

## بررسی اثرات خشک‌سالی کشاورزی بر تراکم پوشش گیاهی با استفاده از سنجش از دور (مطالعه موردی: حوضه آبریز سیمینه‌رود)

عادل نبی‌زاده بلخکانلو\* - دکتری رشته اقلیم کشاورزی دانشگاه خوارزمی تهران  
پرویز ضیائیان فیروزآبادی - استاد ژئوفورماتیک دانشگاه خوارزمی تهران  
علی خدمت‌زاده - کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۶ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۵

### چکیده

در سال‌های اخیر، افت تراز سطح آب دریاچه ارومیه، بررسی میزان تغییرات آستانه‌های دمایی، رطوبتی، و تنش خشکی پوشش گیاهی را در منطقه ضرورتی اجتناب‌ناپذیر کرده است. در این تحقیق، که از نظر روش توصیفی-تحلیلی و از نظر هدف کاربردی است، از داده‌های سنجنده MODIS به منظور بررسی رابطه فضایی NDVI-TS و NDVI-ATS برای استخراج زمان وقوع خشک‌سالی کشاورزی از ژوئن تا اکتبر سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ استفاده شده است تا شاخص‌های VTCI و WDI که قادر به شناسایی تنش خشکی در مقیاس منطقه‌ای اند استخراج شوند. نتیجه این تحقیق نشان داد که در هر دو شاخص وضعیت تنش خشکی در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ بیشتر بوده است. همچنین، براساس رابطه فضایی NDVI-TS در همه سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ شیب بالایی فضای مثلی برای لبه گرم منفی است؛ یعنی با افزایش NDVI میزان LST کاهش یافته است؛ درحالی‌که برای لبه سرد شیب مثبت است. همچنین، شیب به‌دست‌آمده از رابطه فضایی NDVI-ATS برای خط خشک منفی است؛ یعنی خط خشک یا خط حداقل ETR یک همبستگی منفی با NDVI را نشان می‌دهد. درحالی‌که برای خط مرطوب بالاخص در سال ۲۰۰۸ شیب مثبت بوده و در بقیه سال‌ها تغییر محسوسی دیده نمی‌شود. پژوهش حاضر نشان داد مقدار آستانه VTCI برای تنش خشکی در سال ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ شدید بوده است.

واژگان کلیدی: حوضه آبریز سیمینه‌رود، خشک‌سالی کشاورزی، MODIS، VTCI، WDI.

### مقدمه

خشک‌سالی پدیده‌ای اقلیمی است که به‌صورت دوره‌ای و با توجه به شرایط آب و هوایی یک منطقه رخ می‌دهد. بنابراین، شناسایی خشک‌سالی خود یافته‌ای ارزشمند برای مدیریت منابع آبی مناطقی چون ایران است که بخش اعظم آن را مناطق خشک و نیمه‌خشک تشکیل می‌دهد (شریفان و رحیمی، ۱۳۹۲: ۲).

برای برآورد خشک‌سالی یک منطقه روش‌های متفاوتی وجود دارد که این روش‌ها نیاز به داشتن داده‌های قابل اطمینان از گذشته دارند. ولی بی‌دقتی در برداشت داده‌ها محاسبه خشک‌سالی را با مشکلاتی همچون عدم دقت در زمان و شدت وقوع آن مواجه کرده است. بنابراین، امروزه با فراهم‌شدن امکانات ماهواره‌ای و تصویربرداری‌های متعدد در بازه‌های زمانی متفاوت می‌توان خشک‌سالی را با صرف هزینه‌ها و زمان کمتر و با دقت بالاتری اندازه‌گیری کرد (علوی‌پناه، ۱۳۸۲: ۱۷۰). امروزه استفاده از سنجش از دور یکی از روش‌هایی است که برای شناسایی تغییرات پوشش

گیاهی استفاده می‌شود. این تکنولوژی، با اندازه‌گیری تشعشع خاص پوشش گیاهی، امکان شناخت تغییرات بازتاب ناشی از خشک‌سالی را در گیاهان فراهم می‌کند (بووین و همکاران، ۲۰۰۶). داده‌های ماهواره‌ای برای تهیه نقشه و پایش سطح زمین از طریق ترکیب کاربردی LST و NDVI تفسیر مکانیکی تری ارائه می‌دهد و این داده‌ها منبع مهمی برای پایش خشک‌سالی‌اند (تیان و همکاران، ۲۰۱۶). در صورت وجود رطوبت در محصول، نسبت LST/NDVI در طول زمان خشک‌سالی افزایش می‌یابد، زیرا شیب منفی نسبت LST/NDVI به دلیل دمای پایین سطح است. در شرایط خشک و در زمان رطوبت کمتر خاک درجه حرارت برگ‌های در حال رشد می‌تواند شاخص مناسبی برای تنش رطوبتی گیاه به‌خصوص از زمان ظهور خشک‌سالی شناخته شود (تانگ، ۲۰۱۳). در طول خشک‌سالی یا شرایط خشک (کمبود رطوبت خاک)، افزایش درجه حرارت برگ نشان‌دهنده اختلال رطوبت گیاهان قبل از شروع خشک‌سالی است (تانگ، ۲۰۱۳). ذکر این نکته لازم است که پاسخ تنش درجه حرارت تاج پوشش گیاه ممکن است حتی زمانی که گیاه سبز باشد نیز رخ دهد، زیرا بسته‌شدن روزنه‌ها می‌تواند به کاهش از دست دادن آب به وسیله تعرق و در نتیجه جریان شار حرارتی منجر شود (کارلسون و همکاران، ۱۹۹۴؛ کانها و همکاران، ۲۰۱۵؛ هان و همکاران، ۲۰۰۶).

محققان شاخص‌های سلامت گیاهان و خشک‌سالی را براساس نسبت‌های NDVI-LST نشان داده‌اند؛ از جمله شاخص سلامت گیاهان VHI<sup>۱</sup> (کوگان، ۱۹۹۵)، شیب<sup>۲</sup> (نمانی<sup>۳</sup> و همکاران، ۱۹۹۲)، شاخص ذخیره آب پوشش گیاهی<sup>۴</sup> (کارلسون و همکاران، ۱۹۹۴)، شاخص کسری آب<sup>۵</sup> (موران و همکاران، ۱۹۹۴)، شاخص شرایط دمای گیاهان (وانگ و همکاران، ۲۰۰۱)، شاخص کمبود رطوبت خاک<sup>۶</sup> (کشاورز و همکاران، ۲۰۱۴).

فشایی و همکاران (۲۰۱۵) در پژوهشی با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS به پهنه‌بندی شاخص کمبود آب (WDI) در محدوده مطالعاتی زیرمجموعه دشت مشهد در سال آبی ۱۳۹۰-۱۳۹۱ پرداختند و سپس با استفاده از رابطه خطی این متغیر با رطوبت خاک انطباق مناسبی را بین این دو متغیر به دست آوردند که ضریب همبستگی ۰٫۹۳ درصد بین شاخص WDI و رطوبت خاک اندازه‌گیری شده در عمق ۵ سانتی‌متری از سطح خاک تأیید دیگری بر صحت نتایج به دست آمده است. سهرابی‌نیا (۲۰۱۲) تغییرات دمایی را در برابر رطوبت خاک نزدیک سطح زمین در دشت کانتربری در جنوب نیوزلند بررسی کرد. نتایج نشان داد رابطه مناسبی میان دمای سطح زمین اندازه‌گیری شده و رطوبت خاک به دست آمده از سنجنده MODIS وجود ندارد و هر چقدر بازه‌های تصاویر سنجنده MODIS کوتاه‌تر باشد ضریب همبستگی بهتری با وضعیت رطوبتی خاک خواهد داشت.

