

Evaluation of Vegetation Indices for Sugarcane Yield Modeling with Emphasis on Growth Pattern Based on Satellite Imagery: (Case Study: Khuzestan Imam Khomeini Agro Industry)

MOSTAFA KHOSRAVIRAD¹, MAHMOUD OMID^{1*}, FERAYDOUN SARMADIAN², SOLEIMAN HOSSEINPOUR¹

1. Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Department of Science and Soil Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Feb. 6, 2019- Revised: June. 22, 2019- Accepted: July. 8, 2010)

ABSTRACT

The aim of this study is to determine the growth pattern and to investigate the vegetation indices power for sugarcane yield modelling at field scale in Imam Khomeini Agro-industry. For this purpose, the vegetation indices extracted from Landsat7 satellite images were investigated using time series analysis. Overall, 306 Landsat7 satellite images from March 2004 to February 2017 were used. All of the images were converted to surface reflectance via FLAASH algorithm. The average values of 13 vegetation indices related to the study region extracted from satellite images and converted to seven days' time-series via interpolation. In order to eliminate the noise, all series were reconstructed using the Savitzky-Golay algorithm. Thus, 13 different time series of vegetation indices were made for 523 sugarcane fields. Then the growth pattern was drawn via averaging NDVI time series and it was divided into three growth periods. Then the accumulative values of vegetation indices related to the first and second periods of growth stage were extracted since 2004 to 2017. Therefore, 3286 samples were prepared overall, of which 2628 samples were used for modelling and 658 samples for evaluation. The samples extracted from time series were evaluated by simple linear regression model against the average observed yields. The result showed that the accumulative vegetation index of GNDVI for the first growth period with $R^2=0.47$, RMSE=11.70 ton/ha and the accumulative vegetation index of NDI for the second growth period with $R^2=0.56$, RMSE=10.62 ton/ha are a better indices for sugarcane yield estimation as compared to the other vegetation indices. Also, the sum of GNDVI and NDI indices for summation of first and second growth periods had a better result ($R^2=0.65$, RMSE=9.47 ton/ha) than that's where one index at one period was used. Finally, the sugarcane yield of 658 samples was estimated for evaluation and the R^2 and RMSE of the best model was obtained to be 0.58 and 10.99 ton/ha, respectively. The results of this study confirm the suitability of the GNDVI and NDI indices for monitoring sugarcane growth during the first and second growth stages.

Keywords: Sugarcane, Timeseries, Image processing, Vegetation indices, Biomass, Landsat

ارزیابی شاخص‌های سبزی‌نگی در مدل‌سازی عملکرد نیشکر با تأکید بر الگوی رشد بر اساس پردازش تصاویر ماهواره‌ای مطالعه موردی: خوزستان کشت و صنعت امام خمینی (ره)

مصطفی خسروی راد^۱، محمود امید^{۱*}، فریدون سرمیدیان^۲، سلیمان حسین پور^۱

۱. گروه مهندسی ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه

تهران، کرج، ایران

۲. گروه مهندسی علوم خاک، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران،

کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۱۷ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۴/۱ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۸/۴/۱۷)

چکیده

هدف از این تحقیق تعیین الگوی رشد و بررسی قدرت شاخص‌های سبزی‌نگی برای مدل‌سازی عملکرد نیشکر در سطح مزارع کشت و صنعت امام خمینی (ره) در استان خوزستان است. برای این منظور شاخص‌های سبزی‌نگی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ به کمک سری زمانی بررسی و مورد تحلیل قرار گرفت. در مجموع، تعداد ۳۰۶ تصویر مربوط به اسفند سال ۱۳۸۳ لغایت بهمن سال ۱۳۹۶ استفاده شد کلیه تصاویر با الگوریتم فلش (FLAASH) به انعکاس سطحی تبدیل شدند. میانگین مقادیر ۱۳ شاخص سبزی‌نگی استخراج و با درون‌یابی به صورت سری زمانی هفت‌روزه تنظیم شد. به منظور حذف اعوجاج، سری‌ها با استفاده از الگوریتم ساویتزکی گلائی (Savitzky-Golay) بازسازی شدند. بدین ترتیب ۱۳ سری زمانی متفاوت از شاخص‌های سبزی‌نگی برای ۵۲۳ مزرعه نیشکر تشکیل گردید. سپس با میانگین‌گیری از سری زمانی شاخص سبزی‌نگی NDVI، الگوی رشد نیشکر مشخص و به سه دوره رشد تقسیم شد. سپس مقادیر تجمعی شاخص‌های سبزی‌نگی در دوره‌های رشد اول و دوم الگوی رشد برای سال‌های ۱۳۸۳ تا ۱۳۹۶ استخراج شد. بنابراین در مجموع ۳۲۸۶ نمونه بدست آمد که ۲۶۲۸ نمونه برای مدل‌سازی و ۶۵۸ نمونه برای ارزیابی مدل‌ها استفاده شد. برای مدل‌سازی عملکرد، مقادیر تجمعی شاخص‌های سبزی‌نگی در مقابل میانگین عملکرد مشاهده شده با روش رگرسیونی خطی ساده مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد برای دوره رشد اول شاخص سبزی‌نگی تجمعی GNDVI با ضریب تبیین ۰/۴۷ و ضریب RMSE برابر ۱۱/۷۰ تن در هکتار و برای دوره رشد دوم شاخص سبزی‌نگی تجمعی NDI با ضریب تبیین ۰/۵۶ و RMSE برابر ۱۰/۶۲ تن در هکتار نمایش‌دهنده بهتری برای عملکرد نیشکر نسبت به شاخص‌های دیگر می‌باشند. همچنین برای مجموع دوره رشد اول و دوم، مجموع شاخص‌های سبزی‌نگی GNDVI و NDI با ضریب تبیین ۰/۶۵ و RMSE برابر ۹/۴۷ تن در هکتار نتیجه بهتری نسبت به حالتی که فقط از یک شاخص سبزی‌نگی و یک دوره رشد استفاده شد، داشت. در انتها برای ۶۵۸ نمونه، عملکرد نیشکر برای ارزیابی مدل‌ها تخمین زده شد و ضریب تبیین و RMSE بهترین مدل برابر ۰/۵۸ و ۱۰/۹۹ تن در هکتار بدست آمد. نتایج این تحقیق مناسب بودن شاخص GNDVI و NDI را برای پیش‌رشد نیشکر در دوره رشد اول و دوم تأیید می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سری زمانی، پردازش تصویر، شاخص‌های سبزی‌نگی، بایومس، لندست

مقدمه

نیشکر یک محصول چندساله است که به‌طور وسیعی کشت می‌شود و نقش اصلی در کشاورزی برای تولید شکر و دیگر محصولات (بیو دیزل، ملاس، باگاس، مواد مغذی و غیره) را دارا است. نیشکر در ایران برای تولید شکر و دیگر محصولات صنعتی مانند خوراک دام، کاغذ، نئوپان، تخته صنعتی، الکل و غیره استفاده می‌شود. بیش از ۲۸ میلیون هکتار از زمین‌های کشاورزی در جهان به کاشت نیشکر اختصاص داده شده است که کشورهای برزیل، هند

و چین به ترتیب با ۱۰۴۱۹ و ۵۰۱۲ و ۱۷۶۸ هزار هکتار به ترتیب رتبه اول تا سوم را دارا می‌باشند. کشور ایران با ۹۳۶۷۷ هکتار مساحت نیشکر برداشت‌شده با میانگین ۷۳/۷۸ تن در هکتار رتبه ۲۷ ام دنیا را دارا است (FAOSTAT, 2017).

در سال‌های اخیر مطالعات زیادی همچون طبقه‌بندی اراضی، تعیین وارثه، تشخیص بیماری‌ها و تخمین عملکرد محصول نیشکر از طریق سنجش از دور انجام شده است (Apan *et al.*, 2004). عملکرد محصول حاصل تعامل پیچیده عوامل

۲۰۰۷، ۲۰۰۸ و ۲۰۰۹ استفاده شد ضرایب تبیین این پیش بینی-ها به ترتیب برابر ۰/۴۱، ۰/۵۹، ۰/۶۴، ۰/۸۵ و ۰/۸۰ و $RMS\bar{E}$ به ترتیب برابر ۱۰/۲۷، ۹/۸۴، ۷/۳۶، ۴/۸۰ و ۹/۱۱ تن در هکتار بود و توصیه شد از شاخص های دیگر سبزینگی و ترکیب با مدل های تولید محصول برای افزایش دقت پیش بینی محصول استفاده شود (Mutanga et al., 2013). در ایران در منطقه کشت و صنعت میرزا کوچک خان استان خوزستان مدل خطی و غیر خطی بین شاخص NDVI برای دوره های مختلف رشد نیشکر بررسی شد و نتایج نشان داد مدل غیر خطی میانگین شاخص NDVI در طول دوره رشد با ضریب تبیین ۰/۵۳ و $RMSE$ ۷/۲۱ تن در هکتار نتیجه خوبی داشته است و در مدل خطی مقدار تجمعی شاخص NDVI در دوره رشد سریع نیشکر با ضریب تبیین ۰/۵۱ و $RMSE$ ۸/۲۰ تن در هکتار بهترین همبستگی را با عملکرد نیشکر داشته است (Essari and Mirlatifi, 2004). به خاطر محدودیت های شاخص NDVI در تصحیح اثرات اتمسفری شاخص سبزینگی مقاوم به اثرات اتمسفری (ARVI) پیشنهاد شد که در محاسبه این شاخص از مدلی به نام SS^4 استفاده شده است که بر اساس اثرات معنی دار اتمسفری روی باند قرمز نسبت به مادون قرمز طراحی شده است در رابطه طیفی این شاخص باند قرمز به وسیله اختلاف باند آبی و قرمز جایگزین می شود و بیان شد این شاخص می تواند به طور معنی داری وابستگی خود را به اثرات اتمسفری را کاهش دهد (Kaufman and Tanr, 1992). شاخص مقاوم به اثرات اتمسفری (IAVI) می تواند اثرات اتمسفری را بدون کاربرد مدل SS برطرف نماید (Zhang et al., 1996). در رابطه طیفی شاخص سبزینگی تفاضلی سبز نرمال شده $GNDVI^f$ از باند سبز برای نرمال کردن باند مادون قرمز نزدیک استفاده شد و بیان شد این شاخص در دامنه گسترده ای از تغییرات کلروفیل، بیشترین حساسیت را داشته و می تواند تغییرات کلروفیل را بهتر از شاخص NDVI نشان دهد (Gitelson and Merzlyak, 1998; et al., 1996). در تحقیقی در استرالیا عملکرد نیشکر با استفاده از سری زمانی شاخص سبزینگی $GNDVI$ با ضریب تبیین ۰/۶۹ و $RMSE$ برابر ۴/۲ تن در هکتار پیش بینی شد (Rahman and Robson, 2016). برای اصلاح اثر خاک در شاخص سبزینگی در سال ۱۹۸۸ شاخص $SAVI^y$ معرفی شد (Huete, 1988). در سال ۲۰۰۲ دو شاخص

