

درونیابی DTM با بکارگیری تکنیک Shape from Shading

برروی تک تصویر رادار و مقایسه آن با سایر تکنیکهای درونیابی

مصطفی منصورپور: کارشناس ارشد نقشه برداری - سنجش از دور

محمد علی رجیبی: استادیار گروه مهندسی نقشه برداری دانشگاه تهران

زهرا رضایی: کارشناس فتوگرامتری سازمان نقشه برداری کشور

Email: mansourpour@gmail.com , marajabi@ut.ac.ir , rezaee.ncc@gmail.com

چکیده

مدل رقومی زمین ابزاری مهم برای مدلسازی سه بعدی زمین و تجزیه و تحلیل‌های مکانی بوده و در بسیاری از کاربردهای علمی و عملی که به زمین و توپوگرافی آن مربوط می‌شود نقش اساسی ایفا می‌کند. با اینکه انواع DTM (Digital Terrain Model) از نقاط مختلف کره زمین موجود می‌باشد، لیکن قدرت تفکیک آنها همواره راضی کننده نبوده و ممکن است در بعضی مناطق DTM چگالتری مورد نیاز باشد. یکی از روشهای چگالتز کردن DTM استفاده از تکنیک درونیابی می‌باشد که بسیار سریع و کم هزینه است. با اینکه روشهای متنوع و گوناگونی برای درونیابی موجود می‌باشد ولیکن در مقایسه با روشهای مستقیم، بدست آوردن ارتفاع با این روش در برخی موارد مشکلات خاص خود را خواهد داشت. در سالهای اخیر تصاویر رادار با کیفیت و دقت قابل قبول و ویژگیهای منحصر به فرد تبدیل به منبع داده مهمی در سنجش از دور شده‌اند و روشهای متنوعی برای استخراج ارتفاع از این نوع تصاویر ارائه شده است، در این تحقیق سعی شده است تا از تکنیک Shape from Shading (SFS) بر روی تک تصویر رادار یک منطقه با استخراج اطلاعات ارتفاعی، جهت درونیابی DTM موجود از منطقه استفاده شود. تصویر مورد استفاده تصویر ماهواره RADARSAT می‌باشد. برای مقایسه نتایج، DTM منطقه با چهار روش درونیابی دیگر نیز چگالتز شده است. نتایج بدست آمده برای ۵ منطقه تست برای روشهای درونیابی Bilinear ، Nearest Neighbor ، Spline و Bicubic و درونیابی با تکنیک SFS نشان می‌دهد تکنیک SFS فقط در نواحی با توپوگرافی خشن جوابهای نسبتاً خوبی دارد. و همچنان در این نوع مناطق نیز تکنیکهای درونیابی نتایج بهتری دارد. البته این مورد را شاید نتوان بدلیل عملکرد بهتر تکنیک درونیابی دانست بلکه به نظر می‌رسد نتایج نه چندان خوب تکنیک SFS بیشتر بدلیل در نظر گرفتن مدل‌های نامناسب و استفاده از تکنیکهای Photometric SFS در Radar SFS باشد.

واژگان کلیدی: رادار، درونیابی، مدل انعکاسی، نویز، Photometric SFS، Orthorectification، SAR، Shape from Shading، Speckle.

DTM کاربردهای مختلفی در علوم زمین داشته و در بسیاری از علوم مختلف و بویژه در رشته‌های مهندسی نقش مهمی در مدلسازی و تجزیه و تحلیل اطلاعات توپوگرافیک و اطلاعات مکانی ایفا می‌کند. مسلماً کاربران مختلف بسته به نیاز خود از مدل رقومی زمین با قدرت تفکیک و دقت متفاوت استفاده می‌کنند با این حال همیشه نیاز به مدل رقومی زمین چگالتر و دقیقتر وجود دارد. اولین روش برای بدست آوردن DTM چگالتر، استفاده از تکنیکهای مختلف نقشه‌برداری زمینی، زوج عکسها در فتوگرامتری یا زوج تصاویر سنجنش از دور می‌باشد. اگرچه هر کدام از این روشها نتایج دقیقی به همراه دارد ولیکن بسیار هزینه‌بر و وقت‌گیر می‌باشد. علاوه بر آن مکانهایی مثل مناطق کوهستانی صعب‌العبور، مناطق جنگلی، مناطق حفاظت شده و حتی سطوح کرات دیگر هستند که انجام عملیات میدانی و یا تهیه تصاویر استرئو از آنجا امکانپذیر نمی‌باشد. بنابراین با این توضیحات در نبود امکان نقشه‌برداری زمینی و تصاویر استرئو می‌بایست به دنبال راهکارهای دیگری بود. روش دیگری که برای چگالتر کردن DTM به نظر می‌رسد استفاده از تکنیک درونبایی می‌باشد که بسیار سریع و کم هزینه است. با اینکه روشهای متنوع و گوناگونی برای درونبایی موجود می‌باشد ولیکن در مقایسه با روشهای مستقیم، بدست آوردن ارتفاع با این روش در برخی موارد مشکلات خاص خود را خواهد داشت. برای مثال تعیین نوع و درجه آن نیاز به آنالیزهای مختلف داشته، همچنین کارایی و دقت آن در مناطق با توپوگرافی متنوع مورد سؤال می‌باشد. از طرفی دیگر با پیشرفت ماهواره‌های سنجنش از دور راداری پیشرفته¹ SAR، امکان دسترسی به تصاویر ماهواره‌ای به‌هنگام و با قابلیتها و پوشش زیاد فراهم شد که در مقایسه با سایر منابع داده‌ها حاوی اطلاعات زیاد بوده و به نسبت آنها هزینه پایینتری دارند. روشهای متنوعی برای استخراج ارتفاع از این نوع تصاویر ارائه شده است، هر چند ویژگیها و هندسه خاص تصاویر راداری آنها را بصورت قابل توجهی از تصاویر اپتیکال متمایز می‌کند. روش clinometry یکی از روشهای استخراج ارتفاع از تصاویر رادار می‌باشد که از تک تصویر برای استخراج ارتفاع استفاده می‌کند. در این روش از تکنیک SFS برای استخراج اطلاعات سه بعدی استفاده می‌شود و بیشتر در مواردی که تهیه تصاویر استرئو امکان‌پذیر نباشد مناسب است. تکنیک SFS از جمله روشهایی است که با پیشرفت علوم الکترونیک و کامپیوتر در دهه‌های اخیر دانشمندان علوم کامپیوتر و ژئوماتیک برای بدست آوردن اطلاعات سه‌بعدی از تک تصویر ارائه و گسترش داده‌اند. اطلاعات مؤثر در استخراج داده‌های سه بعدی از تک تصویر، تغییرات روشنایی در سطح تصویر می‌باشد. برقراری ارتباط بین مقدار روشنایی و ارتفاع سطح، هدف تکنیک SFS می‌باشد. در نگاه اول مسأله غیر قابل حل به نظر می‌رسد، چرا که دو مجهول $p = \partial z / \partial x$ و $q = \partial z / \partial y$ برای بدست آوردن توجیه سطح در برابر فقط

