

## بررسی شاخص‌های ژئومورفولوژیکی و رابطه آن با پوشش گیاهی در تپه‌های ماسه‌ای (مطالعه موردی: آران و بیدگل و کاشان)

میثم آرامش - دانشجوی دکتری گروه مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.  
عباسعلی ولی\* - دانشیار گروه مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.  
ابوالفضل رنجبر - استاد گروه مدیریت و کنترل بیابان، دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین، دانشگاه کاشان.

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲      تأیید نهایی: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱

### چکیده

شرایط ویژه حاکم بر مناطق خشک فرآیند بادی را در این مناطق رقم می‌زند. در این مناطق ارتباطات پوشش گیاهی و ژئومورفولوژی بیانگر عملکرد موثر این ارتباطات بر مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای است. از سوی دیگر تاثیر پوشش گیاهی هم از طریق رفتار جوامع گیاهی و همچنین ایفای نقش تک تک گونه‌های گیاهی قابل بررسی است. از اینرو در تحقیق حاضر به بررسی تاثیر جوامع گیاهی به کمک دورسنجی و تاثیر گونه‌های مجزا با مراجعه میدانی در منطقه ارگ کاشان طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۰ پرداخته شد. به منظور بررسی ارتفاع و شیب از تصاویر گوگل ارث و برای محاسبه پوشش گیاهی از تصاویر لندست TM و OLI8 و بازدید صحرائی استفاده شد. همبستگی بین عوامل مورفولوژیکی و پوشش گیاهی با استفاده از رگرسیون وزن دار فضایی (GWR) بررسی شد. نتایج شناسایی تپه‌های ماسه‌ای بیانگر وجود شش نوع تپه مختلف در منطقه مورد مطالعه بود. کمی سازی ارتفاع و شیب بیانگر میانگین ارتفاع ۳۳ متر و شیب ۳/۶ درصد بود. تغییرات ارتفاع و حجم تپه‌های ماسه‌ای ارگ کاشان روند افزایشی را نشان داد به طوریکه نرخ تغییر ارتفاع و همبستگی آن به ترتیب ۰/۴۵۵ و ۰/۸۵ و نرخ تغییر حجم و همبستگی آن به ترتیب ۰/۲۱۶ و ۰/۹ محاسبه شد. حجم سطحی تپه‌های ماسه‌ای منطقه کاشان حدود ۱/۰۲ کیلومتر مکعب در طی یک دوره ۲۵ ساله افزایش داشت. تغییرات زمانی NDVI در این دوره مطالعاتی افزایش بود، رابطه بین ارتفاع و شیب تپه‌های ماسه‌ای با NDVI نشان داد که بیشترین مقدار پوشش گیاهی در تپه‌های تثبیت شده و کمترین مقدار آن در تپه‌های ستاره‌ای و بوکلیه بارخانی واقع شده است. نتایج حاصل از همبستگی بین خصوصیات مورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای با NDVI از طریق رگرسیون وزن دار فضایی (GWR) نشان داد که بین این عوامل در همه بخش‌ها همبستگی مثبت وجود دارد ( $R=0/46$ ,  $R=0/57$ ). گونه‌های ماسه‌دوست منطقه گونه‌های اسکمبیل، کلیت، سبد و دم‌گاوی بودند که نتایج تحلیل کارایی این گونه‌ها در مورفولوژی دامنه تپه‌ها نشان داد گونه‌های فوق عملکرد یکسانی ندارند. به طوریکه ترکیب گونه‌ها و گونه سبد به ترتیب با افزایش شیب جزئی دامنه ۴۰ و ۳۰٪ بیشترین و گونه دم‌گاوی کمترین تاثیر را در شیب جزئی دامنه داشته است. در نهایت قابل ذکر است تنوع پوشش گیاهی منجر به تنوع عملکرد در مورفولوژی تپه‌ها شده است و این موضوع بیانگر استفاده اکوسیستم از نقش همه گونه‌ها در تقابل با فرآیند بادی است، لذا این دستاورد می‌تواند در برنامه‌های اجرایی و پروژه‌های اقدام طرح‌های کنترل فرسایش بادی در این مناطق در دستور کار قرار گیرد.

واژگان کلیدی: ژئومورفومتری، طبقه‌بندی تپه‌های ماسه‌ای، خصوصیات ژئومورفولوژیکی، NDVI، ارگ کاشان.

## مقدمه

شرایط خشکی، فعالیت‌های انسانی را محدود می‌کند بنابراین پایداری بین اجزای اکوسیستم را در مناطق تخریب شده تر از بین می‌برد (یو<sup>۱</sup> و همکاران، ۲۰۲۱؛ یائو<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۲۱). مفهوم پایداری یک اصل اکولوژیکی است و بر اساس آن، پایداری در صورتی حفظ می‌شود که بهره‌برداری‌ها متناسب با ظرفیت باشد (کسترا<sup>۳</sup> و همکاران، ۲۰۱۸؛ هیمنس<sup>۴</sup> و همکاران، ۲۰۱۹). علاوه بر این، تداوم پایداری در مناطق خشک مستلزم ارزیابی‌هایی مانند عوامل انسانی، عوامل طبیعی، گیاهان، جانوران و تعاملات بین انسان و محیط است (کولینگ<sup>۵</sup> و همکاران، ۱۹۹۹). بنابراین ارزیابی و پایش شاخص‌های اقلیمی از جمله باد، نقش موثری در حفظ پایداری به عنوان یک عامل تأثیرگذار در مناطق خشک ایفا می‌کند (عباسی و همکاران، ۲۰۲۰؛ نظری سامانی و همکاران، ۲۰۲۰).

شرایط خشک و فراخشک حاکم بر بخش وسیعی از ایران با بارندگی حدود ۲۰۰ میلیمتر در سال باعث شده که بخش وسیعی از کشور را مناطق بیابانی، تپه‌های ماسه‌ای و مناطقی با پوشش گیاهی کم پوشش دهد (زرهی و رضایی، ۲۰۲۲). شرایط سخت در مناطق بیابانی از جمله خشکی، بارش کم و تابش آفتاب موجب کاهش رویش و تراکم پوشش گیاهی می‌شود. در این مناطق وزش بادهای شدید باعث جدا شدن ذرات خاک و در نتیجه وقوع پدیده ریزگرد و تشکیل تپه‌های ماسه‌ای می‌شود (عباسی، ۱۴۰۰). دریاچه‌های ماسه‌ای بیابانی که ارگ نیز نامیده می‌شود مناطقی هستند که در اثر فرایندهای رسوب-گذرای در مناطق کویری با درجات مختلف پوشش گیاهی ایجاد می‌شوند. به طور کلی اکثر رسوب‌شناسان و ژئومورفولوژیست‌ها مساحتی در حدود ۱۲۵ کیلومتر مربع را برای شناسایی ارگ در نظر می‌گیرند و مناطق کوچکتر از را به عنوان پهنه‌های شنی بیان می‌کنند (پی و تستوار، ۲۰۰۸). بر اساس مطالعات بیشترین مساحت ارگ مربوط به قاره آسیا (۴۵٪/۵) و پس از آن آفریقا (۳۴٪/۲)، استرالیا (۲۰٪) و آمریکا (۳٪/۳) است (احمدی، ۲۰۰۸). ارگ‌ها در ایران در ۱۵ استان (۵۶ ارگ) با مساحتی حدود ۴/۴ میلیون هکتار را پوشش می‌دهند (احمدی، ۲۰۰۴).

تپه‌های ماسه‌ای یکی از انواع مخاطرات طبیعی است که هر ساله سبب وارد آمدن خسارات زیادی به ویژه در مناطق خشک و بیابانی دنیا می‌شود (بیزهانگ و اشکنازی<sup>۶</sup>، ۲۰۲۲). بسته به رژیم باد و عرضه ماسه، تپه‌ها شامل چندین شکل مانند بارخان، تپه‌های عرضی، تپه‌های ستاره‌ای خطی و سهمی هستند که هر یک ویژگی‌های خاص خود از قبیل ارتفاع، عرض و فاصله را دارد (زو<sup>۷</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). تپه‌های ماسه‌ای منبع بالقوه گرد و غبار ناشی از فرسایش بادی هستند که به شدت بر تشکیل لس و فرایندهای بیوژئوشیمیایی و اکولوژیکی با تامین مواد مغذی برای اکوسیستم‌های دریایی و زمینی تاثیر می‌گذارد (سوئت<sup>۸</sup> و همکاران، ۲۰۲۰). تپه‌های ماسه‌ای همواره از جهت تهدیدات انسانی مهم می‌باشند از اینرو مطالعه این تپه‌ها به دلیل تاثیراتی که بر منابع آب و خاک و حیات گیاهی و جانوری و تاسیسات و راه‌های ارتباطی دارند، ضروری است (بیزهانگ و اشکنازی<sup>۹</sup>، ۲۰۲۲). درک ما از مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای تا حد زیادی مبتنی بر روابط بین مورفولوژی تپه و رژیم باد است. دانش کمی کردن عوارض سطح زمین را تحت عنوان ژئومرفومتري در نظر می‌گیرند که در زمینه تحلیل کارتوگرافیک عوارض سطح زمین بر پایه محاسبات رایانه‌ای و تغییرات ارتفاعی عوارض زمین یک رویکرد نوین

1. Yu

2. Yao

3. Keesstra

4. Heymans

5. Cowling

6. Yizhaq and Ashkenazy

7. Xu

8. Swet

9. Yizhaq and Ashkenazy

محسوب می‌شود (پیکه و دیکائو<sup>۱</sup>، ۲۰۰۰). از زمانی که سازمان زمین‌شناسی ایالات متحده<sup>۲</sup> (USGS) برای اولین بار توزیع مدل‌های رقمی ارتفاع<sup>۳</sup> (DEM) سه بعدی را در سال ۱۹۷۴ آغاز کرد داده‌های مدل رقمی ارتفاع به عنوان رایج‌ترین ورودی برای ژئومورفومتری در نظر گرفته شد (یوسری<sup>۴</sup>، ۲۰۱۰).

