

Analysis of the time series of land surface albedo in Iran using MODIS data

Omid Reza Kefayat Motlagh *

Dep of Climatology, University of Kurdistan, Sanandaj, Iran

* Corresponding Author: o.kefayatmotlagh@gmail.com

Abstract

Introduction: Albedo is one of the key parameters in environmental studies that shows the ratio between the solar radiation reflected from the Land surface and the solar radiation incident on it. In Iran, many studies have been conducted on the Land surface albedo at the local and national levels. In some studies, the zoning of the Land surface albedo and the factors affecting it have been studied. In some studies, the trend of the Land surface albedo has also been studied. However, no research has been conducted on the albedo time series of Iran at the macro and national levels. Therefore, examining the albedo time series in Iran can be a step towards revealing its environmental changes over the last two decades.

Data and Methods: The MODIS sensor is mounted on two satellites, Terra and Aqua, which were launched by NASA on December 18, 1999, and May 4, 2002, respectively. These two satellites image the entire land surface twice a day. MODIS sensor produces the land surface albedo with appropriate spatial and temporal resolution and makes it available to researchers. In this study, in order to analyze the time series of Iran's albedo, daily albedo data of MODIS sensor in Iran were downloaded from NASA website in the period from 1/1/1379 to 29/12/1401 for 8402 days. After mosaicking the tiles using the Frequency function in MATLAB software, daily, monthly, seasonal, and annual time series of Iran's albedo were calculated.

Results and Discussion: The results of the time series on an annual scale showed that the highest albedo of Iran during the last two decades occurred in 2007 with a value of 14 percent. The lowest albedo of Iran was recorded in 2009 with a value of about 11 percent. Seasonal time series studies also showed that the highest and lowest albedo of Iran during the last two decades occurred in the winter of 2007 and the fall of 2018, respectively. The monthly time series results also indicate that the highest albedo of Iran during the last two decades occurred in January and especially in February of 2007 with a value of 28%. The lowest albedo of Iran was also recorded not in July or August but in December of 2009. This shows that the albedo of Iran has a bimodal behavior; that is, one peak is observed in the winter due to increased snow cover and one peak is observed in the summer due to increased temperature and dryness of the land surface.

Conclusion: According to scientific statements, among the phenomena of the land surface, the highest of the land surface albedo is specific to snow and the lowest of the land surface albedo is specific to water and dense vegetation. A large area of Iran is poor in terms of snow cover. On the other hand, snowfall occurs only in a short period of the year. Therefore, the average albedo of Iran over the last two decades has been recorded at about 12 percent, which is insignificant compared to the global average (30 percent). The results of the time series on a daily scale showed that the lowest albedo of Iran over the last two decades occurred on December 2, 2018, which seems to be the day when precipitation systems were active in the country and a large area of the country was covered with precipitation. This seems natural considering the widespread flood of 2018 that occurred over a large area of the country and requires a separate study. On this day, the average albedo of Iran was calculated to be only 9 percent. The time series on a daily scale also confirmed that the maximum albedo of Iran was in the winter of

۲۰۰۷. The results showed that on January ۱۹, ۲۰۰۷, Iran's albedo reached ۳۸ percent, which suggests that heavy snow occurred in Iran on that day, which requires a separate study.

Keywords: Albedo, Snow, Time Series, MODIS, Iran

واکاوی سری زمانی آلبدوی سطح زمین در ایران با داده‌های مودیس

امید رضا کفایت مطلق*

گروه آب و هواشناسی، دانشگاه کردستان، سنندج، ایران

*نویسنده عهده دار مکاتبات: o.kefayatmotlagh@gmail.com

چکیده

مقدمه: آلبدو یکی از پارامترهای کلیدی در مطالعات زیست محیطی است که نسبت میان تابش خورشیدی بازتاب شده از سطح زمین به تابش خورشیدی فرود آمده بر آن را نشان می‌دهد. در ایران پژوهش‌های زیادی در سطح محلی و ملی بر روی آلبدوی سطح زمین انجام شده است. در برخی از پژوهش‌ها پهنه‌بندی آلبدوی سطح زمین و عوامل مؤثر بر آن مطالعه شده است. در برخی پژوهش‌ها نیز روند آلبدوی سطح زمین بررسی شده است. اما در سطح کلان و ملی پژوهشی بر روی سری زمانی آلبدوی ایران انجام نشده است. از این رو بررسی سری زمانی آلبدو در ایران می‌تواند گامی جهت آشکارسازی تغییرات محیطی آن طی دو دهه اخیر باشد.

داده و روش‌ها: سنجنده مودیس بر روی دو ماهواره ترا و آکوا نصب شده است که به ترتیب در ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ۴ می ۲۰۰۲ توسط ناسا به فضا پرتاب شدند. این دو ماهواره هر روز دو بار از تمام سطح زمین تصویربرداری می‌کنند. سنجنده مودیس آلبدوی سطح زمین را با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب تولید و در دسترس پژوهشگران قرار می‌دهد. در این پژوهش جهت واکاوی سری زمانی آلبدوی ایران، داده‌های روزانه آلبدوی سنجنده مودیس در محدوده ایران در بازه زمانی ۱۳۷۹/۱/۱ تا ۱۴۰۱/۱۲/۲۹ به مدت ۸۴۰۲ روز از وبگاه ناسا دانلود شد. پس از موزائیک کردن کاشی‌ها به کمک تابع Frequency در نرم افزار متلب، سری زمانی روزانه، ماهانه، فصلی و سالانه آلبدوی ایران محاسبه گردید.

نتایج و بحث: نتایج سری زمانی در مقیاس سالانه نشان داد که بالاترین آلبدوی ایران طی دو دهه اخیر در سال ۱۳۸۶ با مقدار ۱۴ درصد رخ داده است. پایین‌ترین آلبدوی ایران در سال ۱۳۸۸ با مقدار حدود ۱۱ درصد ثبت شده است. بررسی‌ها سری زمانی فصلی نیز نشان داد که بالاترین و پایین‌ترین آلبدوی ایران طی دو دهه اخیر به ترتیب در فصل زمستان ۱۳۸۶ و فصل پاییز ۱۳۹۷ اتفاق افتاده است. همچنین نتایج سری زمانی ماهانه گویای آن است که بالاترین آلبدوی ایران طی دو دهه اخیر در دی و بویژه بهمن ۱۳۸۶ با مقدار ۲۸ درصد رخ داده است. پایین‌ترین آلبدوی ایران نیز نه در تیر یا مرداد بلکه در آذر ۱۳۸۴ ثبت شده است. این موضوع نشان می‌دهد که آلبدوی ایران رفتاری بایمودال دارد؛ یعنی یک نقطه اوج آن در فصل زمستان به دلیل افزایش پوشش برفی و یک نقطه اوج آن در فصل تابستان به دلیل افزایش دما و خشکی سطح زمین مشاهده می‌شود.

