نشریه علمی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال یازدهم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۲

Vol.11, No.2, Summer 2023

۱۷ -۳۹

مقاله پژوهشی

DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5

آشکارسازی ابر به روش استریوگرافی با استفاده از جدیدترین نسل ماهواره های زمین ثابت با قدرت تفکیک مکانی بالا

سحر دهنوی[۱و۲]، یاسر مقصودی[۳]، محمدجواد ولدان زوج[۴*]

۱- دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- مشاور پژوهشی، موسسه تحقیقات آب و هواشناسی، دانشگاه لایبنیز هانوفر، هانوفر، آلمان

۳- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۴- استاد گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۲/۱۸ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۰۳/۲۲

چکیده

هدف از پژوهش حاضر ارائه روشی مبتنی بر استریوگرافی برای آشکارسازی ابرها برمبنای مقدار ارتفاع ابرها با بالاترین حدتفکیک مکانی ممکن و با بکارگیری تصاویر هواشناسی زمین ثابت است؛ به این ترتیب که ابتدا با استفاده از باند مرئی با تفکیک مکانی بالا از سنجنده سویری (*SEVIRI*) نصب شده بر روی دو سکو متیوست-۸ و متیوست-۱۰ یک زوج استریو تشکیل می‌شود. سپس با توجه به هندسه دید متفاوت دو سنجنده، هر دو تصویر در یک شبکه مرجع تصویرسازی می‌شوند و در نهایت با تشکیل خطوط مسیر دید دو سنجنده در یک صفحه اپی‌پلار، پارالاکس در دو تصویر بر روی نقاط ابری برآورد می‌شود. از مزیتهای این روش در برآورد ارتفاع ابر آن است که اندازه‌گیریهای استریو فقط وابسته به روابط هندسی بنیادی بین مشاهدات اجزای مرئی ابرهاست. در این مطالعه روشی نوین برای آشکارسازی پیکسلهای ابری مبتنی بر ارتفاع ابر ارائه شده است. پس از برآورد ارتفاع ابرها، امکان تفکیک پیکسلهای ابری از پیکسلهای غیرابری برمبنای اختلاف ارتفاع موجود فراهم شده و در واقع می‌توان آشکارسازی ابر را برمبنای ارتفاع برآورد شده در پیکسلها انجام داد. نتایج این پژوهش نشان‌دهنده دقت بالا و امکان‌پذیر بودن استفاده از استریوگرافی برای آشکارسازی پیکسل‌های ابری در تصاویر ماهواره‌ای است. مزیت آشکارسازی ابرها با بهره‌مندی از اطلاعات ارتفاع ابر آن است که نه تنها در تصاویر زمین‌ثابت حدتفکیک مکانی آشکارسازی افزایش می‌یابد، بلکه امکان استخراج اطلاعات سه‌بعدی ابر که از اهمیت ویژه‌ای در مطالعات برآورد ایرادیانس خورشیدی، استخراج ویژگی‌های ابر و سایر کاربردهای وابسته به ابرها برخوردار است؛ را فراهم می‌آورد. در نهایت از نقطه نظر اهمیت این پژوهش در ایران، لازم به ذکر است که با انجام این پژوهش، شاخه جدیدی از مطالعات سنجش‌از دور هواشناسی، با عنوان "استریوگرافی هواشناسی" در کشور پایه‌گذاری خواهد شد که راهگشای پژوهش‌های گسترده‌تر در این زمینه خواهد بود.

کلید واژه‌ها : آشکارسازی ابر، ارتفاع ابر، استریوگرافی، تصاویر هواشناسی زمین ثابت، سنجش از دور و فتوگرامتری.

* نویسنده مکاتبه کننده: خیابان ولیعصر، بالاتر از میدان ونک، تقاطع میرداماد، دانشکده مهندسی نقشه برداری، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.

تلفن: ۰۲۱۸۸۸۷۷۰۷۱

Email: valadanzouj@kntu.ac.ir

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

۱- مقدمه

ابرها علاوه بر آنکه اثرات گسترده‌ای در موازنه میزان انرژی در سطح زمین دارند، موجب تغییرات شدید جوی در راستاهای قائم و افقی جو نیز می‌شوند. به عنوان مثال گردش‌های جوی در نواحی اقیانوسی و خشکیها انواعی از تغییرات جوی هستند که به خودی خود موجب بروز ترکیبات و شکلهای گوناگونی از ابرها می‌شوند. به این ترتیب پرواضح است که پایش ابرها و اطلاع از خصوصیات آنها در مکانها و زمانهای مختلف، از جمله مهمترین مسائل تحقیقاتی در بررسی تغییرات جوی، ردیابی اثرات گازهای گلخانه‌ای و مطالعه نقش آنها در اثراتی مانند گرم شدن کره زمین محسوب می‌شود. یکی دیگر از دلایل اهمیت بررسی ابرها و خصوصیات فیزیکی آنها، اطلاع از میزان اثرگذاری دخالتهای انسانی و طبیعی بر روی جو و در نتیجه بر روی ابر است[۱]. در کنار اهمیتی که مطالعه ابرها و خصوصیات آنها دارد می‌تواند به نقش ابرها در کاهش ایرادیانس فرودی خورشید بر سطح زمین اشاره کرد. چنین نقشی در مباحثی مثل مکانیابی نیروگاههای خورشیدی، برآورد مقدار انرژی قابل تولید با بهره‌مندی از سلولهای خورشیدی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار خواهد شد و موجب می‌شود که مطالعه روشهای متعدد برای آشکارسازی ابرها جالب توجه و البته بسیار مهم تلقی شود. در این میان سالهاست که نقش سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای به عنوان یکی از ابزارهای کنترل و پایش جو به صورت مستمر و در وسعتهای مکانی بزرگ کاملا شناخته شده است. تاکنون روشهای متفاوتی برای آشکارسازی ابرها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای ارائه شده است[۲]. اما در هیچیک از مطالعات پیشین از تکنیک آشکارسازی ابر مبتنی بر ارتفاع آن بهره برده نشده است. از طرف دیگر روشهای متنوعی برای برآورد ارتفاع ابر با بهره‌مندی از داده‌های سنجش از دوری ارائه شده‌اند. در جدول (۱)، مروری بر تکنیکهای سنجش‌از دوری متفاوت برای استخراج اطلاعات ارتفاع ابر/ خاکسترهای آتشفشانی که تاکنون مطالعه و بررسی شده‌اند، انجام گرفته است. با اینحال صحت نتایج برآورد شده از تمامی مدلها وابسته به حدتفکیک مکانی سنجنده‌ها و ارتفاع ابر است[۳]. به نحوی که از این جدول روشن است، بهترین دقت تخمین ارتفاع ابر با استفاده از داده‌های لیدار سکوی فضایی[۱] حدود ۲۰۰ متر بوده و می‌تواند در شرایط شب و روز تهیه شود؛ با این اوصاف که امکان انجام این نوع از اندازه‌گیریها تنها هر ۱۶ روز یکبار فراهم است[۴]. برآورد ارتفاع برمبنای باندهای جذبی کربن دی اکسید هم با دقت کمتر ولی چندین بار در روز و با دقت ۲٫۹ کیلومتر انجام می‌شود. در این میان یکی از روشهایی که از گذشته تاکنون گاهی توسط محققین برای برآورد ارتفاع ابر مورد توجه قرار گرفته، روش مبتنی بر زوج داده‌های استریو و براساس مشاهدات پارالاکس در دو تصویر است. مشاهدات استریوگرافی جو، در ابتدا با عنوان مبانی فتوگرامتری ابر شناخته می‌شد. اوایل، زوج دوربینهای زمینی[۲] یا یک سری زمانی از عکسهای هوایی با هدف تولید داده‌های استریو برای مطالعه ابرها مورد استفاده قرار می‌گرفتند، به نحوی که اولین مرجع در بحث استریوگرافی هوایی مطالعه‌ای بود که در[۵] انجام گرفت. به طور کلی، مشاهدات استریوگرافیک در گذشته با استفاده از سکوهای هوایی و در ارتفاع پرواز بالا و با استفاده از دوربینهای قائم تهیه می‌شدند[۶]. مشاهدات استریوگرافیک ابرها با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای اولین بار در [۷, ۸] و با بهره‌گیری از ماهواره‌های هواشناسی انجام گرفت. در سال ۱۹۶۸، عکسهای حدتفکیک بالای استریو از ابرها از آپولو ۶ در یک مدار کم ارتفاع (*LEO*)[۳]اخذ شد و بعلاوه از این داده‌ها برای نمایش امکان اندازه‌گیری ارتفاع ابر با استفاده از روش استریوگرافی استفاده نمودند [۹]. پس از آن در [۱۰] از مجموعه‌ای از سری زمانی تصاویر

---

۱ *Space Platform*
۲ *Twin ground stations*
۳ *Low Earth Orbit (LEO)*

آپولو-۶ استفاده کردند تا ساختار ابر را با استفاده از جبهه هوای سرد[۱] آن شناسایی کنند. در مطالعه [۱۱] از داده‌های استریو سنجنده اسکایلب [۲]برای مطالعه توفانهای جوی استفاده شد. در سال ۱۹۷۴، اولین ماهواره زمین آهنگ[۳] با امکان تولید تصاویر حد تفکیک بالایی (۰/۹ کیلومتر) با عنوان اس-ام-اس-۱ [۴]پرتاب شد و در موقعیت *75 W* قرار گرفت. با عملکرد موفق ماهواره دوم در موقعیت ۱۰۷ درجه غربی با نام *SMS-2*، محققان مرکز پرواز فضایی گودارد[۵]، به دنبال راهکاری برای توسعه یک روش استریو تصویربرداری رفتند[۵, ۱۲-۱۴]. استفاده از زوج تصاویر استریو در مشاهدات ایستگاههای زمینی هم، براساس ابزارهای مشاهده آسمان پیشتر انجام گرفته است، که هدف در تمامی آنها بهبود نتایج شناسایی و آشکارسازی ابرها ذکر شده است. به عنوان مثال در [۱۵] سنجنده‌های تصویربردار کامل آسمان *TSI*[۶] و نیمکره کامل آسمان *HSI*[۷] دارای یک میدان دید نیمکره‌ای هستند و با هدف هدف تهیه یک سری‌زمانی از کسر ابر[۸] مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این مقاله از مشاهدات سطحی *HSI* برای استخراج اطلاعات ارتفاع پایین ابر[۹] *(CBH)* بهره گرفته شده است. در مطالعه ای که بر مبنای روش استریوگرافی در سال ۲۰۱۰ بر روی خاکسترهای آتش-فشانی انجام گرفت، مقدار ارتفاع خاکستر با دقت ارتفاعی ۶۰۰ متر برآورد شد. در این مطالعه زوج تصویر استریو به ترتیب از دو سنجنده چندطیفی قطبی مودیس و سنجنده زمین‌ثابت *SEVIRI* انتخاب شدند.

[۱] *Cold front*
[۲] *Skylab*
[۳] *GSO*
[۴] *SMS-1*
[۵] *Godard space flight center*
[۶] *Total Sky Imager (TSI)*
[۷] *Hemispherical Sky Imager (HSI)*
[۸] *fractional sky*
[۹] *Cloud base Height (CBH)*

با توجه به اینکه حد تفکیک مکانی سنجنده مودیس بهتر از حدتفکیک مکانی *SEVIRI* است، بنابراین استفاده از تکنیک استریو در این دو تصویر موجب بهبود حدتفکیک مکانی در برآورد ارتفاع ابر خواهدشد. با این وجود تعداد کم تصاویر مودیس در طول یک روز در مقایسه با تعداد تصاویر سنجنده *SEVIRI* که هر ۱۵ دقیقه اخذ می‌شوند، موجب می‌شود که تعداد زوج تصاویر استریو مناسب برای برآورد ارتفاع ابرهای آتشفشانی محدود شود[۱۶]. بنابراین راهکار استفاده از دو سنجنده زمین‌ثابت، راهی مناسب برای افزایش تعداد زوج تصاویر استریو برای برآورد ارتفاع ابر خواهد بود. لذا در آخرین مطالعه‌ای که به روش استریوگرافی بر روی ابرهای آتشفشانی انجام گرفت از دو سنجنده زمین ثابت[۱۰] بر روی سکو متیوست، برای برآورد ارتفاع ابرهای آتشفشانی بهره برده شد. در این تحقیق سنجنده اول از زوج استریو، سنجنده *SEVIRI* مربوط به نسل دوم ماهواره‌های متیوست (*MSG*[۱۱])، و سنجنده دوم *MVIRI* مربوط به نسل اول از ماهواره‌های متیوست (*MFG*[۱۲]) بوده است[۱۷]. به این ترتیب در تشکیل این زوج استریو امکان بهره‌وری از تمامی مزیتهای موجود در نسل دوم داده‌های *SEVIRI* اعم از حدتفکیک مکانی بالا، فراهم نبود. از آنچه پیشتر بیان شد و بررسی کامل تحقیقات گذشته تا سال ۱۳۹۷، به نظر می‌رسد تاکنون در هیچ مطالعه‌ای از اطلاعات ارتفاع ابر برای آشکارسازی پیکسلهای ابری در تصاویر ماهواره‌ای استفاده نشده است. بنابراین اولین نوآوری و هدف این تحقیق را می‌توان استفاده از تکنیک استریو برای تخمین ارتفاع و آشکارسازی پیکسلهای ابر مبتنی بر مقدار ارتفاع آنها دانست. با اینحال با توجه به اینکه این روش از باند مرئی سنجنده بهره برده است، لذا این روش به اندازه-گیریها در ساعات روشنایی روز محدود می‌شود.

