

## برآورد جابجایی مسطحاتی و ارتفاعی تپه‌های ماسه‌ای ریگ اردستان با استفاده از تداخل سنجی راداری و شاخص‌های طیفی

علی احمدآبادی\* - استادیار گروه ژئومورفولوژی دانشکده علوم جغرافیائی، دانشگاه خوارزمی.  
امیر کرم - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیائی، دانشگاه خوارزمی.  
امیر صفاری - دانشیار گروه ژئومورفولوژی، دانشکده علوم جغرافیائی، دانشگاه خوارزمی.  
مهدی یزدان پناه - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه خوارزمی.

پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۰۲      تأیید نهایی: ۱۳۹۸/۱۰/۲۳

### چکیده

جابجایی و ناپایداری تپه‌های ماسه‌ای از مهمترین دغدغه‌های نواحی مرکزی ایران است و این چالش از اولویت‌های برنامه‌ریزان آمایش ژئومورفولوژیکی جهت تعیین اولویت‌ها و راهکارهایی به منظور کاهش اثرات مخرب آن‌ها در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه از تداخل سنجی راداری بر روی تصاویر Sentinel 1 و نسبت گیری بر روی تصاویر چندباندی Sentinel 2 به ترتیب برای برآورد مدل رقومی ارتفاعی، جابجایی عمودی و جابجایی مسطحاتی تپه‌های ماسه‌ای ریگ اردستان در شمال استان اصفهان استفاده شد. دقت سنجی نتایج با استفاده از نقاط میدانی برای RMSE، MAE و R2 در جابجایی عمودی به ترتیب ۰،۰۵۲، ۰،۰۳۷ و ۰،۸۶ بود، در حالی که برای مدل رقومی ارتفاعی و جابجایی مسطحاتی به ترتیب ۲،۴۲، ۲،۰۶ و ۰،۷۳ و ۰،۶۷، ۳،۷۳، ۴،۰۶۸ را نشان می‌داد. نتایج مطالعه نشان داد که سمت حرکت کلی تپه‌های ماسه‌ای در بازه زمانی مطالعه شده از شمال شرقی به جنوب غربی می‌باشد، از طرفی اندازه جابجایی تپه‌های ماسه‌ای در ابعاد مسطحاتی و ارتفاعی به حجم آن‌ها بستگی دارد، این مطالعه با به کارگیری تداخل سنجی راداری برای مدلسازی جابجایی عمودی، بر اهمیت و قابلیت بالقوه تصاویر راداری در پایش لندفرم‌های بادی که از عوامل تهدید آمیز حیات ساکنین نواحی مرکزی ایران می‌باشند، تأکید داشت.

واژگان کلیدی: تپه‌های ماسه‌ای، تداخل سنجی راداری، جابجایی عمودی، جابجایی مسطحاتی، ریگ اردستان.

## مقدمه

شرایط خشک و فراخشک حاکم بر بخش وسیعی از ایران همراه با بارندگی سالانه کمتر از ۱۵۰ میلی متر موجب شده است که تقریباً ۸۰ میلیون هکتار از مساحت ایران را مناطق کویری، تپه‌های ماسه‌ای و نواحی با پوشش گیاهی تنک و یا ناچیز بپوشانند. در حالی که ماسه‌ها و ریگ‌های روان حدود ۱۲ میلیون هکتار از این مساحت را اشغال کرده است، ۵۰ درصد سطح مذکور یعنی تقریباً ۶ میلیون هکتار توسط تپه‌های ماسه‌ای و شنی فعال پوشانیده شده است (نگارش و لطیفی، ۱۳۸۷).

بخشی از تپه‌های ماسه‌ای سبب شکل‌گیری کانون‌های بحران می‌شود که تهدیدکننده حریم مسکونی شهرها، روستاها و مراکز اقتصادی، نظامی و خطوط مواصلاتی می‌باشد (رفاهی، ۱۳۸۳). از جمله بلای طبیعی که هر ساله باعث وارد آمدن خسارت زیادی به ویژه در نواحی خشک و بیابانی می‌شود، طوفان‌های ماسه‌ای است (امیدوار، ۱۳۸۵). باد توان فرسایش تقریباً ۲۸٪ از خشکی‌های جهان را دارد (وب و همکاران، ۲۰۰۶). طوفان‌های ماسه‌ای ناشی از جابجایی لندفرم‌های ماسه‌ای نه تنها در ایران بلکه در سایر کشورهای آسیایی، آفریقایی و آمریکایی هم موجب بروز خسارت‌های مالی و جانی فراوانی می‌شود (لین، ۲۰۰۲) که از آن جمله می‌توان به طوفان سیاه شمال چین که در سال ۱۹۹۳ باعث کشته شدن ۸۵ نفر و تخریب حدود ۳۷۳۰۰۰ هکتار از محصولات زراعی و باغی گردید (یولین، ۲۰۰۲) و همچنین جابجایی سالانه حداقل ۱۶۱ میلیون تن خاک در کانادا به ارزش ۲۴۹ میلیون دلار آمریکا اشاره نمود (اسکویرز، ۲۰۰۲).

شن‌زارها و تپه‌های فعال و نیمه فعال نواحی مرکزی و کویری کشور با وزش باد جابجا شده و با هجوم خود به اراضی کشاورزی، نهرها و کانال‌های آب، راه‌های ارتباطی، شهرها و مراکز روستایی و تأسیسات اقتصادی و حیاتی، مشکلات عدیده‌ای را برای زندگی ساکنان فراهم می‌کند و به فعالیت‌های زیربنایی آن نواحی لطمات جبران ناپذیری می‌زند. به طور که در دهه‌های اخیر اثرات زیان بخش و جبران ناپذیری به محیط زیست انسانی وارد آمده است و در اثر استفاده نابجا از منابع طبیعی بیابان‌ها به سرعت گسترش یافته‌اند (احمدیان، ۱۳۷۸). به طور کلی جابجایی و ناپایداری تپه‌های ماسه‌ای از مهمترین دغدغه‌های محیطی و اقتصادی-اجتماعی نواحی مرکزی ایران محسوب می‌شود که همواره ساکنین شهرها و روستاهای این نواحی را با مشکلات عدیده‌ای مواجه می‌سازد؛ مشکلاتی که مسائل معیشتی ساکنین آنجا را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد، به طوری که به دنبال تداوم ناپایداری لندفرم‌های ماسه‌ای ابعاد مختلف زندگی روزمره ساکنین با سختی‌ها و آسیب‌هایی جدی مواجه می‌شود و حتی در طولانی مدت منجر به مهاجرت ساکنین روستاها و شهرهای کوچک به مناطق مصون از این مخاطرات می‌گردد که خود زمینه ساز ظهور مسائل و مشکلات اجتماعی متعاقب خواهد شد. بنابراین چالش ناپایداری و جابجایی تپه‌های ماسه‌ای روان می‌تواند به عنوان یکی از اولویت‌های برنامه‌ریزان و مدیران محیطی و آمایش ژئومورفولوژیکی جهت تعیین اولویت‌ها و راهکارهایی به منظور کاهش اثرات مخرب آن‌ها در نظر گرفته شود؛ زیرا اهمیت مطالعه تپه‌های ماسه‌ای به علت تأثیرات مخربی است که آن‌ها بر روی منابع آب و خاک، حیات گیاهی و جانوری و تأسیسات و راه‌های ارتباطی دارند (رامشت و همکاران، ۱۳۹۱).

## مبانی نظری

پیشینه مطالعات و پژوهش‌های انجام شده با محوریت تپه‌های ماسه‌ای و لندفرم‌های منفرد به دهه ۱۹۷۰ بر می‌گردد. برخی از این مطالعات با تمرکز بر روی برخان‌ها (فرانک و کوکیورک، ۱۹۹۶، لانکاستر و همکاران، ۱۹۹۶، ویگز و همکاران ۱۹۹۶) و بعضی بر روی تپه‌های خطی (لیونینگ استون، ۲۰۰۳ و ونگ و همکاران، ۲۰۰۲) انجام شده‌اند. به طور کلی بسیاری از مطالعات اولیه بر اندازه‌گیری جریان باد و ماسه با استفاده از بادسنج متمرکز شده‌اند. در این میان محدود پژوهش‌هایی راجع به برآورد جابجایی لندفرم‌های بادرفتی مبتنی بر تکنیک‌های میدانی، تصاویر فتوگرامتری و سنجش از دور گزارش شده‌اند با این حال این گونه مطالعات به دلیل ساده انگاری در برآورد جابجایی و تغییرات مکانی