¹Synthetic Aperture Radar

یک معلوم که روشنایی سطح در هر پیکسل است وجود دارد. برای حل این مسأله در برخی موارد فرضیاتی برای ساده‌سازی قیود اضافه‌تری برای رسیدن به جواب در نظر گرفته می‌شود. برای مثال بسیاری از الگوریتمهای SFS در شرایط ایده‌ال عمل می‌کنند. در این الگوریتمها معمولاً سیستم تصویری ارتوگرافیک، منبع نور نقطه‌ای و سطح لامبرتن در نظر گرفته می‌شود، البته باید توجه داشت که سطوح در حالت طبیعی نه کاملاً لامبرتن و نه آینه‌ای هستند همچنین قیود اضافه‌تری نظیر نرم بودن سطح و ... به مسأله اضافه می‌شود [1].

در این تحقیق سعی شده است تا با از تکنیک SFS بر روی تک تصویر رادار و سایر روشهای درونیابی Bilinear, Nearest Neighbor, Spline و Bicubic جهت چگال کردن DTM استفاده و عملکرد آنها با یکدیگر مقایسه شود. برای رسیدن به چنین هدفی از تصویر ماهواره رادارست از منطقه Death-Valley ایالت کالیفرنیا آمریکا به طول و عرض جغرافیایی تقریبی $36^{\circ}34'00''N$ و $116^{\circ}42'00''W$ و DTM این منطقه با قدرت تفکیک ۳۰ متر استفاده شده و قبل از اعمال الگوریتم SFS بر روی تصویر تصحیحات رادیومتریک و هندسی بر روی آن انجام گرفته است.

۲- سنجش از دور راداری

اگر چه در اواسط قرن گذشته بود که مفاهیم مدرن رادار متولد شد. کاربردهای عمرانی رادار از دهه ۶۰ شروع شد که به عنوان ابزاری جهت terrain analysis و کاربردهای منابع طبیعی و... بکار گرفته شد. تصویر رادار در اصل ثبت فعل و انفعال بین انرژی الکترومغناطیسی ارسالی و عارضه زمینی است. تصویر تشکیل شده به متغیرهایی از قبیل: شکل هندسی، میزان پستی بلندی سطح، میزان رطوبت هدف و سایر ویژگیها مانند هندسه بین سنجنده و هدف، جهت دید سنجنده نسبت به هدف و... بستگی دارد. تفاوت‌های زیادی بین طرز تشکیل تصویر و نمایش آن در سیستمهای رادار با سیستمهای نوری مکانیکی و الکترواپتیکی وجود دارد. یک تصویر رادار نمایشی است که میزان درجه خاکستری در آن متناسب با میزان امواج برگشتی به سمت سنجنده خواهد بود. هدفهایی که میزان موج برگشتی زیادی از خود دارند در تصویر با درجه خاکستری روشنتری نسبت به هدفهایی با میزان موج برگشتی کمتر ظاهر می‌شوند [2][3].

۲-۱- عوامل مؤثر بر خصوصیات رادیومتریکی تصویر رادار

مقادیر خاکستری که یک تصویر SAR را می‌سازد در واقع نتیجه امواج برگشتی از هدفها و عوارض زمینی می‌باشد. عوارضی که نسبت بیشتری از موج ارسالی به سمت آنها به طرف سنجنده برگشته باشد در تصاویر روشنتر ظاهر خواهند شد و برعکس. میزان طول موج برگشتی به سنجنده تابعی از خصوصیات هدف مانند (شکل هندسی،

میزان پستی بلندی، ثابت دی الکتریک، زاویه برخورد محلی) و ویژگیهای سنجنده از قبیل طول موج (فرکانس)، زاویه برخورد، پلاریزاسیون و جهت دید) می باشد. ترکیبی از این فاکتورها میزان موج برگشتی به سنجنده را تعیین می کند، بنابراین تغییر در میزان موج برگشتی به سنجنده می تواند ناشی از تغییر در هر یک از پارامترهای فوق باشد.

