

# مطالعه‌ی پایش محور میزان تبخیر-تعرق در شهر تبریز با استفاده از الگوریتم

## SEBAL با یکپارچگی GIS و TRS

علی صیادی<sup>۱</sup>، محمد جواد امیری<sup>۱\*</sup> و محمد یزدی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه محیط زیست و ایمنی، دانشکده محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه زمین شناسی منابع معدنی و آب، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

**سابقه و هدف:** تبخیر-تعرق یکی از بخش‌های مهم تعادل چرخه آب هستند. بیش از ۰.۷۲ 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. در این راستا هدف از این پژوهش بررسی روند تغییرات حرارتی و میزان تبخیر-تعرق کلان‌شهر تبریز با استفاده از سنجش‌ازدور است.

**مواد و روش‌ها:** در این پژوهش با توجه به‌دقت و تطبیق‌پذیری بالا در الگوریتم سبال و همچنین تکنیک‌های سنجش‌ازدور برای برآورد تبخیر و تعرق از الگوریتم سبال و تصاویر ماهواره‌ای لندست استفاده گردید. بدین منظور تصاویر ماهواره‌ای لندست در سنجنده‌های ("OLI\_TIRS") و از سال ۲۰۱۳ - ۲۰۲۱ از سایت اداره‌ی کل ملی هوانوردی و فضا (NASA) تهیه‌شده است. همچنین در این پژوهش از فنون سنجش‌ازدور حرارتی و سامانه اطلاعات جغرافیایی که به شیوه‌ای مؤثر و کارآمد با یکدیگر ترکیب شدند استفاده‌شده است. در این مطالعه از نرم‌افزار *ARC Gis 10/8* برای تهیه خروجی و از نرم‌افزارهای *Envi 5/3* به‌منظور 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 الی ۳۲۰ و ۳۲۰ درجه به بالا در منطقه مورد بررسی غالب گردیده است. شاخص (*NDVI*) نشان داد پیکسل‌های رنگ زرد و قرمز رنگ (*0/2-0/4*) و (*0/6>*) افزایش پیدا کرده است. شاخص (*BT*) افزایش پیدا کرده است و پیکسل‌های ۳۱۰-۳۱۵ جای خود را به ۳۱۵-۳۲۰ و ۳۲۰ به بالا داده است. نتایج تبخیر-تعرق نشان داد روند صعودی در تبخیر-تعرق وجود داشته و از سال ۲۰۱۷ الی ۲۰۲۱ در قسمت خارج از مرکز شهر افزایش پیدا کرده است.

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

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.

کلیدواژه: الگوریتم سبال، جزایر حرارتی، دمای هوا، تبخیر، تبریز

## ۱. مقدمه

تبخیر-تعرق یکی از بخش‌های مهم تعادل چرخه آب هستند (Szabó *et al.*, 2019). بیش از 0/72 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، توسعه 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 سنجش‌ازدور، در صورت برخورداری از خروجی دقیق و مناسب، می‌تواند ابزار مناسبی برای تعیین تبخیر-تعرق واقعی ( $AET^{\dagger}$ ) باشد (Brisco *et al.*, 2014). از جمله الگوریتم‌های موجود در سنجش‌ازدور که مربوط به برآورد تبخیر و تعرق که بر اساس روش‌های مبتنی بر بیان انرژی است، می‌توان به الگوریتم سبال ( $SEBAL^{\ddagger}$ ) اشاره کرد. سبال یک الگوریتم سنجش‌ازدور 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 (Bastiaanssen *et al.*, 2002). 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 موارد داده‌های الگوریتم سبال با داده‌های میدانی در چین، هند، اسپانیا و پاکستان بدون هیچ‌گونه اصلاحی مطابقت دارند. در مطالعه ی Jia *et al.* (۲۰۰۹) 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 (Papadavid *et al.*, ۲۰۱۳) تبخیر-تعرق واقعی گیاهان بادام‌زمینی واقع در منطقه ماندریا قبرس را با استفاده از فناوری سنجش‌ازدور تخمین زدند. Sanaeinejad *et al.* (2014) 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 Mohseni Saruri *et al.* (2010)

<sup>†</sup> Actual Evapotranspiration

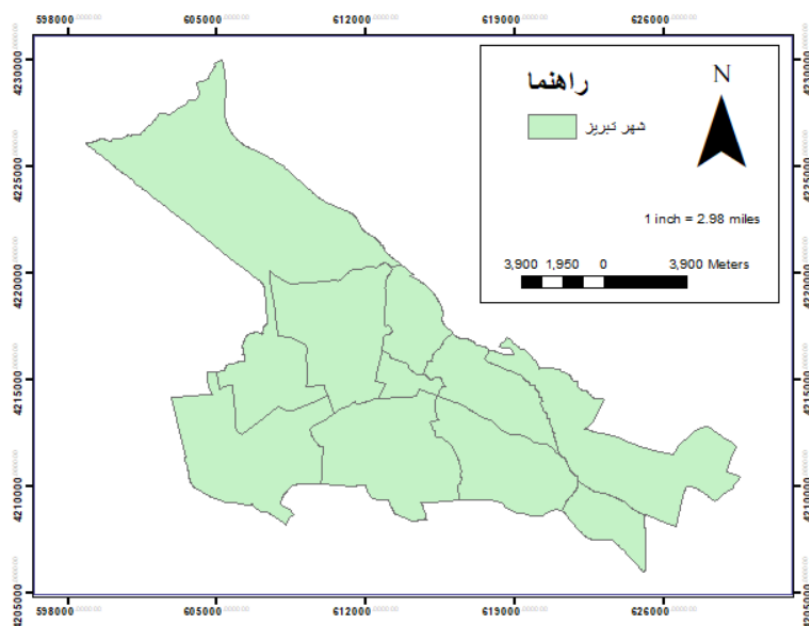
<sup>‡</sup> Surface Energy Balance Algorithm for Land

به منظور بررسی کارایی روش اصلاح شده 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 (۲۰۱۶) از الگوریتم سبال استفاده شد که تبخیر-تعرق واقعی مزرعه را برای مزارع یونجه و ذرت خرمدره برآورد کرده و از داده‌های سنجنش‌ازدور 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 سنجنش‌ازدور 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 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 سنجنش‌ازدور حرارتی است. بدین منظور یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار افزایش دمای سطح زمین است که همان‌طور که گفته شده با استفاده از سنجنش‌ازدور 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.

