

تحلیل روند بلندمدت تغییرات پوشش گیاهی با استفاده از سری زمانی MODIS-NDVI (مطالعه موردی: استان کردستان)

مهرنوش مسیح پور^۱، علی اصغر درویش صفت^{۲*}، رامین رحمانی^۳

۱. دانشجوی دکتری جنگلداری گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استاد گروه جنگلداری و اقتصاد جنگل دانشکده منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. دانشیار، دانشکده علوم جنگل، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان، گرگان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۲/۲۲، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۶/۱۳

چکیده

در گذر زمان، عامل‌های محیط و انسان سبب تغییرات مثبت و منفی در کمیت و کیفیت پوشش گیاهی شده‌اند؛ این وضعیت در آینده نیز ادامه خواهد داشت. تغییرات زمانی در پوشش گیاهی ممکن است به صورت روندهای افزایشی (Greening) یا کاهش (Browning) باشد. شناخت این تغییرات و تعیین روند آنها در گذشته و آینده می‌تواند راهگشای تصمیم‌سازی برای سیمای سرزمین باشد. بر این اساس، تغییرات زمانی بلندمدت وضعیت پوشش گیاهی در استان کردستان با استفاده از شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده (NDVI) در دوره زمانی ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ بررسی شد. در پژوهش پیش رو، سری زمانی NDVI ۱۶ روزه سنجنده MODIS شامل ۴۱۴ تصویر با اندازه پیکسل ۲۵۰ متر استفاده شد. ابتدا سیستم مختصات تصاویر از Sinusoidal به جغرافیایی تبدیل و یک سری زمانی از ۴۱۴ تصویر تهیه شد. پس از حذف تغییرات فصلی، تحلیل روند بلندمدت به روش‌های پارامتری رگرسیون حداقل مربعات معمولی و ناپارامتری‌های تیل-سن و من-کندال به صورت پیکسل به پیکسل انجام گرفت. نتایج تجزیه و تحلیل روند به روش‌های رگرسیون حداقل مربعات معمولی و تیل-سن کاملاً مشابه و بیانگر افزایش ناچیز NDVI و وقوع Greening بسیار ضعیف در طی دوره پژوهش بود. براساس تحلیل روند من-کندال، حدود ۹۷ درصد منطقه روند افزایشی و ۲/۴۶ درصد روند کاهش داشت. البته براساس نتایج آزمون معنی‌داری من-کندال، تنها در ۱۲ درصد مساحت استان روند کاهش یا افزایشی معنی‌دار در سطح ۱ درصد و در دیگر بخش‌های استان روند افزایشی بسیار اندک و قابل چشم‌پوشی با شیب رگرسیون بسیار کم (غیرمعنی‌دار) وجود داشت.

واژه‌های کلیدی: تیل-سن، حداقل مربعات معمولی، روند بلندمدت، سری زمانی، من-کندال، Greening, Browning, MODIS-NDVI

مقدمه

بیرونی، پیچیدگی تغییرات پوشش گیاهی را در مقیاس زمانی - مکانی افزایش می‌دهند. شناسایی چنین پویایی پیچیده‌ای نیازمند ابزار و داده‌های مناسب است. سنسجش از دور ماهواره‌ای می‌تواند برای این کار مناسب باشد، زیرا اندازه‌گیری‌های تکرارپذیر و مستمر برای پایش مکان‌های مختلف و شناسایی تأثیرات بسیاری از فرایندهای مؤثر بر

گیاهان مؤلفه‌ای مهم در اکوسیستم خشکی‌اند و اغلب به صورت غیرخطی و پیچیده به تغییر اقلیم و وقوع آشفته‌گی‌ها واکنش نشان می‌دهند. آشفته‌گی‌های با منشأ

* نویسنده مسئول، تلفن: ۰۲۶۳۲۲۳۰۴۴

Email: adarvish@ut.ac.ir

Greening^{۱۱}) است یا روندهای کاهش NDVI که Browning نامیده می‌شود، نمایش داد. Greening ممکن است ناشی از افزایش طول فصل رویش یا افزایش پوشش سبز گیاهی باشد. در مقابل، Browning کاهش پوشش سبز و برگ است که به سبب خزان پیش‌رس، تداوم فصل خشک یا تغییر پوشش گیاهی رخ می‌دهد [۱، ۵]. بر اساس تحقیقات منتشرشده در دهه اخیر، تغییرات پارامترهای اقلیمی با اثرگذاری بر فنولوژی گیاهان سبب تغییر طول دوره رویش در بسیاری از مناطق جهان شده است. برای مثال در سال‌های ۱۹۸۲-۲۰۱۱ طول دوره رویش گیاهی در آلمان و کشورهای اسکاندیناوی به ترتیب $+1/4$ و $-1/47$ روز در سال افزایش و کاهش یافت [۶، ۷]. در قسمت‌هایی از غرب و مرکز ایران نیز، افزایش طول فصل رویش به مقدار $0/94$ روز در سال در دوره ۱۹۹۹-۱۹۸۲ گزارش شده است [۸].

تجزیه و تحلیل روندهای سری‌های زمانی NDVI برای دستیابی به اهداف گوناگون از جمله ارزیابی واکنش‌های بوم‌شناختی به گرمایش کره زمین، تغییر جهانی اقلیم، تولید محصولات کشاورزی، تخریب سرزمین و بیابان‌زدایی به کار رفته است [۹]. در زمینه بررسی روند تغییرات فعالیت پوشش گیاهی در ایران می‌توان به پژوهش کیاپاشا و همکاران (۲۰۱۷) اشاره کرد. آنها روند بلندمدت تغییرات در جنگل‌های هیرکانی را با استفاده از سری‌های زمانی GIMMS-NDVI در طی سال‌های ۲۰۱۲-۱۹۸۱ بررسی کردند و با آزمون تحلیل روند من-کندال به صورت پیکسل به پیکسل در کل سطح جنگل، روند Greening را در $75/35$ درصد از جنگل‌ها نشان دادند [۳]. بررسی نتایج مطالعاتی که از ۱۹۸۲ تا ۱۹۹۸ با استفاده از NDVI^{۱۲} NOAA در مقیاس جهانی انجام گرفت، نشان می‌دهد که در عرض‌های جغرافیایی بالا و میانی نیمکره شمالی و همچنین در بخش‌هایی از مناطق استوایی و نیمه‌استوایی، روند تدریجی بلندمدت Greening وجود دارد [۱۰]. در

