



سنجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران / سال هشتم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۵
Iranian Remote Sensing & GIS / Vol.8, No. 3, Autumn 2016

۷۶-۵۹

تعیین مناسب‌ترین روش استخراج دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ماهواره

لندست ۸ در کلان‌شهر کرج

- بهروز ابراهیمی هروی^{۱*}، کاظم رنگرن^۲، حمیدرضا ریاحی بختیاری^۳، ایوب تقی‌زاده^۴
۱. کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۲. دانشیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید چمران اهواز
 ۳. استادیار گروه علوم جنگل دانشکده منابع طبیعی و علوم زمین دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران
 ۴. مربی گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید چمران اهواز

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۹/۲۴

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۶/۱۶

چکیده

دما یکی از شاخص‌ترین پارامترهای اقلیمی و از اصلی‌ترین عوامل اثرگذار در برنامه‌ریزی شهرها محسوب می‌شود زیرا هدایت‌کننده نوع تسهیلات اختصاص‌یافته در شهرها و حتی تعیین‌کننده ساختار، شکل و بافت شهری است. دمای سطح فاکتور اصلی در تعادل انرژی کره‌زمین بوده و به عنوان ورودی مدل‌های تغییرات آب‌وهوایی و جزایر حرارتی شهری به کار می‌رود. دمای کلان‌شهرها در مقایسه با مناطق شهری و روستایی اطراف بیش‌تر و مشهودتر است که به این پدیده «جزیره حرارتی شهری» گفته می‌شود. کلان‌شهر کرج سومین کلان‌شهر بزرگ و دومین شهر مهاجرپذیر ایران (پس از کلان‌شهر تهران) است و به‌علت داشتن چنین جایگاهی، بررسی حرارتی آن بیش از پیش احساس می‌شود. در این تحقیق دمای سطح زمین در کلان‌شهر کرج با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۸ (چهار تصویر) در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۴، به کمک روش‌های گوناگون استخراج شد. روش‌های مورد استفاده شامل پنجره تکی، سبال، استفان-بولتزمن، تک‌کانالی (توسعه‌داده‌شده توسط مونیوس و سوپرینو^۱، ۲۰۰۳)، تک‌کانالی (توسعه‌داده‌شده توسط مونیوس و همکاران، ۲۰۱۴)، پنجره مجزا و دفتر علوم لندست است. در نهایت، با استفاده از شاخص آماری میانگین خطای مطلق روش‌های گوناگون مقایسه شد و بهترین روش، به‌واسطه نزدیکی به داده زمینی انتخاب شد. نتایج نشان داد بهترین روش مورد استفاده روش سبال باند ۱۱ با مقدار میانگین خطای مطلق ۷/۹۸ است؛ ضمن آن‌که در حالت کلی، باند ۱۱ ماهواره لندست ۸، به‌منظور استخراج دمای سطح زمین نتایج قابل اعتمادتری نسبت به باند ۱۰ تولید می‌کند. همچنین بررسی نتایج در تاریخ‌های مختلف مشخص کرد تصاویر نیمه دوم سال در مقایسه با نیمه اول سال، تخمین دقیق‌تر و نتایج نزدیک‌تری به واقعیت تولید می‌کنند.

کلیدواژه‌ها: دمای سطح، تصاویر حرارتی، ماهواره لندست، سنجش از دور، کلان‌شهر کرج، میانگین خطای مطلق.

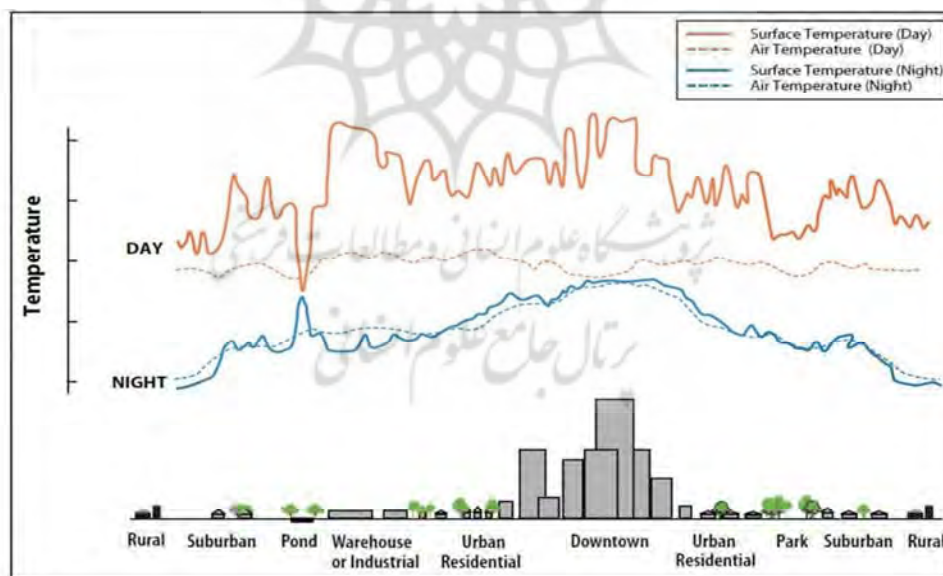
* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: اهواز، گلستان، میدان دانشگاه، دانشگاه شهید چمران اهواز، گروه سنجش از دور و GIS. تلفن: ۰۹۲۶۵۰۵۹۹۸۵.

۱- مقدمه

در طول موج بالاتری گسیل می‌کنند. در مناطق غیرشهری، انرژی ورودی خورشید موجب تبخیر آب از گیاهان می‌شود. این روند دمای مناطق غیرشهری را افزایش نمی‌دهد اما در شهرها عکس این موضوع اتفاق می‌افتد (Xian and Crane, 2006).

شدت و الگوی مکانی UHI به پویایی جمعیت، توسعه و گسترش مناطق مسکونی، ساختار شهر، نسبت مناطق مسکونی به فضای سبز در واحد سطح، شرایط آب‌وهوایی (مثل باد و رطوبت هوا)، فعالیت‌های اجتماعی-اقتصادی (Maimaitiyiming et al., 2014)، توسعه صنعتی شهر، اندازه و تراکم شهر، پراکنش کاربری/ پوشش زمین و ویژگی مناطق روستایی اطراف ارتباط دارد (Senanayake et al., 2013). معمولاً در طول تابستان جزایر حرارتی شهرهای واقع‌شده در عرض‌های میانی (همانند کلان‌شهر کرج) به بالاترین مقدار خود می‌رسد (Liu and Zhang, 2011). شناسایی

دمای سطح زمین (LST)^۱ از شاخص‌های اصلی تعادل انرژی کره زمین و تأثیرگذار در حیات انسان‌هاست زیرا تمامی فعالیت‌های بشری، مستقیم و غیرمستقیم، به دمای هوا (که متأثر از دمای سطح زمین است) ارتباط دارد (Zhang and Wang, 2008). از جمله مناطقی که تراکم انسان‌ها در آن بالا می‌باشد شهرها هستند؛ هرچند که تا سال ۲۰۱۰، ۵۰٪ جمعیت جهان در شهرها زندگی می‌کردند که نشان‌دهنده اقامت اکثریت جمعیت جهان در شهرهاست (Senanayake et al., 2013). همین‌طور تخمین زده می‌شود تا سال ۲۰۵۰ نزدیک به ۷۰٪ جمعیت جهان در شهرها سکونت داشته باشند (Farina, 2012). واضح‌ترین ویژگی حرارتی شهرها جزایر حرارتی شهری (UHI)^۲ است (Thi et al., 2008). به‌طور کلی در محیط‌های شهری پوشش گیاهی به‌صورت پراکنده بوده بنابراین، ساختمان‌ها و سطوح نفوذناپذیر شهری انرژی خورشیدی را جذب و انرژی جذب‌شده را



شکل ۱. اختلاف دمای سطح زمین در مناطق شهری و روستایی طی روز و شب

منبع: Farina, 2012

1. Land Surface Temperature (LST)
2. Urban Heat Islands (UHI)

پوشش گیاهی در هر دو فصل نقش تعدیل کننده دما را دارد؛ به طوری که در تابستان با دما دارای رابطه منفی و در فصل پاییز با آن رابطه مثبت دارد. دشتی (۱۳۹۴) در پایان نامه خود، با استفاده از روش سبال و تصویر لندست ۸، LST را در کلان شهر تهران استخراج کرد. نتایج تحقیق نشان داد روش سبال در مقایسه با روش های دیگر از محاسبات بسیار ساده تر و ورودی های کمتری استفاده می کند. مهم ترین مزیت روش سبال خطای کمتر و صحت آن برای تهیه نقشه دمای سطح است. یووانوسکا و آودن^۴ (۲۰۱۶) با استفاده از باند ۱۰ لندست ۸، ابزاری برای تهیه نقشه حرارتی به صورت خودکار عرضه داشتند. در این تحقیق روش های گوناگونی به کار رفت تا بهترین روش و مدل تهیه شود. به منظور ارزیابی و بهبود خوارزمی، از داده های دمای سطح زمین و هوای نزدیک سطح زمین استفاده کردند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد انحراف معیار نقشه دمای تهیه شده با داده های دمای سطح زمین و داده های دمای هوای نزدیک به سطح زمین به ترتیب برابر با ۲/۴ و ۲/۷ درجه سانتی گراد بوده است. به عبارتی، مقایسه نقشه LST با داده های دمای سطح زمین منطقی تر و قابل اعتمادتر است.

المدرسی و همکاران (۱۳۹۳) برای استخراج LST به کمک لندست ۸ از شاخص NDVI استفاده کردند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد نقشه تهیه شده با استفاده از باند ۱۱ دقتی بیشتر از باند ۱۰ دارد. همچنین برای مناطق سردسیر یا تصاویر نیمه دوم سال، باند حرارتی ۱۰ و برای تصاویر نیمه نخست سال یا مناطق گرمسیر، باند حرارتی ۱۱ نتایج بهتری تولید می کنند. با تحقیق راجشواری و مانی^۵ (۲۰۱۴) که با استفاده از روش SW نقشه LST تهیه شده بود، گسیلندگی سطح زمین (LSE) در باندهای ۱۰ و ۱۱ لندست ۸ با استفاده از روش آستانه گذاری مقادیر NDVI به دست آمد.

