

## افزایش تراکم ابر نقاط لایدار هوابرد با استفاده از آنالیز موج پیوسته

مسعود بابادی<sup>\*</sup>، مهران ستاری<sup>۲</sup><sup>۱</sup> کارشناس ارشد سنجش از دور - گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده مهندسی عمران، حمل و نقل - دانشگاه

اصفهان

masoud.babadi92@trn.ui.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده مهندسی عمران، حمل و نقل - دانشگاه اصفهان

sattari@eng.ui.ac.ir

(تاریخ دریافت بهمن ۱۳۹۶، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۷)

## چکیده

در سال‌های اخیر، سیستم‌های جاروب‌کننده لیزری (لایدار) تبدیل به یکی از قدرتمندترین ابزار به منظور اندازه‌گیری‌های مربوط به سطح زمین و مدل‌سازی آن تبدیل شده‌اند. با ظهور سیستم‌های ماهواره‌ای و هوایی لایدار، امکان استخراج اطلاعات و پارامترهای مرتبط با ساختار عمودی عوارض، به خصوص درختان، فراهم شد، در حالی که قبل‌تر، این کار بوسیله داده‌های غیرفعال سنجش از دوری مانند تصاویر امکان‌پذیر نبود. ابر نقاط حاصل از این سنجنده‌ها، اطلاعات دقیقی را از ویژگی‌های هندسی و فیزیکی عوارض موجود در مسیر حرکت لیزر و توزیع عمودی آنها ارائه می‌کند. از کاربردهای مربوط به این سیستم‌ها می‌توان به کاربرد آنها در جنگل‌داری و اندازه‌گیری پارامترهای جنگل، بدست آوردن مدل رقومی زمین با دقت ارتفاعی بالا، تعیین عمق دریاها و تعیین ضخامت یخ‌های قطبی، مدل‌سازی ساختمان‌های شهری، شناسایی پل‌ها و خطوط برق، نقشه‌برداری خطوط ساحلی و معادن روباز و طبقه‌بندی پوشش‌های زمینی اشاره کرد. به دلیل اینکه خروجی سنجنده‌های لایدار اولیه (سیستم‌های لایدار گسسته) صرفاً ابر نقطه بوده است، محدودیت‌هایی در برخی از کاربردهای آن وجود دارند. برای مثال تشخیص گونه‌های درختی و استخراج درختان منفرد در جنگل‌های متراکم با استفاده از این داده‌ها بسیار مشکل و در بسیاری از موارد امکان‌پذیر نبوده است. از سال ۲۰۰۴، سیستم‌های تجاری جاروب‌کننده لیزری هوایی جدیدی با نام سیستم‌های لایدار موج پیوسته ظاهر شد. با امکان ثبت اطلاعات موج پیوسته‌ی بازگشتی به طور کامل توسط جاروب‌کننده‌های لایدار در سال‌های اخیر، ضمن برطرف کردن بخشی از نقاط ضعف سیستم‌های گسسته‌ی لایدار مانند تراکم پایین نقاط، با دراختیار گذاشتن خصوصیات موج برگشتی نظیر دامنه و شدت قله‌های ثبت شده، امکان تفکیک و استخراج تک‌درختان در جنگل‌های متراکم، طبقه‌بندی گونه‌های مختلف درختی و طبقه‌بندی عوارض با دقت بالاتری فراهم شد. یکی از چالش‌های مربوط به این داده‌ها، نحوه‌ی تجزیه امواج بازگشتی و استخراج ابر نقاط و اطلاعات اضافی مربوط به این داده‌ها است. اگرچه در ایران تحقیقات به نسبت خوبی بر روی استفاده از داده‌های لایدار گسسته و کاربرد آنها در مدیریت جنگل و مدل‌سازی ساختمان‌های شهری صورت گرفته است، ولی به جرات می‌توان گفت هنوز داده‌های لایدار موج پیوسته و نحوه‌ی پردازش و تجزیه‌ی آنها یک موضوع ناشناخته است که از مهمترین دلایل آن می‌توان به در دسترس نبودن این داده‌ها، عدم شناخت کافی به ماهیت این نوع داده‌ها، کمبود نرم‌افزارهای مربوط به پردازش آن‌ها و در اختیار قرار ندادن روش‌های پردازش این داده‌ها توسط شرکت‌های سازنده‌ی آن اشاره کرد. این تحقیق بر آن است تا نحوه‌ی استخراج اطلاعات از داده‌های خام موج پیوسته‌ی لایدار هوابرد را به صورت ع ملی نشان دهد و نتایج حاصل از استخراج اطلاعات از داده‌های موج پیوسته را با ابر نقطه‌ی حاصل از سیستم لایدار مقایسه کند.

واژگان کلیدی: سیستم‌های لایدار موج پیوسته، تجزیه‌ی امواج بازگشتی، تولید ابرنقاط، تولید ویژگی‌های لایدار

\* نویسنده رابط

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، سیستم‌های جاروب‌کننده‌ی لیزری که به اسم سیستم‌های لایدار (LiDAR) نیز شناخته می‌شوند، به ابزاری قدرتمند به منظور اندازه‌گیری‌های مربوط به سطح زمین و مدل‌سازی آن تبدیل شده است. داده‌ی حاصل از این سیستم‌های فعال<sup>۲</sup>، برتری زیادی نسبت به سیستم‌های غیرفعال<sup>۳</sup> در بسیاری از کاربردهای سنجش از دوری دارند. از کاربردهای این داده‌ها می‌توان به کاربرد آن در جنگل‌داری، اندازه‌گیری پارامترهای جنگل و طبقه‌بندی درختان، بدست آوردن مدل رقومی زمین با دقت ارتفاعی بالا، عمق سنجی، مدل‌سازی ساختمان‌های شهری، شناسایی پل‌ها و خطوط برق، نقشه‌برداری خطوط ساحلی و معادن روباز، مانیتور کردن دیواره‌های رودخانه‌ها و طبقه‌بندی پوشش‌های زمینی اشاره کرد<sup>۱، ۲</sup>. در بسیاری از زمینه‌ها در حوزه‌ی سنجش از دور، به خصوص در مورد پوشش‌های گیاهی مانند اندازه‌گیری مدل ارتفاعی درختان، اندازه‌گیری قطر ساقه‌ی درختان و تخمین حجم چوب، استفاده از داده‌های حاصل از سیستم‌های غیرفعال سنجش از دوری مانند تصاویر چندطیفی و ابر طیفی بسیار مشکل و در اکثر مواقع غیر ممکن است. داده‌های لایدار با توجه به اطلاعاتی که در مورد ساختار ارتفاعی اشیاء در اختیار کاربران قرار می‌دهند، پتانسیل بالایی در اندازه‌گیری ساختار قائم در کنار ساختار افقی آنها، به خصوص در مورد پوشش‌های گیاهی را دارند<sup>۳، ۴</sup>.

جاروب‌کننده‌های لیزری از نظر سکوی حمل‌کننده‌ی آنها به سه دسته‌ی زمینی، هوایی و فضایی تقسیم بندی می‌شوند و کاربردهای اختصاصی متفاوتی نیز دارند<sup>۵</sup>. جاروب‌کننده‌های لیزری هوایی<sup>۴</sup>، که تمرکز این تحقیق نیز بر روی این سیستم‌ها است، یک تکنیک فعال سنجش از دوری است که اندازه‌گیری‌های دقیقی را از فضای بین جاروب‌کننده‌ی لیزری و توپوگرافی سطح زمین فراهم می‌آورد. خروجی این سیستم‌ها بیشتر به شکل ابر نقاط سه-بعدی نمایش داده می‌شوند که دارای دقت ارتفاعی بالایی است (۱/۱ < متر). بسته به شرایط و هندسه‌ی سطح مورد اندازه‌گیری، به ازای هر موج ارسال توسط سیستم لایدار،

یک تا چند قله‌ی بازگشتی که هر کدام مربوط به یک شی در مسیر اشعه‌ی لیزر است می‌تواند ثبت شود. سیستم‌های جاروب‌کننده‌ی لیزری بخاطر داشتن این قابلیت و همچنین دلیل اینکه برخلاف تکنیک‌های فتوگرامتری و غیر فعال سنجش از دوری، در آن واحد با هر اشعه‌ی ارسالی می‌توانند هم ساختار ارتفاعی درختان و هم زمین واقع در زیر آن را اندازه‌گیری کنند، به خصوص در کاربردهای مربوط به پوشش‌های جنگلی، بسیار مورد توجه هستند<sup>۱</sup>.

سیستم‌های لایدار از نظر داده‌ی خروجی به دو دسته-ی سیستم‌های لایدار گسسته<sup>۵</sup> و لایدار موج پیوسته<sup>۶</sup> تقسیم می‌شوند<sup>۶</sup>. خروجی سیستم‌های لایدار اولیه‌ی گسسته صرفاً ابر نقطه بوده است و فقط یک نمایش هندسی کلی را از منطقه‌ی مورد نظر ارائه می‌دهند و تراکم آنها نیز با توجه به آنالیز لحظه‌ای آن، در اکثر مواقع قابل قبول نبوده است. محققان زیادی الگوریتم‌های اتوماتیک متعددی را برای طبقه‌بندی نقاط<sup>۷</sup>، بازسازی و مدل‌سازی شهری<sup>۸، ۹</sup> و اندازه‌گیری پارامترهای جنگل<sup>۱۰</sup> ارائه داده‌اند. بیشتر این تحقیقات بر پایه‌ی هندسه‌ی ابر نقاط لایدار است و کمتر همراه با شدت ثبت شده توسط دستگاه برای این نقاط است.

از سال ۲۰۰۴، سیستم‌های تجاری جاروب‌کننده‌ی لیزری هوایی جدیدی به نام لایدار موج پیوسته ظاهر شد و در اختیار کاربران قرار گرفت<sup>۱۱</sup>. این دستگاه‌ها قابلیت ثبت موج کامل برای اشعه‌ی بازگشتی لیزر را دارند، در نتیجه علاوه بر اندازه‌گیری فاصله، خصوصیات فیزیکی اشیاء قرار گرفته در ردپای<sup>۱۲</sup> این سیستم‌ها نیز می‌تواند با آنالیز امواج بازگشتی بدست آیند. با امکان ثبت اطلاعات موج پیوسته توسط جاروب‌کننده‌های لایدار در سال‌های اخیر، ضمن برطرف کردن بخشی از نقاط ضعف سیستم‌های گسسته‌ی لایدار در ارتباط با تراکم نقاط، با دراختیار گذاشتن خصوصیات موج برگشتی نظیر دامنه و شدت، استفاده از این سیستم‌ها بیش از پیش مورد توجه محققان به خصوص محققان سنجش از دوری قرار گرفته است<sup>۱۱</sup>.

