

جغرافیا و توسعه شماره ۲۲ اردیبهشت ۱۳۹۰

وصول مقاله : ۱۳۸۸/۱۱/۲۹

تأیید نهایی : ۱۳۸۹/۸/۱۰

صفحات : ۱۶۴-۱۴۷

بررسی کارایی شاخص‌های منتج از فناوری سنجش از دور در ارزیابی خشکسالی هواشناسی؛ مطالعه‌ی موردی: حوضه‌ی آبریز سفیدرود

دکتر مجید خلقی

لاله پرویز

دانشجوی دکتری گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران دانشیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

دکتر شهاب عراقی نژاد

خلیل ولیزاده

استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران عضو هیات علمی جغرافیا طبیعی دانشگاه تبریز

دکتر پرویز ایران نژاد

دانشیار مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران

چکیده

در سال‌های اخیر خشکسالی با تأثیرات مخرب در بخش‌های مدیریت منابع آب، زیست‌محیطی، اکولوژیکی به عنوان بحران جدی تلقی می‌شود. برنامه‌ریزی و اقدامات پیشگیرانه در برابر خشکسالی در کاستن اثرات آن از اهمیت چشمگیری برخوردار است. در این راستا استفاده از روش مناسب پایش و پیش بینی خشکسالی می‌تواند تأثیر قابل توجهی در مقابله با این پدیده داشته باشد. در این تحقیق جهت پایش خشکسالی از اطلاعات حاصل از تصاویر سنجنده MODIS در استخراج شاخص‌های $NDWI$ ، $NDVI$ ، LST ، DSI ، $VTCI$ استفاده شده است. هدف انتخاب شاخص مبنا بر اساس ارتباط با عامل موجد خشکسالی در حوضه‌ی آبریز سفیدرود جهت بررسی و مطالعه‌ی خشکسالی و اثرات آن می‌باشد. متوسط خطای حاصل از محاسبات دمای سطح زمین با استفاده از الگوریتم پنجره‌ی مجزا توسعه داده شده توسط پرایس ۳/۸۴ درجه سانتی‌گراد بوده است. بیشترین مقدار ضریب همبستگی بین بارش ماهانه با شاخص‌های مورد مطالعه مربوط به شاخص $VTCI$ می‌باشد. همچنین سایر شاخص‌های مورد مطالعه بجز شاخص $VTCI$ دارای تأخیر زمانی نسبت به زمان وقوع بارش هستند. کمترین میزان ضریب همبستگی مربوط به شاخص $NDVI$ می‌باشد که دلیل آن را می‌توان در نوع پوشش گیاهی حاکم در منطقه‌ی مورد مطالعه دانست. بنابراین شاخص $VTCI$ در تعیین شرایط خشکسالی (زمان واقعی) به علت تلفیق خصوصیات حرارتی (دمای سطح زمین) و اطلاعات حاصل از بازتاب طیفی (شاخص‌های پوشش گیاهی) در قالب فرمول‌بندی مناسب، می‌تواند متمرکزتر باشد.

کلیدواژه‌ها: خشکسالی، شاخص $VTCI$ ، الگوریتم پنجره مجزا، حوضه‌ی آبریز سفیدرود.

مقدمه

خشکسالی وضعیتی از کمبود بارندگی و افزایش دماست که در هر وضعیت اقلیمی ممکن است رخ دهد. خشکسالی غالباً به عنوان یک پدیده‌ی خزنده بیان می‌شود چرا که برخلاف سایر بلاهای طبیعی این پدیده به تدریج و در یک دوره‌ی زمانی نسبتاً طولانی عمل کرده و اثرات آن ممکن است پس از چند سال و با تأخیر بیشتری نسبت به سایر حوادث طبیعی ظاهر شود. همچنین اثرات ناشی از آن به صورت غیرساختاری است و در نتیجه خسارت‌های آن در بخش‌های مختلف مانند کشاورزی، اجتماعی، اقتصادی، زیست‌محیطی و... قابل توجه می‌باشد. به دلیل پیچیدگی مسایل مرتبط با خشکسالی، تحلیل و بررسی این پدیده با مشکلاتی همراه بوده است. نیاز به برنامه‌ریزی و اقدامات پیشگیرانه در برابر خشکسالی جهت مدیریت مناسب و کاستن اثرات مخرب خشکسالی لازم و ضروری می‌باشد. در این راستا استفاده از روش‌های مناسب پایش و پیش‌بینی خشکسالی از اهمیت چشمگیری برخوردار است.

در سال‌های اخیر محققین از شاخص‌های خشکسالی نقطه‌ای به‌طور وسیع در پایش خشکسالی و تصمیم‌گیری در مدیریت منابع آب استفاده کرده‌اند. شاخص پالمر بر اساس بیلان آبی ماهانه شامل بارش، تبخیر و تعرق، رواناب و رطوبت خاک تعریف شده است.

شاخص بارش استاندارد (SPI)^۱ با پایه‌ی احتمالی به صورت شاخص ثابت مکانی از خشکسالی در نظر گرفته شده است. پیچیدگی این شاخص نسبت به شاخص پالمر کم می‌باشد. شاخص بارش استاندارد شده جهت پایش شرایط حاکم نسبت به شاخص پالمر از نتایج بهتری برخوردار است و تشخیص ماه‌های خشکسالی توسط این شاخص زودتر از شاخص پالمر می‌باشد (ون، ۲۰۰۴: ۶۲). از سوی دیگر، در شاخص بارش استاندارد شده، مقادیر و ارزش‌ها بر داده‌های اولیه‌ای که ممکن است تغییر کنند استوار می‌باشد و این مسأله به عنوان یکی از نکات ضعف این شاخص در نظر گرفته می‌شود. شاخص‌های خشکسالی مبتنی بر داده‌های هواشناسی تنها برای یک محل معتبرند. از طرفی به علت کمبود آمار اقلیمی (ایستگاه‌های هواشناسی) در اغلب مناطق، این‌گونه شاخص‌ها جهت ارزیابی خشکسالی چندان مناسب نمی‌باشند. در این راستا آگاهی از تغییرات مکانی شاخص‌های خشکسالی بخصوص در مقیاس‌های بزرگ جهت انجام مطالعات و بررسی‌های اقلیمی و هیدرولوژیکی لازم به نظر می‌رسد. بنابراین تکنیک سنجش از دور به علت جمع‌آوری داده‌های مکانی در مقیاس وسیع، به روز بودن داده‌ها و سهولت روش، از توانایی بالایی در استفاده از اطلاعات حاصل جهت تفسیر

1- Standardized Precipitation Index

2-Wan, 2004

متغیرهای مربوطه با قدرت تفکیک زمانی و مکانی بالا، برخوردار است. تاکر و همکاران از شاخص^۱ NDVI به عنوان شاخص پوشش گیاهی با استفاده از باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک استفاده کردند، همچنین آنها به ارتباط شاخص NDVI با شاخص سطح برگ^۲ پی بردند (تاکر،^۳ ۱۹۷۹: ۶۴۴). همچنین شاخص NDVI را به عنوان شاخص پاسخی در تشخیص توزیع خشکسالی در مناطق خشک و نیمه‌خشک مطرح کردند که مقادیر کم این شاخص مرتبط با شرایط استرسی پوشش گیاهی بود (تاکر،^۴ ۱۹۸۷: ۲۴۵).