ونگ و همکاران (۲۰۰۱) مشخص کردند VTCI براساس رابطه فضای مثلثی بین LST و NDVI برای نظارت بر خشک‌سالی است. سندهالت و همکاران (۲۰۰۲) VTCI را برای ارزیابی وضعیت رطوبت خاک توسعه دادند. ون و همکاران (۲۰۰۳) از LST و NDVI به‌عنوان محصولات MODIS برای تولید شاخص درجه حرارت گیاهی (VTCI) برای نظارت بر خشک‌سالی در جنوب دشت بزرگ ایالات متحده آمریکا استفاده کردند. لاله و همکاران (۱۳۹۰) با استفاده از فناوری سنجش از دور و تصاویر سنجنده MODIS به ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی حوضه آبریز سفیدرود و استخراج شاخص‌های NDVI، NDWI، DSI و VTCI پرداختند. نتایج نشان داد شاخص VTCI در تعیین شرایط خشک‌سالی

1. Vegetation Health Index

2. NDVI-LST

3. Nemani

4. Vegetation Supply Water Index

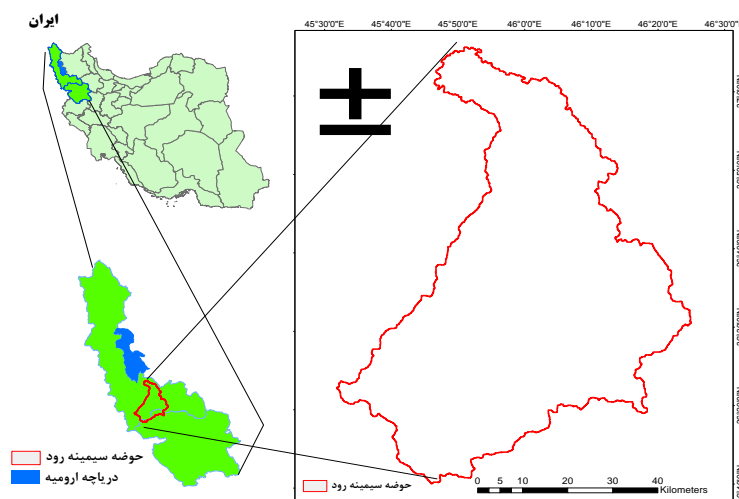
5. Water Deficit Index

6. Soil Wetness Deficit Index

(زمان واقعی) به علت تلفیق خصوصیات حرارتی (دمای سطح زمین) و اطلاعات حاصل از بازتاب طیفی (شاخص‌های پوشش گیاهی) در قالب فرمول‌بندی مناسب می‌تواند مفیدتر باشد. خالدی و همکاران (۱۳۹۵) به بررسی ارتباط بین خشک‌سالی و شاخص تفاضل نرمال‌شده پوشش گیاهی بر منطقه قروه و دهگلان کردستان با استفاده از تصاویر سنجنده MODIS پرداختند. نتایج نشان داد به طور کلی مقادیر میانگین شاخص NDVI در سال‌های ۲۰۰۰، ۲۰۰۱ و ۲۰۰۸ پایین است که به عنوان سال‌های نمونه خشک‌سالی اکولوژیکی تعیین شده بودند. سال ۲۰۰۱ کمترین مقدار NDVI را داشت و غیر از مناطق مرکزی، که زیر کشت آبی بوده‌اند، بقیه مناطق تقریباً پوشش گیاهی خود را از دست داده‌اند. نگارندگان در این تحقیق برآن‌اند که با استفاده از داده‌های ماهواره‌ای سنجش از راه دور رابطه فضایی بین NDVI-Ts و  $\Delta T$ -NDVI را بررسی کند تا براساس داده‌های ماهواره‌ای شاخص‌های  $VTCI^1$  (شاخص شرایط درجه حرارت پوشش گیاهی) و  $WDI^2$  (شاخص کسری آب) را که قادر به شناسایی تنش خشکی در مقیاس منطقه‌ای‌اند بررسی کنند و زمان وقوع خشک‌سالی کشاورزی را استخراج نمایند. شاخص  $VTCI$ ، که شامل شاخص  $NDVI^3$  و  $LST^4$  می‌شود، برای پایش دمای سطح پوشش گیاهی در منطقه مناسب است. همچنین، شاخص کسری آب ( $WDI$ ) نیز یک معیار بسیار مهم ماهواره‌ای برای پایش شرایط رطوبت خاک است که وابسته به NDVI و اختلاف درجه حرارت  $Ts-Ta$  است (پاریدا، ۲۰۰۶).

### معرفی منطقه مورد مطالعه

حوضه سیمینه‌رود از زیرحوضه‌های دریاچه ارومیه است که در موقعیت جغرافیایی  $32^{\circ}45'$  تا  $34^{\circ}46'$  طول شرقی و  $10^{\circ}$  تا  $36^{\circ}03'$  عرض شمالی، با وسعتی معادل ۳۹۰۰ کیلومتر مربع، در غرب زیرحوضه زربینه‌رود و شرق زیرحوضه جنوب دریاچه ارومیه قرار گرفته و رودخانه اصلی آن سیمینه‌رود است (شکل ۱). این رود از دامنه‌های شمالی کوه‌های دوسر، خسرو، نیستان، ابراهیم جلال، و مام‌سوار سرچشمه می‌گیرد و پس از دریافت شاخه‌های متعدد در مسیر خود، که در امتداد جنوب به شمال است، از غرب بوکان عبور می‌کند و در جنوب غربی میاندوآب در نواحی ساحلی دریاچه پخش می‌شود.



شکل ۱. حوضه آبریز سیمینه‌رود (منبع: نگارندگان)

1. Vegetation temperature condition index
2. Water deficit index
3. Normalized difference condition index
4. Land surface temperature

## داده‌ها و روش‌ها

در این پژوهش، از داده‌های سنجنده MODIS مستقر بر ماهواره Terra استفاده شد. در این تصاویر، از محصولات ترکیبی هشت‌روزه دمای سطح زمین با قدرت تفکیکی یک کیلومتر و هشت‌روزه بازتاب سطح با قدرت تفکیکی ۲۵۰ متر در بازه زمانی (۲۰۰۵ لغایت ۲۰۰۸) در پنج ماه متوالی ژوئن تا اکتبر استفاده شد. برای استخراج نتایج از روش رگرسیون خطی استفاده شد. همچنین، در این تحقیق از ENVI ۵.۱ و ARC GIS ۱۰.۵ برای تجزیه و تحلیل استفاده شد.

دو محصول مورد استفاده از سنجنده مادیس در این پژوهش برای استخراج تصاویر LST و NDVI عبارت‌اند از:

1. MODIS/Terra Land Surface Temperature (LST)
2. MODIS/Terra Surface Reflectance (NDVI)

پس از دانلود این تصاویر، پیش‌پردازش‌هایی مانند تبدیل تصاویر به مقیاس مربوطه، برش آن‌ها براساس محدوده منطقه مورد مطالعه، محاسبه Raster Calculator آن‌ها، و استخراج و محاسبه شاخص‌های NDVI، VTCI، و WDI انجام شد.

شاخص VTCI (معادله ۱) به‌طور فیزیکی به‌صورت نسبت تفاوت دما بین پیکسل‌ها تعریف می‌شود. VTCI یک شاخص بی‌بعد است و از صفر تا یک متفاوت است. روند این شاخص در نتیجه مدل‌سازی انرژی و انتقال ماده بین جو و سطح زمین است. دامنه مقادیر شاخص VTCI بین صفر تا یک است که مقادیر پایین شاخص VTCI مبین احتمالات بالای خشک‌سالی است.

