

پایش رطوبت خاک در مراحل رشد گندم دیم به کمک نمایه‌های هواشناسی و سنجش از دور

احمد صمدی^۱، سعید بازگیر^{۲*}، فرامرز خوش اخلاق^۲

۱- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران، تهران، ایران

(علمی - پژوهشی)

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۳/۱۶ تأیید نهایی مقاله: ۱۴۰۰/۱/۱۴

چکیده

در ایران به دلیل کمبود داده‌های رطوبت اعماق خاک با توزیع مکانی مناسب، تحقیقات مرتبط با خشکسالی کشاورزی و پایش رطوبت خاک نسبت به خشکسالی از نوع هواشناسی و آب‌شناسی کمتر انجام شده است. هدف اصلی از تحقیق حاضر پایش رطوبت خاک در اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری به کمک داده‌های زمینی و سنجش از دور در مراحل رشد گندم دیم (جوانه‌زنی تا ۴ برگی، ساقه‌دهی و شکم پر تا رسیدگی کامل) در شهرستان نیشابور بوده است. اثر نوسانات رطوبت خاک روی عملکرد گندم دیم در مراحل رشد نیز مورد بررسی قرار گرفته است. به همین منظور تاریخ‌های دیدبانی شده مراحل رشد گندم دیم در ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور طی سال‌های زراعی ۱۳۸۹-۱۳۹۰ تا ۱۳۹۳-۱۳۹۲ و متغیرهای هواشناسی به همراه نمایه‌های SPI، SPEI، NDVI، VCI و TCI مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان دادند که تنها رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک با نمایه‌های $NDVI_{max}$ ($r=0.595$) و SPEI ($r=0.780$) ارتباط معنی‌دار داشته است. براساس نتایج به دست آمده، ۳۵ و ۶۱ درصد تغییرات رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک به ترتیب به کمک $NDVI_{max}$ و SPEI قابل توجیه بوده است. در خصوص تغییرات عملکرد گندم دیم با رطوبت اعماق خاک هر چند روابط معنی‌داری حاصل نشد، اما نتایج بیانگر اهمیت بارش‌های فروردین ماه در نوسانات رطوبت خاک و متعاقب آن عملکرد گندم دیم در نیشابور می‌باشد. در پایان می‌توان نمایه‌های $NDVI_{max}$ و SPEI را به دلیل ماهیت ذاتی مؤلفه‌های دخیل در محاسبه آن‌ها، به عنوان سنجه‌های پایش رطوبت خاک معرفی نمود.

واژه‌های کلیدی: رطوبت خاک، خشکسالی کشاورزی، گندم دیم، نیشابور.

مقدمه

تغییر اقلیم به شدت بر تغییر الگوهای بارشی تأثیر گذاشته و منجر به رخداد‌های شدید آب و هوایی از جمله خشکسالی شده است. برای نمونه می‌توان به خشکسالی‌های سال‌های اخیر در ایران اشاره داشت که شدت و فراوانی رخداد آن‌ها رو به افزایش بوده و خسارت زیادی به بخش‌های مختلف در صنعت، کشاورزی و محیط‌های اکولوژیک داشته است (Bazrafshan et al, 2014؛ زارع ابیانه و همکاران، ۱۳۹۴). درک بهتر خشکسالی و سایر پدیده‌های زیان‌بخش جوی به منظور کاهش خسارت ناشی از آن‌ها اهمیت فراوانی دارد (Ebi and Bowen, 2016). از اثرات ناشی از خشکسالی می‌توان به کاهش ذخایر آبی و تولیدات کشاورزی و متعاقب آن به قحطی، بیماری و مرگ و میر اشاره نمود (Destouni and Verrot, 2014). در خصوص پایش خشکسالی می‌توان به تحقیقات دوتا و همکاران (Dutta et al, 2016) اشاره نمود که به بررسی رابطه نمایه نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی^۱، نمایه وضعیت رویشی^۲ و نمایه استاندارد شده بارش^۳ با عملکرد محصول پرداختند. آن‌ها نشان دادند که از بین نمایه‌های مذکور، VCI بیشترین همبستگی را با عملکرد محصول داشته است ($r=0.75$). در تحقیق دیگری رابطه بین شاخص بارش-تبخیر و تعرق استاندارد شده^۴ با رطوبت خاک و عملکرد گندم در ماه‌های فوریه، مارس، آوریل، ژوئن و نوامبر در مولدوای مورد بررسی قرار گرفت (Potopova et al, 2016). از نتایج این تحقیق می‌توان به تأثیر-گذاری رخداد خشکسالی در دوره گلدهی و کاهش ۶۲ درصدی عملکرد گندم دیم اشاره نمود. در خصوص پایش خشکسالی کشاورزی می‌توان به مطالعه‌ای در جنوب آمریکای مرکزی به کمک نمایه تجربی رطوبت خاک استاندارد شده برای برآورد تغییرات رطوبت خاک اشاره کرد (Carrao et al, 2016).

ایشان همبستگی بین این شاخص با عملکرد گندم، سویا و ذرت را مورد بررسی قرار داده و به این نتیجه رسیدند که از این نمایه می‌توان برای پایش خشکسالی کشاورزی استفاده نمود. در این مطالعه ضریب همبستگی این شاخص با عملکرد گندم، سویا و ذرت معنی‌دار بود ($r=0.82$). در داخل کشور، مساعدی و همکاران (مساعدی و همکاران، ۱۳۹۴) به بررسی اثر خشکسالی روی تولید محصولات گندم و جو در مشهد، بیرجند و بجنورد پرداخته و به این نتیجه رسیدند که بارندگی در ماه‌های آغازین دوره رشد (آبان تا آذر)، بارندگی ماه‌های پایانی رشد و همچنین دوره ۵ ماهه منتهی به فروردین بیشترین تأثیر را روی عملکرد محصولات مذکور داشته‌اند. ایشان در این تحقیق دریافتند که علاوه بر مقدار و توزیع زمانی بارش، میانگین دما در بجنورد و مشهد و تبخیر و تعرق و میانگین دما در بیرجند روی عملکرد تأثیرگذار بوده‌اند. با توجه به کمبود داده‌های اندازه‌گیری رطوبت اعماق خاک، بسیاری از تحقیقات انجام شده برای پایش خشکسالی کشاورزی در ایران به کمک داده‌های سنجش از دور انجام شده است (یاقوتی و همکاران، ۱۳۹۷). در خصوص پایش خشکسالی به کمک داده‌های سنجش از دور می‌توان به تحقیقات رضایی‌مقدم و همکاران (Rezai moghaddam et al, 2015) اشاره نمود. ایشان به بررسی کارایی داده‌های سنجنده MODIS در کنار داده‌های ماهانه بارش طی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۱ در حوضه آبریز دریاچه ارومیه پرداختند. در این تحقیق ضرایب همبستگی SPI با نمایه‌های رویشی VCI و نمایه شرایط دمایی^۵ به ترتیب ۰/۷ (معنی‌دار با خطای ۵ درصد) و ۰/۲۵ بدست آمد. آن‌ها به این جمع‌بندی رسیدند که در پایش خشکسالی، نمایه VCI می‌تواند جایگزین مناسب و قابل اعتمادی برای شاخص‌های هواشناسی باشد. در