در مقیاس‌های وسیع زمانی و مکانی اندازه‌گیری زمینی به دلیل هزینه زیاد و زمانبر بودن دشوار است. امروزه داده‌های سنجش از دور به دلیل دسترسی آسان، وضوح و پوشش مکانی مناسب توسط محققین زیادی به منظور شناسایی و درک بهتر از مناطق بیابانی (تپه‌های ماسه‌ای) به دلیلی دشواری دسترسی به کار برده شده‌اند (می‌هالستا<sup>۵</sup> و همکاران، ۲۰۰۸؛ کلینتون و گنگ<sup>۶</sup>، ۲۰۱۳؛ آیانسینا<sup>۷</sup>، ۲۰۱۶). محاسبه ارتفاع و فاصله بین تپه‌های ماسه‌ای بسیار پیچیده است و متناسب با نوع تپه و موقعیت مکانی آن تغییر می‌کند که این موضوع منعکس‌کننده وضعیت پویایی تپه (رشد عمودی تپه در مقابل مهاجرت یا گسترش به جلو) و در دسترس بودن منبع ماسه است (لانکستر<sup>۸</sup>، ۱۹۹۸).

تحرک تپه‌های ماسه‌ای به عوامل زیادی از جمله شدت باد، بارش، فعالیت‌های انسانی و پوشش تپه‌ها (شن، پوشش گیاهی و پوسته زیستی) بستگی دارد (کیناست<sup>۹</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). فرایندهای ژئومورفولوژیکی همراه با حضور پوشش گیاهی تکامل سیستم‌های تپه‌ای را تعیین می‌کند (پلیتیر<sup>۱۰</sup> و همکاران، ۲۰۱۵). دینامیک و مورفومتری تپه‌های ماسه‌ای به میزان زیادی تحت تاثیر پوشش گیاهی قرار دارد به طوری‌که، تپه‌های ماسه‌ای که با پوشش گیاهی بیشتری پوشانده می‌شوند، سرعت بادهای بسیار شدید را کاهش داده و در نتیجه تنش برشی روی بستر از بین می‌رود که این موضوع منجر به فرسایش شن و ماسه و تحرک تپه‌ها نمی‌شود (مایئود و وب<sup>۱۱</sup>، ۲۰۱۷). تاثیر پوشش گیاهی به نوع و تراکم آن (عمدتاً تخلخل و انعطاف پذیری آن) بستگی دارد. هنگامی که پوشش گیاهی بالاتر از مقدار بحرانی باشد، کل سطح از فرسایش بادی محافظت می‌شود سوتربوری<sup>۱۲</sup> و همکاران، ۲۰۱۳). هنگامی که پوشش گیاهی بسیار کوچک است، حتی بادهای نسبتاً ضعیفی که بالاتر از سرعت آستانه هستند (حدود ۶ متر بر ثانیه برای دانه‌های تپه‌های ماسه معمولی ۲۵۰ میکرومتر) منجر به انتقال شن و در نتیجه فرسایش ماسه و تجمع در اطراف موانع می‌شود (فرایبرگ<sup>۱۳</sup>، ۱۹۷۹). باد همچنین می‌تواند مستقیماً با اعمال فشار مکانیکی بر ساقه‌ها و برگ‌ها و افزایش تبخیر و تعرق روی پوشش گیاهی تأثیر بگذارد (حتی بدون حمل ماسه) که باعث کاهش بیشتر پوشش گیاهی و در نتیجه افزایش بیشتر فعالیت تپه‌ها می‌شود.

حدود ۴ میلیون هکتار معادل ۳۰٪ سطح استان اصفهان را اراضی بیابانی و شن‌زار تشکیل داده که به طور عمده در بخش‌های شمالی و شرقی آن پراکنش دارند که از این مقدار حدود ۶۳۵ هزار هکتار آن مربوط به مناطق ماسه‌ای است که ۱۳٪/۴ از کل ماسه‌زارهای کشور را شامل می‌شود (سازمان جنگل‌ها و مراتع، ۱۳۹۷). دست‌کم ۱۶ کانون ریزگرد با مساحت

<sup>1</sup>. Pike and Dikau

<sup>2</sup>. The United States Geological Survey

<sup>3</sup>. Digital elevation model

<sup>4</sup>. Usery

<sup>5</sup>. Mihalcea

<sup>6</sup>. Clinton and Gong

<sup>7</sup>. Ayansina

<sup>8</sup>. Lancaster

<sup>9</sup>. Kinast

<sup>10</sup>. Pelletier

<sup>11</sup>. Mayaud and Webb

<sup>12</sup>. Suter-Burri

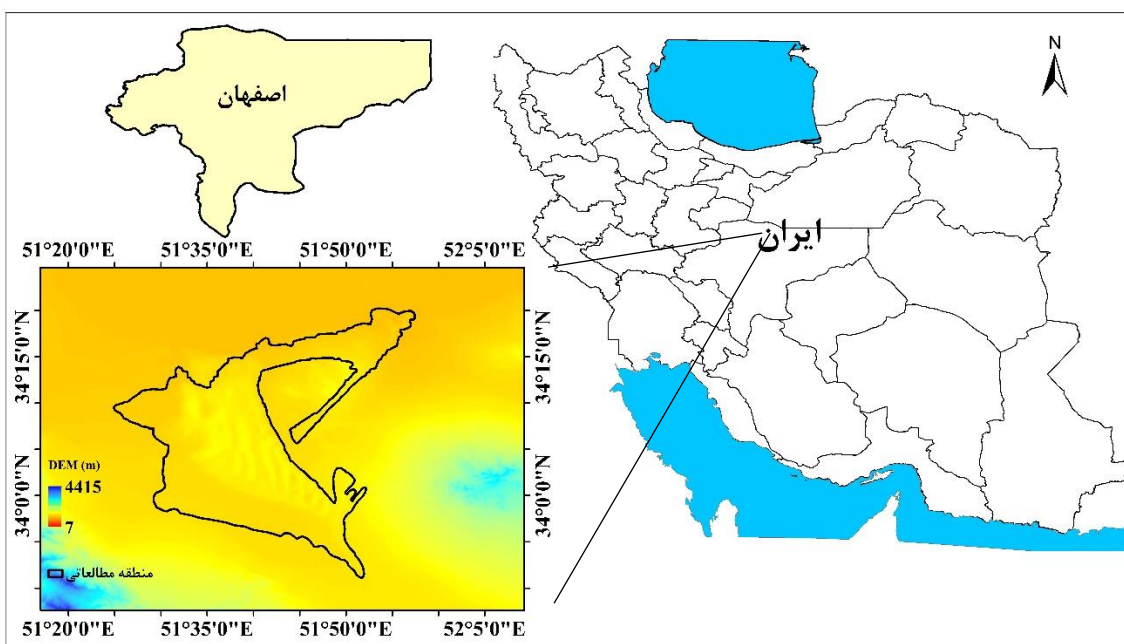
<sup>13</sup>. Fryberger

نزدیک به یک میلیون و ۹۰ هزار هکتار در استان اصفهان قرار دارد که می‌تواند سالانه بیش از ۳۶۰ میلیارد ریال به امکانات زیربنایی و منابع طبیعی از جمله پایگاه‌های نظامی، زمین‌های کشاورزی، راه‌های ارتباطی، شهرک‌های صنعتی و راه‌آهن می‌تواند آسیب وارد کند. ۳۰۰ هزار هکتار از نقاط کانونی بحران در استان اصفهان، از جمله ۱۲۰ هزار هکتار در شمال شهرستان آران و بیدگل شامل کویر سیازگه و مرنجاب از جمله نقاطی هستند که در صورت شدت گرفتن مشکلات موجود، می‌توانند حتی زندگی عادی در نقاط مسکونی همجوار را با مشکل روبه‌رو کنند (اداره منابع طبیعی و ابن‌خیزداری اصفهان، ۱۴۰۰). با توجه به خسارات حاصل از فرسایش بادی، گسترش این معضل به عنوان یک پدیده زیست محیطی و نقش با اهمیت پوشش گیاهی در کنترل آن، در تحقیق حاضر سعی شد مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای (ارتفاع، شیب عمومی و شیب جزئی) تحت تاثیر گونه‌های گیاهی هم به صورت جوامع گیاهی از طریق روش‌های دورسنجی و هم از طریق بررسی نقش تک تک گونه‌های گیاهی به صورت بررسی میدانی بررسی گردد.