[۱۰] *Geostationary*
[۱۱] *Meteosat Second Generation*
[۱۲] *Meteosat First Generation*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

جدول ۱: مروری بر روشهای سنجش از دوری برآورد ارتفاع ابر [۱۷]

روش	مزایا و معایب
لیدار و رادار[۱] [۴, ۱۸, ۱۹]	+ حد تفکیک مکانی و صحت بسیار بالا - زمان بازنگری مجدد[۲] بسیار طولانی (هر ۱۶ روز یکبار) و فقط مشاهدات نادیر امکانپذیر است
امواج صوتی[۳] [۲۰, ۲۱]	+ حد تفکیک بالا در تروپوسفر پایین - به صورت جهانی در دسترس
مدلسازی مسیر بازگشتی[۴] [۲۲, ۲۳]	+ امکان مدلسازی حتی در ابرهایی که از مرجع اندازه‌گیریها دور هستند -نیازمند داده‌های میدانی باد برای مدلسازی بازگشتی قابل اعتماد
دمای ظاهری[۵] [۳, ۲۲, ۲۴]	+ بکارگیری راحت، با ابزارهایی با بازنگری زمانی کوتاه - نیازمند پروفایل جوی و گسیلمندی ابرها/ فرض تعادل دینامیکی جو، مشکلاتی در ناحیه تروپوپاز
باند جذبی اکسیژن O_2 –A [۶] [۲۵]	+صحت بالا -نیازمند داده‌های با حدتفکیک طیفی بالا (که در تعداد زیادی از ماهواره‌ها ناموجود است، دوره بازنگری طولانی مدت)/ تنها در سطوح تاریک دارای عملکرد خوبی است، نیازمند مدلسازی انتقال تابش است/ فقط اندازه‌گیری در طول روز
باند جذبی کربن دی اکسید CO_2 [۷] [۲۶, ۲۷]	+عملکرد خوب حتی در مقابل ابرهای نیمه شفاف -دقیق تنها در ارتفاعات بالای تروپوسفر/ دارای مشکلات محاسباتی در نواحی تروپوپاز
طول سایه[۸] [۲۴, ۲۸]	+روشی ساده در پیاده‌سازی، بدون نیاز به هیچ نوع داده جانبی -امکان استفاده از این روش تنها در طول روز/ ارتفاع لبه افقی ابرها استخراج می‌شود نه ارتفاع بالای ابر
استریوسکوپی[۹] [۳, ۱۶, ۲۹-۳۲]	+صحت بالا/ نیازمند هیچ نوع داده جانبی/ تنها مبتنی بر اطلاعات هندسی است -نیازمند داده‌های همزمان از دو زاویه دید متفاوت
برآورد بهینه[۱۰] [۳۳-۳۵]	+شامل روشی برای محاسبه خطا -نیازمند اطلاعات پروفایل اتمسفری، ویژگیهای اپتیکی ابر و مدل انتقال تابش

[۱] *LiDAR and radar*
[۲] *Revisit time*
[۳] *Radio occulation*
[۴] *Backward trajectory modeling*
[۵] *Brightness Temperature*
[۶] *O_2 A-band absorption*
[۷] *CO_2 Absorption*
[۸] *Shadow length*
[۹] *Stereoscopy*
[۱۰] *Optimal estimation*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

با این وجود با توجه به برنامه‌ریزی پرتاب نسل جدیدی از سنجنده‌های چندطیفی مانند سنجنده متصل بر روی سکو[1] *MTG-1*، تصویربردار بازمکانی پیشرفته[2]، تصویربردار هیماواری پیشرفته[3] و تعدادی سنجنده زمین‌ثابت دیگر که تعداد باندهای حرارتی و مادون قرمز بیشتر و با حد تفکیک مکانی بالاتری در مقایسه با باند مرئی *SEVIRI-HRV* خواهند داشت، انتظار می‌رود استفاده از روش پیشنهادی در این مطالعه بهبود چشمگیری داشته باشد. انتظار می‌رود که بعد از سال ۲۰۲۰، با پرتاب نسل سوم از ماهواره‌های زمین‌ثابت تمامی بخشهای زمین تحت پوشش تصویربرداری این سنجنده‌ها قرار گیرند. در شکل ۱ ماهواره‌های زمین-ثابت فعال و ماهواره‌هایی که تا سال ۲۰۲۰ در مدار قرار خواهند گرفت نمایش داده شده‌اند. سنجنده‌های زمین-ثابت به طور متوالی در حال پیشرفتهایی از نقطه نظر حدتفکیک مکانی، طیفی، رادیومتریک، تعداد دفعات تکرار اخذ تصویر[4]، و تفاوت زاویه دید بین سنجنده‌ها هستند. این پیشرفتهای مکرر امکان بکارگیری تمامی مزیتهای ذکر شده در روش این تحقیق را برای پایش موثر ابرها در مقیاس جهانی، با باندهای متفاوت تصویربرداری و همچنین در هر دو زمان شب و روز فراهم خواهد آورد. از طرف دیگر، با توجه به سیاستهای اخیر یومتست [5]که در اواسط سال ۱۳۹۶ اجرایی، سکو *MSG-8* که از نسل دوم متیوست بود به طول جغرافیایی ۴۱/۵ درجه و به بالای اقیانوس هند منتقل شد. بنابراین با افزایش باز مکانی هوایی بین این سنجنده و سکو *MSG-10* که هر دو حامل یک سنجنده مشابه هستند، اختلاف زاویه دید بین دو سنجنده افزایش یافته و امکان تشکیل یک زوج استریو مناسب با حد تفکیک مکانی بالاتر از قبل برای برآورد ارتفاع ابر فراهم آمده است. از جمله مزیتهای این انتقال در سنجنده *SEVIRI-IODC* و تغییر سیاستهای یومتست که به بهبود نتایج این مطالعه نیز کمک کرده است می‌توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- حدتفکیک زمانی اخذ داده‌ها از ۳۰ دقیقه در نسل اول سنجنده متیوست به ۱۵ دقیقه تنزل داشته است. در نتیجه فاصله زمانی اخذ داده‌ها کمتر شده و امکان بررسی تغییرات آب و هوایی و ابرها با سرعت بیشتری ممکن شده است. ۲- حدتفکیک مکانی در این سنجنده در مقایسه با نمونه پیشین خود سه برابر شده است به نوعی که در نسل اول آن حدتفکیک مکانی ۳ کیلومتر بوده و در این سنجنده برابر با یک کیلومتر است. ۳- بعلاوه در نسل اول این سنجنده تنها دارای ۴ باند طیفی بود، در حالی که با تغییرات ذکر شده در بالا، هم اکنون این سنجنده دارای ۱۱ باند طیفی و یک باند با حدتفکیک مکانی بالاست.

در این مقاله برای اولین بار در سطح بین‌المللی از ترکیب اطلاعات دو سنجنده نسل دوم ماهواره متیوست بهره برده شده و هر دو سنجنده دارای مزیتهای ذکر شده در بالا هستند (تنها تفاوت این سنجنده‌ها در طول جغرافیایی تصویربرداری آنهاست). بنابراین در کنار سایر نوآوریهای این مطالعه تاثیر مزیتهای فوق نیز بررسی خواهد شد. از دیگر مزایای مطالعه حاضر میتوان به طور اجمالی و موردی به نکات زیر اشاره کرد. اولا، با توجه به اینکه مدل پیشنهادی ژیواستریو برای آشکارسازی ابر تنها از اطلاعات هندسی تصاویر بهره می‌برد و اطلاعات بازتابندگی دخیل نمی‌شوند، بنابراین امکان تفکیک ابر از نواحی برفی براحتی امکان‌پذیر می‌شود. این ویژگی را می‌توان یکی از مهمترین مزیتهای این مدل دانست چراکه یکی از دشوارترین و پرچالش‌ترین بخشهای مطالعه در خصوص ابرها در حال حاضر ارائه روشی برای تفکیک پیکسلهای ابرها از پیکسلهای حاوی برف در تصاویر ماهواره‌ای است. یکی دیگر از مزیتهای مدل پیشنهادی ژیواستریو که مبتنی بر فتوگرامتری

---
[1] *Flexible combined imager*
[2] *Advanced baseline imager*
[3] *Advanced Himawari imager*
[4] *Acquisition repetition cycle*
[5] *EUMETSAT*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

ماهواره‌ای است، استقلال این مدل از داده‌های جانبی یا فرضیات مربوط به وضعیت جو در زمان اخذ داده است. در این روش اهمیتی ندارد که ابر در زیر ناحیه تروپوپاز یا بالای آن باشد و همچنین نیازی به هیچ فرضی در خصوص مقدار گسیلمندی ابر وجود ندارد. اینگونه از فرضیات معمولا در سایر مدلهای برآورد ارتفاع ابر به عنوان فرضیات اولیه و کلیدی شناخته می‌شوند [۳, ۲۲, ۲۴]، که در روش حاضر به طور کامل حذف شده‌اند. از طرف دیگر در این مطالعه با در نظر گرفتن سه تصویر متوالی برای تشکیل زوجهای استریو تلاش بر آن بوده است که خطای حرکت ابر نیز در حین تشکیل زوجهای استریو حذف شود. پیشتر در [۳۶, ۳۷] از باند *HRV* در سنجنده متیوست به منظور استخراج اطلاعات پوشش ابر[۱] استفاده شده بود، و نتایج این مطالعه حاکی از آن بود که با افزایش حدتفکیک مکانی در باند *HRV* نسبت به محصولات موجود ابر در یومتست که برمبنای سایر باندهای متیوست هستند، دقت استخراج اطلاعات ابر افزایش یافته است. به عنوان مثال امکان شناسایی ابرهای سیریوس[۲] و باریک در محصولات موجود ابر وجود نداشته و یا اینکه کل محدوده ابری تشخیص داده شده است که به ترتیب می‌تواند خطاهای تخمین کمتر[۳] یا تخمین بیش از حد[۴] را به خروجیهای مدل اعمال کند. اما لازم به ذکر است که در [۳۶, ۳۷] همچنان از روش حدآستانه گذاری در مقادیر طیفی استفاده شده است که می‌تواند به خودی خود دارای خطای انتخاب حد آستانه باشد. بنابراین، یکی دیگر از مزیتهای مدل ژیواستریو عدم وابستگی این مدل به حدآستانه‌گذاریهای تجربی توسط نیروی انسانی است.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان بیان کرد هدف در این تحقیق آن است که با بهره‌گیری از تمامی مزیتهای سنجنده *SEVIRI* که بخشی از آنها در بالا ذکر شد، و بهره‌گیری از دو زوج استریو، ارتفاع ابر با بیشترین حدتفکیک مکانی انجام گیرد و از اختلاف ارتفاع موجود بین ابرها و سایر عوارض سطح زمین برای آشکارسازی ابرها بهره برده شود. در ادامه کلیات بیشتری از داده‌های مورد استفاده، روش مورد استفاده و نتایج حاصله ارائه شده است.