زیادی از جمله خاک، آب و هوا، ژنوتیپ گیاه و فعالیت های مدیریتی می باشد. تعاملات پیچیده محصول با عوامل گوناگون از یک سو و خود عوامل با هم از سوی دیگر باعث گردیده مدل سازی محصول بسیار دشوار گردد. در سیستم سنجش از دور پارامترهای رشد محصول از بالا و از فاصله دور و با امکان برآورد این پارامترها در هر مقیاس مکانی (از پیکسل تا منطقه ای) سنجیده می شود. تکنیک های سنجش از دور در سال های اخیر به عنوان روش دقیق و کم هزینه به عنوان جایگزین روش های مرسوم برای پیش بینی محصول و پایش رشد مورد ارزیابی قرار گرفته است. در مطالعات زیادی امکان مشاهدات تصاویر ماهواره ای به صورت سری های زمانی در تفکیک های متفاوت برای پایش سبزینگی، تشخیص محصولات، تهیه نقشه های الگوهای فصلی، تناوب زراعی محصولات و پیش بینی عملکرد را بررسی نموده اند. در کاربرد سری های زمانی در سنجش از دور روش های زیادی برای بازسازی سری زمانی به منظور کاهش اعوجاج و استخراج مؤلفه های رشد استفاده شده است. در تحقیقی پنج روش کاهش اعوجاج در سری های زمانی شاخص تفاضل پوشش گیاهی نرمال شده (NDVI) ماهواره مادیس بررسی شد و نتیجه شد همه روش های بازسازی سری زمانی در کاهش اعوجاج مؤثر هستند ولی هنوز هیچ مدرک و گواه معتبری برای برتری یک روش بر روش دیگر وجود ندارد (Cai et al., 2017). شاخص سبزینگی NDVI، یکی از قدیمی ترین و پرکاربردترین شاخص های گیاهی است که به طور وسیعی در شناسایی پوشش گیاهی و تخمین مقادیر محصولات تولیدی بکار می رود (Rouse et al., 1974). این شاخص به طور متناوب در محصولات با زیست توده زیاد اشباع می شود و آلودگی - های جوی اثر منفی روی آن دارد (Huete et al., 1994). در تحقیقی در جزیره ریونیون زیست توده نیشکر در سطح مزرعه با تصاویر اسپات ۴ و ۵ با ضریب تبیین برابر ۰/۷۸ تخمین زده شد. بر اساس این تحقیق بهترین زمان اکتساب تصویر برای پیش بینی زیست توده دو ماه قبل از شروع فصل برداشت یعنی زمانی که گیاه توسعه رویشی خود را انجام داده ولی هنوز از نظر رسیدگی کامل نیست مشخص شد (Bégué et al., 2010). در تحقیقی در زیمبابوه از سری زمانی تجمعی شاخص سبزینگی NDVI ماهواره اسپات برای پیش بینی عملکرد نیشکر در سال های ۲۰۰۵، ۲۰۰۶،

۱. اتمسفر دارد که بدست آوردن آن دشوار است.

5. Interference Atmospheric Vegetation Index

6. Green Normalized Difference Vegetation Index

7. Soil-adjusted vegetation index

1 Normalized Difference Vegetation Index

2 Root Mean of Square Error

3 Atmospherically Resistant Vegetation Index

۴. این نام مدلی است که با کاربرد آن در محاسبه شاخص ARVI اثرات مربوط به ذرات معلق و ازن در اتمسفر در نظر گرفته می شود و احتیاج به داده های واقعی از

مدل سازی عملکرد نیشکر و تعیین الگوی رشد از طریق پردازش سری زمانی تصاویر ماهواره‌ای صورت نگرفته و شاخص‌های سبزیگی مناسب برای شرایط آب و هوایی استان خوزستان بررسی نشده است. بنابراین این تحقیق ۱۳ شاخص سبزیگی مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای لندست ۷ را برای مدل‌سازی عملکرد نیشکر بررسی نموده و شاخص مناسب برای پیش‌بینی عملکرد نیشکر با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ و روش تصحیح اتمسفری FLAASH را مشخص می‌کند.

مواد و روش‌ها

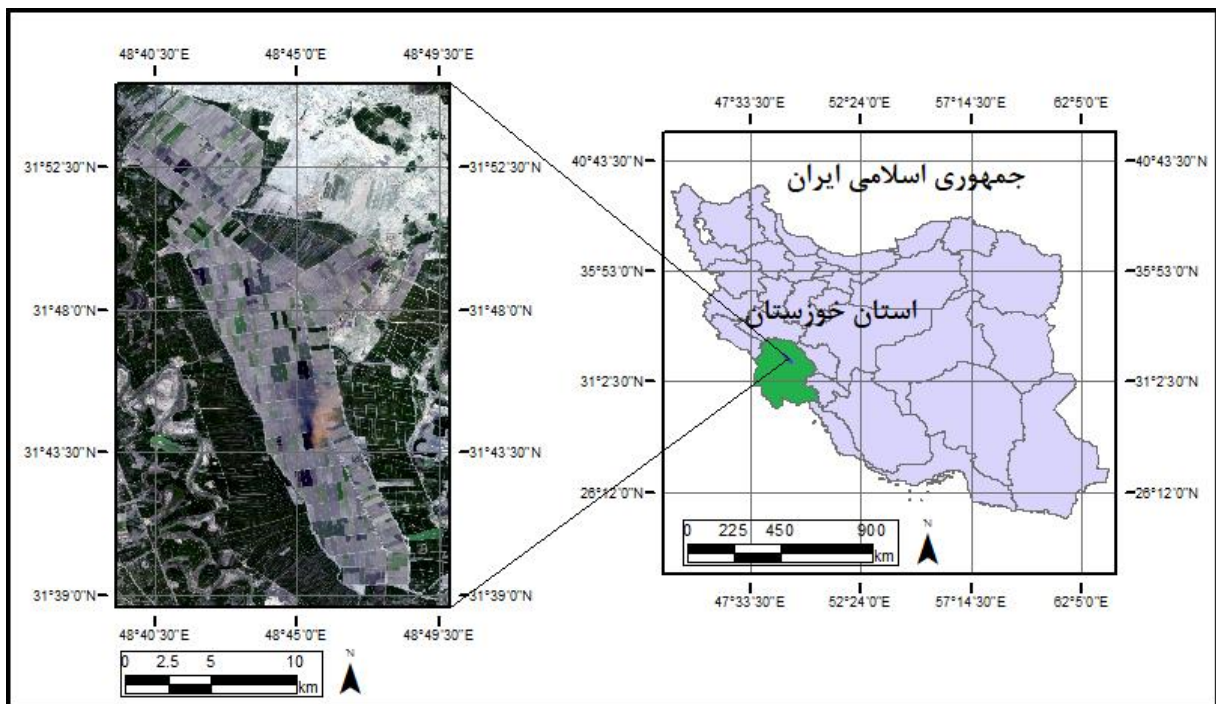
منطقه مورد مطالعه اراضی کشاورزی مربوط به کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره) واقع در شمال غربی استان خوزستان است. این منطقه در بین عرض جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۸ دقیقه و ۳۴ ثانیه شرقی و ۴۸ درجه و ۵۰ دقیقه و ۱۴ ثانیه شرقی و طول جغرافیایی ۳۱ درجه و ۳۹ دقیقه و ۲ ثانیه شمالی و ۳۱ درجه و ۵۵ دقیقه و ۲۳ ثانیه شمالی واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع متوسط از سطح دریا ۴۰ متر و تغییرات آن در حدود ۱۰ متر است. کشت صنعت امام خمینی (ره) در اراضی شعیبیه بین رودخانه‌های شطیط و دز در ۳۰ کیلومتری جنوب شهرستان شوشتر در استان خوزستان واقع شده است. محدوده طرح، بخشی از دشت شعیبیه واقع در دهستان شعیبیه از توابع شهرستان شوشتر است که از شمال به تپه‌های شمالی دشت شعیبیه و از غرب به رودخانه دز و از شرق به رودخانه شطیط (کارون) و از جنوب به کشت و صنعت دهخدا محدود است (IKAI, Dimention, 2018). مساحت تقریبی اراضی کشاورزی این منطقه ۱۵۳۰۰ هکتار است که ۱۲۸۰۰ هکتار آن در محدوده شرکت کشت و صنعت نیشکر امام خمینی (ره) است که بیش از ۱۰۰۰۰ هکتار از آن به محصول نیشکر اختصاص می‌یابد. آمار مربوط به هواشناسی منطقه مورد مطالعه در جدول (۱) آورده شده است.