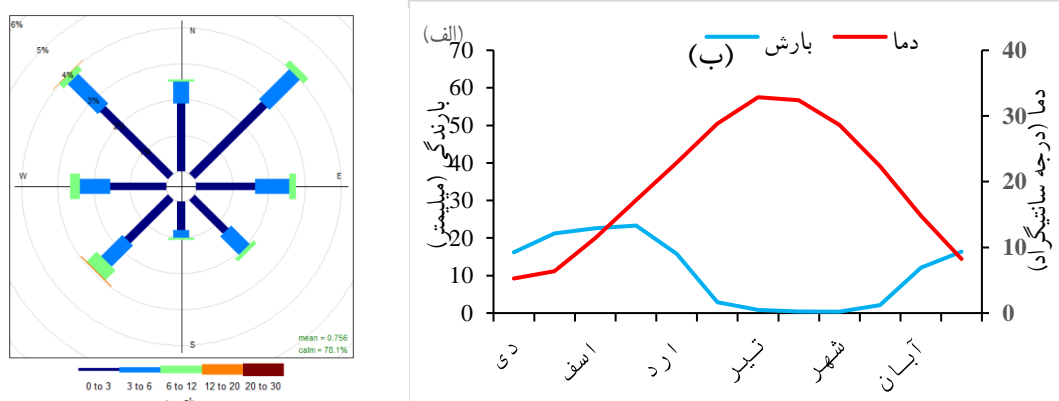
### مواد و روش‌ها

#### منطقه مورد مطالعه

ریگ بلند کاشان یا بند ریگ یکی از معدود مجموعه‌های ماسه‌ای مهم ایران است که در جنوب دریاچه نمک در شهرستان آران و بیدگل قرار دارد. این منطقه با مساحت ۹۶۹/۹ کیلومتر مربع در محدوده ۴۵° ۳۳' تا ۱۵' ۳۴° درجه شمالی و ۳۰' ۵۱° تا ۴۵' ۵۱° طول شرقی واقع شده است (شکل ۱). این مجموعه ماسه‌ای درست مجاور دریاچه نمک و داخل حوضه مسیله قرار دارد و دارای قوس‌های هلالی شکل است که طول قوس خارجی آن حدود ۱۱۵ کیلومتر و طول قوس داخلی آن حدود ۶۰ کیلومتر است و شهر کاشان در غرب آن واقع شده است. این رشته از امتداد قوس جنوبی به مجموعه ماسه‌ای ارگ اردستان واقع در شرق اردستان می‌پیوندد و تا شمال نائین به صورت یک رشته باریک به عرض متوسط حدود ۶ تا ۸ کیلومتر و طول بیش از ۲۴۰ کیلومتر امتداد می‌یابد. این منطقه در واحد پلایا و برخی از واحدهای زمین‌شناسی مانند Qs، Qc، Qf2، Qm، Qsd قرار دارد. بر اساس اطلاعات سازمان هواشناسی کشور میزان بارندگی، درجه حرارت و رطوبت نسبی در این منطقه به ترتیب ۱۳۱ میلی‌متر، ۱۸/۷ درجه سانتیگراد و ۳۷/۴ درصد گزارش شد. باد غالب در منطقه سمت شمال شرقی داشته و ۴/۱ درصد از کل باد را شامل می‌شود (شکل ۲). منشأ شن و ماسه در این منطقه مواد معدنی محلی است. همچنین گزارش شده است که ماسه‌های ارگ کاشان عمدتاً کوارتز با محتوای آهک در حدود ۱۷-۲۴ درصد هستند (نظری سامانی و همکاران، ۲۰۱۶).



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه



شکل ۲. منحنی آمبروترمیک (الف) و گلباد ایستگاه سینوپتیک کاشان

### داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق به منظور بررسی تغییرات ارتفاعی از تصاویر گوگل ارث مربوط به دوره ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۰ و مدل رقومی ارتفاع ۳۰ متر مربوط به ماهواره آستر<sup>۱</sup> استفاده شد. همچنین به منظور بررسی شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی<sup>۲</sup> (NDVI)

از تصاویر چند زمانه لندست شده از درگاه (<https://earthexplorer.usgs.gov>) در شرایط بدون ابر با ردیف/گذر<sup>۳</sup> ۱۶۳ و ۳۶ استفاده شد. تصاویر انتخاب شده مربوط به سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۰ از لندست ۵ و ۸ سنجنده‌های TM و OLI بود. برای محاسبه دقیق، تصاویر با قدرت تفکیک مکانی و زمانی ۳۰ متر و ۱۶ روز انتخاب شد.

<sup>1</sup>. ASTER

<sup>2</sup>. Normalized Difference Vegetation Index

<sup>3</sup>. Row/Path

## روش پژوهش

مطالعه حاضر با هدف بررسی مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای تحت تاثیر جوامع گیاهی با استفاده از شاخص‌های دورسنجی (NDVI) و همچنین بررسی کارایی تک تک گونه‌ها به صورت میدانی انجام شد. از اینرو به منظور بررسی تغییرات ارتفاع و شیب تپه‌های ماسه‌ای در ابتدا نقشه‌های رقومی ارتفاع تعیین شد. با توجه به اینکه مدل رقومی ارتفاع برای سال‌های مختلف در دسترس نبود برای تهیه تصاویر فوق از نرم افزار گوگل ارث استفاده شد و تصاویر مربوط به سال‌های مختلف تعیین و اقدام به نمونه‌برداری نقاط شد. سپس نقاط برداشت شده از گوگل ارث با استفاده از gps visualizer/elevation به نقاط ارتفاعی تبدیل شدند و با استفاده از روش درونیابی نقشه DEM مربوط به سال‌های مختلف تهیه شد.

به منظور تهیه ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای به طور سیستماتیک تعداد ۱۲۰۰ نقطه تعیین شد و با استخراج پروفیل ارتفاعی از طریق گوگل ارث ارتفاع تپه‌ها محاسبه شد. سپس با استفاده از این نقشه ارتفاعی شیب مربوط به هر دوره تهیه شد.

## شاخص تفاضلی نرمال شده پوشش گیاهی

پس از دانلود تصاویر ماهواره‌ای، در مرحله پیش پردازش، اقدام به کالیبراسیون رادیانس و تصحیح اتمسفری تصاویر اخذ شده با هدف حذف خطاهای ناشی از سنجنده و اتمسفر در محیط نرم افزار ENVI 5.3 شد. NDVI ماهیانه از ترکیب دو NDVI با فاصله ۱۶ روزه تهیه شد. از شاخص NDVI به عنوان مهمترین شاخص‌های مورد استفاده پوشش گیاهی نام برده شده است. این شاخص می‌تواند جهت تعیین سایر پارامترهای پوشش گیاهی به عنوان شاخص پایه مورد استفاده قرار گیرد.

NDVI بر اساس تعریف رئوس<sup>۱</sup> و همکاران ۱۹۷۴ به صورت معادله زیر است:

$$NDVI = \frac{P_{nir} - P_{red}}{P_{nir} + P_{red}} \quad (1)$$

در این رابطه  $P_{nir}$  بازتابش باند مادون قرمز نزدیک و  $P_{red}$  بازتابش باند قرمز نزدیک است. مقادیر این شاخص بین محدوده +۱ تا -۱ می‌باشد. مقادیر بالای این شاخص نشان‌دهنده تراکم پوشش گیاهی زیاد در منطقه می‌باشد، ولی ابرها، برف و آب با مقادیر منفی مشخص می‌شوند. (لی<sup>۲</sup> و همکاران، ۲۰۰۹).

## عملیات میدانی

بررسی صحرایی با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و بازدید از قسمت‌های مختلف و پیمایش صحرایی انجام گرفت. در این مرحله با توجه به وسعت زیاد منطقه به منظور بررسی وضعیت پوشش گیاهی و گونه‌های موجود در این شنزارها از هر سمت منطقه دو تپه ماسه‌ای به طور تصادفی انتخاب شد و پوشش گیاهی آن بررسی شد. سپس وضعیت پوشش گیاهی و گونه‌های موجود در این شنزارها مشخص شد. به این منظور نمونه‌های گیاهی طی عملیات صحرایی جمع‌آوری شد سپس با استفاده از منابع موجود مانند فلور ایرانیکا گونه‌های مذکور شناسایی شدند. همزمان با شناسایی گونه‌های گیاهی ماسه‌دوست تراکم این گونه‌ها در منطقه تعیین شد. همچنین اندازه‌گیری شیب جزئی ناشی از پوشش گیاهی بر روی تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از شیب سنج اندازه‌گیری شد.

۱. Roues

۲. LI

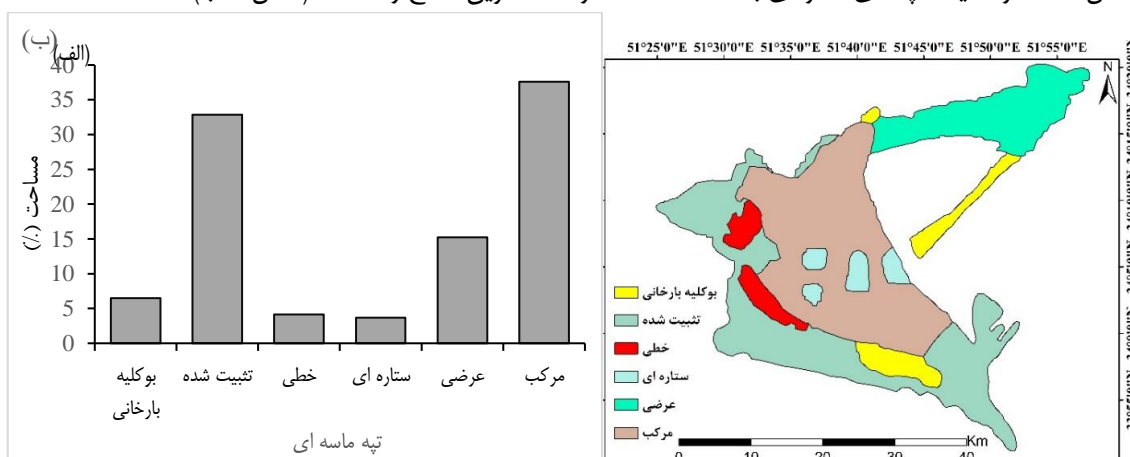
### روش‌های آماری استفاده شده برای تجزیه و تحلیل نتایج

فاکتورهای مورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای با استفاده از تصاویر DEM استخراج شد. به منظور بررسی همبستگی بین این عوامل و NDVI یک شبکه نقطه‌ای (۳۰۰۰ نقطه) به عنوان نقاط نمونه انتخاب شد. تجزیه و تحلیل تغییرات عوامل مورفولوژیکی با NDVI با استفاده از رگرسیون وزن‌دار فضایی<sup>۱</sup> در محیط نرم‌افزار ArcGIS 10.2 انجام شد. همچنین برای بررسی معنی داری بین درصد پوشش گیاهی گونه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه از آنالیز تجزیه و تحلیل چند متغیره<sup>۲</sup> آنوا<sup>۲</sup> استفاده شد.

### نتایج

#### تپه‌های مختلف تپه‌های ماسه‌ای

بر اساس مطالعات قبلی (نظری سامانی و همکاران، ۲۰۱۶) و گوگل ارث انواع تپه‌های ماسه‌ای موجود در ارگ کاشان به صورت شش نوع بوکلیه بارخانی، تثبیت شده، خطی، ستاره‌ای، عرضی و مرکب شناسایی شد (شکل ۳ الف). به طوریکه تپه‌های عرضی در بخش‌های شمال شرقی، خطی در غرب، مرکب در شرق و مرکز، ستاره‌ای در مرکز و تثبیت شد از شمال غرب تا غرب و جنوب مشاهده شد. بر این اساس تپه مرکب و تثبیت شده بیشترین سطح از منطقه مورد مطالعه را شامل شدند در حالیکه تپه‌های ستاره‌ای با مساحت ۳/۶۷ درصد کمترین سطح را داشتند (شکل ۳ ب).



