



Modeling the Above-Ground Biomass Estimation in Zagros Oak Coppice Forests Using Radar Data of Sentinel-1 Satellite

Saeed Saroei.^{1*}, Ali Asghar Darvishsefat.², Manochehr Namiranian.²

1. Ph.D. Student, Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran
2. Prof. of Faculty of Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

Abstract

Estimating the biomass values in forests stands through remote sensing is important. It has been reported that the major reasons of uncertainty are the lack of concurrency in satellite data and field information as well as the use of global allometric equations for estimating the weight of biomass of forest trees inside the country. Minimizing the above problems and the investigation of data performance in developing appropriate model for estimating the forest biomass in the Bankoll region of Karazan District of Sirvan County in Ilam province using Sentinel-1 satellite data in 27th of June, 2017 was the main goal of this study. Average size of the trees crown in 53 rectangular plots related to the coppice growth form with dimensions of 30×30 m which during 23 may 2017 to 10 June 2017 through applying DGPS by RTK method have been implemented on the ground were entered in the process of estimation the value of biomass. The average harvested field biomass was 10.63 Mg ha⁻¹. After extraction of radar features, those features which had the greatest correlation with the values of biomass were selected using genetic algorithm by two models including K-Nearest Neighbor (K-NN) regression and Support-Vector Regression (SVR), then the most appropriate combination was identified and the biomass values were modelled. Models were validated using 26 test plots. Correlation of features obtained from radar data and the value of biomass indicated that features of VH ,Mean VV ,Mean VV GLCM (Correlation) and Mean VH GLCM (Dissimilarity) had the greatest sensitivity towards the value of biomass. Using regression models indicated that SVR model (Relative RMSE of 0.08) was more precise compared with K-NN regression (relative RMSE of 0.10). The best combination in the use of K-NN regression model with a relative RMSE of almost 0.99 Mg ha⁻¹ (equal to 10%) and the coefficient of determination (R²) of 0.22 and the best combination when using SVR model was a relative RMSE of 0.87 Mg ha⁻¹ (equal to 8%) and the R² of 0.14. The results indicated that the final models, obtained from the optimal features extracted from radar data in the wavelength of C band and used parametric and non-parametric regression methods in this research, were not able to improve the saturated effect in data for estimation of biomass in the studied forests and it was not resulted in presenting an estimating model with an acceptable accuracy.

Keywords: Forest biomass, Sentinel-1 radar data, Genetic Algorithm (GA), K-Nearest Neighbor (K-NN), Support Vector Machine (SVM).

* Correspondence Address: 13th floor, Export promotion Bureau ,Ministry of Agriculture- Jahad, No. 369, Taleghani St., TERAN, IRAN, Postal code: 15934-16111, Tell: 09125136514.

Email: s.saroei@ut.ac.ir

https://doi.org/10.52547/gisj.12.4.35



سینجش از دور

GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران سال دوازدهم، شماره چهارم، زمستان ۱۳۹۹
Vol.12, No. 4, Winter 2021 Iranian Remote Sensing & GIS

۵۲-۲۵
مقاله پژوهشی

مدل سازی برآورد زیست توده چوبی روی زمینی جنگل های شاخه زاد بلوط زاگرس با استفاده از داده های راداری ماهواره سنتینل-۱

سعید ساروئی^{۱*}، علی اصغر درویش صفت^۲، منوچهر نمیرانیان^۲
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

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۸

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۹/۲۰

چکیده

برآورد میزان زیست توده در توده های جنگلی با روش های سنجش از دوری اهمیت بسیاری دارد. هم زمان نبودن دریافت داده های ماهواره ای و اطلاعات میدانی و کاربرد معادلات آلومتریک جهانی، برای محاسبه وزن زیست توده درختان جنگلی داخل کشور، از مهم ترین دلایل عدم قطعیت در نتایج و تحلیل های حاصل از مطالعات مشابه قبلی به شمار می روند. به حداقل رساندن این مشکلات و بررسی قابلیت و عملکرد داده ها در توسعه مدل مناسب برآورد زیست توده جنگل، در منطقه بانکول بخش کارزان شهرستان سیروان، استان ایلام، با استفاده از داده های راداری ماهواره سنتینل-۱، اخذ شده در تاریخ ۶ تیرماه ۱۳۹۶، هدف این تحقیق بود. اندازه قطر میانگین تاج پوشش درختان در ۵۳ قطعه نمونه زمینی مربعی، مربوط به فرم رویشی شاخه زاد، به ابعاد ۳۰×۳۰ متر که در بازه زمانی ۲ تا ۲۰ خرداد ۱۳۹۶، به کمک دستگاه موقعیت یاب جهانی تفاضلی و به روش تعیین موقعیت کینماتیک آبی روی زمین اجرا و برداشت شدند، وارد روند برآورد زیست توده شد. میانگین زیست توده برداشت شده میدانی ۱۰۶۳ تن در هکتار بود. پس از استخراج ویژگی های راداری، آن دسته از ویژگی ها که بیشترین میزان همبستگی را با مقادیر زیست توده داشتند انتخاب و از بین آنها، با به کارگیری الگوریتم ژنتیک و با استفاده از دو مدل رگرسیون K نزدیک ترین همسایه و رگرسیون بردار پشتیبان، مناسب ترین ترکیب ویژگی ها شناسایی و سپس، مقادیر زیست توده مدل سازی شد. اعتبارسنجی مدل ها با استفاده از ۲۶ قطعه نمونه تست، انجام گرفت. همبستگی بین ویژگی های حاصل از داده های راداری و مقادیر زیست توده نشان داد که ویژگی های Mean VV، VH، Mean VV و Mean VH GLCM (Dissimilarity) و Mean VV GLCM (Correlation)، بیشترین حساسیت را به مقادیر زیست توده داشتند. استفاده از مدل های رگرسیون نشان داد که روش رگرسیون بردار پشتیبان، با RMSE نسبی ۰،۰۰۸، از روش رگرسیون K نزدیک ترین همسایه، با RMSE نسبی ۰،۱۰، دقیق تر عمل کرده است. از بین ترکیب های ویژگی مورد بررسی نیز، بهترین ترکیب در حالت استفاده از رگرسیون K نزدیک ترین همسایه، دارای RMSE به میزان تقریبی ۰،۹۹ تن در هکتار (معادل ۱۰٪) و ضریب تعیین ۰،۲۳ و در حالت استفاده از رگرسیون بردار پشتیبان، دارای RMSE به میزان ۰،۸۷ تن در هکتار (معادل ۸٪) و ضریب تعیین ۰،۱۴ بود. مدل های نهایی حاصل از ترکیب ویژگی های بهینه استخراج شده از داده راداری در طول موج باند C و روش های رگرسیونی پارامتری و غیر پارامتری مورد بررسی در این تحقیق به تنهایی قادر به بهبود اثر اشباع شدگی در داده، برای برآورد زیست توده در جنگل های مورد مطالعه، نبودند و منجر به پیشنهاد مدل برآورد کننده ای با صحت قابل قبول نشد.

کلیدواژه ها: زیست توده جنگل شاخه زاد بلوط زاگرس، داده راداری سنتینل-۱، الگوریتم ژنتیک، K نزدیک ترین همسایه، رگرسیون بردار پشتیبان.

* نویسنده مکاتبه کننده: تهران، خیابان آیتاله طالقانی، وزارت جهاد کشاورزی، پلاک ۲۶۹، طبقه سیزدهم، دفتر توسعه صادرات- کدپستی: ۱۶۱۱۱-۱۵۹۲۴

تلفن: ۰۹۱۲۵۱۳۶۵۱۴

۱- مقدمه

اندازه‌گیری می‌شوند، مانند قطر برابر سینه، ارتفاع درخت یا ابعاد تاج پوشش، مورد توجه بسیاری از محققان و کارشناسان است (Burrows et al., 2000,) (Sohrabi & Shirvani, 2012). ایرانمنش^۱ و همکاران، در سال ۱۳۹۳، مقدار زیست‌توده و ذخیره کربن روی زمینی را در دو فرم رویشی دانه‌زاد و شاخه‌زاد بلوط ایرانی^۲، به صورت نمونه‌های و با قطع درختان نشانه‌گذاری شده و عملیات خشک کردن و تعیین چگالی، اندازه‌گیری کردند. نتایج این پژوهش، ضمن اینکه میانگین زیست‌توده و ذخیره کربن این دو فرم رویشی در منطقه را به تفکیک قسمت‌های متفاوت درخت و نیز در طبقه‌های قطری و تاجی گوناگون ارائه می‌دهد، در واقع، نوعی جدول برآورد زیست‌توده و کربن به حساب می‌آید (Iranmanesh et al., 2014).

این چنین روش‌های قدیمی‌ای معمولاً پرهزینه و پرهزینه بوده و در سطوح وسیع، به سختی اجرا می‌شوند و نمی‌توان آنها را در فواصل زمانی کوتاه، تکرار کرد. به علاوه، در مناطق کوهستانی، اجرای این روش‌ها ناممکن یا بسیار دشوار خواهد بود. بنابراین، استفاده از تکنولوژی سنجش از دور، به منزله یکی از روش‌های غیرمخرب، برای برآورد زیست‌توده روی زمینی به کار می‌رود (Amini & Sadeghi, 2013; Yadav & Nandy, 2015).