۲-۲- تصحیح رادیومتریک تصاویر رادار

عامل اصلی که باعث کاهش کیفیت رادیومتریک تصاویر رادار می شود نویز speckle موجود در تصاویر می باشد. رفع این مشکل نیاز به پردازشهای قابل انعطاف و پیشرفته ای دارد که هر یک می تواند در مراحل مختلف انجام گیرد. یکی از این روشها که معمولاً در ایستگاههای گیرنده تصاویر راداری در زمان اخذ تصویر انجام می شود پردازش Multilooking می باشد. این روش می تواند تا اندازه ای مقدار نویز speckle را کاهش دهد. اما مشکل عمده این روش این است که باعث کاهش قابل ملاحظه ای در قدرت تفکیک مکانی می شود. این پردازش قابل انجام توسط کاربران نیست. یکی دیگر از روشهای کاهش نویز speckle روش Filtering می باشد. در این تحقیق برای کاهش نویز speckle از فیلتر Gamma-MAP استفاده شده است [4][5].

۲-۳- تصحیح هندسی تصاویر رادار

با توجه به ویژگیهای خاص تصاویر که به برخی از آنها اشاره شد مراحل تصحیح هندسی تصاویر رادار با تصاویر اپتیکال تفاوت خواهد داشت. این تصحیحات شامل سه مرحله (۱) تبدیل slant to ground range (۲) Registration و (۳) تصحیح هندسی و حذف جابجایی های ناشی از اختلاف ارتفاع و توپوگرافی (روش رادارگرامتری) می باشد که سومین مرحله فقط با داشتن اطلاعات ارتفاعی امکان پذیر می باشد. با توجه به اینکه فرمت تصویر اصلی برای اجرای الگوریتم، ground range می باشد بنابراین از روش رادارگرامتری برای تصحیح هندسی تصویر استفاده شد.

۳- تکنیک Shape from Shading

تکنیک SFS اولین بار توسط Rindfleisch و Horn مطرح شد [6][5][7]. در این تکنیک سعی می شود با در نظر گرفتن ارتباط بین مقادیر درجات خاکستری تصویر و توپوگرافی منطقه، سطح سه بعدی با استفاده از تک تصویر بازسازی شود. در واقع مسأله مستقیم در تکنیک SFS برقراری نداشت بین توجیه سطح و روشنایی سطح می باشد که می بایست برای سطوح مختلف و شرایط پرتوافکنی متفاوت حل گردد.

Radar SFS یا بکارگیری تکنیک SFS بر روی تصاویر رادار مسیری را برای آنالیز اتوماتیک زمین با بهره‌گیری از این نوع تصاویر پیش روی ما قرار می‌دهد. این فرایند کمک می‌کند تا از تصاویر رادار از طریق آنالیز تغییر شدت موج برگشتی جهت بازسازی توپوگرافی زمین استفاده نمود. بطور معمول در این روش نیز تلاش شده است تا از ایده‌ها و روشهای استفاده شده در بازسازی سطوح با استفاده از Photometric SFS بهره گرفته شود. در Photometric SFS بازسازی needle map بر پایه معادله irradiance تصویر اپتیکال مورد نظر می‌باشد در حالت کلی این موضوع تا زمانی که هدف بازسازی دو جزء از نرمال سطح بوسیله مقدار روشنایی آن باشد یک مساله ill-posed خواهد بود. به همین دلیل تعدادی قیود اضافی دیگر نیز باید به مساله اضافه شود تا شکل سطح را بتوان بازسازی کرد. رایجترین قیود این است که جهت نرمال سطح بصورت اسموز در عرض سطح بازسازی شونده تغییر کند. علاوه بر آن معادله irradiance را می‌توان با در نظر گرفتن تابع انعکاس معلوم (معمولاً لامبرتین) که در عرض سطح ثابت می‌باشد و همچنین معلوم بودن جهت منبع، در مراحل بعدی تبدیل به یک مدل ساده‌تری کرد.

۳-۱- ساده‌سازی معادلات

برای اینکه بتوان معادلات بسیار پیچیده SFS را قابل کنترل و مدلسازی نمود بیشتر محققین با فرضیات اولیه، روابط را ساده‌سازی کردند. اولین فرض برای ساده سازی مساله این است که بیننده یا سنجنده و منبع انرژی از سطح مورد نظر دور بوده بصورتی که جهت برخورد و جهت دید سنجنده ثابت باشد. همچنین خصوصیات انعکاسی سطح یکسان و سطح لامبرتین در نظر گرفته شده و سیستم تصویر ارتوگرافیک باشد. باید به این مساله توجه شود که در عمل این فرضیات بطور کامل امکان پذیر نیستند مگر در محیطهایی که قابل کنترل باشند.

