

Original Article



Monitoring of Evapotranspiration Rate in Tabriz City Using SEBAL Algorithm with GIS and TRS Integration

Received: 2023.01.12

Accepted: 2023.08.13

Ali Sayyadi,¹ Mohammad Javad Amiri,^{1*} , Mohammad Yazdi²

¹ Department of Environment and Safety, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

² Department of Geology of Mineral and Water Resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

EXTENDED ABSTRACT

Introduction: The intricate choreography of evaporation and transpiration plays a fundamental role in the delicate ballet of the water cycle, serving as a linchpin for ecological equilibrium. Regrettably, more than 0.72% of a nation's water reservoirs slip through our fingers due to this natural process. The significance of precise predictions for evaporation and transpiration reverberates across a myriad of applications, encompassing agriculture, water resource management, irrigation planning, and the intricate modeling of plant growth. Robust studies on evapotranspiration, especially within the domains of climate change, sustainable development, and the management of water resources, underscore its indispensable importance. Nevertheless, the scarcity of meteorological stations and the resource-intensive nature of ground-based data collection have propelled an exploration into the realm of remote sensing techniques. Remote sensing techniques, when armed with accurate and fitting outputs, emerge as invaluable instruments for unraveling the intricacies of actual evaporation and transpiration. Among the plethora of algorithms residing within remote sensing, the Sabal algorithm stands out as a beacon of precision. Executing an instantaneous surface energy balance for each pixel in a satellite image, this algorithm becomes a powerful instrument for crafting accurate estimations. This investigation centers on the vibrant city of Tabriz, nestled in the western expanse of East Azerbaijan Province, Iran.

Material and Methods: To unravel the enigmas of evaporation and transpiration in Tabriz, the Sabal algorithm and Landsat satellite images in sensors ("OLI_TIRS") spanning from 2013 to 2021 were enlisted. These images, procured from NASA, became the canvas for the meticulous strokes of remote sensing and geographic information systems (GIS). The harmonious fusion of thermal remote sensing techniques and GIS was orchestrated with precision, employing ARC GIS 10.8 and Envi 5.3 software for the intricate processes of data manipulation, analysis, and visualization.

Results and Discussion: The findings of this research unveiled a visual metamorphosis since 2017, as the orange and red tones of Land Surface Temperature (LST) underwent a discernible escalation. Prevailing pixels exhibited temperatures spanning from 315 to 320 degrees and 320 degrees and above, marking a conspicuous warming trend in the surveyed area. The Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) echoed this narrative, with yellow and red pixels (0.2-0.4) and (<0.6) illustrating an upward trajectory. The Brightness Temperature (BT) index joined the symphony of change, portraying an upward shift, as pixels in the 310-315 range yielded ground to 315-320 and 320 degrees and above. The tangible correlation between vegetation cover (NDVI) and land surface temperature resonated in the accurate depiction of the ascending trend in evaporation-transpiration from 2017 to 2021, particularly in the regions beyond the city center.

Conclusion: In conclusion, this research illuminates the surge in evaporation-transpiration beyond Tabriz's city center, notably in regions experiencing a documented temperature increase. The documented correlation underscores the profound influence of climate variations on this indispensable process. It is recommended that, considering the research results indicating noticeable changes in evapotranspiration outside the city center in the years 2017, 2019, and 2021, future investigations utilize daily, monthly, and annual formulas. Factors such as land-use changes and meteorological variables like temperature statistics, precipitation, etc., should be thoroughly examined in upcoming research. And this topic is of utmost importance for sustainability.

Keywords: SEBAL algorithm, Heat Island, Air temperature, Evaporation, Tabriz

How to cite this article:

Sayyadi, A., Amiri, M.J. and Yazdi, M., 2024. Monitoring Study of Evapotranspiration Rate in Tabriz City Using SEBAL Algorithm with GIS and TRS Integration. *Environ. Sci.* 22(1): 53-68

* Corresponding Author Email Address: mjamiri@ut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2023.1256



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

مطالعه‌ی پایش محور میزان تبخیر-تعرق در شهر تبریز با استفاده از الگوریتم SEBAL با یکپارچگی GIS و TRS



تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۲۲

علی صیادی^۱، محمد جواد امیری^{۱*}، محمد یزدی^۲

^۱ گروه محیط زیست و ایمنی،
دانشکده محیط زیست، دانشگاه
تهران، تهران، ایران

^۲ گروه زمین شناسی منابع معدنی و
آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه
شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده مبسوط

سابقه و هدف: تبخیر-تعرق یکی از بخش‌های مهم تعادل چرخه آب هستند. بیش از ۷۲ درصد از منابع آبی کشور به دلیل تبخیر-تعرق از دسترس خارج می‌شود. این عوامل، اهمیت و ضرورت استفاده بهینه از آب و پیش‌بینی دقیق میزان تبخیر و تعرق واقعی در کاربردهای مختلف از جمله کشاورزی و مدیریت منابع آب، اعم از برنامه‌ریزی آبیاری و مدل‌سازی رشد گیاه را نشان می‌دهد. برآوردهای دقیق تبخیر-تعرق در مطالعاتی از قبیل بررسی تغییرات اقلیمی، توسعه‌ی پایدار و کنترل منابع آبی نقش مهمی را ایفا می‌کند. با توجه به محدود بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و بالا بودن هزینه و زمان جمع‌آوری اطلاعات زمینی، استفاده از تکنیک‌های سنسجش از دور، در صورت برخورداری از خروجی دقیق و مناسب، می‌تواند ابزار مناسبی برای تعیین تبخیر-تعرق واقعی باشد. از جمله الگوریتم‌های موجود در سنسجش‌از دور که مربوط به برآورد تبخیر و تعرق که بر اساس روش‌های مبتنی بر بیلان انرژی است، می‌توان به الگوریتم سبال اشاره کرد. سبال یک الگوریتم سنسجش از دور است که تعادل انرژی سطحی لحظه‌ای را برای هر پیکسل از یک تصویر ماهواره‌ای انجام می‌دهد. همچنین محدوده مورد بررسی تبریز در غرب استان آذربایجان شرقی است.

مواد و روش‌ها: در این پژوهش با توجه به دقت و تطبیق‌پذیری بالا در الگوریتم سبال و همچنین تکنیک‌های سنسجش‌از دور برای برآورد تبخیر و تعرق از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده گردید. بدین منظور تصاویر ماهواره‌ای لندست در سنسجش‌های ("OLI_TIRS") و از سال ۲۰۱۳ - ۲۰۲۱ از سایت اداره‌ی کل ملی هوانوردی و فضا (NASA) تهیه شده است. همچنین در این پژوهش از فنون سنسجش از دور حرارتی و سامانه اطلاعات جغرافیایی که به شیوه‌ای مؤثر و کارآمد با یکدیگر ترکیب شدند استفاده شده است. در این مطالعه از نرم‌افزار Arc Gis ۱۰.۸ برای تهیه خروجی و از نرم‌افزارهای ۵.۳ Envi به منظور انجام پردازش، تجزیه و تحلیل تصاویر لندست استفاده شد.

نتایج و بحث: نتایج این پژوهش نشان داد (LST) از سال ۲۰۱۷ قسمت نارنجی و قرمز رنگ افزایش پیدا کرده است. پیکسل‌های با دمای ۳۱۵ درجه الی ۳۲۰ درجه و ۳۲۰ درجه به بالا در منطقه مورد بررسی غالب گردیده است. علاوه بر این شاخص NDVI نشان داد پیکسل‌های رنگ زرد و قرمز رنگ (۰/۴-۰/۲) و (>۰/۶) افزایش پیدا کرده است و همچنین ادامه شاخص BT افزایش پیدا کرده است و پیکسل‌های ۳۱۰-۳۱۵ درجه جای خود را به ۳۱۵-۳۲۰ درجه و ۳۲۰ درجه به بالا داده است. با توجه به ارتباط میان پوشش گیاهی (NDVI) و دمای سطح زمین که مستقیم بر محاسبه‌ی تبخیر-تعرق تأثیر می‌گذارد، نتایج تبخیر-تعرق بدرستی نشان داد روند صعودی در تبخیر-تعرق وجود داشته و از سال ۲۰۱۷ الی ۲۰۲۱ در قسمت خارج از مرکز شهر تبخیر-تعرق افزایش پیدا کرده است.