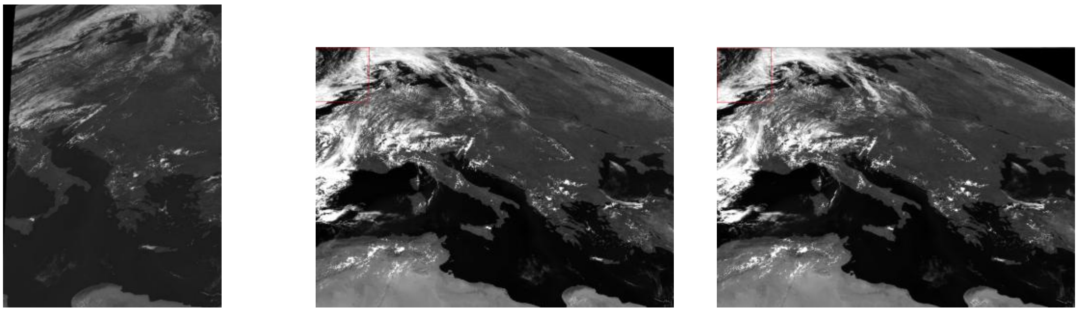
۲- داده‌های مورد استفاده

برای انتخاب همزمان زوج تصاویر استریو که از دو سنجنده متفاوت اخذ شده‌اند و بهبود برآوردهای ارتفاعی، جزییات زیادی هستند که لازم است مورد توجه قرار گیرد. به عنوان مثال باید به زمان دقیق اخذ تمامی پیکسلهای تصویری و موقعیت دقیق جغرافیایی آنها کاملا توجه داشت. به این منظور در مرحله اول لازم است که اطلاعات موقعیتی دقیق ماهواره در اختیار باشد. گرچه اصولا انتظار می‌رود که داده‌های ماهواره‌ای زمین‌ثابت موقعیت ثابتی در فضا داشته باشند، اما تصویر اطلاعات مداری آنها بر روی سطح زمین نه تنها یک نقطه ثابت نیست بلکه تقریبا به شکل عدد *8* است. بنابراین با توجه به اینکه موقعیت ماهواره می‌تواند نسبت به وضعیت اسمی خود تا چندین درجه هم جابجایی داشته باشد، لذا لازم است موقعیت ماهواره را با تابعی از زمان محاسبه کرد. گرچه پارامتریزه کردن اطلاعات مداری ماهواره کار ساده‌ای نیست اما می‌توان تقریب خوبی از آن را با بهره‌گیری از یک چندجمله‌ای درجه سه که ضرایب آن در فرداده ماهواره‌های متیوست موجود است برآورد نمود[۳۸]. برای آنکه در تشکیل زوج استریو بیشینه اطلاعات مکانی بکارگرفته شود، بنابراین باند *HRV*[۵] (۰/۶- ۰/۹ میکرون) از هر دو سنجنده مورد استفاده قرار گرفت.

[۱] *Cloud Mask*
[۲] *Cirius*
[۳] *Under estimation*
[۴] *Over estimation*
[۵] *High Resolution Visible*

۲-۱- سنجنده ***SEVIRI*** بر روی سکو ***MSG-10***

مهمترین بخش سکو *MSG*، رادیومتر *SEVIRI* با ۱۲ باند طیفی از محدوده مرئی تا مادون قرمز حرارتی است که با دوره گردش ۱۵ دقیقه‌ای برای ناحیه اسمی تصویربرداری ماهواره در طول جغرافیایی ۰ درجه است. باند با تفکیک مکانی بالا (*HRV*) در این سنجنده دارای حد تفکیک ۱ کیلومتر در بخش نادیر تصویر است، در حالیکه حد تفکیک سایر باندهای این سنجنده ۳ کیلومتر است. باند تصویری منتخب در سطح ۱/۵ از داده‌های یومتست گرفته شده است. در این سطح، داده‌های تصویری از نقطه نظر رادیومتریک و اطلاعات مکانی (*Geolocation*) پیش‌پردازش و ترمیم (*Rectified*) شده‌اند و آماده سایر پردازش‌ها برای استخراج محصولات هواشناسی هستند[۳۹]. با توجه به اینکه ابرها با سرعت زیادی جابجا می‌شوند و ممکن است در فاصله زمانی ۱۵ دقیقه حتی تا ۵۰ پیکسل جابجایی داشته باشند، بنابراین بهتر است از سه تصویر متمادی برای تشکیل صفحات اپی‌پلار استریو استفاده شود تا بتوان میانگین زمانی اخذ این تصاویر را به عنوان یک زمان واحد برای برآورد ارتفاع ابر در نظر گرفت. دو تصویر اول از سنجنده با طول جغرافیایی صفر درجه انتخاب شدند (شکل(۱)).



الف) تصویر سنجنده *MSG-10*، در تاریخ نهم آگوست ۲۰۱۷، ساعت ۱۲:۱۲:۵۷.

ب) تصویر سنجنده *MSG-10*، در تاریخ نهم آگوست سال ۲۰۱۷، ساعت ۱۱:۵۷:۵۷.

پ) *MSG-8* در تاریخ نهم آگوست سال ۲۰۱۷، ساعت ۱۱:۵۸:۰۲

شکل ۱: الف و ب) تصاویر سنجنده *SEVIRI* ($\lambda = 0$)، که به صورت متوالی و با فاصله زمانی ۱۵ دقیقه از یکدیگر اخذ شده‌اند.
پ) تصویر سنجنده *SEVIRI* ($\lambda = 41.5°$).

۲-۲- سنجنده ***SEVIRI*** بر روی سکو ***MSG-8*** (***IODC***[۱])

در این سکو نیز سنجنده کاملا مشابه با ماهواره متیوست*10*- با خصوصیات کاملا مشابه اخذ تصویر می‌کند با این تفاوت که طول جغرافیایی مرکز تصویری در این سکو، طول جغرافیایی ۴۱/۵ درجه است. باند با تفکیک مکانی بالا (*HRV*) در این سنجنده با حد تفکیک ۱ کیلومتر نیز به عنوان یکی از اجزای زوج استریو مورد استفاده قرار گرفته است. باند تصویری منتخب در سطح ۱/۵ از داده‌های یومتست گرفته شده است.

۳- روش استریوگرافی پیشنهادی (مدل ژیواستریو)

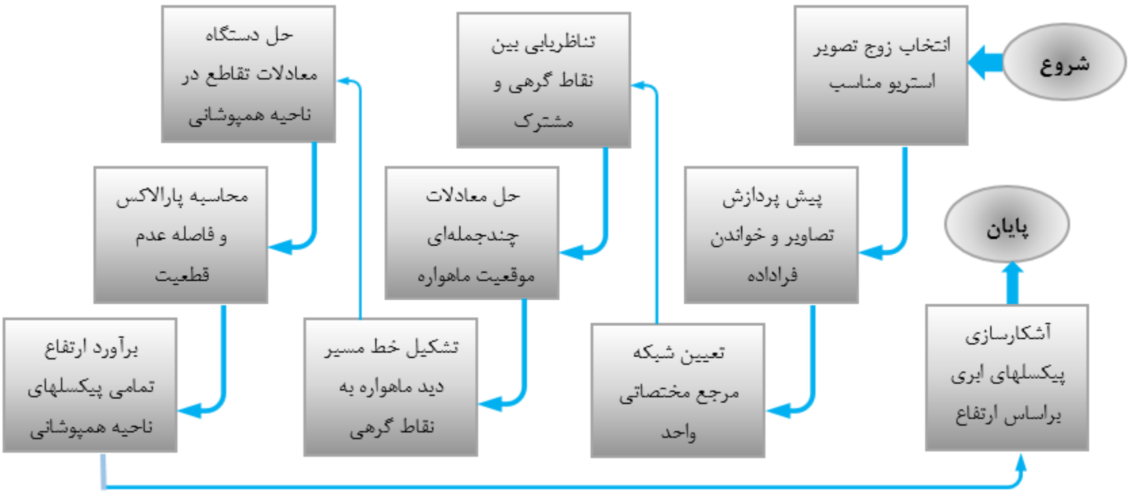
در این پژوهش روش مورد استفاده برای برآورد ارتفاع ابر مبتنی بر جابجایی ناشی از اختلاف ارتفاع ابر و اثر پارالاکس است. این روش با استفاده از داده‌های اخذ شده از دو رادیومتر چندطیفی یکسان و تقریبا به صورت همزمان و بر روی سکوهای زمین ثابت متفاوت پیاده‌سازی خواهد شد. با توجه به اینکه زوج داده‌های تصویری ورودی در روش استریوگرافی پیشنهادی داده-

---
۱ *Indian Ocean Data Coverage*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

های زمین‌ثابت هستند، مدل پیشنهادی در این تحقیق با عنوان مدل ژیواستریو معرفی شده است.

در این مدل، مقدار پارالاکس می‌تواند به صورت فاصله بین موقعیت ظاهری یک ابر مشابه از دو نقطه مشاهداتی متفاوت اندازه‌گیری شود و مسلما با توجه به اصول اولیه فتوگرامتری مقدار آن متناسب با مقدار ارتفاع ابر از سطح زمین می‌باشد. با توجه به اینکه موقعیت معلوم ماهواره و تصویر زمین مرجع شده معرف هندسه تصویربرداری است، مقدار ارتفاع ابر را می‌توان در سه گام کلی تخمین زد. اول، داده‌های *SEVIRI-IODC* ($\lambda = 41.5°$) بر شبکه مکانی *SEVIRI* ($\lambda = 0°$) تصویر می‌شوند. سپس با استفاده از یک فرآیند تناظریابی اتوماتیک هر دو تصویر هم‌مرجع می‌شوند و نقاط گرهی و مشترک بین دو تصویر شناسایی و استخراج می‌شوند. در نهایت پس از تشکیل خطوط مسیر دید ماهواره‌ها به نقاط مشاهداتی استخراج شده، از معادله تقاطع این خطوط برای برآورد ارتفاع ابر استفاده می‌شود. ترتیب این مراحل در روندنمای شکل(۲) نمایش داده شده است. در ادامه جزییات مراحل مورد نیاز برای اجرای مدل ژیواستریو در زوج تصاویر زمین‌ثابت متیوسط به تفصیل بیان شده است.



شکل۲: روندنمای مدل ژیواستریو پیشنهادی برای آشکارسازی ابر برمبنای مقدار ارتفاع

۳-۱- یکسان‌سازی شبکه مرجع زوج تصاویر استریو

با توجه به اینکه تصاویر اخذ شده با سنجنده *SEVIRI* و بر روی سکوهای متفاوت اخذ شده‌اند، باید برای برآورد مقدار پارالاکس، تصویرهای اخذ شده از ماهواره‌های متفاوت، در یک شبکه مختصاتی واحد یک‌مرجع‌سازی شوند. به این معنا که تمامی داده‌ها باید دارای مرجع مکانی، سیستم تصویر[1]، دیتوم ژئودتیک[2] و حد تفکیک یکسان باشند. پس از انجام این مرجع‌سازی می‌بایست تمام خطوط ساحلی در همه تصاویر بر هم منطبق شوند. به این ترتیب در صورتی که یک عارضه دارای ارتفاع باشد، می‌بایست موقعیت مکانی آن در سیستم مختصات تصویری متناسب با مقدار ارتفاع آن تغییر کند.

در تصاویر زمین ثابت متیوست، تمامی داده‌های

[1] *Map projection*

[2] *Geodetic datum*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

تصویری در یک سیستم تصویر عمومی پرسپکتیو[۱] که یک سیستم تصویر استاندارد نیست، تصویرسازی شده‌اند. بنابراین به منظور همسان سازی سیستم تصویر در هر دو سنجنده لازم است یکی از اجزای استریو بر روی شبکه زوج استریو دیگر منطبق شود. به این منظور میتوان از یکی از انواع روشهای نمونه‌برداری مجدد نظیر همسایگی نزدیک[۲]، خطی[۳]، دوسویه[۴]، سه خطی[۵]، تداخل مکعبی[۶] و درونیابی وزندار معکوس[۷] بهره برد. در این مطالعه، سنجنده *SEVIRI-IODC* با استفاده از درونیابی وزندار معکوس از سیستم تصویر اولیه خود بر روی شبکه مختصاتی *SEVIRI* تصویر شده است (شکل(۳)).

۳-۲- تناظریابی اتوماتیک تصویری

در اثر تناظریابی، زوج نقاط مشترک بین دو تصویر ماهواره‌ای تعیین می‌گردند. در مطالعاتی که پیش از این در زمینه استریوسازی زوج تصاویر انجام گرفته است[۱۶, ۱۷] با توجه به اینکه سنجنده‌های تصویری (و در نتیجه حدتفکیک مکانی و تابع پاسخ طیفی) متفاوت بودند، نتایج دارای کیفیت نسبتا پایینتری بوده‌اند. در این پژوهش با وجود اینکه تفاوتهایی در دو تصویر از نقطه نظر شرایط نوردهی خورشیدی و هندسه‌دید دارند، اما از دو سنجنده یکسان *SEVIRI* بهره برده شده است. علاوه بر مشابه‌سازی سیستم تصویربرداری دو سنجنده، در این تحقیق مقدار حدتفکیک مکانی تصویری نیز نسبت به مطالعات پیشین که بر روی خاکسترهای آتشفشانی انجام گرفته بود، افزایش داشته است [۱۶, ۱۷].