تحقیقات زیادی در زمینه‌ی استخراج اطلاعات از داده‌های لایدار گسسته و استفاده از آنها صورت گرفته است، ولی در زمینه‌ی لایدار موج پیوسته برای رسیدن به این

<sup>۵</sup> Describe LiDAR

<sup>۶</sup> Full Waveform LiDAR

<sup>۷</sup> Foot print: مساحتی که هر اشعه‌ی لیزر در بر می‌گیرد.

<sup>۱</sup> Light Detection And Ranging

<sup>۲</sup> Active

<sup>۳</sup> Passive

<sup>۴</sup> Aerial Laser Scanner

زمین برخورد می‌کنند. در سیستم لایدار گسسته، این محاسبات به صورت آنی و توسط خود سیستم انجام می‌شود ولی در سیستم‌های موج پیوسته، امکان این پردازش‌ها توسط خود کاربر نیز وجود دارد [۱].

## ۲-۲- فرمول‌های اندازه‌گیری شدت موج بازگشتی لایدار

معادله‌ی استاندارد لایدار، از معادله‌ی رادار بدست می‌آید. این معادله فرایند پردازش شدت موج بازگشتی را با در نظر گرفتن ویژگی‌های آشکارساز، هدف و همچنین قدرت امواج ارسالی و بازگشتی در نظر می‌گیرد [۱۳]. معادله‌ی مذکور می‌تواند به صورت یک انتگرال بیان شود [1]:

$$P_r(t) = \frac{D^2}{4\pi\lambda^2} \int_0^H \frac{\eta_{sys}\eta_{atm}}{R^4} P_t \left( t - \frac{2R}{v_g} \right) \sigma(R) dR \quad (1)$$

که در آن  $t$  زمان،  $D$  قطر دیافراگم اپتیک گیرنده،  $P_r$  قدرت دریافتی،  $P_t$  قدرت ارسالی،  $\lambda$  طول موج ارسالی،  $H$  ارتفاع پرواز،  $R$  فاصله‌ی سیستم تا هدف،  $\eta_{sys}$  و  $\eta_{atm}$  به ترتیب فاکتورهای انتقال اتمسفریک و سیستمی،  $v_g$  سرعت گروهی اشعه لیزر و  $\sigma(R) dR$  مقطع عرضی موثر هستند [۱۴]. قدرت موج دریافتی همچنین می‌تواند به صورت مجموع سهم  $N$  هدف و با در نظر گرفتن خصوصیات آنها بیان شود [۱]:

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N P_{r,i}(t) * \eta_{sys}(t) * \eta_{atm}(t) \quad (2)$$

که  $P_{r,i}(t)$  قله‌ی مربوط به  $i$ امین شیء است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{r,i}(t) = \frac{D^2}{4\pi\lambda^2} \int_{R_i-\Delta R}^{R_i+\Delta R} \frac{1}{R^4} P_t \left( t - \frac{2R}{v_g} \right) \sigma_i(R) dR \quad (3)$$

که  $R_i$  فاصله‌ی میانگین،  $[R_i + \Delta R, R_i - \Delta R]$  بازه-ی مکانی و  $\sigma_i(R)$  مقطع عرضی بازگشتی موثر است.

## ۲-۳- سیستم‌های لایدار گسسته

اولین جاروب‌کننده‌های لیزری هوایی گسسته‌ی موجود تجاری، برای هر موج ارسالی تنها یک قله‌ی بازگشتی و در نتیجه یک نقطه را فراهم می‌آوردند. اگر تنها یک عارضه در هر ردپای سیستم وجود داشته باشد،

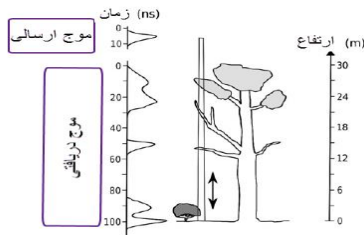
اهداف نسبت به استفاده از صرف ابر نقاط، تحقیقات نسبتاً کمتری صورت گرفته است. به جرات میتوان گفت هنوز داده‌های لایدار موج پیوسته و نحوه‌ی پردازش و تجزیه‌ی آنها در ایران یک موضوع ناشناخته است و از مهمترین دلایل آن میتوان به در دسترس نبودن این داده‌ها، عدم شناخت کافی به ماهیت این نوع داده‌ها که ناشی از در دسترس نبودن آن است، کمبود نرم‌افزارهای مربوط به پردازش آنها و در اختیار قرار ندادن روش‌های پردازش این داده‌ها توسط شرکت‌های سازنده‌ی آنها اشاره کرد. این تحقیق بر آن است تا نحوه‌ی استخراج اطلاعات از داده‌های خام موج پیوسته‌ی لایدار هوابرد را به صورت عملی نشان دهد و نتایج حاصل از استخراج اطلاعات از داده‌های موج پیوسته را با ابر نقطه‌ی حاصل از سیستم لایدار مقایسه کند. روند ادامه‌ی مطالب در این پژوهش به این صورت است: در بخش دوم اصول فیزیکی سیستم‌های لایدار و تفاوت بین سیستم‌های لایدار گسسته و موج پیوسته ارائه می‌شود، در بخش سوم مراحل تبدیل امواج بازگشتی لایدار به ابر نقاط شرح داده می‌شود، در بخش چهارم منطقه و داده‌ی مطالعاتی معرفی می‌شود، در بخش پنجم نتایج و بحث و بررسی پیرامون پیاده سازی مراحل ذکر شده در فصل سوم ارائه می‌شود و نهایتاً در بخش ششم نتایج نهایی بیان می‌شوند.

## ۲- معرفی سیستم‌های لایدار

در این بخش اصول فیزیکی سیستم‌های لایدار به اختصار شرح داده می‌شوند و در ادامه سیستم‌های لایدار گسسته و موج پیوسته معرفی و تفاوت آنها بیان می‌شود.

### ۲-۱- اصول فیزیکی سیستم‌های لایدار

اصول فیزیکی جاروب‌کننده‌های لیزری هوایی بر مبنای ارسال اشعه‌های لیزری از یک سکوی هوایی و اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت اشعه‌ی لیزر و در نتیجه، محاسبه‌ی فاصله‌ی بین سیستم لایدار تا سطح زمین و مختصات سه-بعدی ابرنقاط حاصل از آن است [۱۲]. با توجه به طول موج ارسالی، موج الکترومغناطیسی منتشر شده می‌تواند با ذرات جو برخورد کند و یا از آنها عبور و فقط به سطح زمین برخورد کند؛ اما در مورد سیستم‌های لایدار توپوگرافی این امواج عمدتاً به اشیاء طبیعی یا مصنوعی متعلق به سطح

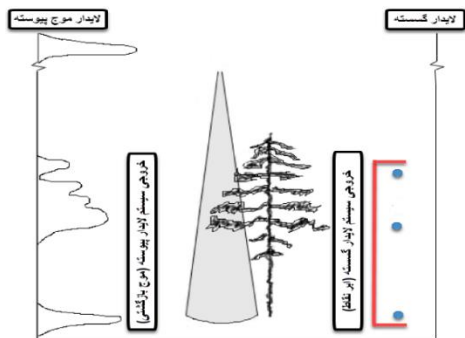


شکل ۱- نمونه ای از موج ارسالی و بازگشتی ثبت شده توسط یک سیستم موج پیوسته لایدار

تفاوت‌های زیادی برای سیستم‌های لایدار گسسته و موج پیوسته در تحقیقات ذکر شده است که چند نمونه از مهم‌ترین آنها در جدول ۱ ارائه شده و تفاوت آنها از نظر داده‌های خروجی نیز در شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- تفاوت داده ای لایدار گسسته و موج پیوسته [۱۹]

مزایا	معایب
<p>داده‌های موج پیوسته</p> <p>داده‌های گسسته</p>	<p>داده‌های موج پیوسته</p> <p>داده‌های گسسته</p>
<p>مزایا</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ارائه‌ی جزئیات بیشتر در مورد ساختار ارتفاعی، شیب و سختی سطح</li> <li>- قابلیت کنترل بیشتر حجم داده‌ها</li> <li>- محدودیت کمتر در تعداد اهداف شناسایی شده در هر موج</li> <li>- پردازش سریع‌تر</li> <li>- انعطاف پذیری و کنترل بیشتر در پردازش و تفسیر داده‌ها</li> <li>- وجود ابزارهای زیاد به منظور پردازش داده‌ها</li> <li>- امکان تعریف روش استفاده شده به منظور شناسایی قله‌ها</li> <li>- پردازش دقیق‌تر داده‌ها</li> </ul>	<p>معایب</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- افزایش حجم داده‌ها نسبت به داده‌های گسسته</li> <li>- زمان‌برتر بودن پردازش داده‌ها</li> <li>- رزولوشن ارتفاعی پایین‌تر</li> <li>- شناسایی نشدن اهدافی با فاصله‌ی کمتر از یک متر</li> <li>- موجود نبودن ابزار متنوع (مخصوصاً رایگان) برای پردازش این داده‌ها</li> <li>- روش شناسایی قله به سازندگان سیستم بستگی دارد و کاربر هیچ حق انتخابی در آن ندارد.</li> </ul>



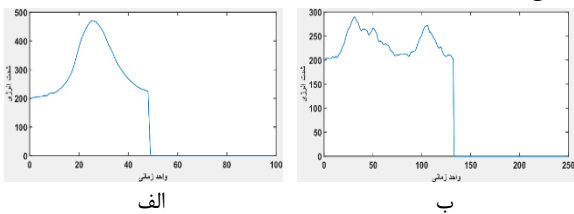
شکل ۲- تفاوت خروجی سیستم‌های لایدار گسسته و موج پیوسته [۱۸]

ثبت یک قله‌ی تنها برای هر موج ارسالی مناسب و کافی است، ولی در بسیاری از موارد، مانند پوشش‌های گیاهی، ممکن است چندین عارضه در مسیر حرکت اشعه‌ی لیزر موجود باشد. سیستم‌های جاروب‌کننده‌ی لیزری چند پالسی یا چند قله‌ای گسسته، برای ثبت بیش از یک قله طراحی شدند که به طور معمول قله‌های اول و آخر را ثبت و ذخیره می‌کردند، ولی برخی از این سیستم‌ها قادر به ثبت و ذخیره‌ی تا شش قله‌ی بازگشتی از هر تک موج بازگشتی هستند. برای سیستم‌های چند قله‌ای گسسته، شناسایی قله‌ها به صورت آنی بر روی موج بازگشتی انجام می‌شود. سیستم آشکارساز مربوط به این دستگاه‌ها، موج پیوسته‌ی بازگشتی را به چندین قله‌ی زمانی، که هر کدام مربوط به یک عارضه در مسیر حرکت موج ارسالی هستند، تبدیل می‌کند و مختصات مکانی آنها را محاسبه می‌کند. روش‌های شناسایی قله‌ی زیادی وجود دارند، ولی سازندگان سیستم‌های لایدار هیچ اطلاعاتی را در مورد روش پیاده سازی شده بر روی سیستم‌های سخت افزاری-شان ارائه نمی‌دهند، این در حالی است که تعداد و مکان قله‌های بالقوه‌ی ثبت شده به روش شناسایی قله‌ها بستگی دارد [۱۵، ۱۶].

