



سنجش از دور & GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۷
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.10, No.3, Autumn 2018

۵۳-۷۴

تخمین تولید محصول یونجه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 منطقه مورد مطالعه: شرکت کشاورزی و دامپروری مگسال (قزوین)

فرزانه حدادی^۱، محسن آزادبخت^{۲*}، مانده بهی^۳، حمیدصالحی شهرابی^۱، امیر معینی راد^۴

۱. کارشناس ارشد سنجش از دور، مرکز تحقیقات فضایی، پژوهشگاه فضایی ایران
۲. استادیار مرکز مطالعات سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه شهید بهشتی
۳. دانشجوی دکتری سنجش از دور، گروه سنجش از دور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
۴. دانشجوی دکتری سنجش از دور، دانشکده نقشه برداری (ژئودزی و ژئوماتیک)، دانشگاه صنعتی نصیرالدین طوسی

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۸/۵

تاریخ دریافت مقاله: ۹۷/۲/۱

چکیده

در طول چند دهه گذشته، شاخص‌های پوشش گیاهی متعددی برای تخمین تولید محصولات کشاورزی توسعه داده شده‌اند که هر یک از آن‌ها با توجه به باندهای مورد استفاده و فرمول جبری خود، به مقادیر متفاوتی از تراکم و شاخص سطح برگ گیاهان زراعی حساسیت دارند. مطالعه بعضی از محصولات زراعی چندساله مانند یونجه، که در هر سال به دفعات برداشت می‌شود، بسیار پیچیده بوده و کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این مقاله، از مهم‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی توسعه داده شده در برآورد تولید یونجه، توسط تصاویر سری زمانی Sentinel-2 استفاده می‌شود. در این تحقیق، اقدام به جمع‌آوری دوره‌ای ۱۴۴ نمونه، به شیوه تخریبی از مزارع زیرکشت محصول یونجه شرکت کشاورزی و دامپروری مگسال (قزوین)، به صورت تقریباً نزدیک به زمان گذر ماهواره، شد و سپس کارایی ۱۰ شاخص از معروف‌ترین شاخص‌های پوشش گیاهی، مبتنی بر تصاویر Sentinel-2 برای تخمین تولید محصول یونجه، مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج تحقیق حاضر، نشان داد که تولید تخمین زده شده یونجه، با استفاده از شاخص $GNDVI$ نسبت به سایر شاخص‌ها، دارای بالاترین همبستگی ($R^2 = 0.69$) و کمترین جذر میانگین مربعات ($RMSE = 0.316 \text{ kg/m}^2$) با داده‌های برداشت شده میدانی در اواسط مرداد ماه بوده است. به علاوه در نتایج این تحقیق، نشان داده شد که شاخص‌های لبه قرمز، مشکل اشباع‌شدگی شاخص‌های پوشش گیاهی در محصول یونجه را نتوانسته‌اند برطرف کنند و شاخص‌های پوشش گیاهی سبز، نسبت به شاخص‌های لبه قرمز جهت تخمین تولید این محصول، توانایی بیشتری را نشان داده‌اند.

کلیدواژه‌ها: سنجش از دور، کشاورزی، شاخص طیفی لبه قرمز، تخمین تولید، یونجه، Sentinel-2

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، مرکز مطالعات سنجش از دور و GIS

۱- مقدمه

عوامل محیطی مانند اتمسفر، خاک، سنگ و پوشش گیاهی می‌تواند به جذب انرژی تابشی و بازتابندگی آن منجر شود. بازتابندگی ثبت شده، توسط سنجده‌های سنجش از دور را می‌توان برای توصیف کمی و کیفی پدیده‌های سطح زمین استفاده کرد، به طور مثال، از بازتابندگی در محدوده‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک طیف الکترومغناطیس، می‌توان در توصیف خصوصیات پوشش گیاهی بهره برد (Elachi and Van Zyl 2006).

در تحقیقات مختلف، جهت تعیین رابطه کمی، بین داده‌های سنجش از دور و تولید محصول، از دو روش استفاده شده است (Hamar, Ferencz et al. 1988, Sirotenko 2001, Ferencz, Bognar et al. 2004). در روش اول، از داده‌های ماهواره‌ای در مدل‌های فیزیولوژیکی گیاه یا مدل‌های هواشناسی کشاورزی، استفاده می‌شود که از مزایای آن می‌توان به امکان شبیه‌سازی رشد محصول، برآورد بایومس و تولید در زمان‌های مختلف اشاره کرد. از جمله محدودیت‌های این روش‌ها، تعداد زیاد داده‌های ورودی، مانند شاخص سطح برگ (LAI)^۱، مقدار کلروفیل و غیره است. استخراج مقادیر دقیق آن‌ها از داده‌های سنجش از دور، پیچیده بوده و جمع‌آوری میدانی آن‌ها پرهزینه است (Badhwar and Henderson 1981, Brakke and Kanemasu 1981, Asrar, Fuchs et al. 1984, Pantazi, Moshou et al. 2016). از جمله این روش‌ها می‌توان به مدل‌های رشد محصول SAFY^۲ و مدل Aqua crop^۳ اشاره کرد (Hadria, Duchemin et al. 2008, Raes, Steduto et al. 2009). روش دوم، برآورد مقدار تولید محصول، بر اساس روابط تجربی و آماری، مانند رگرسیون ساده و

به منظور مدیریت و برنامه‌ریزی در بخش کشاورزی، ضروریست تا اطلاعات دقیقی در زمینه‌های مختلف، مانند تولید محصول فراهم شود. امروزه برآورد تولید، به عنوان یکی از پارامترهای اساسی در کشاورزی دقیق^۱، در مقیاس منطقه‌ای و ملی محسوب می‌شود. عملکرد محصول، به میزان تولید پوشش گیاهی در طول رشد گیاه گفته می‌شود که نتیجه ترکیب داده‌های محیطی مانند تابش خورشید، میزان رطوبت، ساختار خاک و دیگر عوامل مؤثر بر رشد گیاه است (Ferencz, Bognar et al. 2004). تخمین تولید محصول در ایران و بسیاری از کشورهای جهان، براساس روش‌های سنتی، مانند جمع‌آوری اطلاعات و گزارش‌های میدانی صورت می‌گیرد. اکثر این روش‌ها، وقت‌گیر و هزینه‌بر بوده و به دلیل مشاهدات ناقص زمینی، دارای خطای زیادی هستند. این خطاها، باعث برآورد نادرست تولید محصول، در هر منطقه می‌شوند (Reynolds, Yitayew et al. 2000). در مقابل، داده‌های سنجش از دور، قابلیت بالایی در تأمین داده‌های مکانی به صورت منطقه‌ای و جهانی دارند، به طوری که تمامی پدیده‌های سطح زمین در زمان واقعی خود پوشش داده می‌شود (Reynolds, Yitayew et al. 2015, Lobell, Thau et al. 2000). در حالت کلی داده‌های سنجش از دور با کاهش تحقیقات میدانی، هزینه و زمان مطالعات را کمتر می‌کنند (Doraiswamy, Sinclair et al. 2005, Leroux, Baron et al. 2016). مطالعات سنجش از دور در زمینه کشاورزی، شامل بررسی ویژگی‌های پوشش گیاهی، تخمین تولید، برآورد بایومس، نظارت بر سلامت و استرس گیاه است (Wu, Wang et al. 2007). تعامل انرژی تابشی خورشید با

^۱Simple Algorithm For Yield estimate

^۲Crop-water productivity model

^۱Precision agriculture

^۲Leaf area index

داده‌های سنجش از دور در مراحل مختلف رشد گیاه بررسی کرد. تجزیه و تحلیل این داده‌ها، امکان استخراج ویژگی‌های گیاه را فراهم کرده و به درک بهتر تغییرات بیوفیزیکی و فنولوژیکی گیاه در اکوسیستم‌های مختلف کمک می‌کند (Schwartz and Karl 1990).

در بین شاخص‌های گیاهی، شاخص نرمال شده پوشش گیاهی^۱ (NDVI)، براساس مقادیر بازتابندگی مادون قرمز نزدیک (NIR) و قرمز است که به دلیل رابطه بسیار نزدیک با شاخص‌هایی مانند شاخص سطح برگ (Goswami, Gamon et al. 2015, Kross, McNairn et al. 2015, Sakamoto, Gitelson et al. 2014,)، بایومس (Wang, Nie et al. 2016)، تابش فعال فتوسنتزی و تولید محصول در تحقیقات مختلف استفاده شده است (Leroux, Baron et al. 2016). علاوه بر این، در تحقیقات مختلف، نشان داده شده که مقادیر NDVI در یک روز مشخص، مانند زمان حداکثر رشد و یا سری زمانی شاخص NDVI را می‌توان برای پیش‌بینی تولید محصول استفاده کرد (Lewis, Rowland et al. 1998,)، Bolton and Mkhabela, Mkhabela et al. 2005, Friedl 2013). بولتن^۲ و فریدل^۳ (۲۰۱۳)، با استفاده از سری زمانی تصاویر MODIS و شاخص‌های پوشش گیاهی مانند NDVI و EVI2، مقدار تولید محصولات زراعی ذرت و سویا را در مقیاس وسیع تخمین زدند. جهت تخمین تولید، از مشخصات فنولوژیک محصولات، استفاده شده است. آنها بهترین زمان برای تخمین تولید ذرت و سویا را به ترتیب ۶۵-۷۵ و ۸۰ روز بعد از مرحله سبزیبندی بدست آوردند. نتایج تحقیق آنها نشان داد، شاخص EVI2 بهترین شاخص برای پیش‌بینی تولید ذرت در مناطق غیر نیمه خشک است ($R^2 = 0.67$).

^۳Friedel

چندگانه، بین داده‌های تصاویر ماهواره‌ای و پارامترهای فیزیکی گیاه، مانند بایومس، تولید محصول از طریق بازتاب طیفی سطح تاج پوشش و شاخص‌های پوشش گیاهی است (Petropoulos and Kalaitzidis, Malingreau 1989, Kogan, Salazar et al. 2012, Li, Zhao et al. 2015). از جمله محدودیت‌های روش دوم، این است که فرض می‌کنند روابط رگرسیونی نسبتاً ثابت است (Ferencz, Bogner et al. 2004). اما نتایج برآورد، نسبت به مکان و زمان تغییر می‌کند (Pantazi, Moshou et al. 2016).

شاخص‌های پوشش گیاهی از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌شود و در تحقیقات مختلف جهت نظارت بر کشاورزی و برآورد محصول استفاده شده است (Myneni, Hall et al. 1995). این شاخص‌ها، براساس یک رابطه جبری بین باندهای مختلف تصاویر هستند که با فعالیت فتوسنتزی گیاه و شاخص سطح برگ همبستگی دارند، لذا می‌توان از آنها در برآورد بایومس تاج پوشش گیاهی و تولید محصول، استفاده کرد (Tucker 1979). اساس کار این شاخص‌ها بر روی اختلاف باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک است. دلیل این امر، خاصیت جذب نور قرمز توسط رنگدانه‌های موجود در کلروفیل است که باعث انعکاس کمتر گیاه در باند قرمز و انعکاس شدید در باند مادون قرمز نزدیک می‌شود. با افزایش بایومس، مقدار کلروفیل تاج پوشش افزایش می‌یابد، بنابراین جذب تابش افزایش می‌یابد (Shunlin 2004).

