبرفتی ریزدانه و بستر خشک‌رودها (Qal)، ۱۷۵۴ کیلومتر مربع از رسوبات مخروط افکنه‌ها و پادگانه‌ها (Qt) و ۱۴۴۳ کیلومتر مربع از ترکیب رس و نمک (Qc) و ۱۹۹ کیلومتر مربع از مناطق رسوب یا تپه‌های ماسه‌ای (Qsd) تشکیل شده است و ۱۱۰۰ کیلومتر مربع دریاچه جازموریان شامل می‌شود. دو رودخانه شامل بامپور از شرق و حلیل از غرب به حوضه جازموریان جریان می‌یابند. بر طبق گلباد سالانه، بادهای غالب از جهات جنوب غربی، جنوبی و جنوب شرقی می‌وزند. تبخیر و تعرق در منطقه مورد مطالعه بالاست و در سالهای گرم به ۲۵۰۰ میلی‌متر در سال می‌رسد (راشکی و همکاران، ۲۰۱۷).



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و نقاط نمونه‌برداری در منطقه جازموریان.

### روش تحقیق

#### نمونه‌برداری و اندازه‌گیری‌های آزمایشگاهی

بعد از تهیه نقشه زمین‌شناسی از سازمان زمین‌شناسی کشور و مشخص نمودن جهت بادها با استفاده از داده‌های ایستگاه هواشناسی که‌نوج در منطقه مورد مطالعه، در پاییز سال ۱۳۹۵ اقدام به نمونه‌برداری در قالب سازندهای زمین‌شناسی انجام گردید. سازندهای Qt, Qs, Qc و به عنوان منابع رسوبات تپه‌های ماسه‌ای و سازند Qsd (تپه‌های ماسه‌ای) به عنوان منطقه رسوب بادی در نظر گرفته شد و سپس اقدام به نمونه‌برداری از منابع و رسوب گردید. تعداد ۷، ۲۵، ۵ و ۲۱ نمونه رسوب بسته مساحت سازندهای زمین‌شناسی به ترتیب از سازندهای Qt, Qal, Qs و Qc به عنوان منابع رسوبات تپه‌های ماسه‌ای و ۱۴ نمونه از سازند Qsd به عنوان رسوب بادی جمع‌آوری گردید. پس از انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، با استفاده از الک‌های خشک (۶۲/۵، ۱۲۵، ۲۵۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ میکرون) بخش‌های مختلف ذرات از هم تفکیک گردید و سپس بخش غالب مربوط به اندازه ذرات به عنوان هدف آزمایش به منظور اندازه‌گیری عناصر ژئوشیمیایی انتخاب گردید. پس از آماده‌سازی نمونه‌ها با محلول آکوا ریجیا<sup>۲</sup> (کالینز و همکاران، ۲۰۱۲) غلظت ۱۰ عنصر ژئوشیمیایی شامل

۱. Rashki

۲. Aqua Regia

مس (Cu)، لیتیوم (Li)، نیکل (Ni)، کبالت (Co)، کروم (Cr)، گالیوم (Ga)، منگنز (Mn)، فسفر (P)، باریوم (Ba) و استرانسیوم (Sr) به عنوان ردیاب‌های اولیه با استفاده از دستگاه جذب اتمی (AAS) اندازه‌گیری شدند.

### روش‌های آماری مورد استفاده به منظور تفکیک منابع رسوبات بادی در روش انگشت‌نگاری

یک روش آماری دو مرحله‌ای پیشنهاد شده بوسیله کالینز و همکاران (۱۹۹۷) به منظور تفکیک منابع رسوبات بادی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله اول با استفاده از تست H کروسکال والیس توانایی ردیاب‌ها در تفکیک منابع مورد استفاده قرار گرفت. در مرحله دوم با استفاده از آنالیز تابع تشخیص گام به گام<sup>۱</sup> (DFA) ردیاب‌های ترکیبی بهینه<sup>۲</sup> بر اساس کمینه‌سازی ویلکس لامبدا<sup>۳</sup> به عنوان پارامتر ورودی به مدل‌های ترکیبی کالینز و هوگس تعیین شدند. مطالعات متعددی با استفاده از این روش آماری دو مرحله‌ای منابع رسوب آبی و بادی تفکیک نمودند (غلامی و همکاران، (۱۳۹۳) و (۱۳۹۴)؛ والینگ و همکاران، (۱۹۹۹)؛ استون و همکاران، (۲۰۱۴)؛ ژو و همکاران<sup>۴</sup>، (۲۰۱۶)؛ چن و همکاران، (۲۰۱۶)؛ لیو و همکاران، (۲۰۱۶)؛ غلامی و همکاران، (a,b ۲۰۱۷) و نصرتی و همکاران، (۲۰۱۱)).

### کمی نمودن سهم منابع تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از مدل‌های ترکیبی

پس از انتخاب ردیاب‌های ترکیبی بهینه (با استفاده از فرآیند آماری دو مرحله‌ای)، برای تعیین سهم و اهمیت نسبی هر یک از منابع رسوب از مدل‌های ترکیبی استفاده می‌شود. به منظور کمی نمودن سهم منابع رسوبات از مدل‌های ترکیبی کالینز (معادله ۱) و هوگس (معادله ۲) استفاده شد. ساختار مدل‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$f(X_j) = \sum_{i=1}^n \left( (B_i - \sum_{j=1}^m A_j \cdot X_{j,i}) / B_i \right)^2 \quad \text{معادله (۱)}$$

$$f(X_j) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{\sum_{i=2}^{1000} \sum_{j=1}^m X_{j,i} A_j / 1000 - B_i}{B_i} \right]^2 \quad \text{معادله (۲)}$$

که در این معادله؛  $f(X_j)$  تابع هدف می‌باشد؛  $B_i$  غلظت ردیاب  $i$  ام در نمونه‌های رسوب؛  $A_j$  سهم فرضی منبع  $j$  ام؛ و  $X_{j,i}$  غلظت ردیاب  $i$  ام در منبع  $j$  ام،  $m$  تعداد منبع رسوب؛ و  $n$  تعداد ردیاب‌های بهینه می‌باشد.