نتیجه‌گیری: مطابق با گزاره‌های علمی در بین پدیده‌های سطح زمین بالاترین آلبدوی سطح زمین مختص برف و پایین‌ترین آلبدوی سطح زمین مختص آب و پوشش گیاهی انبوه می‌باشد. گستره وسیعی از کشور ایران از نظر پوشش برفی فقیر است. از سوی دیگر تنها در بازه کوتاهی از سال ریزش برف رخ می‌دهد. از این رو میانگین آلبدوی ایران طی دو دهه اخیر حدود ۱۲ درصد ثبت شده است که نسبت به میانگین جهانی (۳۰ درصد) ناچیز است. نتایج سری زمانی در مقیاس روزانه نشان داد که پایین‌ترین آلبدوی ایران طی دو دهه اخیر در روز

۲ آذر ماه ۱۳۹۷ رخ داده است که به نظر می‌رسد در این روز سامانه‌های بارش‌زا در کشور فعال بوده و گستره وسیعی از کشور را بارش فرا گرفته باشد. این موضوع با توجه به سیل فراگیر ۱۳۹۷ که در گستره وسیعی از کشور رخ داد، طبیعی به نظر می‌رسد و نیازمند پژوهشی جداگانه است. در این روز میانگین آلودگی ایران تنها ۹ درصد محاسبه شده است. همچنین سری زمانی در مقیاس روزانه بیشینه بودن آلودگی ایران در زمستان ۱۳۸۶ را تایید کرد. نتایج نشان داد که در روز ۱۹ دی ماه ۱۳۸۶ آلودگی ایران به ۳۸ درصد رسیده است که به نظر می‌رسد در این روز برف سنگینی در ایران رخ داده باشد که نیازمند پژوهشی جداگانه است.

واژه‌های کلیدی: آلودگی، برف، سری زمانی، مودیس، ایران

۱- مقدمه

آلودگی سطح فراسنجی است که نسبت میان تابش خورشیدی بازتاب شده از سطح زمین به تابش خورشیدی فرود آمده بر آن را نشان می‌دهد. در مقابل آلودگی سیاره‌ای، بازتاب کل سامانه زمین- جو است که از فضا دیده می‌شود (Hummel & Reck, ۱۹۷۹). این فراسنج در تنظیم ترازمندی تابشی سطح زمین نقش بسیار مهم دارد. تغییرات زمانی و مکانی آلودگی سطح زمین بسیار زیاد است. با تغییر پوشش زمینی و وضعیت سطح تغییرات چشمگیری در آلودگی سطح رخ می‌دهد. مهم‌ترین پیامد معنی‌دار و قابل پیش‌بینی در خصوص آلودگی، از طریق گرمایش جهانی قابل مشاهده است. مطالعات نشان داده‌اند که به استثنای یخ‌های قطب جنوب (اخیراً یک درصد در سال میزان آلودگی افزایش داشته است)، به دلیل کاهش سطح پوشش برف (Solomon, ۲۰۰۷) و حتی ابرناکی، انرژی کمتری به فضا بازتاب می‌شود. یا به بیانی میزان آلودگی رفتاری کاهشی داشته است. همین امر به گرمایش زمین در سطح جهان می‌افزاید که در این میان سرزمین ایران از این قاعده مستثنا نمی‌باشد (Spångmyr, ۲۰۱۰).

افزایش آلودگی سطح در طول خشکسالی دهه ۸۰ منطقه ساحل آفریقا مورد ارزیابی قرار گرفت. مقایسه آلودگی سطح از سال ۱۹۸۴ که خشک‌ترین سال دهه ۸۰ بوده با سال ۲۰۰۳ که میزان بارش مشابهی نسبت به شرایط پیش از خشکسالی دهه ۸۰ داشت، نشان داد که کمبود بارندگی موجب افزایش آلودگی سطح در طی خشکسالی‌های دهه ۸۰ شده و تفاوت مقدار آلودگی بین سال‌های ۱۹۸۴-۲۰۰۳ برابر با ۰/۰۶ بوده است (Govaerts & Lattanzio, ۲۰۰۸). بیشترین مقدار آلودگی (بیش از ۰/۴) در نواحی بدون پوشش گیاهی، یعنی در بیابان‌های شمال آفریقا و خاورمیانه رخ می‌دهد، در حالی که در جنوب اروپا مقادیر آن بین ۰/۱۵ تا ۰/۲۵ است. بررسی تغییرات آلودگی سطح زمین بر اساس تغییرات پوشش زمین نیز به طور عمده روند کاهشی را نشان می‌دهد که نیازمند بررسی بیشتری جهت عوامل تأثیرگذار بر آلودگی سطح زمین است (Benas and Chrysoulakis, ۲۰۱۴). در پژوهشی تغییرات آلودگی سطح در منطقه مدیترانه طی دوره زمانی ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۲ برآورد شد. این منطقه به دلیل گستردگی به سه منطقه لوانت^۱ (شرق مدیترانه)، آفریقای شمالی و جنوب اروپا تقسیم شد. یافته‌ها نشان داد که روند آلودگی سطحی در منطقه لوانت ۳/۳ درصد افزایش و در آفریقای شمالی، ۶/۶ درصد کاهش یافته است، در حالی که نشانه‌های متفاوتی در جنوب