گوتمن کارایی داده‌های حرارتی را در تعیین تغییرات درون‌سالی رطوبت سطحی نسبت به شاخص‌های گیاهی (زمانی که شاخص‌های گیاهی نسبت به شرایط خشکسالی عکس‌عملی ندارند) اثبات کرد (گوتمن،^۵ ۱۹۹۰: ۲۸۴). نمانی و همکاران با بررسی ارتباط بین شاخص NDVI و دمای سطح زمین به همبستگی منفی بین این دو متغیر پی بردند. از نتایج تحقیق آنها با استفاده از ماهواره NOAA^۶ می‌توان به تأثیر قوی کسر پوشش گیاهی در تغییرات مکانی دمای سطح زمین، حساسیت زیاد نسبت دمای سطح زمین به شاخص $\frac{LST}{NDVI}$ به شرایط رطوبتی سطح اشاره کرد (نمانی،^۷ ۱۹۹۲: ۳۲). در تحقیقی با استفاده از همبستگی منفی بین شاخص NDVI و دمای سطح زمین به محاسبه دمای هوای نزدیک سطح زمین با استفاده از ماهواره NOAA پرداخته شد. این نتایج با احتساب منابع خطای حاصل از محاسبه دمای سطح زمین قابل قبول بود (پری هادکو،^۸ ۱۹۹۷: ۳۳۵).

بیرجاریگل و همکاران شاخص دیگری تحت عنوان^۹ DSI را که شامل تفریق حالت استاندارد شده دمای سطح زمین و NDVI بود، به عنوان شاخص خشکسالی پیشنهاد دادند (بیرجاریگل،^{۱۰} ۲۰۰۰: ۳۲۷). جی و پیترز ارتباط بین بارش استاندارد شده و شاخص NDVI را مورد بررسی قرار دادند. بیشترین همبستگی آنها در دوره‌های میانی رشد (۳ ماه) بوده است. همچنین به وجود تأخیر زمانی عکس‌العمل پوشش گیاهی نسبت به بارش اشاره شده است (جی،^{۱۱} ۲۰۰۳: ۸۷). همچنین با استفاده از همبستگی منفی بین شاخص گیاهی و دمای سطح

1-Normalized Difference Vegetation Index

2-Leaf Area Index

3-Tucker, 1979

4-Tucker, 1987

5-Gutman, 1990

6-National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)

7-Nemani, 1992

8-Prihodko, 1997

9-Drought Severity Index

10-Bayarjargal, 2000

11-Ji, 2003

زمین به پایش خشکسالی در جلگه‌های جنوبی بخش‌هایی از نگزاس و اکلاهما با استفاده از سنجنده^۱ MODIS با نتایج قابل قبول پرداخته شد. وجود همبستگی بین بارش و شاخص NDVI با یک تأخیر زمانی از نتایج تحقیق بود (ون، ۲۰۰۴: ۶۲).

در تحقیقی دیگر جهت بررسی دقیق خشکسالی از همپوشانی دو تصویر شاخص پوشش گیاهی NDVI، نقشه‌ی تغییر دو ساله‌ی پوشش گیاهی کشور ایران به دست آمد. با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای استفاده از ماهواره NOAA، وضعیت خشکسالی در مناطق مختلف کشور مورد ارزیابی و تحقیق قرار گرفته و نتیجه شد که اکثر مناطق کشور در سال ۱۹۹۸ دچار شرایط خشکسالی بوده است. با وجود بهبود شرایط پوشش گیاهی در طی سال‌های ۱۹۹۹ و ۲۰۰۰ در برخی مناطق باز هم این شرایط کم و بیش در طی اغلب مناطق کشور (بخصوص نیمه‌ی شرقی و جنوبی کشور) ادامه یافته است (احترامیان، ۱۳۸۲: ۱). بیرجارگل و همکاران با استفاده از انواع شاخص‌های حاصل از تصاویر ماهواره‌ای شامل NDVI، $\frac{LST}{NDVI}$ ، VCI، DSI و شاخص پالمر با استفاده از تصاویر سنجنده^۲ AVHRR بررسی جامعی در مورد پدیده‌ی خشکسالی منطقه‌ی مغولستان انجام دادند. نتایج آنها مبین انطباق خوب بین شاخص‌های مذکور و شاخص‌های خشکسالی حاصل از ایستگاه‌های هواشناسی در دوره‌های خشک بوده است. ولی در این تحقیق شاخص مبنایی معرفی نشده است (بیرجارگل، ۲۰۰۶: ۹).

جیو و همکاران به ارزیابی خشکسالی با استفاده از شاخص‌های NDVI، NDWI و NDDI حاصل از تصاویر سنجنده MODIS در جلگه‌های مرکزی ایالات آمریکا پرداختند. مقایسه‌ی شاخص‌ها با شرایط حاکم حساسیت بالای شاخص NDDI را نسبت به شاخص‌های دیگر در ارزیابی خشکسالی نشان داد (جیو، ۲۰۰۷: ۱). استفاده از شاخص NDVI جهت پایش خشکسالی‌های استان اصفهان با تصاویر ماهواره NOAA در ماه‌های دوره‌ی رشد حاکی از این است که در بین سری‌های مختلف SPI شاخص NDVI با SPI سه ماهه‌ی همبستگی بهتری را نشان داد (باعقیده، ۱۳۸۶: ۱۴۵).

استفاده از دو تصویر ماهواره‌ی لندست یکی در سال کم‌باران و دیگری در سال مرطوب در محدوده‌ای از دشت مشهد بیانگر این می‌باشد که در سال مرطوب مقادیر NDVI به سمت محدوده‌ی بین ۰/۵ تا ۰/۷ تمایل داشتند، در حالی که مقادیر این شاخص در سال خشک به

1-Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)

2-Wan, 2004

3-Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)

4-Bayarjatgal, 2006

5-Gu, 2007

سمت محدود ۰/۱ تا ۰/۴ متمایل بودند. با توجه به نتایج حاصله، این روش می‌تواند به عنوان مرحله‌ی مقدماتی در یک سیستم پشتیبانی تصمیم‌گیری خشکسالی و یا به منظور ایجاد بانک اطلاعاتی مقادیر NDVI برای تصاویر سال‌های گذشته به کار رود (ثنایی‌نژاد، ۱۳۸۶: ۱).

