

ناوبری صحیح و دقیق هواپیما با ترکیب داده‌های لیدار و INS بدون استفاده از داده‌های GPS

افشین آصفپور و کیلیان¹، مهران ستاری²

1. دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش از دور، گروه نقشه‌برداری، دانشگاه اصفهان

afshin.asefpour@eng.ui.ac.ir

2. استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری، دانشگاه اصفهان

m_sattari_a@yahoo.com

چکیده

لیدار یکی از ابزارهای پیشرفته در حوزه‌های فتوگرامتری و سنجش از دور می‌باشد که به کمک ارسال و دریافت پرتوهای لیزر، علاوه بر توانایی برداشت داده‌های ارتفاعی، قابلیت‌های دیگری مانند برداشت خصوصیات سطح به کمک داده‌های شدت موج بازگشتی را نیز دارا می‌باشد. روشی که در این مقاله ارائه شده است می‌تواند با دریافت داده‌های لیزر و تولید تصویر ارتفاعی و انطباق آن با نقشه‌های توپوگرافی موجود به کمک داده‌های شدت موج بازگشتی، به تشخیص موقعیت دقیق هواپیما با دقتی در حد زیر پیکسل‌ها صحتی در حدود 95٪ در تمامی مناطق با تغییرات توپوگرافی مختلف بپردازد. دلیل دستیابی به چنین دقت و صحتی در مقایسه با دیگر روش‌های ارائه شده، ترکیب داده‌های لیزر با داده‌های شدت موج بازگشتی و استفاده از عملگرهای مورفولوژی بر روی تصاویر ارتفاعی حاصل می‌باشد. در انتهای این مقاله مقایسه‌ای بین نتایج روش پیشنهادی و روش‌های موجود صورت گرفته است که نشان دهنده مزیت روش پیشنهادی نسبت به روش‌های دیگر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: ناوبری، لیدار، شدت موج بازگشتی، تصویر ارتفاعی، عملگرهای مورفولوژی، انطباق تصویر.

1- مقدمه

استفاده از لیدار¹ یکی از دقیق‌ترین و مؤثرترین روش‌های تولید نقشه‌های توپوگرافی بزرگ مقیاس می‌باشد. به منظور تولید نقشه‌های توپوگرافی دقیق از هر منطقه به کمک لیدار، لازم است تا موقعیت دقیق هواپیما در لحظه برداشت داده‌های ارتفاعی نیز مشخص باشد. دقت مورد نیاز جهت محاسبه موقعیت هواپیما و انتقال مختصات به سطح زمین به طور معمول از ترکیب مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سیستم موقعیت‌یاب جهانی² و سیستم اینرشیال INS³ به دست می‌آید. تاریخچه تعیین موقعیت سکوها پرنده به کمک داده‌های ارتفاعی به جنگ جهانی دوم بازمی‌گردد. خلبان‌ها در آن زمان به منظور موقعیت‌یابی از پرتوهای لیزر و اندازه‌گیری شدت موج بازگشتی آن‌ها استفاده می‌کردند که بر روی صفحه‌های نمایشگر موجود در کابین نقش می‌بستند. سپس با مقایسه بصری بین عوارض موجود در نقشه توپوگرافی و موقعیت یکسری موانع مشخص بر روی زمین، به تخمین موقعیت هواپیما می‌پرداختند [6].

از دیگر روش‌های تعیین موقعیت هواپیما در دوران جنگ جهانی دوم می‌توان روش انطباق بین منحنی-های میزان (TERCOM)⁴ را نام برد. در این روش موقعیت هواپیما بر اساس برداشت مقادیر ارتفاعی یک پروفیل از سطح زمین و انطباق آن با نقشه منحنی میزان‌های موجود به دست می‌آید. سپس موقعیت به دست آمده از این روش وارد فیلتر کالمن⁵ می‌شد و به این ترتیب دریافت ایجاد شده بر روی داده‌های INS جبران می‌شد [7]. در روشی دیگر که به نام SITAN⁶ شناخته شده بود، پس از برداشت مقادیر ارتفاعی یک پروفیل، شیب آن پروفیل محاسبه می‌شد و پس از اعمال فیلتر کالمن بر روی آن، خطای دریافت⁷ ایجاد شده بر روی داده‌های INS حذف می‌گردید [2 و 5]. پس از ارائه الگوریتم‌های فوق، روشی جدید بر مبنای تلفیق دو روش TERCOM و SITAN توسعه داده شد تا به این طریق موقعیت مکانی به دست آمده برای هواپیما دقیق‌تر شود [1]. روشی دیگر در این حوزه به تعریف تابع log-likelihood بین تغییرات پروفیل برداشت شده از منطقه توسط تابع توزیع نرمال تقریب زده می‌شوند و سپس تفاوت بین تقریب داده‌های ارتفاعی برداشتی و داده‌های ارتفاعی موجود با استفاده از فیلتر کالمن مدل می‌شوند [10].

کاهش نویز موجود بر روی داده‌های لیدار به عنوان یکی از محاسبات ضروری جهت دستیابی به مقادیر ارتفاعی دقیق است. یکی از روش‌های ارائه شده جهت بهبود نسبت سیگنال به نویز در داده‌های لیدار به منظور اعتبار بخشیدن به نتایجی که از روی این داده‌ها حاصل می‌شوند، تبدیل ویولت گسسته می‌باشد [3]. یکی از مطالعات صورت گرفته در حوزه کاهش نویز بر مبنای تبدیل ویولت در سال 2004 ارائه شده است. در این مطالعه از داده‌های لیدار دو فرکانسه استفاده شده است که قادر به برداشت امواج بازگشتی در دو طول موج متفاوت می‌باشد. در روش اخیر به حذف مقادیر پرت به کمک تعریف انواع منابع نویز و استفاده از تلفیق بیشینه قدرمطلق مقادیر به دست آمده از دو طول موج پرداخته شده است. این روش باعث می‌شود تا سیگنال نهایی به بیشترین میزان ممکن بهبود یابد و آثار عوارض سطحی مانند درختان و گیاهان و عوارض ساخت دست بشر و ... در آن تا حد ممکن کاهش یابند [11].