^۱- Levant region

اروپا مشاهده شده است. همچنین یافته‌ها نشان داد که تغییرات پوشش سطح زمین، تغییرات بارش و ضخامت نوری هواپرها^۱ نقش مهمی بر روی ناهنجاری‌های آلودگی سطح زمین بازی می‌کنند (Benas & Chrysoulakis, ۲۰۱۵). بر اساس برداشت‌های میدانی و فراورده‌های سنجنده مودیس (MCD۴۳A۲ و MCD۴۳A۳) آلودگی سطح یخ در دریاچه‌های فلات تبت برآورد شد. یافته‌ها نشان داد که آلودگی در هنگام طلوع و غروب خورشید به ۰/۳۰ می‌رسد در حالی که در نیمروز به ۰/۰۸-۰/۰۹ کاهش می‌یابد. آلودگی سطح یخ دریاچه‌ها، هنگامی که با برف پوشیده شده باشد، تنها ۰/۲۱۲ است. همچنین یافته‌ها گویای آن است که فراورده MCD۴۳A۳ نسبت به MCD۴۳A۲ از دقت بالاتری برخوردار است و ناهنجاری دوره‌ای کمتری دارد (Li et al, ۲۰۱۸). برای واکاوی تغییرات آلودگی در فلات تبت، آلودگی سنجنده مودیس با پیش‌فرض مدل WRF^۲ در بازه ۲۰۰۰ تا ۲۰۰۹ راست آزمایی گردید. یافته‌ها نشان داد که بیشینه آلودگی در فصل زمستان و کمینه آن مربوط به فصل تابستان است. در غرب فلات تبت، در تمام فصل‌ها به طور پیش فرض مدل WRF مقادیر بسیار بیشتری نسبت به مودیس نشان می‌دهد. در حالی که در مرکز و شرق فلات تبت مقادیر نسبتاً کوچک‌تر است. بررسی‌های بیشتر نشان داد که میانگین آلودگی داده‌های مودیس ۰/۲۲ است در حالی که میانگین آلودگی مدل WRF ۰/۳۶ می‌باشد که نشان‌دهنده برآورد بالای آلودگی در پیش فرض مدل WRF است. همچنین هر دو فراورده تغییرات بین سالانه و سالانه را به طور پیوسته نشان دادند اما پیش فرض مدل WRF، دامنه بسیار بیشتری نسبت به مودیس داشته است (Meng et al, ۲۰۱۸). سهم بشر در تغییر آلودگی در شمال چین حدود ۸۶ درصد بوده که اغلب به دلیل کشت و گسترش شهرها می‌باشد. بررسی روند آلودگی در شمال چین نشان داد که آلودگی اندکی افزایش یافته است، که می‌تواند موجب کاهش جذب تابش خورشیدی منطقه شود. چرخه فصلی آلودگی در تابستان و پاییز روند افزایشی داشته و نیز در زمستان و بهار، روند کاهشی را نشان داده است. در تابستان آلودگی عمدتاً به دلیل رشد پوشش گیاهی پایین است؛ در حالی که در زمستان به دلیل پوشش برفی آلودگی سطح افزایش می‌یابد. تغییرات آلودگی ناشی از انسان در شمال چین منجر به واداشت تابشی منفی خواهد شد (Hu et al, ۲۰۱۹). در مطالعه‌ای برای بررسی تغییرات آلودگی در سطح جهان از مشاهدات ماهواره‌ای و قابلیت Google Earth Engine بهره گرفته شد. با استفاده از شیب رگرسیون خطی تغییرات آلودگی طی ۲۰۰۰-۲۰۱۵ محاسبه و همچنین روند آن بر اساس آزمون من-کندال مورد بررسی قرار گرفت. یافته‌ها نشان داد که در کشورهای مدیترانه، هند، جنوب غربی آفریقا و استرالیا شرقی روند نزولی در آلودگی وجود دارد در حالی که روند صعودی در اوکراین، جنوب روسیه و شرق قزاقستان، آسیای شرقی، مرکز و شرق برزیل و استرالیا مرکزی مشاهده می‌شود. بخش عمده این روندها تابع بارش و تغییر شیوه‌های کشاورزی و تداوم پوشش برف هستند (Chrysoulakis et al, ۲۰۱۹). اندازه‌گیری‌های ماهواره‌ای کاهش کلی آلودگی را در سراسر ورقه یخی گرینلند در طول چند دهه گذشته نشان داده‌اند، به‌ویژه در امتداد حاشیه غربی صفحه یخی، منطقه‌ای که به منطقه تاریک معروف است (آلودگی کمتر از ۴۵ درصد). نتایج سری زمانی Landsat و Sentinel ۲ طی دوره ۱۹۸۴-۲۰۲۰ نشان داد که وسعت منطقه تاریک بین سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۷ به سرعت گسترش یافته است و از آن زمان به ۲۸٪ از میانگین حداکثر وسعت سالانه ۲۹۰۰ کیلومتر مربع به ۸۰۰۰ کیلومتر مربع افزایش یافته است. منطقه تاریک به آرامی به تاریک شدن ادامه می‌دهد و میانگین حداقل آلودگی سالانه با سرعت ۰/۰۰۰۶- کاهش می‌یابد (Feng et al, ۲۰۲۳).

^۱- Aerosol Optical Thickness

^۲- Weather Research and Forecasting

ایران به دلیل گستردگی زیاد به لحاظ طول و عرض جغرافیایی، وجود پیچیدگی پیکربندی ناهمواری‌ها و قرارگیری در معرض یورش توده‌های هوا، از نظر آلوده شرایط ویژه‌ای دارد. هر یک از پدیده‌های جغرافیایی میزان آلودگی خاص خود را دارند و بسته به نوع پوشش سطح زمین میزان آلودگی سطح تغییر می‌کند. به طور کلی مقدار آلودگی کلی زمین حدود ۰/۲۴ است. بنابراین با آگاهی از میزان آلودگی هر نقطه می‌توان شناخت دقیقی از پدیده‌های سطح زمین داشت. آلودگی تحت تأثیر عرض جغرافیایی، ارتفاع و توده‌های هوا قرار دارد، به طوری که با تغییر هر یک از این عوامل، آلودگی نیز تغییر خواهد کرد. به عبارت دیگر، شرایط کلی آلودگی تابعی از زاویه تابش و ارتفاع است و عوامل دیگری مانند دما، ابرناکی، پوشش گیاهی، رطوبت خاک و حتی نوع خاک در آلودگی هر مکان نقش دارند. در ایران پژوهش‌های زیادی در مقیاس محلی بر روی آلودگی سطح زمین انجام شده است (۲۰۲۰، Asadi et al, ۲۰۱۸; Firozi et al, ۲۰۱۶; Ghobadi, ۲۰۱۳; Akbarzadeh et al, ۲۰۱۱; Lotfi, ۲۰۱۱). در برخی از پژوهش‌ها نیز آلودگی سطح زمین در مقیاس کلان و ملی مطالعه شده است (Soltani Akmal, ۲۰۱۷; Hejazizadeh et al, ۲۰۲۲, Kefayat Motlagh, ۲۰۱۹; Karbalaie, ۲۰۱۸). اما در پژوهش‌های اندکی سری زمانی آلودگی ایران بررسی شده است. در پژوهشی برای مدل‌سازی تغییرات زمانی و مکانی آلودگی ایران زمین از داده‌های MERRA^{۲۱} با قدرت تفکیک ۵۰×۵۰ کیلومتر در بازه زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۰ استفاده گردید. نتایج ایشان نشان داد که بیشترین مقدار آلودگی در طول جغرافیایی ۴۴ تا ۴۵ درجه شرقی به میزان ۲/۸ تا ۳/۳ و کمترین مقدار آن بین ۵۲ تا ۵۳ درجه طول شرقی به میزان ۱ تا ۱/۵ واحد به ثبت رسیده است. همچنین یافته‌ها نشان داد که بیشترین آلودگی در فصل زمستان به مقدار ۰/۲۶ واحد و کمترین آن در فصل بهار با ۰/۲۳ واحد رخ داده است (Hejazizadeh, ۲۰۱۷). در پژوهشی دیگر عوامل مؤثر بر آلودگی در ارتفاعات ایران به کمک رگرسیون خطی چندگانه شناسایی شدند. نتایج حاصل از مدل‌سازی ماهانه نشان داد که در تمامی ماه‌های سال به جزء ماه‌های جولای، آگوست، سپتامبر و اکتبر نقش مستقیم برف بر روی آلودگی ارتفاعات ایران بارز بوده است. در این ماه‌ها به دلیل نبود پوشش برف و به ثمر رسیدن محصولات کشاورزی و باغات، نقش معکوس پوشش گیاهی بر روی تغییرات آلودگی تعیین‌کننده است. بررسی‌های فصلی نشان داد که در فصول زمستان، بهار و پاییز برف نقش چشمگیری بر روی آلودگی ارتفاعات ایران دارد؛ اما در فصل تابستان پوشش گیاهی تعیین‌کننده است. همچنین نتایج سالانه نشان داد که برف، پوشش گیاهی، ارتفاع، شیب، دمای سطح زمین و وجه‌شیب به ترتیب عوامل مؤثر بر آلودگی در ارتفاعات ایران به شمار می‌روند که نقش برف، دمای سطح زمین و وجه‌شیب بر روی آلودگی مثبت و نقش پوشش گیاهی، ارتفاع و شیب منفی می‌باشد (Motlagh and Darand, ۲۰۲۴). از آنجایی که آلودگی متغیر فیزیکی بسیار مهمی در مطالعات زیست محیطی، هواشناسی و بیلان تابشی محسوب شده و بر حیات زیست‌بوم‌های گیاهی و حیوانی تأثیرگذار است لازم است سری زمانی آن در ایران بررسی گردد و آشکار شود که تغییرات آلودگی طی دو دهه اخیر چگونه است؟ در چه سالی آلودگی ایران بیشینه و در چه سالی کمینه بوده است؟ آیا تغییرات آلودگی در فصول مختلف یکسان بوده است؟ در چه روزی آلودگی ایران بیشینه بوده است؟ چه عواملی باعث افزایش/کاهش آلودگی ایران شده است؟

۲- داده و روش‌ها

^{۲۱}- Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version ۲ (MERRA-۲).