در مدل‌های چند متغیره ترکیبی از برنامه نویسی خطی برای حل تعدادی از معادلات استفاده می‌شود و با حل این معادلات سهم هر یک از منابع مختلف رسوب بدست می‌آید. برای هر یک از ردیاب‌های بهینه، معادله بالا تکرار می‌شود و بنابراین به تعداد ردیاب‌ها، معادله وجود خواهد داشت و مدل چند متغیره ترکیبی با تعدادی معادله مشخص خواهد شد. با حل این معادلات می‌توان سهم هر یک از منابع مختلف رسوب را بدست آورد. جواب‌های بهینه برای سهم منابع رسوب با حداقل کردن معادلات (۱) و (۲) با استفاده از عملیات تکرار، سعی و خطا و با در نظر گرفتن دو شرط زیر محاسبه می‌شود:

(۱) مقادیر ضریب سهم هر یک از رخساره‌ها باید بین یک و صفر باشد؛

$$0 \leq A_j \leq 1$$

(۲) مجموع ضرایب سهم هر یک از واحدهای زمین‌شناسی باید برابر با یک باشد

$$\sum_{j=1}^n A_j = 1$$

۱. Stepwise Discriminant Function Analysis

۲. Optimum Composite Fingerprints

۳. Minimization of Wilks Lambda

۴. Zhou

بهینه‌سازی با استفاده از الحاقیه سولور<sup>۱</sup> در اکسل انجام شد. سولور یک ابزار بهینه‌سازی در اکسل می‌باشد که به منظور محاسبه‌ی سهم‌های بهینه از این الحاقیه استفاده گردید.

### ارزیابی نتایج مدل‌های ترکیبی با استفاده از GOF

به منظور ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های ترکیبی از GOF پیشنهادی توسط کالینز و همکاران، (۲۰۱۲) استفاده گردید که از رابطه زیر محاسبه می‌شود. هر چه مقدار GOF به ۱۰۰ نزدیک‌تر باشد نشان‌دهنده دقت بیشتر نتایج مدل می‌باشد.

$$GOF = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{B_i - \sum_{j=1}^m A_j X_{ji}}{B_i} \right) \quad \text{معادله (۳)}$$

محققان متعددی مانند استون و همکاران، (۲۰۱۴)؛ ژو و همکاران (۲۰۱۶)؛ ژانگ و لیو<sup>۲</sup> (۲۰۱۶) و چن و همکاران (۲۰۱۶) به منظور ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های ترکیبی از معیار GOF استفاده نمودند.

### بحث و نتایج

#### جداسازی منابع تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از روش‌های آماری

نتایج مربوط به تست H کروسکال والیس به منظور بررسی توانایی ردیاب‌ها در تفکیک چهار منبع تپه‌های ماسه‌ای شامل Qc و Qs, Qal, Qt نشان داد که از بین ده ردیاب (Li, Ni, Cu, Co, Cr, Ga, Mn, P, Ba, Sr) اندازه‌گیری شده، هر ده ردیاب تفاوت معنی‌داری در سطح ۹۹ درصد بین منابع نشان می‌دهند و توانایی اولیه در تفکیک منابع تپه‌های ماسه‌ای در منطقه مورد مطالعه دارا می‌باشند.

در مرحله دوم، تمام ده ردیاب عبوری از مرحله اول (تست کروسکال والیس) به مرحله دوم (تست DFA گام به گام) وارد گردید تا بتوان از بین این ده ردیاب، ردیاب‌های بهینه به عنوان ورودی‌های مدل ترکیبی انتخاب شوند. بر طبق نتایج جدول (۱)، از بین ده ردیاب، ۴ ردیاب شامل Cr, Li, Ni و Co به عنوان ردیاب بهینه انتخاب شدند و به طور کلی، هشتاد و یک درصد نمونه‌های منبع با چهار ردیاب بهینه به درستی طبقه‌بندی شده‌اند (شکل ۲). غلامی و همکاران، (۲۰۱۷a,b) از یک فرآیند آماری دو مرحله‌ای مشابه در این تحقیق به منظور انتخاب ردیاب‌های بهینه استفاده نمودند که در نهایت ۶ ردیاب به عنوان پارامترهای ورودی به مدل انتخاب نمودند و اظهار داشتند که نزدیک به ۸۲ درصد نمونه‌های برداشت شده به درستی طبقه‌بندی شده‌اند. غلامی و همکاران، (۱۳۹۳) به منظور تفکیک رخساره‌های مختلف ژئومورفولوژی به عنوان منابع تپه‌های ماسه‌ای در ارگ اشکذر با استفاده از فرآیند آماری دو مرحله‌ای سه ردیاب بهینه انتخاب نمودند. لاسبی و اولی<sup>۳</sup> (۲۰۱۵)، به منظور تفکیک منابع از روش آماری دو مرحله‌ای مشابه این تحقیق استفاده نمودند. کالینز و والینگ (۲۰۰۷) به منظور تفکیک منابع رسوبات آبی از دو تست آماری کروسکال والیس و آنالیز تحلیل تشخیص گام به گام استفاده نمودند و شش ردیاب به عنوان ترکیب بهینه معرفی نمودند.

جدول ۱: نتایج DFA گام به گام برای انتخاب ترکیب بهینه از ردیاب‌ها برای تشخیص منابع تپه‌های ماسه‌ای در منطقه جازموریان.