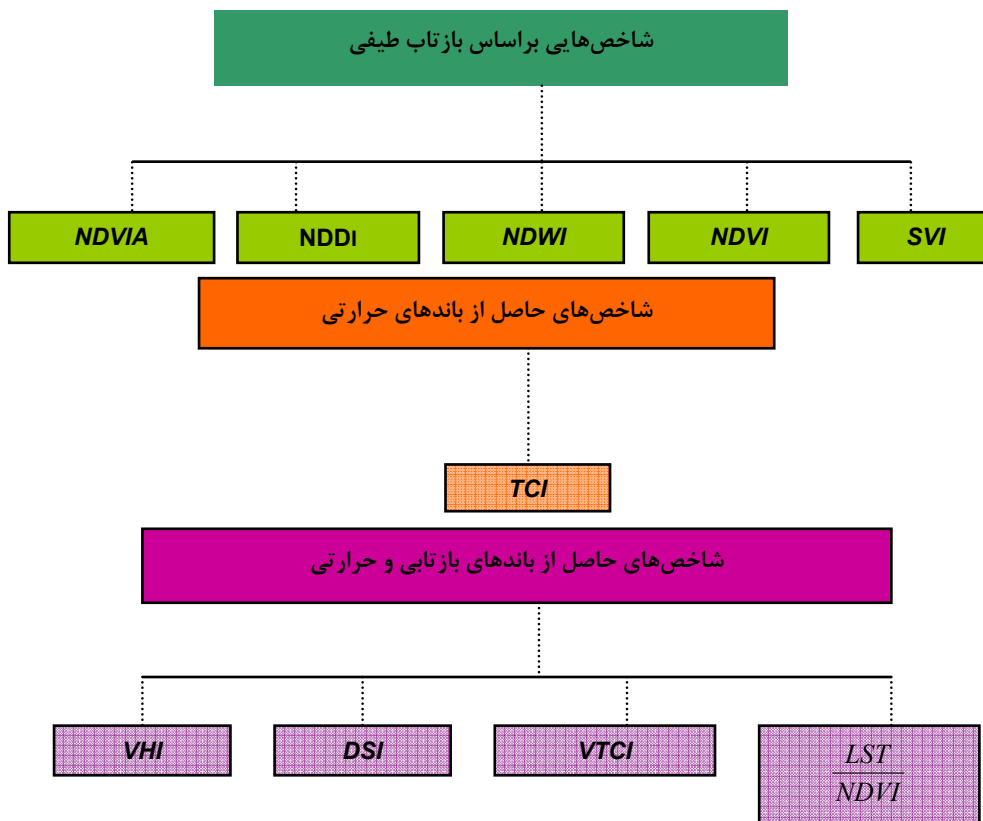
رحیم‌زاده و همکاران کارایی شاخص‌های VCI، NDVI حاصل از داده‌های سنجنده AVHRR را جهت پایش خشکسالی در منطقه‌ای در شمال غرب کشور مورد ارزیابی قرار دادند. شاخص NDVI نسبت به شاخص VCI از ضریب همبستگی بالایی با بارندگی سه ماهه برخوردار بود. در این تحقیق کارایی ضعیف شاخص VCI را ناشی از ناکافی بودن تعداد تصاویر به کار رفته در محاسبه این شاخص دانستند (رحیم‌زاده و همکاران، ۲۰۰۸: ۱).

محمودزاده و همکاران به بررسی همبستگی شاخص خشکسالی SPI و شاخص NDVI حاصل از سنجنده AVHRR ماهواره NOAA در منطقه‌ی فریدون‌شهر پرداختند. شاخص SPI برای دوره‌های سه، نه، شش و دوازده ماهه برای ماه‌های آوریل، می، ژوئن در طول دوره‌ی آماری ۱۹۹۸-۲۰۰۳ استخراج شد. میانگین منطقه‌ای تصاویر NDVI و SPI سه ماهه‌ی ماه ژوئن بالاترین همبستگی را در ماه‌های مورد مطالعه داراست. همچنین در بررسی‌ها مشخص گردید که در اغلب مناطق، همبستگی معنی‌داری بین NDVI ماه‌های آوریل و می با SPI سه ماهه ماه‌های دسامبر و ژانویه وجود دارد (محمودزاده، ۱۳۸۷: ۱). کوایرنیک و گینش کارایی شاخص شرایط گیاهی (VCI) در برابر شاخص‌های PDSI، شاخص Z و SPI در ارزیابی خشکسالی هواشناسی در تگزاس را مورد بررسی قرار دادند. نتایج حاکی از استفاده‌ی شاخص VCI با احتیاط می‌باشد چرا که همبستگی این شاخص با شاخص‌های بیان شده کم می‌باشد و شاخص VCI با فاکتورهای متغیر مکانی همبستگی قوی دارد (کوایرنیک، ۲۰۰۹: ۱).

هدف این تحقیق تحلیل شاخص‌های خشکسالی (شاخص‌های مورد مطالعه در این تحقیق: NDVI، NDWI، DSI، VTCI) براساس اطلاعات حاصل از بازتاب‌های طیفی و دمای سطح زمین در پایش خشکسالی حوضه‌ی مورد مطالعه و انتخاب یک یا گروهی از شاخص‌ها به عنوان شاخص مبنا براساس ارتباط این شاخص‌ها با عامل خشکسالی می‌باشد. در این تحقیق با تأکید بر خشکسالی هواشناسی (خشکسالی از نظر هواشناسی اساساً به حالتی از خشکی ناشی از کمبود بارندگی اطلاق می‌شود) از بارش به عنوان عامل خشکسالی استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

با توجه به این که اندازه‌گیری خشکسالی (کمی نمودن آن) بسیار پیچیده است، محققان در پی تدوین و تهیه شاخص‌هایی به این منظور بوده‌اند. شاخص‌های خشکسالی مقادیر معتدله‌ای اطلاعات اقلیمی و هیدرولوژی مانند درجه حرارت، بارندگی، برف، جریان رودخانه‌ها و سایر منابع آبی را به کار می‌گیرد تا تصویر جامعی از وضعیت خشکسالی را در غالب محدوده‌ای از اعداد بیان نماید. تحقیقات مربوط در پایش خشکسالی توسط تصاویر ماهواره‌ای منوط به استخراج برخی از شاخص‌های حاصل از داده‌های بازتاب طیفی و حرارتی می‌باشد. این شاخص‌ها را می‌توان به سه گروه تقسیم‌بندی کرد که در شکل ۱ برای هر گروه برخی از شاخص‌ها به‌طور نمونه آورده شده است.



شکل ۱: طبقه‌بندی شاخص‌های خشکسالی
مأخذ: نگارندگان

محدوده‌های شاخص NDVI حدوداً بین ۸۵۷ تا ۶۴۵ نانومتر، NDWI حدوداً بین ۲۱۳۰ تا ۸۵۷ نانومتر است. شاخص NDDI حاصل از شاخص‌های NDVI و NDWI، شاخص SVI حاصل از شاخص NDVI می‌باشد (بیرجارگل، ۲۰۰۶: ۱۱).

در اکثر تحقیقات به صورت عمومی از این شاخص‌ها برای ارزیابی خشکسالی استفاده شده است. ولی نکته‌ی مهم انتخاب یک یا گروهی از شاخص‌های مذکور به عنوان شاخص جامع در ارزیابی خشکسالی بر اساس ارتباط بین این شاخص‌ها و عامل موجد خشکسالی می‌باشد. بطوری که در برخی از موارد این شاخص‌ها نسبت به عامل ایجادکننده‌ی خشکسالی به عنوان مثال بارش، دارای تأخیر زمانی می‌باشند. پس بررسی ارتباط این شاخص‌ها با عامل ایجادکننده‌ی خشکسالی تأثیر مهمی در پایش خشکسالی دارد. در این میان انتخاب یک یا چند شاخص به عنوان شاخص مبنا و جامع می‌تواند یکی از دقیق‌ترین و کارآمدترین روش‌ها جهت پایش خشکسالی در مطالعات آینده باشد. به طوری که اگر بتوان با الگوریتمی بر میزان این شاخص‌ها با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای نظارت داشت، می‌توان با بررسی تغییرات این شاخص‌ها نسبت به پدیده‌ی خشکسالی آگاهی به‌دست آورد. در ادامه به شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق اشاره می‌شود.

