

## تعیین الگوریتم بهینه برای پهنه‌بندی یخبندان‌های بهاره و پاییزه در استان کردستان با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR

فیروز مجرد\* - دانشیار گروه جغرافیا، دانشگاه رازی کرمانشاه  
محمد رامیار یوسف‌نژاد- کارشناسی ارشد اقلیم‌شناسی، گروه جغرافیا، دانشگاه رازی کرمانشاه  
امان‌الله فتح‌نیا- استادیار گروه جغرافیا، دانشگاه رازی کرمانشاه

پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۱۰/۲۷ تأیید نهایی: ۱۳۹۴/۰۴/۰۲

### چکیده

یخبندان پدیده‌ی زیان‌بار اقلیمی است که فعالیت‌های مختلف انسانی و فرایندهای زیستی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. تصاویر ماهواره‌ای به دلیل پیوستگی و تکرارپذیری داده‌های آن، روش مناسبی برای بررسی یخبندان است. در این پژوهش با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR به تعیین الگوریتم بهینه برای شناسایی و استخراج پهنه‌های یخبندان بهاره و پاییزه در استان کردستان در سال‌های ۲۰۰۱ تا ۲۰۱۰ پرداخته شده است. پس از تعیین روزهای یخبندان در هفت ایستگاه هواشناسی منطقه، ۲۴ تصویر گذر شبانه برای بررسی دما و صد تصویر گذر روزانه برای محاسبه شاخص NDVI و قابلیت انتشار انتخاب و ارزیابی شد. برای محاسبه دمای سطح زمین، باندهای حرارتی چهارم و پنجم تصاویر گذر شبانه در سه الگوریتم پرایس، کول و اولیویری به کار گرفته شد. براساس نتایج، الگوریتم کول در برآورد دمای سطح زمین به دلیل خطای کمتر و نیز همبستگی‌های قوی و معنی‌دار در مقایسه با دماهای مشاهداتی، عملکرد بهتری نسبت به دیگر الگوریتم‌ها داشت. بنابراین، این الگوریتم در تهیه نقشه‌های نهایی پهنه‌بندی یخبندان استان کردستان استفاده شد. نگاه کلی به نقشه‌ها، تأثیر مهم ارتفاعات را بر وقوع یخبندان‌های شبانه در منطقه -هم از نظر شدت و هم از نظر گسترش- به خوبی نشان می‌دهد.

کلیدواژه‌ها: استان کردستان، پهنه‌بندی، تصاویر ماهواره‌ای NOAA، یخبندان‌های بهاره و پاییزه.

### مقدمه

سرما و یخبندان یکی از پدیده‌های آب‌وهوایی است که در دوره سرد سال در بیشتر مناطق کشور اتفاق می‌افتد. یخبندان با کاهش دما و نزول آن به آستانه بحرانی مشخص آغاز می‌شود و با تأثیراتی که بر سطح زمین می‌گذارد، زندگی انسان‌ها و همچنین فعالیت‌های عمرانی و رشد بازرگانی محصولات زراعی را تحت تأثیر قرار می‌دهد (علیچانی و همکاران، ۱۳۸۹: ۲). به‌طور کلی، یخبندان به شرایطی اطلاق می‌شود که دمای هوا در ارتفاع ۱/۵ متری از سطح زمین، به صفر درجه سلسیوس یا کمتر نزول کند؛ اما از دیدگاه هواشناسی کشاورزی، یخبندان به وقوع دماهای کم، درحد ایجاد خسارت در بافت‌های گیاهی اطلاق می‌شود که این نوع یخبندان باتوجه به دمای بحرانی برای هر نوع محصول متفاوت

\* E- mail: f\_mojarrad@yahoo.com

است (محمدی و گزل خو، ۱۳۸۹: ۹۴). یخبندان به‌لحاظ نوع، شدت و مدت وقوع، خسارت‌های مختلفی را برجا می‌گذارد؛ اما می‌توان گفت بخش کشاورزی بیشترین تأثیر را از نتایج و تبعات منفی آن می‌پذیرد. تکرار، شدت و تداوم زمانی وقوع این پدیده در استان کردستان، به‌لحاظ ماهیت کوهستانی و تنوع توده‌های اثرگذار، چشمگیر است. بنابراین، مقابله با یخبندان باید یکی از برنامه‌های جدی مسئولان در این استان، به‌خصوص در بخش کشاورزی تبدیل شود.

اغلب، یخبندان را با استفاده از داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی بررسی می‌کنند؛ داده‌هایی که نشانه شرایط اطراف ایستگاه است و به‌دلیل تأثیر دما از شرایط سطح زمین (پستی و بلندی، جهت شیب، نوع پوشش و ...) قابلیت تعمیم به نقاط دورتر را ندارد. باتوجه‌به پیوستگی، داده‌های ماهواره‌ای شرایط بهتری را برای بررسی پدیده‌های اقلیمی از جمله یخبندان فراهم می‌آورد.

پژوهش‌هایی با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور درباره یخبندان انجام گرفته است که در این‌جا، برخی از آنها بررسی می‌شود. کالما و همکاران (۱۹۸۳: ۱) با استفاده از تصاویر HCMM<sup>۱</sup> دمای سطحی را بر پایه باند مادون قرمز حرارتی شبانه در طول موج ۱۰/۲۵ تا ۱۲ میکرومتر محاسبه کردند و پهنه‌های خطر یخبندان را برای چهار شب به‌نسبت‌صاف، در سال‌های ۱۹۷۸ و ۱۹۷۹ به‌دست آوردند. آنها بیان داشتند که بین مقادیر محاسبه‌شده و مشاهداتی رابطه‌ای پذیرفتنی وجود دارد. دالزیوس و لاوردیادو (۱۹۹۵: ۱۲۳) دمای محدوده سه ایستگاه هواشناسی را در کشور یونان با استفاده از تصاویر حرارتی متئوست با تکرار زمانی نیم‌ساعته و تفکیک مکانی ۵ کیلومتری برای شب ۳۰ مارس ۱۹۹۴ بررسی کردند. آنان باتوجه‌به وقوع دمای کمینه بین ۱- و ۲- درجه سلسیوس، شدت یخبندان را از نوع ملایم و بیشترین شدت و گسترش مکانی آن را در ساعت چهار صبح مشاهده کردند. در مطالعه دیگری، کردیس و همکاران (۱۹۹۶: ۱۵۷) دمای سطح زمین مناطق متأثر از یخبندان را در جنوب و غرب ناحیه پامپین<sup>۲</sup> کشور آرژانتین طی روزهای ۴، ۵ و ۲۳ نوامبر ۱۹۹۲- که در این روزها خسارت‌های جدی به محصولات کشاورزی، به‌خصوص گندم وارد شد- با استفاده از تصاویر حرارتی NOAA<sup>۳</sup>-AVHRR<sup>۴</sup> محاسبه کردند. آنها با استفاده از دوازده الگوریتم به روش پنجره مجزا<sup>۵</sup>، دماها را استخراج و با دماهای کمینه ثبت‌شده در سی ایستگاه هواشناسی سینوپتیک و ده ایستگاه کلیماتولوژی مقایسه کردند. نتایج بررسی آنها به‌ترتیب روز وقوع، حاکی از ضرایب همبستگی ۰/۸۱، ۰/۴۴ و ۰/۹ و مقادیر انحراف‌معیار ۱/۴، ۱/۹ و ۱/۷ درجه سلسیوس بود. فرانسوا و همکاران (۱۹۹۹: ۱۱۳) رابطه بین دماهای کمینه مشاهده‌شده در هفده ایستگاه هواشناسی و برآوردشده از راه بیست‌وپنج تصویر حرارتی NOAA-AVHRR را به‌منظور تهیه نقشه‌های خطر یخبندان در منطقه آلتی‌پلانو<sup>۶</sup> بولیوی بررسی کردند. آنها نقشه‌های دمای کمینه، دمای میانگین کمینه و سه نقشه درصد خطر یخبندان را برای سه گونه سیب‌زمینی تهیه کردند. دقت حاصل از نقشه دمای میانگین کمینه، ۰/۸ درجه سلسیوس و نقشه خطر یخبندان ۰/۰۹ درجه سلسیوس بود.