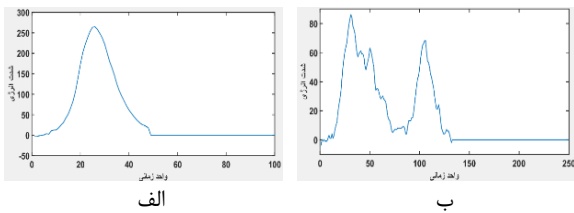
## ۲-۴- سیستم‌های لایدار موج پیوسته

آنالیز شکل موج بازگشتی، امکان توسعه‌ی روش‌های پردازش پیشرفته‌ی امواج را فراهم می‌آورد که قابلیت اعتماد، دقت و تعداد قله‌های شناسایی شده را افزایش می‌دهد. علاوه بر این، تکنولوژی جدید سیستم‌های موج پیوسته‌ی لایدار که کل موج بازگشتی را ذخیره و بعنوان خروجی در اختیار کاربران قرار می‌دهد، امکان کنترل بیشتری را برای تفسیر فرایند اندازه‌گیری‌های فیزیکی می‌دهد و از طرفی اطلاعات بیشتری را در مورد خصوصیات ساختاری و فیزیکی سطح مورد نظر (خصوصیات بازتابی و هندسی)، فراهم می‌آورد [۱۷]. امواج ارسالی و بازگشتی لایدار به صورت دنباله‌ای از شدت‌های ثبت شده در یک بازه‌ی زمانی هستند. معمولاً امواج لایدار به دلیل محدودیت حجم برای ثبت آنها، هر یک نانو ثانیه رقوم‌سازی و ثبت می‌شوند [۱۸]. نمونه‌ای از موج ارسالی و بازگشتی لایدار در شکل ۱ نشان داده شده است. هر کدام از قله‌ها در این شکل مربوط به یکی از عوارضی است که اشعه‌ی لیزر به آن برخورد کرده است.

وقوع، که بخشی از آن می‌تواند به دلیل وجود اختلالات<sup>۲</sup> باشد، وجود داشته باشد. در امواج بازگشتی لایدار استفاده شده در این تحقیق، افت‌های انرژی قابل صرف نظر کردن بود و برای ادامه‌ی فرایند این مقادیر حذف شدند. به منظور حذف این انحرافات، نیاز به مقادیر دقیق آن‌ها است که این مقادیر بعنوان خروجی دستگاه و اطلاعات جانبی وجود دارند، به عبارت دیگر برای انجام این کار کفایت مقادیر انحراف تیره‌ی متناظر با هر موج بازگشتی یا ارسالی از مقادیر آن موج کم شوند. امواج نشان داده شده در شکل ۴، پس از حذف انرژی اضافی مربوط به انحراف تیره در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.



شکل ۴- نمونه‌ای از داده‌های خام موج پیوسته‌ی لایدار. (الف) موج ارسالی (ب) موج بازگشتی



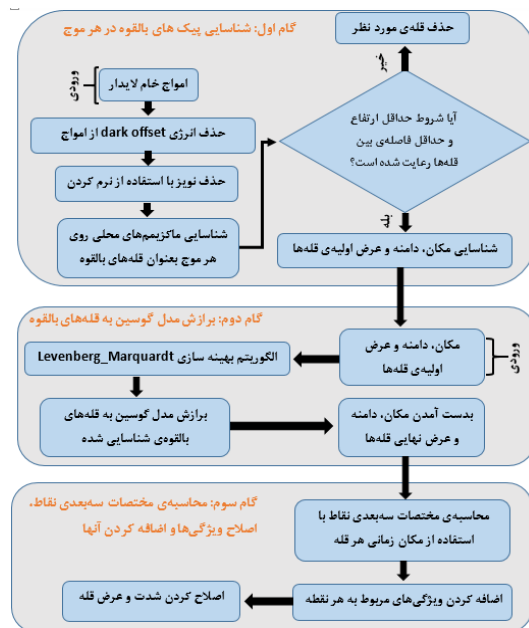
شکل ۵- نمونه‌ای از داده‌های موج پیوسته‌ی لایدار پس از حذف انرژی dark offset. (الف) موج ارسالی (ب) موج بازگشتی

هر داده‌ی سنجش از دوری به هر حال شامل مقداری اختلالات می‌باشد. داده‌های لایدار هوایی نیز از این قاعده مستثنی نیستند. به منظور حل این مشکل می‌توان از قوانین حد آستانه‌ای و همچنین از نرم کردن<sup>۳</sup> امواج استفاده کرد. این حقیقت غیر قابل انکار است که نرم کردن هر نوع داده‌ای، به هر حال بخشی از اطلاعات موجود در آن را از بین می‌برد ولی در بسیاری از مواقع چاره‌ای جز این وجود ندارد و در بسیاری از پژوهشات در این زمینه، قبل از اینکه قله‌های بالقوه بر روی امواج شناسایی شوند، فرایند نرم کردن امواج بازگشتی اجرا می‌شود [۲۱، ۲۲]. در این تحقیق، با استفاده از نرم کردن تا حدودی اختلالات مربوط به امواج بازگشتی حذف شدند و

<sup>۲</sup> Noise  
<sup>۳</sup> Smoothing

### ۳- مراحل تبدیل امواج بازگشتی لایدار به ابر نقاط

مراحل اجرایی به سه گام اصلی تقسیم می‌شوند: (۱) شناسایی قله‌های بالقوه در هر موج (۲) برازش مدل گوسین به قله‌های بالقوه‌ی شناسایی شده (۳) محاسبه‌ی مختصات سه‌بعدی نقاط، اضافه کردن ویژگی‌ها و اصلاح آنها. نمودار گردش‌ی این مراحل در شکل ۳ ارائه شده است و این سه گام در بخش بعد به تفسیر شرح داده شده است.



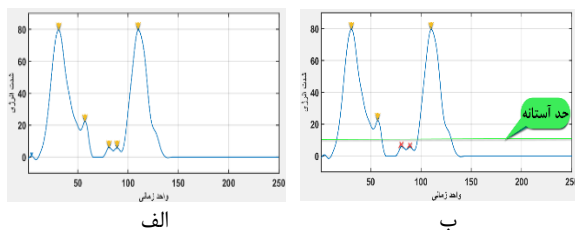
شکل ۳- نمودار گردش‌ی مراحل تبدیل امواج بازگشتی به ابر نقاط

### ۳-۱- گام اول: شناسایی قله‌های بالقوه در هر موج

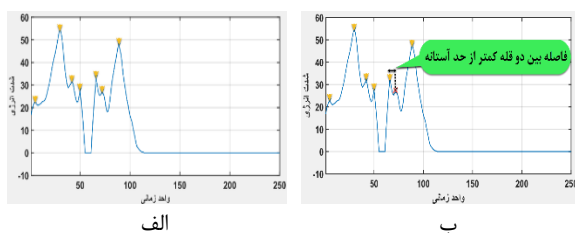
همانطور که ذکر شد، هر موج بازگشتی لایدار به صورت دنباله‌ای از انرژی‌های ثبت شده برای اشعه‌ی بازگشتی در هر زمان است و هر قله در هر موج، نشان دهنده‌ی یک عارضه در مسیر حرکت اشعه‌ی لیزر است [۲۰]؛ بنابراین به منظور تولید ابر نقاط، ابتدا قله‌های بالقوه در هر موج باید شناسایی شوند. نمونه‌ای از شکل موج ارسالی و بازگشتی در شکل ۴ ارائه شده است. همانگونه که از این شکل مشخص است، هر شکل موج ارسالی یا بازگشتی، شامل مقداری انرژی اضافی به نام انحراف تیره<sup>۱</sup> است. دلیل این مقدار انرژی اضافی که برای امواج اختصاص داده شده است این است که فضایی برای نشان دادن افت‌های انرژی در صورت

<sup>۱</sup> Dark offset

هستند. در مورد شرط دوم (حداقل فاصله‌ی بین قله‌ها)، حد‌آستانه‌ی مربوط به فاصله‌ی بین قله‌ها نیز به صورت تجربی در نظر گرفته می‌شود که در این پژوهش این حد‌آستانه برابر ۳ نانو ثانیه در نظر گرفته شد. این حد-آستانه به این خاطر استفاده شد که قله‌هایی که بیش از حد به یکدیگر نزدیک هستند، احتمال اینکه متعلق به اختلالات باشند بالا است. نمونه‌هایی از حذف قله‌های نامناسب بوسیله‌ی این دو شرط در شکل ۷ و شکل ۸ ارائه شدند. بدست آوردن مقادیر مذکور برای این دو حد‌آستانه و اجرای این دو شرط، با بررسی امواج بازگشتی متعدد و همچنین نتایج حاصل از تولید ابر نقاط با استفاده از مقادیر مختلف این حد آستانه‌ها صورت گرفت. مانند آنچه در مورد نرم کردن امواج توضیح داده شد، در صورت کاهش مقادیر این حد آستانه‌ها، قله‌ها و در نتیجه نقاطی تولید می‌شوند که مربوط به عوارض واقعی نیستند (به عبارت دیگر مربوط به اختلالات هستند) و در صورت افزایش این مقادیر، قله‌های بالقوه‌ی زیادی حذف می‌شوند و دیگر قابل تشخیص نیستند.



