

مطالعات جغرافیایی مناطق خشک

دوره ششم، شماره بیستم و سوم، بهار ۱۳۹۵

تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۱/۲۸

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۷/۲۴

صص ۶۳-۵۰

پایش مکانی خشک‌سالی در جغرافیای کشاورزی مناطق خشک از طریق شاخص شرایط حرارتی پوشش

گیاهی (VTCI) و به‌وسیله‌ی داده‌های دورسنجی MODIS، مطالعه‌ی موردی: استان مرکزی

علی اکبر دماوندی، دانشجوی دکتری بیابان‌زدایی - دانشگاه سمنان

محمد رحیمی*، استادیار آب و هواشناسی - دانشگاه سمنان

محمد رضا یزدانی، استادیار آب و هواشناسی - دانشگاه سمنان

علی اکبر نوروزی، استادیار خاکشناسی - سازمان تحقیقات آموزش و ترویج کشاورزی تهران

چکیده

خشک‌سالی از جمله بلاهای طبیعی است که سبب وارد شدن خسارات اقتصادی فراوانی خصوصاً در بخش جغرافیای کشاورزی و منابع طبیعی مناطق خشک می‌گردد. ارزیابی و پایش خشک‌سالی به دلیل ماهیت آرام و خزنده‌اش با مسائل و مشکلات فراوانی همراه است. رویکرد استفاده از شاخص‌های مبتنی بر فناوری سنجش‌ازدور به دلیل قابلیت‌های مکانی و زمانی مناسب و نیز عدم وجود مشکلات روش‌های نقطه‌ای، در حال توسعه و پیشرفت است. از جمله این شاخص‌ها، شاخص شرایط درجه حرارت پوشش گیاهی (VTCI) است که بر اساس استفاده هم‌زمان از NDVI و LST ایجاد شده است؛ بنابراین در این تحقیق قابلیت شاخص VTCI در پایش مکانی خشک‌سالی مدنظر قرار گرفته است. برای این منظور، محصولات NDVI و LST سنجنده مودیس ماهواره ترا برای مردادماه سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ دریافت شده و پس از انجام اصلاحات مکانی و زمانی لازم، برای ایجاد شاخص VTCI، مورد پردازش قرار گرفتند. بر اساس نتایج، سال ۱۳۸۵ دارای ضرایب رگرسیون بالاتری نسبت به سایر سال‌ها بوده است ($R^2=0/73$) برای لبه‌ی گرم و $R^2=0/86$ برای لبه‌ی سرد). در ادامه، شاخص VTCI مربوط به مردادماه هر سال بر اساس ضرایب رگرسیون همان سال استخراج و نقشه‌ی VTCI منطقه به ۵ کلاس تنش خشک‌سالی: شدید، متوسط، ملایم، نرمال و مرطوب طبقه‌بندی شده و در نهایت طبقات خشک‌سالی در طی این ۱۵ سال با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج حاصل نشان دادند که بیش‌ترین درصد مساحت خشک‌سالی مربوط به طبقه‌ی متوسط و کم‌ترین درصد مربوط به طبقه‌ی مرطوب بوده است. هم‌چنین سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۰ دارای بیش‌ترین درصد طبقه‌ی شدید و مرطوب بوده‌اند.

واژگان کلیدی: خشک‌سالی کشاورزی، سنجش‌ازدور، VTCI، مودیس، NDVI، LST.

* Email: mrahimi@profs.semnan.ac.ir

نویسنده‌ی مسئول:

این مقاله بر گرفته از پایان‌نامه‌ی دکتری بیابان‌زدایی دانشگاه سمنان می‌باشد.

۱- مقدمه

خشک‌سالی بلای طبیعی آرام و خزنده‌ای است که به تدریج محیط را تسخیر می‌کند و سبب ایجاد مجموعه‌ای از اثرات در بخش‌های مختلف، به‌ویژه بخش کشاورزی می‌گردد (Wardlow et al., 2012: 2). مطالعه‌ی ویژگی‌های خشک‌سالی به دلیل اثرات سوء فراوانی که بر جغرافیای مناطق خشک وارد می‌کند، از اهمیت فراوانی برخوردار است. خشک‌سالی منجر به کاهش میزان تولید محصولات کشاورزی می‌گردد که این کاهش تحت تأثیر شدت، مدت و وسعت مکانی تنش خشک‌سالی است (Patel et al., 2012: 2). خشک‌سالی در کشورهایی مانند ایران که در جغرافیای مناطق خشک و نیمه‌خشک واقع می‌گردند، به دلیل محدودیت منابع آب، اثرات منفی بیش‌تری داشته و حتی می‌تواند به بحران تبدیل گردد. طبق نظر فائو خسارات ناشی از خشک‌سالی در سال‌های ۲۰۰۱ و ۲۰۰۲ در ایران به ترتیب برابر با ۲/۵ و ۱/۷ میلیارد دلار بوده است (FAO, 2013: 12)؛ بنابراین پایش و ارزیابی این پدیده‌ی خطرناک برای برنامه‌ریزان و تصمیم‌سازان از نقطه‌نظر امنیت غذایی، بسیار حائز اهمیت است (AghaKouchak, 2015: 3). پایش خشک‌سالی در کشورهایی مانند ایران که از طریق روش‌های مبتنی بر ایستگاه‌های هواشناسی صورت می‌گیرد، به دلیل عدم وجود شبکه‌ی پراکنده و نیز عدم دسترسی به داده‌های به‌هنگام از دقت مطلوبی برخوردار نیست. فناوری سنجش‌ازدور با همراهی سیستم اطلاعات جغرافیایی با ایجاد قابلیت‌های مناسب مکانی و زمانی، امکان ارزیابی و پایش پدیده‌های متغیر سطحی مانند خشک‌سالی را فراهم آورده است، به‌طوری‌که در دو دهه‌ی اخیر استفاده از روش‌های مبتنی بر داده‌های ماهواره‌ای برای پایش خشک‌سالی‌ها از اولویت‌های اول سازمان‌های تحقیقاتی و تخصصی شده است (Zargar et al., 2011: 20).

یکی از معروف‌ترین روش‌های مطالعه‌ی خشک‌سالی‌ها، استفاده از شاخص‌های خشک‌سالی است (Tsakiris et al., 2007: 4). شاخص‌های خشک‌سالی، سنجش‌های کمی هستند که سطوح خشک‌سالی را به‌وسیله‌ی همانندسازی و تلفیق داده‌ها از یک یا چندین متغیر مانند بارندگی و تبخیر و تعرق به یک مقدار عددی واحد توصیف می‌نمایند (Zargar et al., 2011: 8). چنین شاخصی دارای سهولت بیش‌تری برای استفاده نسبت به داده‌های اقلیمی خام می‌باشند (Hayes, 2011: 7). شاخص‌های خشک‌سالی می‌توانند بیانگر ناهنجاری‌های خشکی اقلیمی (عموماً مبتنی بر بارش) و یا در ارتباط با اثرات همراه با تأخیر کشاورزی و هیدرولوژیکی نظیر هدر رفتن رطوبت خاک یا پایین رفتن سطح مخازن آب زیرزمینی باشند (et al., 1987: 9). شاخص‌های خشک‌سالی را می‌توان بر اساس داده‌ها و فناوری به‌کار گرفته‌شده طبقه‌بندی کرد (Steinemann et al., 2005: 5). از آنجایی‌که توسعه‌ی شاخص خشک‌سالی از نظر مفهومی می‌تواند بر اساس عوامل متعددی صورت گیرد (ماهیت خشک‌سالی و ویژگی‌ها و اثرات در نظر گرفته‌شده)، شاخص‌های خشک‌سالی متعددی توسعه‌یافته‌اند (Niemeyer, 2008: 11). همراه با ادامه‌ی توسعه فناوری (خصوصاً در زمینه‌ی سنجش‌ازدور)، شاخص‌های خشک‌سالی مبتنی بر این فناوری با تأکید بر پوشش گیاهی و رطوبت سطحی توسعه‌یافته‌اند (Brown et al., 2008: 6). با روی کار آمدن فناوری سنجش‌ازدور، ابعاد جدیدی از راه‌حل‌ها برای مسائل زیست‌محیطی فراهم گردید. بدین‌صورت که تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی و زمانی مناسب به‌عنوان داده‌های تکمیلی، امکان بررسی و پایش اثرات مکانی و زمانی خشک‌سالی را فراهم نمودند (Gu et al., 2007: 8). در نتیجه سنجش‌ازدور ماهواره‌ای برای تعیین به‌موقع و پایش مکانی و زمانی خصوصیات خشک‌سالی در سراسر جهان مورداستفاده و کاربرد قرار گرفتند.