مطالعاتی در این مورد با استفاده از داده‌های نوری، راداری و ترکیبی از آنها و با بهره‌گیری از داده‌های میدانی در داخل و به‌ویژه، خارج از کشور انجام شده است که نتایج بخشی از آنها رضایت‌بخش بوده و نتایج بخشی نیز نشان می‌دهد که استفاده از داده‌های سنجش از دور، برای برآورد زیست‌توده روی زمینی، هنوز با مشکلاتی همراه است (Nichol & Sarker, 2010; Ronoud & Darvishsefat, 2016). رضانی و صاحبی^۳ (۲۰۱۵)، با استفاده هم‌زمان از تصاویر نوری

ناحیه رویشی زاگرس، با زیر پوشش قراردادن یازده استان کشور، حدود یک سوم جمعیت و بیش از نیمی از دام‌های کشور را در خود جای داده و ۳۰٪ از کل نزولات، ۴۰٪ از آب‌های جاری، ۳۳٪ از آب‌های سطحی و ۴۰٪ مساحت جنگل‌های کشور (معادل پنج میلیون هکتار) را به خود اختصاص داده است. همچنین، به دلایل متعدد اجتماعی - اقتصادی، سیاسی و بوم‌شناختی، از عرصه‌های کلیدی کشور به شمار می‌آید (Attarod et al., 2016). متأسفانه عوامل تخریبی گوناگونی، از جمله دامداری سنتی، قطع درختان و باز شدن تاج، کشاورزی، آتش‌سوزی و نیز برخی مدیریت‌های نامناسب اعمال شده ویژگی‌های خاک و پوشش گیاهی را دچار تغییر کرده است (Heydari et al., 2015). جنگل، علاوه بر اینکه منبع اصلی ذخیره کربن زمین است، منبع اقتصادی مهم و تأمین‌کننده مواد و انرژی مورد نیاز بشر محسوب می‌شود و توزیع مکانی آن در بیشتر کارکردهای اکوسیستمی، از جمله حفاظت از تنوع زیستی، تأثیر می‌گذارد. تخریب جنگل‌ها موجب جریان زیاد دی‌اکسید کربن (جذب و انتشار) می‌شود و اثر پررنگی در چرخه جهانی کربن و سیستم آب‌وهوایی دارد (Baghdadi et al., 2014). این نقش اکوسیستم‌های جنگلی در مقدار جهانی کربن، که بیشتر تحت تأثیر تغییرات جهانی قرار گرفته است، نیاز به تجزیه و تحلیل عمیق دینامیک ذخیره کربن را در کنار سایر عوامل اقلیمی، تشدید می‌کند (Galidaki et al., 2017). برآورد زیست‌توده روی زمینی، که عبارت است از وزن ماده خشک اجزای زنده اکوسیستم و با واحد تن در هکتار بیان می‌شود، از طریق اندازه‌گیری‌های زمینی، مستلزم نمونه‌برداری مخرب یا اندازه‌گیری مستقیم است. در این روش‌ها، به قطع درختان و سپس خشک کردن آنها و اندازه‌گیری زیست‌توده نیاز است. به دلیل آنکه اندازه‌گیری مستقیم زیست‌توده کل درخت و اجزای آن مخرب، وقت‌گیر و پرهزینه است، استقرار معادلات آلومتریک بر اساس متغیرهایی که به آسانی

1. Iranmanesh
2. Quercus brantii
3. Ramezani & Sahebi

مطالعات مشابه قبلی، بهبود ببخشد. عطارچی و گلوآگن^۱ (۲۰۱۴)، برای مدل‌سازی زیست‌توده روی‌زمینی جنگل‌های لوه گرگان، با استفاده از داده‌های نوری سنجنده ETM+ و راداری سنجنده PALSAR ماهواره ALOS، روش‌های رگرسیونی خطی چندمتغیره را اعمال کردند. طبق نتایج این پژوهش، با افزودن داده راداری در مدل‌سازی، ضریب تعیین به‌اندازه ۰.۱۵ و مجذور میانگین مربع خطا به‌میزان ۶.۴۶ تن‌درهکتار بهبود یافت. در تحقیقی دیگر، دنگ^۱ و همکاران (۲۰۱۴)، با استفاده از داده‌های نوری سنجنده WorldView-2 و راداری سنجنده PALSAR، زیست‌توده روی‌زمینی بخشی از جنگل‌های چین را مدل‌سازی کردند. در این تحقیق نیز، نتایجی مشابه با تحقیق اخیر کسب شد. بهرا^۱ و همکاران (۲۰۱۶)، برای برآورد میزان کربن و زیست‌توده روی‌زمینی در جنگل‌های شاخه‌زاد *Tectona grandis* و *Shorea robusta*، از داده‌های باند L سنجنده PALSAR ماهواره ALOS تفکیک مکانی ۲۵ متر و مدل WCM^{۱۱} استفاده کردند. میانگین میزان زیست‌توده مرجع زمینی در این جنگل‌ها، به‌ترتیب، ۴۴۴ و ۴۵۱ تن‌درهکتار بود. بهترین نتیجه برآورد زیست‌توده با ویژگی HV برای هر دو جنگل، به‌ترتیب، با بیش‌برآوردی معادل ۱۳۹ تن‌درهکتار (معادل ۳۰.۸۲٪) و ضریب تعیین ۰.۷۱ و ۱۴۸ تن‌درهکتار (معادل ۳۳.۳۳٪) و ضریب تعیین ۰.۴۷ حاصل شد. نتایج این تحقیق پتانسیل قابل‌قبول استفاده از داده‌های یک‌زمانه^{۱۲} راداری پلاریزه‌شده

سنجنده AVNIR-2 (تفکیک مکانی ۱۰ متر) و تصویر راداری باند L سنجنده PALSAR ماهواره ALOS، برای برآورد زیست‌توده روی‌زمینی منطقه شمالی جنگل خیرودکنار، باندهای بهینه را با استفاده از الگوریتم ژنتیک^۱ انتخاب کردند و بهترین نتیجه را از مدل شبکه عصبی مصنوعی^۲ به‌دست آوردند. ارزیابی نتایج حاصل از اعمال شبکه عصبی و تحلیل رگرسیون بیانگر دقت بالای ۷۰٪، با استفاده از شبکه عصبی، و حدود ۱۵٪، با تحلیل رگرسیون، بود. امینی و صادقی^۳ (۲۰۱۳)، به‌منظور مدل‌سازی زیست‌توده جنگل، در جنگل‌های طبیعی حوزه شفاورد و دست‌کاشت حوزه چوکای گیلان، تصاویر نوری (پانکروماتیک سنجنده PRISM و چندطیفی سنجنده AVNIR-2) و راداری PALSAR ماهواره ALOS را به‌کار بردند. در این تحقیق، قطر و ارتفاع درختان در ۲۸ قطعه نمونه زمینی به‌روش نمونه‌ای برداشت و برای تولید معادله محلی اقدام شد و تحلیل رگرسیون چندمتغیره، با ضریب تعیین ۰.۷۳، و مجذور میانگین مربع خطا^۴ ۱۳.۸۸ تن‌درهکتار به‌منزله بهترین مدل برآورد معرفی شد. تحقیق امینی و سومانتیو^۵ (۲۰۰۹) به‌منظور برآورد زیست‌توده جنگل، با استفاده از چهار باند تصویر نوری سنجنده AVNIR-2 ماهواره ALOS و چهار ویژگی بافت بهینه تصویر SAR ماهواره JERS شامل کنتراست، انحراف معیار، همبستگی و حداکثر احتمال و مدل شبکه عصبی شبیه‌ساز چندلایه انجام شد. نتایج این پژوهش نشان داد به‌کاربردن هم‌زمان تصاویر نوری و راداری دقت برآورد را افزایش می‌دهد. مقدار مجذور میانگین مربع خطا، در بهترین نتیجه این تحقیق، ۲.۱۷۵ (تن) به‌دست آمد که به‌طور معنی‌داری کمتر از نتیجه روش‌های قبل‌تر از آن بود. قاسمی^۶ و همکاران (۲۰۱۲)، با تجزیه و تحلیل داده‌های راداری PALSAR و روش رگرسیون خطی چندمتغیره در جنگل خیرودکنار، نشان دادند که مدل‌سازی مبتنی بر موجک^۷ توانسته است نتایج برآورد زیست‌توده روی‌زمینی را به‌میزان ۷۵٪ و حتی بیشتر، در مقایسه با نتایج

1. Genetic Algorithm (GA)
2. Artificial Neural Network
3. Amini & Sadeghi
4. Root Mean Square Error
5. Sumantyo
6. Ghasemi
7. Wavelet
8. Attarchi & Gloaguen
9. Deng
10. Behera
11. Water Cloud Model
12. One time data

پروژه بود که در آوریل ۲۰۱۴ در مدار قرار گرفت. شناسایی مناطق قطع یکسره و قطع پارسی، طبقه‌بندی تیپ‌ها، شناسایی آشفستگی و برآورد زیست‌توده از کاربردهای این ماهواره در مدیریت پایدار جنگل بیان شده است. تحقیق چانگ و شوشانی^۲ (۲۰۱۶) پتانسیل داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ را در ترکیب با داده‌های نوری ماهواره سنتینل-۲، برای تهیه نقشه زیست‌توده روی زمینی در جنگل‌های مدیترانه‌ای، نمایان کرد.

بررسی مطالعات مشابه نشان می‌دهد که انجام دادن برخی از آنها، به‌ویژه مواردی که داخل کشور انجام شده‌اند، با محدودیت‌ها و مشکلاتی همراه بوده که گاه نتایج تحقیق را تحت تأثیر قرار داده است. از مهم‌ترین عوامل مؤثر، می‌توان به اینها اشاره کرد: محدودیت دسترسی به داده‌های ماهواره‌ای به‌هنگام در مناطق جنگلی دلخواه، ناهم‌زمانی دریافت داده‌های ماهواره‌ای و اطلاعات میدانی و در نتیجه، لحاظ‌نشدن رویش و تخریب جنگل در اندازه‌گیری زیست‌توده، نبود اطمینان به کیفیت و صحت اطلاعات میدانی، فقدان شفافیت در نحوه محاسبه زیست‌توده روی زمینی جنگل به‌کمک مشخصه‌هایی مانند قطر برابر سینه، ابعاد تاج‌پوشش و ارتفاع درختان، کاربرد معادلات آئومتریک جهانی برای محاسبه وزن زیست‌توده درختان جنگلی داخل کشور (مطالعات داخلی)، بروز خطای هندسی در شناسایی و پیاده‌سازی محل قطعات نمونه زمینی به‌کمک دستگاه موقعیت‌یاب جهانی دستی و در نتیجه، نبود انطباق دقیق مرز قطعه نمونه‌ها روی تصاویر ماهواره‌ای و مشکل در انتخاب بهترین ترکیب باندهای استفاده حداکثری از توان داده‌های ماهواره‌ای.