تغییرات رطوبت لایه سطحی خاک (به خصوص عمق ۵ سانتی‌متری) ارتباط دارند (فشائی و همکاران، ۱۳۹۴). با این رویکرد، هدف اصلی تحقیق حاضر پایش رطوبت اعماق خاک در مراحل رشد گندم دیم به کمک داده‌های زمینی و سنجش از دور بوده است. همچنین، تاثیر نوسانات رطوبت خاک روی عملکرد گندم دیم در شهرستان نیشابور مورد بررسی قرار گرفته است.

منطقه مورد مطالعه

شهرستان نیشابور از جنوب به شهرستان‌های تربت‌حیدریه و کاشمر، از غرب به سبزوار، از شمال به فاروج و قوچان و از شرق به مشهد و چناران متصل است. موقعیت جغرافیایی آن از ۵۷ درجه و ۴۰ دقیقه تا ۵۹ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی و ۳۵ درجه و ۳۰ دقیقه تا ۳۶ درجه و ۶۰ دقیقه شمالی می‌باشد (شکل ۱).

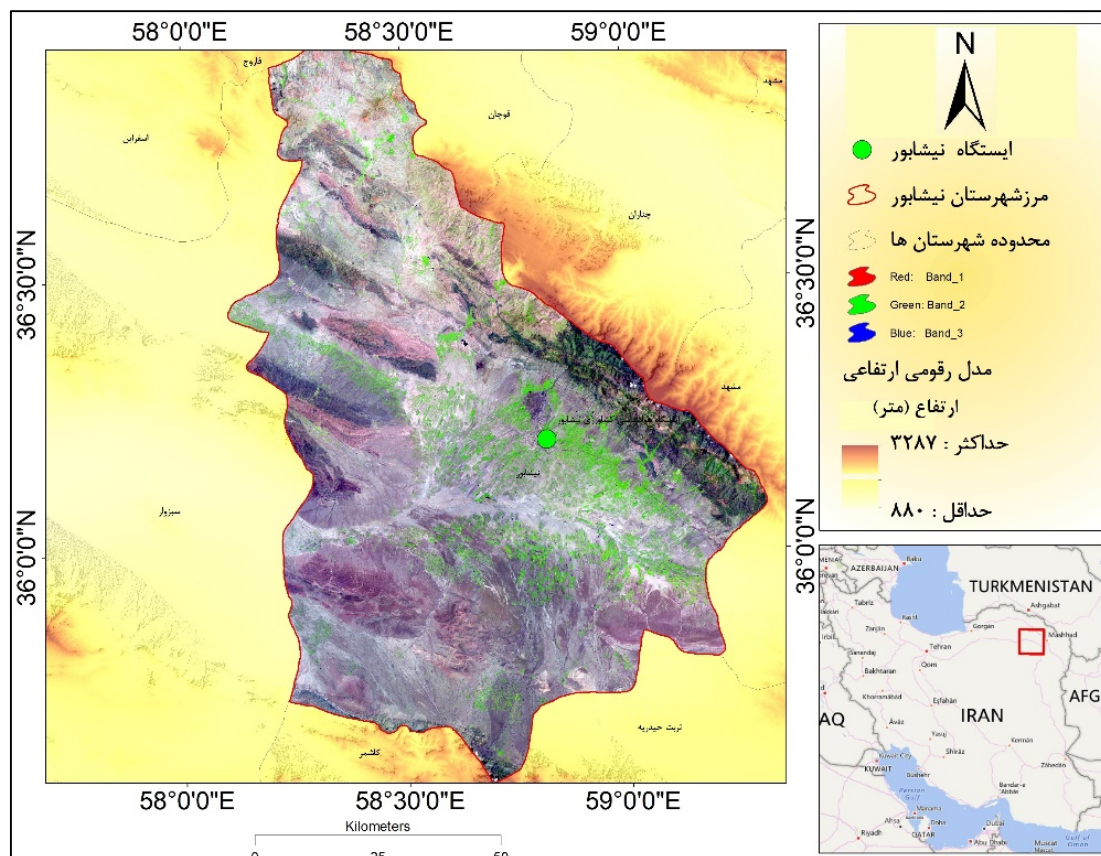
مواد و روش‌ها

داده‌ها

الف) کشاورزی (گندم دیم)

داده‌های مربوط به تاریخ‌های شروع و خاتمه مراحل رشد گندم دیم رقم سرداری و اندازه‌گیری‌های بیومتری و عملکرد محصول از ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور جمع‌آوری گردید (جداول ۱ و ۲). براساس این جداول تاریخ کشت گندم دیم در اوایل آبان و برداشت آن در اوایل تیر ماه می‌باشد (ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور، ۱۳۹۴).

تحقیق دیگری نیازی و همکاران (Niazi et al, 2018) به کمک داده‌های TRMM و MODIS یک شاخص ترکیبی شامل کمبود در مقدار بارش، تداوم بارندگی‌های کمتر از متوسط طولانی مدت، دمای بیش از حد نرمال و خصوصیات رطوبت خاک معرفی نمودند. در این تحقیق یک همبستگی معنی دار ($r=0.61$) بین شاخص خشکسالی مذکور و رطوبت خاک به دست آمد. در ایران به دلیل کمبود داده رطوبت اعماق خاک، تحقیقات مرتبط با خشکسالی کشاورزی نسبت به پایش خشکسالی از نوع هواشناسی و آب‌شناسی کمتر انجام شده است (چراغعلی زاده و همکاران، ۱۳۹۴؛ جلالی، ۱۳۹۲). با این وجود محققینی بوده‌اند که مطالعاتی در پایش رطوبت خاک و ارتباط آن با عملکرد محصول در کشت دیم داشته‌اند. برای نمونه در مطالعه‌ای همبستگی داده‌های رطوبت خاک با شاخص‌های ترکیبی (داده‌های زمینی (بارش و دما) و سنجش از دور) مورد بررسی قرار گرفت (نیازی و همکاران، ۱۳۹۵). در این تحقیق نشان داده شد که همبستگی معنی‌دار ($r=0.78$) بین رطوبت اعماق خاک و شاخص‌های ترکیبی وجود دارد. با توجه به تحقیقات انجام شده دیده می‌شود که تغییرات رطوبت اعماق خاک تحت تاثیر عوامل اقلیمی مانند دما، بارش و رطوبت نسبی (بابازاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷) بوده و می‌توان نمایه‌هایی که از این متغیرها مشتق می‌شوند را برای برآورد مذکور به کار برد. به علاوه مطالعات نشان می‌دهند که شاخص‌های گیاهی به دست آمده از داده‌های سنجش از دور نیز با