شاخص پوشش گیاهی تفاضل نرمال شده (NDVI) به‌عنوان معروف‌ترین شاخص برای پایش واقعی خشک‌سالی مطرح است (Park et al., 2004: 8; Wang et al., 2004: 6). به دلیل تأخیر در واکنش پوشش گیاهی به خشک‌سالی، شاخص

NDVI نمی‌تواند رویداد خشک‌سالی را به‌صورت فوری آشکار سازد. از طرفی دیگر شاخص درجه حرارت سطح زمین (LST^2) که به تنش آب حساسیت دارد، شاخص مناسبی برای پیش‌خشک‌سالی است (Goetz, 1997: 6; Jackson et al., 1981: 6). شاخص LST شاخص مناسبی برای تعیین تعادل انرژی در سطح زمین در مقیاس منطقه‌ای و جهانی است. در نتیجه پیش‌دقیق و واقعی خشک‌سالی نیازمند ترکیب داده‌های ماهواره‌ای باندهای حرارتی، مرئی و مادون‌قرمز است تا اطلاعات موردنیاز شرایط پوشش گیاهی و شرایط رطوبتی و حرارتی را فراهم آورد. نمودار پراکندگی حاصل از شاخص‌های درجه حرارت و پوشش گیاهی در صورت بزرگ بودن منطقه‌ی مطالعه به‌صورت یک مثلث یا دوزنقه است. اخیراً از طریق تفسیر نمودار پراکندگی حاصل از NDVI و LST انواع گوناگونی از اطلاعات هیدرولوژی مانند درجه حرارت، تبخیر و تعرق و رطوبت خاک استخراج شده است (Sandholt et al., 2002: 8).

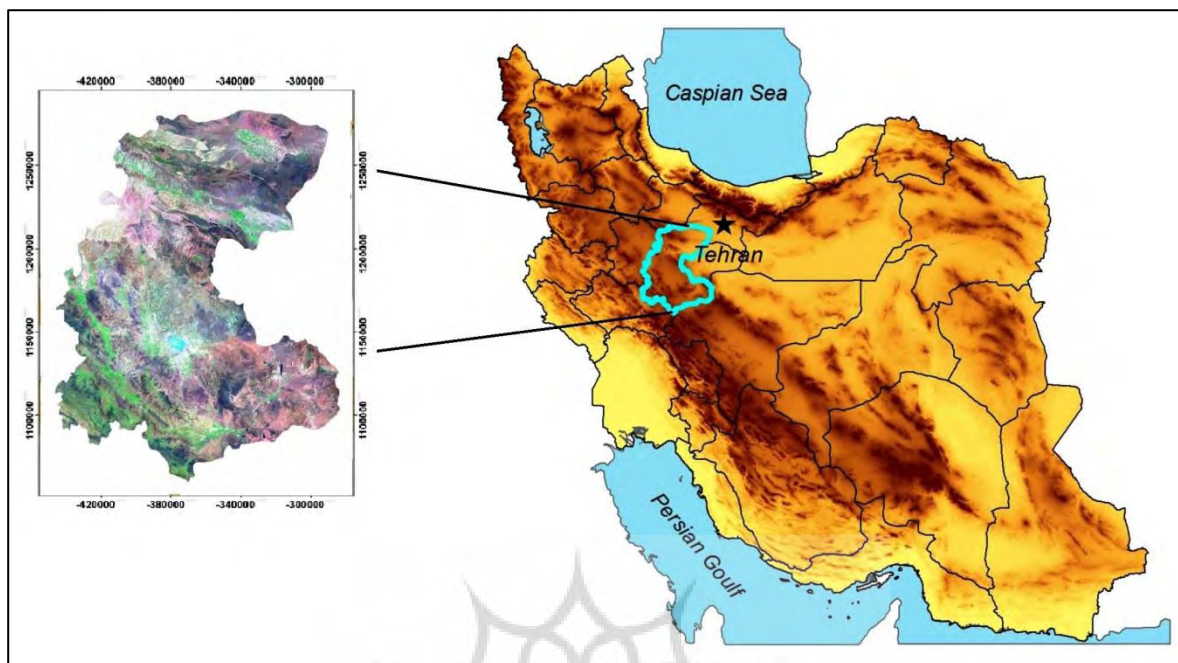
ارتباط میان NDVI و LST بستگی به فصل سال و شرایط رطوبتی منطقه دارد. نتایج یک تحقیق جامع که در خصوص رابطه‌ی میان NDVI و LST در قاره‌ی آمریکای شمالی در طول فصل رویش انجام شد (آوریل - سپتامبر) نشان داد وقتی آب عامل محدودکننده برای رشد پوشش گیاهی باشد رابطه NDVI و LST منفی بوده و در صورتی که تابش خورشید عامل محدودکننده باشد رابطه NDVI و LST مثبت است (Karnieli et al., 2010: 7). اثرات تنش خشک‌سالی بر کشاورزی، ارتباط نزدیکی با تبخیر و تعرق حقیقی به‌وسیله‌ی تاج پوشش‌های گیاهان در دوره‌ی رشد دارد. بنابراین شاخص خشک‌سالی که ارتباط نزدیکی با الگوهای آب گیاهان زراعی داشته باشد، نقشی کلیدی را در پیش‌خشک‌سالی کشاورزی ایفا خواهد کرد. شاخص‌های خشک‌سالی زیادی برای تعیین و پیش‌به‌هنگام و واقعی گسترش و بزرگی مکانی خشک‌سالی ایجاد گردیده‌اند. هدف این تحقیق، به‌کارگیری رویکرد توسعه‌ی پیش‌مکانی خشک‌سالی کشاورزی از طریق شاخص شرایط حرارتی پوشش گیاهی ($VTCI^3$) است. این رویکرد به‌وسیله‌ی محصولات داده‌های سنجنده‌ی مودیس ماهواره ترا برای استان مرکزی مورد ارزیابی قرار گرفته است. هم‌چنین با توجه به چالش اصلی استفاده از شاخص $VTCI$ (تعیین لبه‌ی گرم و سرد فضای ایجادشده توسط شاخص‌های LST و NDVI)، ارزیابی تعیین لبه‌ی گرم و سرد نیز مدنظر می‌باشد. با توجه به آن‌چه در بیان مسئله‌ی تحقیق ارائه شد، هدف این تحقیق، ارزیابی توانایی داده‌های سنجنده MODIS در پیش‌مکانی خشک‌سالی کشاورزی با رویکرد نزدیک به واقعیت در استان مرکزی است.

۲- منطقه‌ی مورد مطالعه

استان مرکزی- بین عرض‌های جغرافیایی 23° و 33° تا 33° و 35° شمالی و طول‌های جغرافیایی 51° و 48° تا 51° و 50° شرقی واقع شده است. استان مرکزی از شمال به استان‌های تهران، البرز و قزوین، از غرب به استان همدان، از جنوب به استان لرستان و شرق به استان‌های قم و اصفهان محدود شده است. مساحت کل آن در حدود ۲۹۱۲۷ کیلومترمربع (۲/۹۱۲/۷۰۰ هکتار) است که حدود ۱/۸۵ درصد از مساحت کل کشور را به خود اختصاص می‌دهد. استان مرکزی از یک‌طرف در کویر مرکزی و از طرف دیگر در محل زاویه‌ی چین‌خوردگی البرز و زاگرس واقع شده است. قلمرو ارتفاعات در استان مرکزی از جنوب غربی به شمال شرقی کاهش می‌یابد به‌طوری‌که مرتفع‌ترین نقطه‌ی استان، قله‌ی کوه آدینه در جنوب غرب شازند با ارتفاع ۳۳۹۰ متر از سطح دریا و پست‌ترین نقطه‌ی آن اراضی جنوبی و جنوب غربی دشت ساوه با ارتفاع ۹۵۰ متر از سطح دریا است. میزان بارندگی نواحی مختلف استان نیز متناسب با این کاهش ارتفاع کم می‌شود، به‌طوری‌که پرباران‌ترین نقطه‌ی آن، شهرستان شازند با بارندگی ۵۲۰ میلی‌متر و کم‌باران‌ترین آن دلیجان با ۱۷۷ میلی‌متر و متوسط بارندگی آن ۲۹۰ میلی‌متر در سال است.

