Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

A review of remote sensing vegetation indices in the land cover assessment

Fazel Amiri [1]*

[1] Associate Professor, Department of Natural Resources and Environment, Branch Bushehr, Islamic Azad University, Bushehr, Iran

Abstract

Introduction

Remote sensed information on growth, vigor, and dynamics from terrestrial vegetation can provide useful insights for applications in environmental monitoring, biodiversity conservation, agriculture, forestry, urban green infrastructures, and other related fields. Specifically, these types of information applied to agriculture provide not only an objective basis (depending on resolution) for the macro- and micro-management of agricultural production but also on many occasions the necessary information for yield estimation of crops. Vegetation indices (VIs) obtained from the vegetation canopy in remote sensing are simple and effective algorithms for quantitative and qualitative evaluations of vegetation cover, vigor, and growth dynamics, among other applications. These indicators are used in remote sensing applications and satellite systems. To date, there is no unified mathematical expression that defines all VIs due to the complexity of different combinations of light spectra, instrumentation, platforms, and resolutions used. Therefore, special algorithms have been developed for different applications according to the specific mathematical expressions in the range of the visible light radiation spectrum, mainly the green spectrum region, from vegetation, and invisible spectra to quantitatively determine the level of vegetation cover. In this article, the spectral characteristics of vegetation and vegetation indices, the advantages and disadvantages of various developed indices, and their application are discussed according to the characteristics of vegetation, environment, and accuracy of implementation.

Materials and Methods

Remote sensing of vegetation is primarily performed by getting the electromagnetic wave reflectance data from canopies utilizing passive sensors. It is well known that the reflectance of light spectra from plants changes with plant sort, water substance inside tissues, and other natural components. The reflectance from vegetation to the electromagnetic range (spectral reflectance or emanation characteristics of vegetation) is decided by chemical and morphological characteristics of the surface of organs or clears out. Most applications for inaccessible detecting of vegetation are based on the taking after light spectra: (i) the bright locale (UV), which goes from 10 fr 380 nm; (ii) the apparent spectra, which are composed of the blue (450–495 nm), green (495−570 nm), and ruddy (620–750 nm) wavelength districts; and (iii) the close and mid-infrared band (850–1700 nm). The emissivity rate of the surface of takes off (equivalent to the absorptivity within the warm waveband) of a completely developed green arrange.

Results and Discussion

Many studies have constrained this translation by extricating vegetation data utilizing person light spectra groups or a bunch of single groups for information investigation. Hence, analysts regularly combine the information from near-infrared (0.7–1.1 m) and ruddy (0.6–0.7 m) groups in numerous ways concurring with their particular targets. These sorts of combinations display many disadvantages (e.g., need for affectability) by employing a single or restricted gathering of groups to detect, for case, vegetation biomass. These impediments are especially apparent when attempting to apply these sorts of VI on heterogeneous canopies, such as green tree ranches. A blended combination of soils, weeds, and cover crops within the interrow. The plants of intrigued make the segregation locales of intrigued and extraction of straightforward VI exceptionally troublesome, particularly, when the vegetation of intrigued has distinctive VIs due to spatial inconstancy, or VIs compared to other vegetation (weeds and cover edit), which can be compared to those of intrigued. The last mentioned will complicate imaging denoising and sifting forms. A few picture examination procedures and calculations have been created to go around these issues, which can be depicted afterward. Indeed in spite of the fact that there are

Water and Soil Management and Modeling

Online ISSN: 2783 - 2546

University of Mohaghegh Ardabili

numerous contemplations as portrayed sometime recently, the development of a straightforward VI calculation seems numerous times to render basic and compelling apparatuses to degree vegetation status on the surface of the soil. Vegetation data from remotely detected pictures is primarily translated by contrasts and changes within the green clears out from plants and canopy ghastly characteristics. The foremost common approval preparation is through coordinate or backhanded relationships between VIs gotten and the vegetation characteristics of intrigued measured in situ, such as vegetation cover, leaf area index (LAI), biomass, development, and vigor evaluation. More set-up strategies are utilized to evaluate VIs utilizing coordinate and georeferenced strategies by checking sentinel plants to be compared with VIs gotten from the same plants for calibration purposes.

Conclusion

Basic vegetation records combining obvious and near-infrared groups have essentially moved forward the affectability of green vegetation discovery. Diverse situations have their variable and complex characteristics that must be considered when utilizing distinctive plant lists. Hence, each vegetation list has its claim definition of green vegetation, its reasonableness for particular applications, and a few restricting variables. Subsequently, for commonsense applications, the choice of a particular vegetation file ought to be done carefully by considering and comprehensively analyzing the points of interest and confinements of existing vegetation records and after that combining them for application in a particular environment. In this way, the utilization of plant markers can be custom-fitted to particular applications, instruments, and stages. With the advancement of hyperspectral and multispectral further detecting innovation, it is conceivable to create unused plant markers that grow investigative areas.

Keywords: Detection of land cover/land use, Land cover, Remote sensing, Vegetation indices (VIs)

Article Type: Review Article

*Corresponding Author, E-mail: Fazel.Amiri@iau.ac.ir

Citation: Amiri, F. (2023). A Review of Remote sensing vegetation indices in the land cover assessment. *Water and Soil Management and Modeling*, 3(2), 297-318.
DOI:10.22098/MMWS.2023.12207.1212
DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.20.0

Received: 25 January 2023, Received in revised form: 06 February 2023, Accepted: 27 February 2023, Published online: 27 February 2023

Water and Soil Management and Modeling, Year 2023, Vol. 3, No. 2, pp. 297-318

Publisher: University of Mohaghegh Ardabili

© Author(s)

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک

شاپا الکترونیکی: ۲۵٤٦-۲۷۸۳

مروری بر شاخص‌های پوشش‌گیاهی سنجش از دور در ارزیابی پوشش اراضی

فاضل امیری[1*]

[1] دانشیار، گروه منابع طبیعی و محیط زیست، واحد بوشهر، دانشگاه آزاد اسلامی، بوشهر، ایران

چکیده

داده‌های سنجش از دور از رشد، زادآوری و تغییرات رشد پوشش گیاهی می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را در نظارت بر محیط‌زیست، حفاظت از تنوع زیستی، کشاورزی، جنگلداری، زیرساخت‌های سبز شهری و سایر زمینه‌های مرتبط ارائه دهد. از کاربرد داده‌های سنجش از دور استفاده در ارزیابی پوشش و کاربری اراضی است. شاخص‌های گیاهی به‌دست‌آمده از تاج پوشش‌گیاهی در سنجش از دور، الگوریتم‌های ساده و مؤثری برای ارزیابی‌های کمی و کیفی پوشش گیاهی، زادآوری و تغییرات رشد گیاهان هستند. این شاخص‌ها در سنجش از دور با استفاده از سیستم‌های مختلف هوابرد و ماهواره ای استفاده می‌شوند. تا به امروز، هیچ رابطه ریاضی کاملی وجود ندارد که کلیه شاخص‌های گیاهی را به دلیل پیچیدگی ترکیبات مختلف طیف‌های نور، ابزار دقیق، پلت فرم‌ها و وضوح مورد استفاده، تعریف کند. بنابراین، الگوریتم‌های خاصی برای کاربردهای مختلف با توجه به روابط ریاضی در دامنه طیف تابش نور مرئی، عمدتاً منطقه طیف سبز، از پوشش گیاهی، و طیف‌های نامرئی را برای تعیین کمی سطح پوشش گیاهی، توسعه یافته است. در مقاله حاضر، ویژگی‌های طیفی پوشش گیاهی و شاخص‌های گیاهی، مزایا و معایب شاخص های مختلف توسعه یافته ارائه، و کاربرد آن‌ها با توجه به ویژگی-های پوشش گیاهی، محیط، و دقت اجرا بحث می‌شود. الگوریتم‌های شاخص پوشش گیاهی مورد بحث در این تحقیق، می‌تواند ابزاری مؤثری برای اندازه‌گیری وضعیت پوشش گیاهی اراضی ارائه دهد.

واژه‌های کلیدی: پوشش اراضی، پایش پوشش یا کاربری اراضی، سنجش از دور، شاخص‌های گیاهی

نوع مقاله: پژوهشی

*مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: Fazel.Amiri@iau.ac.ir.

استناد: امیری، فاضل. (۱۴۰۲). مروری بر شاخص‌های پوشش‌گیاهی سنجش از دور در ارزیابی پوشش اراضی. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۳۱۸-۲۹۷.

DOI:10.22098/MMWS.2023.12207.1212

DOR: 20.1001.1.27832546.1402.3.2.20.0

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۰۵، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸، تاریخ انتشار: ۱۴۰۱/۱۲/۰۸

مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک، سال ۱۴۰۲، دوره ۳، شماره ۲، صفحه ۲۹۷ تا ۳۱۸

ناشر: دانشگاه محقق اردبیلی

© نویسندگان

۱- مقدمه

داده‌های سنجش از دور مربوط به رشد، زادآوری و تغییرات رشد پوشش‌گیاهی می‌تواند اطلاعات بسیار مفیدی را در نظارت بر محیط زیست، حفاظت از تنوع زیستی، کشاورزی، جنگل‌داری، زیرساخت‌های سبز شهری و سایر زمینه‌های مرتبط ارائه دهد. از کاربرد داده‌های سنجش از دور استفاده در ارزیابی پوشش و کاربری اراضی است (Sishodia et al., 2020). سنجش از دور پوشش‌گیاهی عمدتاً با به‌دست آوردن اطلاعات بازتاب امواج الکترومغناطیسی از تاج‌پوشش گیاهان با استفاده از سنجنده‌های غیرفعال انجام می‌شود (Amiri and Yeganeh, 2012). بازتاب طیف‌های نور از گیاهان با نوع گیاه، محتوای آب در بافت‌ها و سایر عوامل ذاتی تغییر می‌کند. بازتاب از پوشش‌گیاهی به طیف الکترومغناطیسی (بازتاب طیفی یا ویژگی‌های انتشار پوشش‌گیاهی) با ویژگی‌های شیمیایی و ریخت‌شناسی سطح اندام‌ها یا برگ‌ها تعیین می‌شود (Zhang and Kovacs, 2012). محدودهٔ سنجش از دور پوشش‌گیاهی بر اساس طیف‌های نور به شرح زیر است: (الف) ناحیهٔ فرابنفش (UV) که از ۱۰ تا ۳۸۰ نانومتر می‌رود، (ب) طیف مرئی که از مناطق طول موج آبی (۴۵۰–۴۹۵ نانومتر)، سبز (۵۷۰–۴۹۵ نانومتر)، و قرمز (۶۲۰–۷۵۰ نانومتر) تشکیل شده است، (ج) باند مادون قرمز نزدیک و میانی (۸۵۰–۱۷۰۰ نانومتر) (Cruden et al., 2012; Rahim et al., 2016). نرخ انتشار سطح برگ‌ها (معادل جذب در باند موج حرارتی) یک گیاه سبز کاملاً رشد یافتهٔ بدون هیچ‌گونه تنش زیستی یا غیرزیستی به‌طور کلی در محدودهٔ ۰/۹۹–۰/۹۶ و اغلب بین ۰/۹۷ و ۰/۹۸ است. در صورتی‌که برای گیاهان خشک، نرخ انتشار عموماً دارای محدودهٔ بزرگ‌تری (۰/۹۴–۰/۸۸) است (Arkebauer, 2005). انتشار پوشش‌گیاهی در محدودهٔ نزدیک و میانی مادون قرمز در تاج پوشش گیاهان مورد مطالعه قرار گرفته است. شاخص‌های استخراج شده از این طیف نوری را می‌توان به طیفی از ویژگی‌های فراتر از رشد و زادآوری گیاهان مربوط به محتوای آب، رنگدانه‌ها، محتوای قند و کربوهیدرات، محتوای پروتئین و مواد معطر و غیره نسبت داد (Batten, 1998). کاربردهای مختلف به پیک‌های بازتابی یا نور برای اجزای خاص در نواحی مرئی و مادون قرمز نزدیک یا میانی طیف نور بستگی دارد. بازتاب گیاه در محدودهٔ طیفی مادون قرمز حرارتی (۱۴– ۸ میکرومتر) از قانون تابش جسم سیاه که در آن انتشار گیاه تحت تأثیر دمای گیاه تفسیر می‌شود، پیروی می‌کند (Burns and Ciurczak, 2007).