سبزیگی NDVI و EVI مستخرج از تصاویر ماهواره‌ای مادیس برای نمایش سبزیگی بررسی و نتیجه شد شاخص سبزیگی NDVI در مناطق با پوشش گیاهی زیاد اشباع می‌شود در حالیکه شاخص EVI هنوز حساس است (Huete *et al.*, 2002). در استرالیا چهار شاخص سبزیگی NDVI, GNDVI, EVI_2 و SAVI استخراج شده از داده‌های انعکاس بالای جو برای پیش‌بینی عملکرد نیشکر در سه منطقه بررسی شد و برای افزایش دقت پیش‌بینی مزارع از نظر وارپته و سن طبقه‌بندی شدند که نتایج آن نشان داد شاخص GNDVI برای پیش‌بینی عملکرد نیشکر مناسب‌تر از بقیه است (Robson *et al.*, 2012). شاخص سبزیگی سبز (GVI) در سال ۱۹۷۶ معرفی شد (Kauth & Thomas, 1976). این شاخص چند سال بعد شرح داده شد (Crist, 1985). در سودان در تحقیقی با اطلاعات دو سال عملکرد نیشکر را در چند مزرعه با دقت ۹۰ درصد پیش‌بینی کردند و گزارش دادند دقت پیش‌بینی با استفاده از شاخص NDVI نسبت به پیش‌بینی با روش مرسوم بیشتر است (Elhag and Abdelhadi, 2018). در تحقیقی با استفاده از سری زمانی پانزده ساله شاخص سبزیگی GNDVI و در مقیاس منطقه‌ای عملکرد نیشکر پیش‌بینی شد (Muir *et al.*, 2018). در ایران از شاخص‌های NDVI و SAVI برای مدل‌سازی سن فیزیولوژیکی رشد نیشکر در منطقه کشت و صنعت امیرکبیر و دعبل خوزستان استفاده شد (Mobasheri *et al.*, 2010). در تحقیقی برای پیش‌بینی عملکرد نیشکر در منطقه کشت و صنعت میرزا کوچک‌خان استان خوزستان از شبکه عصبی مصنوعی برای دوسال ۱۳۸۴ و ۱۳۸۵ استفاده شد که ورودی شبکه عصبی میانگین و انحراف معیار شاخص‌های سبزیگی GVI, SAVI, NDVI, PVI^۲ و خروجی محصول تولیدی بود. نتایج این تحقیق نشان داد شاخص SAVI با ضریب تبیین به ترتیب ۰/۷۷ و ۰/۸۱ و RMSE به ترتیب ۸/۲۹ و ۸/۳۰ تن در هکتار بهترین نتیجه را داشته است (Essari and Mirlatifi, 2004). در ایران مطالعات کافی در زمینه

جدول ۱- آمار هواشناسی بیست‌ساله منطقه مورد مطالعه

مجموع ساعات آفتابی	بارندگی (mm)		تبخیر (mm)			درصد رطوبت نسبی			درجه حرارت روزانه (C°)	
	مجموع	حداکثر	حداکثر	حداقل	مجموع	میانگین	حداکثر	حداقل	میانگین	حداکثر
۳۱۶۵	۲۵۴/۱		۲۶۱۶	۵۲/۷	۳۲/۷	۷۲/۶	۲۴/۷	۳۳/۱	۱۶/۴	۹۷-۱۳۷۸
										مطلق دوره
										دی ۸۶
										تیر ۷۹

منبع: ایستگاه هواشناسی مستقر در منطقه مورد مطالعه



شکل ۱ - تصویری از منطقه مورد مطالعه واقع در دشت شیعیبه استان خوزستان

می‌باشند. یک باند کیفیت^۵ در تصاویر این قالب ضمیمه شده که اطلاعات بیتی منطبق بر شرایطی که ممکن است پیکسل از ابر یا برف یا اشباع متأثر شده باشد را ارائه می‌دهد. همچنین این تصاویر از لحاظ کیفیت در آرشیو، با عنوان تییر (Tier) متمایز شده است. تییر ۱ شامل بالاترین کیفیت داده بوده و مناسب برای تحلیل‌های سری زمانی بوده و به خوبی زمین مرجع شده‌اند و خطای RMSE کمتر از ۱۲ متر دارند (Landsat7-L1TP, 2018). تصاویر استفاده شده در این تحقیق علاوه بر قالب L1TP دارای کیفیت بالای تییر ۱ باشد.

پیش پردازش تصاویر ماهواره‌ای

در مجموع ۳۸۸ تصویر مربوط به ماهواره لندست ۷ سنجنده ETM+ مربوط به اسفند سال ۱۳۷۹ لغایت بهمن ۱۳۹۶ منطقه مورد مطالعه بدست آمده از آرشیو سازمان نقشه برداری آمریکا مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت که ۸۲ تصویر به علت ابرهای سراسری و یا گرد و خاک حذف و ۳۰۶ تصویر در پردازش‌های نهایی استفاده شد. کلیه تصاویر با استفاده از نرم افزار ENVI5.3 تصحیح و سپس با الگوریتم فلش (FLAASH) به بازتاب سطحی تبدیل گردید برای حذف اثرات نامطلوب اتمسفر روی پیکسل از اطلاعات فایل کیفیت همراه تصویر استفاده شد. به ازای هر پیکسل در باند تصویری یک پیکسل متناظر در باند کیفیت وجود

داده‌های سنجنش از دور

ماهواره لندست ۷ با سنجنده^۱ ETM+ از جولای ۱۹۹۹، با دوره دریافت تصاویر ۱۶ روزه در مدار زمین قرار داده شد. به علت خرابی SLC^۲ تصاویر دریافت شده از ۳۰ام می ۲۰۰۳ معادل ۱۹م خرداد ۱۳۸۲ دارای نوارهای خالی (سیاه) می‌باشند. این خطا باعث تکراری شدن بعضی از قسمت‌ها و فاصله خالی در بعضی قسمت‌های دیگر تصویر شد. در پردازش‌های سطح ۱ لندست قسمت‌های تکراری حذف و فقط ۷۸٪ تصویر اصلی باقی می‌ماند ولی هنوز از لحاظ ژئومتری و رادیومتری جزء دقیق‌ترین داده‌های ماهواره‌ای در دنیا است (Landsat-SLC-off, 2018). تصاویر سنجنده ETM+ ماهواره لندست ۷، شامل ۸ باند طیفی شامل ۶ باند با تفکیک مکانی ۳۰ متر (باندهای ۱ تا ۵ و ۷) و یک باند با تفکیک مکانی ۶۰ متر (باند ۶) و یک باند پانکروماتیک با تفکیک مکانی ۱۵ متر (باند ۸) است (Landsat7-L1TP, 2018). تصاویر استفاده شده در این تحقیق دارای قالب L1TP^۳ است. تصاویر مربوط به این قالب ویژگی‌های رادیومتری خوبی داشته و به صورت متقاطع^۴ از طریق سنجنده‌های متفاوت کالیبره شده‌اند. این تصاویر به وسیله نقاط کنترل زمینی به صورت سیستماتیک، رادیومتری، ژئومتری و توپوگرافیکی با بالاترین کیفیت تصحیح شده و مناسب برای تحلیل‌های سری زمانی در حد پیکسل

۵. یک فایل که نام آن با حروف QA پایان می یابد و قسمتی از محصولات با فرمت L1TP می باشد

6Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes

1Enhanced Thematic Mapper
2Scan Line Corrector
3Level 1 Terrain Product
4Cross-Calibrated

است که در رابطه طیفی آن ضریب گاما میزان تأثیر باندهای قرمز و سبز را در نرمال سازی باند مادون قرمز تنظیم می کند. از این شاخص نیز به دو شکل GARI1 با لاندای برابر ۰/۶۰ و GARI2 با لاندای برابر ۱/۹ استفاده شده است. در شاخص SAVI اثر خاک با ضریب ثابت L تنظیم می شود. از این شاخص با ثابت L برابر ۰/۵ استفاده شده است. در شکل (۲) فلوجارت مراحل مختلف دریافت تصاویر، پیش پردازش و پردازش تصاویر ماهواره ای ارائه شده است. با روی هم اندازی لایه برداری مزارع نیشکر و لایه رستری مربوط به هر باند از تصویر ماهواره ای، مقدار میانگین درجه روشنایی باندهای آبی، سبز، قرمز، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز میانی مربوط به هر مزرعه محاسبه و در یک فایل متنی ذخیره شد. بدین ترتیب به تعداد تصاویر ماهواره ای فایل های متنی ساده با اطلاعات میانگین درجات روشنایی مزارع ایجاد گردید. در هر فایل متنی ستون های اول تا پنجم به ترتیب مقادیر میانگین درجات روشنایی باندهای آبی، سبز، قرمز، مادون قرمز نزدیک، مادون قرمز میانی (میانگین مادون قرمز میانی ۱ و مادون قرمز میانی ۲) و هر ردیف آن مربوط به یک مزرعه بود (مربوط به قسمت B فلوجارت شکل ۲). سپس کلیه فایل های متنی حاوی درجات روشنایی خوانده و مقادیر شاخص های سبزیگی ارائه شده در جدول (۱) محاسبه گردید. بدین ترتیب با تجمیع اطلاعات فایل های درجات روشنایی برای هر شاخص سبزیگی یک فایل متنی سری زمانی ایجاد شد.