استفاده از اطلاعات نامتناسب با موضوع و تکراری موجود در تصاویر ماهواره‌ای ممکن است منجر به حصول اهداف دیگری، غیر از هدف تحقیق، شود (Haddadi et al., 2011)؛ بنابراین، می‌توان ویژگی‌های

ماهواره PALSAR، برای برآورد زیست‌توده روی زمینی، و موجودی کرین را در جنگل‌های متراکم شاخه‌زاد نمایان کرد (Behera et al., 2016). لائورین^۱ و همکاران (۲۰۱۸) ۴۴ ویژگی (متغیر)، با بالاترین همبستگی با مقدار زمینی زیست‌توده روی زمینی، از داده‌های چندزمانی باند C راداری ماهواره سنتینل-۱ با دو پلاریزاسیون VV و VH، چهار ویژگی از باند L سنجنده ALOS-2 با دو پلاریزاسیون HH و HV و ده باند طیفی و دو شاخص گیاهی (جمعاً دوازده ویژگی) از داده‌های نوری ماهواره سنتینل-۲ را استخراج و برای ساخت مدل زیست‌توده روی زمینی جنگل‌های پهن‌برگ مدیترانه‌ای استان ویترو ایتالیا به‌کار بردند. در این تحقیق، برای انتخاب ویژگی‌های بهینه، از آزمون‌های رگرسیون گام‌به‌گام استفاده شد که بهترین نتیجه، از داده‌های چندزمانی راداری سنتینل-۱ با ویژگی S1 VH-VV و با ضریب تعیین ۰.۵۵ و مجذور میانگین مربع خطا، ۲۶ تن در هکتار به‌دست آمد. با افزودن چهار ویژگی باند L سنجنده ALOS-2 به ویژگی‌های چندزمانی سنتینل-۱ و سپس، اضافه کردن ویژگی‌های انتخاب‌شده از داده‌های نوری، ضریب تعیین به‌ترتیب ۰.۶۷ و ۰.۷۱ و مجذور میانگین مربع خطا ۱۰۰ و مجذور میانگین مربع خطا ۷۴.۵ تن در هکتار حاصل شد. در این تحقیق، نتیجه گرفته شد که داده‌های ماهواره سنتینل-۱ نتایج خوبی در جنگل‌های مدیترانه‌ای، با زیست‌توده بالاتر از ۴۰۰ تن در هکتار، به‌دست می‌آورد و این منبع داده که به‌رایگان در دسترس است، با وجود کمبود داده ماهواره‌ای مناسب برای تهیه نقشه زیست‌توده جنگل، مدل‌سازی و برآورد زیست‌توده جنگل را ممکن می‌کند.

امروزه بسیاری از سنجنده‌های نوری، لیزری و راداری ماهواره‌ها، در طول موج‌های متفاوتی، سطح زمین را پایش می‌کنند. از پیشرفته‌ترین ماهواره‌ها، سری ماهواره‌های سنتینل (پروژه مشترک آژانس فضایی اروپا و اتحادیه اروپا) است و ماهواره راداری سنتینل-۱A، در محدوده باند C، اولین ماهواره این

1. Laurin
2. Chang & Shoshany

ویژگی‌ها استخراج و در ادامه، مقادیر زیست‌توده، با دو روش رگرسیون بردار پشتیبان و K نزدیک‌ترین همسایه، مدل‌سازی شدند. روش‌های پارامتریک رگرسیون خطی و غیرپارامتریک شبکه عصبی مصنوعی و جنگل تصادفی^۹ نیز، به‌منظور مدل‌سازی زیست‌توده، بررسی شد که، با توجه به نتایج پایین‌تر آنها در قیاس با دو روش مورد بررسی در این تحقیق، از ذکر نتایج آنها در این مقاله صرف‌نظر شده است.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

منطقه تحقیق در مساحتی حدود ۲۰۰۰ هکتار از جنگل‌های منطقه بانکول بخش کارزان، در شهرستان سیروان در استان ایلام، بین ۴۶ درجه و ۲۷ دقیقه تا ۴۶ درجه و ۳۱ دقیقه طول شرقی و ۳۳ درجه و ۴۵ دقیقه تا ۳۳ درجه و ۴۸ دقیقه عرض شمالی واقع است که پوشیده از جنگل خالص بلوط، با فرم‌های رویشی شاخه‌زاد (حدود ۷۰-۶۰٪ منطقه) و دانه‌زاد (حدود ۴۰-۳۰٪ منطقه)، و با تراکم تاج‌پوشش کم تا انبوه است و توپوگرافی نسبتاً ملایمی دارد. دامنه ارتفاع آن از سطح دریا ۱۵۰۰-۱۲۰۰ متر است. تحقیق حاضر براساس هدف در بخش شاخه‌زاد آن انجام شده است (شکل ۱).

۲-۲- داده‌های سنجش از دوری

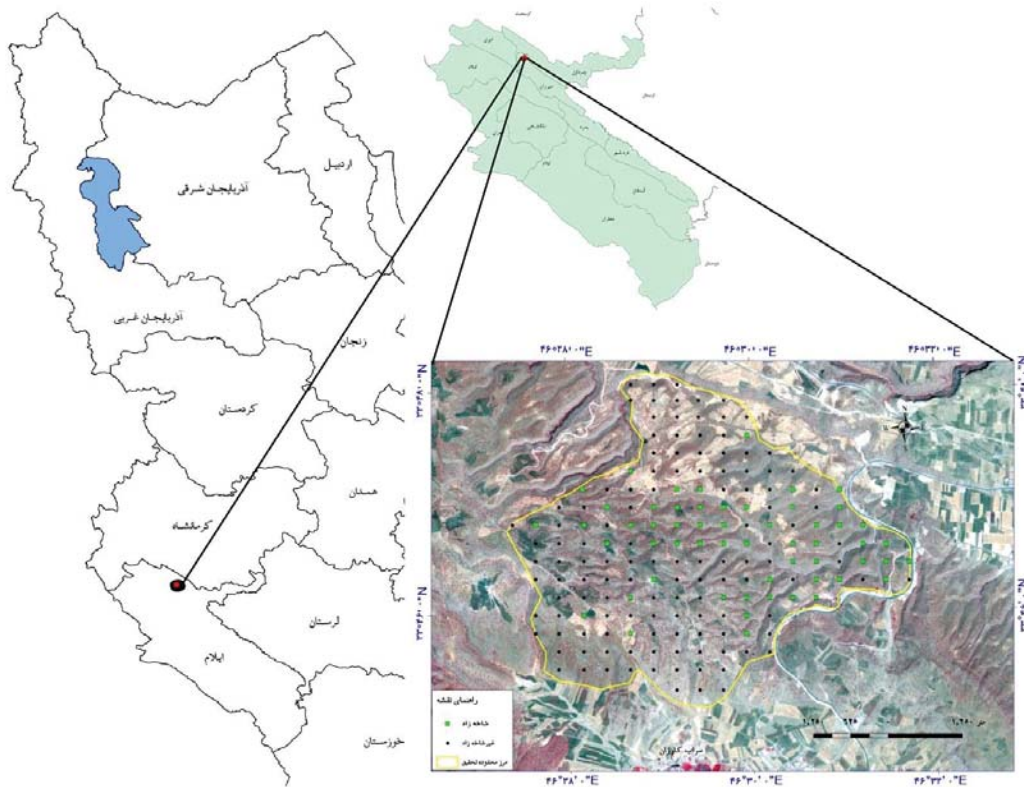
در این تحقیق، داده‌های باند C راداری با روزنه مجازی^{۱۰} ماهواره سنتینل-۱A، با قطبش‌های دوکاناله^{۱۱} VH و VV و در حالت نوار پهن تداخل‌سنج^{۱۲}.

1. Scattering Mechanisms
2. Fitness Function
3. Selection
4. Crossover
5. Mutation
6. Roulette Wheel
7. Support Vector Regression (SVR)
8. K-Nearest Neighbor
9. Random Forest
10. SAR (Synthetic Aperture Radar)
11. Dual polarization
12. Interferometric Wide Swath Mode

مفید را استخراج کرد که بیشترین اختلاف را بین مکانیسم‌های پخش^۱ ایجاد می‌کنند و نیز، حداقل تعداد ویژگی را از بین همه ویژگی‌ها انتخاب کرد که، درعین‌حال، حاوی حداکثر اطلاعات ممکن باشند. بدین ترتیب، منطقی است که تعداد ورودی‌ها کاهش می‌یابد و ویژگی‌هایی که در بهبود نتیجه تأثیری ندارند نادیده گرفته می‌شوند. راه‌حل‌های عملی متعددی، برای انتخاب ویژگی‌های بهینه، وجود دارد که الگوریتم ژنتیک یکی از قوی‌ترین آنهاست. این الگوریتم تکنیکی است مبتنی بر اصل انتخاب طبیعی داروین که در تجزیه و تحلیل‌های بهینه‌سازی کاربرد دارد و در ساختار آن کروموزوم، عملگرهای برازش^۲، انتخاب^۳، تقاطع یا ترکیب مجدد^۴، جهش^۵ و همچنین چرخه رولت^۶ به کار می‌رود و در مطالعات سنجش از دور برای انتخاب بهینه‌ترین متغیرها، از بین تعداد بی‌شماری از متغیرها (باند‌های اصلی و محاسباتی)، بر مبنای اندازه‌های تعریف‌شده برای این عملگرها عمل می‌کند (Sukawattanavijit et al., 2017).

حال چنانچه سعی شود مشکلات مورد اشاره به‌نحو مقتضی برطرف شود و یا به حداقل ممکن برسد، تحلیل نتایج حاصل از پژوهش می‌تواند مبنای صحیح‌تری برای قضاوت و تصمیم‌گیری باشد.