از این‌رو، شاخص‌های به‌دست آمده از محدودهٔ طیفی را می‌توان برای ارزیابی دینامیک روزنه‌ها که نرخ تعرق گیاهان را تنظیم می‌کند، استفاده کرد. بنابراین، شاخص‌های بعدی را می‌توان به‌عنوان شاخص وضعیت آب گیاه (Fuentes et al., 2012; Prashar and Jones, 2016; Martynenko et al., 2016) و سطوح تنش زنده و غیرزنده (Mahlein et al., 2012; Oerke et al., 2014) استفاده کرد. مطالعات نشان می‌دهد که تفسیر کمی اطلاعات سنجش از دور از پوشش‌گیاهی کاری مشکل و پیچیده است. بسیاری از مطالعات این تفسیر را با استخراج اطلاعات پوشش‌گیاهی با استفاده از باندهای تکی طیف نور یا گروهی از باندهای منفرد برای تحلیل داده‌ها محدود کرده‌اند (Tabatabaie and Amiri, 2019). بنابراین، پژوهش‌گران اغلب داده‌های باندهای مادون قرمز نزدیک (۱/۱– ۰/۷ متر) و قرمز (۰/۷–۰/۶ متر) را با توجه به اهداف خاص خود به روش‌های مختلف ترکیب می‌کنند (Sishodia et al., 2020). ترکیبات باندی با استفاده از تک باند یا باندهای محدود برای شناسایی، به‌عنوان مثال، زیست‌تودهٔ گیاهی، معایب بسیاری را به همراه دارند (مانند عدم حساسیت). این محدودیت‌ها به‌ویژه هنگام استفاده از این نوع شاخص‌های گیاهی در تاج پوشش‌های ناهمگن، مانند مزارع درختان باغبانی بیش‌تر دیده می‌شود. ترکیب خاک‌های مختلف، علف‌های هرز، پوشش محصولات در میان ردیف، و تفکیک مناطق و استخراج شاخص پوشش‌گیاهی مناسب را بسیار دشوار می‌کند. به‌ویژه، زمانی‌که پوشش‌گیاهی به‌دلیل تنوع مکانی دارای شاخص‌های پوشش‌گیاهی مختلف باشد (Amiri and Nateghi, 2023). در مواردی فرآیندهای حذف خطا و فیلتر کردن تصویر، تحلیل تصویر را مشکل و پیچیده می‌کند. چندین روش و الگوریتم تحلیل تصویر برای حل این مسئله توسعه یافته است. با وجود ملاحظات زیاد، اما ارائه الگوریتم‌های شاخص پوشش‌گیاهی می‌تواند ابزاری مؤثری برای اندازه‌گیری وضعیت پوشش‌گیاهی اراضی ارائه دهد (Hoffmann et al., 2015). هدف از پژوهش حاضر، ارائه ویژگی‌های طیفی پوشش‌گیاهی و شاخص‌های گیاهی، مزایا و معایب شاخص‌های مختلف توسعه یافته، و کاربرد آن‌ها با توجه به ویژگی‌های پوشش‌گیاهی، محیط، و دقت اجرا بحث می‌شود.

۲- شاخص‌های پوشش‌گیاهی

۲-۱- شاخص‌های اصلی پوشش‌گیاهی

یکی از اولین شاخص‌های گیاهی به نام شاخص نسبت گیاهی (RVI)[1] توسط Jordan (1969) پیشنهاد شد. این شاخص بر این اصل استوار است که برگ‌ها نور قرمز را نسبت به مادون قرمز بیش‌تر جذب می‌کنند. شاخص مذکور از طریق رابطهٔ (۱) برآورد می‌شود.

$$RVI = \frac{R}{NIR} \qquad (۱)$$

[1] Ratio vegetation index (RVI)

در این رابطه، NIR بازتاب باند مادون قرمز نزدیک و R بازتاب باند قرمز است. با توجه به ویژگی‌های طیفی پوشش‌گیاهی، گیاهان بوته‌دار بازتاب کمی در نوار قرمز دارند و همبستگی بالایی با شاخص سطح برگ[1](LAI)، زیست‌توده خشک برگ (LDBM)[2]و محتوای کلروفیل برگ‌ها نشان داده‌اند (Quan et al., 2011). RVI به‌طور گسترده برای تخمین و پایش زیست‌تودهٔ سبز، به‌ویژه در مناطقی با پوشش‌گیاهی متراکم استفاده می‌شود. زیرا این شاخص به پوشش‌گیاهی بسیار حساس است و همبستگی خوبی با زیست‌توده گیاهی دارد. وقتی‌که تراکم پوشش‌گیاهی کم است (کم‌تر از ۵۰ درصد پوشش)، RVI به اثرات جوی حساس است در این حالت برآورد زیست‌تودهٔ گیاهی با استفاده از این شاخص ضعیف است (Pearson and Miller, 1972). شاخص تفاضل پوشش‌گیاهی(DVI)[3]با استفاده از رابطهٔ (۲) تعیین می‌شود.

$$DVI = NIR - R \qquad (۲)$$

DVI به تغییرات پس‌زمینهٔ خاک بسیار حساس است. می‌توان آن را برای ارزیابی محیطی پوشش‌گیاهی استفاده کرد (Nourqolipour et al., 2015b). DVI، شاخص پوشش‌گیاهی محیطی (EVI) [4] نیز نامیده می‌شود. شاخص عمودی پوشش‌گیاهی (PVI)[5]شبیه‌سازی از شاخص گیاهی سبز (GVI)[6] بر اساس دو باند طیفی قرمز (R) و مادون قرمز (NIR) است (Richardson and Wiegand, 1977). در سیستم مختصات NIR-R، پاسخ طیفی از خاک به‌صورت خط روشن خاک ارائه می‌شود. اثر دوم را می‌توان به این صورت توضیح داد که خاک یک پاسخ طیفی بالایی در باندهای NIR و R ارائه می‌دهد. فاصلهٔ بین نقطهٔ بازتاب (NIR، R) و خط خاک به‌صورت RVI تعریف شده و از رابطهٔ (۳) به‌دست می‌آید.

$$PVI = \sqrt{(\rho_{soil} - \rho_{veg})^2{}_R - (\rho_{soil} - \rho_{veg})^2{}_{NIR}} \qquad (۳)$$

در آن، ρ_{soil} ؛ بازتاب خاک و ρ_{veg} ؛ بازتاب پوشش‌گیاهی است. این شاخص زیست‌تودهٔ گیاهی را در پس‌زمینهٔ خاک ρ_{soil} مشخص می‌کند (Richardson and Weigand 1977; Roujean and Breon, 1995). هر چه فاصله بیش‌تر باشد، زیست‌توده بیش‌تر است. هم‌چنین، می‌تواند به‌صورت کمی بیان شود:

$$PVI = (DNNIR - b)\cos\theta - DNR - b)\cos \qquad (۴)$$

در این رابطه؛ DN_{NIR} و DN_R مقادیر درخشندگی منعکس شدهٔ تابش از NIR و R هستند. b نقطهٔ مبدأ خط پایهٔ خاک و محور عمودی بازتاب NIR و θ زاویهٔ بین محور افقی بازتاب‌پذیری و خط پایهٔ خاک است. به این ترتیب PVI اثرات پس‌زمینهٔ خاک را به روشی کارآمد فیلتر می‌کند. هم‌چنین، حساسیت کم‌تری به اثرات جوی دارد و عمدتاً برای وارونگی پارامتر پوشش‌گیاهی سطحی (تولید گراس، محتوای کلروفیل)، محاسبهٔ شاخص سطح برگ و شناسایی و طبقه‌بندی پوشش گیاهی استفاده می‌شود (Wenlong, 2009; Kaufman and Tanre, 1992). با این حال، PVI به روشنایی و بازتاب خاک حساس است، به‌ویژه در مورد پوشش‌گیاهی کم که نیاز به تنظیم برای این اثر دارد (Major et al., 1990). شاخص نرمال شدهٔ اختلاف پوشش‌گیاهی[7](NDVI) بیش‌ترین استفاده را به‌عنوان شاخص گیاهی دارد (Amiri et al., 2014). این شاخص توسط Rouse et al. (1974) ارائه شده و بر اساس رابطهٔ (۵) محاسبه می‌شود.

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{\rho_{NIR}} + \rho_R \qquad (۵)$$

از آن‌جایی‌که این شاخص به روش نرمال شده محاسبه می‌شود، دامنهٔ مقادیر NDVI بین صفر تا یک است و برای مناطق تحت پوشش‌گیاهی کم، پاسخ حساسی به پوشش‌گیاهی سبز دارد. این شاخص اغلب در پژوهش‌های مربوط به ارزیابی‌های پوشش‌گیاهی منطقه‌ای و جهانی استفاده می‌شود و نشان داده شد که علاوه‌بر ساختار تاج پوشش و شاخص سطح برگ با فتوسنتز تاج پوشش نیز مرتبط است (Gamon et al., 1992). بنابراین، NDVI به اثرات روشنایی خاک، رنگ خاک، جو، سایهٔ ابر و سایهٔ تاج برگ حساس بوده و نیاز به واسنجی دارد.

۲-۲- شاخص‌های پوشش‌گیاهی با در نظر گرفتن اثرات جوی

با توجه به محدودیت‌های NDVI تحت تأثیرات جوی، شاخص گیاهی غیرحساس به عوامل جو (ARVI)[8]پیشنهاد شد (Kaufman and Tanre, 1992). این شاخص مبتنی بر دانشی است که جو به‌طور قابل‌توجهی در مقایسه با NIR تأثیر می‌گذارد. بنابراین، Kaufman and Tanre (1992) مقدار تابش R را با تفاوت بین آبی (B) و R تغییر داد. بنابراین، ARVI می‌تواند وابستگی این شاخص گیاهی (VI) را به اثرات جوی به‌طور مؤثر کاهش دهد، که از رابطهٔ (۶) محاسبه می‌شود.

$$ARVI = \frac{(NIR - RB)}{(NIR + RB)} \qquad (۶)$$
$$\rho_{\tau b}{}^* = \rho_\tau{}^* - \gamma(\rho_b{}^* - \rho_\tau{}^*)$$

[1] Leaf area index (LAI)
[2] Leaf dry biomass matter (LDBM)
[3] Difference vegetation index (DVI)
[4] Environmental vegetation index (EVI)
[5] Perpendicular vegetation index (PVI)
[6] Green vegetation index (GVI)
[7] Normalized difference vegetation index (NDVI)
[8] Atmospherically resistant vegetation index (ARVI)

جایی‌که RB تفاوت بین B و R، بازتاب مربوط به پراکندگی مولکولی و جذب گازی برای تصحیح ازن است و پارامترهای تهویهٔ مطبوع را نشان می‌دهد. ARVI معمولاً برای از بین بردن اثرات ذرات معلق در هوا استفاده می‌شود. اثرات ذرات معلق در هوا و ازن در جو هنوز باید توسط مدل جوی 5S (5S یک کد کامپیوتری، برای تخمین تابش خورشیدی باز پراکنده شده توسط سیستم زمین–سطح–اتمسفر است) حذف شوند (Tanre, 1990). با این حال، برای پیاده‌سازی مدل انتقال اتمسفر 5S، پارامترهای جوی واقعی باید در نظر گرفته شوند که به سختی به‌دست می‌آیند. اگر شاخص ARVI با استفاده از مدل 5S محاسبه نشود، انتظار نمی‌رود این شاخص با در نظر گرفتن اثرات جوی یا ذرات غبار بزرگ در جو، عملکرد بسیار بهتری نسبت به NDVI داشته باشد. بنابراین، Ren-hua et al. (1996) یک شاخص‌گیاهی با حذف اثر جوی (IAVI)، را پیشنهاد کردند که می‌تواند تداخل جوی را بدون استفاده از مدل 5S حذف کند.

$$IAVI = \frac{\{\rho_{nir} - [\rho_r - \gamma(\rho_b - \rho_r)]\}}{\{\rho_{nir} + [\rho_r - \gamma(\rho_b - \rho_r)]\}} \quad (۷)$$

در آن، محدودهٔ مقادیر γ بین ۰/۶۵ و ۱/۱۲ است. مقدار قابل‌توجه γ برای ARVI نزدیک به یک است. پس از آزمایش، خطای ایجاد شده در IAVI توسط اثر اتمسفر بین ۰/۴ تا ۳/۷ درصد است و کم‌تر از خطاهایی است که استفاده از NDVI در شرایط مشابه (۳۱–۱۴ درصد) مشاهده می‌شود.