1. Heat Capacity Mapping Mission Satellite
2. Pampean
3. National Oceanic and Atmospheric Administration
4. Advanced Very High Resolution Radiometer
5. Split Window
6. Altiplano

تایت و ژنگ (۲۰۰۳: ۱۹۳) در منطقه اتاگو<sup>۱</sup> نیوزلند، نقشه‌های شش متغیر یخبندان، شامل اولین و آخرین روز یخبندان، طول دوره بدون یخبندان و تعداد روزهای یخبندان در ماه‌های سپتامبر، اکتبر و نوامبر را با استفاده از بیست تصویر سنجنده AVHRR تهیه کردند. آنها برای این کار از متغیرهای جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع و فاصله از دریا) و داده‌های ماهواره‌ای (داده‌های باندهای ۳، ۴ و ۵ به همراه قابلیت انتشار سطح با شاخص NDVI) بر مبنای الگوی خطی تعمیم‌یافته‌ای استفاده کردند. در نهایت، با روش درون‌یابی خطی و براساس افت آهنگ محلی وقوع یخبندان نسبت به ارتفاع، نقشه‌های با قدرت تفکیک یک کیلومتر را به نقشه‌های با قدرت تفکیک ۵۰ متری تبدیل کردند. ون‌بین و همکاران (۲۰۱۳: ۶۲) با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس، دمای کمینه و بیشینه حوضه رودخانه خیانگرید<sup>۲</sup> را در شمال فلات تبت تخمین زدند. نتایج کار آنان نشان داد که سنجنده مودیس، دمای کمینه را با مجذور میانگین مربعات خطای ۲/۹۷ درجه سلسیوس، قدرمطلق خطای ۲/۳۷ درجه سلسیوس و  $r=0/94$  برآورد می‌کند. با توجه به پژوهش‌های انجام‌گرفته و کمبود پژوهش‌های مرتبط با یخبندان و برآورد دمای سطح زمین با تصاویر ماهواره‌ای در داخل کشور، هدف این پژوهش، تعیین الگوریتم بهینه برای بررسی و استخراج پهنه‌های یخبندان سطح زمین در استان کردستان در دو فصل بهار و پاییز با استفاده از تصاویر شبانه سنجنده AVHRR<sup>۳</sup> است.

## مواد و روش‌ها

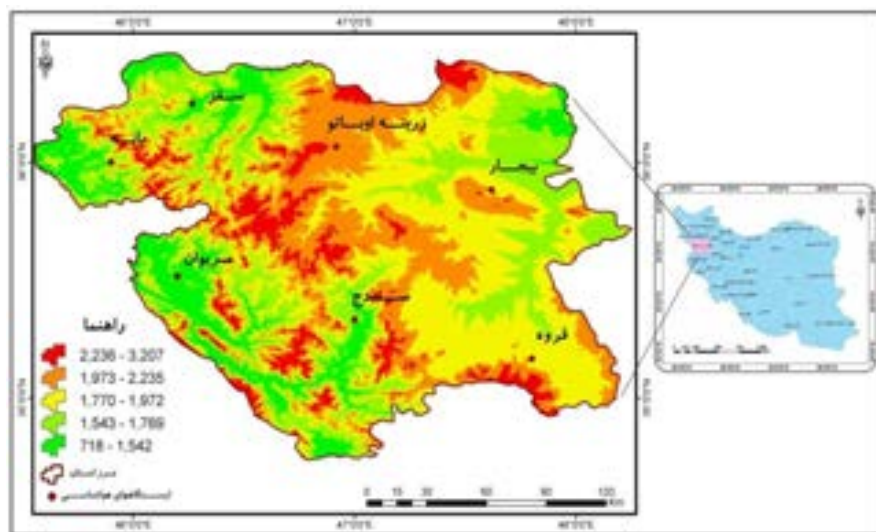
### منطقه پژوهش

منطقه پژوهش، استان کردستان در غرب ایران است (شکل ۱). برای این پژوهش، از داده‌های دمای روزانه هفت ایستگاه سینوپتیک منطقه استفاده شده است که خصوصیات آنها در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

جدول ۱. مشخصات ایستگاه‌های هواشناسی استفاده‌شده

نام ایستگاه	ارتفاع (متر)	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	نوع ایستگاه
سنندج	۱۳۷۳/۲	۴۷° ۰۰'	۳۵° ۲۰'	سینوپتیک اصلی
سقز	۱۵۲۳	۴۶° ۱۶'	۳۶° ۱۵'	سینوپتیک اصلی
مریوان	۱۲۸۷	۴۶° ۱۲'	۳۵° ۳۱'	سینوپتیک اصلی
بیجار	۱۸۸۳	۴۷° ۳۷'	۳۵° ۵۳'	سینوپتیک اصلی
زرینه اوباتو	۲۱۴۲	۴۶° ۵۵'	۳۶° ۰۴'	سینوپتیک اصلی
قره	۱۹۰۶	۴۷° ۴۸'	۳۵° ۱۰'	سینوپتیک اصلی
بانه	۱۶۰۰	۴۵° ۵۴'	۳۶° ۰۰'	سینوپتیک تکمیلی

- Otago
- Xiangride
- Advanced Very High Resolution Radiometer



شکل ۱. نقشه موقعیت و وضعیت ارتفاعی استان کردستان و ایستگاه‌های منتخب (ترسیم نقشه: نویسندگان)

### تعیین روزهای یخبندان

به منظور تعیین روزهای یخبندان برای انتخاب تصاویر ماهواره‌ای، از آمار روزانه S-c data ایستگاه‌های استان کردستان در یک دوره ده ساله (۲۰۰۱-۲۰۱۰) استفاده شد. براساس نتایج پژوهش پایه روزنبرگ و مایرز (۱۹۶۲: ۴۷۱) در زمینه یخبندان‌های تابشی و وزشی در ایالت نبراسکای ایالات متحده آمریکا، در فصل پاییز، بین یک تا سه یخبندان تابشی پیش از نخستین یخبندان وزشی پاییزه و در فصل بهار بین دو تا پنج یخبندان تابشی پس از آخرین یخبندان وزشی بهاره رخ می‌دهد؛ به عبارت دیگر، نخستین یخبندان‌ها در پاییز و آخرین یخبندان‌ها در بهار، از نوع تابشی است. از آنجاکه این یخبندان‌های تابشی با آسمانی صاف همراه است، دمای آنها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای، راحت‌تر برآورد می‌شود؛ ضمن آنکه به لحاظ کاربردی، برآورد یخبندان در اوایل پاییز و اواخر بهار، به دلیل هم‌زمان شدن با فعالیت‌های کشاورزی، مهم‌تر از دیگر مواقع سرد سال است. چنانچه یخبندان از نوع وزشی باشد، به طور معمول این رخداد از اوایل تا اواخر زمستان اتفاق می‌افتد که برآورد دما در این مواقع به دلیل حضور سامانه‌های ابری، اغلب با مشکلات زیادی روبه‌روست. به لحاظ کاربردی نیز برآورد دماهای یخبندان در فصل زمستان اهمیت کمتری دارد.

باتوجه به مطالب ذکر شده، در این پژوهش برای هر سال در هر ایستگاه، نخستین روز فصل پاییز و آخرین روز فصل بهار که دارای شرایط زیر بود، انتخاب شد: ۱. دمای کمینه در آن روز به صفر یا زیر صفر درجه سلسیوس رسید؛ ۲. روز مورد نظر فاقد ابرناکی بود. در نهایت، برای تمام ایستگاه‌ها، دو روز یخبندان در هر سال (نخستین روز با شرایط یادشده در پاییز و آخرین روز با شرایط یادشده در بهار) و در مجموع بیست روز در دوره آماری انتخاب شد.