1. mono window
2. Jiménez-Muñoz et al.
3. split window
4. Jovanovska & Avdan
5. Rajeshwari & Mani

الگوهای مکانی UHI به کمک داده های مشاهدات زمینی (داده های هواشناسی) به دلیل پوشش و تفکیک مکانی ناچیز، مشکل است. با اینکه تفکیک زمانی داده های سنجش از دوری کمتر از داده های هواشناسی است استفاده از داده های سنجش از دور در پایش الگوهای UHI در مقیاس بزرگ و متوسط راهکار بسیار مناسبی محسوب می شود (Zhang et al., 2013). تنها مشکل استفاده از داده های سنجش از دور قدرت تفکیک مکانی آن است ولی فواید و ویژگی های آن بسیار بیش تر از داده های زمینی است.

دشتکیان و دهقان (۱۳۸۵) در تحقیق خود در منطقه اشکذر یزد، با استفاده از تصاویر لندست ۷ و روش های گوناگون، LST را پیش بینی کردند و به این نتیجه رسیدند که اراضی بایر و در رأس آن ها شنزارها بیشترین دما و اراضی کشاورزی و باغی کمترین دما را دارند که این به علت رطوبت نسبی موجود در خاک و میزان پوشش گیاهی سطح زمین است. دمای تأسیسات شهری و کارخانه ها تقریباً پایین (نسبت به اراضی بایر اطراف آن ها) و ضریب تغییرات آن بیشترین مقدار بوده که علت آن آلودگی هوا، بیابانی بودن و تفاوت گسیلندگی اجسام است. علیپور و همکاران (۱۳۸۹) با استفاده از روش های پنجره تکی (MW)^۱ و تک کانالی (SC)، LST را استخراج کردند. برای استخراج گسیلندگی، دو روش NDVI و طبقه بندی تصویر ماهواره ای را به کار بردند. نتایج کار آن ها نشان داد روش MW که در آن گسیلندگی به روش NDVI استخراج شده بود بهترین روش است. خیمنز- مونیوس و همکاران^۲ (۲۰۱۴) با استفاده از روش های پنجره مجزا (SW)^۳ و SC، LST را استخراج کردند و به این نتیجه رسیدند که روش SW نتایج دقیق تر و خطای کمتری دارد. همتی (۱۳۸۳) در پایان نامه خود، با استفاده از روش سبال، LST را در کرمانشاه استخراج کرد. نتایج نشان داد دما در کاربری های بایر، صنعتی و حمل و نقل شهری بیشترین مقدار را دارد که علت آن وجود پوشش گیاهی پراکنده در این کاربری هاست.

استفاده را داراست. همچنین در روش‌های معادله انتقال تابشی و SC که برای استخراج LST از یک باند استفاده می‌کنند، باند ۱۰ به نسبت باند ۱۱ دقت بیشتری در تخمین LST داشته است. فیضی‌زاده و همکاران (۱۳۹۴) در محاسبه LST از روش SW در حوزه آبریز مهاباد استفاده کردند. نتایج مشخص کرد نقشه تهیه‌شده دارای دقتی در حدود ۱/۴ درجه سانتی‌گراد بوده است. همچنین مناطق با پوشش گیاهی متراکم و پوشیده از آب دمای کمی دارند و مناطق با پوشش گیاهی اندک و خاک بایر دارای دمای بالایی هستند.

در تحقیق حاضر، هدف استخراج LST با استفاده از همه روش‌های موجود و به کمک تصویر ماهواره لندست ۸ و پس از آن انتخاب بهترین روش از بین روش‌های مورد استفاده، از نظر نزدیکی به داده‌های زمینی (داده‌های دمای خاک ایستگاه‌های هواشناسی)، با استفاده از شاخص آماری میانگین خطای مطلق (MAE)^۴ است. کلان‌شهر کرج به دلیل هم‌جواری با کلان‌شهر تهران و موقعیت مناسب آب‌وهوایی و فرصت‌های شغلی مناسب، پذیرای جمعیت بسیاری است؛ به طوری که این کلان‌شهر، پس از کلان‌شهر تهران، بالاترین میزان مهاجرپذیری و همچنین بیشترین میزان رشد شهری است. این کلان‌شهر در سال ۱۳۳۵، با جمعیت ۱۴۵۲۶ نفری خود به جمعیت ۱۶۰۵۰۰۰ نفری در سال ۱۳۸۵ رسیده است (گومه، ۱۳۹۱). بنابراین، به‌علت داشتن چنین جایگاهی، بررسی و تهیه LST بسیار ضروری است زیرا هرچه شهر بزرگ‌تر و متراکم‌تر و دارای جمعیت بیشتری باشد، آلودگی آن بیشتر است و این باعث ایجاد جزایر حرارتی و به‌تبع آن، مشکلات بعدی می‌شود (ابراهیمی‌هروی، ۱۳۹۳). از چالش‌های این

نتایج تحقیق آن‌ها مشخص کرد در مناطق بیابانی، مناطق کشت‌نشده و شهرها بیشترین مقدار LST و در مناطق دره‌ای (به‌علت برخورداری از پوشش گیاهی) کمترین مقدار LST مشاهده می‌شود. نتایج تحقیق سورش و همکاران^۱ (۲۰۱۶) که با استفاده از روش SW نقشه LST تهیه شده بود نشان داد که LST در مناطق بیابانی، بیشترین مقدار و در مناطق با پوشش گیاهی متراکم، کمترین مقدار خواهد بود. نتایج این تحقیق مشخص کرد با توجه به اینکه روش SW به‌منظور استخراج LST از هر دو باند حرارتی لندست ۸ استفاده می‌کند بنابراین نقشه‌های حرارتی حاصل، مطمئن‌تر و دقیق‌تر خواهد بود. بالچیک و ارگن^۲ (۲۰۱۶) با استفاده از تصویر لندست ۸ و به‌کارگیری روش MW، LST را برآورد و نقشه کاربری/پوشش زمین را تهیه کردند. نتایج مشخص کرد که همبستگی LST و داده‌های دمایی ایستگاه‌های هواشناسی ۷۴/۴۹٪ بوده است. آن‌ها در تحقیق خود برای استخراج LST از باند ۱۰ لندست ۸ استفاده کردند زیرا بر طبق گفته سازمان زمین‌شناسی ایالات متحد (USGS)، باند ۱۱ لندست ۸ عدم قطعیت بالایی در برآورد LST دارد و بنابراین، پیشنهاد کرده برای الگوریتم‌هایی که فقط از یک باند برای استخراج LST استفاده می‌کنند از باند ۱۰ لندست ۸ استفاده شود. نتایج تحقیق آن‌ها همچنین مشخص کرد مناطق مسکونی LST بالایی دارند و پهنه‌های با پوشش گیاهی، دارای کمترین مقدار LST هستند. همچنین مناطق بایر بدون پوشش گیاهی به‌علت آلودگی بالای آن‌ها (همانند مناطق مسکونی)، بیشترین مقدار LST را دارند. یو و همکاران^۳ (۲۰۱۴) به‌منظور استخراج LST، از روش‌های معادله انتقال تابشی، SW و SC استفاده کردند. طبق نتایج، به‌منظور استخراج LST در باند ۱۰ لندست ۸، معادله انتقال تابش بیشترین دقت را با میانگین ریشه مربعات خطای کمتر از ۱ کلون دارد. روش SW دارای دقت متوسط است و روش SC کمترین دقت در بین روش‌های مورد

1. Suresh et al.
2. Balcik & Ergene
3. Yu et al.
4. Mean Absolute Error (MAE)

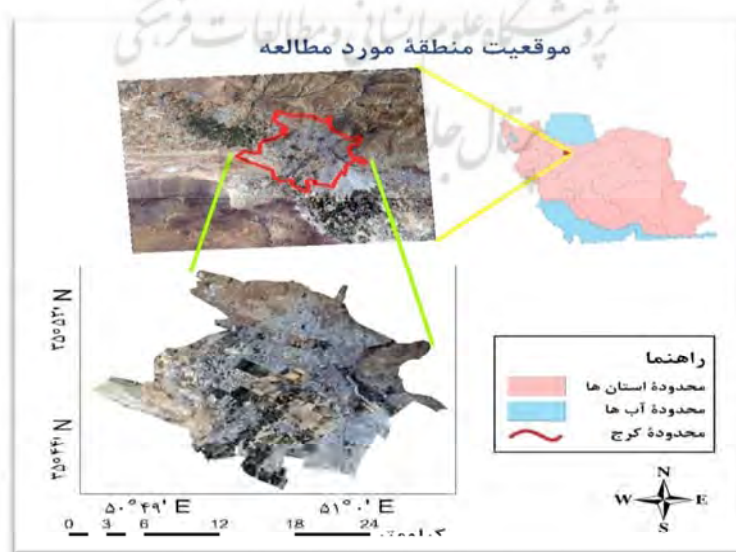
۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

کلان‌شهر کرج در شمال ایران و غرب کلان‌شهر تهران قرار گرفته است. مختصات جغرافیایی گوشه شمال غرب و جنوب شرق منطقه به ترتیب $36^{\circ} 30' 50''$ و $32^{\circ} 35' 14''$ است (شکل ۲). وجود رشته‌کوه‌های مرتفع در قسمت شمالی باعث شده این کلان‌شهر به قسمت‌های شرقی، غربی و جنوبی توسعه یابد. طبق بررسی‌های انجام‌یافته روی آمار بلندمدت ایستگاه‌های هواشناسی کرج، این شهرستان دارای بارندگی سالیانه $247/3$ میلی‌متر و میانگین سالانه دمای هوای $14/4$ درجه سلسیوس است. میانگین روزانه سرعت باد $2/2$ متر بر ثانیه و جهت غالب آن شمال غرب به جنوب شرق است. تیرماه با میانگین $34/6$ درجه سلسیوس، گرم‌ترین ماه و بهمن با $9/2$ درجه سلسیوس، سردترین ماه سال محسوب می‌شوند (پاکدامن، ۱۳۹۳).