## ۲. مواد و روش

### ۲/۱. محدوده مورد مطالعه

تبریز در غرب استان آذربایجان شرقی و در منتهی‌الیه شرقی 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 رشته کوه سهند محدود می‌شود (Geographical organization of the armed forces, 2000). 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 (Encyclopedia of the Islamic world, 2001).



شکل ۱- محدوده مورد مطالعه

Fig. 1- study area

## ۲/۲. روش پژوهش

در این پژوهش به منظور تجزیه و تحلیل زیست محیطی 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 تهیه شده است. در نهایت داده‌های خام سنجنش 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 می‌شوند.

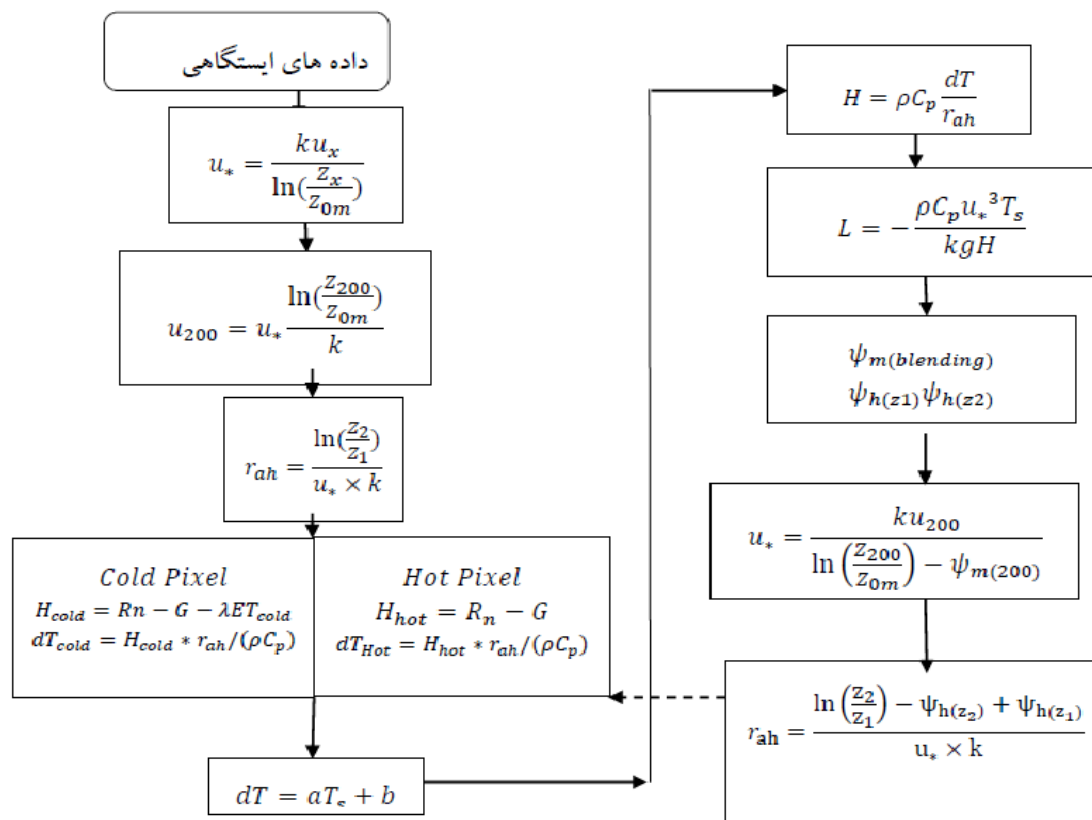
همچنین در این مطالعه از نرم‌افزار Arc Gis 10/8 برای تهیه خروجی و از نرم‌افزارهای 5/3 Envi به منظور انجام پردازش، تجزیه و تحلیل تصاویر لندست استفاده شد. جدول (۱) تصاویر ماهواره‌ای لندست به همراه سنجنده و باندهای حرارتی را نشان می‌دهد، همچنین دیاگرام ۱ نیز روند نمای الگوریتم SEBAL به ترتیب انجام پژوهش را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات تصاویر ماهواره‌ای لندست

Table 1 - Specifications of Landsat satellite images

تاریخ اخذ تصویر	ماهواره	سنجنده	مسیر	ردیف	باند حرارتی	سیستم مختصات
date	Satellite		PATH	ROW	Thermal band	Coordinate system
۲۰۱۳-۰۷-۱۰	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	۱۶۸	۰۳۴	۱۱-۱۰	"WGS84" UTM_ZONE = 39

۲۰۱۵-۰۶-۱۴	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	۱۶۸	۰.۳۴	۱۱-۱۰	"WGS84"UTM_ZONE = 39
۲۰۱۷-۰۶-۱۹	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	۱۶۸	۰.۳۴	۱۱-۱۰	"WGS84"UTM_ZONE = 39
۲۰۱۹-۰۶-۲۵	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	۱۶۸	۰.۳۴	۱۱-۱۰	"WGS84"UTM_ZONE = 39
۲۰۲۱-۰۶-۱۴	"LANDSAT_8"	"OLI_TIRS"	۱۶۸	۰.۳۴	۱۱-۱۰	"WGS84"UTM_ZONE = 39



