مجله ترویجی علوم و فناوری اطلاعات کشاورزی
دوره هشتم، شماره ۱، شماره پیاپی ۱۵، بهار و تابستان ۱۴۰۴
jaist.areeo.ac.ir

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22092/jaist.2024.367213.1123

معرفی پایگاه‌های اطلاعات ماهواره‌ای بارش در ایران

سیدمسعود سلیمان‌پور[1]، پارسا حقیقی[2]

۱- دانشیار بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.
(نویسنده مسئول). رایانامه: m.soleimanpour@areeo.ac.ir

۲-کارشناس بخش تحقیقات حفاظت خاک و آبخیزداری، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان فارس، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، شیراز، ایران.
رایانامه: p.haghighi@areeo.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۱۵ تاریخ ویرایش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۸/۱۳ تاریخ چاپ: ۱۴۰۳/۱۲/۲۰ صص: ۳۶-۲۷

چکیده

باتوجه‌به تغییرپذیری زیاد کمیت بارش در مکان و زمان، پایش آن در مقیاس‌های منطقه‌ای با استفاده از ایستگاه‌های زمینی بسیار دشوار است. برای افزایش دقت پیش‌بینی مدیریت منابع آب، به داده‌های بارندگی با وضوح زمانی و مکانی بالا به‌عنوان ورودی کلیدی در الگوهای آب‌شناسی و هواشناسی نیاز است. امروزه با پیشرفت فنّاوری، برآورد بارش ازطریق سنجش‌ازدور امکان‌پذیر شده است. یکی از روش‌های سنجش‌ازدور، استفاده از ماهواره‌ها برای تخمین بارش است. در این پژوهش، پایگاه‌های اطلاعات ماهواره‌ای بارش معرفی و بین دقت خروجی ماهواره‌ها و الگوریتم‌های اندازه‌گیری بارش آن‌ها مقایسه شده است. نتایج پژوهش نشان داد که برای استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای، باید به زمان، موقعیت جغرافیایی و مقدار بارش توجه کرد. با استفاده از روش‌های تلفیقی داده‌های ماهواره‌ای می‌توان صحت و دقت مقادیر پیش‌بینی‌شده بارش را افزایش داد. رابطه بین شدت بارش هر منطقه و میزان بارش‌های ثبت‌شده ماهواره نیز اهمیت دارد؛ یعنی می‌توان علاوه بر ارتباط منطقی بین مقادیر بارش ماهواره‌ای و ایستگاه محلی، ارتباط بین شدت بارش هر منطقه با بارش‌های ثبت‌شده ماهواره‌ها را نیز بررسی کرد. دقت خروجی الگوهای ماهواره‌ای برای داده‌های بارشی، حداقل در مقیاس زمانی روزانه، متوسط تا ضعیف است. بنابراین، برای کاهش عدم قطعیت تولیدات ماهواره‌ای بارش، باید از روش‌های ریزمقیاس نمایی در سطح ایستگاه و کاهش خطا استفاده کرد.

کلیدواژه‌ها: تخمین بارش، عدم قطعیت، ماهواره‌های هواشناسی، سنجش‌ازدور، ایران.

مقدمه

بارش به‌عنوان بخشی مهم از چرخه آب‌شناسی، مولفه بسیار مهمی در مطالعات آب‌شناسی، هواشناسی و محیط‌زیست است. نوسان‌های حدی بارش در طول دوره‌های مختلف بر مسائل اجتماعی و اقتصادی نیز تأثیرگذار بوده است. پراکندگی نامناسب و گاهی دقت ناکافی داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی، علت عدم‌دسترسی به داده‌های اقلیمی مکانی و زمانی دقیق است. بیابانی و کوهستانی بودن مناطق زیادی از کشور ایران، یکی از مشکلات جدی در برآورد سیلاب است. به همین دلیل، امروزه از داده‌های بارش ماهواره‌ای با تفکیک زمانی و مکانی بالا به‌جای داده‌های ایستگاهی استفاده می‌شود. داده‌های بارش ماهواره‌ای با شرط داشتن دقت بالا، منبع جایگزینی بسیار مناسب برای انجام مطالعات مختلف آب‌شناسی در مناطقی با توزیع نایکنواخت ایستگاه‌ها و فقدان آمار مناسب است (میری و همکاران، ۱۳۹۷). داده‌های بارش ماهواره‌ای، برخلاف داده‌های زمینی مبتنی بر روش‌های سنجش‌ازدور، می‌توانند تصویر بهتری از پراکندگی بارش در سطح زمین ارائه دهند، به‌ویژه در مناطقی که، به‌دلیل جغرافیای طبیعی منطقه، ایستگاه‌های کمی وجود دارد. این ویژگی به‌خصوص درزمینه پیش‌بینی سیلاب و الگوسازی، از اهمیت فراوانی برخوردار است. در آوریل سال ۱۹۶۰، آمریکا برای اولین بار یک ماهواره هواشناسی را به فضا پرتاب کرد. ماهواره‌های هواشناسی درابتدا فقط تصویری از ابرهای موجود در جو ارائه می‌کردند اما بعدها بسته به اهداف دانشمندان، ماهواره‌های مختلف هواشناسی در مدار قرار گرفت. همه ماهواره‌های هواشناسی به سنجنده‌هایی مجهز هستند که رادیومتر نامیده می‌شود. رادیومترها تصاویری تولید می‌کنند که از مجموعه‌ای از نقاط کاملاً مجزا به‌صورت سطر و ستون تشکیل‌شده است. هر یک از این نقاط یک عنصر تصویری (پیکسل) نامیده می‌شوند. رادیومتر درواقع شدت انرژی تابشی رسیده از سطح زمین و جو را در باندهای مختلف طیفی اندازه‌گیری می‌کند (فرج‌زاده و کریمی، ۱۳۹۲). باتوجه‌به کسب انرژی موردنیاز برای سنجش، سنجنده‌ها به دودسته‌ی غیرفعال و فعال تقسیم می‌شوند. دستگاه‌های غیرفعال که بر انرژی منتشرشده خورشیدی متکی هستند، معمولاً محدوده‌های قابل‌رؤیت مادون‌قرمز نزدیک و میانی را اندازه‌گیری می‌کنند. اما سنجنده‌های فعال که در محدوده‌ی طیف الکترومغناطیس ریزموج کار می‌کنند، خود یک منبع ارسال‌کننده‌ی انرژی نیز هستند و با ارسال نوعی انرژی، هدف را متأثر کرده و ویژگی‌های تابش بازگشتی را اندازه می‌گیرند. مهم‌ترین مسئله در تخمین بارش با استفاده از ماهواره‌ها، چگونگی تصمیم‌گیری برای ترکیب همه برآوردهای منحصربه‌فرد جداگانه از ماهواره‌های مختلف و پیشنهاد الگوریتمی برای تعیین دقیق‌ترین تخمین ممکن از بارش است. تا به امروز سنجنده‌های بارش ماهواره‌ای با توان تفکیک مکانی و زمانی مختلف تولید شده است. در ادامه هر یک از سنجنده‌ها و ویژگی‌های آن‌ها بررسی می‌شوند.