الگوریتم‌ها و نرم‌افزارهای دیگری نیز ارائه شده‌اند که می‌توانند آثار ناشی از عوارض زمینی و ساخت دست بشر که به عنوان اثر ناشی از DSM⁸ شناخته می‌شوند را کاهش دهند و تا حد ممکن از حضور نقاط ارتفاعی مربوط به چنین عوارضی در ابر نقطه⁹ جلوگیری نمایند [8]. در این تحقیق نشان داده شده است که نتایج حاصل از استخراج سطح زمین خام¹⁰ (سطح زمین بدون حضور عوارض زمینی و عوارض ساخت دست بشر) که به عنوان DEM¹¹ شناخته شده است با استفاده از الگوریتم‌های مختلف مانند SAGA GIS، TLID، Terrasolid (Terrascan) و Canopy Fuel Stimator (CFE) با یکدیگر متفاوتند. در یکی دیگر از تحقیق‌های انجام شده در این زمینه، از نرم‌افزار Quick Terrain Modeler (QTM) به منظور کلاس‌بندی هر نقطه از داده‌های ارتفاعی لیدار به عنوان نقطه مربوط به عوارض سطح و یا مربوط به زمین خام استفاده شده است [9]. در این تحقیق از دانش اولیه کاربر در مورد داده‌های برداشت شده توسط لیزر به عنوان عاملی جهت دستیابی به نتایج بهتر در مرحله انطباق نام برده شده است.

در روش پیشنهادی در این مقاله بر مشکل روش‌های موجود در استخراج داده‌های زمین خام غلبه شده است که می‌توان بر اساس آن به تعیین موقعیت دقیق هواپیما به صورت آنی بر روی هر منطقه دلخواه پرداخت. این روش همچنین توانایی غلبه بر مشکل انطباق تصاویر ارتفاعی بر روی مناطق هموار را نیز دارد. دلیل آن نیز استفاده از داده‌های شدت موج¹² بازگشتی در کنار داده‌های ارتفاعی دریافت شده توسط لیزر می‌باشد. در صورتی که تغییرات ارتفاعی در محدوده مورد مطالعه زیاد باشد، احتمال منحصر به فرد بودن

رفتار توپوگرافی در آن محدوده زیاد خواهد بود. اما در صورتی که سطح منطقه مورد نظر هموار باشد و تغییرات ارتفاعی در آن ناچیز باشد، احتمال وقوع رفتاری تکرار شونده بر روی توپوگرافی مطرح خواهد بود. در این حالت استفاده از داده‌های شدت موج بازگشتی می‌تواند در دستیابی به موقعیت دقیق هواپیما کمک کند که در ادامه به توضیح این روش می‌پردازیم.

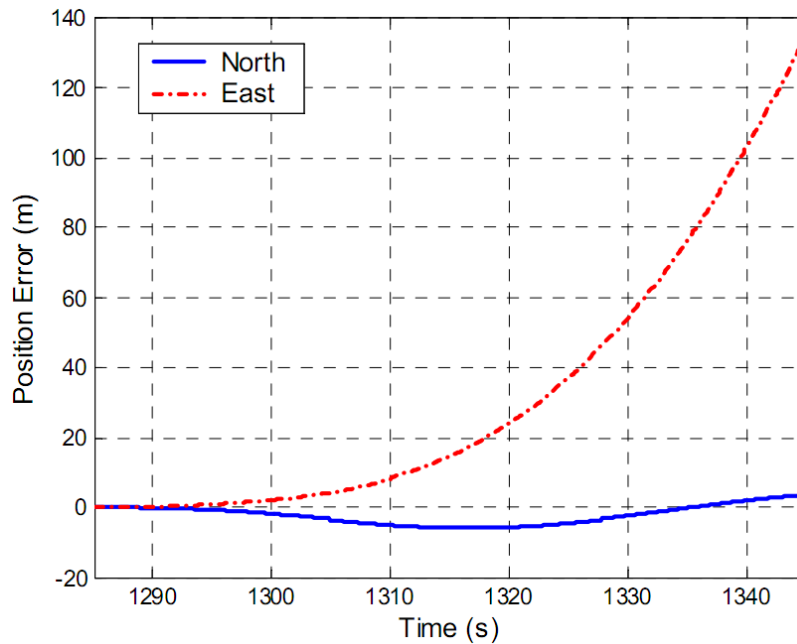
2- روش پیشنهادی

هدف از انطباق بین تصاویر ارتفاعی، یافتن نقاط و یا عوارض ارتفاعی به دست آمده از لیدار است که متناظر آن‌ها در تصویر توپوگرافی موجود از همان منطقه نیز وجود داشته باشد. با ایجاد انطباق بین تصاویر نام برده شده می‌توان موقعیت هواپیما را به دست آورد. زمانی از این روش به منظور موقعیت‌یابی سکوه‌های هوایی مانند هواپیما استفاده می‌شود که داده‌های GPS به هر دلیلی در دسترس نباشند. از میان این دلایل می‌توان وقوع خطای Cycle Slip در حالت کلی و یا اعمال نویز بر روی داده‌های کد C/A مربوط به GPS در بحران-های نظامی را نام برد. روش موقعیت‌یابی هر سکوی هوایی یا فضایی بر مبنای داده‌های به دست آمده از توپوگرافی زمین را به اختصار TRN¹³ می‌نامند.