با توجه به تفاوتهایی که هنوز در دو زوج استریو از دیدگاه نوردهی و زاویه دید سنجنده‌ها وجود دارد، بنابراین شکل ظاهری یک عارضه مشابه در دو تصویر کاملا متفاوت دیده می‌شود، به این ترتیب توصیفگرهای محلی[۸] یک عارضه مشابه در تصویر متفاوت خواهند بود. با تستهای متعددی که در این مطالعه انجام گرفت مشخص شد که نرم‌افزارها و روشهای متداول فتوگرامتری و سنجش‌از دوری مثل انوی[۹]، اردس[۱۰]، ژئوماتیکا[۱۱] و ال-پی-اس[۱۲] قادر به شناسایی نقاط گرهی مشترک و همبستگی[۱۳] بین دو تصویر نیستند. پیشتر روشهای تناظریابی اتوماتیک متفاوتی برای حل این مسئله توسط محققین متفاوت مورد مطالعه و بررسی قرار گرفتند که می‌توان آنها رو به دو دسته روشهای ناحیه‌مبنا[۱۴] و ویژگی‌مبنا[۱۵] تقسیم‌بندی کرد[۴۰-۴۴]. علاوه بر این با توجه به مطالعات صورت گرفته، دیده شد که حتی با تعریف قیود مقیاس و جهت هم امکان شناسایی تعداد کافی از نقاط همبستگی در تصاویر هواشناسی متیوست فراهم نخواهد آمد[۱۶]. به منظور برآورد مقدار همبستگی بین زوج تصویر، از روش پیشنهادی در [۱۶, ۴۵] استفاده شد، که در آن از روابط مکانی سخت‌گیرانه‌تری برای شناسایی عوارض همسایه که مبتنی بر همسایگی محلی هستند و روش تحلیل پنجره متحرک[۱۶] بهره برده شده است. مزیت این روش مکان‌مبنا، نسبت به روشهای عارضه‌مبنا آن است که در نتیجه آن تعداد نقاط همبسته بیشتری شناسایی می‌شوند[۱۶].

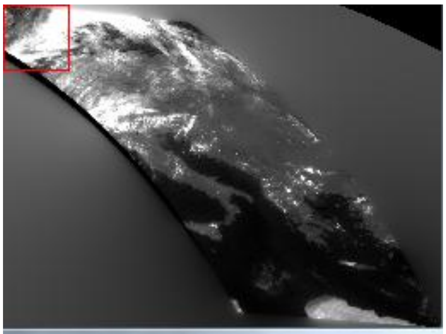
گرچه در نتیجه تناظریابی تصویری عموماً مقدار شیفت

۱ *General near-side perspective*
۲ *Nearest Neighbour*
۳ *Linear*
۴ *BiLinear*
۵ *TriLinear*
۶ *Cubic Convolution*
۷ *Inverse Weighted Interpolation*

۸ *Local descriptors*
۹ *ENVI*
۱۰ *ERDAS*
۱۱ *GEOMATICA*
۱۲ *LPS*
۱۳ *Correlation*
۱۴ *Area-based*
۱۵ *Feature-based*
۱۶ *Moving window*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

بین یک زوج تصویر برآورد می‌شود، اما در روش مورد استفاده در این مطالعه به منظور در نظر داشتن اثر باد در جابجایی ابرها همیشه از سه تصویر متفاوت شامل یک تصویر *SEVIRI-IODC* و دو تصویر *SEVIRI* که دقیقا در فاصله زمانی کوتاهی قبل و بعد از تصویر *SEVIRI-IODC* اخذ شده‌اند، بهره برده می‌شود.



شکل۳: تصویر سنجنده *MSG-8*، در تاریخ ۲۰۱۷۰۸۰۹، ساعت ۱۱:۵۸:۰۲ پس از تصویرسازی در شبکه مرجع واحد با استفاده از درونیابی وزندار معکوس

با توجه به اینکه موقعیت ابرها در سه زمان متفاوت متناسب با سه تصویر مورد استفاده تغییر کرده است، بنابراین فرض برآن است که موقعیت و ارتفاع ابر در لحظه برداشت تصویر *SEVIRI-IODC* از نظر زمانی و با استفاده از تصویر *SEVIRI* برداشت شده است. بنابراین در این مطالعه دوبار عملیات تناظریابی تصویری بین سه تصویر و با ثابت بودن جزء *SEVIRI-IODC* در این عملیات اجرا می‌شود. در ادامه جزییات بیشتر این روش تناظریابی به تفصیل بیان شده و شامل گامهای زیر است[۱۶, ۴۵]:

- ابتدا براساس پیکسل مورد نظر (پیکسلی با مختصات تصویری *C* و *L*) یک پنجره جستجو مرجع[۱] (با تعداد خطوط n_{C1} و تعداد ستونهای n_{L1}) از تصویر اول انتخاب می‌شود (شکل(۴-ب)): پیکسل *C* و *L* با رنگ قرمز و چارچوب پنجره جستجو با رنگ زرد نمایش داده شده‌اند).
- در تصویر دوم یک پنجره جستجو در نظر گرفته می‌شود (با تعداد خطوط و ستونهای بیشتر از پنجره جستجو مرجع $n_{C1} > n_{C2}$ و $nL_1 > nL_2$) که مرکزیت آن پیکسلی با مختصات تصویری *(C,L)* است. (شکل(۴-الف)): پنجره جستجو (نارنجی کمرنگ) را در تصویر دوم نشان می‌دهد که در مرکزیت آن پیکسل با مختصات *(C,L)* قرار دارد (نارنجی تیره)).
- در این مرحله در داخل پنجره جستجو، یک پنجره متحرک (با تعداد nL_1 سطر و nC_1 ستون) و به بزرگی پنجره مرجع در تصویر اول انتخاب می‌شود. پنجره جستجو نیز در تصویر دوم به رنگ زرد نمایش داده شده است.
- این پنجره در داخل محدوده پنجره جستجو حرکت کرده و برای هر بار جابجایی پنجره متحرک مقدار شاخص همبستگی (*CI*[۲]) بین پنجره مرجع و پنجره متحرک تصویر دوم محاسبه می‌شود (رابطه(۱)).
- قابل ذکر است که در رابطه (۱)، *CI* مقدار شاخص همبستگی بین دو پنجره جستجو، $DNm_{i,j}$ و $DNr_{i,j}$ مقادیر درجات خاکستری پنجره متحرک (تصویر دوم) و پنجره جستجو مرجع (تصویر اول)،

[۱] *Reference subset*

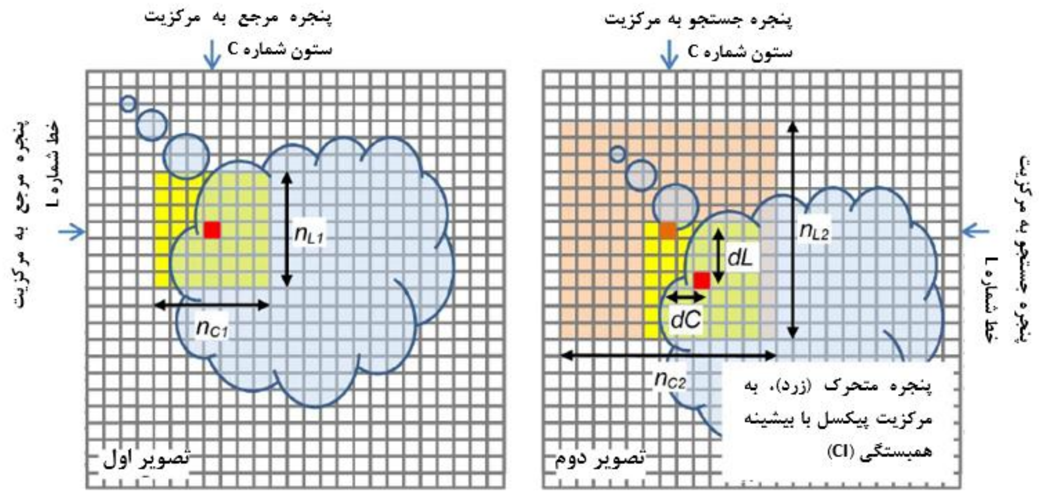
[۲] *Correlation Index*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

μr و μs هم به ترتیب مقادیر میانگین درجات خاکستری در پنجره جستجو مرجع و پنجره جستجو متحرک، i و j هم مقدار جابجایی پیکسل مرکزی بین پنجره‌های جستجوی مرجع و متحرک هستند.

- پس از محاسبه مقادیر شاخص همبستگی CI در پنجره متحرک در موقعیتهای متفاوت، مقدار شیفتی (موقعیتی از پنجره متحرک) که در آن CI بیشینه است را ثبت می‌کنیم. در شکل(۴)، مرکز پنجره متحرک با بیشترین مقدار CI به رنگ قرمز و مرکز قاب پنجره مرجع به رنگ نارنجی تیره نمایش داده شده‌اند. به این ترتیب از جابجایی این دو مرکز به اندازه dC در راستای ستون و dL در راستای سطر نسبت به هم مشخص است که ابر در این شکل به میزان دو ستون و سه سطر جابجایی داشته است.

$$CI=\frac{\sum_{i=1-\frac{n_{C1}}{2},j=1-\frac{n_{L1}}{2}}^{i=\frac{n_{C1}}{2}-1,j=\frac{n_{L1}}{2}-1}(DNr_{i,j}-\mu r).(DNm_{i,j}-\mu s)}{\sqrt{\sum_{i=1-\frac{n_{C1}}{2},j=1-\frac{n_{L1}}{2}}^{i=\frac{n_{C1}}{2}-1,j=\frac{n_{L1}}{2}-1}(DNr_{i,j}-\mu r)^2}.\sqrt{\sum_{i=1-\frac{n_{C1}}{2},j=1-\frac{n_{L1}}{2}}^{i=\frac{n_{C1}}{2}-1,j=\frac{n_{L1}}{2}-1}(DNm_{i,j}-\mu s)^2}} \qquad \text{رابطه(۱)}$$



شکل ۴: نمایی شماتیک از روش تناظریابی ناحیه مبنا [۱۶]

به این ترتیب در نهایت با محاسبه مقدار شیفت (جابجایی) بین دو تصویر می‌توان نقاط متناظر زوج تصویر را استخراج کرد. با توجه به اینکه در این مطالعه از سه تصویر استفاده می‌شود، بنابراین محاسبه شیفت دوبار انجام میگرد تا نقاط متناظر هر سه تصویر استخراج شوند. نتایج این تناظریابی تصویری هم مسلماً وابسته به اندازه ناحیه جستجو و پنجره متحرک است. پنجره با ابعاد بزرگ نمی‌تواند عوارض کوچکتر را شناسایی کند اما عوارض بزرگتر را راحتتر شناسایی و استخراج می‌کند. بنابراین برای بهینه‌سازی تناظریابی، بهترین راهکار استفاده از تناظریابی در سطوح متفاوت هرمهای تصویری[۱] است. هرمهای تصویری به نوعی

[۱] *Image pyramids*

نمایش تصویر اولیه در حدود تفکیک مکانی[۱] متفاوت هستند. به نحوی که پایینترین سطح هرم تصویر اولیه بوده و هرمهای سطوح بالاتر بازسازی مجدد سطح پایینی هرم در یک حدتفکیک متفاوت هستند. در سطوح بالایی هرم حدتفکیک متناسب با ضریب هرم انتخابی[۲]، تغییر می‌کند. در این مطالعه مشابه با روش زاکسک (۲۰۱۳) [۱۶]، از ضریب ۳ استفاده شده، بنابراین هر سطح بالایی هرم، میانگین ۳×۳ از پیکسلها در سطح پایینی است. به این ترتیب مقدار شیفت برای تمامی سطوح هرم محاسبه می‌شود و اگر مقدار CI در سطح انتهایی هرم (با کمترین حد تفکیک مکانی[۳]) کمتر از ۰/۷ باشد، به این ترتیب مقدار جابجایی محاسبه شده غیرقابل اعتماد تلقی شده و مقدار آن صفر در نظر گرفته می‌شود. در این مطالعه، با توجه به نتیجه خوبی که از پژوهش [۱۶] حاصل شده بود، ابعاد پنجره متحرک ۷×۷ و ابعاد پنجره جستجو ۱۳×۱۳ انتخاب شد.

پس از تکمیل فرآیند تناظریابی بین دو تصویر، روشن است که با داشتن موقعیت ابر و هر دو ماهواره امکان تشکیل خطوط مسیر دید دو ماهواره فراهم شده و از تقاطع این خطوط مقدار ارتفاع ابر قابل برآورد خواهد بود.