دیاگرام ۱- روند الگوریتم سبال (RSRC,2015)

Diagram 1- The process of Sabal's algorithm (RSRC, 2015)

### ۲/۳. دمای سطح زمین

از مهم‌ترین مؤلفه‌ها و عوامل تأثیرگذار در افزایش دمای شهر تبریز روند دمای سطح زمین است همان‌طور که قبلاً ذکر شده با استفاده از باندهای حرارتی ماهواره لندست و در سنجنده‌های ("OLI\_TIRS") تهیه می‌شود. به‌منظور تهیه نقشه حرارتی سطح شهر ابتدا باید پردازش‌های روی پیکسل‌های تصاویر برای به دست 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 راقومی می‌باشند این ارزش‌های راقومی 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 راقومی تصاویر ماهواره‌ای را تصحیح کنیم. در واقع 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.

$$L\lambda = \left( \frac{LMAX - LMIN}{Qcalmax - Qcalmin} \right) (Qcal - Qcalmin) + LMIN \quad (Chander et al., 2009)(1)$$

که در آن  $L\lambda$ : رادیانس طیفی در سنجنده،  $Qcal$  ارزش پیکسل در باند موردنظر  $Qcalmin$  حداقل ارزش پیکسل،  $Qcalmax$  حداکثر ارزش پیکسل،  $LMAX$  و  $LMIN$  حداقل و حداکثر رادیانس طیفی در سنجنده است. همچنین میزان ضریب انعکاس برای سنجنده لندست از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$\lambda = \frac{\pi \times L\lambda \times d^2}{ESUN \lambda \times COS \theta S} \quad (Chander et al., 2009)(2)$$

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  $\theta$  زاویه تابش خورشید (درجه) است  
برای به دست آوردن رادیانس طیفی در سنجنده  $OLI$  از رابطه (۳) استفاده می‌شود:

$$\lambda = ML * Qcal + AL \quad (Chander et al., 2009)(3)$$

در این رابطه،  $L\lambda$  رادیانس در بالای اتمسفر  $ML$  ( $watts/m^2 * srad * \mu m$ ) ضریب تبدیل ضریب،  $Qcal$  ارزش‌های پیکسلی ۱۰ و ۱۱ ضریب تبدیل تجمیع کننده است.

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).

$$T = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L\lambda} + 1\right)} \quad \text{(Rajeshwari et al., 2014)(۴)}$$

که در آن  $T$  دمای مؤثر درخشندگی در سنجنده برحسب کلون،  $K2$  ضریب کالیبراسیون ۲ برحسب کلون،  $K1$  ضریب کالیبراسیون ۱ برحسب  $W(m\ st\ \mu m)$  و  $L\lambda$  رادیانس طیفی در سنجنده است. ضرایب  $K1$  و  $K2$  بر اساس جدول (۲) محاسبه می‌شود.

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 کلون) Calibration ۲ (Kelvin)
L5-TM B6	۶۰۷/۷۶	۱۲۶۰/۵۶
L7-ETM+B6	۶۶۶/۰۹	۱۲۸۲/۷۱
L8-OLI B10	۷۷۷/۸۹	۱۳۲۱/۰۸
L8-OLI B11	۴۸۰/۸۹	۱۲۰۱/۱۴

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

## ۲/۵ 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 درزمینه‌ی 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، به جز در مواردی که پوشش گیاهی کم باشد، حساسیت کمتری دارد. شاخص  $NDVI$  از رابطه (۵) محاسبه می‌شود:

$$NDVI = \frac{NIR-RED}{NIR+RED} \quad (VAN DE GRIEND \& OWE, 1993) (۵)$$

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 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 بارنگ سبز تیره تهیه شد.

#### ۲/۶. تهیه نقشه تبخیر-تعرق

سبال (الگوریتم توازن انرژی سطحی برای زمین) مدلی مبتنی بر پردازش تصویر بوده که مشتمل برای بیست‌وپنج مدل جهت محاسبه تبخیر-تعرق ( $ET$ ) به‌عنوان باقیمانده بیلان انرژی سطحی زمین است. این مدل توسط باستیانس 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 استفاده می‌نماید. مقدار  $ET$  در هر پیکسل (به‌عنوان 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 گرهای وارده به خاک و گرمای وارده به هوا محاسبه خواهد شد. جزئیات بیشتر این مدل توسط باستیانس و همکارانش ارائه شده است، اما معادله کلی مورد استفاده سبال به صورت زیر است:

$$LE = Rn - H - G \quad (۶)$$

که در این فرمول  $LE$  شار گرمای نهان بر حسب ( $Wm^{-2}$ ) است که به راحتی قابل تبدیل به  $ET$  است  $Rn$ . تابش خالص خورشیدی است  $H$  ( $Wm^{-2}$ ) شار گرمای محسوس ( $Wm^{-2}$ ) و  $G$  شار گرمای زمین یا خاک ( $Wm^{-2}$ ) است. از این فرمول این چنین 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