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه و ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی شهرستان نیشابور

جدول ۱: تاریخ‌های فصل رشد گندم دیم رقم سرداری به همراه عملکرد محصول طی سال‌های ۹۳-۸۹*

سال زراعی	تاریخ شروع	تاریخ پایان	جمع (روز)	عملکرد گندم دیم (کیلوگرم/هکتار)
۹۰-۸۹	۱۸ آبان	۴ تیر	۲۲۸	۱۶۷۵
۹۱-۹۰	۱۷ آبان	۱۸ تیر	۲۴۳	۳۸۴۵
۹۲-۹۱	۸ آبان	۹ تیر	۲۴۴	۳۶۵۸
۹۳-۹۲	۲ آبان	۱ تیر	۲۴۰	۲۸۳۶

* منبع: ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور

تحلیل‌ها نیز استفاده گردید. به منظور لحاظ نمودن توزیع زمانی بارش، علاوه بر مجموع بارش هفتگی، تعداد روزهای بارانی بیش از ۰/۱، بیش از ۱ و بیش از ۵ میلی‌متر نیز در بررسی‌های آماری مورد استفاده قرار گرفتند. نمایه‌های پایش خشکسالی، SPI و SPEI نیز مورد تحلیل قرار گرفته که در خصوص مراحل محاسبه آن‌ها به منظور رعایت ایجاز، خوانندگان محترم می‌توانند به ترتیب به منابع ۱۷، ۲۳، ۲۶ و ۲۹ مراجعه نمایند. لازم به ذکر

(ب) داده‌ها و شاخص‌های هواشناسی و رطوبت اعماق خاک

از داده‌های هواشناسی شامل بارش، دمای هوا، رطوبت نسبی، ساعات آفتابی و سرعت باد دیدبانی شده در ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور استفاده شد. همچنین از داده‌های درصد وزنی رطوبت خاک اندازه‌گیری شده اعماق ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری در مقیاس هفتگی طی سال‌های زراعی ۹۰-۱۳۸۹ تا ۹۳-۱۳۹۲ در

ترموگراویمتریک^۶ رطوبت وزنی محاسبه و سپس میانگین رطوبت وزنی این چهار نقطه به عنوان عدد مبنا در نظر گرفته می شود.

است که در ایستگاه‌های تحقیقات هواشناسی کشاورزی برای اندازه‌گیری هفتگی رطوبت وزنی اعماق خاک، در چهار نقطه از مزرعه نمونه‌های خاک برداشت و به آزمایشگاه منتقل شده و به روش

جدول ۲: تاریخ‌های شروع و خاتمه و طول (روز) مراحل رشد گندم دیم در ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور*

سال	جوانه زنی	دوب رگی	چهار برگی	آغاز پنجه زنی	پنجه زنی کامل	ساقه - دهی	شکم پر دهی	خوشه دهی	گل‌دهی	شیری شدن	رسیدگی کامل
۹۰-۸۹ 2000-01	شروع آبان	۱۸	۷	۱۸	۵	۱۱	۱۹	۳۱	۶	۲۵	۲۷
	پایان	۶	۱۷	۴	۱۰	۱۸	۳۰	۵	۱۶	۲۶	۴
	طول دوره	۱۹	۳۴	۸۱	۶	۸	۱۲	۶	۱۱	۳۴	۹
۹۱-۹۰ 2001-02	شروع آبان	۱۷	۷	۱۳	۸	۱۳	۲۱	۴	۱۱	۱	۸
	پایان	۶	۱۲	۷	۱۲	۲۰	۳	۱۰	۲۴	۷	۱۸
	طول دوره	۲۰	۳۷	۸۳	۵	۸	۱۳	۷	۱۴	۳۸	۱۱
۹۲-۹۱ 2002-03	شروع آبان	۸	۲۹	۵	۲۹	۶	۱۴	۲۷	۴	۲۶	۳۱
	پایان	۲۸	۴	۲۸	۵	۱۳	۲۶	۳	۱۶	۳۰	۹
	طول دوره	۲۱	۳۶	۸۴	۶	۸	۱۳	۸	۱۳	۳۶	۱۰
۹۳-۹۲ 2003-04	شروع آبان	۲	۲۳	۲۷	۲۰	۲۸	۷	۲۱	۲۸	۲۰	۲۰
	پایان	۲۲	۲۶	۱۹	۲۷	۶	۲۷	۲۷	۱۱	۲۴	۱
	طول دوره	۱۸	۳۳	۸۳	۷	۹	۱۴	۷	۱۴	۳۵	۱۲

* ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور

مراحل جوانه‌زنی تا چهار برگی)، میانی (شامل پنجه زنی تا ساقه‌دهی) و پایانی (شامل شکم‌پر تا رسیدگی کامل) رشد آمده است. از این داده‌ها در بررسی رابطه رطوبت اعماق خاک با شاخص‌های رویشی استفاده شده است (حیدری و دیگران، ۱۳۹۴؛ عرفانیان و دیگران، ۱۳۹۳؛ Sruthi and Aslam, 2015).