معرفی انواع ماهواره‌ها و الگوریتم‌های اندازه‌گیری بارش

باتوجه‌به اهمیت داده‌های بارش در علوم مختلف و شبکه‌ی باران‌سنجی گسترده و مناسب، باید داده‌های بارشی را برآورد کرد. ماهواره‌ها به نسبت ایستگاه‌های زمینی، به‌ویژه در مناطقی که کمبود ایستگاه‌های زمینی وجود دارد، می‌توانند تصویر بهتری از توزیع باران و برف در کره زمین فراهم کنند. در ادامه انواع ماهواره‌ها و الگوریتم‌های پرکاربرد برای اندازه‌گیری بارش و بررسی دقت مکانی و زمانی هر یک از آن‌ها معرفی می‌شوند.

محصول ماهواره ای تی ام ام[1]

ماهواره ای تی ام ام با همکاری سازمان ملی هوانوردی و فضایی ایالات متحده آمریکا[2] و آژانس اکتشاف فضایی ژاپن[3] در ۲۸ نوامبر ۱۹۹۷ در یک مدار تقریباً دایره‌ای در ارتفاع تقریبی ۳۵۰ کیلومتری زمین و با زاویه میل ۳۵ درجه نسبت به استوا با

1. Tropical Rainfall Measuring Mission
2. National Aeronautics and Space Administration (NASA)
3. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)

دوره گـردش زمانـی ۹۱/۵ دقیقه بـه فضا پرتاب شـد (هافمن و بولوین[1]، ۲۰۱۵). ماهواره ای تی ام ام داده های بارش را برای ۵۰ درجه جنوب تا ۵۰ درجه شـمال عرض جغرافیایی ارائه می کند. این ماهواره با اسـتفاده از دریافت تابش ناشـی از ذوب‌شدن یخ در درون قطـرات باران، داده‌های شـدت بارش را برآورد کرده و بادقت زمانی سـه سـاعته در ابعاد ۰/۲۵ × ۰/۲۵ درجه طول و عرض جغرافیایی ارائه می‌دهد. همچنین، با اسـتفاده از اطلاعات سه‌سـاعته بارش، اطلاعات روزانه و ماهانه بارش محاسبه شده و در اختیـار کاربران قرار می گیرد. ماهواره ای تی ام ام با داشـتن سنجنده‌ها و ابزارهای مختلفی مثل سنجنده‌های فروسرخ نزدیک و مرئی[2] چندلایه، سـنجنده ماکروویو و رادار بارندگی، تصاویر باکیفیـت بالایـی تولید کـرده و از میزان بارندگـی و نیز آب و هواشناسـی سـاختار عمودی لایه جـو، داده‌های بسـیار مفیدی اسـتخراج می کند. بااین‌وجود، به دلیل حرکـت این ماهواره در مـدار با ارتفاع کم و قطب‌گـرد، ای تی ام ام تنهـا می‌تواند ۱۶ بار در روز به‌دور مدار زمیـن بچرخد. لذا تصویربرداری از اکثر مناطـق را با تناوب‌های یک یـا دو بار در روز انجام می‌دهد. این کاستی باعث می‌شود که بسیاری از وقایع بارندگی در طول روز از دسـت بروند. لذا، دقت سـنجنده‌های ای تـی ام ام برای ارائه مقادیر بارندگی در بازه‌های زمانی کوتاه‌مدت پایین است (ژانگ و جیا[3]، ۲۰۱۳).

محصول ماهواره جی پی ام[4]

اندازه‌گیـری بـارش جهانی کـه به‌اختصار جی پـی ام نامیده می‌شـود، شـبکه‌ای بین‌المللی از ماهواره‌هاسـت که نسـل بعدی مشـاهدات جهانی بـارش و برف را فراهم می کنـد. این مأموریت که بر پایه‌ی موفقیت ماهواره ای تی ام ام بنا شـده است، با استفاده از یـک ماهواره اصلی و مرکزی که یک سـامانه رادیومتر و رادار پیشـرفته را حمل می کند، بارش را از فضـا اندازه‌گیری می کند و استاندارد مرجعی برای تلفیق اندازه‌گیری‌های بارش از مجموعه‌ای از ماهواره‌های تحقیقاتی و عملیاتی اسـت. الگوی سنجش جهانی بارش یا جی پی ام نام پروژه‌ای مشـترک بیـن آژانس کاوش‌های هوافضایی ژاپن و ناسـا و دیگر آژانس‌های فضایی بین‌المللی است که اخیراً باهدف دیده‌بانی پیوسـته بارش زمین ایجادشـده اسـت. ایـن ماهواره در تاریـخ ۲۸ فوریه ۲۰۱۴ از مرکز فضایی تانگشـیما در جنوب غربی ژاپن پرتاب شـد. این پروژه بخشـی از برنامه ناسا به نام مأموریت‌های روشـمند زمین اسـت که با در اختیار داشـتن مجموعـه‌ای از ماهواره‌ها برای تأمین پوشـش کلـی زمین فعالیت می کنـد و در زمینه مطالعه اقلیم جهـان، پیش‌بینی حوادث و بلایای طبیعـی و بهبود کاربـرد داده‌های ماهواره‌ای به پژوهشـگران یاری می‌رساند. در سـامانه پردازش بارش در مرکز فضایی گودار ناسا و همچنین ژاکسـای ژاپن، داده‌ها پردازش می‌شود. داده‌ها در سطوح پردازش چندگانه، از اندازه‌گیری‌های خام ماهواره‌ای تا نقشـه‌های جهانی بارش، برآورد شـده و با اسـتفاده از ترکیب همه مشاهدات مجموعه و سـایر داده‌های هواشناسـی ارائه می‌شوند (علی‌بخشی و همکاران،۱۳۹۷). همه این داده‌ها در وبگاه ناسـا به آدرس https:// disc.gsfc.nasa.gov/datasets به رایگان در اختیار عموم قرار دارد.