نتیجه‌گیری: با توجه به نتایج این پژوهش، تبخیر-تعرق در خارج از مرکز شهر افزایش پیدا کرده است، در قسمت‌هایی که افزایش دما ثبت شده میزان تبخیر-تعرق نیز افزایش پیدا کرده و رابطه معناداری ثبت شده است. همچنین پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج پژوهش که سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ تغییرات مشهودی در خارج از مرکز شهر در تبخیر-تعرق ثبت گردیده است در تحقیقات آینده از فرمول روزانه ماهانه و سالانه استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم سبال، جزایر حرارتی، دمای هوا، تبخیر، تبریز

استناد به این مقاله: صیادی، ع.، م.ج. امیری و م. یزدی. ۱۴۰۳. مطالعه‌ی پایش محور میزان تبخیر-تعرق در شهر تبریز با استفاده از الگوریتم SEBAL با یکپارچگی GIS و TRS. فصلنامه علوم محیطی. ۶۸-۵۳ (۱): ۲۲

* Corresponding Author Email Address: mjamiri@ut.ac.ir

DOI: 10.48308/envs.2023.1256



مقدمه

موارد داده‌های الگوریتم سبال با داده‌های میدانی در چین، هند، اسپانیا و پاکستان بدون هیچ‌گونه اصلاحی مطابقت دارند. در مطالعه‌ی *Jia et al.* (2009) تبخیر تعرق روزانه و سالانه را با استفاده از داده‌های MODIS از دلتای رودخانه زرد چین تخمین زده شد و به این نتیجه رسیدند که نوسانات معنادار ET در یک‌زمان معین و برای گونه‌های مختلف دارد. همچنین در مطالعه دیگری *et al.* (2013) Papadavid تبخیر-تعرق واقعی گیاهان بادام‌زمینی واقع در منطقه ماندریا قبرس را با استفاده از فناوری سنجش‌از‌دور تخمین زدند. *et al.* (2014) Sanaeinejad در یک مطالعه در سال ۲۰۱۴، مقادیر تبخیر-تعرق و بارش را با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس برای سه روز از سال در منطقه مشهد بررسی کردند و نتایج نشان داد که تصاویر مودیس و الگوریتم سبال توانایی خوبی در برآورد مقدار تبخیر-تعرق واقعی در مقیاس روزانه دارد. مطالعه دیگری توسط *et al.* (2010) Mohseni Saruri به منظور بررسی کارایی روش اصلاح‌شده سبال در محاسبه تبخیر و تعرق مناطق کوهستانی با استفاده از ماهواره‌ی مادیس، تبخیر و تعرق در حوضه آبریز طالقان در ۲۲ روز در سال ۲۰۰۶ را مورد بررسی قرار دادند که نتایج همبستگی بالا در مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده را نشان داد. در مطالعه دیگری توسط *Karbasi* (2016) از الگوریتم سبال استفاده شد که تبخیر-تعرق واقعی مزرعه را برای مزارع یونجه و ذرت خرمدره برآورد کرده و از داده‌های سنجش از دور و داده‌های هواشناسی استفاده کردند و نتایج آن‌ها نشان داد که تبخیر-تعرق برای گیاه یونجه در مدل سبال بیشتر از ذرت است. در بسیاری از پژوهش‌های پیشین، روش کار استفاده از سنجش از دور و الگوریتم سبال بوده است و از سنجنده مودیس مناطق وسیعی را با توجه اندازه پیکسل‌ها (۲۵۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری) مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش از داده‌های لندست با اندازه پیکسل ۳۰ متری

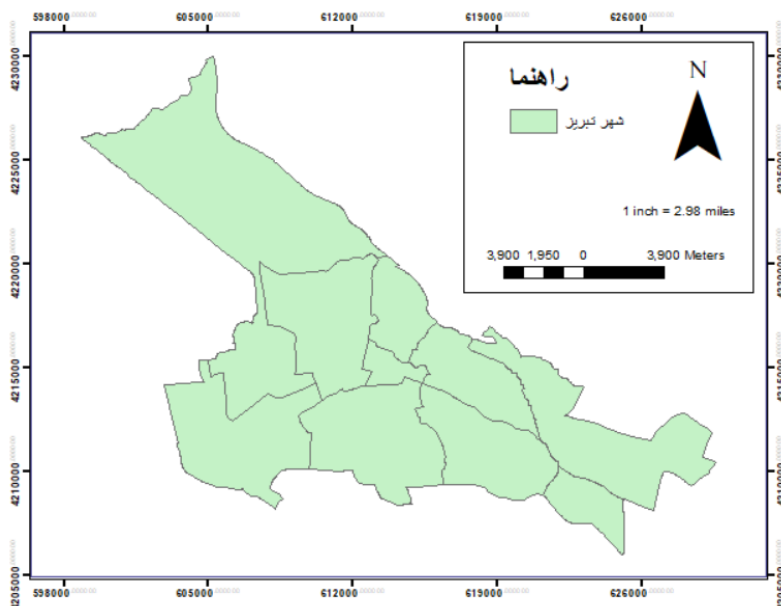
تبخیر-تعرق یکی از بخش‌های مهم تعادل چرخه آب هستند (Szabó *et al.*, 2018). بیش از ۷۲ درصد از منابع آبی کشور به دلیل تبخیر-تعرق از دسترس خارج می‌شود (Sharghi *et al.*, 2010). این عوامل، اهمیت و ضرورت استفاده بهینه از آب و پیش‌بینی دقیق میزان تبخیر و تعرق واقعی در کاربردهای مختلف از جمله کشاورزی و مدیریت منابع آب، اعم از برنامه‌ریزی آبیاری و مدل‌سازی رشد گیاه را نشان می‌دهد (Lopes *et al.*, 2019). برآوردهای دقیق تبخیر-تعرق در مطالعاتی از قبیل بررسی تغییرات اقلیمی، توسعه‌ی پایدار و کنترل منابع آبی نقش مهمی را ایفا می‌کند (Liu *et al.*, 2010). این داده‌ها بر اساس شرایط موجود در هر مورد، مقدار واقعی آب تبخیر شده را اندازه‌گیری می‌کند. با توجه به محدود بودن تعداد ایستگاه‌های هواشناسی و بالا بودن هزینه و زمان جمع‌آوری اطلاعات زمینی، استفاده از تکنیک‌های سنجش از دور، در صورت برخورداری از خروجی دقیق و مناسب، می‌تواند ابزار مناسبی برای تعیین تبخیر-تعرق واقعی^۱ (AET) باشد (Brisco *et al.*, 2014). از جمله الگوریتم‌های موجود در سنجش از دور که مربوط به برآورد تبخیر و تعرق که بر اساس روش‌های مبتنی بر بیان انرژی است، می‌توان به الگوریتم سبال^۲ (SEBAL) اشاره کرد. سبال یک الگوریتم سنجش از دور است که تعادل انرژی سطحی لحظه‌ای را برای هر پیکسل از یک تصویر ماهواره‌ای انجام می‌دهد (Bastiaanssen *et al.*, 1998). سبال نیاز به حداقل اطلاعات هواشناسی از اندازه‌گیری زمینی دارد. در این زمینه پژوهش‌های بسیاری انجام گرفته است که مهم‌ترین آن‌ها در ادامه بیان شده‌اند، باستیانسن یکی از پیشگامان استفاده از الگوریتم سبال برای محاسبه تبخیر-تعرق بود (Bastiaanssen *et al.*, 1998). او در سال ۱۹۹۸ با کمک همکاران تبخیر-تعرق داده‌های ماهواره‌ای را مقایسه کردند و الگوریتم سبال را با اندازه‌گیری‌های میدانی مقایسه کردند. آن‌ها دریافتند که در ۸۵ درصد

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

تبریز در غرب استان آذربایجان شرقی و در منتهی‌الیه شرق و جنوب شرقی دشت تبریز واقع شده است. این شهرستان از سمت شمال به کوه‌های یکچین و عون بن علی، از شمال شرقی به کوه‌های گزنی و بابا باغی، از شرق به گردنه پایان و از جنوب به دامنه‌های رشته‌کوه سهند محدود می‌شود. تبریز از شمال، جنوب و شرق به کوه‌ها و از غرب به زمین‌های هموار دشت تبریز و شوره‌زارهای رودخانه تلچه (آجی چای) محدود می‌شود و به گودال یا دشت نسبتاً بزرگی بین کوه‌ها تبدیل شده است. ارتفاع شهر از سطح دریا از ۱۳۴۸ متر در جاده مرند تا ۱۵۶۱ متر در محله زعفرانی متغیر است و شیب کلی سرزمین تبریز به سمت مرکز شهر و سپس به سمت غرب است.

استفاده کرده که یکی از فواید آن دقت بالا و قدرت تفکیک مکانی بهتر این ماهواره است که می‌تواند برای بررسی عوامل مؤثر بر تبخیر-تعرق شهری مورد استفاده قرار گیرد و دیدی مناسب جهت برنامه‌ریزی شهری و دستیابی به توسعه پایدار را داشته باشد. هدف این پژوهش بررسی روند تغییرات حرارتی کلان‌شهر تبریز با استفاده از سنجش از دور حرارتی است. بدین منظور یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار افزایش دمای سطح زمین است که همان‌طور که گفته شده با استفاده از سنجش از دور حرارتی بررسی می‌شود. همچنین یکی دیگر از عوامل تأثیرگذار در روند جزیره حرارتی شهر تبریز بررسی پوشش گیاهی منطقه مورد مطالعه از سال ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۱ هست که با استفاده از شاخص نرمال شده پوشش گیاهی و تصاویر لندست مورد بررسی قرار خواهد گرفت.