ج) داده‌های سنجش از دور با توجه به کاربرد بودن سنجنده‌های TM، ETM⁺ و OLI، برای پایش خشکسالی، شاخص‌های NDVI (Tran et al, 2017; AghaKouchak et al, 2015) VCI (Kogan, 1995) و TCI (Du et al, 2018). مرادی زاده و همکاران، ۱۳۹۶؛ رضایی مقدم و همکاران، ۱۳۹۱) استفاده شده است. در جدول ۳ اطلاعات تصاویر ماهواره لندست و تاریخ-های برداشت تصاویر برای مراحل ابتدایی (مجموع

جدول ۳: تاریخ و مشخصات داده‌های سنجنش از دور (Path/Row: 160/035)

مرحله رشد	سال	۸۹ - ۹۰	۹۰ - ۹۱	۹۱ - ۹۲	۹۲ - ۹۳
ابتدایی (جوانه‌زنی تا چهار برگی)	تاریخ	۸۹/۱۰/۶	۹۰/۱۰/۲۴	۹۱/۱۰/۲۸	۹۲/۱۰/۲۰
	ماهواره	Landsat07	Landsat07	Landsat07	Landsat08
	سنجنده	ETM+	ETM+	ETM+	OLI
	باند مورد استفاده	3,4,6	3,4,6	3,4,6	2,3,10,11
میانی (پنجه‌زنی تا ساقه‌دهی)	تاریخ	۹۰/۱/۲۷	۹۱/۱/۲۷	۹۲/۱/۲۴	۹۳/۱/۲۷
	ماهواره	Landsat07	Landsat07	Landsat08	Landsat08
	سنجنده	ETM+	ETM+	OLI	OLI
	باند مورد استفاده	3,4,6	3,4,6	2,3,10,11	2,3,10,11
پایانی (شکم پر تا رسیدگی کامل)	تاریخ	۹۰/۲/۲۹	۹۱/۲/۳۱	۹۲/۲/۲۵	۹۳/۲/۲۸
	ماهواره	Landsat05	Landsat07	Landsat08	Landsat08
	سنجنده	TM	ETM+	OLI	OLI
	باند مورد استفاده	3,4,6	3,4,6	2,3,10,11	2,3,10,11

بحث و نتایج

ارتباط شاخص‌های گیاهی و هواشناسی با رطوبت اعماق خاک

قبل از بررسی نتایج به دست آمده، ذکر این نکته ضروری است که آزمون ناپارامتری کلموگروف-اسمیرنوف یک نمونه‌ای^۷ برای نرمال بودن داده‌ها انجام و به غیر از متغیر جمع بارش فروردین و اردیبهشت، سایر متغیرها دارای داده‌هایی با توزیع نرمال بودند ($\text{Sig.} > 0.05$). شاخص‌های گیاهی و

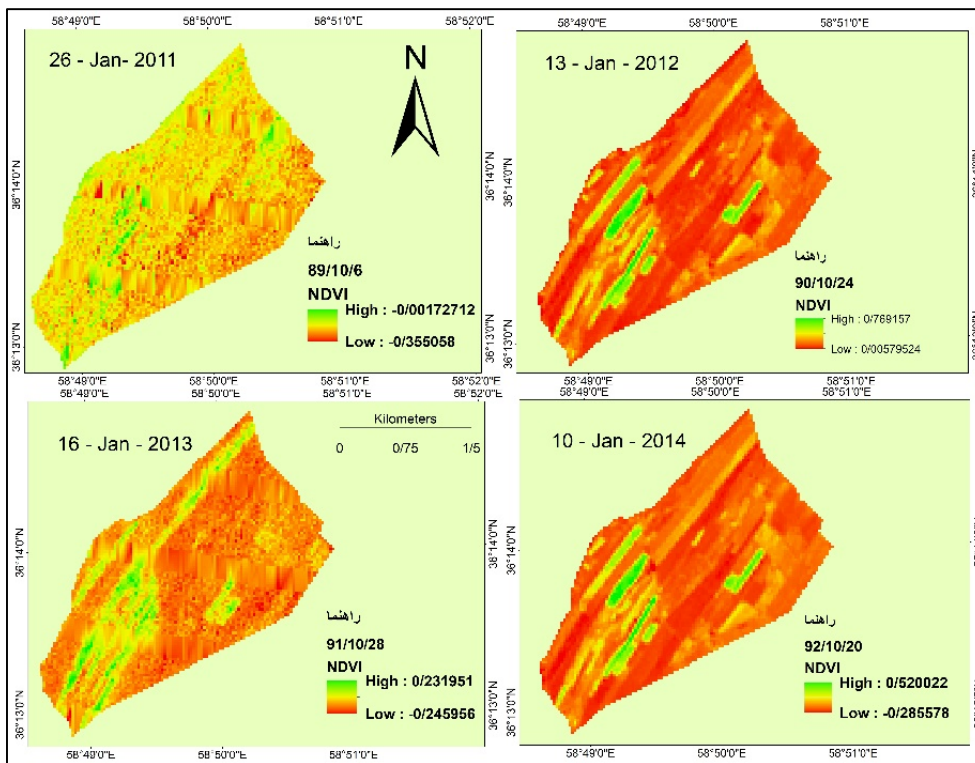
حرارتی مورد مطالعه برای ماه‌های متناظر با مراحل سه گانه رشد گندم دیم محاسبه و مقادیر عددی هر یک از آن‌ها در جدول ۴ آمده است. با محاسبه مقادیر ^1BT و NDVI و همچنین TCI و VCI که به ترتیب از آن‌ها مشتق شده‌اند، امکان مقایسه این شاخص‌ها با مقادیر شاخص‌های خشکسالی هواشناسی و رطوبت اعماق خاک حاصل شد (جدول ۴).