تغییرات را میسر می‌کند [۱]. پویایی پوشش گیاهی را می‌توان در مقیاس‌های مختلف زمانی و مکانی از طریق داده‌های سری‌های زمانی شاخص‌های پوشش گیاهی حاصل از داده‌های ماهواره‌ای نظیر مجموعه داده GIMMS^۱، MODIS و SPOT-Vegetation پایش کرد [۲]. یکی از شاخص‌های پرکاربرد، شاخص تفاوت پوشش گیاهی نرمال‌شده^۳ (NDVI) است که سبب‌یابی پوشش گیاهی^۴ را نیز نشان می‌دهد. ثابت شده است که تجزیه و تحلیل روند زمانی حاصل از این نوع داده‌ها، برای شناسایی و پایش واکنش پوشش گیاهی به رخدادهای ناگهانی طبیعی یا انسانی و همچنین تغییرپذیری فصلی^۵ فنولوژی گیاهی ناشی از رژیم‌های بارندگی و دما سودمند است [۳]. به عبارت دیگر، از طریق بررسی پوشش گیاهی بر مبنای سری‌های زمانی سنجنش از دور، شناخت بیشتری از تغییرات سالانه^۶ و بین‌سالی^۷ گیاهان از مقیاس محلی تا جهانی به دست می‌آید [۱]. هر سری زمانی NDVI در سنجنش از دور به طور معمول شامل سه مؤلفه است: مؤلفه روند جهت‌دار بلندمدت^۸، تغییرات منظم و فصلی^۹ و نوسان‌های کوتاه‌مدت، نامنظم و تصادفی که به آن مؤلفه باقی مانده^{۱۰} گفته می‌شود [۴]. تغییرات فصلی، تغییرات فنولوژی متأثر از تغییرات فصلی آب‌وهوایی در طول سال را نشان می‌دهد و در واقع چرخه‌ای تکرارشونده است. آشفتگی‌هایی همانند آتش‌سوزی، سیل و آفات نیز موجب تغییرات ناگهانی می‌شود. در مقابل، تغییرات تدریجی اقلیم، سبب بروز واکنش‌های تدریجی در بلندمدت می‌شود که می‌توان آنها را به صورت روندهای مثبت فزونی NDVI که بیانگر افزایش سبب‌یابی / سبب‌شدگی

1. Global Inventory and Mapping System (GIMMS)
2. Moderate resolution Imagine Spectrometer (MODIS)
3. Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)
4. Vegetation's greenness
5. Seasonal variability
6. Intra annual
7. Inter annual
8. Long term directional Trend
9. Seasonality
10. Remainder

۱۱. برای واژه Greening، واژه‌های سبب‌شدگی، سبب‌پوشانی و سبب‌بودن پیشنهاد شده است.

12. National Oceanic and Atmospheric Administration

۶۲ درصد از استان دارای پوشش‌های جنگل و مرتع است و ۶۱ کیلومتر مربع آن را مناطق مسکونی در بر می‌گیرد [۱۴]. جنگل‌های این استان در نوار غربی، از شمال به جنوب امتداد یافته است که بیشتر اطراف شهرهای بانه و میوان را در بر می‌گیرد. براساس طبقه‌بندی اقلیمی کوپن، کردستان دارای اقلیم سرد و معتدل است. اقلیم این استان در زمستان سرد تا خیلی سرد و در تابستان معتدل، نیمه‌گرم و خشک است [۱۵]. میانگین بارش سالانه در استان کردستان ۵۱۲ میلی‌متر و میانگین دمای سالانه ۱۲/۵ درجه سانتی‌گراد است [۱۴].

داده‌های بازتاب طیفی

برای بیان وضعیت پوشش گیاهی و پایش آن می‌توان از NDVI به‌عنوان شاخص استفاده کرد. این شاخص بر مبنای بازتاب در دو باند طیفی، با استفاده از رابطه ۱ محاسبه می‌شود [۱۶]:

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \quad (1)$$

R_{RED} و R_{NIR} به ترتیب بیانگر بازتاب در نواحی طیفی مادون قرمز نزدیک و قرمز هستند. ارزش‌های شاخص NDVI دامنه‌ای از -۱ تا ۱ دارند.

در این پژوهش، از داده‌های ترکیبی ۱۶ روزه MODIS-NDVI به نام MOD13Q1 با اندازه تفکیک ۲۵۰ متر استفاده شد. این داده‌ها از سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ از USGS LPDAAC^۱ شامل ۲۳ تصویر در سال و در مجموع ۴۱۴ تصویر NDVI به صورت منفرد و مجزا دانلود شدند. این تصاویر پس از اعمال تصحیحات اتمسفری، حذف ابر و تصحیح BRDF^۲، در سطح ۳ با پروجکشن Sinusoidal ارائه می‌شوند. برای تولید داده ترکیبی ۱۶ روزه، از الگوریتم ترکیب حداکثر ارزش^۳ (MVC) استفاده می‌شود. این الگوریتم با هدف کمینه‌سازی تأثیرات

تحقیق Fensholt و همکاران (۲۰۱۵) در دوره زمانی ۱۹۸۲ تا ۲۰۱۲، نتیجه‌ای مشابه پژوهش یادشده گزارش شد [۱۱]. در تحقیق Fensholt و همکاران (۲۰۱۲) که با داده‌های MODIS-NDVI در طی ۲۰۱۰-۲۰۰۰ انجام گرفت، نیز نتیجه مشابهی مشاهده شد [۵]. de Jong و همکاران (۲۰۱۱) تحقیق دیگری با استفاده از داده GIMMS-NDVI در مقیاس جهانی انجام دادند که نتایج نشان داد روند Greening در نیمکره شمالی و روند Browning در نیمکره جنوبی غلبه دارد [۹]. در مقیاس منطقه‌ای نیز تحقیقات مشابهی انجام گرفت. برای مثال Fensholt و همکاران (۲۰۰۹) در آفریقا و همکاران (۲۰۱۵) در مکزیک با استفاده از سری‌های زمانی MODIS-NDVI و GIMMS-NDVI، روندهای بلندمدت را بررسی کردند [۲، ۱۲].

