

مدلسازی عدم قطعیت حاصل از داده‌های ارتفاعی SRTM و ASTER و تأثیر آن بر طبقه‌بندی لندفرم‌ها در حوضه آبریز گرم‌چای

بختیار فیضی زاده^۱

سلیمه عبدالله آبادی^۲

خلیل ولیزاده کامران^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۲/۲۲

چکیده

امروزه اعتبارسنجی نتایج حاصل از تحلیل‌های مکانی GIS، تبدیل به یک چالش بزرگ در دنیای GIS شده است. تحلیل عدم قطعیت در زمینه‌های مختلف توجه به کیفیت داده و موضوعات مرتبط با آن از قبیل خطا، مدل‌های عدم قطعیت، انتشار خطا، حذف خطا و عدم قطعیت در داده‌ها، بیش از هر زمان دیگر احساس می‌شود. مدل‌های ارتفاعی رقومی از مهمترین داده‌های جغرافیایی می‌باشند که مبنای تحلیل‌های مکانی مختلفی را تشکیل می‌دهند. این پژوهش با هدف بررسی میزان خطا و عدم قطعیت، داده‌های ارتفاعی حاصل از ماهواره‌های SRTM و ASTER را مد نظر قرار داده است. در این راستا، ابتدا با استفاده از شاخص‌های آماری ME، STD و RMSE مقدار خطای داده‌های مدل‌های ارتفاعی رقومی شناسایی محاسبه شد. در ادامه عدم قطعیت خطای داده‌ها با روش مونت کارلو شبیه‌سازی و الگوی انتشار خطا با روش درون‌یابی نتایج استخراج شد. نتایج این مرحله نشان می‌دهد که مدل رقومی استخراج شده از زوج استرویی ASTER با وجود داشتن تفکیک مکانی بهتر، مقادیر بالاتری از خطا را شامل می‌شود و عملاً فاقد جزئیات مدل رقومی ارتفاع معادل ۳۰ متر است. سپس با حذف الگوی انتشار خطا از مدل‌های رقومی، DEM ثانویه تولید گردید. با محاسبه مجدد شاخص‌های توصیف‌کننده خطا و مقایسه این مقادیر با مقادیر اولیه، نتایج حاکی از آن است که هر دو مدل ارتفاعی رقومی بعد از حذف الگوی انتشار خطا دقت بالاتری را از خود نشان می‌دهند. از شاخص TPI جهت تعیین موقعیت توپوگرافی حوضه استفاده شد و حوضه به ۶ طبقه تقسیم و میزان خطا در هر یک از طبقات قبل و بعد از شبیه‌سازی محاسبه گردید. نتایج حاکی از کاهش میزان خطا در تمامی طبقات قبل و بعد از شبیه‌سازی در هر دو مدل ارتفاعی رقومی است. نتایج حاصل از این تحقیق در خصوص مدلسازی عدم قطعیت داده‌های مدل‌های رقومی ارتفاع به عنوان یکی از داده‌های پایه در مطالعات علوم زمین بسیار کاربردی بوده و می‌تواند راهگشای مطالعات آبی برای کاهش عدم قطعیت و افزایش صحت نتایج تحقیقات آبی باشد.

واژه‌های کلیدی: تحلیل عدم قطعیت - مدل‌های رقومی ارتفاع - زوج استرویی Aster-SRTM - گرم‌چای

۱- استادیار گروه سنجش از دور و GIS، دانشگاه تبریز (نویسنده مسئول) Feizizadeh@tabrizu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS دانشگاه تبریز Salim_ab@yahoo.com