جدول ۴: مقادیر نمایه‌های رویشی

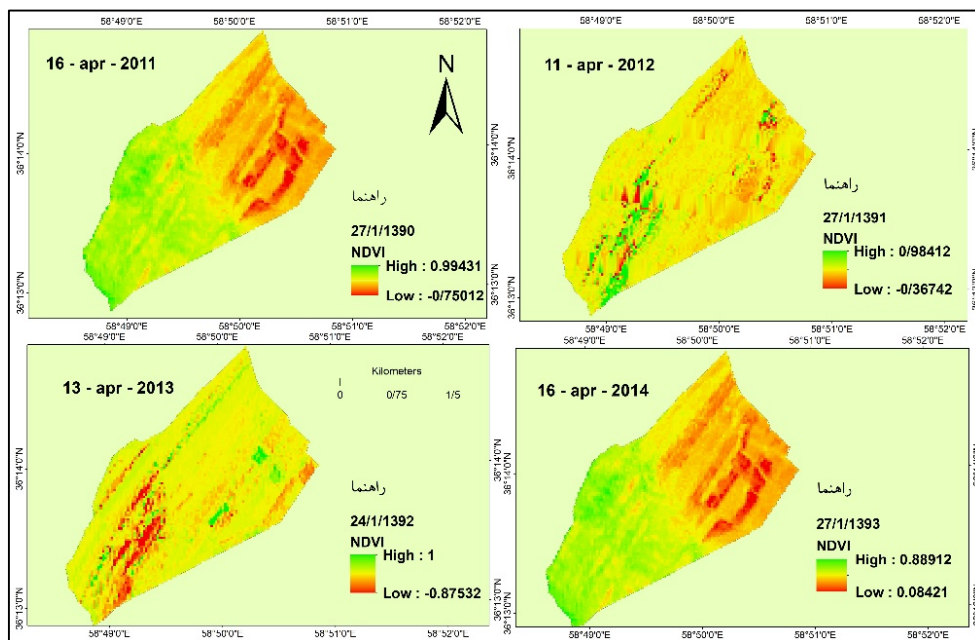
سال	تاریخ تصویر	NDVI min	NDVI max	NDVI	VCI	TCI
۸۹-۹۰	۸۹/۱۰/۶	۰/۱۸	۰/۷۸	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۳۷
	۹۰/۱/۳۷	-۰/۷۵	۰/۹۹	۰/۱۲	۰/۵۰	-۰/۷۱
	۹۰/۲/۲۹	۰/۱۴	۰/۵۱	۰/۱۸	۰/۴۹	۰/۵۰
۹۰-۹۱	۹۰/۱۰/۲۴	۰/۰۰۵	۰/۷۶	۰/۳۸	۰/۴۹	-۰/۵۱
	۹۱/۱/۲۷	-۰/۳۶	۰/۹۸	۰/۳۱	۰/۵۰	۰/۵۰
	۹۱/۲/۳۱	-۰/۲۷	۰/۳۰	۰/۰۱	۰/۴۹	۰/۴۹
۹۱-۹۲	۹۱/۱۰/۳۸	-۰/۱۳	۰/۸۷	۰/۳۷	۰/۴۹	۰/۴۰
	۹۲/۱/۲۴	-۰/۸۷	۱/۰۰	۰/۰۶	۰/۴۹	-۰/۵۶
	۹۲/۲/۲۵	-۰/۱۴	۰/۴۸	۰/۱۷	۰/۵۰	۰/۱۲
۹۲-۹۳	۹۲/۱۰/۲۰	۰/۰۸	۰/۸۸	۰/۴۸	۰/۵۰	-۰/۷۳
	۹۳/۱/۲۷	-۰/۲۹	۰/۶۸	۰/۱۹	۰/۴۹	۰/۴۲
	۹۳/۲/۲۸	-۰/۶۰	۰/۳۱	۰/۶۸	۱/۰	۰/۵۰

در شکل‌های ۲ تا ۴ نقشه توزیع جغرافیایی مربوط به شاخص NDVI نشان داده شده است. بر این اساس بیشینه مقدار NDVI در دی ماه (مراحل جوانه‌زنی تا چهار برگ) مربوط به سال زراعی ۹۱-۹۰ به مقدار $+۰/۷۶۹$ و کمترین آن به مقدار $-۰/۳۵۵$ در سال زراعی ۹۰-۸۹ به دست آمد. این در حالی است که عملکرد گندم در سال‌های زراعی ۹۰-۸۹ و ۹۱-۹۰ به ترتیب ۱۶۷۵ و ۳۸۴۵ کیلوگرم در هکتار، یعنی کمترین و بیشترین مقدار را به خود اختصاص داده‌اند که با مقادیر NDVI ذکر شده مطابقت دارد. در کل دوره رشد، بیشترین

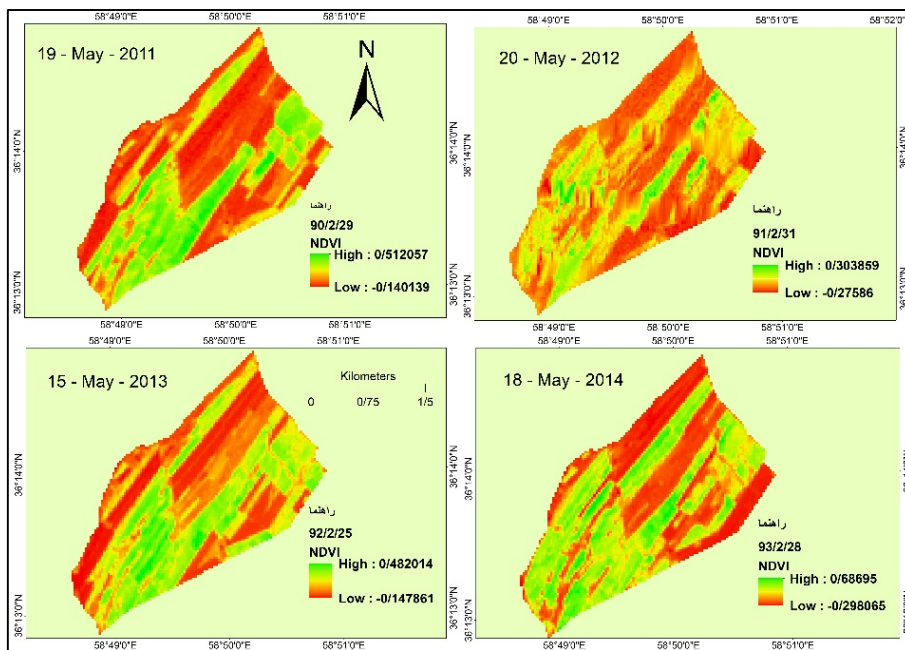
اختلاف بیشینه و کمینه این شاخص (دامنه شاخص)، مربوط به سال زراعی ۹۳-۹۲ و کمترین دامنه مربوط به سال زراعی ۹۱-۹۰ بوده است. بنابراین می‌توان به این نتیجه رسید که توزیع زمانی مناسب بارش در فصل رشد و مناسب بودن رطوبت ناحیه عمق مؤثر ریشه گندم، در افزایش عملکرد سال زراعی ۹۱-۹۰ (۳۸۴۵ کیلوگرم در هکتار) نسبت به سال‌های ۹۳-۹۲ و ۹۰-۸۹ (به ترتیب ۲۸۳۶ و ۱۶۴۵ کیلوگرم در هکتار) تاثیر داشته است.



شکل ۲: مقادیر NDVI در مراحل جوانه‌زنی تا چهار برگی در محدوده ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور در سال‌های ۹۲ - ۱۳۸۹



شکل ۳: مقادیر NDVI طی مراحل پنجه‌زنی تا ساقه‌دهی در محدوده ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور در سال‌های ۹۳ - ۱۳۹۰



شکل ۴: مقادیر NDVI طی مراحل شکم‌پر تا رسیدگی کامل در محدوده ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور ۹۳-۱۳۹۰

نتایج نشان می‌دهند که ۳۵ و ۶۱ درصد تغییرات رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک به ترتیب مربوط به بیشینه نمایه اختلاف نرمال شده رویشی و نمایه تبخیر و تعرق بارش استاندارد شده می‌باشد (جدول ۵).