لندفرم های بادرفتی به نتایج مطلوبی منجر نشده اند (لیوینگ استون و همکاران، ۲۰۰۷). مطالعات مقیاس میدانی لندفرم ها از هنگام برقراری دسترسی عموم به تصاویر منظم سنجش از دور به صورت شتابان مورد توجه پژوهشگران این عرصه قرار گرفته است. مطالعات مقیاس میدانی، جنبه های متنوعی از لندفرم ها را شامل می شوند از جمله: نقشه برداری و طبقه بندی، تحلیل الگوها، تحلیل مکانی، مطالعات تغییرات توپوگرافی و مورفولوژی لندفرم ها و برآورد خصوصیات کانی شناختی و رسوبی (الموتیری و همکاران، ۲۰۱۶). از طرفی مدل سازی کمی پویایی لندفرم های بادرفتی پدیده ای نسبتاً طولانی دارد. بر مبنای نخستین شیوه های تحلیلی درک ژئومورفولوژیکی و انتقال ماسه ای با مدل های کامپیوتری جریان باد در گستره تپه های ماسه ای ترکیب شده است. با این حال در مدل سازی های اولیه، مطالعات معدودی الگوهای فرسایش و رسوب گذاری تپه های ماسه ای را در ترکیب با هم مدل سازی کرده اند به طوری که مدل های مطالعه شده هم نتوانستند برآوردهایی مطمئن از توسعه و حرکت تپه های ماسه ای ارائه دهند (ویگز، ۲۰۰۱). به طور کلی مدل های اولیه گرایش به مطالعه ناپایداری هایی داشتند که گمان می شد حاصل از حساسیت بالای سرعت انتقال به نوسانات سرعت باد و وضعیت توپوگرافی می باشد (والمسلی و هووارد، ۱۹۸۵). در ادامه به برخی از مهمترین مطالعات خارجی و داخلی انجام گرفته در این حوضه اشاره می شود:

دابی و همکاران (۱۹۹۸) با کمک تصاویر چند زمانه به مطالعه و کنترل تغییرات تپه های شنی شمال غرب کویت از منظر شکل و حرکت پرداختند. در مطالعه آن ها ۴ تصویر Landsat مربوط به سال های مختلف انتخاب و از طریق تفسیر بصری، نقشه تپه های شنی تهیه و روند تغییرات آن ها ممکن شد. مورسی و همکاران (۲۰۰۱) با استفاده از تحلیل داده های هواشناسی در یک دوره سی ساله از ۱۹۶۷ تا ۱۹۹۷ میزان پتانسیل حمل ماسه را در بیابان الخانکای مصر مورد بررسی قرار دادند. بی شاپ (۲۰۱۰) از تحلیل نزدیکترین همسایگی برای توصیف برخاها استفاده کردند، رویکرد آن ها مبتنی بر شاخص های جغرافیایی در درک میدانی خودسازماندهی، بلوغ و تغییرات محیطی لندفرم های بادرفتی بود. قدیری و باربارا (۲۰۱۰) یک سیستم پایش برای تخمین جابجایی تپه های ماسه ای در صحرای غربی مصر توسعه دادند، آن ها از برنامه نویسی Python در بستر تصاویر SPOT با دو قدرت تفکیک مکانی ۱۰ و ۲٫۵ متر برای مدل سازی جابجایی لندفرم های ماسه ای استفاده کردند.

المسراحی و مونتینی (۲۰۱۳) تغییرات مکانی تپه های بادی و مورفولوژی میان تپه ای را مطالعه کردند. آهنگ مکانی تغییرات مورفولوژی لندفرم های بادی از طریق یک سری از روابط تجربی توصیف شد، این توصیف تغییرات سبب توسعه یک مدل برای درک بهبود یافته وضعیت سیستم رسوب گذاری گستره مطالعاتی شد. بازیچتو و همکاران (۲۰۱۶) تأثیرات مورفولوژی تپه های ماسه ای بر شکل زیست بوم های ساحلی در سواهی مدیترانه را مطالعه کردند. آن ها در پژوهش خود از فناوری هوابرد LiDAR سود جستند. شناسایی روابط نزدیک میان نوع زیست بوم و متغیرهای مورفولوژیکی برآمده از LiDAR نشان دهنده پتانسیل بالای این ابزار سنجش از دور در تحلیل و پایش یکپارچگی اکوسیستم های ساحلی بود. الموتیری و همکاران (۲۰۱۶) در مطالعه ای با استفاده از تصاویر پانکروماتیک ماهواره SPOT 4 به برآورد جابجایی ریگ های روان در شمال شهر ریاض عربستان پرداختند. شیوه به کار رفته در پژوهش آن ها بر اساس فناوری تصحیح هندسی و همبستگی تصاویر اپتیکی<sup>۱</sup> (COSI-Corr) دریافت شده در سال های ۲۰۰۶ و ۲۰۰۹ انجام شد. آن ها با توجه به جهت جنوبی جابجایی تپه ها نتیجه گرفتند که سمت باد غالب شمالی می باشد. متلکا و همکاران (۲۰۱۸) در مطالعه ای نقشه ی لندفرم رخساره های سنگی در بورکینافاسو را با استفاده از داده های سنجش از دور و ژئوفیزیک هوایی به صورت

1- Co-registration of optically sensed images and Correlation

خودکار تهیه کردند. آن‌ها از ترکیب طیف سنجی اشعه گاما با مدل رقومی ارتفاعی (DEM) SRTM<sup>۱</sup>، تصاویر Landsat و داده‌های رادار پلاریمتری به دقت کلی ۹۴٫۲۱٪ و مقدار کاپا ۰٫۹۲ دست یافتند.

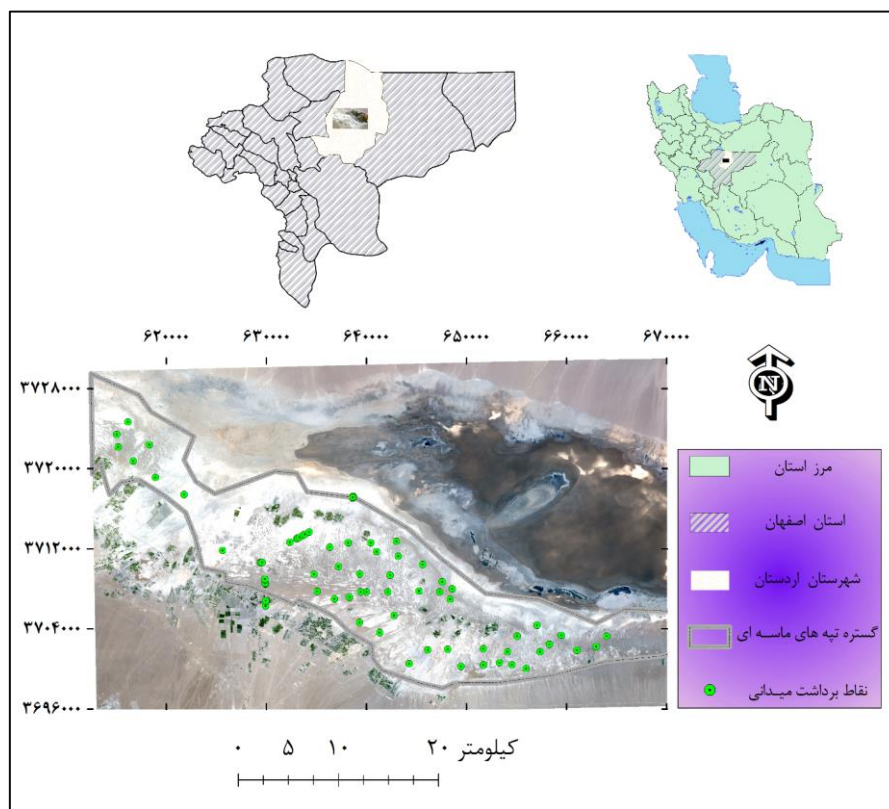
تازه و همکاران (۱۳۸۴)، بر مبنای ترسیم گل باد و گل طوفان‌های مربوط به ده ایستگاه سینوپتیک و استفاده از نتایج مطالعات طرح کانون‌های بحرانی فرسایش بادی در برخی از استان‌های کشور، جهت رسوبگذاری نهشته‌های ماسه بادی ایران را مطالعه کردند. آن‌ها نتیجه گرفتند که سمت شکل‌گیری تپه‌های ماسه‌ای با بادهای طوفان‌زا در یک دوره آماری پنج ساله، تطابق قابل قبولی را نشان می‌دهد. اختصاصی و دادفر (۱۳۹۲) رابطه تندبادهای سواحل جنوبی ایران با مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای را مطالعه کردند. آن‌ها از تجزیه و تحلیل داده‌های بادسنجی پنج ایستگاه سینوپتیک منتخب در سواحل جنوبی استفاده کردند و وجود تپه‌های ماسه‌ای از نوع تپه‌های طولی، سیلک‌های دندان‌های کشیده و سیف را تأیید کردند که نتیجه گرفتند حاصل بادهای دو جهته‌ی جنوب غربی و جنوب شرقی بوده است. وسو و همکاران (۱۳۹۳) رابطه‌ی مورفولوژی تپه‌های ماسه‌ای با شاخص‌های مورفومتری در شرق بابل‌سر را مطالعه کردند. نتایج نشان داد که مؤلفه‌ی ارتفاع با طول قله و دامنه‌ی پشت به باد، بهترین ضریب همبستگی را نشان داشت، به عبارت دیگر، ارتفاع تپه‌ها با تغییر طول قله و طول دامنه‌ی پشت به باد هم تغییر می‌کند و مؤلفه‌ی طول دامنه‌ی رو به باد، تأثیری بر ارتفاع ندارد. آحراری رودی (۱۳۹۶) نحوه تشکیل و گسترش تپه‌های ماسه‌ای و تأثیر آن بر مورفولوژی محیط ساحلی دریای عمان را مطالعه کرد. اساس پژوهش وی بر آنالیز دانه سنجی نمونه‌های برداشت شده از تپه‌های ماسه‌ای نواحی ساحلی بود. نتایج مطالعه نشان داد که تشکیل تپه‌های ماسه‌ای متأثر از تکتونیک و فرآیندهای هوازدگی، فرسایش و تخریب سازندها و انباشته شدن ذرات در سواحل بوده است.