### تصاویر ماهواره‌ای

دریافت تصاویر منوط به گذر ماهواره و برداشت تصویر از منطقه پژوهش بود که این نکته سبب شد تصاویر بعضی از روزهای انتخاب شده، موجود نباشد یا در بعضی از فصول بیش از یک تصویر وجود داشته باشد. در نهایت، تعداد

بیست‌و‌چهار تصویر گذر شبانه ماهواره انتخاب شد. سنجنده AVHRR دارای باندهای مرئی و حرارتی است و برای برآورد دمای سطح زمین، از تصاویر گذر شبانه و باندهای حرارتی چهارم و پنجم استفاده شد. دریافت کل تصاویر از تارنمای ماهواره NOAA<sup>۱</sup> انجام گرفت. در مرحله بعد، تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از پوشه GCP هر تصویر، در نرم‌افزار ENVI انجام گرفت. این پوشه که حاوی نقاط کنترل زمینی برداشت‌شده به‌وسیله ماهواره است، براساس اعلام تارنمای ماهواره، دارای خطای کمتر از ۰/۱ پیکسل (۱۰۰ متر) است. گفتنی است تصحیح رادیومتریک به روش Histogram Equalization اعمال شد.

### رادیانس باندهای حرارتی

برای محاسبه دمای روشنایی و دمای سطح، ابتدا باید مقادیر رقومی باندهای حرارتی تبدیل به رادیانس شوند. برای این کار باید دو نوع تابع بر روی تصاویر اعمال شود: ۱. تابع خطی؛ ۲. تابع غیرخطی. ابتدا تابع خطی زیر (رابطه ۱) که برای تمام ماهواره‌های NOAA کاربرد دارد، بر روی تصاویر اعمال شد:

$$L_E \text{ or } L_{LIN} = S.C + I \quad (1)$$

که در آن  $L_E$  رادیانس نهایی برای ماهواره‌های NOAA 7-12،  $L_{LIN}$  رادیانس خطی برای ماهواره‌های NOAA 13-19 برحسب  $W/m^2/sr/cm$  مقدار هر پیکسل (دامنه‌ای از ۰ تا ۱۰۲۳)،  $S$  و  $I$  به ترتیب شیب<sup>۲</sup> و ضریب زاویه<sup>۳</sup> است که برای هر تصویر از HDR به‌دست می‌آید. این تابع بر روی باندهای چهارم و پنجم هر تصویر اعمال شد. تصحیح‌های غیرخطی تصاویر با رابطه ۲ و ۳ انجام گرفت. برای ماهواره NOAA 13-14 رابطه ۲ اعمال شد:

$$L_E = D + A \times L_{LIN} + B \times L_{LIN}^2 \quad (2)$$

که در آن  $D$ ،  $A$  و  $B$  ضرایب ثابت‌اند. این ضرایب برای ماهواره‌های یادشده متفاوت بوده، از راهنمای POD استخراج می‌شود. برای ماهواره‌های NOAA 15-19 رابطه ۳ به‌کار برده شد:

$$L_E = b_0 + (1 + b_1) \times L_{LIN} + b_2 \times L_{LIN}^2 \quad (3)$$

که در آن  $b_0$ ،  $b_1$  و  $b_2$  ضرایب تصحیح غیرخطی‌اند و همانند رابطه ۲ برای ماهواره‌های یادشده متفاوت بوده، از راهنمای KLM استخراج می‌شود.

### دمای روشنایی

دمای به‌دست‌آمده از زمین در ارتفاع ماهواره، دمای روشنایی<sup>۴</sup> نامیده می‌شود (کین و کارنلی، ۱۹۹۹: ۲۳۶۹). سنجنده‌های حرارتی، بازتابی را اندازه‌گیری می‌کنند که قابلیت تبدیل به دمای روشنایی را داشته باشد (کر و همکاران،

1. <http://www.class.ngdc.noaa.gov/>

2. Slope

3. Intercept

4. Brightness temperature

۱۹۹۲: ۱۹۷). برای محاسبه دمای روشنایی، ابتدا رادیانس محاسبه و در معادله معکوس پلانک بر روی تصاویر اعمال شد (علوی پناه، ۱۳۸۷: ۳۹۹؛ کیر و همکاران، ۱۹۹۲: ۱۹۸).

برای تصاویر ماهواره NOAA 14 رابطه ۴ اعمال شد:

$$T_E = \frac{C_v \cdot v}{\ln\left(1 + \frac{C_1 \cdot v^r}{L_E}\right)} \quad (4)$$

و برای ماهواره‌های NOAA 15-19 رابطه‌های ۵ و ۶ اعمال شد:

$$T'_E = \frac{C_v \cdot v}{\ln\left(1 + \frac{C_1 \cdot v^r}{L_E}\right)} \quad (5)$$

در نتیجه

$$T_E = \frac{T'_E - A}{B} \quad (6)$$

که در آنها  $T_E$  دما به درجه کلونین،  $L_E$  مقدار رادیانس برحسب  $W / m^2 / sr / cm$ ، و  $v$  طول موج مرکزی باند مورد نظر برحسب  $cm^{-1}$  است. برای هر ماهواره،  $A$  و  $B$  ضرایبی متفاوت‌اند.  $C_1$  و  $C_2$  نیز ضرایب ثابت‌اند که این‌گونه محاسبه می‌شوند:

$$C_1 = 1/1910659 \times 10^{-5} mW (m^2 / sr / cm^{-2}) \quad (7)$$

$$C_2 = 1/438833 cm.K \quad (8)$$

### قابلیت انتشار سطح زمین

در تعریف جسم سیاه فرض می‌شود که این جسم تمام انرژی دریافتی را گسیل می‌کند. در طبیعت، جسم سیاه حقیقی یافت نمی‌شود؛ بلکه بیشتر اجسام فقط بخشی از انرژی دریافتی را گسیل می‌کنند. نسبتی از انرژی دریافتی که گسیل می‌شود، قابلیت انتشار ( $\epsilon$ ) جسم نامیده می‌شود (کوران، ۱۳۷۴: ۴۰). درحقیقت، قابلیت انتشار سطح، اندازه‌ای از قابلیت ذاتی سطح در تبدیل انرژی گرمایی به انرژی تابشی است (سوبرینو و همکاران، ۲۰۰۱: ۲۵۷). خطای تقریبی ۱ درصد در قابلیت انتشار ممکن است خطایی در حدود ۰/۶ تا ۲ درجه کلونین در برآورد دمای سطح زمین ایجاد کند (واز کوئز و همکاران، ۱۹۹۷: ۳۲۱). روش‌های مختلفی برای محاسبه قابلیت انتشار وجود دارد (لی و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۴). برای محاسبه قابلیت انتشار ( $\epsilon$ ) استفاده از لایه کاربری اراضی ضروری است. در این پژوهش، از مقادیر NDVI استفاده شد. به این ترتیب که برای هر سال، ده تصویر روزانه (پنج تصویر برای فصل بهار و پنج تصویر برای فصل پاییز) و در مجموع برای دوره آماری، صد تصویر دریافت و شاخص NDVI برای هر کدام محاسبه شد. سپس برای حذف اثر ابرناکی، ترکیب مقادیر بیشینه (MVC) از مقادیر هر ماه استخراج شد.

1. Emissivity

2. Maximum Value Composite

قابلیت انتشار با استفاده از الگوریتم‌هایی بر پایه روابط بین قابلیت انتشار و مقادیر NDVI در پایه لگاریتم نپر تخمین‌زدنی است که در این پژوهش از رابطه‌های وان‌دگریند و اوه (۱۹۹۳: ۱۱۱۹) یعنی رابطه‌های ۹ تا ۱۲ استفاده شد:

$$\varepsilon_f = 0.9897 + 0.029 \times \ln(NDVI) \quad (9)$$

$$\Delta\varepsilon = 0.1019 + 0.1344 \times \ln(NDVI) \quad (10)$$

$$\varepsilon_d = \varepsilon_f - \Delta\varepsilon \quad (11)$$

$$\varepsilon = \frac{(\varepsilon_f + \varepsilon_d)}{2} \quad (12)$$

که در آنها  $\varepsilon_f$  و  $\varepsilon_d$  به ترتیب قابلیت انتشار در باندهای چهارم و پنجم سنجنده AVHRR،  $\Delta\varepsilon$  تفاضل قابلیت انتشار باندهای چهارم و پنجم و  $\varepsilon$  میانگین قابلیت انتشار است.