با مشاهده شکل ۲ به خوبی مشخص می‌شود مناطق خاکستری رنگ مربوط به مناطق مسکونی است و مناطق تیره (یشمی و مشکی) به مناطق دارای پوشش گیاهی (پارک‌ها و فضای سبز) مربوط می‌شود. دیگر بخش‌ها نشان‌دهنده خاک لخت است.

تحقیق کم‌بودن نسبی قدرت تفکیک مکانی باندهای حرارتی است (هرچند این امر عادی و گریزناپذیر است). می‌توان برای پژوهش‌های این‌چنینی از باندهای حرارتی سنجنده‌های هوایی (مستقر در هواپیما یا پهپاد) که قدرت تفکیک حرارتی بیشتری دارند، استفاده کرد. چالش دیگر اندک بودن نسبی تعداد ایستگاه‌های زمینی هواشناسی است. هرچند در این تحقیق از آمار ۴ ایستگاه استفاده شده است زیاد بودن تعداد ایستگاه زمینی در تخمین و ارزیابی LST تأثیرگذار است. مسئله دیگر موقعیت جغرافیایی کلان-شهر کرج است زیرا تخمین دقیق‌تر LST نیازمند استفاده از تصاویر بدون پوشش ابر است. با توجه به اینکه کلان‌شهر کرج در دامنه رشته‌کوه‌های البرز قرار گرفته و این دامنه‌ها در بیشتر مواقع سال پوشش ابر دارند (بر اثر عامل همرفتی یا به‌علت گرمایش سطح زمین و سپس صعود هوا و بخار آب)؛ بنابراین انتخاب تصویری که فاقد ابر باشد بسیار اساسی و مهم خواهد بود. در این تحقیق با استفاده از شاخص MAE، قابلیت باندهای ۱۰ و ۱۱ لندست ۸ و همچنین فصل سال در تخمین LST مشخص شده است. سپس با استفاده از شاخص آماری یادشده، مشخص شد نقشه کدام باند و فصل سال در تخمین LST دقیق‌تر است.



شکل ۲. نقشه ایران و موقعیت منطقه مورد مطالعه روی تصویر رنگی طبیعی لندست ۸

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق از تصاویر لندست ۸، نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰، داده‌های هواشناسی شامل دمای هوا، رطوبت نسبی هوا و دمای نقطه شبنم برای برآورد LST استفاده شده است. ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه شامل ایستگاه‌های هواشناسی کرج، فرودگاه پیام، چیتگر و هشتگرد است. شماره ردیف و مسیر تصاویر به کاررفته به ترتیب ۳۵ و ۱۶۵ است. جدول ۱ مشخصات تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده را نمایش می‌دهد.

۳- روش تحقیق

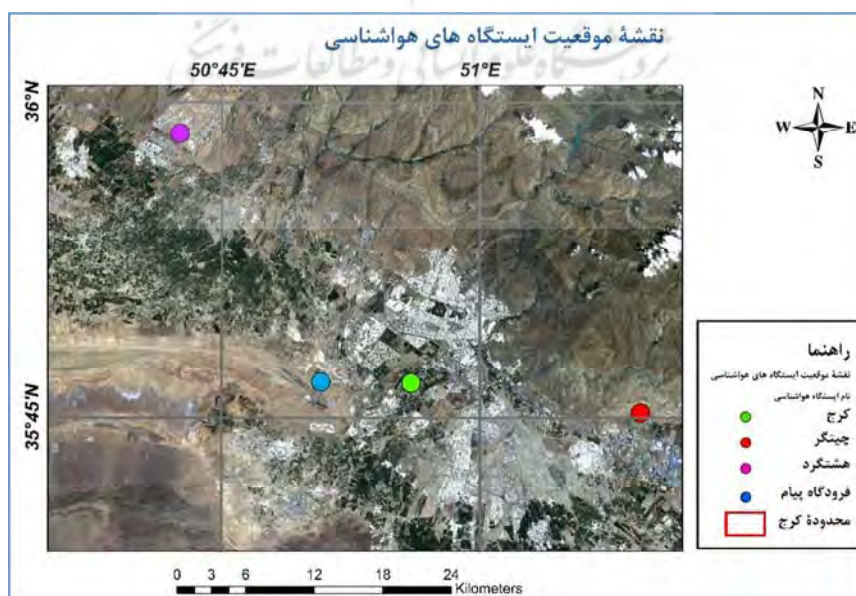
پس از دریافت داده‌های مورد نظر، منطقه مورد مطالعه

از تصاویر ماهواره‌ای برش داده شد. تصحیح هندسی تصاویر با استفاده از نقشه توپوگرافی انجام گرفت و همه تصاویر با سیستم مختصات UTM ناحیه ۳۹ شمالی انطباق داده شدند. در تصحیح هندسی تصاویر سعی شد خطای RMS کمتر از ۰/۵ پیکسل شود. همچنین سعی شد تصاویر انتخابی فاقد ابرناکی باشند که در نتایج خوارزمی‌های گوناگون اختلال ایجاد نکنند. به منظور محاسبه عوامل مربوط به استخراج دما، از داده‌های هواشناسی ساعتی ایستگاه‌های سینوپتیک مستقر در منطقه مورد مطالعه استفاده شده است. شکل ۳ نقشه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی مستقر در منطقه مورد مطالعه را نمایش می‌دهد.

جدول ۱. ویژگی‌های تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده در این تحقیق

منبع: فایل مرجع تصاویر

سنجنده	تاریخ دریافت تصویر	زاویه ارتفاع			زاویه میل (درجه)
		ساعت تصویربرداری (به وقت محلی)	خورشیدی (درجه)	آزیموت خورشیدی (درجه)	
OLI/TIRS	18/May/2013	۱۳۹۲/۰۲/۲۸	۶۶/۳۵	۱۲۸/۲۲	۹۸/۲
OLI/TIRS	05/Jul/2013	۱۳۹۲/۰۴/۱۴	۶۷/۱۷	۱۱۹/۱۴	۹۸/۲
OLI/TIRS	25/Oct/2013	۱۳۹۲/۰۸/۰۳	۳۹/۴۹	۱۵۸/۹۳	۹۸/۲
OLI/TIRS	13/Jan/2014	۱۳۹۲/۱۰/۲۳	۲۸/۷۵	۱۵۵/۷۴	۹۸/۲



شکل ۳. نقشه موقعیت ایستگاه‌های هواشناسی موجود در محدوده انتخاب‌شده

مشخص و به ترتیب اولویت بندی می کند. ضمن آنکه در این تحقیق با استفاده از شاخص مذکور مشخص شد که دقت روش های LST در کدام فصل بیشتر بوده و به عبارتی، این کار به تفکیک ماه سال انجام شده است. با مشاهده جدول ۱ به خوبی مشخص می شود که ۲ تصویر از چهار تصویر انتخابی در نیمه اول و دو تصویر دیگر در نیمه دوم سال دریافت شده اند. به عبارتی، یک تصویر نماینده هر فصل است تا با آن بتوان دقت الگوریتم در تخمین LST در فصول متفاوت را بررسی کرد. روش های مورد استفاده استخراج LST شامل پنجره تکی^۱، تک کانالی (توسعه داده شده از سوی مونیوس و سوبرینو، ۲۰۰۳)، تک کانالی (توسعه داده شده از سوی مونیوس و همکاران، ۲۰۱۴)، دفتر علوم لندست، سبال، پنجره مجزا^۲ و روش استفان-بولتزمن است. مهم ترین فرضیه در مورد روش های استخراج LST این است که روش SW، به دلیل اینکه مختص لندست ۸ است، قاعدتاً می باید نسبت به دیگر روش ها قابلیت خوبی در استخراج LST داشته باشد (Rozenstein et al., 2014). نکته مهم اینکه در این تحقیق از همه روش های موجود برای استخراج LST (به صورت یکجا) استفاده شده است.

در تمامی روش های استخراج LST نیاز است تابش طیفی و دمای درخشندگی باندهای حرارتی تصاویر محاسبه شوند. همه اجسامی که دمای آن ها بالای صفر مطلق باشد از خود حرارت گسیل می کنند. بر این اساس، علائم رسیده به سنجنده می توانند با استفاده از رابطه زیر به تابش در سطح سنجنده (یا تابش طیفی) تبدیل شوند (راهنمای لندست ۸):

$$L_{\lambda} = M_L \times Q_{cal} + A_L \quad (1)$$

که در آن L_{λ} تابش طیفی در بالای اتمسفر، M_L عامل مقیاس سازی ضربی باند خاص^۳، A_L عامل مقیاس سازی افزایشی باند خاص^۴، و Q_{cal} عدد رقومی (DN) باند

نکته مهم این است که برای اجرای روش های استخراج LST روی تصاویر، محدوده مورد بررسی کمی بزرگتر از محدوده کلان شهر کرج انتخاب شد (که در شکل ۳ نیز به خوبی مشخص است). مزیت این کار افزایش دقت نتایج روش های استخراج LST خواهد بود. چرا که برای اجرای روش های تخمین LST نیاز به داده های زمینی (چرا داده های هواشناسی مانند دمای هوا و رطوبت نسبی) است. هرچه این داده ها بیشتر و دقیق تر باشند، دقت نتیجه نهایی استخراج LST نیز بیشتر خواهد بود. شایان ذکر است که دمای استخراج شده از طریق تصاویر ماهواره ای با داده های دمای سطح خاک (۵ سانتی متری خاک) مقایسه شد زیرا در تمامی ایستگاه های هواشناسی، دمای سطح زمین اندازه گیری نمی شود و دمای خاک در اعماق متفاوت (همچون ۵، ۱۰، ۲۰ سانتی متری) اندازه گرفته می شود. برای مقایسه با داده زمینی (داده های هواشناسی) از پارامتر دمای خاک در عمق ۵ سانتی متری استفاده شده است. شکل ۴ پژوهش را مرحله به مرحله نمایش می دهد.