ماهواره ماموریت اندازه‌گیری بارندگی استوایی (چیرپس)[5]

محصـول این ماهـواره بـا همکاری سـازمان زمین‌شناسـی ایـالات متحده[6] و گروه بلایای اقلیمی سـانتاباربارا در دانشـگاه کالیفرنیا و بر اساس تخمین بارش مدت‌زمان اَبَرسرد[7] مادون‌قرمز توسـعه‌یافته اسـت. در این ماهواره از داده‌های بارش ایستگاه‌ها، که بـا روش درون‌یابی معکـوس وزنی ـ فاصلـه‌ای[8] درون‌یابی شده است، برای تصحیح خطا اسـتفاده می‌شود. داده‌های بارشی این ماهـواره در وبگاه https://www.chc.ucsb.edu در دسـترس است. لازم به ذکر است که این محصول تنها برای بارندگی صفر

1.Huffman and Bolvin
2. Visible and Infrared Scanner (VIRS)
3. Zhang and Jia
4. Global Precipitation Measurement
5. CHIRPS
6. United States Geological Survey (USGS)
7. Cold Cloud Duration (CCD)
8. Inverse distance weighting (IDW)

تـا ۱۴۴۴/۴۳ میلی‌متـر در روز اعتبار دارد (فانـک و همکاران[1]، ۲۰۱۵). بـرای تحلیـل فضایی میانگین بـارش، از داده‌های بارش رقومی ایـن ماهواره، که قـدرت تفکیک بالایی دارد، اسـتفاده می‌شـود. داده‌های این ماهواره از مقیاس زمانی ۶ ساعته تا ۳ ماهه و با تفکیک مکانی ۰/۰۵×۰/۰۵ درجه قوسـی در دسـترس قرار دارد. برای نظارت بر خشک‌سـالی و تغییـرات اقلیمی در مقیاس شـبه‌جهانی و نیز تجزیه‌وتحلیل روندهـای بلندمدت، از داده‌های این ماهواره استفاده می‌شود (فانک و همکاران، ۲۰۱۵).

محصول ماهواره پرشین[2]

از میان منابع بـارش ماهواره‌ای مختلـف، خروجی الگوهای مختلـف ماهواره پرشـین، به‌دلیل توان تفکیـک زمانی و مکانی بهتـر آن، موردتوجه محققین متعددی به‌ویژه در سـطح کشـور قـرار دارد. منبع این ماهواره از چهار محصول بارشـی مختلف به نام‌های پرشـین[3]، پرشـین اس دی ار[4]، پرشـین سی سی اس[5] و پرشـین پی دی ای ار[6] تشکیل شده اسـت که هریک از آن‌ها از الگوریتم‌هـای متفاوتی برای تخمین بارش اسـتفاده می‌کنند. در ادامه به ویژگی‌های هر یک از این الگوها اشاره می‌شود.

۱. الگوریتم پرشین

الگوریتـم پرشـین، کـه از شـبکه عصبی مصنوعـی برآورد بارش از اطلاعات سـنجش‌ازدور استفاده می‌کند، در سال ۱۹۹۷ توسـعه یافت. این الگوریتم به اطلاعات ماهواره لئو[7] و نمونه‌های فرکانس بالای ماهواره ژئو[8] وابسـته اسـت. ورودی الگوریتم در تصاویر ماهواره‌های ژئو و پرشین با بازیابی طول‌موج مادون‌قرمز و مرئی، و در تصاویر ماهواره‌های لئو با بازیابی طول‌موج ماکروویو ایجاد می‌شـود. درواقـع، الگوریتم پرشـین یک الگوی شـبکه عصبی مصنوعی بـا الگوی پیش‌خور[9] عصبی چندلایه اسـت. با اسـتفاده از ماهواره‌های با مدار پاییـن مانند ای تی ام ام، نوآ ۱۵[10]، نـوآ ۱۶[11]، نـوآ ۱۷[12]، دی ام اس پـی[13]، اف ۱۳[14]، اف ۱۴[15] و اف۱۵[16] تصاویر به‌طور منظم به‌روز می‌شـوند. الگوریتم برآورد بارش پرشـین، به‌طور کاربردی از سال ۱۹۸۳ با پوشش سراسری از ۶۰ درجه شـمالی تا ۶۰ درجه جنوبی، در دسـترس قرار دارد. این محصول بارشـی دارای توان تفکیک مکانـی ۰/۲۵ درجه و مقیاس زمانی روزانه و ماهانه برای بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۸ برای بخش‌های اعظمی از دنیا اسـت (هسو و همکاران[17]، ۲۰۰۹). این داده‌ها در پایگاه داده https://chrsdata.eng.uci.edu در دسـترس قرار دارد.