اگر داده‌های GPS برای مدت زمان محدودی در دسترس نباشند، داده‌های برداشت شده توسط لیدار همچنان می‌توانند با داده‌های اینرشیا INS تلفیق شوند و مختصات نسبی نقاط برداشت شده را محاسبه نمایند. زیرا سیستم اینرشیا INS قابلیت محاسبه شتاب هواپیما در سه راستای مختصات متعامد را دارد. بنابراین می‌توان با دو مرتبه انتگرال گرفتن از این مقادیر و داشتن مقادیر اولیه از آخرین مقادیر برداشت شده توسط GPS به مختصات تقریبی نقاط دست یافت. اما مختصات به دست آمده از این روش به دلیل خطای دریافت INS دائما دچار انحراف می‌شوند که می‌توان جهت‌تعدیل این خطا و محاسبه مختصات اولیه دقیق‌تر پس از گذشت مدت زمانی مشخص از روش TRN استفاده نمود. به عبارتی دیگر، پروفیل‌های برداشتی در نبود داده‌های GPS نسبت به یکدیگر دچار انحراف می‌شوند که این انحراف با گذشت زمان افزایش می‌یابد.

اگر نقشه توپوگرافی منطقه از قبل موجود باشد، می‌تواند به عنوان سطحی مرجع مورد استفاده قرار گیرد که با ایجاد انطباق میان آن و نقاط برداشت شده توسط لیدار بتوان به مقادیر جدید برای مختصات دست یافت. به این ترتیب می‌توان خطای موقعیت تقریبی به دست آمده از INS را در یک بازه خاص حفظ نمود. شکل 1 نشان دهنده خطای دریافت INS به منظور موقعیت‌یابی است که در آن شاهد مقدار خطای 140 متر در موقعیت‌مسطحاتی در طی مدت زمان 60 ثانیه اندازه‌گیری هستیم. از طرفی با توجه به این شکل اگر موقعیت‌یابی دقیق توسط انطباق توپوگرافی برداشت شده از سطح زمین و توپوگرافی موجود از منطقه در طی مدت زمان کوتاهی در حدود 5 ثانیه صورت گرفته باشد، در آن صورت خطای تعیین موقعیت هواپیما به دلیل دریافت INS، کمتر از 1 متر خواهد بود.

به طور کلی می‌توان سه پارامتر را به عنوان عوامل مؤثر بر عملیات انطباق در فرآیند TRN معرفی نمود که عبارتند از: میزان تغییرات ارتفاعی سطح زمین، چگالی نقاط برداشتی توسط لیدار و ابعاد پروفیل برداشته شده توسط لیدار.



شکل 1. خطای دریافت INS در مدت زمان 60 ثانیه قطع سیگنال [12GPS]

از بین این سه پارامتر، می‌توان تغییرات ارتفاعی سطح زمین در منطقه مورد مطالعه را به عنوان مهم‌ترین و مؤثرترین پارامتر در ایجاد انطباق دقیق و صحیح جهت موقعیت‌یابی در TRN مطرح نمود. همانطور که پیش‌تر نیز به آن اشاره شد، استفاده از داده‌های ارتفاعی به دست آمده از لیدار در مناطق ناهموار، با دقت بالایی قابلیت انطباق با نقشه‌های توپوگرافی را دارد. اما در مناطق هموار به دلیل تغییرات جزئی و یکنواخت ارتفاع در سرتاسر منطقه احتمال تعیین موقعیت اشتباه بسیار بیشتر است. در این مقاله روشی جدید به منظور غلبه بر این مشکل ارائه شده است که در آن علاوه بر داده‌های ارتفاعی از داده‌های شدت موج بازگشتی نیز استفاده شده است. در مورد چگالی نقاط برداشتی نیز هر چه چگالی بیشتر باشد و نقاط به صورت مترکم-تری از یک منطقه برداشت شده باشند، نتایج به دست آمده از عملیات انطباق نسبت به حالتی که تراکم نقاط کمتر باشد بهتر خواهد بود که دلیل آن نمایش بهتر جزئیات ارتفاعی سطح منطقه خواهد بود. داده‌های لیدار استفاده شده در این مقاله دارای چگالی 36 نقطه در هر متر مربع می‌باشند و نقشه توپوگرافی موجود از منطقه نیز قدرت تفکیک مکانی برابر با 1 متر دارد. طول پروفیل برداشتی از منطقه جهت اعمال عملیات انطباق نیز یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در روش TRN است. هر چه طول این پروفیل بزرگتر باشد، تغییرات ارتفاعی بیشتری را شامل می‌شود، اما نوسانات ارتفاعی در عرض پروفیل تأثیر خواهد گذاشت و به این ترتیب عملیات انطباق دشوارتر خواهد شد. از طرفی دیگر کوتاه بودن طول پروفیل برداشتی باعث عدم دستیابی به نتیجه قابل اطمینان خواهد شد. لذا باید تعادلی منطقی بین طول پروفیل برداشت شده و تغییرات ارتفاعی منطقه وجود داشته باشد. در این مقاله از پروفیلی به طول 40 متر از منطقه جهت انجام TRN استفاده شده است تا تغییرات ارتفاعی باعث ایجاد اعوجاج در آن نشوند و در ضمن حداقل تغییرات ارتفاعی نیز در آن مشخص باشند.

