

Estimation of Frost Damage in Walnut Trees (*Juglans regia*) using Remote Sensing

E. Gohari¹, H. Torabzadeh Khorasani^{1*}, S. Alvandy², M. Heidari Mozaffar¹

1- Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2- Department of Plant Protection, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

(*- Corresponding author's Email: torabzadeh@basu.ac.ir)

Received: 07 December 2024

Revised: 06 April 2025

Accepted: 13 April 2025

Available Online: 13 April 2025

How to cite this article:

Gohari, E., Torabzadeh Khorasani, H., Alvandy, S., & Heidari Mozaffar, M. (2026). Estimation of frost damage in walnut trees (*Juglans regia*) using remote sensing. *Journal of Horticultural Science*, 39(4), 663-676. (In Persian with English abstract). <https://doi.org/10.22067/jhs.2025.91090.1398>

Introduction

Walnut is one of the most important economic crops in Iran and worldwide. Among the climatic factors that influence the selection of suitable sites for walnut (*Juglans regia*) cultivation, spring frost is particularly significant. Most of the walnut planting areas in Iran are mostly in the areas that have damaging colds in spring. The largest area under walnut cultivation in Iran is concentrated in the mountain hills and heights of the Zagros and Alborz mountain ranges. Every year, walnut production is limited by spring frosts, which, in addition to reducing production, can also damage sensitive plant tissues. Frost damage is one of the cases that are subject to compensation from the Agricultural Insurance Fund. Due to the high economic value of this product, an accurate, fast and low-cost estimation is necessary to evaluate the damages caused by this phenomenon on the walnut product. In this regard, in order to plan for the accurate calculation of the amount of compensation to the insurer, the insurer needs comprehensive information, so that it can estimate the performance losses caused by various factors. Remote sensing methods for frost monitoring using vegetation indicators are very efficient and effective. Therefore, this research examines spring frost damage by providing a quantitative index.

Materials and Methods

In this research, frost damage of the Agricultural Insurance Fund was used for walnut trees. The damage assessment was presented over a period of nine years. Vegetation index values extracted from Landsat and Sentinel-2 images have been used to overcome adverse weather conditions. Each of the vegetation indicators has different noises such as light changes during the day, wind speed, temperature, sun angle, etc. In order to smooth the indices, Savitzky-Golay filter was used. This filter was calculated with window size 11 and degree 2. In this filter, choosing the window size and degree is very important, because the small window size and degree cause noise to remain in the data, and if the window size and degree are chosen large, they lead to the loss of information related to vegetation indices. Meanwhile, choosing the reference year for comparison with other years was of particular importance. According to the consistency of the filtered indicators and the damages reported by the Agricultural Insurance Fund, the reference year was determined. The Spring Frost Damage Index index was presented in each year using the filtered values of the relevant vegetation indices, between the reference year and other years. In general, the enclosed area of the two curves between the intersection points at the beginning and the end has indicated the values of the SFDI index in each year.

Results and Discussion

The relationship between Spring Frost Damage Index (SFDI) index and damages was done through 2nd



Authors retain the copyright. This is an open access article distributed under [Creative Commons Attribution 4.0 International License \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.91090.1398>

degree polynomial model and linear regression. The status of the SFDI index compared to the estimates of the agricultural insurance fund for all villages was investigated through two polynomial models of the 2nd degree and linear regression. The accuracy of the regression model was evaluated with criteria such as: r , RMSE, P-value. The value of r indicates how well a model can predict the value of the dependent variable in percentage terms. The higher the value of r , the better the model. RMSE values indicate how well a regression model can predict the value of the variable. The quantity P-value shows the significance of two independent and dependent variables, and values less than 5% indicate the existence of a relationship between two variables at a significant level of 95%. It is useful to calculate all three quantities for a given model, as each measure provides useful information. Spring frost damage index based on Normalized Difference Vegetation Index vegetation index with correlation coefficients of $r = 0.927$ and $r = 0.823$ were able to estimate the damage. Finally, the maps of spatial distribution and spring frost damage showed a good fit with the damage reported by the Agricultural Insurance Fund.

Conclusion

The SFDI index has demonstrated a positive role in assessing frost damage. The spatial distribution results of the SFDI index further confirm its effectiveness, showing that as the index value increases, the percentage of frost damage reported by the Agricultural Insurance Fund also rises. Overall, the findings indicate that this index evaluates the impacts of spring frost accurately and efficiently and shows a strong correlation with reductions in crop yield.

Keywords: Satellite images, Spring frost damage, Time series, Vegetation index

برآورد میزان خسارت ناشی از سرمازدگی در درختان گردو (*Juglans regia*) با استفاده از سنجش از دور

الهام گوهری^۱  - حسین ترابزاده خراسانی^۱  - سعید الوندی^۲  - مرتضی حیدری مظفر^۱ 

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۴

چکیده

خسارت سرمازدگی بهاره، از جمله مواردی است که مشمول پرداخت غرامت از سوی صندوق بیمه کشاورزی هستند. سرمازدگی ناگهانی از اثرات منفی در میزان بازدهی محصولات در باغها است. به دلیل ارزش اقتصادی نسبتاً بالای محصولات باغی، باید از روش‌های دقیقی در برآورد میزان خسارت استفاده کرد. برخلاف محصولات زراعی که در سطح وسیع و به صورت یکنواخت کشت می‌شوند، تعمیم روش‌های نمونه‌برداری در این مطالعه به کل منطقه بسیار دشوار بوده و موجب کاهش دقت مدل‌های برآورد خسارت می‌گردد. هدف اصلی این تحقیق، ارائه یک شاخص کمی برای تخمین میزان خسارت وارده به درختان گردو (*Juglans regia*) بر مبنای سری زمانی تصاویر ماهواره‌های Sentinel-2 و Landsat است؛ لذا براساس سری زمانی شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده، شاخص خسارت سرمازدگی بهاره برای باغ‌های گردوی شهرستان تویسرکان محاسبه و در یک دوره زمانی ۹ ساله (۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱) مورد ارزیابی قرار گرفت. سری‌های زمانی شاخص پوشش گیاهی تفاضلی نرمال‌شده مورد استفاده توسط فیلتر ساویتزکی - گالای هموار شده‌اند تا اثرات عواملی مانند ابر، گردوغبار و نویز کاهش یابند. با مقایسه سری زمانی هر سال با سال مرجع و محاسبه سطح بین دو منحنی، شاخص خسارت سرمازدگی بهاره محاسبه شد که بیانگر میزان خسارت‌های وارده به درختان گردو است. ارزیابی عملکرد شاخص خسارت سرمازدگی بهاره نسبت به برآوردهای صندوق بیمه کشاورزی نشان می‌دهد که این شاخص برای همه روستاها از طریق دو مدل چندجمله‌ای درجه ۲ و رگرسیون خطی با ضریب‌های همبستگی به ترتیب $r = 0.927$ و $r = 0.823$ قادر به تخمین خسارت است. در این بین، نقشه‌های توزیع مکانی و خسارت سرمازدگی بهاره، تناسب خوبی با خسارت‌های گزارش شده از طرف صندوق بیمه کشاورزی دارند. در نهایت، روش پیشنهادی می‌تواند جایگزین مقرون به صرفه‌ای جهت برداشت داده میدانی خسارت برای درختان گردو با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای باشد.

واژه‌های کلیدی: تصاویر ماهواره‌ای، خسارت سرمازدگی بهاره، سری زمانی، شاخص پوشش گیاهی

مقدمه

مناطق مستعد کشت گردو (*Juglans regia*) در ایران، به طور معمول در دامنه ارتفاعات و به خصوص ارتفاعات رشته‌کوه‌های البرز و زاگرس پراکنده هستند. ایران با ۹/۱ درصد تولید گردو در جهان، سومین تولیدکننده این محصول است. همچنین با ۴/۹ درصد سطح زیرکشت باغ‌های گردو در جهان، رتبه پنجم جهان را دارد (Hassani et al., 2020). از عوامل اقلیمی مؤثر در بازدهی درختان گردو، می‌توان به سرمای زمستانه و بهاره، بارندگی و گرمای تابستان اشاره نمود. دمای پایین در پاییز و بهار از عوامل عمده محدودکننده بر

کشت گردو در بسیاری از مناطق موجود در عرض‌های بالا است. با وجود تفاوت ارقام مختلف گردو به سرما (Aslamarz et al., 2010)، نیاز سرمایی ارقام گردو بین ۴۰۰ الی ۱۶۰۰ ساعت است (Rasolzadegan, 1996)، اما عموماً دمای پایین‌تر از ۱۰- درجه سلسیوس برای اکثر گونه‌ها و ژنوتیپ‌های گردو مضر است (Khoramshahi, 2012). برخی از ژنوتیپ‌ها، با برگ‌دهی دیررس، می‌تواند خسارت ناشی از سرمازدگی را کاهش دهند (Fallah et al., 2022)، اما به صورت کلی، بروز دماهای زیر صفر و یخبندان در اوایل بهار سبب سرمازدگی شاخه‌های سال جاری و به خصوص گل‌ها می‌شود. اغلب مناطق کاشت گردو در ایران، در نواحی با سرماهای زیان‌بخش پاییزه و بهاره واقع شده‌اند؛ بنابراین هر ساله تولید گردوی ایرانی با یخبندان بهاری محدود می‌شود که علاوه بر کاهش تولید، می‌تواند به بافت‌های حساس گیاه نیز آسیب برساند (Khadiji et

