

برآورد زیتوده و ذخیره کربن جنگل‌های مانگرو با استفاده از متغیرهای مستخرج از تصاویر پهپاد

مژده میرکی^۱، هرمز سهرابی^{۲*}، Markus Immitzer^۳

^۱ دکتری مدیریت جنگل، گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

m.miraki@modares.ac.ir

^۲ دانشیار گروه جنگلداری، دانشکده منابع طبیعی و علوم دریایی، دانشگاه تربیت مدرس

hsohrabi@modares.ac.ir

^۳ موسسه ژئوماتیک، دانشگاه منابع طبیعی و علوم زیستی، وین (BOKU)، اتریش

markusimmitzer@boku.ac.at

(تاریخ دریافت: خرداد ۱۴۰۲، تاریخ تصویب: مهر ۱۴۰۲)

چکیده

جنگل‌های مانگرو به عنوان بوم‌سازگان‌های کربن آبی مهم شناخته می‌شوند، زیرا نقش مهمی در ترسیب کربن در بین بوم‌سازگان‌های ساحلی دارند. بنابراین، برآورد دقیق زیتوده جنگل‌های مانگرو یک امر ضروری است. این در حالی است که ارزیابی میزان ذخیره کربن روی-زمینی در جنگل‌های مانگرو به اندازه‌گیری دقیق زیتوده درختان متکی است، که به طور سنتی، زمان‌بر و پرهزینه است. در این مطالعه با استفاده از تصویربرداری پهپاد مجهز به سنجنده رنگی واقعی و اندازه‌گیری ارتفاع و عرض تاج درختان و نمونه‌برداری و اندازه‌گیری کربن خاک در سه سایت جنگلی سیریک، قشم و خمیر، ذخیره کربن موجود در درختان و خاک مورد بررسی قرار گرفت. ایجاد موزاییک تصویر برای استخراج متغیر عرض تاج با استفاده از الگوریتم ساختار حرکت مینا و مدل ارتفاع تاج برای استخراج ارتفاع درختان با تفاضل دو لایه مدل رقومی زمین و مدل رقومی سطح به دنبال تصویربرداری در آبان ۱۴۰۰ انجام شد. بعد از برآورد مقدار زیتوده با توجه به دو متغیر قطر تاج و ارتفاع درختان، مقدار ذخیره کربن روی زمینی به دست آمده از اطلاعات استخراج شده از تصاویر پهپاد در سه سایت سیریک، خمیر و قشم به ترتیب برابر ۱۱/۶۳، ۷/۹۷ و ۹/۸۷ تن در هکتار به دست آمد. ذخیره کربن خاک نیز در دو عمق ۰ تا ۱۵ سانتیمتر و ۱۵ تا ۳۰ سانتیمتر با استفاده از روش والکلی-بلک اندازه‌گیری شد که مقدار ۶۷/۹۸، ۸۱/۹ و ۸۵ تن در هکتار و ۱۸۷/۲، ۱۳۳/۵۳ و ۱۱۳/۷ را برای سایت‌های سیریک، خمیر و قشم نشان داد. این تحقیق نشان می‌دهد که داده‌های پهپاد برای برآورد متغیرهای مربوط به تک‌پایه‌های درختی در جنگل-های مانگرو با شرایط عبور و مرور دشوار دارای قابلیت بالا بوده و متعاقب برآورد متغیرهای ارتفاع و عرض تاج، برآورد موجودی جنگل و ذخیره کربن بر پایه متغیرهای به دست آمده در جنگل‌های مانگرو نسبتاً همگن قابل انجام است. به‌ویژه به این دلیل که این بوم‌سازگان‌ها، محیط‌هایی هستند که اغلب دور، غیرقابل دسترس یا کار کردن در آن‌ها دشوار است.

واژگان کلیدی: مانگرو، ذخیره کربن، پهپاد، موزاییک تصویر، مدل ارتفاع تاج

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

جنگل‌های مانگرو در جهان ۱۰-۱۵ درصد از کل ذخیره کربن زیست‌بوم‌های ساحلی را تشکیل می‌دهند [۱] و می‌توانند مقادیر قابل توجهی کربن را در خاک و زیتوده خود ذخیره کنند [۲]. با این حال، زیست‌بوم‌های مانگرو بسیار حساس و شکننده هستند و در سال‌های اخیر، فشارهای ناشی از افزایش جمعیت و گسترش زمین‌های کشاورزی و توسعه صنعتی و شهری باعث تخریب بخش قابل توجهی از جنگل‌های مانگرو در جهان شده است [۳]. از این رو ارزیابی دقیق زیتوده به منظور مدیریت جنگل و درک نقش آن به عنوان منبع کربن، از اهمیت بالایی برخوردار است [۴].

جنگل‌های مانگرو به دلیل بهره‌وری بالا و میزان تنفس-کم، مقدار زیادی زیتوده و کربن آلی را برای مدت طولانی ذخیره می‌کنند. همچنین بوم‌سازگان‌های ساحلی، از جمله جنگل‌های مانگرو در برابر بوم‌سازگان‌های زمینی ۱۰ تا ۵۰ برابر قابلیت ترسیب کربن بیشتری دارند و در میان اکثر سیستم‌های سازنده، این جنگل‌ها می‌توانند تغییرات آب و هوایی را به طور موثر کاهش دهند. بنابراین، برآورد دقیق زیتوده زمینی از جنگل‌های مانگرو که باتوجه به سن و گونه‌های غالب متفاوت است، ضروری است [۵].

ارزیابی میزان ذخیره کربن روی زمینی در جنگل‌های مانگرو به اندازه‌گیری دقیق زیتوده درختان متکی است، که به طور سنتی شامل جمع‌آوری اطلاعات و اندازه‌گیری مستقیم از درختان و ارتباط آن با زیتوده با استفاده از روابط آلومتریک انجام می‌شود [۶]. با این حال، اطلاعات دقیق، قابل اعتماد و به موقع در مورد توزیع و پویایی جنگل‌های مانگرو در جهان به راحتی در دسترس نیست. این در حالی است که در دسترس بودن داده‌های سنجش از دور، پیشرفت در الگوریتم‌های پیش‌پردازش و پردازش، بهبود چشمگیر در محاسبات، داشتن تخصص در مدیریت داده-های سنجش از دور و افزایش آگاهی در مورد کاربرد محصولات سنجش از دور بسیار بهبود یافته است و این امر درک علمی ما را از تغییر صفات پوشش جنگل‌های مانگرو آگاه می‌سازد [۷]. علاوه بر محدودیت‌های ذکر شده در بالا، جنگل‌های مانگرو به طور معمول در مناطق دور افتاده و دشوار از نظر دسترسی قرار دارند. در نتیجه آماربرداری‌های میدانی برای این مناطق بسیار محدود می‌شود. با این وجود، نظارت منظم بر ساختار جنگل‌های مانگرو، از لحاظ

فلورستیکی و زیتوده برای مدیریت منابع و اطمینان از حفاظت موثر و استفاده پایدار لازم است [۵].