سنجنده مودیس در اواسط سال ۱۹۹۵ میلادی تکمیل شد. این سنجنده بر روی دو ماهواره ترا^۱ و آکوا^۲ نصب شده است که به ترتیب در ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ و ۴ می ۲۰۰۲ توسط ناسا به فضا پرتاب شدند. این دو ماهواره هر روز دو بار از تمام سطح زمین تصویربرداری می کنند و داده هایی در ۳۶ باند طیفی (طول موج های ۰/۴-۱۴/۴ میکرومتر) با قدرت تفکیک مکانی ۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری برداشت می کنند (ladsweb.nascom.nasa.gov). در این پژوهش داده های روزانه آلبدوی آبی فام فراورده MCD43A4 با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر در بازه زمانی ۱۳۷۹/۱/۱ تا ۱۴۰۱/۱۲/۲۹ خورشیدی به مدت ۸۴۰۲ روز از تارنمای مودیس استخراج شد. این فراورده از تابع توزیع بازتابندگی دو راستایی^۳ استفاده می کند. تابع توزیع بازتابندگی دو راستایی تعیین می کند که وقتی انرژی تابشی از راستایی معین به سطحی برخورد می کند، چه میزان از آن در راستای معین دیگر، بازتاب می شود. بنابراین تابع توزیع بازتابندگی دو راستایی تابعی از زوایای نوردهی و دید است. وقتی انرژی تابشی خورشید بر سطحی فرود می آید، بسته به ویژگی های فیزیکی سطح، طول موج های مختلف به مقادیر مختلف جذب، بازتاب و یا گذر داده می شوند. این بدان معنی است که این تابع، تابعی از طول موج می باشد و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\text{BRDF} = f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \Lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i)}{dE(\theta_i, \phi_i)} \quad \text{رابطه (۱)}$$

واحد این تابع، استرادیان (sr^{-1}) بوده و $\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r$ به ترتیب زوایای سروسو^۴ و سمت^۵ مربوط به راستای نوردهی و دید هستند. $E(\theta_i, \phi_i)$ تابش فرودی در راستای معین و $L_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; E_i)$ بازتاب در راستای دید می باشد (Nicodemus et al., ۱۹۹۹; Strahler et al., ۱۹۷۷).

داده های فرآورده MCD43A4 سنجنده مودیس ترکیبی از ماهواره های ترا و آکوا با پوشش مکانی ۵۰۰ متر بوده است. فرمت داده ها HDF بوده و بازه زمانی آن روزانه است که از تاریخ ۱۳۷۸/۱۲/۵ خورشیدی بر روی وبگاه ناسا در دسترس می باشد. همچنین مختصات این داده ها سینوسی است و ایران در مختصات ۵ و ۶ عمودی و ۲۱ تا ۲۳ افقی قرار دارد. داده های این سنجنده به صورت کاشی های جداگانه در ابعاد ۱۲۰۰*۱۲۰۰ کیلومتری در دسترس است و در مجموع شش کاشی گستره ایران را پوشش می دهد. با توجه به این شش کاشی پیرامون کشور ایران را نیز در بر می گرفت، تنها داده هایی که درون مرز جغرافیایی ایران را پوشش می داد، استخراج گردید (شکل ۱). از این رو یک ماتریس مکان-زمان به ابعاد ۸۴۰۲*۷۵۴۱۵۰۲ تهیه گردید که سطرهای آن تعداد یاخته های درون ایران و ستون ها زمان بر حسب روز را نشان می دهد. این ماتریس مبنای دآوری این پژوهش قرار گرفت. بر پایه رابطه (۱) میانگین آلبدوی ایران برای هر روز محاسبه گردید. این فرایند برای هر ماه، فصل و سال تکرار و در نهایت برای هر بازه، سری زمانی آن محاسبه گردید.

$$\bar{A}_i = \frac{\sum A_i}{n} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این رابطه $\bar{A}_i$ میانگین آلبدوی ایران در هر روز، A_i مقدار آلبدوی هر پیکسل در هر روز و n تعداد مشاهدات آن روز می باشد.

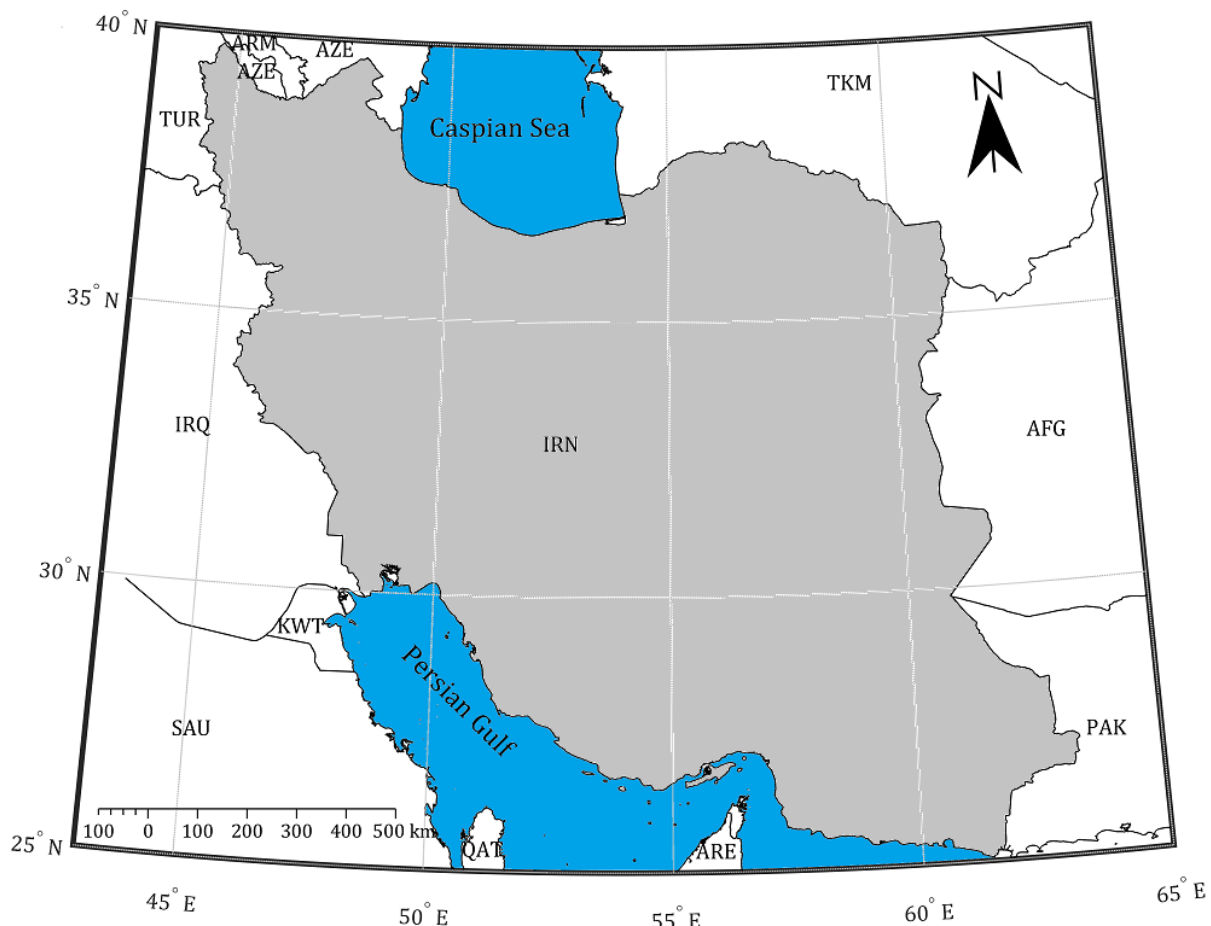
^۱- Terra.