۱- گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲- گروه گیاه‌پزشکی، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(Email: torabzadeh@basu.ac.ir)

(*) نویسنده مسئول:

<https://doi.org/10.22067/jhs.2025.91090.1398>

al., 2019). سرمازدگی بهاره نه تنها به سطح سلولی گیاه آسیب رسانده (Nejadsadeghi et al., 2014)، بلکه موجب آشفته‌گی در تولید کلروفیل و به هم خوردن توازن کلروپلاست می‌شود. در نتیجه، برگ‌های گیاه به‌ندرت می‌توانند بلافاصله بعد از تنش سرما بهبود یابند (Díaz et al., 2019). برآورد دقیق از میزان سرمازدگی و خسارت محصولات باغی می‌تواند به متولیان امر در انجام اقدامات مدیریتی، از قبیل بهینه‌سازی ساختار کاشت منطقه‌ای، آبیاری و کوددهی به‌موقع، یاری رساند (Cilia et al., 2014). مشابه با شیوه‌های رایج در برآورد خسارت محصولات زراعی، برای باغ‌های نیز از روش نمونه‌برداری مستقیم و تصادفی استفاده شود. اما کاشت غیریکنواخت محصولات باغی و عدم همگن بودن توزیع آن در هر منطقه، تمهیم این روش را دشوار کرده و دقت مدل‌های برآورد خسارت را به‌شدت کاهش می‌دهد. این کاهش دقت، برای محصولاتی نظیر گردو که از ارزش اقتصادی زیادی برخوردارند منجر به اختلافات مالی زیادی بین شرکت‌های بیمه و باغداران می‌شود. ارزیابی چنین خساراتی، یکی از چالش‌های اصلی صندوق‌های بیمه است. روش‌های فعلی تعیین میزان خسارت که بر مشاهدات نقطه‌ای و در تعداد محدود استوار هستند، کارایی لازم را در مورد محصولات باغی ندارند. ضمن اینکه بررسی خسارت به‌صورت سنتی بسیار وقت‌گیر، هزینه‌بر و در عین حال سلیقه‌ای است. در مقابل، روش‌های سنجش‌ازدور با توجه به توانایی نقشه‌برداری در هر دو بعد مکان و زمان، پوشش گسترده و تکرار اندازه‌گیری‌ها، امکان بررسی مناطق وسیع را با دقت بالا و هزینه کمتر فراهم می‌کند. این روش‌ها به‌دلیل غیرتماسی بودن، غیرمخرب بودن و همچنین سهولت در استنتاج سریع مشاهدات در مقیاس‌های بزرگ‌تر، به‌طور ویژه‌ای مورد توجه پژوهش‌های بوم‌شناختی و اقلیمی قرار گرفته است (Li et al., 2021). همچنین ترکیب تصاویر سنجش‌ازدور با مدل‌های اقلیمی می‌تواند نیازهای خاص محصول را در شرایط اقلیمی مختلف شناسایی کرده و براساس آن، میزان کود، آب و سایر منابع را مشخص نماید (Vahdati et al., 2019). از جمله روش‌های سنجش‌ازدور در ارزیابی سرمازدگی، استفاده از شاخص‌های پوشش گیاهی است. این شاخص‌ها، تبدیل‌های محاسباتی هستند که براساس رفتار طیفی گیاهان تعریف می‌شوند و برای ارزیابی و بررسی گیاهان در مشاهدات ماهواره‌ای چند طیفی طراحی شده‌اند (Skendžić et al., 2023). شاخص‌های پوشش گیاهی می‌توانند به‌عنوان جایگزینی مناسب برای داده‌های ثبت‌نشده و مربوط به گذشته مانند تغییرات داده‌های کاربری اراضی و تغییرات پوشش گیاهی در دوره‌های زمانی مختلف مورد استفاده قرار گیرند و به‌عنوان اطلاعات پایه برای مطالعات دیگر به کار روند. از میان شاخص‌های پوشش گیاهی، $NDVI^1$ به‌دلیل

عملکرد مطلوب در توصیف پوشش گیاهی، به یکی از شاخص‌های مهم در زمینه سنجش‌ازدور تبدیل شده است (Zhu & Liu., 2015). به‌طور طبیعی، تغییرات این شاخص‌ها در طول زمان بر روی پوشش گیاهی و در ابتدای فصل رشد (ابتدای بهار) روند مثبتی دارد، بنابراین هرگونه کاهش در این روند می‌تواند به وقوع خسارت در گیاهان مربوط باشد (Allevato et al., 2019). سری‌های زمانی شاخص‌های گیاهی معمولاً از تصاویر سنجنده مودیس ساخته می‌شوند، زیرا دوره بازدید روزانه آن برای افزایش حساسیت روش‌ها به کمترین تغییرات گیاهان مناسب است (Cao et al., 2015). قدرت تفکیک مکانی ۵۰۰ متری این داده‌ها، برای بررسی پوشش‌های گیاهی وسیع همچون جنگل‌ها و مزارع بزرگ، مطلوب است. هرچند برای بررسی خسارت در مزارع کوچک‌تر و باغ‌های، از سنجنده‌های با توان تفکیک متوسط، مستقر بر ماهواره‌های Landsat و Sentinel-2 استفاده می‌شود (Wang et al., 2020) در بین پژوهش‌های مختلف بر روی سرمازدگی (Duddu et al., 2018)، میزان افت عملکرد کلزا (*Brassica napus* L.) با استفاده از روش‌های سنجش‌ازدور ارزیابی شد. همچنین مقایسه آزمایشگاهی بین دو محصول گندم (*Triticum aestivum* L.) آسیب‌دیده و سالم، در سه روز پس از یخ‌زدگی روند کاهشی را در مقدار سری زمانی شاخص NDVI نشان داد (Murphy et al., 2020). نتایج پژوهشی دیگر گویای آن است که میزان کلروفیل برگ‌های تحت تأثیر تنش سرما، با رفتار منحنی بازتاب طیفی قابل ارزیابی است (Wang et al., 2016). میزان خسارت ناشی از سرمازدگی برنج (*Oryza sativa japonica*) Azari (2012) را به‌کمک سری زمانی شاخص EVI^2 و NDVI به دست آمد. نظر به اینکه میزان شاخص‌های پوشش گیاهی در زمان خوشه‌دهی به بیشترین مقدار خود می‌رسد، مجموع دماهای پایین‌تر از یک حد آستانه، در طول دوره رشد زایشی محاسبه و درجه روز سرما تعیین شده و در نهایت درصد عقیمی این محصول ارزیابی گردید. روشی که توسط وانگ و همکاران (Wang et al., 2020) ارائه شده است، به استانداردسازی و مقایسه سطح زیر منحنی سری‌های زمانی در سال‌های مختلف برای محصول گندم می‌پردازد. اساس این روش بر این است که کاهش در سطح زیر منحنی فوق با افزایش خسارت ناشی از سرمازدگی بهاره نسبت مستقیم دارد. از این‌رو شاخص $SFDI^3$ برای ارزیابی این خسارت پیشنهاد شده است. برای سایر محصولات کشاورزی مانند جوانه برگ چای (*Camellia sinensis*)، روش‌های برآورد دمای کمینه مبتنی بر سنجنده و ویژگی‌های مکانی-زمانی بر مبنای روزهای خسارت، استفاده شد. به‌طور کلی، میزان روند کاهشی دمای هوا، متناسب با خسارت ارزیابی شد (Wang et al., 2021). در

2- Enhanced Vegetation Index

3- Spring Frost Damage Index

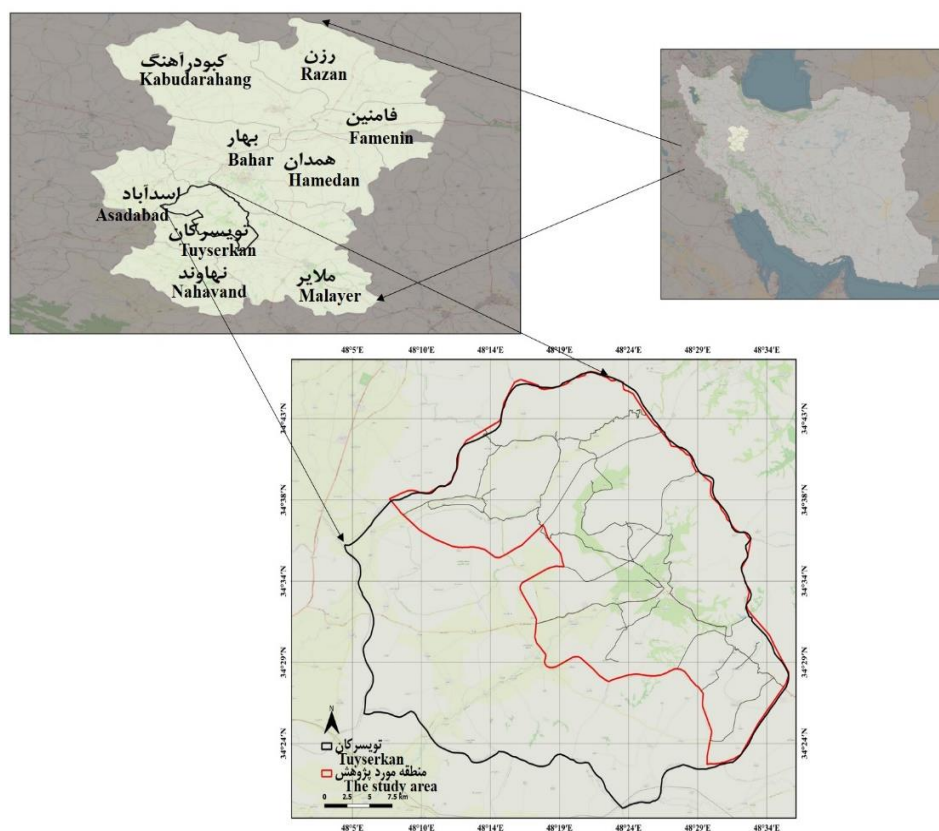
1- Normalized Difference Vegetation Index

زمانی نُه ساله (۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱)، با استفاده از تصاویر ماهواره‌های Landsat و Sentinel-2 ارزیابی شد. بدین منظور از شاخص SFDI استفاده گردید.