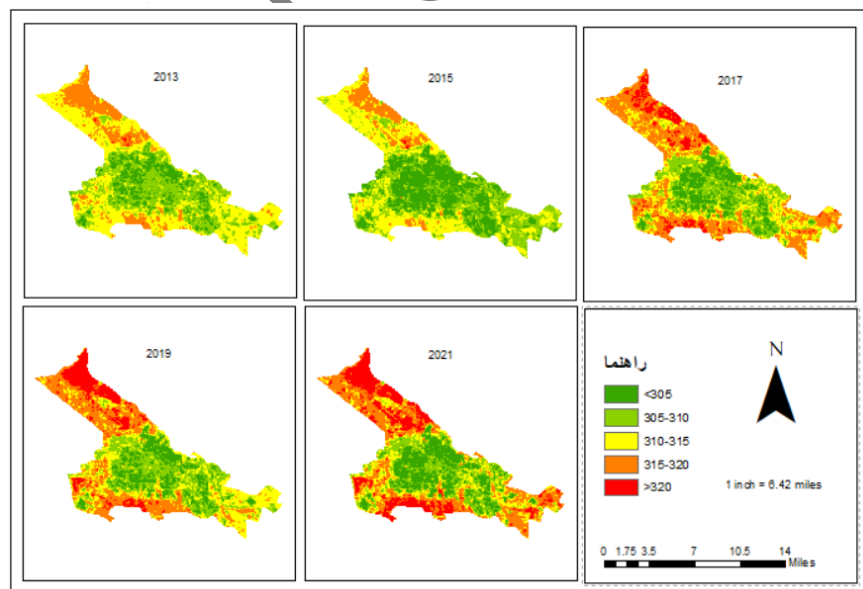
هدف سبب محاسبه شار گرمای نهان ( $ET$ ) است که همان  $ET$  واقعی محسوب می‌گردد. لازم به ذکر است که دقت واقعی نتایج حاصله برای  $LE$  یا  $ET$  است. متأثر از دقت باند با طول موج کوتاه و نیز باند ترمال ماهواره است که در معادله زیر تشعشع خالص از معادله توازن انرژی سطحی محاسبه می‌شود:

$$Rn = (1 - \alpha)Rs + (Lin - Lout) \quad (7)$$

که در آن  $a$  آلبیدی سطحی،  $Rs$  تابش خورشیدی ( $Wm^{-2}$ )،  $e$  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 به دست می‌آید. مقادیر پتانسیل  $Rs$  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 باستیانس و همکاران قابل برآورد است.

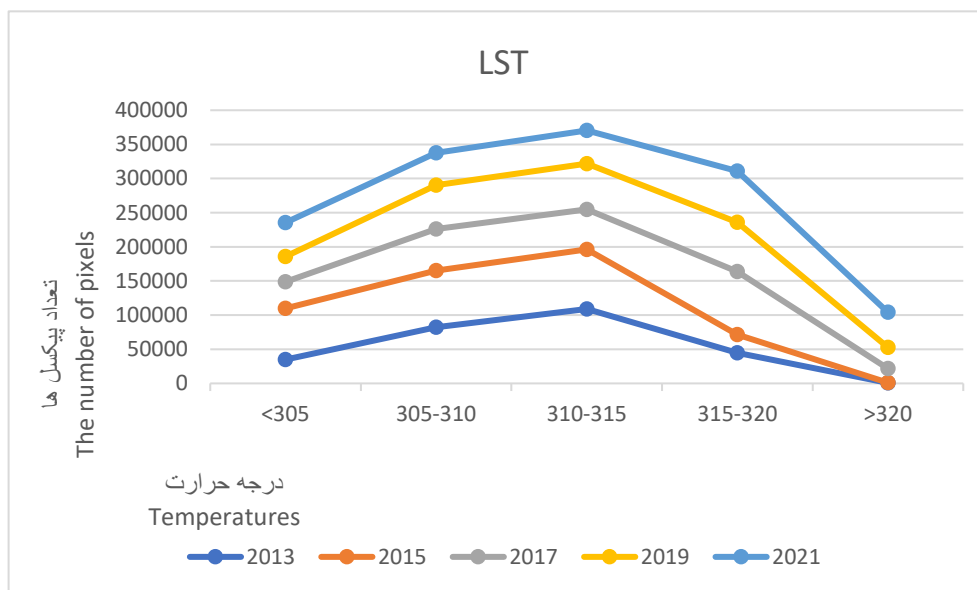
### ۳. نتایج

نقشه  $LST$  در دوره مورد بررسی به ۵ دسته (کمتر از ۳۰۵ درجه به رنگ سبز، ۳۰۵ الی ۳۱۰ درجه سبز کم‌رنگ، ۳۱۰ الی ۳۱۵ درجه به رنگ زرد، ۳۱۵ الی ۳۲۰ به رنگ نارنجی درجه و از ۳۲۰ درجه به بالا به رنگ قرمز) مشخص شده است، با توجه نتایج به دست آمده از سال ۲۰۱۷ قسمت نارنجی و قرمز رنگ افزایش پیدا کرده است. ۳۱۵ الی ۳۲۰ درجه و ۳۲۰ درجه به بالا در منطقه مورد بررسی غالب گردیده است.