معادلات آماری برآورد درصد رطوبت اعماق خاک در جدول ۵ آمده است. بر این اساس تنها رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک (به عنوان متغیر وابسته) با نمایه‌های $NDVI_{max}$ و SPEI (به عنوان متغیرهای مستقل معادلات برآورد رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک) ارتباط معنادار داشته است.

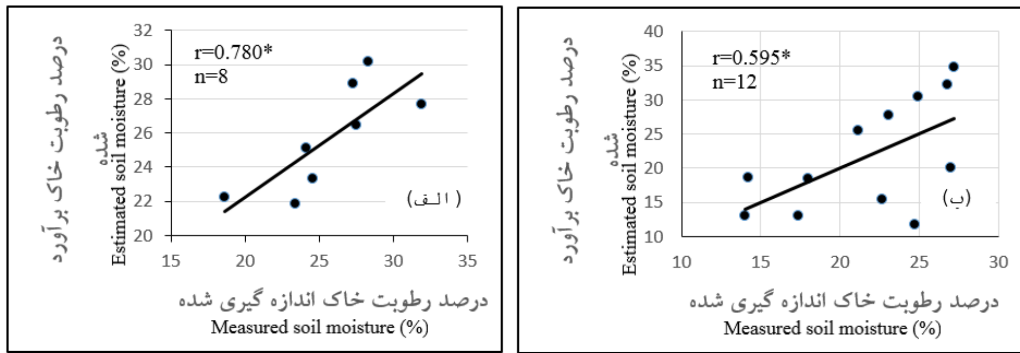
جدول ۵: معادلات آماری تخمین رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک

خطا (%)	Sig.	ضریب تبیین (R^2)	ضریب همبستگی پیرسون (r)	معادله آماری	مدل آماری
۶/۸۲	۰/۰۴۱	۰/۳۵۴	*۰/۵۹۵	$SM10=38.355+18.84(NDVI_{max})$	(۱)
۲/۶۹	۰/۰۲۲	۰/۶۰۹	*۰/۷۸۰	$SM10=30.122+1.782(SPEI)$	(۲)

SM10. رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک؛ $NDVI_{max}$: بیشینه نمایه اختلاف نرمال شده رویشی براساس داده‌های ۱۲ روز متناظر با روزهای برداشت تصویر ماهواره در تاریخ‌های سه مرحله رشد ابتدایی، میانی و انتهایی؛ SPEI: نمایه تبخیر و تعرق بارش استاندارد شده براساس داده‌های ماهانه فروردین و اردیبهشت؛ *معنی‌دار ($Sig.<0.05$)

برآورد شده توسط مدل‌های آماری تا حد قابل قبولی نزدیک به مقادیر واقعی (اندازه‌گیری شده) می‌باشند.

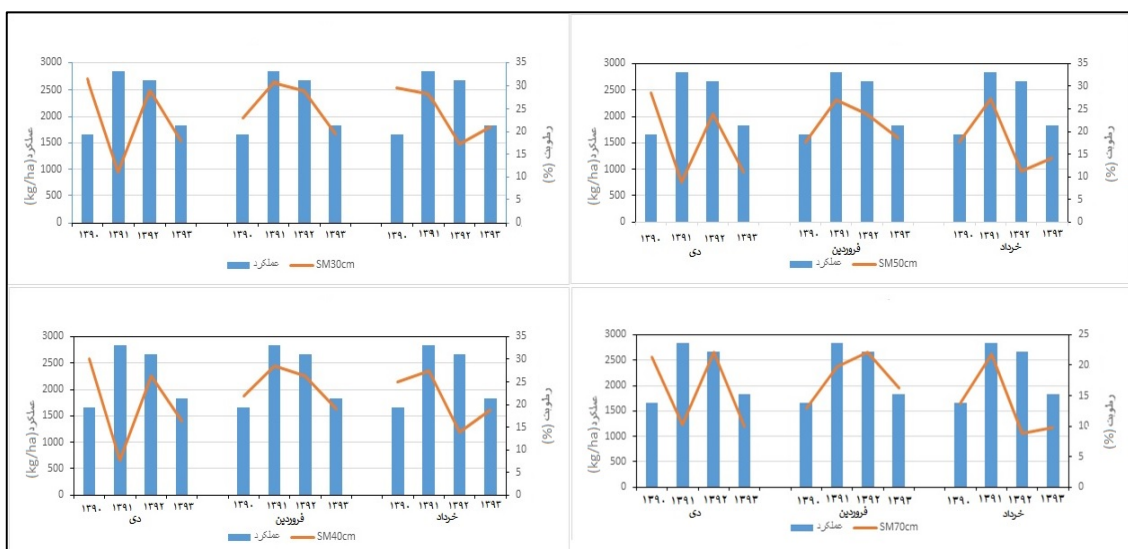
شکل ۵ پراکنش مقادیر برآورد شده رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک به کمک مدل‌های پیشنهادی ۱ و ۲ را به ازای داده‌های اندازه‌گیری شده (واقعی) نشان می‌دهند. دیده می‌شود که مقادیر رطوبت



شکل ۵: مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده (واقعی) و برآورد شده رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک، الف) متغیر مستقل، SPEI؛ ب) متغیر مستقل، $NDVI_{max}$ ؛ *معنی‌دار ($P < 0.05$).

عملکرد ارتباط مستقیم داشته، اوائل فصل بهار یعنی فروردین ماه می‌باشد. کم‌ترین همبستگی بین عملکرد گندم دیم با رطوبت اعماق خاک مربوط به دی ماه یعنی اوائل فصل رشد بوده است. در فروردین ماه (مراحل میانی رشد) با افزایش رطوبت اعماق خاک به خصوص طی سال‌های ۹۱ و ۹۲ بیشترین عملکرد (به ترتیب ۳۸۴۵ و ۳۶۵۸ کیلوگرم در هکتار) و در سال‌های ۹۰ و ۹۳ با کاهش رطوبت اعماق خاک، کم‌ترین عملکرد (به ترتیب ۱۶۴۵ و ۲۸۳۶ کیلوگرم در هکتار) نیز حاصل شده است.