دارد که مشخص کننده وضعیت کیفیت پیکسل است. در صورتی که عدد کیفیت هر پیکسل یکی از مقادیر ۶۷۲، ۶۷۶، ۶۸۰ و یا ۶۸۴ باشد آن پیکسل مربوط به آسمان صاف و غیر اشباع بوده و در هیچ یک از باندها اشباع نشده و متأثر از عوامل پایین آورنده کیفیت نبوده و قابل اطمینان است (Landsat7-BQA, 2018). با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه هم در گذر (Path) ۱۶۶ و هم در گذر ۱۶۵ ماهواره لندست ۷ تصویربرداری می شود و تصاویر گذر ۱۶۶ در زون ۳۸ و تصاویر گذر ۱۶۵ در زون ۳۹ قرار داشت لذا لایه برداری مزارع نیشکر منطقه میان آب به وسیله نرم افزار ArcGIS 10.5 برای دو زون ۳۸ و ۳۹ به صورت جداگانه تهیه و برای آنها ۱۵ متر مرز داخلی از مرزهای خارجی در نظر گرفته شد.

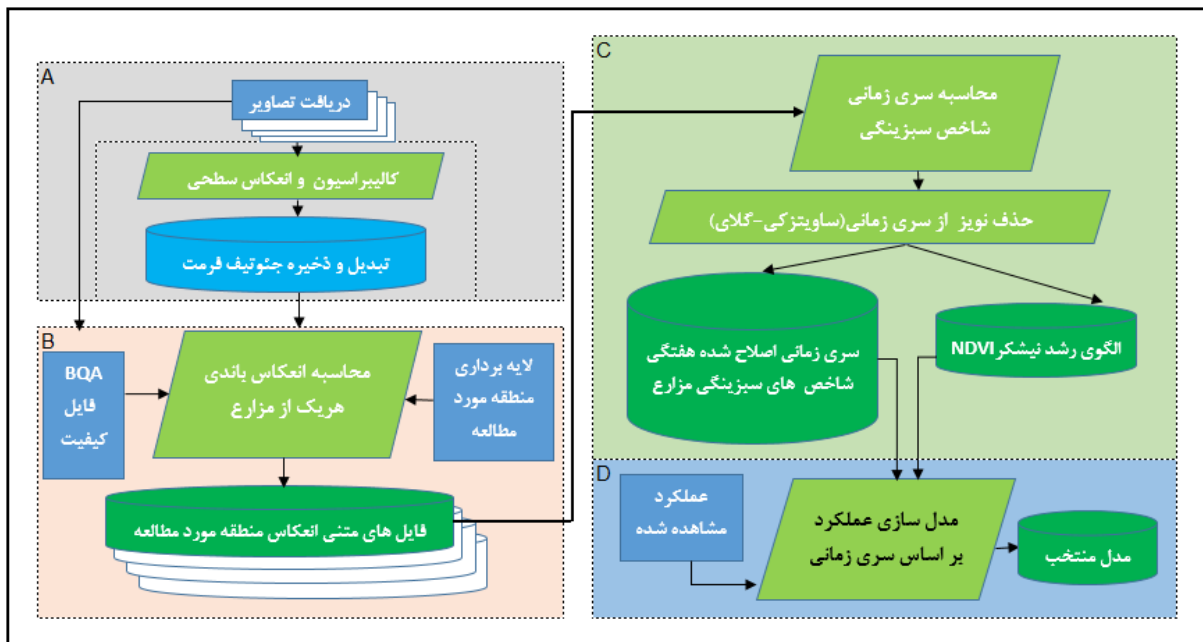
پردازش تصاویر ماهواره ای

در این تحقیق ۱۳ شاخص سبزیگی که امکان محاسبه از باندهای موجود در تصاویر ماهواره ای لندست ۷ را دارند و روابط طیفی آن در جدول (۱) آورده شده است، مورد ارزیابی قرار گرفته است. شاخص IAVI با استفاده از سه باند طیفی آبی، قرمز و مادون قرمز، مقاوم به اثرات اتمسفری می باشد که در رابطه طیفی آن ضریب گاما میزان تأثیر باندهای قرمز و آبی را در نرمال سازی باند مادون قرمز تنظیم می کند از این شاخص به دو شکل IAVI1 با گاما برابر ۰/۶۵ و IAVI2 با گاما برابر ۱/۴ استفاده شد. شاخص GARI نیز با استفاده از سه باند مرئی و یک باند مادون قرمز در رابطه طیفی خود یکی از شاخص های مقاوم به اثرات اتمسفری

جدول ۱- رابطه طیفی شاخص های سبزیگی

ارجاع	رابطه طیفی	نام شاخص
شاخص های سبزیگی نرمال شده تفاضلی		
Rouse <i>et al</i> , 1974	$(R_{NIR} - R_{red}) / (R_{NIR} + R_{red})$	NDVI
McNairn and Protz, 1993	$(R_{NIR} - R_{MIR}) / (R_{NIR} + R_{MIR})$	NDI
Gitelson <i>et al</i> , 1996	$(R_{NIR} - R_{green}) / (R_{NIR} + R_{green})$	GNDVI
شاخص های سبزیگی خاک تنظیم شده		
A. R. Huete, 1988	$(1+L)(R_{NIR} - R_{red}) / (R_{NIR} + R_{red} + L)$	SAVI
Rondaux <i>et al</i> . (1996)	$(1.16)(R_{NIR} - R_{red}) / (R_{NIR} + R_{red} + 0.61)$	OSAVI
شاخص های سبزیگی ارتقاء یافته		
Huete <i>et al</i> , 1994	$2.5(R_{NIR} - R_{red}) / (R_{NIR} + 6 R_{red} - 7.5 R_{blue} + 1)$	EVI
Jiang <i>et al</i> , 2008	$2.5(R_{NIR} - R_{red}) / (R_{NIR} + 2.4 R_{red} + 1)$	EVI2
شاخص های سبزیگی مقاوم به اثرات اتمسفر		
Kaufman and Tanr, 1992	$\{R_{NIR} - [R_{red} - (R_{blue} - R_{red})]\} / \{R_{NIR} + [R_{red} - (R_{blue} - R_{red})]\}$	ARVI
Zhang <i>et al.</i> , 1996	$\{R_{NIR} - [R_{red} - \gamma(R_{blue} - R_{red})]\} / \{R_{NIR} + [R_{red} - \gamma(R_{blue} - R_{red})]\}$	IAVI
Gitelson <i>et al</i> , 1996	$\{R_{NIR} - [R_{green} - \lambda(R_{blue} - R_{red})]\} / \{R_{NIR} + [R_{green} - \lambda(R_{blue} - R_{red})]\}$	GARI
Kauth and Thomas, 1976; Crist., 1985	$0.1603R_{blue} - 0.2819R_{green} - 0.4934R_{red} + 0.7940R_{nir} - 0.0002R_{MIR1} - 0.1446R_{MIR2}$	GVI

باند آبی (R_{blue})، باند سبز (R_{green})، باند قرمز (R_{red})، باند مادون قرمز نزدیک (R_{NIR})، باند مادون قرمز میانی (R_{MIR})



شکل ۲- فلوچارت مراحل انجام مدل سازی عملکرد نیشکر بر اساس سری زمانی از شاخص های سبزینگی

و سرد شدن هوا اتفاق می افتاد به عنوان مرحله رسیدگی در نظر گرفته شده است. با میانگین گیری از سری های زمانی هفتگی شاخص سبزینگی NDVI منطقه مورد مطالعه مربوط به سال های ۱۳۸۳ لغایت ۱۳۹۶، سری زمانی هفتگی میانگین شاخص سبزینگی دوره ۱۷ ساله بدست آمد. سری زمانی بدست آمده الگوی میانگین رشد نیشکر در منطقه مورد مطالعه بر اساس اطلاعات ۱۴ سال گذشته می باشد لذا با برازش یک منحنی چند جمله ای درجه چهارم به آن معادله منحنی الگوی رشد بدست آمد سپس نقاط حداقل، حداکثر و عطف منحنی رشد به عنوان نقاط حساس رشد (فنولوژیک) محاسبه گردید. و با توجه به این نقاط حساس الگوی رشد به سه مرحله تقسیم شد. مرحله اول از نقطه حداقل اول منحنی یعنی بعد از جوانه زنی و شروع مرحله رشد سبزینگی شروع و تا نقطه عطف اول یعنی اواسط مرحله رشد سبزینگی تعریف می شود. مرحله دوم از نقطه عطف اول منحنی رشد شروع و تا نقطه حداکثری رشد یعنی پایان مرحله رشد سبزینگی و شروع مرحله رسیدگی ادامه پیدا می کند. مرحله سوم یا مرحله رسیدگی از نقطه حداکثری منحنی رشد شروع شده و تا نقطه حداقل ادامه می یابد. در مرحله یک پس از جوانه زنی مرحله رشد رویشی و افزایش سبزینگی با شتاب مثبت ادامه پیدا می کند بطوریکه در این مرحله افزایش سبزینگی در هر روز مثبت و از روز ماقبل خود بیشتر است. در مرحله دوم رشد سبزینگی ادامه پیدا می کند ولی شتاب آن منفی است بطوریکه در انتهای مرحله دوم شتاب رشد سبزینگی به صفر می رسد در

هر فایل سری زمانی مربوط به یک شاخص سبزینگی است که هر ردیف مربوط به یک مزرعه و هر ستون مربوط به مقدار شاخص سبزینگی در تاریخ تصویر ماهواره ای است. برای یکسان سازی تاریخ های تصاویر و تعداد تصاویر یکسان در هر سال، داده های موجود در فایل های سری زمانی بر اساس شماره روز در سال در دوره هفت روزه یکسان سازی و برای داده های خالی درون یابی شد. با توجه به اینکه از ۳۰۶ تصویر سالم در طول مدت ۱۴ سال استفاده شده است میانگین دوره تصویرهای سالم تقریباً ۱۶/۷ روز برای هر تصویر بوده است. همچنین در سری زمانی داده های تصویر در روزهای مشخصی از سال (۱، ۸، ۱۵، ...، ۳۶۵) مورد نیاز است که ممکن است در آن تاریخ تصویری موجود نباشد (داده خالی) لذا این داده های خالی با استفاده از داده های موجود تاریخ قبل و بعد خود درون یابی شده است. در تحقیقی در منطقه سرادو ایالت ساووپولو برزیل برای طبقه بندی اراضی با استفاده از سری های زمانی از روش مشابه این تحقیق برای یکسان سازی و جایگزینی مقادیر خالی استفاده شد (Do Bendini et al., 2016). برای حذف نویز و داده های پرت در سری های زمانی از فیلتر ساویترکی گلای نرم افزار متلب استفاده شد.