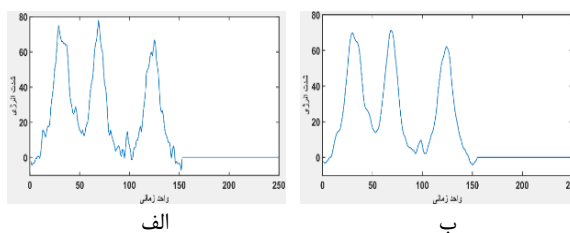
شکل ۷- نمونه‌ای از تشخیص اشتباه قله در موج پیوسته‌ی لایدار در صورت در نظر نگرفتن حد آستانه‌ی مربوط به ارتفاع قله. الف) تشخیص قله‌ها بدون در نظر گرفتن حد آستانه (ب) تشخیص قله‌ها با در نظر گرفتن حد آستانه



شکل ۸- نمونه‌ای از تشخیص اشتباه قله در موج پیوسته‌ی لایدار در صورت در نظر نگرفتن حد آستانه مربوط به فاصله‌ی بین قله‌ها. الف) تشخیص قله‌ها بدون در نظر گرفتن حد آستانه (ب) تشخیص قله‌ها با در نظر گرفتن حد آستانه

در نتیجه با استفاده از این شروط و شناسایی ماکزیمم‌های محلی، ویژگی‌های اولیه‌ی مکان، دامنه و عرض قله‌های بالقوه شناسایی می‌شوند. نمونه‌ای از

به این منظور از یک فیلتر میانگین متحرک (یک فیلتر پایین‌گذر) استفاده شد. ضرایب این فیلتر از نسبت تقسیم مقادیر اصلی موج در یک محدوده‌ی تعیین شده بدست می‌آیند. محدوده‌ای که برای هر نقطه این فیلتر بر آن اعمال می‌شود، به صورت سعی و خطا و با بررسی امواج بازگشتی متعدد برابر با ۹ در نظر گرفته شد [۲۳]. این مقدار به این دلیل انتخاب شد که اگر مقداری کمتر انتخاب شود، به حدی اختلالات در انتخاب قله‌های بالقوه تاثیر می‌گذارد که حتی استفاده از حد‌آستانه‌های مربوط به ارتفاع و فاصله‌ی بین قله‌ها نیز دیگر قادر به حذف قله‌های اشتباه نخواهند بود و در نتیجه باعث انتخاب شدن قله‌های اشتباه و در نتیجه تولید نقاطی می‌شود که مربوط به عوارض واقعی نیستند، همچنین اگر مقداری بیشتر انتخاب شود، قله‌های بالقوه نیز نرم می‌شوند و دیگر در مرحله‌ی بعد قابل شناسایی نیستند. نمونه‌ای از موج بازگشتی نرم شده در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمونه‌ای از نرم کردن داده‌های موج پیوسته‌ی لایدار. الف) قبل از نرم کردن (ب) پس از نرم کردن

به منظور شناسایی قله‌های بالقوه، ابتدا ماکزیمم‌های محلی بر روی هر موج بازگشتی شناسایی می‌شوند، ولی از طرفی تمام ماکزیمم‌های محلی شناسایی شده، قله‌های بالقوه نیستند و در نتیجه شروطی را باید در نظر بگیریم تا منجر به حذف قله‌های نامناسب و پیدا شدن قله‌های بالقوه شوند. شروطی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند شامل: (۱) حداقل ارتفاع یا دامنه‌ی قله‌های انتخاب شده و (۲) حداقل فاصله‌ی بین قله‌ها هستند (می‌توان آنها را بعنوان حد آستانه‌هایی به منظور حذف اختلالات باقی مانده نیز در نظر گرفت). در مورد شرط اول (حداقل ارتفاع)، این حد‌آستانه در مورد هر سیستم و با توجه به شرایط برداشت متفاوت است و در این پژوهش به صورت تجربی مقدار ۱۵ برای آن در نظر گرفته شد. این حد‌آستانه به منظور حذف قله‌هایی است که انرژی آنها کمتر از یک مقدار مجاز است و مربوط به اختلالات

عناصر استخراج شده توسط روش‌های پردازش موج معمولاً شامل تعداد قله‌های معنی‌دار، فاصله‌ی آنها تا جاروب‌کننده‌ی لیزری و پارامترهای تابع مدل هستند و اکثراً از یک تابع تنها برای مدل کردن همه‌ی قله‌های موجود در امواج استفاده می‌شود [۱]. مدل کردن با تجزیه‌ی یک شکل موج  $y = f(x_i)$  به مجموع  $n$  جزء صورت می‌گیرد [22]:

$$y_i = \sum_{k=1}^n \phi_k(x_i) + b_i \quad (4)$$

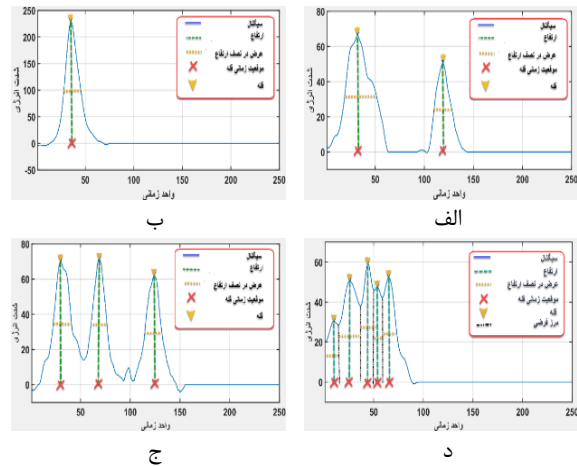
که  $f$  مدل شکل موج،  $\phi$  مدل قله با مجموعه‌ای از پارامترهای  $\theta$  مربوط به تابع مدل  $(f = \sum_k \phi_k)$ ،  $i = 1, \dots, N$  دنباله‌ای از نقاط یکنواخت در موج،  $y = \{y_i\}$ ،  $i = 1, \dots, N$  شکل موج برای هر نقطه (انرژی موج دریافتی در هر زمان) و  $b$  مربوط به اختلالات است. یک مدل مرتبط برای مدل کردن قله‌ها خصوصاً برای زمانی مناسب است که پارامترهای مربوط به آن بخواهند برای قطعه‌بندی ابر نقاط سه‌بعدی استفاده شوند. مطالعات زیادی به منظور نشان دادن مساله‌ی مدل کردن شکل موج‌ها بوسیله‌ی مدل‌های پارامتریک انجام شده است [۱۱، ۲۴، ۲۵].

شکل موج لایدار شامل پیچش<sup>۱</sup> بین موج ارسال شده-ی لایدار (که فرض می‌شود شکلی گوسین با عرضی اصلاح شده دارد) و تابع پراکندگی سطح است و اغلب بعنوان تابعی از مدل گوسین در نظر گرفته می‌شود [۱۴]. سیگنال دریافتی عمدتاً به صورت ترکیبی از توزیع‌های گوسینی در نظر گرفته می‌شود و این نوع مدل کردن پر استفاده‌ترین نوع پردازش داده‌های لایدار موج پیوسته است. عبارت تحلیلی تابع گوسین به صورت زیر است [۲۱]:

$$\phi_k(x) = A_k \exp\left(-\frac{(x - \mu_k)^2}{2\sigma_k^2}\right) \quad (5)$$

که  $A_k$  دامنه‌ی قله‌ی  $k$ ام،  $\sigma_k$  انحراف استاندارد قله‌ی  $k$ ام و  $\mu_k$  فاصله‌ی قله‌ی  $k$ ام تا مبدا است. بنابراین پارامترهای  $\theta$  مربوط به تابع مدل که در بالا به آنها اشاره شد، برای یک تابع مدل گوسینی شامل  $\theta_k = \{A_k, \sigma_k, \mu_k\}$  هستند [۱]. توزیع گوسین برای دامنه‌ی ۱، مکان (فاصله تا مبدا) ۵ و انحراف استاندارد‌های ۰، ۵ و ۱ در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

شناسایی قله‌های بالقوه و ویژگی‌های اولیه‌ی مربوط به آنها در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- نمونه‌هایی از شناسایی قله‌های بالقوه در امواج بازگشتی لایدار

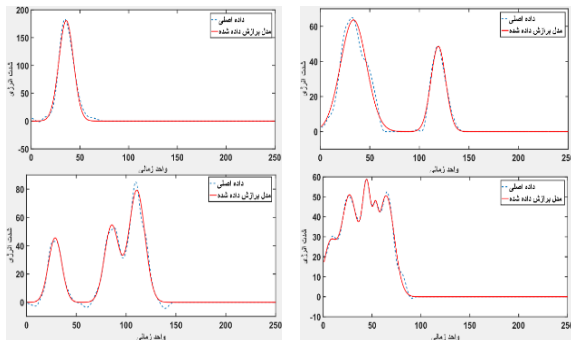
همانگونه که در شکل ۹ مشخص است، مکان و دامنه‌ی هر قله که در نمودار با نماد مربوط به موقعیت زمانی هر قله و ارتفاع مشخص شده‌اند، دارای دقت کافی هست ولی عرض قله در نیمه‌ی دامنه که در نمودار با نماد مربوط به عرض در نصف ارتفاع مشخص شده است دارای دقت مناسبی نیست زیرا با توجه به شکل موج ارسالی انتظار داریم امواج بازگشتی نیز بتوانند به صورت تابعی از مدل گوسین مدل شوند [۱۴]، ولی همانگونه که مشخص است پارامتر عرض قله در اینجا تقریب مناسبی برای تابع گوسین نیست. در واقع در بسیاری از موارد مانند موج ارائه شده در شکل ۹ (د)، به هیچ وجه عرض قله‌ها با این روش قابل تشخیص نیستند و همانطور که مشخص است، با استفاده از مرزهای فرضی که قله‌ها را از یکدیگر جدا میکند، عرض هر قله را تنها می‌توانیم تخمین بزنیم. بنابراین باید بر روی هر قله‌ی شناسایی شده، یک تابع گوسین برازش دهیم.