۱- شاخص NDVI

این شاخص از اطلاعات حاصل از باندهای مادون قرمز نزدیک و قرمز حاصل می‌شود.

$$NDVI = \frac{\rho_{857} - \rho_{645}}{\rho_{857} + \rho_{645}} \quad (1)$$

ρ_{645} : مقادیر بازتاب در باند قرمز. ρ_{857} : مقادیر بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک. محدوده‌ی این شاخص بین ۱ و -۱ می‌باشد. مقادیر بالای این شاخص نشان‌دهنده‌ی افزایش تراکم پوشش گیاهی می‌باشد (الن، ۲۰۰۲: ۱۹). مقادیر متداول شامل ۰/۱ برای خاک لخت و ۰/۹ برای پوشش گیاهی متراکم است.

۲- شاخص NDWI^۳

$$NDWI = \frac{\rho_{857} - \rho_{2130}}{\rho_{857} + \rho_{2130}} \quad (2)$$

ρ_{857} : مقادیر بازتاب در باند مادون قرمز نزدیک، ρ_{2130} : مقادیر بازتاب در ۲۱۳۰ نانومتر.

1-Bayarjatal, 2006

2-Allen, 2002

3-Normalized Difference Water Index

دمای روشنایی^۱ دمای متناظر با انرژی تابشی دریافتی از سطح یک پدیده یا شیء توسط سنجنده می‌باشد. دمای روشنایی از حل معکوس معادله‌ی پلانک طبق معادله‌ی ۳ به دست می‌آید.

$$T_b = \frac{hc/k\lambda}{\ln\left(\frac{2hc^2\lambda^{-5}}{L_\lambda} + 1\right)} = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (3)$$

T_b : دمای روشنایی (کلوین)، c : سرعت نور 3×10^8 (ms⁻¹)، h : ثابت پلانک 6.626×10^{-34} (Js)، k : ثابت بولتزمن 1.3807×10^{-23} (JK⁻¹)، L_λ : تابش طیفی (Wm⁻²μm⁻¹sr⁻¹)، λ : طول موج مرکزی هر باند (μm)، K_1, K_2 : ضرایب کالیبراسیون (Wm⁻²μm⁻¹sr⁻¹) که مقادیر این ضرایب در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱: ضرایب کالیبراسیون دمای روشنایی سنجنده MODIS

K_2	K_1	ضرایب کالیبراسیون
۱۳۰۵/۸۴	۷۳۰/۰۱	باند ۳۱
۱۱۹۸/۲۹	۴۷۴/۹۹	باند ۳۲

مأخذ: هاتق و همکاران، ۲۰۰۹: ۱۲۵

جهت تعیین دمای واقعی سطح زمین از الگوریتم پنجره مجزا بر پایه‌ی این که اتمسفر در طول موج‌های متفاوت، عکس‌العمل مختلفی دارد استفاده می‌شود. بطوری‌که این الگوریتم از تفاوت تابش سنجش شده در دو ناحیه‌ی طیفی مجاور هم ناحیه‌ی مادون قرمز که ناشی از تأثیرات جذب توسط گازهای اتمسفری می‌باشد، برای برآورد دمای سطح زمین بهره می‌گیرد. در این تحقیق از الگوریتم توسعه داده شده توسط پرایس (۱۹۸۴) استفاده شده است.

$$LST = T_{31} + 1.8(T_{31} - T_{32}) + 48(1 - \varepsilon) - 75\Delta\varepsilon \quad (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{31} + \varepsilon_{32}}{2} \quad (5)$$

$$\Delta\varepsilon = 0.01019 + 0.01344\ln(NDVI) \quad (6)$$

$$\varepsilon_{31} = 0.989 + 0.029\ln(NDVI) \quad (7)$$

T_{31} : دمای روشنایی باند ۳۱ (کلوین)، T_{32} : دمای روشنایی باند ۳۲ (کلوین)، ϵ_{31} : توان تشعشعی باند ۳۱، ϵ_{32} : توان تشعشعی باند ۳۲ (هانق،^۱ ۲۰۰۹: ۱۲۵).

۳- شاخص^۲ DSI

این شاخص بر اساس اطلاعات حاصل از بازتاب طیفی و داده‌های حرارتی، از رابطه‌ی ۸ حاصل می‌شود.

$$DSI = \Delta LST - \Delta NDVI \quad (۸)$$

$$\Delta LST = \frac{(\overline{LST} - LST)}{\partial LST} \quad (۹)$$

$$\Delta NDVI = \frac{(\overline{NDVI} - NDVI)}{\partial NDVI} \quad (۱۰)$$

\overline{LST} : میانگین دمای سطح زمین، ∂LST : انحراف معیار دمای سطح زمین، $\partial NDVI$: انحراف معیار شاخص NDVI (بیرجارگل،^۳ ۲۰۰۶: ۱۱).

۴- شاخص^۴ VTCI

این شاخص بر پایه‌ی رابطه‌ی منفی بین شاخص پوشش گیاهی NDVI و دمای سطح زمین می‌باشد. شاخص VTCI بطور فیزیکی به صورت نسبت تفاوت دما بین پیکسل‌ها تعریف می‌شود. دامنه‌ی مقادیر شاخص VTCI بین صفر تا یک است که مقادیر پایین شاخص VTCI مبین احتمالات بالای خشکسالی می‌باشد.

$$VTCI = \frac{LST_{NDVI.max} - LST_{NDVI}}{LST_{NDVI.max} - LST_{NDVI.min}} \quad (۱۱)$$