برآورد پارامترهای موجودی جنگل نیاز به اطلاعات دقیق برای تخمین زیتوده و کربن دارد. با این حال، بدست آوردن اطلاعات پارامترهای موجودی جنگل برای تخمین زیتوده و ذخایر کربن اغلب یک چالش عمده در جنگل‌های مانگرو است [۸]. علی‌رغم استفاده گسترده از تصاویر ماهواره‌ای و داده‌های لایدار [۹]-[۱۴] برای بازیابی پارامترهای ساختاری توده‌های جنگلی، استفاده از این داده‌ها با محدودیت‌هایی مواجه است. بسیاری از این کاستی‌ها مربوط به هزینه‌های بالای خرید تصاویر با وضوح بالا و سنجنده‌هایی مانند سنجنده لایدار، پردازش و مشکلات مربوط به بازیابی تصاویر با تراکم بالا برای بازسازی دقیق پارامترهای جنگل به ویژه در مناطق با تراکم بالای درختان است [۱۵].

اخیراً، استفاده از داده‌های سنجش از دور به طور خاص هواپیمای بدون سرنشین (UAV^۲) و تصاویر هوایی به دست آمده از سنجنده‌های متصل به پهپادها در برنامه‌ریزی و اجرای آماربرداری جنگل در مقیاس کوچک افزایش یافته است زیرا این داده‌ها می‌توانند به غلبه بر برخی از محدودیت‌های ذکر شده کمک کنند [۵]. استفاده از تصاویر پهپادها دارای مزایایی چون هزینه کم و انعطاف پذیری بالا می‌باشند. با توجه به قدرت تفکیک مکانی بالای تصاویر پهپاد می‌توان به شناسایی و برآورد پارامترهای مختلف گونه-های مانگرو پرداخت. مدیریت پیشرفته جنگل عمدتاً به اطلاعات مکانی جنگل برای حفظ گردش کار مستمر نیاز دارد و سنجش از دور مبتنی بر پهپاد، آینده‌ای امیدوار کننده در این زمینه را ارائه می‌دهد [۱۶]. سهولت جمع‌آوری داده-ها، کنترل آسان، انعطاف‌پذیری بالا، تفکیک مکانی و زمانی بالا و محیط کار ایمن، از دیگر مزایای سنجش از دور مبتنی بر پهپاد است [۱۷]. تصویربرداری فتوگرامتری که با الگوریتم ساختار حرکت مبنا (SfM)^۳ و تطبیق تصاویر متراکم پشتیبانی می‌شود، ابزاری بسیار جالب برای جمع‌آوری اطلاعات سه بعدی از اشیاء شده است [۱]. این فناوری توان بالایی در ارائه اطلاعات مکانی در مورد ویژگی‌های

۱ LiDAR

۲ Unmanned Aerial Vehicle

۳ Structure from Motion

بیوفیزیکی جنگل دارد زیرا امکان بررسی سریع‌تر مناطق بزرگ‌تر را در مقایسه با آماربرداری زمینی به روش سنتی فراهم نموده و می‌تواند تکنیک‌های سنتی آماربرداری جنگل را تکمیل کند [۷]. همچنین، پهپاد فتوگرامتری با قیمت ارزان و انعطاف‌پذیری بالا، رویکرد جمع‌آوری اطلاعات در مورد ساختار و موجودی جنگل را ارائه می‌دهد، بنابراین، به طور طبیعی علاقه به استفاده از چنین داده‌هایی افزایش پیدا می‌کند و این فن‌آوری و الگوریتم SfM با امکان تولید اطلاعات سه‌بعدی کاملاً دقیق از مجموعه تصاویر، می‌تواند ابزاری قدرتمند برای جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز کاربران باشد. [۱۸] با استفاده از هواپیمای بدون سرنشین به تخمین زیتوده روی زمینی زیست‌بوم‌های مانگرو پرداختند. در این مطالعه، با استفاده از داده‌های UAV-SfM، ارتفاع، قطر تاج-پوشش و زیتوده روی زمینی جنگل‌های مانگرو طبیعی و احیا شده در دو منطقه از سواحل جنوب شرقی استرالیا برآورد شد. از اندازه پنجره متغیر برای آشکارسازی پایه‌های درختی با دقت تشخیص ۸۰٪ استفاده کردند. روش‌های ارائه شده در این مطالعه به ارائه رویکرد سریع و مقرون به صرفه‌تر برای نظارت بر جنگل‌های مانگرو در مناطق وسیع‌تر نسبت به آماربرداری‌های روی زمینی به روش سنتی با حفظ موجودی جنگل، و امکان سنجش با هزینه کمتر و تکرار بیشتر با استفاده از روش UAV-SfM کمک می‌کند. [۱] به برآورد سنجش از دوری موجودی کربن روی زمینی (AGC۱) جنگل‌های مانگرو با استفاده از پهپاد در شمال خلیج شزن، واقع در جنوب چین پرداختند. در این مطالعه، کربن روی زمینی جنگل‌های مانگرو با استفاده از چهار متغیر گونه، ارتفاع تاج، شاخص‌های پوشش گیاهی و ویژگی‌های بافت، با استفاده از پهپاد ارزان قیمت تخمین زده شد. در این مطالعه سه مدل الگوریتم یادگیری ماشین جنگل تصادفی (RF۲)، رگرسیون برداری پشتیبان (SVR۳) و شبکه عصبی مصنوعی (ANN۴)، مقایسه شدند. نتایج نشان داد که مدلی که از هر چهار نوع متغیر استفاده می‌کند و مبتنی بر الگوریتم جنگل تصادفی است، تخمین کربن روی زمینی بهتری را ارائه می‌دهد. [۶] با استفاده از اندازه‌گیری‌های حاصل از تصاویر پهپاد با استفاده از دوربین رنگی واقعی

(RGB)، پتانسیل برآورد زیتوده درختان مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این مطالعه نشان داد که با استفاده از مدل‌هایی که از اندازه‌گیری‌های مبتنی بر تصاویر پهپاد مانند ارتفاع درخت و سطح تاج پوشش به دست می‌آید و پیش‌بینی مقدار قطر در ارتفاع برابر سینه، امکان استفاده از تصاویر مبتنی بر پهپاد برای اندازه‌گیری ویژگی‌های ساختاری درخت حرا *A. marina* و زیتوده وجود دارد. با توجه به تحقیقات ذکر شده داده‌های حاصل از تصاویر پهپاد برای تخمین بیوفیزیکی مربوط به موجودی جنگل و پارامترهای مانند ارتفاع، قطر تاج، تراکم، نوع گونه و زیتوده مناسب هستند [۱۹]. بنابراین از آنجا که تحقیقی در زمینه برآورد زیتوده درختان مانگرو با استفاده از پارامترهای قابل استخراج از تصاویر پهپاد در داخل کشور تاکنون انجام نشده است در تحقیق حاضر، با توجه به اهمیت خاص جنگل‌های مانگرو و لزوم بررسی این مهم، اندازه‌گیری متغیرهای بیوفیزیکی و برآورد زیتوده و ذخیره کربن با استفاده از تصاویر رنگی واقعی مبتنی بر پهپاد در جنگل‌های مانگرو انجام شد.