2- Land Surface Temperature

3- Vegetation Temperature Condition Index

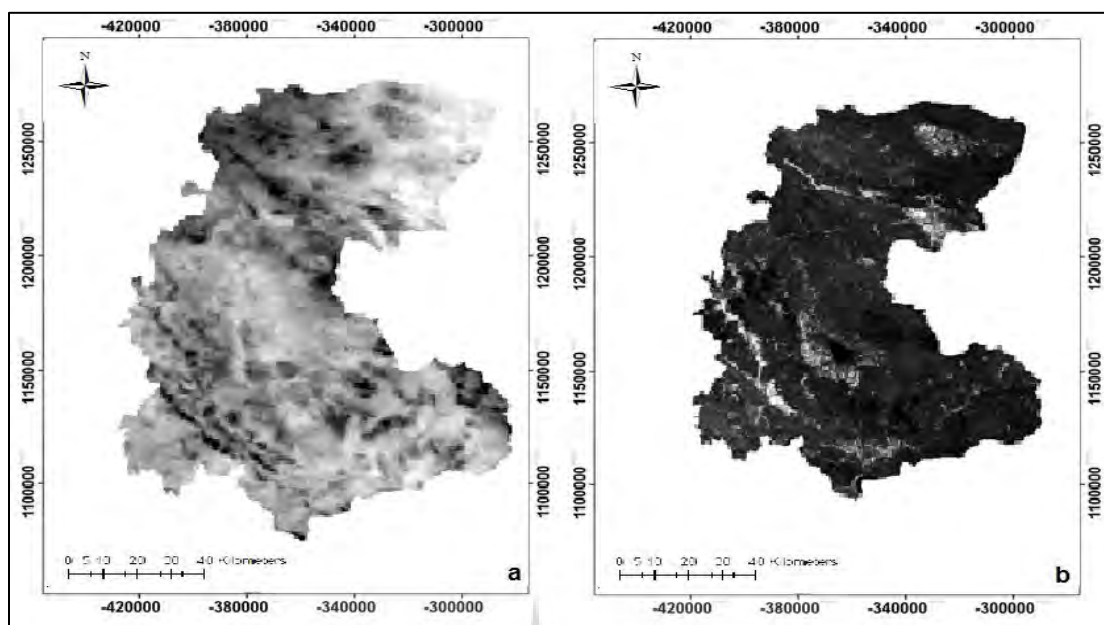


شکل ۱: موقعیت منطقه‌ی مورد مطالعه در کشور

۳- مواد و روش‌ها

۳-۱- داده‌ها

با توجه به این که شاخص VTCI شاخصی مبتنی بر به‌کارگیری سری‌های زمانی NDVI و LST است، در این تحقیق از محصولات سطح ۳/۴ سنجنده‌ی مودیس ماهواره ترا مربوط به مردادماه سال‌های ۱۳۷۹ (۲۰۰۰) تا ۱۳۹۳ (۲۰۱۴) استفاده گردید. داده‌های NDVI دارای قدرت مکانی اسمی ۲۵۵ متر (حقیقی ۲۲۶ متر) و ۱۶ روزه و داده‌های LST با قدرت مکانی اسمی ۱۰۰۰ متر (حقیقی ۸۵۵ متر) و ۸ روزه می‌باشند، بنابراین با توجه به دوره‌های زمانی محصولات فوق و نیز روز برداشت تصاویر، محصول NDVI مربوط به ۶ و ۲۲ مرداد هر سال (روزهای ۲۰۹-۲۲۵ و ۲۲۵-۲۳۳ از سال به میلادی) و محصول LST مربوط به ۶-۱۴-۲۲ و ۳۰ مرداد هر سال (روزهای ۲۰۹-۲۱۷-۲۲۵ و ۲۲۳-۲۳۳ از سال به میلادی) بوده است، بنابراین تعداد کل تصاویر NDVI در سال‌های مطالعه، ۳۰ تصویر و تعداد کل تصاویر LST در مدت‌زمان مورد مطالعه، ۶۰ تصویر است. هم‌چنین از موقعیت جغرافیایی ۱۱ ایستگاه سینوپتیک داخل استان مرکزی به‌عنوان نقاط مرجع برای کنترل مقادیر شاخص‌های ماهواره‌ای استفاده گردید.



شکل ۲: تصاویر محصولات LST (a) و NDVI (b)

۲-۳- پردازش داده‌ها

پس از دریافت محصولات NDVI و LST در تاریخ‌های ذکر شده، تصاویر مذکور در نرم‌افزار ENVI قرائت گردیده و عملیات تغییر سیستم تصویر، اعمال ضریب مقیاس و یکسان‌سازی قدرت تفکیک مکانی و زمانی بر روی تصاویر صورت گرفت. با توجه به تطابق زمانی تصاویر NDVI و LST (روز از سال)، میانگین دو تصویر NDVI مردادماه هر سال و میانگین چهار تصویر LST به‌عنوان نماینده‌ی آن ماه در نرم‌افزار ArcGIS محاسبه گردید. در ادامه، برای محاسبه شاخص VTCI که شاخصی مؤثر برای پایش مکانی خشک‌سالی کشاورزی از طریق بررسی پوشش گیاهی است (Wang et al., 2001: 6; Wan et al., 2004: 4) مبادرت گردید. محاسبه شاخص VTCI از رابطه‌ی زیر صورت می‌گیرد:

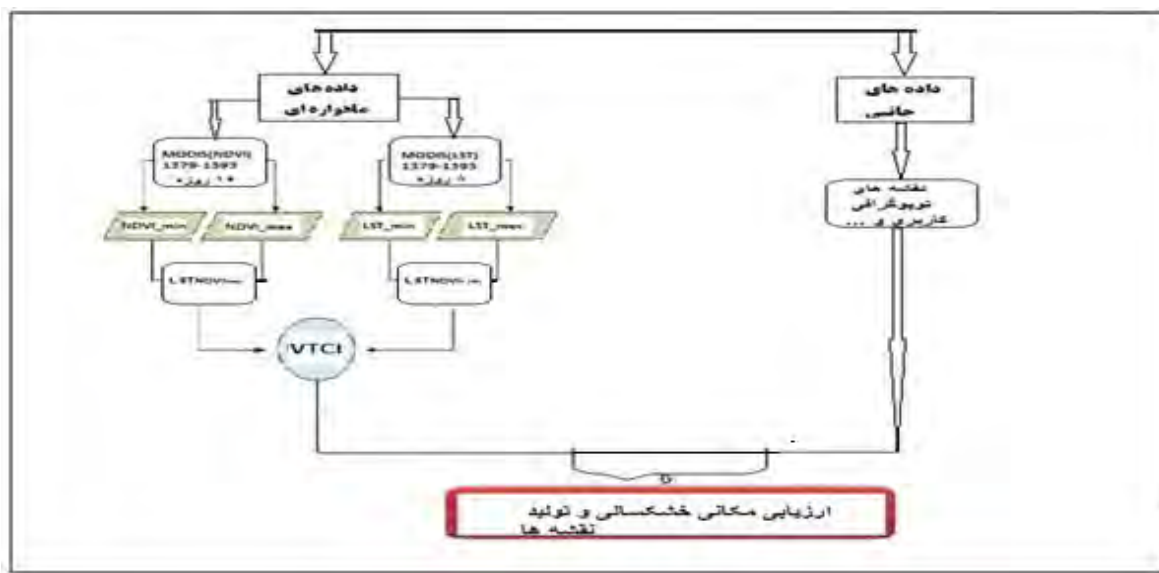
$$VTCI = \frac{LST_{NDVI_i.max} - LST_{NDVI_i}}{LST_{NDVI_i.max} - LST_{NDVI_i.min}} \quad \text{رابطه‌ی ۱}$$