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

Fig. 1- Study area

تهیه شده است. در نهایت داده‌های خام سنجش از دور که به وسیله سنجنده‌های مختلف از سطح زمین برداشت می‌شوند، ممکن است دارای کمبودها و خطاهایی باشند؛ بنابراین برای استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لازم است تا کمبودها، جبران و خطاها حذف شوند. همچنین در این مطالعه از نرم‌افزار Arc Gis 10.8 برای

روش پژوهش

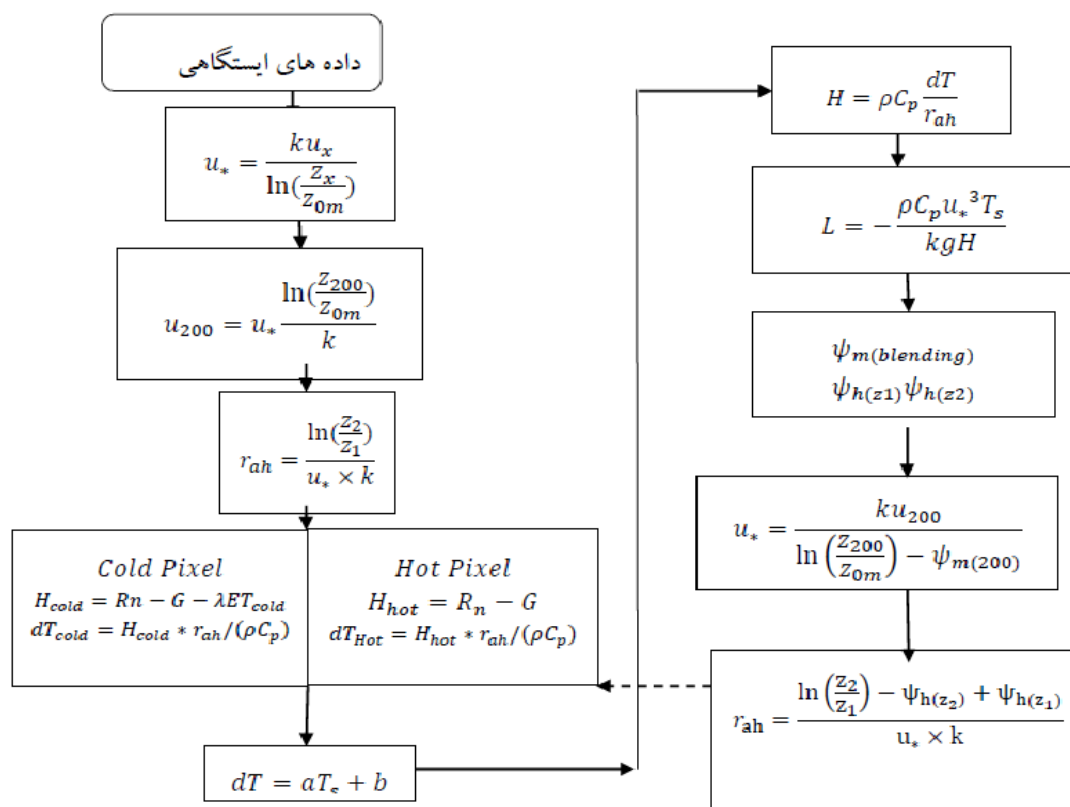
در این پژوهش به منظور تجزیه و تحلیل زیست‌محیطی و مکانی شهر تبریز از تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده شده است. بدین منظور تصاویر ماهواره‌ای لندست در سنجنده‌های ("OLI_TIRS") و در سال‌های ۲۰۱۳، ۲۰۱۵، ۲۰۱۷، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ از سایت سازمان زمین‌شناسی ناسا

حرارتی را نشان می‌دهد، همچنین شکل ۲ نیز روند نمای الگوریتم SEBAL به ترتیب انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

تهیه خروجی و از نرم‌افزارهای Envi 5.3 به منظور انجام پردازش، تجزیه و تحلیل تصاویر لندست استفاده شد. جدول (۱) تصاویر ماهواره‌ای لندست به همراه سنجنده و باندهای

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای لندست
Table 1. Specifications of landsat satellite images

تاریخ اخذ تصویر Date	ماهواره Satellite	سنجنده	مسیر PATH	ردیف ROW	باند حرارتی Thermal band	سیستم مختصات Coordinate system
2013-07-10	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	168	034	11-10	"WGS84"UTM_ZONE = 39
2015-06-14	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	168	034	11-10	"WGS84"UTM_ZONE = 39
2017-06-19	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	168	034	11-10	"WGS84"UTM_ZONE = 39
2019-06-25	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	168	034	11-10	"WGS84"UTM_ZONE = 39
2021-06-14	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	168	034	11-10	"WGS84"UTM_ZONE = 39



شکل ۲- روند الگوریتم سیال (RSRC, 2015)

Fig. 2-- The process of Sabal's algorithm (RSRC, 2015)

ذکر شده با استفاده از باندهای حرارتی ماهواره لندست و در سنجنده‌های ("OLI_TIRS") تهیه می‌شود. به منظور تهیه نقشه حرارتی سطح شهر ابتدا باید پردازش‌های روی

دمای سطح زمین از مهم‌ترین مؤلفه‌ها و عوامل تأثیرگذار در افزایش دمای شهر تبریز روند دمای سطح زمین است همان‌طور که قبلاً

همچنین میزان ضریب انعکاس برای سنجنده لندست از

رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\lambda = \frac{\pi \times L\lambda \times d^2}{ESUN \lambda \times \cos \theta_s} \quad (2)$$

که در آن $p\lambda$ ضریب انعکاس، $\pi = 3.1459$ ، $L\lambda$ رادیانس طیفی در سنجنده، d فاصله زمین تا خورشید (واحد نجومی)، $ESUN$ میانگین تابش خورشید و θ زاویه تابش خورشید (درجه) است

برای به دست آوردن رادیانس طیفی در سنجنده OLI از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$\lambda = ML * Q_{cal} + AL \quad (3)$$

در این رابطه، $L\lambda$ رادیانس در بالای اتمسفر ML ($\mu m * sr * \text{watts/m}^2$) ضریب تبدیل ضربی، Q_{cal} ارزش‌های پیکسلی ۱۰ و ۱۱ ضریب تبدیل تجمیع کننده است.

بدست آوردن دمای درخشندگی

داده‌های باندهای حرارتی می‌تواند از رادیانس طیفی در سنجنده به دمای درخشندگی تبدیل شوند. دمای درخشندگی با فرض اینکه زمین جسم سیاه است و شامل تأثیرات اتمسفر (جذب و تشعشع) است. برای به دست آوردن دمای درخشندگی برای سنجنده‌های ماهواره لندست از رابطه (۴) محاسبه می‌شود (Rajeshwari et al., 2014).

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L\lambda} + 1\right)} \quad (4)$$

که در آن T دمای مؤثر درخشندگی در سنجنده برحسب کلونین، K_2 ضریب کالیبراسیون ۲ برحسب کلونین، K_1 ضریب کالیبراسیون ۱ برحسب W ($m \text{ st } \mu m$) و $L\lambda$ رادیانس طیفی در سنجنده است. ضرایب K_1 و K_2 بر اساس جدول (۲) محاسبه می‌شود.