شکل ۳. نقشه انواع تپه‌های مختلف اراضی ماسه‌ای (الف) و درصد مساحت هر یک از تپه‌های ماسه‌ای در ارگ کاشان (ب)

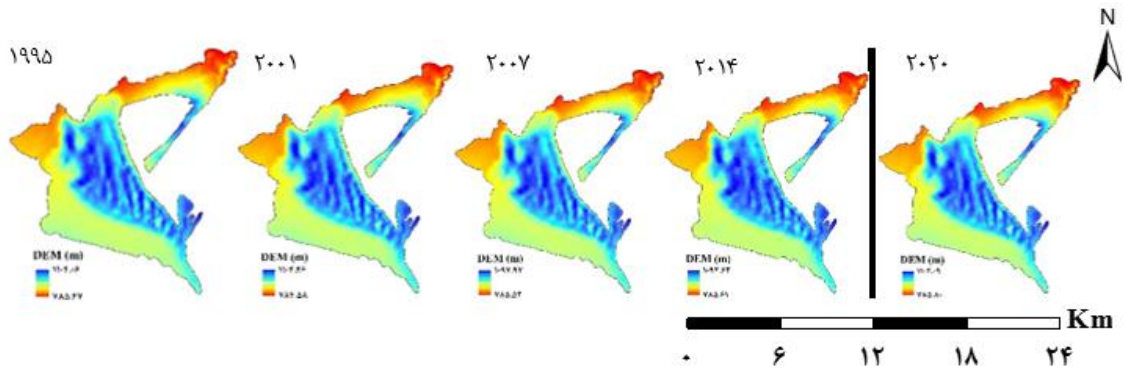
#### تغییرات ارتفاع و حجم تپه‌های ماسه‌ای

تغییرات زمانی ارتفاع از سطح دریا برای تپه‌های ماسه‌ای نشان داد که ارتفاع از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱ افزایش داشت در حالیکه بعد از ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۴ کاهش و در سال ۲۰۲۰ مجدد افزایشی بود (شکل ۴). بیشترین و کمترین مقدار ارتفاع به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۱۴ تعیین شد. از نظر تغییرات مکانی ارتفاع طی دوره مطالعاتی (۱۹۹۵-۲۰۲۰) در بخش‌های شمال و شمال شرقی کم بوده و به سمت شرق، مرکز و جنوب شرق افزایش می‌یابد. کمترین مقدار ارتفاع در بخش شمال شرقی بود که حدود ۷۸۰ متر برآورد شد در حالیکه حداکثر ارتفاع آن در بخش مرکزی حدود ۱۱۰۵ متر بود. بر این اساس تفاوت ارتفاعی در امتداد نیمرخ طولی حدود ۳۲۵ متر تعیین شد. نتایج حاصل از محاسبه ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای با

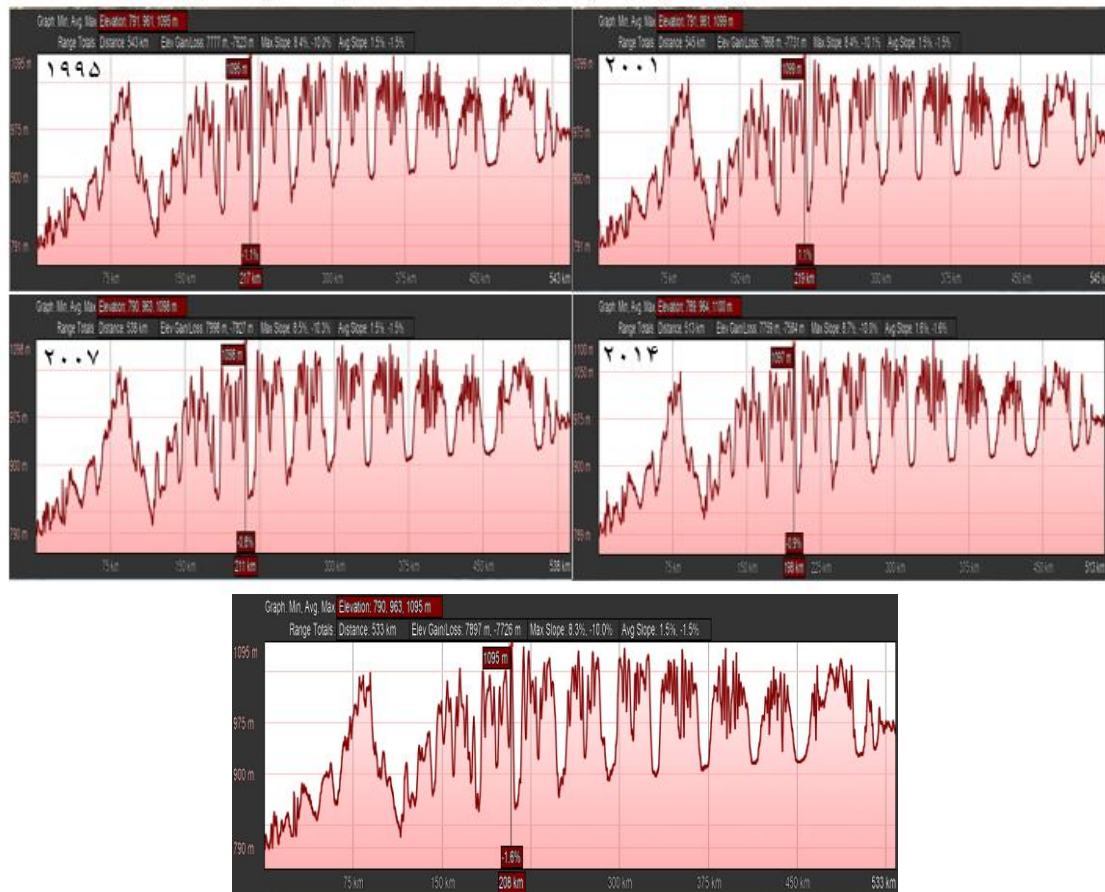
<sup>1</sup>. Geographically Weighed Regression

<sup>2</sup>. Analysis of variance

استفاده از پروفیل ارتفاعی مدل رقومی ارتفاع در شکل ۵ نشان داده شده است. پروفیل طولی تپه‌های شنی تغییرات قابل توجهی را در ارتفاع تپه‌ها نشان می‌دهد. نامنظم بودن مشخصات ارتفاعی طولی تپه‌ها بیانگر پیچیدگی توپوگرافی تپه است.



شکل ۴. DEM استخراج شده از گوگل ارث طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۰ در منطقه ارگ کاشان

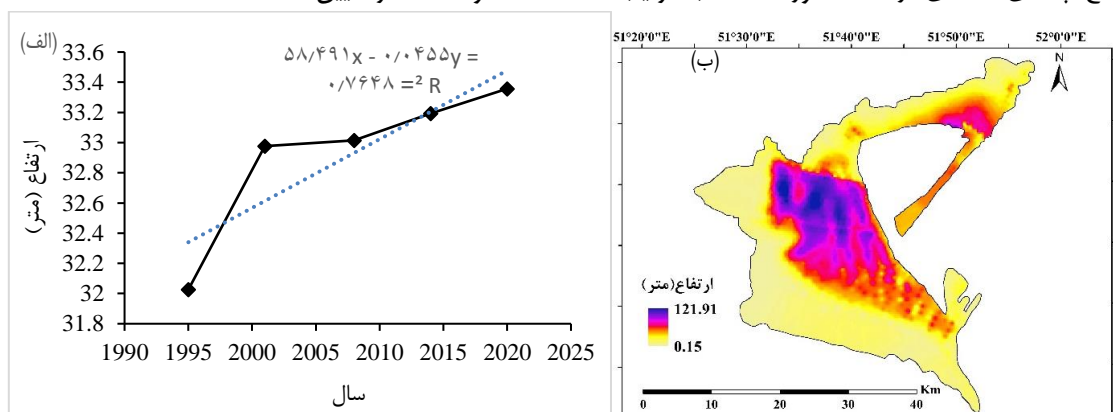


شکل ۵. پروفیل ارتفاعی تپه‌های ماسه‌ای طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۰ در ارگ کاشان

تغییرات زمانی ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای در منطقه ارگ کاشان روند افزایشی را نشان داد به طوری که بیشترین و کمترین مقدار آن به ترتیب در سال‌های ۲۰۲۰ و ۱۹۹۵ مشاهده شد (شکل ۶ الف) نتایج حاصل از تحلیل رگرسیون خطی بین سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۲۰ نرخ تغییر ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای و همبستگی را به ترتیب  $0.0455$  و  $0.85$  در تپه‌های ماسه‌ای منطقه مورد مطالعه نشان داد. ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای در بخش مرکزی بیشترین مقدار را داشت در حالی که ارتفاع کم

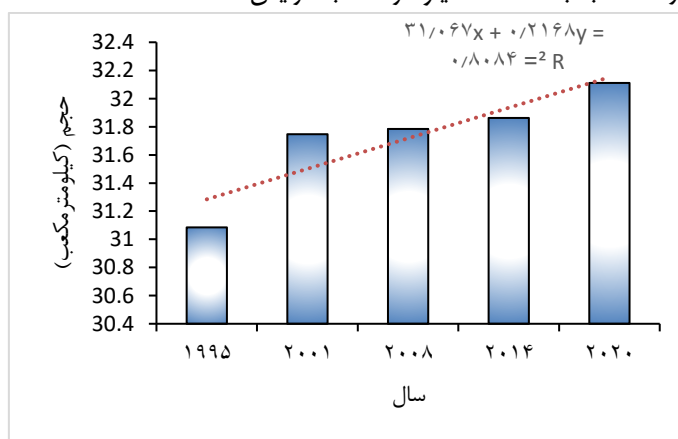


تپه‌های ماسه‌ای در بخش‌های وسیعی از منطقه مورد مطالعه مشاهده شد (شکل ۶ ب). مقادیر حداکثر، میانگین و حداقل ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای در منطقه مورد مطالعه به ترتیب ۱۲۱/۹۱، ۳۳ و ۰/۱۵ متر تعیین شد.