۲. الگوریتم پرشین اس دی ار[18]

ازسـال ۱۹۸۳ تاکنون، از این الگوریتم اصلاح‌شـده پرشین، برای تولید تاریخچه تخمین بارش استفاده می‌شود. این الگوریتم برای دسـت‌یابی به داده‌های بلندمدت و با وضوح‌بالای بارش در مقیاس جهانی و مطالعه تاریخچه مکانی ـ زمانی بارش تولید شده اسـت. برای رفع نیاز به برآوردهای ماکروویو غیرفعال عامل‌های رگرسیون غیرخطی شبکه عصبی مصنوعی، این الگوریتم واسنجی شـده و برای تولید تخمین‌های گذشـته‌نگر با استفاده از داده‌های سه‌سـاعته ماهواره گریدسـت – بی ۱[19] ثابت نگه داشته می‌شود. این محصول با استفاده از محصول ماهانه پروژه اقلیم بارش جهانی با قدرت تفکیک ۲/۵ × ۲/۵ درجه تنظیم می‌شـود. این محصول با قدرت تفکیک ۰/۲۵ × ۰/۲۵ در مقیاس‌های زمانی ۱ سـاعته، ۳ سـاعته، ۶ ساعته، روزانه، ماهانه، سـالانه و تجمعی تولید می‌شود

1. Funk at al
2. PERSIANN
3. PERSIANN
4. PERSIANN-CDR
5. PERSIANN-CCS
6. PERSIANN-PDIR
7. LEO
8. GEO
9. Feed forward
10. NOAA-15
11. NOAA-16
12. NOAA-17
13. Defense Meteorological Satellite Program
14. F13
15. F14
16. F15
17. Hsu at al
18. PERSIANN-CDR
19. GridSat-B1

(هسو و همکاران، ۲۰۰۹). این داده‌ها در پایگاه داده https:// chrsdata.eng.uci.edu قابل دسترسی است.

۳. الگوریتم پرشین سی سی اس[1]

محصول ماهواره‌ای بارش این سامانه، با استفاده از روش تطبیق هیستوگرام و برازش رگرسیون نمایی به دمای درخشندگی پیکسل[2] و میزان بارندگی، ابرها را ازنظر ویژگی‌های بافت و اندازه نرخ بارش هر پیکسل تحت پوشش ابر طبقه‌بندی می‌کند. این الگوریتم ابتدا با استفاده از حداقل دمای درخشندگی منطقه‌ای در ابرها و روش نظارت نشده نقشه ویژگی‌های خودسازمان‌دهنده[3]، تکه‌های ابر را مشخص می‌کند. سپس، با استخراج ویژگی‌های هندسی، دمایی و بافت، هر تکه ابر را در گروه خاصی قرار می‌دهد. در انتها، با استفاده از برازش تابع‌نمایی بی تی ار[4] میزان بارش را محاسبه می‌کند. محصول بارش این الگوریتم باقدرت تفکیک ۰/۰۴ × ۰/۰۴ در مقیاس‌های زمانی یک‌ساعته، سه‌ساعته، شش‌ساعته، روزانه، ماهانه، سالانه و تجمعی تولید می‌شود (هسو و همکاران، ۲۰۰۹). این داده‌ها در پایگاه داده https://chrsdata. eng.uci.edu در دسترس قرار دارد.

٤. الگوریتم پرشین پی دی ای ار[5]

الگوی پویای نرخ بارش ـ مادون‌قرمز[6] نسخه به‌روز شده پرشین سی سی اس است که با قدرت تفکیک مشابه ۰/۰۴ × ۰/۰۴ تولید می‌شود. در این الگو، با استفاده از داده‌های اقلیمی، بین دمای درخشندگی و بارش رابطه‌ای پویا ایجاد می‌شود. فرضیه اصلی تولید این محصول آن است که ویژگی‌های زمین‌شناسی، مانند توپوگرافی، دما، نوع آب‌وهوا و غیره، بر رابطه تابع‌نمایی بی تی ار مؤثر است. همچنین، در این محصول برای معرفی ویژگی‌های بارش هر منطقه از داده‌های اقلیم‌شناسی جهانی استفاده‌شده است. این محصول نسبت به الگوریتم‌های کمی تخمین بارش در منطقه غربی مجاور ایالات متحده آمریکا از چندین مزیت قابل‌توجه برخوردار است. این الگو در مقایسه با الگوریتم سی سی اس بهبودیافته است. این محصول دارای قدرت تشخیص بالاتر در بارش‌های گرم، تشخیص بهتر طیف گسترده‌تری از ابرها و قدرت تشخیص رژیم‌های بارشی متفاوت است. در مقیاس‌های زمانی، ۱ ساعته، ۳ ساعته، ۶ ساعته، روزانه، ماهانه، سالانه و تجمعی تولید می‌شود (نگوین و همکاران[7]، ۲۰۲۰). این داده‌ها در پایگاه‌داده https://chrsdata.eng.uci.edu قابل دسترس است.

الگوریتم سی ام او ارپیاچ[8]

این الگوریتم محصول مرکز پیش‌بینی اقلیمی[9] است. این محصول برآوردهای مایکروویو غیرفعال[10] از همه ماهواره‌های موجود مدار پایین زمین[11] را در یک چارچوب لاگرانژی ادغام می‌کند. این محصول برآوردهای بارش را با قدرت تفکیک مکانی ۰/۲۵ × ۰/۲۵ و قدرت تفکیک زمانی سه‌ساعته با پوشش ۶۰ شمالی تا ۶۰ جنوبی از سال ۱۹۹۸ تاکنون تولید کرده است. در این محصول از تخمین بارش حاصل از مایکروویو غیرفعال استفاده شده است که با به‌کارگیری بردارهای حرکتی حاصل از داده‌های ماهواره‌های مادون‌قرمز زمین‌ایستا[12] با قدرت تفکیک زمانی نیم‌ساعته، ویژگی‌های بارش را استخراج می‌کند. برآورد بارش حاصل از مایکروویو غیرفعال، که در حال حاضر در الگوریتم سی ام او ار پی اچ استفاده می‌شود، از ماهواره‌های هواشناسی عملیاتی با مدار قطبی سازمان ملی هوانوردی و فضایی، برنامه ماهواره‌ای هواشناسی دفاع آمریکا و ماهواره مأموریت اندازه‌گیری باران گرمسیری به دست می‌آید (زولدی و همکاران[13]، ۲۰۰۹). داده‌های این الگوریتم به آدرس https:// www.ncei.noaa.gov/data در دسترس قرار دارد.