تعیین الگوی رشد نیشکر

از چهار مرحله استاندارد رشد گیاه شامل جوانه زدن، رشد سبزینگی، گل دهی و رسیدگی، دو مرحله آخر در منطقه مورد مطالعه در ایران اتفاق نمی افتد بنابراین فرآیند قند سازی در ساقه گیاه که بعد از اوج رشد رویشی در پایان شهریور با قطع آب

برای سال‌های ۱۳۸۳ لغایت ۱۳۹۶ از این جداول اطلاعاتی استخراج گردید. در جدول (۲) تعداد داده‌های استفاده شده در سطح مزرعه در این تحقیق بر اساس سن و رقم نیشکر نشان داده شده است. داده‌های مربوط به هر سال به صورت تصادفی مرتب شد و سپس ۸۰ درصد داده‌ها برای مدل‌سازی و ۲۰ درصد برای ارزیابی در نظر گرفته شد. بدین ترتیب از مجموع ۳۶۷۸ نمونه ۲۹۴۱ نمونه برای مدل‌سازی و ۷۳۷ نمونه برای ارزیابی مدل‌های منتخب استفاده شد. در جدول (۲) رقم CP69 با عدد ۶۹ و رقم CP57 با عدد ۵۷ و رقم CP48 با عدد ۴۸ و رقم‌های دیگر به صورت غیره و همچنین محصول سال اول (Plant) با عدد ۱ و بازروئی (Ratoon) اول تا بازروئی چهارم با عدد ۲ تا ۵ و بازروئی پنجم و بیشتر به صورت غیره نشان داده شده است.

این مرحله افزایش سبزی‌نگی در هرروز مثبت و از روز ماقبل خود کمتر است. مرحله سوم مرحله رسیدگی است در این مرحله گیاه به حداکثر رشد رویشی خود رسیده و فرآیند رسیدگی (قند سازی) شروع می‌شود. لذا در این مرحله با کاهش دمای هوا و کاهش طول روز به جای رشد سبزی‌نگی با کاهش رشد آن مواجه هستیم بطوریکه هر روز مقداری از سبزی‌نگی کاسته می‌شود (قسمت C فلوچارت شکل ۲)

داده‌های عملکرد مشاهده شده

داده‌های مربوط به مقادیر ساقه محصول نیشکر برداشت شده هر مزرعه و در هر سال در منطقه مورد مطالعه به صورت قبض‌های باسکول در واحد آمار کشاورزی کشت و صنعت امام خمینی (ره) ثبت می‌شود. لذا داده‌های وابسته عملکرد مشاهده شده در هکتار

جدول ۲- تعداد نمونه‌های استفاده شده در سال‌های مختلف از نظر رقم و سن

رقم / سن	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸	۱۹	۲۰	مجموع	رقم نیشکر	سن نیشکر	مدل‌سازی
۶۹	۱۱۷۸	۱۳۰	۱۲۲	۱۰۷	۱۱۰	۹۵	۸۹	۱۲۱	۱۵۲	۱۶۲	۸۷	۳	۶۹	رقم نیشکر	مدل‌سازی							
	۲۸۳	۵	۱۲	۱۴	۱۹	۲۲	۱۴	۵۷	۱۸	۲۲	۳۷	۶۳	۵۷									
	۹۱۴	۷۸	۹۴	۸۷	۱۰۳	۱۲۳	۸۸	۹۹	۷۵	۸۲	۶۸	۱۷	۴۸									
	۵۶۶	۹۳	۹۳	۶۸	۸۱	۷۷	۱	۳۶	۲۴	۲۹	۴۱	۲۳	غیره									
۱	۴۶۸	۴۷	۵۹	۱	۵۲	۷۰	۳۳	۶۳	۴۶	۴۹	۳۲	۱۶	۱	سن نیشکر	مدل‌سازی							
	۶۱۳	۶۲	۵۶	۶۷	۶۷	۷۲	۴۵	۹۱	۵۳	۵۶	۲۰	۲۴	۲									
	۵۴۱	۵۸	۶۶	۷۴	۶۸	۵۵	۶۱	۴۰	۵۱	۲۵	۲۲	۲۱	۳									
	۵۱۷	۵۸	۶۳	۱۰۱	۴۹	۷۶	۱۸	۳۶	۲۳	۳۵	۳۲	۲۶	۴									
	۳۵۷	۴۸	۴۳	۲۴	۵۶	۲۴	۱۰	۴۴	۲۰	۳۱	۴۸	۹	۵									
	۴۴۵	۳۳	۳۴	۹	۲۱	۲۰	۲۵	۳۹	۷۶	۹۹	۷۹	۱۰	غیره									
۶۹	۳۰۲	۳۳	۳۱	۲۸	۲۵	۳۲	۲۰	۲۶	۳۷	۴۲	۲۳	۵	۶۹	رقم نیشکر	ارزیابی مدل‌ها							
	۷۳	۲	۵	۴	۳	۶	۲	۱۰	۵	۸	۱۲	۱۶	۵۷									
	۲۳۳	۲۵	۲۰	۱۶	۳۰	۲۷	۲۶	۳۴	۱۷	۱۷	۱۷	۴	۴۸									
	۱۲۹	۱۷	۲۴	۲۱	۲۰	۱۴	۰	۹	۸	۷	۷	۲	غیره									
۱	۱۰۴	۱۱	۱۰	۰	۱۴	۱۰	۹	۱۴	۱۳	۱۰	۷	۶	۱	سن نیشکر	ارزیابی مدل‌ها							
	۱۵۱	۱۷	۲۱	۱۴	۱۷	۱۴	۱۱	۲۷	۱۴	۸	۲	۶	۲									
	۱۴۴	۱۸	۱۳	۱۶	۱۵	۲۳	۹	۱۲	۱۳	۷	۱۱	۷	۳									
	۱۱۲	۱۴	۱۶	۲۱	۱۲	۱۷	۷	۸	۲	۵	۶	۴	۴									
	۹۲	۸	۱۲	۱۱	۱۲	۸	۴	۸	۳	۷	۱۵	۴	۵									
	۱۳۴	۹	۸	۷	۸	۷	۸	۱۰	۲۲	۳۷	۱۸	۰	غیره									

مدل‌سازی عملکرد نیشکر

هر یک از شاخص‌های سبزی‌نگی به دو روش مختلف انجام گردید. در روش اول مقدار تجمعی شاخص سبزی‌نگی در دوره اول رشد و در روش دوم مقدار تجمعی شاخص سبزی‌نگی در دوره دوم رشد

به منظور مشخص نمودن میزان ارتباط دوره‌های رشد با عملکرد نهایی مشاهده شده ساقه نیشکر، مدل‌سازی عملکرد نیشکر برای

نسبت به دو شاخص سبزیگی دیگر نقطه اوج کوتاه تری دارد ولی این شاخص در نقطه اوج شکل منظم تری داشته و باعث شده الگوریتم لبه یابی ساویتزکی- گلای با دقت بیشتری اعوجاج در نقاط اوج رشد را تصحیح نماید (بیضی های قرمز رنگ). میانگین عملکرد نیشکر در منطقه مورد مطالعه بر روی نقاط اوج درج شده است. با توجه به شکل سری زمانی فصلی سال ۱۳۸۴ به علت وقوع سرمازدگی شدید در زمستان و از بین رفتن قسمتی از محصول و سری های زمانی فصلی سال های ۱۳۸۸ و ۱۳۸۹ به علت وقوع پدیده گرد و خاک شدید و بی کیفیت شدن تصاویر ماهواره ای در مدل سازی ها استفاده نشد. سال های حذف شده با مستطیل سیاه روی شکل (۳) مشخص شده است.

الگوی رشد نیشکر

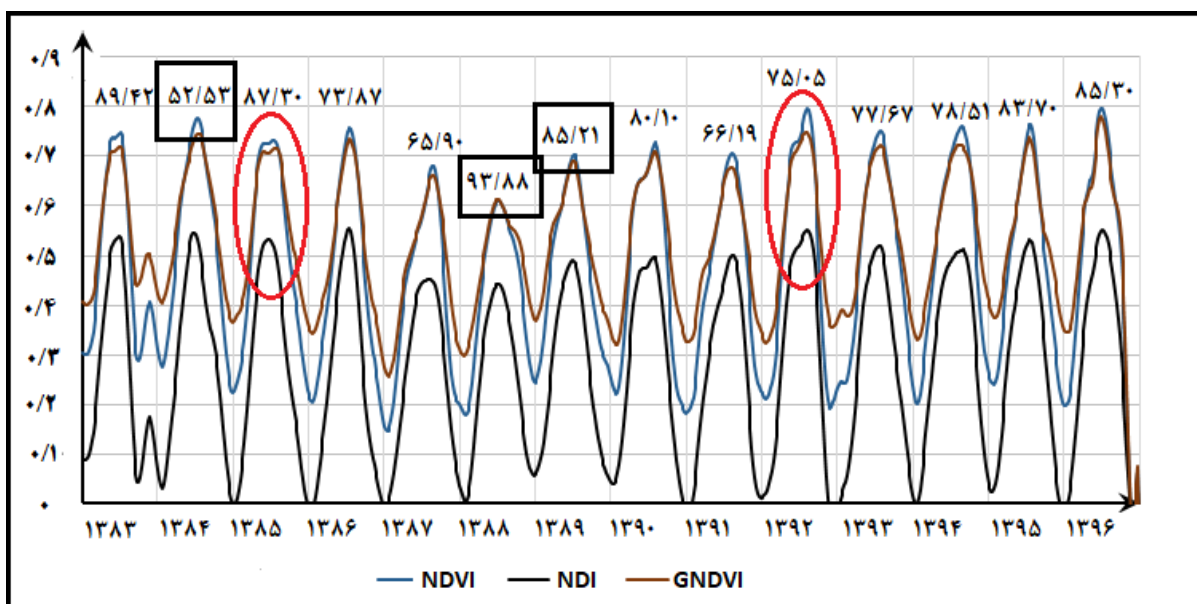
با میانگین گیری از ۱۱ الگوی فصلی باقیمانده، الگوی میانگین رشد نیشکر بر اساس زمان (واحد هفته) برای شاخص سبزیگی NDVI مربوط به منطقه مورد مطالعه بدست آمد. برای پارامتری نمودن الگوی رشد از ابزار Curve Fitting در نرم افزار متلب استفاده شد که بهترین برازش توسط یک منحنی چند جمله ای درجه چهارم صورت گرفت (ضریب تبیین ۰/۹۹).