۳- دانشیار گروه سنجش از دور و GIS دانشگاه تبریز Valizadeh@tabrizu.ac.ir

۱- مقدمه

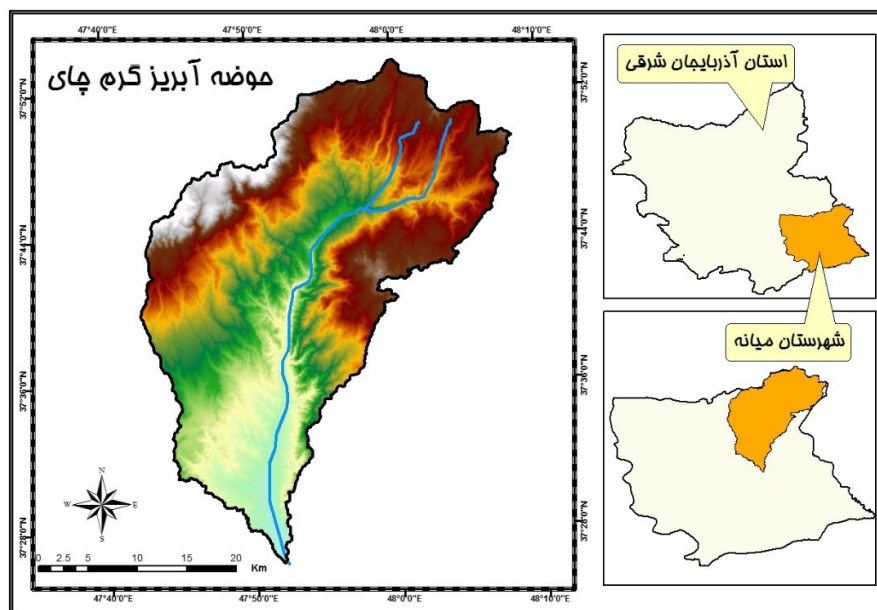
داده‌های جغرافیایی است که مبنای بسیاری از تحلیل‌های GIS را تشکیل می‌دهد. مدل‌های رقومی ارتفاع، به عنوان یک ورودی مهم در تحلیل‌های مختلف محسوب می‌شود. طی دهه گذشته، مدل‌های DEMs با توجه به کاهش قیمت داده‌های مکانی و افزایش قدرت محاسباتی کامپیوترها به طور فزاینده‌ای در اختیار کاربران داده‌های مکانی قرار گرفته است. DEMs بدون در نظر گرفتن منابع آنها، اغلب ارائه دهنده توپوگرافی سطح زمین بوده و تفسیری روشن و دقیق از عوارض سطح زمین را ارائه می‌نمایند. چنین تفسیری از مدل‌های رقومی ارتفاع، اغلب کاربران این نوع از داده‌ها را با القای احساس امنیتی کاذب درباره صحت و دقت داده‌ها همراه ساخته و خطاهای احتمالی و اثری که این خطا بر روی مشتقات حاصل از DEMs و نتایج نهایی تحلیل‌ها دارند را مخفی می‌سازد (وکسلر، ۲۰۰۳). در واقع این شکل از داده‌های مکانی یک مدل از واقعیت هستند و طبیعتاً دارای مقداری خطا نیز می‌باشند. ماهیت و میزان این خطاها اغلب شناخته نشده است و به آسانی در دسترس کاربران قرار ندارد. براین اساس، توسعه و پیاده‌سازی روش‌هایی جهت کمی‌سازی عدم قطعیت همراه با انتشار خطا در تحلیل‌های داده‌های فضایی/ مکانی از اهمیت بالایی برخوردار است. با توجه به این مهم روش‌ها و تکنیک‌های متعددی برای مدلسازی عدم قطعیت ارائه شده است. روش‌های تحلیلی، عددی، روش مونت کارلو و روش انتشار خطا به عنوان یکی از مهمترین تکنیک‌ها برای ارزیابی جهت بررسی اثرات خطای مدل‌های ارتفاع رقومی مطرح شده‌اند. بررسی پیشینه تحقیق نیز نشان می‌دهد که پژوهشگران از روش‌های متعددی برای مدلسازی عدم قطعیت استفاده نموده‌اند. در تحقیقی هیولینک (۱۹۹۰)، با استفاده از سری تیلور و روش مونت کارلو میزان انتشار خطا در مشتقات مدل ارتفاع رقومی (شیب و جهت شیب) را محاسبه نمود. فیشر (۱۹۹۳)، انتشار خطا در مشتقات حاصل مدل‌های DEMs را با روش مونت کارلو بررسی و به این نتیجه رسید که با افزایش RMSE مدل ارتفاعی رقومی، میزان