روشهای مختلفی برای بیان توجیه هر المان از سطح موجود می‌باشد. با فرض اینکه $z(x, y)$ ارتفاع یک المان از سطح بر روی صفحه XY در سیستم مختصات کارتزین باشد، در اینصورت یک روش برای بیان توجیه سطح در موقعیت (x, y) تعیین بردار نرمال سطح در آن نقطه می‌باشد. روش دیگر، مشخص کردن مؤلفه‌های گرادیان سطح $p(x, y) = \partial z / \partial x$ و $q(x, y) = \partial z / \partial y$ می‌باشد که p و q به ترتیب شیب سطح $z(x, y)$ در راستای x و y در موقعیت (x, y) می‌باشد. رابطه بین بردار نرمال سطح با گرادیان سطح بصورت رابطه (۱) خواهد بود.

$$N(x, y) = (N_1, N_2, N_3)^T = \frac{1}{\sqrt{1 + p^2 + q^2}} (-p, -q, 1)^T \quad (1)$$

که در آن N_1 ، N_2 و N_3 به ترتیب مؤلفه‌های بردار نرمال در راستای محورهای x ، y و z می‌باشد.

موج برگشتی از یک سطح ممکن است علاوه بر منبع نور اصلی ناشی از نورهای جانبی و یا نور انعکاس یافته از سطوح دیگر نیز باشد. در صورتیکه تأثیر این نورهای خارجی را صفر، همچنین منبع نور نقطه‌ای و سطح لامبرتین در نظر گرفته شود در این صورت تابع روشنایی سطح بصورت رابطه (۲) خواهد بود

$$R(p, q) = \rho \vec{N} \cdot \vec{L} = \rho \frac{-l_1 p - l_2 q + l_3}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \quad (2)$$

که در آن ρ فاکتور البدو سطح و N بردار نرمال سطح، $L=(l_1, l_2, l_3)$ بردار یکه منبع انرژی و p و q مولفه‌های گرادیان سطح می‌باشند.

راه حل‌های کلی که برای SFS ارائه می‌شود نیز بر اساس رابطه (۲) شکل می‌گیرد. در صورتی که $E(x,y)$ روشنایی مشاهده شده المان سطح در نقطه (x,y) و Ω دامنه x,y تصویر باشد در اینصورت معادله روشنایی سطح را می‌توان بصورت رابطه (۳) در نظر گرفت.

$$E(x, y) = R(p, q) = \rho \vec{N} \cdot \vec{L} = \rho \frac{-l_1 p - l_2 q + l_3}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} \quad \forall x, y \in \Omega \quad (3)$$

معادله روشنایی تصویر (رابطه (۳)) یک معادله غیر خطی از مشتقات جزئی مرتبه اول می‌باشد. در این معادلات در صورتی که ابعاد تصویر $D \times D$ باشد و با فرض معلوم بودن ρ و بردار منبع نور L ، می‌بایست این معادلات را برای $2D^2$ مجهول با D^2 تغییرات روشنایی حل کرد.

۳-۲- تکنیکهای ارائه شده برای SFS

در یک تقسیم بندی، دو دسته الگوریتم برای مسأله SFS ارائه شده است. الگوریتمهای کلی^۱ که اطلاعات را در تمامی سطح از یک نقطه با توجیه معلوم به بقیه نقاط سطح منتشر می‌کنند و الگوریتمهای محلی^۲ که اطلاعات سطح را از تغییرات محلی روشنایی بدست می‌آورند. در روش محلی که توسط Pentland ارائه شد [8][9]. با فرض کروی بودن سطح بطور محلی، شکل سطح از روشنایی و مشتقات اول و دوم سطح بازسازی می‌شود. وی از فرضیاتی در مورد شکل محلی سطح، برای استخراج توجیه سطح از اطلاعات تغییرات روشنایی در همسایگی کوچکی از تصویر استفاده می‌کند. روش کلی که توسط Horn و همکارانش مطرح شد دو مرحله برای تخمین سطح در نظر می‌گیرد در مرحله اول، روشنایی اندازه‌گیری شده المان تصویر برای بدست آوردن گرادیان سطح در هر نقطه به همراه فرضیات مختلفی برای رسیدن به جواب در نظر گرفته می‌شود. یکی از این فرضیات نرم بودن سطح می‌باشد. در مرحله دوم

¹ Global Algorithms

² Local Algorithm

انتگرال‌گیریهای متوالی انجام می‌شود تا از توجیه سطح تخمین شده شکل سطح یا $z(x,y)$ استخراج شود. روشهای characteristic strip، خطی و variational از روشهای کلی SFS می‌باشند که توسط محققین مورد بررسی قرار گرفتند. در این تحقیق با توجه به مواردی که در بخشهای بعد آورده خواهد شد روش variational به عنوان روش حل SFS انتخاب شد [10][11][12].

۳-۳- انتخاب روش

همانطور که در مطالب پیشین مطرح شد دو روش عمده برای مسأله SFS با استفاده از تک تصویر وجود خواهد داشت: روشهای محلی و روشهای کلی. علی‌رغم ساده بودن روش محلی، این روش فرضیات قوی را در مورد شکل سطح در نظر گرفته و از مشتقات اول و دوم روشنایی سطح برای استخراج پارامترهای شکل استفاده می‌کند. فرض کرویت با تکیه بر مشتقات روشنایی که می‌تواند دارای نویزهای مختلف باشد، روش محلی را برای مطالعه مورد نظر غیرمناسب می‌سازد. علاوه بر روشهای محلی، روشهایی مانند روش characteristic strip، variational یا تکراری و خطی جزء روشهای کلی می‌باشند. همانند روش محلی، روش characteristic strip به نویز تصویر حساس بوده و متأثر از آن خواهد بود. همچنین وابستگی مستقیم این روش به خطاهای جمع شده متوالی، فرایند متوالی این روش را نامؤثر و غیر مستحکم می‌سازد. برای روش خطی با اینکه روشی بدون تکرار و سریع می‌باشد ولیکن تقریب خطی نگاشت انعکاس با وجود اهمیت ترمهای مربعی باعث ضعف این الگوریتم خواهد بود. با این حال به نظر می‌رسد در صورتی که قیود، شرایط و پارامترهای مناسبی در روش variational انتخاب شود. این روش نتایج مستحکمتری نسبت به سایر روشهای SFS ارائه کند [1].