که در این رابطه:

$$LST_{NDVI_i.max} = a + bNDVI_i \quad \text{رابطه‌ی ۲}$$

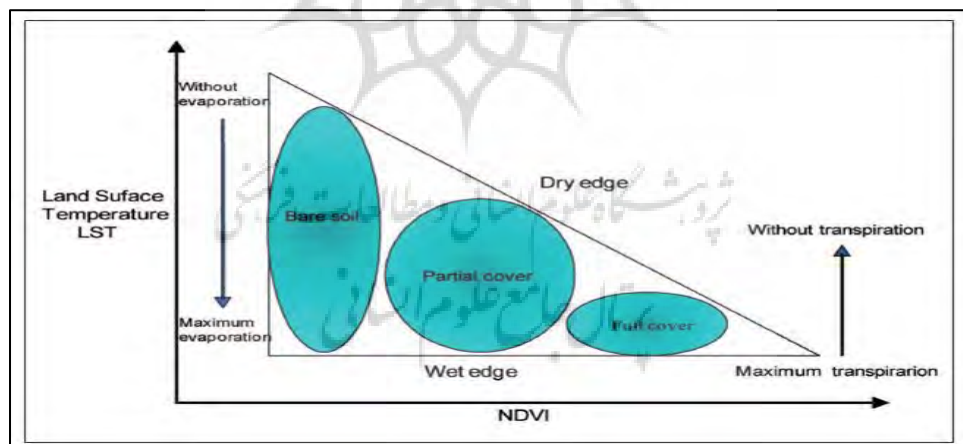
$$LST_{NDVI_i.min} = a' + b'NDVI_i$$

$LST_{NDVI_i.max}$ و $LST_{NDVI_i.min}$ به ترتیب محدوده‌های ماکزیمم و مینیمم دمای سطح زمین با مقادیر NDVI یکسان در منطقه و LST_{NDVI_i} دمای سطح زمین هر پیکسل با شاخص پوشش گیاهی LST_{NDVI} می‌باشند. ضرایب a ، b ، a' و b' مربوط به معادلات فوق را می‌توان از ترسیم نمودار پراکنش دمای سطح زمین در برابر NDVI برای تاریخ‌های مشخص به دست آورد (Wang et al., 2001: 6).



شکل ۳: طرح‌واره تحقیق

در صورتی که منطقه‌ی مورد مطالعه وسیع باشد، شکل نمودار پراکنش در مقیاس منطقه‌ای به صورت مثلث است (Gollies et al., 1997: 4; Wang et al., 2001: 6). شاخص VTCI نه تنها مرتبط با تغییرات NDVI در منطقه است، بلکه در ارتباط تغییرات LST پیکسل‌های با مقادیر NDVI به خصوص نیز است. به طور کلی در مقادیر پایین تر VTCI، خشک‌سالی شدیدتر روی می‌دهد. LST_max مربوط به لبه‌ی گرم است جایی که رطوبت خاک در دسترس کم تر بوده و گیاهان تحت شرایط خشک هستند. LST_min مرتبط با لبه‌ی سرد است، جایی که محدودیت رطوبت برای رشد گیاهان نیست (Gillies et al., 1997: 5).



شکل ۴: طرح شماتیک تفسیر فیزیکی شاخص خشک‌سالی VTCI (Wang et al., 2004: 6)

۴- بحث و نتایج

۴-۱- تعیین لبه‌ی گرم و سرد

یکی از چالش‌های مهم در پایش خشک‌سالی با رویکرد VTCI، تعیین لبه‌ی گرم و سرد است. لبه‌ها می‌توانند از طریق به‌کارگیری نمودار پراکنش ترکیبات مختلف NDVI و LST به دست آیند. برای تعیین لبه‌ی گرم و سرد سه روش وجود

- دارد: ۱- از طریق استفاده از حداکثر مقدار ترکیب NDVI و LST در دوره‌ی مشخص ۲- از طریق حداکثر مقادیر چندساله ترکیب NDVI و LST ۳- لبه‌ی گرم از طریق ترکیب مقادیر حداکثر چندساله NDVI و LST و لبه‌ی سرد از طریق رویکرد ترکیب مقادیر حداکثر-حداقل تعیین لبه‌ی سرد. برای تعیین لبه‌ی گرم و سرد در این تحقیق مراحل زیر انجام گردید:
- ۱- ایجاد فایل استک (گروهی) و نمودار پراکنش دوبعدی NDVI (محور طول) و LST (محور عرض) در نرم‌افزار ENVI
 - ۲- تعیین حداقل و حداکثر مقادیر NDVI و LST
 - ۳- جداسازی نقاط بالای لبه‌ی گرم (حداکثر) و پایین لبه‌ی سرد (حداقل) و انتقال هر کدام از آن‌ها به نرم‌افزار ArcGIS و استخراج مقادیر NDVI و LST برای نقاط مذکور
 - ۴- تشکیل معادله‌ی خطی میان NDVI و LST برای لبه‌ی گرم و لبه‌ی سرد در برنامه‌ی اکسل و درنهایت تعیین ضرایب a و b برای لبه‌ی گرم و 'a' و 'b' برای لبه‌ی سرد
 - ۵- ساختن اجزای رابطه‌ی شاخص خشک‌سالی VTCI و درنهایت ایجاد نقشه‌ی VTCI مربوط به ماه مربوط (مرداد) و به تعداد سال‌های مطالعه

۶- ارزیابی دقت نقشه‌های تولیدشده با استفاده از شاخص NDVI و LST

در نتیجه پس از ساخت تعداد ۱۵ شاخص VTCI مربوط به مردادماه سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳، مقادیر ضرایب لبه‌های گرم و سرد هر کدام از سال‌های ۱۳۷۹ الی ۱۳۹۳ برای مردادماه استخراج گردید و نهایتاً ضریب R^2 برای لبه‌های مذکور استخراج گردید. بالاترین ضرایب R^2 برای لبه‌های گرم وارد مربوط به مردادماه سال ۱۳۸۵، به ترتیب برابر با ۰/۷۳ و ۰/۸۶ است و پایین‌ترین مقادیر R^2 مربوط به سال ۱۳۷۹ (به ترتیب برابر با ۰/۰۳ و ۰/۰۶) است. جدول ۱ مقادیر ضرایب لبه‌های گرم و سرد مردادماه را در سال‌های مطالعه نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقادیر ضرایب لبه‌های گرم و سرد سال‌های مطالعه