(رابطه ۱)
$$Y = aX^4 + bX^3 + cX^2 + dX + e$$
 که در آن: Y مقدار شاخص سبزیگی مدل و X تعداد روز رشد از ابتدای سال شمسی ($X = \{6, 7, 8, \dots, 363\}$) و a برابر ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۵۱۸ و b برابر ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۳۸۲ و c برابر ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۷۳۷ و d برابر ۰/۰۰۰۰۰۰۰۰۰۱۲۲ و e برابر ۰/۲۴۸ است.

با استفاده از رگرسیون خطی ساده به عملکرد ساقه نیشکر مشاهده شده ربط داده شد. برای مدل های بدست آمده ضریب تبیین (R^2) و ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE) محاسبه شد. با مقایسه ضریب تبیین و شاخص RMSE هر یک از مدل ها، مدل منتخب هر روش مشخص گردید. بنابراین معلوم شد کدام شاخص سبزیگی برای پایش مراحل رشد اول و دوم مناسب تر است. در مدل سازی با روش سوم مجموع مقادیر تجمعی شاخص سبزیگی منتخب روش اول و شاخص سبزیگی منتخب روش دوم با استفاده از رگرسیون خطی ساده به عملکرد ساقه نیشکر مشاهده شده ربط داده شد و ضریب تبیین و شاخص RMSE محاسبه گردید (قسمت D فلوچارت شکل ۲). در انتها به منظور ارزیابی مدل ها عملکرد نیشکر در سطح مزارع منطقه مورد مطالعه بر اساس نمونه های استفاده نشده در مرحله مدل سازی تخمین زده شد و با مقدار مشاهده شده مقایسه گردید و ضریب تبیین و شاخص RMSE محاسبه گردید.

بحث و نتیجه گیری

در شکل (۳) سری های زمانی دو شاخص سبزیگی NDVI و GNDVI که از پرکاربردترین شاخص های سبزیگی در مدل سازی عملکرد نیشکر است در مقایسه با سری زمانی شاخص سبزیگی NDI که در این تحقیق نتایج خوبی داشته است ترسیم شده است. آنچه به طور واضح در شکل (۳) مشخص است نحوه پاسخ این سه شاخص در نقطه اوج رشد است. با اینکه شاخص سبزیگی NDI

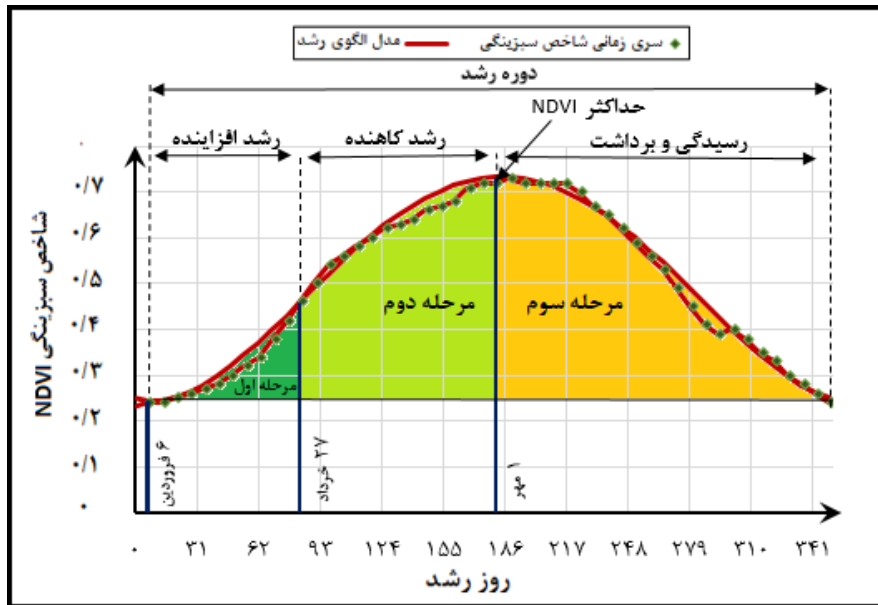


شکل ۳- سری های زمانی میانگین شاخص های سبزیگی NDVI، NDI و GNDVI

در شکل (۴) منحنی سری زمانی شاخص سبزیگی همراه با منحنی مدل الگوی رشد نیشکر در منطقه مورد مطالعه بر اساس

دوم مهرماه شروع شده و تا اوایل فروردین ماه ادامه می‌یابد. پس از مشخص شدن نقاط حساس الگوی رشد نیشکر مقادیر تجمعی هر یک از ۱۳ شاخص سبزینگی از سری‌های زمانی در مراحل رشد اول و دوم استخراج گردید و به عنوان داده‌های مستقل ورودی در پردازش‌های بعدی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج تحقیقی مشابه در برزیل نشان داد شاخص سبزینگی NDVI نمایش‌دهنده بسیار خوبی برای رشد نیشکر است (Lisboa et al., 2018).

شاخص سبزینگی NDVI ترسیم شده است. با توجه به این مدل الگوی رشد نیشکر، رشد نیشکر در سه مرحله طبقه‌بندی شد. مرحله اول رشد از حداقل اول منحنی رشد یعنی روز ۶ فروردین ماه شروع شده و پس از ۸۴ روز تا نقطه عطف اول منحنی در روز ۲۷ خردادماه ادامه پیدا می‌کند. مرحله دوم رشد از روز ۲۸ خردادماه شروع شده و پس از ۹۸ روز تا نقطه حداکثری رشد یعنی روز اول مهرماه ادامه پیدا می‌کند. مرحله سوم از نقطه روز



شکل ۴- الگوی رشد نیشکر بر اساس شاخص سبزینگی NDVI در منطقه مورد مطالعه

تن در هکتار رابطه خوبی با عملکرد نیشکر در پایان مرحله اول و اواسط دوره داشت دارا می‌باشند. و شاخص‌های سبزینگی تجمعی $GARI_2$ و NDI با ضرایب تبیین به ترتیب ۰/۵۶ و ۰/۵۴ و مقادیر $RMSE$ به ترتیب برابر ۱۰/۶۲ و ۱۰/۹۵ تن در هکتار نمایش‌دهنده خوبی برای عملکرد نیشکر در پایان مرحله دوم رشد و قبل از شروع عملیات برداشت می‌باشند. با توجه به نتایج، شاخص مناسب مرحله اول رشد شاخص $GNDVI$ و شاخص مناسب مرحله دوم رشد شاخص NDI انتخاب شد.

بررسی روش اول و دوم با ۱۳ شاخص سبزینگی باعث ایجاد ۲۶ مدل متفاوت گردید که هر مدل به‌طور جداگانه بررسی شد. در جدول (۲) ضرایب تبیین و $RMSE$ و شیب و عرض از مبدأ (به ترتیب a و b) روابط خطی این مدل‌ها برای مقایسه ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد شاخص‌های سبزینگی در دوره اول و دوم رشد روابط متفاوتی با عملکرد نیشکر دارند. شاخص‌های سبزینگی تجمعی $GNDVI$ و $NDVI$ با ضرایب تبیین به ترتیب ۰/۴۶ و ۰/۴۷ و مقادیر $RMSE$ به ترتیب برابر ۱۱/۶۸ و ۱۱/۷۱