### ۳-۲- گام دوم: برازش مدل گوسین به قله‌های بالقوه‌ی شناسایی شده

هنگام مدل کردن قله‌های موجود در یک شکل موج، معمولاً روش‌های پارامتریک مورد استفاده قرار می‌گیرد و پارامترهای مدل پارامتریک برای هر قله‌ی شناسایی شده در هر موج تخمین زده می‌شود. این پارامترها اطلاعات اضافی‌ای در مورد خصوصیات هدف (شکل و بازتاب) فراهم می‌آورند و همچنین قابلیت پردازش شکل موج را توسعه می‌دهند.

<sup>۱</sup> convolution





شکل ۱۱- نمونه‌هایی از برازش مدل به داده‌های بازگشتی لایدار

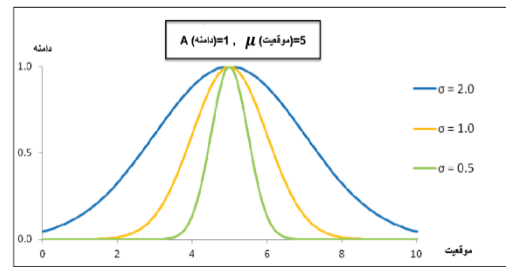
به این ترتیب، با در نظر گرفتن پارامترهای بدست آمده در گام اول و با استفاده از الگوریتم بهینه سازی Levenberg-Marquardt، برای هر موج بازگشتی و بر روی هر قله‌ی شناسایی شده، یک مدل گوسین برازش داده شد. در نتیجه برای هر قله‌ی شناسایی شده، پارامترهای گوسین شامل سه پارامتر دامنه‌ی قله ( $A_k$ )، عرض قله ( $w = 2 * \sigma_k$ ) و فاصله‌ی قله تا مبدا ( $\mu_k$ ) با دقت بالاتری نسبت به پارامترهای قبلی بدست آمده برای هر قله، محاسبه شدند.

### ۳-۳- گام سوم: محاسبه‌ی مختصات سه‌بعدی نقاط، اضافه کردن ویژگی‌ها و اصلاح آنها

#### ۳-۳-۱- محاسبه‌ی مختصات سه‌بعدی نقاط با استفاده از مکان زمانی بدست آمده برای هر قله

در این مرحله با استفاده از مکان زمانی بدست آمده برای هر قله (فاصله‌ی قله تا مبدا) و معادلات استاندارد لایدار، مختصات سه‌بعدی نقاط متناظر با هر قله بدست می‌آیند و سایر پارامترها به عنوان ویژگی‌های نقاط استخراج شده به آنها نسبت داده و پیوست می‌شوند.

همانطور که ملاحظه شد، هر موج بازگشتی لایدار به صورت یک سری زمانی است و بنابراین می‌توان با استفاده از فاصله‌ی زمانی بین سکو و عارضه و سرعت حرکت لیزر، فاصله‌ی بین سکو و عارضه که رنج<sup>۱</sup> نامیده می‌شود را محاسبه کرد. از طرفی با توجه به مختصات جغرافیایی مربوط به موقعیت آنی سکو که بوسیله‌ی GPS و IMU بدست می‌آیند و با استفاده از dx و dy و dz، که به ترتیب مربوط به تغییرات طول، عرض و ارتفاع لیزر ارسالی نسبت



شکل ۱۰- توضیح گوسین برای دامنه‌ی ۱، موقعیت ۵ و انحراف استاندارد ۰/۵ (نمودار سبز)، ۱ (نمودار زرد) و ۲ (نمودار آبی) [۲۵]

به منظور برازش شکل موج با توابع مدل، یکی از مناسب‌ترین روش‌های پیشنهاد شده، روش کمترین مربعات غیرخطی است که در سیستم‌های جاروب‌کننده‌ی لیزری عمق سنجی، ماهواره‌ای، زمینی و هوایی کاربرد دارد [۲۶]. این مسئله شامل تعداد  $N$  مشاهده و  $m * n$  مجهول است که  $m = \text{card}\theta$  تعداد پارامترهای تابع مدل و  $n$  تعداد قله‌ها هستند. کیفیت نتایج بوسیله‌ی متغیر  $\xi$  ارزیابی می‌شود و در نهایت، هدف برازش مدل بر داده‌ها با دقت از پیش تعیین شده‌ی  $\varepsilon$  است [۲۶]:

$$\xi = \sqrt{C \sum_{i=1}^N (f(x_i) - y_i)^2} < \varepsilon \quad (6)$$

که  $f(x_i)$  مدل برازش داده شده به موج،  $y_i$  شکل موج نام و  $C$  یک وزن است که مقدار آن برابر است با  $C=1/N$ . به منظور حل این مسئله بوسیله‌ی روش کمترین مربعات غیرخطی، از روش Levenberg-Marquardt می‌تواند استفاده شود و این فرایند از طریق یک الگوریتم تکراری انجام می‌گیرد [۲۷]. الگوریتم Levenberg-Marquardt، یک الگوریتم مناسب و قوی است ولی نیاز به مقادیر اولیه دارد که این مقادیر معمولاً توسط روش‌های اولیه‌ی شناسایی قله مانند حدآستانه گذاری مشخص می‌شوند و تنها مکان اولیه‌ی قله‌ها بعنوان نقاط شروع وارد الگوریتم می‌شوند [۲۸]. در این تحقیق به منظور بالا بردن دقت برازش، مقادیر اولیه‌ی تمامی پارامترها بعنوان نقاط شروع وارد الگوریتم شدند. به این منظور از مقادیر تقریبی بدست آمده برای موقعیت، دامنه و انحراف استاندارد قله‌ها (نصف عرض هر قله) در مرحله‌ی قبل، بعنوان مقادیر اولیه به منظور برازش مدل گوسین بر موج بازگشتی استفاده شدند. نمونه‌ای از برازش مدل به داده‌های بازگشتی لایدار بوسیله‌ی روش کمترین مربعات غیرخطی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی Levenberg-Marquardt در شکل ۱۱ نشان داده شده است.

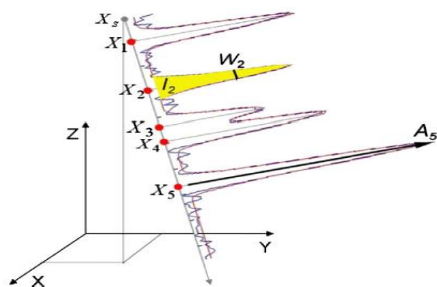
<sup>۱</sup> Range



دامنه یا ارتفاع قله، عرض قله، شدت قله، شماره قله (چندمین قله‌ی شناسایی شده در موج) و تعداد کل قله‌ها در موجی است که قله‌ی مورد نظر در آن شناسایی شده است. این ویژگی‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده‌اند. منظور از دامنه‌ی قله همان ارتفاع قله‌ی شناسایی شده است که متناظر با پارامتر  $A_k$  مرتبط با مدل گوسین برازش داده شده به قله در معادله‌ی (۵) است. در شکل ۱۲، دامنه‌ی قله‌ی شناسایی شده‌ی پنجم با عنوان  $A_5$  نشان داده شده است. منظور از عرض قله، عرض مربوط به مدل گوسین برازش داده شده به هر قله‌ی شناسایی شده در موقعیت نصف ارتفاع آن قله است که متناظر با دو برابر پارامتر  $\sigma_k$  یعنی دو برابر انحراف استاندارد مرتبط با مدل گوسین برازش داده شده به قله در معادله‌ی (۵) است. در شکل ۱۲، عرض مربوط به قله‌ی شناسایی شده‌ی دوم با عنوان  $W_2$  نشان داده شده است. همچنین شدت قله که معادل با مساحت زیر منحنی مربوط به هر قله است با استفاده از دو پارامتر دامنه ( $A_k$ ) و انحراف استاندارد ( $\sigma_k$ ) و با استفاده از معادله‌ی (۱۰) بدست می‌آید [۲۲].

$$I_i = \sqrt{2 * \pi * A_i * \sigma_i} \quad (10)$$

در شکل ۱۲، این پارامتر با عنوان  $I_2$  برای قله‌ی شناسایی شده‌ی دوم نشان داده شده است. منظور از ویژگی شماره‌ی قله، این است که نقطه‌ی مورد نظر شناسایی شده مربوط به چندمین قله‌ی شناسایی شده در هر موج بازگشتی است. برای مثال در شکل ۱۲، قله‌های شناسایی شده با نمادهای  $X_1$  تا  $X_5$  شماره گذاری شده‌اند. در نهایت منظور از ویژگی تعداد کل قله‌ها، تعداد کل قله‌هایی است که در موج متناظر با قله‌ی شناسایی شده وجود دارد که این ویژگی برای تمامی نقاط شناسایی شده در موج زیر برابر عدد پنج در نظر گرفته می‌شود. بنابراین هر نقطه با پنج ویژگی ذکر شده ذخیره می‌شود.