شکل ۲- نقشه LST

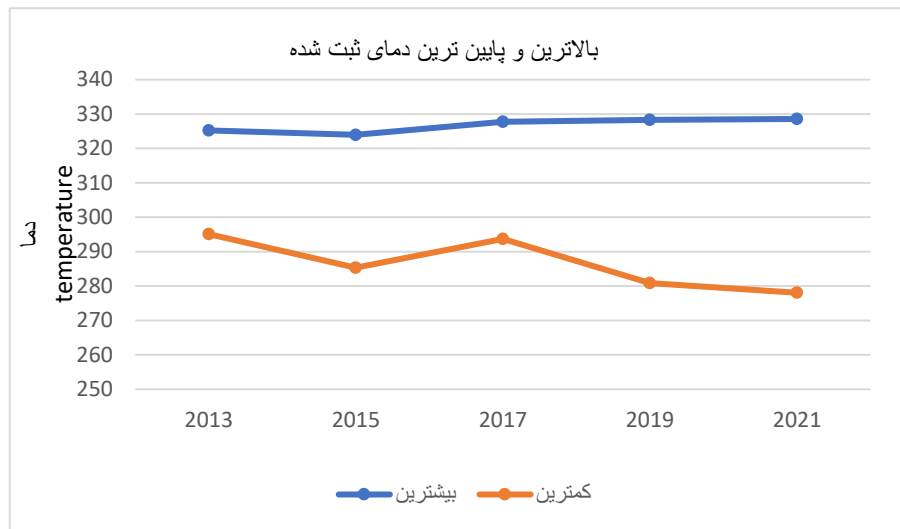
Figure 2- LST map



شکل 3- نمودار تغییرات پیکسل LST

Figure 3- Diagram of LST pixel changes

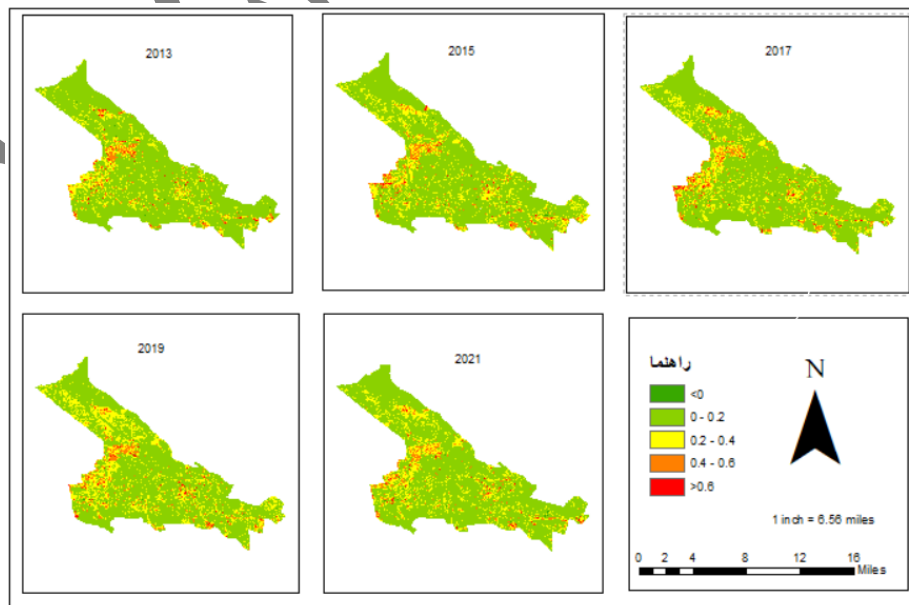
شکل شماره ۴ که نمودار تغییرات گرم‌ترین و سردترین پیکسل ثبت‌شده را نشان می‌دهد که با توجه به نتایج نشان‌دهنده افزایش دمای گرم‌ترین پیکسل بوده (سال ۲۰۱۳ بیشترین دمای ثبت‌شده ۳۲۵ درجه بوده که در سال ۲۰۱۵ به ۳۲۳ درجه کاهش و مجدد افزایش و به ۳۲۷.۷ و ۳۲۸.۳ و ۳۲۸.۶ درجه در سال‌های ۲۰۱۷، ۲۰۱۹، ۲۰۲۱ رسیده است)، همچنین سردترین پیکسل به جز سال ۲۰۱۷ روند نزولی داشته است و از ۲۹۵ درجه در سال ۲۰۱۳ به ۲۸۵.۴ درجه رسیده اما در سال ۲۰۱۷ به ۲۹۳.۷ درجه افزایش پیدا کرده و در ادامه به ۲۸۰.۹ و ۲۷۸ درجه کاهش پیدا کرده است.



شکل 4- نمودار تغییرات LST

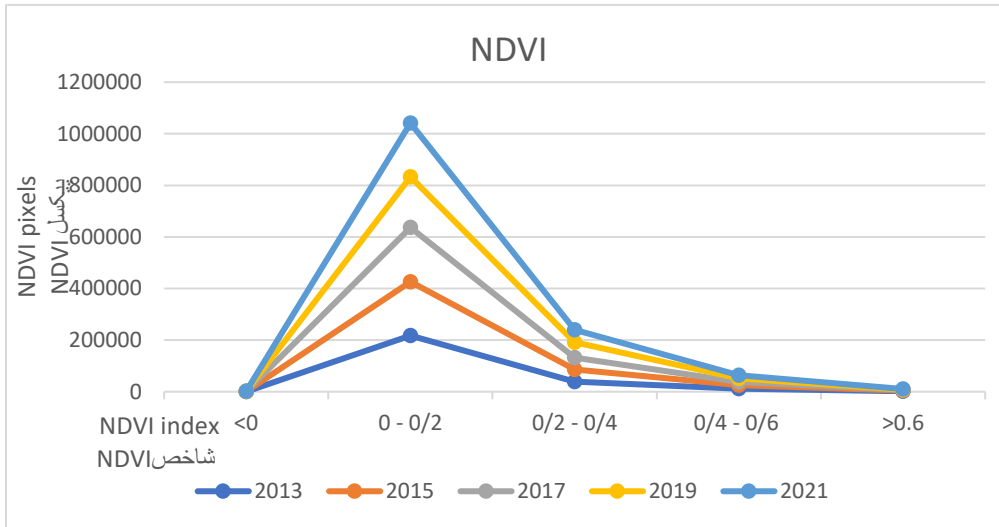
Fig 4- Diagram of LST changes

شکل شماره 5 نشان دهنده شاخص *NDVI* برای سال‌های ۲۰۱۳ تا 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 نارنجی و بیشتر از ۰/۶ به رنگ قرمز تقسیم گردیده است، با توجه به نتایج این شاخص پیکسل‌های رنگ زرد و قرمز رنگ (۰/۱-۰/۴) و (<۰/۶) افزایش پیدا کرده است.