شکل ۴. مراحل استخراج دمای سطح زمین

در مرحله بعد، به دلیل فراوانی روش های مورد استفاده در استخراج LST، لازم است بهترین روش از بین تمامی روش های اجرا شده شناسایی شود. برای این منظور، از شاخص آماری میانگین خطای مطلق (که یکی از پرکاربردترین شاخص های آماری در این زمینه است) استفاده شد. مزیت این کار این است که نخست از افزونگی نقشه های به دست آمده برای نمایش می گاهد و دوم از بین روش های مورد استفاده بهترین روش را

1. mono window
2. split window
3. Band-specific multiplicative rescaling factor
4. Band-specific additive rescaling factor

اتمسفیری را از روی محتوای بخار آب هوا نمایش می‌دهد.

جدول ۲. معادلات تخمین قابلیت عبور اتمسفری از طریق محتوای بخار آب هوا در دماها و بخار آب گوناگون اتمسفری

منبع: Zhang et al., 2013

دمای اتمسفری	بخار آب (گرم بر سانتی‌متر مربع)	معادله تخمین قابلیت عبور اتمسفری
بالا	۰/۴-۱/۶	0/97429 - 0/08007 w
	۱/۶-۳	1/031412 - 0/11536 w
	۰/۴-۱/۶	0/982007 - 0/09611 w
پایین	۱/۶-۳	1/05371 - 0/14142 w

نکته مهم این است که در هیچ منبعی مرز بین دمای بالا و پایین هوا (جدول ۲) مشخص نشده است. به دلایلی در مورد برخی از ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه مورد مطالعه داده‌های رطوبت‌نسبی موجود نبوده و داده دمای نقطه شبنم آن ایستگاه موجود بوده است؛ بنابراین، نیاز به محاسبه رطوبت نسبی از روی دمای نقطه شبنم است که بر طبق رابطه زیر به دست می‌آید (علیزاده، ۱۳۸۷):

$$T_d = (112 + 0/9T)(R_H)^{0/125} + (0/1T - 112) \quad (6)$$

$$(R_H) = \left(\frac{T_d - 0/1T + 112}{0/9T + 112} \right)^8$$

به دلیل اینکه در منطقه مورد مطالعه بیش از یک ایستگاه هواشناسی وجود دارد، برای به دست آوردن w و T_0 مقادیر میانگین دمای هوا و رطوبت نسبی داده‌های زمینی وارد روابط بالا می‌شوند (Liu & Zhang, 2011). یکی از مزیت‌های این تحقیق استفاده از چندین ایستگاه سینوپتیک است که از این راه بتوان عدد میانگین به دست آمده برای پارامتر دمای هوا و رطوبت نسبی را به واقعیت نزدیک‌تر کرد و دقت نهایی نقشه LST را افزایش داد. اینکه هر جسمی چقدر انرژی و در چه طول موجی تابش می‌کند به گسیلندگی و دمای جنبشی آن جسم ارتباط دارد. مرحله بعد محاسبه گسیلندگی پیکسل‌های تصویر است. در محدوده حرارتی، بیشتر مواد گسیلندگی بالاتر از ۰/۹ دارند (علوی‌پناه، ۱۳۸۵). گسیلندگی برای تبدیل دمای

مورد نظر است. همین‌طور مقادیر M_L و A_L در فایل مرجع تصاویر دریافت شده موجود می‌باشند. مرحله بعد تبدیل تابش طیفی به دمای درخشندگی در سطح سنجنده است (علیپور و همکاران، ۱۳۸۹):

$$T_{\text{sensor}} = \frac{K2}{Ln \left(\frac{K1}{L_\lambda} + 1 \right)} \quad (2)$$

که در آن T_{sensor} دمای درخشندگی (درجه کلوین)، L_λ تابش طیفی، Ln لگاریتم نپرین، K_1 و K_2 ثابت‌های کالیبراسیون سنجنده‌اند که از فایل مرجع برداشت شدند.

۳-۱- روش پنجره تکی (MW)

روابط مورد استفاده در این روش بدین صورت‌اند (Maimaitiyiming et al., 2014; Zhang et al., 2006):

$$T_s = \left(\frac{a(1-C-D) + [b(1-C-D) + C + D]T_{\text{sensor}} - DT_a}{c} \right) \quad (3)$$

که $a = -67/355351$ و $b = 0/458606$ ، $C = \varepsilon\tau$ ، $D = [1 + (1 - \varepsilon)\tau]$ ، ε گسیلندگی سطح زمین، T_{sensor} دمای درخشندگی در سطح سنجنده، τ قابلیت عبور جو، T_a میانگین مؤثر دمای هوا و T_s دمای سطح زمین (درجه کلوین) است. روش MW نیاز به محاسبه قابلیت عبور دهندگی جو و میانگین مؤثر دمای هوا دارد. برای میانگین مؤثر دمای هوا (T_a) روابط چندی بیان شده که برای مناطق گوناگون جهان متفاوت است (Zhang et al., 2006):

$$T_a = 16/011 + 0/92621 T_0 \quad \text{تابستان}$$

$$T_a = 19/2704 + 0/91118 T_0 \quad \text{زمستان}$$

قابلیت عبور جو از طریق محتوای بخار آب هوا (W) محاسبه می‌شود (همان).

$$W = 0/0981 \times \{10 \times 0/6108 \times \exp \left[\frac{17/27 * (T_0 - 273/15)}{237/3 + (T_0 - 273/15)} \right] \times RH\} + 0/1697 \quad (5)$$

که در آن T_0 دمای هوای نزدیک سطح و RH نیز رطوبت نسبی است که از ایستگاه‌های هواشناسی دریافت می‌شوند. جدول ۲ معادلات تخمین قابلیت عبور

1. water vapor content

دمای درخشندگی در سطح سنجنده، $b_\gamma = \frac{c_2}{\lambda}$ برای باندهای حرارتی ۱۰ و ۱۱ لندست ۸ به ترتیب برابر با ۱۳۲۴ و ۱۱۹۹ کلوین است. Ψ_1 و Ψ_2 و Ψ_3 نیز با استفاده از مجموع محتوای بخار آب هوا (w) (همانند روش MW) محاسبه می‌شوند (همان).

رابطه (۹)

$$\Psi_1 = 0/14714 w^2 - 0/15583 w + 1/1234$$

$$\Psi_2 = -1/1836 w^2 - 0/37607 w - 0/52894$$

$$\Psi_3 = -0/04554 w^2 + 1/8719 w - 0/39071$$

۳-۳- روش تک کانالی (Munoz & Sobrino, 2003):

روش مورد نظر در استخراج LST طبق معادلات زیر است (Rozenstein et al., 2014):

$$T_s = \gamma \left[\frac{1}{\varepsilon} (\Psi_1 L_{sen} + \Psi_2) + \Psi_3 \right] + \delta$$

$$\gamma \approx \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma L_{sen}} \quad \text{رابطه (۱۰)}$$

$$\delta \approx T_{sen} - \frac{T_{sen}^2}{b_\gamma}$$

که در آن T_s دمای سطح زمین، ε گسیلندگی سطح زمین، T_{sen} دمای درخشندگی در سطح سنجنده، $b_\gamma = \frac{c_2}{\lambda}$ در باندهای ۱۰ و ۱۱ لندست ۸ به ترتیب برابر با ۱۳۲۴ و ۱۱۹۹ کلوین، L_{sen} تابش طیفی، Ψ_1 ، Ψ_2 و Ψ_3 توابع اتمسفری به شمار می‌روند. روش دیگر برای تقریب توابع اتمسفری استفاده از W است که از برآزش تابع چند جمله‌ای درجه دوم به دست می‌آید ($\Psi = cw$).

$$\begin{bmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c11 & c12 & c13 \\ c21 & c22 & c23 \\ c31 & c32 & c33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w^2 \\ w \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{رابطه (۱۱)}$$

مقادیر c_{ij} با شبیه‌سازی داده‌ها به دست می‌آید که خیمنس- مونیوس و همکاران مقادیر زیر را برای ضرایب c به دست آوردند:

رابطه (۱۲)

$$c = \begin{bmatrix} 0/04019 & 0/02916 & 1/01523 \\ -0/38333 & -1/50294 & 0/20324 \\ 0/00918 & 1/36072 & -0/27514 \end{bmatrix}$$

درخشندگی به دمای جنبشی مورد نیاز است زیرا دمای درخشندگی دمایی است که جسم سیاه به منظور تولید رادیانس معلوم در طول موج معلوم (۱۱/۵ میکرومتر) دارد (شکیبا و همکاران، ۱۳۸۸). در حالت کلی دو روش برای استخراج گسیلندگی وجود دارد: ۱. محاسبه گسیلندگی از طریق شاخص گیاهی تفاضلی نرمال شده (NDVI)؛ ۲. محاسبه گسیلندگی با استفاده از نقشه کاربری/ پوشش اراضی. در این تحقیق در تمامی شیوه‌های استخراج LST، از هر دو روش بالا برای به دست آوردن گسیلندگی استفاده شده است. پس از محاسبه NDVI، گسیلندگی از طریق روابط جدول ۳ به دست می‌آید:

جدول ۳. روابط گسیلندگی و شاخص NDVI

منبع: Liu & Zhang, 2011

NDVI	گسیلندگی سطح زمین (ε)
NDVI < -0/۱۸۵	۰/۹۹۵
-0/۱۸۵ ≤ NDVI ≤ 0/۱۵۷	۰/۹۷
0/۱۵۷ ≤ NDVI ≤ 0/۷۲۷	۱/۰۰۹۴ + 0/۰۴۷ Ln (NDVI)
0/۷۲۷ < NDVI	۰/۹۹