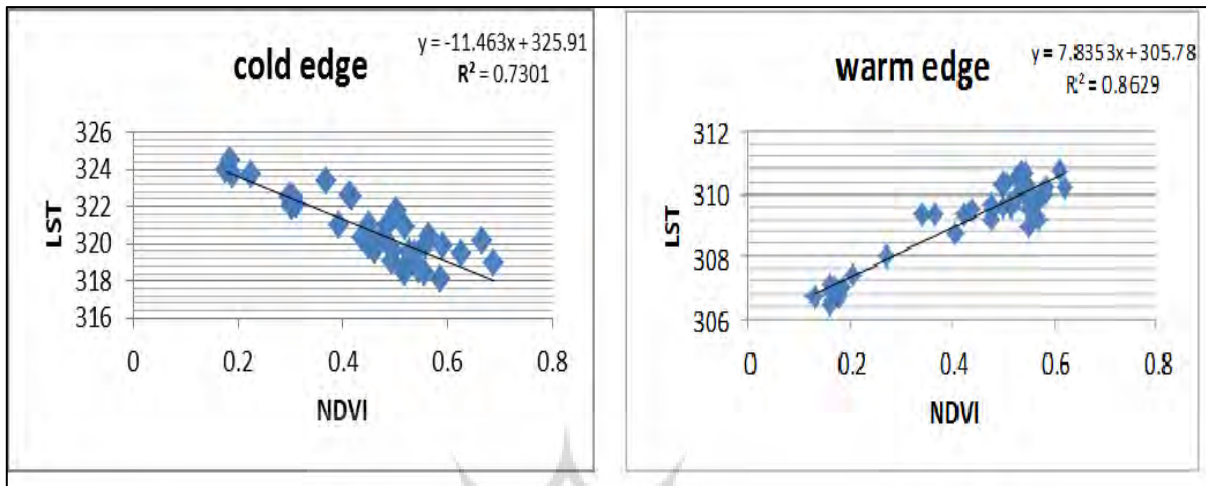
سال	a	B	R^2	a'	b'	R^2
۱۳۷۹	۱/۲۸۶۳	۳۲۰/۸۱	۰/۰۳	۰/۲۵۲۴	۳۱۳/۴۱	۰/۰۶
۱۳۸۰	-۷/۹۰۱۸	۳۲۵/۰۵	۰/۲۵	۴/۳۳۴۸	۳۱۱	۰/۱۶
۱۳۸۱	-۷/۳۴۳۶	۳۲۴/۴۹	۰/۲	۲/۵۶۸۱	۳۱۰/۴۵	۰/۱۱
۱۳۸۲	-۲/۸۰۲۲	۳۲۲/۳۲	۰/۰۳	۲/۱۸۱۹	۳۰۹/۸۱	۰/۰۷
۱۳۸۳	-۲/۸۴۴۶	۳۲۳/۱۸	۰/۰۵	۱/۶۵۶۱	۳۱۱/۴۶	۰/۰۳
۱۳۸۴	-۱۰/۵۳۱	۳۲۶/۷۴	۰/۷	۳/۸۵۸۸	۳۰۹/۰۲	۰/۱۴
۱۳۸۵	-۱۱/۴۶۳	۳۲۵/۹۱	۰/۷۳	۷/۸۳۵۳	۳۰۵/۷۸	۰/۸۶
۱۳۸۶	-۸/۳۹۳۵	۳۲۱/۱۳	۰/۱۵	۴/۷۶۶۱	۳۰۶/۶۲	۰/۲
۱۳۸۷	۱۰/۵۹	۳۲۳/۳	۰/۲۲	۶/۴۷۲۹	۳۰۷/۳	۰/۲۵
۱۳۸۸	-۷/۰۶۵۲	۳۲۱/۷۹	۰/۱۵	۴/۶۰۱۳	۳۰۸/۸۶	۰/۱۳
۱۳۸۹	-۸/۶۰۹۵	۳۲۲/۴	۰/۲۱	۷/۹۶۸۶	۳۰۶/۳۵	۰/۷
۱۳۹۰	-۸/۸۹۲۴	۳۲۲/۳۳	۰/۳	۵/۲۳۴۳	۳۰۹/۳۶	۰/۱۷
۱۳۹۱	-۸/۰۵۳۷	۳۲۳/۵۸	۰/۱۷	۲/۲۵۶۶	۳۱۰/۷۴	۰/۰۳
۱۳۹۲	-۳/۳۶۳۶	۳۲۲/۹۹	۰/۰۶	۲/۴۹۸۶	۳۱۰/۶۴	۰/۰۲
۱۳۹۳	-۱۰/۷۹۹	۳۲۴/۱	۰/۳	۱/۶۰۵۷	۳۰۹/۹۶	۰/۰۲

بنابراین بهترین معادله برای لبه‌ی گرم و لبه سرد بر اساس ضرایب مردادماه سال ۱۳۸۵ به شرح ذیل است:

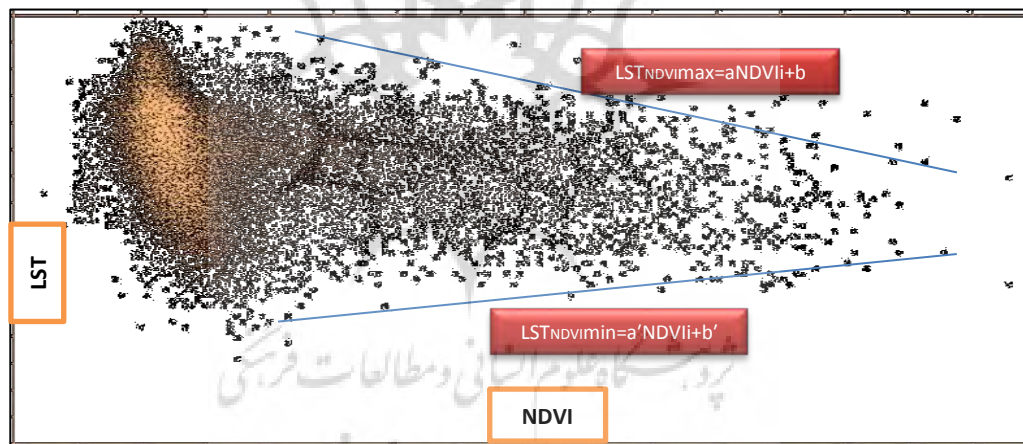
$$LST_{NDVI i.max} = 325.91 - 11.463NDVI_i$$

رابطه‌ی ۳

$$LST_{NDVI i.min} = 305.78 + 7.8353 \times NDVI_i$$



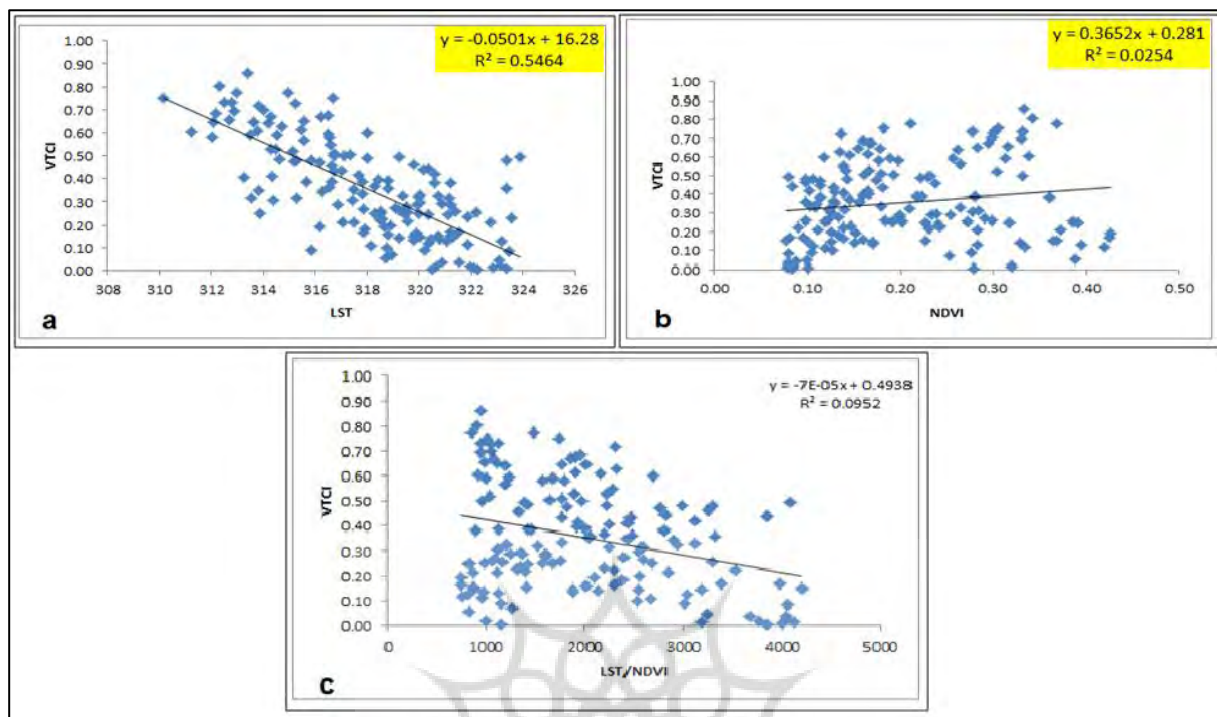
شکل ۵: نمودار پراکنش لبه‌ی گرم و سرد و ضرایب رگرسیون مربوط مردادماه سال ۱۳۸۵



شکل ۶: نمودار پراکنش و لبه‌ی گرم و سرد NDVI و LST مرداد ۱۳۸۵

۲-۴- ارتباط میان شاخص VTCI و NDVI، LST و LST/NDVI

ارزیابی همبستگی خطی میان شاخص VTCI و LST نشان می‌دهد که رابطه‌ی قوی و معنی‌داری میان آن‌ها وجود داشته و این رابطه منفی است؛ بدین مفهوم که با افزایش درجه حرارت سطح زمین (افزایش تنش خشک‌سالی) از مقادیر VTCI کاسته می‌گردد. هم‌چنین رابطه‌ی میان VTCI و NDVI از نوع خطی و مثبت که همبستگی قوی میان آن‌ها وجود ندارد، بنابراین با افزایش پوشش گیاهی (کاهش تنش خشک‌سالی) بر میزان مقادیر VTCI افزوده می‌گردد. ارتباط میان VTCI و LST/NDVI نیز از نوع خطی و منفی است که همبستگی ضعیفی بین آن‌ها وجود دارد، بنابراین هرچه نسبت مذکور بیش‌تر باشد (به دلیل قرار گرفتن درجه حرارت در صورت کسر) از میزان مقادیر VTCI کاسته می‌گردد.