$$LST_{NDVI.max} = a + bNDVI_i \quad (۱۲)$$

$$LST_{NDVI.min} = a' + b'NDVI_i \quad (۱۳)$$

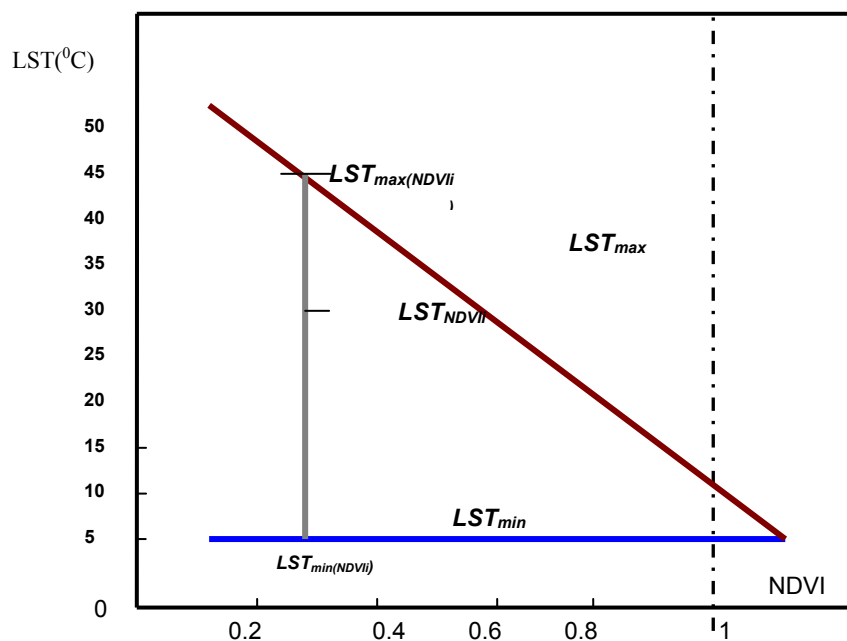
1-Hong, 2009

2-Drought Severity Index

3-Bayarjargal, 2006

4-Vegetation Temperature Condition Index

$LST_{NDVI,max}$ و $LST_{NDVI,min}$: به ترتیب محدوده‌های ماکزیمم و مینیمم دمای سطح زمین با مقادیر $NDVI_i$ یکسان در منطقه‌ی مورد مطالعه، $LST_{NDVI,i}$: دمای سطح زمین هر پیکسل با شاخص پوشش گیاهی $NDVI_i$. ضرایب مربوط به معادلات ۱۲-۱۳ را می‌توان از ترسیم نمودار دمای سطح زمین در برابر شاخص $NDVI$ به دست آورد. در صورتی که منطقه‌ی مورد مطالعه به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد تا دامنه‌ی وسیعی از $NDVI$ و شرایط رطوبتی سطح را شامل شود، شکل این نمودار به‌طور نرمال در مقیاس ناحیه‌ای به‌صورت مثلث می‌باشد (وزن، ۲۰۰۴: ۶۵).



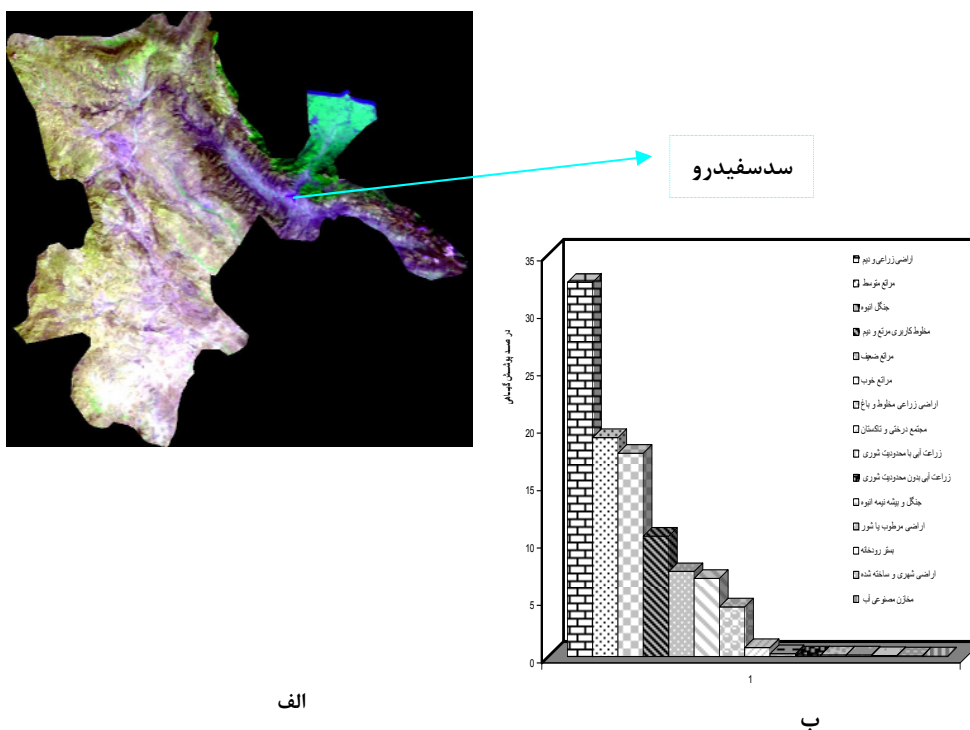
شکل ۲: نمودار شماتیک تفسیر فیزیکی شاخص VTCI

مأخذ: ون و همکاران، ۲۰۰۴

منطقه‌ی مورد مطالعه

حوضه‌ی آبریز سفیدرود در محل تلاقی رشته‌کوه‌های البرز، زاگرس و مرکزی بین مختصات جغرافیایی ۴۶،۳۰ و ۵۱،۱۳ طول شرقی، ۳۴،۵۵ و ۳۷،۵۲ عرض شمالی قرار دارد. مساحت حوضه‌ی آبریز ۶۰۴۹۴ کیلومترمربع است که حدود ۴۴۹۲۷ کیلومترمربع آن را مناطق کوهستانی و ۱۵۵۶۷ کیلومترمربع آن را دشت‌ها و کوهپایه‌ها تشکیل می‌دهند. حوضه‌ی قزل اوزن- سفیدرود در مقایسه با سایر حوضه‌های آبریز کشور، به لحاظ وسعت اراضی قابل آبیاری پس از حوضه‌ی دریاچه‌ی نمک بزرگترین حوضه‌ی آبریز کشور به‌شمار می‌آید.

به لحاظ تقسیمات کشوری محدوده‌ی مطالعاتی در برگرفته‌ی بخش‌هایی از ۱۱ استان: آذربایجان شرقی، اردبیل، تهران، زنجان، قزوین، کردستان، گیلان و همدان، مازندران، کرمانشاه و آذربایجان غربی است که سه استان مازندران، کرمانشاه و آذربایجان غربی جمعاً کمتر از یک درصد کل مساحت را در نظر می‌گیرند. محدوده‌ی مورد مطالعه این تحقیق قبل از سد سفیدرود می‌باشد که اراضی زراعی و دیم، مراتع متوسط، مخلوط کاربری دیم و مرتع ضعیف به ترتیب بیشترین درصد پوشش گیاهی را به خود اختصاص داده‌اند. شکل ۳ حوضه‌ی آبریز سفیدرود و نمودار درصد پوشش گیاهی را نشان می‌دهد.



شکل ۳: حوضه‌ی مورد نظر (الف)، نمودار حاصل از نقشه کاربری اراضی (ب)