از پارامترهای مهم در مرحله پردازش داده‌های لیدار می‌توان انتخاب فیلتر مناسب جهت حذف تأثیر عوارض سطحی زمین را نام برد که بر روی تصویر مربوط به داده‌های لیزر دریافت شده از سطح زمین اعمال می‌شود. تأثیرات ناشی از عوارض سطحی مانند اثر چتر گیاهی¹⁴ و عوارض ساخت دست بشر مانند ساختمان-ها، دکل‌های مخابراتی و برق و ... باعث عدم امکان ایجاد تطابق بین پروفیل برداشتی توسط لیدار (DSM) و

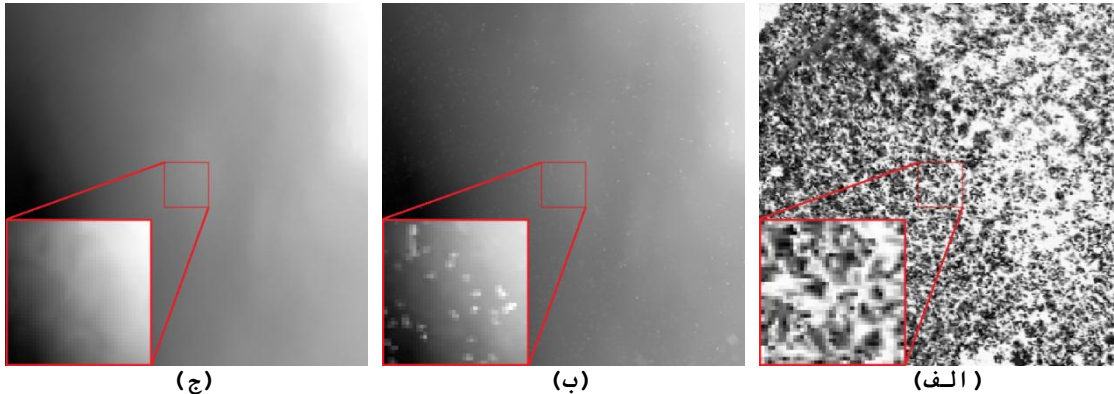
نقشه توپوگرافی موجود از منطقه (DEM) می‌شود. زیرا نقشه توپوگرافی تنها شامل سطح زمین خام می‌باشد و عوارض سطحی نام برده شده در آن وجود ندارند. این پدیده زمانی اثر خود را بیشتر نشان می‌دهد که منطقه هموار باشد و درختانی پراکنده در آن روییده باشند. لذا جهت دستیابی به موقعیت‌یابی دقیق هواپیما، ابتدا باید به حذف آثار مربوط به عوارض سطحی نام برده شده در داده‌های لیدار پرداخت. لذا در این مقاله داده‌های برداشت شده توسط لیدار به تصاویری از مقادیر ارتفاعی و شدت موج بازگشتی تبدیل شدند، سپس به منظور یکسان نمودن ابعاد تصاویر حاصل و نقشه توپوگرافی موجود از منطقه از یک مرحله تبدیل ویولت گسسته از نوع Haar استفاده شد. در ادامه از فیلتر مورفولوژی Opening جهت حذف اثر DSM از روی تصویر ارتفاعی حاصل از لیدار و تبدیل آن به تصویر DEM استفاده شد. در نهایت با استفاده از عملیات انطباق تصاویر به محاسبه موقعیت هواپیما در لحظه برداشت داده‌ها پرداخته شد و مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی و روش‌های دیگر انجام شد که در ادامه به تشریح موارد ذکر شده پرداخته می‌شود.

3- نتایج و پیشنهادات

به منظور پیاده‌سازی روش پیشنهادی، ابتدا داده‌های ارتفاعی و شدت موج بازگشتی از لیدار به تصاویری با ابعاد حداکثری تبدیل شدند که در نهایت تصاویری با قدرت تفکیک مکانی 15 سانتیمتر بر روی زمین تولید شدند (به دلیل چگالی 36 نقطه در متر مربع). سپس به منظور کاهش اثر نویزهای نقطه‌ای موجود در تصویر مانند حضور پرندگان در تصویر و ... یک مرحله تبدیل ویولت گسسته از نوع Haar بر روی تصاویر ارتفاعی و شدت موج بازگشتی اعمال شد. از آنجایی که قدرت تفکیک مکانی نقشه‌های توپوگرافی موجود برابر با 1 متر بود، لذا به منظور انجام انطباق بین تصویر ارتفاعی تبدیل یافته حاصل از لیدار و نقشه توپوگرافی، از روش کاهش ابعاد تصویر بر مبنای درونیابی Bilinear استفاده شد. بنابراین ابعاد تصاویر ارتفاع و شدت موج بازگشتی نهایی با ابعاد نقشه توپوگرافی موجود با قدرت تفکیک مکانی 1 متر یکسان شدند. در ادامه قسمتی از تصویر ارتفاع و شدت موج بازگشتی متناظر با آن به ابعاد 40 پیکسل در 40 پیکسل برش زده شدند (template)، تا با تصویر توپوگرافی موجود از منطقه انطباق داده شوند.