مرور مطالعات بالا نشان می‌دهد که در بسیاری از پژوهش‌ها از تصاویر ماهواره‌ای اپتیک و چندطیفی با تفکیک مکانی‌های متفاوت برای تهیه نقشه جابجایی لندفرم‌های بادی استفاده شده است و اگرچه شاید اطلاعات جابجایی عمودی لندفرم‌ها از اهمیتی یکسان با جابجایی‌های افقی برخوردار نباشد، با این حال دسترسی به جابجایی در جهت قائم به منظور مدل‌سازی سه بعدی و برآوردی دقیق از حجم رسوبات بادی جابجا شده، می‌تواند تعیین‌کننده و واجد اهمیت فراوان باشد. مبنای مطالعه حاضر به کارگیری شیوه تداخل سنجی راداری<sup>۲</sup> برای برآورد جابجایی عمودی و شاخص‌های طیفی حاصل از ترکیب‌های بانندی تصاویر ماهواره‌ای به منظور برآورد جابجایی افقی تپه‌های ماسه‌ای و لندفرم‌های بادی می‌باشد.

برای این منظور از تصاویر رادار ماهواره Sentinel 1 و تصاویر چندطیفی ماهواره Sentinel 2 برداشت شده در بهار ۲۰۱۸ که محدوده مکانی ریگ اردستان را می‌پوشانند، استفاده شده است. منطقه ریگ اردستان در گستره مرکزی شهرستان اردستان در شمال استان اصفهان واقع شده است که با مساحتی بیش از ۲۰۰۰ کیلومتر مربع، از طول جغرافیایی 52° 12' 51" تا 52° 46' 10" شرقی و عرض جغرافیایی 33° 23' 16" تا 33° 42' 09" شمالی را در بر می‌گیرد (شکل ۱).

1- Shuttle Radar Topography Mission Digital Elevation Model

2- Radar Interferometry



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی ریگ اردستان به عنوان گستره مطالعاتی

### روش تحقیق

مهمترین داده هایی که برای این مطالعه به کار رفته اند شامل دو نوع تصویر ماهواره ای راداری و چندطیفی از دو نسل ماهواره Sentinel 1 و Sentinel 2 بود (جدول ۱). مأموریت Sentinel 1 بر مبنای دو دسته از ماهواره های رادار روزانه مصنوعی در باند C می باشد که از دو واحد A و B به منظور فراهم آوردن پیوستگی داده ای برای مأموریت های آژانس فضایی اروپا (ESA) و ENVISAT تشکیل شده است. نقطه مشترک هر دو ماهواره تأمین مجموعه داده مورد نیاز برای اهدافی شامل پایش نواحی یخی آبها و محیط قطبی، شناسایی محیط های دریایی، پایش خطر حرکت سطوح زمین، نقشه برداری سطوح اراضی (جنگل، آب و خاک) و نقشه برداری شرایط بحرانی محیطی ناشی از عامل دخالت انسانی (مارتینز و همکاران، ۲۰۱۶). در حالی که برداشت تصاویر Sentinel 2 از سال ۲۰۱۵ با پوشش سراسری کره زمین توسط آژانس فضایی اروپا آغاز شده است. ماهواره Sentinel 2 در تفکیک های مکانی ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر در ۱۲ باند طیفی به ثبت انرژی الکترومغناطیسی گسیل شده از عوارض و پدیده های سطح زمین در محدوده های مرئی و مادون قرمز نزدیک طیف الکترومغناطیسی در قالب تصاویر سنجش از دور در حال انجام مأموریت می باشد (قلی زاده و همکاران ۲۰۱۸). علاوه بر داده های تصویری به منظور اعتبارسنجی نتایج با گیرنده GPS از محدوده مطالعاتی در فاصله زمانی میان برداشت تصاویر، ۱۱۰ نقطه برداشت شد که شامل اطلاعات مختصات و کلاس اراضی گستره مطالعاتی بود (شکل ۱).

جدول ۱: مشخصات تصاویر دریافت شده برای برآورد سطوح جابجایی مسطحاتی و عمودی تپه‌های ماسه ای

کاربرد	تاریخ برداشت تصویر		ماهواره	نوع تصویر
جابجایی مسطحاتی	2018/05/03	2018/04/21	Sentinel 1	اپتیکی چندطیفی
جابجایی عمودی	2018/05/20	2018/04/10	Sentinel 2	رادار

به طور کلی اجرای پژوهش در دو مرحله مدلسازی و برآورد مکانی جابجایی عمودی و جابجایی مسطحاتی تپه‌های ماسه‌ای اجرا شد. در ادامه مقاله اجرای دو قسمت به صورت تفکیک شده می‌آید:

### جابجایی عمودی

ظهور تداخل سنجی راداری، امکان اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های بسیار کوچک سطح زمین را در نواحی دستخوش جابجایی لندفرم‌های ماسه‌ای فراهم آورده است. از جمله مزایای تکنیک تداخل سنجی راداری می‌توان به دقت بسیار بالا، پوشش وسیع، قدرت تفکیک مکانی بالا و عدم نیاز به کار میدانی، مقرون به صرفه بودن و امکان اخذ اطلاعات در هر شرایط آب و هوایی اشاره نمود. یک تصویر<sup>۱</sup> SAR با پردازش میلیون‌ها پالس انرژی مایکروویو که توسط آنتن‌های هواگرد یا فضاپردار سال و دریافت می‌شوند، تولید می‌شود (ام می‌تر، ۱۳۸۹). اساس کار در اندازه‌گیری تغییرات سطح زمین، استفاده از تصاویر تکراری رادار است؛ به طوری که تصویری که از یک منطقه در یک زمان مشخص برداشت می‌شود می‌تواند با تصویری که در زمان دیگر توسط همان سنجنده از همان مکان برداشت می‌شود تلفیق گردد. با توجه به اصول روش تداخل سنجی راداری، در عمل برداشت دو تصویر دقیقاً از یک موقعیت و با هندسه دید کاملاً مشابه، امکان پذیر نیست. تفاوت‌ها در موقعیت دید، به جابه‌جایی فاز<sup>۲</sup> منجر می‌شود که ناشی از تغییرات در ارتفاع زمین است. اگر این تفاوت‌ها کوچک باشند، جا به جایی فاز مربوط به ارتفاع را می‌توان اندازه‌گیری کرد و سپس برای اندازه‌گیری‌های حرکت تفاضلی زمین، جابه‌جایی فاز ناشی از ارتفاع از مقدار جابه‌جایی فاز کل کاسته شود (ریچاردز، ۲۰۰۷). در این مطالعه برای برآورد نقشه جابجایی عمودی از دو محصول نوار پهن تداخل سنجی<sup>۳</sup> تصویر Sentinel 1 استفاده شده است. در این محصول داده‌ها در یک نوار ۲۵۰ کیلومتری در تفکیک مکانی ۵ متر تا ۲۰ متر (مجموعه دید منفرد<sup>۴</sup> یا SLC) برداشت می‌شوند. طریقه IW سه زیرنوار را بر مبنای مشاهدات زمین با جاروب‌های پیش رونده SAR<sup>۵</sup> یا TOPSAR اخذ می‌کند. TOPSAR جایگزین ScanSAR مر سوم شده است که علاوه بر حصول همان تفکیک مکانی و پوشش ScanSAR، سبب ارتقاء نسبت سیگنال به نوفه<sup>۶</sup> (SNR) و نسبت ابهام اهداف توزیع شده (DTAR<sup>۷</sup>) هم می‌شود (مارتینز، ۲۰۱۶). در شکل ۲ مراحل ایجاد مدل رقومی ارتفاع و مدل جابجایی نشان داده شده است، بسیاری از مراحل پردازش برای DEM و جابجایی به صورت مشترک انجام می‌پذیرند و برای پیاده سازی آن‌ها از نرم افزارهای SNAP و Snaphu استفاده می‌شود.

محصولات IW SLC تصاویر Sentinel-1 دارای سه زیرنوار IW1، IW2 و IW3 می‌باشند که هر کدام دربردارنده یک برداشت تصویر به طریقه TOPS می‌باشند. برای هر پردازش تداخل سنجی، حداقل باید باندهای دو تصویر نسبت به هم