^۲- Aqua.

^۳- Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF)

^۴- Zenith Angle

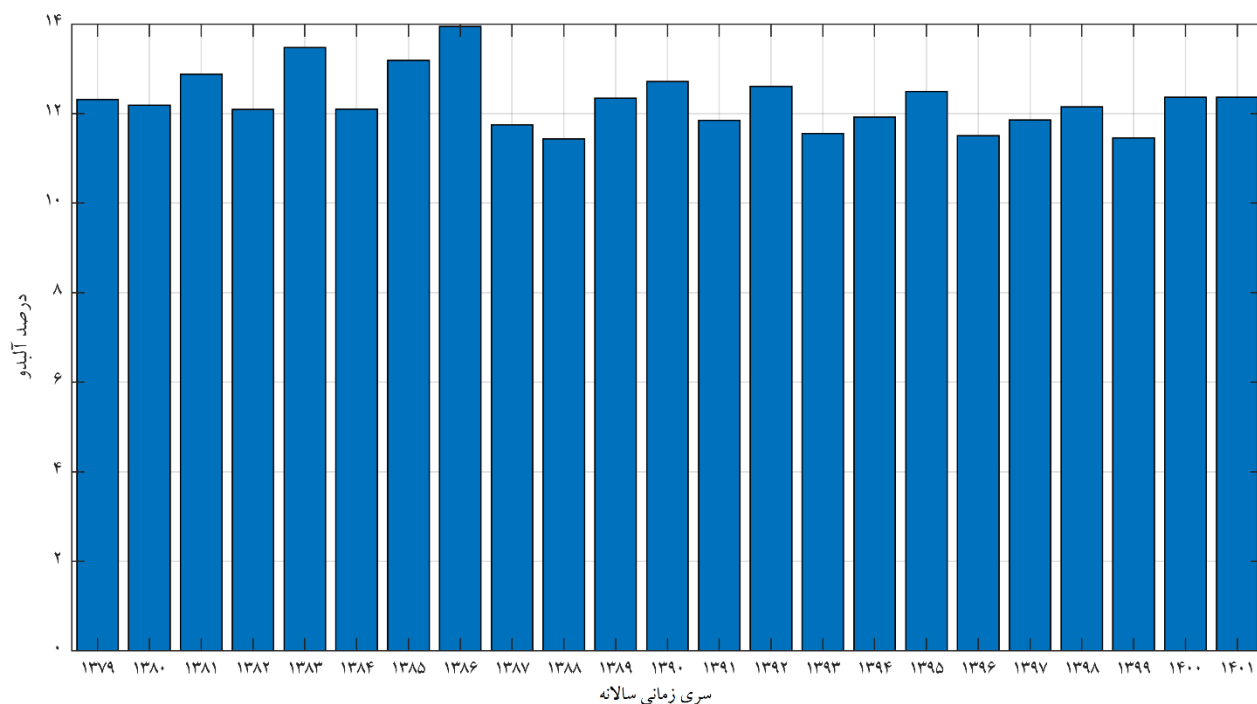
^۵- Azimuth Angle



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

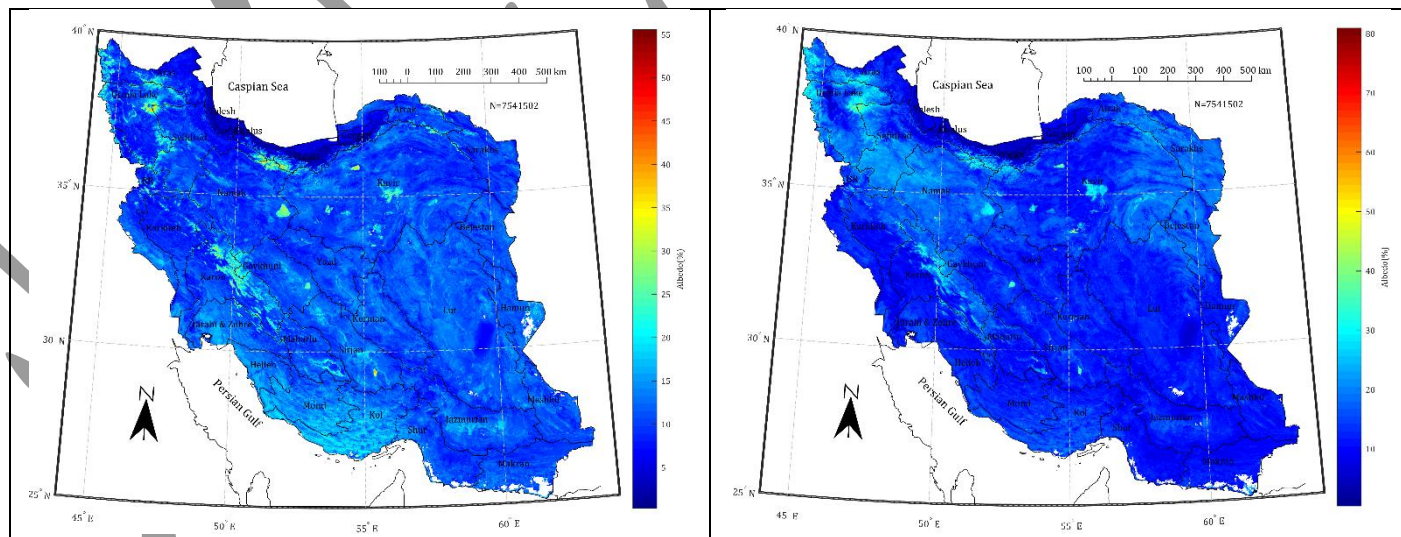
۳- نتایج و بحث

برای پاسخ به این پرسش که تغییرات آلودگی ایران طی دو دهه اخیر چگونه بوده است، از سری‌های زمانی مختلف بهره گرفته شد. واکاوی سری زمانی میانگین سالانه نشان داد که در سال ۱۳۸۶ بیشینه آلودگی ایران رخ داده است. در این سال میانگین آلودگی کشور به ۱۴ درصد رسیده است که در طول دوره مورد مطالعه بی سابقه بوده است. کمینه آلودگی نیز در سال ۱۳۸۸ به حدود ۱۱ درصد رسیده است (شکل ۲).