جنگل‌ها و مراتع به‌عنوان یکی از اجزای مهم پوشش گیاهی زاگرس که کارکردهای بوم‌شناختی اساسی و مهمی دارند، افزون‌بر تأثیرپذیری از تغییرات پارامترهای اقلیمی، به سبب توسعه ریزگردها، آفات و سوء مدیریت، به زوال فراگیر نیز دچار شده‌اند [۱۳]. از طرف دیگر تغییر کاربری جنگل‌ها و مراتع نیز در کمیت و کیفیت پوشش گیاهی منطقه زاگرس تأثیر چشمگیری گذاشته است. در این شرایط باید تغییرات وضعیت پوشش گیاهی و روند آنها تا حد ممکن به صورت کمی تعیین و پیش‌بینی پذیر شود تا به کمک آن و دیگر اطلاعات، مدیران تدابیری برای کاهش این اثرها و بهبود کیفیت ببندیشند. این پژوهش با هدف بررسی روند بلندمدت تغییرات پوشش گیاهی استان کردستان با استفاده از داده‌های ترکیبی ۱۶ روزه MODIS-NDVI در دوره زمانی سال‌های ۲۰۰۰ تا ۲۰۱۷ انجام گرفت.

مواد و روش‌ها

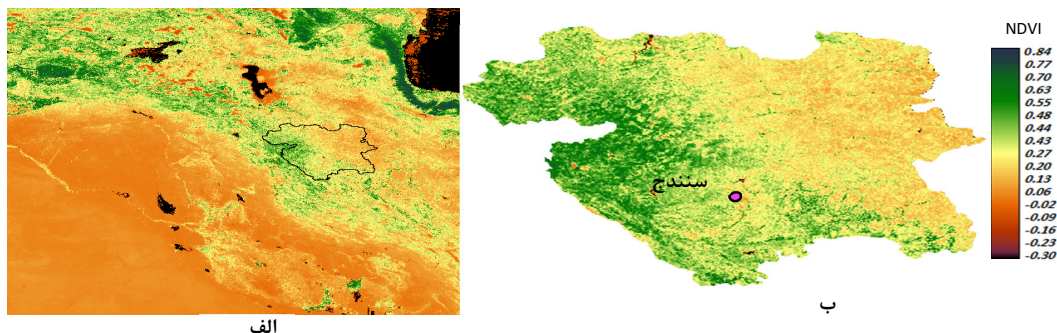
منطقه تحقیق

استان کردستان با مساحت ۲۹ هزار کیلومتر مربع، در غرب ایران و در بخش میانی زاگرس شمالی قرار دارد. در حدود

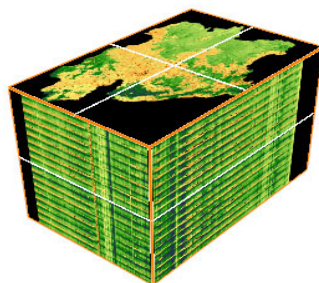
1. United States Geological Survey Land Processes Distributed Active Archive Center
2. Bidirectional Reflectance Distribution Function
3. Maximum Value Composite

مشاهدات زمینی کیفیت مطلوب‌تری برخوردارند [۵]. محدوده استان کردستان در تصاویر به صورت یک پنجره شامل ۱۲۶۹×۸۲۸ پیکسل جدا شده و استفاده شد. در شکل ۱، تصویر MODIS-NDVI (اوایل خرداد ۱۳۹۶) و پنجره مربوط به محدوده استان کردستان دیده می‌شود.

اتمسفیری باقی مانده و انتخاب بهترین کیفیت NDVI برای دوره زمانی نظر طراحی شده است. سری زمانی MODIS در مقایسه با سری زمانی GIMMS-NDVI، به لحاظ اندازه تفکیک مکانی، صحت هندسی، تصحیح اتمسفری، غربالگری ابر و کالیبراسیون و همچنین سازگاری بیشتر با



شکل ۱. تصویر یک فریم از MODIS-NDVI در اوایل خرداد ۱۳۹۶ (الف) و همان تصویر NDVI در محدوده استان کردستان (ب). (رنگ‌های سبز پررنگ و قرمز پررنگ به ترتیب بیانگر بیشترین و کمترین مقدار NDVI است)



شکل ۲. سری زمانی هجده ساله NDVI؛ شامل ۴۱۴ تصویر ترکیبی ۱۶ روزه، تصویر بالاترین سطح مربوط به اواخر دی ۱۳۷۸ و تصویر پایین‌ترین سطح مربوط به اوایل دی ۱۳۹۶ است (رنگ‌های سبز پررنگ و قرمز پررنگ به ترتیب بیانگر بیشترین و کمترین مقدار NDVI است)

سری زمانی می‌تواند به سه مؤلفه تشکیل دهنده‌اش تجزیه شود. مؤلفه روند- که مدنظر این پژوهش است- بیان‌کننده رفتار بلندمدت و تدریجی در سری زمانی است. مؤلفه فصلی که به طور مکرر و متناوب در هر سال رخ می‌دهد و چرخه‌ای سالانه دارد، ممکن است بررسی مؤلفه روند را با مشکل مواجه کند. از این رو باید بررسی مؤلفه روند بعد از حذف مؤلفه فصلی از سری زمانی انجام گیرد [۳، ۹، ۱۷]. حذف مؤلفه فصلی با استفاده از روش Anomalies در نرم‌افزار IDRISI Taiga 16 انجام گرفت. محاسبه‌های این روش در سری زمانی ۱۶ روزه و براساس

پیش‌پردازش و آماده‌سازی داده‌ها

ابتدا سیستم مختصات تصاویر از Sinusoidal به طول و عرض جغرافیایی و فرمت آن نیز از HDF^۱ به فرمت IDRISI تبدیل شد. با استفاده از نقشه گستره استان کردستان، ماسکی تهیه شد تا همه پردازش‌های داده فقط در این محدوده انجام گیرد. در نهایت ۴۱۴ تصویر NDVI در محدوده استان کردستان، به یک سری زمانی تبدیل شد (شکل ۲).

1. Hierarchical Data Format (HDF)

به کار گرفته می شوند. تیل سن روشی رتبه پایه^۵ است که نسبت به فصل، غیرنرمال بودن، خودهمبستگی زمانی^۶ و ناهم‌واریانسی مقاوم است و در نتیجه برای ارزیابی نرخ تغییر در سری‌های زمانی کوتاه مدت (در این گونه موارد سری زمانی حدود ده سال)، یا همراه با نوزهای احتمالی باقی مانده از ابر و دیگر اثرهای منفی اتمسفر و همچنین داده‌های پرت (noisy) استفاده می‌شود [۵]. آماره شیب روند تغییرات با تعیین شیب هر ترکیب جفتی و پیدا کردن میانه شیب محاسبه می‌شود. در این روش روندها بر مبنای وجود روند ثابت در حداقل ۲۹ درصد طول سری (به لحاظ زمانی) محاسبه می‌شود. به این مفهوم که دست کم در ۲۹ درصد از طول سری، روند مورد نظر وجود داشته باشد [۵، ۱۷]. مراحل این آزمون به شرح زیر انجام گرفت.