شکل 5- نقشه شاخص NDVI

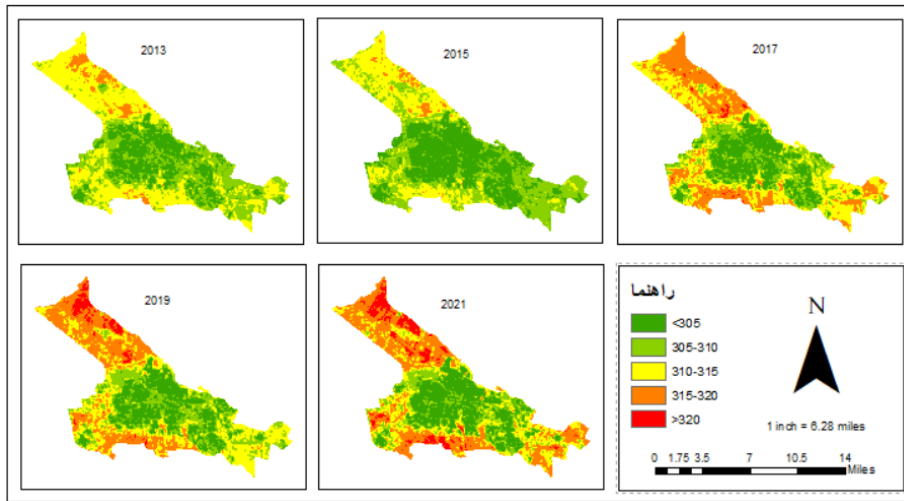
Fig 5- Map of NDVI index



شکل 6- نمودار تغییرات پیکسل NDVI

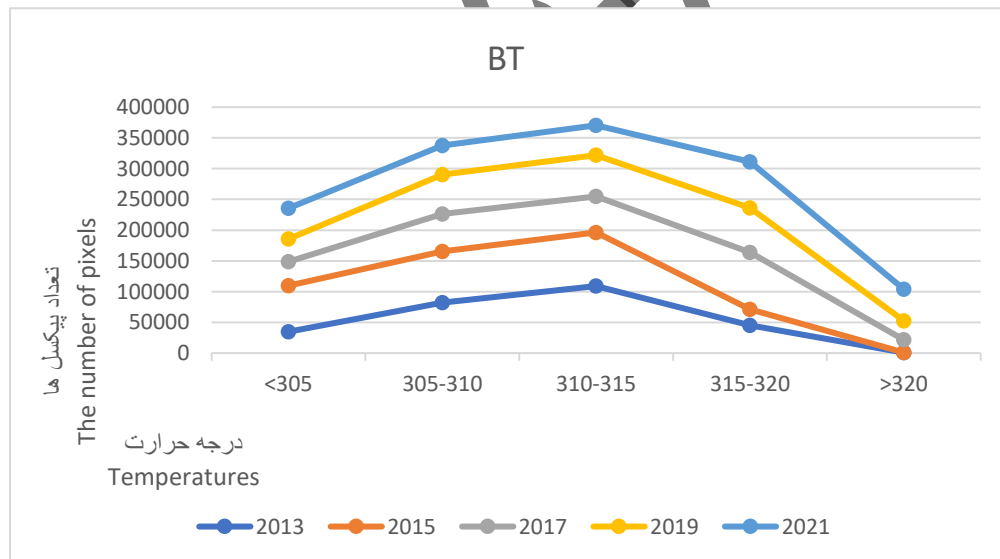
Figure 6- Diagram of NDVI pixel changes

شکل شماره 7 نشان دهنده BT در دوره مورد بررسی به 5 دسته (کمتر از 305 به رنگ سبز تیره، 305 الی 310 سبز کم رنگ، 310 الی 315 به رنگ زرد، 315 الی 320 به رنگ نارنجی و از 320 درجه به بالا بارنگ قرمز) مشخص شده است، با توجه نتایج به دست آمده از سال 2014 قسمت نارنجی و قرمز رنگ افزایش پیدا کرده است. 315 الی 320 و 320 درجه به بالا در منطقه مورد بررسی غالب گردیده است. با توجه به نتایج نشان دهنده افزایش پیکسل های قرمز در خارج از مرکز شهر بوده و شاخص BT افزایش پیدا کرده است و پیکسل های 310-315 جای خود را به 315-320 و 320 به بالا داده است.