مواد و روش‌ها

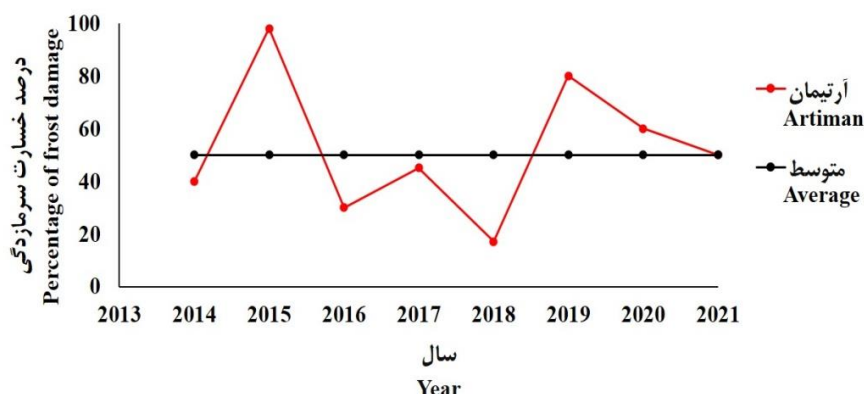
شهرستان تویسرکان در نیمه جنوبی استان همدان واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع متوسط این شهر از سطح دریا برابر ۱۸۵۷ متر، میانگین دمای سالانه ۱۲/۲۷ درجه سانتی‌گراد و بارندگی ۳۴۱/۳ میلی‌متر می‌باشد. این منطقه با آب‌وهوای معتدل کوهستانی در سال ۱۳۹۵ دارای جمعیت ۶۶۶,۱۰۱ نفر بوده است (Khazaei et al., 2019). به دلیل برخورداری از آب‌وهوای مناسب، بهره‌برداری از منبع آب کافی و سابقه بلندمدت در تولید گردوی با کیفیت، شرایط بسیار مطلوبی برای تولید این محصول در منطقه وجود دارد. در این شهرستان، ۵,۳۶۰ هکتار باغ گردو، با تولید ۱۵۰۰۰ تن وجود دارد که رتبه اول را در کشور به خود اختصاص داده است. از حیث اقتصادی نیز عمده درآمد مردم از همین طریق کسب می‌شود. به‌عنوان مثال، درآمد حاصل از تولید گردو در سال ۱۳۸۹ نزدیک به ۵۰ میلیون دلار بوده است (Arghan et al., 2016).

مورد محصولات باغی همچون سیب (*Malus domestica*) نیز تحقیقاتی صورت گرفته است، به‌طوری‌که خسارت سرمازدگی از طریق مقایسه شاخص NDVI در سال‌های بدون سرما (مرجع) و سرما برآورد شده است. نتایج حاکی از رفتار غیرطبیعی منحنی طیفی در سری زمانی شاخص NDVI است (Zhu et al., 2021). همچنین با بررسی رفتار منحنی طیفی باغ‌های انگور (*Vitis vinifera*)، رابطه شدت سرمازدگی و افت شاخص‌های گیاهی پس از وقوع یخبندان بررسی شده است. این شاخص‌ها شواهدی از بهبودی کامل انگورها را ۴۰ روز پس از وقوع یخبندان ارائه نمودند (Cogato et al., 2020). در پژوهش دیگری از شاخص پوشش گیاهی و طبقه‌بندی جنگل تصادفی برای محصول انگور استفاده شده و افت شدید در شاخص پوشش گیاهی واضح بوده است (Li et al., 2021). براساس نتایج، ۴۱ درصد از سطح زیرکشت انگور دچار خسارت ناشی از سرمازدگی شده بود. علی‌رغم اهمیت محصول گردو از نظر اقتصادی و نیاز به ارزیابی دقیق خسارت‌ها، متأسفانه تاکنون شاخص کمی مناسبی برای ارزیابی سرمازدگی بهاره با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با توان تفکیک بالا ارائه نشده است. هدف اصلی این تحقیق، ارائه چنین شاخصی برای درختان گردو در منطقه مورد مطالعه است. در این پژوهش، میزان خسارت ناشی از سرمازدگی در درختان گردو در بازه

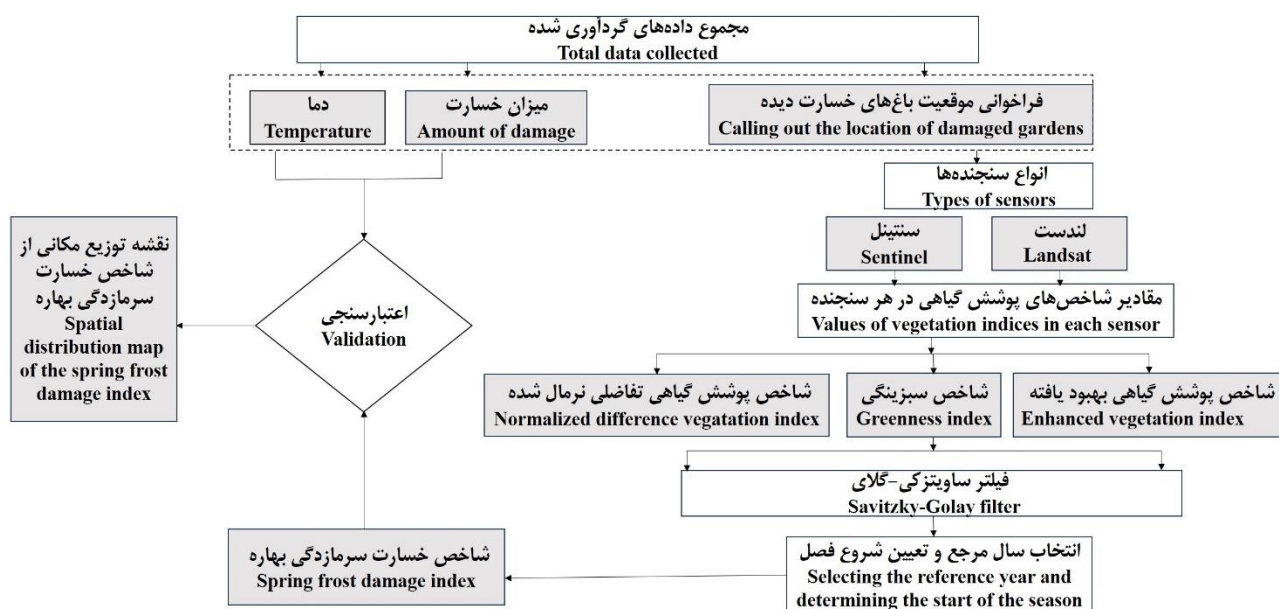


شکل ۱- منطقه مورد مطالعه

Figure 1- The study area



شکل ۲- نمونه‌ای از روند خسارت در باغ‌های گردوی روستای آرتیمان براساس گزارش صندوق بیمه کشاورزی
Figure 2- A sample of damage trend for walnut trees in Artiman village according to AIF report



شکل ۳- روند پیاده‌سازی کلی پژوهش
Figure 3- Overall research implementation process

داده‌های مورد استفاده

در این پژوهش، از سه نوع داده جهت تجزیه و تحلیل سرمازدگی استفاده شده است. این مجموعه داده‌ها عبارتند از تصاویر ماهواره‌ای، گزارش‌های صندوق بیمه کشاورزی و داده‌های آب‌وهوایی. اخذ تصاویر و محاسبه شاخص‌های پوشش گیاهی از طریق سامانه GEE¹ انجام شد. با توجه به پراکنده بودن باغ‌های گردو و شرایط آب‌وهوایی نامساعد در فصل بهار، تصاویر در بازه‌های زمانی متفاوت بودند و

ابری بودن برخی از تصاویر ماهواره‌ای منجر به کمبود تصاویر در هر سال می‌شد. به‌منظور فائق آمدن بر این مشکل، تصاویر دو سنسور ETM+² و OLI³ از ماهواره لندست با تصاویر سنسور MSI⁴ از ماهواره سنیتینل-۲ ترکیب شدند.