شیب بین هر جفت زمانی داده NDVI برای هر سال با استفاده از رابطه ۴ محاسبه شد [۱۶].

$$Q = \frac{x_t - x_s}{t - s} \quad (4)$$

Q شیب بین هر جفت داده و X_t و X_s ارزش NDVI در زمان‌های t و s در هر پیکسل است. s یک واحد زمانی بعد از زمان t است.

میانه شیب (Q_{med}) جفت داده‌های به دست آمده به عنوان شیب برآوردگر تیل سن ارائه و برحسب اینکه N فرد یا زوج باشد، به ترتیب با رابطه‌های ۵ و ۶ محاسبه می‌شود:

$$Q_{med} = Q[(N+1)/2] \quad (5)$$

$$Q_{med} = 0.5 \left(Q\left[\frac{n}{2}\right] + Q\left[\frac{(N+2)}{2}\right] \right) \quad (6)$$

N برابر است با:

$$N = n \times (n-1) / 2 \quad (7)$$

n تعداد کل مشاهدات (۴۱۴) است.

رابطه ۲ صورت می‌گیرد [۳]. داده حاصل از این پیش‌پردازش را سری زمانی فصل‌زدایی شده^۱ می‌نامند.

$$x_i = v_i - \mu \quad (2)$$

x_i : ارزش حاصل از فصل‌زدایی هر پیکسل

v_i : ارزش NDVI ۱۶ روزه

μ : میانگین NDVI ۱۶ روزه در کل دوره

تجزیه و تحلیل روند بلندمدت

روند بلندمدت به روش‌های رگرسیون حداقل مربعات معمولی (OLS^۲)، تیل سن^۳ و من-کندال^۴ محاسبه شد. روش OLS بر مبنای محاسبه شیب رگرسیون بین ارزش‌های NDVI فصل‌زدایی شده هر پیکسل (متغیر وابسته) و زمان (متغیر مستقل)، به صورت پیکسل به پیکسل، در طول دوره بررسی اجرا می‌شود (رابطه ۳). خروجی تجزیه و تحلیل روند بلندمدت به صورت نقشه‌ای است که ارزش هر یک از پیکسل‌های آن معادل شیب رگرسیون در آن محل است که نرخ تغییر در زمان (روند) را نشان می‌دهد [۱۸].

$$Slope = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NDVI_i - \left(\sum_{i=1}^n i\right) \left(\sum_{i=1}^n NDVI_i\right)}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (3)$$

در رابطه ۳، Slope شیب رگرسیون، n تعداد تصاویر (در این پژوهش ۴۱۴ تصویر)، i ترتیب سال‌ها در دوره تحقیق (از ۱ تا ۱۸ سال در این پژوهش) و $NDVI_i$ میانگین NDVI در سال i-ام است. مقادیرهای $Slope > 0$ و $Slope < 0$ به ترتیب بیانگر روندهای افزایش و کاهش هستند.

از آنجا که داده‌ها در سری زمانی NDVI ممکن است از توزیع نرمال برخوردار نباشند، روش‌های ناپارامتری تیل سن و من-کندال نیز برای محاسبه روند تغییرات پوشش گیاهی

1. Deseasoned
2. Ordinary Least square regression
3. Theil-Sen
4. Mann-Kendall

5. Rank-based
6. Temporal auto correlation

پوشش گیاهی (Greening) و کاهش آن (Browning) را نشان می‌دهند [۴، ۸، ۱۷]. معنی دار بودن یا نبودن با استفاده از Z_s در سطوح ۱ و ۵ درصد بررسی شد. معنی داری من-کندال (Z_s) براساس رابطه ۱۱ و واریانس سری زمانی ($var(s)$) لازمه آن با رابطه ۱۲ محاسبه شد [۳]. در این رابطه‌ها، m مجموع تکرار مقادیر و i فراوانی داده‌هایی است که ارزش یکسانی دارند.

$$Z_s = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{var(S)}} & \text{for } S > 0 \\ \cdot & \text{for } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{var(S)}} & \text{for } S < 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$var(s) = \frac{n(n-1)(2n-5) \sum_{t=1}^m t(t-1)(2t-5)}{18} \quad (12)$$

نتایج و بحث

همان‌طور که بیان شد، برای تجزیه و تحلیل روند سری‌ها ابتدا مؤلفه فصلی حذف شد. ارزش هر پیکسل در هر تصویر فصل‌زدایی شده برابر است با ارزش آن پیکسل منهای میانگین ارزش‌های همان پیکسل در دوره زمانی تحقیق [۳، ۱۷]. در شکل ۳، تصویر NDVI فصل‌زدایی شده (ب) در مقایسه با تصویر اولیه (الف) (مربوط به اوایل خرداد) نشان داده شده است. براساس این شکل ارزش‌ها در یکایک پیکسل‌ها ناشی از فرایند فصل‌زدایی، کاهش یافته است. طیف رنگ سبز به سمت طیف زرد-قرمز (کاهش ارزش‌ها) و طیف قرمز-زرد به سمت قرمز (کاهش ارزش‌ها) متمایل شده‌اند. این کاهش ارزش‌ها ناشی از فرایند فصل‌زدایی، در پژوهش de Jong و همکاران (۲۰۱۱) نیز تأیید شده است [۹].