1. PERSIANN-CCS
2. Brightness Temperature
3. SOFM
4. BT-R
5. PERSIANN-PDIR
6. PERSIANN Dynamic Infrared-Rain Rate (PDIR)
7.Nguyen at al
8. CMORPH
9. Climate Prediction Center (CPC)
10.Passive MicroWave (PMW)
11. Low Earth Orbit (LEO)
12. Geostaionary Infrared satellites (GEO-IR)
13. Zeweldi at al

محصول ماهواره‌ای ای ام ای ار جی[1]

پس از پایان مأموریت ای تی ام ام که مأموریت فضایی مشترکی بین اداره کل ملی هوانوردی و فضا و آژانس اکتشافات هوافضای ژاپن[2] برای نظارت ماهواره‌ای بر میزان بارش جهانی بود، ناسا با همکاری آژانس اکتشافات هوافضای ژاپن در سال ۲۰۱۴ پروژه برآورد بارش جهانی را راه‌اندازی کرد. رصدخانه مرکزی[3]، ماهواره اصلی برآورد بارش است که به دو سنجنده رادار دو فرکانسی بارش[4] (متشکل از یک رادار باند Ku و یک باند Ka) و تصویرگر ماکروویو[5] مجهز شده است. این الگوریتم یکی از محصولات بارش ماهواره جی پی ام است که از ادغام برآوردهای بارش سنجنده‌های ماکروویو، تخمین‌های ماهواره‌های مادون‌قرمز واسنجی شده با ماکروویو و تحلیل داده‌های باران‌سنجی تشکیل شده است. این الگوریتم سه مرحله‌ای است: ۱) استفاده از الگوریتم شکل‌گیری ابر برای تولید بردارهای حرکت ابر از تخمین‌های ماکروویو غیرفعال؛ ۲) الگوریتم پرشین سی سی اس برای برآورد تخمین‌های مادون قرمز کالیبره‌شده با مایکروویو غیرفعال؛ ۳) بارش چند ماهواره برای تنظیم بین ماهواره‌ای و تنظیم ماهانه با داده‌های مشاهداتی. داده‌های جی پی ام در مقیاس‌های زمانی نیم ساعت، سه ساعته، روزانه، هفتگی و ماهانه باقدرت تفکیک ۰/۱ × ۰/۱ منتشر می‌شوند (علی‌بخشی و همکاران، ۱۳۹۵). این تصاویر از پایگاه‌داده به آدرس https://gpm1.gesdisc.eosdis.nasa.gov/ قابل دسترسی است.

محصول ماهواره مرآ[6]

در حال حاضر، مرکز الگوسازی و همسان‌سازی داده‌ای سازمان فضایی و هوانوردی ملی آمریکا، نسخه دوم اطلاعات این پایگاه را ارائه کرده است. هدف از ایجاد این پایگاه عبارت است از: ۱) قراردادن مشاهدات ماهواره‌های سازمان فضایی آمریکا در یک بستر اقلیمی؛ و ۲) بهبود شناخت چرخه آب‌شناسی. این پایگاه، اطلاعات اقلیمی مختلفی را به‌صورت شبکه‌بندی شده برای کل جهان ارائه می‌دهد. اطلاعات این پایگاه به شکل ساعتی، روزانه و ماهانه از سال ۱۹۷۹ تاکنون و با تفکیک مکانی ۰/۵ درجه در ۰/۶۶۷ درجه برای کل جهان در دسترس است (رینکر و همکاران[7]، ۲۰۱۱).

دقت در ماهواره‌ها و الگوریتم‌های اندازه‌گیری بارش

در داده‌های بارش ماهواره‌ای، عدم قطعیت‌هایی مثل خطای سامان‌مند سنجنده، خطای برآورد و نمونه‌برداری زمانی مکانی وجود دارد. همچنین، مطالعات نشان می‌دهند که کارایی محصولات ماهواره‌ای بارش در اقلیم‌های مختلف متفاوت است. علاوه بر این، بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از پژوهش‌های انجام‌شده در ایران، برآوردهای ماهواره‌ای در مقیاس روزانه نتایج مطلوبی نداشته‌اند. ازاین‌رو، تحقیق در راستای ارزیابی محصولات ماهواره‌ای برای شناخت نقاط قوت و ضعف آن‌ها در برآورد بارش و ارائه محصول ترکیبی برای دستیابی به اطلاعات جامع‌تری از الگوی مکانی بارندگی امری ضروری است. داده‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای معمولاً دارای خطاهایی هستند که از عواملی چون تناوب نمونه‌برداری میدان دید غیریکنواخت سنجنده‌ها و عدم قطعیت در الگوریتم‌های استخراج بارش ناشی می‌شوند. همچنین، میزان دقت الگو در بعضی موارد به انبوه بارندگی و ارتفاع نیز بستگی دارد که می‌تواند باعث خطا در الگو شود. بنابراین، برای بررسی میزان قابلیت اعتماد محصولات ماهواره‌ای، صحت‌سنجی این الگوها با استفاده از داده‌های بارش زمینی ضروری است. در سال ۲۰۰۳ کارگروه جهانی بارش، برای اعتبارسنجی محصولات ماهواره‌ای در سطح جهانی، پروژه‌ی جدیدی را آغاز کرد. این پروژه تحقیقاتی برای ارزیابی داده‌های ماهواره‌ای در اقلیم‌ها و مناطق جغرافیایی با خصوصیات متفاوت تعریف و پیشنهاد می‌شود که برونداد آن زمینه‌ساز بهبود و اصطلاح داده‌های ماهواره‌ای است. همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، عملکرد تخمین‌های بارش ماهواره‌ای باتوجه به فصل، منطقه و ارتفاع تغییر می‌کند.