گام	ردیاب‌های بهینه	ویلکس لامبدا	Sig
۱	Cr	۱۷۸/۹	۰/۰۰۰
۲	Li	۵۵/۱	۰/۰۰۰
۳	Ni	۳۷/۸	۰/۰۰۰

۱. Solver

۲. Zhang and Liu

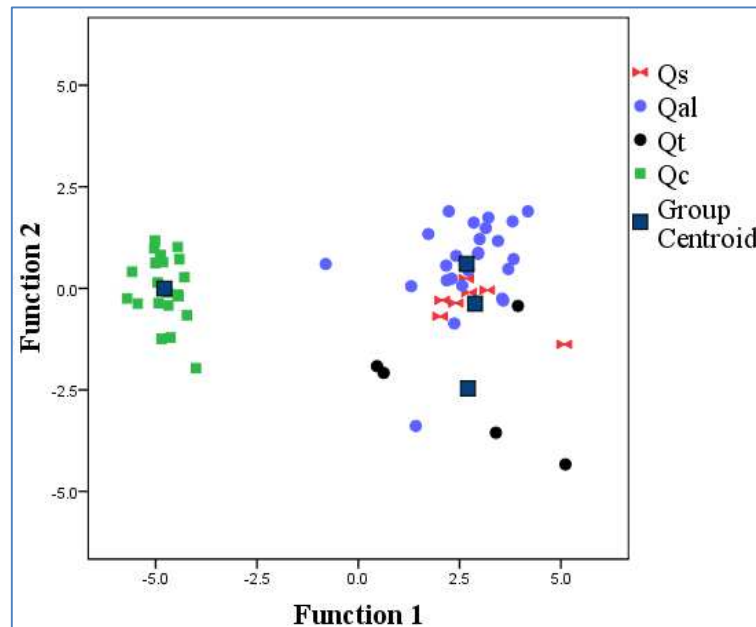
۳. Lacey and Olley

۴

Co

۳۰/۲

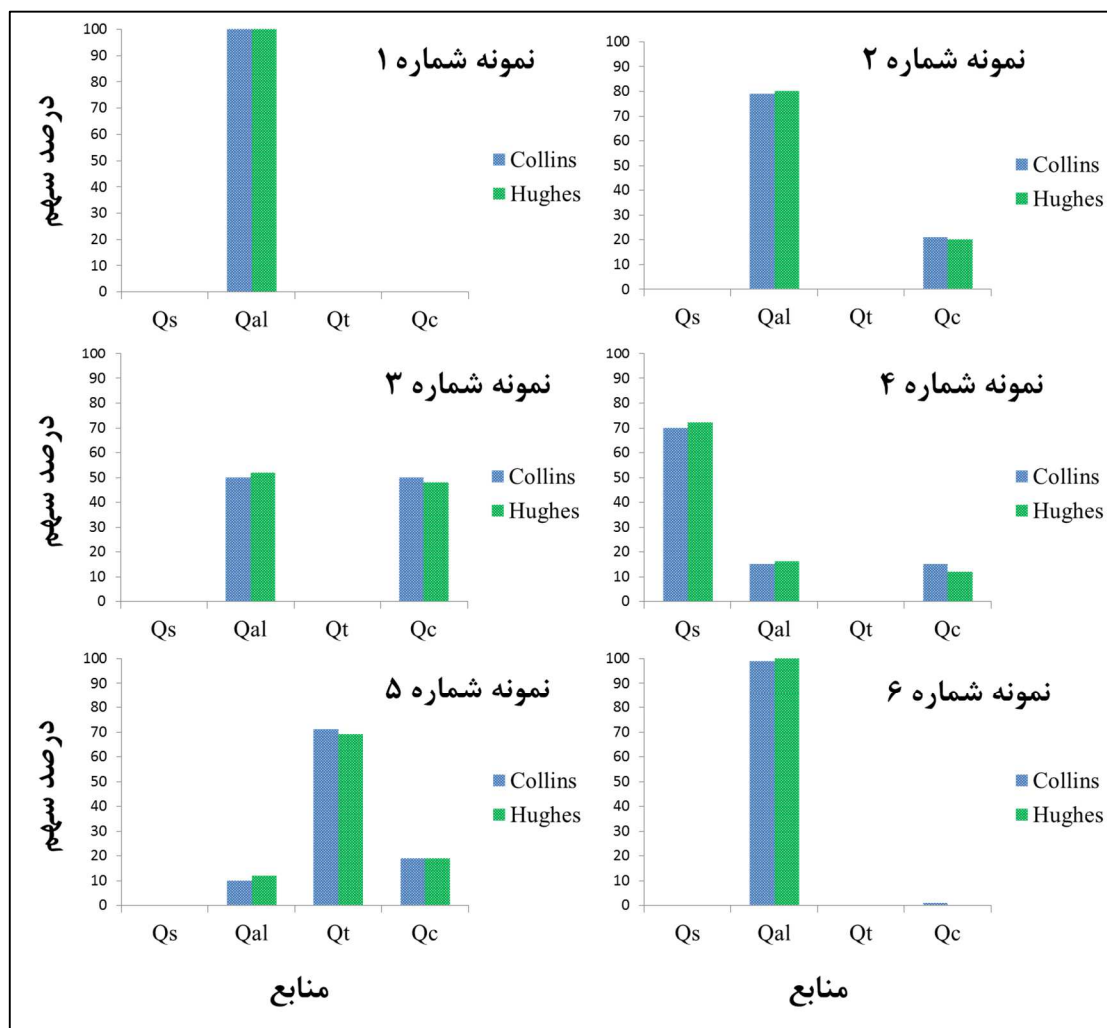
۰/۰۰۰



شکل ۲: جداسازی منابع تپه‌های ماسه‌ای توسط توابع اول و دوم.