۲- روش انجام کار

۲-۱- منطقه مورد مطالعه

با توجه به این مهم که مجموعه جنگل‌های مانگرو به عنوان ذخیره‌گاه زیست‌کره مانگرو در استان هرمزگان واقع است، منطقه‌های مورد پژوهش در سه سایت در استان هرمزگان، مورد مطالعه قرار گرفت. زیست‌بوم اول قسمتی از جنگل‌های مانگرو در جزیره قشم با مساحت ۱۵ هکتار و در عرض جغرافیایی ۱° ۴۷' ۲۶° و در طول جغرافیایی ۵۰° ۴۵' ۵۵° شرقی، زیست‌بوم دوم در بندر خمیر با مساحت ۱۳ هکتار که در عرض جغرافیایی ۵° ۵۸' ۲۶° و در طول جغرافیایی ۵۰° ۳۷' ۵۵° شرقی قرار دارد. گونه غالب این جنگل‌ها، درخت حرا (*Avicennia Marina*) با بستر گل-آلود، غرقابی و شور است. زیست‌بوم سوم در رویشگاه سیریک با مساحت ۳۸ هکتار در عرض جغرافیایی ۲۲° ۱۹' ۲۶° و در طول جغرافیایی ۲۴° ۵' ۵۷° شرقی انتخاب شد که تنها رویشگاه چنندل (*Rhizophora Mucronata*) در ساحل جنوبی ایران است. موقعیت جغرافیایی سه رویشگاه در شکل ۱ نشان داده شده‌است.

۱ Above-ground carbon

۲ Random Forest

۳ Support Vector Regression

۴ Artificial Neural Network

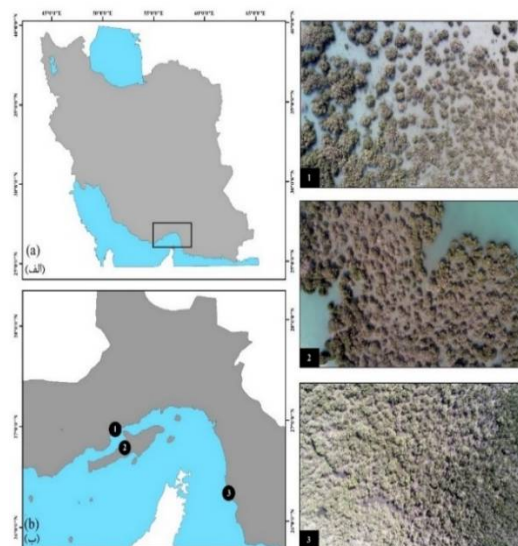
کاربری پهپاد انجام شد (DJI GS Pro). این نرم‌افزار قابلیت مدیریت پرواز ایمن‌تری دارد، و با توجه به پارامترهای مورد نیاز کاربر، مساحت منطقه مورد مطالعه، ارتفاع پرواز، درصد همپوشانی تصاویر، میزان تفکیک مکانی، زاویه چشمی دوربین، سرعت تصویربرداری و وضوح تصاویر را طراحی می‌کند. بعد از تنظیم کردن پارامترهای مورد نیاز تصویربرداری عملیات برداشت تصاویر به صورت کاملاً خودکار صورت گرفت. تصویربرداری بعد از تنظیم شبکه پرواز (طراحی شبکه پرواز در جهت شرقی-غربی جهت کاهش تاثیر سایه)، ارتفاع پرواز و همپوشانی در آبان ماه ۱۴۰۰ در ارتفاع پرواز ۱۰۰ متر در بازه زمانی ۱۲ الی ۱۴ ظهر و در روزهای آفتابی و تا حد امکان بدون وزش باد انجام شد. خلاصه پارامترهای پرواز در جدول ۱ نشان داده شده‌است.

جدول ۱- پارامترهای پرواز برای سه منطقه مورد مطالعه

نام منطقه	ارتفاع پرواز (متر)	زمان پرواز (دقیقه)	سرعت پرواز (متر بر ثانیه)	تعداد تصاویر	حذف شده	تعداد تصاویر نهایی
قشم	۱۰۰	۱۴۰۰/۰۸/۰۵	۶۰×۸۰	۵۵۳	۴۵	
خمیر	۱۰۰	۱۴۰۰/۰۸/۰۵	۶۰×۸۰	۵۱۲	۰	
سیریک	۱۰۰	۱۴۰۰/۰۸/۳۰	۶۰×۸۰	۷۴۰	۰	

۲-۳- پردازش تصاویر

برای پردازش در گام اول تمامی تصاویر به صورت دستی یک بار مورد ارزیابی قرار گرفتند و تصاویری که واضح یا از کیفیت مناسب برخوردار نبودند از مراحل پردازش حذف شدند. به طور مثال در سایت قشم، تعدادی از تصاویر به دلیل وجود سایه ابر، نامناسب تشخیص داده شدند و از مراحل بعدی پردازش حذف شدند. تصاویر باقیمانده در نرم‌افزار Agisoft PhotoScan v1.27 بازخوانی شدند. در مرحله اول تصاویر بر اساس مختصات هر عکس در کنار هم چیده شدند. پس از مرتب کردن تصاویر در کنار یکدیگر ابرنقاط پراکنده با استفاده از الگوریتم ساختار حرکت مبنا تولید شد. مراحل پردازش تصاویر به منظور تولید ابرنقطه متراکم بر اساس عملکرد "تنظیمات با صحت بالا" به این صورت که هر دو پیکسل در مرحله تولید ابر نقطه به عنوان یک نقطه در نظر گرفته شد، انجام گرفت. در



شکل ۱- چپ: موقعیت منطقه مورد مطالعه در ایران (الف)، موقعیت سه زیست‌بوم مانگرو در جزیره قشم، بندر خمیر و سیریک در استان هرمزگان (ب). راست: نمونه تصویر تاج پوشش گرفته شده از پهپاد در زیست‌بوم (۱) خمیر (۲) قشم (۳) سیریک