1. IMERG
2. Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA)
3. GPM Core Observatory (GPM-CO)
4. Dual freqiency Precipitation Radar (DPRY)
5. GPM Microwave Imager (GMI)
6. MERRA
7. Rienecker at al

جدول ۱. ماهواره‌ها و الگوریتم‌های اندازه‌گیری بارش و بررسی دقت آن‌ها

ردیف	هدف تحقیق	نوع الگوریتم یا ماهواره برآورد بارش	دقت الگوریتم یا ماهواره	منبع
۱	بررسی دقت و تصحیح داده‌های بارش تصاویر ماهواره‌ای TRMM در استان لرستان	ماهواره TRMM	استفاده از یک رابطه خطی و یا غیرخطی محتمل بین مقادیر بارش روزانه حاصل از تصاویر ماهواره‌ای و مقادیر متناظر آن‌ها در محل ایستگاه‌های زمینی استان لرستان برای اصلاح مقادیر خطا ضروری به نظر می‌رسد.	رضایی و همکاران،۱۳۹۹
۲	ارزیابی داده‌های بارش با استفاده از الگوهای CHIRPS و PERSIANN (مطالعه موردی: بندرعباس)	الگوهای CHIRPS و PERSIANN	نتایج نشان داد که برآورد بارش در ماهواره‌های PERSIANN و CHIRPS در مقیاس ماهانه و سالانه نسبت به مقیاس روزانه دقت بیشتری دارد	سیاسر و سالاری، ۱۴۰۲
۳	ارزیابی داده‌های بارش دورسنجی GPM در مقابل داده‌های مشاهده‌ای (موردمطالعه: غرب میانه ایران)	ماهواره GPM	نتایج نشان داد که درمجموع بارش روزانه حاصل از سنجنده GPM در غرب میانه ایران از دقت مناسبی برخوردار نیست. براساس ضریب تعیین، بیش از ۷۷ درصد ایستگاه مقدار ضریب تعیین کمتر از ۰/۵ دارند و تنها برای ۷ ایستگاه، مقدار ضریب تعیین به ۰/۵ و بیشتر می‌رسد که در بهترین حالت برای ایستگاه نورآباد لرستان مقدار این شاخص ۰/۵۷ است؛ اما سنجنده GPM در مقیاس‌های زمانی بالاتر (ماه، سال) دقت قابل‌قبولی دارد.	صادقی و همکاران،۱۳۹۸
٤	ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR و بررسی تأثیر ناهمواری‌ها بر آن (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز حله)	ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR	نتایج نشان داد الگوریتم PERSIANN در همهٔ مقیاس‌های زمانی و مکانی، ضمن کم برآوردکردن عمق بارش، دقت کمی نیز دارد. در مقابل، دقت الگوریتم PERSIANN-CDR بیشتر است	شکری کوچک و همکاران،۱۳۹۹
٥	ارزیابی عملکرد محصولات PDIR-Now و PERSIANN CCS برای بارش‌های منجر به خسارت‌بارترین سیلاب‌های کشور ایران در سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸	الگوریتم PDIR-Now و PERSIANN CCS	نتایج نشان از تغییرپذیری بالای شاخص‌ها در وقایع مختلف است. به‌طور میانگین ملاحظه شد که محصولات PERSIANN-CCS و PDIR-Now اگرچه دارای میانگین PC بالا هستند، اما به ترتیب دارای ضریب تعیین ۰/۱۶ و ۰/۱۹ و RMSE برابر با ۹/۳۸ و ۱۲/۷۸ بوده که مقادیر بسیار مطلوبی نیستند.	ثنایی نژاد و همکاران،۱۴۰۲
٦	ارزیابی محصولات ماهواره‌ای بارش CMORPH برای محاسبه شاخص خشک‌سالی هواشناسی SPI در حوزه آبریز دریاچه ارومیه	ماهواره CMORPH	در این پژوهش با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های زمینی حوزه آبریز دریاچه ارومیه در بین سال‌های ۱۹۹۸ تا ۲۰۱۶ دقت الگو CMORPH ماهواره‌ای در تخمین میزان بارش و خشک‌سالی هواشناسی مورد ارزیابی قرار گرفت که این الگو نتایج بسیار ضعیفی در تخمین بارش و پایش خشک‌سالی ارائه داده است.	صادقی و همکاران،۱۳۹۷
۷	مقایسه آماری بین محصولات IMERG و 3B42V7 TMPA در سطح سه داده‌های بارشی GPM و TRMM (مطالعه موردی: حوضه آبریز	محصولات IMERG و 3B42V7 TMPA	نتایج نشان داد که به‌طورکلی دادهٔ بارش 3B42V7 متعلق به ماهوارهٔ TRMM دقت بالاتری از دادهٔ IMERG متعلق به ماهوارهٔ GPM در منطقه دارد. داده‌های IMERG تنها در مقایسهٔ زمانی ماهانه و حوزه دقت بالاتری نسبت به دادهٔ 3B42V7 داشته است.	علی‌بخشی و همکاران،۱۳۹۵
۸	ارزیابی داده‌های بارش زمینی، ماهواره GPM و MERRA (مطالعه موردی: حوضه آبریز کشف رود)	ماهواره GPM و MERRA	نتایج نشان داد که داده بارش روزانه HQ متعلق به ماهواره GPM نسبت به داده MERRA در منطقه موردمطالعه دقت بالاتری دارد. در مقابل، داده‌های MERRA در مقایسه زمانی ماهانه دقت بالاتری نسبت به داده GPM داشته است.	علی‌بخشی و همکاران، ۱۳۹۷
۹	ارزیابی پایگاه داده‌های جهانی بارش برای استفاده در الگوهای فیزیکی، مطالعه موردی: حوزه آبریز کارون	PERSIANN ، PERSIANN-CDR، RT، 3B42-APHRODITE،TRMM ERRA-INTERIM ،CHIRPS V2.0	نتایج نشان داد که علی‌رغم این‌که دو پایگاه‌داده APHRODITE و ERRA-INTERIM در همه ارزیابی‌ها از دقت مناسبی داشته‌اند ولی در تشخیص عدم وقوع بارش عملکرد ضعیفی دارند.	رحمتی و مساح بوانی،۱۳۹۸
۱۰	ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای برای برآورد رخدادهای بارشی سنگین در نوار ساحلی دریای خزر	ماهواره‌ای GPM-IMERG، CHIRPS، PERSIANN-CDR و TRMM-3B42V7	باتوجه‌به نتایج به‌دست‌آمده محصول IMERG نسبت به سه محصول CHIRPS، PERSIANN-CDR و TRMM بهتر عمل کرده است.	محمودی بابلان و همکاران، ۱۴۰۱