جدول ۲- شاخص‌های ارزیابی و ضرایب روابط خطی مدل‌های عملکرد نیشکر

شاخص	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲	۱۳	مدل
R2	۰/۴۶*	۰/۳۹	۰/۴۷*	۰/۴۳	۰/۴۲	۰/۳۹	۰/۴۲	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۳۷	اول
RMSE	۱۱/۷۱*	۱۲/۵۰	۱۱/۶۸*	۱۲/۱۵	۱۲/۲۱	۱۲/۵۴	۱۲/۲۳	۱۲/۱۲	۱۱/۹۷	۱۱/۹۶	۱۱/۸۱	۱۲/۰۴	۱۲/۷۵	
a	۱۲/۴۷	۱۱/۶۵	۱۷/۰۸	۱۵/۸۷	۲۲/۶۰	۱۳/۸۷	۱۴/۹۷	۱۰/۱۷	۱۰/۹۰	۱۰/۱۹	۱۴/۱۰	۱۱/۱۹	۲۸/۰۷	
b	۲۵/۶۲	۵۵/۹۷	-۹/۳۲	۳۰/۴۲	۳۰/۹۸	۳۵/۹۳	۳۴/۴۰	۵۶/۷۷	۴۷/۷۰	۶۳/۷۴	۲۶/۹۲	۶۵/۰۸	۱۲/۳۷	دوم
R2	۰/۴۷	۰/۵۶*	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۵۱	۰/۵۰	۰/۵۱	۰/۵۲	۰/۴۹	۰/۵۰	۰/۵۳	۰/۵۴*	۰/۴۹	
RMSE	۱۱/۷۱	۱۰/۶۲*	۱۱/۴۰	۱۱/۲۳	۱۱/۲۵	۱۱/۳۰	۱۱/۲۴	۱۱/۳۶	۱۱/۴۴	۱۱/۳۲	۱۱/۰۷	۱۰/۹۵*	۱۱/۴۹	
a	۱۱/۳۱	۱۴/۶۳	۱۴/۲۷	۱۴/۶۲	۲۰/۷۳	۱۲/۴۵	۱۲/۵۶	۹/۹۰	۱۰/۴۰	۹/۳۹	۱۲/۸۴	۱۰/۴۰	۲۴/۶۰	
b	-۲۶/۰۲	-۱۶/۰۳	-۵۱/۵۶	-۱۷/۵۶	-۱۵/۸۹	-۹/۳۸	-۵/۸۲	۰/۸۶	-۷/۹۰	۹/۶۷	-۲۷/۵۵	۹/۱۶۲	۳۷/۱۲	

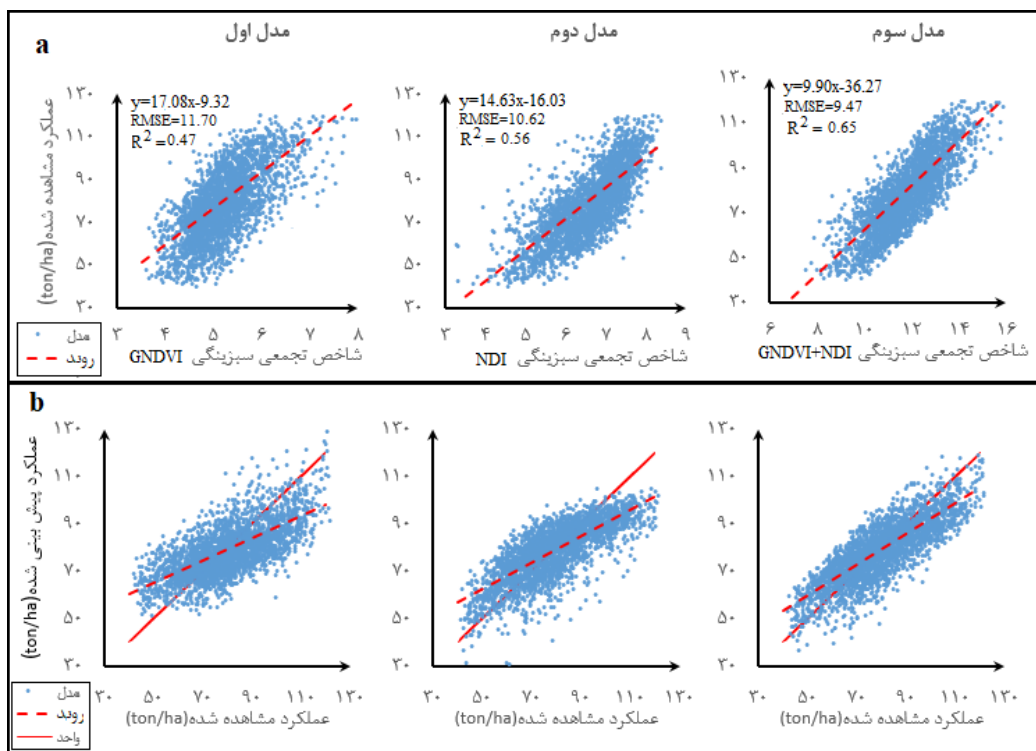
و NDI_i مقدار شاخص سبزینگی NDI در هفته زام. در شکل (۵) برازش متغیر مستقل شاخص تجمعی سبزینگی و عملکرد مشاهده شده (a) و همچنین برازش عملکرد مشاهده شده در مقابل عملکرد پیش بینی شده (b) مدل های منتخب در روش های اول و دوم و سوم ترسیم شده است. نتایج مدل سازی عملکرد نیشکر در سطح مزرعه نشان داد که مقادیر تجمعی بالاتر برای شاخص های سبزینگی با عملکردهای بالاتر همراه بوده است که این نتیجه با نتایج محققین دیگر مشابهت داشته است (Mutanga *et al.*, 2013; Rahman and Robson, 2016)

شکل (۵) نشان می دهد پراکندگی نمونه ها حول خط مدل در مدل سوم بهتر از مدل دوم و در مدل دوم بهتر از مدل اول توزیع شده است.

با توجه به نتایج ارائه شده در جدول (۲) در روش سوم، مدل بهینه شده بر اساس نتایج مدل اول و دوم طراحی شد. در این روش مجموع تجمعی شاخص های سبزینگی GNDVI و NDI به ترتیب مربوط به مرحله اول و دوم رشد در یک مدل رگرسیون خطی برازش شد. ضریب تبیین ۰/۶۵ و RMSE برابر ۹/۴۷ تن در هکتار این مدل رابطه بسیار خوبی با عملکرد ساقه در هکتار نیشکر نشان داد. رابطه (۲) عملکرد ساقه نیشکر را بر اساس مدل بهینه شده سوم پیش بینی می کند. (رابطه ۲)

$$Y = \left(\sum_{i=1}^{12} GNDVI_i + \sum_{j=13}^{26} NDI_j \right) 9.8973 - 36.2653$$

Y عملکرد ساقه نیشکر پیش بینی شده بر اساس تن در هکتار، $GNDVI_i$ مقدار شاخص سبزینگی در هفته نام



شکل ۵- برازش مقادیر تجمعی شاخص سبزینگی و عملکرد مشاهده شده در مدل های منتخب (a) برازش عملکرد مشاهده شده در مقابل عملکرد پیش بینی شده توسط مدل (b)

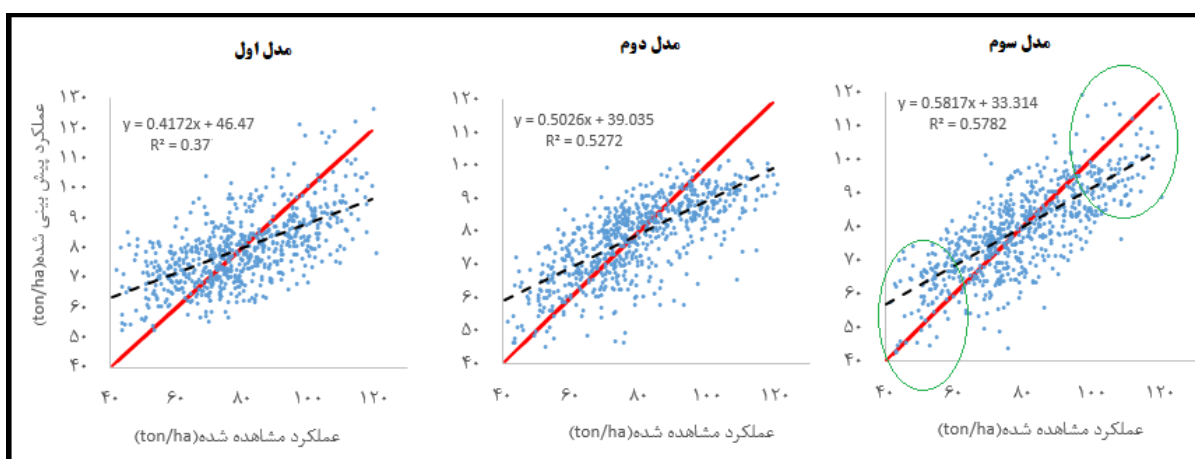
جدول ۳- مشخصات مدل های منتخب پیش بینی عملکرد نیشکر در منطقه مورد مطالعه

مدل	شاخص سبزینگی	دوره رشد		RMSE	R ²	ضرایب		
		اول	دوم			a	b	c
۱	GNDVI	✓		۱۱/۶۸	۰/۴۷	۱۷/۰۸	-۹/۳۲	
۲	NDI		✓	۱۰/۶۲	۰/۵۹	۱۴/۶۳	-۱۶/۰۳	
۳	GNDVI+NDI	✓	✓	۹/۴۷	۰/۶۵	۹/۹۰	-۲۶/۲۷	

X₁ و X₂ به ترتیب مقدار تجمعی شاخص در مرحله اول و دوم است

نیشکر ایجاد کند. پیش‌بینی عملکرد نیشکر در پایان دوره رشد دوم و قبل از شروع عملیات برداشت با استفاده از مدل سوم مبتنی بر شاخص سبزی‌نگی GNDVI و NDI امکان برنامه‌ریزی عملیات برداشت و بازاریابی و فروش و انبار محصولات صنعتی حاصل از نیشکر را فراهم می‌آورد. همچنین علیرغم نتایج خوب مدل سوم مطابق شکل (۶) این مدل در پیش‌بینی عملکرد نیشکر در مزارع با پتانسیل بسیار بالا و بسیار پایین خوب عمل نمی‌کند. در جدول (۴) ضرایب تبیین و RMSE چند مدل داخلی و خارجی با نتایج مدل سوم این تحقیق مقایسه شده است. با توجه به بهتر بودن ضرایب ارزیابی مدل سوم نسبت به دو مدل دیگر، این مدل، مدل نهایی پیش‌بینی عملکرد ساقه در هکتار نیشکر انتخاب شد.