### سهم‌بندی منابع تپه‌های ماسه‌ای توسط مدل کالینز و ارزیابی نتایج توسط GOF

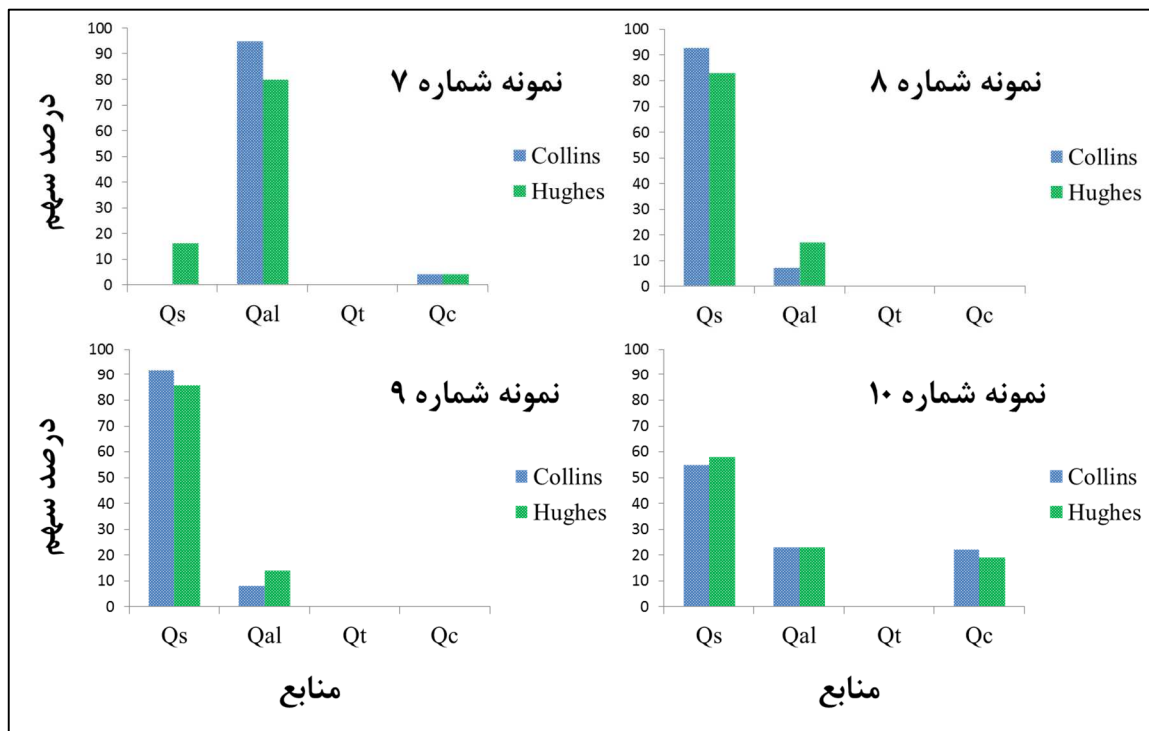
نتایج مربوط به سهم‌بندی منابع تپه‌های ماسه‌ای توسط مدل‌های ترکیبی و ارزیابی نتایج آنها در جداول ۲؛ و اشکال (۳) و (۴) نشان داده شده است. برای نمونه‌ی شماره یک، سهم منابع Qs، Qal، Qt و Qc به ترتیب ۰٪، ۱۰۰٪، ۰٪ و ۰٪ محاسبه گردید که نشان‌دهنده‌ی این است که تمام رسوب نمونه‌ی شماره یک از رسوبات آبرفتی ریزدانه تامین می‌شود (شکل ۳). GOF محاسبه شده برای نمونه‌ی رسوب شماره یک، ۸۸ درصد بدست آمد (شکل ۶). سهم منابع Qs، Qal، Qt و Qc به ترتیب ۰٪، ۷۹٪، ۰٪ و ۲۱٪ برای نمونه‌ی شماره دو محاسبه گردید و GOF آن ۸۱ درصد بدست آمد و سهم منابع Qs، Qal، Qt و Qc برای نمونه رسوب ۳، به ترتیب ۰٪، ۵۰٪، ۰٪ و ۵۰٪ بدست آمد و GOF برای این نمونه، ۸۰٪ محاسبه شد. برای نمونه‌های رسوب شماره ۱ و ۲، Qal به عنوان مهمترین منبع شناخته شد. برای نمونه رسوب ۴، سهم منابع Qs، Qal، Qt و Qc به ترتیب ۷۰٪، ۱۵٪، ۰٪ و ۱۵٪ با GOF، ۹۸ درصد محاسبه گردید. منبع Qt به عنوان مهمترین منبع تولیدکننده رسوب برای نمونه شماره ۵ با GOF برابر ۹۱ درصد شناخته شد. مهمترین منبع برای نمونه‌های رسوب ۶ و ۷، منبع Qal با سهم‌های ۱۰۰٪ و ۹۵٪ با GOF برابر ۹۲ و ۹۷ درصد محاسبه گردید.



شکل ۳: درصد سهم منابع مختلف برای نمونه‌های شماره ۶-۱ تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از مدل‌های کالینز و هوگس

بر طبق شکل‌های ۴ و ۵، برای نمونه‌های رسوب ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳، منبع QS به عنوان مهمترین تامین‌کننده رسوب با کمترین GOF برای نمونه ۱۳ (۹۲ درصد) و بیشترین GOF برابر ۹۸ برای نمونه ۸ (۹۸ درصد) شناخته شد. همچنین، مهمترین منبع برای نمونه ۱۴، Qal با ۵۸ درصد سهم و GOF برابر ۹۳ شناخته شد (شکل ۶) (جدول ۲). غلامی و همکاران، (۲۰۱۷a,b) اظهار داشتند که بیشترین سهم برای تپه‌های ماسه‌ای اشکذر از منبع Qt2 (دست‌های ریگی و رسوبات آبی ریزدانه) تامین می‌شود.