دو عامل تقریبی بودن مختصات به دلیل خطای دریافت INS پس از قطع شدن سیگنال GPS و حضور عوارض زمینی مربوط به سطح در بخش قبلی معرفی شدند که در روش پیشنهادی به بحث در مورد آن - هاپر پرداخته خواهد شد. یک روش به منظور ایجاد انطباق بین تصویر ارتفاعی بریده شده و نقشه توپوگرافی موجود از منطقه، مطابقت دادن تصویر بریده شده با ارتفاعات مربوط به تمام خشکی‌های جهان است که به دلیل زمانبر بودن و نیز رفتارهای تکرار شونده توپوگرافی در سطوح وسیع امکان‌پذیر نمی‌باشد. روش دیگر آنست که با داشتن مختصات تقریبی هواپیما با استفاده از داده‌های INS، یک محدوده مجاز تقریبی جهت جستجوی محل انطباق معرفی شود تا در محدوده مجاز به جستجوی محل دقیق حضور هواپیما پرداخته شود. لذا می‌توان با توجه به نمودار شکل 1 و با در نظر گرفتن بازه زمانی مورد نیاز بین هر بار محاسبه مختصات دقیق ورودی برای INS، به تعریف ابعاد مناسب برای محدوده جستجو پرداخت. محدوده مجاز تعریف شده برای حضور هواپیما در این مقاله برابر با 140 متر (140 پیکسل) از هر طرف می‌باشد. در این حالت حدوداً هر یک دقیقه یکبار نیاز به برداشت مختصات و محاسبه موقعیت جدید برای هواپیما است. اما در نتایج به دست آمده در انتهای مقاله مشاهده می‌شود که سرعت پردازش الگوریتم پیشنهادی جهت محاسبه موقعیت دقیق هواپیما از 5 ثانیه هم کمتر می‌باشد. بنابراین می‌توان ابعاد محدوده جستجو را به میزان زیادی

کاهش داد، زیرا خطای ایجاد شده در این بازه زمانی کمتر از 1 متر (1 پیکسل) می باشد که این امر خود می تواند موجب افزایش بیشتر سرعت محاسبات در روش پیشنهادی شود. عامل مهم دیگری که باید اثر آن را از روی تصویر ارتفاعیبه دست آمده از لیدار حذف نمود، حضور عوارض زمینی مربوط به سطح می باشد. تأثیر این عامل در شکل 2 به وضوح قابل رؤیت می باشد.

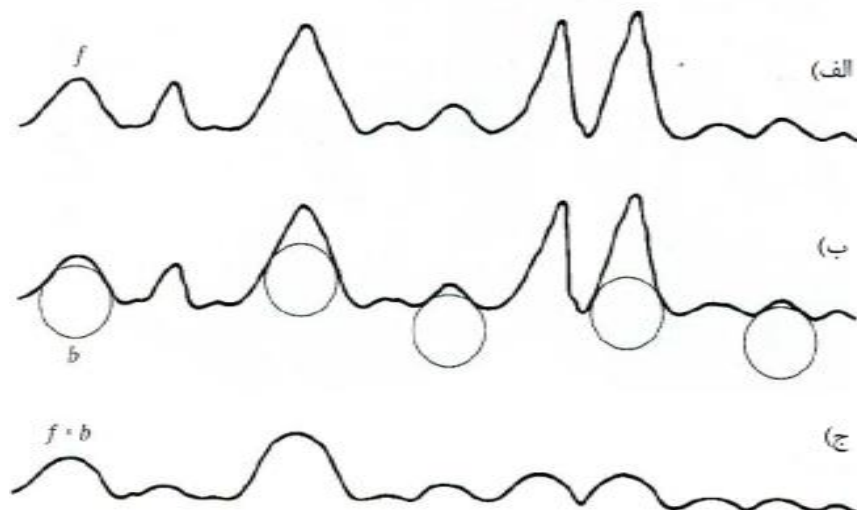


شکل 2. تصویر مربوط به محدوده بریده شده از الف) تصویر شدت موج بازگشتی، ب) تصویر DSM به دست آمده از داده های ارتفاعی لیدار و ج) تصویر DEM بریده شده از نقشه توپوگرافی

به منظور حذف اثر DSM در شکل 2. ب و تولید تصویر ارتفاعی عاری از هر گونه عوارض سطحی، سه مرحله زیر بر روی داده های لیزر حاصل از لیدار اعمال شدند:

1. برای یک نقطه برداشت شده توسط لیدار حداکثر امکان ثبت 6 مقدار ارتفاعی متفاوت وجود دارد که یکی از دلایل آن وجود تخلخل و منافذ خالی در شاخ و برگ های درخت می باشد. پرتوی لیزر می تواند از بالای برگ ها تا پایین ترین نقطه مربوط به تنه درخت چندین نقطه ارتفاعی را ثبت نماید که همگی در یک راستای قائم قرار گرفته باشند. از طرفی، مقادیر ارتفاعی مربوط به سطح زمین خام اغلب کمترین مقادیر ارتفاعی را دارند. بنابراین آخرین پرتوی دریافتی توسط لیدار که به پایین ترین قسمت درخت نفوذ کرده است به عنوان ارتفاع مربوط به سطح زمین خام در آن نقطه در نظر گرفته می شود. با این وجود همچنان تعداد زیادی از مقادیر ارتفاعی وجود دارند که به دلیل تراکم بالای پوشش گیاهی و یا حضور ساختمان ها در منطقه و ... مربوط به سطح زمین خام نیستند.
2. در این مرحله به حذف آثار باقیمانده از DSM با استفاده از داده های شدت موج بازگشتی پرداخته شد. زیرا حضور چتر گیاهی در منطقه باعث ایجاد پراکندگی بر روی داده های بازتابشی می شود. بنابراین شدت امواج بازگشتی از مناطق پوشیده از گیاه کمتر از مقادیر بازگشتی از مناطق بدون پوشش گیاهی می باشد که این نتیجه را می توان از مقایسه بین تصاویر 2. الف و 2. ب به دست آورد. بنابراین از تمامی مقادیر شدت موج بازگشتی میانگین گرفته شد و سپس تنها از مقادیر ارتفاعی متناظر با پیکسل هایی از تصویر شدت موج بازگشتی که مقداری بیشتر از میانگین داشتند در تولید تصویر ارتفاعی مربوط به زمین خام استفاده شد. همچنین به منظور محاسبه مقادیر ارتفاعی در محل پیکسل های حذف شده نیز از برازش سطح و درونیابی بین مقادیر ارتفاعی معلوم به روش Kriging استفاده شد. با این حال همچنان در برخی از پیکسل ها مقادیر ارتفاعی پرت وجود داشتند. لذا مرحله ای دیگر جهت حذف کامل اثر مربوط به عوارض زمینی مربوط به سطح اعمال شد.