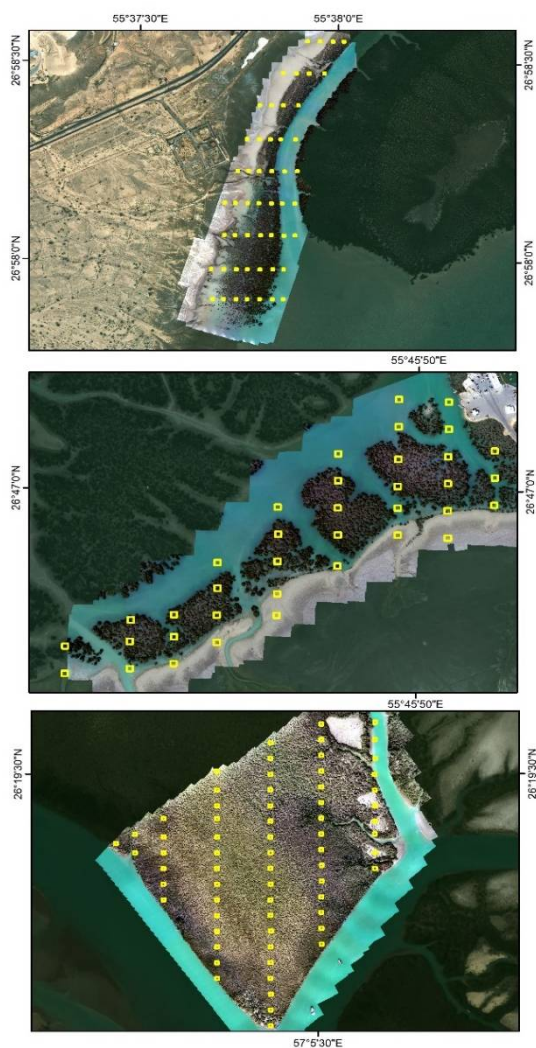
۲-۲- تصاویر رنگی واقعی به دست آمده از پهپاد

در این مطالعه برای برداشت تصاویر هوایی از پهپاد مدل Phantom 4 Pro با قابلیت ثبت تصاویر رنگی واقعی با فرمت JPG استفاده شد. این پهپاد از نوع پرنده‌های عمود پرواز است. وزن این وسیله ۱۳۸۰ گرم و باری که با خود حمل می‌کند، دوربینی چند طیفی با قابلیت ثبت عکس‌های ۲۰ مگاپیکسلی و ابعاد هرکدام از تصاویر برداشت‌شده به وسیله این سنجنده، ۴۰۰۰×۳۰۰۰ پیکسل است. لنز ۲۴ میلیمتری، سنسور CMOS یک اینچی، ایزو 100-12800 (عکس) و 100-6400 (ویدئو)، دیافراگم f/2.8-f/11، زاویه دید ۸۴ درجه و سرعت شاتر s(Mechanical) 8-1/2000 و s(Electric) 8-1/8000 است. سیستم موقعیت‌یابی جغرافیایی که این پهپاد از آن استفاده می‌کند، GPS^۱ و GLONASS^۲ می‌باشد؛ به همین دلیل، توانایی حفظ موقعیت در تمام طول پرواز و بازگشت به مکان شروع پرواز و اتمام عملیات را به صورت بسیار دقیق داراست [۲۰].

قبل از تصویربرداری، مسیر پروازی پهپاد روی منطقه مورد مطالعه مشخص گردید. این کار از طریق نرم‌افزار رابط

^۱ Global Positioning System

^۲ Global Navigation Satellite System

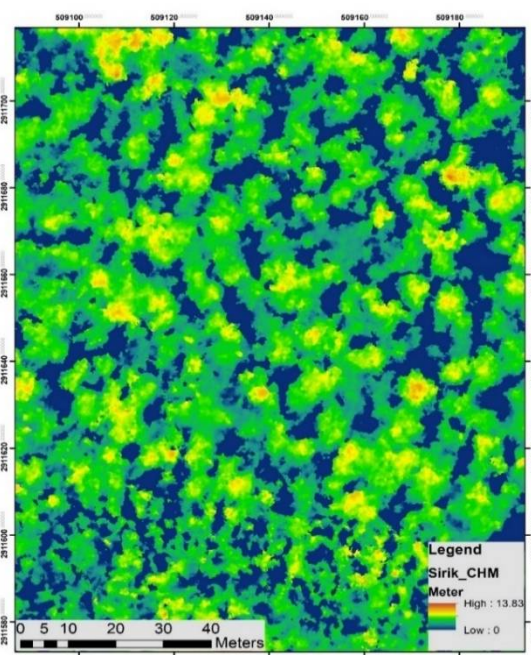


شکل ۳- شبکه آماربرداری بر روی موزاییک تصویر، از بالا به پایین: خمیر، قشم، سیریک، هر قطعه نمونه با یک مربع زرد نشان داده شده است. پس زمینه تصویر Bing

جهت برآورد زیتوده با استفاده از تصاویر به دست آمده از پهپاد از اندازه‌گیری و برآورد متغیرهای بیوفیزیکی ارتفاع [۲۷]، [۲۸]، عرض تاج [۲۹] و قطر در ارتفاع برابر سینه درختان [۳۰] استفاده می‌شود. در این مطالعه از ارتفاع و عرض تاج برای برآورد زیتوده درختان استفاده شد. اما با توجه به آب گرفتگی سطح زمین در هنگام تصویربرداری و اختلال در ایجاد یک مدل ارتفاعی با دقت لازم و همچنین قرار گرفتن درختان به صورت توده‌ای و عدم تشخیص تک درختان بر روی تصویر (شکل ۴)، اندازه‌گیری پارامترهای مربوط به هر تک درخت مانند ارتفاع و عرض تاج در هر جایی امکان‌پذیر نبود. به همین دلیل در قطعه نمونه‌هایی که امکان اندازه‌گیری وجود داشت اندازه‌گیری پارامترهای مورد نیاز انجام و در برآورد زیتوده درختان مورد استفاده قرار گرفت.

نهایت ابر نقاط متراکم تولید شده در تهیه مدل ارتفاع تاج^۱ (بررسی هندسه درختان) و موزاییک تصویر (بررسی طیفی درختان) مورد استفاده قرار گرفت.

مدل ارتفاع تاج از تفاضل مدل رقومی زمین^۲ و مدل رقومی سطح^۳ به دست خواهد آمد. مدل رقومی سطح یک لایه رستری است که هر پیکسل آن ارتفاع از سطح دریا را نشان می‌دهد. مدل رقومی زمین نیز یک لایه رستری است که عوارض ارتفاعی آن حذف گردیده و ارزش هر پیکسل معادل ارتفاع زمین در آن پیکسل می‌باشد [۲۱]–[۲۶]. شکل ۲ مدل ارتفاع تاج در سایت سیریک را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مدل ارتفاع تاج (CHM) در زیست‌بوم سیریک

۲-۴- برآورد زیتوده و کربن رویه زمینی

بعد از پردازش تصاویر، موزاییک تصویر هر سایت در نرم‌افزار QGIS 3.22.1 فراخوانی شد و شبکه آماربرداری مربوط به هر سایت طراحی گردید. موقعیت هر قطعه نمونه با ابعاد ۱۰ متر در ۱۰ متر و فواصل طولی ۱۵۰ و فواصل عرضی ۵۰ متر طراحی که در شکل ۳ نمایش داده شده است.