۳-۴- روش variational برای حل مسأله SFS

یکی از روشهای کلی در مسأله SFS استفاده از روشهای تکرار در حل معادلات می‌باشد که در دو مرحله بر روی شبکه‌ای از سلولهای به هم پیوسته اجرا می‌شود. در مرحله اول توجیهات سطح با استفاده از اطلاعات تغییرات روشنایی بدست آمده و سپس در مرحله دوم با استفاده از این اطلاعات شکل و ارتفاع سطح بازسازی می‌شود. در صورت توجه به روابط ذکر شده در بخشهای قبل، مشاهده می‌شود که معادله (۳) الزاماً مقادیر تئوریک را خواهد داد و در عمل مدلسازی خطاها مانند نامناسب بودن نگاشت انعکاس، ناقص بودن اطلاعات از منبع نور، خطاهای رادیومتریکی و مکانی و همچنین وجود نویزهای مختلف و تغییرات البدو سطح بصورت کامل امکانپذیر نمی‌باشد. همه این موارد بر وجود و یکتایی جواب تاثیرگذار می‌باشد. برای اینکه بتوان وجود این خطاها را در معادلات لحاظ کرد، می‌توان معادله (۳) را بصورت (۴) بازنویسی کرد:

$$E(x, y) = R(p, q) + e(x, y) = \rho \vec{N} \cdot \vec{L} = \rho \frac{-l_1 p - l_2 q + l_3}{\sqrt{p^2 + q^2 + 1}} + e(x, y) \quad \forall x, y \in \Omega \quad (4)$$

که در آن $e(x, y)$ خطای روشنایی در نقطه (x, y) می‌باشد.

روشهای تکراری SFS بر اساس فرمولهای Variational می‌باشد که در آنها نرمال سطح یا گرادیان سطح با مینیم کردن تابع انرژی در سرتاسر تصویر بدست می‌آید. اولین پارامتری که تابع انرژی شامل آن می‌باشد خطای روشنایی می‌باشد که بصورت مستقیم از معادله روشنایی بدست می‌آید. به زبان ریاضی تابعی که باید مینیم شود بصورت رابطه (5) خواهد بود.

$$I(p, q) = \iint_{\Omega} |e(x, y)|^2 d\Omega = \iint_{\Omega} (E(x, y) - R(p, q))^2 d\Omega \quad (5)$$

که در آن $e(x, y)$ خطای روشنایی در نقطه (x, y) می‌باشد.

مینیم کردن این تابع نسبت به مقادیر مجهول p و q ، نتایجی خواهد داد که تفاوت بین روشنایی تصویر مشاهده شده و روشنایی فرمول شده حداقل شود.

پس از برآورد توجیهای سطح \hat{p} و \hat{q} به روش کمترین مربعات، مرحله دوم در SFS به روش تکرار بدست آوردن سطح $z(x, y)$ از توجیهای سطح می‌باشد.

نکته‌ای که باید به آن توجه کرد این است که روش مینیم سازی بر اساس معادله (4) یک مسئله ill-posed است. معادلات SFS ذاتاً معادلات ill-posed می‌باشند که دلیل فیزیکی آن امکان وجود سطوح مختلف با الگوی تغییرات روشنایی یکسان می‌باشد. البته می‌توان مسئله را با دانستن اطلاعات دیگری از سطح تصویر برداری شده از حالت ill-posed خارج کرد. بنابراین برای همگرایی و یکتایی جواب در مسئله SFS، قیدها و شرایطی نیز در نظر گرفته می‌شود. برخی از محققین از قید نرم بودن سطح برای همگرایی و رسیدن به جواب یکه استفاده کردند. این قید با مینیم کردن تابع (6) بدست می‌آید.

$$\iint_{\Omega} (p_x^2 + p_y^2 + q_x^2 + q_y^2) d\Omega \quad (6)$$

در آن اندیسه‌های x و y مشتقات نسبی را نشان می‌دهد.

یکی دیگر از روشها برای برقراری قید نرم بودن، استفاده از قید نرم بودن به عنوان ترم منظم‌سازی¹ و مینیم کردن تابع (رابطه 7) و پیدا کردن مقادیر مجهول p و q می‌باشد [12].

$$\iint_{\Omega} [(E(x, y) - R(p, q))^2 + \lambda(p_x^2 + p_y^2 + q_x^2 + q_y^2)] d\Omega \quad (7)$$

¹ Regularization

که در آن (رابطه ۷) λ یک اسکالر است که توازن بین خطای روشنایی و قید نرم کنندگی ایجاد می‌کند. از شکل تابع کاملاً مشخص است که انتخاب مقدار بزرگتری از λ موجب تولید یک سطح نرم‌تر خواهد شد.