شکل ۶. تغییرات زمانی (الف) و مکانی (ب) ارتفاع تپه‌های ماسه در ارگ کاشان

در این مطالعه همچنین حجم سطحی تپه‌های شنی محاسبه شد. تغییرات حجم تپه‌های شنی در طول ۲۵ سال در شکل ۷ نشان داده شد. نرخ تغییر حجم و همبستگی به ترتیب ۰/۲۱۶ و ۰/۹ در تپه‌های ماسه‌ای بود. به طور کلی حجم سطحی تپه‌های شنی منطقه کاشان حدود ۱/۰۲ کیلومتر مکعب در طی یک دوره ۲۵ ساله افزایش یافته است، به طوریکه طی سال‌های ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱ حدود ۰/۶۶ کیلومتر مکعب، از ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ حدود ۰/۳۱ کیلومتر مکعب، از ۲۰۰۸ تا ۲۰۱۴ حدود ۰/۷۸ کیلومتر مکعب و از ۲۰۱۴ به بعد ۰/۲۴۸ کیلومتر مکعب افزایش مشاهده شد.

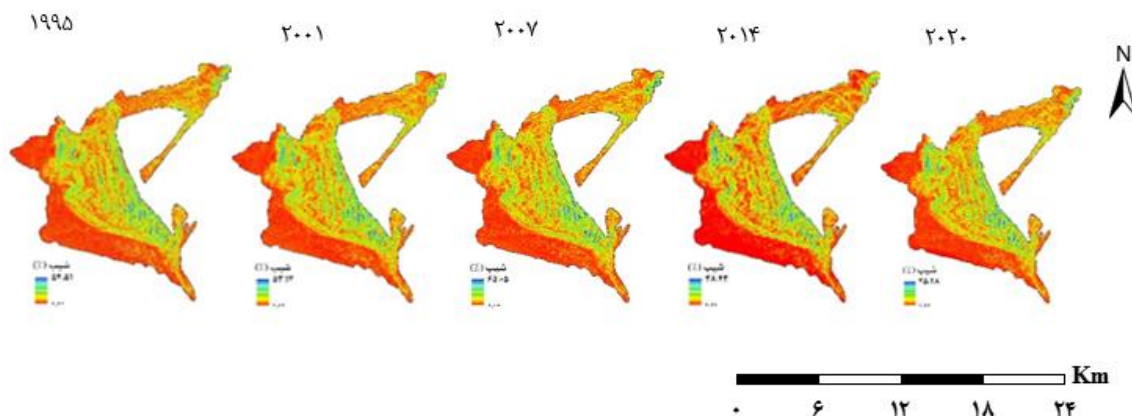


شکل ۷. تغییرات حجم سطحی تپه‌های ماسه‌ای ارگ کاشان طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۰

توزیع زمانی و مکانی شیب تپه‌های ماسه‌ای در شکل ۸ نشان داده شده است. بر این اساس از سال ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱ مقدار شیب

کاهش، در سال ۲۰۰۸ افزایش، از ۲۰۱۴ تا ۲۰۰۸ کاهش و در ۲۰۲۰ افزایش یافت. بیشترین مقدار شیب در سال ۲۰۰۸ مشاهده

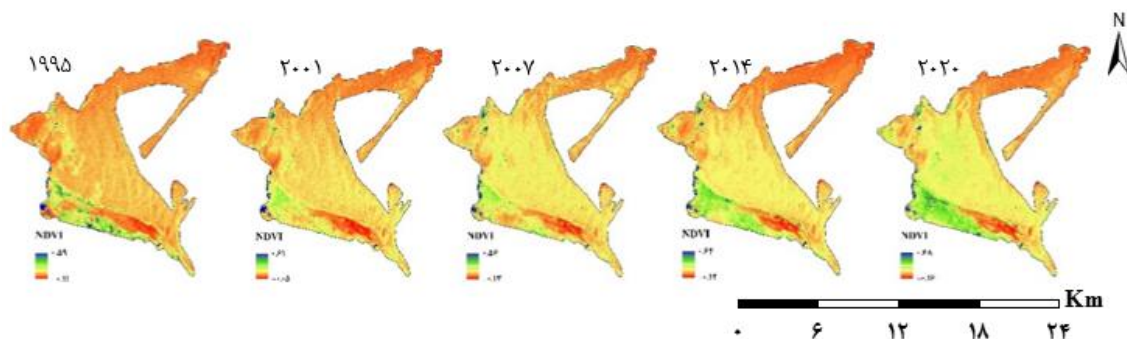
شد در حالیکه کمترین مقدار آن مربوط به سال ۲۰۱۴ بود. از نظر توزیع مکانی نیز بخش وسیعی از منطقه مورد مطالعه را شیب‌های کم شامل شد در حالیکه شیب‌های زیاد، بخش کوچکی از شمال شرقی، غرب، شرق و جنوب شرقی را به خود اختصاص داد.



شکل ۸. تغییرات زمانی و مکانی شیب در تپه‌های ماسه‌ای ارگ کاشان طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۰

### تغییرات پوشش گیاهی

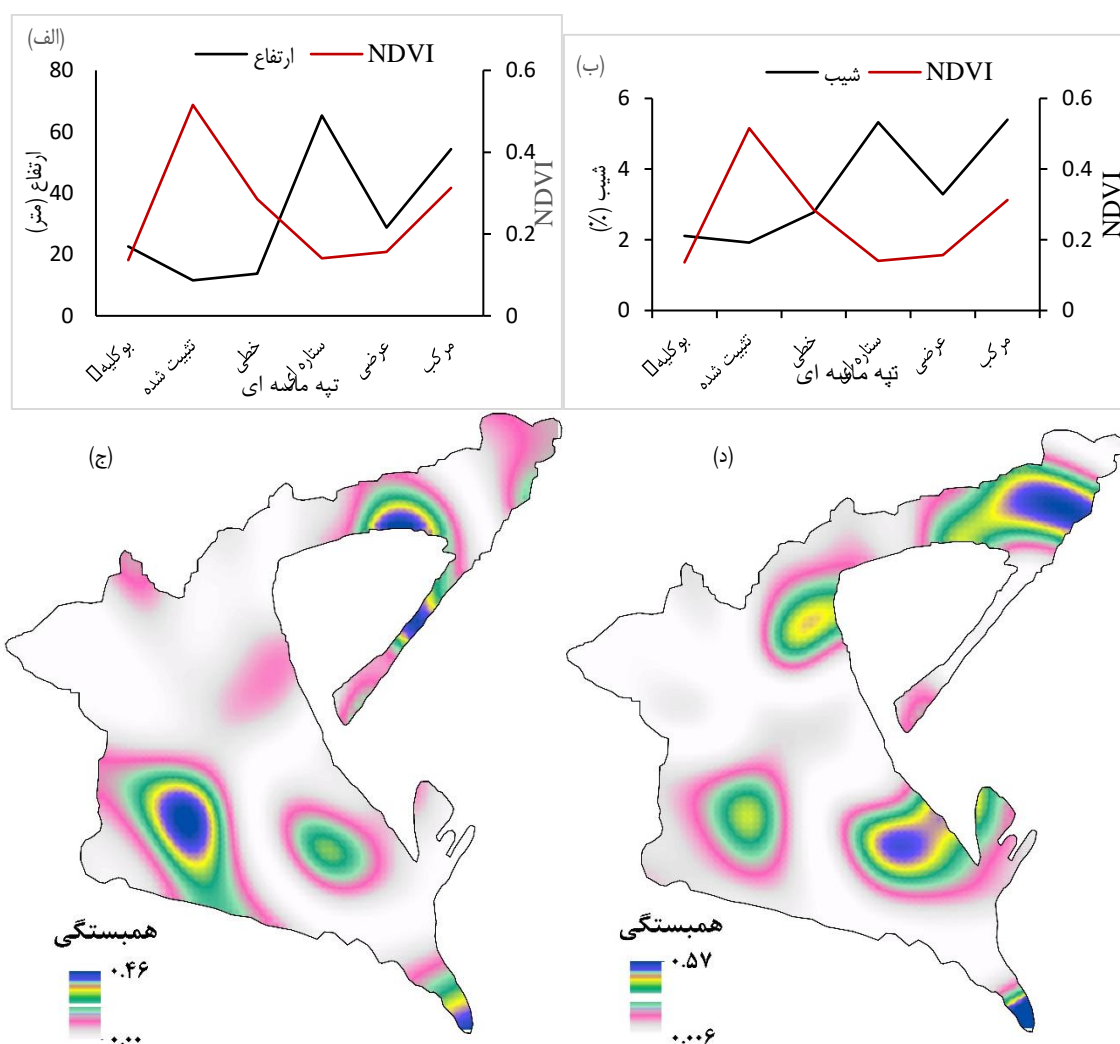
تغییرات زمانی و مکانی NDVI در شکل ۹ نشان داده شده است. بر این اساس مقدار NDVI از ۱۹۹۵ تا ۲۰۰۱ افزایش، از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ کاهش و از ۲۰۰۸ به بعد افزایش داشت. کمترین و بیشترین مقدار NDVI به ترتیب در سال‌های ۲۰۰۸ و ۲۰۲۰ مشاهده شد. از نظر توزیع مکانی نیز بیشترین مقدار NDVI در بخش جنوب غربی و غرب منطقه مورد مطالعه که متناسب با تپه‌های شنی تثبیت شده بود، مشاهده شد. بیشترین مقدار NDVI در بخش تپه‌های ماسه‌ای تثبیت شده مشاهده شد که در این بخش بیشتر توسط جنگل‌های دست‌کاشت قابل مشاهده است.