ارتباط رطوبت اعماق خاک با عملکرد گندم دیم براساس نتایج به دست آمده رابطه معنی‌داری بین عملکرد محصول و رطوبت اعماق خاک به دست نیامد. در برخی سال‌ها با وجود افزایش درصد رطوبت خاک، عملکرد گیاه کاهش و در برخی سال‌ها عکس این موضوع رخ داده است. شاید یکی از دلایل این تناقض، کوتاه بودن دوره آماری داده‌های عملکرد و رطوبت خاک در این مطالعه آن هم به مدت ۴ سال بوده است. با این وجود شکل ۶ نمودار تغییرات عملکرد گندم دیم و رطوبت اعماق خاک در مراحل مختلف رشد را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهند که مهم‌ترین فصلی که رطوبت خاک با



شکل ۶: نمودار تغییرات عملکرد گندم دیم با رطوبت اعماق خاک، در ماه‌های دی، فروردین و خرداد (۹۳ - ۱۳۸۹)

نتیجه گیری

خاک در مناطق با پوشش گیاهی ضعیف و یا فاقد پوشش گیاهی اشاره داشته‌اند. از دیگر نتایج مطالعه حاضر اهمیت رطوبت اعماق خاک در فروردین ماه یعنی مرحله میانی رشد گندم دیم بوده است. در خصوص تغییرات عملکرد گندم دیم با رطوبت اعماق خاک روابط معنی‌دار و قابل قبولی حاصل نشد. شاید یکی از دلایل آن را بایستی در کوتاه بودن دوره آماری مورد مطالعه ذکر نمود. براساس نتایج این تحقیق می‌توان اذعان داشت که نمایه‌های NDVI_{max} و SPEI به دلیل ماهیت ذاتی مؤلفه‌های دخیل در محاسبات آن‌ها می‌توانند به عنوان سنجه‌های پایش رطوبت خاک مورد استفاده قرار گیرند. در پایان پیشنهاد می‌شود با ترکیب متغیرهای هواشناسی مانند دما و رطوبت نسبی (حسین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۷)، نمایه‌های پایش خشکسالی مانند SPEI و همچنین نمایه‌های سنجش از دور از قبیل دمای درخشندگی و NDVI می‌توان انتظار برآوردهای دقیق‌تری از رطوبت اعماق خاک داشت.

نتایج به دست آمده در این مطالعه نشان داد که نمایه‌های NDVI_{max} و SPEI بیشترین همبستگی معنی‌دار با رطوبت عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک را داشته‌اند. در خصوص سایر متغیرها و ارتباط آن‌ها با رطوبت اعماق ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ و ۷۰ سانتی‌متری رابطه معنی‌داری حاصل نشد. مطالعات بسیاری در ایران مبنی بر کارایی نمایه نرمال شده تفاوت پوشش گیاهی (NDVI) در برآورد رطوبت اعماق مختلف خاک انجام شده است (بابازاده و همکاران، ۱۳۹۱؛ خانمحمدی و همکاران، ۱۳۹۳). با توجه به معناداری NDVI در برآورد رطوبت خاک، می‌توان به همسویی مطالعه ایشان با تحقیق اخیر اشاره کرد. به علاوه ابراهیم‌زاده (ابراهیم‌زاده، ۱۳۹۲) در تحقیق خود نشان داد که می‌توان از نمایه NDVI برای پایش خشکسالی کشاورزی استفاده نمود. با این وجود فشائی و همکاران (۱۳۹۴) در مطالعه خود به کارکرد ضعف NDVI برای تخمین رطوبت

پانویس

1-Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
2-Vegetation Condition Index (VCI)
3-Standardized Precipitation Index (SPI)
4-Standardized precipitation Evapotranspiration Index (SPEI)

5-Temperature Condition Index (TCI)
6-Thermogravimetric
7-One Sample Kolmogrov-Smirnov
8-Brightness Temperature

منابع

-ایستگاه تحقیقات هواشناسی کشاورزی نیشابور، ۱۳۹۴. داده‌های مشاهدات فصلی و اندازه‌گیری های بیومتریک، دوره آماری از سال ۱۳۸۹ تا ۱۳۹۳.
-بابازاده، ح.، نوروزی اقدم، ا.، عقیقی، ح.، شمس‌نیا، س. ا. و خدادادی دهکردی، د.، ۱۳۹۱. تخمین رطوبت لایه سطحی خاک اراضی مرتعی مناطق خشک و نیمه خشک با استفاده از شاخص دما و

-ابراهیم‌زاده، س.، ۱۳۹۲. مطالعه تطبیقی شاخص‌های خشک‌سالی مبتنی بر تصاویر ماهواره AVHRR-NOAA و داده‌های زمینی با استفاده از تکنیک آشکارسازی تغییر (استان کرمانشاه)، پایان‌نامه ارشد، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی و آبیاری و آبادانی، ص ۱۵-۲۵.