پیکسل‌های تصاویر برای بدست آوردن اطلاعات صحیح انجام شود به کلیه این موارد پیش‌پردازش تصاویر و یا تصحیح تصاویر گفته می‌شود. از مهم‌ترین اصلاحات که بر روی پیکسل‌های تصاویر انجام می‌شود رادیو متریکی است. بخشی از اصلاحات رادیو متریکی بر روی تصاویر تصحیح طیفی است. تصحیح طیفی بر روی ارزش‌های تشکیل‌دهنده تصاویر و یا همان پیکسل انجام می‌شود. به طوری که زمانی که تصویری اخذ می‌شود تصویر موردنظر دارای ارزش‌های عددی رقومی می‌باشند این ارزش‌های رقومی حاوی اطلاعات پدیده‌های سطح زمین است؛ اما داده‌های اولیه دارای اطلاعات خام می‌باشند (تصحیح‌نشده) و نمی‌تواند نمایش‌دهنده پارامترهای سطح زمین مانند دما، رطوبت، پوشش گیاهی و ... باشند، بدین منظور برای اینکه بتوانیم مقادیر پارامترهای سطح زمین را برای تصاویر ماهواره‌ای موردنظر اعمال کنیم باید ارزش‌های رقومی تصاویر ماهواره‌ای را تصحیح کنیم. درواقع باید مقادیر پیکسل‌های تشکیل‌دهنده هر تصویر را تبدیل به رادیانس و انعکاس کرد که به این شکل اصلاحات، تصحیح طیفی گفته می‌شود. مدل‌ها و روش‌های مختلفی برای تبدیل کردن مقادیر پیکسل‌های تصاویر ماهواره‌ای به رادیانس و انعکاس وجود دارد که در ادامه به آن اشاره می‌شود. برای تبدیل ارزش‌های خام تصویر به رادیانس برای تصاویر لندست از رابطه (۱) استفاده می‌شود.

$$L\lambda = \frac{LMAX - LMIN}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN \quad (1)$$

$$L\lambda = \frac{LMAX - LMIN}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} (Q_{cal} - Q_{calmin}) + LMIN$$

که در آن $L\lambda$ رادیانس طیفی در سنجنده، Q_{cal} ارزش پیکسل در باند موردنظر، Q_{calmin} حداقل ارزش پیکسل، Q_{calmax} حداکثر ارزش پیکسل، $LMIN$ و $LMAX$ حداقل و حداکثر رادیانس طیفی در سنجنده است.

جدول ۲- ضرایب K1 و K2 برای ماهواره لندست
Table 2. K1 and K2 coefficient for Landsat satellite

ضریب سنجنده (باند) (BAND)	ضریب کالیبراسیون ۱ Calibration 1	ضریب کالیبراسیون ۲ (برحسب کلوین) Calibration 2 (Kelvin)
L5-TM B6	607.76	1260.56
L7-ETM+B6	666.09	1282.71
L8-OLI B10	777.89	1321.08
L8-OLI B11	480.89	1201.14

و بیش‌تر از ۱- است. مقادیر این شاخص برای پوشش گیاهی متراکم به‌سوی عدد یک میل می‌کند ولی ابرها، برف و آب با مقادیر منفی مشخص می‌شوند، سنگ‌ها و خاک‌های بایر که واکنش‌های طیفی مشابه در دو باند مورد استفاده دارند با مقادیر نزدیک به صفر دیده می‌شوند. در این شاخص خاک معمولی، معادل یک منظور می‌شود. هر قدر فاصله پیکسل بالاتر از اندازه خاک باشد نشان‌دهنده تراکم پوشش گیاهی است. بدین منظور شاخص پوشش گیاهی NDVI بر روی تصاویر لندست اعمال شد و نقشه پوشش گیاهی منطقه یک از سال ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۱ در پنج کلاس خیلی زیاد: رنگ قرمز، نسبتاً زیاد: رنگ نارنجی، تراکم متوسط: رنگ زرد، نسبتاً کم: سبز کم‌رنگ و تراکم خیلی کم با رنگ سبز تیره تهیه شد.

تهیه نقشه تبخیر-تعرق

سبال (الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین) مدلی مبتنی بر پردازش تصویر بوده که مشتمل برای ۲۵ مدل جهت محاسبه تبخیر-تعرق (ET) به‌عنوان باقیمانده بیلان انرژی سطحی زمین است. این مدل توسط باستیانسن در کشور هلند معرفی و همچنین برای منطقه کوهستانی آیداهو با تکیه بر مقادیر تبخیر-تعرق اندازه‌گیری شده در سطح زمین توسعه یافته است. مدل سبال از اطلاعات تصاویر رقومی اخذ شده توسط ماهواره لندست یا سایر سنجنده‌های سنجش از دوری که قادر به ثبت تشعشعات مادون قرمز حرارتی و همچنین تشعشعات مرئی و مادون قرمز نزدیک

بدین منظور تصاویر ماهواره‌ای شهر تبریز کالیبره شدند و اصلاحات مورد نیاز بر روی آن‌ها اعمال شد و به‌منظور تهیه نقشه‌های حرارتی از الگوریتم‌های ذکر شده استفاده شد و نقشه پهنه‌بندی حرارتی شهر تبریز از سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۱ بدست آمد.

پوشش گیاهی

یکی از مؤلفه‌های دیگر تأثیرگذار در افزایش دمای شهر تبریز تراکم پوشش گیاهی در این منطقه است که با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای لندست و شاخص پوشش گیاهی به دست می‌آید. NDVI از معروف‌ترین، ساده‌ترین و کاربردی‌ترین شاخص‌هایی است که در زمینه مطالعات پوشش گیاهی شناخته شده است فرایند محاسباتی ساده دارد و در مقایسه با دیگر شاخص‌ها دارای بهترین توان دینامی است. این شاخص بیش‌ترین حساسیت را به تغییرات پوشش گیاهی داشته و در مقابل اثرات جوی و زمینه خاک، به‌جز در مواردی که پوشش گیاهی کم باشد، حساسیت کم‌تری دارد. شاخص NDVI از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$(5) \quad (VAN DE GRIEND \& OWE, 1993)$$

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED}$$

که در آن NIR بازتاب در باند مادون قرمز و RED انعکاس در باند سرخ است. اگرچه از دیدگاه نظری مقدار این شاخص در محدوده (-۱ و ۱) است ولی در عمل کم‌تر از ۱

(2) e ، بازتابش سطح زمین (انتشار)، Lin-Lout تابش ورودی و خروجی به زمین به صورت امواج با طول موج بلند است. مقدار a با اختلاط بازتاب‌های طیفی حاصله از شش باند با طول موج کوتاه در ماهواره لندست به دست می‌آید. همچنین Lin-Lout به عنوان تابعی از دمای سطحی در نظر گرفته می‌شوند که از تصویر ماهواره‌ای قابل استخراج است. مقدار e توسط شاخص‌های گیاهی ایجاد شده از دو باند با طول موج کوتاه بدست می‌آید. مقادیر پتانسیل R_s برای هر پیکسل دارای شیب مشخص با استفاده از منحنی‌های تئوری آسمان صاف قابل تعیین می‌باشند. شار گرمایی خاک یا G نیز به صورت تجربی و با استفاده از معادله باستیانسن و همکاران قابل برآورد است.

نتایج و بحث

نقشه LST (شکل شماره ۳) در دوره مورد بررسی به پنج دسته (کمتر از ۳۰.۵ درجه به رنگ سبز، ۳۰.۵ الی ۳۱.۰ درجه سبز کم‌رنگ، ۳۱.۰ الی ۳۱.۵ درجه به رنگ زرد، ۳۱.۵ الی ۳۲.۰ درجه به رنگ نارنجی و از ۳۲.۰ درجه به بالا نارنگ قرمز) مشخص شده است، با توجه نتایج به دست آمده از سال ۲۰۱۷ قسمت نارنجی و قرمز رنگ افزایش پیدا کرده است. ۳۱.۵ الی ۳۲.۰ درجه و ۳۲.۰ درجه به بالا در منطقه مورد بررسی غالب گردیده است.

شکل شماره ۵ که نمودار تغییرات گرم‌ترین و سردترین پیکسل ثبت شده را نشان می‌دهد که با توجه به نتایج نشان‌دهنده افزایش دمای گرم‌ترین پیکسل بوده (سال ۲۰۱۳ بیشترین دمای ثبت شده ۳۲.۵ درجه بوده که در سال ۲۰۱۵ به ۳۲.۳ درجه کاهش و مجدد افزایش و به ۳۲.۷/۷ و ۳۲.۸/۳ و ۳۲.۸/۶ درجه در سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۹، ۲۰۲۱ رسیده است)، همچنین سردترین پیکسل به جز سال ۲۰۱۷ روند نزولی داشته است و از ۲۹.۵ درجه در سال ۲۰۱۳ به ۲۸.۵/۴ درجه رسیده اما در سال ۲۰۱۷ به ۲۹.۳/۷ درجه افزایش پیدا کرده و در ادامه به ۲۸.۰/۹ و ۲۷.۸ درجه کاهش پیدا کرده است.

استفاده می‌نماید. مقدار ET در هر پیکسل (به عنوان مثال در ۳۰ در ۳۰ مترمربع تصاویر TM و ETM تصاویر لندست) برای لحظه‌ای خاص که همان زمان تصویر اخذ می‌شود محاسبه می‌گردد.