۳-۲- روش تک کانالی

این روش که خیمنس- مونیوس و سوپرینو آن را توسعه دادند به منظور استخراج LST در سنجنده‌های TM و ETM+ به کار می‌رود ولی پس از اجرای آن روی تصاویر لندست ۸ دیده شد که این خوارزمی می‌تواند نتایج مطلوبی عرضه کند. پس از محاسبه تابش طیفی و دمای درخشندگی در سطح سنجنده، LST با استفاده از روابط زیر به دست می‌آید (Zhang et al., 2006):

$$LST = (\gamma [\varepsilon^{-1} (\Psi_1 L_\lambda + \Psi_2) + \Psi_3] + \delta) \quad \text{رابطه (۸)}$$

$$\gamma = \left\{ \frac{c_2 L_\lambda}{T_{sensor}^2} \left[\frac{\lambda^4}{c_1} L_\lambda + \lambda^{-1} \right] \right\}^{-1}$$

$$\delta = -\gamma L_\lambda + T_{sensor}$$

که در آن $c_1 = 1.19104 \times 10^8$ ، $c_2 = 14387.7$

طول موج مؤثر^۱ است و برای باند ۱۰ و ۱۱ لندست ۸،

به ترتیب برابر با ۱۰/۹۰۴ و ۱۲/۰۰۳ میکرومتر است. T_s

دمای سطح زمین، ε گسیلندگی سطح زمین، T_{sen}

1. effective wavelength

2. second-order polynomial

۳-۴- روش توازن انرژی برای سطح زمین (سبال) (Waters et al., 2002):

روش سبال به منظور تخمین تبخیر و تعرق با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به کار می‌رود که در آن با استفاده از معادلات گوناگون، تبخیر و تعرق تخمین زده می‌شود. در روش سبال، ابتدا با استفاده از معادلات گوناگون LST تخمین زده می‌شود و در مرحله بعد، با استفاده از نقشه LST تولید شده و روش پیکسل سرد و پیکسل گرم نقشه تبخیر و تعرق تهیه می‌شود. بنابراین، با استفاده از معادلات این روش می‌توان نقشه LST را تهیه کرد. روابط مورد نیاز برای استخراج LST به روش سبال به صورت پی‌درپی در زیر آمده است.

رابطه (۱۳)

$$R_c = \frac{L\lambda - R_p}{\tau_{NB}} - (1 - \epsilon_{NB}) R_{sky} - 0.26 \exp(-7.77 \times 10^{-4} [277/15 - T_a]^2)$$

$$R_{sky} = (1/8.07 \times 10^{-10}) T_a^4 [1$$

$$T_s = \left(\frac{K_2}{\ln\left(\frac{\epsilon_{NB} K_1}{R_c} + 1\right)} \right)$$

که در آن R_c رادیانس حرارتی تصحیح‌شده، R_p رادیانس مسیر در باند حرارتی، τ_{NB} قابلیت عبور اتمسفری در باند حرارتی، ϵ_{NB} گسیلندگی سطحی، R_{sky} تابش آسمان صاف در باند حرارتی، T_a دمای هوای نزدیک سطح، K_1 و K_2 ثابت‌های کالیبراسیون سنجنده‌اند. لازم به یادآوری است که محاسبه مقادیر R_p و τ_{NB} نیاز به مدل‌های انتقال تابش اتمسفری همچون Modtran دارد. در صورت موجود نبودن مقادیر بالا (که محاسبه آن‌ها پیچیده و دشوار است) می‌توان آن‌ها را به ترتیب برابر با ۰ و ۱ در نظر گرفت. گسیلندگی سطح زمین با استفاده از روابط جدول ۴ به دست می‌آید:

جدول ۴. روابط گسیلندگی سطح زمین و شاخص‌های

LAI و NDVI

منبع: ملک‌پور و همکاران، ۱۳۸۹

$LAI < 3$	$\epsilon_{NB} = 0.97 + 0.037LAI$
$NDVI > 0$	$\epsilon_{NB} = 0.98$
$LAI \geq 3$	$\epsilon_{NB} = 0.99$
$NDVI < 0$ برای آب	$\alpha < 0.47$
$NDVI < 0$ برای برف	$\alpha \geq 0.47$
	$\epsilon_{NB} = 0.99$

۳-۵- روش دفتر علوم لندست (Feng et al., 2013):

در این روش، LST با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$LST = \frac{T_{sensor}}{1 + \left(\lambda \frac{T_{sensor}}{\rho}\right) \ln(\epsilon)} \quad \text{رابطه (۱۴)}$$

$$\rho = \frac{hc}{k} = (mK) 1.438$$

که در آن T_{sensor} دما در سطح سنجنده (کلوین)، λ طول موج باند مورد نظر (۱۱/۵ میکرومتر)، h ثابت پلانک ($1/38 \times 10^{-23}$), c سرعت نور ($2/998 \times 10^8$), k ثابت بولتزمن ($1/38 \times 10^{-23}$) و ϵ گسیلندگی سطح زمین است.

۳-۶- روش استفان-بولتزمن (Thi et al., 2008):

سنجنده‌های مادون قرمز حرارتی تابش را در قسمت بالایی اتمسفر اندازه‌گیری می‌کنند که به این مقدار دمای درخشندگی گفته می‌شود و با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$TB = \left(\frac{1}{\ln\left(\frac{2hc^2\lambda^{-5}}{B_\lambda} + 1\right)} \right) \left(\frac{hc}{k\lambda} \right) \quad \text{رابطه (۱۵)}$$

که در آن h ثابت پلانک، c سرعت نور، λ طول موج تابش گسیل شده (متر) و B_λ تابش جسم سیاه است (Van and Xuan-Bao, 2008). در صورت معلوم بودن گسیلندگی، LST با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$B = \epsilon \sigma T_s^4 = \sigma T_B^4$$

$$T_s = \frac{T_B}{\sqrt[4]{\epsilon}} \quad \text{رابطه (۱۶)}$$

۳-۷- روش پنجره مجزا:

جدیدترین روش برای استخراج LST برای تصویر لندست ۸ روش پنجره مجزا است که روزنشتاین و همکاران^۱ (۲۰۱۴) آن را توسعه دادند. در این روش تأکید اصلی روی محاسبه پارامتری با عنوان L_i است (رابطه ۱۷):

$$L_i = \frac{Bi(T)}{\left[\frac{\partial Bi(T)}{\partial T}\right]} \quad \text{رابطه (۱۷)}$$

1. Rozenstein et al.

شایان ذکر است با توجه به فصل سال، مقادیر قابلیت عبور اتمسفری (τ) با استفاده از جدول ۶ محاسبه می‌شود. از آن‌جا که در جدول مورد نظر برای زمستان معادله‌ای درج نشده، می‌توان مقادیر تصاویر زمستانه را با استفاده از استاندارد ۱۹۷۶ امریکا محاسبه کرد. هر چند مقادیر محاسبه‌شده در هریک از نمایه‌های یادشده اختلافی بسیار جزئی با هم دارند؛ نکته اساسی این است که مقادیر قابلیت عبور اتمسفری در زمستان و تابستان برای لندست‌های ۷ و پیش‌تر از آن موجود است و با استفاده از آن به راحتی می‌توان مقادیر مربوط را محاسبه کرد. روش SW بیشتر برای سنجنده‌های با عرض برداشت وسیع ایجاد شده است؛ بنابراین برای سنجنده‌های مذکور تصحیح زاویه زینت، به‌منظور برآورد قابلیت عبور اتمسفری ضروری است. اما در مورد سنجنده TIRS با ارتفاع ۷۰۵ کیلومتر و عرض برداشت ۱۸۵ کیلومتر بیشترین مقدار زاویه زینت در حدود $7/5^\circ$ است؛ بنابراین، اثر زاویه زینت روی قابلیت عبور اتمسفری برای هر دو باند LWIR لندست بسیار ناچیز و جزئی است. در نتیجه قسمت θ در معادلات بالا قابل حذف خواهد بود. پس از استخراج نقشه‌های LST، به‌دلیل تعدد روش‌های مورد استفاده و به‌دلیل این‌که برای هر روش در این تحقیق از تمامی روش‌های استخراج گسیلندگی (روش‌های NDVI و کاربری/پوشش زمین) استفاده شده است، به‌ازای هر تصویر ۱۴ نقشه حرارتی به‌دست می‌آید. همین‌طور به‌دلیل ارائه بهترین نتیجه از بین روش‌های مورد استفاده، لازم خواهد بود از روش‌های آماری برای انتخاب بهترین شیوه استفاده شود. یکی از شاخص‌های پرکاربرد شاخص میانگین خطای مطلق است (رنجبران، ۱۳۸۷):

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^k |X_k - Y_k|}{k} \quad \text{رابطه (۲۱)}$$

که در آن k تعداد داده‌ها و $X_k - Y_k$ اختلاف بین نتایج حاصل از روش سنجش از دور با داده‌های زمینی است. مقادیر MAE هرچه به صفر نزدیک‌تر باشند به این معناست که خطایی کمتر از حالت استاندارد وجود دارد (شهبابی‌فر و همکاران، ۱۳۸۹).

بنابراین با مشاهده شکل شماره ۶ مشخص می‌شود که ضرایب a_i و b_i برای باند ۱۰ به ترتیب برابر با ۰/۳۸۷ و ۵۲/۰۱ است. پس از محاسبه a_i و b_i با روابط زیر محاسبه می‌شود:

رابطه (۲۰)

$$C_i = \varepsilon_i \tau_i(\theta)$$

$$D_i = [1 - \tau_i(\theta)][1 + (1 - \varepsilon_i) \tau_i(\theta)]$$

$$E_0 = D_{11}C_{10} - D_{10}C_{11}$$

$$E_1 = \frac{D_{11}(1 - C_{10} - D_{10})}{E_0}$$

$$E_2 = \frac{D_{10}(1 - C_{11} - D_{11})}{E_0}$$

$$A = \frac{D_{10}}{E_0}$$

$$A_0 = E_1 a_{10} + E_2 a_{11}$$

$$A_1 = 1 + A + E_1 b_{10}$$

$$A_2 = A + E_2 b_{11}$$

$$T_s = A_0 + A_1 T_{\text{sensor}10} - A_2 T_{\text{sensor}11}$$

که در آن ε_i گسیلندگی سطح زمین در باند i ، $\tau_i(\theta)$ قابلیت عبور اتمسفری برای زاویه زینت معین در باند i ، T_s دمای سطح زمین، و $T_{\text{sensor}10}$ و $T_{\text{sensor}11}$ به ترتیب دمای درخشندگی باندهای ۱۰ و ۱۱، همچنین مقادیر A_0 ، A_1 ، A_2 ضرایبی‌اند که از طریق قابلیت عبور اتمسفری و گسیلندگی محاسبه می‌شوند. جدول ۶ رابطه قابلیت عبور اتمسفری و محتوای بخار آب اتمسفری را نمایش می‌دهد.