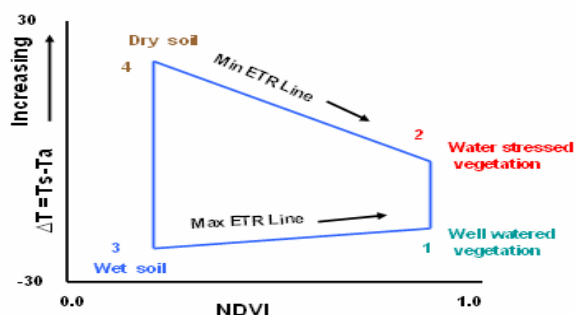
$$VTCI = \frac{LST_{NDVI_{i_{max}}} - LST_{NDVI_i}}{LST_{NDVI_{i_{max}}} - LST_{NDVI_{i_{min}}}} \quad (1)$$

$LST_{NDVI_{i_{Max}}}$  و  $LST_{NDVI_{i_{Min}}}$  به‌ترتیب محدوده‌های حداکثر و حداقل دمای سطح زمین با مقادیر NDVI یکسان در منطقه مورد مطالعه است.

$LST_{NDVI}$  دمای سطح زمین هر پیکسل با شاخص پوشش گیاهی NDVI ضرائب مربوط به معادلات بالا را می‌توان از ترسیم نمودار دمای سطح زمین در برابر شاخص NDVI به‌دست آورد. در صورتی که منطقه مورد مطالعه به اندازه کافی بزرگ باشد تا دامنه وسیعی از NDVI و شرایط رطوبتی سطح را شامل شود.

دمای سطح زمین (LST) یکی از پارامترهای کلیدی در فیزیک فرایندهای سطح زمین در مقیاس‌های منطقه‌ای و جهانی است که ترکیبی از نتایج حاصل از همه فعل و انفعالات سطح جو و شار انرژی بین هوا و زمین است (منستین، ۱۹۸۷). گسیلندگی انرژی سطح می‌تواند در تفکیک پوشش گیاهی کهنه نیز استفاده شود (فرنچ و همکاران، ۲۰۰۰). LST را همچنین می‌توان برای نظارت بر خشک‌سالی و سطح برآورد رطوبت خاک استفاده کرد (فلدهاک و همکاران، ۱۹۹۶). در مطالعه‌ای از دمای تاج Tc (با اندازه‌گیری دماسنج مادون قرمز) منهای دمای هوا Ta به‌عنوان شاخص وضعیت آب محصول استفاده شد. پژوهشگران آن را تفاوت Tc-Ta در «تنش-درجه-روز» نامیدند و این پارامتر مربوط به عملکرد و نیاز آب در محصول است (ایدسو و همکاران، ۱۹۸۱). در تحقیقی دیگر شاخص کسری آب (WDI) برای محاسبات نرخ تبخیر و تعرق به‌کار برده شد (موران و همکاران، ۱۹۹۴). معادله محاسبه شاخص کمبود آب به شرح ذیل است.

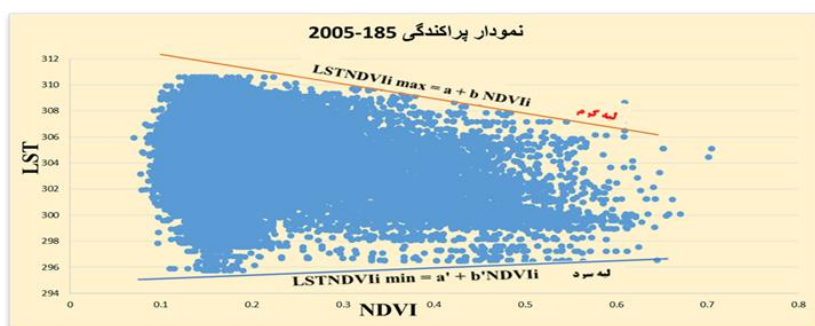
$$WDI = 1 - \frac{ET}{ET_m} \approx \frac{\Delta LST_{min} - \Delta LST}{\Delta LST_{min} - \Delta LST_{max}} \approx \frac{a \min NDVI + b \min \Delta LST}{(a \min - a \max) NDVI + (b \min + b \max)} \quad (2)$$



شکل ۲. کمبود آب (WDI)

مدل ذوزنقه (شکل ۲) تلفیقی از شاخص دورسنجی پوشش گیاهی و تفاضل داده‌های دمای سطح زمین با دمای هواست. شاخص پوشش گیاهی NDVI در لبه‌های چپ و راست ذوزنقه قرار می‌گیرد؛ به‌طوری‌که اعداد ۱ و ۳ برای بیان شرایط رطوبت خاک و آب کافی در دسترس محصول است و اعداد ۲ و ۴ در ذوزنقه برای بیان خشکی خاک و میزان شدت تبخیر بالقوه آب مصرفی و تنش محصول است (لاکوئوت و همکاران، ۲۰۰۴).

شاخص VTCI براساس یک فضای مثلثی NDVI-TS ساده‌شده استوار است (شکل ۳) که در آن «لبه سرد» (شرایط بدون استرس آبی) را یک خط در نظر می‌گیریم که کمترین دما را در محور NDVI (محور X) دارد و «لبه گرم» (شرایط عدم دسترسی به آب) را به‌عنوان یک ارتباط منفی با NDVI تفسیر می‌کنیم. اسکتر پلات دو بُعدی، NDVI و LST با استفاده از نرم‌افزار ENVI و پیرو مفهومی که از VTCI ارائه شد ساخته شده است، که در آن ایزولاین‌ها (تصاویر مجزا از هم) می‌تواند در قالب یک مثلث ترسیم شود.

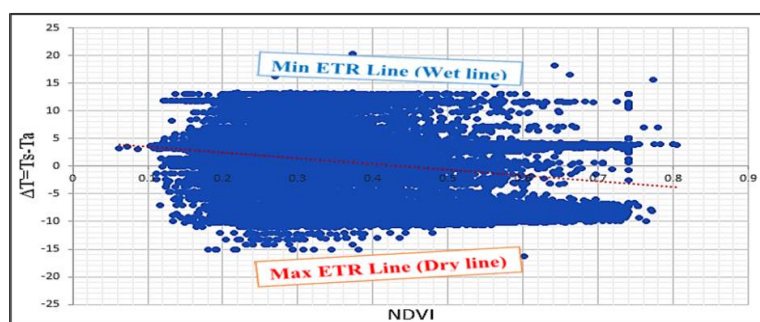


شکل ۳. فضای مثلثی شاخص VTCI

حد بالای این مثلث نشان‌دهنده  $LST_{NDVI \max}$  است؛ یعنی جایی که ذخیره آب محدود است و حد پایین آن نشان‌دهنده  $LST_{NDVI \min}$  است؛ یعنی جایی که هیچ محدودیت آبی وجود ندارد. ضرایب  $a, b, a', b'$  را می‌توان از روی نمودار پراکندگی برآورد کرد. در معادله ضرایب  $a, a'$  عرض محور مختصات است و ضرایب  $b, b'$  شیب لبه گرم و سرد است. لبه‌های خشک و مرطوب از طریق رگرسیون خطی برآورد شده‌اند. براساس فضای NDVI-TS به‌دست‌آمده، VTCI برای هر پیکسل، به غیر از پیکسل‌های مربوط به محدوده اصلی آب، با استفاده از band math در نرم‌افزار ENVI محاسبه شده است. WDI را بیشتر می‌توان تحت عنوان خط مرطوب یا ETR حداکثر برابر با  $\Delta LST_{NDVI \min}$  و خط خشک یا خط ETR حداقل برابر با  $\Delta LST_{NDVI \max}$  نشان داد. در این پژوهش از قسمت قرمز رنگ معادله برای محاسبه شاخص WDI

استفاده شد. نمودار پراکندگی این شاخص پس از تفاضل دمای سطح تصاویر ماهواره از دمای هوای محیط ایستگاه‌های سینوپتیک سیمینهرود به صورت نمونه در زیر آمده است (شکل ۴).