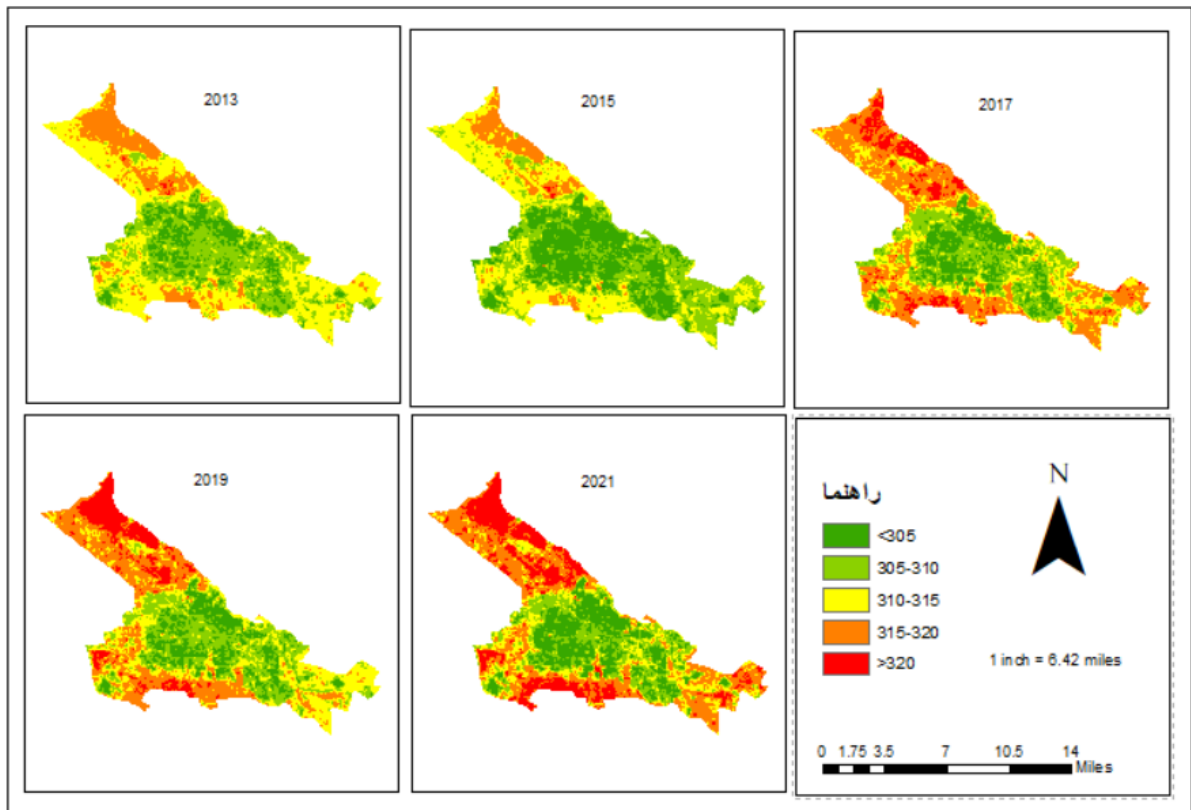
فرایند محاسبه بر اساس توازن کامل انرژی استوار است که در آن مقدار ET از کسر نمودن مقدار انرژی باقیمانده معادله کلاسیک بیلان انرژی به دست می‌آید. لذا مقدار ET برابر با تفاضل تشعشع خالص خورشیدی از گرمای وارده به خاک و گرمای وارده به هوا محاسبه خواهد شد. جزئیات بیشتر این مدل توسط باستیانسن و همکارانش ارائه شده است، اما معادله کلی مورد استفاده سبال به صورت زیر است:

$$LE = R_n - H - G \quad (6)$$

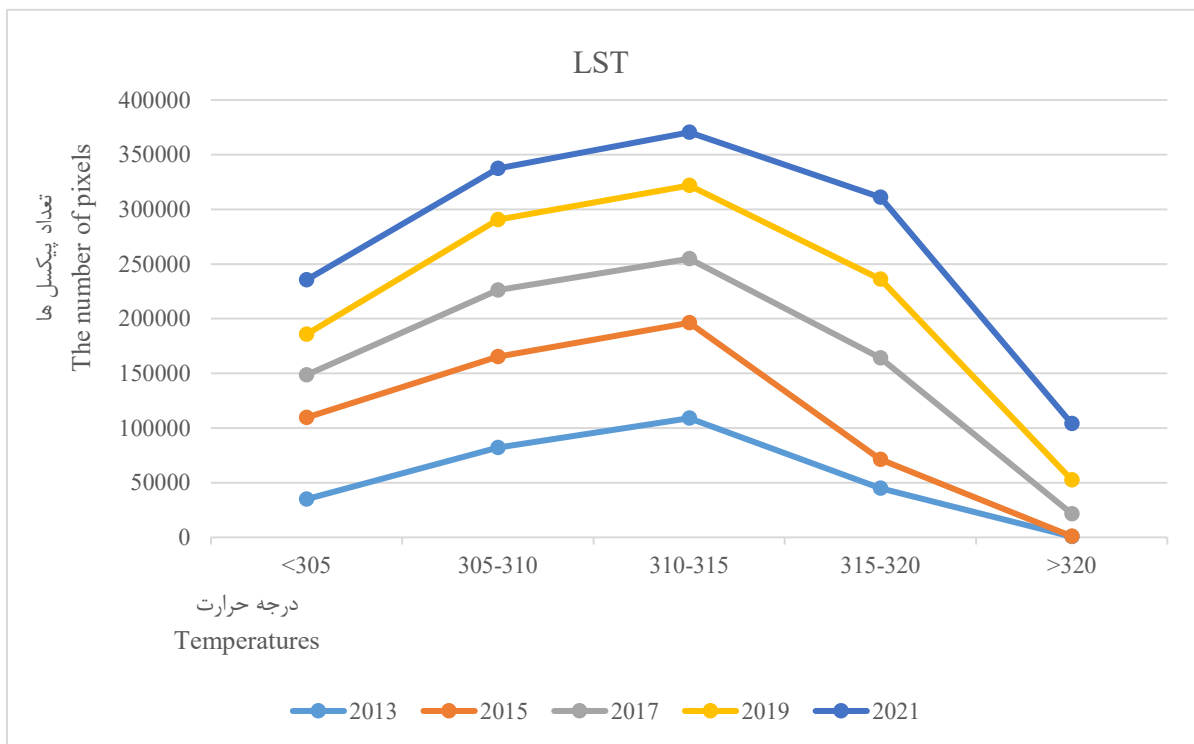
که در این فرمول LE شار گرمای نهان برحسب (Wm^{-2}) (2) است که به راحتی قابل تبدیل به ET است. R_n تابش خالص خورشیدی است H شار گرمای محسوس (Wm^{-2}) و G شار گرمای زمین یا خاک (Wm^{-2}) است. از این فرمول استنباط می‌گردد که تابشی که از جو به سطح زمین می‌رسد به سه قسمت مجزا می‌شود. بخشی صرف گرم کردن زمین یا خاک شده بخش دیگری صرف گرم کردن هوای مجاور سطح زمین و بقیه مقدار انرژی باقیمانده منجر به تبخیر-تعرق می‌گردد. در واقع هدف سبال محاسبه شار گرمای نهان (ET) است که همان ET واقعی محسوب می‌گردد. لازم به ذکر است که دقت واقعی نتایج حاصله برای LE یا ET است. متأثر از دقت باند با طول موج کوتاه و نیز باند ترمال ماهواره است که در معادله زیر تشعشع خالص از معادله توازن انرژی سطحی محاسبه می‌شود:

$$R_n = (1 - \alpha)R_s + (Lin - Lout) \quad (7)$$

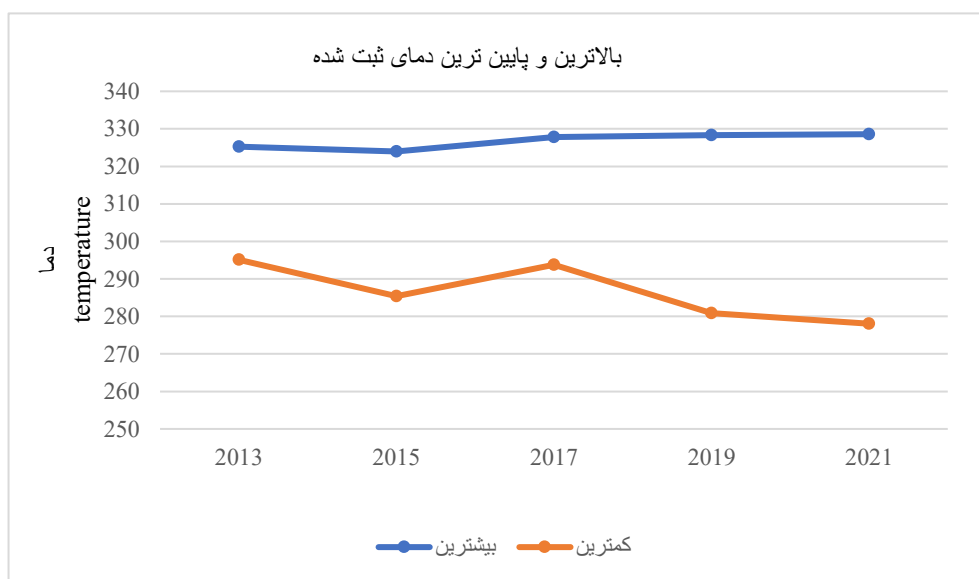
که در آن a آلبیدی سطحی، R_s تابش خورشیدی (Wm^{-2})