جدول ۶. رابطه قابلیت عبور اتمسفری و محتوای بخار آب اتمسفری

در دامنه $0.5 - 3 \text{ (g/cm}^2\text{)}$

منبع: Liu & Zhang, 2011

نماینه	معادله برآورد
استاندارد ۱۹۷۶ امریکا	$\tau_{10} = -0.1146w + 1.0286$ $\tau_{11} = -0.1868w + 1.0083$
تابستان عرض‌های میانه	$\tau_{10} = -0.1124w + 1.0235$ $\tau_{11} = -0.1846w + 1.0078$

۴- نتایج

جدول ۷. معادلهٔ مربوط به رابطهٔ دمای خاک و دمای هوا در منطقهٔ مورد مطالعه

نام سنجنده	معادله	ضریب رگرسیون
OLI/TIRS	$y = 0.659x + 3.66$	$R^2 = 0.964$

MAE، داده‌های دمای خاک همهٔ ایستگاه‌ها با داده‌های LST در همان نقاط مقایسه شد. رابطهٔ رگرسیونی بالا با استفاده از دادهٔ دمای هوا و دمای ۵ سانتی‌متری خاک در طی ۱۷ سال (از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۳) به‌دست آمده است. به‌عبارتی، سعی شده است با استفاده از همهٔ داده‌های ایستگاه‌های هواشناسی موجود، رابطهٔ دمای هوا و دمای ۵ سانتی‌متری خاک به‌دست آید تا با این شیوه بتوان دادهٔ دمای ۵ سانتی‌متری خاک ایستگاه فرودگاه پیام را بازسازی کرد. موضوع اصلی این که رابطهٔ دمای هوا و دمای خاک به پارامترهای گوناگونی همانند پوشش سطح، رطوبت هوا، ارتفاع محل، زاویهٔ تابش خورشید و نوع مواد بستگی دارد و می‌توان گفت تمامی موارد بالا در مقیاس جغرافیایی در ایستگاه‌های مورد مطالعه، بسیار به هم نزدیک‌اند و اختلاف بسیار ناچیزی با هم دارند. در این‌جا از این اختلافات ناچیز چشم‌پوشی می‌شود و تنها (و مهم‌ترین) عامل دخیل در آن، عامل دمای هوا (که داده‌های آن موجود بودند) در نظر گرفته شد و سعی شد با استفاده از بیشترین تعداد سال موجود، رابطهٔ دمای هوا و دمای خاک در منطقهٔ مورد مطالعه به‌دست آید (ابراهیمی هروی، ۱۳۹۳). نکته‌ای که باید مدنظر قرار گیرد این است که برای به‌دست‌آوردن و شبیه‌سازی رابطهٔ یادشده در مقیاس‌های بزرگ جغرافیایی باید عوامل بسیار زیادی را در آن دخیل کرد تا رابطهٔ به‌دست‌آمده بیشترین نزدیکی را به واقعیت داشته باشد. در تحقیقاتی از این نوع برای مقایسهٔ روش‌ها و معرفی بهترین شیوه، داده‌های ماهواره‌ای را با داده‌های ایستگاه زمینی که چند نقطه خواهند بود مقایسه کرده‌اند. همچنین تغییر در پوشش زمین باعث تغییر در دمای خاک و در نهایت دمای هوا می‌شود.

در ابتدا انواع روش‌های استخراج LST روی تصاویر مورد استفاده اجرا شدند. به‌دلیل تعدد روش‌های اجراشده، ابتدا با استفاده از شاخص آماری MAE بهترین روش انتخاب شد. این کار براساس مقایسهٔ نقشه‌های حرارتی حاصل از انواع روش‌های استخراج LST، با داده‌های دمای ۵ سانتی‌متری خاک ایستگاه هواشناسی موجود در منطقهٔ مورد مطالعه انجام گرفت. شایان ذکر است دمای ۵ سانتی‌متری خاک با دمای سطح خاک رابطهٔ مستقیم و کاملی دارد؛ بدین معنا که با افزایش دمای سطح خاک دمای اعماق متفاوت خاک نیز تغییر می‌کند و تنها اختلاف موجود اختلاف زمانی این دو با هم است. به‌عبارتی، افزایش یا کاهش دمای سطح خاک در ابتدا رخ می‌دهد و پس از آن افزایش یا کاهش دما در اعماق گوناگون خاک پدید می‌آید. تأخیر زمانی یادشده با عمق خاک رابطهٔ مستقیمی دارد؛ یعنی هرچه عمق خاک بیشتر باشد اختلاف زمانی بیشتر است و برعکس (علوی‌پناه، ۱۳۸۵). با توجه به اینکه برای مشخص کردن بهترین روش، داده‌های دمای خاک ایستگاه‌های هواشناسی با پیکسل متناظرشان در نقشه‌های LST مقایسه شده‌اند، نیاز است داده‌های دمای خاک ایستگاه‌ها بی‌نقص و در دسترس باشند. داده‌های دمای خاک ایستگاه هواشناسی فرودگاه پیام بسیار ناقص بوده است. بنابراین با استفاده از رگرسیون بین داده‌های دمای هوا و داده‌های دمای خاک ایستگاه‌های دیگر، داده‌های دمای خاک ایستگاه فرودگاه پیام بازسازی شد و در مرحلهٔ بعد، نقشه‌های LST با داده‌های دمای ۵ سانتی‌متری خاک مورد مقایسه قرار گرفت و بهترین روش از بین آن‌ها انتخاب شد. روابط رگرسیونی حاصل از ارتباط دمای هوا و دمای ۵ سانتی‌متری خاک در منطقهٔ مورد مطالعه در جدول ۷ نمایش داده شده است.

بنابراین، با استفاده از رابطهٔ رگرسیونی بالا، داده‌های دمای خاک ایستگاه هواشناسی فرودگاه پیام بازسازی شد و در مرحلهٔ بعد با استفاده از شاخص

تعیین مناسب‌ترین روش استخراج دمای سطح زمین با استفاده از تصاویر ...

در ادامه، نتایج اجرای شاخص آماری MAE روی داده‌های جدول ۸ نمایش داده می‌شود (جدول‌های ۹ و ۱۰). نکته بسیار اساسی این‌که با مشاهده نتایج جدول‌های ۹ و ۱۰، به خوبی می‌توان اولویت‌بندی روش‌ها را مشاهده کرد و به‌نوعی قابلیت روش‌های گوناگون برای تخمین LST را در نظر گرفت. در این تحقیق، با استفاده از محاسبه شاخص مذکور در تاریخ‌های متفاوت سعی شد قابلیت روش‌های گوناگون در تاریخ‌های متفاوت نیز مشخص شود و این به‌نوعی دقت تخمین LST در فصل سال را بازگو می‌کند.

همین‌طور نتایج روش‌های استخراج LST باید با داده‌های زمینی دمای خاک مقایسه شود و این کار با داده‌های دمای هوا اشتباه است و نتایجی دور از واقعیت به‌دست خواهد داد زیرا خروجی تمامی روش‌های LST دمای سطح زمین است. بنابراین در این تحقیق، برای تخمین دقیق‌تر و بالابردن دقت نتایج تحقیق لازم بود که داده‌های دمای خاک همه ایستگاه‌های موجود در منطقه مورد مطالعه آماده شوند. اعداد جدول نتایج اجرای روش‌های گوناگون‌اند که در آنها گسیلندگی به روش NDVI محاسبه شده است.

جدول ۸. نتایج اجرای روش‌های گوناگون و داده‌های دمای زمینی برای ایستگاه‌های هواشناسی موجود در منطقه مورد مطالعه