شاخص‌های پوشش گیاهی می‌توانند برای کمی کردن وضعیت گیاه و ارزیابی میزان بایومس و یا تولید محصولات کشاورزی بکار گرفته شوند. به‌علاوه تغییرات پوشش گیاهی، در طول زمان را می‌توان از سری زمانی

^۱Normalized difference vegetation index (NDVI)

^۲Bolton

برآورد و باهم مقایسه کردند. آنها مقادیر شاخص سطح برگ را از طریق داده‌های بازتاب ۸ روزه محاسبه کردند و مجموع شاخص سطح برگ را از ابتدا تا انتهای فصل رشد، توسط داده‌های زمینی و تابع لجستیک برازش دادند و دوام مساحت سطح برگ را بررسی کردند^۵ (LAD). شاخص LAD، مقدار متوسط شاخص سطح برگ، در زمان ظهور تا زمان بلوغ محصول است. جهت محاسبه پارامترهای این شاخص از مدل‌های فنولوژی، برای استخراج زمان ظهور و بلوغ محصول استفاده شده است. نتایج تحقیق آنها نشان داد برای برآورد تولید ذرت در مناطقی با تغییرپذیری بالا، شاخص LAD نسبت به شاخص‌های گیاهی در هر یک از مراحل رشد گیاه عملکرد بهتری دارد. همچنین شاخص LAD با مقدار ماده خشک محصول و تولید، رابطه معناداری نشان داده است (Ban, Kim et al. 2016). در تحقیقی دیگر، جانسون^۶ (۲۰۱۶) به منظور تعیین مقدار همبستگی شاخص‌های مختلف با مقدار تولید محصولات کشاورزی از سری زمانی تصاویر MODIS استفاده کرده است. محصولات مورد بررسی شامل جو، کلزا، ذرت، پنبه، سیب زمینی، برنج، سویا و گندم است. داده‌های MODIS شامل شاخص NDVI، سهم تابش فعال فتوسنتزی^۷ (FPAR)، شاخص سطح برگ (LAI) و تولید ناخالص اولیه^۸ (GPP)، دمای روزانه^۹ (DLST) و شبانه سطح زمین^{۱۰} (NLST) است. تصاویر مورد استفاده نیز با فواصل زمانی ۸ روزه است. قدرت تفکیک تصاویر NDVI، ۲۵۰ متر و محصولات دیگر ۱۰۰۰ متر بوده است. مجموعه

اما شاخص NDWI در مناطق نیمه خشک، عملکرد بهتری نشان داده است ($R^2 = 0.69$). شاخص‌های NDVI و EVI2 تولید سویا را تقریباً به‌طور برابر، پیش‌بینی کرده‌اند (به ترتیب $R^2 = 0.69$ و $R^2 = 0.7$). به طور کلی، نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده ترکیبی از مشخصات فنولوژی محصول و شاخص‌های EVI2 و NDWI مزیت قابل توجهی، جهت برآورد تولید ذرت و سویا مبتنی بر داده‌های سنجنش از دور دارد (Bolton and Friedl 2013). مورل^۱ و همکاران (۲۰۱۴) نیز با استفاده از سری زمانی تصاویر Sentinel-2 و مقایسه سه روش مختلف، موفق شدند تولید محصول نیشکر را برآورد کنند. روش اول استفاده از روابط تجربی و آماری و شاخص NDVI تجمعی، در طول دوره رشد محصول نیشکر است و روش دوم و سوم از مدل رشد محصول مونته^۲ و MOSIACAS^۳ استفاده شده است. هر یک از مدل‌های روش اول و دوم به تنهایی با مدل رشد محصول روش سوم مقایسه و مورد بحث قرار گرفت. نتایج، نشان داد که مدل تجربی خطی، بهترین نتایج را در مقیاس مزرعه نشان داده است ($RMSE = 10.4$ تن در هکتار). آنها اشاره کردند این روش ساده‌ترین راه، برای برآورد تولید است و به داده‌های کمتری نیاز دارد و به نظر می‌رسد مناسب‌ترین روش برای پیش‌بینی تولید محصول نیشکر در مقیاس مزرعه است (Morel, Todoroff et al. 2014). در مطالعه دیگر بن^۴ و همکاران (۲۰۱۶)، با استفاده از داده‌های بازتاب زمینی MODIS، مقدار تولید محصول ذرت را در دو منطقه با شرایط اقلیمی مختلف

^۶ Johnson

^۷ Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation

^۸ Gross primary production

^۹ Daytime Land Surface Temperature

^{۱۰} nighttime LST

^۱ Morel

^۲ Monteith crop model

^۳ forced-coupling method with a sugarcane crop model

^۴ Ban

^۵ Leaf Area Duration

2007). در تحقیق دیگر، مشابه با تحقیق حاضر، کایاد^۳ و همکاران در سال ۲۰۱۵ با استفاده از سری زمانی تصاویر لندست ۸ و مقدار تجمعی شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف، مانند EVI، SAVI، GRVI، GNDVI و LSWI، مقدار تولید محصول یونجه را در مراحل مختلف رشد بررسی کرده‌اند. نتایج آنها نشان داد، بازتابندگی NIR و مقدار تجمعی شاخص‌های NDVI و SAVI به ترتیب در روزهای ۱۴، ۱۶ و ۲۳ روز پس از برداشت، بالاترین مقدار ضریب تعیین را با مقدار تولید یونجه داشته و ضریب تعیین و سطح معناداری آزمون به ترتیب بین مقادیر ۰/۵۶-۰/۵۳ و ۰/۰۰۰۰۲-۰/۰۰۰۰۲ متغیر بوده است (Kayad, Al-Gaadi et al. 2015).

شاخص پوشش گیاهی نرمال شده^۴ (NDVI)، نشان‌دهنده مقدار سبزی‌نگی و میزان سلامت پوشش گیاهی است. جذب بالای کلروفیل در محدوده قرمز طیف الکترومغناطیس، منجر به عدم حساسیت NDVI به تراکم بالای پوشش گیاهی و اشباع این شاخص می‌شود (Huete, Didan et al. 2002). به‌منظور رفع این نقیصه، شاخص‌های متعددی ارائه شده‌اند، اما اکثر آن‌ها دارای مشکل مشابهی با شاخص NDVI هستند. در تحقیقات گذشته، محدوده لبه قرمز طیف الکترومغناطیس، برای افزایش حساسیت شاخص‌های پوشش گیاهی در گیاهان با تراکم متوسط و بالا استفاده می‌شود (Gitelson, Merzlyak et al. 1996). محدوده لبه قرمز در مرز بین جذب زیاد کلروفیل در ناحیه قرمز و بازتابندگی زیاد کلروفیل، طول موج مادون قرمز قرار دارد. سنجنده MSI ماهواره Sentinel-2 با داشتن محدوده لبه قرمز، پوشش گسترده، تکرار کوتاه و طول عمر طولانی، پتانسیل بالایی

داده‌های MODIS از هر دو ماهواره Terra و Aqua و از داده‌های زمینی، مقدار متوسط سالانه در سطح منطقه برای ارزیابی روابط شاخص‌های مختلف با مقدار تولید محصولات مختلف، در ایالات متحده آمریکا استفاده شده است. شاخص‌های پوشش گیاهی تمام محصولات، به استثنای برنج، در اواسط فصل رشد با مقدار تولید، رابطه معناداری نشان دادند و رابطه شاخص NDVI کمی بهتر از FPAR مشاهده شده است. شاخص سطح برگ به مقدار تولید کمتر وابسته است و GPP به طور کلی رابطه ضعیفی را نشان داده است. برعکس، برخی از محصولات، به ویژه کلزا، ذرت و سویا، همبستگی منفی با DLST را در اواسط تابستان نشان دادند. اما شاخص NLST با تولید محصول ارتباطی نداشته است. در نهایت، EVI بهترین رابطه را با تولید نشان داده است (Johnson 2016). دس^۱ و کرن^۲ در سال ۲۰۰۷ مقدار تولید محصول یونجه را با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی MGVI و MTCI و طیف سنج MERIS ماهواره ENVISAT، به ترتیب در سه حالت (۱) زمان حداکثر فصل رشد، (۲) مساحت زیر سطح منحنی شاخص‌های MGVI و MTCI از ابتدای فصل رشد تا حداکثر فصل رشد و (۳) مساحت کل زیر سطح منحنی بررسی کردند. در نهایت، هر دو شاخص MGVI و MTCI رابطه قوی با مقدار تولید نشان داده‌اند. اما شاخص MTCI نسبت به شاخص MGVI عملکرد بهتری داشت. آنها پیشنهاد دادند، شاخص‌های کلروفیل با محدوده لبه قرمز، نتایج بهتری نسبت به شاخص‌های برآورد مقدار شاخص سطح برگ دارند. همچنین حالت‌های دوم و سوم بالاترین مقدار ضریب تعیین را با مقدار تولید یونجه نشان داده است (Dash and Curran

^۳Kayad

^۴Normalized Difference Vegetation Index

^۱Dash

^۲Curran

شهریورماه انجام می‌شود. کاشت بهاره، معمولاً بعد از رفع سرمای بهاره از نیمه دوم اردیبهشت‌ماه الی خردادماه انجام می‌شود.^۴ برداشت چین اول یونجه، براساس زمان رشد و در مرحله گل‌دهی انجام می‌شود، ولی در چین‌های بعدی در مرحله ظهور گل‌های بنفش در مزرعه بوده، زیرا در این زمان یونجه دارای بیشترین کیفیت علوفه است. به نظر می‌رسد، این الگوی نامنظم در کاشت و برداشت محصول موجب شده تا تخمین میزان تولید یونجه کمتر مورد توجه قرار گیرد. به همین دلیل، در اکثر مطالعات انجام‌شده بیشتر به محصولاتی مانند گندم، جو و ذرت پرداخته‌شده است. استفاده از اطلاعات سنجش از دور، این امکان را برای کشاورزان فراهم می‌کند تا تغییرات مقدار تولید محصولات زراعی مانند عناصر غذایی خاک، رطوبت موجود و مورد نیاز گیاه و ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی خاک با دقت مکانی بالا (کمتر از ۱ تا ۱۰ متر) را پایش و ارزیابی نماید و در نهایت، رشد کشاورزی دقیق تسریع داده شود. لذا این امر، باعث بهبود شرایط محیطی اکوسیستم‌های کشاورزی می‌شود. در حقیقت، اطلاعات داده‌های سنجش از دور مانند داده‌های رطوبت، چگونگی رشد محصول، پایش تغییرات رشد و پیش‌بینی عملکرد محصول برای کشاورزان و تولیدکنندگان محصولات زراعی در شرایط مختلف تصمیم‌گیری بسیار ارزشمند است. از آنجایی که محصول یونجه روند رشد و نحوه برداشت متفاوتی نسبت به سایر محصولات زراعی دارد، لذا تحقیق حاضر بر آن است تا اهداف ذکر شده از طریق کشاورزی دقیق پوشش داده شود. در این تحقیق، ابتدا منطقه مورد مطالعه و داده‌های مورد استفاده توضیح داده می‌شود و در ادامه شاخص‌هایی که برای تخمین تولید