۲-۳- شاخص پوشش‌گیاهی تعدیل شده خاک [1]

تمایز پوشش‌گیاهی از خاک زمینه در ابتدا توسط Richardson and Wiegand (1997) با تحلیل خط خاک پیشنهاد شد تا به‌صورت یک رابطهٔ خطی، مقادیر بازتاب طیفی خاک بین NIR و R در نظر گرفته شود. بنابراین، می‌توان آن را به‌عنوان توصیفی از اطلاعات طیفی خاک در نظر گرفت. بسیاری از شاخص‌های پوشش‌گیاهی که تأثیر خاک زمینه را در نظر می‌گیرند بر این اصل استوار شده‌اند. علاوه‌بر PVI، شاخص بدون تاثیر اتمسفر خط خاک (SLRA)[2] بر اساس تعدیل خط خاک توسعه داده شد. سپس SLRA با شاخص گیاهی تعدیل شده با خاک (TSAVI)[3] ترکیب شد تا توسعهٔ شاخص گیاهی اصلاح شده جوی نوع خاک (TSARVI)[4] است. شاخص NDVI به عوامل پس‌زمینه مانند روشنایی و سایهٔ تاج پوشش گیاهی و روشنایی پس‌زمینهٔ خاک بسیار حساس است. در این راستا، نتایج پژوهش Huete (1988) نشان داده است که با افزایش روشنایی پس‌زمینه، NDVI نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اثر خاک زمینه، زمانی‌که پوشش گیاهی کم است تابش به‌طور قابل‌توجهی افزایش می‌یابد. برعکس، تشعشعات NIR کاهش می‌یابد تا رابطهٔ بین پوشش‌گیاهی و خاک معنادار شود. بسیاری از شاخص‌های پوشش‌گیاهی برای تطبیق با اثر خاک توسعه یافته‌اند. از آن‌جایی‌که NDVI و PVI در توصیف رفتار طیفی پوشش‌گیاهی و خاک زمینه دارای کاستی‌هایی هستند، Huete (1988) شاخص گیاهی تعدیل شدهٔ خاک (SAVI) را ارائه کرد.

$$ISAVI = \frac{(\rho_n - \rho_r)(1 + L)}{(\rho_n + \rho_r + L)} \quad (۸)$$

در رابطهٔ فوق از خاک زمینه برای بهبود حساسیت NDVI به استفاده شد، که در آن L شاخص تهویهٔ خاک است و حساسیت NDVI به خاک زمینه را بهبود می‌بخشد. محدودهٔ L از صفر تا یک است. در کاربردهای عملی، مقادیر L با توجه به شرایط محیطی خاص تعیین می‌شود. هنگامی‌که تراکم و درصد تاج پوشش‌گیاهی زیاد باشد، L نزدیک به یک است، که نشان می‌دهد خاک زمینه تأثیری بر استخراج اطلاعات پوشش‌گیاهی ندارد. این نوع شرایط ایده‌آل به‌ندرت در محیط‌های طبیعی یافت می‌شود و تنها در عرصه‌هایی که تراکم و پوشش تاج پوشش زیاد باشد، مقدار L نزدیک به یک است (Kaufman and Tanre, 1992). مقدار L معمولاً ۰/۵ در نظر گرفته می‌شود. وقتی L نزدیک صفر باشد، مقدار SAVI برابر با NDVI است. با این حال، فاکتور L باید با مقدار پوشش‌گیاهی موجود برعکس تغییر کند تا تنظیم بهینه برای اثر خاک به‌دست آید. بنابراین، یک SAVI اصلاح شده (MSAVI) عامل L را SAVI در رابطهٔ (۸) با یک تابع L متغیر جایگزین می‌شود. به این ترتیب، MSAVI (Qi et al., 1994) تأثیر خاک عاری از پوشش گیاهی را بر SAVI کاهش می‌دهد و از رابطهٔ (۹) تعیین می‌شود.

$$MSAVI = 0.5 \times \{2R_{800} + 1 - [SQRT(2R_{800} + 1)^2 - 8\,(R_{800} - R_{670})]\} \quad (۹)$$

SAVI نسبت به RVI و تغییرات خاک زمینه ناشی از رنگ خاک یا رطوبت سطحی خاک حساسیت بسیار کم‌تری دارد. سه نوع SAVI (SAVI2، SAVI3 و SAVI4) بر اساس ارزیابی میدانی و نظری اثرات خاک‌های مرطوب و خشک ارائه شده است (Major et al., 1990). SAVI2، SAVI3 و SAVI4 با در نظر گرفتن تأثیر تغییر زاویهٔ تابش خورشید و تغییرات در ساختار فیزیکی خاک، تأثیر روشنایی خاک زمینه را کاهش می‌دهند. بر اساس شاخص MSAVI، Richardson and Wiegand

[1] Adjusted soil vegetation index
[2] Soil line atmospheric resistance index (SLRA)
[3] Transformed soil-adjusted vegetation index (TSAVI)
[4] Type soil atmospheric impedance vegetation index (TSARVI)

(1977) یک شاخص گیاهی ثانویهٔ تعدیل شده با خاک (MSAVI2)[1]را پیشنهاد کردند.

$$\mathrm{MSAVI2} = 0.5\left[(2\mathrm{NIR}+1) - \sqrt{(2\mathrm{NIR}+1)^2 - 8(\mathrm{NIR}-\mathrm{R})}\right] \quad (۱۰)$$

شاخص MSAVI2 به خط خاک بستگی ندارد و الگوریتم ساده‌تری دارد. عمدتاً در تحلیل رشد گیاهان، پژوهش‌های بیابان‌زایی، برآورد عملکرد مراتع، ارزیابی شاخص سطح برگ، تحلیل مواد آلی خاک، پایش خشکسالی و تحلیل فرسایش خاک استفاده می‌شود (Wenlong, 2009). هم‌چنین، Baret et al. (1993) حساسیت پنج شاخص گیاهی NDVI، SAVI، شاخص گیاهی تعدیل شده با خاک (TSAVI)، شاخص گیاهی اصلاح شده با خاک (MSAVI) و شاخص جهانی نظارت بر محیط زیست (GEMI) را مربوط به خاک زمینهٔ مورد مطالعه دانستند. آن‌ها عملکرد شاخص‌های گیاهی را برای بافت‌های مختلف خاک، سطوح رطوبت و زبری با استفاده از مدل (SAIL)[2]شبیه‌سازی کردند. سپس مقدار بهینه SAIL=۰/۱۶ را برای کاهش اثرات خاک زمینه تعیین کردند و در ادامه یک شاخص گیاهی بهینه شده با خاک (OSAVI) را پیشنهاد کردند.

$$\mathrm{OSARVI} = \frac{(\mathrm{NIR}-\mathrm{R})}{(\mathrm{NIR}+\mathrm{R}+\mathrm{X})} \quad (۱۱)$$

در این رابطه، مقدار SAIL برابر با ۰/۱۶ است و OSAVI به خط خاک بستگی ندارد و می‌تواند تأثیر خاک زمینه را به‌طور مؤثر از بین ببرد. با این حال، برنامه‌های کاربردی OSAVI گسترده نیست. عمدتاً برای محاسبهٔ زیست‌تودهٔ سطح زمین، محتوای نیتروژن برگ، و محتوای کلروفیل و غیره استفاده می‌شود (Huete, 1988; Qi et al., 1994).

۲-۴- تبدیل تسلدگپ شاخص سبزی پوشش‌گیاهی

Kauth and Thomas (1976) الگوی طیفی فرآیند رشد پوشش گیاهی را مطالعه کردند و آن را الگوی اسپایک گپ[3] نامیدند، از جمله بازتاب خاک زمینه و خط روشنایی. تبدیل تسلدگپ تبدیل نوارهای اصلی یک تصویر به مجموعهٔ جدیدی از نوارها با تعابیر تعریف شده است که برای نقشه‌برداری پوشش‌گیاهی مفید است. تبدیل تسلدگپ با استفاده از "ترکیبات خطی" باندهای تصویر اصلی انجام می‌شود، که از نظر مفهومی شبیه به تحلیل داده‌های چندمتغیره است که به آن تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) می‌گویند. تسلدگپ می‌تواند داده‌های Landsat MSS، Landsat TM و Landsat ETM$^+$ را تبدیل کند. علاوه‌بر این، برای داده‌های Landsat MSS، تسلدگپ تبدیل متعامد روی داده‌های اصلی را انجام می‌دهد که آن را به یک فضای چهاربعدی (4D) تبدیل می‌کند. این تبدیل شامل شاخص روشنایی خاک (SBI)[4]، درجهٔ شاخص گیاهی سبز (GVI) و درجهٔ شاخص گیاهی زرد (YVI)[5]است. هم‌چنین، شامل شاخص Nonsuch عمدتاً برای کاهش نویز است. NSI ارتباط نزدیکی با اثرات جوی دارد. برای داده‌های Landsat TM، نتایج تسلدگپ از سه عامل تشکیل شده است؛ روشنایی، سبزی، و جزء سوم مربوط به خاک. در میان آن‌ها، روشنایی و سبزی معادل SBI و GVI در تسلدگپ MSS است. مؤلفه سوم مربوط به خصوصیات و رطوبت خاک است. برای داده‌های Landsat 7 ETM$^+$، تبدیل تسلدگپ شش باند به نام‌های روشنایی، سبزی، رطوبت، مؤلفه چهارم (نویز)، مؤلفه پنجم و مؤلفه ششم ایجاد می‌کند (Tian and Min, 1998).

$$\mathrm{GVI} = -0.29\,\mathrm{MSS}_4 - 0.562\,\mathrm{MSS}_5 + 0.600\,\mathrm{MSS}_6 + 0.491\mathrm{MSS}_7 \quad (۱۲)$$

$$\mathrm{YVI} = -0.829\,\mathrm{MSS}_4 - 0.522\,\mathrm{MSS}_5 + 0.039\,\mathrm{MSS}_6 + 0.149\mathrm{MSS}_7 \quad (۱۳)$$

$$\mathrm{SBI} = -0.29\,\mathrm{MSS}_4 - 0.632\,\mathrm{MSS}_5 + 0.586\,\mathrm{MSS}_6 + 0.264\mathrm{MSS}_7 \quad (۱۴)$$

در GVI، YVI، و SB تعامل و اثرات جو، خاک، و پوشش‌گیاهی نادیده گرفته می‌شود. SBI و GVI را می‌توان برای ارزیابی رفتار پوشش‌گیاهی و خاک لخت استفاده کرد (Tian and Min, 1998). GVI همبستگی قوی با پوشش‌گیاهی مختلف دارد. بنابراین، GVI پردازش اثرات جوی را افزایش می‌دهد. Jackson (1980) شاخص روشنایی خاک تعدیل شده (ASBI)[6]و شاخص گیاهی درجهٔ سبز تعدیل شده (AGVI) را پیشنهاد کرد.

$$\mathrm{ASBI} = 2\,\mathrm{YVI}$$

$$\mathrm{AGVI} = \mathrm{GVI} - (1 + 0.018\,\mathrm{GVI})\mathrm{YVI} - \frac{\mathrm{NSI}}{2} \quad (۱۵)$$

تحلیل مؤلفه‌های اصلی (PCA) را Misra and Wheeler (1977) بر روی تصاویر لندست انجام دادند و عوامل متعدد این شاخص‌ها را محاسبه کردند. این تحلیل اساس توسعهٔ شاخص روشنایی خاک میسرا (MSBI)، شاخص گیاهی درجهٔ سبز میسرا (MGVI) و شاخص گیاهی درجهٔ زرد میسرا (MYVI) بود که از طریق رابطهٔ (۱۶) تعیین می‌شود.