شماره	کرج				فرودگاه پیام				چیتگر				هشتگرد				روش‌ها
	باند	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	۴	۱	۲	۳	
۱۰	۱۸/۷	۳۱	۵	۳۷/۲	۲۲/۹	۳۳/۲	۵/۱	۳۴۶	۲۵/۹	۳۲/۸	۷/۸	۴۴/۷	۲۳/۳	۳۲/۵	۷/۷	۴۳/۵	دفتر علوم
۱۱	۱۶/۲	۲۸/۴	۳/۱	۳۴/۸	۲۰/۵	۳۰/۱	۳/۱	۴۳	۱۶/۲	۳۰/۱	۶/۲	۴۱/۷	۲۱/۸	۳۰/۳	۵/۶	۴۰/۸	لندست
۱۰	۲۲/۵	۳۶/۲	۵/۵	۴۱/۷	۲۴/۳	۳۷/۶	۵/۶	۵۰	۲۷/۶	۳۸/۳	۸/۶	۴۸/۱	۲۴/۷	۳۸	۸/۴	۴۶/۶	پنجره تکی
۱۱	۱۹/۷	۳۳/۲	۳/۴	۳۸/۷	۲۱/۶	۳۴/۲	۳/۵	۴۶	۲۵/۳	۳۵/۲	۶/۸	۴۴/۴	۲۳/۱	۳۵/۵	۶/۲	۴۲/۳	سبال
۱۰	۱۸/۷	۳۱/۹	۵	۳۸/۱	۲۲	۳۴/۱	۵/۱	۴۶/۴	۲۶	۳۳/۷	۷/۹	۴۴/۶	۲۳/۳	۳۳/۴	۷/۸	۴۲/۶	سبال
۱۱	۱۶/۴	۲۹/۵	۳/۲	۳۵/۷	۲۰/۶	۳۱/۱	۳/۳	۴۳/۲	۲۴	۳۱/۲	۶/۳	۴۱/۹	۲۲	۳۱/۴	۵/۸	۴۰/۹	تک‌کانالی
۱۰	۲۳/۴	۳۷/۵	۵/۸	۴۶/۹	۲۵/۳	۳۹	۵/۹	۵۵/۴	۲۸/۵	۳۹/۶	۸/۹	۵۳/۴	۲۵/۷	۲۹/۳	۸/۷	۵۲	(مونبوس و سوپرینو)
۱۱	۲۱	۳۵	۳/۷	۴۳/۷	۲۲/۸	۳۶	۳/۸	۵۱/۲	۲۶/۴	۳۷	۷/۱	۴۹/۶	۲۴/۲	۳۷/۳	۶/۵	۴۸/۵	تک‌کانالی
۱۰	۲۲/۵	۳۶/۲	۵/۶	۴۳/۶	۲۲/۲	۳۷/۶	۵/۶	۵۱/۵	۲۷/۴	۳۸/۳	۸/۵	۴۹/۷	۲۴/۶	۳۸	۸/۴	۴۸/۳	(مونبوس و همکاران)
۱۱	۲۰/۱	۳۳/۶	۳/۷	۴۰/۵	۲۱/۸	۳۴/۵	۳/۷	۴۷/۴	۲۵/۳	۳۵/۶	۶/۹	۴۶	۲۳/۲	۳۵/۹	۶/۳	۴۴/۹	پنجره مجزا
---	۱۷/۳	۲۹/۳	۴/۵	۳۷/۲	۲۱/۸	۳۲/۷	۴/۶	۴۷	۲۴/۴	۳۱/۲	۷/۲	۴۴/۸	۲۱/۱	۳۰/۴	۷/۴	۴۲/۸	استفان-بولتزمن
۱۰	۲۲/۶	۳۵/۱	۵/۷	۴۰/۵	۲۳/۶	۳۶/۳	۵/۸	۴۶/۹	۲۶/۶	۳۷/۱	۸/۶	۴۵/۴	۲۴	۳۶/۸	۸/۴	۴۴/۲	دمای هوا
۱۱	۲۰/۱	۳۲/۵	۳/۸	۳۰	۲۱/۲	۳۳/۲	۳/۸	۴۳/۶	۲۴/۵	۳۴/۴	۷	۴۲/۳	۲۲/۵	۳۴/۶	۶/۳	۴۱/۴	دمای خاک
---	۱۶/۹	۲۳/۵	۶	۳۱	۱۶	۲۴/۲	۹/۲	۳۳/۶	۲۰/۹	۲۴	۲	۳۳/۴	۱۴/۵	۲۰	۳/۵	۲۹	
---	۲۲	۲۸/۶	۱/۴	۳۶/۸	۱۸/۷	۳۱/۳	۸/۴	۴۵/۵	۲۳/۱	۳۱/۳	۳/۱	۴۴/۲	۲۱/۵	۲۷/۲	۱/۳	۴۰/۶	

اعداد ۱، ۲، ۳ و ۴ در ستون جدول به ترتیب تاریخ‌های ۱۳۹۲/۰۸/۰۳، ۱۳۹۲/۰۲/۲۸، ۱۳۹۲/۰۱/۲۳ و ۱۳۹۲/۰۴/۱۴ را نشان می‌دهند.

جدول ۹. نتایج اولویت‌بندی روش‌های مورد استفاده به منظور استخراج LST به کمک شاخص آماری MAE در باندهای حرارتی لندست ۸

روش‌ها	شماره باند	MSE	اولویت‌بندی روش‌های استخراج LST به همراه باند مربوطه
دفتر علوم لندست	۱۰	۱۱/۰۲	سبال - ۱۱
پنجره تکی	۱۱	۱۰/۸	پنجره مجزا
	۱۰	۳۲/۹	دفتر علوم لندست - ۱۱
	۱۱	۱۳/۳۲	دفتر علوم لندست - ۱۰
	۱۰	۱۲/۷	پنجره تکی - ۱۱
سبال	۱۱	۷/۹۸	استفان-بولتزمن - ۱۱
تک‌کانالی (مونبوس و سوپرینو)	۱۰	۶۱/۱۴	سبال - ۱۰
تک‌کانالی (مونبوس و همکاران)	۱۱	۲۹/۶	تک‌کانالی (Munoz و همکاران) - ۱۱
	۱۰	۳۶/۲	استفان-بولتزمن - ۱۰
	۱۱	۱۵/۹	تک‌کانالی (Munoz و Sobrino) - ۱۱
پنجره مجزا	---	۸/۳	پنجره تکی - ۱۰
استفان-بولتزمن	۱۰	۲۳/۲	تک‌کانالی (Munoz و همکاران) - ۱۰
	۱۱	۱۳/۵	تک‌کانالی (Munoz و Sobrino) - ۱۰

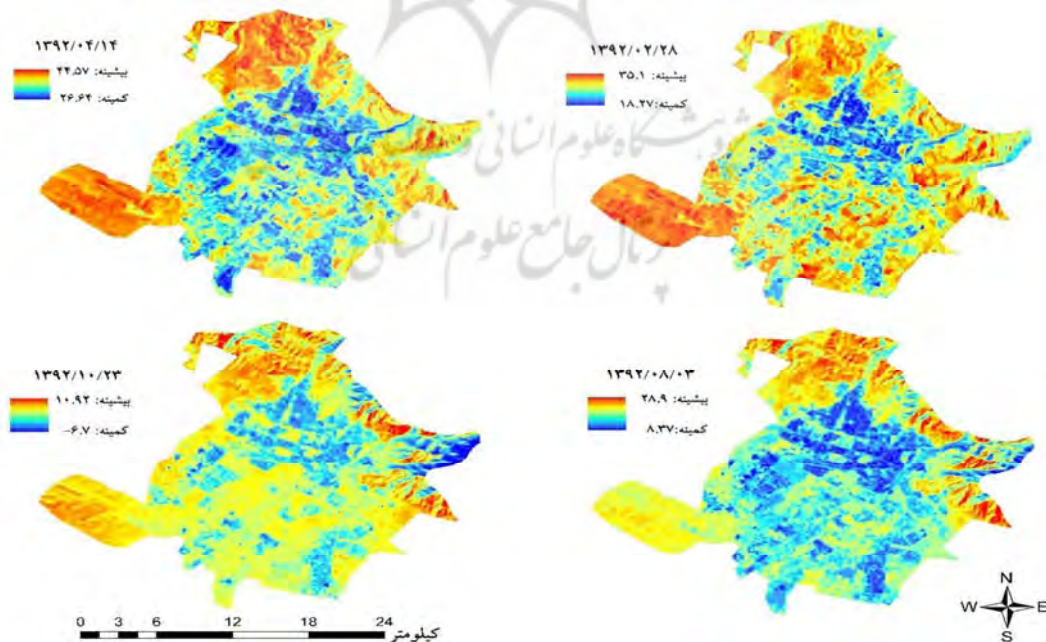
۵- بحث و نتیجه گیری

منطقه مورد مطالعه در این تحقیق کلان شهر کرج است که در سال های اخیر رشد جمعیتی بی سابقه ای داشته است. بنابراین به علت این جایگاه ویژه، تحقیق حاضر در پی آشکارسازی نقشه دمای کرج با استفاده از تصاویر لندست ۸ و به کمک تمامی روش های موجود برای استخراج LST است. مقدار گسیلندگی پارامتر مهم و تأثیرگذار در تخمین مقدار دقیق تر LST محسوب می شود که در تمامی شیوه های مورد استفاده، دو روش NDVI و کاربری اراضی به کار رفته است. نتایج مقایسه روش ها در تاریخ های متفاوت با استفاده از شاخص آماری MAE نشان داد بهترین روش برای برآورد نزدیک تر LST به داده های زمینی دمای خاک، باند ۱۱ روش سبال است. با بررسی نتایج شاخص آماری

در ادامه، نتایج حاصل از اجرای شاخص MAE در فصل های متفاوت سال نمایش داده می شود (جدول ۱۰). با ملاحظه جدول نتایج، مشخص می شود بهترین نتیجه از نظر نزدیکی به داده های زمینی، روش سبال باند ۱۱ است که اختلافی بسیار جزئی با روش پنجره مجزا دارد و از نظر تاریخ نیز بهترین نتایج مربوط به تاریخ های فصل سرد سال (نیمه دوم سال) است. در ادامه، نقشه های حرارتی تولید شده از طریق اجرای روش های گوناگون نمایش داده شده است (شکل ۷). به دلیل فراوانی روش های مورد استفاده و نیز محدودیت صفحات، فقط نتایج اجرای بهترین روش نمایش داده می شود. شکل ۷ نقشه های حرارتی تولید شده به روش سبال باند ۱۱ (مناسب ترین روش شناخته شده) را نشان می دهد.

جدول ۱۰. نتایج اولویت بندی روش های مورد استفاده به تفکیک تاریخ به کمک شاخص آماری MAE

تاریخ				مجموع میانگین خطای مطلق
۲۰۱۳/۰۷/۰۵	۲۰۱۴/۰۱/۱۳	۲۰۱۳/۰۵/۱۸	۲۰۱۳/۱۰/۲۵	
۴۰/۹	۸/۷	۳۷/۲	۱۹/۴	



شکل ۷. نقشه دمای سطح زمین به روش سبال (باند ۱۱) در کلان شهر کرج

نشان داد روش SW، نسبت به SC، در تخمین LST نتایج دقیق‌تر و با خطای کمتری دارد. روش SW از روش‌های مهم برآورد LST است که دقتی بیشتر از دیگر روش‌ها دارد. همچنین ویژگی مهم این خوارزمی حذف آثار جوی است. موضوع اساسی این است که با مشاهده جدول ۹ قابلیت بالای روش SW به‌خوبی مشهود است و بعد از روش سبال، بیشترین دقت را دارد (با اختلاف بسیار اندک). تحقیق المدرسی و همکاران نیز نشان داد که در تهیه نقشه حرارتی لندست ۸، باند ۱۱ دقتی بیشتر از باند ۱۰ در تخمین LST دارد و تأییدکننده تحقیق حاضر است.