۳-۳- عملیات تقاطع و برآورد ارتفاع ابر

پس از عملیات تناظریابی، مقادیر مختصاتی هر سه تصویر برآورد و تعیین خواهد شد. اطلاعات مورد نیاز برای محاسبه مقدار طول و عرض جغرافیایی پیکسلها معمولاً در فراداده[۴] ماهواره موجود است و بخشی از داده ماهواره‌ای[۵] است. بعلاوه اطلاعات موقعیتی ماهواره[۶] نیز در قالب فراداده ماهواره در اختیار قرار می‌گیرد، بنابراین تعیین موقعیت لحظه‌ای ماهواره امکان‌پذیر است. پیش از انجام عملیات تقاطع، به منظور در نظر گرفتن جابجایی‌های احتمالی در ابرها در فواصل زمانی اخذ سه تصویر، موقعیت ابر را در لحظه اخذ تصویر میانی در نظر می‌گیریم. در این مرحله می‌توان با بهره‌مندی از یک روش مبتنی بر جبر برداری مقدار ارتفاع ابر را محاسبه نمود[۱۷].

- مرحله اول، تبدیل تمام مقادیر مختصاتی جغرافیایی[۷] (λ, φ, h) به یک سیستم مختصات کارتزین زمین‌مرکز[۸] (X,Y,Z) به شرح رابطه(۲) است:

رابطه (۲)
$$X = (N + h).\,cos\varphi.\,cos\lambda$$
$$Y = (N + h).\,cos\varphi.\,sin\lambda$$
$$Z = (N.\,(1 - e^2) + h).\,sin\varphi$$

در رابطه(۲)، N مقدار شعاع انحنا[۹] و e خروج از مرکزیت اولیه بر طبق رابطه (۳) است:

رابطه (۳)
$$N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 sin^2\varphi}}$$
$$e = \sqrt{\frac{a^2 - b^2}{a^2}}$$

در رابطه (۳)، a و b به ترتیب شعاعهای کمینه و بیشینه بیضوی مرجع[۱۰] هستند[۱۶].

- با اجرای عملیات درونیابی که قبلا مطرح شد، موقعیت مجازی پیکسلهای تصویری *SEVIRI* در زمان اخذ تصویر *SEVIRI-IODC* تعریف می‌شوند.
- در این مرحله معادله پارامتریک سه‌بعدی بین خطوط تشکیل‌دهنده مختصاتهای مجازی تصویر *SEVIRI* و موقعیت مکانی ماهواره *SEVIRI* و خوط متناظر که متشکل از موقعیت ماهواره *SEVIRI-IODC* و پیکسلهای متناظر زمینی در این تصویر

---

[۱] *Multi-resolution*
[۲] *Chosen pyramid factor*
[۳] *Coarser resolution*
[۴] *metadata*
[۵] *Satellite dataset*
[۶] *Satellite ephemerides*
[۷] *Geographic coordinate system*
[۸] *Geocentric Cartesian coordinate system*
[۹] *Radius*
[۱۰] *Reference ellipsoid*

هستند، تعریف می‌شود.

- حل سیستم معادلات خطی رابطه (۴)، محل تقاطع زوج خطوط هر زوج استریو را تعیین می‌کند.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{IODC} + t_{IODC}.\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{IODC} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{SEVIRI} + t_{SEVIRI}.\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{SEVIRI}$$ رابطه (۴)

در رابطه(۴)، $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{IODC}$ و $\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}_{SEVIRI}$ به ترتیب موقعیت‌های مکانی سنجنده‌های *SEVIRI-IODC* و *SEVIRI* در مدار خود، $\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{IODC}$ و $\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix}_{SEVIRI}$ هم بردارهای جهت خطوط دو سکو (بردارهای *CI* و *CS*) و در نهایت t_{SEVIRI} و t_{IODC} نیز مجهولات تعیین‌کننده موقعیت نقطه تقاطع هستند. با توجه به اینکه سیستم معادلات رابطه (۴)، یک سیستم معادلات فرامعین[۱] است بنابراین با استفاده از روش کمترین مربعات[۲] قابل حل خواهد بود. در نهایت مقادیر مختصاتی در سیستم کارتزین به سیستم مختصات جغرافیایی بازگردادنده می‌شود تا به این ترتیب مقدار ارتفاع از سطح بیضوی تعیین شود. به این منظور از رابطه (۵) بهره برده می‌شود.

$$h = \frac{\sqrt{X^2 + Y^2}}{cos\varphi} - N$$
$$tan\varphi = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}.(1 - \frac{e^2.N}{N + h})}$$ رابطه (۵)
$$tan\lambda = \frac{Y}{X}$$

با توجه به ماهیت گسسته پیکسلهای تصویری باید توجه داشت که خطوط دو سنجنده هیچگاه همدیگر را قطع نمی‌کنند، بلکه به نوعی از هم عبور می‌کنند. به این ترتیب سیستم معادلات رابطه (۴) به دنبال تعیین نقطه تقاطع واقعی این خطوط نیست، بلکه به نوعی نزدیکترین زوج نقاط در این دو خط را تعیین خواهد کرد. به این ترتیب مقدار ارتفاع ابر را هم می‌توان با استفاده از موقعیت یکی از این نقاط یا موقعیت میانگین بین دو نقطه برآورد نمود، که در این مقاله موقعیت میانگین دو نقطه به عنوان موقعیت ابر در نظر گرفته می‌شود. یکی از مزیتهای این نوع محاسبه مقدار ارتفاع به روش تقاطع آن است که می‌توان تخمینی از کیفیت تقاطع برمبنای فاصله تقاطع[۳] دو خط برآورد نمود.

۴- نتایج

داده‌های تصویری مورد استفاده برای ارتفاع ابر شامل باندهای *HRV* از دو سنجنده یکسان *SEVIRI* که به ترتیب بر روی دو سکو در طولهای جغرافیایی ۰ و ۴۱/۵ درجه بوده‌اند. علت عدم استفاده از حالت تصویربرداری *RSS*[۴] آن است که در این مود طول جغرافیایی مرکز تصویر ۹/۵ درجه شرقی خواهد بود که در نتیجه مقدار طول باز مکانی فضایی بین دو سنجنده (*B*) کاهش خواهد یافت. در بررسیهای که بر روی روش دقت برآورد ارتفاع از یک زوج استریو انجام گرفته است، رابطه (*B/H*) در فتوگرامتری که به عنوان نسبت باز به ارتفاع[۵] شناخته می‌شود معرفی شده است[۴۶]. دقت برآورد ارتفاع را متناسب با این نسبت دانسته‌اند. به نحوی که افزایش این نسبت موجب افزایش دقت برآورد ارتفاع (کاهش خطای ارتفاعی)، می‌شود. بنابراین روشن است که افزایش طول باز مکانی *B* موجب بزرگتر شدن این نسبت و در نتیجه دقت برآورد ارتفاع می‌شود. بنابراین در این مطالعه از دو تصویر با بیشترین بازمکانی ممکن بهره برده شد. از طرف دیگر یکی از دلایل ذکر شده در مطالعات پیشین [۱۷] برای بهره‌مندی از باند *RSS* آن بوده است که فاصله زمانی اخذ دو تصویر

---
۱ *overdetermined*

۲ *Least Square*

۳ *Intersection distance*

۴ *Rapid Scan Service Mode*

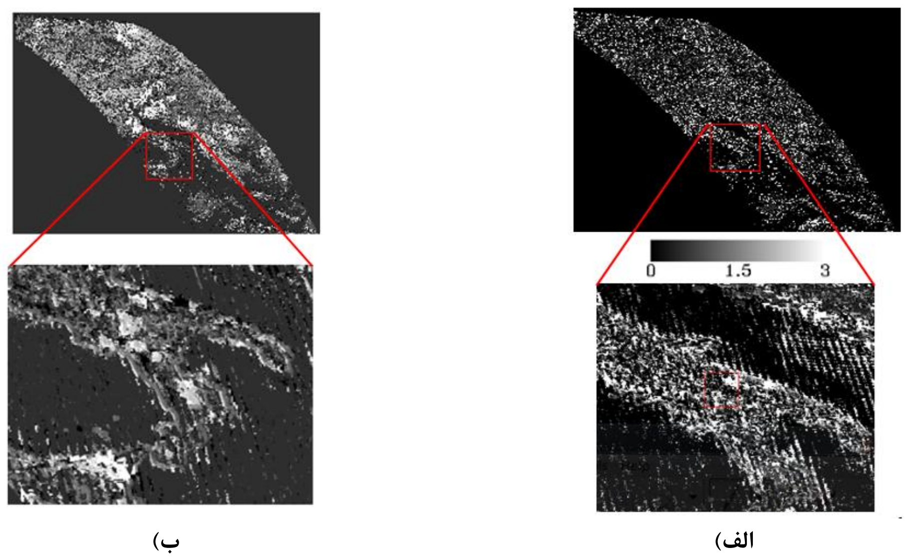
۵ *Base to Height Ratio*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

کمینه شود. با توجه به تنظیمات یکسان در دو سنجنده *SEVIRI* مورد استفاده در کار پژوهشی حاضر به نحوی که هر دو هر ۱۵ دقیقه یکبار تصویربرداری می‌کنند، بنابراین اختلاف زمانی اخذ تصاویر در این دو سنجنده بسیار کوتاه (کمتر از یک دقیقه است). به عنوان مثال با نگاهی به زمان اخذ تصویر در داده‌های مورد استفاده در این مطالعه در شکل (۱) مشاهده می‌شود که اختلاف زمانی اخذ دو تصویر تنها ۵ ثانیه بوده است. بنابراین انتظار می‌رود برآوردهای ارتفاعی با استفاده از داده‌های نسل جدید متیوست، بیشترین دقت قابل برآورد را ارائه کنند. با توجه به اینکه هر دو تصویر توسط یک سنجنده یکسان اخذ شده‌اند بنابراین اختلاف زیادی بین ابعاد پیکسلها وجود نخواهد داشت (یک کیلومتر) و عوارض به جز اختلاف زاویه دیدی که باهم دارند، تقریبا یکسان دیده می‌شوند. البته توجه به این نکته ضروری است که حدتفکیک مکانی از نادیر به سمت حاشیه در تصویر متیوست کاهش می‌یابد، به این ترتیب انتظار می‌رود که تصویر *IODC* در ناحیه اروپا حدتفکیکی در حدود ۳ کیلومتر داشته باشد که دقت برآورد ارتفاع و تناظریابی را اندکی تحت تاثیر قرار می‌دهد.

فاصله بین خطوط اپیپلار (خطوط تقاطع در زوج استریو)، نشان‌دهنده دقت برآورد ارتفاع ابر است (شکل(۵)). این خطوط که در واقع خطوط مسیر دید سنجنده به عارضه زمینی یا ابرها هستند، هیچگاه در داده‌های تصویری مورد استفاده، تقاطع کامل ایجاد نمی شود. زیرا داده‌های مورد استفاده تصویری در یک فضای گسسته هستند. بنابراین کمترین فاصله بین این خطوط متنافر به عنوان محل تقاطع شناخته شده و فاصله موجود در محل تقاطع معیاری از عدم قطعیت در نتایج برآورد ارتفاع خواهد بود. با توجه به اینکه این فاصله معیاری از عدم قطعیت است، بنابراین باید تا حد امکان کوچک باشد. هرچه این فاصله کمتر باشد، رنگ پیکسلهای شکل(۵-الف))، تیره‌تر و قطعیت مدل ژیواستریو بیشتر خواهد بود.



شکل ۵: الف) فاصله خطوط اپیپلار (*km*)، ب) مقدار ارتفاع بالای ابر برآورد شده

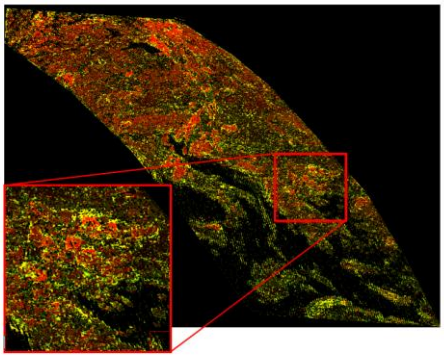
با توجه به حضور ابرهای تکه‌ای و وجود مرزهای ساحلی در دماغه ایتالیا، شناسایی ابرها و نمایش خروجیها در این ناحیه ساده‌تر است. بنابراین خروجیهای نمایش داده شده در شکل‌های (۹)، در این

ناحیه متمرکز شده اند.