عدم قطعیت تجزیه تحلیل کمی نقش عناصر و عوامل تأثیرگذار در دقت و اطمینان‌پذیری به نتایج حاصله می‌باشد. فرایند تحلیل عدم قطعیت دست یابی به دقت بالا را با حذف عوامل تأثیرگذار در دقت فراهم می‌آورد (فیضی زاده و همکاران ۲۰۱۴). امروزه عدم قطعیت، مشخصه اصلی تحقیقاتی است که بین علم و فناوری قرار دارند (می، ۲۰۰۱). از آنجایی که عدم قطعیت توانایی ما را جهت مطالعه و درک درست از جهان واقعی با محدودیت روبه رو می‌کند، به عنوان یک مشخصه اصلی در حیطه GIS به رسمیت شناخته شده است. تنوع داده‌ها، روش‌ها و الگوریتم‌های متعدد باعث شده که ارزیابی دقت هر یک از آنها و همچنین شناسایی مؤثرترین آنها با کمترین نسبت از خطا چالش‌هایی را ایجاد نماید. با توجه به اینکه عدم قطعیت به دلیل تنوع داده‌ای، مدل‌ها و استفاده از نظرات کارشناسی در محیط GIS، ویژگی اصلی مدلسازی‌ها در GIS می‌باشد، بنابراین شناسایی منابع عدم قطعیت و حذف آنها برای ارتقاء نتایج یکی از مهمترین موارد در GIS محسوب می‌شود (فیضی زاده و بلشکه ۲۰۱۴). در راستای این مهم، امروزه تحلیل‌های عدم قطعیت به یکی از مهمترین تحلیل‌های GIS تبدیل شده است.

در حال حاضر عدم قطعیت به عنوان یکی از ۱۰ موضوع برتر تحقیقاتی GIS محسوب می‌شود و طی سال‌های اخیر، سهم تحقیقات با موضوع عدم قطعیت داده‌های مکانی روند افزایشی را داشته است (فیضی زاده و همکاران ۲۰۱۴، کاب، ۲۰۰۰، ژانگ و گودچایلد، ۲۰۰۲). تحلیل‌های عدم قطعیت در موضوعات متفاوتی نظیر عدم قطعیت مربوط به داده‌ها، مدل‌های تصمیم‌گیری مکانی و آنالیزها مربوط به وزن‌های معیار انجام می‌شود. در این راستا نیز انواع تکنیک‌های آماری و ریاضی برای مدلسازی عدم قطعیت استفاده می‌شود. تحلیل‌های عدم قطعیت در ارتباط با کیفیت و دقت داده‌ها از مهمترین تحلیل‌های GIS محسوب می‌شود. در میان داده‌های GIS، مدل‌های ارتفاع رقومی (DEM) از مهمترین

1- Cobb

2- Zhang and Goodchild



نگاره ۱: حوضه آبریز گرم چای

است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از نتایج تحقیقات مشابه مدلسازی عدم قطعیت مدل‌های رقومی ارتفاع حاصل از SRTM و ASTER را مدنظر قرار داده است. در این پژوهش علاوه بر مقایسه دقت داده‌های DEMs حاصل از زوج استروپی تصاویر Aster و داده‌ای حاصل از SRTM و تعیین نسبت اطمینان‌پذیری به نتایج آنها، به رفع خطای این داده‌ها نیز اقدام شده و قابلیت هریک از این مدل‌ها در بهینه‌سازی مورد بحث و بررسی قرار گرفته و نتایج به شکل کمی باهم مقایسه شده است که می‌تواند راهگشای تحقیقات آتی هم در زمینه شناسایی داده‌های DEMs دقیق‌تر و کارآمدی مدل‌های بهینه‌سازی دقت داده‌ای ارتفاعی باشد.