۶- منابع

ابراهیمی هروی، ب.، ۱۳۹۳، تحلیل روابط بین جزایر حرارتی شهری و تغییرات کاربری / پوشش زمین با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای در کلانشهر کرج، پایان‌نامه کارشناسی ارشد سنجش از دور و GIS، دانشگاه شهید چمران اهواز، دانشکده علوم.

برنامه راهبردی و طرح ساختاری (جامع) شهر کرج، ۱۳۸۹، سازمان مسکن و شهرسازی استان البرز.

جهانبخش، س.، زاهدی، م.، والی‌زاده کامران، خ.، ۱۳۹۰، محاسبه دمای سطح زمین با استفاده از روش سبال و درخت تصمیم‌گیری در محیط RS، GIS. در بخش مرکزی شهر مراغه، جغرافیا و برنامه‌ریزی (دانشگاه تبریز)، سال ۱۶، شماره ۲۸، صص. ۴۲-۱۹.

دشتکیان، ک.، دهقانی، م.، ۱۳۸۶، بررسی دمای سطح زمین در ارتباط با پوشش گیاهی و توسعه شهری با استفاده از سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی در مناطق بیابانی، مطالعه موردی: منطقه یزد- اشکذر، پژوهش و سازندگی در منابع طبیعی، دوره ۲۰، شماره ۷۷، صص. ۷۹-۱۶۹.

در تاریخ‌های متفاوت، مشخص شد که دقت نتایج در تاریخ ۱۳۹۲/۱۰/۲۳ بیشتر از دیگر موارد است و پس از آن، تاریخ ۱۳۹۲/۰۸/۰۳ بیشترین دقت را دارد. بر این اساس، استفاده از تصاویر نیمه دوم سال در تخمین LST نتایج بهتر و نزدیک‌تری به واقعیت تولید می‌کند و به‌عبارتی، خطای استفاده از تصاویر نیمه اول سال بیش‌تر است. همچنین بررسی نتایج حاصل از اجرای روش‌های گوناگون نشان داد که باند ۱۱ نتایجی دقیق‌تر از باند ۱۰ در تخمین LST دارد. بنابراین، نتایج اصلی و پیشنهادی این تحقیق بدین قرار است: استفاده از شاخص NDVI برای برآورد گسیلندگی (با توجه به دقت بیشتر آن نسبت به روش کاربری اراضی)؛ استفاده از روش سبال برای استخراج LST (در مقایسه با تمامی روش‌های استفاده‌شده در این تحقیق، به‌لحاظ دقت بیشتر این روش)؛ ارجحیت باند حرارتی ۱۱ لندست ۸ به‌منظور استفاده از آن در تحقیقات مربوط به استخراج LST، اولویت استفاده از تصاویر نیمه دوم سال در استخراج LST و یافتن راهی برای افزایش دقت استخراج LST در تصاویر نیمه اول سال. تحقیق دشتکیان و دهقانی (۱۳۸۵) که در آن با استفاده از سه روش دفتر علوم لندست روش پیشنهادی و روش سئول نقشه LST را در اشکذر یزد استخراج کرده بودند، مشخص کرد روش‌های دفتر علوم لندست و روش پیشنهادی از دقت خوبی برخوردارند و نتایج بهتری داشته‌اند. تحقیقات علیپور و همکاران^۱ (۱۳۸۹)، ژانگ و همکاران^۲ (۲۰۰۶)، سویرینو و همکاران (۲۰۰۴) و لیو و ژانگ (۲۰۱۱) نیز که با استفاده از دو روش MW و SC اقدام به استخراج LST کرده بودند در نهایت این نتیجه را به‌دست آوردند که روش MW دقتی بیشتر از روش SC دارد. تحقیق روزنشتاین و همکاران (۲۰۱۴) که برای استخراج LST از روش SW استفاده شده بود مشخص کرد با اینکه باندهای حرارتی لندست ۸ قدرت تفکیک کمتری از ETM+ دارد (۱۰۰ متر، در مقایسه با ۶۰ متر)، قابلیت لندست ۸ در تخمین LST، با داشتن ۲ باند حرارتی بهتر است و نتایج بهتر و دقیق‌تری می‌دهد. تحقیق خیمنس- مونیوس و همکاران (۲۰۱۴)

1. Alipour et al.
2. Zhang et al.

- Feng, H., Zhao, X., Chen, F. & Wu, L., ۲۰۱۴, **Using Land Use Change Trajectories to Quantify the Effects of Urbanization on Urban Heat Island**, *Advances in Space Research*, 53(3), PP. 463–473.
- http://landsat.usgs.gov/band_designations_landsat_satellites.php.
- Jiménez-Muñoz, J.C., Sobrino, J., Skoković, D., Mattar, C. & Cristóbal, J., 2014, **Land Surface Temperature Retrieval Methods from Landsat-8 Thermal Infrared Sensor Data**, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(10), PP. 1840–1843 .
- Landsat 7 Science Data Users Handbook, National Aeronautics and Space Administration, PP: 1–186.
- Liu, L. & Zhang, Y., 2011, **Urban Heat Island Analysis Using the Landsat TM Data and ASTER Data: A Case Study in Hong Kong**, *Remote Sensing*, 3(7), PP. 1535–1552.
- Maimaitiyiming, M., Ghulam, A., Tiyip, T., Pla, F., Latorre-Carmona, P., Halik, Ü., Sawut, M. & Caetano, M., 2014, **Effects of Green Space Spatial Pattern on Land Surface Temperature: Implications for Sustainable Urban Planning and Climate Change Adaptation**, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 89, PP. 59–66.
- Rozenstein, O., Qin, Zh., Derimian, Y. & Karnieli, A., 2014, **Derivation of Land Surface Temperature for Landsat-8 TIRS Using a Split Window Algorithm**, *Sensors*, 14(4), PP. 5768–5780.
- Senanayake, I.P., Welivitiya, W.D.D.P. & Nadeeka, P.M., 2013, **Remote Sensing Based Analysis of Urban Heat Islands with Vegetation Cover in Colombo City, Sri Lanka Using Landsat-7 ETM+ Data**, *Urban Climate*, 5, PP. 19–35.
- Sobrino, J., Jimenez-Munoz, J.C. & Paolini, L., 2004, **Land Surface Temperature Retrieval from LANDSAT TM 5**, *Remote Sensing of Environment*, 90, PP. 434 – 440
- رنجبران، ه.، ۱۳۸۷، **آمار و احتمال و کاربرد آن در اقتصاد**، چاپ اول، تهران، انتشارات نور علم.
- شکیبا، ع.، ضیائی‌بان فیروزآبادی، پ.، عاشورلو، د.، نامداری، س.، ۱۳۸۸، **تحلیل رابطه کاربری و پوشش اراضی و جزایر حرارتی شهر تهران، با استفاده از داده‌های ETM+، سنجش از دور و GIS ایران**، سال اول، شماره اول، صص. ۵۶–۳۹.
- شهبابی فر، م.، عساری، م.، کوچک زاده، م.، میرلطفی، م.، ۱۳۸۹، **ارزیابی برخی از روش های تبخیر و تعرق گیاه مرجع چمن با استفاده از داده های لایسیمتری در شرایط گلخانه ای**، پژوهش آب در کشاورزی، دور، ۲۴، شماره ۱، صص. ۱۹–۱۳.
- علوی پناه، س.ک.، ۱۳۸۵، **سنجش از دور حرارتی و کاربرد آن در علوم زمین**، انتشارات دانشگاه تهران.
- علیزاده، الف.، ۱۳۸۷، **اصول هیدرولوژی کاربردی**، مشهد، انتشارات آستان قدس رضوی.
- ملک‌پور، پ.، طالعی، م.، رضائی، ی.، خوشگفتار، م.، ۱۳۸۹، **بررسی درجه حرارت سطح زمین و ارتباط آن با کلاس های پوشش- کاربری زمین شهری با استفاده از داد. سنجنده ETM+، مطالعه موردی شهر تهران**، همایش ملی ژئوماتیک.
- هاشمی، س.م.، علوی پناه، س.ک.، دیناروندی، م.، ۱۳۹۱، **ارزیابی توزیع مکانی دمای سطح زمین در محیط زیست شهری با کاربرد سنجش از دور حرارتی**، محیط‌شناسی، سال ۳۹، شماره ۱، صص. ۹۲–۸۱.
- Alipour, T., Sarajian, M.R. & Esmaily, A., 1389, **Land Surface Temperature Estimation from Thermal Band of Landsat Sensor, Case Study: Alashtar City**, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVIII-4/C7.

Van, T. & Xuan Bao, H.D., 2008, **A Study on Urban deVelopment through Land Surface Temperature by Using Remote Sensing: In Case of Ho Chi Minh City**, VNU Journal of Science, Earth Sciences, 24, PP. 160–167.

Waters, R., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R. & Bastiaanssen, W., 2002, **Surface Energy Balance Algorithms for Land**, a NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through The Idaho Department of Water Resources, PP. 1–98.

Xian, G. & Crane, M., 2006, **An Analysis of Urban Thermal Characteristics and Associated Land Cover in Tampa Bay and Las Vegas Using Landsat Satellite Data**, Remote Sensing of Environment, 104(2), PP. 147–156.

Zhang, H., Qi, Zh.F., Ye, X. & Chen, M., 2013, **Analysis of Land Use/Land Cover Change, Population Shift, and their Effects on Spatiotemporal Patterns of Urban Heat Islands in Metropolitan Shanghai, China**, Applied Geography, 44, PP. 121–133.

Zhang, J., Wang, Y. & Li, Y., 2006, **A C++ Program for Retrieving Land Surface Temperature from the Data of Landsat TM/ETM+ Band6**, Computers & Geosciences, 32, PP. 1796–1805.