شکل ۱۲- ویژگی‌های مربوط به هر قله در داده‌های موج پیوسته‌ی لایدار [۲۹]

به زمان هستند و توسط دستگاه محاسبه می‌شوند، میتوان موقعیت مکانی مربوط به هر نقطه روی موج بازگشتی را محاسبه کرد. با این حال، در اکثر مواقع موقعیت اولین قله‌ی شناسایی شده روی موج بازگشتی و همچنین مختصات سه‌بعدی عارضه‌ی متناظر با آن که به صورت آنی توسط دستگاه محاسبه شده است، به همراه اطلاعات  $dx$  و  $dy$  و  $dz$  مربوط به اشعه‌ی ارسالی به عنوان خروجی دستگاه در اختیار کاربر قرار گرفته است؛ در نتیجه با استفاده از این اطلاعات و با استفاده از معادلات (۷) و (۸) و (۹) که در ادامه معرفی شده است، برای هر موقعیت زمانی دلخواه روی موج بازگشتی، میتوان موقعیت سه-بعدی نقطه‌ی متناظر با آن را محاسبه کرد [۲۸]:

$$NE = (NP - RP) * dx + FE \quad (7)$$

$$NN = (NP - RP) * dy + FN \quad (8)$$

$$NH = (NP - RP) * dz + FH \quad (9)$$

در این معادلات،  $NP$  مربوط به موقعیت زمانی قله‌ی شناسایی شده توسط کاربر بر روی موج بازگشتی،  $RP$  مربوط به موقعیت زمانی اولین قله‌ی شناسایی شده بر روی موج بازگشتی توسط دستگاه،  $dx$ ،  $dy$  و  $dz$  به ترتیب مربوط به تغییرات طول، عرض و ارتفاع لیزر ارسالی نسبت به زمان،  $FE$ ،  $FN$  و  $FH$  به ترتیب مربوط به طول، عرض و ارتفاع نقطه‌ی متناظر با اولین قله‌ی شناسایی شده بر روی موج بازگشتی و  $NE$ ،  $NN$  و  $NH$  به ترتیب مربوط به طول، عرض و ارتفاع متناظر با موقعیت زمانی قله‌ی شناسایی شده توسط کاربر بر روی موج بازگشتی هستند. برای هر موج بازگشتی، پارامترهای  $RP$ ،  $dx$ ،  $dy$ ،  $dz$ ،  $FE$ ،  $FN$  و  $FH$  توسط دستگاه محاسبه شده و در اختیار قرار داده شده است. به این ترتیب مختصات سه‌بعدی مربوط به قله‌های بالقوه‌ی شناسایی شده بر روی هر موج بازگشتی محاسبه می‌شوند.

### ۳-۳-۲- اضافه کردن ویژگی‌های مربوط به هر نقطه

هنگام تولید مختصات سه‌بعدی نقاط با استفاده از داده‌های موج پیوسته‌ی لایدار، ویژگی‌های مربوط به قله‌ی متناظر با هر نقطه‌ی سه‌بعدی تولید شده نیز به آن پیوست می‌شود که این امر، همانطور که در فصل دوم ذکر شد، یکی از برتری‌های داده‌های لایدار موج پیوسته نسبت به نوع گسسته‌ی آن می‌باشد. این ویژگی‌ها شامل

## ۳-۳-۳- اصلاح کردن شدت و عرض قله

بدلیل اینکه سیستم‌های لایدار موج پیوسته، کل موج بازگشتی را به صورت یکجا ثبت و ذخیره می‌کنند و همینطور به دلیل از دست رفتن بخشی از انرژی موج در مسیر حرکت لیزر، اصلاح ویژگی‌های شدت و عرض هر قله مرحله‌ی مهمی است که پس از تولید آنها باید انجام شود [۲۹]. اصلاح کردن مقدار عرض ( $W_i$ ) و شدت ( $I_i$ ) هر قله با استفاده از عرض ( $W^e$ ) و شدت ( $I^e$ ) موج گوسین ارسالی متناظر با موج بازگشتی آن قله انجام می‌شود. به منظور تصحیح شدت هر قله، علاوه بر شدت موج گوسین ارسالی، به فاصله‌ی بین جاروب‌کننده‌ی لیزری و عارضه‌ی مورد نظر ( $D_i$ ) و یک فاصله‌ی اسمی ( $D_0$ ) نیز نیاز است. مقدار فاصله‌ی اسمی برابر با مقدار میانگین ارتفاع پرواز در نظر گرفته می‌شود [۲۱] و برای محاسبه‌ی  $D_i$ ، فاصله‌ی بین جاروب‌کننده‌ی لیزری تا مکان مربوط به نانو ثانیه‌ی اول ( $D_1$ ) روی موج بازگشتی، محاسبه شده و به عنوان خروجی در داده‌های مورد استفاده موجود است، بنابراین با محاسبه‌ی فاصله‌ی بین مکان سه بعدی هر قله تا مکان مربوط به نانو ثانیه‌ی اول و اضافه کردن این مقدار به  $D_1$ ، مقدار  $D_i$  برای هر قله بدست می‌آید. اصلاح کردن این مقادیر با استفاده از معادلات (۱۱) و (۱۲) انجام می‌شوند [۲۹]:

$$W_i^c = \frac{W_i}{W^e} \quad (11)$$

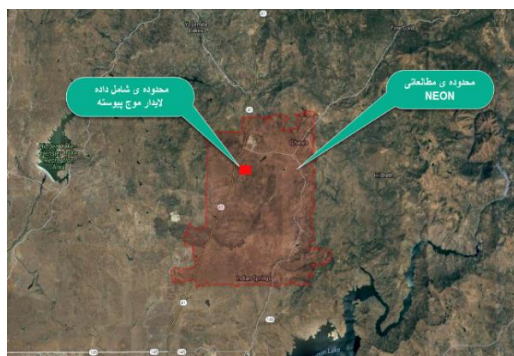
$$I_i^c = \frac{I_i}{I^e} * \left(\frac{D_i}{D_0}\right)^k \quad (12)$$

که  $W_i^c$  عرض اصلاح شده و  $I_i^c$  شدت اصلاح شده‌ی هر قله هستند و توان  $k$  در معادله‌ی (۱۲) به صورت تئوری بدست می‌آید که با توجه به مقدار ذکر شده برای آن در مقالات، مقدار ۲ برای آن در نظر گرفته شد [۲۱]. در نتیجه با طی مراحل ذکر شده، داده‌های خام لایدار موج پیوسته‌ی هوآیی تبدیل به ابر نقاط سه‌بعدی می‌شوند و ویژگی‌های اصلاح شده‌ی مربوط به هر نقطه نیز به آنها پیوست می‌شود.

## ۴- منطقه و داده‌ی مطالعاتی

روش ارائه شده در این پژوهش، بر روی امواج بازگشتی لایدار مربوط به بخشی از محدوده‌ی آزمایشی در سان جواکین<sup>۱</sup>

واقع در ایالت کالیفرنیا کشور آمریکا اجرا شده است. داده‌های مورد استفاده توسط شبکه‌ی ملی نظارت زیست محیطی<sup>۲</sup> (NEON) اخذ شده است. مساحت منطقه‌ی مورد مطالعه با مختصات جغرافیایی عرض  $37^{\circ} 06' 43''$  و طول  $118^{\circ} 44' 11''$  -  $119^{\circ} 06' 25''$  هکتار است که مربوط به یک منطقه‌ی جنگلی نامتراکم می‌باشد. تصویر ماهواره‌ای مربوط به محدوده‌ی این منطقه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. داده‌ی مورد استفاده توسط سنجنده‌ی لایدار هوآیی Optech Gemini از منطقه‌ی مورد مطالعه اخذ شده و مشخصات دستگاه و داده‌ی اخذ شده توسط آن در جدول ۲ ارائه شده است.



شکل ۱۳- تصویر ماهواره‌ای مربوط به محدوده‌ی منطقه مورد مطالعه

جدول ۲- مشخصات دستگاه و داده‌ی اخذ شده توسط دستگاه [۲۸]

مشخصات سنجنده‌ی لایدار	
نام سنجنده	Optech Gemini
ارتفاع اسمی پرواز	۱۰۰۰ متر
تاریخ پرواز	۱۳ ژوئن ۲۰۱۳ (میلادی)
پهنای واگرایی	۰/۸ میلی رادیان
فرکانس تکرار پالس	۱۰۰ کیلو هرتز
نرخ نمونه برداری	۵۰ هرتز
زاویه‌ی جاروب	۳۷ درجه
مشخصات داده‌ی اخذ شده توسط سیستم	
تعداد نقاط اسمی	۳/۸۲
فاصله‌ی بین نقاط در جهت عمود بر مسیر حرکت	۰/۵۲۴ متر
فاصله‌ی بین نقاط در جهت مسیر حرکت	۰/۵ متر
عرض موج ارسال شده	۱۵ نانو ثانیه
نرخ رقمی‌سازی موج ارسالی و بازگشتی	۱ نانو ثانیه
فرمت ذخیره‌سازی داده ها	فایل باینری قابل خواندن در زبان‌های برنامه‌نویسی

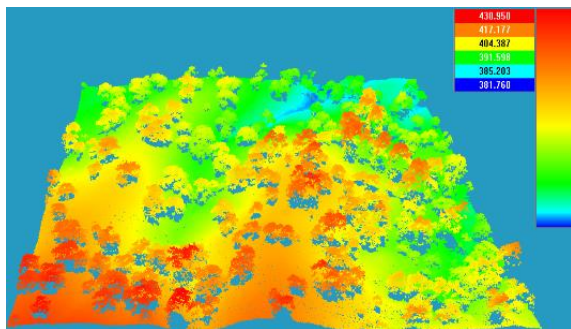
<sup>۲</sup> National Ecological Observation Network

<sup>۱</sup> San Joaquin

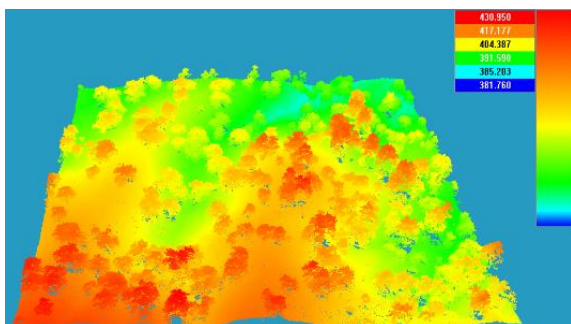
شده‌اند. تعداد ابر نقاط بدست آمده از اولین قله‌ی شناسایی شده در هر موج برابر با تعداد امواج بازگشتی در هر دو خط پروازی یعنی برابر با ۲۵۸۶۶۷ عدد و تعداد ابر نقاط بدست آمده از تمامی قله‌های شناسایی شده در هر موج برابر با تعداد کل قله‌های بالقوه‌ی شناسایی شده یعنی برابر با ۳۲۴۳۴۰ عدد است.

به منظور بررسی دقت نقاط بدست آمده، ابرنقاط مربوط به اولین قله‌ی شناسایی شده با ابرنقاط مربوط به اولین بازگشت که توسط دستگاه ارائه شده است مقایسه شدند و این ابر نقاط از نظر موقعیت تفاوتی با یکدیگر نداشتند. از طرفی تعداد کل ابرنقاط ارائه شده توسط دستگاه بوسیله‌ی پردازش آنی امواج لایدار برابر با ۳۰۴۳۱۱ نقطه بود که تعداد آن ۲۰۰۲۹ نقطه کمتر از تعداد نقاطی بود که در این تحقیق شناسایی شد.