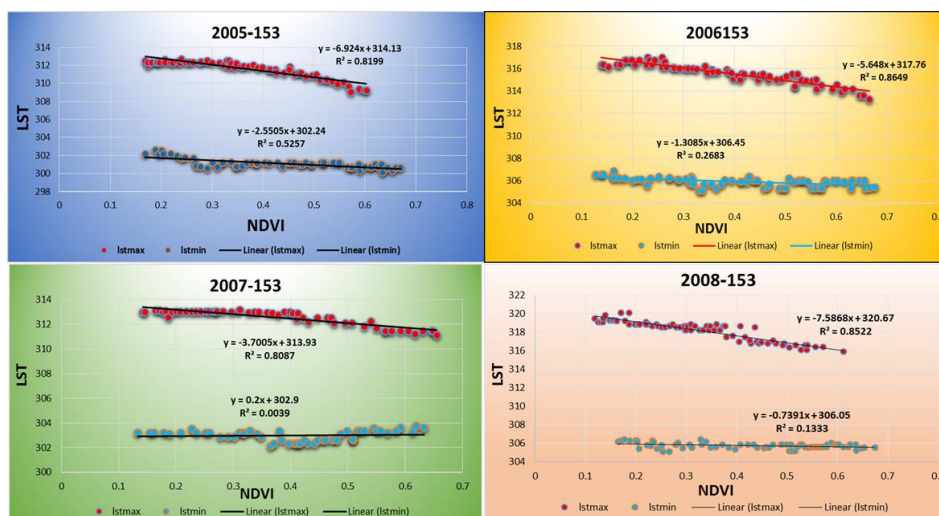
WDI با استفاده از معادله فوق و خطوط ترسیم شده مبتنی بر تفسیر فضای ساده شده  $\Delta T$ -NDVI محاسبه می‌شود که در آن «خط مرطوب یا حداکثر ETR» (شرایط بدون تنش آب) به عنوان یک خط با داشتن کمترین تفاوت دمایی در محور NDVI (محور X) و «خط خشک یا حداقل ETR» (شرایط بدون آب در دسترس) با داشتن یک همبستگی منفی با NDVI توصیف می‌شود. در این تحقیق خطوط خشک و مرطوب با روش رگرسیون خطی برآورد شدند. براساس فضای  $\Delta T$ -NDVI به دست آمده، شاخص WDI برای هر پیکسل محاسبه شده است، به جز پیکسل‌های مربوط به پهنه آب که با استفاده از band math در نرم‌افزار ENVI محاسبه شده است.



شکل ۴. پراکندگی (WDI) براساس فضای مثلثی  $\Delta T$ -NDVI

## یافته‌های پژوهش

شاخص شرایط دمایی پوشش گیاهی (VTCI) براساس رابطه فضای مثلثی NDVI-TS محاسبه شده است. نمودار دوبعدی رابطه پراکندگی بین پیکسل‌ها را نشان می‌دهد. پیکسل‌های لبه گرم و سرد به عنوان معادله خطی رگرسیون برای محاسبه VTCI با استفاده از نرم‌افزار ENVI به صورت داده‌های ریاضی استخراج شده‌اند، که در آن دمای سطح زمین (LST) و تصاویر شاخص NDVI به عنوان یک پارامتر ورودی برای معادلات VTCI استفاده شده است (شکل ۵).

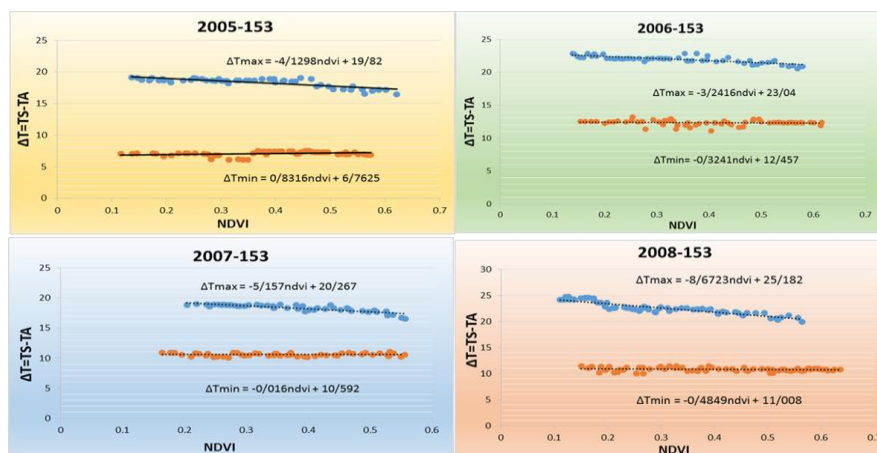


شکل ۵. لبه گرم و سرد از رابطه فضایی NDVI-TS روز ژوئیه ۱۵۳ در حوضه آبریز سیمینهرود (۲۰۰۵-۲۰۰۸)

در سراسر این سال‌ها مشاهده می‌شود که شیب برای لبه گرم منفی است و این نشان می‌دهد که تراکم پوشش گیاهی نسبت به دمای سطح زمین بیشتر بوده و دما را تعدیل کرده است؛ درحالی‌که برای لبه سرد به صورت جزئی منفی یا تغییر محسوسی ندارد. شیب لبه گرم نشان می‌دهد هنگامی که مقدار NDVI برای هر فاصله زمانی افزایش می‌یابد دمای حداکثر کاهش می‌یابد. شیب در لبه سرد نشان می‌دهد هنگامی که مقدار NDVI افزایش می‌یابد، دمای حداقل در بیشتر سال‌های مورد مطالعه اندکی کاهش می‌یابد به جز سال ۲۰۰۷ که شیب لبه سرد روند افزایشی داشته است (شکل ۵).

مقدار کمتر VTCI وضعیت تنش را مشخص می‌کند. درحالی‌که مقدار بالای آن نشان‌دهنده شرایط مطلوب در منطقه است. بازه زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۶ در منطقه مورد مطالعه مقدار VTCI بیشتری نسبت به سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۰۸ دارند؛ یعنی مقدار تنش کمتری دارند. مقدار پایین VTCI تمایل به تنش دارد و مقدار بالای آن نشان‌دهنده شرایط مطلوب است. مقدار VTCI پایین نسبت به مقدار بالاتر آن در نقشه‌های به دست آمده کمتر دیده می‌شود که کاملاً وضعیت نسبی مساعد تنش خشکی را در کل منطقه مورد مطالعه بیان می‌کند. به طور کلی، سیمینه سفلی یعنی بالادست شهرستان بوکان و تا حدودی دشت حاجی‌آباد میاندوآب مناطقی هستند که در طی سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ شرایط تنش رطوبت کمتری را نشان می‌دهند. این مناطق یعنی سیمینه رود سفلی (بین میاندوآب و بوکان) VTCI پایین‌تری نسبت به مناطق سیمینه رود وسطی (بین مهاباد و بوکان) و سیمینه رود علیا (بین بوکان و سقز) نشان می‌دهند. مناطق شمالی‌تر با مقدار بالای VTCI دارای تنش رطوبتی کمتر هستند و شرایط مطلوبی دارند. VTCI بالاتر این مناطق به دلیل داشتن امکانات آبیاری است که پوشش گیاهی تمایل به تنش رطوبت ندارد. علاوه بر این، بخش‌های زیادی از میاندوآب غربی پوشیده از باغات میوه و مزارعی است که با چاه آبیاری می‌شوند.