1- Synthetic Aperture Radar

2- Phase

3- Interferometric Wide

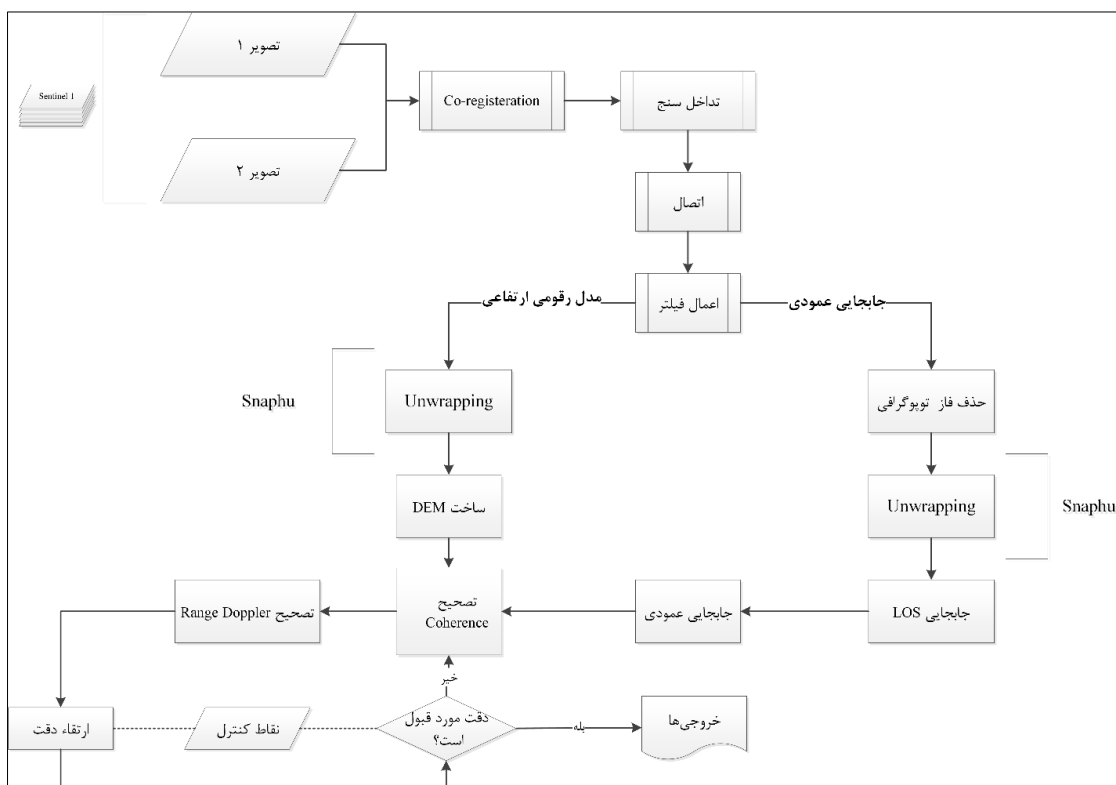
4- Single Look Complex (SLC)

5- Terrain Observation with Progressive Scans SAR (TOPSAR)

6- Signal-to-Noise Ratio

7- Distributed Target Ambiguity Ratio

ردیف و تثبیت<sup>۱</sup> شوند. یک تصویر به عنوان مبنا<sup>۲</sup> و دیگری به عنوان پیرو<sup>۳</sup>؛ پیکسل‌ها در تصویر پیرو به منظور تأمین دقت زیرپیکسل در جهت پیکسل‌های تصویر مبنا حرکت داده می‌شوند. تداخل سنچ از ضرب خارجی تصویر مبنا در مجموعه توأم تصویر پیرو حاصل می‌آید. دامنه هر دو تصویر از حاصل ضرب ولی فاز حاصل اختلاف فاز میان دو تصویر می‌باشد. فاز تداخل سنچی هر پیکسل تصویر SAR حاصل تفاوت در هر مسیر طی شده برای دو تصویر SAR نسبت به تفکیک مورد نظر می‌باشد (رابطه ۱).



شکل ۲: مراحل پردازشی تولید مدل جابجایی عمودی و مدل رقومی ارتفاع از تصاویر رادار Sentinel 1

$$\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}, \quad \varphi = \frac{4\pi}{\lambda} (R + \Delta R)$$

رابطه ۱

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

تغییر فاز تداخل سنچی،  $\Delta\varphi$ ، متناسب با  $\Delta R$  تقسیم بر طول موج منتقل شده،  $\lambda$ ، می‌باشد. تفاوت فاز از پنج منبع مختلف زیر حاصل می‌شود:  $\Delta\varphi_{flat}$  که فاز زمین مسطح نامیده می‌شود و ناشی از انحنای زمین می‌باشد،  $\Delta\varphi_{elevation}$  که ناشی از تأثیر توپوگرافی بروی فاز تداخل سنچی می‌باشد.  $\Delta\varphi_{displacement}$  که از تأثیر تغییر شکل سطح بروی فاز تداخل سنچی به وجود می‌آید،  $\Delta\varphi_{atmosphere}$  که تأثیر اتمسفر بروی فاز تداخل سنچی می‌باشد.

1- Co-registration

2- Master

3- Slave

این مؤلفه از تغییرات رطوبت، دما و فشار اتمسفر بین دو برداشت تصویر به وجود می‌آید و  $\Delta\varphi_{noise}$  که نوفه فاز ایجاد شده توسط تغییرات موقت پخش کننده‌ها، زاویه دید متفاوت و پخش حجمی حاصل می‌شود.

رابطه ۲ از  $\Delta\varphi = \Delta\varphi_{flat} + \Delta\varphi_{elevation} + \Delta\varphi_{displacement} + \Delta\varphi_{atmosphere} + \Delta\varphi_{noise}$

طریق پردازش تداخل سنجی می‌توان منابع خطا را حذف کرد و تنها با منبع دلخواه که معمولاً ارتفاع یا جابجایی است ادامه داد. fringeهای تداخل سنج یک سیکل کامل  $2\pi$  را نشان می‌دهند. fringeها به عنوان سیکل‌هایی از رنگ‌های قراردادی در تداخل سنج ظاهر می‌شوند که هر رنگ نشان دهنده نصف طول موج سنجنده است. جابجایی نسبی میان دو نقطه می‌تواند از طریق شمارش fringeها و ضرب آن‌ها در نصف طول موج به دست آید. هر گونه تخطی از الگوی fringeهای موازی می‌تواند به عنوان تغییر توپوگرافی تفسیر شود. در مرحله ساخت تداخل سنج می‌توان همبستگی<sup>۱</sup> را نیز برآورد کرد. همبستگی بالای میان تصاویر مبنا و پیرو می‌تواند نشان دهنده این باشد که تصاویر شباهت بالایی به هم دارند و بنابر این می‌توانند برای تولید مدل رقومی ارتفاعی به کار روند (ریچاردز، ۲۰۰۷). باند همبستگی نشان دهنده شباهت موجود میان دو پیکسل منطبق در تصاویر مبنا و پیرو در دامنه ای از ۰ تا ۱ می‌باشد. نواحی دارای همبستگی بالا روشن و مناطق با همبستگی پایین تیره نشان داده می‌شوند. به طور کلی در یک تصویر عوارض پوش گیاهی همبستگی پایین و ساختمان‌ها همبستگی بالایی را نشان می‌دهند. در پردازش‌های بعدی به منظور از بین بردن عدم پیوستگی میان توالی‌های هر نوار تصویر از تابع TOPS Deburst استفاده می‌شود و نتیجه یک تصویر عاری از عدم پیوستگی میان توالی‌ها می‌باشد که برای اجرای پردازش‌های بعدی آماده شده است. فاز تداخل سنج از منابع نوفه زیر تأثیر می‌پذیرد:

➤ عدم همبستگی زمانی

➤ عدم همبستگی هندسی

➤ پخش حجمی

➤ خطای پردازش

پایین بودن همبستگی سبب نامناسب شدن الگوی تداخل سنجی می‌گردد. به منظور واپیچیدن<sup>۲</sup> مناسب فاز، نیاز است که SNR از طریق اعمال فیلتر فاز افزایش یابد (ریچاردز، ۲۰۰۷). تداخل سنجی می‌تواند با حذف فاز توپوگرافی مسطح شود. این مرحله یک تداخل سنج را بر اساس یک DEM مرجع و تفریق آن از تداخل سنج پردازش شده، شبیه سازی می‌کند.

در تداخل سنج، فاز تداخل سنجی مبهم است و تنها در داخل سیکل‌های  $2\pi$  قابل تشخیص می‌باشد. به منظور برقراری ارتباط میان فاز تداخل سنجی و ارتفاع توپوگرافی، فاز باید واپیچیده شود. واپیچیدن فاز از طریق یکپارچه ساختن تفاوت فاز میان پیکسل‌های همسایه، ابهام را از بین می‌برد. بعد از اعمال مرحله واپیچش تغییر فاز میان دو نقطه در تداخل سنج مسطح یک اندازه گیری از تغییرات واقعی ارتفاع را فراهم می‌آورد. کیفیت و قابل اتکا بودن نتایج واپیچش بستگی زیادی به پارامتر همبستگی دارد. نتایج معتبر تنها می‌توانند در نواحی با همبستگی بالا مورد انتظار باشند. نتایج واپیچیده باید به عنوان جابجایی/ارتفاع نسبی میان دو پیکسل تفسیر شوند. به منظور رسیدن به مقادیر مطلق باید یک نقطه متناظر برای تبدیل فاز واپیچیده به ارتفاع مورد استفاده قرار گیرد (کاستنتینی، ۱۹۹۸). فرآیند واپیچیدن فاز در محیط برنامه Snaphu انجام می‌پذیرد، این برنامه در سیستم عامل Linux قابل راه اندازی است ولی به منظور اجرای آن در سیستم عامل

1- Coherence

2- Unwrapping



Windows می توان از برنامه Cygwin که محیط Linux را در سیستم عامل Windows شبیه سازی می کند، سود برد.

پس از اعمال واپیچش در Snaphu، نتایج به محیط SNAP وارد می شوند. در این مرحله می توان با اعمال توابع Phase to Elevation و Phase to Displacement به خروجی های مدل رقومی ارتفاعی و جابجایی دست یافت.