شکل ۳- نقشه LST
Fig. 3- LST map



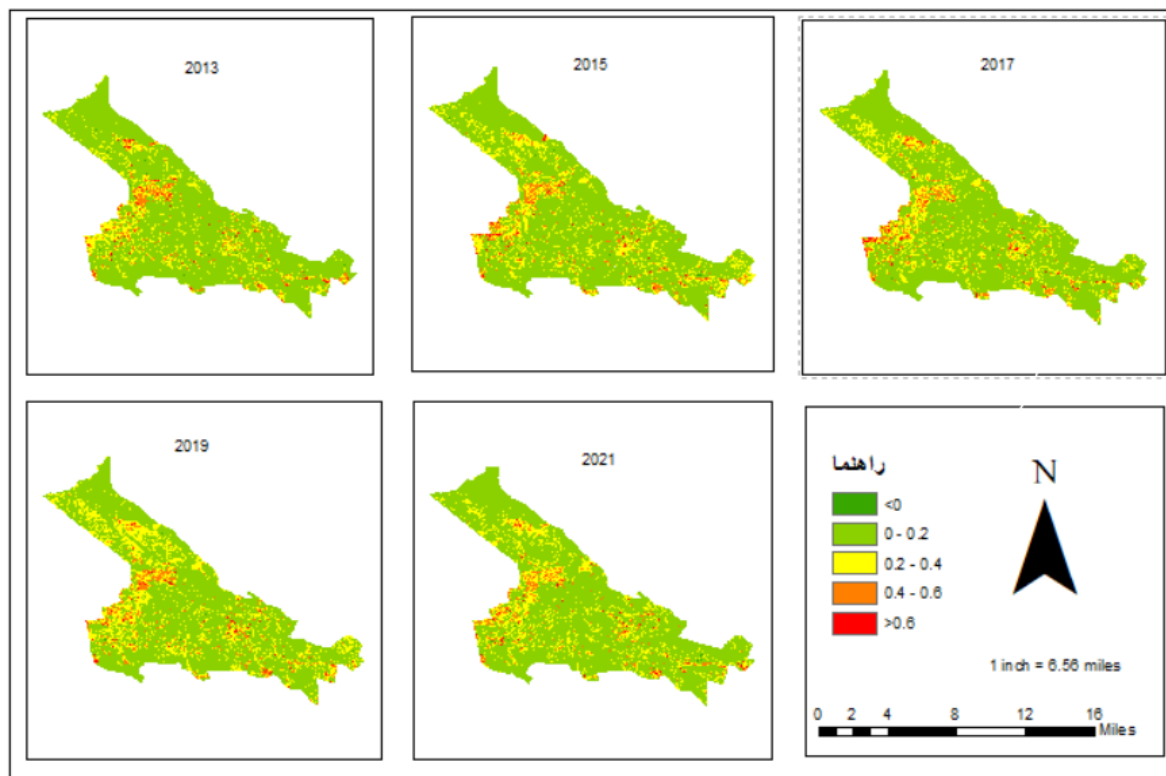
شکل ۴- نمودار تغییرات پیکسل LST
Fig. 4- Diagram of LST pixel changes



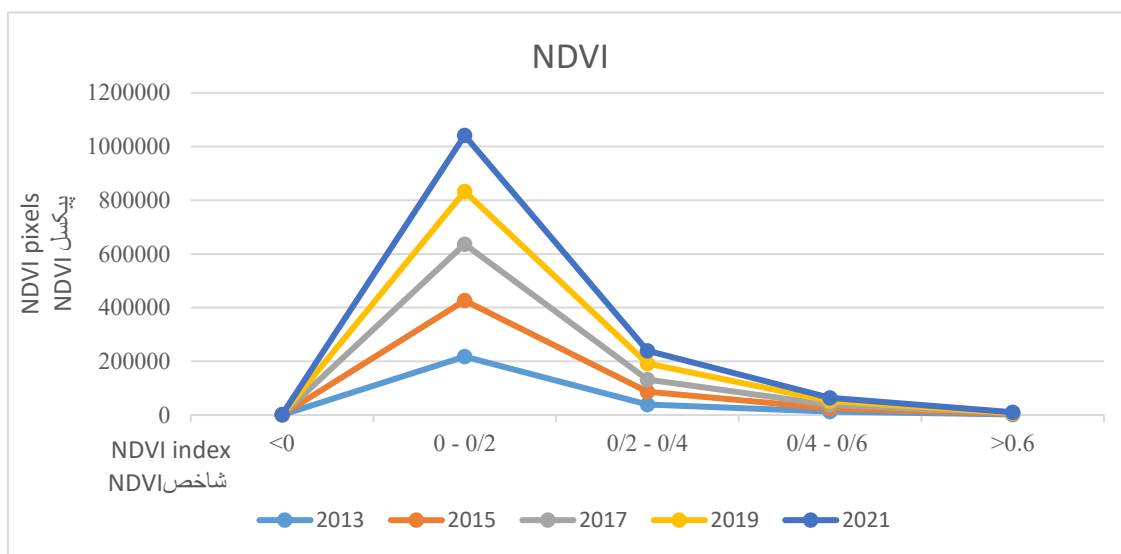
شکل ۵- نمودار تغییرات LST
Fig. 5- Diagram of LST changes

نارنجی و بیشتر از ۰/۶ به رنگ قرمز تقسیم گردیده است، با توجه به نتایج این شاخص پیکسل‌های رنگ زرد و قرمز رنگ (۰/۴-۰/۱) و (۰/۶<) افزایش پیدا کرده است.

شکل شماره ۶ نشان دهنده شاخص NDVI برای سال‌های ۲۰۱۳ الی ۲۰۲۱ بوده و به ۵ دسته کمتر از صفر رنگ سبز و صفر الی ۰/۲ رنگ سبز کم‌رنگ، ۰/۲ الی ۰/۴ به رنگ زرد و ۰/۴ الی ۰/۶ به رنگ