هدف از این تحقیق بررسی توان داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ در توسعه مدل برآورد زیست‌توده روی زمینی جنگل‌های شاخه‌زاد زاگرس، با تأکید بر به حداقل رساندن محدودیت‌های ذکرشده، است. استخراج ویژگی‌های راداری و مشخص کردن مناسب‌ترین ویژگی‌ها، مدل‌سازی برآورد زیست‌توده با ترکیب ویژگی‌های متفاوت حاصل از به‌کارگیری الگوریتم بهینه‌یابی ژنتیک و دو مدل رگرسیون بردار پشتیبان^۷ و K نزدیک‌ترین همسایه^۸، و تعیین مناسب‌ترین ترکیب ویژگی‌های راداری حاصل از سنجنده سنتینل-۱ برای برآورد زیست‌توده منطقه مورد مطالعه از مهم‌ترین موارد انجام‌شده در این تحقیق محسوب می‌شوند. در واقع، ابتدا، مناسب‌ترین ترکیب



شکل ۱. موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه ایران، استان ایلام و شهرستان سیروان و نیز پراکنش و قطعات نمونه برداشت شده روی تصویر رنگی Resampled Sentinel-2 843 2017 منطقه

۲-۲- داده‌های سنجش از دوری

در این تحقیق، داده‌های باند C راداری با روزه مجازی^۵ ماهواره سنتینل ۱A، با قطبش‌های دوکاناله^۶ VV و VH و در حالت نوار پهن تداخل سنج^۷، مربوط به تاریخ ۶ تیر ۱۳۹۶، با پهنای باند ۲۵۰ کیلومتر و تفکیک مکانی ۵×۲۰ متر و سطح ۱، با فرمت SAFE، از سایت مرکز علمی Hub سازمان فضایی اروپا^۱ دریافت و استفاده شد. تفکیک مکانی، در داده‌های راداری، در دو

مربوط به تاریخ ۶ تیر ۱۳۹۶، با پهنای باند ۲۵۰ کیلومتر و تفکیک مکانی ۵×۲۰ متر و سطح ۱، با فرمت SAFE، از سایت مرکز علمی Hub سازمان فضایی اروپا^۱ دریافت و استفاده شد. تفکیک مکانی، در داده‌های راداری، در دو جهت آزیموت^۲ (جهت حرکت سکوی ماهواره) و دامنه^۳ تعریف می‌شود که، هرچه طول پالس کمتر باشد، امکان تفکیک دو عارضه همسایه بیشتر و قدرت تفکیک بهتر است. با اعمال سطح تصحیحات ۱ روی داده‌های راداری، داده‌های خام طی فرایند پیش‌پردازش و معمولاً به کمک مدل‌های برازش چندجمله‌ای در راستای آزیموت و دامنه متمرکز می‌شود و در چند حالت خروجی به دست می‌آید. در این تحقیق، از خروجی GRDH^۴، با تفکیک مکانی ۱۰×۱۰ متر، استفاده شد که سایت ارائه‌دهنده تصاویر در اختیار قرار داده است.

1. European Space Agency (ESA)
2. Azimuth
3. Range
4. Ground Range Detection High Resolution
5. SAR (Synthetic Aperture Radar)
6. Dual polarization
7. Interferometric Wide Swath Mode
8. European Space Agency (ESA)

پیاده‌سازی شد. ابعاد قطعات نمونهٔ مربعی، متناسب با تفکیک مکانی دادهٔ ماهواره‌ای مورد استفاده، ۳۰×۳۰ متر (Amini and Sadeghi., 2013; Vafaei et al., 2017) و به‌مرکزیت نقاط شبکه، انتخاب و به‌کمک دستگاه موقعیت‌یاب جهانی تفاضلی^۴ به‌روش تعیین موقعیت کینماتیک آنی^۵ روی زمین، در بازهٔ زمانی ۲ تا ۲۰ خرداد ۱۳۹۶، پیاده‌سازی شدند. از مجموع ۵۶ قطعه نمونه در محدودهٔ جنگل شاخه‌زاد، سه قطعه در اراضی کشاورزی و یا محدوده‌های غیرجنگل حذف و اندازهٔ ابعاد تاج‌پوشش، قطر برابرسینه و ارتفاع تمامی درختان و درختچه‌های موجود در ۵۳ قطعهٔ دیگر برداشت شد (شکل ۲). قابلیت نفوذ^۶ امواج راداری در باند C به درون و به‌سمت تنهٔ درختان ضعیف بوده (Eini-Zinab et al, 2019) و بنابراین، در این تحقیق، مشخصهٔ ابعاد تاج‌پوشش وارد روند برآورد زیست‌توده شده است. خلاصهٔ مشخصات آماری ۵۳ قطعه نمونهٔ اندازه‌گیری‌شدهٔ زمینی در جدول ۱ آمده است.

جهت آزیموت^۱ (جهت حرکت سکوی ماهواره) و دامنه^۲ تعریف می‌شود که، هرچه طول پالس کمتر باشد، امکان تفکیک دو عارضهٔ همسایه بیشتر و قدرت تفکیک بهتر است. با اعمال سطح تصحیحات ۱ روی داده‌های راداری، داده‌های خام طی فرایند پیش‌پردازش و معمولاً به‌کمک مدل‌های برازش چندجمله‌ای در راستای آزیموت و دامنه متمرکز می‌شود و در چند حالت خروجی به‌دست می‌آید. در این تحقیق، از خروجی GRDH^۳، با تفکیک مکانی ۱۰×۱۰ متر، استفاده شد که سایت ارائه‌دهندهٔ تصاویر در اختیار قرار داده است.

۲-۳- اندازه‌گیری‌های زمینی

جهت عمومی شیب غالب منطقهٔ مورد مطالعه شمالی - جنوبی است و بنابراین، به‌منظور برداشت اطلاعات میدانی، براساس تجربه و به‌نسبت مساحت منطقهٔ تحقیق، ابتدا یک شبکهٔ منظم تصادفی، به‌ابعاد ۳۹۰ متر در راستای محور عرض‌ها و ۳۰۰ متر در راستای محور طول‌ها، طراحی و روی نقشهٔ منطقهٔ مورد مطالعه



شکل ۲. استقرار گیرندهٔ مینا^۱ در نقطهٔ مبنای ایستایی (الف)؛ اندازه‌گیری قطر برابرسینهٔ درختان با خط‌کش دوبازو (ب)؛ گیرندهٔ متحرک^۱ در مرکز قطعه نمونه و اندازه‌گیری ارتفاع تاج‌پوشش درختان داخل آن با دستگاه شیب‌سنج سوننتو (ج)

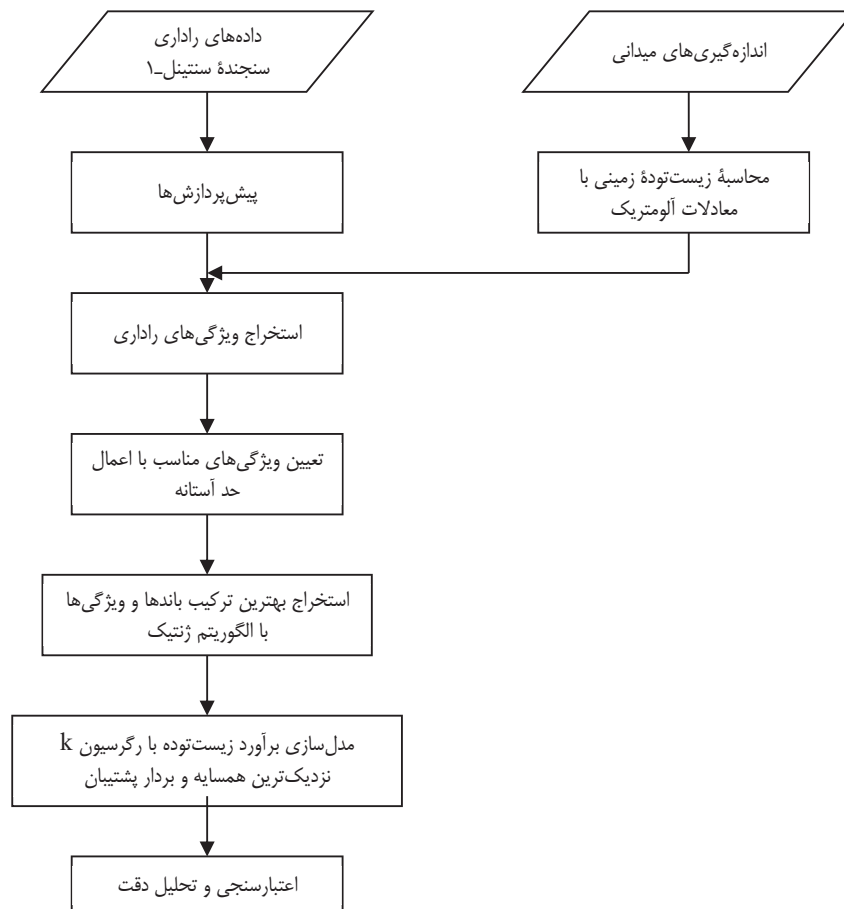
1. Azimuth
2. Range
3. Ground Range Detection High Resolution
4. Differential Global Positioning System (DGPS)
5. Real Time Kinematic (RTK)
6. Penetration

جدول ۱. خلاصه مشخصات آماری متغیر زیست‌توده روی‌زمینی قطعات نمونه زمینی برداشت‌شده (واحد: کیلوگرم در سطح قطعه نمونه)

تعداد قطعه نمونه	دامنه	کمینه	پیشینه	میانگین	اشتباه معیار	انحراف معیار	واریانس
۵۳	۱۶۹۸.۱۸	۲۷۹.۲۱۰	۱۹۷۷.۳۹۰	۹۵۷.۱۵۷۵	۶۱.۸۲	۴۵۰.۱۰۴۵	۲۰۲۵۹۴.۰۶۳۴

۲-۴- روش تحقیق

- مرحله اول: محاسبه زیست‌توده مرجع، با استفاده از اندازه‌گیری‌های زمینی
 - مرحله دوم: پیش‌پردازش داده‌های راداری (تصحیح رادیومتری، هندسی و کاهش نویز)
 - مرحله سوم: استخراج ویژگی‌های راداری
 - مرحله چهارم: تعیین ویژگی‌های مناسب با اعمال حد آستانه
- فلوچارت روش تحقیق مطابق شکل ۳ و مراحل زیر است
- مرحله پنجم: انتخاب باندها و ویژگی‌های بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک، به منظور مدل‌سازی برآورد زیست‌توده
 - مرحله ششم: برآورد زیست‌توده با مجموعه ویژگی‌های بهینه و ارزیابی نتایج
 - ارزیابی دقت برآورد زیست‌توده به دست آمده، با استفاده از انواع ترکیب ویژگی‌های گوناگون و روش‌های رگرسیون.