در صورت حل عددی معادله (۷) روابط (۸) و (۹) نتیجه می‌شود.

$$p_{i,j}^{n+1} = \bar{p}_{i,j}^n + \frac{\varepsilon^2}{4\lambda} (E_{i,j} - R(p_{i,j}^n, q_{i,j}^n)) R_p(p_{i,j}^n, q_{i,j}^n) \quad (۸)$$

$$q_{i,j}^{n+1} = \bar{q}_{i,j}^n + \frac{\varepsilon^2}{4\lambda} (E_{i,j} - R(p_{i,j}^n, q_{i,j}^n)) R_q(p_{i,j}^n, q_{i,j}^n) \quad (۹)$$

که در آن روابط

$$\bar{p}_{i,j}^n = \frac{1}{4} (p_{i+1,j}^n + p_{i-1,j}^n + p_{i,j+1}^n + p_{i,j-1}^n) \quad (۱۰)$$

$$\bar{q}_{i,j}^n = \frac{1}{4} (q_{i+1,j}^n + q_{i-1,j}^n + q_{i,j+1}^n + q_{i,j-1}^n) \quad (۱۱)$$

و (i, j) موقعیت هر سلول را نشان می‌دهد و بالانویس n نشان دهنده تعداد تکرار و ε فاصله بین سلولهاست. به دلیل اینکه $R(p, q)$ غیر خطی است این معادلات به روش تکرار حل می‌شود.

۴- مراحل حل مساله

همانطور که در مطالب قبلی مطرح شد برای کاهش تعداد مجهولات در مسأله SFS، فرضهای اولیه‌ای در نظر گرفته می‌شود. یکی از فرضیات این است که موقعیت منبع موج در لحظه اخذ تصویر ثابت و قابل محاسبه باشد. با توجه به فاصله زیاد منبع موج تا سطح، می‌توان آن را منبع موج نقطه‌ای فرض کرد. فرض دوم سطح را دارای خصوصیات انعکاسی یکسان یا به عبارتی سطح لامبرتین در نظر می‌گیرد. هر چند در مورد تصویربرداری رادار این فرض مسأله را بسیار ساده‌تر خواهد کرد. فرض سوم این است که تصویر اخذ شده دارای سیستم تصویر ارتوگرافیک باشد. بنابراین برای تصاویر که سیستم تصویر غیر ارتوگرافیک دارند می‌بایست تحت فرایند Orthorectification و یا با رجیستر کردن تصویر با تصاویر تصحیح شده و DTM مربوط به تصویر، جابجایی‌های ناشی از تیلت یا ارتفاع در آن، تصحیح گردد. فرض اساسی دیگر این است که تصویر رادار قدرت تفکیک بهتری نسبت به DTM داشته باشد. بنابراین تصویر در نظر گرفته شده با قدرت تفکیک دو برابر نسبت به DTM مربوطه انتخاب شده است.

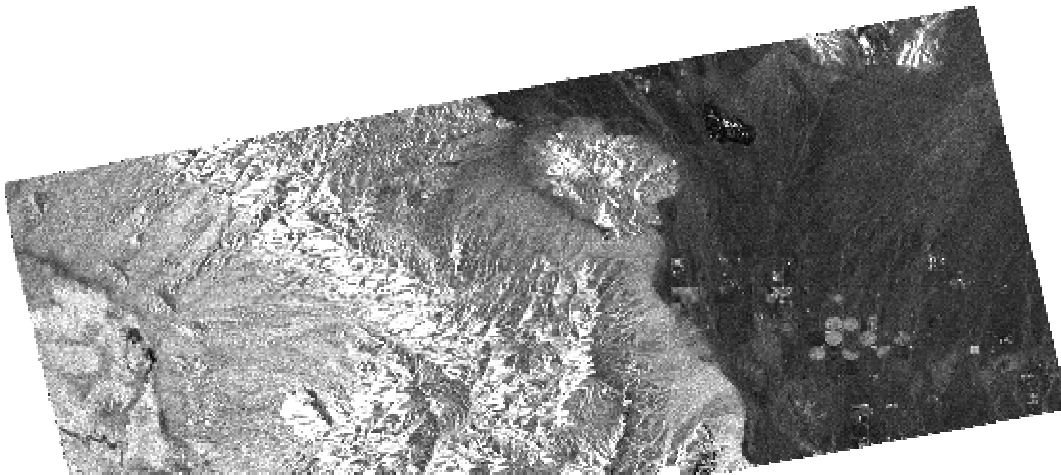
علاوه بر روش SFS برای درونیابی DTM از چهار روش درونیابی Bilinear, Nearest Neighbor, Spline و Bicubic نیز استفاده می‌شود.

مراحل محاسباتی مسأله SFS در دو بخش پیش پردازش و پردازش انجام می‌گیرد. در مرحله پیش پردازش، داده‌های ورودی برای پردازش اصلی آماده می‌شود. داده ورودی در این فرایند تصویر SAR و DTM مربوط به منطقه اخذ تصویر می‌باشد که می‌بایست در مرحله اول تصحیحات رادیومتریک و هندسی برای آماده سازی تصویر جهت الگوریتم SFS بر روی تصویر ورودی انجام می‌شود. برای کاهش نویز از فیلتر Gamma-MAP و برای تصحیح هندسی از روش رادارگرامتری استفاده شد. در این مرحله همچنین مواردی از جمله وجود مناطقی که DTM مربوطه در آن مناطق دارای گپ می‌باشد و اینکه آیا مینیمم یا ماکزیمم مقدار خاکستری در تصویر وجود دارد کنترل می‌شود. در هر دو این حالات کل این قسمت پردازش نشده رها می‌شود و از مقدار درونیابی شده با روشهای دیگر، استفاده می‌شود. مرحله پیش پردازش با مرحله‌ای دیگر ادامه می‌یابد و برای بدست آوردن مقادیر اولیه برای تکنیک SFS ارتفاع نقاط نامعلوم در DTM توسط تکنیک درونیابی Bilinear تقریب زده می‌شود. پس از بدست آوردن مقادیر p و q از روش SFS برای بدست آوردن مقادیر ارتفاعی از مقادیر p و q موجود، تصویر به قطعه های 3×3 تقسیم می‌شود. بصورتی که هر قطعه دارای ۹ نقطه بوده که ارتفاع ۵ نقطه از ۹ نقطه با توجه به فرض معلوم می‌باشد. بنابراین در هر قطعه ۴ نقطه با ارتفاع مجهول خواهد بود. برای بدست آوردن ارتفاع نقاط مجهول از ۵ نقطه و شش p و شش q معلوم در هر قطعه از روش کمترین مربعات استفاده می‌شود.