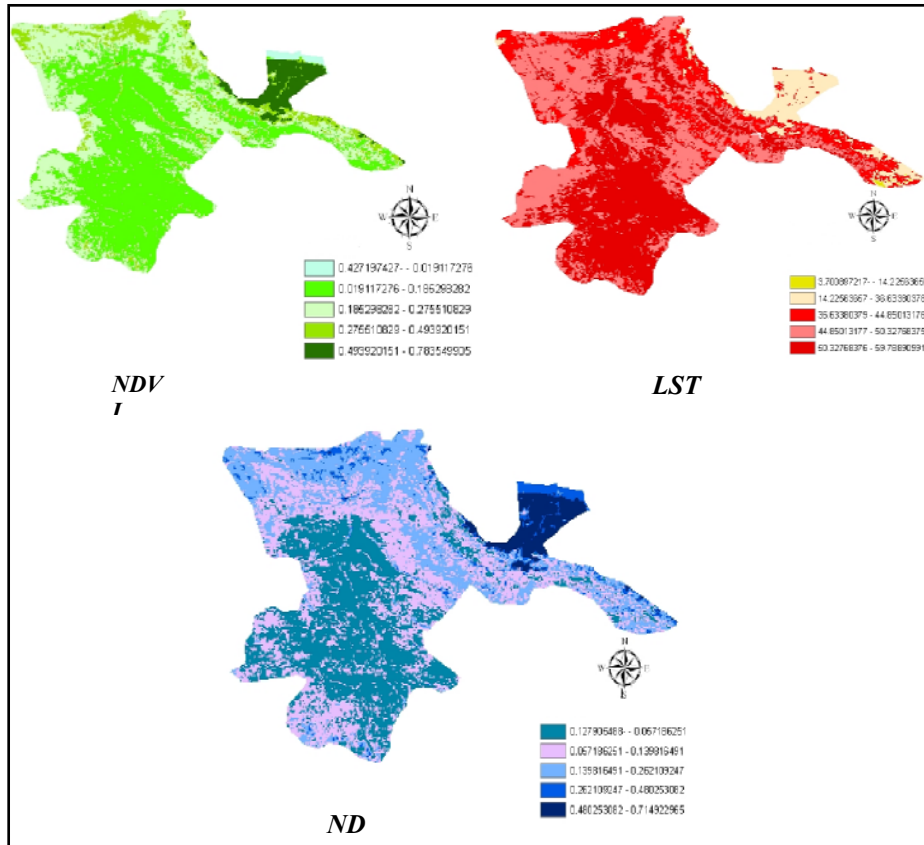
نتایج و بحث

دلایل انتخاب سنجنده MODIS، ماهواره Terra، در این تحقیق شامل توان تفکیک طیفی و مکانی بالا، تکنیک کالیبراسیون مخصوص، باریک بودن اکثر باندهای طیفی این سنجنده که این ویژگی سبب جلوگیری از جذب طیفی بخار آب در باند مادون قرمز شده و در نتیجه خطایی که به واسطه‌ی جذب بخار آب ایجاد می‌شود بسیار کوچک می‌شود. بنابراین دقت

محاسباتی در تعیین شاخص NDVI افزایش می‌یابد. تصاویر منتخب مربوط به سال‌های ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ بودند. مرحله‌ی بعدی مربوط به اعمال پردازش مقدماتی بر روی تصاویر می‌باشد. مرحله‌ی اول مربوط به تبدیل داده‌های اولیه به مقادیر تابش و بازتابش است. خوشبختانه این مرحله بر روی تصاویر دانلود شده انجام گرفته و نیازی به انجام این مرحله نمی‌باشد (هالکا، ۲۰۰۸: ۲).

در گام بعدی تصحیحات هندسی بر روی تصاویر انجام گرفت. در ابتدا تصاویر به سیستم طول و عرض جغرافیایی تبدیل شدند و سپس با استفاده از روش نزدیکترین همسایگی نمونه‌برداری مجدد به منظور تصحیح ابعاد پیکسل‌ها انجام گرفت. بر اساس تحقیقی که انجام گرفته است پیشنهاد شده است برای تصاویری که $offset=0$ است از تصحیح اتمسفری استفاده نشود (محمودزاده، ۱۳۸۸: ۴).

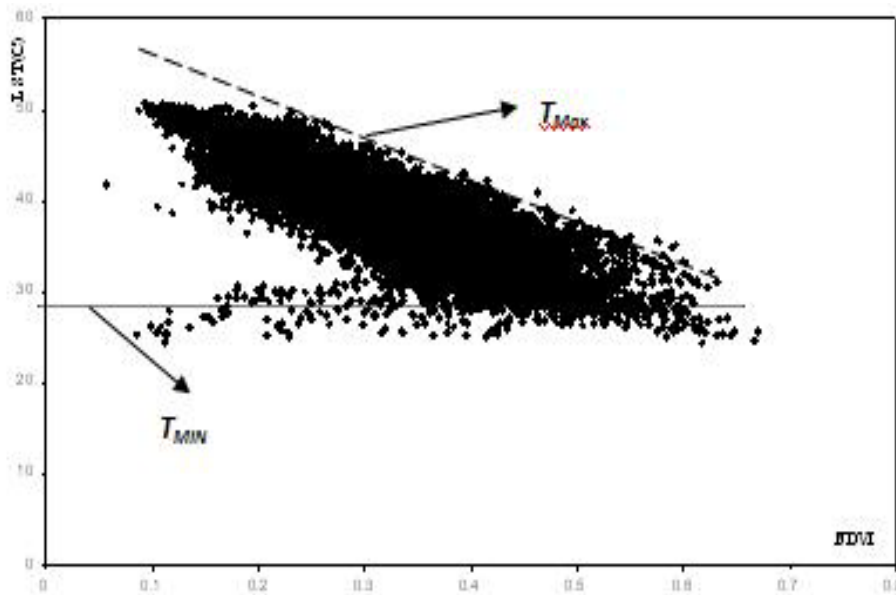
برای بررسی این موضوع، در این تحقیق از روش کم کردن ارزش پیکسل‌های تیره با در نظر گرفتن دریای خزر به عنوان شی سیاه جهت تصحیح اتمسفری استفاده شد. سپس با محاسبه‌ی شاخص گیاهی NDVI و مقایسه‌ی آن با حالت تصحیح نشده متوجه شدیم که مقادیر حالت تصحیح نشده مقادیر قابل قبول تری هستند چراکه مقادیر این شاخص گیاهی برای مناطق آبی از جمله آب پشت سد سفیدرود در ماه‌های سال‌های مورد بررسی اعداد مثبتی هستند. با مراجعه به فایل Header تصاویر مورد استفاده، مقادیر $offset$ صفر می‌باشند. بعد از انجام تصحیحات مربوطه بر روی تصاویر امکان استخراج شاخص‌های NDVI، NDWI، $DSI = \frac{LST}{NDVI}$ می‌باشد. به‌طور نمونه تصاویر مربوط به برخی از شاخص‌ها در تیرماه سال ۱۳۸۱ در ادامه آورده شده است (خاطر نشان می‌شود اعداد منفی مربوط به دریای خزر می‌باشد).



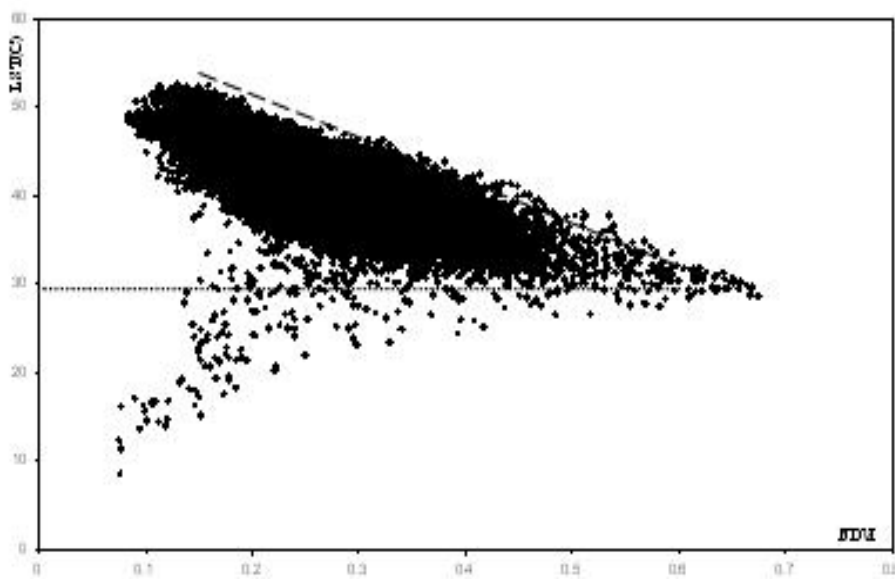
شکل ۴: مقادیر برخی از شاخص‌ها در تیر ۱۳۸۱