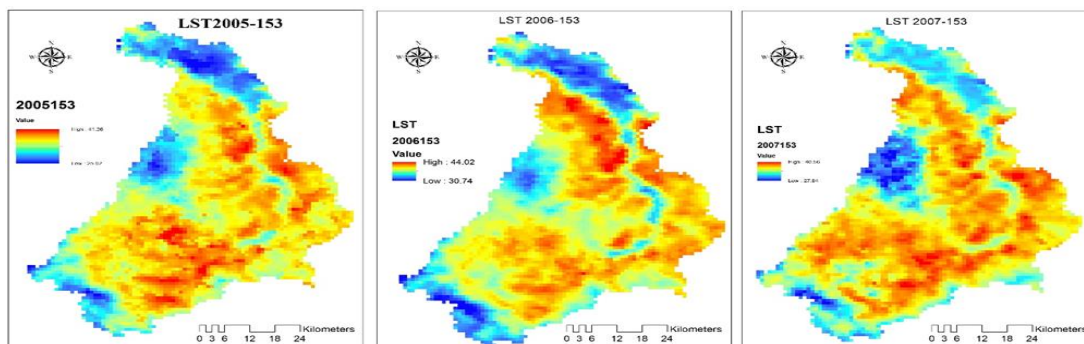
برای استخراج نتایج شاخص WDI، نخست داده‌های ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه (بوکان، مهاباد، میاندوآب، و سقز) استخراج و به روش کریجینگ درون‌یابی شد که نتایج آن بیانگر کاهش تدریجی بارش و افزایش ملموس دمای حداکثر و بالاخص دمای حداقل و فزونی میزان تبخیر و تعرق با وجود تغییرات بسیار اندک در ساعات آفتابی است و به خوبی نشان می‌دهد که در سال‌های مورد مطالعه رطوبت خاک کاهش یافته و میزان تنش پوشش گیاهی افزایش یافته است (نبی‌زاده بلخکانلو، ۱۳۹۷). اشکال و داده‌های این تحلیل در فایل پیوست مقاله آمده است. در ادامه از تفاضل تصاویر TS ماهواره و Ta درون‌یابی‌شده ایستگاه‌های سینوپتیک منطقه  $\Delta T$  به دست آمد. در ادامه نمودارهای پراکندگی خط مرطوب و خط خشک در نرم‌افزار EXCL ترسیم شد (شکل ۶).



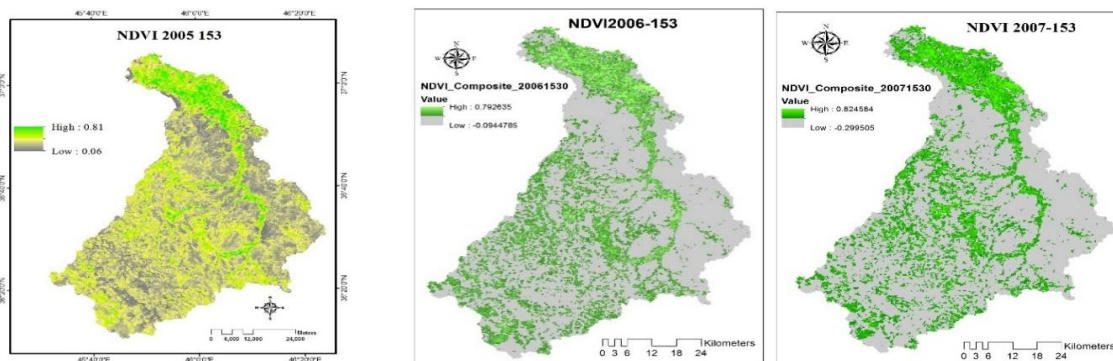
شکل ۶. لبه خشک و مرطوب از رابطه فضایی NDVI- $\Delta T$  روز ژوئیه ۱۵۳ در حوضه آبریز سیمینه‌رود (۲۰۰۵-۲۰۰۸)



شیب به‌دست‌آمده از رابطه فضایی  $\Delta\text{NDVI}$ - $\Delta\text{TS}$  برای خط خشک منفی است؛ درحالی‌که شیب به‌دست‌آمده برای خط مرطوب مثبت و در بقیه سال‌ها تغییر محسوسی نداشته است. شیب منفی نشان می‌دهد  $\Delta T$  Max با افزایش شاخص NDVI کاهش می‌یابد و شیب مثبت نشان می‌دهد که  $\Delta T$  Min با افزایش شاخص NDVI افزایش می‌یابد.



شکل ۷. تصاویر روز ژوئیه سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ دمای سطح زمین (LST) حوضه سیمینه‌رود



شکل ۸. تصاویر روز ژوئیه سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ بازتاب سطح زمین (NDVI) حوضه سیمینه‌رود

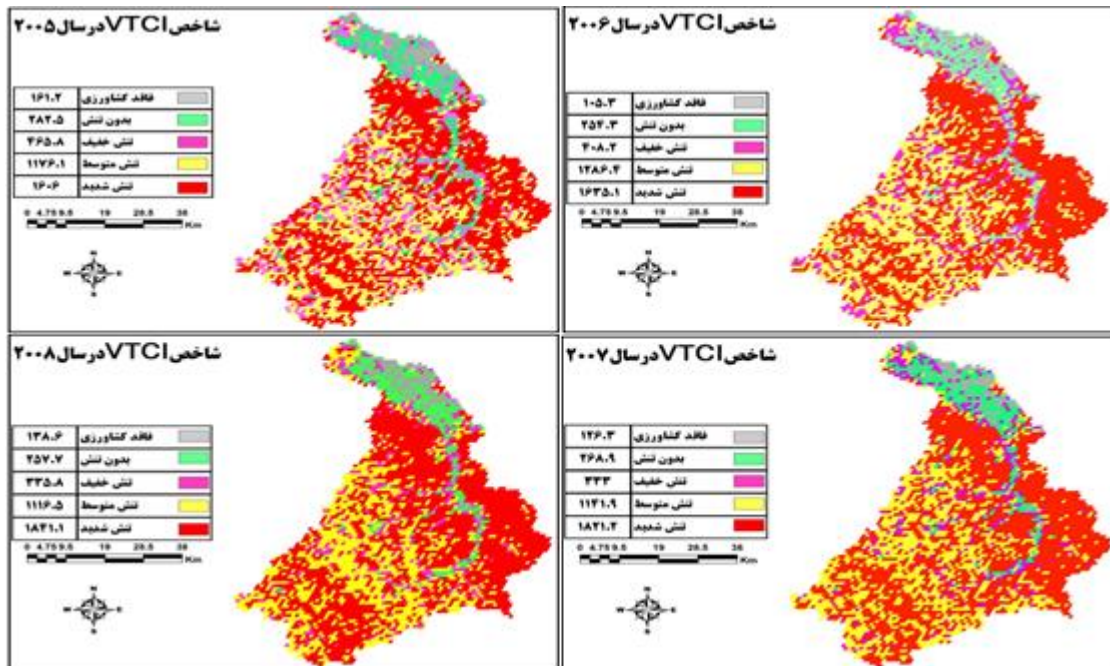
با توجه به شکل‌های ۷ و ۸، می‌توان نتیجه گرفت بین تراکم پوشش گیاهی و دمای سطح استخراج‌شده از تصاویر ماهواره‌ای رابطه عکس و همبستگی منفی وجود دارد؛ یعنی در جاهایی که پوشش گیاهی بیشتر است دمای کمتری را مشاهده می‌کنیم. بیشترین دما با مقدار  $44/02$  درجه سانتی‌گراد در سال ۲۰۰۶ و بیشترین تراکم پوشش گیاهی با مقدار  $0/82$  در سال ۲۰۰۷ مشاهده می‌شود.

مساحت زمین‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه با پوشاندن ویژگی‌های دیگر طبقه‌بندی استخراج شده است و براساس مقدار آستانه VTCI طبقات مختلف خشک‌سالی یعنی تنش کم، تنش متوسط، و تنش شدید فقط برای روزهای ژوئیه بحرانی (۱۵۳) در هر سال محاسبه شده است.