۵- اجرای الگوریتم بر روی تصویر SAR

تصویر مورد استفاده در این تحقیق تصویر تصحیح شده ماهواره RADARSAT (شکل ۱) و DTM مربوط به آن می‌باشد. با توجه به قدرت تفکیک DTM موجود از منطقه (۳۰ متر) از تصویر SAR تصحیح شده تصویری با قدرت تفکیک ۳۰ متری استخراج شد. بنابراین فرض مسأله بر این اساس است که با داشتن تصویر قائم از منطقه با قدرت تفکیک ۳۰ متری بتوان با استفاده از تکنیک SFS، از DTM با قدرت تفکیک ۶۰ متری، DTM ۳۰ متری را بازسازی کرد. لازم به ذکر است که DTM با قدرت تفکیک ۶۰ متری از DTM اصلی ۳۰ متری بدست آمده است. همچنین مقادیر درجات خاکستری تصویر بین مینیمم صفر و ماکزیمم یک، scale شده است که در اینصورت مقدار ρ در محاسبات می‌بایست برابر با یک در نظر گرفته شود. پس از انجام پیش پردازشهای اولیه، پنج منطقه تست از تصویر اصلی جهت بررسی نتایج الگوریتم در آن مناطق انتخاب شده که خصوصیات ارتفاعی مناطق انتخاب شده در جدول ۱ آمده است. منطقه تست ۱ بخشی از تصویر اصلی می‌باشد که دارای توپوگرافی متنوعی است. منطقه تست ۲ بخشی از منطقه تست ۱ می‌باشد که دارای سطح نسبتاً همواری است و منطقه تست ۳ نیز بخش دیگری از منطقه تست ۱ می‌باشد که دارای توپوگرافی خشن تری است. مناطق تست ۴ و ۵ نیز جهت بررسی بیشتر نتایج بر روی مناطق مختلف تصویر، انتخاب شده است

در مرحله پردازش داده ها، گام اول بدست آوردن مقادیر p و q برای سطح مورد نظر می باشد در گام اول در معادلات (۸) و (۹) مقدار $(\varepsilon^2 / 4\lambda) = 1$ در نظر گرفته شد. مقادیر اولیه نیز از سطح درونیابی شده استخراج و در معادلات قرار گرفت. در مراحل بعدی نتایج الگوریتم با فرض $(\varepsilon^2 / 4\lambda) = 0.6$ و $(\varepsilon^2 / 4\lambda) = 0.3$ بررسی شده است. لازم به ذکر است در معادلات (۸) و (۹) در صورتی که $(\varepsilon^2 / 4\lambda) > 1$ بوده و با کاهش λ نتایج در مقایسه با نتایج تکنیک درونیابی بدتر شده و با کاهش بیشتر λ مسأله همگرا نخواهد شد. در جدول ۲ برای مقایسه، مقادیر بدست آمده از الگوریتم برای انحراف معیار اختلاف بین سطح واقعی و سطح درونیابی شده و همچنین انحراف معیار اختلاف بین سطح واقعی و سطح بدست آمده از الگوریتم SFS برای مناطق تست مختلف و روشهای درونیابی متفاوت، آورده شده است.



جدول ۲. مقادیر انحراف معیار اختلافات ارتفاعی بین سطح واقعی و سطوح بدست آمده با استفاده از تکنیکهای مختلف درونیابی و تکنیک SFS در شرایط مختلف (مقادیر بدست آمده بر حسب متر می باشد)

SFS ($\varepsilon^2 / 4\lambda$) = 0.3	SFS ($\varepsilon^2 / 4\lambda$) = 0.6	SFS ($\varepsilon^2 / 4\lambda$) = 1	Bicubic	Spline	Bilinear	Nearest neighbor	
۱,۹۹۵۶	۲,۱۰۳۵	۲,۲۶۷۹	۱,۶۸۷۰	۱,۷۰۸۶	۱,۶۲۶۵	۳,۲۷۸۶	منطقه تست ۱
۱,۶۳۳۹	۱,۷۹۸۸	۱,۹۵۸۱	۰,۶۵۵۸	۰,۶۷۷۶	۰,۶۴۶۲	۱,۶۶۰۵	منطقه تست ۲
۴,۹۰۷۷	۵,۰۱۲۰	۵,۱۳۸۲	۴,۷۴۱۳	۴,۴۴۵۷	۴,۹۸۰۷	۹,۵۳۸۴	منطقه تست ۳
۲,۲۳۳۲	۲,۲۹۰۷	۲,۳۷۷۵	۱,۷۲۷۴	۱,۷۱۸۶	۱,۷۶۰۷	۳,۶۹۸۸	منطقه تست ۴
۳,۲۲۶۵	۳,۳۱۱۲	۳,۴۴۴۷	۲,۵۶۶۹	۲,۶۰۲۱	۲,۶۱۱۶	۵,۷۲۴۹	منطقه تست ۵