### دمای سطح زمین

پس از محاسبه قابلیت انتشار سطح زمین، معادله دمای سطح زمین با توجه به قابلیت انتشار بر روی تصاویر اعمال شد. روش‌های مختلفی برای محاسبه دمای سطح زمین پیشنهاد شده است که در سه گروه طبقه‌بندی می‌شوند: ۱. روش یک‌باندی؛ ۲. روش چندباندی یا پنجره مجزا؛ ۳. روش چندزاویه‌ای (بکر و لی، ۱۹۹۰: ۳۶۹؛ اوتل و استول، ۱۹۹۳: ۲۰۲۵). در این پژوهش، از روش پنجره مجزا استفاده شد که مک‌میلین (۱۹۷۱) برای نخستین بار آن را مطرح کرد. این روش ابتدا برای محاسبه دمای سطح دریا استفاده شد (کِر و همکاران، ۱۹۹۲: ۲۰۰). روش پنجره مجزا بر پایه رفتار متفاوت جذب اتمسفری دو باند در محدوده ۱۲/۵-۱۰ میکرومتر عمل می‌کند (اولیویری و همکاران، ۱۹۹۴: ۶۰). اثر کاهندگی جو در باند ۱۲ میکرومتر (باند پنجم سنجنده AVHRR) بیشتر از باند ۱۱ میکرومتر (باند چهارم سنجنده AVHRR) است و با افزایش اثر کاهندگی اتمسفر (بیشتر به علت افزایش بخار آب)، تفاوت تابش ثبت‌شده در دو باند افزایش می‌یابد. از این رو، در الگوریتم پنجره مجزا از همین مغایرت برای تعیین تأثیر اتمسفر بر تابش ساطع‌شده از سطح زمین و در نتیجه، برآورد دمای سطح استفاده می‌شود (رحیمی خوب و همکاران، ۱۳۸۴: ۸۵). موفقیت روش پنجره مجزا در تخمین دمای سطح دریا سبب تلاش‌های زیادی از اواخر دهه ۱۹۸۰ برای توسعه این روش به منظور محاسبه دمای سطح زمین شد (لی و همکاران، ۲۰۱۳: ۱۹). در این پژوهش از سه الگوریتم برای محاسبه دمای شبانه استفاده شد تا با مقایسه دقت هر کدام در برآورد، روش بهینه برای محاسبه دمای یخبندان شبانه سطح زمین در منطقه پژوهش به دست آید. این سه الگوریتم عبارت‌اند از:

الف) الگوریتم پرایس (۱۹۸۴: ۷۲۳۶)، رابطه ۱۳:

$$TS = [T_f + 3/33(T_f - T_d)] \times \left[ \frac{5/5 - \varepsilon_f}{4/5} \right] + 0.75T_d \Delta\varepsilon \quad (13)$$

ب) الگوریتم کول و همکاران (۱۹۹۴: ۱۱۳)، رابطه ۱۴:

$$TS = T_f + \left[ 1 + 0.58(T_f - T_d) \right] \times (T_f - T_d) + 40(1 - \varepsilon) - 75\Delta\varepsilon \quad (14)$$

ج) الگوریتم اولیویری و همکاران (۱۹۹۴: ۶۲)، رابطه ۱۵:

$$TS = T_f + 1/8(T_f - T_d) + 48(1 - \varepsilon) - 75\Delta\varepsilon \quad (15)$$

که در آنها TS دمای سطح زمین،  $T_4$  و  $T_5$  به ترتیب دمای روشنایی باندهای چهارم و پنجم سنجنده AVHRR،  $\varepsilon$  میانگین قابلیت انتشار،  $\varepsilon_4$  قابلیت انتشار در باند چهارم و  $\Delta\varepsilon$  تفاضل قابلیت انتشار در باندهای چهارم و پنجم است. همه رابطه‌های یادشده در نرم‌افزار ERDAS بر روی تصاویر اعمال شدند و در نهایت، مقادیر دمای محاسبه‌شده سطح زمین به منظور جداسازی پهنه‌های یخبندان، به نرم‌افزار ArcGIS وارد شد. سه الگوریتم مذکور برای رعایت اختصار، در ادامه به ترتیب الگوریتم‌های پرایس، کول و اولیویری نامیده می‌شوند.

### مقایسه دمای تصویر ماهواره‌ای با دمای هوای ایستگاه هواشناسی

ساعت گذر شبانه ماهواره برای هر تصویر، متفاوت و از ساعت ۲۲ و ۴۰ دقیقه گرینویچ تا ۳۰ دقیقه گرینویچ متغیر است. به همین منظور، میانگین ساعت «۰۰» گرینویچ به دلیل داشتن نزدیک‌ترین فاصله زمانی تا ساعت‌های گذر شبانه ماهواره، برای همه تصاویر در نظر گرفته شد و به این ترتیب، برای بررسی مقدار دقت، دماهای محاسبه‌شده از تصاویر، با دمای هوای ساعت «۰۰» گرینویچ ایستگاه‌های هواشناسی مقایسه شد. گفتنی است دماهای به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای، مربوط به سطح زمین است؛ در حالی که دماهای ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی در ارتفاع ۲ متری اندازه‌گیری می‌شود. شاخص‌هایی که در این پژوهش استفاده شدند، شامل خطای مطلق میانگین (MAE)<sup>۱</sup>، خطای بایاس میانگین (MBE)<sup>۲</sup> و ریشه دوم میانگین مربع خطا (RMSE)<sup>۳</sup> است (فرج‌زاده و همکاران، ۱۳۹۰: ۱۰۹).

MAE معرف خطاست و هرچه به صفر نزدیک‌تر شود، دقت روش مورد نظر افزایش می‌یابد. مقدار MBE بیان‌کننده میانگین انحراف است که مثبت یا منفی است. از لحاظ نظری هرگاه این دو مقدار برابر صفر شوند، دقت روش صد درصد و مقدار برآوردشده برابر با مقدار واقعی است (فرجی سبکبار و عزیزی، ۱۳۸۵: ۱). RMSE مقدار اختلاف بین مقادیر پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده است. همچنین مقادیر همبستگی بین دماهای هوا در ساعت «۰۰» و دماهای کمیته هوا در ساعت ۰۳ گرینویچ از یک سو، با مقادیر دمای برآوردشده در هر سه الگوریتم از سوی دیگر محاسبه شد.

1. Mean Absolute Error
2. Mean Bias Error
3. Root-Mean-Square Error



## یافته‌های پژوهش

## تعیین الگوریتم بهینه

بر اساس ترتیبی که در بخش مواد و روش‌ها توضیح داده شد، دماهای سطح زمین در استان کردستان با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA با سه الگوریتم پرایس، کول و اولیویری برآورد شد. برای اعتبارسنجی برآوردهای دمایی، همان‌طور که ذکر شد، از برخی شاخص‌های آماری استفاده شد. این شاخص‌ها از یک سو مبتنی بر مقایسه دماهای اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌های هواشناسی و از سوی دیگر، دماهای سطح زمین به دست آمده از تصاویر ماهواره‌ای است. نتایج بررسی مقادیر خطا با این شاخص‌ها در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲. مقایسه شاخص‌های خطا بین دمای هوا در ایستگاه‌های هواشناسی در ساعت «۰۰» و دمای سطح زمین به دست آمده از ماهواره (برحسب درجه سلسیوس)

الگوریتم	شاخص خطا	سنندج	مریوان	سقز	قروه	زرینه اوباتو	بیجار
کول	RMSE	۲/۵	۲/۷	۲/۶	۶/۳	۴/۸	۵/۸
	MAE	۲	۲/۱	۲/۱	۵/۵	۴/۴	۵/۲
	MBE	-۰/۷۵	۱/۸	-۰/۱	۵/۵	۴/۳	۵/۲
اولیویری	RMSE	۵/۳	۶/۴	۴/۵	۱۱/۳	۱۰	۱۴/۶
	MAE	۴/۳	۵	۴/۳	۹/۹	۸/۵	۱۳/۴
	MBE	۳/۶	۵/۲	۳/۲	۹/۹	۸/۸	۱۳/۴
پرایس	RMSE	۱۰/۶	۱۰/۵	۱۱	۱۷/۵	۱۶/۴	۱۷/۷
	MAE	۹/۶	۹	۹/۴	۱۶	۱۴/۶	۱۶/۴
	MBE	۹/۶	۹/۴	۹/۵	۱۶	۱۴/۶	۱۶/۴