با نگاهی به تمامی بخشهای شکل(۵-ب))، پر واضح است که ابرها به علت دارا بودن ارتفاعی بالاتر از سطح زمین به خوبی نسبت به سایر پیکسلهای تصویر تفکیک و شناسایی شده‌اند. بنابراین روشن است که روش مورد مطالعه به نتایج خوبی منتهی شده است. با این وجود برای تفکیک ساده‌تر ابرها از سایر پیکسلهای موجود در تصویر به نظر می‌رسد استفاده همزمان از اطلاعات فاصله تقاطع خطوط اپیپلار، مقدار ارتفاع بالای ابر و پارالاکس به صورت تصویر ترکیب رنگی می‌توان ابرها را با دقت بالاتری نسبت به سایر پیکسلها تفکیک نمود و همچنین نتایج از نظر نمایشی ملموستر خواهد بود.

بنابراین در شکل(۶) نمایی از تصویر ترکیب رنگی این پارامترها نمایش داده شده است. جهت مقایسه بهتر خروجیها، ناحیه بزرگنمایی در این تصویر بخش متناظر بزرگنمایی شده در شکل(۶) در نظر گرفته شده است.

آنچنان که در شکل(۶) مشاهده می‌شود، نواحی با پارالاکس بیشتر که به رنگ قرمز در تصویر نمایش داده شده است، نواحی حضور ابرها هستند، که کاملا همسو با مفهوم پارالاکس و ارتفاع بیشتر ابرها نسبت به سطح زمین است.



شکل۶: تصویر ترکیب رنگی (*RGB*) محدوده مطالعاتی. *R*: پارالاکس، *G*: فاصله تقاطع خطوط اپیپلار، *B*: ارتفاع بالای ابر

با بررسی ظاهری شکل(۶) مشاهده می‌شود که در نواحی با پارالاکس بیشتر (رنگ قرمز بیشتر)، ابرهای بیشتری حضور دارند. از آنجاکه پارالاکس بیشتر در یک مدل استریو، با توجه به مفهوم پارالاکس، نشان‌دهنده ارتفاع بیشتر عوارض است؛ به این ترتیب خروجی شکل(۶) دارای تطابق کامل با این مفهوم است.

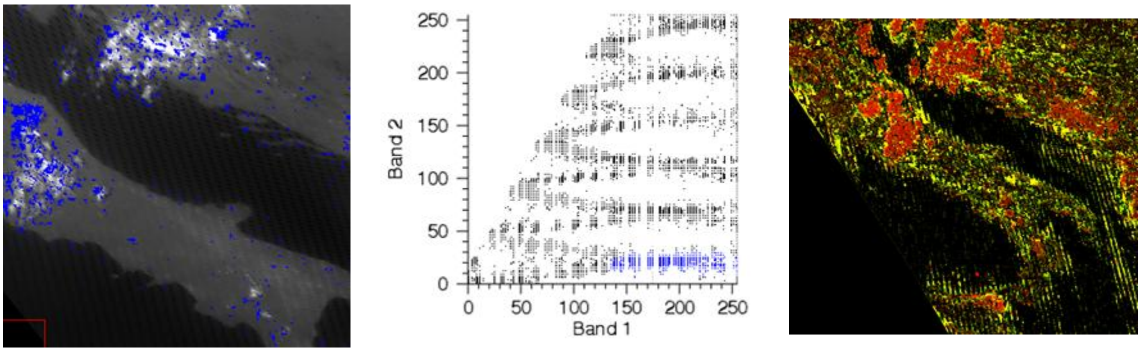
اما با توجه به خروجیهای بدست آمده در بالا و آنچه پیشتر بیان شد، ما در این تحقیق به دنبال پیکسلهایی هستیم که دارای بیشترین ارتفاع یا پارالاکس (*p* یا *CTH*) و کمترین عدم قطعیت (*d*) در برآورد ارتفاع باشند. بنابراین می‌توان با بهره‌مندی از یک فضای دوبعدی[1] و اعمال شرط در این فضا، پیکسلهای مناسب را به عنوان پیکسلهای ابر تفکیک نمود. با تمرکز بر ناحیه کوچکی از تصویر این روند جداسازی پیکسلهای ابری در شکل(۷) نمایش داده شده است. در این شکل باند اول نماینده مقدار پارالاکس (که با درجات خاکستری تصویری نمایش داده شده است) و باند دوم نماینده مقدار فاصله تقاطع (به عبارتی میزان عدم قطعیت در برآورد ارتفاع) هستند. بنابراین برای یافتن پیکسلهایی که بهترین نمایندگان ابر هستند لازم است پیکسلهایی که در باند یک دارای مقادیر بزرگتر و در باند دو، مقادیر کمتری دارند؛ تفکیک شوند. به این

[1] *2D scatter plot*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

منظور در فضای دوبعدی شکل(۷–ب)، از تعریف ناحیه آبی رنگ با این هدف استفاده شده است.

به این ترتیب که پیکسلهایی که دارای مقدار پارالاکس زیاد و مقدار کم فاصله تقاطع هستند به عنوان پیکسلهای ابر آشکارسازی می‌شوند. در شکل(۷–پ)، پیکسلهای ابری جداسازی شده به روش استریو بر روی تصویر خام ورودی اولیه نمایش داده شده‌اند.



الف) ب) پ)

شکل ۷: جداسازی پیکسل‌های ابری با استفاده از فضای دوبعدی. الف)خروجی ترکیب رنگی شکل ۱۲ که در ناحیه ایتالیا بزرگنمایی شده است. ب) فضای دوبعدی برای جداسازی پیکسلهای ابری، در این فضا باند یک معادل اطلاعات پارالاکس و باند دو معادل اطلاعات عدم قطعیت در برآورد ارتفاع است. پ) ناحیه آبی رنگ در این قسمت معادل با پیکسل‌های جداسازی شده در فضای دوبعدی قسمت (ب) و به رنگ آبی است که در تصویر اولیه بازیابی و نمایش داده شده‌اند.

با نگاهی به این تصویر کاملا آشکار است که معیار ارتفاع به خوبی در آشکارسازی ابرها عمل کرده و امکان استخراج اطلاعات ابر با حد تفکیک مکانی بالاتر را از داده‌های *HRV* فراهم نموده است.

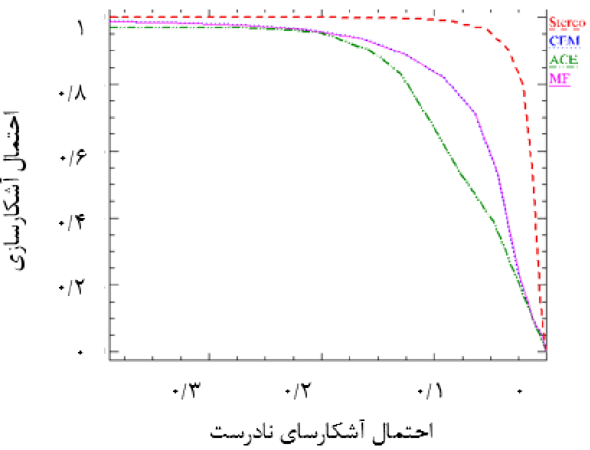
از طرف دیگر به منظور ارزیابی نتایج آشکارسازی حاصل از مدل استریو، سه روش آشکارسازی *ACE*، *CEM* و *MF* بر روی تصاویر چندطیفی[1] متیوست پیاده‌سازی شدند. لازم به ذکر است که مروری کلی بر پژوهشهای پیشین حاکی از آن است که روشهای آشکارسازی مذکور در تصاویر هواشناسی و به منظور شناسایی ابر استفاده نشده‌اند. بنابراین نه تنها در این مطالعه، خروجیهای حاصل از سه روش آشکارسازی مذکور بررسی شد، بلکه مقایسه‌ای بین عملکردهای همه روشهای آشکارسازی مورد مطالعه نیز انجام گرفت.

برای انجام مقایسه عملکرد، از روش متداول ترسیم منحنی ارزیابی آشکارسازی *ROC* [۴۷] بهره برده شد. به این منظور پیکسلهای واحدی به عنوان پیکسلهای تست برای ارزیابی نتایج آشکارسازی به صورت بصری انتخاب شدند. در نهایت ارزیابی آشکارسازی مطابق شکل(۸) قابل نمایش خواهد بود.

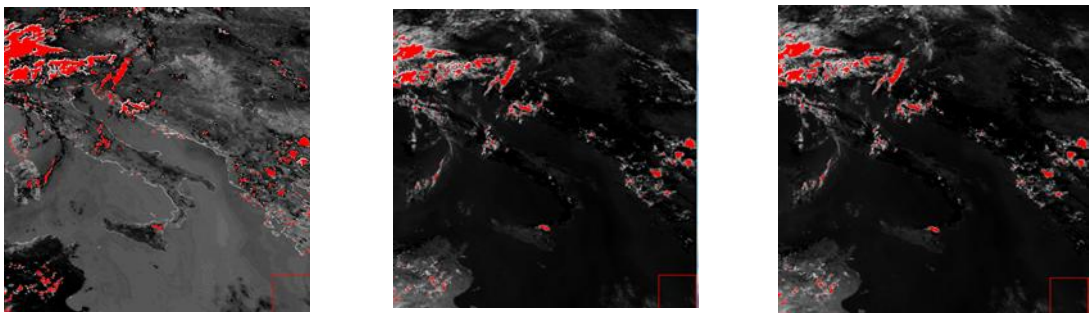
از تحلیل منحنیهای ترسیم شده در شکل(۸)، به نظر میرسد قدرت آشکارسازی در دو روش *CEM* و *MF* مشابه بوده است، در حالیکه روش *ACE* عملکرد ضعیفتری در این خصوص داشته است. این مقایسه حاکی از عملکرد مناسبتر روش پیشنهادی ژیواستریو در آشکارسازی ابر است. از طرف دیگر، اولین محدودیت تصویر چندطیفی و نتایج آشکارسازی آن، این است که حدتفکیک مکانی در این تصویر برابر با ۳ کیلومتر است در حالیکه حدتفکیک مکانی در باند *HRV* برابر با ۱ کیلومتر است. به این ترتیب واضح است که اولین مزیت استفاده از باند *HRV* برای آشکارسازی ابرها، فارغ از عملکرد روش آشکارسازی، افزایش حدتفکیک مکانی در

[1] *Multispectral images*

عملیات آشکارسازی است.
با این وجود برای انجام مقایسه بهتر خروجیهای آشکارسازی در روشهای *ACE*، *CEM* و *MF* نیز در شکل(۹) نمایش داده شده است.



شکل۸: عملکرد منحنی *ROC* در آشکارسازی ابرها. سه روش آشکارسازی *ACE*، *CEM* و *MF* با مدل پیشنهادی ژیواستریو مقایسه شده‌اند.



الف) ب) پ)

شکل ۹: نتایج آشکارسازی روشهای الف) *MF*، ب) *CEM*، پ) *ACE*

نگاهی کلی به این نتایج نشان می‌دهد که گرچه روشهای آشکارسازی ابر که مبتنی بر باندهای طیفی هستند، ابرها را در بیشتر نواحی به خوبی تشخیص داده‌اند، اما نه تنها حد تفکیک خروجیها نسبت به خروجی مدل ژیواستریو کمتر است، بلکه در شناسایی تکه ابرهای کوچک نیز ضعیف عمل کرده‌اند. در صورتی که ابرهای کوچک در خروجی استریو به خوبی شناسایی شده‌اند. با اینحال با نگاهی به شکل(۷-پ)، به نظر میرسد روش استریو با وجود داشتن مزیتهای واضحی نسبت به آشکارسازی بر مبنای باندهای طیفی، دارای نویز بیشتری در خروجیهاست. اما مبتنی بودن این روش بر ارتفاع ابر، این امکان را فراهم می‌آورد که ابرها در نواحی قطبی را بتوان ساده‌تر از پیکسلهای ابری تفکیک نمود. به این ترتیب مشکلی که تاکنون محققان به دنبال یافتن راه حلی مناسب برای آن بوده-اند، با این روش قابل حل خواهد بود.