نتیجه تجزیه و تحلیل روند بلندمدت به روش OLS در شکل (۴ الف) دیده می‌شود. براساس این شکل در اکثر قریب به اتفاق نقاط استان یک شیب مثبت (طیف سبز) ولی بسیار اندک دیده می‌شود که بیانگر روند Greening است. این وضعیت در نوار جنگلی در غرب استان بارزتر است. نتیجه

من-کندال به‌عنوان یکی از روش‌های ناپارامتری بسیار متداول تحلیل روند در سری‌های زمانی چگونگی یکنواختی^۱ روند یا به بیانی دیگر، درجه‌ای را که یک روند به‌طور مداوم افزایشی یا کاهش‌ی است، در سری زمانی محاسبه می‌کند. آماره من-کندال دامنه‌ای بین -۱ تا +۱ دارد که ارزش +۱ روند همواره افزایشی و ارزش -۱ روند همواره کاهش‌ی در طول دوره را بیان می‌کند و ارزش صفر بیانگر نبود روندی ثابت است [۵، ۱۷]. مشابه روش تیل-سن، روش من-کندال نیز شیب‌های بین همه ترکیبات جفتی نمونه‌ها را بررسی می‌کند. در این روش مقدار NDVI در سری زمانی، به‌طور پیوسته و پشت سر هم با بقیه مقادیر سری مقایسه و آماره من-کندال محاسبه می‌شود. این روش به‌شرح زیر اجرا شد [۳]:

اختلاف بین یکایک ارزش‌ها محاسبه و سپس تابع sign function اعمال شد و در نهایت پارامتر S با استفاده از رابطه ۸ استخراج شد.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (8)$$

که n تعداد مشاهدات سری زمانی و x_j, x_k ارزش NDVI در زمان‌های j و k هستند. تابع علامت (sgn) با استفاده از رابطه ۹ محاسبه شد.

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ \cdot & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (9)$$

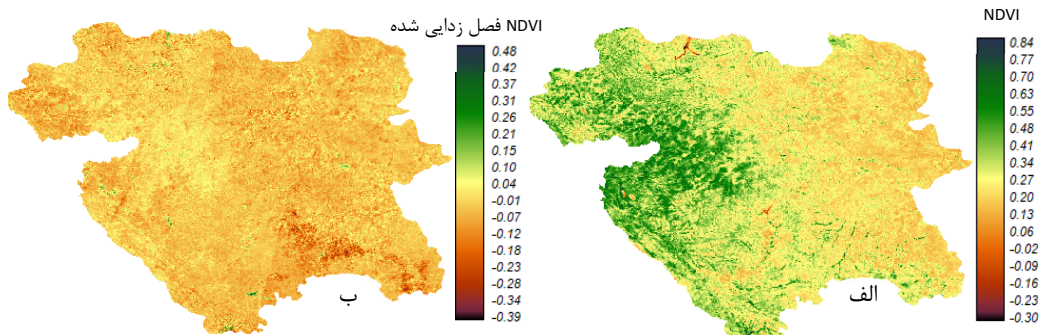
من-کندال (τ) با رابطه ۱۰ محاسبه شد.

$$\tau = \frac{2S}{n(n-1)} \quad (10)$$

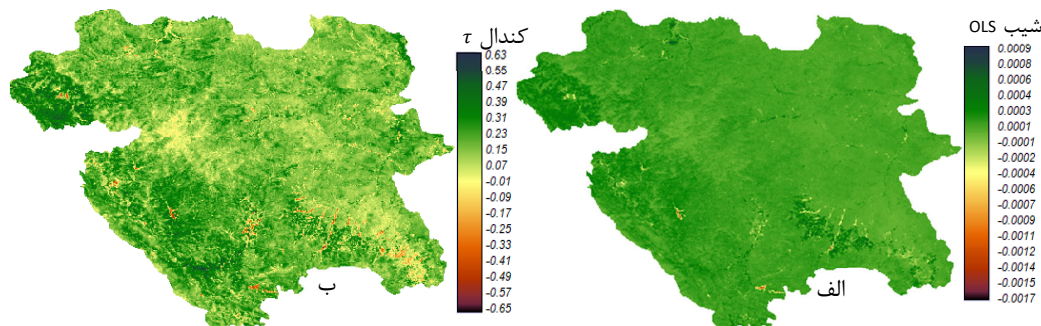
از آزمون معنی‌داری من-کندال برای تشخیص روندهای معنی‌دار استفاده شد. خروجی این آزمون، تصویری حاوی ارزش‌های Z_s در هر پیکسل بود که ارزش‌های مثبت و منفی Z_s به ترتیب روندهای افزایش

کشاورزی زیراشکوب اراضی جنگلی مرتبط دانست که بیشتر دارای درجه انبوهی کمی هستند. در پژوهش Verbesselt و همکاران (۲۰۱۰) نیز کشت و کار در اراضی جنگلی دلیلی برای Greening بیان شده است [۱]. لکه‌های سبز پررنگ در نواری در قسمت جنوب شرقی استان نیز Greening با شیب به نسبت بیشتر را نشان می‌دهد که مربوط به اراضی کشاورزی و باغ‌هاست که به‌طور معمول از وضعیت پوششی بهتری از پوشش‌های طبیعی برخوردارند. همچنین در اراضی دیمی که تبدیل به کشت آبی شده باشند نیز ممکن است پدیده Greening رخ دهد.

برآوردگر تیل-سن نیز به‌طور کامل با نتیجه حاصل از روش OLS شباهت دارد. این نتیجه با بیان Eastman (۲۰۰۹) مبنی بر تشابه نتایج این دو روش در بیشتر تحقیقات همخوانی دارد [۱۷]. اگرچه وقوع Greening در کردستان، توسط Babaei kafaki و همکاران (۲۰۰۹) برای دوره ۱۹۸۲-۱۹۹۹ گزارش شده است [۸]، در پژوهش پیش رو، مقادیر شیب کم بیانگر نبود روندی آشکار در تغییرات پوشش گیاهی است و مثبت بودن آن، افزایش بسیار ناچیزی را در NDVI تأیید می‌کند که نشان‌دهنده وقوع Greening بسیار ضعیف در کردستان است. پدیده Greening مشاهده شده در استان را می‌توان تا حدی به



شکل ۳. الف) تصویر اصلی NDVI مربوط به اوایل خرداد سال ۷۹؛ ب) تصویر NDVI بعد از حذف مؤلفه فصلی. به بیانی دیگر با فصل‌زدایی، تغییرات ارزش‌های NDVI در سری زمانی که سالانه تحت تأثیر تغییرات پارامترهای اقلیمی (باران و دما) طی فصول و چرخه سالانه خورشیدی رخ می‌دهد، حذف شده است. ارزش $\tau = -0.3$ در این تصاویر مربوط به آب است که قراردادی و Fill Value است



شکل ۴. نتایج بررسی روند تغییرات در سری زمانی فصل‌زدایی شده NDVI طی دوره ۲۰۱۷-۲۰۰۰. الف) به روش پارامتری OLS، ارزش هر پیکسل شیب تحلیل است؛ ب) به روش روند من-کندال، ارزش پیکسل‌ها من-کندال τ است