۶- نتیجه گیری و پیشنهادات

در تکنیک SFS با در نظر گرفتن ارتباط بین درجات خاکستری تصویر، توجیه سطح، نوع سطح و جهت تابش منبع نور به هنگام تصویربرداری، سطح سه بعدی از یک تصویر بازسازی می شود. در الگوریتم SFS که در این تحقیق استفاده شده است فرض بر این است که تصویر در شرایط تابش یکسان منبع موج، از سطح پیوسته با خاصیت انعکاسی (albedo) ثابت و بصورت ارتوگرافیک برداشته شده است بنابراین در صورت عدم تحقق هر یک از پیش فرضها، نتایج حاصل از این تکنیک می تواند نادرست و یا گمراه کننده باشد. فرض لامبرتین بودن سطح که در بسیاری از الگوریتمهای SFS جهت ساده سازی مسأله در نظر گرفته می شود. بدلیل حساس بودن انعکاس راداری به جنس سطح، در مقایسه با SFS در طول موج مرئی فرض ضعیف تری می باشد. میزان نویز و همچنین نوع نویز موجود در تصاویر رادار در مقایسه با تصاویر اپتیکال بسیار متفاوت است. بنابراین با توجه به تاثیر مستقیم نویز بر روی درجه خاکستری تصاویر، می بایست نویز موجود در تصاویر رادار با توجه به ویژگیهای آن مدلسازی و حذف شود. یکی از پیش فرضهای الگوریتم مطرح شده در این تحقیق، قائم بودن سیستم تصویر است. بنابراین می بایست تصویر رادار مورد استفاده Orthorectify شود. جهت ارتو کردن تصویر رادار با توجه به اعوجاجات هندسی شدید ناشی از توپوگرافی سطح در این نوع تصاویر، بهترین روش استفاده از روش رادارگرامتری است که در آن نیاز به DTM منطقه می باشد. بدیهی است استفاده از DTM دقیقتر و نقاط کنترل دقیقتر، دقت تصویر اورتو شده را افزایش خواهد داد. نتایج نشان می دهد که تکنیک SFS فقط در نواحی با توپوگرافی خشن جوابهای نسبتاً خوبی دارد در حالیکه مشاهده می شود در این نوع مناطق نیز تکنیکهای درونیابی نتایج بهتری دارد. البته این مورد را شاید نتوان بدلیل عملکرد بهتر تکنیک درونیابی دانست بلکه به نظر می رسد نتایج نه چندان خوب تکنیک SFS بیشتر بدلیل در نظر گرفتن مدل های نامناسب و استفاده از تکنیکهای Photometric SFS در Radar SFS باشد.

۷- مراجع

- [1] Rajabi M. A. , 2003; Spatial Enhancement of Digital Terrain Models Using Shape From Shading With Single Satellite Imagery , PhD Thesis , Department of Geometrics Engineering , Calgary.
- [2] Raney R. K. , 1998; Radar Fundamentals: Technical Perspective , Manual of Remote Sensing, Third Edition, Volume 1,2, ASPRS, John Wiley and Sons Inc. , Toronto
- [3] Henerson, F. M. , Lewis, A. J. , 1998. Principles and Application of Imaging Radar. Volume1, John Wiley & Sons Inc. , New York.
- [4] Lopes A. , Nezry E. , Touzi R. , and Laur H, 1993; Structure Detection and Statistical Adaptive Speckle Filtering in SAR Images , International Journal of Remote Sensing, Vol. 14, No. 9, pp. 1735-1758
- [5] Touzi R. , Lopes A. , and Bousquet P. ,1998; A statistical and geometrical edge detector for SAR image , IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 26, No. 6, pp. 764-773
- [6] Horn B. K. P. , 1970 ; Shape From Shading : A Method For Obtaining The Shape Of Asmooth Opaque Obget From One View , Phd Thesis , Department Of Electrical Engineering , MIT.
- [7] Rindfleisch T., 1966; Photometric Method for Lunar Topography, Photogrammetric Eng. , Vol. 32, pp. 262-276.
- [8] Pentland A. P., 1984; Local Shading Analysis , IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence , Vol. 6 . pp. 170-187.
- [9] Pentland A. P. , 1989; Local Shading Analysis. Shape from Shading, MIT, pp. 473-479.
- [10] Horn B. K. P. , 1975; Obtaining Shape from Shading, The Psychology of Machine Vision, P. H. Winston Ed. , McGraw-Hill, NY, pp. 115-155.
- [11] Horn B. K. P. , Brooks M. J. , 1986 ; The Variational Approach to Shape from Shading , CVGIP, Vol. 33, No. 2, pp. 174-208.
- [12] Ikeuchi K. , Horn B. K. P. , 1981 ; Numerical Shape from Shading and Occluding Boundaries , Artificial Intelligence , Vol. 17 , No. 1-3 , pp. 141-184

- هاشمی بنی لیلا، استخراج اتوماتیک مدل رقومی زمین از یک تصویر با استفاده از تکنیک Shape from Shading، پایان نامه کارشناس ارشد، دانشگاه تهران، ۱۳۸۰