شکل ۴: درصد سهم منابع مختلف برای نمونه‌های شماره ۱۰-۷ تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از مدل‌های کالینز و هوگس

جدول ۲: نتایج سهم‌بندی منابع تپه‌های ماسه‌ای توسط مدل ترکیبی کالینز و مقادیر GOF

شماره نمونه رسوب	سهم منبع Qs	سهم منبع Qal	سهم منبع Qt	سهم منبع Qc	GOF (%)
۱	۰	۱۰۰	۰	۰	۸۸
۲	۰	۷۹	۰	۲۱	۸۱
۳	۰	۵۰	۰	۵۰	۸۰
۴	۷۰	۱۵	۰	۱۵	۹۸
۵	۰	۱۰	۷۱	۱۹	۹۱
۶	۰	۱۰۰	۰	۰	۹۲
۷	۰	۹۵	۰	۵	۹۷
۸	۹۳	۷	۰	۰	۹۰
۹	۹۲	۸	۰	۰	۹۷
۱۰	۵۵	۲۳	۰	۲۲	۹۸
۱۱	۷۷	۲۳	۰	۰	۹۴
۱۲	۷۰	۱۶	۰	۱۴	۹۵
۱۳	۵۷	۰	۰	۴۳	۹۲
۱۴	۰	۵۸	۰	۴۲	۹۳

### سهم‌بندی منابع تپه‌های ماسه‌ای توسط مدل هوگس و ارزیابی نتایج توسط GOF

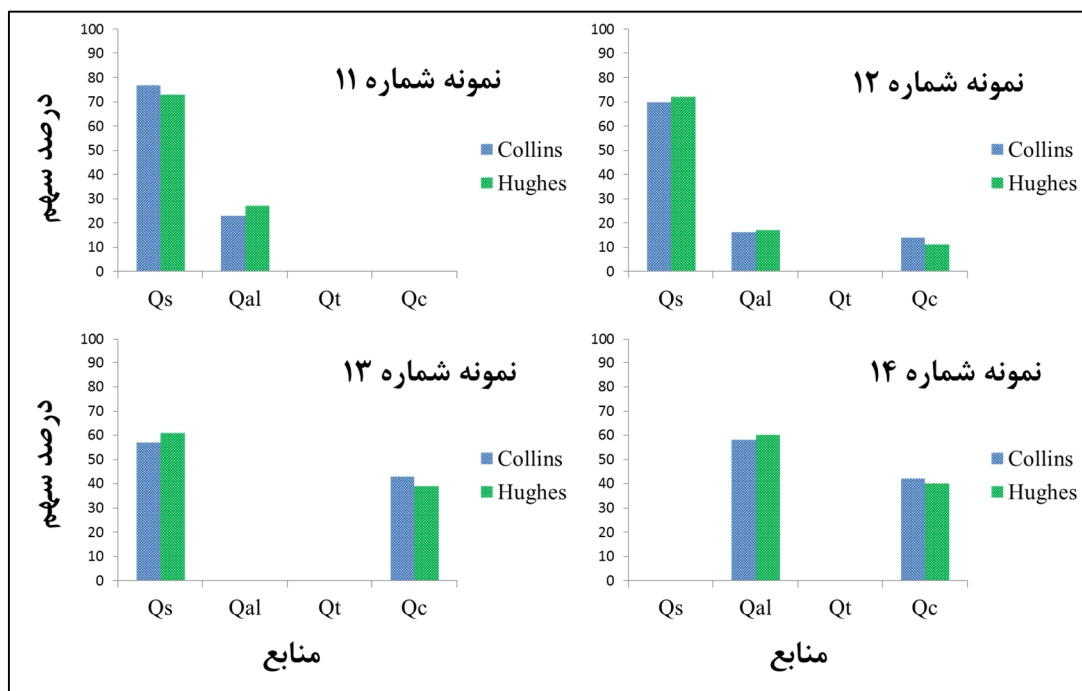
بر طبق جدول (۳) و شکل‌های ۳، ۴ و ۵، منبع Qal به عنوان مهمترین منبع برای نمونه‌های رسوب ۱، ۲، ۳، ۶ و ۱۴ با سهم ۱۰۰٪، ۸۰٪، ۵۲٪، ۹۲٪ و ۹۳ درصد شناخته شد. کمترین GOF برای نمونه‌ی شماره ۳ با مقدار ۸۰ درصد بدست آمد. Qt به عنوان مهمترین منبع فقط برای نمونه شماره ۵ با سهم ۶۹ درصد شناخته شد که GOF آن ۹۱ درصد محاسبه

شد. منبع Qs به عنوان منبع اصلی تامین‌کننده رسوب برای نمونه‌های تپه ماسه‌ای شماره ۴، ۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ شناخته شد. منبع Qc به عنوان منبع اصلی در هیچ یک از نمونه‌های تپه ماسه‌ای معرفی نشد.

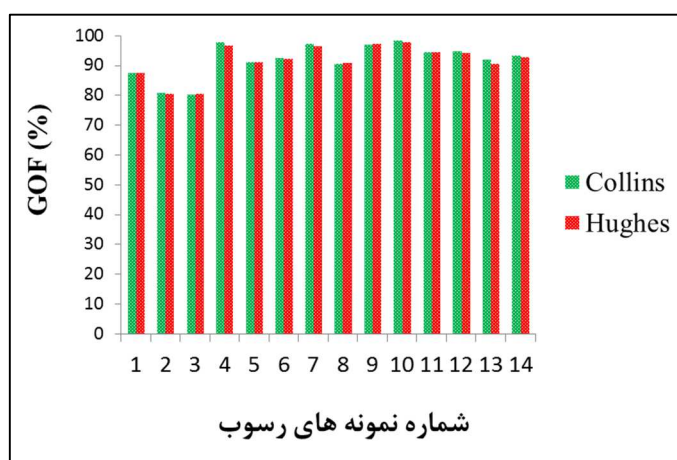
جدول ۳: نتایج سهم‌بندی منابع تپه‌های ماسه‌ای توسط مدل ترکیبی هوگس و مقادیر GOF