شکل ۹. تغییرات زمانی و مکانی NDVI در تپه‌های ماسه‌ای ارگ کاشان طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۰

### رابطه ارتفاع و شیب تپه‌های ماسه‌ای با NDVI

رابطه بین ارتفاع و شیب تپه‌های ماسه‌ای با NDVI نشان داد که از بوکلیه بارخانی به سمت تپه‌های تثبیت شده با افزایش مقدار شاخص فوق ارتفاع و شیب تپه کاهش داشت در حالیکه از تپه‌های تثبیت شده به سمت عرضی با کاهش مقدار NDVI ارتفاع و شیب افزایش داشت (شکل ۱۰ الف و ب). نتایج حاصل از همبستگی بین خصوصیات مورفولوژیکی تپه‌های ماسه‌ای با NDVI از طریق رگرسیون وزن‌دار فضایی (GWR) نشان داد که بین این عوامل در همه بخش‌ها همبستگی مثبت وجود دارد (شکل ۱۰ ج و د). میزان همبستگی بین ارتفاع و شیب جزئی با NDVI در بخش‌های شمال شرق، جنوب غرب و جنوب شرق که بیشتر از بخش‌های دیگر منطقه مطالعاتی تعیین شد. به علاوه، حداکثر مقدار بین ارتفاع و شیب با NDVI به ترتیب ۰/۵۷ و ۰/۴۶ محاسبه شد که برای عامل ارتفاع مربوط به تپه‌های تثبیت شده و بوکلیه بارخانی بود. در حالی که برای عامل شیب بیشترین همبستگی در بوکلیه بارخانی، تپه عرضی و تثبیت شده مشاهده شد.



شکل ۱۰. رابطه NDVI با ارتفاع (الف) شیب (ب) همبستگی بین NDVI و ارتفاع (ج) و شیب (د) با استفاده از رگرسیون وزن-دار فضایی

### تغییرات درصد پوشش در گونه‌های مختلف

در منطقه مورد مطالعه گونه‌های اسکمبیل (*Calligonum Comosum*)، کلبیت (*Cyperus conglomerates*)، سید (*Stipagrostis Plumosa*) و دم‌گاو (*Smiriviva Iranica*) مشاهده شد (جدول ۱ و شکل ۱۱). در منطقه مورد مطالعه گونه کلبیت بیشترین درصد پوشش را به خود اختصاص داد در حالیکه کمترین درصد پوشش گیاهی مربوط به گونه دم‌گاو تعیین شد (شکل ۱۲). نتایج حاصل از تحلیل چندمتغیره انوا و مقایسه آماری نشان داد که بین درصد پوشش چهار گونه اسکمبیل، کلبیت، سید و دم‌گاو در منطقه مورد مطالعه تفاوت معنی‌داری ( $Pvalue < 0.05$ ) وجود دارد (جدول ۲). نتایج حاصل از تحلیل چندمتغیره انوا و مقایسه آماری نشان داد که درصد پوشش گونه اسکمبیل با کلبیت و سید ۳ تفاوت معنی‌داری ( $p < 0.05$ ) داشتند در حالی که با گونه دم‌گاو تفاوت معنی‌دار نداشت. از سوی دیگر گونه کلبیت و سید وضعیت مشابهی داشتند و درصد پوشش آنها با گونه‌های دیگر اختلاف معنی‌داری را نشان دادند ( $p < 0.05$ ).

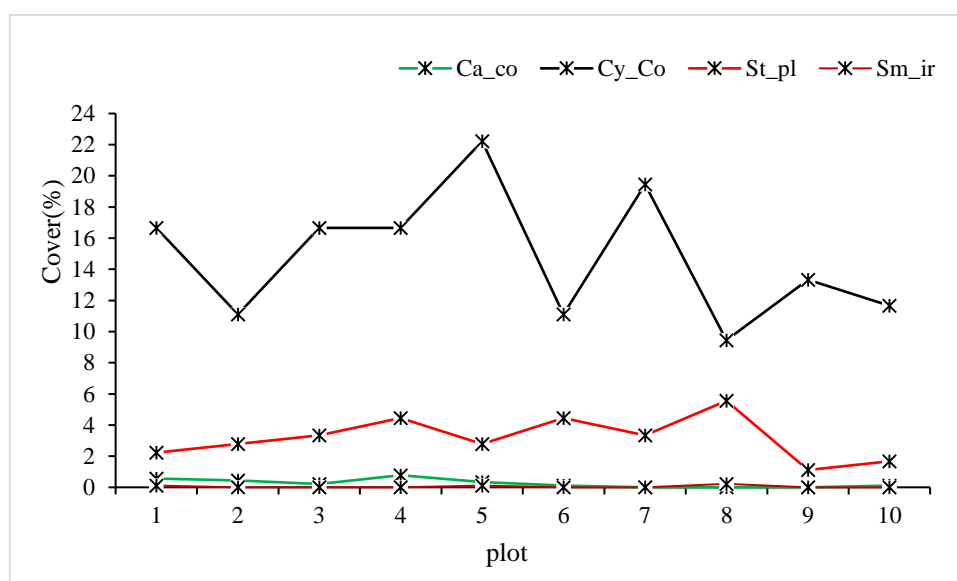
در صورتیکه گونه دم گاوی با ۲ گونه کلیت و سبذ اختلاف معنی دار و با گونه اسکمبیل اختلاف معنی‌داری را از نظر درصد پوشش نشان نداد.

جدول ۱. گونه‌های موجود در سطح تپه‌های شنی ارگ کاشان

ردیف	نام گونه	نام علمی	فرم رویشی
۱	اسکمبیل	<i>Calligonum comosum</i>	درختچه
۲	کلیت	<i>Cyperus conglomerates</i>	بوته‌ای
۳	دم گاوی	<i>Smiriviva iranica</i>	درختچه
۴	سبذ پاکوتاه	<i>Stipagrostis plumosa</i>	علفی



شکل ۱۱. نمایی کلی از گونه‌های گیاهی ماسه‌دوست موجود در تپه‌های ماسه‌ای ارگ کاشان



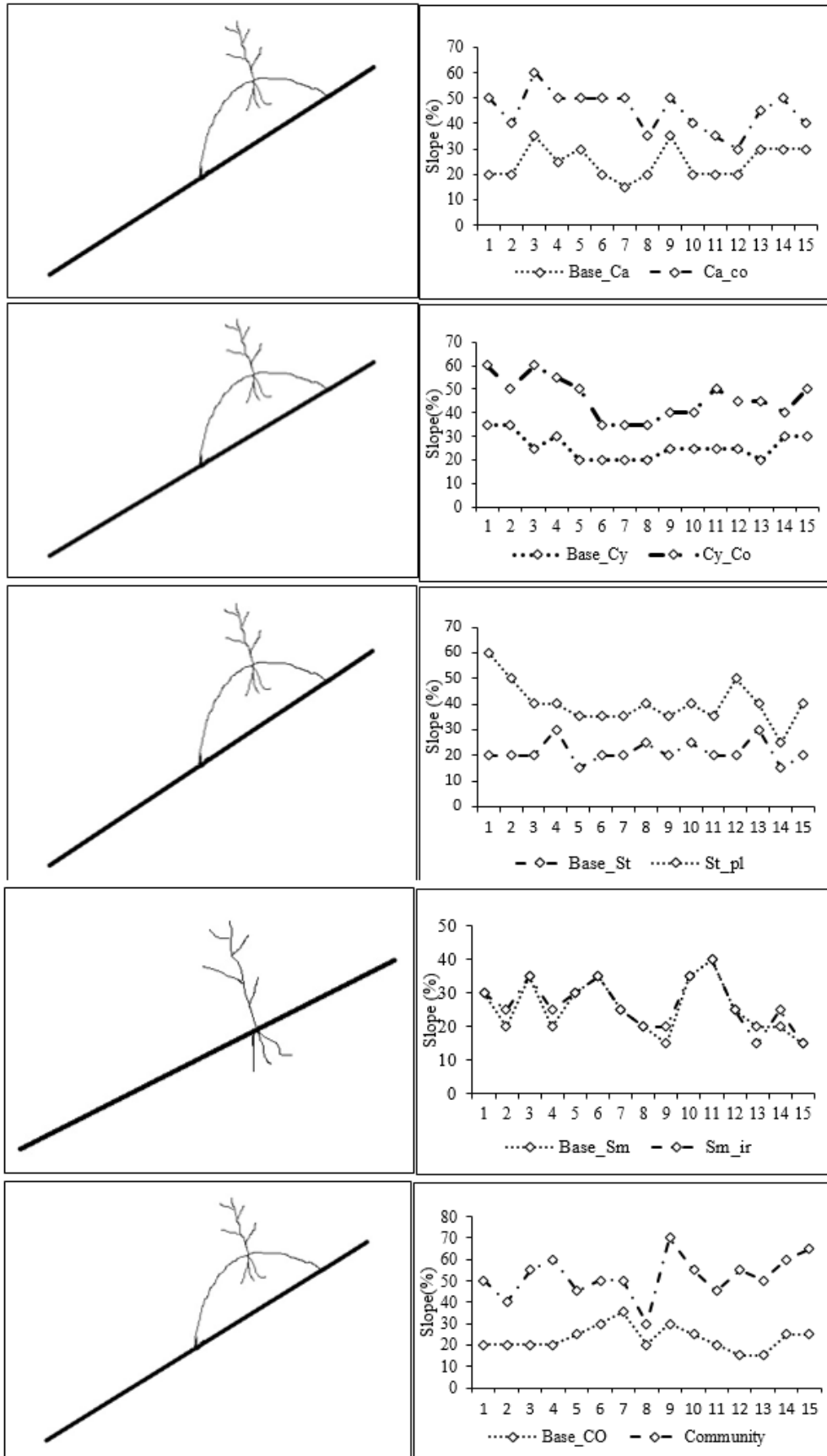
شکل ۱۲. درصد پوشش گیاهی برای هر یک از گونه های گیاهی

جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل واریانس چند متغیره (ANOVA) برای درصد پوشش گونه های مورد مطالعه

متغیرها	گونه‌ها (I)	گونه‌ها (J)	Mean Difference (I-J)	Std. Error	p-value
پوشش (%)	Ca-Co	Ju_gl	-1.45778*	.09284	.000
		St_pl	-.29111*	.09284	.003
		Sm_ir	.02000	.08596	.817
	Ju_gl	Ca-Co	1.45778*	.09284	.000
		St_pl	1.16667*	.09284	.000
		Sm_ir	1.47778*	.08596	.000
	St_pl	Ca-Co	.29111*	.09284	.003
		Cy_Co	-1.16667*	.09284	.000
		Sm_ir	.31111*	.08596	.001
	Sm_ir	Ca-Co	-.02000	.08596	.817
		Cy_Co	-1.47778*	.08596	.000
		St_pl	-.31111*	.08596	.001

### تاثیر پوشش گیاهی بر پایداری دامنه (شیب جزئی)

نتایج مربوط به بررسی تاثیر پوشش گیاهی بر پایداری دامنه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. از بین گونه های موجود در منطقه مورد مطالعه اسکمبیل، سبد و کلیت موجب افزایش پایداری دامنه شدند اما گونه دم گاوی تاثیری نداشت. به طوریکه در مورد گونه های افزایش دهنده پایداری دامنه موجب تجمع خاک بیشتر در پای بوته و افزایش شیب شدند. به طوریکه گونه های اسکمبیل و کلیت شیب جزئی را از ۳۵ به ۶۰٪، سبد از ۳۰ به ۶۰٪، گونه دم گاوی صفر و در حالت ترکیب گونه ها شیب جزئی از ۳۰ به ۷۰٪ درصد افزایش دادند. بیشترین میزان افزایش شیب پایداری دامنه در حالت ترکیب گونه ها (۴۰٪) و گونه سبد (۳۰٪) و کمترین مقدار آن در گونه های اسکمبیل و کلیت (۲۵٪) مشاهده شد.