جمع‌بندی و توصیه‌ها

پیشرفت‌های اخیر درزمینه تجهیزات ماهواره‌ای و سنجش‌ازدور، دسترسی به داده‌های بارش در مقیاس‌های منطقه‌ای و سراسری را افزایش داده است. بااین‌حال، به‌دلیل پیچیدگی‌های مربوط به خصیصه‌های غیرمستقیم برآوردهای سنجش‌ازدور، داده‌های بارشی به‌دست‌آمده از این روش‌ها با عدم قطعیت‌هایی روبرو هستند که استفاده از آن‌ها به‌عنوان ورودی در الگوهای آب‌شناسی و اقلیمی را با تردید روبرو می‌کنند. بنابراین، لازم است تا دقت داده‌های بارش حاصل از ماهواره‌ها بررسی شده و عدم قطعیت آن‌ها تحلیل شود. دقت داده‌های ماهواره‌ای به عواملی چون نوع زمین، آب‌وهوای منطقه و نوع بارش وابسته است. درنتیجه، ارزیابی دقت داده‌های ماهواره‌ای، به‌جای استفاده از روش‌های جهانی، به کاربران اجازه می‌دهد تا از مجموعه داده‌ها راحت‌تر استفاده کنند. گرچه داده‌های اندازه‌گیری‌شده، مدت‌زمان طولانی‌تری از داده‌ها را ثبت و ذخیره می‌کنند اما ازلحاظ دقت مکانی داده‌ها چندان قابل‌اعتماد نیستند. برای مثال، در نواحی کوهستانی و کویری ایران داده‌های اندازه‌گیری‌شده وجود ندارد. بهره‌گیری از روش سنجش‌ازدور برای اندازه‌گیری بارش در چنین مناطقی مفید است و داده‌های حاصل، به نسبت داده‌های اندازه‌گیری‌شده، یکنواختی بیشتری دارند. نتایج نشان می‌دهد که داده‌های ماهواره‌ای برای تخمین بارش، به‌خصوص در مناطق مرطوب و فصل‌های تر، بهتر عمل می‌کنند. باتوجه‌به موارد پیش‌گفته، لزوم تحلیل عدم قطعیت برآوردهای بارش ماهواره‌ای و همچنین ارائه الگوی ترکیبی برای تصحیح خطای آن‌ها ضروری است. برای پیش‌بینی و هشدار به‌موقع سیل و کاهش تلفات ناشی از آن، برآوردهای نسبتاً دقیق بارش و داشتن اطلاعات مفید از توزیع زمانی ـ مکانی آن ضروری است. به‌طورکلی، برای پیش‌بینی سیل به شبکه متراکمی از ایستگاه‌های باران‌سنجی یا اندازه‌گیری‌های رادارهای بارش زمینی نیاز است که در زمان واقعی عمل می‌کنند. بااین‌حال، در اغلب کشورهای درحال‌توسعه مانند ایران دردسترس‌بودن ایستگاه‌های اندازه‌گیری زمینی باران‌سنج و رادار که دارای توزیع متراکم و یکسانی باشند، در اکثر مناطق بسیار محدود است. به همین دلیل، استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای در ایران ضروری است. در ادامه چند توصیه برای بهبود عملکرد مقادیر اندازه‌گیری ماهواره‌ها و الگوریتم‌های اندازه‌گیری بارش ارائه می‌شود:

- در استفاده از داده‌های بارش ماهواره‌ای، به زمان، موقعیت جغرافیایی و مقدار بارش توجه شود. چراکه یک الگو ممکن است در شرایط و اقلیم مرطوب و پربارش نتیجه بهتری ارائه دهد؛
- بررسی اثر روش‌های تلفیقی داده‌های ماهواره‌ای بر صحت مقادیر پیش‌بینی‌شده بارش یکی از روش‌های افزایش دقت در داده‌های ماهواره‌ای است. بنابراین، پیشنهاد می‌شود برای افزایش دقت برآورد و کاهش عدم‌قطعیت در پیش‌بینی بارش، از روش‌های تلفیقی استفاده شود؛
- بررسی ارتباط شدت بارش هر منطقه با بارش‌های ثبت‌شده ماهواره‌ها مهم است و می‌توان علاوه بر ارتباط منطقی بین مقادیر بارش ماهواره‌ای و ایستگاه محلی، ارتباط بین شدت بارش هر منطقه با بارش‌های ثبت‌شده ماهواره‌ها را نیز بررسی کرد.
- دقت خروجی الگوهای ماهواره‌ای برای داده‌های بارشی، حداقل در مقیاس زمانی روزانه، متوسط تا ضعیف است. بنابراین، به‌نظر می‌رسد تولیدات ماهواره‌ای بارش به بررسی بیشتری نیاز دارند.

منابع

ثنایی‌نژاد، سید حسین، سالاری، خسرو (۱۴۰۲). ارزیابی عملکرد محصولات PDIR-Now و PERSIANN CCS برای بارش‌های منجر به خسارت‌بارترین سیلاب‌های کشور ایران در سال‌های ۱۳۹۶ الی ۱۳۹۸. *جغرافیا و مخاطرات محیطی*، ۱۲(۱) , ۲۴۶-۲۲۹.

رحمتی، اکبر، مساح بوانی، علیرضا (۱۳۹۸). ارزیابی پایگاه داده‌های جهانی بارش برای استفاده در مدل‌های فیزیکی، مطالعه موردی: حوزه آبریز کارون. *تحقیقات منابع آب ایران*، ۱۵(۱) , ۱۹۲-۱۷۸.

رضایی، ا. زینی وند، ح. طهماسبی پور، ن. حقی زاده، ع. (۱۳۹۹). *بررسی*

دقت و تصحیح داده‌های بارش تصاویر ماهواره‌ای TRMM *در استان لرستان*. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد، دانشگاه لرستان، دانشکده کشاورزی.

سیاسر، هادی، سالاری، امیر (۱۴۰۲). ارزیابی داده‌های بارش با استفاده از مدل‌های CHIRPS و PERSIANN (مطالعه موردی: بندرعباس). *علوم آب‌وخاک*. ۲۷ (۱): ۱۸۸-۱۷۵.

شکری کوچک، سعید، آخوندعلی، علی‌محمد، و شریفی، محمدرضا (۱۳۹۹). ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های بارش ماهواره‌ای PERSIANN و PERSIANN-CDR و بررسی تأثیر ناهمواری‌ها بر آن (مطالعهٔ موردی: حوضهٔ آبریز حله). *اکوآب‌شناسی*، ۷(۲) , ۵۲۷-۵۱۱.