- پوشش گیاهی (مطالعه موردی: استان خراسان)، نشریه تحقیقات مرتع و بیابان ایران، دوره ۹، شماره ۱، ص ۱۲۰-۱۳۲.
- جلالی، ل.، ۱۳۹۲. واسنجی و صحت سنجی شاخص خشک‌سالی محصول خاص CSDI برای محصول گندم دیم (مراغه و کرمانشاه)، دانشگاه تهران، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، گروه مهندسی آبیاری و آبادانی، پایان‌نامه ارشد، ص ۴۳-۵۶.
- حسین‌زاده، ج.، تنگو، ا.، نجفی‌فر، ع. و حسینی، ا.، ۱۳۹۷. بررسی تغییرات رطوبت خاک با شاخص‌های اقلیمی در رویشگاه جنگلی مله سیاه در استان ایلام، نشریه آب و خاک، دوره ۳۲، شماره ۴، ص ۸۲۱-۸۳۰.
- حیدری، ح.، ولدان‌زوج، م.، مقصودی، ی. و بهشتی‌تر، م.، ۱۳۹۵. ارزیابی کارایی شاخص‌های طیفی پوشش گیاهی پهن باند در پیش‌بینی شرایط خشک‌سالی در ایران، مجله سنجش از دور و GIS ایران، دوره ۸، شماره ۲، ص ۱۱۲-۱۰۱.
- رضایی مقدم، م.، ولی‌زاده، ک.، رستم‌زاده، ه. و رضایی، ع.، ۱۳۹۱. ارزیابی کارایی داده‌های سنجنده MODIS در برآورد خشک‌سالی (مطالعه موردی: حوضه آبریز دریاچه ارومیه)، مجله جغرافیا و پایداری محیط، دوره ۲، شماره ۵، ص ۳۷-۵۲.
- زارع‌ایبانه، ح.، سبزی‌پرور، ع.، معروفی، ص.، قیامی، ف.، میرمسعودی، ش. و کاظمی، م.، ۱۳۹۴. تحلیل و پایش خشک‌سالی هواشناسی منطقه سیستان و بلوچستان، نشریه علوم و تکنولوژی محیط زیست، دوره ۱۷، شماره ۱، ص ۴۹-۶۱.
- سبقتی، م.، احمدی بیرگانی، ح. و مقدم، ع.، ۱۳۹۵. محاسبه تداوم و شدت خشک‌سالی به‌وسیله شاخص SPEI اصلاحی (شهرهای تبریز و ارومیه)، مجله محیط‌زیست و مهندسی آب، دوره ۲، شماره ۲، ص ۲-۱۸.
- عرفانیان، م.، وفایی، ن. و رضاییان‌زاده، م.، ۱۳۹۳. ارائه یک روش نوین برای ارزیابی ریسک خشک‌سالی استان فارس با تلفیق داده‌های ماهانه بارندگی ماهواره TRMM و داده‌های شاخص پوشش گیاهی NDVI سنجنده MODIS/Terra، مجله پژوهش‌های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۶، شماره ۱، ص ۹۳-۱۰۸.
- فشائی، م.، ثنایی‌نژاد، س.ح. و داوری، ک.، ۱۳۹۴. تخمین رطوبت خاک با استفاده از تصاویر سنجنده مودیس (مطالعه موردی: محدوده دشت مشهد)، نشریه آب و خاک، دوره ۲۹، شماره ۶، ص ۱۷۳۵-۱۷۴۸.
- مرادی‌زاده، م.، مومنی، م. و سراجیان، م.ر.، ۱۳۹۶. بررسی رابطه بین دمای سطحی خاک و رطوبت نزدیک به سطح در مرکز ایران، جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی، دوره ۲۸، شماره ۳، ص ۵۹-۶۸.
- مساعدی، ا.، محمدی‌مقدم، س. و قبائی‌سوق، م.، ۱۳۹۴. مدل‌سازی عملکرد گندم و جو دیم براساس شاخص‌های خشک‌سالی و متغیرهای هواشناسی، نشریه آب و خاک، دوره ۲۹، شماره ۳، ص ۷۳۰-۷۴۹.
- نیازی، ی.، طالبی، ع.، مختاری، م. و وظیفه‌دوست، م.، ۱۳۹۵. ارزیابی یک شاخص خشک‌سالی ترکیبی جدید مبتنی بر داده‌های سنجش‌از‌دور (RCDI) در محدوده ایران مرکزی، اکوهیدرولوژی، دوره ۳، شماره ۱، ص ۳۱-۴۳.
- یاقوتی، ح.، پذیرا، ا.، امیری، ا. و مسیح‌آبادی، م.، ۱۳۹۷. کاربرد تصاویر ماهواره‌ای و فن‌آوری سنجش از دور برای تخمین عملکرد برنج، نشریه حفاظت منابع آب و خاک، دوره ۷، شماره ۳، ص ۵۵-۶۹.

- AghaKouchak, A., Farahmand, A., Melton, F.S., Teixeira, J., Anderson, M.C., Wardlow, B.D. and Hain, C.R., 2015. Remote sensing of drought: Progress, challenges and opportunities. *Reviews of Geophysics*, v. 53, p. 452-480.
- Bazrafshan, J., Hejabi, S. and Rahimi, J., 2014. Drought monitoring using the multivariate standardized precipitation index (MSPI). *Water Resources Management*, v. 28, p. 1045-1060.
- Carrao, H., Russo, S., Sepulcre-Canto, G. and Barbosa, P., 2016. An empirical standardized soil moisture index for agricultural drought assessment from remotely sensed data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 48, p. 74-84.
- Destouni, G. and Verrot, L., 2014. Screening long-term variability and change of soil moisture in a changing climate. *Journal of Hydrology*, v. 516, p. 131-139.
- Dutta, D., Kundu, A., Patel, N.R., Saha, S.K. and Siddiqui, A.R., 2015. Assessment of agricultural drought in Rajasthan (India) using remote sensing derived Vegetation Condition Index (VCI) and Standardized Precipitation Index (SPI). *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, v. 18, p. 53-63.
- Du, T.L.T., Bui, D.D., Nguyen, M.D. and Lee, H., 2018. Satellite-Based, Multi-indices for evaluation of agricultural droughts in a highly dynamic tropical catchment, central Vietnam. *Water*, v. 10, p. 1-24.
- Ebi, K.L. and Bowen, K., 2016. Extreme events as sources of health vulnerability: Drought as an example. *Weather and Climate Extremes*, v. 11, p. 95-102.
- Khanmohammadi, F., Homae, M. and Norouzi, A.A., 2014. Estimation of soil moisture using vegetation indices and soil surface temperature and normalized soil moisture index with MODIS images. *Journal of Water and Soil Resources Conservation*, v. 4(1), p. 37-44.
- Kogan, F.N., 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, v. 15, p. 91-100.
- McKee, T.B., Doesken, N.J. and Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration of time scales. Eighth Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Jan17-23, 1993, Anaheim CA, p. 179-186
- Niazi, Y., Talebi, A., Mokhtari, M. and Vazifehdoost, M., 2018. Spatio-Temporal analysis of the accuracy of TRMM satellite data to estimate the severity of a drought based on precipitation in Central Iran. *Journal of Physical Geography Research*, v. 50(1), p. 69-85.
- Potopova, V., Boroneanț, C., Boincean, B. and Soukup, J., 2016. Impact of agricultural drought on main crop yields in the Republic of Moldova. *International Journal of Climatology*, v. 36, p. 2063-2082.
- Sruthi, S. and Aslam, M.M., 2015. Agricultural drought analysis using the NDVI and land surface temperature data; a case study of Raichur district. *Aquatic Procedia*, v. 4, p. 1258-1264.
- Tran, H.T., Campbell, J.B., Tran, T.D. and Tran, H.T., 2017. Monitoring drought vulnerability using multispectral indices observed from sequential remote sensing (Case Study: Tuy Phong, Binh Thuan, Vietnam). *GIScience & Remote Sensing*, v. 54, p. 167-184.
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S. and López-Moreno, J.I., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of climate*, v. 23, p. 1696-1718.

-Wang, F., Qin, Z., Song, C., Tu, L., Karnieli, A. and Zhao, S., 2015. An improved mono-window algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat 8 thermal infrared sensor data. *Remote sensing*, v. 7, p. 4268-4289.

-Yu, M., Li, Q., Hayes, M.J., Svoboda, M.D. and Heim, R.R., 2014. Are droughts becoming more frequent or severe in China based on the standardized precipitation evapotranspiration index: 1951–2010? *International Journal of Climatology*, v. 34, p. 545-558.