خسارت‌های اعلام‌شده برای روستاهای مختلف شهرستان توپسرکان در بازه زمانی مورد مطالعه، از صندوق بیمه کشاورزی اخذ شد. به‌عنوان نمونه، در روستای آرتیمان، میزان خسارت به‌ترتیب در شکل ۲ بیان شده است. خط سیاه‌رنگ، نشان‌دهنده میزان متوسط خسارت می‌باشد. بیشترین درصد خسارت سرمازدگی بهاره مربوط به سال ۲۰۱۵ و کمترین درصد خسارت سرمازدگی بهاره مربوط به سال

- 1- Google Earth Engine
- 2- Enhanced Thematic Mapper Plus
- 3- Operational Land Image
- 4- Multi Spectral Instrument

باغ‌های گردو در شهرستان تویسرکان، مقادیر و تصاویر شاخص پوشش گیاهی در سامانه GEE، در فصل بهار از ۱۹ فوریه تا ۲۶ ژوئن بین سال‌های ۲۰۱۳ تا ۲۰۲۱ محاسبه شدند. جهت هموارسازی شاخص پوشش گیاهی از فیلتر SG استفاده گردید. معادله این فیلتر از طریق معادله ۲ به دست آمد.

$$Y_j^* = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} C_i Y_{j+i}}{N} \quad (2)$$

که در آن، Y : مقادیر خام شاخص پوشش گیاهی، Y^* : مقادیر فیلتر شده شاخص پوشش گیاهی، C_i : مقدار ضریب فیلتر (پنجره هموار کردن)، N : تعداد نقاط جهت هموارسازی، m : پنجره هموارسازی و شاخص Z : به‌عنوان نشانگر در حال اجرا از جدول داده‌های اصلی است. تعیین مقادیر پنجره هموارسازی (m) که مقدار آن از ۱ تا ۱۲ متغیر است و درجه هموارسازی (d) که مقدار آن از ۲ تا ۴ متغیر است از اهمیت بیشتری برخوردارند (Chen et al., 2004). اندازه پنجره و درجه کوچک باعث می‌شود که نویز در داده‌ها باقی‌مانده و اگر اندازه پنجره و درجه بزرگ انتخاب شود منجر به از بین رفتن اطلاعات اصلی می‌شود. با توجه به نتایج آزمون‌های اولیه، در این تحقیق، این فیلتر با اندازه پنجره ۱۱ و درجه ۲ در نرم‌افزار MATLAB محاسبه شد.

انتخاب سال مرجع و تعیین شروع فصل

سال مرجع (سال بدون سرمازدگی) دارای ویژگی‌هایی مانند پیوستگی شاخص پوشش گیاهی، یعنی نداشتن افت ناگهانی در سری زمانی (تغییرات زیاد) است. در حقیقت، رفتار منحنی سال مرجع کمترین اثرات ناشی از سرمازدگی را دارد. انتخاب این سال به دلیل مرجع بودن و مقایسه با سال‌های دیگر از اهمیت خاصی برخوردار است. برای انتخاب درست سال مرجع، دو نکته لحاظ شده است. اول اینکه از طرف صندوق بیمه، خسارتی برای آن سال به دلیل سرمازدگی اعلام نشده باشد. دوم اینکه افت قابل ملاحظه‌ای در سری زمانی شاخص گیاهی وجود نداشته باشد. با توجه به پیوستگی شاخص فیلتر شده و گزارش عدم خسارت سرمازدگی بهار، سال ۲۰۱۳ به‌عنوان مرجع تعیین گردید. پس از انتخاب سال مرجع، تاریخ SOS^3 براساس اولین جهش صعودی که شاخص‌های فیلتر شده پوشش گیاهی نشان می‌دهند (Diao, 2020)، مشخص شد. این تاریخ به‌عنوان مبنا جهت تقاطع با سایر سال‌ها و تولید شاخص SFDI استفاده شده است.

۲۰۱۸ می‌باشد. همچنین هیچ‌گونه خسارتی در سال ۲۰۱۳ به منطقه مورد مطالعه وارد نشده است.

داده‌های آب‌وهوایی لازم از سازمان هواشناسی کشور تهیه شده است که شامل دمای روزانه (کمینه، متوسط و بیشینه) در طول مدت مورد مطالعه می‌باشد. این داده‌ها توسط ایستگاه هواشناسی تویسرکان ثبت شده است که در مختصات $48/42$ درجه شرقی و $34/55$ درجه شمالی قرار دارد.

متداول‌ترین روش جهت بررسی خسارت ناشی از سرمازدگی، براساس شاخص‌های پوشش گیاهی است (She et al., 2015). این شاخص‌ها براساس بازتاب طیفی گیاهان، وضعیت رشد محصول و شرایط سلامتی آن‌ها را نشان می‌دهند. عملکرد هر شاخص پوشش گیاهی در شرایط خاصی متفاوت است. منحنی شاخص مرجع در شرایط معمولی یک روند صعودی پیوسته‌ای طی می‌کند، اما پس از سرمازدگی، شاخص تحت تنش قرار گرفته و افت ناگهانی در آن دیده می‌شود. در نهایت، خسارت سرمازدگی را می‌توان با محاسبه تفاوت بین منحنی مرجع و سایر منحنی‌ها کمی‌سازی کرد. روند کلی پیاده‌سازی پژوهش حاضر در شکل ۳ نشان داده شده است.

محاسبه شاخص پوشش گیاهی

شاخص‌های گیاهی متداول در مطالعه خسارت وارده به گیاهان، شامل NDVI، EVI و به‌صورت محدود، GI^1 هستند که برای اجتناب از ورود داده‌های پرت، نیاز به هموارسازی دارند (Maji et al., 2015; Gamon et al., 2015). یک شاخص پوشش گیاهی ایده‌آل باید دارای حداکثر میزان سیگنال مربوط به خصوصیات بیوفیزیکی و حداقل نویز مانند تأثیرات خاک و جو باشد (Ji et al., 2014). شاخص پوشش گیاهی NDVI از طریق معادله ۱ محاسبه گردید.

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

که در آن، NIR: باند مادون‌قرمز نزدیک و RED: باند قرمز است. به‌طور کلی، کیفیت داده‌های سنجنش‌ازدور تحت تأثیر عوامل مختلف محدود می‌شود که از آن جمله می‌توان به تغییرات شدت و زاویه نور خورشید، دمای سطح زمین، وجود سایه و ابرناکی اشاره کرد (Maji et al., 2015; Gamon et al., 2015). در این بین، پوشش ابر و برف باعث اغتشاش قابل توجه در سیگنال و در نهایت منجر به افت ناگهانی در سری زمانی پوشش گیاهی می‌شود (Ulsig et al., 2017). فیلتر SG^2 یک روش ساده و مؤثری است که می‌تواند اثرات نویزهای مزاحم را کاهش دهد (Savitzky & Golay, 1964). برای

1- Greenness Index

2- Savitzky-Golay

3- Start of the Season

شاخص SFDI

که در معادله ۴ و ۵، y : یک متغیر وابسته، x : یک متغیر مستقل، β : شیب خط (ضریب رگرسیون) و ε : عرض از مبدأ می‌باشد.

نتایج

صندوق بیمه کشاورزی استان همدان از سال ۲۰۱۳ برای هر باغ گردو دو نوع بیمه‌نامه با عنوان بیمه تک خطر و بیمه عمومی در نظر گرفته است. بیمه تک خطر صرفاً برای خطر سرما و یخبندان می‌باشد. بیمه عمومی مربوط به عوامل مختلفی مانند باران‌های بی‌موقع و مداوم در زمان گل‌دهی گردو، بارش سنگین برف، تگرگ، زلزله، سیل، طوفان، گرما و باد گرم در زمان گل‌دهی می‌باشد. با توجه به گزارش‌های این صندوق، در بین سال‌های مورد مطالعه، سال‌های ۲۰۱۵ و ۲۰۱۸ به ترتیب بیشترین و کمترین آسیب سرما را در اغلب مناطق داشته‌اند که مورد تأیید بیمه کشاورزی نیز بوده است (شکل ۴).

منحنی‌های شاخص NDVI که به وسیله فیلتر SG هموار شده‌اند، را در سال‌های مختلف نشان می‌دهد (شکل ۵). در بازه زمانی نُه‌ساله مورد مطالعه، سال ۲۰۱۳ (منحنی سبز تیره) پیوستگی بهتری نسبت به سایر سال‌ها نشان می‌دهد و افت ناگهانی در سری زمانی آن وجود ندارد. از طرفی، با توجه به خسارت اعلام‌شده توسط صندوق بیمه کشاورزی، خسارتی در این سال به درختان گردو در روستاهای مختلف وارد نشده است، بنابراین به‌عنوان مرجع، جهت مقایسه با سال‌های دیگر و ارائه شاخص SFDI استفاده می‌شود.