صادقی، حمیدرضا، معصوم‌پور سماکوش، جعفر، و میری، مرتضی (۱۳۹۸). ارزیابی داده‌های بارش دورسنجی GPM در مقابل داده‌های مشاهده‌ای (موردمطالعه: غرب میانه ایران). *نشریه سنجش‌ازدور و* GIS *ایران*، ۱۱(۲), ۱۲۴-۱۱۵.

صادقی، فرزاد و ذهبیون، باقر و مشیرپناهی، داود (۱۳۹۷)، ارزیابی محصولات ماهواره‌ای بارش CMORPH برای محاسبه شاخص خشکسالی هواشناسی SPI در حوزه آبریز دریاچه ارومیه، *اولین دوره همایش ملی مدل‌سازی و فناوری‌های جدید در مدیریت آب*، بیرجند.

علی‌بخشی، سیده مریم، فرید حسینی، علیرضا، داوری، کامران، علیزاده، امین، مونیکا گاسچا، هنری (۱۳۹۵). مقایسه آماری بین محصولات IMERG و TMPA 3B42V7 در سطح سه داده‌های بارشی GPM و TRMM (مطالعه موردی: حوضه آبریز کشف رود، استان خراسان رضوی). *نشریه علمی ـ پژوهشی مرتع و آبخیزداری*، ۶۹(۴) , ۹۸۱-۹۶۳.

علی‌بخشی، سیده مریم، فرید حسینی، علیرضا، داوری، کامران، علی‌زاده، امین و مونیکا، هنری (۱۳۹۷). ارزیابی داده‌های بارش زمینی، ماهواره GPM و MERRA (مطالعه موردی: حوضه آبریز کشف رود). *پژوهش‌نامه مدیریت حوزه آبخیز*، ۹(۱۸)، ۱۲۲-۱۱۱.

فرج‌زاده، م. کریمی، ن. (۱۳۹۲). *مبانی هواشناسی ماهواره‌ای*، چاپ اول، انتشارات سمت. صفحه ۴۸-۵۲.

محمودی بابلان، سجاد، نسترنی عموقین، سعید، رسول‌زاده، علی (۱۴۰۱). ارزیابی محصولات بارش ماهواره‌ای جهت برآورد رخدادهای بارشی سنگین در نوار ساحلی دریای خزر. *مدل‌سازی و مدیریت آب‌وخاک*، ۲(۴) , ۱۲۲-۱۰۷.

میری، م. رحیمی، م و نوروزی، ع. (۱۳۹۷). ارزیابی دقت برآورد بارش روزانه پایگاه داده‌های TRMM و GPM در مقابل داده‌های مشاهده‌ای در ایران، *نشریه علمی پژوهشی مهندسی و مدیریت آبخیز*، جلد ۱۱، شماره ۴، ص ۹۸۳-۹۷۲.

Funk, C. P. Peterson, M. Landsfeld, D. Pedreros, J. Verdin, S. Shukla, G. Husak, J. Rowland, L. Harrison, A. Hoell and J. Michaelsen. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data* 150066 *:2*.

Hsu, K.-L., & Sorooshian, S. (2009). Satellite-based precipitation measurement using PERSIANN system. *In Hydrological modelling and the water cycle* (pp. 48-27).

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Braithwaite, D., Hsu, K., Joyce, R., Xie, P., & Yoo, S.-H. (2015). NASA global precipitation measurement (GPM) integrated multi-satellite retrievals for GPM (IMERG). *Algorithm Theoretical Basis Document* (ATBD) Version, 26 ,4.

Rienecker M.M., Suarez M.J., Gelaro R., Todling R., Bacmeister J., Liu E., Bosilovich M.G., Schubert S.D.,Takacs L. and Kim G.-K. 2011. MERRA: NASA's mod- ern-era retrospective analysis for research and applica- tions. *Journal of climate,* 3648-3624 :24.

Zeweldi, D. A., & Gebremichael, M. (2009). Evaluation of CMORPH precipitation products at fine space–time scales. *Journal of Hydrometeorology*, 307-300 ,(1)10.

Zhang, A. and Jia, G. 2013. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data. *Remote Sensing of Environment,* 23-12 :134.

Journal of Agricultural Information sciences and Technology
Volume 8, Issue 1, Serial Number 15, Spring and Summer 2025
jaist.areeo.ac.ir

Introducing satellite precipitation databases in Iran

Seyed Masoud Soleimanpour[1], **Parsa Haghighi**[2]

1. Associate Professor, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran. (Corresponding author). Email: m.soleimanpour@areeo.ac.ir
2. Masters, Soil Conservation and Watershed Management Research Department, Fars Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, Agricultural Research, Education and Extension Organization (AREEO), Shiraz, Iran. Email: p.haghighi@areeo.ac.ir

Abstract

Due to the high variability of precipitation quantity in space and time, it is very difficult to monitor it in regional scales using ground stations. Precipitation data with high temporal and spatial resolution are essential as key inputs in hydrological and meteorological models to increase the accuracy of water resources management predictions. Today, with the advancement of technology, it has become possible to estimate precipitation using remote sensing. One of the remote sensing methods is the use of satellites to estimate precipitation. In this study, we introduce satellite precipitation databases and compare the accuracy of satellite output and precipitation measurement algorithms. The study showed that when using satellite precipitation data, time, geographical location, and precipitation amount should be considered, and satellite data integration methods can increase the accuracy and precision of predicted precipitation values. The relationship between the rainfall intensity of each region and the satellite-recorded rainfall is also important, and in addition to the logical relationship between the satellite and local station rainfall values, the relationship between the rainfall intensity of each region and the satellite-recorded rainfall can also be examined. The output of satellite models, at least on a daily time scale, indicates moderate to poor accuracy for precipitation data; therefore, in order to reduce the uncertainty of satellite precipitation products, it is necessary to use exponential downscaling methods at the station level and reduce the error.

Keywords:precipitation estimation, uncertainty, meteorological satellites, remote sensing.