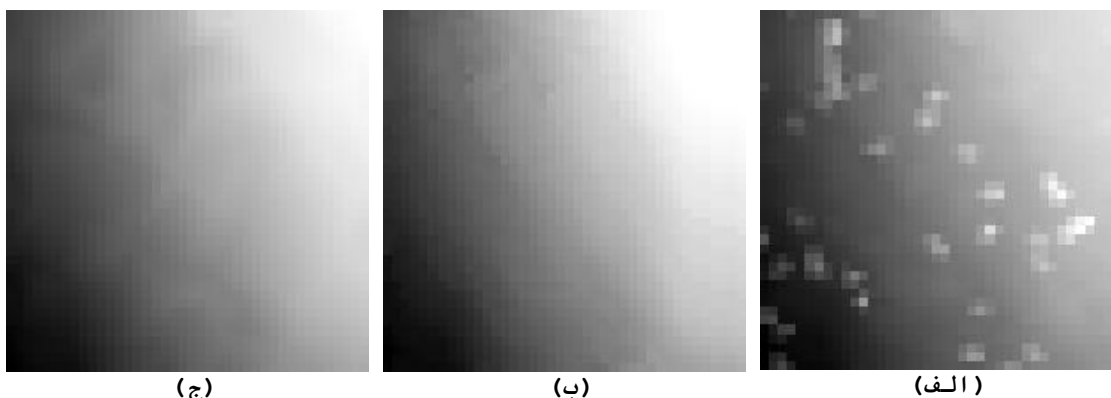
3. قدم آخر مربوط به حذف اثر DSM، استفاده از تبدیل مورفولوژی Opening است. این تبدیل با استفاده از المان ساختاری¹⁵ تعریف شده، مقادیر درجات خاکستری بیشتر را تعدیل می‌کند (شکل 3). از آنجا که ارتفاعات بیشتر نیز با درجات خاکستری بیشتری نمایش داده می‌شوند و از مقادیر مربوط به سطح زمین خام دور هستند، لذا این تبدیل باعث تعدیل مقادیر پیکسل‌های مربوط به چتر گیاهی و عوارض ساخت دست بشر می‌شود.



شکل 3. الف) مقادیر درجات خاکستری یک پروفیل خطی از تصویر، ب) موقعیت قرارگیری المان ساختاری دایروی بر روی درجات خاکستری پروفیل به منظور انجام عملیات Opening، ج) نتیجه حاصل از اعمال [Opening 4]

به دلیل شکل دایروی چتر گیاهی برای هر درخت یا بوته در تصاویر ارتفاعی اخذ شده توسط لیدار، از شکل هندسی دایره برای تشکیل المان ساختاری موجود در این مقاله استفاده شد. در ضمن ابعاد المان ساختاری باید به گونه‌ای باشد که بتواند اغلب مقادیر ارتفاعی پرت را تعدیل نماید و از طرفی آنقدر بزرگ نباشد که منطقه را بیش از حد هموار نماید و تغییرات جزئی ارتفاعی که عامل اصلی شناسایی موقعیت در مناطق هموار است را از بین ببرد. قطر المان ساختاری دایروی به کار رفته در این مقاله به صورت تجربی برابر با 20 درصد از ابعاد متوسط محدوده بریده شده به دست آمد. لذا در این مقاله که محدوده بریده شده ابعادی معادل 40 پیکسل در 40 پیکسل دارد، المان ساختاری قطری معادل 8 پیکسل خواهد داشت.

پس از حذف اثر DSM از روی تصویر ارتفاعی برداشت شده توسط لیدار، اکنون هدف ایجاد انطباق بین تصویر بریده شده از لیدار و محدوده متناظر در نظر گرفته شده از نقشه توپوگرافی است. بنابراین در انجام عملیات انطباق بین تصاویر مذکور، مقادیر ارتفاعی پرت حذف شده‌اند و امکان تطابق با بالاترین دقت و صحت فراهم شده است. جهت انجام عملیات تطابق از مقایسه ضرایب همبستگی بین مقادیر ارتفاعی تصویر بریده شده و مقادیر ارتفاعی متناظر با نقشه توپوگرافی استفاده شد. وقوع بیشترین همبستگی مثبت (با در نظر گرفتن علامت) بین دو تصویر نام برده شده در هر نقطه نشان دهنده محل پرواز هواپیما خواهد بود. همانطور که در شکل 4 مشاهده می‌شود، می‌توان تفاوت بین تصویر ارتفاعی به دست آمده از داده‌های لیدار را پیش از انجام هر گونه پردازش (4.الف) و پس از اعمال روش پیشنهادی (4.ب) مشاهده نمود. محدوده متناظر تصویر بریده شده از روی نقشه توپوگرافی نیز در این شکل (4.ج) آورده شده است.



شکل 4. مقایسه‌ای بین الف) تصویر DSM به دست آمده از داده‌های ارتفاعی لیدار، ب) نتیجه حاصل از تبدیل مورفولوژی بر روی تصویر DSM ج) تصویر DEM مربوط به منطقه مورد مطالعه. با مقایسه بصری بین اشکال فوق، امکان انطباق بین دو تصویر "ب" و "ج" بیشتر از دو تصویر "الف" و "ج" است.