جهت بهبود محدودیت‌های شاخص‌های پوشش گیاهی و برآورد پارامترهای بیوفیزیکی گیاه مانند شاخص سطح برگ، کلروفیل، بایومس و تولید دارد. در مطالعه‌ای که دلگیدو^۱ و ورلست^۲ در سال ۲۰۱۱ با استفاده از تصاویر Sentinel-2 و شاخص NDI^۳ انجام دادند، توانستند مقدار شاخص سطح برگ و کلروفیل محصولات زراعی مانند ذرت، لوبیا و آفتابگردان را با ضریب تعیین ۰/۷۹ و ۰/۹ برآورد کنند (Delegido, Verrelst et al. 2011). در تحقیق دیگر آل‌گادی^۴ و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی NDVI و SAVI تولید محصول سیب‌زمینی را برای تصاویر Landsat-8 و Sentinel-2 به ترتیب با ضریب تعیین ۰/۳۹-۰/۶۵ و ۰/۶۵-۰/۴۷ برآورد کردند (Al-Gaadi, Hassaballa et al. 2016). جورکا^۵ و همکاران در سال ۲۰۱۶ از طریق شاخص‌های NDVI و EVI2 و تصاویر Sentinel-2 تولید جو را در مقیاس مزرعه و نوبت‌های مختلف نمونه برداری میدانی برآورد کردند. نتایج آنها نشان داد تصاویر Sentinel نسبت به Landsat-8 عملکرد بهتری داشته است (JURECKA, HLAVINKA et al. 2016).

محصول یونجه، مهم‌ترین گیاه علوفه‌ای ایران و جهان است. طبق آمارنامه کشاورزی، سطح زیر کشت یونجه آبی و دیم در سطح کشور بالغ بر ۶۶۰۴۸۳ هکتار و مقدار کل تولید یونجه آبی و دیم کشور معادل ۵۹۵۰۲۵۵ تن در هکتار است (آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴-۱۳۹۳). لذا اهمیت زیادی در تغذیه دام‌ها و افزایش فرآورده‌های دامی دارد. این محصول عمدتاً در دو فصل پائیز و بهار کشت می‌شود. کاشت پائیزه در مناطق سرد، اوایل شهریورماه و در مناطق سرد معتدل تا اواسط

^۴Al-Gaadi

^۵JURECKA

^۶<https://www.avanmz.ir/NewsDetail.aspx?itemid=4277>

^۱Delegido

^۲verrelst

^۳Normalized difference index

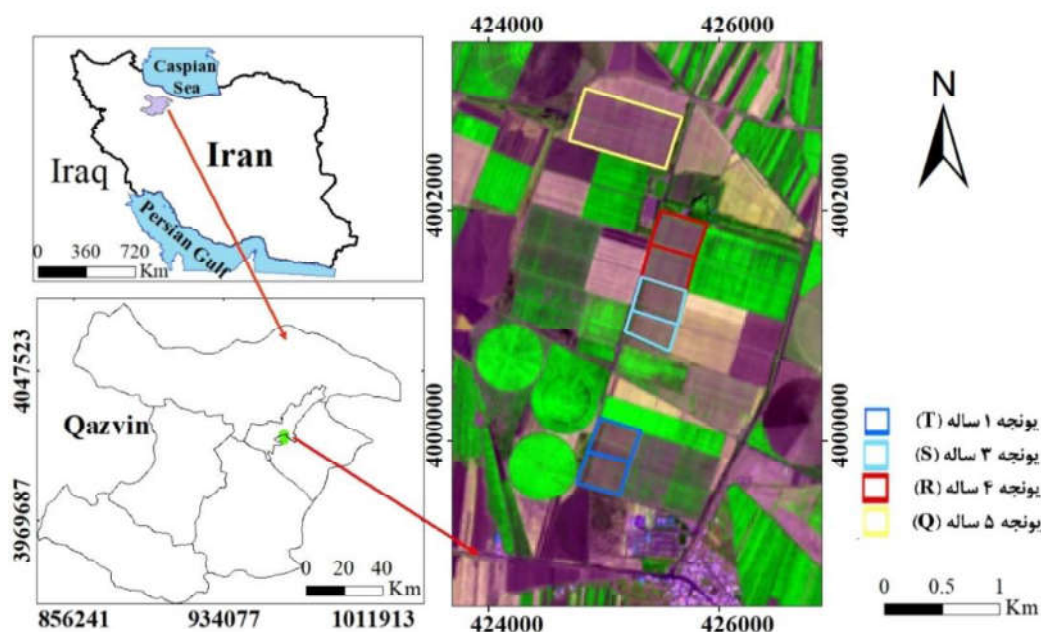
منطقه در بخش آبیگ شهرستان قزوین بین عرض جغرافیایی ۳۶/۰۹ درجه عرض شمالی و طول جغرافیایی ۵۰/۱۰ درجه شرقی قرار دارد. شرکت مگسال، یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های فعال در بخش کشاورزی و دام‌پروری است. مساحت اراضی محصول یونجه، تقریباً ۱۰۰ هکتار بوده و بخش زراعت آن شامل اراضی به وسعت یک هزار هکتار است. عمده تولیدات شرکت مگسال شامل غلات بذری و غیر بذری، دانه‌های روغنی بذری و غیر بذری، انواع علوفه‌های دامی و چغندر قند می‌باشد (شکل ۱).

در تحقیقات گذشته کاربرد داشته‌اند معرفی خواهد شد و سپس مشکل اشباع در شاخص‌های باریک باند و لبه قرمز جهت تخمین مقدار تولید در طول دوره‌های مختلف رشد بررسی خواهد شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

مزارع کشت و صنعت مگسال، به‌عنوان منطقه مطالعاتی این تحقیق، واقع در شمال غربی ایران انتخاب شده است. این



شکل ۱. موقعیت مزارع یونجه در کشت و صنعت مگسال و تصویر ماهواره‌ای Sentinel-2

یونجه بوده و یونجه نیز به‌صورت کشت بهاره در اوایل خردادماه و کشت پاییزه آن در نیمه شهریورماه انجام می‌شود.

اقلیم منطقه سرد و خشک است. میانگین بارندگی سالیانه ۲۱۰ تا ۲۳۰ میلی‌متر متغیر است. این منطقه یکی از مناطق مهم و پیشرفته کشاورزی ایران بوده که اطلاعات و داده‌های زمین‌های کشاورزی آن، از چند دهه پیش ثبت شده است. محصول مورد مطالعه در این منطقه

<http://www.irimo.ir/far/>

سنجش از دور و GIS ایران

سال دهم = شماره سوم = پاییز ۱۳۹۷

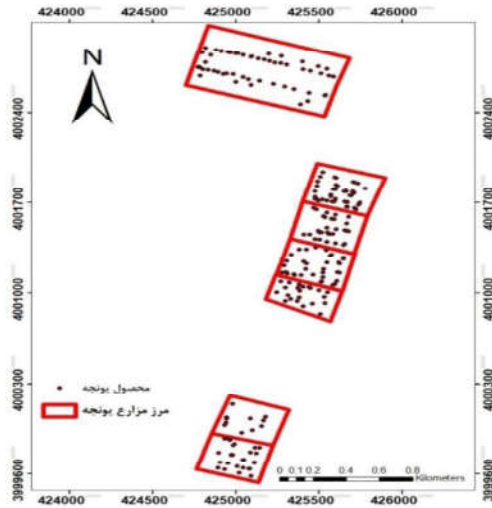
۲-۲- داده‌های مورد استفاده

۲-۲-۱- داده‌های زمینی عملکرد محصول

در این تحقیق، با روش نمونه‌برداری تصادفی، تعداد ۱۴۴ نقطه داده‌ی عملکرد محصول یونجه از زمین‌های کشاورزی کشت و صنعت مگسال در قزوین برداشت شد. جمع‌آوری داده‌ها در چندین نوبت نمونه‌برداری و هم‌زمان با گذر ماهواره Sentinel-2 انجام شده است. در هر مرحله نمونه‌برداری از مزارع مختلف محصول یونجه با شرایط رویشی متفاوت نمونه‌برداری شده است. در جدول ۱، تاریخ‌های نمونه‌برداری از کشت و صنعت مگسال قزوین، زمان گذر ماهواره و متوسط ارتفاع محصول یونجه در منطقه نشان داده شده است. نمونه‌برداری از هر نقطه، توسط پلات‌هایی با ابعاد 1 × 1 متر انجام شد و در هر نقطه نمونه، اطلاعاتی مانند: دقت GPS، وزن تر، ارتفاع گیاه، تعداد گیاه در هر پلات، وضعیت آسمان و ساعت نمونه‌برداری ثبت شد. نمونه‌های برداشت شده در همان محل، برداشت و با ترازو توزین و سپس به آزمایشگاه منتقل شده و در نهایت وزن تر و خشک هر نمونه مشخص شد. موقعیت نقاط نمونه برداری محصول یونجه، در شکل ۲ نشان داده شده است.