از آنجایی که جابجایی برآورد شده در جهت دید سنجنده<sup>۱</sup> یا LOS می باشد و معمولاً به جابجایی عمودی نیاز هست با اعمال رابطه ۳ می توان به برآوردی از جابجایی عمودی دست یافت:

$$\text{رابطه ۳} \quad ((\text{Unwrapped Phase} \times \lambda) / (-4\pi \times \cos(\text{rad}(\text{Incident angle})))$$

در رابطه بالا Unwrapped Phase فاز واپیچیده و  $\lambda$  طول موج را نشان می دهد که معمولاً با توجه به اینکه تصاویر راداری Sentinel 1 در باند C که دارای طول موج ۵.۶ سانتی متر می باشد، برداشت می شوند، این پارامتر ۵.۶ در نظر گرفته می شود. Incident angle هم زاویه میان هدف و سنجنده را نشان می دهد که به صورت میانگین در رابطه بالا اعمال می شود. به دلیل تغییرات توپوگرافی موجود در یک برداشت تصویر و تغییر فواصل در هنگام برداشت تصویر به علت پهلونگر بودن ماهواره، فواصل در تصاویر SAR دستخوش اعوجاج می شوند. تصحیحات سطح از طریق اعمال تابع Range Doppler موجب جبران این اعوجاجات می گردد. پس از اجرای کلیه مراحل بالا در SNAP می توان برای مستند سازی خروجی ها، آن ها را به نرم افزارهای قدرتمند GIS منتقل کرد؛ این مرحله مستلزم خروجی گرفتن از تصاویر در فرمت هایی مانند GeoTiff می باشد (شکل های ۳ و ۴).

### جابجایی افقی

برای بهره گیری از قابلیت های تصاویر ماهواره ای پیش از اعمال الگوریتم ها و توابع اصلی پردازشی و همچنین برای اینکه بتوان با دقت بالایی پردازش ها و تحلیل های بعدی را پیاده سازی نمود بایستی نخست مواردی چون رفع خطاهای هندسی و رادیومتریک در باندهای ورودی و آماده سازی داده های اصلی و کمکی برای ورود به توابع مختلف به منظور تهیه نقشه های قابل ارجاع، در دستور کار قرار گیرد. برای این برآورد جابجایی افقی از دو تصویر Sentinel 2 استفاده شد (جدول ۱)، در اولین قدم آماده سازی داده ها، باندهای مورد نظر تصویر به هم پیوسته شدند، برای اینکه بتوان با دقت بالایی پردازش های بعدی را پیاده سازی نمود بایستی ابتدا خطاهای هندسی و رادیومتریک موجود در تصویر رفع شود. چون سطح پردازشی تصاویر دریافتی تصحیحات مورد نیاز هندسی را شامل می شد، در این مطالعه تنها به تصحیحات اتمسفری بسنده شد که برای اعمال آن از تابع Quick Atmospheric Correction در نرم افزار ENVI استفاده شد. برای برآورد محدوده و گستره تپه های ماسه ای از شاخص های طیفی استفاده شد، در این مطالعه سه شاخص طیفی شامل شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال شده<sup>۲</sup> (NDVI)، شاخص ماسه ای تفاضلی نرمال شده<sup>۳</sup> (NDSI) و شاخص خاک برهنه<sup>۴</sup> (BSI) به کار گرفته شد:

1- Line of Sight

2- Normalized Difference Vegetation Index

3- Normalized Difference Sand Index

4- Bare Soil Index

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad \text{رابطه ۴}$$

$$NDSI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR} \quad \text{رابطه ۵}$$

$$BSI = \frac{(SWIR + R) - (NIR + B)}{(SWIR + R) + (NIR + B)} \quad \text{رابطه ۶}$$

در روابط ۴، ۵ و ۶، NIR، R، SWIR<sup>۱</sup> و B به ترتیب باندهای مادون قرمز نزدیک، قرمز، مادون قرمز موج کوتاه و آبی را نشان می‌دهند (عبدالحلیم و فرهود، ۲۰۱۵ و فادهیل، ۲۰۱۳) که در تصویر Sentinel 2 به ترتیب باندهای ۸، ۳، ۹ و ۲ را در برمی‌گیرند. محدوده تپه‌های ماسه‌ای برای هر دو تصویر با به کارگیری شاخص‌های مذکور و اعمال آستانه‌های مناسب برآورد شد، پس از مقایسه خروجی‌ها با نقاط برداشت میدانی، گستره‌های حاصل از اعمال NDSI به عنوان محدوده گسترش تپه‌های ماسه‌های در دو تصویر تعیین شد (شکل ۵).

### بحث و یافته‌ها

نقشه مدل رقمی ارتفاعی گستره تپه‌های ماسه‌ای ریگ اردستان در شکل ۳ نشان داده شده است، در حالی که نقشه‌های جابجایی عمودی و مسطحاتی به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده است. دامنه مقادیر جابجایی ارتفاعی در مقایسه با جابجایی مسطحاتی ارزش‌های پایین‌تری را نشان می‌دهد، عامل جابجایی لندفرم‌های بادی، چه عمودی و چه مسطحاتی، نیروی باد می‌باشد و جابجایی عمودی از استمرار در حرکت مسطحاتی که منجر به انباشه شدن یا کنده شدن ذرات ماسه می‌شود، شکل می‌گیرد؛ لذا دامنه مقادیر آن در هر بازه زمانی کمتر از دامنه مقادیر جابجایی مسطحاتی می‌باشد.

برای ارزیابی دقت مقادیر جابجایی عمودی و افقی برآورد شده تپه‌های ماسه‌ای از سه پارامتر میانگین جذر مربعات خطا (RMSE)، خطای متوسط میانگین<sup>۲</sup> (MAE) و ضریب تشخیص یا تعیین ( $R^2$ ) استفاده شده است (پائول و همکاران، ۲۰۰۷).

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{I}_i - I_i)^2}{N}} \quad \text{رابطه ۷}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |I_i - \hat{I}_i| \quad \text{رابطه ۸}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{I}_i - \bar{I})}{\sum_{i=1}^N (I_i - \bar{I})^2} \quad \text{رابطه ۹}$$

در روابط بالا،  $\hat{I}_i$  گستره یا مقدار بعد ارتفاعی لندفرم بادی حاصل از مدل برای نمونه  $i$ ،  $I_i$  گستره یا مقدار بعد ارتفاعی لندفرم بادی از داده‌های مرجع،  $\bar{I}$  گستره یا مقدار بعد ارتفاعی لندفرم بادی نمونه‌ها و  $N$  تعداد نمونه‌ها می‌باشد. تعیین مقادیر پارامترهای دقت سنجی فوق با استفاده از مقادیری از نمونه برداری‌های میدانی انجام شد که برای ارتقاء دقت

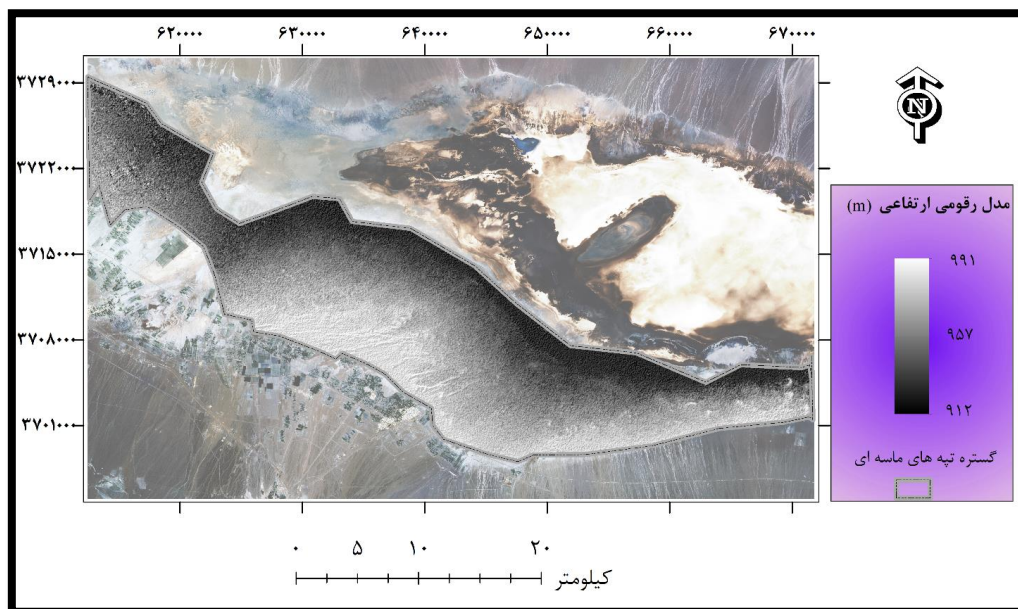
1- Short Wave Infra-Red

2- Mean Average Error (MAE)