مقایسه مقادیر خطای حاصل از این الگوریتم‌ها با یکدیگر نشان می‌دهد که نتایج الگوریتم کول با داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی تطابق بهتری دارد. مقدار خطای مجذور میانگین مربعات (RMSE)، خطای بایاس میانگین (MBE) و خطای مطلق میانگین (MAE) این الگوریتم به ترتیب برای ایستگاه سنندج ۲/۵، ۰/۷۵ و ۲، ایستگاه سقز ۲/۶، ۰/۱ و ۲/۱، ایستگاه مریوان ۲/۷، ۱/۸ و ۲/۱، ایستگاه زرینه ۴/۸، ۴/۳ و ۴/۴، ایستگاه بیجار ۵/۸، ۵/۲ و ۵/۲، ایستگاه قروه ۶/۳، ۵/۵ و ۵/۵ درجه سلسیوس است. ایستگاه بانه به علت فقدان داده‌های شبانه هواشناسی در طول دوره آماری این پژوهش، در این محاسبات آماری لحاظ نشد. برای بیان علل اختلاف بین دماهای ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی با دماهای برآورده شده به وسیله سنجنده در این تحقیق (جدول‌های ۲ و ۴)، چهار دلیل می‌توان بیان کرد:

۱. به طور معمول، زمان گذر ماهواره با زمان ثبت داده‌های هواشناسی در ایستگاه‌ها متفاوت است. این تفاوت گاه به یک تا یک و نیم ساعت می‌رسد. بدیهی است که در این فاصله زمانی، تغییراتی در دمای سطح زمین رخ می‌دهد.

۲. ابعاد بزرگ هر سلول تصویر ماهواره NOAA - که ۱/۱ کیلومتر مربع است - به خصوص در منطقه ذی‌عارضه و از لحاظ توپوگرافی متنوع استان کردستان سبب می‌شود تا دمای واقعی ثبت شده در محل ایستگاه هواشناسی با دمای میانگین برآوردی کل سلول - که دربرگیرنده نقاط مختلف با ارتفاعات مختلف است - متفاوت باشد.
۳. دمای ایستگاه‌های هواشناسی در ارتفاع ۲ متری از سطح زمین ثبت می‌شود؛ درحالی‌که دمای برآورد شده از روی تصاویر ماهواره‌ای، مربوط به سطح زمین است و به‌طور طبیعی بین این دو اختلاف وجود دارد.
۴. اثر اتمسفری سبب افزایش خطا در برآورد دمای سطح زمین از روی تصاویر ماهواره‌ای می‌شود که با تصحیح‌هایی می‌توان آن را به کمترین مقدار رساند؛ اما نمی‌توان آن را به‌طور کامل حذف کرد. شاید به‌همین دو علت اخیر (بندهای ۳ و ۴) باشد که اختلاف دمای برآورد شده و مشاهده شده در ایستگاه‌های مناطق مرتفع مانند بیجار، قروه و زرینه از دیگر ایستگاه‌ها بیشتر است (جدول‌های ۲ و ۴).
- در مجموع، به‌نظر می‌رسد با توجه به محدودیت‌های یاد شده، مقادیر به‌دست‌آمده اختلاف بین دماهای مشاهداتی و برآورد شده، در حد پذیرفتنی باشد؛ همچنان‌که در برخی از پژوهش‌های معتبر پیشین، مانند ون‌بین و همکاران (۲۰۱۳: ۶۲) و جهانبخش و همکاران (۱۳۹۰: ۳۸)، اندازه خطا تقریباً معادل این پژوهش و در حدود ۳ تا ۵/۵ درجه سلسیوس بوده است. حتی پژوهش جهانبخش و همکاران بر روی تصاویر ETM انجام گرفته است که ابعاد پیکسل بسیار کوچک‌تر (۳۰ متر) و به‌طور طبیعی دقت برآورد بیشتری دارد.
- جدول ۳ ضرایب همبستگی بین دماهای حاصل از الگوریتم کول و همچنین دماهای ثبت شده در ایستگاه‌های هواشناسی در دو ساعت ۰۰ و ۰۳ گرینویچ را نشان می‌دهد. براساس ارقام این جدول، در ایستگاه‌های سنندج، مریوان، بیجار و زرینه اوباتو همبستگی‌ها در سطح ۰/۰۱ و در ایستگاه‌های سقز، قروه و بانه در سطح ۰/۰۵ معنادار است. همچنین، جدول ۴ دماهای ایستگاه‌های هواشناسی را در ساعت ۰۰ گرینویچ با دماهای محاسبه شده از روی تصاویر در هر روز به‌وسیله الگوریتم کول مقایسه می‌کند.

جدول ۳. ضرایب همبستگی بین دماهای هوا در ایستگاه‌های هواشناسی و دماهای سطح زمین به‌دست‌آمده از ماهواره با الگوریتم کول

ایستگاه							متغیرها
سنندج	مریوان	قروه	سقز	زرینه اوباتو	بیجار	بانه	
۰/۷۴ **	۰/۷۵ **	۰/۵۳ *	۰/۴۵ *	۰/۶۳ **	۰/۶۰ **	-	
۰/۷۳ **	۰/۷۹ **	۰/۴۹ *	۰/۴۴ *	۰/۶ **	۰/۶۲ **	۰/۵۵ *	

\*\* معنادار در سطح ۰/۰۱، \* معنادار در سطح ۰/۰۵

جدول ۴. مقایسه دماهای سطح زمین به دست آمده از ماهواره با الگوریتم کول (Ts) و دماهای هوا در ایستگاه‌های هواشناسی (Ta) (ارقام برحسب درجه سلسیوس)