به منظور اعمال پردازش‌های مربوط به TRN و انجام مقایسات مربوط به دقت و صحت و زمان انجام آنالیزها، برنامه‌ای تحت زبان برنامه‌نویسی متلب نوشته و اجرا شد. نتایج ارائه شده در جدول 1 بر مبنای اجرای برنامه مذکور با استفاده از داده‌های لیدار مربوط به 100 منطقه هموار و 100 منطقه ناهموار بر روی سیستمی با پردازنده دو هسته‌ای 2/8 GHz از نوع اینتل می‌باشد. سرعت متوسط اجرای برنامه مذکور بر روی این سیستم برابر با 2/78 ثانیه برای هر کدام از 200 تصویر مورد مطالعه به دست آمد. با توجه به زمان به دست آمده برای انجام محاسبات و اطلاعات حاصل از نمودار شکل 1 می‌توان گفت که حداکثر میزان خطای دریافت مربوط به موقعیت‌یابی توسط INS نمی‌تواند از مقدار 1 متر تجاوز نماید. بنابراین اگر در هر بار اجرای این برنامه، تنها 10 پیکسل از اطراف مختصات به دست آمده توسط INS به عنوان محدوده مجاز جستجو در نظر گرفته شوند، موقعیت نهایی هواپیما با سرعت بیشتری به دست خواهد آمد.

نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که اگر در استخراج ارتفاع زمین خام از نرم‌افزارهای رایج در این زمینه مانند GRASS، CFE و یا TerraScan استفاده شود، ضریب همبستگی متوسط در محل انطباق تصاویر در مناطق ناهموار برابر با 0/91 و در محل انطباق تصاویر در مناطق هموار تقریباً برابر با 0/37 خواهد بود. مقادیر نام برده شده برای روش پیشنهادی به ترتیب برابر با 99٪ و 94٪ خواهند بود. در مورد زمان مورد نیاز جهت حذف آثار مربوط به DSM با استفاده از نرم‌افزارهای مذکور نیز به طور متوسط برای هر یک از تصاویر به 6/01 ثانیه زمان نیاز بود. مقایسه‌ای بین نرم‌افزار GRASS به عنوان صحیح‌ترین نرم‌افزار موجود و روش پیشنهادی در این مقاله در جدول 1 آورده شده است.

جدول 1. مقایسه بین نتایج حاصل از روش پیشنهادی و نرم‌افزار GRASS بر روی 200 تصویر مورد مطالعه

روش پیشنهادی	GRASS	
0/965	0/640	متوسط ضریب همبستگی
6/01	2/78	سرعت (ثانیه)
94/50	67/50	صحت (٪)
0/82	0/74	متوسط خطا (بر حسب پیکسل)

در مورد نحوه محاسبه صحت روش‌ها می‌توان از نسبت بین مواردی که موقعیت درست و در محدوده مجاز جستجو داده‌اند به تعداد کل موارد (200 تصویر) استفاده نمود. زیرا در برخی موارد جواب مربوط به موقعیت هواپیما در گوشه‌های محدوده مجاز جستجو واقع می‌شود و از محل واقعی آن فاصله دارد که به دلیل رفتار تکرار شونده توپوگرافی است و احتمال رخ دادن آن در مناطق هموار بیشتر است. مقدار صحت روش پیشنهادی با 189 انطباق صحیح برابر با 94/50٪ به دست آمد و بیشترین صحت برای سه نرم‌افزار نام برده شده با 135 عدد انطباق صحیح برابر با 67/50٪ و مربوط به نرم‌افزار GRASS می‌باشد.

در مورد محاسبه عدم دقت (خطای) روش‌ها می‌توان از معیار جابجایی پیکسل‌ها و عدم تطابق کامل تصویر بریده شده با نقشه توپوگرافی در موارد صحیح استفاده نمود. بنابراین مواردی که در مرحله قبل به عنوان ناصحیح شناخته شده بودند را کنار گذاشته و سپس به محاسبه خطا بر روی مواردی که صحیح بودند پرداخته شد. این پدیده می‌تواند به دلیل جابجایی عوارض ارتفاعی در مرحله اعمال تبدیل مورفولوژی و یا مواردی از این قبیل باشد. خطای میانگین روش پیشنهادی بر روی 189 تصویر صحیح مورد مطالعه با مجموع 155 پیکسل خطا، برابر با 0/82 پیکسل به دست آمد (دقت زیر پیکسل به دست آمد). خطای میانگین روش GRASS به عنوان صحیح‌ترین نرم‌افزار موجود در بین سه نرم‌افزار نام برده شده، با مجموع 100 پیکسل خطا بر روی 135 تصویر صحیح، در حدود 0/74 پیکسل به دست آمد. لذا دقت موقعیت‌یابی در استفاده از نرم‌افزار GRASS نسبت به روش پیشنهادی مقدار بیشتری را نشان می‌دهد که البته این میزان دقت در مقابل صحت پایین‌تر مربوط به این روش قرار گرفته است.

در مجموع می‌توان روش پیشنهادی در این مقاله را به عنوان سریع‌ترین و با بیش‌ترین قابلیت اطمینان نسبت به دیگر نرم‌افزارهای موجود در این حوزه نام برد که دارای قابلیت غلبه بر مشکلات ناشی از سطوح هموار توپوگرافی می‌باشد و جواب قابل قبولی در عملیات انطباق بر روی توپوگرافی‌های مختلف می‌دهد.