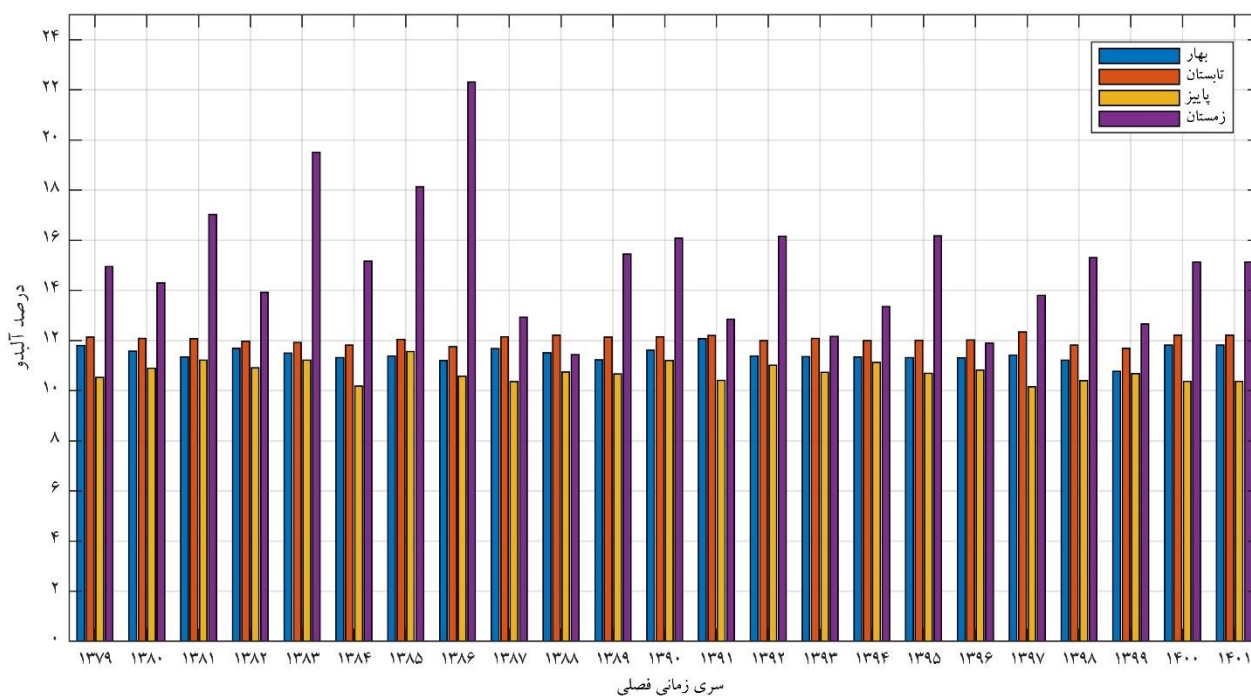
شکل ۲. سری زمانی میانگین سالانه آلبدوی ایران

برای درک جغرافیایی بهتر میانگین آلبدوی ایران طی سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸ خورشیدی نشان داده شده است (شکل ۳). همان طور که مشاهده می‌شود در سال ۱۳۸۶ مقادیر آلبدو به ۸۰ درصد نیز رسیده است که به نظر می‌رسد در این سال وضعیت پوشش برفی ایران نسبت به سال‌های دیگر متفاوت بوده است اما در سال ۱۳۸۸ مقادیر آلبدو پایین‌تر از ۵۵ درصد تجربه شده است.



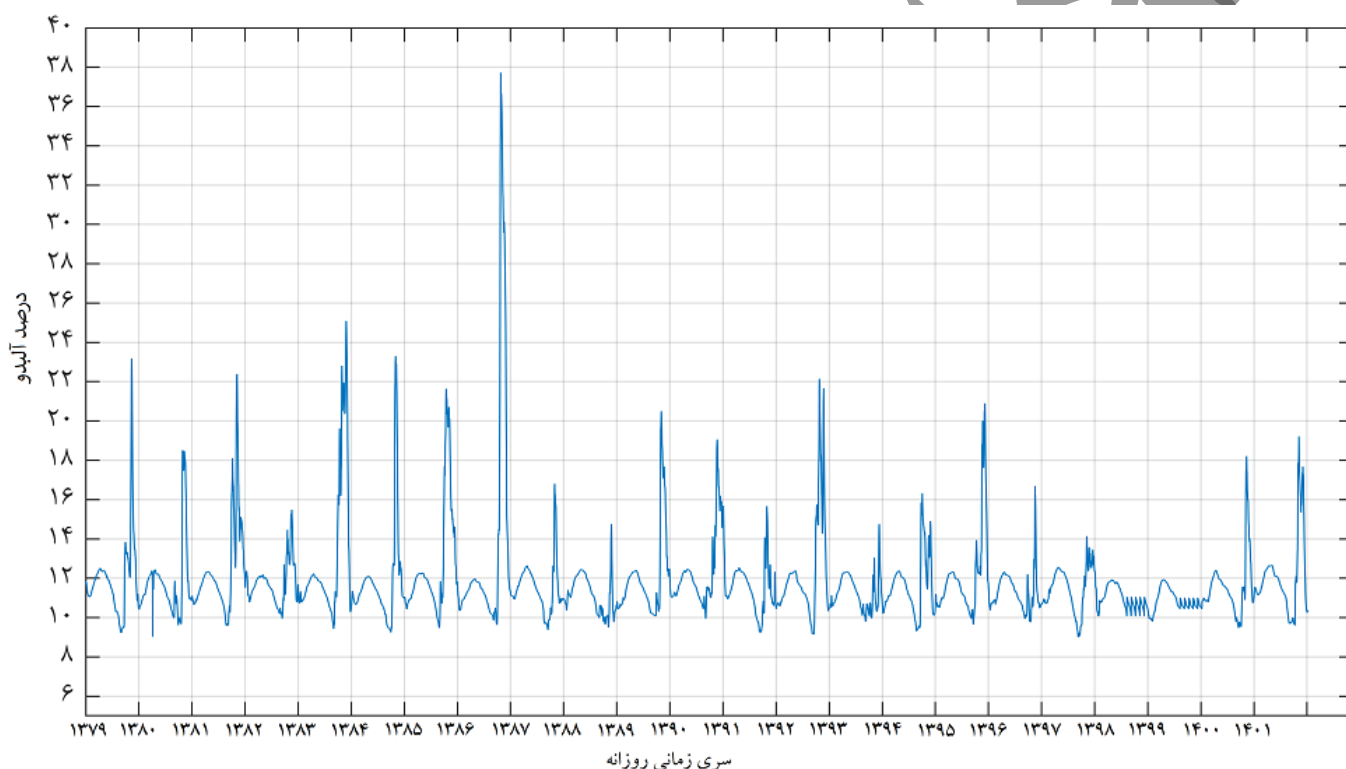
شکل ۳. میانگین آلبدوی ایران در سال ۱۳۸۶ (سمت راست) و ۱۳۸۸ (سمت چپ)

تحلیل سری زمانی فصلی آلودگی ایران طی دو دهه اخیر نشان داد که زمستان ۱۳۸۶ بیشترین آلودگی ایران رخ داده و به بیش از ۲۲ درصد رسیده است. تحلیل سری زمانی فصلی برفپوشان ایران نیز نشان داد که زمستان ۱۳۸۶ فصل بیشینه برفپوش ایران زمین بوده است، به همین دلیل در زمستان ۱۳۸۶ بیشینه آلودگی رخ داده است. کمینه آلودگی نیز نه در تابستان بلکه در پاییز ۱۳۸۴ حدود ۱۰ درصد بوده است (شکل ۴). در ادامه میانگین آلودگی ایران در زمستان ۱۳۸۶ خورشیدی نشان داده شده است (شکل ۵).