شکل ۶- نقشه شاخص NDVI
Fig. 6- Map of NDVI index

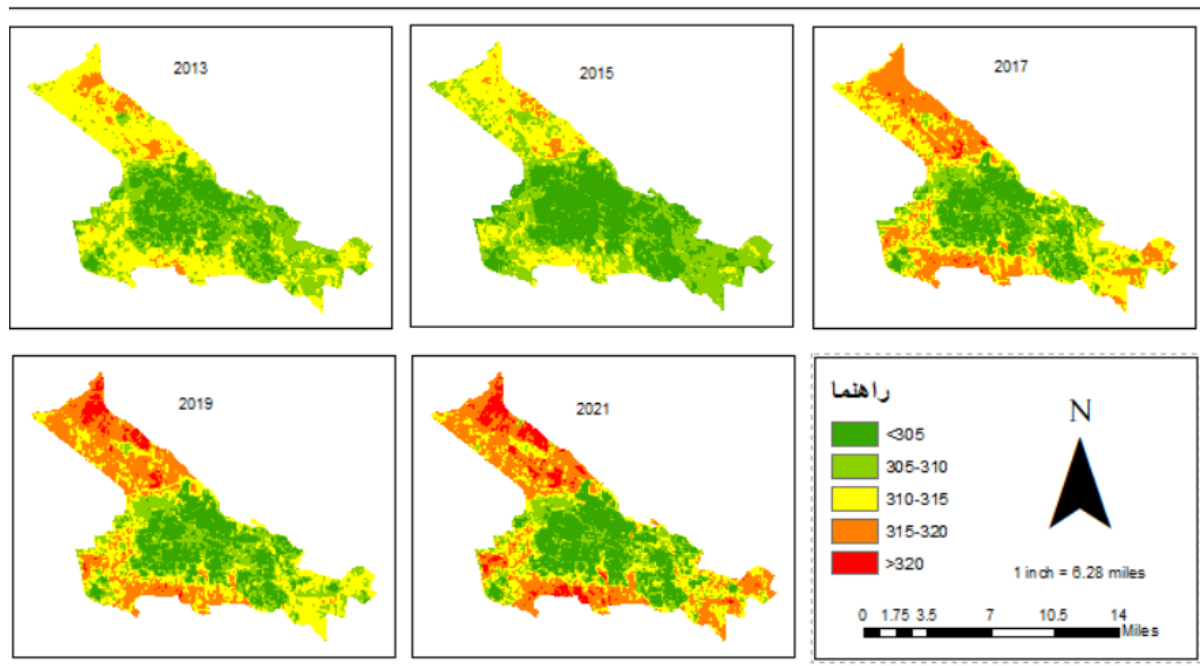


شکل ۷- نمودار تغییرات پیکسل NDVI

Fig. 7- Diagram of NDVI pixel changes

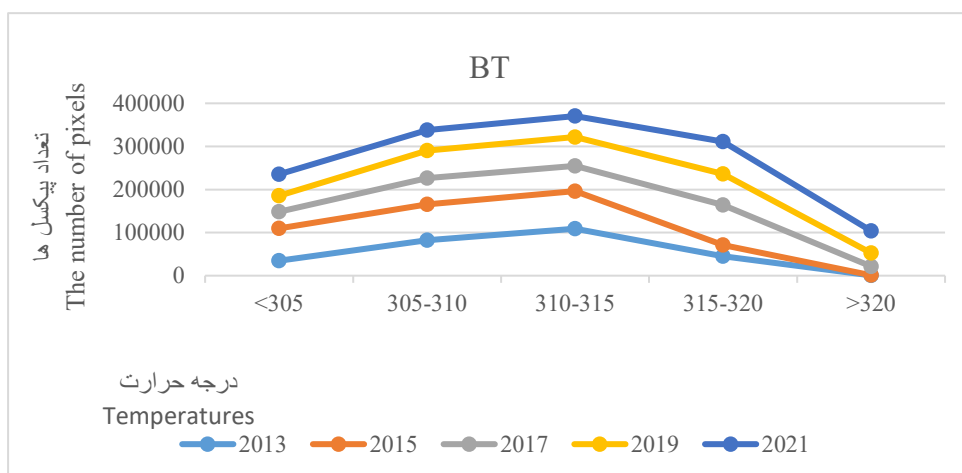
و ۳۱۵ الی ۳۲۰ و ۳۲۰ درجه به بالا در منطقه موردبررسی غالب گردیده است. با توجه به نتایج نشان دهنده افزایش پیکسل‌های قرمز در خارج از مرکز شهر بوده و شاخص BT افزایش پیدا کرده است و پیکسل‌های ۳۱۰-۳۱۵ جای خود را به ۳۲۰-۳۱۵ و ۳۲۰ به بالا داده است.

شکل شماره ۸ نشان‌دهنده BT در دوره موردبررسی به ۵ دسته (کمتر از ۳۰۵ به رنگ سبز تیره، ۳۰۵ الی ۳۱۰ سبز کم‌رنگ، ۳۱۰ الی ۳۱۵ به رنگ زرد، ۳۱۵ الی ۳۲۰ به رنگ نارنجی و از ۳۲۰ درجه به بالا بارنگ قرمز) مشخص شده است، با توجه نتایج به دست آمده از سال ۲۰۱۴ قسمت نارنجی و قرمز رنگ افزایش پیدا کرده است



شکل ۸- نقشه BT

Fig. 8 - BT map

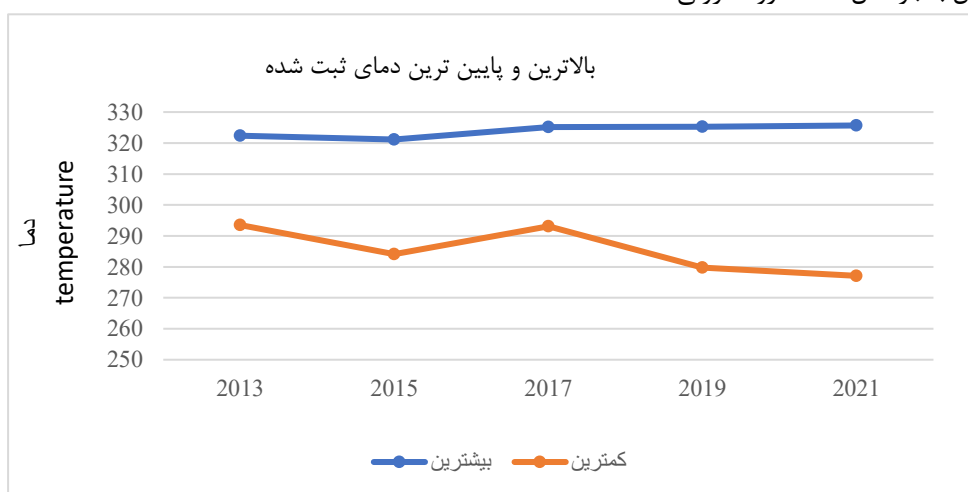


شکل ۹- نمودار تغییرات پیکسل BT

Fig. 9- Diagram of BTS pixel changes

تغییرات گرم‌ترین پیکسل به صورت ۳۲۵/۲، ۳۲۵/۶ تا ۲۰۱۳ تا ۳۲۲/۳ و ۳۲۱/۱، ۳۲۵/۱ بوده است.

شکل شماره ۱۰ نمودار تغییرات گرم‌ترین و سردترین پیکسل ثبت‌شده را نشان می‌دهد که با توجه به نتایج نشان‌دهنده افزایش دمای گرم‌ترین پیکسل بوده همچنین سردترین پیکسل به جز سال ۲۰۱۷ روند نزولی داشته است.

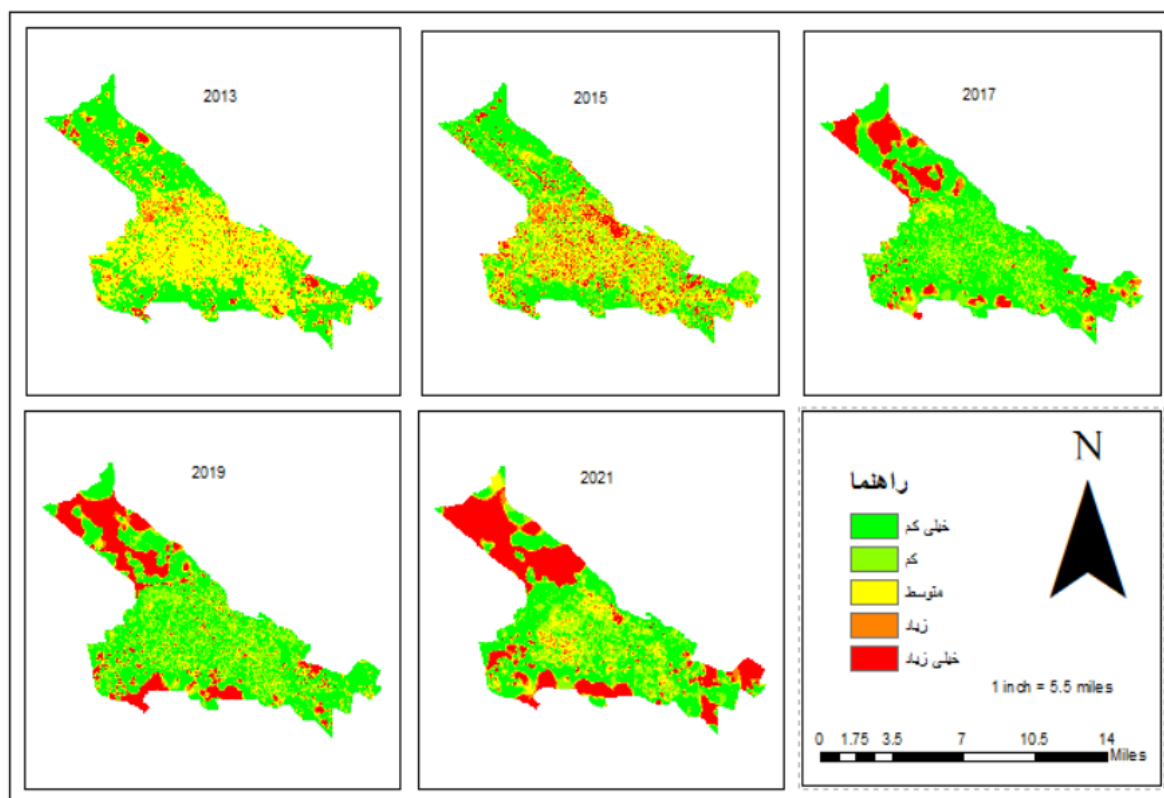


شکل ۱۰- نمودار تغییرات BT

Fig. 10- Chart of BT changes

تبخیر-تعرق زیاد و خیلی زیاد هستند. نتایج نشان می‌دهد در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ مرکز شهر دارای تبخیر-تعرق متوسط (پیکسل زرد) قابل توجهی داشته، از سال ۲۰۱۷ الی ۲۰۲۱ پیکسل‌های قرمز رنگ در قسمت‌های پیرامون مرکز شهر افزایش و پیکسل‌های سبز رنگ در مرکز متمرکز شده است. به‌طور کلی روند تبخیر-تعرق در این شهر افزایش پیدا کرده و پیکسل‌های قرمز افزایش پیدا کرده است.