شکل ۷: ارتباط میان VTCI با LST (a)، NDVI (b) و LST/NDVI (c)

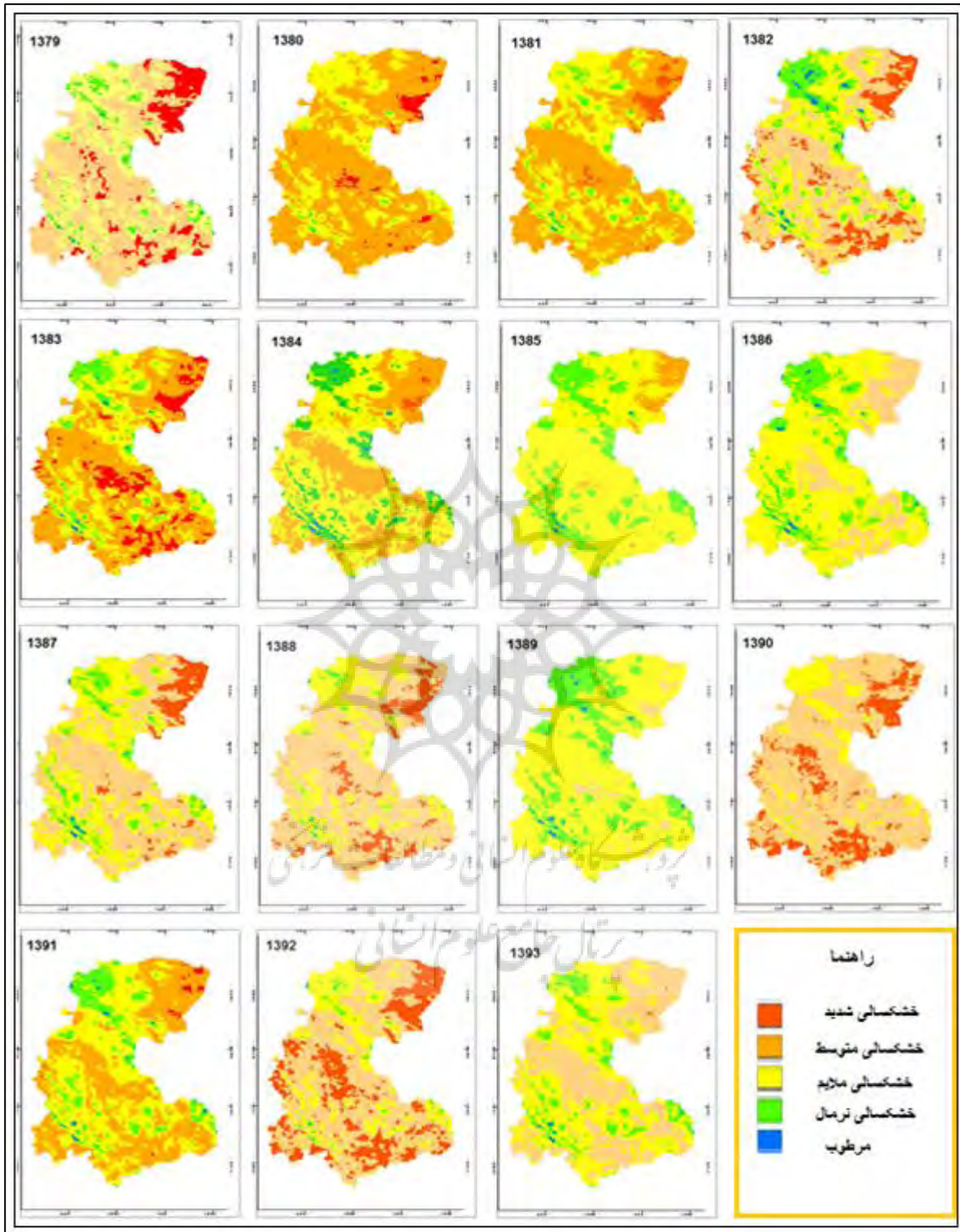
جدول ۲: ارتباط VTCI و LST، NDVI و LST/NDVI در سال‌های مختلف

سال	NDVI	LST	NDVI/LST	VTCI
۱۳۷۹	۰/۲	۳۱۹/۷۲	۲۱۷۱/۳۲	۰/۲۰
۱۳۸۰	۰/۲	۳۱۷/۴۸	۱۹۶۴/۰۷	۰/۲۶
۱۳۸۱	۰/۲۱	۳۱۸/۱۶	۱۸۱۷/۱۸	۰/۳۸
۱۳۸۲	۰/۲۳	۳۱۷/۵۷	۱۶۶۰/۵۷	۰/۳۷
۱۳۸۳	۰/۱۹	۳۱۶/۰۳	۲۰۵۳/۱۳	۰/۳۹
۱۳۸۴	۰/۲۳	۳۱۷/۹۷	۱۶۵۶/۶۰	۰/۴۸
۱۳۸۵	۰/۱۸	۳۱۶/۸۲	۲۰۲۹/۷۵	۰/۲۵
۱۳۸۶	۰/۲۳	۳۱۵/۲۰	۱۷۴۵/۸۰	۰/۳۰
۱۳۸۷	۰/۱۸	۳۱۷/۴۹	۲۱۷۰/۴۰	۰/۴۵
۱۳۸۸	۰/۲۱	۳۱۷/۹۷	۱۸۸۷/۴۸	۰/۳۴
۱۳۸۹	۰/۱۸	۳۱۹/۱۵	۲۱۱۰/۳۵	۰/۲۵
۱۳۹۰	۰/۱۹	۳۱۷/۳۸	۲۲۰۴/۴۸	۰/۳۲
۱۳۹۱	۰/۱۸	۳۱۹/۰۶	۲۰۳۵/۵۱	۰/۳۴
۱۳۹۲	۰/۱۹	۳۲۰/۵۶	۲۰۶۶/۵۸	۰/۴۰
۱۳۹۳	۰/۱۷	۳۱۸/۵۹	۲۱۶۴/۵۷	۰/۳۹