در جدول (۳) پارامترهای مدل‌های منتخب پیش‌بینی عملکرد نیشکر ارائه شده است. ارزیابی هر سه مدل منتخب با داده‌های استفاده‌نشده در مرحله مدل‌سازی انجام شده و ضرایب تبیین به ترتیب ۰/۳۷، ۰/۵۳ و ۰/۵۸ و شاخص RMSE به ترتیب برابر ۱۳/۴۵، ۱۱/۵۹ و ۱۰/۹۹ تن در هکتار بدست آمد. در شکل (۶) برازش عملکرد مشاهده‌شده در مقابل عملکرد پیش‌بینی‌شده هر سه مدل ترسیم شده است. پراکندگی نقاط حول خط واحد در مدل سوم به مراتب منظم‌تر از مدل دوم و اول است و خط روند انحراف کم‌تری نسبت به خط واحد دارد. استفاده از سری زمانی شاخص سبزی‌نگی GNDVI برای پیش‌بینی عملکرد نیشکر در طول دوره رشد اول فرصت مناسبی برای تولیدکنندگان نیشکر جهت پیش وضعیت رشد محصول



شکل ۶- برازش عملکرد مشاهده‌شده در مقابل عملکرد پیش‌بینی‌شده

جدول ۴- مقایسه نتایج این تحقیق با نتایج دیگر محققین

منطقه	ماهواره	شاخص	ضرایب تبیین	RMSE	ارجاع
این تحقیق	لندست	NDI, GNDVI	۰/۶۵	۹/۴۷	مدل سوم این تحقیق
شرکت میرزا کوچک خان	مادیس	NDVI	۰/۵۳-۰/۵۱	۷/۲۱-۸/۲۰	(Essari and Mirlatifi, 2004)
جزیره ریونیون	اسپات		۰/۷۸	گزارش نشده	(Bégué et al., 2010)
زیمبابوه	اسپات	NDVI	۰/۴۱-۰/۵۹-۰/۶۴	۱۰/۲۷-۹/۸۴-۷/۳۶	(Mutanga et al., 2013)
جزایر ریونیون	اسپات	NDVI	گزارش نشده	۴/۸۰-۹/۱۱	(Morel et al., 2014)
برزیل	مادیس	EVI	۰/۵۹-۰/۶۹-۰/۵۹	گزارش نشده	(Vicente et al., 2013)

اولین بار در این تحقیق برای پیش‌بینی نیشکر استفاده شده است، رابطه خوبی با عملکرد نیشکر در مرحله دوم رشد داشته است.

سپاسگزاری

از معاونت پژوهشی دانشگاه تهران و مدیریت عامل و معاونت کشاورزی شرکت کشت و صنعت امام خمینی (ره) جهت در اختیار دادن اطلاعات لازم و فراهم آوردن امکانات این تحقیق تشکر می‌شود.

نتایج این تحقیق در مدل‌سازی عملکرد نیشکر در سطح مزرعه و با استفاده از تصاویر ماهواره لندست ۷ که ۲۲ درصد تصویر به خاطر نوارهای سیاه محو شده است بسیار امیدوارکننده است. نتایج این تحقیق نشان داد شاخص سبزی‌نگی GNDVI برای مرحله اول رشد و شاخص سبزی‌نگی NDI برای مرحله دوم رشد عملکرد بهتری نسبت به سایر شاخص‌های سبزی‌نگی داشته‌اند. این تحقیق نشان داد شاخص سبزی‌نگی NDI که برای

REFERENCES

- Apan, A., Held, A., Phinn, S., and Markley, J. (2004). Detecting sugarcane "orange rust" disease using EO-1 Hyperion hyperspectral imagery. *International Journal of Remote Sensing* 25(2): 489-498
- Bégué, A., Lebourgeois, V., Bappel, E., Todoroff, P., Pellegrino, A., Baillarin, F., and Siegmund, B. (2010). Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI. *International Journal of Remote Sensing*, 31 (20), 5391-5407.
- Cai, Z., Jönsson, P., Jin, H., and Eklundh, L. (2017). Performance of smoothing methods for reconstructing NDVI time-series and estimating vegetation phenology from MODIS data. *Remote Sensing*, 9, 1271
- Crist, E. P. (1985). A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data. *Remote Sensing of Environment*. 17(3), 301-306. doi.org/10.1016/0034-4257(85)90102-6
- Do Bendini, H. N., Sanches, I. D., Körting, T. S., Fonseca, L. M. G., Luiz, A. J. B., and Formaggio, A. R. (2016). Using Landsat 8 image time series for crop mapping in a region of Cerrado, Brazil. In *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*, 41, 845-850. doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B8-845-2016
- Elhag, A., and Abdelhadi, A. (2018). Monitoring And Yield Estimation of Sugarcane Using Remote Sensing and GIS. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 7(1), 170-179
- Essari, M., and Mirlatifi, S. (2004). Exploring the use of TERRA satellite, MODIS sensor, CSWB model imagery To estimate the production of cane sugar. Case study of sugarcane cultivation and production of Mirzakocheh Khan. Ph. D. dissertation, University of Tarbiat Modares. (In Farsi)
- FAOSTAT (2017). Sugarcane stat Of United Nation. Retrieved December 15 from <http://www.fao.org/faostat/en/#data>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., and Merzlyak, M. N. (1996). Use of a green channel in remote sensing of global vegetation from EOS- MODIS. *Remote Sensing of Environment*. 58(3), 289-298 ,doi.org/10.1016/S0034-4257(96)00072-7
- Gitelson, A. A., and Merzlyak, M. N. (1998). Remote sensing of chlorophyll concentration in higher plant leaves. *Advances in Space Research*. 22(5), 689-692, doi.org/10.1016/S0273-1177(97)01133-2
- Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., and Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 83(1-2), 195-213, doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2
- Huete, A., Justice, C., and Liu, H. (1994). Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS. *Remote Sensing of Environment*. 49(3), 224-234, doi.org/10.1016/0034-4257(94)90018-3
- Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*. 25(3), 295-309, doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X
- IKAI. District (2018). Iman Khomeini Agro Industry. Retrieved September 18, 2018, from <http://www.ik-sugarcane.ir/>
- Jiang, Z., Huete, A., Didan, K., and Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*. 112(10), 3833-3845,
- Kaufman, Y. J., and Tanr, D. (1992). Atmospherically Resistant Vegetation Index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 30(2), 261-270.
- Kauth, R. J., and Thomas, G. S. (1976). The tasselled cap - A graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Laboratory for Applications of Remote Sensing*. doi.org/10.1529/biophysj.106.083931
- Landsat-SLC-off. (2018). Landsat7 SLC off. Retrieved November 18, 2018, from <https://landsat.usgs.gov/landsat-7>
- Landsat7-BQA. (2018). Landsat Collection 1 Level-1 Quality Assessment Band. Retrieved November 18, 2018, from <https://landsat.usgs.gov/collectionqualityband>
- Landsat7-L1TP. (2018). Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) Level-1 Data Products. Retrieved November 18, 2018, from <https://lta.cr.usgs.gov/LETMP>
- Lisboa, I. P., Damian, J. M., Cherubin, M. R., Barros, P. P. da S., Fiorio, P. R., Cerri, C. C., and Cerri, C. E. P. (2018). Prediction of Sugarcane Yield Based on NDVI and Concentration of Leaf-Tissue Nutrients in Fields Managed with Straw Removal. *Agronomy*. doi.org/10.3390/agronomy8090196
- McNairn, H., and Protz, R. (1993). Mapping corn residue cover on agricultural fields in oxford county, ontario, using thematic mapper. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 19(2), 152-159.
- Mobasheri, M. R., Chahardoli, M., and Farajzadeh, M. (2010). Introducing PASAVI and PANDVI methods for sugarcane physiological date estimation, using ASTER images. *Journal of Agricultural Science and Technology*. Journal agriculture science technology. 12, 309-320
- Morel, J., Bégué, A., Todoroff, P., Martiné, J. F., Lebourgeois, V., and Petit, M. (2014). Coupling a sugarcane crop model with the remotely sensed time series of fIPAR to optimise the yield estimation. *European Journal of Agronomy*. 61, 60-68, doi.org/10.1016/j.eja.2014.08.004
- Muir, J. S., Robson, A. J., and Rahman, M. M. (2018). 'Sugar from space': Using satellite imagery to predict cane yield and variability. In 40th Annual Conference Australian Society of Sugar Cane Technologists, ASSCT 2018.

- Mutanga, S., Schoor, C. Van, Olorunju, P. L., Gonah, T., and Ramoelo, A. (2013). Determining the Best Optimum Time for Predicting Sugarcane Yield Using Hyper-Temporal Satellite Imagery. *Advances in Remote Sensing*. 2(3), 269-275, doi.org/10.4236/ars.2013.23029
- Rahman, M. M., and J. Robson, A. (2016). A Novel Approach for Sugarcane Yield Prediction Using Landsat Time Series Imagery: A Case Study on Bundaberg Region. *Advances in Remote Sensing*. 5(2), 93-102, doi.org/10.4236/ars.2016.52008
- Robson, A., Abbott, C., Lamb, D., and Bramley, R. O. B. (2012). Developing sugar cane yield prediction algorithms from satellite imagery. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*. 34(11).
- Rondaux, G., Steven, M., and Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*. 55(2), 95-107, doi.org/10.1016/0034-4257(95)00186-7.
- Rouse, J.W, Haas, R.H., Scheel, J.A., and Deering, D. W. (1974). 'Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. In *Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium* (pp. 48–62).
- Vicente, L. E., Gomes, D., Victoria, D. de C., Koga-Vicente, A., and Iwashita, F. (2013). Evaluation of annual sugarcane monitoring using MODIS/EVI temporal series and spectral mixture analysis approach. In *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/264458361>
- Zhang, R. H., Rao, N. X., and Liao, K. N. (1996). Approach for a vegetation index resistant to atmospheric effect. *Acta Botanica Sinica*, 38(1), 53–62.