شکل ۴. سری زمانی فصلی آلودگی ایران

همان‌طور که یک پزشک از روی نوار قلب بیمار خود پی به وضعیت جسمی بیمار خود می‌برد، یک اقلیم‌شناس نیز بایستی از روی نوار پدیده‌های طبیعی پی به وضعیت طبیعی اقلیم و محیط زیست خود ببرد. از این رو در شکل ۸ سری زمانی روزانه آلودگی ایران طی دو دهه اخیر (۱۳۷۹-۱۴۰۱ خورشیدی) نشان داده شده است. این نوار آلودگی که همانند یک نوار قلب وضعیت آلودگی کشور را طی ۸۴۰۲ روز نشان می‌دهد؛ حاکی از آن است که آلودگی ایران گذشته از چرخه‌های نامنظم درون سالانه، دارای بی‌نظمی‌های بین سالانه نیز است. نتایج نشان داد که یکی از ناهنجاری‌های بین سالانه نوار آلودگی ایران در ۱۹ دی سال ۱۳۸۶ رخ داده است. در این روز آلودگی ایران نزدیک به ۴۰ درصد می‌رسد که طی دو دهه اخیر بی سابقه بوده است (شکل ۸). به نظر می‌رسد در این روز برف سنگینی در ایران رخ داده باشد که نیازمند پژوهشی جداگانه است. در ادامه میانگین آلودگی ایران در روز ۱۹ دی ماه سال ۱۳۸۶ خورشیدی نشان داده شده است (شکل ۹). همان‌طور که مشاهده می‌شود در اکثر نقاط کشور بویژه رشته‌کوه‌های زاگرس و البرز، مناطق شمال غرب و شمال شرق آلودگی بالای ۶۰ درصد را تجربه می‌کنند.



شکل ۸. سری زمانی روزانه آلودگی ایران



در این نوشتار برای بررسی سری زمانی آلودگی ایران از داده‌های روزانه فراورده $MCD43A4$ سنجنده مودیس در فاصله زمانی ۱۳۷۹/۱/۱ تا ۱۴۰۱/۱۲/۲۹ با تفکیک مکانی ۵۰۰ متر بهره گرفته شد. پس از انجام پردازش داده‌ها، سری زمانی آلودگی ایران در مقیاس سالانه، فصلی، ماهانه و روزانه محاسبه شد. نتایج سری زمانی سالانه نشان داد که بیشینه و کمینه آلودگی ایران با مقدار ۱۴ و ۱۱ درصد به ترتیب طی سال‌های ۱۳۸۶ و ۱۳۸۸ رخ داده است. نتایج سری زمانی فصلی نشان داد که زمستان ۱۳۸۶ بیشترین آلودگی ایران رخ داده و به بیش از ۲۲ درصد رسیده است. کمینه آلودگی نیز نه در تابستان بلکه در پاییز ۱۳۸۴ حدود ۱۰ درصد بوده است. نتایج سری زمانی ماهانه نشان داد که به دلیل پوشش برفی ایران طی ماه‌های دی و بهمن، بیشینه آلودگی ایران نیز در دی و بهمن ماه است. نتایج نشان داد که بیشینه آلودگی ایران در بهمن ۱۳۸۶ به مقدار ۲۸ درصد در کل گستره کشور رسیده است. یافته‌های این پژوهش هماهنگ با پژوهش پیشینیان از جمله (۲۰۱۷) Faridmojtahedi et al. and (۲۰۱۶) Keikhosravi Kiani می‌باشد. نتایج این پژوهش‌ها حاکی از آن است که در دی و بهمن فصل زمستان سال ۱۳۸۶ گستره وسیعی از کشور را پوشش برفی در بر گرفته است. به همین سبب در سری زمانی دو دهه اخیر دی و بهمن ۱۳۸۶ آلودگی بالایی مشاهده شده است. شاید تصور آن باشد که کمینه آلودگی ایران در فصل تابستان رخ دهد، اما نتایج نشان داد که کمینه آلودگی ایران نه در تیر یا مرداد، بلکه در آذر ۱۳۸۴ رخ داده است. در این ماه آلودگی ایران به کمتر از ۱۰ درصد رسیده است. این بخش از پژوهش در راستای پژوهش (۲۰۲۴) Kefayat Motlagh and Darand است. یافته‌های ایشان نشان داده است

که در ماه‌های سرد سال (فصل زمستان) که ماه‌های برفی ایران شناخته می‌شوند، آلودگی ایران بیشینه شده و در ماه‌های گذار فروکش کرده و سپس در ماه‌های گرم سال (فصل تابستان) به سبب خشکی زمین و افزایش دمای رویه زمین دوباره افزایش می‌یابد. نتایج سری روزانه آلودگی طی دو دهه اخیر حاکی از آن است که آلودگی ایران گذشته از چرخه‌های نامنظم درون سالانه، دارای بی‌نظمی‌های بین سالانه نیز است. بررسی‌ها نشان داد که یکی از ناهنجاری‌های بین سالانه نوار آلودگی ایران در ۱۹ دی ماه سال ۱۳۸۶ رخ داده است. در این روز آلودگی ایران به حدود ۴۰ درصد می‌رسد که طی دو دهه اخیر بی‌سابقه بوده است. به نظر می‌رسد در این روز برف سنگینی در ایران رخ داده باشد که نیازمند پژوهشی جداگانه است.

۵- منابع

Akbarzadeh, M., Mobasheri, M. R., & Fatemi, S. B., ۲۰۱۳, **Evaluation of MODIS ۱۶-Days-Albedo Products Using ASTER Albedo Products for Homogeneous Semi-Arid Surfaces**. Journal of Climate Research, ۱۳۹۲(۱۳), ۸۵-۹۶. https://clima.irimo.ir/article_۱۴۱۵۱.html.

Asadi, M., Baaghdeh, M., & Adab, H., ۲۰۲۰, **Comparison and Estimation of Surface Albedo of Various Levels of Land use by SEBAL and METRIC Methods**. Applied researches in Geographical Sciences, ۲۰(۵۹), ۱۵۷-۱۷۱. <https://doi.org/۱۰.۲۹۲۵۲/jgs.۲۰.۵۹.۱۵۷>.

Benas, N., & Chrysoulakis, N., ۲۰۱۴, **Estimation of land surface albedo time series and trends based on MODIS data**. In Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XVI (Vol. ۹۲۳۹, pp. ۲۴۰-۲۴۷). SPIE. <https://doi.org/۱۰.۱۱۱۷/۱۲.۲۰.۶۶۴۷۳>.

Benas, N., & Chrysoulakis, N., ۲۰۱۵, **Estimation of the land surface albedo changes in the broader Mediterranean area, based on ۱۲ years of satellite observations**. Remote Sensing, ۷(۱۲), ۱۶۱۵۰-۱۶۱۶۳. <https://doi.org/۱۰.۳۳۹۰/rs۷۱۲۱۵۸۱۶>.