4- نتیجه‌گیری

در این مقاله روشی جدید به منظور انطباق دقیق و سریع داده‌های لیدار با دقت زیر پیکسل و صحتی در حدود 95٪ ارائه شد تا در صورت عدم دسترسی به داده‌های GPS به دلایلی مانند وقوع خطای Cycle Slip و یا اعمال خطا بر روی داده‌های کد C/A مربوط به GPS در بحران‌های نظامی، همچنان امکان موقعیت‌یابی سکوه‌های هوایی مانند هواپیما و ... وجود داشته باشد. از آنجا که دلیل اصلی عدم انطباق تصویر حاصل از داده‌های ارتفاعی دریافت شده توسط لیدار و نقشه توپوگرافی منطقه مربوط به اثر DSM و عوارض ساخت دست بشر مانند ساختمان‌ها، دکل‌ها و یا حتی کابل‌های برق می‌باشد، لذا در این مقاله به معرفی مراحل پرداختیم که طی آن‌ها می‌توان افزایش محلی مقادیر ارتفاعی ناشی از این عوارض را به حداقل خود رساند. در اولین مرحله کاهش نویز استفاده شده در این مقاله به منظور حذف نویزهای محلی، از تبدیل ویولت گسسته استفاده شد. مراحل دیگر کاهش نویز که در این مقاله به معرفی آن‌ها پرداخته شد عبارتند از: استفاده از مقادیر بازتاب نهایی ثبت شده توسط لیدار، استفاده از داده‌های کمکی مربوط به شدت موج بازگشتی و در نهایت اعمال تبدیل مورفولوژی Opening. در ضمن در این مقاله سه پارامتر میزان تغییرات ارتفاعی سطح زمین، چگالی نقاط برداشتی توسط لیدار و ابعاد پروفیل برداشته شده توسط لیدار به عنوان مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر عملیات انطباق در فرآیند TRN معرفی شدند.

در نهایت به بررسی نتایج به دست آمده از روش پیشنهادی و نرم‌افزارهای مختلف پرداخته شد که بر روی 200 تصویر با شرایط مختلف توپوگرافی اعمال شدند. بیشترین صحت در بین نرم‌افزارهای موجود با

مقدار 67/50٪ مربوط به نرم افزار GRASS می باشد که در مقابل صحت 94/50٪ از روش پیشنهادی قرار دارد. با توجه به مقادیر جدول 1، دقت روش پیشنهادی در مقابل روش GRASS مقدار کمتری را نشان می دهد که این پارامتر بر اساس مقایسه بین خطاها در موارد صحیح صورت پذیرفت. سرعت روش پیشنهادی در استخراج موقعیت هواپیما نیز بیش از 2 برابر سریعتر از نرم افزارهای موجود در این زمینه می باشد. لذا روش ارائه شده در این مقاله علاوه بر سرعت بیشتر، قابلیت اطمینان بیشتری نیز نسبت به سایر نرم افزارهای موجود از خود نشان می دهد و می تواند به عنوان گزینه معتبرتری در موقعیت یابی آنی هواپیما مورد استفاده قرار گیرد.

5- پانوش

- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1. Light Detection and Ranging (LiDAR) | 9. Point Cloud |
| 2. Global Positioning System (GPS) | 10. Bare-earth |
| 3. Inertial Navigation System | 11. Digital Elevation Model |
| 4. Terrain Contour Matching | 12. Intensity |
| 5. Kalman Filter | 13. Terrain Referenced Navigation |
| 6. Sandia Inertial Terrain-Aided Navigation | 14. Canopy |
| 7. Drift Error | 15. Structure Element |
| 8. Digital Surface Model | |

مراجع

- Baird, C. A., 1989, *Map-aided navigation system employing TERCOM-SITAN signal processing*, United States Patent 4,829,304.
- Baird, C. A. and Abramson, M. R., 1984, *A comparison of several digital map-aided navigation techniques*, Proceedings of the IEEE PLANS, pp. 286-293.
- Fang, H. T. and Huang, D. S., 2004, *Noise Reduction in LiDAR Signal Based on Discrete Wavelet Transform*, Optics Communications, North Holland, Vol. 233, No.1, pp. 67-76.
- Gonzalez, R. C., and Woods, R. E., 2001, *Digital Image Processing*, 2nd Edition, 2002, Prentice-Hall Inc., Upper Saddle River, New Jersey, 793.
- Hostetler, L. D., Andreas, R. D., and Beckman, R. C., 1978, *Continuous Kalman updating of an inertial navigation system using terrain measurements*, IEEE NAECON, CH1336.
- Kayton, M. and Fried, W. R., 1969, *Avionics Navigation Systems*, 2nd Edition, 1997, John Wiley & Sons, Inc., New York, 666.
- Klass, P. J., 1974, *New guidance system being tested*, Aviation Week and Space Technologies, pp. 48-51.
- Korzeniowska, K. and Lacka, M., 2011, *Generating DEM from LiDAR data – Comparison of Available Software Tools*, Archive of Photogrammetry, Cartography and Remote Sensing, Vol. 22, No. 1, pp. 271-284.
- Olsen, R. C., Puetz A.M., and Anderson, B., 2009, *Effects of LiDAR Point Density on Bare Earth Extraction and DEM Creation*, ASPRS Annual Conference, Baltimore, Maryland.
- Runnalls, A. R., 1985, *A Bayesian Approach to Terrain Contour Navigation*, AGARD Unclassified paper No. 43, Guidance and Control Panel, 40th Symposium.
- Shi, S., Gong, W., Lv, L., Zhu, B. and Song, S., 2012, *Signal Noise Reduction Based on Wavelet Transform in Two-Wavelength LiDAR System*, 22nd ISPRS congress, Melbourne, Australia, pp. 449-452.
- Shin, E. H., 2005, *Estimation Techniques for Low-Cost Inertial Navigation*, May 2005, University of Calgary, Department of Geomatics Engineering.

Surf and download all data from SID.ir: www.SID.ir

Translate via STRS.ir: www.STRS.ir

Follow our scientific posts via our Blog: www.sid.ir/blog

Use our educational service (Courses, Workshops, Videos and etc.) via Workshop: www.sid.ir/workshop