۵- بحث و بررسی

آشکارسازی ابرها برمبنای ارتفاع آنها به عنوان یکی از

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

پارامترهای مهم هواشناسی است که اطلاعات مورد نیاز از ساختار قائم ابر را در اختیار می‌گذارد، در این کار پژوهشی مورد مطالعه قرار گرفته است. روش استریوگرافی جهت برآورد ارتفاع ابر تنها یکی از روشهای مطرح و موجود به منظور برآورد ارتفاع ابر است که دارای مزیتها و معایب خاص خود است. مهمترین خصوصیات، نقاط ضعف و قوت روش مورد استفاده در این مطالعه در ادامه بحث و بررسی شده است. در یک نگاه جامع دقت روش استریوگرافی وابسته به موارد زیر است[۱۶]:۱- دقت موقعیتی ماهواره، ۲- دقت رجیستر تصاویر (به نوعی دقت مکانی تصویر)، ۳- خطای حرکت ابر، ۴- دقت تناظریابی تصویر. در این میان موارد ۱ و ۲ کاملا خارج از کنترل کاربر داده‌های سنجش‌ازدوری است. از طرف دیگر موقعیت ماهواره در ماهواره‌های زمین‌ثابت مسئله بسیار مهمی نیست. این پارامتر بیشتر در ماهواره‌های با مدار قطبی[۱] مسئله‌ساز می‌شود، چراکه در این نوع سنجنده‌ها موقعیت ماهواره بسیار سریع (در حدود چند کیلومتر در هر ثانیه) تغییر می‌کند.

اما موقعیت مکانی تصویر در هر نوعی از تصاویر همیشه تاثیر قابل توجهی بر نتایج نهایی می‌گذارد. در مقایسه با سایر روشهای موجود برای مطالعه ارتفاع ابر در روش استریوگرافی نیازمند اطلاعات تصویری همزمان از دو ماهواره هستیم که به صورت همزمان یک ناحیه مشخص از سطح زمین را پوشش می‌دهند. در نتیجه از نواقص این روش آن است که صحت نتایج وابسته به اطلاعات موقعیتی تصویر به خصوص موقعیت نسبی در دو تصویر ورودی است.

به این ترتیب دو مورد ۳و ۴ نیاز به بررسی بیشتر خواهند داشت. که در این بین خطای حرکت ابر در این مطالعه با در نظر گرفتن سه تصویر متوالی برای تشکیل زوجهای استریو مرتفع شده است. لذا منبع خطای اصلی در روش استریوگرافی مورد استفاده در این مطالعه را می‌توان خطای تناظریابی تصاویر در نظر گرفت. تناظریابی اتوماتیک تصویری که بیشترین زمان پردازش داده‌ها را به خود اختصاص می‌دهد، نیازمند در اختیار داشتن اطلاعات بافت و ساختار ابرهاست. در صورتی که ابرها هیچگونه ساختار مشخصی نداشته باشند، امکان شناسایی نقاط متناظر در آنها بسیار کم می‌شود، و به این ترتیب در اینگونه ابرها تنها می‌توان به استخراج اطلاعات لبه‌های ابر اکتفا کرد. بنابراین انتظار می‌رود این مدل در ابرهایی با ساختار یکنواخت با کیفیت خیلی بالایی عمل نکند.

بنابراین یکی از چالشهای پیشرو در مطالعه استریوگرافی ابرها داشتن بافت همگن در ابرهاست. چراکه با داشتن بافت همگن تصویری[۲] در پیکسلهای ابری انتظار می‌رود که شناسایی نقاط گرهی و پیکسلهای متناظر به عنوان ورودی استریو با مشکل مواجه شده و یا امکانپذیر نباشد. اما توجه به این نکته ضروری است که اطلاعات ابر تنها زمانی مسئله‌ساز است که حدتفکیک مکانی تصاویر مورد استفاده یا خیلی بالا[۳] (حدتفکیک بهتر از ۵۰ متر) و یا خیلی کم[۴] (حد تفکیک کمتر از ۵۰۰۰ متر) باشد[۱۶]. با در نظر داشتن باند *HRV* از سنجنده *SEVIRI* به عنوان تصویر ورودی می‌توان گفت که ابرهای هواشناسی در این تصاویر دارای بافت کافی برای انجام عملیات تناظریابی هستند و با توجه به اینکه هر دو تصویر مورد استفاده از یک سنجنده هستند انتظار می‌رود انجام تناظریابی بین آنها بسیار ساده‌تر باشد. بعلاوه با توجه حد تفکیک رادیومتریک ۱۰بیتی در سنجنده *SEVIRI*، استخراج و بازیابی جزییات بافت تصویرنه تنها از نقطه نظر بصری بلکه با استفاده از روشهای اوتوماتیک نیز ساده‌تر خواهد بود. از طرف دیگر نتایج تناظریابی بین داده‌های

[۱] *Polar orbiting satellites*

[۲] *Homogenous Image Texture*

[۳] *Fine resolution*

[۴] *Coarse resolution*

تصویری متفاوت به باندهای منتخب مورد استفاده نیز وابسته است. با توجه به اینکه در هر دو سنجنده مورد استفاده از باندهای *HRV* (شامل بخش اعظم باند مرئی و طیف مادون قرمز نزدیک) استفاده شده است، بنابراین در این خصوص مشکلی وجود نخواهد داشت.

دیگر مهمترین مزیتهای تکنیک پیشنهادی در این تحقیق که مبتنی بر فتوگرامتری ابر است را می‌توان استقلال این مدل از داده‌های جانبی یا فرضیات مربوط به وضعیت جو در زمان اخذ داده دانست. در این روش اهمیتی ندارد که ابر در زیر ناحیه تروپوپاز یا بالای آن باشد. نیازی به هیچ فرضی در خصوص مقدار گسیلمندی ابر وجود ندارد. بعلاوه نیازی به داده‌های جانبی نظیر پروفایل قائم دما و رطوبت در این روش وجود ندارد. قابلیت اطمینان تناظریابی را می‌توان از مقدار فاصله بین خطوط مسیر دید دو سنجنده در محل تقاطع آنها تعیین نمود. به عبارت دیگر میزان اطمینان به نتیجه معادله کمترین مربعات رابطه (۳) زمانی بیشینه است که فاصله بین خطوط متقاطع برابر با صفر باشد. نکته دیگر آن است که فاصله تقاطع[۱] نه تنها به دقت تناظریابی تصویر وابسته است، بلکه متاثر از موقعیت ماهواره و صحت موقعیتی داده تصویری هم می‌باشد. به این ترتیب فاصله تقاطع را می‌توان در مجموع معیار مناسبی برای تخمین دقت کلی مدل دانست.

مهمترین ویژگی روش استریوگرافی دقت نهایی اطلاعات خروجی آن است. بنابر مقایسه انجام شده در [۱۶] که بر روی ابرهای آتشفشانی انجام گرفته بود، دقت این مدل سه برابر بیشتر از برآوردهای ارتفاع براساس باند جذبی *CO2* و حدود سه برابر کمتر از دقت قابل دستیابی براساس اندازه‌گیریهای فضایی لیدار است. در داده‌های مورد استفاده در در مطالعه [۱۶]، دقت تخمین تحلیلی ارتفاع ابر برابر با ۷۰۰ متر بوده است. با اینحال با توجه به اینکه در این مطالعه هدف برآورد مقدار ارتفاع ابر نبوده بلکه تنها بر روی آشکارسازی ابر متمرکز شده است، بنابراین پرداختن بیشتر به مقدار دقت ارتفاعی خارج از حوصله این بحث است. از طرف دیگر همانطور که پیشتر نیز ذکر شد با توجه به اینکه در هر دو تصویر مورد استفاده از باند *HRV* استفاده شده است، لذا از بالاترین حد تفکیک مکانی دو سنجنده بهره برده شده است. به این ترتیب انتظار می‌رود در نتیجه این مطالعه بیشترین دقت قابل حصول از این دو سنجنده کسب شود. با اینحال با توجه به اینکه این روش از باند مرئی سنجنده بهره برده است، لذا این روش به اندازه‌گیریها در ساعات روشنایی روز[۲] محدود می‌شود.

اما پیشرفتهای مکرر در سنجنده‌های زمین ثابت، امکان بکارگیری تمامی مزیتهای ذکر شده در روش این تحقیق را برای پایش موثر ابرها در مقیاس جهانی، با باندهای متفاوت تصویربرداری و همچنین در هر دو زمان شب و روز فراهم خواهد آورد. از دیگر مزیتهای بسیار مهم مدل ژیواستریو برای آشکارسازی ابر می‌توان به این نکته اشاره کرد که با توجه به اینکه در این مدل تنها از اطلاعات هندسی بهره برده می‌شود و اطلاعات بازتابندگی دخیل نمی‌شوند، بنابراین امکان تفکیک ابر از نواحی برفی براحتی امکان‌پذیر می‌شود. با توجه به آنچه در بخش مقدمه نیز ذکر شد، یکی دیگر از مزیتهای مدل ژیواستریو عدم وابستگی این مدل به حدآستانه‌گذاریهای تجربی توسط نیروی انسانی است.

۱۰- نتیجه‌گیری

در این مطالعه روشی نوین برای آشکارسازی ابرها مبتنی بر اختلاف ارتفاع موجود در ابرها و سایر عوارض سطح زمین با عنوان مدل ژیواستریو معرفی شده است. به این منظور از تکنیک نوین استریوگرافی بین دو زوج تصویر زمین‌ثابت بهره برده شده است. این روش شاخه

[۱] *Intersection distance*

[۲] *Daylight hours*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

جدیدی از مطالعات سنجش‌از دور هواشناسی، با عنوان "استریوگرافی هواشناسی" در کشور پایه‌گذاری کرده است. بعلت منحصر به فرد بودن تصاویر مورد استفاده در این تحقیق (جدیدترین نسل ماهواره‌های زمین‌ثابت) با بالاترین حدتفکیک مکانی و زمانی، استفاده از تکنیک استریوگرافی به خودی خود از نوآوریهای این پژوهش به حساب می‌آید. به عبارت دیگر نه تنها تکنیک پیشنهادی برای آشکارسازی ابر، بلکه تکنیک معرفی شده برای برآورد ارتفاع ابر و همچنین نوع داده‌های مورد استفاده در این مطالعه، این کار پژوهشی را کاملا جدید و در همه زمینه‌های ذکر شده یگانه کرده است. نتایج بدست آمده از این تحقیق نشان داده است که آشکارسازی ابرها بر مبنای تکنیک استریو با صحت بالایی انجام گرفته است و این مطالعه را می‌توان راهگشای بسیاری از مطالعات دیگر در حوزه تحقیقات خورشیدی و ابرها دانست. از دیگر مزیتهای بسیار مهم مدل ژیواستریو برای آشکارسازی ابر می‌توان به این نکته اشاره کرد که با توجه به اینکه در این مدل تنها از اطلاعات هندسی بهره برده می‌شود و اطلاعات بازتابندگی دخیل نمی‌شوند، بنابراین امکان تفکیک ابر از نواحی برفی براحتی امکان‌پذیر می‌شود. مشکل تفکیک ابر از نواحی برفی در تصاویر سالهاست که از مشکلات عمده بسیاری از محققین در مطالعات هواشناسی بوده و هست. گرچه مشکل مذکور در این تحقیق با جزییات کامل بررسی نشده است اما نتایج این تحقیق را می‌توان راهگشا و راه حل بسیار مهم و مناسب برای مرتفع نمودن مشکل تفکیک ابر از پیکسلهای حاوی برف دانست. بعلاوه با توجه به آنچه پیشتر نیز بیان شد، پرتاب نسلهای بعدی ماهواره‌های زمین‌ثابت امکان تست مجدد تکنیک ارائه شده در این مطالعه بر انواع مختلف داده‌ها و در مناطق مطالعاتی متفاوت فراهم خواهد آورد.

قدردانی

نویسندگان این مقاله بر خود لازم می‌دانند از مشارکت و همکاری دوستان ارجمند جناب آقای دکتر کلمن زاکسک مشاور ارشد پژوهشی دانشگاه هامبورگ جهت راهنمایی‌های بی‌دریغشان در بحث کدنویسی مدل استریو، جناب آقای دکتر ولادمیر اسکیراپاچوف مشاور پژوهشی سازمان فضایی روسیه در حوزه حل مشکلات کدنویسی، جناب پروفسور کریستین هایپکه استادتمام دانشکده ژئوانفورماتیک دانشگاه لایبنیتز هانوفر جهت جلسات حضوری و غیرحضوری و ارائه راهنمایی در جزییات مدل استریو پیاده‌سازی شده، و همچنین جناب آقای مهندس محمدجواد میرزاده دانشجوی دکتری موسسه تحقیقات نجومی شانگهای آکادمی علوم چین در تست روشهای متفاوت برای ایجاد مدل استریو و سایر دوستان و همکاران ارجمند در دانشگاه هانوفر، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی و دانشگاه تهران که هریک به نوعی در دستیابی به اهداف این پروژه یاری رسان بودند مراتب کامل قدردانی و سپاسگزاری را به جا آورند.

مراجع

[1] Mobasheri, M. and Karimi Asl, N., "A rapid method for determining high cloud pressure using MODIS images.", Geography and Development, 1131, 165-182.