Chrysoulakis, N., Mitraka, Z., & Gorelick, N., ۲۰۱۹, **Exploiting satellite observations for global surface albedo trends monitoring**. Theoretical and Applied Climatology, ۱۳۷(۱), ۱۱۷۱-۱۱۷۹. <https://doi.org/۱۰.۱۰۰۷/s۰۰۷۰۴-۰۱۸-۰۲۶۶۳-۶>.

Faridmojtahedi, N., Ghaffarian, P., & Negah, S. (۲۰۱۷). **Analyzing the Spatial Distribution of Heavy Snow Fall Depth in Gilan Plain (February ۲۰۰۵, January ۲۰۰۸, and February ۲۰۱۴) Using WRF Model**. Journal of Geography and Environmental Hazards, 6(۱), ۱۰۹-۱۲۶. <https://doi.org/۱۰.۲۲۰۶۷/geo.v۶i۱.۵۱۶۷۲>.

Feng, S., Cook, J. M., Anesio, A. M., Benning, L. G., & Tranter, M., ۲۰۲۳, **Long time series (۱۹۸۴-۲۰۲۰) of albedo variations on the Greenland ice sheet from harmonized Landsat and Sentinel ۲ imagery**. Journal of Glaciology, ۶۹(۲۷۷), ۱۲۲۵-۱۲۴۰. <https://doi.org/۱۰.۱۰۱۷/jog.۲۰۲۳.۱۱>.

Firozi, F., Tavosi, T., Mahmoudi, P., & Amir Jahanshahi, S. M., ۲۰۱۸, **Analyzing Temporal and Spatial Variations of Surface Albedo over Sistan Plain in Eastern Iran using Satellite Remote Sensing Product of MODIS Sensor of Terra Satellite**. Iranian Journal of Remote Sensing & GIS, ۱۰(۴), ۶۹-۸۴. https://gisj.sbu.ac.ir/article_۹۶۶۵۲.html?lang=fa.

Ghobadi, A., ۲۰۱۶, **Explanation and spatial-temporal analysis of the heat island phenomenon of Karaj city with emphasis on albedo management and local micro-climate modeling**. PhD thesis in the field of climatology, University of Sistan and Baluchestan.

Govaerts, Y., & Lattanzio, A., ۲۰۰۸, **Estimation of surface albedo increase during the eighties Sahel drought from Meteosat observations**. Global and planetary change, ۶۴(۳-۴), ۱۳۹-۱۴۵. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2008.04.004>.

Hejazizadeh, Z., Rahimi, A., Toulabi Nejad, M., & Bosak, A., ۲۰۱۷, **Modeling of spatio-temporal of albedo over Iran**. Journal of Applied researches in Geographical Sciences, ۱۷(۴۷), ۱-۱۷. <https://doi.org/20.1001.1.22287736.1396.17.47.1.8>.

<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/data/search.html>.

Hu, Y., Hou, M., Zhao, C., Zhen, X., Yao, L., & Xu, Y., ۲۰۱۹, **Human-induced changes of surface albedo in Northern China from ۱۹۹۲-۲۰۱۲**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, ۷۹, ۱۸۴-۱۹۱. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.03.018>.

Hummel, J. R., & Reck, R. A., ۱۹۷۹, **A global surface albedo model**. Journal of Applied Meteorology, ۱۸(۳), ۲۳۹-۲۵۳. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1979\)18\[239:AGSAM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1979)18[239:AGSAM]2.0.CO;2).

Karbalaei, A. R., ۲۰۱۹, **Temporal-spatial behavior of Iran's Albedo**. PhD thesis in the field of climatology, University of Kharazmi.

Kefayat Motlagh, O. R., & Darand, M., ۲۰۲۴, **Climatology of Iran's Albedo using MODIS Data**. Journal of the Earth and Space Physics, ۵۰(۲), ۳۷۳-۳۸۶. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2024.356816.1007512>.

Kefayat Motlagh, O. R., Khosravi, M., & Masoodian, S. A., ۲۰۲۲, **Analysis of the relationship albedo with Elevation, slope, and Aspect in Iran**. Iranian Journal of Geophysics, ۱۶(۲), ۲۴۱-۲۵۱. <https://doi.org/10.30499/ijg.2022.327388.1393>.

Keikhosravi Kiani, M. S., ۲۰۱۶, **Climatology of snow cover in Iran using remote sensing data**. PhD thesis in the field of climatology, University of Isfahan.

Li, Z., Ao, Y., Lyu, S., Lang, J., Wen, L., Stepanenko, V., ... & Zhao, L., ۲۰۱۸, **Investigation of the ice surface albedo in the Tibetan Plateau lakes based on the field observation and MODIS products**. Journal of Glaciology, ۶۴(۲۴۵), ۵۰۶-۵۱۶. <https://doi.org/10.1017/jog.2018.35>.

Lotfi, H., ۲۰۱۱, **Estimation of net solar radiation using MODIS sensor data**. Master's thesis in the field of Agricultural Meteorology, Shiraz of University.

Meng, X., Lyu, S., Zhang, T., Zhao, L., Li, Z., Han, B., ... & Luo, S., ۲۰۱۸, **Simulated cold bias being improved by using MODIS time-varying albedo in the Tibetan Plateau in WRF model**. Environmental Research Letters, ۱۳(۴), ۰۴۴۰۲۸. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab4fa>.

Motlagh, O. R. K., & Darand, M., ۲۰۲۴, **Identification of the Driving Factors Impacts of Land Surface Albedo over Iran: An Analysis with the MODIS Data**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, ۱۰۶۳۷۸. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2024.106378>.

Nicodemus, F. E., Richmond, J. C., Hsia, J. J., Ginsberg, I. W., & Limperis, T., ۱۹۷۷, **Geometrical considerations and nomenclature for reflectance**, Natl. Bur. Stand. Rep., NBS MN-۱۶۰, ۱(۲). <https://graphics.stanford.edu/courses/cs۴۴۸-۰۵-winter/papers/nicodemus-brdf-nist.pdf>

Solomon, S., ۲۰۰۷, IPCC (۲۰۰۷): **Climate change the physical science basis**. In Agu fall meeting abstracts (Vol. ۲۰۰۷, pp. U۴۳D-۰۱). https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/۲۰۲۰/۰۲/ar۴-wg۱-sum_vol_en.pdf

Soltani Akmal, F., ۲۰۱۸, **Climatology of Albedo in Iran Using CDR Data**. Master's Thesis in the field of climatology, University of Isfahan.

Spångmyr, M. (۲۰۱۰). **Global effects of albedo change due to urbanization**. *Lunds universitets Naturgeografiska institution-Seminarieuppsatser*. <https://lup.lub.lu.se/luur/download?func=downloadFile&recordId=۱۸۵۶۹۰۴&fileId=۱۸۵۶۹۳۵>.

Strahler, A. H., Muller, J. P., Lucht, W., Schaaf, C., Tsang, T., Gao, F., ... & Barnsley, M. J., ۱۹۹۹, **MODIS BRDF/albedo product: algorithm theoretical basis document version ۵.۰. MODIS documentation**, ۲۳(۴), ۴۲-۴۷. https://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod۰۹.pdf