[1] Modified secondary soil- adjusted vegetation index (MSAVI2)
[2] Scattering from arbitrarily inclined leaves (SAIL)
[3] Spike cap
[4] Soil brightness index (SBI)
[5] Yellow vegetation index (YVI)
[6] Adjust soil brightness index (ASBI)

$$\begin{aligned} MSBI &= 0.406\ MSS_4 + 0.60\ MSS_5 \\ &+ 0.645\ MSS_6 \\ &+ 0.243 MSS_7 \\ MGVI &= -0.386\ MSS_4 - 0.53 MSS_5 \\ &+ 0.535 MSS_6 \\ &+ 0.532 MSS_7 \\ MYVI &= 0.723\ MSS_4 - 0.597\ MSS_5 \\ &+ 0.206\ MSS_6 \\ &- 0.278 MSS_7 \end{aligned} \quad (۱۶)$$

از آن‌جایی‌که مشخص شده است که NDVI فقط تحت تأثیر روشنایی خاک قرار می‌گیرد، یک همبستگی منفی بین NDVI و روشنایی خاک دیده می‌شود. همبستگی مثبت زمانی پدید می‌شود که فقط اثرات جوی بر NDVI تأثیر بگذارد. در شرایط طبیعی، خاک و اتمسفر به روشی پیچیده بر NDVI تأثیر می‌گذارند که با تأثیر پوشش‌گیاهی در تعامل است (Amiri and Tabatabaie, 2021). بنابراین، اتمسفر و پوشش‌گیاهی بر اساس ویژگی‌های خاک و قرار گرفتن در معرض، بر NDVI تأثیر می‌گذارند. در این راستا، Liu and Huete (1995) انواع مختلف خاک و شاخص‌های توسعه یافتهٔ جو را تحلیل کردند. آن‌ها شاخص اتمسفری عاری از پوشش‌گیاهی (ARVI)[1] و شاخص گیاهی تعدیل شدهٔ خاک (SAVI) را برای تحلیل جوامع پوشش‌گیاهی توسعه دادند. آن‌ها اظهار داشتند که در نتیجهٔ تعامل بین خاک و جو و کاهش یکی از آن‌ها ممکن است دیگری را افزایش دهد. آن‌ها یک مکانیسم بازخورد را با ایجاد پارامتری برای اصلاح اثرات خاک و جو معرفی کردند که شاخص پوشش‌گیاهی بهبود یافته (EVI)[2] است.

$$\begin{aligned} EVI &= \frac{(TM_4 - TM_3)(1+L)}{TM_4 - C_1 TM_3 + C_2 TM + L} \\ EVI &= 2.5 \times \frac{\rho_n^* - \rho_r^*}{\rho_n^* + C_1 \rho_r^* - C_2 \rho_b^* + L} \end{aligned} \quad (۱۷)$$

در رابطهٔ بالا EVI شامل مقادیر مادون قرمز نزدیک (NIR)، قرمز (R) و آبی (B) است که توسط اتمسفر تصحیح می‌شود. L پارامترهای تعدیل‌کنندهٔ خاک و مقدار آن برابر با یک است و پارامترها به‌ترتیب با مقادیر ثابت معادل شش و ۷/۵ است.

۲-۵- شاخص‌های پوشش‌گیاهی سنجش از دور هوایی بدون سرنشین (UAV) در منطقهٔ طیف مرئی

سنجش از دور UAV یک فن‌آوری سنجش از راه دور در ارتفاع پایین (۵۰ تا ۱۰۰ متر) است که در طول فرآیند جمع‌آوری داده‌ها کم‌تر تحت تأثیر عوامل جوی قرار می‌گیرد. این فن‌آوری دارای مزایای مقرون به‌صرفه بودن، عملیات ساده، سرعت تصویربرداری سریع و وضوح مکانی و زمانی بالا است که در مقایسه با فن‌آوری‌های سنجش از دور مبتنی بر داده‌های ماهواره‌های است. در حال حاضر، فن‌آوری سنجش از دور UAV با افزایش علاقه به استفاده از این سکوها در مطالعات مختلف ارزیابی پوشش‌گیاهی، نقش مهمی در زمینهٔ سنجش از دور هوایی ایفا می‌کند (Li et al., 2012). کاربردهای عملی UAV عمدتاً مربوط به دریافت تصاویر در باندهای مرئی (RGB) به‌دلیل دسترسی آسان به دوربین‌هایی با وضوح بالا در همه‌جا با قیمت و وزن کم است. با این حال، به‌دلیل پیشرفت‌های سریع در فن‌آوری، دوربین‌های حرارتی چند طیفی و مادون قرمز دائماً ارزان‌تر و کوچک‌تر می شوند. همان‌طورکه در مورد شاخص‌های پوشش‌گیاهی بیان شد، اکثر این شاخص‌ها بر اساس ترکیب باندهای نور مرئی و مادون قرمز نزدیک برای تولید الگوریتم‌ها استفاده می‌شوند. هر روزه دوربین‌های بدون وزن با وضوح بالا تولید می‌شوند که شامل باند مادون قرمز نزدیک است که کاربرد عملی UAV را افزایش می‌دهد (Li et al., 2012; Honkavaara et al., 2013). این نوع بازتاب معمولاً با استفاده از دوربین‌های مرئی، چندطیفی و فراطیفی اندازه‌گیری می‌شوند. به بیان Gago et al. (2015)، NDVI یکی از پرکاربردترین شاخص‌ها برای کاربردهای UAV بوده و از رابطهٔ (۱۸) تعیین می‌شود.

$$NDVI = \frac{(R_{800} - R_{680})}{(R_{800} + R_{680})} \quad (۱۸)$$

در این رابطه؛ $R_{۸۰۰}$ بازتاب در ۸۰۰ نانومتر و $R_{۶۸۰}$ در ۶۸۰ نانومتر است. به‌دلیل بازتاب مادون قرمز نزدیک (NIR) بالای کلروفیل، از این شاخص برای تشخیص سبزی گیاهان استفاده می شود (Zarco-Tejada et al., 2012). در برخی از مطالعات به استفاده از UAV را با دوربین‌های چندطیفی و ماهواره‌های چندطیفی با وضوح بالا برای تخمین LAI (شاخص سطح برگ) از طریق NDVI اشاره کردند (Berni et al., 2009; Fuentes et al., 2012).

شاخص تعدیل شدهٔ تبدیل جذب کلروفیل در بازتاب جذب کلروفیل تبدیل شده در شاخص بازتاب/شاخص گیاهی تعدیل شده با خاک (TCARI/OSAVI) به‌عنوان شاخص‌گیاهی حساس‌تر به محتوای کلروفیل مطرح شده است. به این ترتیب، از عوامل دیگری که می‌توانند بر مقادیر بازتاب تأثیر بگذارند، مانند بازتاب تاج پوشش و بازتاب خاک در میان سایر موارد، اجتناب می‌شود (Gago et al., 2015). شاخص دیگری که توسط Zarco-Tejada et al. (2013) ارائه شد، شاخص بهبود یافتهٔ بازتاب فتوشیمیایی (PRI)[3] است. این شاخص تغییرات زانتوفیل (زردینهٔ برگ) مربوط به تنش آبی را در نظر می‌گیرد، اما با توجه

[1] Atmosphere antivegetation index (ARVI)
[2] Enhanced vegetation index (EVI)
[3] Photochemical reflectance index (PRI)

به محتوای کلروفیل و کاهش سطح تاج پوشش برگ که عمدتاً تحت تأثیر تنش آبی است، نرمال می‌شود. به‌دلیل استخراج سریع و دقیق اطلاعات پوشش‌گیاهی بر اساس تصاویر UAV، دامنهٔ استفاده از UAV در ارزیابی منابع محیطی به‌سرعت در حال افزایش است. در پژوهشی، Wang et al. (2015) ویژگی‌های طیفی پوشش‌گیاهی سبز سالم را با استفاده از ویژگی‌های طیفی تصاویر UAV ارزیابی کردند. آن‌ها از باند سبز (G) به‌جای باند مادون قرمز نزدیک (NIR) برای محاسبهٔ NDVI استفاده کردند. هم‌چنین، به‌جای باند قرمز (R) در شاخص NDVI از مجموع ρقرمز + ρآبی، و به‌جای باند سبز (G) از ضرب دو در مجموع ρقرمز + ρآبی استفاده کردند. بنابراین، شاخص گیاهی تفاوت باند مرئی (VDVI) بر اساس سه باند نور مرئی ارائه شد (رابطهٔ ۱۹).

$$VDVI = \frac{(2 \times \rho_{green} - \rho_{red} - \rho_{blue})}{(2 \times \rho_{green} + \rho_{red} + \rho_{blue})} \quad (۱۹)$$

مقادیر شاخص VDVI در محدودهٔ منفی یک و یک قرار دارد. دقت استخراج پوشش‌گیاهی بر اساس شاخص VDVI بالاتر از سایر شاخص‌های پوشش‌گیاهی مبتنی بر باند نور مرئی و باند سبز (G) است. در مطالعه‌ای، Wang et al. (2015) دقت شاخص VDVI را بیش از ۹۰ درصد گزارش کردند.

۲-۶- شاخص‌های وضعیت پوشش‌گیاهی

همان‌طور که بیان شد، NDVI تفاوت بازتاب باندهای مادون قرمز NIR و قرمز R را افزایش می‌دهد (Gago et al., 2015). بنابراین، در این شاخص یک رابطهٔ غیرخطی بین مقادیر NIR و R برقرار می‌شود که منجر به افزایش مقادیر حداقل می‌شود. بنابراین، Gitelson (2004) شاخص گیاهی دامنهٔ دینامیکی گسترده (WDRVI) را پیشنهاد کرد (رابطهٔ ۲۰).

$$WDRVI = \frac{(\alpha\, \rho_{nir} - \rho_{red})}{(\alpha\, \rho_{nir} + \rho_{red})} \quad (۲۰)$$

WDRVI دامنه تغییرات NDVI را با اعمال یک پارامتر وزنی به بازتاب NIR افزایش می‌دهد. اگر α برابر با یک باشد، WDRVI معادل NDVI است. اگر α برابر با نسبت ρمادون قرمز نزدیک / ρقرمز باشد، WDRVI صفر است. پس از مراحل اعتبارسنجی، مناسب‌ترین مقدار برای ضریب α در محاسبهٔ WDRVI مقدار ۰/۲۰ است. مطالعهٔ Gitelson (2004) نشان داد که شاخص WDRVI برای افزایش دامنهٔ تغییرات عرصه‌هایی با زیست‌تودهٔ بالا مناسب است (LAI >۲). اما وقتی‌که زیست‌توده کم باشد (LAI <۱)، NDVI برای طبقه‌بندی پوشش‌گیاهی مناسب‌تر است. با توجه به بازتاب طیفی برگ‌های گیاه (۷۰۰–۵۵۰ نانومتر) می‌توان مقدار این بازتاب را ثابت در نظر گرفت حتی اگر میزان کلروفیل برگ‌ها متغیر باشد.

بر این اساس، Qi et al. (1994) سطح جذب را ۶۷۰ نانومتر اندازه‌گیری کردند و مقدار بازتاب حداکثر ۷۰۰ و حداقل (به‌ترتیب ۷۰۰ و ۵۵۰ نانومتر) را به‌هم مرتبط کردند. سپس شاخص نسبت جذب کلروفیل (CARI)[1] را به‌صورت رابطهٔ (۲۱) ارائه کردند.

$$CAR \times \left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right)$$
$$CAR = \frac{|(\alpha \times 670 + R_{670} + b)|}{\left(\alpha^2 + 1\right)^{0.5}} \quad (۲۱)$$
$$\alpha = \frac{(R_{700} - R_{500})}{(150)}$$
$$b = R_{550} - (\alpha \times 550)$$

سپس، Daughtry et al. (2000)، شاخص CARI را اصلاح کردند و شاخص اصلاح شدهٔ نسبت جذب کلروفیل (MCARI)[2] را ارائه کردند (رابطهٔ (۲۲)).

$$MCARI = \frac{1.5 \times [2.5\,(R_{800} - R_{670}) - 1.3\,(R_{800} - R_{5!}} {\sqrt{(2R_{800} + 1)^2 - (6R_{800} - 5R_{670}) - 0.}} \quad (۲۲)$$

MCARI به غلظت کلروفیل برگ حساس‌تر است. در پژوهشی، Daughtry et al. (2000) دریافتند که شاخص سطح برگ، کلروفیل و برهم‌کنش کلروفیل- شاخص سطح برگ به‌ترتیب ۶۰، ۲۷ و ۱۳ درصد از تغییرات MCARI را شامل می‌شوند. حتی اگر در رابطهٔ MCARI با باندهای NIR هم‌بستگی نداشته باشد، این شاخص پیش‌بینی‌های خوبی از پوشش‌گیاهی ارائه می‌دهد. در کشاورزی، رشد محصول به‌طور مستقیم با تأمین آب و وضعیت آب گیاه مرتبط است. هنگامی‌که ذخیرهٔ آب خاک کافی نباشد، گیاهان تحت تنش آبی قرار می‌گیرند که منجر به کاهش عملکرد محصول و حتی از بین رفتن محصول در شرایط خشکی شدید می‌شود. بنابراین ارزیابی به‌موقع و دقیق وضعیت آب محصول بسیار مهم است که تأثیر مستقیمی بر رشد، عملکرد و کیفیت محصول دارد. در سال‌های اخیر، توسعهٔ فن‌آوری سنجش از دور مادون قرمز حرارتی امکان اندازه‌گیری تغییرات دمای تاج پوشش و تغییرات انواع محصول را فراهم کرده است (Elsheikh et al., 2013). این تغییرات به‌سرعت تعرق گیاهان و ضریب انتقال روزنه بستگی دارد. از این‌رو، دمای برگ و تاج پوشش گیاه برای تعیین وضعیت آب محصول استفاده شده است (O'Shaughnessy et al., 2011). به‌منظور سازگاری اندازه‌گیری‌های دمای تاج پوشش، Idso et al. (1981) شاخص تنش آب محصول (CWSI) را برای ارزیابی وضعیت آب محصول ارائه کردند.