^۱Canopy Height Model (CHM)

^۲Digital Terrain Model (DTM)

^۳Digital Surface Model (DSM)

۲-۵- اندازه‌گیری کربن خاک

خاک عامل مهمی در ارائه خدمات اکوسیستمی است که نقش ذاتی در چرخه جهانی کربن، جداسازی کربن و تنظیم گازهای گلخانه‌ای دارد [۳۲] و با توجه به اهمیت ذاتی آن در مدیریت سطوح کربن و سایر مشارک‌های زیست محیطی خاک، این سیستم‌ها باید تا حد امکان مشاهده، مطالعه و حفظ شوند.

در این مطالعه نمونه‌برداری از خاک با استفاده از مغزگیر روسی^۱ انجام شد. در محل نمونه‌برداری، قبل از قرار دادن مغزگیر درون رسوب، مواد آلی زائد و برگ‌های زنده (در صورت وجود)، از روی سطح رسوب برداشته شدند. مغزگیر به صورت عمود در رسوب وارد شد و برای جلوگیری از متراکم شدن رسوبات، سرعت وارد کردن مغزگیر در خاک در همه مراحل یکسان بود. اگر مغزگیر تا عمق مشخص شده در رسوب فرو نمی‌رفت، محل نمونه برداری تغییر می‌کرد. چون ممکن بود یک ریشه بزرگ یا قطعاتی مانند پوسته صدف در مسیر آن باشد. نمونه‌های رسوب مغزی در محدوده عمق‌های ۰ تا ۱۵ سانتی‌متر و ۱۵ تا ۳۰ سانتی‌متر جمع‌آوری شد. زیرنمونه‌های رسوب، بسته به اندازه لوله مغزگیر و ترکیب‌بندی رسوب، معمولا دارای ۵ سانتی‌متر عمق و وزنی بین ۵ تا ۵۰ گرم می‌باشند. زیرنمونه‌ها از نقطه میانی بین محدوده عمق‌های مورد نظر جمع‌آوری شدند.



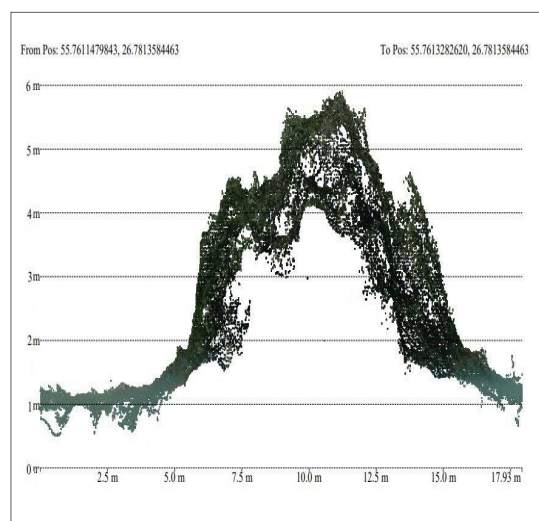
شکل ۶- زیر نمونه مغزگیر (به ارتفاع ۵ سانتی‌متر) از ستون مغز رسوب گرفته‌شده



شکل ۴- راست: قرارگیری درختان به صورت توده‌ای. چپ: آب -

گرفتگی سطح جنگل

شکل ۵ پروفیل تاج درخت حرا را بر روی ابر نقطه حاصل از الگوریتم ساختار حرکت مبنا نشان می‌دهد.



شکل ۵- پروفیل تاج درخت حرا با استفاده از ابر نقطه به دست آمده از الگوریتم ساختار حرکت مبنا

سپس ارتفاع درختان با استفاده از لایه CHM و عرض تاج درختان با استفاده از موزاییک تصویر در داخل هر قطعه نمونه در نرم‌افزار ArcMap 10.8 اندازه‌گیری و با استفاده از معادله زیتوده در رابطه ۱ [۱۸] برآورد زیتوده روی زمینی درختان انجام شد. برای تبدیل زیتوده به کربن نیز از ضریب تبدیل ۴۲ درصد [۳۱] استفاده شد.

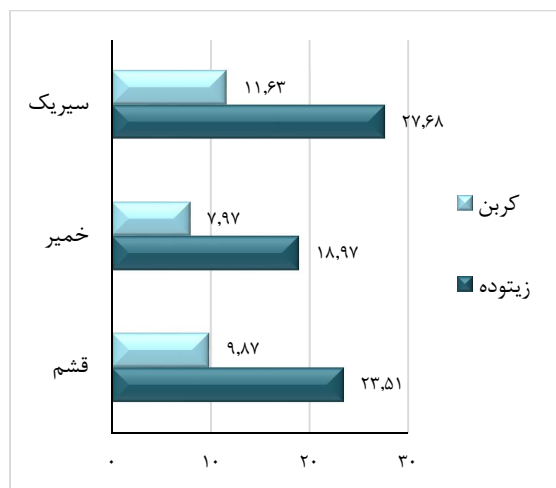
$$AGB = 1.8247 * (CD^2 * H)^{1.0202} \quad (1)$$

AGB = زیتوده روی زمینی

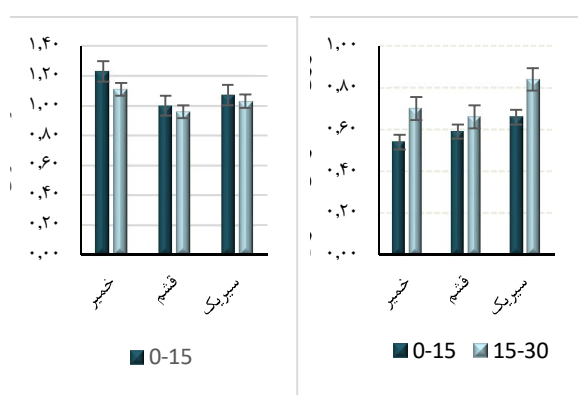
CD = عرض تاج

H = ارتفاع درختان

^۱ Russian pear corer

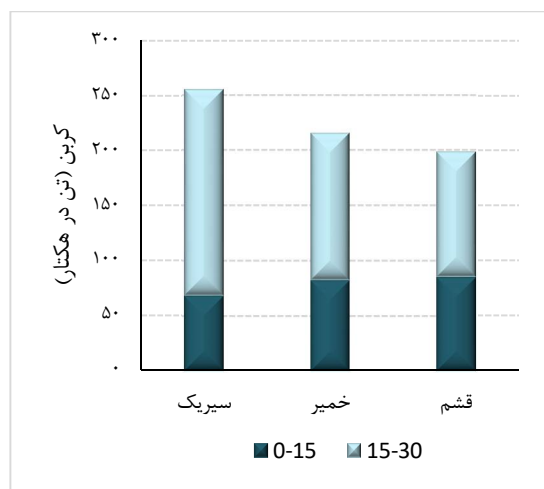


شکل ۷- برآورد زیتوده و کربن رویه زمینی در سه سایت مورد مطالعه



شکل ۸- درصد کربن خاک (سمت چپ)، وزن مخصوص ظاهری خاک (سمت راست) در سایت‌های مورد مطالعه

مطابق شکل ۹ در عمق ۱۵ تا ۳۰ سانتیمتری مقدار ذخیره کربن خاک بیشتری در هر سه سایت خمیر، قشم و سیریک مشاهده شد.