مأخذ: نگارندگان

برای بررسی دقت روش مورد استفاده در برآورد دمای سطح زمین، مقایسه‌ای بین دمای سطح زمین حاصل از روش پرایس و دمای واقعی سطح زمین انجام گرفت. متوسط خطا در سال ۱۳۸۱ و ۱۳۸۲ به ترتیب برابر ۴/۵ و ۲/۵۶ درجه سانتی‌گراد بوده است. جهت محاسبه شاخص VTCI نیاز به برآورد ضرایب معادلات دمای ماکزیمم و مینیمم سطح زمین بر اساس نمودار شاخص NDVI و دمای سطح زمین می‌باشد. به طور نمونه نمودارهای خرداد ماه سال‌های ۸۲-۱۳۸۱ در شکل‌های ۵-۶ آورده شده است.



شکل ۵: نمودار شاخص گیاهی و دمای سطح زمین خرداد
 مأخذ: نگارندگان



شکل ۶: نمودار شاخص گیاهی و دمای سطح زمین
 مأخذ: نگارندگان

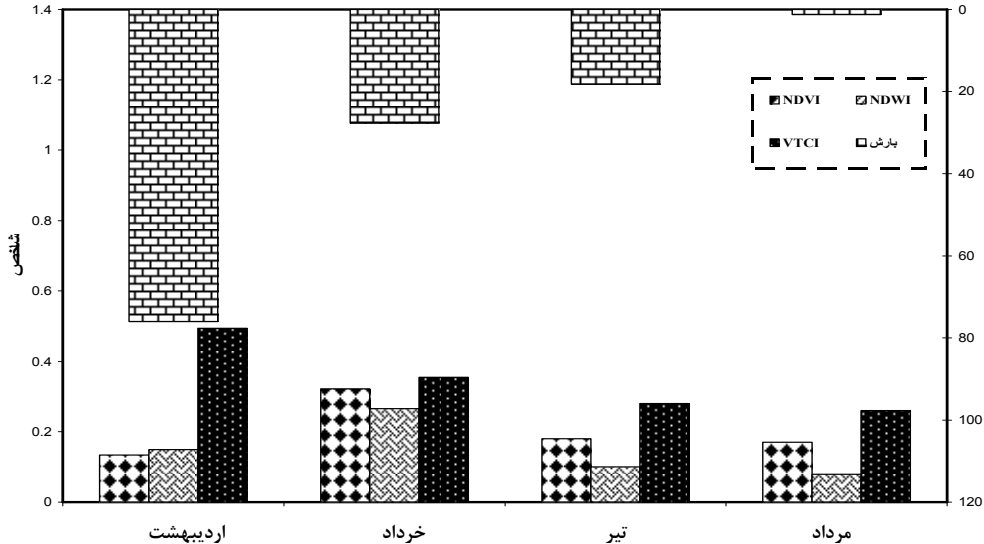
در نهایت معادلات مربوط به دمای ماکزیمم و مینیمم سطح زمین در ماه‌های مورد مطالعه در جدول ۲ آورده شده است. بعد از محاسبه‌ی دمای ماکزیمم و مینیمم سطح زمین شاخص VTCI با استفاده از رابطه‌ی ۱۱ حاصل می‌شود.

جدول ۲: حدود ماکزیمم و مینیمم دمای سطح زمین

۱۳۸۲		۱۳۸۱		سال
$LAST_{NDVI.min}$	$LAST_{NDVI.max}$	$LAST_{NDVI.min}$	$LAST_{NDVI.max}$	ماه
LST=12	$LST=-44.015NDVI+41.18$	LST=15	$LST=-65.68NDVI+39.27$	اردیبهشت
LST=30	$LST=-44.09NDVI+58.82$	LST=29	$LST=-38.28NDVI+56.25$	خرداد
LST=33	$LST=-51.28NDVI+59.79$	LST=35	$LST=-59.016NDVI+65.74$	تیر
LST=33	$LST=-50.62NDVI+58.18$	LST=35	$LST=-51.49NDVI+63.46$	مرداد

مأخذ: نگارندگان

با محاسبه‌ی میانگین شاخص‌های مورد مطالعه و بارش ماهانه، می‌توان به این نتیجه رسید ماکزیمم مقدار شاخص‌ها بجز برای شاخص VTCI که در اردیبهشت‌ماه می‌باشد، در خردادماه اتفاق افتاده است. خاطر نشان می‌شود ماکزیمم بارش نیز در اردیبهشت‌ماه می‌باشد.



شکل ۷: مقادیر ماهانه شاخص‌های NDVI, VTCI, NDWI

مأخذ: نگارندگان

این مسأله مبین وجود همبستگی مثبت بین بارش و شاخص VTCI بدون تأخیر زمانی می‌باشد. همچنین میزان شاخص VTCI در ماه اردیبهشت نسبت به سایر ماه‌ها بیشتر می‌باشد چرا که بارش بیشتری در این ماه نسبت به سایر ماه‌ها اتفاق افتاده است. بر اساس تأخیر زمانی موجود بین شاخص‌های NDVI، NDWI، DSI، شاخص‌های مورد بررسی نمی‌توانند بدون در نظر گرفتن تأخیر زمانی شاخص مناسبی برای پایش خشکسالی باشند. بطوری که مقایسه‌ای بین ضرایب همبستگی شاخص‌های NDVI، NDWI، DSI با بارش بدون تأخیر زمانی و با یک ماه تأخیر زمانی انجام گرفت. بر این اساس میزان ضرایب همبستگی با یک ماه تأخیر شاخص‌های NDVI، NDWI، DSI نسبت به ضرایب همبستگی بدون تأخیر افزایش یافته است.

جدول ۳: ضرایب همبستگی بارش با شاخص‌های مورد مطالعه

ضریب همبستگی	NDVI	VTCI	NDWI	DSI
r_0 (بدون تأخیر زمانی)	۰/۱	۰/۹۷۹	۰/۲۸۹	۰/۵۵۴
r_1 (با یک ماه تأخیر زمانی)	۰/۱۲	۰/۹۴	۰/۴۴	۰/۷۴

مأخذ: نگارندگان

مقایسه‌ی میانگین بارش ماهانه و نسبت $\frac{LST}{NDVI}$ نشان‌دهنده‌ی افزایش این نسبت از ماه اردیبهشت به مردادماه می‌باشد، یعنی وجود همبستگی منفی بین بارش و نسبت $\frac{LST}{NDVI}$ با ضریب همبستگی ۰/۷۸-.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از اطلاعات حاصل از باندهای حرارتی و انعکاسی از شاخص‌های خشکسالی (VTCI، DSI، NDWI، NDVI) استفاده شد. ماکزیمم ضریب همبستگی با بارش مربوط به شاخص VTCI و مینیمم آن مربوط به شاخص NDVI می‌باشد. دلیل کاهش ضریب همبستگی بارش با شاخص NDVI را می‌توان به نوع پوشش گیاهی حاکم، پوشش غالب تنک، دانست که در این حالت بازتاب حاصل از خاک می‌تواند بازتاب پوشش گیاهی را تحت تأثیر قرار دهد. البته از این شاخص می‌توان به عنوان بررسی‌های اولیه در پایش خشکسالی استفاده کرد که در این میان می‌توان به برخی از تحقیقات از جمله احترامیان و همکاران، ثنایی‌نژاد و همکاران اشاره کرد.