شکل شماره ۱۱ نشان‌دهنده تبخیر-تعرق شهر تبریز است. این شکل متشکل از پنج رنگ می‌باشد که هر کدام نشان‌دهنده میزان تبخیر-تعرق در محدوده مورد بررسی است، در قسمت‌هایی از محدوده مورد بررسی که تبخیر-تعرق بسیار کم و کم صورت گرفته رنگ‌های سبز پررنگ و سبز کم‌رنگ مشخص گردیده است، همچنین در قسمت‌هایی که تبخیر-تعرق در حالت متوسط بوده رنگ زرد مشخص گردیده است. رنگ‌های نارنجی و قرمز نشان‌دهنده



شکل ۱۱- تبخیر تعرق

Fig. 11- Evaporation and transpiration

نتیجه گیری

تبخیر-تعرق یکی از مهم‌ترین عوامل در چرخه آب و عاملی تأثیرگذار در تغییرات اقلیمی است و یکی از مهم‌ترین عوامل در برنامه‌ریزی منابع آب و برنامه‌ریزی کشاورزی محسوب می‌شود. در این پژوهش عوامل یا پارامترهای موجود در فرآیند تبخیر-تعرق در شهر تبریز برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفت. دلیل انتخاب الگوریتم سبال نتیجه‌ی پژوهش‌های تحقیق Bastiaanssen است که از الگوریتم سبال برای چهار کشور مختلف استفاده کرد و به این نتیجه رسید که ۸۵ درصد موارد بررسی‌شده بدون هیچ‌گونه واسنجی مطابقت داشتند. همچنین سروری محسنی و همکارانش در تحقیقات خود به این نتیجه رسیده‌اند که همبستگی بالای مقادیر برآوردی و اندازه‌گیری شده را نتایج الگوریتم سبال در آن پژوهش نشان داد. محققین از سنجنده مودیس جهت برآورد تبخیر-تعرق استفاده می‌کردند که کمترین وضوح سنجنده مودیس در

پژوهش‌های آن‌ها ۲۵۰ متر بوده است، اما ماهواره لندست ۸ مورد استفاده در این پژوهش دارای وضوح ۳۰ متر برای هفت باند اول و ۱۰۰ متر برای باند حرارتی است و این یکی از مزیت‌های این بررسی نسبت به سایر بررسی‌ها است. نتایج این پژوهش نشان داد (LST) از سال ۲۰۱۷ قسمت نارنجی و قرمز رنگ افزایش پیدا کرده است. پیکسل‌های با دمای ۳۱۵ درجه الی ۳۲۰ درجه و ۳۲۰ درجه به بالا در منطقه مورد بررسی غالب گردیده است. علاوه بر این شاخص $NDVI$ نشان داد پیکسل‌های رنگ زرد و قرمز رنگ (۰/۲-) و (۰/۴) و (>۰/۶) افزایش پیدا کرده است و همچنین ادامه شاخص BT افزایش پیدا کرده است و پیکسل‌های ۳۱۰-۳۱۵ درجه جای خود را به ۳۱۵-۳۲۰ درجه و ۳۲۰ درجه به بالا داده است. با توجه به ارتباط میان پوشش گیاهی ($NDVI$) و دمای سطح زمین که مستقیم بر محاسبه‌ی تبخیر-تعرق تأثیر می‌گذارند، نتایج تبخیر-تعرق بدرستی نشان داد روند صعودی در تبخیر-تعرق وجود داشته و از سال ۲۰۱۷ الی

پی‌نوشت‌ها

¹ Actual Evapotranspiration

² Surface Energy Balance Algorithm for Land

سپاسگزاری

نویسندگان مقاله، از داوران ارجمند که با نظرات و انتقادات سازنده خود، به بهبود محتوا و کیفیت علمی این مقاله کمک بسیاری نمودند تشکر و قدردانی میکنند. این تبادلات مثبت و موثر، ما را به سمت یک ارائه علمی قوی‌تر هدایت کرد. همچنین نویسندگان از سازمان ناسا برای اجازه دسترسی به داده‌ها برای انجام تحقیقات کمال قدردانی را دارند.

References

Bastiaanssen, W.G., Menenti, M., Feddes, R.A. and Holtslag, A.A.M., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*. 212, 198-212. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00253-4](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00253-4)

Bastiaanssen, W.G., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, J.F., Roerink, G.J. and Van der Wal, T., 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2, Validation. *Journal of Hydrology*. 212, 213-229. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00254-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00254-6)

Brisco, B., Brown, R.J., Hirose, T., McNairn, H. and Staenz, K., 2014. Precision agriculture and the role of remote sensing: a review. *Journal canadien de télédétection*, 24, 315-327. <https://doi.org/10.1080/07038992.1998.10855254>

Chander, G., Markham, B. and Helder, D., 2009. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*. 113, 893-903. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>

Jia, L., Xi, G., Liu, S., Huang, C., Yan, Y. and Liu, Y., 2009. Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. *Hydrology and Earth System Sciences* 13:1775-1787. DOI:10.5194/hessd-6-2301-2009

Karbasi, M., Moghaddam, M., Nikbakht, J. and Kaviani, A., 2016. Estimation of crop actual evapotranspiration using SEBAL algorithm (Case study: Khoramdareh region at Zanjan province). *Ecology*, 3(3):427-437. (In Persian with English abstract). DOI:10.22059/IJE.2016.60031

Liu, S., Bai, J., Jia, Z., Jia, L., Zhou, H. and Lu, L., 2010. Estimation of evapotranspiration in the Mu Us Sandland of China. *Hydrology and Earth System*

۲۰۲۱ در قسمت خارج از مرکز شهر تبخیر-تعرق افزایش پیدا کرده است. با توجه به نتایج این پژوهش در قسمت‌های خارج شهر رشد پوشش گیاهی ثبت شده و از سوی دیگر سطح زمین گرم‌تر شده و این عوامل برافزایش تبخیر-تعرق تأثیر گذاشته‌اند. در انتها پیشنهاد می‌شود با توجه به نتایج پژوهش که سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۹ و ۲۰۲۱ تغییرات مشهودی در خارج از مرکز شهر در تبخیر-تعرق ثبت گردیده است در تحقیقات آینده از فرمول روزانه ماهانه و سالانه استفاده شود و عواملی همچون تغییر کاربری و آماره دمای هواشناسی و بارش و ... مورد بررسی قرار گیرند.

منابع

Sciences 14(3):573-584. DOI:10.5194/hess-14-573-2010

Lopes, J.D., Rodrigues, L.N., Acioli Imbuzeiro, H.M. and Pruski, F.F., 2019. Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. *International Journal of Remote Sensing*. 40(18), 6930-6947. Doi: 10.1080/01431161.2019.1597304

MohseniSaruri, M., Ahmadi, H. and Nosrati, K., 2010. Application of Sebal model in estimating evapotranspiration in Taleghan catchment area, The first International Conference on Plant, Water, Soil and Weather Modeling, Kerman, Iran. 1-34 (In Persian with English abstract).

Papadavid, G., Hadjimitsis, D.G., Toullos, L. and Michaelides, S., 2013. A modified SEBAL modelling approach for estimating crop evapotranspiration in semi-arid conditions. *Water resources management*, 27(9), 3493-3506. DOI: 10.1007/s11269-013-0360-x

Rajeshwari, A. and Mani, N.D., 2014. Estimation of the land surface temperature of Dindigul district using Landsat 8 data. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 3.122-126. DOI:10.15623/ijret.2014.0305025

Remote Sensing Research Center (RSRC), 2015. Estimation of evapotranspiration, costs and the amount of water saving in agriculture (case study: Urmia Lake basin for 2010), EWRC in Sharif University of Technology.

Sanaeinejad, S.H., NASSIRI, M.M., Zare, H., Salehnia, N. and Ghaemi, M., 2014. Wheat yield estimation using landsat images and field observation: A case study in Mashhad. *Journal of Plant Production Research*. 20(4), 45-63 DOI:10.1007.1.23222050.1392.20.4.3.2

Sharghi, T., Bary Abarghuei, H., Asadi M. and Kousari, M., 2010. Estimation of reference evapotranspiration using FAO-Penman-Monteith method and its zonation in Yazd province, Journal of Arid Biome. 1 (1). 25-33. (In Farsi with English abstract). 20.1001.1.2008790.1389.1.1.3.7

Szabó, S., Elemér, L., Kovács, Z., Püspöki, Z., Kertész, A., Kumar Singh, S. and Balázs, B., 2018. NDVI dynamics as reflected in climatic variables: spatial and temporal trends-a case study of Hungary. GIScience & Remote Sensing, 56(4), 624-644. DOI:10.1080/15481603.2018.1560686

Van De Griend, 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. 14. 1119-1131. Doi: 10.1080/01431169308904400



*This page is intentionally
right blank.*