$$CWSI = \frac{(T_{canopy} - T_{nws})}{(T_{dry} - T_{nws})} \quad (۲۳)$$

[1] Chlorophyll absorption ratio index (CARI)
[2] Modified chlorophyll absorption ratio index (MCARI)

در این رابطه، T_{canopy} دمای برگ‌های تاج پوشش کاملاً آفتاب‌گیر (°C)، T_{nws} دمای برگ‌های تاج پوشش کاملاً آفتاب‌گیر (°C) زمانی است که محصول بدون تنش آبی (به خوبی آبیاری شده است) است. T_{dry} دمای برگ‌های تاج پوشش کاملاً آفتاب‌گیر (°C) زمانی است که محصول به‌دلیل کمبود آب در خاک تحت تنش شدید آبی است. T_{nws} و T_{dry}مقادیر دمای پایه پایین و بالایی هستند که برای نرمال‌سازی شاخص CWSI تحت اثرات شرایط محیطی (دمای هوا، رطوبت نسبی، تابش خورشیدی و سرعت باد) بر روی دمای تاج پوشش گیاهی T_{canopy} استفاده می‌شوند. CWSI دو مدل دارد، یک مدل تجربی و یک مدل نظری. مدل نظری شامل پارامترهای بسیار زیادی است و به‌دست آوردن این پارامترها آسان نیست. بنابراین، مدل نظری فقط برای اهداف تحقیقاتی استفاده می‌شود (Lebourgeois et al., 2010). مدل تجربی را می توان با استفاده از دمای تاج پوشش گیاهی، دمای هوا و تفاوت اشباع هوا به‌دست آورد؛ بنابراین، مدل تجربی بیش‌تر مورد مطالعه قرار گرفته و در بسیاری از کاربردهای محصول مورد استفاده قرار گرفته است (Anda, 2009). علاوه‌بر استفاده از تابش مادون قرمز حرارتی برای تشخیص تنش آبی گیاه، قسمت مرئی طیف نیز برای تشخیص زودهنگام تنش آبی مفید است. این شامل استفاده از شاخص‌های متمرکز بر باندهای در طول موج‌های خاص است که در آن رنگدانه‌های فتوسنتزی تحت تأثیر شرایط تنش آبی مانند کلروفیل قرار می‌گیرند. شاخص بازتاب فتوشیمیایی (PRI) به‌عنوان یک شاخص استرس است، که برای تشخیص علائم بیماری، از آن استفاده می‌شود.

$$PRI = \frac{(R_{531} - R_{570})}{(R_{531} - R_{570})} \quad (۲۴)$$

بازده مصرف نور (LUE)[1]به‌عنوان یک متغیر کلیدی برای تخمین تولید اولیهٔ خالص (NPP) نشان داده شده است. هنگام به‌دست آوردن دقت قابل اعتماد در اندازه‌گیری‌های LUE، می‌توان توزیع انرژی و تغییرات آب و هوایی جهانی را مطالعه کرد. PRI یک تفاوت نرمال شده شاخص گیاهی از بازتاب در ۵۳۱ و ۵۷۰ نانومتر است و بازتاب این دو باند تحت تأثیر چرخهٔزانتوفیل قرار دارد و ارتباط نزدیکی با LUE برگ‌ها دارد. بنابراین، PRI تخمین خوبی از LUE برگ ارائه می‌دهد (Haxeltine, 1996; Ruimy et al., 1999). خلاصه‌ای از شاخص‌های پوشش‌گیاهی (VI) بحث شده در جدول ۱ ارائه شده است.

۳- ارزیابی صحت شاخص‌های گیاهی

با استفاده از ابزار دقیق طیفی با تفکیک بالا، تعداد باندهای به‌دست آمده توسط سنجش از دور در حال افزایش است و پهنای باند در حال باریک‌تر شدن است (Honkavaara et al., 2013). یکی از پرکاربردترین شاخص‌هایی که از اطلاعات چندطیفی به‌عنوان نسبت نرمال‌شده بین باندهای قرمز و مادون قرمز نزدیک محاسبه می‌شود، شاخص نرمال‌شده اختلاف پوشش‌گیاهی (NDVI) است (Karnieli et al., 2010). استفاده از NDVI برای مشخص کردن رشد یا میزان زادآوری تاج پوشش گیاهی است. از این‌رو، بسیاری از مطالعات آن را با شاخص سطح برگ (LAI) (Sripada et al., 2005) مقایسه کرده‌اند، که در آن LAI به‌عنوان سطح برگ‌ها در هر سطح از خاک تعریف می‌شود (Zhang et al., 2012). اطلاعات پوشش‌گیاهی از تصاویر سنجش از دور عمدتاً با تفاوت‌ها و تغییرات برگ‌های سبز از گیاهان و ویژگی‌های طیفی تاج پوشش تفسیر می‌شود (Amiri and Tabatabaie, 2020). رایج‌ترین فرآیند اعتبارسنجی از طریق ارتباط مستقیم یا غیرمستقیم بین شاخص‌های پوشش‌گیاهی به‌دست‌آمده و ویژگی‌های پوشش‌گیاهی مورد اندازه‌گیری در عرصه، مانند پوشش‌گیاهی، شاخص سطح برگ، زیست‌توده، رشد و ارزیابی زادآوری است. از روش‌های دقیق‌تر برای ارزیابی شاخص‌های پوشش‌گیاهی با استفاده از روش‌های مستقیم و میدانی با پایش گیاهان غالب برای مقایسه با شاخص‌های پوشش‌گیاهی به‌دست‌آمده از همان گیاهان که به‌منظور واسنجی استفاده می‌شوند (Nourqolipour et al., 2015a). از روش‌های دیگر، اندازه‌گیری‌های آلومتریک است که در این روش‌ها به روش‌های مخرب برای اسکن سطح مشخصی از کل برگ‌ها در هر گیاه یا درخت برای تعیین شاخص سطح برگ (LAI) است (Amiri, 2021). روش‌های اعتبارسنجی غیرمستقیم با استفاده از ابزار دقیق طیفی یکسان یا مشابه برای ارزیابی گیاهان غالبی که موقعیت مکانی آن‌ها در روی تصویر و زمین مشخص شده است، انجام می‌شود. روش دوم برای مقایسه شاخص‌های پوشش‌گیاهی به‌دست آمده از ماهواره‌هایی که به اثرات جوی حساس هستند و به‌عنوان وسیله‌ای برای به‌دست آوردن فاکتورهای تصحیح عمل می‌کنند، مفید است. روش‌های غیرمستقیم جدیدتر بر اساس عکاسی از پوشش برای تخمین تاج پوشش، سطح برگ، تخلخل و شاخص‌های ترکیبی[2]از روش‌های تحلیل اتوماتیک استفاده کرده‌اند.

[1] Light use efficiency (LUE)

[2] Clumping index

جدول ۱- خلاصه‌ای از شاخص‌های گیاهی ارائه شده در ارزیابی پوشش اراضی

Table 1- A summary of vegetation index expression in the land cover assessment

شاخص	رابطه	منبع
AGVI	$GVI - (1 + 0.018GVI) \times YVI - \frac{NSI}{2}$	Gitelson et al. (2001)
ARI	$\left(\frac{1}{R_{550}}\right) - \left(\frac{1}{R_{700}}\right)$	Gitelson et al. (2001)
ARI2	$R_{800}\left[\left(\frac{1}{R_{550}}\right) - \left(\frac{1}{R_{700}}\right)\right]$	Gitelson et al. (2001)
ARVI	$\left(\frac{NIR - RB}{NIR + RB}\right)$	Kaufman and Tanre (1992)
ASBI	0.2 YVI	Jackson (1983)
ATSAVI	$\frac{[\alpha\,(NIR - \alpha\,Red - b)]}{[\alpha\,NIR + Red - ab + X\,(1 + \alpha^2)]}$ X= 0.08 , a= 1.22 , b= 0.03	Baret and Guyot (1991)
AVI	$2.0\,MSS_7 - MSS_5$	Ashburn (1979)
AVI	$\tan^{-1}\left\{\left[\frac{(\lambda_3 - \lambda_2)}{\lambda_2}\right](NIR - R)^{-1}\right\} + \tan^{-1}\left\{\left[\frac{(\lambda_2 - \lambda_1)}{\lambda_2}\right](G - R)^{-1}\right\}$	Plummer (1994)
BGI1	$\frac{R_{400}}{R_{550}}$	Zarco-Tejada et al. (2005)
BGI2	$\frac{R_{450}}{R_{550}}$	Zarco-Tejada et al. (2005)
BRI1	$\frac{R_{400}}{R_{690}}$	Zarco-Tejada et al. (2012)
BRI2	$\frac{R_{450}}{R_{690}}$	Zarco-Tejada et al. (2012)
CAI	$0.5\,(R_{2000} + R_{2200}) - R_{2100}$	Daughtry (2001)
CARI	$\frac{\sqrt{(a - 670 + 670nm + b)^2}}{(a^2 + 1)^{0.5}}\,.5\left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right)$	Qi et al. (1994)
CCCI	$\frac{(NDRE - NDRE_{min})}{(NDRE_{max} - NDRE_{min})}$	Li et al. (2014)
CRCWD	$1 - \rho_{min}^{r}$	Broge and Leblanc (2001)
CRI500	$\frac{(1/R_{515})}{(1/R_{550})}$	Gitelson et al. (2006)
CRI700	$\frac{(1/R_{515})}{(1/R_{700})}$	Gitelson et al. (2006)
CWSI	$\frac{((T_c - T_a) - (T_c - T_a)_u)}{((T_c - T_a)_{ul} - (T_c - T_a)_u)}$	Idso et al. (1981)
DI1	$R_{800} - R_{550}$	Buschmann and Nagel (1993)
DVI	$\int_{\lambda_1}^{\lambda_1}\left(\frac{d_\rho}{d_\lambda}\right)d\lambda$	Demetriades-Shah et al. (1990)
DVI	$2.4MSS_7 - MSS_5$	Richardson and Weigand (1977)
EVI	$\frac{[(TM_4 - TM_3)\,(1 + L)]}{(TM_4 - C_1TM_3 + C_2TM + L)}$	Huete et al. (2002)
EXG	$2 \times \rho_{green} - \rho_{red} - \rho_{blue}$	Pinty and Verstraete (1992)
GARI	$\frac{\{NIR - [Green - \gamma\,(Blue - Red)]\}}{\{NIR + [Green - \gamma\,(Blue - Red)]\}}$	Zhang et al. (2012)
GDVI	NIR - Green	Sripada et al. (2005)
GEMI	$\eta\,(1 - 0.25\,\eta) - \frac{(R - 0.125)}{(1 - R)}$ $\eta = \frac{[2(NIR^2 - R^2) + 1.5NIR + 0.5R]}{(NIR + R + 0.5)}$	Pinty and Verstraete (1992)
GLI	$\frac{(2R_g - R_r - R_b)}{(2R_g + R_r + R_b)}$	Louhaichi et al. (2001)