جدول ۱. تاریخ‌های نمونه‌برداری میدانی در کشت و صنعت مگسال

| تاریخ نمونه‌برداری | زمان گذر ماهواره | متوسط ارتفاع محصول یونجه (سانتی‌متر) |
|-----------------------------|--|--------------------------------------|
| ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ تیرماه ۱۳۹۶ | ۱۱ تیر | ۴۰ |
| ۲۷ و ۲۸ تیرماه ۱۳۹۶ | ۲۶ تیر | ۵۵ |
| ۱۲ و ۱۳ مردادماه ۱۳۹۶ | ۱۳ مرداد | ۳۰ |
| ۳ مهرماه ۱۳۹۶ | ۲۹ شهریور (گذر ۳ مهر مشکل فنی داشت) | ۳۵ |



شکل ۲. موقعیت نقاط نمونه برداری محصول یونجه

۲-۲-۲- داده‌های ماهواره‌ای مورد استفاده

در این تحقیق، از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2 به منظور برآورد مقدار تولید یونجه استفاده شده است. ماهواره Sentinel-2 یکی از پروژه‌های مهم پایش زمین، توسط آژانس فضایی اروپا است که به منظور بهبود مأموریت‌هایی مانند: بررسی تغییرات پوشش زمین برای نظارت بهتر بر محیط‌زیست، تشخیص نوع محصول، مدیریت به منظور کمک به امنیت غذایی، برآورد پارامترهای پوشش گیاهی و مدیریت بلایای طبیعی توسعه یافته است. این پروژه شامل دو ماهواره یکسان Sentinel-2A و Sentinel-2B است. تصاویر این ماهواره، دارای توان تفکیک مکانی متغیر ۱۰ تا ۶۰ متر و شامل ۱۳ باند در محدوده طیفی مرئی، مادون قرمز نزدیک و مادون قرمز موج کوتاه است. تصاویر Sentinel-2 دارای عرض برداشت ۲۹۰ کیلومتر و توان تفکیک زمانی ۵ روز در استوا است. جهت تعیین دامنه مناسب، برای

ارتفاع^۵ (DEM) است. به صورت پیش فرض، مدل رقومی ارتفاع SRTM در نرم افزار وجود دارد که قابل تغییر است. با توجه به اینکه منطقه مورد مطالعه جنگلی نیست، لذا می توان از مدل رقومی ارتفاع SRTM استفاده کرد. خروجی Sen2Core تصاویر بازتابندگی سطح زمین در قدرت تفکیک های مکانی مختلف (۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر) و نقشه های عمق نوری و بخار آب اتمسفر است. ساختار محصول L2A مشابه ساختار محصول L1C است. ویژگی های سنجنده MSI ماهواره Sentinel-2 در جدول ۲، نشان داده شده است.

جدول ۲. ویژگی های سنجنده MSI ماهواره Sentinel-2

| پهنای باند (نانومتر) | توان تفکیک مکانی (متر) | طول موج مرکزی (میکرومتر) | باند |
|----------------------|------------------------|--------------------------|-----------------------------------|
| ۲۰ | ۶۰ | ۰/۴۴۳ | باند ۱- آتروسول، ساحل |
| ۶۵ | ۱۰ | ۰/۴۹۰ | باند ۲- آبی |
| ۳۵ | ۱۰ | ۰/۵۶۰ | باند ۳- سبز |
| ۳۰ | ۱۰ | ۰/۶۶۵ | باند ۴- قرمز |
| ۱۵ | ۲۰ | ۰/۷۰۵ | باند ۵- لبه قرمز |
| ۱۵ | ۲۰ | ۰/۷۴۰ | باند ۶- لبه قرمز |
| ۲۰ | ۲۰ | ۰/۷۸۳ | باند ۷- لبه قرمز |
| ۱۵ | ۱۰ | ۰/۸۴۲ | باند ۸- مادون قرمز |
| ۲۰ | ۲۰ | ۰/۸۶۵ | باند ۸A - مادون قرمز باریک |
| ۲۰ | ۶۰ | ۰/۹۴۵ | باند ۹- بخار آب |
| ۲۰ | ۶۰ | ۱/۳۷۵ | باند ۱۰- مادون قرمز کوتاه - سیروس |
| ۹۰ | ۲۰ | ۱/۶۱۰ | باند ۱۱- مادون قرمز کوتاه |
| ۱۸۰ | ۲۰ | ۲/۱۹۰ | باند ۱۲- مادون قرمز کوتاه |

تصاویر ماهواره ای ابتدا به جمع آوری تقویم زراعی محصول یونجه در منطقه مطالعاتی قزوین اقدام شد و براساس اطلاعات جمع آوری شده، زمان کاشت، اوج سبزینگی، زمان برداشت محصول یونجه در طول دوره های مختلف رشد مشخص و سپس این اطلاعات در پایگاه داده ذخیره و تجزیه و تحلیل های لازم برای زمان سفارش این تصاویر، انجام شد. نتایج بررسی ها نشان داد که برای برآورد مقدار تولید محصول یونجه، به ترتیب به چهار سری تصاویر ماهواره ای Sentinel-2 در سال ۲۰۱۶ نیاز است. به همین منظور، تصاویر ماهواره ای Sentinel-2 با اندازه پیکسل ۱۰، ۲۰ و ۶۰ متر در طول دوره رشد محصول یونجه تهیه شد. تمام تصاویر، ابتدا توسط نرم افزار Sen2Core تصحیح اتمسفری شده و سپس تصحیحات هندسی انجام شد. نرم افزار Sen2Core به منظور تصحیح اتمسفری تصاویر سطح Sentinel-2 L1C و تولید تصاویر بازتابندگی سطح زمین (L2A) استفاده می شود. پردازش تصاویر L2A روی تصاویر بازتابندگی بالای اتمسفر^۱ (TOA) انجام می شود. مراحل پردازش از تشخیص ابر آغاز می شود و با طبقه بندی تصویر عمق نوری اتمسفر^۲ (AOT) و مقدار بخار آب^۳ (WV) از تصاویر L1C ادامه می یابد. مرحله آخر تبدیل مقادیر بازتابندگی بالای اتمسفر به مقادیر سطح زمین است. برای اجرای این مراحل از دو نوع داده کمکی استفاده می شود که شامل جداول تبدیل^۴ (LUT) مدل انتقال تابش و مدل رقومی

^۱Look Up Table

^۵Digital elevation model

^۱Top of Atmosphere

^۲Aerosol Optical Thickness

^۳Water Vapor

۲-۳- شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده

تاکنون از شاخص‌های پوشش گیاهی بسیاری، بر اساس مقدار بازتابندگی طول‌موج‌های قرمز و مادون قرمز نزدیک، به منظور برآورد تولید و سایر پارامترهای بیوفیزیکی گیاه، مانند شاخص سطح برگ (LAI)، محتوای کلروفیل و مقدار تابش فعال فتوسنتزی^۱ استفاده شده است. این شاخص‌ها می‌توانند تا حدی، اثرات بازتابندگی ناشی از شرایط محیطی و سایه‌ها را کاهش دهند، بنابراین همبستگی بین پارامترهای بیوفیزیکی گیاه و شاخص‌های پوشش گیاهی بهبود می‌یابد. در مقایسه با سطوح غیر گیاهی، سطوح پوشش گیاهی تفاوت شدیدی را در طول‌موج‌های قرمز و

مادون قرمز نشان می‌دهد (Elvidge and Chen 1995). با این حال، رابطه بین شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ (LAI) با فعالیت فتوسنتزی و تولید در مقادیر بالای سطح برگ اشباع می‌شود (Wiegand and Richardson 1990). این ارتباط بین شاخص‌های پوشش گیاهی و شاخص سطح برگ (LAI) در مراحل مختلف رشد محصول تغییر می‌کند (Carlson and Ripley 1997). لذا، بررسی رابطه بین شاخص‌های پوشش گیاهی لبه قرمز، با مقدار شاخص سطح برگ و تولید، مورد توجه محققان قرار گرفت. در جدول ۳، شاخص‌های گیاهی مورد استفاده، جهت برآورد تولید در منابع مختلف آورده شده است.

جدول ۳. شاخص‌های پوشش گیاهی مورد استفاده

| شاخص | رابطه | منبع |
|--|--|---------------------------------|
| (NDREI) Normalized Difference Red-Edge | $NDREI = \frac{R_{NIR} - R_{band6}}{R_{NIR} + R_{band6}}$ | (Gitelson and Merzlyak 1994) |
| Green Normal Difference Vegetation Index (GNDVI) | $GNDVI = \frac{(R_{Green} - R_{Red})}{(R_{Green} + R_{Red})}$ | (Gitelson, Kaufman et al. 1996) |
| Normal Difference vegetation Index (NDVI) | $NDVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red})}$ | (Rouse Jr 1972) |
| Edge(CI red edge) Red Chlorophyll Index | $\left(\frac{R_{NIR}}{R_{Red}}\right) - 1CI_{rededge} =$ | (Gitelson, Vina et al. 2003) |
| Enhanced vegetation index 2 (EVI2) | $EVI2 = 2.5 \times \frac{R_{NIR} - R_{Red}}{(R_{NIR} + 2.4 \times R_{Red} + 1)}$ | (Jiang, Huete et al. 2008) |
| Green (CI green) Chlorophyll Index | $= \left(\frac{R_{NIR}}{R_{Green}}\right) - 1CI_{Green}$ | (Gitelson, Vina et al. 2003) |
| (REPNDVI) NDVI Red-edge ratio | $REPNDVI = NDVI \times \sqrt{\frac{R_{band6}}{R_{band5}}}$ | (Chang and Shoshany 2016) |
| Soil Adjust Vegetation Index (SAVI) | $SAVI = \frac{(R_{NIR} - R_{Red})}{(R_{NIR} + R_{Red} + L)}(1 + L)$ | (Huete and Tucker 1991) |
| Sentinel-2 Red-Edge Position (S2REP) | $S2REP = 705 + 35 * \left(\frac{R_{NIR} + R_{Red}}{2} - R_{band5}\right)$ | (Guyot and Baret 1988) |
| Red-Edge Position (REP) | $REP = 700 + 40 * \left(\frac{R_{NIR} + R_{Red}}{2} - R_{band5}\right)$ | (Guyot and Baret 1988) |

$\varphi = \text{شیب خط خاک} \beta = \text{عرض از مبدأ خط خاک}$

$R_{band6} = \text{مقدار بازتابندگی باند ۶}$

$R_{band5} = \text{مقدار بازتابندگی باند ۵}$

$L = \text{عامل تنظیم کننده خاک}$

$R_{NIR} = \text{مقدار بازتابندگی باند مادون قرمز} R_{Red} = \text{مقدار بازتابندگی باند قرمز}$

$R_{Blue} = \text{مقدار بازتابندگی باند آبی}$

$R_{Green} = \text{مقدار بازتابندگی باند سبز}$

^۱Absorbed photosynthetically active radiation

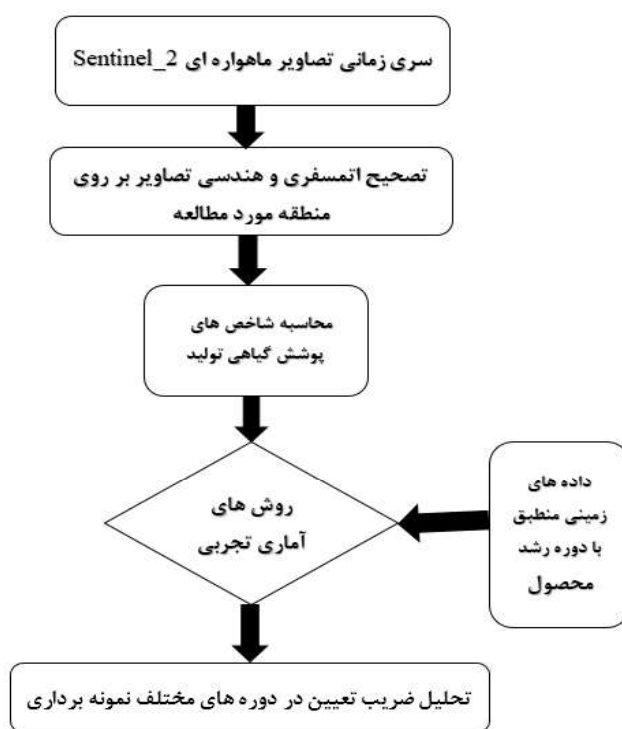
۴-۲- تخمین میزان تولید

در بسیاری از مطالعات کشاورزی، پیش‌بینی تولید محصول با استفاده از متغیرهای کشاورزی-اقلیمی و مدل‌های آماری رگرسیونی انجام شده است (Doraiswamy, Moulin et al. 2003, Robertson and Kirkegaard 2006, Lobell, Cassman et al. 2009, Kogan, Salazar et al. 2012). به‌طور کلی، یک مدل رگرسیونی ساده با استفاده از داده‌های زمینی تولید و شاخص‌های پوشش گیاهی ساخته می‌شود. روش رگرسیون خطی یکی از معمول‌ترین روش‌ها در توسعه مدل‌های تجربی برای مجموعه داده‌های بزرگ است. شکل عمومی معادله رگرسیون خطی ساده بر اساس رابطه ۱ است