شکل ۹- مقدار ترسیب کربن در عمق‌های مختلف خاک در سه سایت قشم، خمیر و سیریک

برای کم کردن سرعت تجزیه مواد آلی و جلوگیری از فعالیت‌های میکروبی، نمونه‌ها باید در محیط خنک (4°C) نگهداری شوند. نمونه‌ها در صورت امکان باید ظرف مدت ۲۴ ساعت منجمد و یا خشک شوند. قبل از محاسبه میزان کربن در نمونه‌های خشک شده قطعات بزرگ مانند سنگ و شاخه درختان، پوسته صدف‌ها و یا قسمت‌هایی از صخره‌های مرجانی کربن حذف شدند. مقدار کربن آلی رسوبات با استفاده از روش والکلی بلک^۱ سنجیده شد [۳۳]. در نهایت مقدار ذخیره کربن خاک بر حسب تن در هکتار با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$Cs = 10 \times OC (\%) \times Bd \times e$$

Cs = کربن آلی (تن بر هکتار)

OC (%) = درصد کربن آلی

Bd = وزن مخصوص ظاهری خاک (گرم بر سانتیمتر مکعب)

e = عمق نمونه‌برداری (سانتیمتر)

۳- نتایج و بحث

اندازه‌گیری قطر تاج و ارتفاع درخت برای همه درختان قابل مشاهده در موزاییک تصویر در سایت خمیر در ۲۶ قطعه نمونه، در سایت قشم در ۲۲ قطعه نمونه و در سایت سیریک در ۳۶ قطعه نمونه انجام شد.

در سایت خمیر مقدار زیتوده کل همان‌گونه که در شکل ۷ نمایش داده شده است برابر $18/97$ تن در هکتار برآورد گردید (اشتباه معیار $1/9$ و اشتباه آماربرداری $3/91$). برآورد زیتوده در سایت قشم نیز با اشتباه معیار $1/17$ و اشتباه آماربرداری $2/43$ برابر با $23/51$ تن در هکتار محاسبه شد. برآورد زیتوده در سایت سیریک نیز برابر $27/68$ تن در هکتار با اشتباه معیار $1/59$ و اشتباه آماربرداری $3/31$ به دست آمد.

در منطقه خمیر ۶ نمونه خاک، در قشم ۱۰ نمونه و در سیریک ۷ نمونه خاک برداشت شد که با توجه به شکل ۸ بیشترین مقدار کربن آلی در هر سه منطقه در عمق ۱۵-۰ سانتیمتری خاک اندازه‌گیری شد در حالیکه وزن مخصوص ظاهری خاک در عمق ۱۵-۳۰ سانتیمتری مقدار بالاتری را نشان داد.

^۱ Walkley-Black

این مطالعه پتانسیل استفاده از تصاویر رنگی واقعی به دست آمده از پهپاد را برای برآورد زیتوده و کربن درختان در جنگل‌های مانگرو در دو بخش اصلی بررسی کرد. بخش اول شامل برآورد زیتوده و کربن روی زمینی جنگل (درختان حرا) و بخش دوم در برگیرنده اندازه‌گیری کربن خاک و برآورد مقدار ترسیب کربن خاک در جنگل‌های مانگرو بود.

برای برآورد زیتوده درختان حرا در این مطالعه از روابط آلومتریک که متداول‌ترین و پرکاربردترین روش برای اندازه‌گیری زیتوده هستند [۳۴] استفاده شد. بدین منظور تصاویر رنگی واقعی برای تولید یک مدل سه بعدی و اورتوموزائیک به دست آورده شد که امکان اندازه‌گیری پارامترهای یک درخت را فراهم می‌کرد. سپس پتانسیل پیش‌بینی زیتوده روی زمین مستقیماً از اندازه‌گیری‌های مبتنی بر تصویر پهپاد و روش‌های مبتنی بر آلومتری بررسی شد.

اندازه‌گیری ارتفاع با استفاده از مدل ارتفاع تاج و اندازه‌گیری عرض تاج از موزائیک تصویر با دقت بسیار بالا انجام شد که با توجه به عدم تفاوت معنی‌دار داده‌های زمینی و داده‌های حاصل از تصاویر، می‌توان از متغیر قطر تاج به عنوان یک پیش‌بینی‌کننده مهم زیتوده درختان [۳۵] استفاده کرد. در واقع بهترین معادلات آلومتریک برای برآورد زیتوده درختان مانگرو با استفاده از اندازه‌گیری‌های فیزیکی از درختان با تکیه بر متغیر قطر در ارتفاع برابر سینه به دست آمده‌اند که برآورد و اندازه‌گیری قطر تنه درختان چندشاخه با استفاده از تصاویر پهپاد قابل انجام نبود. اما برآورد زیتوده روی زمینی درختان مانگرو با استفاده از قطر تاج و ارتفاع نیز با دقت قابل قبول در سایر مطالعات گزارش شده است [۲۸], [۱۸], [۳۲], [۳۶]. البته [۶] در مدلی که برای پیش‌بینی زیتوده مستقیماً از اندازه‌گیری‌های درختی مبتنی بر تصویر پهپاد استفاده کرده بودند، سطح تاج پوشش را یک متغیر پیش‌بینی‌کننده خوب معرفی نکردند.

در کل زمان کوتاه مورد نیاز برای آماربرداری از یک عرصه جنگلی یکی از مزایای اصلی استفاده از پهپاد برای پایش پوشش گیاهی است. جمع‌آوری داده‌های پهپاد، از جمله برنامه‌ریزی و راه‌اندازی پرواز، بیش از ۱ ساعت در یک سایت نمونه‌برداری طول نمی‌کشد. این پرواز در یک مدت زمان کوتاه، مساحت چند هکتاری از جنگل را

پوشش می‌دهد. در حالیکه همین کار را به صورت سنتی با کمک سه نفر با تجربه کار میدانی و در چند روز می‌توان انجام داد [۲۸].