ادامه جدول ۱

Table 1 Continued

شاخص	رابطه	منبع
GM1	$\frac{R_{750}}{R_{550}}$	Gitelson and Merzlyak (1996)
GM2	$\frac{R_{750}}{R_{700}}$	Gitelson and Merzlyak (1996)
GNDVI	$\frac{\left(\rho_{NIR} - \rho_{G}\right)}{\left(\rho_{NIR} + \rho_{G}\right)}$	Louhaichi et al. (2001)
GRABS	GVI - 0.09178SBI + 5.58959	Kanemasu et al. (1977)
GRVI	$\frac{NIR}{Green}$	Sripada et al. (2005)
Greenness index (G)	$\frac{R_{554}}{R_{677}}$	Smith et al. (1995)
GVI	$(-0.283MSS_4 - 0.66MSS_5 + 0.577MSS_6 + 0.388MSS_7)$	Kauth and Thomas (1976)
GVSB	$\frac{GVI}{SBI}$	Badhwar (1981)
LIC3	$\frac{R_{400}}{R_{740}}$	Lichtenthaler et al. (1996)
HJVI	$\frac{\left[2\left(\rho_{nir} - \rho_{red}\right)\right]}{\left(\rho_{nir} + 6\rho_{red} - 7.5\rho_{blue} + 1\right)}$	Zhang et al. (2011)
HI	$\frac{(R_{534} - R_{698})}{(R_{534} + R_{698})} - 0.5R_{704}$	Mahlein et al. (2013)
IAVI	$\frac{\left\{\rho_{nir} - \left[\rho_{r} - \gamma\left(\rho_{b} - \rho_{r}\right)\right]\right\}}{\left\{\rho_{nir} + \left[\rho_{r} - \gamma\left(\rho_{b} - \rho_{r}\right)\right]\right\}}$	Ren-hua et al. (1996)
II	$\frac{TM_5}{TM_7}$	Musick and Pelletier (1988)
IPVI	$\frac{TM_4}{(TM_4 + TM_3)}$	Crippen (1990)
MCARI	$[(R_{700} - R_{670}) - 0.2\,(R_{700} - R_{550})]\left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right)$	Daughtry et al. (2000)
MGVI	$\frac{1.5 \times [2.5\,(R_{800} - R_{670}) - 1.3\,(R_{800} - R_{550})]}{\sqrt{(2R_{800} + 1)^2} - (6R_{800} - 5R_{670}) - 0.5}$	Haboudane et al. (2004)
MGVI	$(-0.386MSS_4 - 0.53MSS_5 + 0.535MSS_6 + 0.532MSS_7)$	Misra and Wheeler (1977)
MNLI	$\frac{[(NIR^2 - Red)\,(1 + L)]}{(NIR^2 + Red + L)}$	Yang et al. (2008)
MNSI	$(-0.404MSS_4 - 0.039MSS_5 - 0.505MSS_6 + 0.762MSS_7)$	Misra and Wheeler (1977)
MRENDVI	$\frac{\left(\rho_{750} - \rho_{705}\right)}{\left(\rho_{750} + \rho_{750} - 2 \times \rho_{445}\right)}$	Sims and Gamon (2002)
MRESR	$\frac{\left(\rho_{750} - \rho_{445}\right)}{\left(\rho_{705} - \rho_{445}\right)}$	Sims and Gamon (2002)
MSAVI2	$0.5 \times \left[(2NIR + 1) - \sqrt{(2NIR + 1)^2 - 8\,(NIR - R)}\right]$	Chen (1996)
MSBI	$(0.406MSS_4 + 0.60MSS_5 + 0.645MSS_6 + 0.243MSS_7)$	Misra and Wheeler (1977)
MSAVI	$0.5 \times \{2R_{800} + 1 - SQRT[(2R_{800} + 1)^2 - 8\,(R_{800} - R_{670})]\}$	Qi et al. (1994)
MSR	$\frac{[(R_{800} - R_{670}) - 1]}{[SQRT\,(R_{800}/R_{670} + 1)]}$	Chen (1996)
MSI	$\frac{\left(\rho_{1599}\right)}{\left(\rho_{819}\right)}$	Hunt and Rock (1989)

ادامه جدول ۱

Table 1 Continued

شاخص	رابطه	منبع
MTVI	$1.2 \times [1.2\,(R_{800} - R_{550}) - 2.5\,(R_{670} - R_{550})]$	Haboudane et al. (2004)
MYVI	$(0.723MSS_4 + 0.597MSS_5 + 0.206MSS_6 + 0.243MSS_7)$	Misra and Wheeler (1977)
MTVI2	$\frac{1.5 \times [1.2\,(R_{800} - R_{550}) - 2.5\,(R_{670} - R_{550})]}{\sqrt{(2R_{800}+1)^2 - (6R_{800} - 5\sqrt{R_{670}}) - 0.5}}$	Haboudane et al. (2004)
NDGI	$\frac{(G - R)}{(G + R)}$	Baret and Guyot (1991)
NDI	$\frac{(NIR - MIR)}{(NIR + MIR)}$	Mcnairn and Protz (1993)
NDI1	$\frac{(R_{780} - R_{710})}{(R_{780} - R_{680})}$	Datt (1999)
NDI2	$\frac{(R_{850} - R_{710})}{(R_{850} - R_{680})}$	Datt (1999)
NDI3	$\frac{(R_{734} - R_{747})}{(R_{715} - R_{726})}$	Vogelmann et al. (1993)
NDNI	$\frac{[\log(1/\rho_{1510}) - \log(1/\rho_{1680})]}{[\log(1/\rho_{1510}) + \log(1/\rho_{1680})]}$	Serrano et al. (2002)
NDLI	$\frac{[\log(1/\rho_{1754}) - \log(1/\rho_{1680})]}{[\log(1/\rho_{1754}) + \log(1/\rho_{1680})]}$	Serrano et al. (2002)
NDVI	$\frac{(R_{800} - R_{680})}{(R_{800} + R_{680})}$	Lichtenthaler et al. (1996)
NDVI	$\frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)}$	Rouse et al. (1974)
NDWI	$\frac{(Green - NIR)}{(Green + NIR)}$	McFeeters (1996)
NGBDI	$\frac{(G - R)}{(G + R)}$	Verrelst et al. (2008)
NGRDI	$\frac{(G - R)}{(G + R)}$	Tucker (1979)
NMDI	$\frac{[\rho_{860} - (\rho_{1640} - \rho_{2130})]}{[\rho_{860} + (\rho_{1640} - \rho_{2130})]}$	Wang and Qu (2007)
NLI	$\frac{(NIR^2 - Red)}{(NIR^2 + Red)}$	Goel and Qin (1994)
OSAVI	$\frac{(1+0.16)(R_{800} - R_{670})}{(R_{800} + R_{670} + 0.61)}$	Rondeaux et al. (1996)
PRI	$\frac{(R_{531} - R_{570})}{(R_{531} + R_{570})}$	Gamon et al. (1992)
PSRI	$\frac{(R_{680} - R_{500})}{R_{750}}$	Merzlyak et al. (1999)
PSNDc	$\frac{(R_{800} - R_{470})}{(R_{800} + R_{470})}$	Blackburn (1998)
PSSRa	$\frac{R_{800}}{R_{680}}$	Blackburn (1998)
PSSRb	$\frac{R_{800}}{R_{635}}$	Blackburn (1998)
PSSRc	$\frac{R_{800}}{R_{470}}$	Blackburn (1998)
PVI	$\sqrt{(\rho_{soil} - \rho_{veg})_R^2 - (\rho_{soil} - \rho_{veg})_{NIR}^2}$	Richardson and Weigand (1977)

ادامه جدول ۱

Table 1 Continued

شاخص	رابطه	منبع
PVI	$\frac{(NIR - aR - b)}{\sqrt{a^2 + 1}}$	Roujean and Breon (1995)
RARS	$\frac{R_{746}}{R_{513}}$	Gitelson et al. (2006)
RDVI	$\frac{(R_{800} - R_{670})}{[SQRT\,(R_{800} + R_{670})]}$	Roujean and Breon (1995)
RDVI	$\sqrt{NDIVI \times DVI}$	Roujean and Breon (1995)
RENDVI	$\frac{(R_{750} - R_{750})}{(R_{750} + R_{705})}$	Gitelson and Merzlyak (1994)
RGRI	$\frac{(\sum_{I=600}^{690} R_I)}{(\sum_{I=500}^{599} R_J)}$	Gamon and Surfus (1999)
RI	$\frac{(R - G)}{(R + G)}$	Pearson and Miller (1972)
RVI	$\frac{R}{NIR}$	Pearson and Miller (1972)
SAVI	$\frac{\left(\rho_{NIR} - \rho_{G}\right)}{\left(\rho_{NIR} + \rho_{G} + L\right)} + (1 + L)$	Huete (1988)
SIPI	$\frac{(R_{800} - R_{445})}{(R_{800} + R_{680})}$	Haboudane et al. (2002)
SBI	$(-0.283MSS_4 - 0.66MSS_5 + 0.577MSS_6 + 0.388MSS_7)$	Kauth and Thomas (1976)
SBL	$MSS_7 - 2.4MSS_5$	Richardson and Weigand (1977)
SDr	$\sum_N \rho'(\lambda_i)$	Van Genderen (2011)
SGI	$\frac{(NIR)}{(Red)}$	Birth and McVey (1968)
SR	$\frac{R_{800}}{R_{670}}$	Jordan (1969)
SR2	$\frac{R_{800}}{R_{550}}$	Buschmann and Nagel (1993)
SR3	$\frac{R_{700}}{R_{670}}$	McMurtrey et al. (1994)
SR4	$\frac{R_{740}}{R_{720}}$	Vogelmann et al. (1993)
SR5	$\frac{R_{675}}{(R_{700}R_{650})}$	Chappelle et al. (1992)
SR6	$\frac{R_{672}}{(R_{550}R_{708})}$	Haboudane et al. (2002)
SR7	$\frac{R_{860}}{(R_{550}R_{708})}$	Datt (1998)
TCARI	$3 \times \left[(R_{700} - R_{670}) - 0.2 \times (R_{700} - R_{550})\left(\frac{R_{700}}{R_{670}}\right)\right]$	Haboudane et al. (2002)
TDVI	$\sqrt{0.5 + \left[\frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}\right]}$	Bannari et al. (2002)
TSARVI	$\frac{[a_{rb}(NIR - a_{rb}RB - b_{rb})]}{\left[RB + a_{rb}NIR - a_{rb}B_{rb} + X(1 + a_{rb}^{\,2})\right]}$	Bannari (1994)
TSAVI	$\frac{[a(NIR - aR - B)]}{[R + aNIR - ab]}$	Baret and Guyot (1991)
TVI	$\sqrt{NDVI + 0.5L}$	Rouse (1973)
VARI	$(G - R)(G + R - B)$	Gitelson (2004)

ادامه جدول ۱

Table 1 Continued

شاخص	رابطه	منبع
VCI	$\frac{(NDVI_i - NDVI_{min})}{(NDVI_{max} - NDVI_{min})}$	Kogan (1995)
VDVI	$\frac{(2 \times \rho_{green} - \rho_{red} - \rho_{blue})}{(2 \times \rho_{green} + \rho_{red} + \rho_{blue})}$	Wang et al. (2015)
VHI	$a \times VCI + (1 - a) \times TCI$	Kogan (1995)
VREI1	$\frac{R_{740}}{R_{720}}$	Vogelmann et al. (1993)
VREI2	$\frac{(R_{734} - R_{747})}{(R_{715} + R_{726})}$	Vogelmann et al. (1993)
YVI	$(-0.283MSS_4 - 0.66MSS_5 + 0.577MSS_6 + 0.388MSS_7)$	Kauth and Thomas (1976)
WBI	$\frac{R_{970}}{R_{900}}$	Wang and Qu (2007)
WDRVI	$\frac{(a\,\rho_{nir} - \rho_{red})}{(a\,\rho_{nir} + \rho_{red})}$	Gitelson (2004)
WV-VI	$\frac{(NIR_2 - Red)}{(NIR_2 + Red)}$	Wolf (2012)
ZM	$\frac{R_{750}}{R_{710}}$	Zarco-Tejada et al. (2005)
IDZ-DGVI	$\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} \lvert \rho'(\lambda_i) \rvert \Delta\lambda_i$	Elvidge and Chen (1995)
2DZ-DGVI	$\sum_{\lambda_1}^{\lambda_n} \lvert \rho''(\lambda_i) \rvert \Delta\lambda_i$	Elvidge and Chen (1995)
AFRI1600	$\left(NIR - 0.66\,\frac{1600\text{ nm}}{NIR + 0.661600\text{nm}}\right)$	Elvidge and Chen (1995)
AFRI2100	$NIR - 0.5\,\frac{2100\text{ nm}}{NIR + 0.562100\text{nm}}$	Elvidge and Chen (1995)
CVI	$NIR \times \frac{Red}{Green^2}$	Rouse et al. (1974)
CTVI	$\frac{NDVI + 0.5}{\lvert NDVI + 0.5 \rvert} \times \sqrt{\lvert (NDVI) + 0.5 \rvert}$	Wang et al. (2015)
EVI2	$2.4 \times \frac{NIR - Red}{NIR + Red + 1}$	Gitelson et al. (2002)
EVI22	$2.5 \times \frac{NIR - Red}{NIR + 2.4Red + 1}$	Gitelson et al. (2001)
GEMI	$\left(N(1 - 0.25n) - \frac{Red - 0.125}{1 - Red}\right)$, $n = (2 \times (NIR^2 - Red^2) + 1.5 \times NIR + 0.5 \times Red)/(NIR + Red + 0.5)$	Elvidge and Chen (1995)
GVMI	$\frac{(NIR + 0.1) - (SWIR + 0.02)}{(NIR + 0.1) + (SWIR + 0.02)}$	Datt (1998)
GLI	$\frac{2Green - Red - Blue}{2Green + red + Blue}$	Bannari (1994)
Norm G	$\frac{G}{NIR + R + G}$	Gamon et al. (1992)
Norm R	$\frac{R}{NIR + R + G}$	Gamon et al. (1992)
Norm NIR	$\frac{NIR}{NIR + R + G}$	Gamon et al. (1992)
WDVI	$NIR - a \times Red$	Elvidge and Chen (1995)

۴- نتیجه‌گیری

شاخص‌های گیاهی ساده با ترکیب باندهای مرئی و مادون قرمز نزدیک به‌طور قابل‌توجهی حساسیت تشخیص پوشش‌گیاهی سبز را بهبود بخشیده است. محیط‌های مختلف ویژگی‌های متغیر و پیچیده خود را دارند که باید هنگام استفاده از شاخص‌های گیاهی مختلف در نظر گرفته شوند. بنابراین، هر شاخص گیاهی تعریف خاص خود را از پوشش‌گیاهی سبز، مناسب بودن خود برای کاربردهای خاص، و برخی عوامل محدودکننده دارد. بنابراین، برای کاربردهای عملی، انتخاب یک شاخص گیاهی خاص باید با احتیاط و با در نظر گرفتن تحلیل جامع مزایا و محدودیت‌های شاخص‌های گیاهی موجود و سپس ترکیب آن‌ها برای اعمال در یک محیط خاص انجام شود. به این ترتیب، استفاده از شاخص‌های گیاهی را می‌توان برای برنامه‌های کاربردی خاص، ابزار دقیق مورد استفاده و سکوها تنظیم کرد. با توسعهٔ فن‌آوری سنجش از دور ابرطیفی و چندطیفی، می‌توان شاخص‌های گیاهی جدیدی را توسعه داد که زمینه‌های پژوهشی را گسترش می‌دهد.