شکل 7- نقشه BT

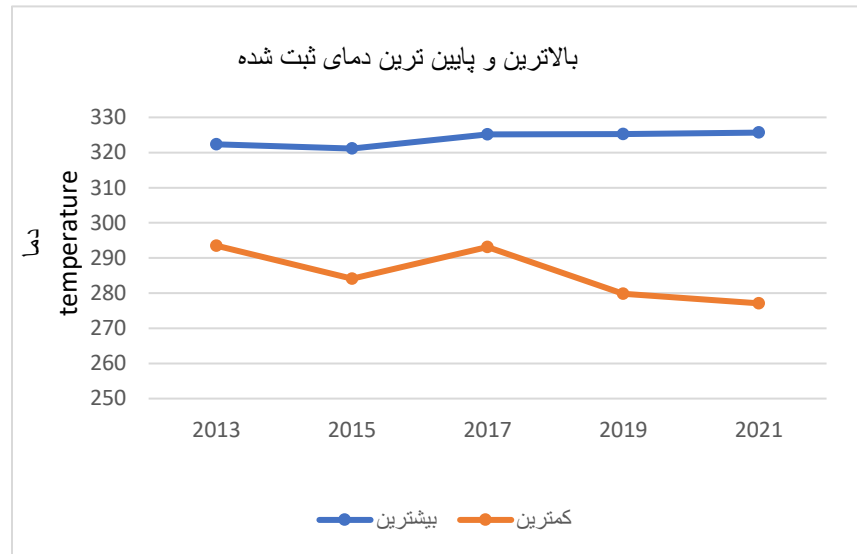
Fig 7 - BT map



شکل 8- نمودار تغییرات پیکسل BT

Figure 8- Diagram of BTS pixel changes

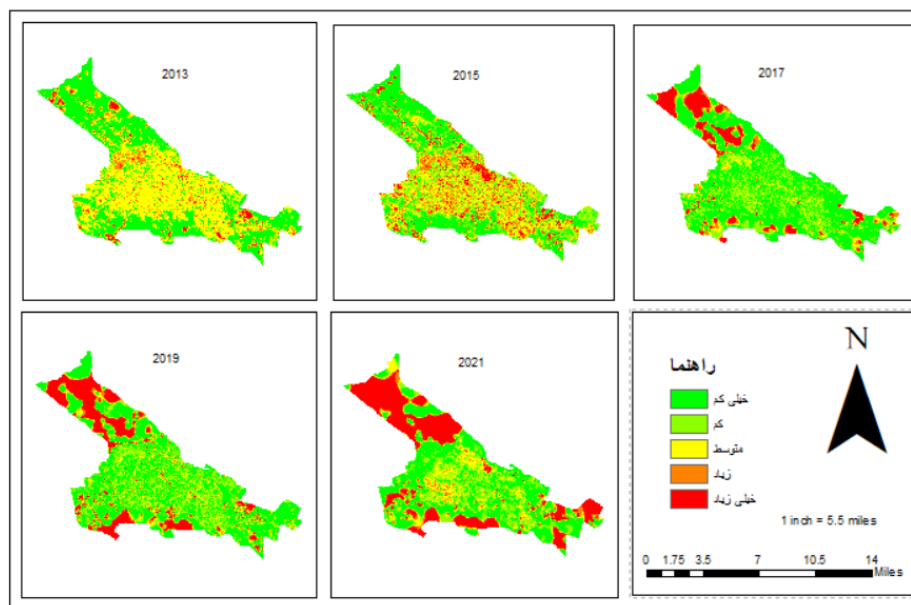
شکل شماره 9 نمودار تغییرات گرم‌ترین و سردترین پیکسل ثبت‌شده را نشان می‌دهد که با توجه به نتایج نشان‌دهنده افزایش دمای گرم‌ترین پیکسل بوده همچنین سردترین پیکسل به‌جز سال ۲۰۱۷ روند نزولی داشته است. تغییرات گرم‌ترین پیکسل به‌صورت (325/6، 325/2، 325/1، 321/1، 322/3) درجه برای سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱ بوده است.



شکل 9- نمودار تغییرات BT

Fig 9-Chart of BT changes

شکل شماره 10 نشان‌دهنده تبخیر-تعرق شهر تبریز است. نتایج به ۵ دسته سبز تبخیر-تعرق خیلی کم، سبز کم‌رنگ کم و زرد متوسط و رنگ نارنجی و قرمز به ترتیب زیاد و خیلی زیاد را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۵ مرکز شهر دارای تبخیر-تعرق متوسط (پیکسل زرد) قبال توجهی داشته، از سال ۲۰۱۷ الی ۲۰۲۱ پیکسل‌های قرمز رنگ در قسمت‌های پیرامون مرکز شهر افزایش و پیکسل‌های سبزرنگ در مرکز متمرکز شده است. به‌طور کلی روند تبخیر-تعرق در این شهر افزایش پیدا کرده و پیکسل‌های قرمز افزایش پیدا کرده است.



شکل 10- تبخیر تعرق

Fig 10- Evaporation and transpiration

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

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 ۴ کشور مختلف استفاده کرد و به این نتیجه رسید که ۸۵ درصد موارد بررسی شده بدون هیچ‌گونه واسنجی مطابقت داشتند یا سروری محسنی و همکارانش که 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 ۷ 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 اولاً ( $LST$ ) 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. ثانیاً شاخص  $NDVI$  نشان داد پیکسل‌های رنگ زرد و قرمز رنگ ( $0/2-0/4$ ) و ( $0/6 >$ ) 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 می‌زارد، نتایج تبخیر-تعرق به‌درستی 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. 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 ... موردبررسی قرار گیرند.