اندک و قابل اغماضی با شیب رگرسیون بسیار کم وجود داشت. براساس شکل ۵، روند Greening بیشتر در اراضی جنگلی زاگرس واقع در قسمت غربی استان دیده می‌شود. این روند افزایشی ممکن است ناشی از افزایش طول دوره‌ی رویش باشد که در مطالعه Babaei Kafaki و همکاران (۲۰۰۹) نیز به آن اشاره شده است [۸]. ممکن است Greening ناشی از بازسازی دوره‌های خشکسالی یا دیگر آشفتگی‌های احتمالی مانند آتش‌سوزی‌های سطحی و همچنین تبدیل اراضی جنگلی به کشاورزی و باغ باشد که Verbesselt و همکاران (۲۰۱۰) و de Jong و همکاران (۲۰۱۱) نیز در پژوهش‌های خود این عامل‌ها را برای Greening تأیید کرده‌اند [۹، ۱]. وجود Greening پراکنده در دیگر قسمت‌های استان ممکن است ناشی از توسعه فضای سبز شهری و اراضی کشاورزی باشد. چنین حالت‌هایی در پژوهش Colditz و همکاران (۲۰۱۵) نیز دیده شده است [۱۲].

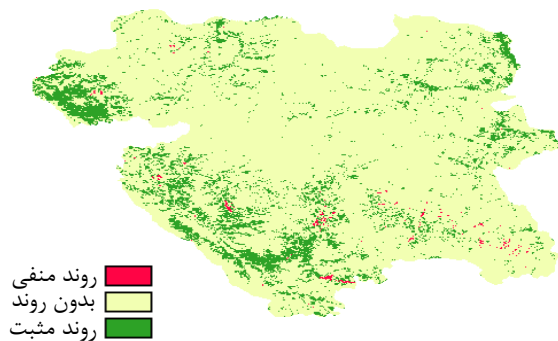
نتیجه تجزیه و تحلیل روند من-کندال در شکل ۴ ب ارائه شده است. میانگین من-کندال τ در منطقه ۰/۱ برآورد شد که با روند افزایشی دائمی (ارزش ۱) فاصله بسیاری دارد. براساس این نتیجه، با اینکه پوشش گیاهی منطقه در سال‌های اخیر تحت تأثیر عوامل مختلف محیطی، اقلیمی و اجتماعی-اقتصادی دچار نقصان و تخریب‌هایی شده، در مجموع روند NDVI افزایشی با شیبی اندک بوده است. بیش از ۹۷ درصد پیکسل‌ها روند افزایشی (رنگ‌های طیف سبز) داشته و فقط ۲/۴۶ درصد آنها روند کاهش (رنگ‌های قرمز) دارند. نتایج تجزیه و تحلیل معنی‌داری روند من-کندال در سطوح ۱ و ۵ درصد در جدول ۱ و نقشه پراکنش مکانی وضعیت معنی‌دار روندها (در سطح ۱ درصد) در شکل ۵ آورده شده است. براساس این جدول Greening و Browning معنی‌دار در سطح ۱ درصد، به ترتیب در ۱۲ و ۰/۳ درصد استان رخ داده است و در دیگر بخش‌های استان اغلب روند Greening بسیار

جدول ۱. نتایج تجزیه و تحلیل روند معنی‌داری من-کندال

درصد	تعداد پیکسل‌ها	سطح معنی‌داری (α)	جهت‌گیری روند
* ۲۲/۸۵ %	۱۱۴۲۶۱	۰/۰۵	مثبت
* ۰/۵۳ %	۲۶۴۰	۰/۰۵	منفی
۷۶/۶۲ %	۳۸۳۱۰۹	۰/۰۵	فاقد روند
** ۱۲/۰۱ %	۶۰۰۴۹	۰/۰۱	مثبت
** ۰/۳۴ %	۱۶۹۵	۰/۰۱	منفی
۸۷/۶۵ %	۴۳۸۲۶۶	۰/۰۱	فاقد روند

x مجموع پیکسل‌ها در تصویر استان کردستان ۵۰۰۰۱۰ است،

** معنی‌دار در سطح ۱ درصد، * معنی‌دار در سطح ۵ درصد



شکل ۵. پراکنش مکانی روندهای مشاهده‌شده براساس آزمون معنی‌داری روند من-کندال (در سطح ۱ درصد) در داده MODIS-NDVI در طی دوره زمانی ۲۰۰۰-۲۰۱۷

مشاهده شد، ممکن است ناشی از دخالت‌های انسان و تخریب‌های صورت گرفته باشد. چنین آشفتگی‌هایی ممکن است در سطوح کوچک رخ دهد، ولی سبب کاهش NDVI می‌شود که پیامد آن وقوع پدیده *Browning* است.

به سبب نوبت بودن موضوع این پژوهش در ایران، مقایسه با پژوهش‌های داخلی میسر نیست، ولی یافته‌های پژوهش حاضر و روند تغییرات به دست آمده، به طور کلی با دیگر پژوهش‌ها در جهان مطابقت دارد. نتایج تحقیق *Fensholt* و همکاران (۲۰۱۲)، *Fensholt* و همکاران (۲۰۱۵) و *Kong* و همکاران (۲۰۱۷) حاکی از آن است که *Greening* با روندی ناچیز در عرض‌های میانی و بالایی نیمکره شمالی [۵، ۱۱، ۲۰] و نیز در مناطق خشک و نیمه‌خشک جهان که جنگل‌های زاگرس را هم در بر می‌گیرد، مشهود است. همچنین می‌توان به مشاهده روند *Greening* برای غرب ایران اشاره کرد که حاصل بررسی‌های انجام گرفته در آسیا توسط *Lamchin* و همکاران (۲۰۱۷) و *Xu* و همکاران (۲۰۱۷) است [۲۱، ۲۲].