مقدار کل کربن خاک در تجزیه و تحلیل ما مشابه [۲] بود که نشان می‌دهد منطقه مورد مطالعه دارای ذخائر غنی کربن خاک در یک متر فوقانی می‌باشد. ذخیره کربن خاک بیشتر از مقادیر گزارش شده برای کشورهای مانند جنوب شرقی استرالیا (۵۷-۹۴ تن در هکتار)، اوکیناوا ژاپن (۵۷ تن در هکتار)، ویتنام شمالی (۶۸ تن در هکتار) و پالاوان فیلیپین (۱۷۳ تن در هکتار) و کمتر از ذخیره کربن در شمال سولاوسی اندونزی (۸۲۲ تن در هکتار) بود. همچنین سایت سیریک نسبت به دو منطقه دیگر دارای ذخیره کربن بالاتری بود که احتمالاً آن را باید به رسوب سالیانه بالا نسبت داد چرا که تقریباً ۵۳۵۰ تن در کیلومتر مربع در سال از رسوبات توسط رودخانه گز منتقل شده و به جنگل حرا سیریک تخلیه می‌شود [۳۷].

با در نظر گرفتن زیتوده و ذخیره کربن خاک، جنگل‌های مانگرو حجم قابل‌توجهی کربن را در خود ذخیره می‌کنند و با شناخت روزافزون این موضوع که اقدام مؤثر بر روی تغییرات آب و هوا مستلزم ترکیبی از کاهش و حذف انتشار گازهای گلخانه‌ای است، حفاظت، تقویت و بازیابی مخازن کربن طبیعی یک اولویت مهم است که لزوم حفاظت پوشش درختی و خاک‌های جنگلی مانگرو را پیش از پیش نمایان می‌کند. با توجه به این اولویت برآورد سریع و کم-هزینه مقدار زیتوده می‌تواند کمک موثری در پایش و مدیریت بهینه این بوم‌سازگان داشته باشد که با توجه به نتایج تحقیق، برآورد مقدار زیتوده با استفاده از داده‌های مستخرج از پهپاد با نتایج قابل قبول امکان‌پذیر می‌باشد.

سپاسگزاری

از صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور که این تحقیق به عنوان بخشی از طرح شماره ۹۹۰۲۵۴۶۳ با عنوان "برآورد کربن اندوخته در روی زمین و خاک جنگل‌های مانگرو در خلیج فارس با استفاده از داده‌های زمینی و تصویربرداری پهپاد" مورد حمایت این صندوق انجام شده‌است، قدردانی می‌شود.

منابع

- [۱] Li, Z., Zan, Q., Yang, Q., Zhu, D., Chen, Y., and Yu, S. (2019). Remote Estimation of Mangrove Aboveground Carbon Stock at the Species Level Using a Low-Cost Unmanned Aerial Vehicle System. *Remote Sensing J.* 11:9.1018.
- [۲] Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G., Solvik, K., Adame, M. F., Benson, L., Bukoski, J. J., Carnell, P., Cifuentes-Jara, M., Donato, D., Duncan, C., Eid, E. M., Ermgassen, P. Z., Lewis, C. J. E., Macreadie, P. I., Glass, L., Gress, S., Jardine, S. L., Jones, T. G., and Landis, E. (2018). A Global Map of Mangrove Forest Soil Carbon at 30 m Spatial Resolution. *Environmental Research Letters J.* 13:5.055002.
- [۳] Näsi, R., Honkavaara, E., Päivi, L.-S., Blomqvist, M., Litkey, P., Hakala, T., Viljanen, N., Kantola, T., Tanhuanpää, T., and Holopainen, M. (2015). Using UAV-Based Photogrammetry and Hyperspectral Imaging for Mapping Bark Beetle Damage at Tree-Level. *Remote Sensing J.* 7:11.15467-15493.
- [۴] Amini, J., and Sadeghi, Y. (2012). Optical and Radar Satellite Images in Forests Biomass Modeling in Northern Iran. *Remote Sensing & GIS J.* 4:4.70-82. (In Persian)
- [۵] Zhu, Y., Liu, K., Myint, S. W., Du, Z., Li, Y., Cao, J., Liu, L., and Wu, Z. (2020). Integration of GF2 Optical, GF3 SAR, and UAV Data for Estimating Aboveground Biomass of China's Largest Artificially Planted Mangroves. *Remote Sensing J.* 12:12.2039.
- [۶] Jones, A. R., Raja Segaran, R., Clarke, K. D., Waycott, M., Goh, W. S. H., and Gillanders, B. M. (2020). Estimating Mangrove Tree Biomass and Carbon Content: A Comparison of Forest Inventory Techniques and Drone Imagery. *Frontiers in Marine Science J.* 6:784.
- [۷] Giri, C. (2016). Observation and Monitoring of Mangrove Forests Using Remote Sensing: Opportunities and Challenges. *Remote Sensing J.* 8:9.783.
- [۸] Ibharim, N., Mustapha, M., Lihan, T., and Mazlan, A. (2015). Mapping Mangrove Changes in the Matang Mangrove Forest Using Multi Temporal Satellite Imageries. *Ocean & Coastal Management J.* 114:64-76.
- [۹] Fatoyinbo, T., Feliciano, E., Lagomasino, D., Lee, S., and Trettin, C. (2018). Estimating Mangrove Aboveground Biomass from Airborne LiDAR Data: A Case Study from the Zambezi River Delta. *Environmental Research Letters J.* 13:2. 025012.
- [۱۰] Motlagh, M. G., Kafaky, S. B., Mataji, A., and Akhavan, R. (2020). Estimation of Forest Above Ground Biomass in Hyrcanian Forests Using Satellite Imagery. *J of Env. Sci. Tech.* 22:5.1-13.
- [۱۱] Hirata, Y., Tabuchi, R., Patanaponpaiboon, P., Pongparn, S., Yoneda, R., and Fujioka, Y. (2013). Estimation of Aboveground Biomass in Mangrove Forests Using High-Resolution Satellite Data. *J of forest research.* 19:1.34-41.
- [۱۲] Jachowski, N., Michelle, R., Quak, S., Friess, D., Duangnamon, D., Webb, E., and Ziegler, A. (2013). Mangrove Biomass Estimation in Southwest Thailand Using Machine Learning. *Applied Geography J.* 45: 11-21.
- [۱۳] Pereira, F. S., Kampel, M., Soares, M. L. G., Estrada, G. C. D., Bentz, C., and Vincent, G. (2018). Reducing Uncertainty in Mapping of Mangrove Aboveground Biomass Using Airborne Discrete Return Lidar Data. *Remote Sensing J.* 10:4.637.
- [۱۴] Hamdan, O., Khairunnisa, M., Ammar, A., Hasmadi, I., and Aziz, H. (2013). Mangrove carbon stock assessment by optical satellite imagery on jstor. *Tropical Forest Science J.* 54-65.
- [۱۵] Díaz-Varela, R., de la Rosa, R., León, L., and Zarco-Tejada, P. (2015). High-Resolution Airborne UAV Imagery to Assess Olive Tree Crown Parameters Using 3D Photo Reconstruction: Application in Breeding Trials. *Remote Sensing J.* 7:4. 4213-4232.
- [۱۶] Birdal, A., Avdan, U., and Türk, T. (2017). Estimating Tree Heights with Images from an Unmanned Aerial Vehicle. *Geomatics, Natural Hazards and Risk J.* 8:2.1144-1156.
- [۱۷] Mohan, M., Silva, C. A., Klauberg, C., Jat, P., Catts, G., Cardil, A., Hudak, A. T., and Dia, M. (2017). Individual Tree Detection from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Derived Canopy Height Model in an Open Canopy Mixed Conifer Forest. *Forests J.* 8:9.1-17.
- [۱۸] Navarro, A., Young, M., Allan, B., Carnell, P., Macreadie, P., and Ierodiaconou, D. (2020). The Application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) to Estimate above-Ground Biomass of Mangrove Ecosystems. *Remote Sensing*