شکل ۱۳. تاثیر پوشش گیاهی بر شیب جزئی دامنه

### بحث و نتیجه‌گیری

در مناطق خشک و نیمه‌خشک، تپه‌های ماسه‌ای به عنوان مهمترین برایندهای فرایندهای بادی همواره در حال حرکت و جابجایی هستند که مقدار این حرکت ناشی از جهت و شدت باد، توپوگرافی محل، رطوبت منطقه، پوشش گیاهی، سازندهای ریزدانه و فعالیت‌های انسانی است. امروزه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با وضوح بالا و انتشار داده‌های مدل رقومی ارتفاع STRM مبنایی برای تجزیه و تحلیل کمی از الگوهای آرایش بستر بادی در مقیاس بزرگ را فراهم کرده است. با توجه به موارد فوق در مطالعه حاضر با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ASTER، گوگل ارث و مشاهدات میدانی عوامل مورفولوژیکی شامل ارتفاع، شیب و حجم تپه‌های ماسه‌ای، ترکیب و درصد پوشش گیاهی و رابطه این شاخص‌های مورفولوژیکی تحت تاثیر جوامع گیاهی با استفاده از شاخص‌های دورسنجی (NDVI) طی دوره ۱۹۹۵-۲۰۲۰ و همچنین بررسی کارایی تک تک گونه‌های گیاهی به صورت میدانی در منطقه بیابانی ارگ کاشان بررسی شد. به طور کلی شش نوع بوکلیه بارخانی، تثبیت شده، خطی، ستاره‌ای، عرضی و مرکب مشخص شد، در تایید این نتایج نظری و همکاران (۱۳۹۶) نیز گزارش کردند که در منطقه ارگ کاشان تپه‌های مرکب و ستاره‌ای به ترتیب بیشترین و کمترین سطح را به خود اختصاص دادند همچنین توکلی فرد و همکاران (۱۳۹۲) نیز گزارش کردند که تپه‌های ماسه‌ای موجود در ارگ کاشان شامل تپه‌های عرضی، مرکب، بوکلیه بارخانی، ستاره‌ای و تپه‌های خطی (تثبیت شده در جنوب ارگ) می‌باشند.

افزایش در مشخصه‌های مورفولوژیکی و شاخص NDVI تپه‌های ماسه‌ای ارگ کاشان در این دوره مطالعاتی مشاهده شد. از اینرو می‌توان بیان داشت که ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای در ابتدای ارگ کم می‌باشد و بتدریج افزایش می‌یابد تا اینکه در مرکز ارگ به بیشترین مقدار خود می‌رسد و بعد از آن نیز کاهش می‌یابد که با نتایج نظری و همکاران (۱۳۹۶) همخوانی دارد. همچنین دلیل این موضوع را بادهای موجود در منطقه نیز می‌توان گزارش کرد به طوریکه بر اساس مطالعات ابازی و همکاران (۱۳۹۴) بادهای منطقه کاشان به دلیل فراوانی زیاد قادر به حمل رسوب زیادی در طول سال هستند که نقش مهمی در شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای دارند. بر اساس مطالعات پیشین بادهای غالب در منطقه مورد مطالعه اغلب شرقی تا شمال شرقی است که تپه‌های ماسه‌ای تحت تاثیر آن قرار دارند. بادهای همگرا و محلی سبب تشکیل هرم‌های ماسه‌ای شده و بدین ترتیب بر ارتفاع و حجم تپه‌های ماسه‌ای به خصوص در بخش‌های مرکزی ارگ کاشان افزوده است. در محدوده زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۲۰ به ارتفاع و حجم تپه‌های ماسه‌ای افزوده شده که با خشکسالی‌های این دوره از منطقه کاشان مطابقت دارد (افشاری نیا و پناهی، ۱۴۰۰).

همچنین رابطه بین خصوصیات مورفولوژیکی با پوشش گیاهی نشان‌دهنده همبستگی مثبت بین این عوامل و تاثیر افزایشی در آنها بود. بر اساس تجزیه و تحلیل‌ها این نتیجه حاصل شد که فعالیت تپه‌های ماسه‌ای در منطقه ارگ کاشان محدود به بخش بالایی می‌شود. همچنین مقدار NDVI در تپه‌های تثبیت شده بیشتر از سایر تپه‌های ماسه‌ای است، در صورتیکه کمترین مقدار آن مربوط به بوکلیه بارخانی و ستاره‌ای بود. در مطالعات مشابه جعفری و همکاران (۱۳۸۳) گزارش کردند که درصد پوشش بومی در ناحیه تثبیت شده بیشتر بود و در نتیجه امکان بازگشت گونه‌های با ارزشتر گیاهی را فراهم می‌کند. دلیل این موضوع را چنین می‌توان بیان داشت که در مناطق تثبیت شده وجود پوشش گیاهی باعث افزایش مواد آلی در خاک می‌شود که این موضوع در درازمدت ساختار خاک را بهبود می‌بخشد و این امر شرایط را برای استقرار بیشتر پوشش گیاهی فراهم می‌آورد.

اسکمبیل، کلیت، سبد و دم‌گاو به عنوان گونه‌های ماسه‌دوست منطقه معرفی شدند که در مطالعات مشابه نیز بتولی و همکاران (۱۴۰۱) کلیت و سبد را شاخص‌ترین رستنی‌های شن دوست ماسه‌زارهای ریگ بلند معرفی کردند که در گستره تپه‌های شنی علفزار یکنواخت و پیوسته‌ای را بوجود می‌آورند. همچنین بیان کردند که بیشتر درخچه‌های مستقر در



دامنه‌های شیب‌دار تپه‌های ماسه‌ای، گونه‌های مختلف جنس اسکنبیل هستند که نتایج تحقیقات محقق فوق با نتایج مطالعه حاضر مطابقت دارد.

نتایج تحلیل کارایی این گونه‌ها در مورفولوژی دامنه تپه‌ها نشان داد گونه‌های فوق عملکرد یکسانی ندارند. به طوریکه ترکیب گونه‌ها و گونه سبب به ترتیب با افزایش شیب جزئی دامنه ۴۰ و ۳۰٪ بیشترین و گونه دم گاوی کمترین تاثیر را در شیب جزئی دامنه داشته است. دلیل این موضوع را چنین می‌توان بیان داشت که ارتفاع و حجم تاج پوشش گیاه نقش مهمی در ارتفاع تپه‌های ماسه‌ای دارد زیرا گیاه هرچه بلندتر و حجیم تر باشد ماسه بیشتری را به دام می‌اندازد و در نتیجه تپه ماسه‌ای بلندتر و با شیب بیشتری ایجاد می‌کند. در مورد گونه‌های درختی و درختچه ای نظیر اسکمبیل می‌توان بیان داشت که گونه‌های درختی و درختچه‌ای به دلیل نداشتن اندام هوایی قابل توجه بیشتر به صورت حفاظ عمل میکنند تا تله رسوبگیر (پورخسروانی، ۱۳۹۴). توسعه فناوری سنجش از دور، به‌ویژه هنگامی که با فناوری سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS) ترکیب شود، محققان اکنون روشی مؤثر برای انجام تحقیقات بیابان‌زایی در مناطق وسیع دارند. با تجزیه و تحلیل تصاویر سنجش از دور در یک دوره زمانی طولانی، ارزیابی سریع و دقیق روند بیابان‌زایی امکان‌پذیر شده است و در نتیجه به پیش‌بینی و مدیریت این مشکل کمک می‌کند. هر چند باید توجه داشت که روش‌های مذکور یک روش تخمینی بوده و با واقعیت موجود تفاوت‌هایی دارد اما در صورت استفاده از تصاویر با دقت بالا و قدرت تفکیک مکانی دقیق‌تر نتایج بهتری حاصل خواهد شد. با توسعه و رشد نرم‌افزارهای مختلف مدلسازی دستیابی به روش‌های کارآمد و مناسب در آینده دور از دسترس نخواهد بود که این موضوع بر کیفیت و دقت مطالعات مدل‌سازی کمی در محیط‌های بیابانی خواهد افزود. نتایج این مطالعه می‌تواند درک بهتری از کنترل‌های احتمالی در وضعیت رسوبی با امکان پیشنهاد و توسعه طیف وسیعی از مدل‌های پویایی رخساره در سیستم‌های بادی را فراهم کند. تغییرات مورفولوژیکی در تپه‌های شنی اطلاعات مهمی را ارائه می‌دهد که با آن می‌توان درک ما را از آرایش احتمالی در تپه‌های بادی قدیمی ممکن می‌سازد. از اینرو این کار گام مهمی در توسعه مدل‌های بهبود یافته برای توصیف پیچیدگی چینه‌شناسی و ناهمگونی در محیط‌های بیابانی است. همچنین تنوع پوشش گیاهی منجر به تنوع عملکرد در مورفولوژی تپه‌ها شده است و این موضوع بیانگر استفاده اکوسیستم از نقش همه گونه‌ها در تقابل با فرآیند بادی است، لذا این دستورالعمل می‌تواند در برنامه‌های اجرایی و پروژه‌های اقدام طرح‌های کنترل فرسایش بادی در این مناطق در دستور کار قرار گیرد. چنین مطالعاتی می‌تواند دانش ما را در مورد طبقه‌بندی کمی لندفرم‌های مناطق خشک بهتر از بررسی‌های بصری و میدانی توسعه دهد، همچنین استفاده از سنجش از دور اطلاعات دقیق‌تری را در زمینه پایش و ارزیابی تخریب سرزمین در اختیار مدیران قرار می‌دهد از اینرو استفاده از این روش‌ها پیشنهاد می‌شود. پوشش گیاهی مناطق بیابانی یکی از مهمترین شاخص‌های ارزیابی و پایش تخریب و بیابان‌زایی می‌باشد چرا که کوچکترین تغییرات در روند بیابان‌زایی عرصه‌ها از طریق بررسی پوشش گیاهی قابل پیگیری می‌باشد، از اینرو پیشنهاد می‌شود به دلیل کم‌هزینه بودن و دقت بالا قبل از عملیات میدانی اقدام به بررسی وضعیت تخریب منطقه طریق شاخص‌های گیاهی سنجش از دوری گردد. همچنین پیشنهاد می‌شود دستگاه‌های اجرایی با حفاظت از رویشگاه‌های طبیعی ماسه‌زارها، قرق نواحی در معرض تشدید فرسایش بادی و انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب و سازگار با شرایط محیطی خاک‌های ناپایدار ماسه‌ای، به‌ویژه در پروژه‌های عملیات اصلاحی و احیایی برنامه‌ریزی شده نسبت به مقابله با آثار مخرب اقدام کنند. افزون بر این، توجه ویژه و هوشمندانه به رصد آفات و بیماری‌های شایع رستنی‌های بیابانی، به‌ویژه دوره‌های خشکسالی و اقدامات عملی برای کنترل آنها، از جمله موارد اجتناب ناپذیری محسوب می‌شوند که بی‌توجهی به آنها، سبب تشدید زوال پوشش گیاهان بومی می‌شود. باتوجه به تنوع گونه‌ای رستنی‌های مستقر در گستره ماسه‌زارهای ریگ بلند، ضروری است دستگاه‌های متولی در امر حفاظت و حمایت از ذخایر ژنتیکی گیاهی عرصه تپه‌های ماسه‌ای، تلاش مضاعفی را برای پایداری این زیست بوم بیابانی صرف کنند.