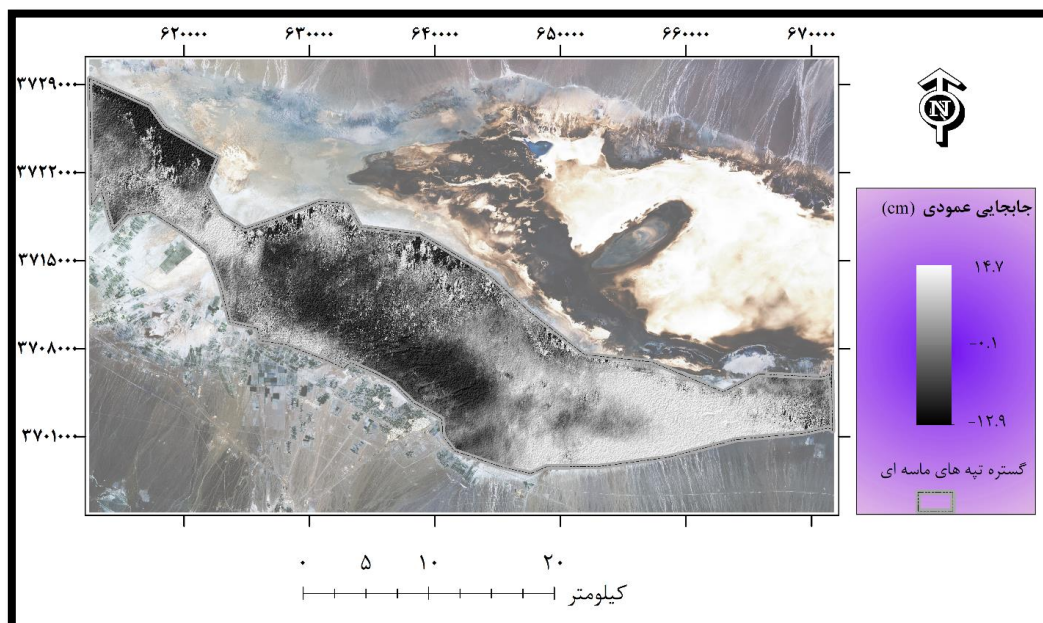
اولیه خروجی‌ها به کار نگرفته شده بودند (جدول ۲). اگرچه دقت‌های حاصل شده برای مدل رقومی ارتفاعی و هردوی جابه‌جایی‌های عمودی و افقی قابل قبول به نظر می‌رسد با این حال پارامترهای دقت سنجی در DEM و جابجایی عمودی دقت بالاتری را نشان می‌دهند که دلایل عمده آن را می‌توان به الف- مدلسازی جابجایی عمودی در یک بعد نسبت داد، در حالی که در جابجایی افقی تپه‌های ماسه‌ای، جهات شمالی- جنوبی و شرقی- غربی با هم ترکیب شده‌اند و به صورت جابجایی مسطحاتی خود را نشان می‌دهند. لذا خطای حاصل از آن دو به صورت ترکیبی و مضاعف خود را نشان می‌دهد و ب- در ایجاد DEM و جابجایی عمودی مستقیماً از پردازش‌های تداخل سنجی راداری استفاده شده است در حالی که در مدلسازی جابجایی مسطحاتی تپه‌های ماسه‌ای، شاخص‌های نسبت گیری طیفی و اختصاص دادن آستانه‌هایی برای تخمین گستره‌های تپه‌های ماسه‌ای به کار گرفته شده‌اند؛ لذا این روند به کارگیری غیرمستقیم باندهای تصاویر Sentinel 2 می‌تواند موجب تکثر خطاها شود.

جدول ۲: دقت نقشه‌های جابجایی ارتفاعی و مسطحاتی بر اساس پارامترهای دقت سنجی

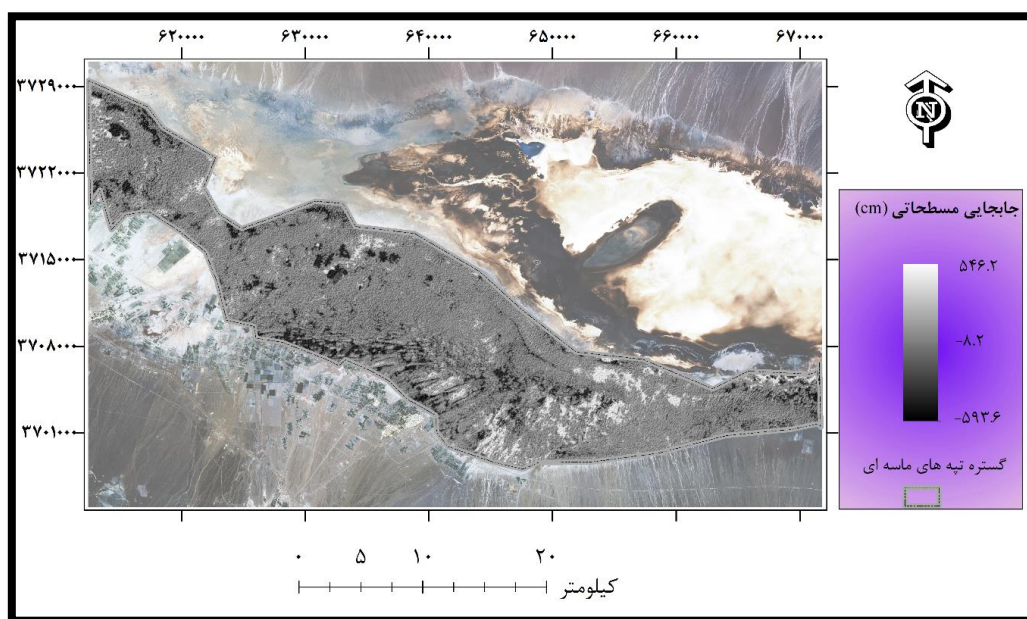
پارامتر دقت سنجی			خروجی
$R^2$	MAE	RMSE	
۰,۷۳	۲,۰۶	۲,۴۲	مدل رقومی ارتفاعی
۰,۸۶	۰,۰۳۷	۰,۰۵۲	جابجایی ارتفاعی
۰,۶۷	۳,۷۴	۴,۶۸	جابجایی افقی



شکل ۳: نقشه مدل رقومی ارتفاعی حاصل از تداخل سنجی راداری تصاویر Sentinel 1



شکل ۴: نقشه جابجایی ارتفاعی تپه‌های ماسه‌ای حاصل از تداخل سنجی راداری تصاویر Sentinel 1

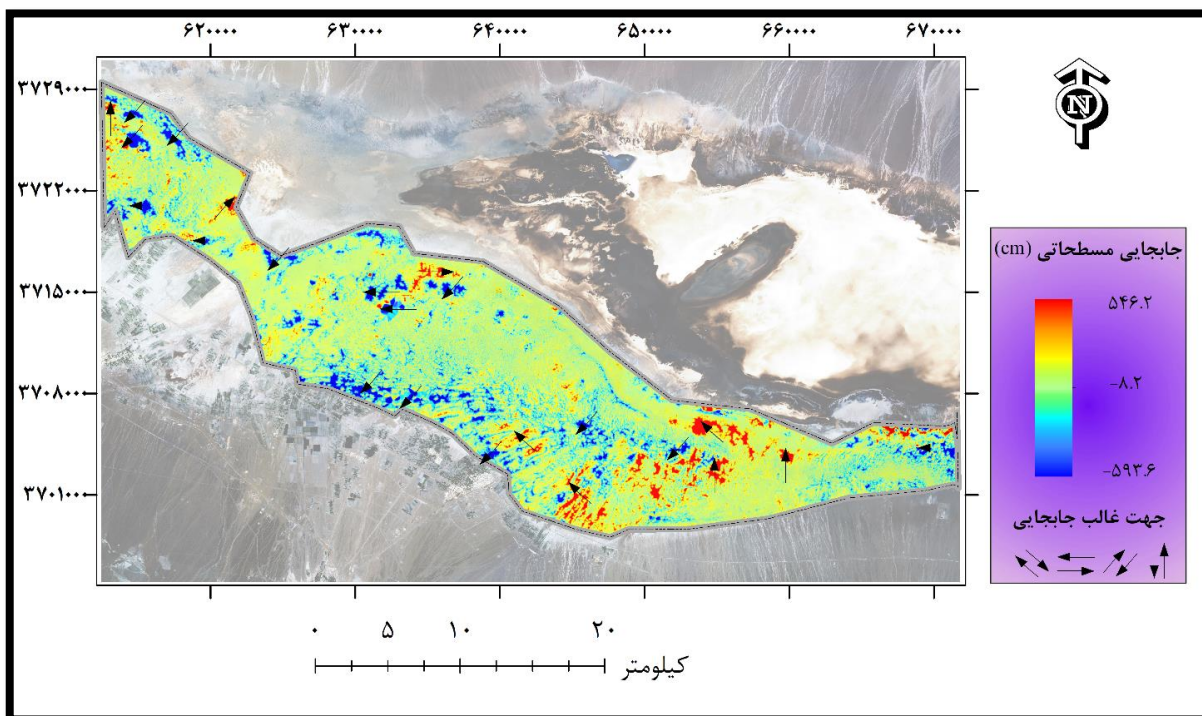


شکل ۵: نقشه جابجایی مسطحی تپه‌های ماسه‌ای حاصل از تداخل سنجی راداری تصاویر Sentinel 1