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x \quad \text{رابطه (۱)}$$

در این فرمول، Y متغیر وابسته مورد مطالعه (مقدار تولید

محصول یونجه)، x متغیر مستقل (شاخص پوشش گیاهی)، β_1 ضریب متغیر مستقل و β_0 عدد ثابت این معادله است. نتیجه تحلیل آماری این روش، شامل مدلی با ضریب تعیین^۱ (R^2) بوده و ارزیابی صحت و کفایت مدل با استفاده از همین ضریب صورت می‌گیرد. در این تحقیق با استفاده از نرم افزار آماری^۲ SPSS و اعمال مدل رگرسیون خطی ساده، بهترین شاخص پوشش گیاهی براساس مقدار ضریب تعیین R^2 انتخاب گردید. پس از انتخاب شاخص مناسب، ضریب متغیر پیش‌بینی کننده میزان تولید با مقدار β_1 ثبت گردید. سپس با قرار دادن ضرایب رگرسیونی به دست آمده، مدل رگرسیون خطی ساده شکل گرفت و در نهایت میزان تولید یونجه برآورد گردید. مراحل انجام تحقیق در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳. مراحل انجام تحقیق

^۲Statistical Package for the Social Sciences

^۱Coefficient of determination

ساله، ۴ ساله، ۳ ساله و ۱ ساله هستند و دو مزرعه اول در دو روز ۱۰ تیر و ۱۲ مرداد و دو مزرعه دوم به ترتیب در روزهای ۱۲ مرداد و ۲۷ تیر نمونه برداری شده‌اند. مزرعه Q، در تاریخ ۱۰ تیر با متوسط ارتفاع ۴۵ سانتی‌متر در دوره میانی رشد قرار دارد و نزدیک به مرحله گل‌دهی است. اما در تاریخ ۱۲ مرداد، پس از یک نوبت برداشت به ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر رسیده است. روابط شاخص‌های پوشش گیاهی با مقدار تولید زمینی در تاریخ ۱۰ تیر و ۱۲ مرداد مزرعه Q در شکل ۴ و ۵ آورده شده است. در هر یک از مدل‌های رگرسیونی، مقادیر ضریب تعیین، جذر میانگین مربعات خطا و سطح معناداری آزمون در جدول ۴ نشان داده شده است. نتایج، نشان می‌دهد به علت ارتفاع زیاد محصول یونجه، در تاریخ ۱۰ تیر، بیشتر شاخص‌های پوشش گیاهی به اشباع رسیده‌اند. اما در تاریخ ۱۲ مرداد، با متوسط ارتفاع ۳۰ سانتی‌متر اکثر شاخص‌های پوشش گیاهی نتایج خوبی را نشان داده‌اند. در تاریخ نمونه برداری ۱۰ تیر، شاخص‌های NDVI، GNDVI و NDREI در مقادیر بیشتر از ۰/۸ و تولید ۰/۴ کیلوگرم در مترمربع اشباع شده‌اند. همچنین شاخص‌های لبه قرمز مانند CI_{green} ، REP ، $REPNDVI$ و $CI_{rededge}$ در مقادیر بیشتر از ۲ و مقدار تولید بیشتر از ۰/۴ کیلوگرم در مترمربع به اشباع رسیده‌اند و مقادیر ضریب تعیین هر ۱۰ شاخص، مقدار بسیار کمی را نشان می‌دهد و در سطح آزمون ۰/۰۵ معنادار نیستند (شکل ۴). در تاریخ نمونه برداری ۱۲ مرداد شاخص‌های NDVI، GNDVI، $SAVI$ و $NDREI$ به ترتیب با مقادیر ضریب تعیین ۰/۶۹، ۰/۶۷، ۰/۶۶ و ۰/۶۳ توانسته‌اند مقدار تولید محصول یونجه را به خوبی برآورد کنند و در سطح

جهت تعیین دقت و معناداری مدل، ضریب تعیین (R^2) و جذر مجموع مربعات خطا^۱ ($RMSE$) محاسبه گردید (روابط ۲ و ۳).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad \text{رابطه (۳)}$$

در روابط فوق y_i مقادیر مشاهده‌شده، \hat{y}_i مقادیر پیش‌بینی‌شده، n تعداد مشاهدات و \bar{y} میانگین مقادیر مشاهده‌شده است.

۳- بحث و نتیجه‌گیری

۳-۱- تخمین میزان تولید محصول یونجه در

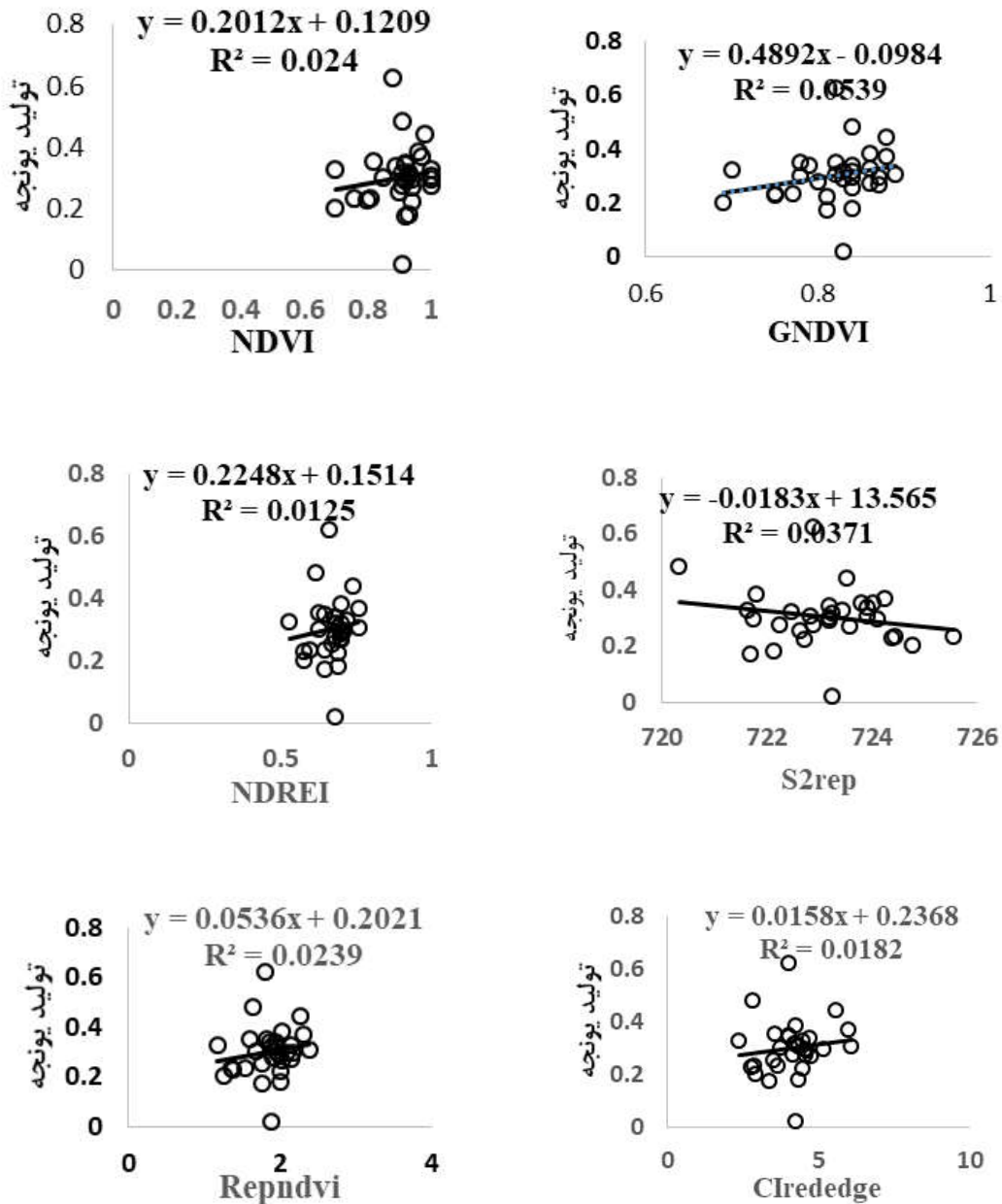
روزهای مختلف نمونه برداری به تفکیک مزرعه

در این تحقیق، مقدار تولید محصول یونجه، به تفکیک مزارع در نوبت‌های مختلف نمونه برداری، توسط شاخص‌های گیاهی $SAVI$ ، $GNDVI$ ، $NDVI$ ، $S2REP$ ، REP ، CI_{green} ، $EVI2$ ، $CI_{rededge}$ ، $NDREI$ و $REPNDVI$ برآورد شد. در هر یک از مدل‌های رگرسیونی، مقادیر ضریب تعیین و جذر میانگین مربعات خطا محاسبه شده است. شناخت تغییرات مقدار تولید یونجه در دوره‌های مختلف رشد، در برآورد دقیق این پارامتر بیوفیزیکی کمک شایانی می‌کند. به همین دلیل مقدار تولید زمینی محصول یونجه در ماه‌های مختلف دوره‌های رشد و برداشت (تیرماه تا مهرماه) جمع‌آوری و روابط شاخص‌های مختلف با مقدار تولید محصول یونجه در چهار مزرعه Q، R، S و T بررسی شد. همان‌طور که در شکل ۱، بخش ۲-۱ نشان داده شد، مزارع یونجه به ترتیب ۵