## منابع

- Bastiaanssen, WG., Menenti, M., Feddes, RA., Holtslag, AAM. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). 1. Formulation. *Journal of Hydrology*, 212, 198-212.
- Bastiaanssen, WG., Pelgrum, H., Wang, J., Ma, Y., Moreno, JF., Roerink, GJ., Van der Wal, T. 1998. A remote sensing surface energy balance algorithm for land (SEBAL). Part 2, Validation. *Journal of Hydrology*, 212, 213-229.
- Bastiaanssen, WG., Allen, R., Tasumi, M., Trezza, R., Waters, R. 2002. SEBAL, Surface Energy Balance Algorithms for Land, Idaho Implementation, Advanced training and user manual. NASA EOSDIS/Synergy grant from the Raytheon Company through The Idaho Department of Water Resources.
- Brisco, B., Brown, RJ., Hirose, T., McNairn, H., Staenz, K. 2014. Precision agriculture and the role of remote sensing: a review. *Can. J. Rem. Sens*, 24, 315-327. <http://dx.doi.org/10.1080/07038992.1998.10855254>
- Chander, G., Markham, B., 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>.
- Encyclopedia of the Islamic world. 2001, volume six, Tabriz, under the supervision of Gholam Ali Haddad Adel, Tehran: Islamic Encyclopedia Foundation, Tabriz, p. 381.
- Geographical organization of the armed forces. 2000, page 48.
- Jia, L., Xi, G., Liu, S., Huang, C., Yan, Y., Liu, Y. 2009. Regional estimation of daily to annual regional evapotranspiration with MODIS data in the Yellow River Delta wetland. *Hydrology and Earth System Science*, 13, 1775-1787.
- Karbasi M, Moghaddam M, Nikbakht J, Kaviani A. 2016. Estimation of crop actual evapotranspiration using SEBAL algorithm (Case study: Khoramdareh region at Zanjan province), *Journal of Echo Hydrology*, 3 (3). 427-437. (In Farsi with English abstract).
- Liu, S., Bai, J., Jia, Z., Jia, L., Zhou, H., Lu, L. 2010. Estimation of evapotranspiration in the MuUs Sandland of China. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* (14), 573-584.
- Lopes, JD., Rodrigues, LN., Acioli Imbuzeiro, HM., Pruski, FF. 2019. Performance of SSEBop model for estimating wheat actual evapotranspiration in the Brazilian Savannah region. *International Journal of Remote Sensing*, 40(18), 6930-6947. <http://dx.doi.org/10.1080/01431161.2019.1597304>
- Mohseni Saruri M, Ahmadi H, 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, November, International Center for Advanced Science and Technology and Environmental Sciences. (In Farsi with English abstract).
- Papadavid, G., Hadjimitsis, DG., Toullos, L., Michaelides, S. 2013. A modified SEBAL modelling approach for estimating crop evapotranspiration in semi-arid conditions. *Water resources management*, 27(9).3493-3506.
- Rajeshwari, A., 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. <https://ijret.org/volumes/2014v03/i05/IJRET20140305025.pdf>.



- 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 H, NASSIRI M.M., Zare H, Salehnia N, Ghaemi M. 2014. Wheat yield Estimation using Landsat images and field observation: A case study in Mashhad. Journal of agricultural sciences and natural resources, 20(4), 45-63
- Sharghi T, Bary Abarghuei H, Asadi M, Kousari M.2010. Estimation of reference evapotranspiration using FAO-Penman-Monteith method and its zonation in Yazd province, Khoshkboom Magazine, 1 (1). 25-33. (In Farsi with English abstract).
- Szabó, S., Elemér, L., Kovács, Z., Püspöki, Z., Kertész, A., Kumar Singh, S., Balázs, B. 2019. NDVI dynamics as reflected in climatic variables: spatial and temporal trends – a case study of Hungary. GIScience & Remote Sensing, 56(4), 624-644. <http://dx.doi.org/10.1080/15481603.2018.1560686>.
- Van De Griend, A., 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. (<https://doi.org/10.1080/01431169308904400>).

انتشارات  
پژوهش  
مطبقه

# Monitoring study of evapotranspiration rate in Tabriz city using SEBAL algorithm with GIS and TRS integration

Ali Sayyadi,<sup>1</sup> Mohammad Javad Amiri<sup>1§</sup> Mohammad Yazdi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Environment and Safety, Faculty of Environment, University of Tehran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Geology of Mineral and Water resources, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

**Introduction:** evaporation-transpiration is one of the essential parts of the water cycle balance. Over 0.72% of the country's water resources are unavailable due to evaporation-transpiration. These factors show the importance and necessity of optimal use of water and accurate prediction of actual evaporation and transpiration in various applications such as agriculture and water resource management, including irrigation planning and plant growth modelling. Accurate evapotranspiration estimates are essential in studies such as climate change, sustainable development and water resources control. This research aims to investigate the process of thermal changes and the rate of evaporation-transpiration of the Tabriz metropolis using remote sensing.

**Material and methods:** In this research, due to the high accuracy and adaptability of the Sabal algorithm, as well as remote sensing techniques, the Sabal algorithm and Landsat satellite images were used to estimate evaporation and transpiration. For this purpose, Landsat satellite images in sensors ("OLI\_TIRS") from 2013-2021 have been prepared from the website of the National Aeronautics and Space Administration (NASA). Also, in this research, the techniques of thermal remote sensing and geographic information system were used, which were combined effectively and efficiently. This study used ARC Gis 8.10 software to prepare the output and Envi 3.5 software to process, analyze and analyze Landsat images.

**Results and discussion:** This research showed that since 2017, the orange and red parts of LST have increased. Pixels with temperatures of 315 to 320 and 320 degrees and above have prevailed in the studied area. The NDVI index showed that yellow and red pixels (0.2-0.4) and (<0.6) have increased. The index (BT) has increased, and 310-315 pixels have been replaced by 320-315 and 320 and above. The evaporation-transpiration results showed an upward trend in evaporation-transpiration, and it increased from 2017 to 2021 in part outside the city centre.

**Conclusion:** According to the results of this research, evaporation-transpiration has increased outside the city centre; in the parts where the temperature increase has been recorded, the rate of evaporation-transpiration has also increased, and a significant relationship has been documented. It is also suggested that according to the

---

<sup>§</sup> Corresponding Author: Email Address. mjamiri@ut.ac.ir

results of the research in the years 2017, 2019 and 2021, visible changes have been recorded outside the city centre in evaporation-transpiration to use the daily, monthly and annual formula in future research.

**Keywords:** SEBAL algorithm, Heat Island, air temperature, evaporation, Tabriz.

نسخه  
پیش  
انتشار