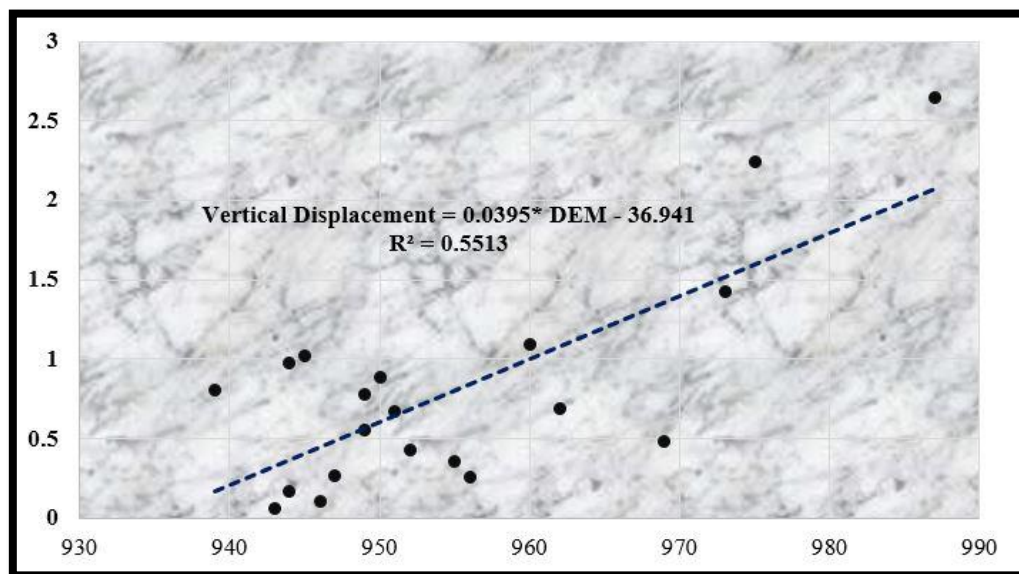
جابجایی مسطحی حاصل تفریق گستره‌های شناسایی شده تپه‌های ماسه‌ای با به کارگیری نسبت‌گیری‌های طیفی در دو تاریخ برداشت تصاویر Sentinel 1 با تفکیک مکانی ۲۰ متر بوده است، با این حال در این نوع مدل‌سازی جهت‌های شمالی- جنوبی و غربی- شرقی قابل تمیز نیست؛ لذا برای این منظور با مقایسه نواحی نشان دهنده جابجایی‌ها با گستره تپه‌های ماسه‌ای در دو تاریخ می‌توان جهت تقریبی حرکت لندفرم‌های بادی را در هر کدام از جهات جغرافیایی هشت گانه تخمین زد (شکل ۶). جهت کلی حرکت تپه‌های ماسه‌ای از شمال شرقی به جنوب غربی است که در تطابق با سمت ثبت شده بادهای غالب ایستگاه هواشناسی اردستان به عنوان نزدیک‌ترین ایستگاه به ریگ اردستان از زمان تأسیس تا

زمان حاضر می باشد، چرا که میانگین سمت بادهای غالب در ماه های آوریل و مه برای ایستگاه مذکور به ترتیب ۲۲۳ و ۲۳۳ درجه می باشد که بیانگر جهت شمال شرقی - جنوب غربی بادهای غالب می باشد.

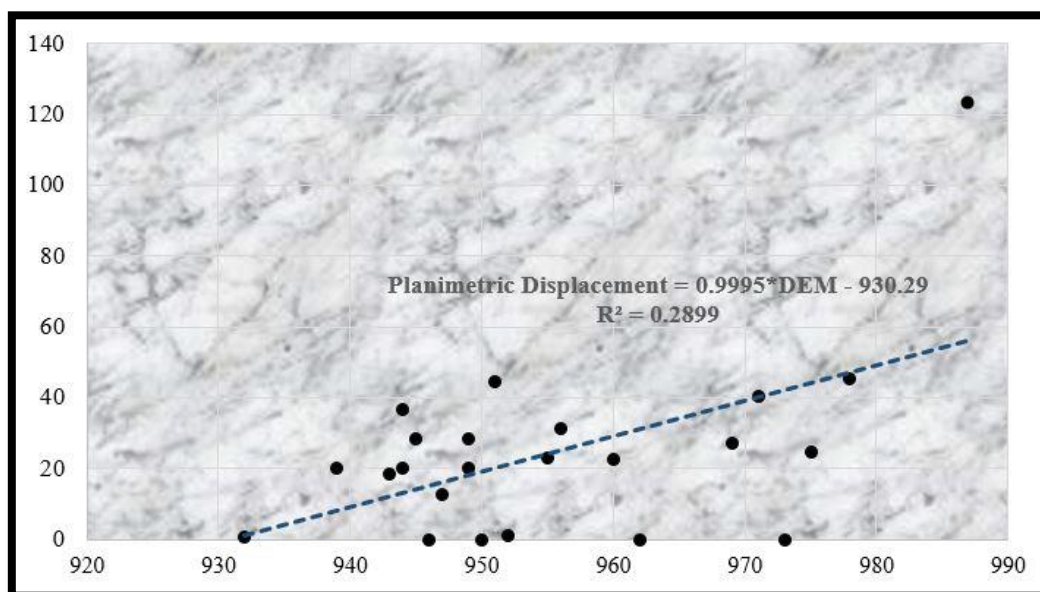
جابجایی تپه های ماسه ای را می توان به حجم و ارتفاع اولیه آن ها نسبت داد، به طور کلی می توان گفت هرچه ارتفاع و حجم تپه بیشتر باشد ناپایداری بالاتری را نشان می دهد و از میل بیشتری نیز برای تغییر در مکان اولیه خود برخوردار می باشد که این تغییر می تواند منجر به جابجایی در هر کدام از ابعاد مسطحاتی یا عمودی شود. برای سنجش این فرض، نقاطی به صورت تصادفی ساده در هر سه خروجی مدل رقومی ارتفاع، جابجایی عمودی و جابجایی افقی برداشت و مقادیر متناظر آن ها به طوری دو به دو با هم مقایسه می شوند که در هر دو حالت مقادیر ارتفاعی بروی محور  $X$  به عنوان متغیر مستقل در تناظر با مقادیر جابجایی عمودی و جابجایی مسطحاتی بر روی محور  $Y$  به عنوان متغیر وابسته قرار گیرد (شکل های ۷ و ۸). از برازش خطی میان دو دسته متغیر مستقل و وابسته در هر دو حالت و تشکیل معادله رگرسیونی میان دو متغیر می توان به این نتیجه رسید که هرچه مقادیر ارتفاعی در گستره تپه های ماسه ای بیشتر باشد، ناآرامی و میل به تغییر در آن ها بالاتر می باشد، زیرا پارامتر شیب در هر دو حالت بزرگتر از صفر است. همچنین ضریب تعیین در حالتی که تغییرات ارتفاعی تابعی از DEM است بیشتر می باشد (شکل ۷)، این اختلاف نشان دهنده این است که ارتباط معنی دارتری میان دو این دو متغیر وجود دارد، به عبارتی هر چه ارتفاع لندفرم های بادی بیشتر باشد، جابجایی عمودی لندفرم ها محتمل تر است و مقادیر آن بیشتر از حالت هایی است که ارتفاع تپه کمتر می باشد.



شکل ۶: جهت های غالب جابجایی مسطحاتی تپه های ماسه ای



شکل ۷: رابطه میان بزرگی مقادیر جابجایی عمودی و مدل رقومی ارتفاعی



شکل ۸: رابطه میان بزرگی مقادیر جابجایی مسطحاتی و مدل رقومی ارتفاعی

### نتیجه گیری

شرایط خشک حاکم بر بخش وسیعی از ایران موجب شده است که حدود ۸۰ میلیون هکتار از مساحت ایران را مناطق کویری، تپه‌های ماسه‌ای و نواحی با پوشش گیاهی ناچیز بپوشاند، جابجایی و ناپایداری تپه‌های ماسه‌ای از مهمترین دغدغه‌های نواحی مرکزی ایران محسوب می‌شود که همواره ساکنین این نواحی را با مشکلات عدیده‌ای مواجه می‌سازد؛ لذا ناپایداری و جابجایی تپه‌های ماسه‌ای می‌تواند به عنوان یکی از اولویت‌های برنامه‌ریزان آمایش ژئومورفولوژیکی جهت تعیین اولویت‌ها و راهکارهایی به منظور کاهش اثرات مخرب آن‌ها در نظر گرفته شود.

در این مطالعه از تداخل سنجی راداری بر روی تصاویر Sentinel 1 به منظور برآورد جابجایی عمودی تپه‌های ماسه‌ای ریگ اردستان استفاده شد. در حالی که نقشه جابجایی مسطحاتی از به کارگیری نسبت گیری و تفریق باندی بر روی

تصاویر چندباندی Sentinel 2 اعمال شد، برای ارتقاء دقت و دقت سنجی نتایج از نقاط میدانی برداشت شده در فاصله میان دو عبور ماهواره استفاده شد. دقت جابجایی عمودی بالاتر از جابجایی مسطحاتی حاصل شد که به دلایل به کارگیری مستقیم پردازش تداخل سنجی راداری و انتشار خطای ناشی از ماهیت دو بعدی داده های جابجایی مسطحاتی بود.

یافته های این مطالعه عبارت اند از: سمت حرکت کلی تپه های ماسه ای ریگ اردستان در ماه های آوریل و مه از شمال شرقی به جنوب غربی می باشد، میزان و اندازه جابجایی تپه های ماسه ای در ابعاد مسطحاتی و ارتفاعی به حجم آنها بستگی دارد، به عبارتی ناپایداری بیشتر لندفرم های مرتفع تر و حجیم تر عامل تحریک آنها به حرکت در اثر نیروی باد غالب می باشد.