۲- منطقه مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه در این پژوهش گرم چای می‌باشد که یکی از مناطق مستعد برای انواع مخاطرات طبیعی نظیر رانش زمین، زلزله و فرونشست می‌باشد. این حوضه از نظر تقسیمات سیاسی، در جنوب شرقی استان آذربایجان شرقی و در شهرستان میانه قرار گرفته است. این منطقه در حوضه‌ی آبریز گرم چای در منتهی‌الیه شرقی ارتفاعات بزغوش قرار گرفته و از زیر حوضه‌های رودخانه قرنقوه بوده که در کل

عدم قطعیت در مشتقات DEMs نیز افزایش پیدا می‌کند. در تحقیقی دیگر دیگر میلر (۱۹۹۶)، اثر خطای مدل ارتفاعی رقومی را در استخراج ویژگی‌های شبکه آبراهه با روش مونت کارلو بررسی نموده و بر کارآمدی این روش در مطالعات عدم قطعیت تأکید می‌کند. سارجاکسکی و اکسانن^۱ (۲۰۰۵)، نیز اثر خطاهای تصادفی مدل‌های ارتفاعی رقومی را با استفاده از روش مونت کارلو جهت بهینه‌سازی مسیر شبکه آبراهه و تعدادی از مشتقات مانند زبری، جریان تجمعی و نظایر آن را بررسی کردند و چنین نتیجه را تأیید نموده‌اند. ارزیابی پیشینه تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از روش مونت-کارلو برای مطالعات عدم قطعیت از سایر روش‌ها عمومیت بیشتری یافته است به طوری که این تکنیک به عنوان روشی اصلی برای مطالعات عدم قطعیت شناخته شده است. لازم به ذکر است داده‌های مربوط به DEMs امروزه به عنوان یکی از داده‌های پایه در علوم زمین شناخته می‌شوند که کاربردهای گسترده‌ای را در انواع مدلسازی‌ها ارائه می‌نمایند. بنابراین برآورد عدم قطعیت این مدل‌ها و تلاش برای ارتقاء دقت آنها می‌تواند دستیابی به دقت بالا را در انواع تحقیقاتی که به نوعی از داده‌های DEMs استفاده می‌کنند فراهم سازد که خود به روشنی بیانگر ضرورت انجام چنین تحقیقی

1- Oksanen and Sarjakoski

درجه و عرض یک درجه می باشند ارائه شده اند و نام فایل هم مطابق گوشه جنوب غربی هر فایل تعیین می شود. دقت هر سلول دو آرک ثانیه (حدود ۹۰ متر) ارائه شده است که در سیستم های مختلف اطلاعات جغرافیائی مورد استفاده قرار می گیرد.

داده های SRTM چند مزیت مهم دارند، اول آنکه این گونه داده های DEM در مناطق وسیع از یک منبع تهیه شده و در مناطق بزرگ قابل استفاده هستند. این در حالی است که دیگر DEM های با قدرت تفکیک بالا از منابع متغیری مثل زوج تصاویر ماهواره ای به دست می آیند و معمولاً برای تمام مناطق در دسترس نیستند. از طرف دیگر این نوع از داده ها توسط تکنولوژی سنجنش از دور فعال تهیه می شود که از تأثیرات اتمسفری نظیر ابرناکی و تیرگی اتمسفر تأثیر نمی پذیرد. برای تهیه داده های سه بعدی از روش تداخل سنجنی راداری استفاده می شود. در این روش دو تصویر راداری از دو نقطه با اختلاف مکانی کم گرفته می شوند. از اختلاف میان این تصاویر، ارتفاع نقاط زمین یا تغییرات آن محاسبه می شود. تداخل سنجنی - ، مطالعه الگوهای تداخلی است که از ترکیب دو مجموعه سیگنال راداری حاصل می شوند. برای اخذ دو تصویر راداری از دو منظر متفاوت، سیستم SRTM شامل یک آنتن رادار در داخل دستگاه و یک آنتن رادار ثانویه نصب شده در انتهای یک دکل به طول ۶۰ متر (۱۹۵ فوت) در خارج دستگاه است.