هرچند باور عمومی بر این است که رشد گیاهان و قابلیت تولید اکوسیستم به سبب گرمایش کره زمین افزایش یافته است، این گرمایش و افزایش تابش‌های خورشیدی می‌تواند تبخیر و تعرق گیاه را نیز افزایش دهد که سبب کمبود رطوبت در خاک می‌شود [۸، ۲۰]. در برخی تحقیقات نیز نتیجه‌گیری شده است که *Greening* می‌تواند بازده آب حوزه آبخیز و در نتیجه منابع آب در دسترس انسان را کاهش دهد. بنابراین *Greening* در نواحی خشک و نیمه‌خشک می‌تواند افزایش مصرف آب توسط گیاهان و در نتیجه درگیری‌های ناشی از افزایش تقاضای آب را در پی داشته باشد [۲۱]. با توجه به اهمیت ناحیه زاگرس باید پژوهش‌های دقیق و گسترده‌ای برای شناخت کارکرد عامل‌های مؤثر در روندهای *Greening/Browning* و کسب اطلاعات بیشتر برای پیش‌بینی تغییرات آتی در روند *Greening* اجرا شود؛ از جمله استفاده از تصاویر

نتایج تحقیقات بر پایه سری‌های زمانی ماهواره‌ای نشان‌دهنده افزایش مستمر فعالیت پوشش گیاهی (*Greening*) در نیمکره شمالی است. روندهای *Greening* در بسیاری از مناطق جهان با استفاده از تغییرات دما و بارش توجیه شده‌اند [۹، ۱۸]. در مقیاس جهانی، افزایش تراکم گازکربنیک در اتمسفر^۱، جنگلکاری، احیای جنگل، زراعت چوب، و عملیات مدیریتی افزایش محصولات کشاورزی را از عوامل *Greening* بر شمرده‌اند. در مقیاس منطقه‌ای نیز روندهای *Greening* با تغییرات اراضی، مدیریت اراضی، افزایش تراکم گازکربنیک در اتمسفر و رسوب نیتروژن^۲ مرتبط بوده است [۱۹].

در اراضی کشاورزی با توان و بازده کم که رها شده و به تدریج به بوته‌زار و مرتع تبدیل می‌شوند، پوشش گیاهی به تدریج کاهش می‌یابد و در نتیجه روند تغییرات NDVI کاهش خواهد بود. در مقابل در مناطق دارای پوشش گیاهی طبیعی ضعیف، به سبب توسعه کشاورزی یا جنگلکاری، مقدار پوشش گیاهی افزایش می‌یابد و در نتیجه روند NDVI افزایشی خواهد شد. روند *Greening* ممکن است ناشی از افزایش تدریجی طول دوره رویش گیاهی نیز باشد که در بسیاری از مناطق با وقوع بهار زودرس یا پاییز دیررس رخ داده است [۱، ۳]. با توجه به پژوهش *Babaei Kafaki* و همکاران (۲۰۰۹) که وقوع *Greening* را تأیید می‌کند، یافته‌های پژوهش پیش رو نیز با این نتیجه همسوست [۸]. روند افزایشی NDVI در مناطقی از استان کردستان اندک است، ولی نشان‌دهنده افزایش فعالیت گیاهی است که ممکن است تا حد زیادی ناشی از روند گرمایش کره زمین و تأثیر آن بر افزایش فرایندهای فتوسنتز و رویش باشد. این افزایش به طور کلی مطلوب ارزیابی می‌شود، ولی نباید به مفهوم بهبود کیفیت و کمیت پوشش گیاهی در نظر گرفته شود [۳، ۵]. پدیده *Browning* که در بخش‌های محدودی از منطقه

1. CO₂ Fertilization
2. Nitrogen Deposition

اندک و قابل اغماضی وجود داشت. هر چند که بخش‌هایی از این منطقه تحت پوشش جنگل‌های غرب کشور است که در دهه‌های اخیر از جنبه‌های مختلفی دچار بحران‌های مخرب طبیعی و انسانی مانند بیماری زغالی و تخریب اراضی جنگلی شده، عواملی مانند افزایش طول دوره رویش ناشی از بهار زودرس یا زمستان دیررس و تبدیل اراضی جنگلی و مرتعی به کشاورزی و همچنین کاهش وابستگی مردم محلی در بعضی مناطق به جنگل ممکن است موجب افزایش سبزی‌نگی پوشش گیاهی شده باشد. تحقیقات تکمیلی شامل بررسی روند تغییرات عوامل اقلیمی اصلی تأثیرگذار بر فعالیت پوشش گیاهی و ارتباط آنها با روند تغییرات پوشش گیاهی و همچنین پدیده‌شناسی سیمای زمین Landscape phenology، لازمه شناخت هر چه بیشتر بوم‌سازگان این منطقه است.

زمان‌هایی که دوره کشاورزی زیراشکوب پایان می‌یابد و تأثیرات پوشش کشاورزی در روند به حداقل می‌رسد.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق که با هدف بررسی پویایی زمانی پوشش گیاهی در استان کردستان در طی دوره زمانی ۲۰۱۷-۲۰۰۰ انجام گرفت، از داده‌های سری زمانی NDVI ۱۶ روزه سنجنده MODIS با اندازه پیکسل ۲۵۰ متر استفاده شد. براساس پیشینه تحقیق، قابلیت این داده‌ها و تناسب روش‌های متداول به‌کاررفته OLS، تیل-سن و من-کندال در این زمینه به تأیید جهانی رسیده است و از این رو احتمال می‌رود نتایج این تحقیق تنها با عدم قطعیت اندکی همراه باشد. براساس نتایج به‌دست‌آمده، تنها در ۱۲ درصد از استان کردستان روند افزایشی معنی‌داری در سطح ۱ درصد در میزان سبزی‌نگی پوشش گیاهی (NDVI) مشاهده شد و در دیگر بخش‌های استان تنها روند افزایشی بسیار