شکل ۳. فلوچارت روش تحقیق برای برآورد زیست‌توده

۲-۴-۱- محاسبه زیست توده مرجع

محاسبه زیست توده مرجع روی زمینی درختان مورد اندازه گیری از مدل به دست آمده برای فرم رویشی شاخه زاد گونه بلوط ایرانی، در تحقیق ایرانمنش و همکاران (۲۰۱۴)، طبق رابطه (۱) است.

$$Y = 2.534 \times X^{2.383} \quad \text{رابطه (۱)}$$

Y زیست توده درخت به کیلوگرم و X متغیر مستقل (قطر متوسط تاج پوشش) است. قطر متوسط تاج پوشش نیز از فرمول میانگین هندسی طبق رابطه (۲) محاسبه شد.

$$X = \sqrt{a \times b} \quad \text{رابطه (۲)}$$

a قطر اول و b قطر دوم تاج پوشش به متر است.

زیست توده است، کاهش می دهد. به همین دلیل، کاهش این نویز یکی از مهم ترین اقدامات در سنجش از دور راداری محسوب می شود (Wang and Ge, 2012). در این تحقیق، از فیلتر Lee با ابعاد ۳×۳ پیکسل استفاده شد.

۲-۴-۳- ویژگی های حاصل از داده های راداری

تصاویر راداری مورد استفاده در تحقیق حاضر در دو پلاریزاسیون VV و VH دریافت شده اند. علاوه بر ویژگی هایی که به طور مستقیم از این تصاویر استخراج می شوند، سایر ویژگی های متداول و مناسب با هدف تحقیق نیز از این تصاویر استخراج شدند که در جدول ۲ تعریف شده اند.

۲-۴-۲- پیش پردازش داده ها

داده های مورد استفاده در سطح یک تصحیحات بودند که لازم بود عملیات تصحیح رادیومتری، هندسی و کاهش نویز اسپکل^۱ روی آنها اعمال شود. برای این منظور، ابتدا، با استفاده از کالیبراسیون اتمسفری استاندارد، داده های ماهواره سنتینل در هر دو پلاریزاسیون VV و VH به واحد نمایش شدت بازپراکنش^۲ در بازه ۰ تا ۱ تبدیل شد. با انجام دادن این عملیات، تأثیرات اتمسفر، به ویژه آثار لایه های بالایی اتمسفر روی امواج راداری، و نیز سایر عواملی که باعث تغییر انرژی الکترومغناطیسی راداری می شوند و نویزهایی که سنجنده ایجاد کرده است، تصحیح می شوند. در گام بعدی، داده ها با روش درون یابی دوخطی^۳ و به کمک مدل رقومی ارتفاعی^۴ حاصل از SRTM^۵، تصحیح هندسی شدند و هم زمان، با بازنمونه گیری^۶ در سیستم تصویر WGS84 UTM Zone 38N و تفکیک مکانی ۱۰×۱۰ متر، پروجکت شدند. در این مرحله، به منظور کاهش حجم داده و سرعت عمل در پردازش های بعدی، برش مکانی در محدوده منطقه مورد مطالعه انجام شد.

نویز اسپکل پتانسیل تصاویر راداری را که از داده های مؤثر در کاربری های رایج تصاویر ماهواره ای مانند برآورد

۲-۴-۴- تعیین ویژگی های مناسب ورودی الگوریتم

ژنتیک با اعمال حد آستانه ضریب همبستگی به منظور مطابقت مکانی مرز قطعات نمونه با سیستم مختصاتی متریک و پیکسل های تصویر، با توجه به ماهیت تصاویر راداری، Φ (عرض جغرافیایی) و λ (طول جغرافیایی) آنها در تصاویر راداری فزاینده شد. با توجه به ابعاد هریک از قطعه نمونه های اندازه گیری شده میدانی (۰.۰۹ هکتار) و با در نظر گرفتن اینکه ابعاد پیکسلی ویژگی های راداری ۱۰ متر است، داخل هریک از این قطعه نمونه ها، تعدادی پیکسل قرار می گیرد. به منظور داشتن مقداری واحد برای هر قطعه نمونه اندازه گیری شده، مقدار میانگین هریک از ویژگی های استخراج شده در داخل هر قطعه نمونه محاسبه و استفاده شد. با توجه به اینکه برای این قطعه نمونه ها مقادیر زیست توده مرجع نیز مشخص است، ضریب همبستگی (r) بین ویژگی و زیست توده، به صورت خطی، برآورد شد. مطابق جدول ۲، پنجاه ویژگی از

1. Speckle noise
2. Backscattering
3. Bilinear Interpolation
4. Digital Elevation Model (DEM)
5. Shuttle Radar Topography Mission
6. Resampling

جدول ۲. ویژگی‌های استخراج‌شده از تصویر راداری

ویژگی	توضیحات
VH	مقدار شدت باند VH
VV	مقدار شدت باند VV
Mean VH	مقدار میانگین شدت باند VH حاصل از یک کرنل ۳*۳
Mean VV	مقدار میانگین شدت باند VV حاصل از یک کرنل ۳*۳
VV / VH	مقدار نسبت بین شدت دو باند VV به VH
VH / VV	مقدار نسبت بین شدت دو باند VH به VV
Mean VV GLCM	ویژگی‌های آماری (کنتراست، نداشتن شباهت، هموزن، گشتاور زاویه‌ای دوم ^۱ ، انرژی، ماکزیمم، آنتروپی، میانگین، واریانس) حاصل از ماتریس رخداد توأم ^۱ اعمال‌شده روی ویژگی Mean VV
Mean VH GLCM	ویژگی‌های آماری (کنتراست، نداشتن شباهت، هموزن، گشتاور زاویه‌ای دوم، انرژی، ماکزیمم، آنتروپی، میانگین، واریانس و کورلیشن) حاصل از ماتریس رخداد توأم اعمال‌شده روی ویژگی Mean VH
PCA	اعمال الگوریتم تحلیل مؤلفه اصلی ^۱ روی ۲۵ ویژگی تعریف‌شده در بالا

منبع: Chen et al., 2018; Laurin et al., 2018

با مقادیر زیست‌توده باشند (Namiranian, 2010; Santi et al., 2017). اما چون تعداد ویژگی‌های راداری با همبستگی بیش از ۰.۲۸ در این تحقیق کم بود و امکان اجرای الگوریتم ژنتیک نبود، پس از سعی و خطا در به‌کارگیری ویژگی‌های با اندازه‌های متفاوت همبستگی، از ویژگی‌های دارای همبستگی بیش از ۰.۲ به‌منزله ورودی الگوریتم ژنتیک استفاده شد (جدول ۳).

داده‌های راداری استخراج شد که دامنه ضریب همبستگی بین ویژگی و زیست‌توده در آنها از ۰.۰۸ تا ۰.۳۵ بود. برای تعیین ویژگی‌های بهینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک در این تحقیق، براساس بررسی جدول آزمون r برای درجه آزادی ۵۱، سعی شد از ویژگی‌هایی استفاده شود که دارای ضریب همبستگی بیش از حداقل سطح معنی‌داری در سطح ۰.۰۵ در جدول (۰.۲۸)

جدول ۳. میزان همبستگی بین ویژگی‌های حاصل از داده‌های راداری و زیست‌توده انتخاب‌شده برای ورود به فرایند الگوریتم ژنتیک

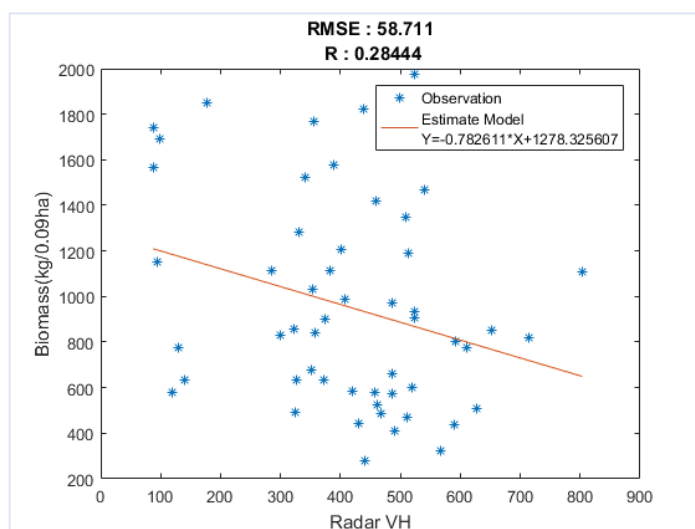
همبستگی	ویژگی
۰.۲۸	VH
۰.۳۱	Mean VV
۰.۳۵	Mean VV GLCM (Correlation)
۰.۲۶	Mean VH GLCM (Dissimilarity)
۰.۲۹	VV
۰.۲۹	VV/VH
۰.۳۰	VH/VV
۰.۲۹	Mean VV GLCM (Mean)
۰.۲۷	Mean VV GLCM (Variance)
۰.۲۶	Mean VH GLCM (Homogeneity)
۰.۲۸	Mean VH GLCM (ASM)
۰.۳۰	Mean VH GLCM (Energy)
۰.۳۰	Mean VH GLCM (MAX)
۰.۲۹	Mean VH GLCM (Entropy)
۰.۲۴	Mean VH GLCM (Mean)
۰.۲۶	Mean VH GLCM (Variance)
۰.۲۸	PCA1
۰.۲۲	PCA8
۰.۲۶	PCA11

و بقیه، با استفاده از اپراتورهای ژنتیکی همچون تقاطع و جهش، برای تولید فرزند (ویژگی جدید) به کار می‌روند. به‌طور کلی، الگوریتم ژنتیک پنج ویژگی مهم دارد: ۱- تابع تناسب: تابعی برای ارزیابی یک فرضیه که مقداری عددی به هر فرضیه نسبت می‌دهد؛ ۲- حد آستانه تابع هزینه: مقدار آستانه که شرط پایان را معین می‌کند؛ ۳- تعداد فرضیه: تعداد فرضیه‌هایی که باید در جمعیت در نظر گرفته شوند؛ ۴- درصد تقاطع: درصدی از جمعیت که در هر مرحله، با استفاده از الگوریتم تقاطع، جایگزین می‌شوند؛ ۵- نرخ جهش: ویژگی‌ای که احتمال اعمال جهش را مشخص می‌کند (Vose, 1999). در این تحقیق، فضای جست‌وجو همان ویژگی‌های حاصل از داده‌های راداری است که، در مرحله انتخاب مناسب‌ترین ویژگی‌ها، شناسایی شده‌اند. تابع تناسب با دو روش رگرسیون K نزدیک‌ترین همسایه و رگرسیون بردار پشتیبان تعریف می‌شود. مقادیر درصد تقاطع و نرخ جهش تعریف شده نیز، به ترتیب، ۵۰٪ و ۰.۳ در نظر گرفته شدند. همچنین شرط اتمام الگوریتم ژنتیک هم به صورت تعداد تکرار لحاظ می‌شود که، در تحقیق حاضر، تعداد آن ۱۰ است.