## منابع

- افشارنیا، م.، پناهی، ف.، ۱۴۰۰. تاثیر خشکسالی اقلیمی بر شوری خاک سطحی در دشت کاشان، مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، دوره ۱، شماره ۲، صص ۴۲-۶۲.
- بتولی، ح.، ۱۴۰۱. ماسه‌زارهای ریگ بلند با رُستنی‌های متنوع در شمال آران و بیدگل (استان اصفهان). طبیعت ایران، دوره ۷، شماره ۱، صص ۹۳-۱۱۰.
- توکلی‌فرد، ا.، نظری سامانی، ع.ا.، قاسمیه، ه.، مشهدی، ن.، ۱۳۹۳. کاربرد ویژگی‌های دانه‌بندی رسوبات بادی در تعیین مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای همگن براساس تحلیل‌های آماری دو و چند متغیره (مطالعه موردی: ارگ کاشان). مدیریت بیابان، شماره ۲، صص ۱۳-۲۶.
- جعفری، م.، آذرنبوند، ح.، توکلی، ح.، زهتابیان، ح.، اسمعیل‌زاده، ح.، ۱۳۸۳. بررسی تاثیر گونه‌های گیاهی تاغ و اسکمبیل بر خصوصیات فیزیکی و شیمیایی تپه‌های ماسه‌ای در منطقه ریگ بلند کاشان، پژوهش و سازندگی، دوره ۶۴، صص ۱۶-۲۱.
- عباسی، ح.م.، ۱۴۰۰. پراکنش تپه‌های ماسه بادی ایران. طبیعت ایران، جلد ۶، شماره ۲، صص ۳۷-۴۴.
- نظری سامانی، ع.ا.، عباسی، ح.ر.، احمدی، ح.، راهداری، م.ر.، ۱۳۹۶. مدل‌سازی کمی ارتفاع و فاصله بین تپه-های ماسه‌ای با استفاده از مطالعات ژئومورفومتریک در بیابان‌های داخلی ایران، فصلنامه علمی-پژوهشی تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۲۴، شماره ۱، صص ۲۱۰-۲۲۳.
- Abassi, H.R., Kashki, M.T., Rahdari, M.R., Gohardoust, A., & Lotfi Nasab Asl, S. (2020). The Features of Wind's Regime and Sand Transport Potential in Sarakhs Erg. Iran. Iranian Journal of Range and Desert Research, 27, 371-384. (In Persian)
- Ahmadi, H. (2008). Applied Geomorphology (Desert-Wind Erosion); University Of Tehran Press: Tehran, Iran.
- Ahmadi, H. (2004). Report of Sand Seas National Project in Iran; University of Tehran: Tehran, Iran.
- Ayansina, A. (2016). Seasonality in the daytime and night-time intensity of land surface temperature in a tropical city area. Science of The Total Environment, 557, 415-424.
- Cowling, R.M., Pressey, R.L., Lombard, A.T., Desmet, P.G., & Ellis, A.G. (1999). From representation to persistence: Requirements for a sustainable system of conservation areas in the species-rich Mediterranean climate desert of southern Africa. Diversity Distribution, 5, 51-71.
- Clinton, N., & Gong, P. (2013). MODIS detected surface urban heat islands and sinks: global locations and controls. Remote Sensing Environment, 134, 294-304.
- Fryberger, S.G. (1979). "Dune forms and wind regime," in A Study of Global Sand Seas, edited by E. D. McKee (U.S. Geol. Surv., 1979), 1052, 137-169.
- Keesstra, S., Mol, G., De Leeuw, J., Okx, J., De Cleen, M., & Visser, S. (2018). Soil-related sustainable development goals: Four concepts to make land degradation neutrality and restoration work. Land, 7, 133.
- Heymans, A., Breadsell, J., Morrison, G.M., Byrne, J.J., & Eon, C. (2019). Ecological urban planning and design: A systematic literature review. Sustainability, 11, 3723.
- Kinast, S., Meron, E., Yizhaq, H., & Ashkenazy, Y., (2013). Biogenic crust dynamics on sand dunes, Physical Review, E 87, 020701(R).
- Lancaster, N. (1988) Controls of eolian dune size and spacing. Geology, 16:972-975.
- Li, B., Tang, H., & Chen, D. (2009) Drought monitoring using the modified temperature/vegetation dryness index, 2nd international congress on image and signal processing. <https://doi.org/10.1109/CISP.2009.5304333>

- Mayaud, J.R., & Webb, N.P. (2017). *Vegetation in drylands: Effects on wind flow and aeolian sediment transport*. *Land*, 6, 64.
- Mihalcea, C., Brock, B.W., Diolaiuti, G., Agata, C.D., Citterio, M., Kirkbride, M.P., Culter, M.E.J., Smiraglia, C. (2008). *Using ASTER satellite and ground-based surface temperature measurements to derive supraglacial debris cover and thickness patterns on Miage Glacier (Mont Blanc Massif, Italy)*. *Cold Regions Science and Technology*, 52, 341–354.
- Nazari Samani, A.A., Rahdari, M.R., & Rahi, G. (2020). *Assessment of Spatial variabilities of Soil Erodibility by Wind on Margial lands of the Lake Urmia*. *Desert Managment*, 8, 53–72. (In Persian)
- Nazari Samani, A., Khosravi, H., Mesbahzadeh, T., Azarakhshi, M., & Rahdari, M. R. (2016). *Determination of sand dune characteristics through geomorphometry and wind data analysis in central Iran (Kashan Erg)*. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(18).
- Pelletier, J.D., Brad Murray, A., Pierce, J.L., Bierman, P.R., Breshears, D.D., Crosby, B.T., Ellis, M., Foufoula-Georgiou, E., Heimsath, A.M., & Houser, C., (2015). *Forecasting the response of Earth's surface to future climatic and land use changes: A review of methods and research needs*. *Earth's Future*, 3, 220–251.
- Pike, R.J., & Dikau, R. (2000). *Advances in geomorphometry*. *N F Exporters and Suppliers List in Bangladesh*, 101- 238.
- Pye, K., Tsoar, H. (2008). *Aeolian Sand and Sand Dunes*; Springer Science & Business Media: Berlin/Heidelberg, Germany.
- Rouse, J.W., Haas, H., Schell, J.A., & Deering, D.W. (1974) *Monitoring vegetation system in the Great Plains with ERTS*. *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*. Greenbelt, USA; NASA SP-351, 3010-3017.
- Suter-Burri, K., Gromke, C., Leonard, K., & Graf, F. (2013). "Spatial patterns of aeolian sediment deposition in vegetation canopies: Observations from wind tunnel experiments using colored sand," *Aeolian Research*, 8, 65–73.
- Swet, N., Kok, J.F., Huang, H., Yizhaq, H., & Katra, I. (2020). *Low dust generation potential from active sand grains by wind abrasion*.
- Usery, E.L. (2010). *The digital transition in cartography: USGS data innovations, 1970s*. In *Proceedings: 3rd International Symposium on the History of Cartography*. University of Texas at Arlington, Arlington.
- Xu, Z., Mason, J.A., Xu, C., Yi, S., Bathiany, S., Yizhaq, H., Zhou, Y., Cheng, J., Holmgren, M., & Lu, H. (2015). "Climate-driven changes to dune activity during the last glacial maximum and deglaciation in the mu us dune field, North-Central China," *Earth Planet. Science Letters*, 427, 149–159.
- Yao, Z., Xiao, J., & Ma, X. (2021). *The impact of large-scale afforestation on ecological environment in the Gobi region*. *Scientific Reports*, 11, 14383.
- Yizhaqa, H., & Ashkenazy, Y. (2022). *Spatiotemporal dynamics of biocrust and vegetation on sand dunes*. *Chaos*, 32, 053103, doi: 10.1063/5.0087296.
- Yu, L., Wu, Z., Du, Z., Zhang, H., & Liu, Y. (2021). *Insights on the roles of climate and human activities to vegetation degradation and restoration in Beijing-Tianjin sandstorm source region*. *Ecological Engineering*, 159, 106105.