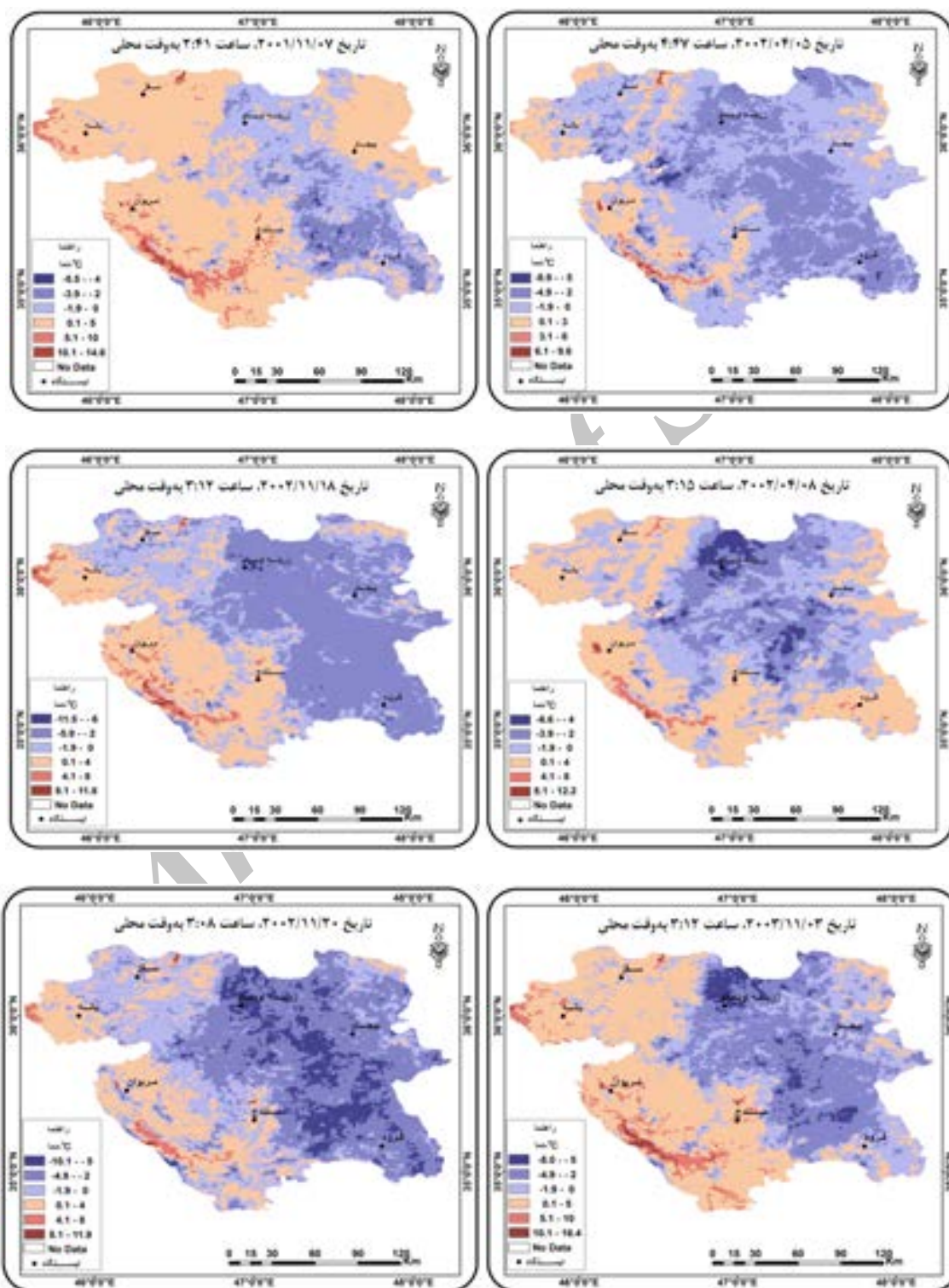
ردیف	تاریخ	سندج		سقز		مریوان		زرینه‌آباتو		قروه		بیجار	
		Ts	Ta	Ts	Ta	Ts	Ta	Ts	Ta	Ts	Ta	Ts	Ta
۱	۲۰۰۱/۱۰/۲۶	۸/۸	۱۰/۶	۴/۳	۰/۶	۵/۶	۷	۰/۷	-۱	۵/۱	*	۵/۶	*
۲	۲۰۰۱/۱۰/۲۷	۹/۱	۱۰/۸	۲/۸	۲	۵/۳	۷/۲	-۲/۵	۱	۴/۶	*	۰/۶	*
۳	۲۰۰۱/۱۱/۰۷	۶/۳	۲/۶	۴/۶	۰/۶	۳/۹	۲/۲	-۱/۱	۲/۲	۰/۷	*	۲/۹	*
۴	۲۰۰۲/۰۴/۰۵	-۰/۷	۱/۸	-۰/۹	۴	۰/۶	۳/۴	-۳	-۰/۴	-۱/۷	۴/۲	۳	-۱/۴
۵	۲۰۰۲/۰۴/۰۸	۱/۱	۲/۸	۱/۱	۳/۲	۱/۸	۴/۲	-۵/۱	۰	۳/۵	۹/۸	۶/۶	-۰/۳
۶	۲۰۰۲/۱۱/۱۸	۳/۱	۱/۲	-۰/۸	-۳	۲/۶	۳/۲	-۴/۹	۱	-۲	-۰/۲	۰/۶	-۲/۴
۷	۲۰۰۲/۱۱/۲۰	۲/۱	-۰/۶	۰/۶	-۳/۵	۰/۴	-۱	-۵/۴	-۲/۴	-۲/۴	۲	۲	-۲/۶
۸	۲۰۰۳/۱۱/۰۳	۵/۱	۳/۲	۱/۱	-۱	-۲/۸	۳	-۵/۱	-۰/۸	۰/۱	۳	۱/۲	-۰/۷
۹	۲۰۰۳/۱۱/۰۴	۴/۶	۰/۸	۱/۷	-۳/۸	۰/۱	۱/۸	-۵/۸	-۳/۲	-۱/۲	۲/۹	۱/۸	-۰/۵
۱۰	۲۰۰۴/۱۱/۲۰	۰	-۰/۲	۰/۴	-۰/۴	۱/۵	۰/۸	-۶	-۳/۴	-۱/۸	۰/۶	۱/۶	-۰/۶
۱۱	۲۰۰۴/۱۱/۲۱	-۰/۹	-۰/۴	-۱	-۱/۶	۰/۱	۱	-۶/۵	-۳	-۲/۴	-۰/۶	۲/۶	-۳
۱۲	۲۰۰۵/۰۳/۲۵	-۵/۵	-۳/۲	-۵/۷	-۳	-۴/۶	۰	-۸/۵	-۵/۶	-۷/۵	-۳/۲	-۳	-۸/۵
۱۳	۲۰۰۵/۰۳/۲۶	-۳/۱	-۱/۲	-۵/۴	-۳/۱	-۵	-۲/۴	-۷/۸	-۴/۶	-۵/۱	-۲/۴	-۰/۶	-۷
۱۴	۲۰۰۵/۱۰/۲۳	۰/۲	۳	-۲/۳	-۲/۶	۱/۱	۲/۸	-۹/۴	-۳/۶	-۵/۵	۱	۰/۶	-۴/۴
۱۵	۲۰۰۵/۱۰/۲۴	۱/۷	۱/۸	-۱/۶	-۳	-۱/۴	-۰/۸	-۸/۳	-۲/۲	-۳/۸	۴/۸	۳	-۱/۷
۱۶	۲۰۰۵/۱۰/۲۵	۱/۷	۰/۸	-۱/۲	-۳	-۳/۴	-۱	-۳/۲	۴/۸	-۲/۸	۶	۳/۲	-۲/۱
۱۷	۲۰۰۶/۰۳/۳۱	-۱/۵	۴/۸	-۱/۸	۲/۴	-۴/۳	۳/۶	-۵/۳	-۰/۸	-۹/۱	۳/۴	۵	-۱/۳
۱۸	۲۰۰۶/۱۱/۱۲	۱	۲	-۲/۶	۰/۲	-۱/۴	۱/۲	-۹/۲	-۱	-۳/۶	۳/۶	۳/۶	-۳/۴
۱۹	۲۰۰۶/۱۱/۱۳	۱/۴	۲/۶	-۱/۳	۰/۲	۰/۳	۲	-۶/۶	۰/۸	-۳/۵	۱/۴	۵	-۱/۷
۲۰	۲۰۰۸/۰۴/۰۲	۰/۲	۵/۲	-۰/۶	۲	-۲/۹	۲/۶	-۸	-۱	-۲/۴	۲/۲	۲/۷	-۲/۷
۲۱	۲۰۰۸/۱۱/۱۷	**	۰	-۳/۶	-۳/۲	-۲/۹	-۱	-۸/۴	-۵/۲	-۴	-۱/۲	-۱/۸	-۵
۲۲	۲۰۰۹/۱۰/۱۹	۶	۶/۸	۲	۳/۲	۵/۴	۵/۶	-۳/۴	۰/۸	-۲/۱	۷/۲	۷/۲	-۱/۶
۲۳	۲۰۰۹/۱۱/۰۶	۲/۷	۴/۶	-۱	۰/۴	۰/۴	۲/۸	-۳/۷	-۰/۲	-۳/۵	۴/۲	۳/۲	-۱/۸
۲۴	۲۰۰۹/۱۱/۰۷	۱/۹	۳/۲	-۰/۲	۰/۶	۰/۷	۲/۸	-۳/۷	۰	-۳/۸	۲/۵	۳/۶	-۶/۹