در هنگام خشکسالی افزایش دمای سطح زمین زودتر از کاهش پوشش گیاهی اتفاق می‌افتد. در شرایط خشک (کاهش در میزان رطوبت قابل دسترس خاک)، افزایش دمای برگ می‌تواند نماد خوبی برای استرس رطوبتی گیاه و آغاز دوره‌ی خشکسالی باشد. این عکس‌العمل حرارتی حتی زمانی که گیاهان سبز می‌باشند نیز اتفاق می‌افتد بطوری‌که با بسته شدن روزنه‌های گیاهان میزان تلفات آب به‌وسیله تعرق کاهش می‌یابد. با کاهش شار حرارتی نهان، جهت تعادل بیلان انرژی شار حرارتی محسوس افزایش می‌یابد که منجر به افزایش دمای برگ خواهد شد. سرانجام تعادل شار انرژی منجر به افزایش دمای سطح زمین خواهد شد. بنابراین شاخصی که بتواند علاوه بر پوشش گیاهی، دمای سطح زمین را نیز در پایش خشکسالی در نظر بگیرد بالتبع از نتایج بهتری برخوردار است. در این تحقیق نیز شاخص‌های VTCI و DSI نسبت به سایر شاخص‌های مورد مطالعه دارای عملکرد بهتری بودند. همچنین ون و همکاران نیز کارایی شاخص VTCI را در پایش خشکسالی نشان دادند. در این تحقیق به علت ضریب همبستگی مثبت و بالای شاخص VTCI با بارش، این شاخص به عنوان شاخص مبنا توصیه می‌شود.

منابع

- ۱- احترامیان، کوروش؛ علیرضا شهابفر و محمدجعفر ناظم‌السادات (۱۳۸۲). پیش‌بینی شرایط خشکسالی با استفاده از شاخص نرمال شده اختلاف پوشش گیاهی (NDVI) در ایران، همایش ژئوماتیک.
- ۲- باعقیده، محمد؛ به راهنمایی بهلول علیجانی؛ پرویز ضیائیان؛ به مشاورت عزت‌الله قنواتی؛ حسین شیخ‌حسینی (۱۳۸۶). بررسی و پایش خشکسالی‌های استان اصفهان با استفاده از تصاویر چندزمانه‌ای NOAA/AVHRR شاخص NDVI و سیستم اطلاعات جغرافیایی (GIS)، رساله دکتری. دانشگاه تربیت معلم تهران. دانشکده ادبیات و علوم انسانی. گروه جغرافیا.
- ۳- ثنایی‌نژاد، حسن؛ کامران داوری و علیرضا عابدی (۱۳۸۶). پایش خشکسالی کشاورزی در دشت مشهد با استفاده از نمایه NDVI و معرفی نمایه جدید APVI، علوم و صنایع کشاورزی (آب و خاک). (۱) ۲۱.
- ۴- محمودزاده، عبدالحسین؛ بهرام ثقفیان و احمد مختاری (۱۳۸۷). بررسی همبستگی شاخص خشکسالی SPI و شاخص NDVI در منطقه‌ی فریدون شهر، سومین کنفرانس مدیریت منابع آب.
- ۵- محمودزاده، حسن و خلیل ولیزاده (۱۳۸۸). کاربرد داده‌های ماهواره‌ای چندزمانه‌ای و GIS برای ارزیابی کاهش مناطق زراعی در شهرستان اسکو، مجله فضایی جغرافیایی. شماره ۲۶.
- 6- Allen, R, Bastiaanssen, W., Tasumi, M. and Trezza, R (2002). SEBAL, Surface Energy

- Balance Algorithms for Land Idaho Implementation. Advanced Training and Users Manual. 1-98.
- 7- Bayarjargal. Y, Adyasuren, T, Mukhtuya, S (2000). Drought and Vegetation Monitoring in the Arid and Semi-arid Regions of the Mongolia Using Remote Sensing and Ground Data. Proceeding of 21st Asian Conference on Remote Sensing, Taipei, Taiwan. 1.327-377.
 - 8- Bayarjargal. Y, Karnieli. A, Bayasgalan. M., Khudumur. S, Gandush. C, and Tucker. C.J. (2006). A Comparative Study of NOAA-AVHRR Derived Drought Indices Using Change Vector Analysis. Remote Sensing of Environmental. 105. 9-22.
 - 9- Hong, S, Hendrickx, J. M. H, and Brochers, B. (2009). Up-Scaling of SEBAL Derived Evapotranspiration Maps From Landsat (30m) to MODIS (250 m) Scale. Journal of Hydrology. 370. 122-138.
 - 10- Hulka. J (2008). Calibrating ASTER for Snow Cover Analysis. 11th AGILE International Conference on Geographic Information Science 2008. University of Girona, Spain.
 - 11- 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. 34. 1-6.
 - 12- Gutman. G. (1990). Towards Monitoring Droughts From Space. Journal of Climate 3. 282-295.
 - 13- Ji, L, Peters, A (2003). Assessing Vegetation Response to Drought in the Northern Great Plains Using Vegetation and Drought Indexes. Remote Sensing of Environmental. 87. 85-98.
 - 14- Nemani. R, Pierce. L, and Running. S (1992). Developing Satellite-derived Estimates Of Surface Moisture Status. Journal of Applied Meteorology. 32. 548-557.
 - 15- Prihodko. L, Goward. S (1997). Estimation of Air Temperature From Remotely Sensed Surface Observation. REMOTE SENS. ENVIRON. 60. 335-346.
 - 16- Quiring. S, Ganesh. S (2009). Evaluating the utility of the Vegetation Condition Index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas. Agricultural and Forest Meteorology. 1-10.
 - 17- Rahimzadeh. P, Darvishsefat. A, Khalili. A, and Makhdoum. M (2008). Journal of Arid Environmental. 72. 1086-1096.
 - 18- Tucker. C. J, Elgin, J. H, and McMurtrey, J. E. (1979). Temporal Spectral measurements of Corn and Soybean Crops. Photogramm. Eng. Remote Sens. 45:643-653.
 - 19- Tucker. C. J, Choudhury, B.Y. (1987). Satellite Remote Sensing of Drought Conditions, Remote Sensing of Environmental. 23. 243-251.
 - 20- Wan. Z, Wang. P, and Li, X. (2004). Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index Products For Monitoring Drought In The Southern Great Plains, USA. INT. J. REMOTE SENSING. 25(1). 61-72.