SRTM از روش تداخل سنجنی با "باز ثابت" استفاده می کند، یعنی دو مجموعه داده راداری در یک زمان اخذ می شوند و آنتن هایی که این داده ها را جمع آوری می کنند در فاصله ثابتی از هم قرار گرفته اند.

ب) مدل های رقومی ارتفاعی مبتنی بر ماهواره ASTER
سنجنده ای ASTER یکی از سنجنده های نصب شده بر روی ماهواره ای Terra است که به عنوان بخشی از سیستم تصویربرداری EOS است که به وسیله ای سکوی EOS-AM در ۱۸ دسامبر ۱۹۹۹ به فضا پرتاب شد (Yamaguchi et al., 1998; Fujisada et al., 2011). استر ناحیه ای با پهنا ۱۴ باند از مرئی

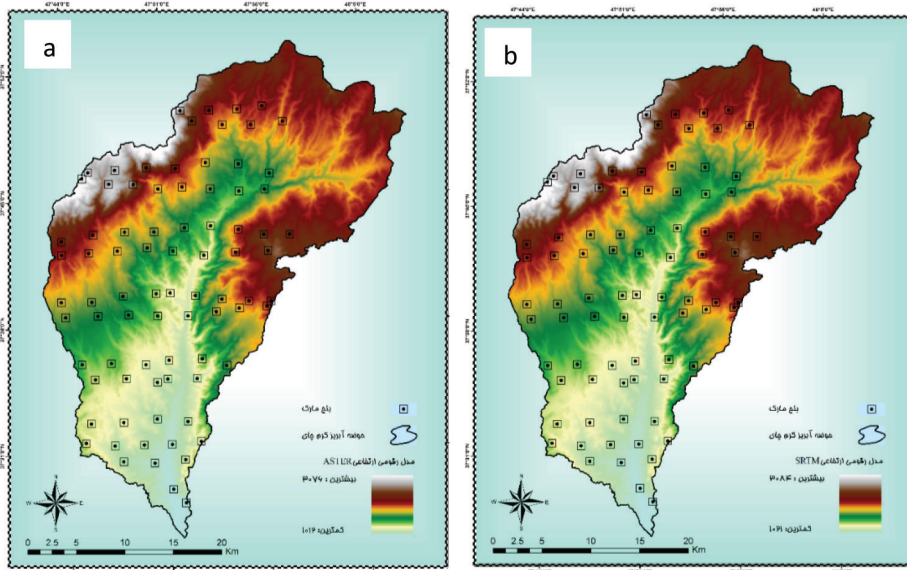
جزء واحد هیدرولوژیکی سفیدرود محسوب می شود (نگاره ۱). این حوضه یکی از بخش های مهم استان آذربایجان شرقی در تولید محصولات کشاورزی بوده و یکی از سکونتگاه های اصلی شهرستان میانه می باشد. انتخاب منطقه مورد مطالعه در این تحقیق با توجه به شرایط توپوگرافی و تنوع واحدهای ژئومورفولوژی و اهمیت انجام مطالعات مخاطرات طبیعی و ضرورت تولید مدل رقومی ارتفاع با دقت مطلوب و همچنین امکان دسترسی به نقاط پایه ژئودزی سازمان نقشه برداری برای ارزیابی دقت و انطباق نتایج پس از رفع خطای مدل های رقومی ارتفاع انتخاب شده است.

۳- مواد و روش ها

با توجه به موضوع تحقیق از داده های ارتفاعی شامل مدل رقومی ارتفاعی SRTM با دقت مکانی ۹۰ معادل متر و مدل رقومی ارتفاعی استخراج شده از زوج استریویی تصاویر ماهواره ای ASTER استفاده شد. برای ارزیابی دقت نتایج نیز از نقاط درجه دو ژئودزی سازمان نقشه برداری بهره کافی برده شد. هریک از این داده ها به اختصار در زیر معرفی شده است.