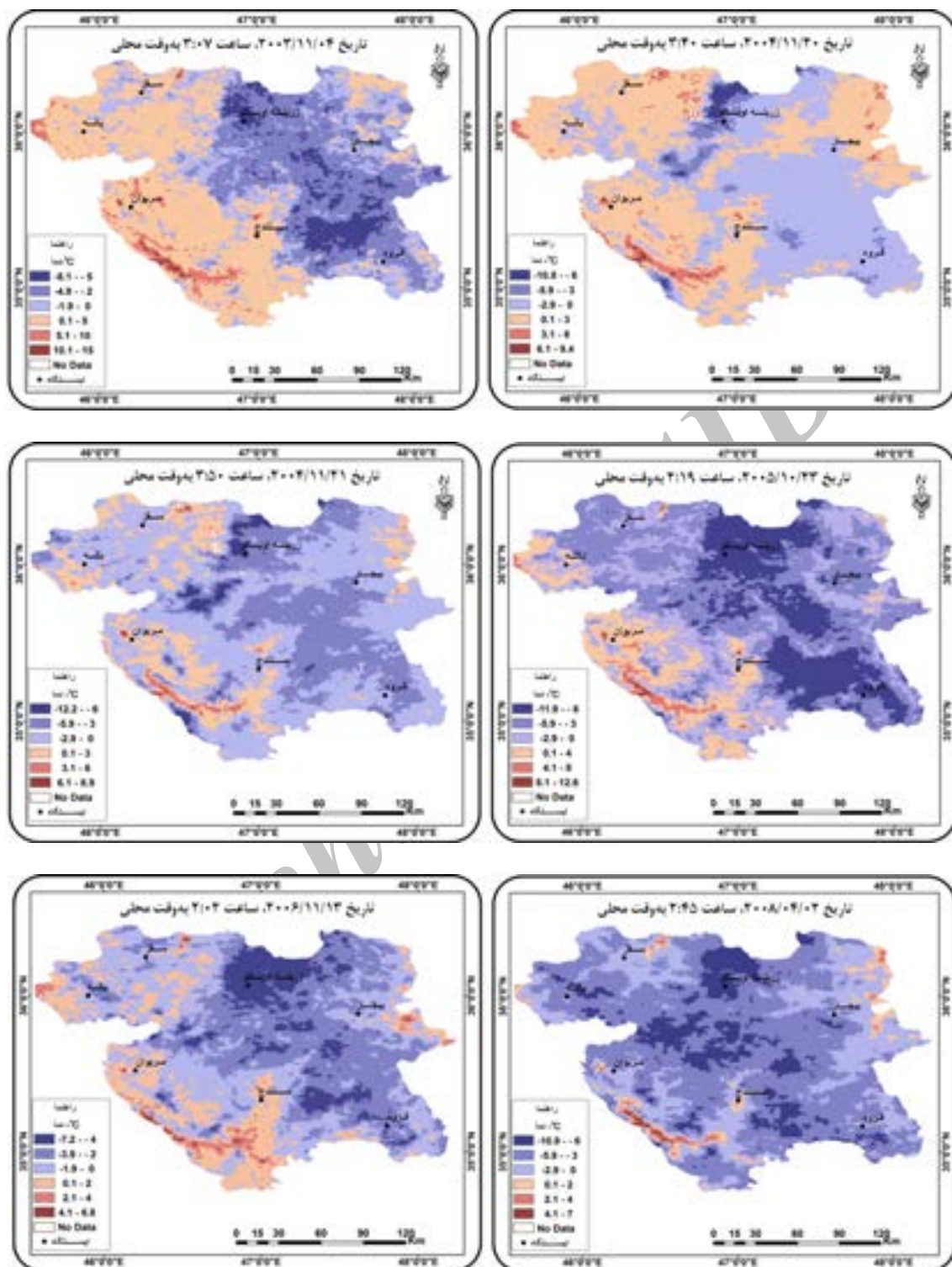
\* نبود داده هواشناسی \*\* نبود پیکسل ماهواره

### نقشه‌های نهایی یخبندان سطح زمین

پس از اعمال تصحیح‌ها و الگوریتم‌های مختلف بر روی تصاویر ماهواره‌ای، نقشه‌های پهنه‌بندی دمایی منطقه به‌منظور شناسایی پهنه‌های یخبندان تهیه شد. این نقشه‌ها، به تعداد تصاویر استفاده شده (۲۴ عدد) است که برای نمونه در شکل ۲ تعداد دوازده نقشه آورده شده است. در این نقشه‌ها برای نمایش بهتر نواحی دارای یخبندان، دماهای کمتر از صفر درجه سلسیوس با طیف رنگ آبی و دماهای بیشتر از صفر درجه سلسیوس با طیف رنگ قهوه‌ای نشان داده شده است.

در بعضی از تصاویر، پیکسل‌هایی وجود داشت که به دلایل مختلف فاقد اطلاعات بود. این پیکسل‌ها به رنگ سفید مشخص شده است.





شکل ۲. پهنه‌های دمایی استان کردستان در تاریخ‌های منتخب، استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای NOAA با الگوریتم کول (تهیه و ترسیم: نویسندگان)

## نتیجه‌گیری

یخبندان پدیده زیان‌بار اقلیمی است که به‌علت تأثیر شگرف بر حوزه‌های مختلف، تاکنون با روش‌های گوناگونی بررسی شده است. سنجش‌ازدور به‌علت توانایی‌های گسترده خاص خود، ابزار مناسبی برای بررسی پدیده‌های زیان‌بار اقلیمی و جوی از جمله یخبندان است. دانشمندان و محققان رشته‌های مختلف برای تفکیک پهنه‌های دمایی از داده‌های ماهواره NOAA به‌علت قدرت مناسب تفکیک زمانی، مکانی و طیفی استفاده کرده‌اند. در این پژوهش سعی شد با استفاده از تصاویر NOAA-AVHRR یخبندان‌های بهاره و پاییزه استان کردستان بررسی و نقشه‌های پهنه‌بندی مربوط به الگوریتم پهنه ارائه شود.

از میان سه الگوریتم استفاده‌شده برای برآورد دمای سطح زمین، الگوریتم کول عملکرد بهتری داشت. استفاده از شاخص NDVI در محاسبه قابلیت انتشار به برآورد بهتر دما کمک کرد. نکته شایان توجه این است که در هر سه الگوریتم، برآوردهای دمایی در ایستگاه‌های سنندج، مریوان و سقز - که ارتفاع کمتری دارند - نسبت به ایستگاه‌های مرتفع‌تر زینت‌آب‌تو، قروه و بیجار بهتر بود. به‌نظر می‌رسد بین عامل ارتفاع ایستگاه‌ها و دقت برآورد، ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم وجود دارد که نیازمند بررسی‌های بیشتر است. همچنین در آینده، پژوهش در زمینه بررسی ارتباط بین دمای سطح زمین با ارتفاع ۲ متری به‌منظور اعمال در برآوردها بسیار سودمند خواهد بود. در نگاهی کلی به نقشه‌های شکل ۲، تأثیر ارتفاعات بر وقوع یخبندان‌های شبانه در استان کردستان - هم از نظر شدت و هم از نظر گسترش - محرز است؛ به‌نحوی که در مناطق مرتفع شمالی و شرقی استان، یخبندان‌های شبانه شدت و گسترش بیشتری دارد. درحالی‌که دماهای بیشتر منطبق با نواحی پست، دره‌ها، مسیر رودخانه‌ها و دریاچه‌های طبیعی و مصنوعی (سدها) است. این نکته دلیلی بر کارایی مناسب الگوریتم به‌کارگرفته‌شده در برآورد دماست.