این مطالعه با به کارگیری تداخل سنجی راداری برای مدلسازی جابجایی عمودی، بر اهمیت و قابلیت بالقوه تصاویر راداری در پایش لندفرم های بادی که طبیعتی سیال و روان دارند و از عوامل تهدید آمیز حیات ساکنین نواحی مرکزی و حاشیه کویری ایران می باشند، تأکید داشت. روند و نتایج این مطالعه می تواند در مطالعات آینده به کار گرفته شود و برای برنامه ریزان آمایش ژئومورفولوژیکی نواحی در معرض لندفرم های بادی از ارزش اجرایی برخوردار باشد.

## منابع

- احراری رودی، محی الدین. ۱۳۹۶، بررسی نحوه تشکیل و گسترش تپه های ماسه ای و تأثیر آن بر مورفولوژی محیط ساحلی دریای عمان، پژوهش های ژئومورفولوژی کمی، شماره ۳، صص ۱۷۵-۱۶۳.
- احمدیان، محمد علی. ۱۳۸۷، بیابان (نگرشی سیستمی به فرایند بیابان زایی و بیابان زدایی). فصلنامه تحقیقات جغرافیایی، شماره ۵۲ و ۵۳، صص ۱۴۴ تا ۱۵۹.
- اختصاصی، محمد رضا و دادفر، صدیقه. ۱۳۹۲، بررسی رابطه تندبادهای سواحل جنوبی ایران با مورفولوژی تپه های ماسه ای، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۴، صص ۶۱ تا ۷۲.
- ام می تر، پاول. ۱۳۸۹، پردازش کامپیوتری تصاویر سنجش از دور، ترجمه جلال امینی، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.
- امیدوار، کمال. ۱۳۸۵، بررسی و تحلیل سینوپتیکی طوفان های ماسه در دشت یزد - اردکان، تحقیقات جغرافیایی، شماره ۲، صص ۴۳ تا ۵۸.
- تازه، مهدی؛ اختصاصی، محمد رضا؛ شریعتمداری، شهاب الدین و طهماسبی، علی محمد. ۱۳۸۴. تعیین جهت غالب رسوبگذاری نهشته های ماسه، بادی ایران با استفاده از اطلاعات کانون های بحرانی فرسایش بادی، اولین همایش ملی فرسایش بادی، ۲۷ بهمن ۱۳۸۴ یزد.
- رامشت، محمد حسین؛ سیف، عبدالله و محمودی، شبنم. ۱۳۹۱، بررسی میزان گسترش تپه های ماسه ای شرق جاسک در بازه زمانی (۱۳۸۳-۱۳۶۹) با استفاده از GIS و RS، جغرافیا و توسعه، شماره ۳۱، صص ۱۲۱ تا ۱۳۶.
- رفاهی، حسینقلی. ۱۳۸۳، فرسایش بادی و کنترل آن، انتشارات دانشگاه تهران، تهران.

- نگارش، حسین و لطیفی، لیلا. ۱۳۸۷، تحلیل ژئومورفولوژیکی روند پیشروی تپه‌های ماسه‌ای شرق دشت سیستان در سال‌های اخیر. ۱۳۸۷، جغرافیا و توسعه، شماره ۱۲، صص ۴۳ تا ۶۰.
- وسو، محبوبه؛ میراب شبستری، غلامرضا و امینی، آرش. ۱۳۹۳، رابطه مورفولوژی تپه‌های ماسه ای با شاخص های مورفومتری در شرق بابلسر، پژوهش های جغرافیای طبیعی، شماره ۲، صص ۲۱۹ تا ۲۳۰.
- Vosou M. , Mirab Shabestari GH., Amini A., 2014, Morphological relationship between Aeolians and morphometric indexes in east of Babolsar, *Physical Geography Research*, No. 2, pp. 219-230.
- Abdulhalim, A. S. and Farhood, A. F., 2015. Monitoring the Movement of Sand Dunes in Thi Qar Governorate Using Some Spectral Indices, *International Journal of Scientific Engineering and Research (IJSER)*, pp.112-118.
- Al-Dabi, H., Maghali, EI-Baz, F. and Al-Sarawi, M. 1998. Mapping and monitoring sand dune patterns northwest Kuwait using Landsat TM image, In: *Sustainable Development in Arid Zones (eds Omar, S.A.S. Misak, R. & Sattelite Al- Ajami, D.)*, Vol Balkema.
- Al-Masrahy, M.A. and Mountney, N.P., 2013. Remote sensing of spatial variability in aeolian dune and interdune morphology in the Rub'Al-Khali, Saudi Arabia. *Aeolian Research*, 11, pp.155-170.
- Al-Mutiry, M., Hermas, E.A., Al-Ghamdi, K.A. and Al-Awaji, H., 2016. Estimation of dune migration rates north Riyadh City, KSA, using SPOT 4 panchromatic images. *Journal of African Earth Sciences*, 124, pp.258-269.
- Bishop, M. A. 2010. Nearest neighbor analysis of mega-barchanoid dunes, Ar Rub' al Khali, sand sea: The application of geographical indices to the understanding of dune field self-organization, maturity and environmental change. *Geomorphology*, 120, 186–194.
- Bazzichetto, M., Malavasi, M., Acosta, A.T.R. and Carranza, M.L., 2016. How does dune morphology shape coastal EC habitats occurrence? A remote sensing approach using airborne LiDAR on the Mediterranean coast. *Ecological Indicators*, 71, pp.618-626.
- Costantini, M., 1998. A novel phase unwrapping method based on network programming. *IEEE Tran. on Geoscience and Remote Sensing*, 36, 813-821.
- Ferretti A., Massonet D., Monti Guarnieri A., Prati C., Rocca F., 2007, *InSAR Principles: Guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*, ESA TM-19
- Fadhil, A. M. 2013, Sand dunes monitoring using remote sensing and GIS techniques for some sites in Iraq. In *PIAGENG 2013: Intelligent Information, Control, and Communication Technology for Agricultural Engineering (Vol. 8762, p. 876206)*. *International Society for Optics and Photonics*.
- Frank, A., Kocurek, G., 1996. Airflow up the stoss slope of sand dunes: limitations of current understanding. *Geomorphology* 17, 47–54.
- Ghadir, M. and Barbara, K. 2010, *Developing a Monitoring System for Sand Dunes Migration. Remote Sensing for Science*, 313- 320.
- Gholizadeh, A., Žižala, D., Saberioon, M. and Borůvka, L., 2018. Soil organic carbon and texture retrieving and mapping using proximal, airborne and Sentinel-2 spectral imaging. *Remote Sensing of Environment*, 218, pp.89-103.
- Lancaster, N., Nickling, W.G., McKenna Neuman, C., Wyatt, V.E., 1996. Sediment flux and airflow on the stoss slope of a barchans dune. *Geomorphology* 17, 55–62.
- Lin, Guanghui .2002, *Dust bowl in the 1930' sand storms in the USA, Global Alarm: Dust and sand storms from the world's dry lands*, United Nations.
- Livingstone, I., 2003. A twenty-one-year record of surface change on a Namib linear dune. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 1025–1031.



- Livingstone, I., Wiggs, G. F. S., & Weaver, C. M. 2007. *Geomorphology of desert sand dunes: A review of recent progress. Earth-Science Reviews*, 80, 239–257.
- Mark A. Richards, 2007. *A Beginner's Guide to Interferometric SAR Concepts and Signal Processing, IEEE A&E SYSTEMS MAGAZINE VOL. 22, NO. 9.*
- Metelka, V., Baratoux, L., Jessell, M.W., Barth, A., Ježek, J. and Naba, S., 2018. *Automated regolith landform mapping using airborne geophysics and remote sensing data, Burkina Faso, West Africa. Remote Sensing of Environment*, 204, pp.964-978.
- Moursy, F., Gaber, E.I., Samak, M., 2001, *Sand Drift Potential in EL-Khanka, Egypt, Water, Air & Soil Pollution, Vol. 136, No. 1-4, PP. 225-242.*
- Squires, Victor, R. 2002, *Dust and Storms: An early warning of impending disaster, Global Alarm: Dust and sand storms from the world's dry lands, United Nations.*
- Walmsley, J.L., Howard, A.D., 1985. *Application of a boundary-layer model to flow over an aeolian dune. Journal of Geophysical Research* 90 (D6), 10631–10640.
- Wang, X., Dong, Z., Zhang, J., Q, J & Z, A. 2002. *Grain size characteristics of dune sands in the central Taklimakan sand sea. Sedimentary Geology*, 161, 1- 14.
- Webb, N.P., McGowan, H.A., Phinn, S.R. and McTainsh, G.H., 2006. *AUSLEM (AUStralian Land Erodibility Model): A tool for identifying wind erosion hazard in Australia. Geomorphology*, 78(3), pp.179-200.
- Wiggs, G.F.S., Livingstone, I., Warren, A., 1996. *The role of streamline curvature in sand dune dynamics: evidence from field and wind tunnel measurements. Geomorphology* 17, 29–46.
- Wiggs, G.F.S., 2001. *Desert dune processes and dynamics. Progress in Physical Geography* 25, 53–79.
- Yagüe-Martínez, N., Prats-Iraola, P., Gonzalez, F.R., Brcic, R., Shau, R., Geudtner, D., Eineder, M. and Bamler, R., 2016. *Interferometric processing of Sentinel-1 TOPS data. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(4), pp.2220-2234.
- Youlin, Yang. 2002, *Black windstorm in northwest China: A case study of the stormy sand-dust storms on May 5<sup>th</sup> 1993. Global Alarm: Dust and sand storms from the world's dry lands, United Nations.*