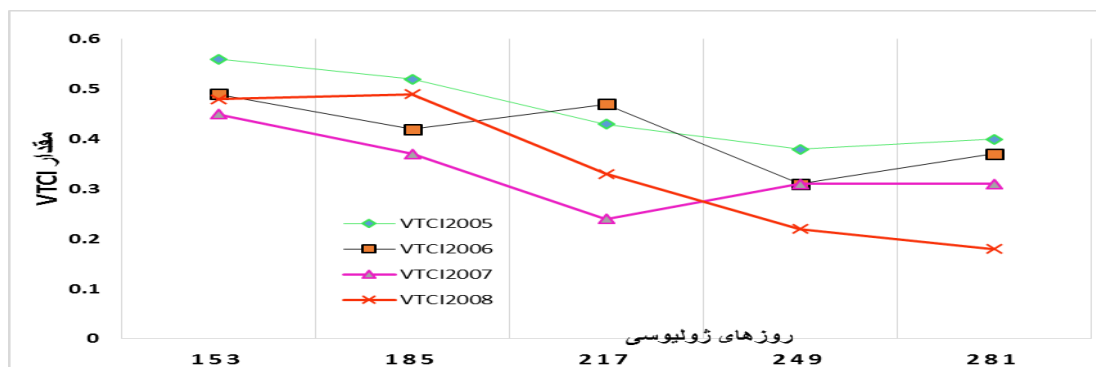
پراکنش دمای سطح در طول سال‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد بیشترین میزان مساحت تحت تنش شدید مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ به ترتیب به میزان  $182102$  و  $184101$  کیلومتر مربع است (شکل ۹ و ۱۱).

تغییرات زمانی ماه ژوئن (روز ژوئیه ۱۵۳) تا ماه اکتبر (روز ژوئیه ۲۸۱) نشان می‌دهد مقدار VTCI یعنی شرایط دمای سطح پوشش گیاهی به تدریج کاهش یافته است. دلیل آن کاهش تراکم پوشش گیاهی از ژوئن تا اکتبر است (شکل ۱۰).

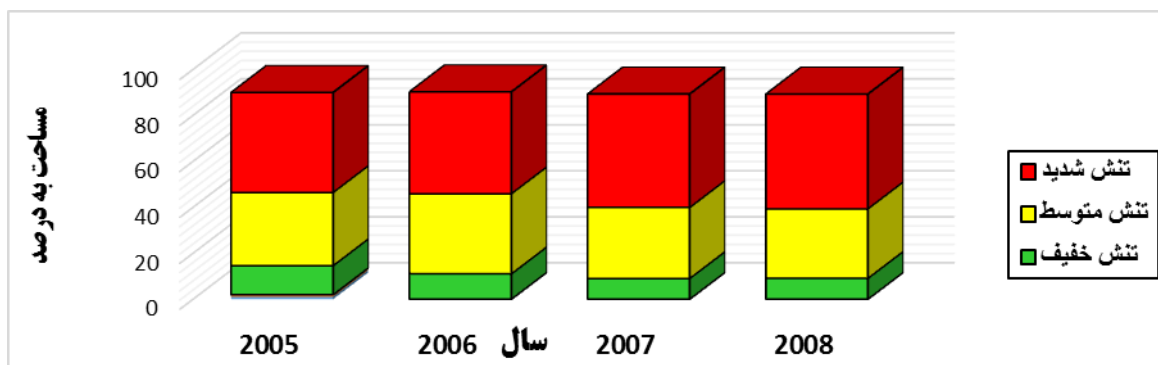




شکل ۹. پراکنش شدت خشک‌سالی در طول سال‌های ۲۰۰۵-۲۰۰۸ براساس VTCI

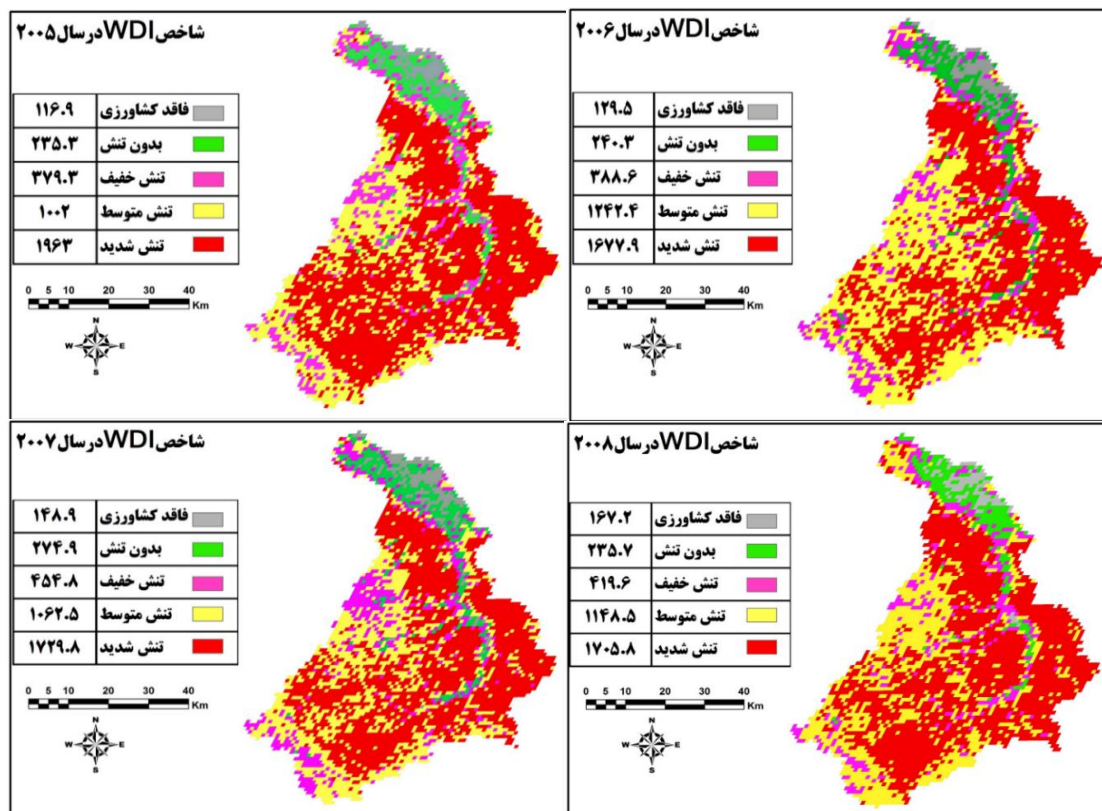


شکل ۱۰. منحنی تغییرات زمانی شاخص VTCI برای روزهای ژولیوسی (۲۰۰۵-۲۰۰۸) در حوضهٔ سیمینه‌رود



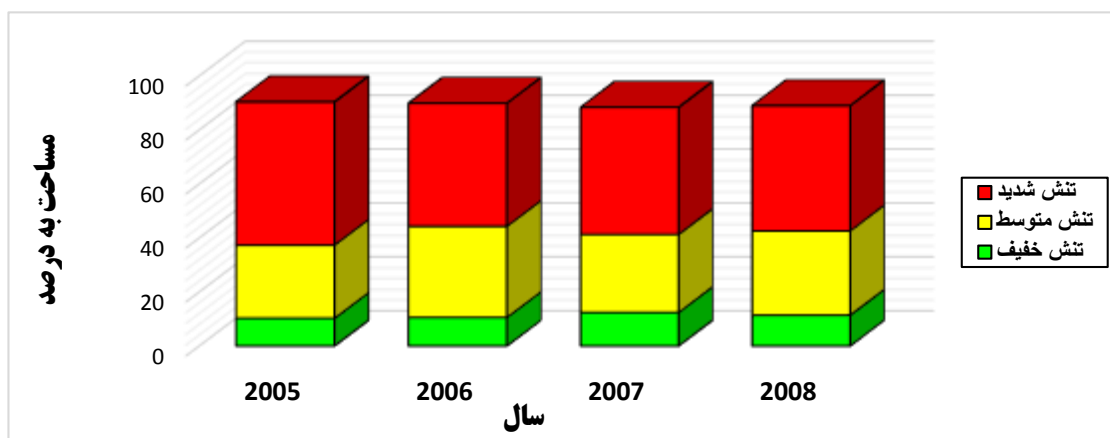
شکل ۱۱. میزان تنش خشکی کشاورزی منطقه در شرایط VTCI در روز ژولیوسی ۱۵۳ برحسب درصد