همانطور که از تصاویر ارائه شده مشخص است، در مورد ابر نقاط بدست آمده از تمام قله‌های شناسایی شده در هر موج، تراکم نقاط در مورد درختان به شدت افزایش یافته است زیرا در مورد درختان تا ۶ قله‌ی بازگشتی شناسایی شدند.



شکل ۱۵- ابر نقاط بدست آمده از اولین قله در هر موج



شکل ۱۶- ابر نقاط بدست آمده از تمام قله‌های شناسایی در هر موج

شکل ۱۷ ابر نقاط مربوط به دو نمونه از درختان را نشان می‌دهد. نقاط آبی نشان دهنده‌ی اولین بازگشت در

داده‌ی مورد استفاده در شرایط برگ‌دار از منطقه‌ی مورد مطالعه اخذ شده است. برای اخذ این داده‌ها، سکوی پروازی هم در طول شمال به جنوب (خط اول) و هم در طور شرق به غرب (خط دوم) پرواز کرده است و در نتیجه دو خط پروازی با مساحت ۲۵۰×۲۵۰ متر در دست است. مشخصات داده‌ی اخذ شده در این منطقه در جدول ۳ ارائه شده است و تصویر هوایی مربوط به منطقه‌ی مورد مطالعه نیز در شکل ۱۴ نمایش داده شده است.

جدول ۳- مشخصات داده‌ی اخذ شده در منطقه‌ی مورد مطالعه

تعداد امواج بازگشتی در خط اول	۱۶۷۰۱۹
تعداد امواج بازگشتی در خط دوم	۹۱۶۴۸
کل تعداد امواج بازگشتی	۲۵۸۶۶۷
مساحت منطقه	۶/۲۵ هکتار



شکل ۱۴- تصویر هوایی مربوط به منطقه‌ی مورد مطالعه

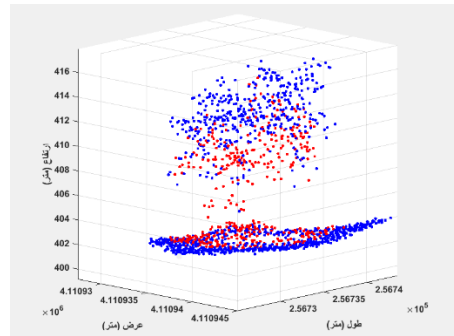
## ۵- نتایج و بحث و بررسی

پس از اجرای مراحل ذکر شده‌ی مربوط به گام اول (شناسایی قله‌های بالقوه در هر موج) بر روی داده‌های مورد آزمایش، برای خط اول پرواز با ۱۶۷۰۱۹ موج بازگشتی تعداد ۲۰۹۰۷۰ و برای خط دوم پرواز با ۹۱۶۴۸ موج بازگشتی تعداد ۱۱۵۲۷۰ قله‌ی بالقوه شناسایی شدند، بنابراین در کل تعداد ۳۲۴۳۴۰ قله‌ی بالقوه برای کل امواج بازگشتی که تعداد آنها ۲۵۸۶۶۷ عدد است، بدست آمد. پس از اجرای گام دوم (برازش مدل گوسین به قله‌های بالقوه‌ی شناسایی شده) و گام سوم (محاسبه‌ی مختصات سه‌بعدی نقاط، اضافه کردن ویژگی‌ها و اصلاح آنها)، مختصات سه‌بعدی برای تمامی قله‌ها محاسبه شدند. ابر نقاط بدست آمده از اولین قله‌ی شناسایی شده و همچنین تمام قله‌های شناسایی در هر موج و بر اساس ارتفاع آنها، به ترتیب در شکل ۱۵ و شکل ۱۶ نشان داده

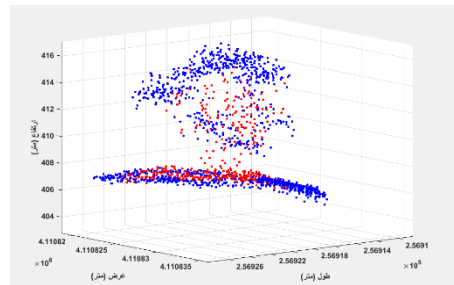
جدول ۴- چند نمونه از نقاط ذخیره شده همراه با ویژگی محاسبه شده برای آنها

طول جغرافیایی (متر)	۲۵۶۷۶۳/۲۸	۲۵۶۷۶۳/۸۴	۲۵۶۷۶۳/۹۵
عرض جغرافیایی (متر)	۴۱۱۰۶۹۸	۴۱۱۰۶۹۸/۱	۴۱۱۰۶۹۸/۱
ارتفاع جغرافیایی (متر)	۳۸۹/۳۵۷۳	۳۸۴/۸۹۸۲۷	۳۸۴/۰۰۶۴۷
شماره‌ی قله	۱	۲	۳
تعداد کل قله‌ها	۳	۳	۳
دامنه قله	۷۸/۴۶۸۱۲۹	۳۹/۵۷۹۲۴۱	۳۹/۲۴۵۹۰۷
عرض قله	۱/۵۲۴۹۶۶۶	۱/۲۷۰۲۳۰۲	۰/۶۳۸۴۵۹۹
شدت قله	۰/۵۰۳۷۶۸۳۵	۰/۲۱۳۴۷۵۰۲	۰/۱۰۵۶۶۹۷۱
شماره‌ی موج	۷۸۶	۷۸۶	۷۸۶

هر موج بازگشتی و نقاط قرمز نشان دهنده‌ی بازگشت‌های دوم تا آخر در هر موج بازگشتی هستند.



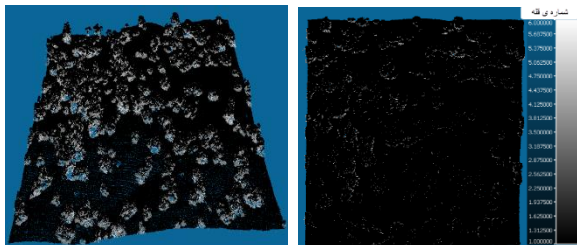
الف



ب

در ادامه نمایش ابر نقاط بدست آمده بر حسب ویژگی-های شماره‌ی قله، تعداد کل قله‌ها در موج متناظر، دامنه-ی قله، عرض قله و شدت قله به ترتیب در شکل‌های ۱۸ تا ۲۲ نشان داده شده است.

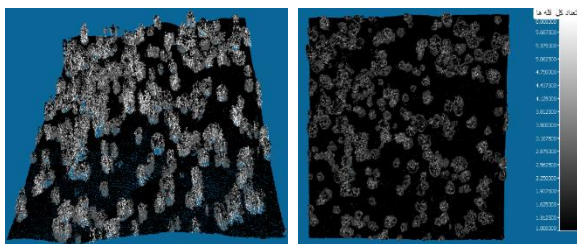
شکل ۱۷- ابر نقاط بدست برای دو نمونه درخت الف) بلوط زنده و ب) بلوط آبی. نقاط آبی نشان دهنده‌ی اولین بازگشت در هر موج بازگشتی و نقاط قرمز نشان دهنده‌ی بازگشت‌های دوم تا آخر در هر موج بازگشتی هستند



ب

الف

شکل ۱۸- نمایش ابر نقاط بر حسب شماره‌ی قله الف) نمای قائم ب) نمای مایل



ب

الف

شکل ۱۹- نمایش ابر نقاط بر حسب تعداد کل قله‌ها در موج متناظر الف) نمای قائم ب) نمای مایل

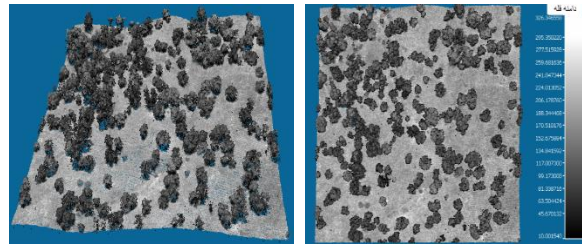
همانطور که توضیح داده شد، ویژگی‌های مربوط به قله‌ی متناظر با هر نقطه‌ی سه‌بعدی تولید شده به آن پیوست می‌شود و بنابراین هر نقطه با ۹ پارامتر ذخیره شدند. این پارامترها عبارت هستند از: ۱) طول جغرافیایی نقطه ۲) عرض جغرافیایی نقطه ۳) ارتفاع جغرافیایی نقطه ۴) شماره‌ی قله ۵) تعداد کل قله‌ها در موج متناظر با آن نقطه ۶) دامنه‌ی قله ۷) عرض قله ۸) شدت قله ۹) شماره‌ی موج (که قله از آن تولید شده است). همانگونه که ذکر شد، اصلاح ویژگی‌های عرض و شدت هر قله با استفاده از معادلات (۱۱) و (۱۲) انجام می‌گیرد. در معادله‌ی (۱۲)، مقدار فاصله‌ی اسمی برابر با ۱۰۰۰ متر، که همان ارتفاع اسمی پرواز است، در نظر گرفته شد و در نتیجه با استفاده از این معادلات، ویژگی‌های عرض و شدت برای تمامی قله‌ها اصلاح شدند. نمونه‌ای از چند نقطه‌ی ذخیره شده در جدول ۴ ارائه شده است.



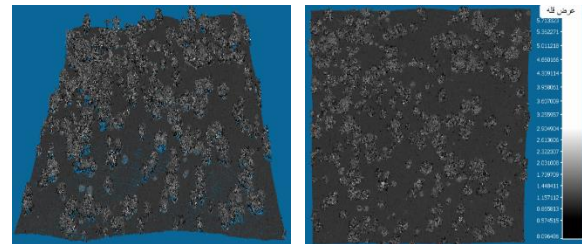
به این منظور، ابتدا قله‌های بالقوه در هر موج بازگشتی لایدار، که متناظر با عوارض موجود در مسیر موج بازگشتی هستند، شناسایی و ویژگی‌های اولیه‌ی هر کدام از آنها نیز تولید شدند. در ادامه با استفاده از روش Levenberg-Marquardt و ویژگی‌های اولیه‌ی بدست آمده بعنوان نقاط شروع، بر روی هر کدام از قله‌های شناسایی شده در هر موج بازگشتی، یک مدل گوسین برازش داده شد و پارامترهای این مدل بعنوان ویژگی‌های دقیق هر کدام از قله‌ها استخراج شدند؛ سپس با استفاده از مختصات زمانی بدست آمده برای هر قله و معادلات زمانی لایدار موج پیوسته، مختصات سه‌بعدی هر عارضه‌ی متناظر با قله‌ی شناسایی شده محاسبه شد. در پایان ویژگی‌های عرض و شدت قله‌ها اصلاح و همراه با دیگر ویژگی‌ها به هر نقطه‌ی سه‌بعدی پیوست شدند.