شماره نمونه رسوب	سهم منبع Qs	سهم منبع Qal	سهم منبع Qt	سهم منبع Qc	GOF (%)
۱	۰	۱۰۰	۰	۰	۸۸
۲	۰	۸۰	۰	۲۰	۸۱
۳	۰	۵۲	۰	۴۸	۸۰
۴	۷۲	۱۶	۰	۱۲	۹۷
۵	۰	۱۱	۶۹	۱۹	۹۱
۶	۰	۱۰۰	۰	۰	۹۲
۷	۱۶	۸۰	۰	۴	۹۶
۸	۸۳	۱۷	۰	۰	۹۱
۹	۸۶	۱۴	۰	۰	۹۷
۱۰	۵۸	۲۳	۰	۱۹	۹۸
۱۱	۷۳	۲۷	۰	۰	۹۵
۱۲	۷۲	۱۷	۰	۱۱	۹۴
۱۳	۶۱	۰	۰	۳۹	۹۰
۱۴	۰	۶۰	۰	۴۰	۹۳

به طور کلی درصد GOF برای هر دو مدل از ۸۰ تا ۹۸ متغیر می‌باشد که مقادیر GOF محاسبه شده برای مدل کالینز از مدل هوگس بیشتر می‌باشد (شکل ۶). به عنوان مثال، حدادچی و همکاران، (۲۰۱۳) هفت مدل ترکیبی از جمله دو مدل هوگس و کالینز به منظور سهم‌بندی منابع رسوبات آبی مورد استفاده قرار دادند و نتایج مدل‌های مختلف توسط معیار GOF مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که کمترین و بیشترین مقدار GOF برای مدل کالینز به ترتیب ۳۰/۳ و ۸۹/۲ درصد می‌باشد و هم چنین کمترین و بیشترین مقدار GOF برای مدل هوگس، ۳۵/۷ و ۸۸/۶ درصد محاسبه نمودند. ژو و همکاران، (۲۰۱۶) از یک معیار GOF به منظور ارزیابی نتایج سهم‌های ارائه شده توسط مدل کالینز استفاده نمودند و اظهار داشتند که مقدار GOF کمتر از ۸۰ درصد برای مدل‌های ترکیبی قابل قبول نمی‌باشند. نمونه‌هایی که مقدار GOF آنها کمتر از ۸۰ درصد محاسبه گردید از ادامه مطالعه حذف نمودند. کالینز و همکاران، (۲۰۱۲) به منظور ارزیابی نتایج حاصل از یک مدل ترکیبی از معیار GOF استفاده نمودند. که میانگین GOF در زیرحوضه‌های مختلف بیشتر از ۸۵ درصد بدست آوردند. محققان زیادی از جمله ژانگ و لیو (۲۰۱۶)؛ استون و همکاران، (۲۰۱۴)؛ پالازون و همکاران، (۲۰۱۵)؛ لیو و همکاران، (۲۰۱۶) به منظور ارزیابی نتایج حاصل از مدل‌های ترکیبی در سهم‌بندی منابع رسوب از معیار GOF استفاده نمودند.



شکل ۵: درصد سهم منابع مختلف برای نمونه‌های شماره ۱۴ - ۱۱ تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از مدل‌های کالینز و هوگس



شکل ۶: مقادیر GOF برای ارزیابی نتایج سهم‌های محاسبه شده توسط مدل‌های ترکیبی کالینز و هوگس.

### نتیجه‌گیری

در این تحقیق، برای تعیین سهم منابع رسوبات بادی به صورت کمی از روش انگشت‌نگاری رسوب همراه با مدل‌های ترکیبی کالینز و هوگس مورد استفاده قرار گرفت. سهم‌های ارائه شده برای ۱۴ نمونه رسوب توسط هر دو مدل تا حد زیادی مشابه به هم محاسبه شدند به طوری که بر طبق نتایج هر دو مدل، منبع اصلی تامین‌کننده رسوب برای ۷ نمونه تپه ماسه‌ای، Qs می‌باشد و همچنین بیشتر رسوب برای ۶ نمونه تپه ماسه‌ای از منبع Qal تامین می‌شود و منبع Qt تنها برای یک نمونه رسوب به عنوان منبع غالب شناسایی گردید و منبع Qc در هیچ یک از ۱۴ نمونه رسوب به عنوان منبع غالب شناسایی نشد. منابع Qs و Qal عمدتاً شامل رسوبات آبی ریزدانه (رخساره دشت ریگی ریزدانه) و بستر خشک‌رودها (رخساره اوئد) و پهنه‌های ماسه‌ای با ضخامت کم (مثل ریپل مارک‌ها) می‌باشند که بدلیل سست بودن و عدم پیوستگی این رسوبات به راحتی توسط بادها برداشت شده و به عنوان تامین‌کننده اصلی رسوب برای تپه‌های ماسه‌ای به حساب می‌آیند. به عنوان

مثال، غلامی و همکاران (۲۰۱۷a,b)، رسوبات دشت‌های ریگی ریزدانه و بستر خشک‌رودها به عنوان منابع اصلی تامین‌کننده رسوب برای تپه‌های اشکذر معرفی نمودند. تغییرپذیری در جهت باد باعث می‌شود که در هر فصل منابع غالب برای تپه‌های ماسه‌ای تغییر کند. مقادیر GOF برای نتایج هر دو مدل به هم شبیه و از ۸۰ تا ۹۸ درصد متغیر بودند ولی مقادیر GOF محاسبه شده برای مدل کالینز نسبت به مدل هوگس کمی بیشتر بدست آمد که این موضوع نشان‌دهنده کارایی بالای مدل کالینز نسبت به مدل هوگس می‌باشد. حدادچی و همکاران (۲۰۱۳)، از بین هفت مدل ترکیبی مورد استفاده در منشأیابی رسوبات آبی، دو مدل کالینز و هوگس به عنوان مدل‌های کارا معرفی نمودند و همچنین در تحقیق آنها، GOF محاسبه شده برای مدل کالینز نسبت به سایر مدل‌ها بالاتر بدست آمد. به طور کلی، استفاده از روش انگشت‌نگاری همراه با مدل ترکیبی کالینز برای تعیین سهم کمی منابع رسوبات بادی (تپه‌های ماسه‌ای و ریزگردها) در سایر محیط‌های بیابانی با تپه‌های ماسه‌ای فعال توصیه می‌شود تا بتوان منابع آنها تثبیت نمود.