[2] Geethu Chandran A J and C. Jojy, "A Survey of Cloud Detection Techniques for Satellite Images," International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), vol .02, 2015.

[3] I. Genkova, G. Seiz, P. Zuidema, G. Zhao, and L. Di Girolamo, "Cloud top height comparisons from ASTER, MISR, and MODIS for trade wind cumuli," Remote Sensing of Environment, vol. 107, pp. 211-222, 2007/03/15/ 2007.

[4] D. M. Winker, J. Pelon, J. A. C. Jr., S. A. Ackerman, R. J. Charlson, P. R. Colarco, et al., "The CALIPSO Mission," Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 91, pp. 1211-1230, 2010.

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]

[5] A. Hasler, "Stereographic observations from geosynchronous satellites: An important new tool for the atmospheric sciences," Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 62, pp. 194-212, 1981.

[6] W. T. Roach, "On the nature of the summit areas of severe storms in Oklahoma," Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 93, pp. 318-336, 1967.

[7] O. R. J. Ondrejka, J. H. Conover, and R. J . Ondrejka, "Note on the stereo interpretation of Nimbus II APT photography," 1966.

[8] K. Kikuchi and T. Kasai, "Stereoscopic analysis of photographs taken by NIMBUS II APT system," J. Meteor. Soc. Japan, vol. 46, pp. 60-67, 1968.

[9] I. Browne, J. Garcia ,and V. Whitehead, "Cloud height contouring from Apollo 6 photography," 1969.

[10] W. Shenk, R. Holub, and R. Neff, "Stereographic cloud analysis from Apollo 6 photographs over a cold front," 1975.

[11] P. G. Black, "Some aspects of tropical storm structure revealed by handheld-camera photographs from space," in Skylab Explores the Earth, 1977, p. 417.

[12] W. R. Bryson, Cloud height determination from geosynchronous satellite images: University of Wisconsin, 1978.

[13] D. Lorenz, "On the feasibility of cloud stereoscopy and wind determination with the Along-Track Scanning Radiometer," International Journal of Remote Sensing, vol. 6, pp. 1445-1461, 1985.

[14] C. Bristor and W. Pichel, "3-D CLOUD VIEWING USING OVERLAPPED PICTURES FROM 2 GEOSTATIONARY SATELLITES," vol. 55, ed: AMER METEOROLOGICAL SOC 45 BEACON ST, BOSTON, MA 02108-3693, 1974, pp. 1353-1355.

[15] E. Kassianov, C. N. Long, and J. Christy, "Cloud-base-height estimation from paired ground-based hemispherical observations," Journal of Applied Meteorology, vol. 44, pp. 1221-1233, 2005.

[16] K. Zaksek, M. Hort, J. Zaletelj, and B. Langmann, "Monitoring volcanic ash cloud top height through simultaneous retrieval of optical data from polar orbiting and geostationary satellites," Chemistry and Physics, pp. 2589-2606, 2013.

[17] L. Merucci, K. Zakšek, E. Carboni, and S. Corradini, "Stereoscopic Estimation of Volcanic Ash Cloud-Top Height from Two Geostationary Satellites," Remote Sensing, vol. 8, p. 206, 2016.

[18] A. Stohl, A. J. Prata, S. Eckhardt, L. Clarisse, A. Durant, S. Henne, et al., "Determination of time- and height-resolved volcanic ash emissions and their use for quantitative ash dispersion modeling: the 2010 Eyjafjallajökull eruption," Atmos. Chem. Phys., vol. 11, pp. 4333-4351, 2011.

[19] S. A. Carn, J. S. Pallister, L. Lara, J. W. Ewert, S. Watt, A. J. Prata, et al., "The Unexpected Awakening of Chaitén Volcano, Chile," Eos, Transactions American Geophysical Union, vol. 90, pp. 205-206, 2009.

[20] E. R. Kursinski, G. A. Hajj, J. T. Schofield, R. P. Linfield, and K. R. Hardy, "Observing Earth's atmosphere with radio occultation measurements using the Global Positioning System," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 102, pp. 23429-23465, 1997/10/20 1997.

[21] F. S. Solheim ,J. Vivekanandan, R. H. Ware, and C. Rocken, "Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 104, pp. 9663-9670, 1999/04/27 1999.

[22] C. Oppenheimer, "Review article: Volcanological applications of meteorological satellites," International

Journal of Remote Sensing, vol. 19, pp. 2829-2864, 1998/01/01 1998.

[23]S. Eckhardt, A. J. Prata, P. Seibert, K. Stebel, and A. Stohl, "Estimation of the vertical profile of sulfur dioxide injection into the atmosphere by a volcanic eruption using satellite column measurements and inverse transport modeling," Atmos. Chem. Phys., vol. 8, pp. 3881-3897, 2008.

[24]A. J. Prata and I. F. Grant, "Retrieval of microphysical and morphological properties of volcanic ash plumes from satellite data: Application to Mt Ruapehu, New Zealand," Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 127, pp. 2153-2179, 2001/07/01 2006.

[25]P. Dubuisson, R. Frouin, D. Dessailly, L. Duforêt, J.-F. Léon, K. Voss, et al., "Estimating the altitude of aerosol plumes over the ocean from reflectance ratio measurements in the O2 A-band," Remote Sensing of Environment, vol. 113, pp. 1899-1911, 2009/09/01/ 2009.

[26]M. Richards ,S. Ackerman, M. Pavolonis, and W. Feltz, "Volcanic ash cloud heights using the MODIS CO2-slicing algorithm," MSc, University of Wisconsin-Madison, 2006.

[27]F.-L. Chang, P. Minnis, B. Lin, M. M. Khaiyer, R. Palikonda, and D. A. Spangenberg, "A modified method for inferring upper troposphere cloud top height using the GOES 12 imager 10.7 and 13.3 μm data," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 115, 2010/03/27 2010.

[28]L. S. Glaze, P. W. Francis, S. Self, and D. A. Rothery, "The 16 September 1986 eruption of Lascar volcano, north Chile: Satellite investigations," Bulletin of Volcanology, vol. 51, pp. 149-160, May 01 1989.

[29]A. F. Hasler, "Stereographic Observations from Geosynchronous Satellites: An Important New Tool for the Atmospheric Sciences," Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 62, pp. 194-212, 1981/02/01 1981.

[30]A. J. Prata and P. J. Turner, "Cloud-top height determination using ATSR data," Remote Sensing of Environment, vol. 59, pp. 1-13, 1997/01/01/ 1997.

[31]S. Scollo, R. A. Kahn, D. L. Nelson, M. Coltelli, D. J. Diner, M. J. Garay, et al., "MISR observations of Etna volcanic plumes," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 117, 2012/03/27 2012.

[32]T. H. Virtanen, P. Kolmonen, E. Rodríguez, L .Sogacheva, A. M. Sundström, and G. de Leeuw, "Ash plume top height estimation using AATSR," Atmos. Meas. Tech., vol. 7, pp. 2437-2456, 2014.

[33]P. N. Francis, M. C. Cooke, and R. W. Saunders, "Retrieval of physical properties of volcanic ash using Meteosat: A case study from the 2010 Eyjafjallajökull eruption," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 117, 2012/10/27 2012.

[34]M. J. Pavolonis, A. K. Heidinger, and J. Sieglaff, "Automated retrievals of volcanic ash and dust cloud properties from upwelling infrared measurements," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, vol. 118, pp. 1436-1458, 2013/02/16 2013.

[35]C. A. Poulsen, R. Siddans, G. E. Thomas, A. M. Sayer, R. G. Grainger, E. Campmany, et al., "Cloud retrievals from satellite data using optimal estimation: evaluation and application to ATSR," Atmos. Meas. Tech., vol. 5, pp. 1889-1910, 2012.

[36]S. Bley and H. Deneke, A threshold-based cloud mask for the high-resolution visible channel of Meteosat Second Generation SEVIRI vol.2013 ,6 .

[37]Hocking J., P. N. Francis, and R. W. Saunders, "Cloud detection in Meteosat second generation imagery at the Met office," Meteorological Applications, vol. 18, pp. 307-323, 2011.

[38]EUMETSAT, "MSG Level 1.5 Image Data

Format Description ,"in Issue v8 e-signed, ed. EUMETSAT, 2017, p. 129.

[39] Euemetsat. (2019, 1/1/2019). High Rate SEVIRI Level 1.5 Image Data - MSG - 0 degree. Available: https://www.europeandataportal.eu/data/en/dataset/acronym-msg15-satellite-msg1-msg2-msg3-fileid-eo-eum-dat-msg-hrseviri

[40] C. Evans, "notes on the opensurf library," University of Bristol, 2009.

[41] H. Goncalves, L. Corte-Real, and J. A. Goncalves, "Automatic Image Registration Through Image Segmentation and SIFT," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 49, pp. 2589-2600, 2011.

[42] M. Hasan, X. Jia, A. Robles-Kelly, J. Zhou, and M. R. Pickering, "Multi-spectral remote sensing image registration via spatial relationship analysis on sift keypoints," in 2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010, pp. 1011-1014.

[43] C. Huo, C. Pan, L. Huo, and Z. Zhou, "Multilevel SIFT Matching for Large-Size VHR Image Registration," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 9, pp. 171-175, 2012.

[44] M. Teke and A. Temizel, "Multi-spectral Satellite Image Registration Using Scale-Restricted SURF," in 2010 20th International Conference on Pattern Recognition, 2010, pp. 2310-2313.

[45] T. A. Scambos, M. J. Dutkiewicz, J. C. Wilson, and R. A. Bindschadler, "Application of image cross-correlation to the measurement of glacier velocity using satellite image data," Remote Sensing of Environment, vol. 42, pp. 177-186, 1992/12/01/ 1992.

[46] Hiroyuki HASEGAWA, Kaoru MATSUO, Mamoru KOARAI, H. M. Nobuyuki WATANABE, and Y. FUKUSHIMA, "DEM ACCURACY AND THE BASE TO HEIGHT (B/H) RATIO OF STEREO IMAGES," vol. XXXXIII, ed. Amesterdam: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS), 2000.

[47] H. R. Goldberg, "A performance characterization of kernel-based algorithmsfor anomaly detection in hyperspectral imagery," p. 119, 2007.

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.11, No.2, Summer 2023

Research Paper

Using Stereographic Observations of two High Resolution Geostationary Satellite Images for Cloud Detection

Sahar Dehnavi [1,2], Yaser Maghsoudi [3], Mohammad Javad Valadan Zouj [4]*

1- Remote Sensing scientist, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
2- Research assistant, Institute of Meteorolgy and Climathology, Leibniz University of Hanover, Germany
3- Associate Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology
4- Professor, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K. N. Toosi University of Technology

Abstract

The aim of the current research is to propose a stereographic-based method for cloud detection using the height information of clouds with the highest possible spatial resolution and utilizing ground-based meteorological images. This goal is achieved as follows: first, a stereo pair is created using the high spatial resolution visible band from the Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager (SEVIRI) sensor mounted on the Meteosat-8 and Meteosat-10 platforms. Then, the two images are registered to a common reference imaging grid by taking the different viewing geometries of the two sensors into consideration. And finally, by forming the lines of the sight connecting the two sensor views on an epipolar plane, the parallax in the two images is estimated for the cloudy points. One advantage of this cloud height estimation method is that the stereo measurements depend solely on the fundamental geometric relationships between the observable components of the clouds. This study introduces a novel approach for the cloud pixel detection based on the cloud height. After estimating the cloud heights, it is possible to distinguish the cloudy pixels from the non-cloudy ones on the basis of the height differences, hence enabling us to detect the clouds based on the estimated heights in pixels. The results of this research demonstrate high accuracy and feasibility of using stereography for cloud pixel detection in satellite imagery. The benefit of the cloud detection based on cloud height information is twofold: it not only enhances the spatial resolution of the cloud detection in fixed-ground images but also facilitates the extraction of the three-dimensional cloud information. This is of particular importance in solar irradiance estimation studies, cloud feature extraction, and the other cloud-related applications. Ultimately, this research is so valuable in Iran, it lays the foundation for a new branch of remote sensing meteorology called "Meteorological Stereography," which will pave the way for broader research in this field.

Key words: *Cloud detection, Stereography, Meteorology, Geostationary observations (Meteosat), SEVIRI, High Resolution.*

Correspondence Address: *Remote Sensing Group, Department of Geodesy and Geomatics Engineering, KNToosi University of Technology, Tehran, Iran.*
Tel : *021-**88877071***
Email : *valadanzouj@kntu.ac.ir*

[DOR: 20.1001.1.20089635.1402.11.2.2.5]
[DOI: 10.61186/jgit.11.2.17]