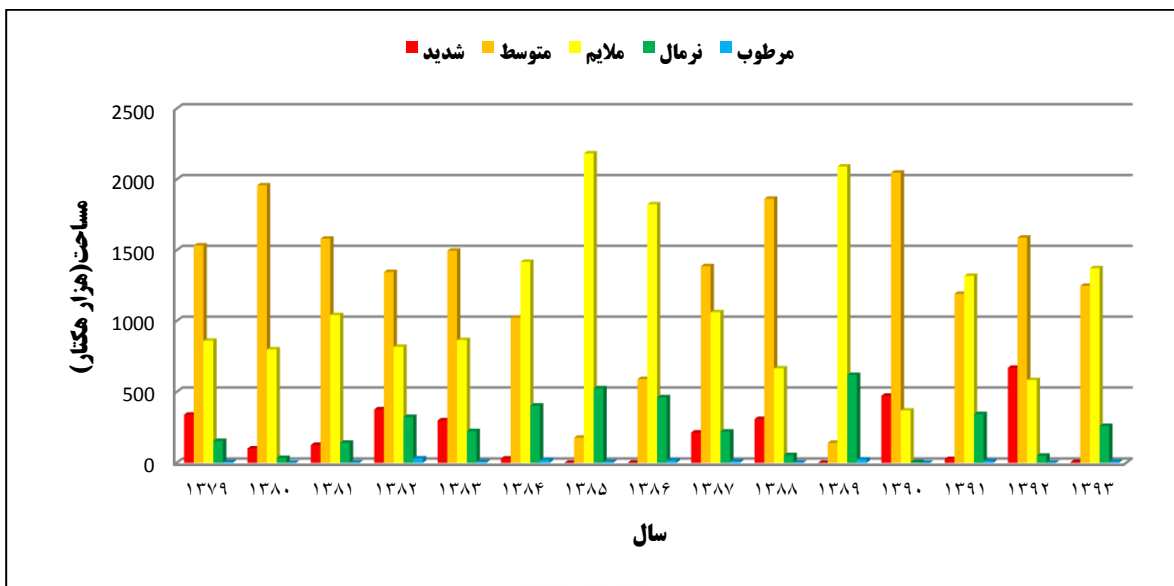
به‌طور کلی دامنه مقادیر VTCI بین ۰ و ۱ است و مقادیر خارج از این محدوده به دلیل وجود شرایط ابر و سایر خطاها بر روی تصاویر است. مطابق نظر Wang و همکاران (۲۰۰۱) دامنه طبقات خشک‌سالی در شاخص VTCI شامل ۵ طبقه و به این شرح است: ۱- خشک‌سالی شدید (۰/۰-۲) ۲- خشک‌سالی متوسط (۰/۰-۴/۲) ۳- خشک‌سالی سبک یا ملایم (۰/۰-۶/۴) ۴- وضعیت نرمال (۰/۰-۸/۶) ۵- مرطوب (۰/۰-۱/۸). بر اساس این طبقه‌بندی، شاخص‌های VTCI مربوط به مردادماه سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳ به ۵ کلاس با طبقات خشک‌سالی شدید، متوسط، ملایم، نرمال و مرطوب تقسیم و نقشه‌های نهایی از نظر وسعت طبقات مذکور مقایسه شدند. با توجه به این‌که غالب مساحت استان مرکزی را اراضی مرتعی و اراضی کشاورزی تشکیل می‌دهند، تنش ناشی از خشک‌سالی بر روی مراتع و اراضی کشاورزی از طریق شاخص VTCI به‌خوبی قابل نمایش است. نتایج بیانگر آن است که سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۸۹ و ۱۳۹۳ کم‌ترین تنش خشک‌سالی را داشته و سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۲ دارای شدت خشک‌سالی شدید بوده‌اند.

جدول ۳: مقادیر و درصد مساحت طبقات خشک‌سالی به روش VTCI (هکتار)

سال	شدید	متوسط	ملایم	نرمال	مرطوب
۱۳۷۹	۳۳۹۰۴۹	۱۵۳۳۰۳۰	۸۵۹۹۷۸	۱۵۴۰۲۷	۵۱۱۷
۱۳۸۰	۱۰۱۱۰۱	۱۹۵۷۳۹۳	۷۹۹۳۷۶	۳۴۲۱۲	۵۸۵
۱۳۸۱	۱۲۶۰۲۹	۱۵۸۱۲۰۷	۱۰۴۱۷۱۱	۱۴۱۲۳۴	۲۴۸۵
۱۳۸۲	۳۷۶۷۷۰	۱۳۴۵۴۵۲	۸۱۶۷۷۴	۳۲۲۶۷۴	۳۱۰۶۹
۱۳۸۳	۲۹۹۰۶۲	۱۴۹۶۳۳۵	۸۶۵۰۹۵	۲۲۳۶۹۴	۸۴۸۰
۱۳۸۴	۲۹۸۹۹	۱۰۲۲۵۵۸	۱۴۱۷۵۳۱	۴۰۳۱۶۰	۱۹۵۱۸
۱۳۸۵	۷۳	۱۷۶۹۸۱	۲۱۸۳۲۰۶	۵۲۵۰۲۲	۷۴۵۶
۱۳۸۶	۱۲۴۳	۵۹۰۰۸۳	۱۸۲۳۴۶۹	۴۶۱۲۷۷	۱۶۶۶۷
۱۳۸۷	۲۱۳۶۰۶	۱۳۸۶۶۰۸	۱۰۶۱۸۱۴	۲۱۹۸۹۲	۱۰۸۱۹
۱۳۸۸	۳۰۸۷۸۵	۱۸۶۳۰۱۷	۶۶۴۹۴۰	۵۴۰۹۶	۱۸۲۸
۱۳۸۹	۷۳	۱۴۰۸۶۹	۲۰۹۰۳۶۶	۶۱۸۸۱۳	۲۳۲۴۷
۱۳۹۰	۴۷۲۳۸۸	۲۰۴۷۲۳۵	۳۶۸۶۵۶	۴۳۱۳	۷۳
۱۳۹۱	۲۶۶۰۹	۱۱۹۱۷۱۷	۱۳۱۸۴۰۴	۳۴۳۳۶۲	۱۲۵۷۴
۱۳۹۲	۶۶۹۵۴۶	۱۵۸۸۲۹۸	۵۸۲۸۴۶	۵۰۶۶۰	۱۳۸۹
۱۳۹۳	۵۴۱۰	۱۲۴۷۸۶۰	۱۳۷۲۴۲۶	۲۵۹۶۶۰	۷۳۸۳
جمع	۲۹۶۹۶۴۲	۱۹۱۶۸۶۴۳	۱۷۲۶۶۵۹۲	۳۸۱۶۰۹۷	۱۴۸۶۹۰
درصد	۶/۸	۴۴/۲	۳۹/۸	۸/۸	۰/۳

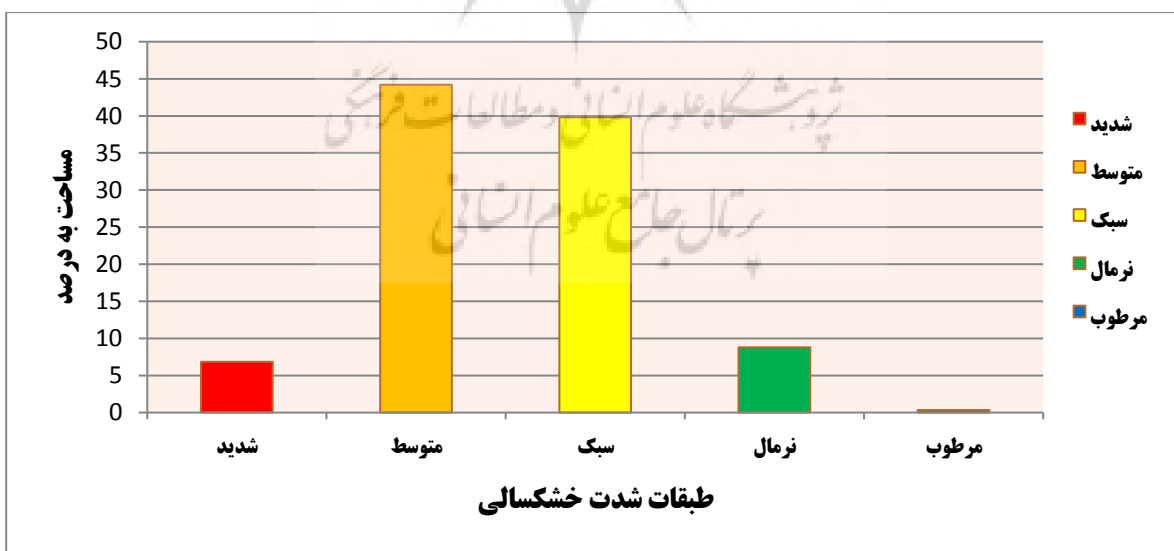


شکل ۸: نقشه‌ی حاصل از طبقه‌بندی خشک‌سالی به‌وسیله‌ی شاخص VTCI



شکل ۹: منحنی تغییرات مساحت طبقات خشک‌سالی در سال‌های مختلف

مطابق جدول ۳ و شکل ۹، درصد مساحت خشک‌سالی متوسط و ملایم با اعداد $44/2$ و $39/8$ بیش‌ترین درصد را در ۱۵ سال مذکور تشکیل داده‌اند. کم‌ترین درصد را نیز طبقه‌ی مرطوب با عدد $0/3$ درصد تشکیل داده است. در مقایسه‌ی سالانه‌ی طبقات خشک‌سالی مشاهده گردید که طبقه‌ی خشک‌سالی شدید به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۲ و ۱۳۹۰ بیش‌ترین درصد طبقات و سال‌های ۸۵ و ۸۹ کم‌ترین درصد طبقات را تشکیل دادند. بیش‌ترین و کم‌ترین طبقه‌ی خشک‌سالی متوسط مرطوب به سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۸۵ بوده است. این مقادیر برای طبقه‌ی خشک‌سالی ملایم سال‌های ۱۳۸۵ و ۱۳۹۰ بوده است. طبقات خشک‌سالی نرمال و مرطوب نیز به ترتیب در سال‌های ۱۳۸۹ و ۹۰ دارای بیش‌ترین و کم‌ترین مساحت بوده‌اند.