### منابع

- احمدی، حسن، ۱۳۸۷، ژئومورفولوژی کاربری، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- دولت‌کردستانی، مجتبی؛ غلامی، حمید؛ احمدی، سیدجواد؛ ولینگ، دزموند؛ فتح‌آبادی، ابوالحسن، ۱۳۹۷، کمی-سازی عدم قطعیت سهم منابع رسوب تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از روش انگشت‌نگاری مونت کارلو (مطالعه موردی: تپه‌های ماسه‌ای جازموریان، جنوب استان کرمان)، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۳۳ (۹)، بهار ۱۳۹۷، صفحات ۱۵-۱.
- غلامی، حمید؛ فیض‌نیا، سادات؛ احمدی، جواد؛ احمدی، حسن؛ نظری سامانی، علی اکبر؛ نوحه‌گر، احمد، ۱۳۹۳، تعیین سهم رخساره‌های ژئومورفولوژی در تولید رسوبات بادی با بهره‌گیری از روش ردیابی رسوبات (بررسی موردی: تپه‌های ماسه‌ای اشکذر)، مدیریت بیابان، شماره ۴، پاییز و زمستان ۱۳۹۳، صفحات ۴۲-۳۱.
- غلامی، حمید؛ طاهری مقدم، الهام؛ نجفی قیری، مهدی؛ مهدوی نجف‌آبادی، رسول، ۱۳۹۴، تعیین سهم کاربری-های اراضی در تولید رسوب تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از روش انگشت‌نگاری (منطقه مورد مطالعه: ارگ نگار بردسیر، استان کرمان)، پژوهش‌های فرسایش محیطی، شماره ۵ (۲)، صفحات ۵۴-۴۶.
- غلامی، حمید؛ مهرداد، محمدرضا؛ فتح‌آبادی، ابوالحسن، ۱۳۹۶، کمی نمودن عدم قطعیت سهم منابع رسوبات بادی با استفاده از تکنیک انگشت‌نگاری-GLUE، چهارمین همایش ملی فرسایش بادی و طوفان‌های گرد و غبار، یزد، ۱۷-۱۶ اسفند ۱۳۹۶.
- Brosinsky, A. Foerster, S. Segl, K. Lopez-Tarazan, J. A. Pique, G. and Bronstert, A., 2014. Spectral fingerprinting: characterizing suspended sediment sources by the use of VNIR-SWIR spectral information. *Journal of Soils and Sediments*. doi:10.1007/s11368-014-092-z.
- Chen, F. Fang, N. and Shi, Z., 2016. Using biomarkers as fingerprint properties to identify sediment sources in a small catchment. *Science of the Total Environment*, 557-558, pp. 123-133.
- Collins, A. L. and Walling, D. E., 2007. Sources of fine sediment recovered from the channel bed of lowland groundwater-fed catchments in the UK. *Geomorphology*, 88, pp. 120-138.
- Collins, A.L. Walling, D.E. and Leeks, G.J.L., 1997. Fingerprinting the origin of fluvial suspended sediment in larger river basins: combining assessment of spatial provenance and source type. *Geografiska Annaler*, 79, pp. 239-254.
- Collins, A. L. Walling, D. E. and Leeks, G. J. L., 1998. Use of composite fingerprints to determine the provenance of the contemporary suspended sediment load transported by rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, pp. 31-52.
- Collins, A. L. Walling, D. E. Stroud, R. W. Robson, M. and Peet, L. M., 2010. Assessing damaged road verges as a suspended sediment source in the Hampshire Avon catchment, southern United Kingdom. *Hydrological Processes*, 24, pp. 1106-1122.
- Collins, A.L. Zhang, Y. Walling, D.E. Grenfell, S.E. Smith, P. Grischeff, J. ... Brogden, D., (2012). *Quantifying fine-grained sediment sources in the River Axe Catchment, southwest England:*