الگوی فضایی WDI نیز در حوضه آبریز سیمینه‌رود از حوضه اصلی دریاچه ارومیه برای روز ژولیوسی ۱۵۳ در طول سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ بررسی شد (شکل ۱۲). مقدار کمتر WDI نشان‌دهنده شرایط مطلوب است و درحالی‌که مقدار بالاتر VTCI نشان‌دهنده شرایط مطلوب در آن منطقه است و دامنه این شاخص درست نقطه مقابل شاخص VTCI است.



شکل ۱۲. شرایط تنش رطوبتی در سال ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸ براساس شاخص WDI در حوضه آبریز سیمینه‌رود

پراکنش شرایط رطوبتی سطح در طی سال‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد بیشترین میزان مساحت تحت تنش شدید رطوبتی مربوط به سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ به ترتیب به میزان ۱۷۲۹۰۸ و ۱۷۲۹۰۸ کیلومتر مربع است (شکل ۱۲).



شکل ۱۳. منطقه کشاورزی در شرایط تنش خشکی WDI در روز ژولیوسی ۱۵۳ برحسب درصد

با توجه به نقشه‌های به‌دست‌آمده از شاخص WDI، می‌توان مشاهده کرد در طی سال‌های ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ الگوی مکانی WDI شبیه به شاخص VTCI است. با اینکه الگوهای فضایی هر دو شاخص مشابه‌اند، شاخص WDI طبقه متمایزی از این وضعیت را ارائه می‌دهد. در کل حوضه آبریز سیمینه‌رود شرایط تنش رطوبتی در سال ۲۰۰۵ شدید ولی از سال ۲۰۰۶ تا ۲۰۰۸ به‌تدریج بیشتر شده است. در سیمینه وسطی و نیز بخشی از سیمینه علیا مقدار WDI بالاست و این نشان می‌دهد که سراسر نواحی بین بوکان و مهاباد در معرض ابتلا به تنش رطوبتی قرار دارند. مناطق شمالی بوکان شامل منطقه سیمینه سفلی و دشت حاجی‌آباد میان‌دوآب شرایط نسبتاً مطلوبی را نشان می‌دهند و در مقابل در سال ۲۰۰۸ کلیه نواحی سیمینه وسطی مانند آختاچی شرقی، غربی، و شمالی مقدار WDI بالاتری را نشان می‌دهد که شبیه به شرایط شاخص VTCI در ۲۰۰۸ است. برای مناطق جنوبی‌تر حوضه سیمینه مانند نواحی ایل‌گورک و کانی بازار مقدار WDI نسبت به سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ پایین‌تر است.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مساحت زمین‌های کشاورزی در منطقه مورد مطالعه با پوشاندن ویژگی‌های دیگر طبقه‌بندی استخراج شده است و براساس مقدار آستانه VTCI طبقات مختلف خشک‌سالی یعنی تنش کم، تنش متوسط، و تنش شدید فقط برای روزهای ژولیوسی بحرانی (۱۵۳) در هر سال محاسبه شده است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد به‌طور کلی حوضه آبریز سیمینه‌رود در طی سال‌های ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ تنش خشکی (شدت خشک‌سالی) کمتری داشته است. بیشترین تنش خشکی در سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ دیده می‌شود؛ به‌طوری‌که با احتساب تنش متوسط و شدید در بیش از ۸۰ درصد از زمین‌های کشاورزی منطقه تنش خشکی روی داده است. تغییرات زمانی (مدت خشک‌سالی) نیز در مناطق کشاورزی در معرض تنش خشکی مشاهده شده که به‌صورت نمودار میله‌ای رسم شده است.

در طی سال ۲۰۰۸ تنش خشکی از روز ژولیوسی ۱۵۳ تا ۲۸۱ جهتی افزایشی داشته است و در مقایسه با سال‌های دیگر بیشترین منطقه تحت تنش خشکی را دربر می‌گیرد. در ۲۰۰۶ خشک‌سالی منطقه تنش خشکی از روز ژولیوسی ۱۵۳ تا ۲۱۷ افزایش داشته، سپس تا روز ژولیوسی ۲۸۱ کاهش یافته است. در سال ۲۰۰۷ منطقه تنش خشکی در روز ژولیوسی ۱۵۳ نسبت به بقیه روزها یعنی ۱۸۵ تا ۲۸۱ بیشتر است و در روز ۱۵۳ سال ۲۰۰۷ بالاترین تنش خشکی نسبت به بقیه سال‌ها مشاهده می‌شود. البته، تنش خشکی منطقه در ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ از روز ژولیوسی ۱۵۳ تا ۱۸۵ کمتر بوده و سپس روند افزایشی داشته است. به‌طور کلی، مشاهده می‌شود روز ژولیوسی ۲۸۱ بیشترین درصد از منطقه تحت تنش را در همه سال‌ها نشان می‌دهد. روز ژولیوسی بحرانی ۲۱۷ نتیجه بهتری از طبقات مختلف خشک‌سالی در منطقه را به‌صورت درصدی توصیف می‌کند و نشان می‌دهد منطقه کشاورزی متأثر از خشک‌سالی در طول ۲۰۰۵ و ۲۰۰۶ کمتر بوده؛ درحالی‌که در طی سال‌های ۲۰۰۷ و ۲۰۰۸ بیشتر تحت تنش بوده است.

تجزیه و تحلیل کلی نشان می‌دهد اندازه و وسعت تنش هم براساس شاخص VTCI و همچنین شاخص WDI از شرایط مطلوب به شرایط تنش مشابه است و نشان می‌دهد که به‌طور کلی در سال‌های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۷ تنش رطوبتی در منطقه مورد مطالعه به‌تدریج بیشتر شده و در سال ۲۰۰۸ شرایط تنش به اوج رسیده است.

توصیه‌های زیر برای ارتقای روش‌شناسی در این مطالعه به‌عنوان ابزار مؤثر پایش خشک‌سالی به شرح زیر پیشنهاد

می‌شود:

۱. رویکرد ماهواره اطلاعات فضایی بالایی از تنش خشکی به‌ویژه در پایش خشک‌سالی کشاورزی ارائه می‌دهد. در شناسایی مقدار آستانه شاخص VTCI و WDI نیاز به تحقیق بیشتر در رابطه با کشاورزی دیم و زراعت آبی برای پایش خشک‌سالی کشاورزی است. برای تحقیق بیشتر، نیاز به مطالعه دقیق در بخش کشاورزی دیم و آبی به‌طور جداگانه با رویکردهای اعتبارسنجی مناسب است.
۲. با توجه به فقدان دستگاه‌های رطوبت‌سنج عمق خاک در مناطق دیم کشور، مطالعه رطوبت لایه پایینی خاک‌ها فعالیت‌های پژوهشی با مانع مواجه می‌شود. تصاویر ماهواره هم محدودیت‌هایی دارند. بنابراین، در پژوهش‌های آینده برای حصول نتیجه‌ای بهتر در مناطق دیم نیاز به رفع این مشکل است.
۳. ابرها در تصاویر ماهواره‌ای در شفافیت نتیجه تأثیر منفی می‌گذارند. بنابراین، پیش از هر گونه تحقیق باید دقیقاً شناسایی شوند. موانع ابری در تصاویر ترکیبی شانزده‌روزه ST و NDVI به کاهش دقت و صحت نتایج برای پایش خشک‌سالی منجر می‌شوند. مهم است که استادان ارجمند و پژوهشگران گرامی بدانند مشاهدات ماهواره‌ای آذربایجان غربی در نیمه اول فصل بهار به‌ویژه ماه‌های فروردین و اردیبهشت نامناسب است و با موانع ابری مواجه است. بنابراین، برای رصد مراحل رشد پوشش گیاهی دامنه ماهواره‌ای زیادی برای غلبه بر این مشکل لازم است.