این شاخص با استفاده از مقادیر شاخص پوشش گیاهی در سال مرجع و سایر سال‌ها طبق معادله ۳ محاسبه می‌شود. به عبارت دیگر، مساحت محصورشده دو منحنی بین نقاط تقاطع در ابتدا و انتها، نشان‌دهنده مقادیر شاخص SFDI است.

$$SFDI = \sum_{i=Sf_{begin}}^{i=Sf_{end}} (VI_{r_i} - VI_{SF_i}) \quad (3)$$

که در آن، VI_{r_i} : مقادیر شاخص پوشش گیاهی در سال مرجع، VI_{SF_i} : مقادیر شاخص پوشش گیاهی در سال متأثر از سرمازدگی بهاره، Sf_{begin} : تاریخ شروع سرمازدگی و Sf_{end} : تاریخ پایان سرمازدگی است (Wang et al., 2020).

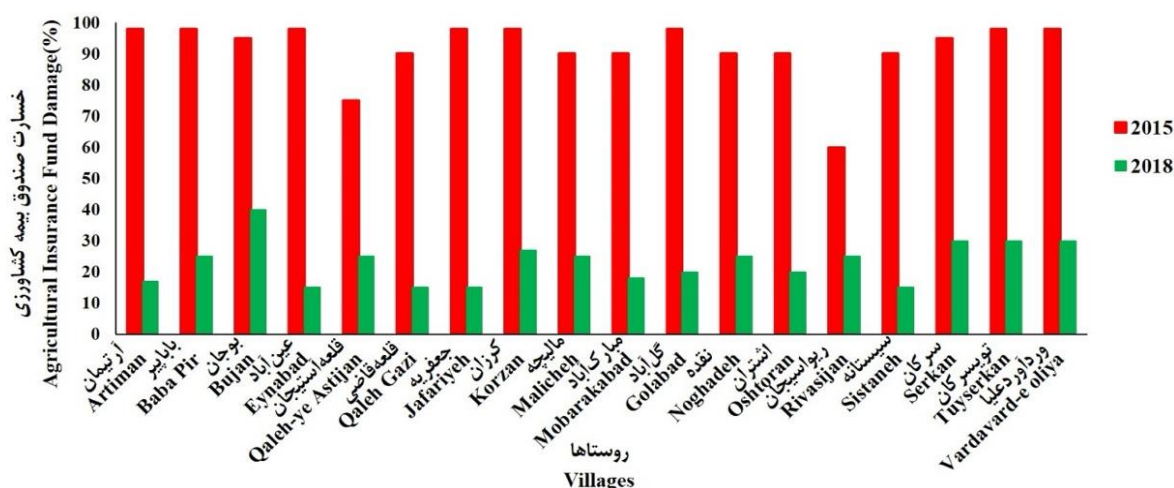
تجزیه و تحلیل رگرسیون تک متغیره

بررسی ارتباط آماری بین شاخص SFDI با خسارت‌های بیمه کشاورزی به روش رگرسیون خطی تک متغیره طبق معادله ۴ انجام شد. مشخصه‌های ارزیابی روش شامل کمیت‌های RMSE، P-value، r بود (Grömping., 2015).

$$y = x\beta + \varepsilon \quad (4)$$

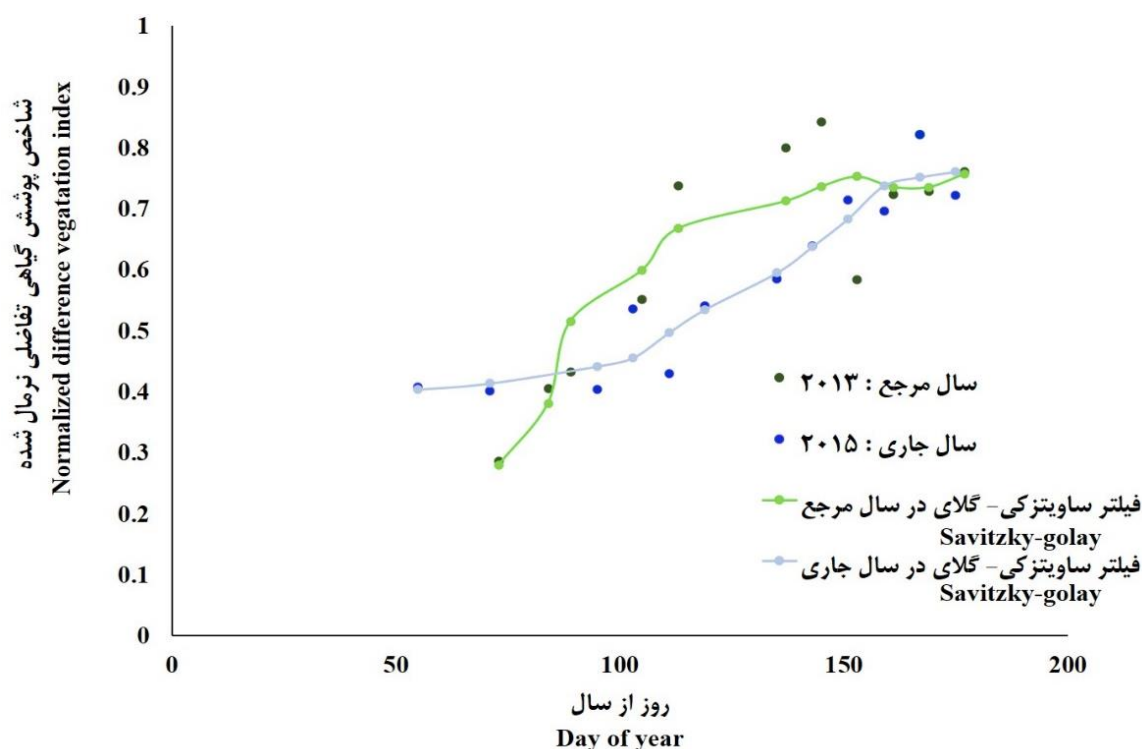
همچنین با توجه به طبیعت داده‌ها، لازم شد تا رابطه غیرخطی (درجه ۲) بین شاخص SFDI و خسارت‌های گزارش‌شده از طریق معادله ۵ مورد ارزیابی قرار گیرد. جهت اجتناب از برآورد غیرواقعی خسارت، در هر دو معادله فوق، مقدار عرض از مبدأ برابر صفر منظور شد.

$$y = \beta_0 x + \beta_1 x^2 + \varepsilon \quad (5)$$



شکل ۴- درصد خسارت صندوق بیمه کشاورزی در باغ‌های تویسرکان در سال‌های ۲۰۱۵ (بیشترین سرمازدگی) و ۲۰۱۸ (کمترین سرمازدگی). سال‌های دیگر برای اجتناب از تداخل داده‌ها در این نمودار نمایش داده نشده‌اند

Figure 4- Percentage of Agricultural Insurance Fund losses in Tuyserkan orchards in 2015 (highest frost damage) and 2018 (lowest frost damage). Other years are not shown in this graph due to data interference avoidance



شکل ۵- روند شاخص پوشش گیاهی NDVI به همراه فیلتر هموارسازی SG در روزهای سال در یکی از باغ‌های روستای آرتیمان
Figure 5- NDVI vegetation index trend with SG smoothing filter by days of the year in one of the orchards of Artiman village

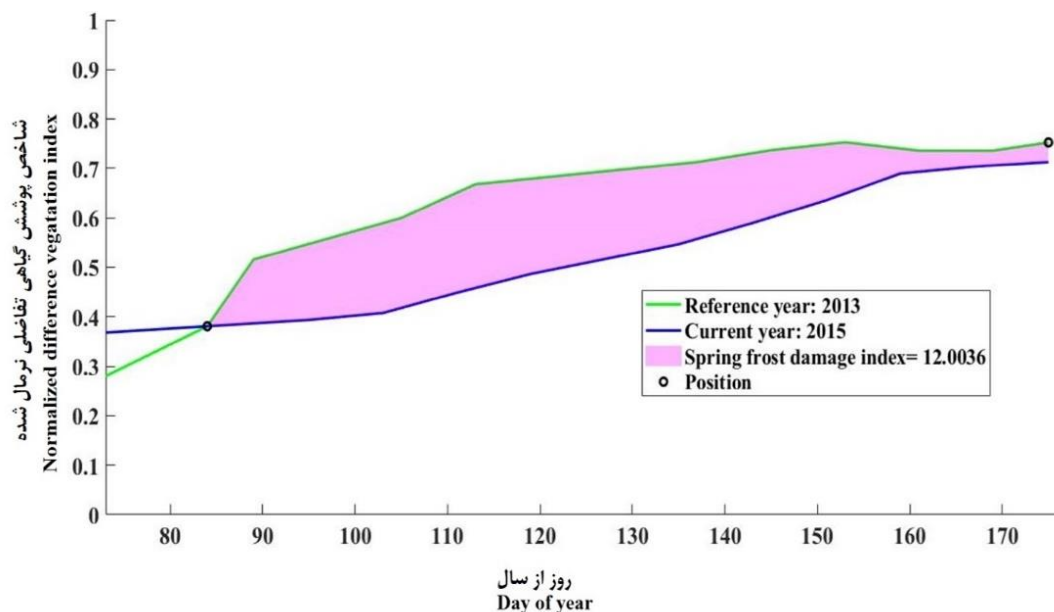
(نواحی صورتی‌رنگ) در هر نمودار، همان مقدار SFDI است که در اینجا بر مبنای شاخص پوشش گیاهی NDVI بیان شده است. به‌طور کلی، مقدار این شاخص از ابتدای نقطه تقاطع اول تا انتهای نقطه تقاطع آخر محاسبه می‌شود (شکل ۶).