به‌منظور ایجاد امکان ارزیابی بصری از رفتار ویژگی‌های استخراج‌شده از داده‌ها و مقادیر زیست‌توده، رفتار ویژگی VH با زیست‌توده، به صورت نمونه، در قالب نمودار شکل ۴ آورده شده است. مشاهده می‌شود که، در طول موجی معین، مقادیر متنوعی از اندازه‌های زیست‌توده واقع شده است که این پدیده همان اثر اشباع‌شدگی در این داده‌ها را نشان می‌دهد.

۲-۴-۵- کاربرد الگوریتم ژنتیک به منظور بهینه‌سازی ویژگی‌ها

الگوریتم ژنتیک در مسائلی با فضای جست‌وجوی بزرگ و با فضای فرضیه پیچیده به کار می‌رود. روش متداول اجرای الگوریتم ژنتیک به این ترتیب است که مجموعه‌ای از فرضیه‌ها، با نام جمعیت^۱، تولید و به‌طور متناوب، با فرضیه‌های جدیدی جایگزین می‌شود. در هر بار تکرار، با استفاده از یک تابع تناسب، تمامی فرضیه‌ها ارزیابی می‌شوند. آنگاه تعدادی از بهترین فرضیه‌ها، با استفاده از یک تابع احتمال، انتخاب می‌شوند و جمعیت جدید را تشکیل می‌دهند. تعدادی از این فرضیه‌های انتخاب‌شده به همان صورت استفاده می‌شوند



شکل ۴. رفتار ویژگی VH حاصل از داده‌های راداری با مقادیر زیست‌توده

1. Population

۲-۴-۵-۱- روش‌های رگرسیون مورد استفاده در مدل‌سازی برآورد زیست‌توده

- رگرسیون K نزدیک‌ترین همسایه: یکی از ده الگوریتم پرکاربرد داده‌کاوی است که هدف کلی آن طبقه‌بندی و تخمین ویژگی‌های مجموعه‌ای از داده‌های مجهول بر مبنای بیشترین شباهت این داده‌ها با داده‌های معلومی است که در همسایگی آنها قرار دارند (Souza et al., 2019). از معایب این روش، می‌توان به تعیین مقدار مناسب K و پیچیدگی زمانی محاسباتی آن اشاره کرد. به‌طور خلاصه، مراحل انجام‌شدن الگوریتم K نزدیک‌ترین همسایه بدین ترتیب است: ۱- انتخاب مقدار K بهینه؛ ۲- به‌دست‌آوردن فواصل، براساس مجموعه داده ورودی؛ ۳- تشکیل K کلاس برحسب نزدیک‌ترین فاصله (بیشترین شباهت) و سپس، محاسبه فاصله رکورد جدید از تمامی رکوردهای آموزشی؛ ۴- انتخاب نزدیک‌ترین همسایه؛ ۵- استفاده از برچسب دسته K نزدیک‌ترین همسایه برای پیش‌بینی دسته رکورد جدید (Shataee et al, 2012).

- رگرسیون بردار پشتیبان: ماشین بردار پشتیبان نوعی ماشین یادگیری است که، به‌منظور رسیدن به یک تابع برازش بهینه، اصل کمینه‌سازی تابع ساختاری ریسک^۱ را روی مجموعه داده‌های آموزشی محدود اجرا می‌کند. رگرسیون بردار پشتیبان نوعی رگرسیون غیرخطی و غیرپارامتریک به حساب می‌آید که از فضای ویژگی با ابعاد بالا استفاده می‌کند (Smola & Schölkopf, 2004). در این تحقیق، از تابع کرنل پایه شعاعی^۲ برای آموزش مدل استفاده شده است. علاوه بر این، ویژگی‌های روش رگرسیون بردار پشتیبان، مانند ویژگی هزینه و ویژگی تابع کرنل، با استفاده از تکنیک بهینه‌سازی پارامتری K-fold برآورد و تنظیم شده است.

آموزشی برای ساخت مدل آموزشی و ۵۰٪ باقی‌مانده نیز به‌منزله داده تست در مدل‌سازی برآورد زیست‌توده و اعتبارسنجی مدل‌های رگرسیونی به‌کار گرفته شده‌اند. اعتبارسنجی مدل‌ها به‌روش اعتبارسنجی تقاطعی^۳ با استفاده از ۲۶ قطعه نمونه تست، که در ساخت مدل آموزشی مشارکت نداشتند، و ارزیابی اندازه پارامترهای آماری مجذور میانگین مربع خط، مجذور میانگین مربع خطای نسبی و ضریب تعیین انجام شد. در این روش اعتبارسنجی، مدلی دارای کارایی بیشتری است که کمترین برآورد خطا و بالاترین ضریب تعیین را داشته باشد.

۳- نتایج

بررسی ویژگی‌های مندرج در جدول ۳ نشان می‌دهد که مقادیر پایین همبستگی بیانگر قابلیت اندک ویژگی‌های راداری استخراج‌شده از تصویر ماهواره سنتینل-۱ در برآورد زیست‌توده جنگل‌های شاخه‌زاد بلوط زاگرس است. در مواردی که میزان همبستگی مثبت است، یعنی تغییرات ویژگی مورد نظر با میزان زیست‌توده در یک جهت قرار دارد و در مواردی که میزان همبستگی منفی است (شکل ۳)، یعنی تغییرات ویژگی و زیست‌توده در خلاف جهت هم‌اند.

از مجموع پنجاه ویژگی استخراج‌شده، نوزده ویژگی دارای ضریب همبستگی بیش از ۰.۲، به‌منزله ویژگی‌های ورودی، در فرایند الگوریتم ژنتیک تجزیه‌وتحلیل شدند که ویژگی Correlation حاصل از ویژگی Mean VV GLCM، ویژگی VH/VV، و ویژگی‌های آماری انرژی و ماکزیمم حاصل از ویژگی Mean VH GLCM، به‌ترتیب، بیشترین میزان همبستگی را با مقادیر زیست‌توده جنگل شاخه‌زاد مورد مطالعه داشتند و به‌منزله ویژگی‌های بهینه انتخاب شدند.

۲-۴-۵-۲- اعتبارسنجی مدل‌های برآورد زیست‌توده

۵۰٪ داده‌های زمینی، به‌طور تصادفی، به‌صورت داده

1. Structural Risk Minimization
2. Radial Basis Function (RBF)
3. Cross validation

در صورتی که ملاک برتری روش‌ها را حالت استفاده از داده‌های تست بدانیم، در حالت استفاده از روش K نزدیک‌ترین همسایه، میزان مجذور میانگین مربع خطا ۱ تن‌درهکتار (معادل ۱۰٪) است که، در مقایسه با روش بردار پشتیبان با میزان مجذور میانگین مربع خطای ۰.۸۷ تن‌درهکتار (معادل ۸٪)، دقت پایین‌تری دارد. ضریب تعیین در روش K نزدیک‌ترین همسایه معادل ۰.۲۳ بهتر از روش بردار پشتیبان با اندازه ۰.۱۴ است. مدل‌های نهایی برآورد زیست‌توده، با استفاده از ترکیب‌های ویژگی‌های بهینه انتخاب‌شده و پس از اعتبارسنجی هنگام استفاده از رگرسیون K نزدیک‌ترین همسایه در محل قطعات آموزشی، اندازه زیست‌توده را با مجذور میانگین مربع خطای ۱۰۰ (معادل ۹٪) و ضریب تعیین ۰.۳۸ و در محل قطعات تست، ۰.۹۹ تن‌درهکتار (معادل ۱۰٪) و ضریب تعیین ۰.۲۳ و در حالت استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان، به ترتیب، ۰.۹۹ تن‌درهکتار (۹٪)، ۰.۲۲ و ۰.۸۷ تن‌درهکتار (۸٪) و ۰.۱۴ برآورد کرده است.

مطابق با تمامی شرایط و مقادیر پارامترهایی که در بخش ۲-۴ تا ۲-۴-۵ بیان شد، با به‌کارگیری بهترین ترکیب ویژگی‌های راداری حاصل از الگوریتم ژنتیک، بهترین نتایج برآورد زیست‌توده جنگل شاخه‌زاد مورد مطالعه با دو روش رگرسیونی K نزدیک‌ترین همسایه و رگرسیون بردار پشتیبان، طبق شرح جدول‌های ۴ و ۵، به دست آمد. در این تحقیق، به منظور تعیین صحت، از پارامترهای آماری مجذور میانگین مربع خطا، مجذور میانگین مربع خطای نسبی و ضریب تعیین استفاده شده است.

شکل ۵، با استفاده از روش‌های رگرسیون K نزدیک‌ترین همسایه و رگرسیون بردار پشتیبان، میزان زیست‌توده مشاهده‌ای و برآوردی را برای داده‌های آموزشی و تست مقایسه می‌کند.

بررسی جدول‌های ۴ و ۵ و شکل ۵ نشان می‌دهد که، در حالت استفاده از روش‌های رگرسیونی K نزدیک‌ترین همسایه و بردار پشتیبان، نتایج دو داده آموزشی و تست تقریباً به هم نزدیک است و حتی برتری‌ای نسبی در مورد داده‌های تست نیز دیده می‌شود.