منابع

امیری، فاضل، و یگانه، حسن (۱۳۹۱). ارزیابی شاخص‌های گیاهی برای تهیه نقشه درصد پوشش گیاهی در اراضی نیمه خشک بخش مرکزی ایران (حوزه آبخیز قره آقاج). *مرتع و آبخیزداری*، ۶۵(۲)، ۱۸۹-۱۷۵.

امیری، فاضل، و طباطبایی، طیبه (۱۳۹۹). تأثیر فضاهای سبز شهر بوشهر بر دمای سطح زمین و رطوبت محیط پیرامونی. *علوم محیطی*، ۱۸(۳)، ۲۰۵-۱۸۴.

امیری، فاضل، و طباطبایی، طیبه (۱۴۰۰). طبقه‌بندی و تحلیل روند تغییر کاربری اراضی محیط شهری با استفاده از تصاویر چند زمانه لندست: مطالعه موردی در منطقه بوشهر. *مدیریت اراضی*، ۹(۱)، ۱۶۷-۱۸۶.

امیری فاضل، و ناطقی، سعیده (۱۴۰۲). طبقه‌بندی پوشش اراضی استان بوشهر با استفاده از تصاویر ترکیب داده‌های لندست ۸ و مودیس. *مدل‌سازی و مدیریت آب و خاک*، ۳(۲)، ۱۴۳-۱۵۶.

طباطبایی، طیبه، و امیری، فاضل (۱۳۹۸). ارزیابی چندزمانه تغییرات جنگل‌های مانگرو در مناطق ساحلی بوشهر با استفاده از تصاویر ماهواره لندست. *اکولوژی کاربردی*، ۸(۳)، ۴۵-۶۲.

References

Amiri, F. (2021). Carbon storage potential of avicennia marina as South influenced by soil factors in National Park Nayband, Coast of Iran. *Acta Ecologica Sinica*, *41*(6), 566-574.

Amiri, F., & Nateghi S. (2023). Lands cover classification of Bushehr Province using Landsat-8 and MODIS images. *Water and Soil Management and Modelling*, *3*(2), 143-156. [In Persian]

Amiri, F., Rahdari, V., Maleki Najafabadi, S., Pradhan, B., & Tabatabaei, T. (2014). Multi-temporal landsat images based on eco-environmental change analysis in and around Chah Nimeh reservoir, Balochestan (Iran). *Environmental Earth Sciences*, *72*(3), 801-809.

Amiri, F., & Tabatabaie, T. (2020). The influence of green spaces on land surface temperature and humidity of the surrounding environment in Bushehr city. *Environmental Sciences*, *18*(3), 184-205. [In Persian]

Amiri, F., & Tabatabaie, T. (2021). Classification and analysis of land use changes in urban environments using multi-temporal landsat images: a case study of Bushehr. *Land Management*, *9*(1), 167-186. [In Persian]

Amiri, F., & Yeganeh, H. (2012). Evaluation of vegetation indices for preparing vegetation cover percentage in semi-arid lands of central iran (case study: Ghareh Aghaj Watershed). *Journal of Range and Watershed Managment*, *65*(2), 175-189. [In Persian]

Anda, A. (2009). Irrigation timing in maize by using the crop water stress index (CWSI). *Cereal Research Communications*, *37*(4), 603-610.

Arkebauer, T.J. (2005). Leaf radiative properties and the leaf energy budget. *Micrometeorology in Agricultural Systems*, *47*, 93-103.

Ashburn, P. (1979). The vegetative index number and crop identification. *NASA Johnson Space Center Proc of Tech Sessions*, *1-2*, 19800007243

Badhwar, G. (1981). The use of parameters to separate and identify spring small grains. In: Proceedings of the Quarterly Technical Interchange Meeting NASA Johnson Space Flight Center, Houston, Tex, USA.

Bannari, A. (1994). High spatial and spectral resolution remote sensing for the management of the urban environment. In: First Int. Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Strasburg, France. Pp. 247-260.

Bannari, A., Asalhi, H., & Teillet, P.M. (2002). Transformed difference vegetation index (TDVI) for vegetation cover mapping. In: IEEE International geoscience and remote sensing symposium. IEEE. doi:3053-3055.3010.1109/IGARSS.1989.576128

Baret, F., & Guyot, G. (1991). Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR

assessment. *Remote Sensing of Environment*, *35*(2), 161-173.

Baret, F., Jacquemoud, S., & Hanocq, J. (1993). The soil line concept in remote sensing. *Remote Sensing Reviews*, *7*(1), 65-82.

Batten, G. (1998). Plant analysis using near infrared reflectance spectroscopy: the potential and the limitations. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, *38*(7), 697-706.

Berni, J.A.J., Zarco-Tejada, P.J., Sepulcre-Cantó, G., Fereres, E., & Villalobos, F. (2009). Mapping canopy conductance and CWSI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*, *113*(11), 2380-2388.

Birth, G.S., & McVey, G.R. (1968). Measuring the color of growing turf with a reflectance spectrophotometer 1. *Agronomy Journal*, *60*(6), 640-643.

Blackburn, G.A. (1998). Quantifying chlorophylls and caroteniods at leaf and canopy scales: an evaluation of some hyperspectral approaches. *Remote Sensing of Environment*, *66*(3), 273-285.

Broge, N.H., & Leblanc, E. (2001). Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. *Remote Sensing of Environment*, *76*(2), 156-172.

Burns, D.A., & Ciurczak, E.W. (2007). Handbook of near-infrared analysis. 4th Edition: CRC press, 834 pages.

Buschmann, C., & Nagel, E. (1993). In vivo spectroscopy and internal optics of leaves as basis for remote sensing of vegetation. *International Journal of Remote Sensing*, *14*(4), 711-722.

Chappelle, E.W., Kim, M.S., & McMurtrey, J.E. (1992). Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): An algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll A, chlorophyll B, and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sensing of Environment*, *39*(3), 239-247.

Chen, J.M. (1996). Evaluation of vegetation indices and a modified simple ratio for boreal applications. *Canadian Journal of Remote Sensing*, *22*(3), 229-242.

Crippen, R.E. (1990). Calculating the vegetation index faster. *Remote Sensing of Environment*, *34*(1), 71-73.

Cruden, B.A., Prabhu, D., & Martinez, R. (2012). Absolute radiation measurement in venus and mars entry conditions. *Journal of Spacecraft and Rockets*, *49*(6), 1069-1079.

Datt, B. (1998). Remote sensing of chlorophyll a, chlorophyll b, chlorophyll a+b, and total carotenoid content in eucalyptus leaves. *Remote Sensing of Environment*, *66*(2), 111-121.

Datt, B. (1999). Visible/near infrared reflectance and chlorophyll content in Eucalyptus leaves. *International Journal of Remote Sensing*, *20*(14), 2741-2759.

Daughtry, C.S. (2001). Discriminating crop residues from soil by shortwave infrared reflectance. *Agronomy Journal*, *93*(1), 125-131.

Daughtry, C.S.T., Walthall, C.L., Kim, M.S., De Colstoun, E.B., & McMurtrey, J.E. (2000). Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, *74*(2), 229-239.

Demetriades-Shah, T.H., Steven, M.D., & Clark, J.A. (1990). High resolution derivative spectra in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, *33*(1), 55-64.

Elsheikh, R., Mohamed Shariff, A.R.B., Amiri, F., Ahmad, N.B., Balasundram, S.K., & Soom, M.A.M. (2013). Agriculture land suitability evaluator (alse): a decision and planning support tool for tropical and subtropical crops. computers and electronics in agriculture, *93*, 98-110.

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

Fuentes, S., De Bei, R., Pech, J., & Tyerman, S. (2012). Computational water stress indices obtained from thermal image analysis of grapevine canopies. *Irrigation Science*, *30*(6), 523-536.

Gago, J., Douthe, C., Coopman, R.E., Gallego, P.P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., Escalona, J., & Medrano, H. (2015). UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, *153*, 9-19.

Gamon, J., & Surfus, J. (1999). Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. *The New Phytologist*, *143*(1), 105-117.

Gamon, J.A., Peñuelas, J., & Field, C.B. (1992). A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. *Remote Sensing of Environment*, *41*(1), 35-44.

Gitelson, A., & Merzlyak, M.N. (1994). Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of aesculus hippocastanum l. and acer platanoides l. leaves. spectral features and relation to chlorophyll estimation. *Journal of Plant Physiology*, 143(3), 286-292.

Gitelson, A.A. (2004). Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology*, *161*(2), 165-173.

Gitelson, A.A., Kaufman, Y.J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, *80*(1), 76-87.

Gitelson, A.A., Keydan, G.P., & Merzlyak, M.N. (2006). Three‐band model for noninvasive

estimation of chlorophyll, carotenoids, and anthocyanin contents in higher plant leaves. *Geophysical Research Letters*, *33*(11), L11402.

Gitelson, A.A., & Merzlyak, M.N. (1996). Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. *Journal of Plant Physiology*, *148*(3), 494-500.

Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., & Chivkunova, O.B. (2001). Optical properties and nondestructive estimation of anthocyanin content in plant leaves. *Photochemistry and Photobiology*, *74*(1), 38-45.

Goel, N.S., & Qin, W. (1994). Influences of canopy architecture on relationships between various vegetation indices and LAI and FPAR: A computer simulation. *Remote Sensing Reviews*, *10*(4), 309-347.

Haboudane, D., Miller, J.R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P.J., & Strachan, I.B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, *90*(3), 337-352.

Haboudane, D., Miller, J.R., Tremblay, N., Zarco-Tejada, P.J., & Dextraze, L. (2002). Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, *81*(2), 416-426.

Haxeltine, A., & Prentice, I. (1996). A general model for the light-use efficiency of primary production. *Functional Ecology*, 551-561.

Hoffmann, H., Nieto, H., Jensen, R., Guzinski, R., Zarco-Tejada, P., & Friborg, T. (2015). Estimating evapotranspiration with thermal UAV data and two source energy balance models. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, *12*(8), 7469-7502.

Honkavaara, E., Saari, H., Kaivosoja, J., Pölönen, I., Hakala, T., Litkey, P., Mäkynen, J., & Pesonen, L. (2013). Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture. *Remote Sensing*, 5(10), 5006-5039.

Huete, A., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E.P., Gao, X., & Ferreira, L.G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, *83*(1), 195-213.

Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, *25*(3), 295-309.

Hunt, E.R., Rock, B.N. (1989). Detection of changes in leaf water content using Near and Middle Infrared reflectances. *Remote Sensing of Environment*, *30*(1), 43-54.

Nourqolipour, R., Shariff, A.R.B.M., Balasundram, S.K., Ahmad, N.B., Sood, A.M., Buyong, T., & Amiri, F. (2015a). A GIS-based model to analyze the spatial and temporal development of oil palm land use in Kuala Langat district, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, *73*(4), 1687-1700.

Nourqolipour, R., Shariff, A.R.B.M., Ahmad, N.B., Balasundram, S.K., Sood, A.M., Buyong, T., & Amiri, F. (2015b). Multi-objective-based modeling for land use change analysis in the South West of Selangor, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, *74*(5), 4133-4143.

Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J., & Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, *24*, 45-55.

Jackson, R.D. (1980). Hand-held radiometry: a set of notes developed for use at the workshop on hand-held radiometry, phoenix, ariz. *Agricultural Research (Western Region), Science and Education Administration*, U.S. Department of Agriculture, 66 pages.

Jackson, R.D. (1983). Spectral indices in N-Space. *Remote Sensing of Environment*, *13*(5), 409-421.

Jordan, C.F. (1969). Derivation of leaf‐area index from quality of light on the forest floor. *Ecology*, *50*(4), 663-666.

Kanemasu, E.T., Hellman, J.L., Bagley, J.O., & Powers, W.L. (1977). Using landsat data to estimate evapotranspiration of winter wheat. *Environmental Management*, *1*(6), 515-520.

Karnieli, A., Agam, N., Pinker, R.T., Anderson, M., Imhoff, M.L., Gutman, G.G., Panov, N., & Goldberg, A. (2010). Use of NDVI and land surface temperature for drought assessment: merits and limitations. *Journal of Climate*, *23*(3), 618-633.

Kaufman, Y.J., & Tanre, D. (1992). Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS. *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *30*(2), 261-270.

Kauth, R.J., & Thomas, G. (1976). The tasselled capa graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *In: LARS symposia*. p 159.

Kogan, F.N. (1995). Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection. *Advances in Space Research*, *15*(11), 91-100.

Lebourgeois, V., Chopart, J.L., Bégué, A., Le & Mézo, L. (2010). Towards using a thermal infrared index combined with water balance modelling to monitor sugarcane irrigation in a tropical environment. *Agricultural Water Management*, *97*(1), 75-82.

Li, B., Liu, R., Liu, S., Liu, Q., Liu, F., & Zhou, G. (2012). Monitoring vegetation coverage variation of winter wheat by low-altitude UAV remote sensing system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *28*(13), 160-165.

Li, F., Miao, Y., Feng, G., Yuan, F., Yue, S., Gao, X., Liu, Y., Liu, B., Ustin, S.L., & Chen, X. (2014). Improving estimation of summer maize nitrogen status with red edge-based spectral vegetation indices. *Field Crops Research*, *157*, 111-123.

Lichtenthaler, H.K., Lang, M., Sowinska, M., Heisel, F., & Miehé, J.A. (1996). Detection of vegetation stress via a new high resolution fluorescence imaging system. *Journal of Plant Physiology*, 148(5), 599-612.

Liu, H.Q., & Huete, A. (1995). A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, *33*(2), 457-465.

Louhaichi, M., Borman, M.M., & Johnson, D.E. (2001). Spatially located platform and aerial photography for documentation of grazing impacts on wheat. *Geocarto International*, *16*(1), 65-70.

Mahlein, A.K., Rumpf, T., Welke, P., Dehne, H.W., Plümer, L., Steiner, U., & Oerke, E.C. (2013). Development of spectral indices for detecting and identifying plant diseases. *Remote Sensing of Environment*, *128*, 21-30.

Mahlein, A.K., Oerke, E.C., Steiner, U., & Dehne, H.W. (2012). Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology*, *133*(1), 197-209.

Major, D., Baret, F., & Guyot, G. (1990). A ratio vegetation index adjusted for soil brightness. *International Journal of Remote Sensing*, *11*(5), 727-740.

Martynenko, A., Shotton, K., Astatkie, T., Petrash, G., Fowler, C., Neily, W., & Critchley, A.T. (2016). Thermal imaging of soybean response to drought stress: the effect of Ascophyllum nodosum seaweed extract. *Springerplus*, *5*(1), 1-14.

McFeeters, S.K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-1432.

McMurtrey, J.E., Chappelle, E.W., Kim, M.S., Meisinger, J.J., & Corp, L.A. (1994). Distinguishing nitrogen fertilization levels in field corn (Zea mays L.) with actively induced fluorescence and passive reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, *47*(1), 36-44.

McNairn, H., & 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.

Merzlyak, M.N, Gitelson, A.A., Chivkunova, O.B., & Rakitin, V.Y. (1999). Non‐destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. *Physiologia Plantarum*, *106*(1), 135-141.

Misra, P., & Wheeler, S. (1977). Landsat data from agricultural sites: crop signature analysis. In: ERIM Proc. of the 11th Intern. Symp. on *Remote Sensing of Environment*, *2*, 1473-1482.

Musick, H.B., & Pelletier, R.E. (1988). Response to soil moisture of spectral indexes derived from bidirectional reflectance in thematic mapper wavebands. *Remote Sensing of Environment*, *25*(2), 167-184.

Nourqolipour, R., Mohamed Shariff, A.R.B., Balasundram, S.K., Ahmad, N.B., Sood, A.M., Buyong, T., & Amiri, F. (2015a). A GIS-based model to analyze the spatial and temporal development of oil palm land use in Kuala Langat district, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 73(4), 1687-1700.

Nourqolipour, R., Shariff A.R.B.M., Ahmad, N.B., Balasundram, S.K., Sood, A.M., Buyong, T, & Amiri, F. (2015b). Multi-objective-based modeling for land use change analysis in the South West of Selangor, Malaysia. *Environmental Earth Sciences*, 74(5), 4133-4143.

Oerke, E.C., Mahlein, A.K., & Steiner, U. (2014). Proximal Sensing of Plant Diseases. In: Gullino, M.L., Bonants, P.J.M. (eds) *Detection and Diagnostics of Plant Pathogens. Springer Netherlands, Dordrecht*, pp 55-68.

O'Shaughnessy, S.A., Evett, S.R., Colaizzi, P.D., & Howell, T.A. (2011). Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. *Agricultural Water Management*, 98(10), 1523-1535.

Pearson, R.L., & Miller, L.D. (1972). Remote mapping of standing crop biomass for estimation of the productivity of the shortgrass prairie. *Remote Sensing of Environment*, VIII: 1355.

Pinty, B., & Verstraete, M.M. (1992). GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites. *Vegetatio*, *101*(1), 15-20.

Plummer, S. (1994). The angular vegetation index: an atmospherically resistant index for the second along track scanning radiometer (ATSR-2). In: Proc. Sixth Int. Symp. Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing, Val d'Isere, France.

Prashar, A., & Jones, H.G. (2016). Assessing drought responses using thermal infrared imaging. *In: Environmental Responses in Plants*. Springer, pp 209-219.

Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A.R., Kerr, Y.H., & Sorooshian, S. (1994). A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, *48*(2), 119-126.

Quan, Z., Xianfeng, Z., & Miao, J. (2011). Eco-environment variable estimation from remote

sensed data and eco-environment assessment: models and system. *Acta Botanica Sinica*, *47*, 1073-1080.

Rahim, H.R.B.A., Lokman, M.Q.B., Harun, S.W., Hornyak, G.L., Sterckx, K., Mohammed, W.S., & Dutta, J. (2016). Applied light-side coupling with optimized spiral-patterned zinc oxide nanorod coatings for multiple optical channel alcohol vapor sensing. *Journal of Nanophotonics*, *10*(3), 036009.

Ren-hua, Z., Rao, N., & Liao, K. (1996). Approach for a vegetation index resistant to atmospheric effect. *Journal of Integrative Plant Biology*, 38(1), 53-62.

Richardson, A.J., & Wiegand, C. (1977). Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, *43*(12), 1541-1552.

Rondeaux, G., Steven, M., & Baret, F. (1996). Optimization of soil-adjusted vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, *55*(2), 95-107.

Roujean, J.L., & Breon, F.M. (1995). Estimating PAR absorbed by vegetation from bidirectional reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, *51*(3), 375-384.

Rouse, J.J., Haas, R.H., Deering, D., Schell, J., & Harlan, J.C. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *NASA Special Publication 351*, 309.

Rouse, J.J.W. (1973). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA Technical Reports Server, Tex, USA, 1974.

Ruimy, A., Kergoat, L., & Bondeau, A. (1999). Comparing global models of terrestrial net primary productivity (NPP): Analysis of differences in light absorption and light‐use efficiency. *Global Change Biology*, *5*(1), 56-64.

Serrano, L., Peñuelas, J., & Ustin, S.L. (2002). Remote sensing of nitrogen and lignin in mediterranean vegetation from AVIRIS data: decomposing biochemical from structural signals. *Remote Sensing of Environment*, *81*(2), 355-364.

Sims, D.A., & Gamon, J.A. (2002). Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. Remote Sensing of Environment, *81*(2), 337-354. doi:10.1016/S0034-4257(02)00010-X

Sishodia, R.P., Ray, R.L., & Singh, S.K. (2020). Applications of remote sensing in precision agriculture: A review. Remote Sensing, *12*(19), 3136.

Smith, R., Adams, J., Stephens, D., & Hick, P. (1995). Forecasting wheat yield in a Mediterranean-type environment from the NOAA satellite. *Australian Journal of Agricultural Research*, *46*(1), 113-125.

Sripada, R.P., Heiniger, R.W., White, J.G., Weisz, R. (2005). Aerial color infrared photography for determining late‐season nitrogen requirements in corn. *Agronomy Journal*, *97*(5), 1443-1451.

Tabatabaie, T., & Amiri, F. (2019). Multi-Temporal Assessment of mangrove forests change in the coastal areas of Bushehr region based on landsat satellite imagery. *Iranian Journal of Applied Ecology*, *8*(3), 45-62. [In Persian]

Tanre, D.D. (1990). Description of a computer code to simulate the satellite signal in the solar spectrum: The 5s code. *International Journal of Remote Sensing*, *11*(1), 659-668.

Tian, Q., & Min, X. (1998). Advances in study on vegetation indices. *Advances in Earth Science*, *13*(4), 327-333.

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

Van Genderen, J.L. (2011). Advances in environmental remote sensing: sensors, algorithms, and applications. CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA, *4*(5), 556 pp.

Verrelst, J., Schaepman, M.E., Koetz, B., & Kneubühler, M. (2008). Angular sensitivity analysis of vegetation indices derived from CHRIS/PROBA data. *Remote Sensing of Environment*, *112*(5), 2341-2353.

Vogelmann, J., Rock, B., & Moss, D. (1993). Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. *Remote Sensing*, *14*(8), 1563-1575.

Wang, L., & Qu, J.J. (2007). NMDI: a normalized multi‐band drought index for monitoring soil and vegetation moisture with satellite remote sensing. *Geophysical Research Letters*, *34*(20), L20405.

Wang, X., Miaomiao, W., Shaoqiang, W., & Yundong, W. (2015). Extraction of vegetation information from visible unmanned aerial vehicle images. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, *31*(5), 152-159.

Wenlong, X. (2009). Vegetation index controlling the influence of soil reflection.

Wolf, A.F. (2012). Using WorldView-2 Vis-NIR multispectral imagery to support land mapping and feature extraction using normalized difference index ratios. In: algorithms and technologies for multispectral, hyperspectral, and ultraspectral imagery XVIII. *The International Society for Optical Engineering*, pp 188-195.

Yang, Z., Willis, P., & Mueller, R. (2008). Impact of band-ratio enhanced AWIFS image to crop

classification accuracy. In: Proc. *Pecora*, Denver, Colo, USA, 1, pp 1-11.

Zarco-Tejada, P.J., Berjón, A., López-Lozano, R., Miller, J.R., Martín, P., Cachorro, V., González, M.R., De & Frutos, A. (2005). Assessing vineyard condition with hyperspectral indices: Leaf and canopy reflectance simulation in a row-structured discontinuous canopy. *Remote Sensing of Environment*, *99*(3), 271-287.

Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., & Berni, J.A.J. (2012). Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. *Remote Sensing of Environment*, *117*: 322-337.

Zarco-Tejada, P.J., González-Dugo, V., Williams, L.E., Suárez, L., Berni, J.A.J., Goldhamer, D., & Fereres, E. (2013). A PRI-based water stress index combining structural and chlorophyll effects: Assessment using diurnal narrow-band airborne imagery and the CWSI thermal index. *Remote Sensing of Environment*, *138*, 38-50.

Zhang, B., Wu, D., Zhang, L., Jiao, Q., & Li, Q. (2012). Application of hyperspectral remote sensing for environment monitoring in mining areas. *Environmental Earth Sciences*, *65*(3), 649-658.

Zhang, C., & Kovacs, J.M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. *Precision Agriculture*, *13*(6), 693-712.

Zhang, Y., Meng, Q.Y., Wu, J.L., & Zhao, F. (2011). Study of environmental vegetation index based on environment satellite CCD data and LAI inversion. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, *31*(10), 2789-2793.