References

- [1]. Verbesselt, J., Hyndman, R., Newnham, G., and Culvenor, D. (2010). Detecting trend and seasonal changes in satellite image time series. *Remote Sensing of Environment*, 114(1): 106-115.
- [2]. Fensholt, R., Rasmussen, K., Nielsen, T.T., and Mbow, C. (2009). Evaluation of earth observation based long term vegetation trends - Intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data. *Remote Sensing of Environment* 113(9): 1886-1898.
- [3]. Kiapasha, K., Darvishsefat, A.A., Zargham, N., Attarod, P., Nadi, M., and Schaeppman, M. (2017). Greening trend in the Hyrcanian forests using NOAA NADVI time series during 1981-2012. *Forest and Wood Products*, 70 (3): 409-420.
- [4]. Kuenzer, C., Dech, S., and Wagner, W. (2015). Remote sensing time series revealing land surface dynamics: Status quo and the pathway ahead. In *Remote Sensing Time Series* (pp. 1-24). Springer, Cham.
- [5]. Fensholt, R., Langanke, T., Rasmussen, K., Reenberg, A., Prince, S.D., Tucker, C., Scholes, R.J., Le, Q.B., Bondeau, A., Eastman, R., Epstein, H., Gaughan, A.E., Hellden, U., Mbow, C., Olsson, L., Paruelo, J., Schweitzer, Ch., Seaquist, J., and Wessels, K. (2012). Greenness in semi-arid areas across the globe 1981-2007- an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers. *Remote Sensing of Environment*, 121: 144-158.
- [6]. de Beurs, K.M., and Henebry, G.M. (2005). Land surface phenology and temperature variation in the International Geosphere-Biosphere Program high-latitude transects. *Global Change Biology*, 11(5): 779-790.
- [7]. Karlsen, S.R., Elvebakk, A., Høgda, K.A., and Johansen, B. (2006). Satellite-based mapping of the growing season and bioclimatic zones in Fennoscandia. *Global Ecology and Biogeography*, 15(4): 416-430.
- [8]. Babaei Kafaki, S., Mataji, A., and Hashemi, S.A. (2009). Monitoring growing season length of deciduous broad leaf forest derived from satellite data in Iran. *American Journal of Environmental Sciences* 5(5): 647-652.

- [9]. de Jong, R., de Bruin, S., de Wit, A., Schaepman, M.E., and Dent, D.L. (2011). Analysis of monotonic greening and browning trends from global NDVI time-series. *Remote Sensing of Environment*, 115(2): 692-702.
- [10]. Xiao, J., and Moody, A. (2005). Geographical distribution of global greening trends and their climatic correlates: 1982–1998. *International Journal of Remote Sensing*, 26(11), 2371-2390.
- [11]. Fensholt, R., Horion, S., Tagesson, T., Ehammer, A., Ivits, E., and Rasmussen, K. (2015). Global-scale mapping of changes in ecosystem functioning from earth observation-based trends in total and recurrent vegetation. *Global Ecology and Biogeography*, 24(9): 1003-1017. doi:10.1111/geb.12338.
- [12]. Colditz, R.R., Ressler, R.A., and Bonilla-Moheno, M. (2015). Trends in 15-year MODIS NDVI time series for Mexico. In 8th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (Multi-Temp). Jul.22-24 Annecy, France, pp. 1-4.
- [13]. Attarod, P., Sadeghi, S.M.M., Sarteshnizi, F.T., Saroyi, S., Abbasian, P., Masihpoor, M., Kordrostami, F., and Dirikvandi, A. (2016). Meteorological parameters and evapotranspiration affecting the Zagros forests decline in Lorestan province. *Iranian Journal of Forest and Range Protection Research*, 13(2): 97-112.
- [14]. Karami A., and Feghhi, J. (2012). Monitoring and comparison of land use of Northern and Southern Zagros using the land surface ecology approach (study Case: Kurdistan Provinces and KohgiluyehBavar Ahmad). *Land Application*, 4(6): 5-34.
- [15]. Kasmaiee, M. (1990). Climatic Classification of Iran for Housing and Residential Environments. Building and Housing Research Center, Iran.
- [16]. Tucker, C.J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8(2): 127-150.
- [17]. Eastman, J.R. (2009). IDRISI Taiga - Guide to GIS and Image Processing. Clark Labs Clark University, Worcester.
- [18]. Geng, L., Che, T., Wang, X., and Wang, H. (2019). Detecting Spatiotemporal Changes in Vegetation with the BFAST Model in the Qilian Mountain Region during 2000-2017. *Remote Sensing*, 11(2): 103.
- [19]. Bastos, A., Ciais, P., Park, T., Zscheischler, J., Yue, C., Barichivich, J., Myneni, R.B., Peng, S., Piao, S., and Zhu, Z. (2017). Was the extreme Northern Hemisphere greening in 2015 predictable? *Environmental Research Letters*, 12(4): 044016.
- [20]. Kong, D., Zhang, Q., Singh, V.P., and Shi, P. (2017). Seasonal vegetation response to climate change in the Northern Hemisphere (1982–2013). *Global and Planetary Change*, 148: 1-8.
- [21]. Lamchin, M., Lee, W., Jeon, S.W., Wang, S.W., Lim, C.H., Song, C., and Sung, M. (2017). Long-term trend and correlation between vegetation greenness and climate variables in Asia based on satellite data. *Science of the Total Environment*, 618: 1089-1095.
- [22]. Xu, H.J., Wang, X.P., and Yang, T.B. (2017). Trend shifts in satellite-derived vegetation growth in Central Eurasia, 1982–2013. *Science of the Total Environment*, 579: 1658-1674.

Long-term trend analysis of vegetation changes using MODIS-NDVI time series during 2000-2017 (Case study: Kurdistan province)

M. Masihpour; Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

A. A. Darvishsefat*; Prof., Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, I.R. Iran

R. Rahmani; Assoc. Prof., Forest Sciences Faculty, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources, Gorgan, I.R. Iran

(Received: 13 March 2019, Accepted: 04 September 2019)

ABSTRACT

Over time, environmental and human factors have caused positive and negative changes in the quantity and quality of vegetation, and these changes will continue. Vegetation greenness trend may be either increasing (Greening) or decreasing (Browning). Understanding the factors creating these changes and detection of trends in the past and future, would be useful for managers and decision makers. This study investigates the long-term changes in Kurdistan vegetation greenness by using the 16-day composite MODIS NDVI time series for 2000–2017, and 414 images with 250-m pixel size. The coordinate system of MODIS data was converted from the sinusoidal to the geographic map projection and a time series of data was created. After seasonality removal in the time series data, the long-term trend analyses were performed using parametric ordinary least squares (OLS) regression and non-parametric Theil-Sen and Mann-Kendall methods at pixel by pixel basis. Both OLS and Theil-Sen represented the similar result and indicated a slight increase in NDVI i.e., the poor greenness during the study period. According to the Mann-Kendall trend analysis, about 97 % of the province experienced a slight increasing and 2.46 % showed decreasing trend. However, based on the Kendall significance test, only 12 % of the province had a significant increasing or decreasing trend at 1 % confidence level and the rest of the area showed a slight and negligible increasing trend.

Keywords: Long term trend, Time series, OLS, Theil-Sen, Mann-Kendal, Greening, Browning, MODIS-NDVI.

* Corresponding Author, Email: adarvish@ut.ac.ir, Tel: +98 2632223044