## منابع

- پرویز، لاله، خیاط خلقی، مجید، ولی‌زاده، خلیل، عراقی‌نژاد، شهاب و ایران‌نژاد، پرویز (۱۳۹۰). بررسی کارایی شاخص‌های منتج از فناوری سنجش از دور در ارزیابی خشک‌سالی هواشناسی؛ مطالعه موردی: حوضه آبریز سفیدرود، جغرافیا و توسعه، شماره ۲۲، ۱۶۴-۱۴۷.
- شریفان، حسین و رحیمی، لیلا (۱۳۹۲). پایش خشک‌سالی بر اساس نمایه SPI، دهک‌ها و نرمال، اولین همایش ملی چالش‌های منابع آب و کشاورزی، انجمن آبیاری و زهکشی ایران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خوراسگان، اصفهان، ۱۷ بهمن، ۲.
- علوی‌پناه، سیدکاظم، ۱۳۸۲، کاربرد سنجش از دور در علوم زمین، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.
- فشایی، محمد، ثنائی‌نژاد، سیدحسین و داوری، کامران (۱۳۹۴). تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (مطالعه موردی: محدوده دشت مشهد)، آب و خاک، ۳۹(۶): ۱۷۳۵-۱۷۴۸.
- مفاخری، امید، خالدی، شهریار، شمسی‌پور، علی‌اکبر، فلاحی خوشجی، مصطفی و کرمانی، آذر (۱۳۹۵). تحلیل خشک‌سالی با استفاده از شاخص NDVI در دشت قروه و دهگلان، نشریه تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی دانشگاه خوارزمی، ۷۷-۷۹.
- نبی‌زاده بلخکانلو، عادل (۱۳۹۷). تجزیه و تحلیل اثرات شدت و مدت خشک‌سالی کشاورزی بر عملکرد محصول با استفاده از تصاویر ماهواره MODIS و داده‌های هواشناسی در حوضه آبریز سیمینه‌رود، پایان‌نامه دکتری، دانشگاه خوارزمی تهران.
- Bhuiyan, C.; Singh, R.P. and Kogan, F.N. (2006). Monitoring Drought Dynamics in the Aravalli Region (India) Using Different Indices Based on Ground and Remote Sensing Data, *International Journal of Applied Earth Observation and Geo information*, 8: 289-302.
- Carlson, T. N.; Gillis, R. R. and Perry, E. M. (1994). A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9(1-2): 161-173.
- Carlson, T.N.; Gillis, R.R. and Perry, E.M. (1994). A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer soil water content and fractional vegetation cover. *Remote Sensing Reviews*, 9: 16-173.
- Cunha, A. P. M.; Alvala, R. C.; Nobre, C. A. and Carvalho, M. A. (2015). Monitoring vegetative drought dynamics in the Brazilian semiarid region. *Agricultural and Forest Meteorology*, 4: 494-505.
- Fashaei, M.; Sanaei Nejad, S. H. and Davari, K. (2015). Estimation of Soil Moisture Using Modis Sensor Imagery (Case Study: Area of Mashhad Plain). *Water and soil*, 29(6): 1735-1748.
- Feldhake, C.M.; Glenn, D. M. and Peterson, D. L. (1996). Pasture soil surface temperature response to drought. *Agronomy Journal*, 88(4): 652-656.
- French, A.N; Schmutge, T. J. and Kustas, W. P. (2000). Discrimination of senescent vegetation using thermal emissivity contrast. *Remote Sensing of Environment*, 74(2): 249-254.
- Han, L.; Wang, P.; Yang, H.; Liu, S. and Wang, J. (2006). Study on NDVI-T s space by combining LAI and evapotranspiration. *Science in China Series D*, 49(7): 747-754.
- Idso, S.B.; Jackson, R.D.; Pinter, P.J. and Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress degree day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24: 44-indices. *Remote Sensing of Environment*, 90(1): 53-62.
- Keshavarz, M. R.; Vazifedoust, M. and Alizadeh, A. (2014). Drought monitoring using a soil wetness deficit index (SWDI) derived from MODIS satellite data. *Agricultural water management*, 132: 37-45

- Khaledi, Sh.; Mafakhri, O. and Shamsipour. A. A. (2016). Drought analysis using the NDVI index in Qorveh and Dehgolan plain. *Journal of Applied Geosciences Research*, Kharazmi University No.77-79.
- Kogan, F. N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, 15(11): 91-100.
- Kogan, F.N. (1990). Remote sensing of weather impacts on vegetation in non-homogeneous areas. *International Journal of Remote Sensing*, 11: 1405-1419.
- Luquet, D.; Vidal, A.; Dauzat, J.; Begue, A.; Olioso, A. and Clouvel, P. (2004). Using directional TIR measurements and 3D simulations to assess the limitations and opportunities of water stress.
- Mannstein, H. (1987). Surface energy budget, surface temperature and thermal inertia. In R. A. Vaughan, & D. Reidel (Eds.), *Remote Sensing Applications in Meteorology and Climatology*. NATO Advanced Study Institutes Series. Series C, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 201.
- Moran, M. S.; Clarke, T. R.; Inoue, Y. and Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49(3): 246-263.
- Nemani, R.; Pierce, L. and Running, S. (1992). Developing satellite-derived estimates of surface moisture status. *Journal of Applied Meteorology*, 32: 548-557.
- Parida, R.B. (2006). Analysing the effect of severity and duration of Agricultural drought on crop performance using Terra/MODIS Satellite data and Meteorological data. Master Thesis. 9-22.
- Parviz, L.; Khayyat khalghi, M.; Araghinezhad, Sh. and Irannezhad, P. (2011). Performance Evaluation of the Indicators of Remote Sensing Technology in Meteorological Drought Assessment; Case study: Basin of the Sefid river. 147-164.
- Sandholt, I.; Rasmussen K. and Andersen J. (2002). A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status, *Remote Sens. Environ.*, 79(2): 213-224.
- Sohrabinia, M. (2012). Geostatistical analysis of surface temperature and in-situ soil moisture using LST time-series from modis, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XXXIX-B7, 2012, XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- Tang, H. and Li, Z. L. (2013). *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared: Theory and Applications*. Springer Science & Business Media.
- Tian, J., Liu, J., Wang, J., Li, C., Niew, H., and Yua, F. (2016). Trend analysis of temperature and precipitation extremes in major grain producing area of China. *Int. J. Climatol.* 37(2), 672-687.
- 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. *International Journal of Remote Sensing*, 25(1): 61-72.
- Wan, Z.; Zhang, Y.; Zhang, Q. and Li, Z. (2002). Validation of the land -surface temperature products retrieved from Terra Moderate Resolution Imaging Spectrometer data. *Remote sensing of Environment*, 83: 163-180.
- Wang, P. X.; Li, X. W.; Gong, J. Y. and Song, C. (2001). Vegetation temperature condition index and its application for drought monitoring. *Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International, 1: 141-143. IEEE