نتایج نشان دادند که تعداد نقاط استخراج شده از امواج بوسیله‌ی آنالیز و تجزیه‌ی آنها، ۲۰۰۲۹ عدد بیشتر از نقطه‌ی است که دستگاه به صورت آنی استخراج و در اختیار کاربر قرار می‌دهد. از طرفی بیشتر سیستم‌های لایدار تنها ویژگی شدت را در کنار مختصات هر نقطه در اختیار کاربران قرار می‌دهند، در حالی که کاربر بوسیله‌ی تجزیه‌ی امواج بازگشتی قادر به تعریف و استخراج ویژگی‌های مفید و متنوع زیادی است که قابل استفاده در بسیاری از کاربردها مانند طبقه‌بندی و قطع‌بندی نقاط است.

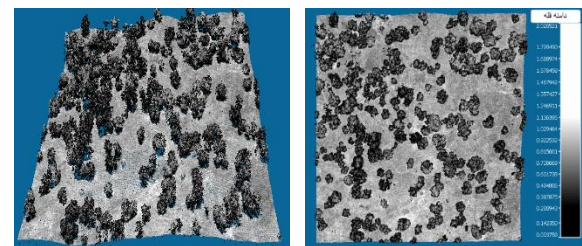
یکی از تحقیقاتی که می‌تواند بعنوان پژوهش‌های آینده در این زمینه پیشنهاد شود، تحقیق بر روی بهبود اصلاح ویژگی‌های عرض و شدت هر قله است. در حال حاضر تنها افت انرژی لیزر ناشی از حرکت آن در طول مسیر حرکت موج تا حدودی مدل می‌شود، در صورتی که نتایج حاکی از آن است که در هر موج بازگشتی، هر قله به شدت بر روی قله‌های بعد از خود تاثیر می‌گذارد و باعث افت انرژی ثبت شده برای دیگر قله‌ها می‌شود. بنابراین افت انرژی موج بازگشتی، علاوه بر مسیر طی شده توسط اشعه‌ی لیزر، به جنس و شکل هر عارضه‌ی متناظر با هر قله نیز مرتبط است و بر دیگر قله‌ها نیز تاثیر می‌گذارد و به منظور اصلاح دقیق‌تر ویژگی‌های هر قله، این پارامترها نیز باید در نظر گرفته شوند.



شکل ۲۰- نمایش ابر نقاط بر حسب دامنه‌ی قله الف) نمای قائم ب) نمای مایل



شکل ۲۱- نمایش ابر نقاط بر عرض قله الف) نمای قائم ب) نمای مایل



شکل ۲۲- نمایش ابر نقاط بر حسب شدت قله الف) نمای قائم ب) نمای مایل

این ویژگی‌ها در قطع‌بندی و طبقه‌بندی درختان و همینطور طبقه بندی عوارض بوسیله‌ی داده‌های لایدار کاربردهای زیادی دارند [۲۲، ۳۰، ۳۱، ۳۲، ۳۳]. به طور مثال همانطور که از شکل ۲۰ و مشخص است، ویژگی‌های دامنه و شدت قله، به تنهایی و تا حد زیادی قابلیت جدا کردن نقاط مربوط به زمین و غیر زمین را دارند.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با توجه به ناشناخته ماندن پتانسیل امواج بازگشتی لایدار مخصوصاً در بین تحقیقات صورت گرفته بر روی داده‌های لایدار در کشور، آنالیز امواج پیوسته‌ی لایدار به منظور تولید ابرنقاط سه‌بعدی، افزایش تراکم آنها و تولید ویژگی‌های مرتبط با هر نقطه انجام شد.

- [1] Mallet C, Bretar F, "Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art.," ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, vol. 64(1), pp. 1-6, 2009.
- [2] I. Korpela, "Acquisition and evaluation of radiometrically comparable multi-footprint airborne LiDAR data for forest remote sensing," Remote sensing of environment, vol. 194, pp. 414-423, 2017.
- [3] Ni-Meister, W., Jupp, D.L. and Dubayah, R., "Modeling lidar waveforms in heterogeneous and discrete canopies," IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 39(9), pp. 1943-1958, 2001.
- [4] Bruggisser, M., Roncat, A., Schaepman, M.E. and Morsdorf, F., "Retrieval of higher order statistical moments from full-waveform LiDAR data for tree species classification," Remote sensing of environment, vol. 196, pp. 28-41, 2017.
- [5] Bunting, P., Armston, J., Clewley, D. and Lucas, R.M., "Sorted pulse data (SPD) library—Part II: A processing framework for LiDAR data from pulsed laser systems in terrestrial environments," Computers & geosciences, vol. 56, pp. 207-215, 2013.
- [6] Heinzl J, Koch B, "Exploring full-waveform LiDAR parameters for tree species classification," International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 13(1), pp. 152-160, 2011 .
- [7] S. G, "Segmentation and classification of airborne laser scanner data," 2005.
- [8] Rottensteiner F, Briese C, " A new method for building extraction in urban areas from high-resolution LIDAR data," International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 34, pp. 295-301, 2002 .
- [9] Haala N, Brenner C, "Extraction of buildings and trees in urban environments.," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 54(2), pp. 130-137, 1999 .
- [10] Hyypä J, Hyypä H, Litkey P, Yu X, Haggrén H, Rönholm P, Pyysalo U, Pitkänen J, Maltamo M, "Algorithms and methods of airborne laser scanning for forest measurements," International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 36(8), pp. 82-89, 2004.
- [11] Chauve A, Mallet C, Bretar F, Durrieu S, Pierrot-Deseilligny M, Puech W, "Processing full-waveform lidar data: modelling raw signals," in International archives of photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences, 2008.
- [12] Baltsavias, E.P., "Airborne laser scanning: Basic relations and formulas," ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vols. 54 (2-3), pp. 199-214, 1999b.
- [13] J. AV, "Laser radar systems," URISA , 1992.
- [14] Wagner W, Ullrich A, Ducic V, Melzer T, Studnicka N, "Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 60(2), pp. 100-111, 2006.
- [15] Wagner W, Ullrich A, Melzer T, Briese C, Kraus K, "From single-pulse to full-waveform airborne laser scanners: potential and practical challenges," International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. 35, pp. 201-206, 2004.
- [16] Jutzi B, Stilla U, "Measuring and processing the waveform of laser pulses," in Proc. 7th Optical 3-D Measurement Techniques, Vienna, Austria, 2005.
- [17] Bretar, F., Chauve, A., Mallet, C. and Jutzi, B., "Managing full waveform LIDAR data: A challenging task for the forthcoming years," in The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Beijing, 2008.
- [18] Lim, K., Treitz, P., Wulder, M., St-Onge, B. and Flood, M., "LiDAR remote sensing of forest structure," Progress in physical geography, vol. 27(1), pp. 88-106, 2003.
- [19] Toth, C.K., Zaletnyik, P., Laky, S. and Grejner-Brzezińska, D., "The potential of full-waveform LiDAR in mobile mapping applications," Archives of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, vol. 22, pp. 401 - 410, 2011.
- [20] Vaughn NR, Moskal LM, Turnblom EC, "Fourier transformation of waveform Lidar for species recognition," Remote Sensing Letters, vol. 2(4), pp. 347-356, 2011.
- [21] Cao L, Coops NC, Innes JL, Dai J, Ruan H, She G, "Tree species classification in subtropical forests using small-footprint full-waveform LiDAR data," International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, vol. 49, pp. 39-51, 2016.
- [22] Reitberger J, Krzystek P, Stilla U, "Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees," International journal of remote sensing, vol. 29(5), pp. 1407-1431, 2008.

- [23] Durbin J., and S. J. Koopman, "Time Series Analysis by State Space Methods," in Oxford University Press, Oxford , 2012.
- [24] Chauve, A., Vega, C., Durrieu, S., Bretar, F., Allouis, T., Pierrot Deseilligny, M. and Puech, W., "Advanced full-waveform lidar data echo detection: Assessing quality of derived terrain and tree height models in an alpine coniferous forest," International Journal of Remote Sensing, vol. 30(19), pp. 5211-5228, 2009.
- [25] Słota, Małgorzata, "Decomposition techniques for full-waveform airborne laser scanning data," Geomatics and Environmental Engineering, 2014.
- [26] Hofton MA, Minster JB, Blair JB, "Decomposition of laser altimeter waveforms," IEEE Transactions on geoscience and remote sensing, vol. 38(4), pp. 1989-1996, 2000.
- [27] Marquardt, Donald W, "An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters," Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics, vol. 11(2), pp. 431-441, 1963.
- [28] "neonscience," National Ecological Observation Network, 10 9 2016. [Online]. Available: <http://www.neonscience.org/data/airborne-data>.
- [29] Reitberger J, Schnörr C, Krzystek P, Stilla U, "3D segmentation of single trees exploiting full waveform LIDAR data," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 64(6), pp. 561-574, 2009 .
- [30] Korpela I, Ørka HO, Maltamo M, Tokola T, Hyyppä J, "Tree species classification using airborne LiDAR—effects of stand and tree parameters, downsizing of training set, intensity normalization, and sensor type," Silva Fennica. , vol. 44(2), pp. 319-339, 2010.
- [31] Lindberg E, Eysn L, Hollaus M, Holmgren J, Pfeifer N, "Delineation of tree crowns and tree species classification from full-waveform airborne laser scanning data using 3-D ellipsoidal clustering," IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, vol. 7(7), pp. 3174-3181, 2014.
- [32] Mallet C, Bretar F, Roux M, Soergel U, Heipke C, "Relevance assessment of full-waveform lidar data for urban area classification," ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 66(6), pp. S71-S84, 2011 .
- [33] Shi, Y., Wang, T., Skidmore, A.K. and Heurich, M., "Important LiDAR metrics for discriminating forest tree species in Central Europe," ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing, vol. 137, pp. 163-174, 2018.