ارتباط بین شاخص‌های SFDI و خسارت اعلام‌شده توسط صندوق بیمه کشاورزی از طریق مدل رگرسیون تک متغیره بررسی شده است، تا میزان ارتباط و همبستگی آن‌ها آشکار شده و عملکرد شاخص SFDI مورد ارزیابی قرار گیرد (شکل ۷). ضریب همبستگی بین مقادیر خسارت و مقادیر SFDI برای تمام باغ‌ها ۰/۸۲ است که با توجه به P-value کمتر از ۰/۰۵ ارتباط قوی و معنی‌دار است. در این حالت، ارتباط بین مقدار SFDI و میزان خسارت (معادله ۶) بدین صورت است.

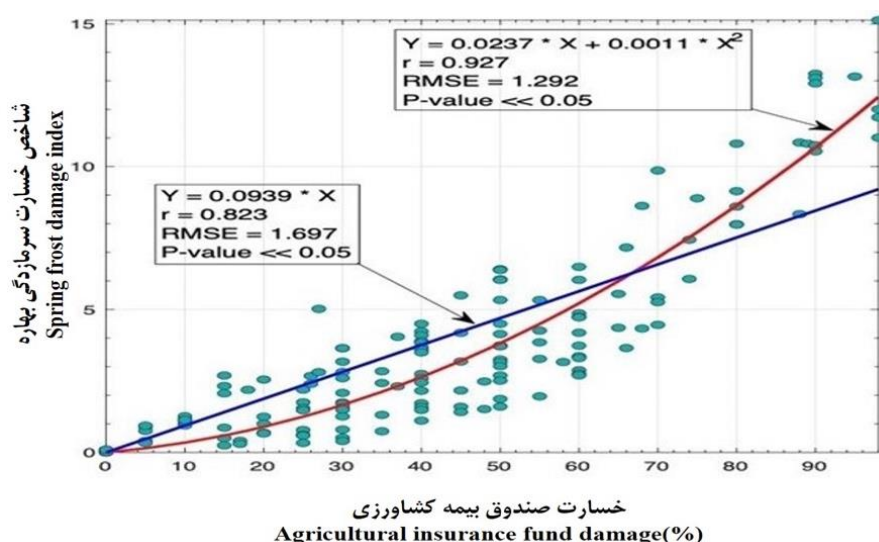
$$\text{SFDI} = 0.0939 \times D \quad (6)$$

در سال ۲۰۱۳، روز شروع فصل رویش SOS، به‌عنوان اولین نقطه تقاطع بین دو منحنی (روز ۸۴ سال میلادی، معادل: پنجم فروردین) به دست آمد. فرض بر این است که در سال‌های نرمال نیز همین منحنی تکرار شود، با این تفاوت که به‌علت تغییر احتمالی در روز شروع فصل، شاهد یک انتقال (شیفت) کلی باشیم؛ بنابراین در صورت منطبق کردن منحنی NDVI مربوط به دو سال مختلف، در نقطه شروع فصل رویش، اختلافات آن‌ها به خسارت‌های وارده به گیاه مرتبط خواهد بود. از آنجاکه در ماه‌های اولیه فصل رشد در باغ‌ها، سرمازدگی بهاره عمده‌ترین عامل خسارت است، بنابراین هرگونه افت در منحنی NDVI هر سال نسبت

به سال مرجع (۲۰۱۳)، به همین خسارت مرتبط خواهد بود. منحنی NDVI سایر سال‌ها با رنگ آبی تیره مشخص شده که متأثر از سرمازدگی بهاره هستند و به‌طور چشمگیری افت ناگهانی در نمودار آن‌ها قابل مشاهده است. مساحت محصورشده بین دو سال مختلف



شکل ۶- شاخص SFDI در سال ۲۰۱۵ در یکی از باغ‌های روستای آرتیمان
Figure 6- SFDI index in 2015 in one of the orchards of Artiman village

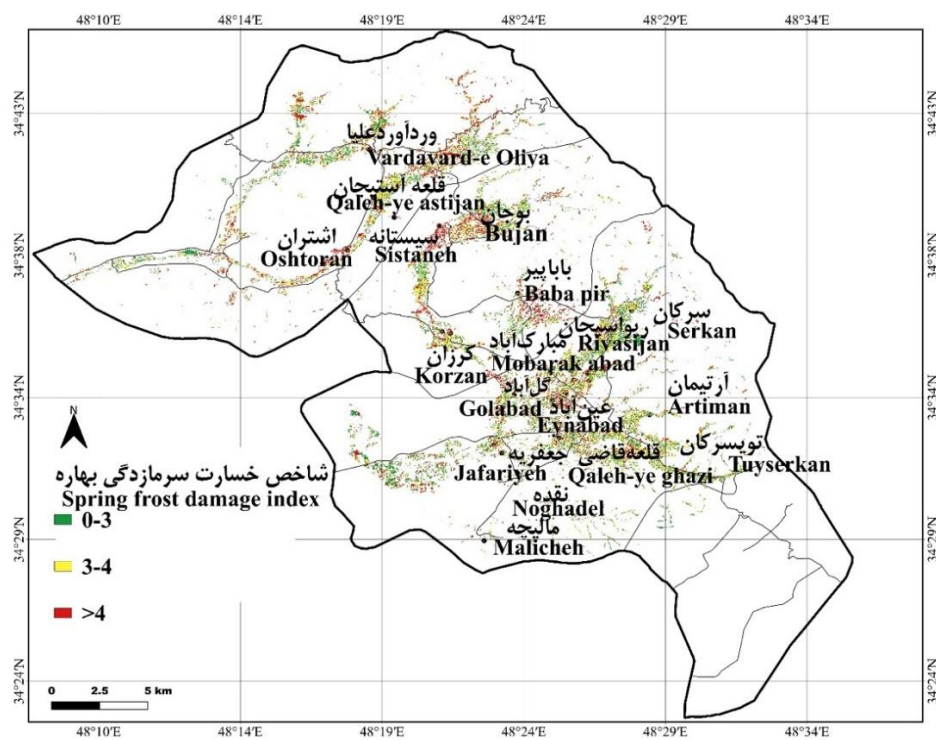


شکل ۷- ارتباط شاخص SFDI با خسارت سرمازدگی که توسط صندوق بیمه کشاورزی گزارش شده است
Figure 7- Relationship between SFDI index and frost damage reported by the Agricultural Insurance Fund

توزیع مکانی شاخص SFDI

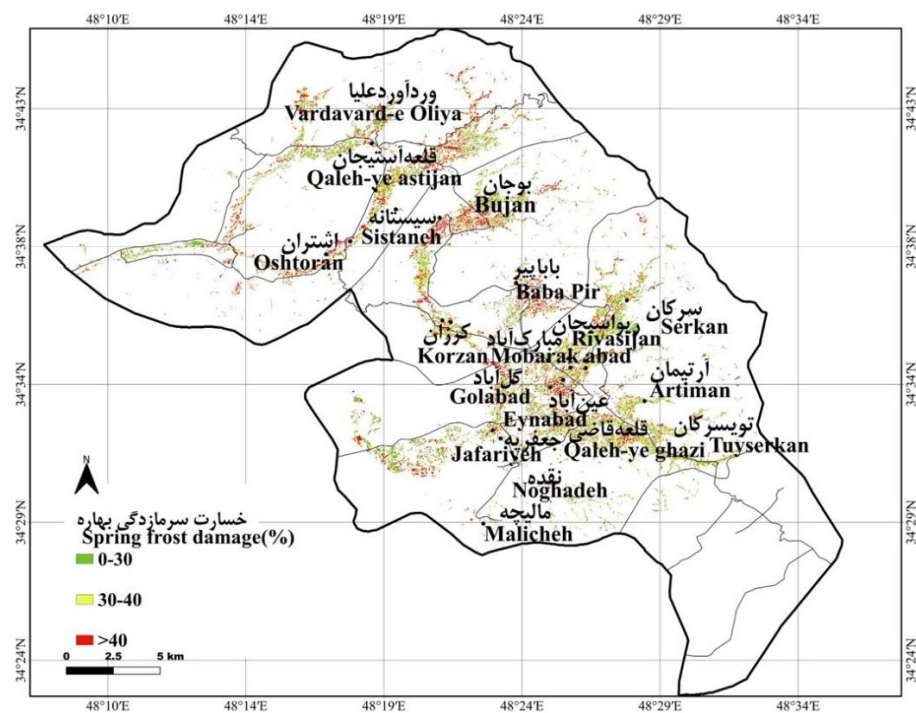
علاوه بر ارتباط مشاهده شده بین شاخص و میزان خسارت، نقشه توزیع مکانی شاخص SFDI در منطقه مورد مطالعه تهیه شده است (شکل ۸). بدین ترتیب می‌توان برای هر پیکسل، مقدار خسارت سرمازدگی را برآورد نمود. در بین سال‌های مورد مطالعه، در سال ۲۰۱۵ بیشترین آسیب سرما در نقاط مختلف مشاهده شده که مورد تأیید بیمه کشاورزی و نقشه توزیع مکانی خسارت نیز بوده است.