- Application of a Monte-Carlo numerical modelling framework incorporating local and genetic algorithm optimisation. Hydrological Processes, 26 (13), pp. 1962–1983.*
- Collins, A.L. Zhang, Y.S. Duethmann, D. Walling, D.E. and Black, K.S., 2013. Using a novel tracing-tracking framework to source fine-grained sediment loss to watercourses at sub-catchment scale. *Hydrological Processes, 27 (6), pp. 959–974.*
  - Devereux, O. H. Prestegard, K. L. Needelman, B. A. and Gellis, A. C., 2010. Suspended-sediment sources in an urban watershed, Northeast Branch Anacostia River, Maryland. *Hydrological Processes, 24, pp. 1391–1403.*
  - Field, J.P. Belnap, J. Breshears, D.D. Neff, J.C. Okin, G.S. Whicker, J.J. Painter, T.H. Ravi, S. Reheis, M.C. and Reynolds, R.L., 2010. The ecology of dust. *Ecol. Soc. Am. 8, pp. 423-430.*
  - Garzanti, E. Ando, S. Vezzoli, G. Lustrino, M. Boni, M. and Vermeesch, P., 2012. Petrology of the Namib sand sea: Long-distance transport and compositional variability in the wind-displaced Orange Delta. *Earth Sci. Rev. 112, pp.173-189.*
  - Gellis, A. C. Hupp, C. R. Pavich, M. J. Landwehr, J. M. Banks, W. S. L. Hubbard, B. E. Langland, M. J. Ritchie, J. C. and Reuter J. M., 2009. Sources, transport, and storage of sediment in the Chesapeake Bay Watershed. *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report, 2008, pp. 5186: 95.*
  - Gholami, H., Middleton, N., Nazari Samani, A. A., Wasson, R. 2017a. Determining contribution of sand dune potential sources using radionuclides, trace and major elements in central Iran. *Arab J Geosci, 10:163.*
  - Gholami, H., Telfer, M. W., Blake, W. H., and Fathabadi, A., 2017b. Aeolian sediment fingerprinting using a Bayesian mixing model. *Earth Surf. Process. Landforms, 42, pp. 2365–2376.*
  - Haddadchi, A. Olley, J. and Laceby, P., 2014. Accuracy of mixing models in predicting sediment source contributions. *Science of the Total Environment, 497-498, pp. 139-152.*
  - Haddadchi, A. Ryder, D. Evrard, O. and Olley, J., 2013. Sediment fingerprinting in fluvial systems: review of tracers, sediment sources and mixing models. *International Journal of Sediment Research, 28, pp. 560-578.*
  - Hughes, A. O. Olley, J. M. Croke, J. C. and Mc Kergow, L. A., 2009. Sediment source changes over the last 250 years in a dry-tropical catchment, central Queensland, Australia. *Geomorphology, 104, pp. 262-275.*
  - Huisman, N. L. H. Karthikeyan, K. G. Lamba, J. Thompson, A. M. and Peaslee, G., 2013. Quantification of seasonal sediment and phosphorus transport dynamics in an agricultural watershed using radiometric fingerprinting techniques. *J Soils Sediments, 13, pp. 1724-1734.*
  - Laceby, J.P. and Olley, J., 2015. An examination of geochemical modelling approaches to tracing sediment sources incorporating distribution mixing and elemental correlations. *Hydrological Processes, 29, pp. 1669–1685.*
  - Lal, R., 2001. Soil degradation by erosion. *La. Degrad. Dev. 12, pp. 519–539.*
  - Liu, B. Niu, Q. Qu, J. and Zu, R., 2016. Quantifying the provenance of aeolian sediments using multiple composite fingerprints. *Aeolian Research, 22, pp. 117-122.*
  - Motha, J.A. Wallbrink, P.J. Hairsine, P.B. and Grayson, R.B., 2003. Determining the sources of suspended sediment in a forested catchment in southeastern Australia. *Water Resources, 39 (3), 1056.*
  - Muhs, D. R., 2017. Evaluation of simple geochemical indicators of Aeolian sand provenance: Late Quaternary dune fields of North America revisited. *Quaternary Science Reviews, 171, pp. 260-296.*
  - Muhs, D.R. Reynolds, R. Been, J. and Skipp, G., 2003. Eolian sand transport pathways in the southwestern United States: importance of the Colorado River and local sources. *Quat. Int. 104, pp. 3-18.*
  - Nosrati, K. Govers, G. Ahmadi, H. Sharifi, F. Amoozegar, M. A. Merckx, R. and Vanmaercke, M., 2011. An exploratory study on the use of enzyme activities as sediment tracers: biochemical fingerprints? *International Journal of Sediment Research, 28, pp. 136-151.*
  - Palazón, L. Latorre, B. Gaspar, L. Blake, W.H. Smith, H.G. and Navas, A., 2015. Combining catchment modelling and sediment fingerprinting to assess sediment dynamics in a Spanish Pyrenean river system. *Science of the Total Environment, in press. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.06.189.*

- Rashki, A. Arjmand, M. and Kaskaoutis, D.G., 2017. Assessment of dust activity and dust-plume pathways over Jazmurian Basin, southeast Iran. *Aeolian Research*, 24, pp. 145-160.
- Russell, M. A. Walling, D. E. and Hodgkinson, R. A., 2001. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. *Journal of Hydrology*, 252, pp. 1-24.
- Scheidt, S. Lancaster, N. and Ramsey, M., 2011. Eolian dynamics and sediment mixing in the Gran Desierto, Mexico, determined from thermal infrared spectroscopy and remote-sensing data. *Geol. Soc. Am. Bull.* 123, pp. 1628 -1644.
- Slattery, M. Walden, J. and Burt, T. P., 2000. Fingerprinting suspended sediment sources using mineral magnetic measurements- A quantitative approach. *Tracers in geomorphology*, John Wiley and Sons: pp. 309-322.
- Stone, M. Collins, A.L. Silins, U. Emelko, M.B. and Zhang, Y.S., 2014. The use of composite fingerprints to quantify sediment sources in a wildfire impacted landscape, Alberta, Canada. *Science of the Total Environment*, 473-474, pp. 642-650.
- Voli, M.T. Wegmann, K.W. Bohnenstiehl, D.R. Leithold, E. Osburn, C.L. and Polyakov, V., 2013. Fingerprinting the sources of suspended sediment delivery to a large municipal drinking water reservoir: Falls Lake, Neuse River, North Carolina, USA. *Journal of Soils and Sediments*, 13 (10), pp. 1692-1707.
- Walling, D.E., 2005. Tracing suspended sediment sources in catchments and river systems. *Science of the Total Environment*, 344 (1-3), pp. 159-184.
- Walling, D. E. Owens, P. N. and Leeks, G. J. L., 1999. Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrological Processes*, 13, pp. 955-975.
- Zhang, X. C. and Liu, B. L., 2016. Using multiple composite fingerprints to quantify fine sediment source contributions: A new direction. *Geoderma*, 268, pp. 108-118.
- Zhou, H. Chang, W. and Zhang, L., 2016. Sediment sources in a small agricultural catchment: A composite fingerprinting approach based on the selection of potential sources. *Geomorphology*, 266, pp. 11-19.