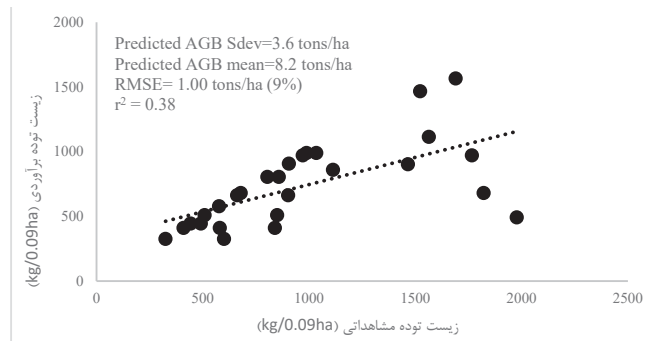
جدول ۴. RMSE و RMSE نسبی برآورد زیست‌توده، با استفاده از روش رگرسیون K نزدیک‌ترین همسایه، و ضریب تعیین بین زیست‌توده مشاهده‌ای و زیست‌توده برآوردی، با استفاده از ویژگی‌های راداری حاصل از تصویر سنتینل-۱، برای جنگل شاخه‌زاد مورد مطالعه

ویژگی‌ها	تعداد ویژگی	ضریب تعیین	داده آموزشی		داده تست	
			RMSE نسبی (تن‌درهکتار)	RMSE نسبی	ضریب تعیین	RMSE نسبی (تن‌درهکتار)
Mean VV, Mean VV GLCM (Correlation)	۲	۰.۳۸	۱.۰۰	۰.۰۹	۰.۲۳	۰.۹۹

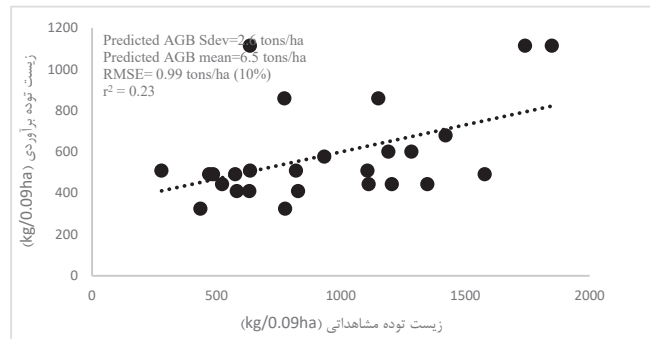
جدول ۵. RMSE و RMSE نسبی برآورد زیست‌توده، با استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان، و ضریب تعیین بین زیست‌توده مشاهده‌ای و زیست‌توده برآوردی، با استفاده از ویژگی‌های راداری حاصل از تصویر سنتینل-۱، برای جنگل شاخه‌زاد مورد مطالعه

ویژگی‌ها	تعداد ویژگی	ضریب تعیین	داده آموزشی		داده تست	
			RMSE نسبی (تن‌درهکتار)	RMSE نسبی	ضریب تعیین	RMSE نسبی (تن‌درهکتار)
VH, Mean VV, Mean VV GLCM (Correlation)	۳	۰.۲۲	۰.۹۲	۰.۰۹	۰.۱۴	۰.۸۷

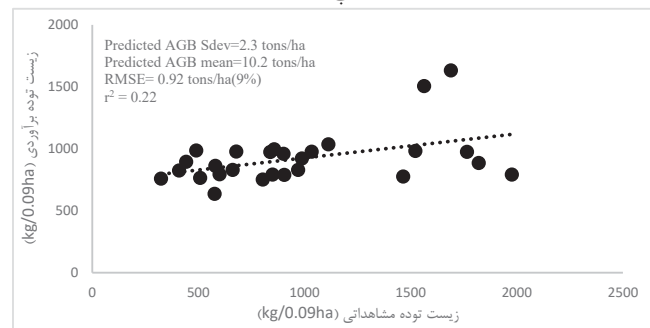
سعید ساروئی و همکاران



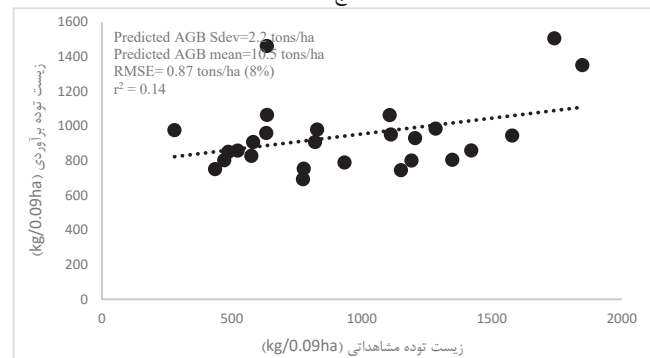
الف



ب



ج



د

شکل ۵. مقایسه بین مقادیر زیست توده مشاهده‌ای و مقادیر زیست توده برآوردی، با استفاده از روش K نزدیک‌ترین همسایه برای داده‌های آموزشی (الف)؛ روش رگرسیون K نزدیک‌ترین همسایه برای داده‌های تست (ب)؛ روش رگرسیون بردار پشتیبان برای داده‌های آموزشی (ج)؛ روش رگرسیون بردار پشتیبان برای داده‌های تست (د)

۴- بحث و نتیجه‌گیری

در تحقیقات پیشین، مشخص شده است که دلیل بروز خطا در برآورد زیست‌توده روی‌زمینی جنگل با استفاده از داده‌های سنجش از دوری، علاوه بر وجود اشتباهاتی در اندازه‌گیری‌های میدانی، ناهم‌زمانی در یافت داده‌های ماهواره‌ای و برداشت اطلاعات میدانی، استفاده از معادله‌های آلومتریک جهانی برای مناطق محلی، به‌حد اشباع رسیدن سریع داده‌های مورد استفاده و نیز، استفاده از مدل‌های برآورد نامناسب بوده است. در این مطالعه سعی شد، با به‌حداقل رساندن این منابع خطا، قابلیت داده‌های سنجش از دور راداری ماهواره سنتینل-۱ در برآورد زیست‌توده روی‌زمینی بخشی از جنگل‌های شاخه‌زاد بلوط زاگرس در استان ایلام ارزیابی شود. بررسی مشخصه‌های آماری متغیر زیست‌توده در قطعات نمونه زمینی (جدول ۱) نشان می‌دهد که پراکندگی داده‌ها در قیاس میانگین زیاد است و سطح تاج‌پوشش جنگل ساختاری ناهمگن دارد. پس از بررسی رابطه همبستگی پی‌یرسون بین زیست‌توده مشاهده‌ای و میانگین ارزش پیکسل‌های تصویر (Santi et al., 2017) در محل قطعات نمونه برای همه ویژگی‌های استخراج‌شده، نوزده ویژگی با ضریب همبستگی بالاتر از ۰.۲، در فرایند انتخاب ویژگی‌های بهینه، با استفاده از الگوریتم بهینه‌یاب ژنتیک وارد شد. از بین ترکیب ویژگی‌های مورد بررسی با روش‌های متفاوت رگرسیونی پارامتری و غیرپارامتری برآورد زیست‌توده، هنگام استفاده از روش رگرسیون K نزدیک‌ترین همسایه، ترکیب ویژگی $\{ \text{Mean VV}, \text{Mean VV GLCM (Correlation)} \}$ ، با دو ویژگی، و هنگام استفاده از روش رگرسیون بردار پشتیبان، ترکیب ویژگی $\{ \text{VH}, \text{Mean VV}, \text{Mean VV GLCM (Correlation)} \}$ ، با سه ویژگی، بهترین عملکرد را داشتند. همبستگی داده‌های راداری و زیست‌توده، در این پنج ویژگی، بالاتر از ۰.۲۸ بود و سطح معنی‌داری حداقل میزان همبستگی برای درجه آزادی ۵۱ و سطح احتمال ۰.۹۵٪ در جدول آزمون t در آنها نیز مورد تأیید

است که عملکرد درست الگوریتم ژنتیک را در انتخاب بهترین ترکیب باندی برای هدف تحقیق، نشان می‌دهد. ارزیابی نتایج اعتبارسنجی مدل‌ها به‌کمک پارامترهای آماری مجذور میانگین مربع خطا، مجذور میانگین مربع خطای نسبی و ضریب تعیین نشان داد کارایی این دو مدل، در برآورد زیست‌توده جنگل مورد مطالعه، در محل قطعات نمونه، بهتر از دیگر مدل‌ها بوده است. هرچند مطابق نتایج مندرج در جدول‌های ۴ و ۵، به‌طور کلی، می‌توان گفت که روش رگرسیون بردار پشتیبان عملکردی بهتر از روش رگرسیون K نزدیک‌ترین همسایه در برآورد زیست‌توده داشته است؛ به‌دلیل نزدیکی نتایج در هر دو روش، با قطعیت نمی‌توان بر این ادعا تأکید کرد. نزدیکی نسبی آماره‌های تعیین صحت در هر دو روش رگرسیونی، در داده‌های آموزشی و تست، بیانگر بهینه‌بودن مدل برآورد ایجادشده است. میزان ضریب تعیین ۰.۲۳ و ۰.۱۴، در استفاده از دو روش رگرسیونی بررسی‌شده در این تحقیق، حداکثر توانی بوده است که داده‌های راداری ماهواره سنتینل-۱ در برآورد زیست‌توده روی‌زمینی، در جنگل‌های شاخه‌زاد بلوط منطقه مورد مطالعه، از خود نشان داده‌اند. تنوع در تراکم تاج‌پوشش و پراکندگی مکانی درختان جنگل، توان تفکیک پایین تصویر راداری مورد استفاده، پدیده اشباع‌شدگی در داده‌های راداری و کوچک‌بودن اندازه قطعات نمونه اندازه‌گیری‌شده زمینی را می‌توان از مهم‌ترین دلایل این امر به‌حساب آورد. در مطالعات پیشین درمورد جنگل‌های مدیترانه‌ای که مشابهت بسیاری با جنگل‌های زاگرس در ایران دارند (Marvie Mohajer, 2006)، قابلیت داده‌های راداری در طول موج باند C، برای مناطقی با زیست‌توده بالاتر از ۴۰۰ تن‌درهکتار مناسب ارزیابی شده (Laurin et al., 2018) و توان این داده‌ها در طول موج باند L، برای برآورد زیست‌توده روی‌زمینی جنگل نیز، مناسب دیده شده است (Behera et al., 2016). (Deng et al., 2014). باین‌حال، برای منطقه مورد مطالعه در این تحقیق با میانگین زیست‌توده ۱۰.۶۳