که در آن، D: میزان خسارت سرمازدگی (بین ۰ و ۱۰۰) می‌باشد. البته نتایج رگرسیون غیرخطی (منحنی قرمز رنگ در شکل ۷) ارتباط مستحکم‌تری را بین SFDI و میزان خسارت نشان می‌دهد ($r=0.93$)، اما چون دلیل قاطعی برای توجیه رفتار غیرخطی شاخص SFDI در دست نیست، فعلاً محاسبات بر مبنای رابطه خطی انجام شده است. تبعاً با انجام آزمون‌های بیشتر در مناطق مختلف، ممکن است که ارتباط غیرخطی شاخص پیشنهادی در آینده مورد تأیید قرار گیرد.



شکل ۸- نقشه توزیع مکانی شاخص SFDI در باغ‌های گردو در منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۱۵

Figure 8- Map of spatial distribution of SFDI index in walnut orchards of the study area in 2015. Black circular dots indicate نقاط دایره‌ای سیاه‌رنگ، نشان‌دهنده روستاهای اعلام‌شده توسط صندوق بیمه کشاورزی می‌باشد. villages declared by the Agricultural Insurance Fund



شکل ۹- نقشه توزیع مکانی خسارت سرمازدگی بهاره در باغ‌های گردو در منطقه مورد مطالعه در سال ۲۰۱۵

Figure 9- Spatial distribution map of spring frost damage in walnut orchards in the study area in 2015

با معکوس کردن معادله ۶، امکان محاسبه درصد خسارت سرمازدگی (D) به صورت زیر وجود دارد (معادله ۷).

$$D = 10.650 \times SFDI \quad (۷)$$

در نهایت، نقشه‌های خسارت سرمازدگی بهاره در هر سال با استفاده از معادله ۷ تولید می‌شود که نمونه‌ای از آن‌ها برای سال ۲۰۱۵ بر حسب درصد در شکل ۹ نمایش داده شده است.

بحث

در این تحقیق، به دلیل وسعت کم عوارض مورد مطالعه، از سنجنده‌های OLI، ETM+ و MSI با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شد. ترکیب این سنجنده‌ها موجب افزایش دوره بازدید به کمتر از یک هفته شد که برای ارزیابی خسارت سرمازدگی مناسب است. خسارت‌های سرمازدگی اعلام شده برای روستاهای مختلف شهرستان تویسرکان در بازه زمانی مورد مطالعه، متفاوت ثبت شده‌اند. شکل ۴، صرفاً درصد خسارت صندوق بیمه کشاورزی برای تمامی باغ‌ها را در سال ۲۰۱۵ و سال ۲۰۱۸ نشان می‌دهد. در میان سال‌های گزارش شده از طرف صندوق بیمه کشاورزی، سال ۲۰۱۳ به عنوان سال مرجع (بدون خسارت سرمازدگی) شناخته شد، زیرا هیچ گونه خسارتی در سال ۲۰۱۳ به منطقه مورد مطالعه وارد نشده بود. روند پیوسته شاخص NDVI در تمامی باغ‌ها نیز مؤید این مسئله است (شکل ۵). سال ۲۰۱۵ به عنوان بیشترین خسارت سرمازدگی از طرف صندوق بیمه کشاورزی توأم با افت ناگهانی در روند شاخص NDVI و سال ۲۰۱۸ به عنوان کمترین خسارت سرمازدگی از طرف صندوق بیمه کشاورزی و رشد پیوسته در روند شاخص معرفی شد.

ارتباط بین شاخص SFDI با میزان خسارت صندوق بیمه کشاورزی از طریق دو مدل رگرسیون خطی و چند جمله‌ای درجه دو بررسی شد. مقادیر ضریب همبستگی به دست آمده (۰/۹۲۷ و ۰/۸۲۳) در کنار مقادیر ناچیز P-value، نشان دهنده این است که شاخص SFDI جهت انعکاس تأثیر خسارت سرمازدگی بهاره مؤثر واقع شده است. همچنین نتایج توزیع مکانی شاخص SFDI، میزان اثربخشی مثبت این شاخص را تأیید می‌نماید، به طوری که با افزایش این شاخص در باغ‌ها، درصد خسارت سرمازدگی صندوق بیمه کشاورزی نیز افزایش یافته است (شکل ۷). نقشه توزیع مکانی شاخص SFDI در منطقه مورد مطالعه گویای آن است که می‌توان برای هر پیکسل، مقدار خسارت سرمازدگی را با دقت برآورد نمود (شکل ۸). نتایج نشان داد که این شاخص تأثیرات سرمازدگی بهاره را به صورت مؤثر و سریع ارزیابی نموده و با کاهش عملکرد محصول تناسب خوبی را نشان داده است. همچنین دارای پتانسیل بالایی برای تعمیم به سایر محصولات کشاورزی و خطرات طبیعی در سطح وسیع‌تری می‌باشد و می‌تواند

برای تخمین سرمازدگی در دیگر محصولات کشاورزی مانند گندم، برنج و ... به کار رود. در مجموع، روش پیشنهاد شده دارای ویژگی‌هایی از قبیل داده‌های در دسترس، سرعت بالای اجرا، تعیین خسارت سرمازدگی به تفکیک مکان و درصد خسارت می‌باشد. ذکر این نکته لازم است که داده‌های دمای ثبت شده تنها برای یک ایستگاه موجود است و ممکن است که تغییرات توپوگرافی، نوع پوشش گیاهی و اقدامات پیشگیرانه باغداران موجب ناهنجاری‌های دما در مکان‌های مختلف شود، که متأسفانه در داده‌های هواشناسی دیده نمی‌شوند. بنابراین ارزیابی دما با یک ایستگاه هواشناسی، شاخص مناسبی در مقیاس باغ‌های واقع در مناطق ناهموار نبوده و یکی از محدودیت‌های این تحقیق به شمار می‌رود. از منظر دیگر، خسارتی که در بهار رخ می‌دهد، قطعاً به یک پارامتر معطوف نشده و ممکن است که اثرات حوادثی چون تگرگ، بارش برف، رگبارهای شدید در زمان گل‌دهی و وزش طوفان نیز در این جریان مداخله داشته باشند. هرچند که در منطقه مورد مطالعه، داده‌ای از این دست وجود نداشت و خسارتی نیز ثبت نشده بود که بتوان از آن‌ها استفاده کرد.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، یک شاخص مبتنی بر سنجش‌ازدور پیشنهاد شد که می‌تواند تأثیرات سرمازدگی بهاره را در مقیاس پیکسل ارزیابی کند. در مقایسه با روش‌های رایج، پیاده‌سازی این روش راحت‌تر و مقرون به صرفه است. باید توجه داشت که خسارت سرمازدگی تحت تأثیر عوامل زیادی از قبیل نوع مقاوم گردو و پیوند آن، شرایط آب‌وهوایی در مناطق مختلف روستاها و مدیریت باغ شامل نحوه آبیاری، کوددهی و سم‌پاشی در زمان مناسب و بررسی وضعیت خاک از نظر حاصلخیزی، ارتفاع و انبوه بودن درختان و غیره است که فارغ از اهمیت آن‌ها، پرداختن به هر یک از آن‌ها نیازمند داده‌های مناسب و کافی است. از آنجاکه هدف اصلی این تحقیق، برآورد ماهواره‌ای میزان خسارت ناشی از سرمازدگی بهاره بوده است و نه پرداختن به عوامل متعدد آن، بررسی‌های بیشتر در مطالعات آتی پیشنهاد می‌گردد. نقشه‌های تولید شده خسارت سرمازدگی کمک شایانی به متولیان امور در انجام اقدامات مدیریتی می‌نماید. از جمله مزایای بهره‌مندی از این نقشه‌ها مواردی همچون پوشش گسترده، سرعت بالا، صرفه‌جویی در هزینه و بررسی‌های بلندمدت هستند. در نهایت، کارشناسان می‌توانند خسارت‌های گزارش شده را با این نقشه‌ها مقایسه کرده و صحت خسارت‌های ثبت شده را کنترل نمایند. سرعت و قابلیت اطمینان بیشتر در روش ارائه شده، جایگزین کردن نتایج آن را با روش‌های رایج ممکن ساخته و می‌تواند به عنوان ابزاری کارآمد از تصمیمات مدیران

در سیاست‌گذاری‌های کلان بیمه‌های کشاورزی پشتیبانی کند. به‌منظور بهبود پژوهش حاضر و استفاده از آن در تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود که میزان سرمازدگی براساس شاخص پیشنهادی با دخالت پارامترهای فیزیوگرافی و اقلیمی نیز بررسی گردد، به‌طوری‌که توپوگرافی و دما در هر روستا نیز در نظر گرفته شود. همچنین در صورت وجود داده‌های مرتبط، پدیده‌های دیگر هواشناسی از قبیل تگرگ، طوفان، باد، باران‌های بی‌موقع و مداوم در زمان گل‌دهی گردو و بارش برف نیز مورد توجه قرار گیرد.