- of Environment J. 242:111747.
- [۱۹] Iglhaut, J., Cabo, C., Puliti, S., Piermattei, L., Connor, J., and Rosette, J. (2019). Structure from Motion Photogrammetry in Forestry: A Review. *Current Forestry Reports J.* 5:3. 55–68.
 - [۲۰] Kabiri, K., Rezai, H., and Moradi, M. (2020). A Drone-Based Method for Mapping the Coral Reefs in the Shallow Coastal Waters – Case Study: Kish Island, Persian Gulf. *Earth Science Informatics J.* 13:4. 65–74.
 - [۲۱] Panagiotidis, D., Abdollahnejad, A., Surový, P., and Chiteculo, V. (2016). Determining Tree Height and Crown Diameter from High-Resolution UAV Imagery. *International J of Remote Sensing.* 38:8.2392–2410.
 - [۲۲] Tanhuanpaa, T., Saarinen, N., Kankare, V., Nurminen, K., Vastaranta, M., Honkavaara, E., Karjalainen, M., Yu, X., Holopainen, M., Hyyppä, J., Tanhuanpää, T., Saarinen, N., Kankare, V., Nurminen, K., Vastaranta, M., Honkavaara, E., Karjalainen, M., Yu, X., Holopainen, M., and Hyyppä, J. (2016). Evaluating the Performance of High-Altitude Aerial Image-Based Digital Surface Models in Detecting Individual Tree Crowns in Mature Boreal Forests. *Forests J.* 7:12.143.
 - [۲۳] Goldbergs, G., Shaun Levick, S., Edwards, A., Goldbergs, G., Maier, S., Levick, S., and Edwards, A. (2018). Efficiency of Individual Tree Detection Approaches Based on Light-Weight and Low-Cost UAS Imagery in Australian Savannas. *Remote Sensing J.* 10:2.161.
 - [۲۴] Fankhauser, K., Strigul, N., and Gatzliolis, D. (2018). Augmentation of Traditional Forest Inventory and Airborne Laser Scanning with Unmanned Aerial Systems and Photogrammetry for Forest Monitoring. *Remote Sensing J.* 10:10.1–17.
 - [۲۵] Daryaei, A., Sohrabi, H., Atzberger, C., and Immitzer, M. (2020). Fine-Scale Detection of Vegetation in Semi-Arid Mountainous Areas with Focus on Riparian Landscapes Using Sentinel-2 and UAV Data. *Computers and Electronics in Agriculture J.* 177:105686.
 - [۲۶] Miraki, M., Sohrabi, H., Fatehi, P., and Kneubuehler, M. (2021). Individual Tree Crown Delineation from High-Resolution UAV Images in Broadleaf Forest. *Ecological Informatics J.* 61:101207.
 - [۲۷] Peña, J., I de Castro, A., Torres-Sanchez, J., Andújar, D., San Martín, C., Dorado, J., Fernández-Quintanilla, C., and López-Granados, F. (2018). Estimating Tree Height and Biomass of a Poplar Plantation with Image-Based UAV Technology. *AIMS Agriculture and Food J.* 3:3. 13–23.
 - [۲۸] Otero, V., Van De Kerchove, R., Satyanarayana, B., Martínez-Espinosa, C., Fisol, M. A. Bin, Ibrahim, M. R. Bin, Sulong, I., Mohd-Lokman, H., Lucas, R., and Dahdouh-Guebas, F. (2018). Managing Mangrove Forests from the Sky: Forest Inventory Using Field Data and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery in the Matang Mangrove Forest Reserve, Peninsular Malaysia. *Forest Ecology and Management J.* 411:35–45.
 - [۲۹] Guerra-Hernandez, C., Silva, C., Soares, B., Gonzalez-Ferreiro, S., and Varela, D. (2019). Predicting Growing Stock Volume of Eucalyptus Plantations Using 3-D Point Clouds Derived from UAV Imagery and ALS Data. *Forests J.* 10:10. 905.
 - [۳۰] Lu, J., Wang, H., Qin, S., Cao, L., Pu, R., Li, G., and Sun, J. (2020). Estimation of Aboveground Biomass of Robinia Pseudoacacia Forest in the Yellow River Delta Based on UAV and Backpack LiDAR Point Clouds. *International J of Applied Earth Observation and Geoinformation.* 86:102014.
 - [۳۱] Mahmoudi, M., Pourebrahim, S., Danehkar, A., and Etemadi. H. (2021). Determination of the Biomass Allometry Equation and Carbon Calculation of Avicennia Marina Shrub in the Nayband Bay. *J of Aqua. Eco* 1:11.26–35. (In Persian)
 - [۳۲] Shaltout, K. H., Ahmed, M. T., Alrumman, S. A., Ahmed, D. A., and Eid, E. M. (2021). Standing Crop Biomass and Carbon Content of Mangrove Avicennia Marina (Forssk.) Vierh. along the Red Sea Coast of Saudi Arabia. *Sustainability J.* 13:24.13996.
 - [۳۳] Walkley, A., and Black, I. A. (1934). An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil science J.* 37:1. 29-38.
 - [۳۴] Abib, S., and Chandani, A. (2012). A Pilot Study for the Estimation of above Ground Biomass and Litter Production in Rhizophora Mucronata Dominated Mangrove Ecosystems in the Island of Mauritius. *Coastal Developpment J.* 16:1.40–49.
 - [۳۵] Owers, C. J., Rogers, K., and Woodroffe, C. D. (2018). Spatial Variation of Above-Ground Carbon Storage in Temperate Coastal Wetlands. *Estuarine, Coastal and Shelf Science J.* 210:55–67.

- [۳۶] Fu, W., and Wu, Y. (2011). Estimation of Aboveground Biomass of Different Mangrove Trees Based on Canopy Diameter and Tree Height. *Procedia Environmental Sciences J.* 10: 89–94.
- [۳۷] Askari, M., Homaei, A., Kamrani, E., Zeinali, F., and Andreetta. A. (2021). Estimation of Carbon Pools in the Biomass and Soil of Mangrove Forests in Sirik Azini Creek, Hormozgan Province (Iran). *Environmental Science and Pollution Research J.* 29:16 . 23712–23720.