- Zagros Forests Decline in Lorestan Province**, Iranian Journal of Forest and Range Protection Research, 13(2).
- Baghdadi, N., Le Maire, G., Bailly, J.S., Osé, K., Nouvellon, Y., Zribi, M., Lemos, C. & Hakamada, R., 2014, **Evaluation of ALOS/PALSAR L-Band Data for the Estimation of Eucalyptus Plantations Above-Ground Biomass in Brazil**, IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 8(8), PP. 3802-3811.
- Behera, M.D., Tripathi, P., Mishra, B., Kumar, S., Chitale, V.S. & Behera, S.K., 2016, **Above-Ground Biomass and Carbon Estimates of Shorea Robusta and Tectona Grandis Forests Using QuadPOL ALOS PALSAR Data**, Advances in Space Research, 57(2), PP. 552-561.
- Burrows, W.H., Hoffmann, M.B., Compton, J.F., Back, P.V. & Tait, L.J., 2000, **Allometric Relationships and Community Biomass Estimates for Some Dominant Eucalypts in Central Queensland Woodlands**, Australian Journal of Botany, 48(6), PP. 707-714.
- Chang, J. & Shoshany, M., 2016, **Mediterranean Shrublands Biomass Estimation Using Sentinel-1 and Sentinel-2**, In 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS) (PP. 5300-5303), IEEE.
- Charlton, M.H., Docherty, R. & Hutchings, M.G., 1995, **Quantitative Structure-Sublimation Enthalpy Relationship Studied by Neural Networks, Theoretical Crystal Packing Calculations and Multilinear Regression Analysis**, Journal of the Chemical Society, Perkin Transactions 2, (11), PP. 2023-2030.
- تن درهکتار، نتایج به دست آمده از کاربرد داده راداری در طول موج باند C و روش های به کاررفته به تنهایی نتوانسته اثر اشباع شدگی داده در برآورد زیست توده در جنگل های شاخه زاد مورد نظر را بهبود دهد و منجر به شناسایی یک مدل برآورد کننده، با صحت قابل قبول، نشده است. از این رو، نمی توان نتایج این پژوهش را با نتایج پژوهش های دیگر مقایسه کرد. بر این اساس، به نظر می رسد، با بهبود کمی و کیفی این جنگل ها و افزایش موجودی سرپای جنگل، نتایج به دست آمده با داده ها و روش های مدل سازی بررسی شده در این تحقیق نیز بهبود یابد. پیشنهاد می شود، همچنان که در تحقیق چانگ و شوشانی (۲۰۱۶) تأثیر مثبت استفاده هم زمان از داده های نوری و راداری ماهواره سنتینل در برآورد زیست توده جنگل های مدیترانه ای نمایان شده است، این تأثیر در ادامه این تحقیق نیز، در مورد این منطقه، ارزیابی شود.

۵- منابع

- Amini, J. & Sadeghi, Y., 2013, **Optical and Radar Images in Modeling the Forests Biomass in North of Iran**.
- Amini, J. & Sumantyo, J.T.S., 2009, **Employing a Method on SAR and Optical Images for Forest Biomass Estimation**, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(12), PP. 4020-4026.
- Attarchi, S. & Gloaguen, R., 2014, **Improving the Estimation of Above-Ground Biomass Using Dual Polarimetric PALSAR and ETM+ Data in the Hyrcanian Mountain Forest (Iran)**, Remote Sensing, 6(5), PP. 3693-3715.
- Attarod, P., Sadeghi, S.M.M., Sarteshnizi, F.T., Saroei, S., Abbasian, P., Masihpoor, M., Kordrostami, F. & Dirikvandi, A., 2016, **Meteorological Parameters and Evapotranspiration Affecting the**

- Chen, L., Ren, C., Zhang, B., Wang, Z. & Xi, Y., 2018, **Estimation of Forest Above-Ground Biomass by Geographically Weighted Regression and Machine Learning with Sentinel imagery**, *Forests*, 9(10), P. 582.
- Deng, S., Katoh, M., Guan, Q., Yin, N. & Li, M., 2014, **Estimating Forest Above-Ground Biomass by Combining ALOS PALSAR and WorldView-2 Data: A Case Study at Purple Mountain National Park, Nanjing, China**, *Remote Sensing*, 6(9), PP. 7878-7910.
- Eini-Zinab, S., Maghsoudi, Y. & Sayedain, S.A., 2019, **Assessing the Performance of Indicators Resulting from Three-Component Freeman–Durden Polarimetric SAR Interferometry Decomposition at P-and L-band in Estimating Tropical Forest Above-Ground Biomass**, *International Journal of Remote Sensing*, 41(2), PP. 433-454.
- Galidaki, G., Zianis, D., Gitas, I., Radoglou, K., Karathanassi, V., Tsakiri–Strati, M., Woodhouse, I. & Mallinis, G., 2017, **Vegetation Biomass Estimation with Remote Sensing: Focus on Forest and Other Wooded Land over the Mediterranean Ecosystem**, *International Journal of Remote Sensing*, 38(7), PP. 1940-1966.
- Ghasemi, N., Sahebi, M.R. & Mohammadzadeh, A., 2012, **Biomass Estimation of a Temperate Deciduous Forest Using Wavelet Analysis**, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(2), PP. 765-776.
- Haddadi G., A., Sahebi, M.R. & Mansourian, A., 2011, **Polarimetric SAR Feature Selection Using a Genetic Algorithm**, *Canadian Journal of Remote Sensing*, 37(1), PP. 27-36.
- Heydari, M., Pourbabaei, H. & Esmailzadeh, O., 2015, **The Effects of Habitat Characteristics and Human Destructions on Understory Plant Species Biodiversity and Soil in Zagros Forest Ecosystem**, *Iranian Journal of Biology*, 28(3), PP. 535-548.
- Iranmanesh, Y., Talebi, K.S., Sohrabi, H., Jalali, S.G. & Hosseini, S.M., 2014, **Biomass and Carbon Stocks of Brant's Oak (*Quercus Brantii* Lindl.) in Two Vegetation Forms in Lordegan, Chaharmahal & Bakhtiari Forests**, *Iranian Journal of Forest and Poplar Research*, 22(4).
- Laurin, G.V., Balling, J., Corona, P., Mattioli, W., Papale, D., Puletti, N., Rizzo, M., Truckenbrodt, J. & Urban, M., 2018, **Above-Ground Biomass Prediction by Sentinel-1 Multi-temporal Data in Central Italy with Integration of ALOS2 and Sentinel-2 Data**, *Journal of Applied Remote Sensing*, 12(1), P. 016008.
- Marvie Mohajer M.R., 2006, **Silviculture**, Tehran, University of Tehran: 404.
- Namiranian, M., 2010, **Measurment of the Tree and Forest Biometry**, University of Tehran press.
- Nichol, J.E. & Sarker, M.L.R., 2010, **Improved Biomass Estimation Using the Texture Parameters of Two High-Resolution Optical Sensors**, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(3), PP. 930-948.
- Ramezani, M.R. & Sahebi, M.R., 2015, **Forest Biomass Estimation Using SAR and Optical Images**, *Journal of Geospatial Information Technology*, 3(1), PP. 15-26.
- Ronoud, G. & Darvishsefat, A.A., 2016, **Estimating Above-Ground Woody Biomass of *Fagus Orientalis* Stands in**

- Hyrcanian Forest of Iran Using Landsat 8 Satellite Data (Case Study: Khyroud Forest)**, A thesis of Master Student in Forest Science, University of Tehran.
- Santi, E., Paloscia, S., Pettinato, S., Fontanelli, G., Mura, M., Zolli, C., Maselli, F., Chiesi, M., Bottai, L. & Chirici, G., 2017, **The Potential of Multifrequency SAR Images for Estimating Forest Biomass in Mediterranean Areas**, Remote Sensing of Environment, 200, PP. 63-73.
- Shataee, S., Kalbi, S., Fallah, A. & Pelz, D., 2012, **Forest Attribute Imputation Using Machine-Learning Methods and ASTER Data: Comparison of k-NN, SVR and Random Forest Regression Algorithms**, International Journal of Remote Sensing, 33(19), PP. 6254-6280.
- Smola, A.J. & Schölkopf, B., 2004, **A Tutorial on Support Vector Regression**, Statistics and Computing, 14(3), PP. 199-222.
- Sohrabi, H. & Shirvani, A., 2012, **Allometric Equations for Estimating Standing Biomass of Atlantic Pistache (Pistacia Atlantica Var. Mutica) in Khojir National Park**, Iranian Journal of Forest, 4(1), PP. 55-64.
- Souza, D.V., Nievola, J.C., Santos, J.X., Wojciechowski, J., Gonçalves, A.L., Corte, A.P.D. & Sanquetta, C.R., 2019, **k-Nearest Neighbor Regression in the Estimation of Tectona G Randis Trunk Volume in the State of Pará, Brazil**, Journal of Sustainable Forestry, 38(8), PP. 755-768.
- Sukawattanavijit, C., Chen, J. & Zhang, H., 2017, **GA-SVM Algorithm for Improving Land-Cover Classification Using SAR and Optical Remote Sensing Data**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14(3), PP. 284-288.
- Vafaei, S., Soosani, J., Adeli, K., Fadaei, H. & Naghavi, H., 2017, **Estimation of Above-Ground Biomass Using Optical and Radar Images (Case Study: Nav-e Asalem Forests, Gilan)**, Iranian Journal of Forest and Poplar Research, 25(2).
- Vose, M.D., 1999. **The Simple Genetic Algorithm: Foundations and Theory**, Vol. 12, MIT press.
- Wang, X. & Ge, L., 2012, **Evaluation of Filters for ENVISAT ASAR Speckle Suppression in Pasture Area**.
- West, P.W. & West, P.W., 2009, **Tree and Forest Measurement**, Heidelberg: Springer.
- Wu, X. & Kumar, V. (eds.), 2009, **The Top Ten Algorithms in Data Mining**, CRC press.
- Yadav, B.K. and Nandy, S., 2015. Mapping aboveground woody biomass using forest inventory, remote sensing and geostatistical techniques. Environmental monitoring and assessment, 187(5), p.308.