^۱Root Mean Square Error

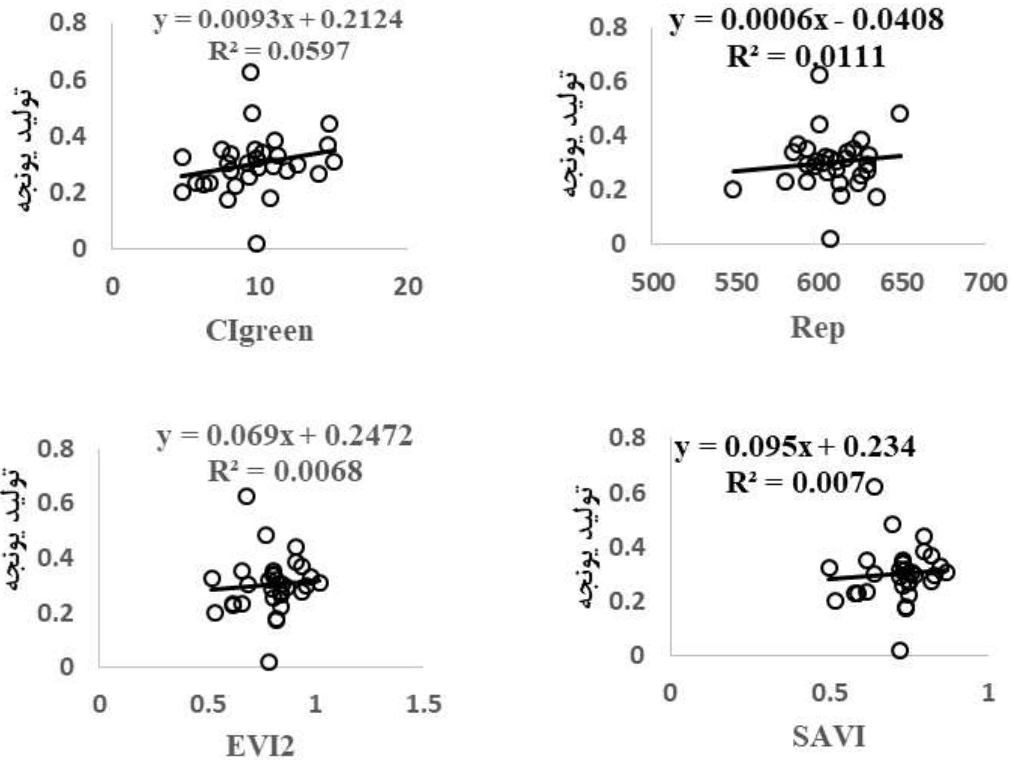
اشباع شده‌اند و شاخص‌های S2REP و REP در سطح ۰,۰۵ معنادار نیستند (شکل ۵ و جدول ۴).

آزمون ۰,۰۵ معنادار هستند. اما شاخص‌های لبه قرمز مانند REPNDVI، S2REP، CI_{green} و $EVI2$ در مقادیر تولید بیشتر از ۰/۱۵ کیلوگرم در مترمربع

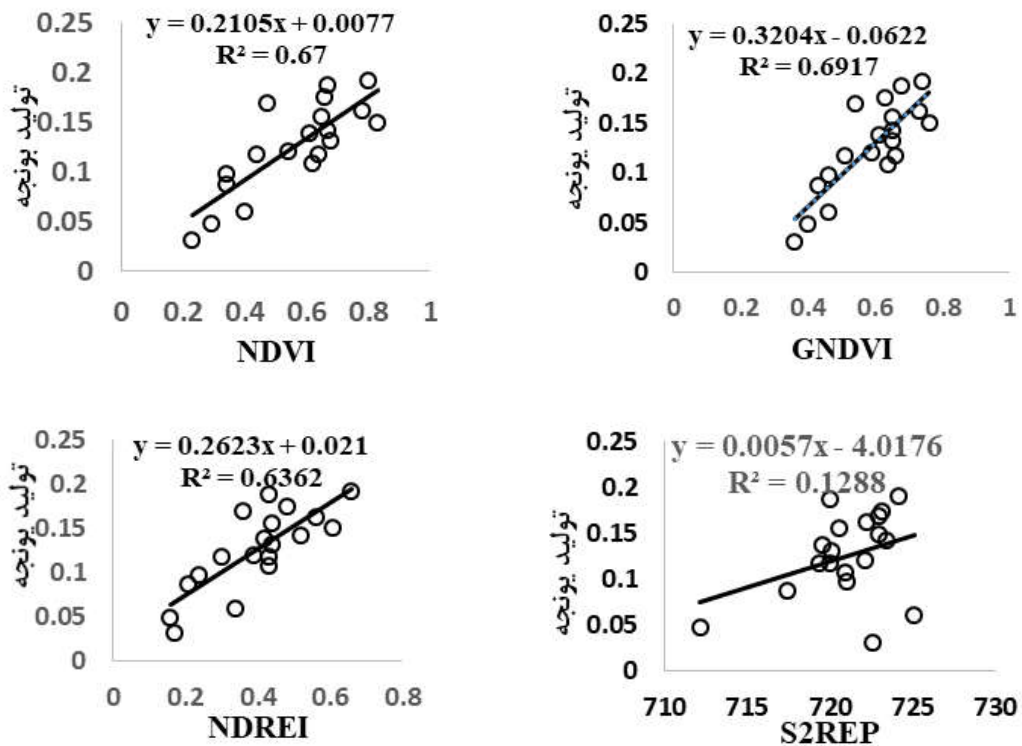


شکل ۴. نمودار پراکنش شاخص‌های پوشش گیاهی و مقدار تولید یونجه در تاریخ ۱۰ تیر در مزرعه Q

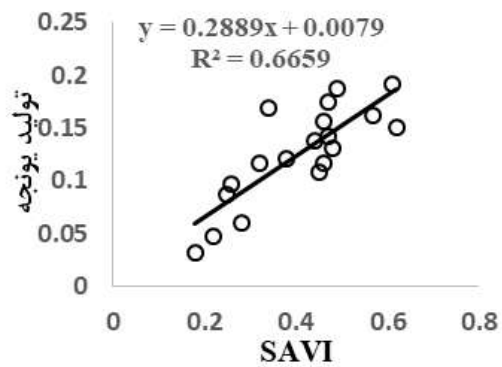
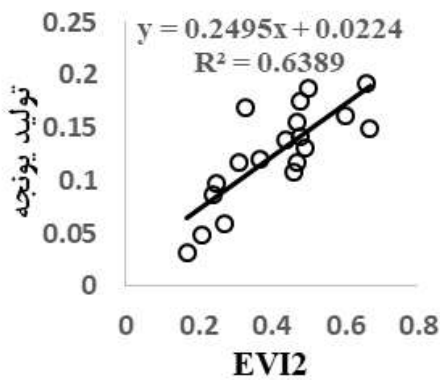
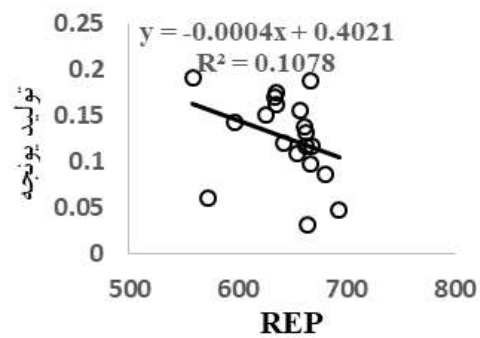
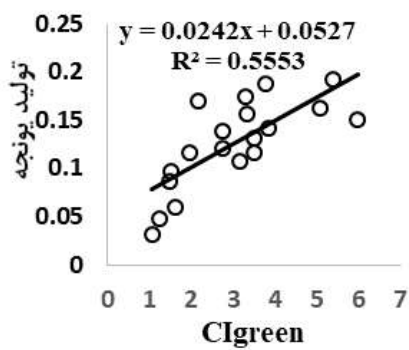
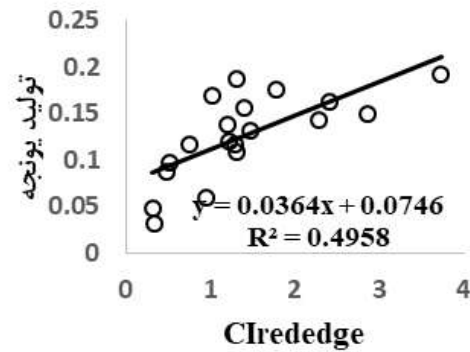
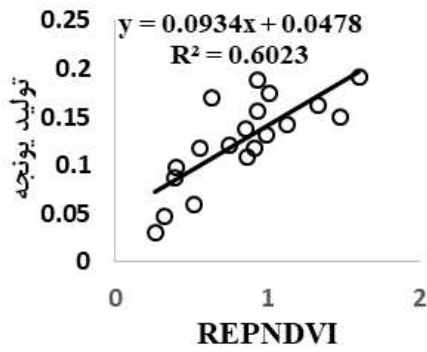
تخمین تولید محصول یونجه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2...



ادامه شکل ۴. نمودار پراکنش شاخص های پوشش گیاهی و مقدار تولید یونجه در تاریخ ۱۰ تیر در مزرعه Q



شکل ۵. نمودار پراکنش شاخص های پوشش گیاهی و مقدار تولید یونجه در تاریخ ۱۲ مرداد مزرعه Q



ادامه شکل ۵. نمودار پراکنش شاخص های پوشش گیاهی و مقدار تولید یونجه در تاریخ ۱۲ مرداد مزرعه Q

جدول ۴. مقدار ضرایب تعیین و جذر میانگین مربعات خطا مزرعه Q محصول یونجه در تاریخ های مختلف نمونه برداری

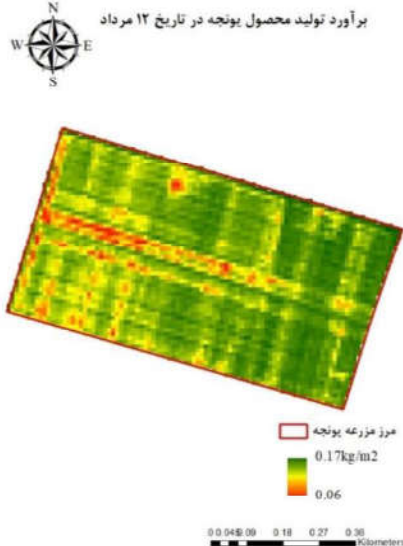
| شاخص های پوشش گیاهی تولید محصول یونجه مزرعه Q | تاریخ نمونه برداری | مقدار ضریب تعیین | جذر میانگین مربعات خطا (کیلوگرم در مترمربع) | سطح معناداری آزمون |
|--|-----------------------|---------------------|--|-----------------------|
| NDVI | ۱۰ تیر | ۰/۰۲ | ۰/۱۰۴ | ۰/۴۰۶ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۶۷ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۱۰۰ |
| GNDVI | ۱۰ تیر | ۰/۰۵ | ۰/۱۰۴ | ۰/۲۰ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۶۹ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۱۰۰ |
| NDREI | ۱۰ تیر | ۰/۰۱ | ۰/۱۰۴ | ۰/۵۵ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۶۳ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۱۰۰ |
| REPNDVI | ۱۰ تیر | ۰/۰۲ | ۰/۱۰۴ | ۰/۴۰ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۰۶ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۱۰۰ |

تخمین تولید محصول یونجه با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای Sentinel-2...