## منابع

- جهانبخش، س.، زاهدی، م. و ولیزاده کامران، خ. (۱۳۹۰). «محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از روش سبال و درخت تصمیم‌گیری در محیط RS و GIS در بخش مرکزی منطقه مراغه». *جغرافیا و برنامه‌ریزی*. دوره ۱۶. ش ۳۸: ۴۲-۱۹.
- رحیمی‌خوب، ع.، کوچک‌زاده، م.، محمدولی سامانی، ج. و شریفی، ف. (۱۳۸۴). «ارزیابی چند روش برآورد دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره NOAA در حوزه آبریز دریاچه ارومیه». *پژوهش و سازندگی در زراعت و باغبانی*. ش ۶۸: ۸۴-۹۰.
- علوی‌پناه، س.ک. (۱۳۸۷). *سنجش از دور حرارتی و کاربرد آن در علوم زمین*. چ ۲. تهران: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران.
- علیجانی، ب.، محمودی، پ.، ریگی چاهی، اب. و خسروی، پ. (۱۳۸۹). «بررسی تداوم روزهای یخبندان در ایران، با استفاده از مدل زنجیره مارکوف». *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. ش ۷۳: ۲۰-۱.
- فرج‌زاده، م.، فتح‌نیا، ا.، علیجانی، ب. و ضیائی‌ان، پ. (۱۳۹۰). «ارزیابی اثر عوامل اقلیمی بر پوشش گیاهی منطقه زاگرس با استفاده از اطلاعات رقومی ماهواره‌ای». *تحقیقات مرتع و بیابان ایران*. ج ۱۸. ش ۱: ۱۲۳-۱۰۷.
- فرجی سبکیار، ع.ع. و عزیزی، ق. (۱۳۸۵). «ارزیابی میزان دقت روش‌های درون‌یابی فضایی، مطالعه موردی: الگوسازی بارندگی حوزه کارده مشهد». *پژوهش‌های جغرافیایی*. ش ۵۸: ۱۵-۱.
- کوران، پ. (۱۳۷۴). *اصول سنجش از دور*. ترجمه رضا حائز. چ ۲. تهران: مؤسسه انتشارات امید.
- محمدی، ح. و گزل‌خو، م. (۱۳۸۹). «تأثیر یخبندان‌های زودرس پاییزه و دیررس بهاره بر کشت غلات در شهرستان کرج». *فصلنامه جغرافیایی سرزمین*. س ۷. ش ۲۷: ۱۰۹-۹۳.
- Alavipanah, S.K. (2008). *Thermal Remote Sensing and its Application in Geosciences*. 2<sup>nd</sup> Edition. Tehran: University of Tehran Press. (In Persian).
- Alijani, B., Mahmoudi, P., Rigi Chahi, A.B. and Khosravi, P. (2011). "Investigation of the Persistence of Frost Days in Iran using Chain Markov Model". *Physical Geography Research Quarterly*. Vol. 42. No. 73: 1-19. (In Persian).
- Becker, F. and Li, Z.-L. (1990). "Towards a Local Split Window Method over Land Surfaces". *International Journal of Remote Sensing*. No. 11: 369-394.
- Coll, C., Casselles, V., Sobrino, J.A. and Valor, E. (1994). "On the Atmospheric Dependence of the Split-Window Equation for Land Surface Temperature". *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 15: 105-122.
- Curran, P. (1995) *Principles of Remote Sensing*. Translated by Haez, R.. 2<sup>nd</sup> Edition. Tehran: Omid Press. (In Persian).
- Dalezios, N.R., Lavradiadou, E.E. (1995). "Features of Frost-Affected Areas from Digital Meteosat IR Images". *Advances in Space Research*. Vol. 15. No. 11: 123-126.
- Faraji Sabokbar, H.A. and Azizi, Gh. (2007). "The Precision of Spatial Interpolation Methods, Case Study: Rainfall Modeling in Kardeh Basin of Mashhad". *Geographical Research Quarterly*. No. 58: 1-15.
- Farajzadeh, M., Fathnia, A.A., Alijani, B. and Zeaiean, P. (2011). "Assessment of Climatic Factors Effect on Vegetation in the Zagross Region Using Satellite Images". *Iranian Journal of Range and Desert Research*. Vol. 18. No. 1: 107-123. (In Persian).
- Francois, C., Bosseno, R., Vacher, J.J. and Seguin, B. (1999). "Frost Risk Mapping Derived from Satellite and Surface Data over the Bolivian Altiplano". *Agricultural and Forest Meteorology*. No. 95: 113- 137.
- Jahanbakhsh, S., Zahedi, M. and Valizadeh Kamran, K. (2012). "Land Surface Temperature Calculation Using SEBAL and Decision Tree Methods Based on ETM + Image in RS, GIS Environment in the Maragheh Central Region". *Quarterly Journal of Geography and Planning*. Vol. 16. No. 38: 19-42. (In Persian).
- Kalma, J.D., Byrne, G.F., Johnson, M.E., Laughlin, G.P. (1983). "Frost Mapping in Southern Victoria: An Assessment of HCMM Thermal Imagery". *International Journal of Climatology*. Vol. 3. No. 1: 1-19.
- Kerdiles, H., Grondona, M., Rodriguez, R. and Seguin, B. (1996). "Frost Mapping Using NOAA AVHRR Data in the Pampean Region, Argentina". *Agricultural and forest Meteorology*. Vol. 79: 157-182.



- Kerr, Y.H., Lagouarde, J.P. and Imbernon, J. (1992). "Accurate Land Surface Temperature Retrieval From AVHRR Data with Use of an Improved Split Window Algorithm". *Remote Sensing of Environment*. Vol. 41. No. 2-3: 197-209.
- Li, Z.-L., Tang, B.-H., Wu, H., Ren, H., Yan, G., Wan, Z., Trigo, I.F. and Sobrino, J.A. (2013). "Satellite-Derived Land Surface Temperature: Current Status and Perspectives". *Remote Sensing of Environment*. No. 131: 14-37.
- McMillin, L.M. (1971). "A Method of Determining Surface Temperatures from Measurements of Spectral Radiance at two Wavelengths". *Ph.D. Dissertation*. Iowa State University. (Available from University Microfilms International, P. O. Box 1764, Ann-Arbor, MI 48106).
- Mohammadi, H. and Gozalkhoo, M. (2010). "Effects of Early Autumn and Late Spring Frosts on Planting Cereals in Karaj County". *Geographical Journal of Territory (Quarterly)*. Vol. 7. No. 27: 93-109. (In Persian).
- Ottilie, C. and Stoll, M.P. (1993). "Effect of Atmospheric Absorption and Surface Emissivity on the Determination of Land Surface Temperature From Infrared Satellite Data". *International Journal of Remote Sensing*. No. 14: 2025-2037.
- Price, J.C. (1984). "Land Surface Temperature Measurements from the Split Window Channels of the NOAA 7 Advanced Very High Resolution Radiometer". *Journal of Geophysical Research*. Vol. 89. No. D5: 7231-7237.
- Qin, Z. and Karnieli, A. (1999). "Progress in the Remote Sensing of Land Surface Temperature and Ground Emissivity Using NOAA-AVHRR data". *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 20. No. 12: 2367-2393.
- Rahimi khoob, A., Kouchakzade, M., Mohammadvali Samani, J. and Sharifi, F. (2005). "Estimating Maximum Daily Temperature Using NOAA Satellite Images: Case Study in Oroomieh Lake Basin". *Pajouhesh & Sazandegi*. No. 68: 84-90. (In Persian).
- Rosenberg, N.J. and Myers, R.E. (1962). "The Nature of Growing Season Frosts in and Along the Platte Valley of Nebraska". *Monthly Weather Review*. No. 90: 471-479.
- Sobrino, J.A., Raissouni, N. and Li, Z.-L. (2001). "A Comparative Study of Land Surface Emissivity Retrieval from NOAA Data". *Remote Sensing of Environment*. Vol. 75. No. 2L: 256-266.
- Tait, A. and Zheng, X. (2003). "Mapping Frost Occurrence Using Satellite Data". *Journal of Applied Meteorology*. Vol. 42. No. 2: 193-203.
- Ulivieri, C., Castronuovo, M.M., Francioni, R. and Cardillo, A. (1994). "A Split-Window Algorithm for Estimating Land Surface Temperature from Satellites". *Advances in Space Research*. Vol. 14. No. 3: 59-65.
- Van de Griend, A.A. and Owe, M. (1993). "On the Relationship Between Thermal Emissivity and the Normalized Difference Vegetation Index for Natural Surfaces". *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 14. No. 6: 1119-1131.
- Vázquez, D.P., Reyes, F.J.O. and Arboledas, L.A. (1997). "A Comparative Study of Algorithms for Estimating Land Surface Temperature from AVHRR Data". *Remote Sensing of Environment*. No. 62: 215-222.
- Wenbin, Z., Aifeng, L. and Shaofeng, J. (2013). "Estimation of Daily Maximum and Minimum air Temperature Using MODIS Land Surface Temperature Products". *Remote Sensing of Environment*. No. 130: 62-73.