شکل ۱۰: درصد مساحت طبقات تنش خشک‌سالی VTCI در استان مرکزی

۵- نتیجه‌گیری

شاخص VTCI را می‌توان، نسبت تفاوت‌های LST به پیکسل‌هایی با NDVI به‌خصوص دانست. هدف ما در این تحقیق، بررسی امکان به‌کارگیری رویکرد شاخص VTCI بوده که یک روش نزدیک به واقعیت و مؤثر در پایش مکانی خشک‌سالی در سطوح جغرافیایی منطقه‌ای است. برای این منظور، پس از ایجاد نمودار پراکنش NDVI و LST، اقدام به استخراج لبه‌های گرم و سرد گردید و نهایتاً شاخص‌های VTCI برای ماه مرداد سال‌های ۱۳۷۹ تا ۱۳۹۳، بیش‌تر سطوح جغرافیایی استان مرکزی متحمل خشک‌سالی از نوع متوسط و ملایم (VTCI برابر ۰/۲ تا ۰/۴ و ۰/۴ تا ۰/۶) بوده که بالغ‌بر ۸۴ درصد مساحت استان را شامل می‌گردد. کم‌ترین نوع طبقه مربوط به گروه مرطوب است. شکل ۱۰ درصد مساحت هر یک از طبقات خشک‌سالی با شاخص VTCI را در استان مرکزی نشان می‌دهد. نتایج طبقه‌بندی شدت خشک‌سالی به‌وسیله‌ی شاخص VTCI با نتایج تحلیل خشک‌سالی کشور توسط مرکز ملی خشک‌سالی و مدیریت بحران تطابق خوبی را نشان می‌دهد. ارزیابی دقت شاخص VTCI از طریق شاخص LST نشان داد که رابطه‌ی قوی و معنی‌داری میان آن‌ها وجود داشته و این رابطه منفی است. رابطه‌ی میان VTCI و NDVI از نوع خطی و مثبت که همبستگی قوی میان آن‌ها وجود نداشته است. با توجه به حساسیت بالای روش VTCI به تغییرات رطوبت و درجه حرارت سطح، برای پایش خشک‌سالی در محصولات زراعی دیم و نیز مراتع مناطق جغرافیایی خشک و نیمه‌خشک پیشنهاد می‌گردد. به‌منظور ارزیابی رویکرد پایش خشک‌سالی به روش VTCI که روش نزدیک به واقعیت است، پیشنهاد می‌گردد استفاده از روش مذکور در طبقات مختلف اقلیمی در سطوح جغرافیایی کشور صورت گیرد تا بتوان برای هر منطقه یا استان از جزییات مربوط به آن منطقه استفاده نمود. از آن‌جایی‌که تصاویر ماهواره‌ای از پراکنش مکانی و زمانی مناسبی برخوردار بوده و محصولات متفاوتی از آن‌ها قابل استخراج است، رویکرد استفاده و جایگزینی روش‌های مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای و محصولات آن‌ها در مطالعات خشک‌سالی کشاورزی مناطق جغرافیایی توصیه می‌گردد.

۶- منابع

1. AghaKouchak, A., A. Farahmand, F. S. Melton, J. Teixeira, M. C. Anderson, B. D. Wardlow, Hain, C. R. (2015). Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities, *Rev. Geophys.*, Volume 53, pp 452–480, doi: 10.1002/2014RG000456.
2. Brown, J.F., Wardlow, B.D., Tadesse, T., Hayes, M.J., and Reed, B.C. (2008). The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): A new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation. *GIScience and Remote Sensing*, Volume 45 (1): pp 16–46.
3. FAO (2013). Drought Facts. FAO land and water. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Retrieved 12.06.2013 from: <http://www.fao.org/docrep/017/aq191e/aq191e.pdf>.
4. Gillies R, Carlson T, Kustas W, Humes K. (1997). A verification of the “triangle” method for obtaining surface soil water content and energy fluxes from remote measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and surface radiant temperature, *Remote Sensing*, Volume 18: pp 3145–3166.
5. Goetz, S. J. (1997). Multi-sensor analysis of NDVI, surface temperature and biophysical variables at a mixed grassland site, *Remote Sensing*, Volume 18, pp 71–94.
6. Gu, Y., Brown, J., F., Verdin, J., P. and Wardlow, B. (2007). A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. *Geophysical Research Letters*, Volume 34, L06407, doi: 10.1029/2006GL029127.
7. Hayes, M., M. Svoboda, N., Wall, and M., Widhalm (2011). The Lincoln declaration on drought indices: Universal meteorological drought index recommended, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, Volume 92(4), pp 485–488, doi:10.1175/2010BAMS3103.1.

8. Jackson, R. D., Idso, S. B., Beginato, R. J., Pinter, P. J., Jr. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator, *Water Resources Research*, Volume 17, pp 1133–1138.
9. Karnieli, A., N. Agam, R. T. Pinker, M. Anderson, M. L. Imhoff, G. G. Gutman, N. Panov, A. Goldberg (2010). Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: Merits and limitations, *J. Clim.*, Volume 23(3), pp 618–633, doi:10.1175/2009JCLI2900.1.
10. Niemeier, S. (2008). New drought indices. *Options, Méditerranéennes. Série A: Séminaires Méditerranéens*, Volume 80: pp 267–274.
11. Park, S., Feddema, J. J., Egberts, S. L. (2004). MODIS land surface temperature composite data and their relationships with climatic water budget factors in the central Great Plains, *Remote Sensing*, Volume 26, pp 1127–1144.
12. Patel, N., B. Parida, V. Venus, S. Saha, V. Dadhwal (2012). Analysis of agricultural drought using Vegetation Temperature Condition Index (VTCI) from TERRA/MODIS satellite data, *Environ. Monit. Assess.* Volume 184(12), pp 7153–7163.
13. Sandholt, I., Rasmussen, K., and Anderson, J. (2002). A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of the surface moisture status. *Remote Sensing of Environment*, Volume 79, pp 213-224.
14. Steinemann, A.C., Hayes, M.J., and Cavalcanti, L. (2005). Drought indicators and triggers. *Drought and water crises: Science, technology, and management issues*. CRC Press, Boca Raton, FL. pp 71–92.
15. Tsakiris, G., D. Pangalou, Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI), *Water Resour. Manage*, Volume 21(5), 821–833.
16. Tucker, C. J., Choudhury, B. J. (1987). Satellite remote sensing of drought conditions, *Remote Sens. Environ.*, Volume 23(2), pp 243–251.
17. Wang, C., Qi, S., Niu, Z., & Wang, J. (2004). Evaluating soil moisture status in China using the temperature-vegetation dryness index (TVDI). *Canadian Journal of Remote Sensing*, Volume 30, pp 671–679.
18. Wardlow, B., M. C. Anderson, Verdin, J. (2012). *Remote Sensing of Drought: Innovative Monitoring Approaches*, pp 484, CRC Press.
19. Wilhite, D. A. (2005). *Drought and Water Crises: Science, Technology, and Management Issues*, pp. 432, Volume 86, CRC Press.
20. Zargar, A., Sadiq, R., Naser, B., Fasal, Khan (2011). A review of drought indices. *Environ. Rev.* Volume 19: pp 333–349.