ادامه جدول ۴. مقدار ضرایب تعیین و جذر میانگین مربعات خطا مزرعه Q محصول یونجه در تاریخ های مختلف نمونه برداری

| شاخص های پوشش گیاهی تولید محصول یونجه مزرعه Q | تاریخ نمونه برداری | مقدار ضریب تعیین | جذر میانگین مربعات خطا (کیلوگرم در مترمربع) | سطح معناداری آزمون |
|--|-----------------------|---------------------|--|-----------------------|
| Clrededge | ۱۰ تیر | ۰/۰۱ | ۰/۱۰۴ | ۰/۴۶ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۴۹ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۰۰۱ |
| Clgreen | ۱۰ تیر | ۰/۰۵ | ۰/۱۰۴ | ۰/۱۸ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۵۵ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۰۰۰ |
| EVI2 | ۱۰ تیر | ۰/۰۰۶ | ۰/۱۰۴ | ۰/۶۶ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۶۳ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۰۰۰ |
| SZREP | ۱۰ تیر | ۰/۰۳ | ۰/۱۰۴ | ۰/۲۹ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۱۲ | ۰/۰۴۴ | ۰/۱۳ |
| REP | ۱۰ تیر | ۰/۰۱ | ۰/۱۰۴ | ۰/۵۷ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۱ | ۰/۰۴۴ | ۰/۱۷ |
| SAVI | ۱۰ تیر | ۰/۰۰۷ | ۰/۱۰۴ | ۰/۶۵ |
| | ۱۲ مرداد | ۰/۶۶ | ۰/۰۳۱۶ | ۰/۰۰۰ |

محاسبه شده است. مزرعه T در روز ۲۷ تیر، با ارتفاع ۵۵ سانتی‌متر در اوایل مرحله گل‌دهی قرار دارد. شاخص‌های پوشش گیاهی با مقدار تولید یونجه در این مزرعه به دلیل اثر اشباع، نتایج خوبی نشان نداده است و مقدار ضریب تعیین کمتر از ۰/۳ بوده و در سطح ۰/۰۵ معنادار است. در شکل ۶، مقادیر برآورد شده تولید محصول یونجه با استفاده از شاخص GNDVI در مزرعه Q را برای تصویر تاریخ ۱۲ مرداد نشان داده است.



شکل ۶. مقادیر برآورد شده تولید محصول یونجه با استفاده از شاخص GNDVI در مزرعه Q و تاریخ ۱۲ مرداد (کیلوگرم در مترمربع)

مزرعه R در روز ۱۰ تیر، همانند مزرعه Q نتایج مشابهی نشان داده است. این مزرعه، دارای متوسط ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر و دارای یونجه ۴ ساله است. اکثر شاخص‌های پوشش گیاهی، در این روز مانند NDVI، GNDVI و NDREI به دلیل شاخص سطح برگ بالا، در مقادیر تولید بیشتر از ۰/۱۴ کیلوگرم در متر مربع اشباع شده‌اند و در سطح ۰/۰۵ معنادار نیستند و مقدار ضرایب تعیین کمتر از ۰/۱ است. دلیل دیگر می‌تواند تغییرات گیاه در زمان بلوغ محصول باشد که باعث افزایش بازتاب قابل ملاحظه از سطح تاج پوشش محصول یونجه شده است (Asner 1998). اما در روز ۱۲ مرداد، ارتفاع محصول یونجه به ۳۰ سانتی‌متر رسیده است و در اوایل دوره رشد قرار دارد. مقدار ضریب تعیین در این تاریخ افزایش یافته و کمتر از ۰/۴ است و در سطح ۰/۰۵ معنادار هستند. مزرعه S با یونجه ۳ ساله فقط در ۱۲ مرداد نمونه برداری شده است که متوسط ارتفاع محصول در این مزرعه ۲۰ سانتی‌متر است و در دوره ابتدایی رشد قرار دارد. اکثر شاخص‌های پوشش گیاهی با مقدار تولید یونجه رابطه خطی نشان نداده‌اند و در سطح ۰/۰۵ معنادار نیستند و مقدار ضریب تعیین، کمتر از ۰/۲

در شاخص‌های پوشش گیاهی مختلف مانند شاخص‌های باریک باند و لبه قرمز، مطالعه و درنهایت شاخص GNDVI به عنوان شاخص مطلوب جهت برآورد مقدار تولید محصول یونجه، در نوبت نمونه برداری ۱۲ مرداد انتخاب شد. نمونه برداری میدانی در طول دوره‌های مختلف رشد محصول، شامل ماه‌های تیر تا مهر ماه جهت ارزیابی نتایج، انجام شد. در حالت کلی، شاخص‌های پوشش گیاهی سبز و اثر خاک با مقدار تولید محصول یونجه، قبل از زمان گل دهی، روابط خطی خوبی را نشان داده‌اند. نتایج حاصل از شاخص‌های باریک باند، بهتر از شاخص‌های لبه قرمز بوده است. بیشتر شاخص‌های لبه قرمز در مقادیر پوشش گیاهی بیشتر از ۰/۸ اشباع شده‌اند. این مطالعه نشان داد که داده‌های سنجش از دور با توان تفکیک مکانی و طیفی بالا، قادر به برآورد مقدار تولید محصول یونجه در مقیاس مزرعه است. همچنین این داده‌ها می‌توانند در بررسی تغییرات مقدار تولید در طول دوره رشد محصول استفاده شوند.

۴- منابع

- آمارنامه وزارت جهاد کشاورزی، ۱۳۹۴-۱۳۹۳.
- Al-Gaadi, K.A., et al., 2016, "**Prediction of potato crop yield using precision agriculture techniques**", PloS one 11(9): e0162219.
- Asner, G.P., 1998, "**Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance**", Remote sensing of Environment, 64(3), pp.234-253.
- Asrar, G.Q., Fuchs, M., Kanemasu, E.T. and Hatfield, J.L., 1984, "**Estimating Absorbed**

نتایج بدست آمده از شاخص‌های مختلف جهت برآورد مقدار تولید محصول یونجه در نوبت‌های نمونه برداری و مزارع مختلف نشان می‌دهد، شاخص‌های NDVI، GNDVI و SAVI نسبت به شاخص‌های لبه قرمز عملکرد بهتری دارند. همچنین نتایج حاصل از رگرسیون خطی در روز ۱۲ مرداد قبل از مرحله گل‌دهی، بهتر از دیگر نوبت‌های نمونه برداری است. این نتایج با تحقیقات ترانتر^۱ و همکاران (۲۰۰۸) و فرنز^۲ و همکاران (۲۰۰۴) مطابقت دارد، بطوری که آنها هم در نتایج خود نتوانسته‌اند ضریب تعیین بیشتر از ۰/۵ را بین مقدار تولید یونجه و شاخص‌های پوشش گیاهی در سطح مزرعه و در طول دوره رشد مشاهده کنند. ولی در دیگر محصولات زراعی مانند ذرت، گندم زمستانه، آفتابگردان، چغندر قند رابطه خوبی را بدست آوردند. همچنین کایاد و همکاران در سال ۲۰۱۶، به نتایج مشابهی دست یافتند، بطوری که شاخص تجمعی NDVI و SAVI به ترتیب در روزهای ۱۴، ۱۶ و ۲۳ روز پس از برداشت بالاترین مقدار ضریب تعیین را با مقدار تولید یونجه نشان داده است.

۳-۲- نتیجه‌گیری

بر اساس مطالب ذکر شده در بخش ۲-۲-۲، ماهواره Sentinel-2، یکی از جدیدترین ماهواره‌های سنجش از دور است که توسط سازمان فضایی اتحادیه اروپا طراحی شده است، لذا در تحقیقات گذشته، کمتر به قابلیت این تصاویر در برآورد مقدار تولید محصولات کشاورزی پرداخته شده است. در این تحقیق، ابتدا کارایی این تصاویر با توان تفکیک طیفی و مکانی مناسب در برآورد مقدار تولید محصول یونجه، در نوبت‌های نمونه برداری بررسی شد و سپس اثر اشباع

^۱Ferencz

^۱Trotter

- ratio Normalized Vegetation Index for remote estimation of green biomass**, Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2016 IEEE International, IEEE.
- Dash, J. and Curran, P.J., 2007, April, **Relationship between the MERIS vegetation indices and crop yield for the state of South Dakota**, USA. In Proc. Envisat Symposium.
- Dempewolf, J., Adusei, B., Becker-Reshef, I., Hansen, M., Potapov, P., Khan, A. and Barker, B., 2014. **"Wheat yield forecasting for Punjab Province from vegetation index time series and historic crop statistics"**. Remote Sensing, 6(10), pp.9653-9675.
- Dente, L.G., Satalino, F., Mattia and Rinaldi, M., 2008, **"Assimilation of leaf area index derived from ASAR and MERIS data into CERES-Wheat model to map wheat yield"**, Remote sensing of Environment 112(4): 1395-1407.
- Delegido, J., Verrelst, J., Alonso, L. and Moreno, J., 2011, **Evaluation of sentinel-2 red-edge bands for empirical estimation of green LAI and chlorophyll content**. Sensors, 11(7), pp.7063-7081.
- Doraiswamy, P.C., Sinclair, T.R., Hollinger, S., Akhmedov, B., Stern, A., Prueger, J., 2005, **Application of MODIS derived parameters for regional crop yield assessment**, Remote sensing of environment, 97(2), pp.192-202.
- Duchemin, B., P. Maisongrande, G. Boulet and I. Benhadj (2008). **"A simple algorithm for yield Photosynthetic Radiation and Leaf Area Index from Spectral Reflectance in Wheat 1"**, Agronomy journal, 76(2), pp.300-306.
- Badhwar, G. and Henderson, K., 1981, **"Estimating Development Stages of Corn from Spectral Data—An Initial Model 1"**, Agronomy Journal 73(4): 748-755.
- Ban, H.Y., Kim, K.S., Park, N.W. and Lee, B.W., 2016. **"Using MODIS Data to Predict Regional Corn Yields"**. Remote Sensing, 9(1), p.16.
- Betbeder, J., Fieuzal, R. and Baup, F., 2016. **"Assimilation of LAI and dry biomass data from optical and SAR images into an agro-meteorological model to estimate soybean yield"**. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 9(6), pp.2540-2553.
- Bolton, D.K. and Friedl, M.A., 2013. **"Forecasting crop yield using remotely sensed vegetation indices and crop phenology metrics"**. Agricultural and Forest Meteorology, 173, pp.74-84.
- Brakke, T.W. and Kanemasu, E.T., 1981. **"Insolation estimation from satellite measurements of reflected radiation"**. Remote sensing of Environment, 11, pp.157-167.
- Carlson, T.N. and Ripley, D.A., 1997. **"On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index"**. Remote sensing of Environment, 62(3), pp.241-252.
- Chang, J. and Shoshany, M., 2016, **Red-edge**

pp.289-298.

Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N. and Lichtenthaler, H.K., 1996, **Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm**, Journal of plant physiology, 148(3-4), pp.501-508.

Gitelson, A.A., Viña, A., Arkebauer, T.J., Rundquist, D.C., Keydan, G. and Leavitt, B., 2003, **Remote estimation of leaf area index and green leaf biomass in maize canopies**, Geophysical Research Letters, 30(5).

Guyot, G. and F. Baret, 1988, **Utilisation de la haute resolution spectrale pour suivre l'etat des couverts vegetaux**, Spectral Signatures of Objects in Remote Sensing.

Hamar, D., Ferencz, C., Lichtenberger, J., Tarcsai, G. and Ferencz Arkos, I., 1988, **The use of remotely sensed data in yield forecasting. 2. Satellite experiments**, Novenytermeles (Hungary).

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), pp.195-213.

Huete, A.R. and Tucker, C.J., 1991, **Investigation of soil influences in AVHRR red and near-infrared vegetation index imagery**, International Journal of Remote Sensing, 12(6), pp.1223-1242.

estimates: Evaluation for semi-arid irrigated winter wheat monitored with green leaf area index", Environmental Modelling & Software 23(7): 876-892.

Elachi, C. and Van Zyl, J.J., 2006. **"Introduction to the physics and techniques of remote sensing"**. John Wiley & Sons.

Elvidge, C.D. and Chen, Z., 1995. **"Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices"**. Remote sensing of environment, 54(1), pp.38-48.

Ferencz, C., Bognar, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Tarcsai, G., Timár, G., Molnár, G., Pásztor, S.Z., Steinbach, P., Székely, B. and Ferencz, O.E., 2004, **Crop yield estimation by satellite remote sensing. International Journal of Remote Sensing**, 25(20), pp.4113-4149.

Goswami, S., J. Gamon, S., Vargas and Tweedie, C., 2015, **"Relationships of NDVI, Biomass, and Leaf Area Index (LAI) for six key plant species in Barrow, Alaska"**, PeerJ PrePrints.

Gitelson, A. and Merzlyak, M.N., 1994, **"Quantitative estimation of chlorophyll-a using reflectance spectra: Experiments with autumn chestnut and maple leaves"**, Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology 22(3): 247-252.

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),

- Kross, A., H. McNairn, D. Lapen, M. Sunohara and C. Champagne, 2015, "**Assessment of RapidEye vegetation indices for estimation of leaf area index and biomass in corn and soybean crops**", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 34: 235-248.
- Leroux, L., C. Baron, B. Zoungrana, S. B. Traoré, D. L. Seen and A. Bégué, 2016, "**Crop monitoring using vegetation and thermal indices for yield estimates: case study of a rainfed cereal in semi-arid west africa**", IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 9(1): 347-362.
- Li, H., Zhao, C., Yang, G. and Feng, H., 2015, "**Variations in crop variables within wheat canopies and responses of canopy spectral characteristics and derived vegetation indices to different vertical leaf layers and spikes**", Remote Sensing of Environment, 169, pp.358-374.
- Lobell, D.B., Cassman, K.G. and Field, C.B., 2009. "**Crop yield gaps: their importance, magnitudes, and causes. Annual review of environment and resources**, 34, pp.179-204.
- Lobell, D. B., D. Thau, C. Seifert, E. Engle and B. Little, 2015, "**A scalable satellite-based crop yield mapper**", Remote Sensing of Environment 164: 324-333.
- Malingreau, J., 1989, "**The vegetation index and the study of vegetation dynamics**".
- Johnson, D. M., 2016, "**A comprehensive assessment of the correlations between field crop yields and commonly used MODIS products**", International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 52: 65-81.
- Jiang, Z., Huete, A.R., Didan, K. and Miura, T., 2008, "**Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band**", Remote sensing of Environment, 112(10), pp.3833-3845.
- JURECKA, F., HLAVINKA, P., LUKAS, V., TRNKA, M. and ZALUD, Z., 2016, "**Crop yield estimation in the field level using vegetation indices**", MendelNet 2016, 1, pp.90-95.
- Kayad, A.G., Al-Gaadi, K.A., Tola, E.H., Madugundu, R. and Zeyada, A.M., 2015, "**Performance evaluation of hay yield monitoring system in large rectangular baler**", American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Sciences, 15, pp.1025-1032.
- Kogan, F., Salazar, L. and Roytman, L., 2012, "**Forecasting crop production using satellite-based vegetation health indices in Kansas, USA**", International journal of remote sensing, 33(9), pp.2798-2814.
- Kogan, F. N., 1995, "**Droughts of the late 1980s in the United States as derived from NOAA polar-orbiting satellite data**", Bulletin of the American Meteorological Society 76(5): 655-668.

- Agronomy Journal 101(3): 438-447.
- Reynolds, C.A., Yitayew, M., Slack, D.C., Hutchinson, C.F., Huete, A. and Petersen, M.S., 2000, **Estimating crop yields and production by integrating the FAO Crop Specific Water Balance model with real-time satellite data and ground-based ancillary data**, International Journal of Remote Sensing, 21(18), pp.3487-3508.
- Robertson, M. J. and Kirkegaard, J. A. 2006, **"Water-use efficiency of dryland canola in an equi-seasonal rainfall environment"** Australian Journal of Agricultural Research 56(12): 1373-1386.
- Rouse Jr, J.W., 1972, **"Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation"**.
- Sakamoto, T., A. A., Gitelson and T. J. Arkebauer, 2014, **"Near real-time prediction of US corn yields based on time-series MODIS data"** Remote Sensing of Environment 147: 219-231.
- Sirotenko, O. D., 2001, **"Crop Modeling"**, Agronomy Journal 93(3): 650-a-653.
- Schwartz, M.D. and T. R. Karl, 1990, **"Spring phenology: Nature's experiment to detect the effect of "green-up" on surface maximum temperatures"**, Monthly Weather Review 118(4): 883-890.
- Shunlin, L., 2004, **"Quantitative remote sensing of land surfaces"**, A John Wiley & Sons publication.
- Applications of remote sensing to agrometeorology**, Springer: 285-303.
- Mkhabela, M. S., M. S. Mkhabela and N. N. Mashinini, 2005, **"Early maize yield forecasting in the four agro-ecological regions of Swaziland using NDVI data derived from NOAA's-AVHRR"** Agricultural and Forest Meteorology 129(1-2): 1-9.
- Morel, J., P. Todoroff, A. Bégué, A. Bury, J.-F., Martiné and M. Petit, 2014, **"Toward a satellite-based system of sugarcane yield estimation and forecasting in smallholder farming conditions: A case study on Reunion Island"**, Remote Sensing 6(7): 6620-6635.
- Myneni, R. B., F. G. Hall, P. J. Sellers and Marshak, A.L., 1995, **"The interpretation of spectral vegetation indexes,"** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 33(2): 481-486.
- Pantazi, X. E., Moshou, D., Alexandridis, T., Whetton, R., and Mouazen, A.M., 2016, **"Wheat yield prediction using machine learning and advanced sensing techniques"** Computers and Electronics in Agriculture 121: 57-65.
- Petropoulos, G.P., and Kalaitzidis, C., 2012, **"Multispectral vegetation indices in remote sensing: an overview"** Ecol. Model 2: 15-39.
- Raes, D., Steduto, P., Hsiao, T.C. and Fereres, E., 2009, **"AquaCrop—the FAO crop model to simulate yield response to water: II. Main algorithms and software description"**

in the Midwestern US". *Remote Sensing*, 5(11), pp.5926-5943.

Sons. inc., Canada.

Trotter, T.F., Frazier, P.S., Trotter, M.G. and Lamb, D.W., 2008, July, **Objective biomass assessment using an active plant sensor (Crop Circle), preliminary experiences on a variety of agricultural landscapes**, In Ninth International Conference on Precision Agriculture'. Denver, Colorado.(Ed. R. Khosla.)(Colorado State University: Fort Collins, CO.).

Tucker, C.J., 1979, "**Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation**", *Remote Sensing of Environment* 8(2): 127-150.

Wang, C., S. Nie, X. Xi, S. Luo and X., Sun, 2016, "**Estimating the Biomass of Maize with Hyperspectral and LiDAR Data**", *Remote Sensing* 9(1): 11.

Wiegand, C.L. and A.J., Richardson, 1990, "**Use of spectral vegetation indices to infer leaf area, evapotranspiration and yield: I. Rationale**", *Agronomy Journal* 82(3): 623-629.

Wu, J., Wang, D., Bauer, M.E., 2007, **Assessing broadband vegetation indices and QuickBird data in estimating leaf area index of corn and potato canopies**, *Field crops research*, 102(1), pp.3342.

Xin, Q., Gong, P., Yu, C., Yu, L., Broich, M., Suyker, A.E. and Myneni, R.B., 2013. "**A production efficiency model-based method for satellite estimates of corn and soybean yields**



سنجش از دور
,
GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دهم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۷
Iranian Remote Sensing & GIS Vol.10, No.3, Autumn 2018

53-76

Alfalfa yield estimation using Sentinel-2 satellite images- a case study in Magsal Agricultural and Production Company (Qazvin)

Haddadi F.¹, Azadbakht M.^{2*}, Behifar M.^{1,3}, Salehi H.¹, Moeinirad A.^{1,4}

1. Remote sensing expert, Iranian Space Research Center
2. Assistant Professor in Remote Sensing, Remote Sensing and GIS Research Center
3. PhD student in Remote Sensing, Remote Sensing and GIS department, School of Geography, University of Tehran
4. PhD student in Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics Engineering, K.N. Toosi University of Technology

Abstract

Over the past several decades, many vegetation indices have been developed for crop yield estimation, each being sensitive to different levels of crop density and leaf area index, based on the bands and the algebraic formulas used in its design. However, the study of some perennial crops such as alfalfa, which are harvested several times annually, is very complicated and has received less attention. Therefore, in this paper, the most important vegetation indices developed to estimate alfalfa yield are using Sentinel-2 time series images. In this research, 144 alfalfa samples were collected periodically in a destructive way from alfalfa farms of Magsal Agricultural and Production Company (Qazvin) near the time of satellite pass, and then the efficiency of 10 of the most famous vegetation indices to estimate alfalfa yield was evaluated based on Sentinel-2 images. The results of this research showed that the estimated alfalfa yield using the **GNDVI** index had the highest correlation ($R^2 = 0.69$) and the lowest root-mean-square-error ($RMSE = 0.316 \text{ kg/m}^2$) compared to the field data collected in the middle of August. In addition, the results showed that the red edge indices did not solve the saturation problem of vegetation indices and that the green vegetation indices were more capable of estimating alfalfa yield than the red edge indices.

Keywords: Remote sensing, Agriculture, Red edge Index, Yield Estimation, Alfalfa, Sentinel-2.