References

- Allevato, E., Saulino, L., Cesarano, G., Chirico, G.B., D'Urso, G., Bolognesi, S.F., Rita, A., Rossi, S., Saracino, A., & Bonanomi, G. (2019). Canopy damage by spring frost in European beech along the Apennines: effect of latitude, altitude and aspect. *Remote Sensing of Environment*, 225, 431-440. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.03.023>
- Arghan, A., Khajehhoseini, N., Meshkinfar, A., & Moafi, N. (2016). Evaluation of the rural economic potential in city development (case study: Tuyserkan). *Turkish Online Journal of Design Art and Communication*, 6, 1102-1108.
- Aslamarz, A.A., Vahdati, K., Rahemi, M., Hassani, D., & Leslie, C. (2010). Supercooling and cold-hardiness of acclimated and deacclimated buds and stems of Persian walnut cultivars and selections. *HortScience*, 45(11), 1662-1667. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.45.11.1662>
- Azari Arani, E. (2012). *Assessment of the damage caused to the rice crop due to frost using remote sensing and GIS (Mazandaran province)*. M.Sc. Thesis, Khajeh Nasiruddin Tousi University, Tehran University, Tehran, Iran. p. 1-123. (in Persian).
- Cao, R., Chen, J., Shen, M., & Tang, Y. (2015). An improved logistic method for detecting spring vegetation phenology in grasslands from MODIS EVI time-series data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200, 9-20. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.09.009>
- Chen, X., Vierling, L., Rowell, E., & DeFelice, T. (2004). Using lidar and effective LAI data to evaluate IKONOS and Landsat 7 ETM+ vegetation cover estimates in a ponderosa pine forest. *Remote Sensing of Environment*, 91(1), 14-26. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.003>
- Cilia, C., Panigada, C., Rossini, M., Meroni, M., Busetto, L., Amaducci, S., Boschetti, M., Picchi, V., & Colombo, R. (2014). Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, 6(7), 6549-6565. <https://doi.org/10.3390/rs6076549>
- Cogato, A., Meggio, F., Collins, C., & Marinello, F. (2020). Medium-resolution multispectral data from Sentinel-2 to assess the damage and the recovery time of late frost on vineyards. *Remote Sensing*, 1896(11), 12. <https://doi.org/10.3390/rs12111896>
- Diao, C. (2020). Remote sensing phenological monitoring framework to characterize corn and soybean physiological growing stages. *Remote Sensing of Environment*, 248, 111960. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111960>
- Díaz, M. L., Soresi, D. S., Basualdo, J., Cuppari, S. J., & Carrera, A. (2019). Transcriptomic response of durum wheat to cold stress at reproductive stage. *Molecular biology reports*, 46(2), 2427-2445. <https://doi.org/10.1007/s11033-019-04704-y>
- Duddu, H.S., Pajic, V., Noble, S.D., Tanino, K.K., & Shirtliffe, S.J. (2018). Image-based rapid estimation of frost damage in canola (*Brassica napus* L.). *Canadian Journal of Remote Sensing*, 44(2), 169-175. <https://doi.org/10.1080/07038992.2018.1462660>
- Fallah, M., Rasouli, M., Hassani, D., Lawson, S.S., Sarikhani, S., & Vahdati, K. (2022). Tracing superior late-leaving genotypes of persian walnut for managing late-spring frost in walnut orchards. *Horticulturae*, 8(11), 1003. <https://doi.org/10.3390/horticulturae8111003>
- Gamon, J.A., Kovalchuck, O., Wong, C.Y.S., Harris, A., & Garrity, S.R. (2015). Monitoring seasonal and diurnal changes in photosynthetic pigments with automated PRI and NDVI sensors. *Biogeosciences*, 12(13), 4149-4159. <https://doi.org/10.5194/bg-12-4149-2015>
- Grömping, U. (2015). Variable importance in regression models. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics*, 7(2), 137-152. <https://doi.org/10.1002/wics.1346>
- Hassani, D., Sarikhani, S., Dastjerdi, R., Mahmoudi, R., Soleimani, A., & Vahdati, K. (2020). Situation and recent trends on cultivation and breeding of Persian walnut in Iran. *Scientia Horticulturae*, 270, 109369. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2020.109369>
- Ji, L., Zhang, L., Rover, J., Wylie, B.K., & Chen, X. (2014). Geostatistical estimation of signal-to-noise ratios for spectral vegetation indices. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96, 20-27. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.06.013>

17. Khadivi, A., Montazeran, A., & Yadegari, P. (2019). Superior spring frost resistant walnut (*Juglans regia* L.) genotypes identified among mature seedling origin trees. *Scientia Horticulturae*, 253, 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.04.041>
18. Khazaei, S., Jenabi, E., Zobdeh, Z., Biglari, M., Afshari, M., Gholamalilee, B., & Bashirian, S. (2019). Pattern of trauma related to falling from walnut tree as an occupational injury: A cross-sectional study in the west of Iran. *Archives of Trauma Research*, 8(2), 99-103.
19. Khoramshahi, L. (2012). *Tiofer's effect on developing spring cold resistance in walnut trees*. M.Sc. Thesis, Faculty of Agriculture, Boali Sina University, Hamedan, Iran. p. 1-98. (in Persian).
20. Li, W., Huang, J., Yang, L., Chen, Y., Fang, Y., Jin, H., Sun, H., & Huang, R. (2021). A practical remote sensing monitoring framework for late frost damage in wine grapes using multi-source satellite data. *Remote Sensing*, 13(16), 3231. <https://doi.org/10.3390/rs13163231>
21. Maji, S., Chakraborty, P., Bhowmick, M., Dutta, S.K., Nath, R., & Chakraborty, P.K. (2015). Diurnal variation in spectral properties of potato under different dates of planting and N-doses. *Environment & Ecology*, 33(1), 478-483.
22. Murphy, M.E., Boruff, B., Callow, J.N., & Flower, K.C. (2020). Detecting frost stress in wheat: A controlled environment hyperspectral study on wheat plant components and implications for multispectral field sensing. *Remote Sensing*, 12(3), 477. <https://doi.org/10.3390/rs12030477>
23. NejadSadeghi, L., Maali-Amiri, R., Zeinali, H., Ramezanpour, S., & Sadeghzade, B. (2014). Comparative analysis of physio-biochemical responses to cold stress in tetraploid and hexaploid wheat. *Cell Biochemistry and Biophysics*, 70(1), 399-408. <https://doi.org/article/10.1007/s12013-014-9925-4>
24. Rasolzadegan, Y. (1996). *Fruit Growing in Temperate Regions*. Publications of Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran. p. 965-978. (in Persian).
25. Sadogh, S. (2014). Geomorphological limitations and physical growth of Tuysarkan city using geographic information systems (GIS) and digital elevation model (DEM). p. 121-142. (in Persian).
26. Savitzky, A., & Golay, M.J. (1964). Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*, 36(8), 1627-1639. <https://doi.org/10.1021/ac60214a047>
27. She, B., Huang, J.F., Guo, R.F., Wang, H.B., & Wang, J. (2015). Assessing winter oilseed rape freeze injury based on Chinese HJ remote sensing data. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE B*, 16(2), 131. <https://doi.org/10.1631/jzus.B1400150>
28. Skendžić, S., Zovko, M., Lešić, V., Pajač Živković, I., & Lemić, D. (2023). Detection and evaluation of environmental stress in winter wheat using remote and proximal sensing methods and vegetation indices—A review. *Diversity*, 15(4), 481. <https://doi.org/10.3390/d15040481>
29. Ulsig, L., Nichol, C.J., Huemmrich, K.F., Landis, D.R., Middleton, E.M., Lyapustin, A.I., Mammarella, I., Levula, J., & Porcar-Castell, A. (2017). Detecting inter-annual variations in the phenology of evergreen conifers using long-term MODIS vegetation index time series. *Remote Sensing*, 9(1), 49. <https://doi.org/10.3390/rs9010049>
30. Vahdati, K., Massah Bavani, A.R., Khosh-Khui, M., Fakour, P., & Sarikhani, S. (2019). Applying the AOGCM-AR5 models to the assessments of land suitability for walnut cultivation in response to climate change: A case study of Iran. *PLoS One*, 14(6), e0218725. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218725>
31. Wang, S., Chen, J., Rao, Y., Liu, L., Wang, W., & Dong, Q. (2020). Response of winter wheat to spring frost from a remote sensing perspective: Damage estimation and influential factors. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 168, 221-235. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.08.014>
32. Wang, H.F., Huo, Z.G., Zhou, G.S., Liao, Q.H., Feng, H.K., & Wu, L. (2016). Estimating leaf SPAD values of freeze-damaged winter wheat using continuous wavelet analysis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 98, 39-45. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2015.10.032>
33. Wang, P., Tang, J., Ma, Y., Wu, D., Yang, J., Jin, Z., & Huo, Z. (2021). Mapping threats of spring frost damage to tea plants using satellite-based minimum temperature estimation in China. *Remote Sensing*, 2713(14), 13. <https://doi.org/10.3390/rs13142713>
34. Zhu, X., & Liu, D. (2015). Improving forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 102, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.08.014>
35. Zhu, Y., Yang, G., Yang, H., Zhao, F., Han, S., Chen, R., Zhang, C., Yang, X., Liu, M., Cheng, J., & Zhao, C. (2021). Estimation of apple flowering frost loss for fruit yield based on gridded meteorological and remote sensing data in Luochuan, Shaanxi province, China. *Remote Sensing*, 13(9), 1630. <https://doi.org/10.3390/rs13091630>