الف) مدل رقومی ارتفاعی SRTM

پروژه SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) در ۱۱ فوریه سال ۲۰۰۰ توسط ناسا جهت تهیه مدل رقومی ارتفاعی شروع شد (Rosen et al., 2000). این داده ها تقریباً دارای یک پوشش جهانی از ۵۶ درجه جنوبی تا ۶۰ درجه شمالی می باشند. داده های شاتل فضایی اندیور نمایشی از توپوگرافی زمین ارائه می دهند که بصورت مخفف SRTM خوانده می شود و نشان از یک تلاش تحقیقاتی جهانی برای رسیدن به مدل ارتفاعی رقومی از سطح زمین دارد. این شاتل در مأموریت خود از یک سیستم راداری اصلاح شده با دو آنتن رادار استفاده می کند و سیستم بکار رفته Interferometric Synthetic Aperture Radar خوانده می شود. مدل ارتفاعی بدست آمده بصورت قطعاتی که هر کدام دارای طول یک



نگاره ۲: مدل‌های رقومی ارتفاع منطقه مورد مطالعه
 a: مدل رقومی ارتفاع ASTER
 و b: مدل رقومی ارتفاع SRTM

تا محل یکسانی را در سطح زمین ثبت می‌کنند. زاویه خارج از نادیر آن ۲۷/۶ درجه بوده و تصویر تولید شده از نادیر و بعدنگر دارای نسبت در حالت کلی، دقت RMSE مدل‌های ارتفاعی DEM حاصل از استر به تعداد نقاط کنترلی بستگی داشته و با دقتی در حدود ± 7 الی ± 50 متر قابل ثبت می‌باشند (کمپ، ۲۰۰۳؛ میرانو، ۲۰۰۳)، البته در مواردی که امکان برداشت نقاط کنترلی به طور دقیق وجود نداشته باشد امکان تهیه مدل‌های DEM تنها با تعریف نقطه مشابه وجود خواهد داشت. مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs)، از سری تصاویر استریو با سنسورهای عمود بر خط طولی و بر اساس انطباق اتوماتیکی، با دقت ± 5 الی ± 20 متر بسته به نسبت B/H^2 به دست می‌آیند.

ج) نقاط درجه دو ژئودزی

لزوم لحاظ نمودن مختصات زمین در پروژه تهیه نقشه-های پوششی از جمله طرح تهیه نقشه‌های ۱/۲۵۰۰۰ و ژئودینامیک، باعث ایجاد شبکه سراسری ارتفاعی گردیده است. ایستگاه‌های این شبکه براساس نیاز و دقت مورد نظر و اهدافش، به سه نوع درجه یک، دو و سه تقسیم‌بندی شده‌اند و این ایستگاه‌ها براساس دستورالعمل‌های خاص خود ایجاد و اندازه‌گیری شده‌اند. طول مسیر شبکه درجه ۱ و ۲ و ۳ سراسری به بیش از ۸۰۰۰۰ کیلومتر می‌رسد.

مادون قرمز حرارتی با قدرت تفکیک مکانی، طیفی و رادیومتریکی بالا را پوشش می‌دهد. استر دارای سه بانده در محدوده مرئی و مادون قرمز نزدیک و با قدرت تفکیک ۱۵ متر و ۶ بانده در محدوده مادون قرمز موج میانی با قدرت تفکیک ۳۰ متر و ۵ بانده در محدوده مادون قرمز حرارتی در دامنه‌ی طیفی با قدرت تفکیک ۹۰ از نادیر و بعدنگر دارای نسبت در حالت کلی، دقت RMSE مدل‌های ارتفاعی DEM حاصل از استر به تعداد نقاط کنترلی بستگی داشته و با دقتی در حدود ± 7 الی ± 50 متر قابل ثبت می‌باشند (کمپ، ۲۰۰۳؛ میرانو، ۲۰۰۳)، البته در مواردی که امکان برداشت نقاط کنترلی به طور دقیق وجود نداشته باشد امکان تهیه مدل‌های DEM تنها با تعریف نقطه مشابه وجود خواهد داشت.

داده‌های تصاویر استریویی تنها در بانده ۳ می‌باشد که در ناحیه‌ی طول موج مادون قرمز نزدیک در دامنه طیفی ۰/۷۸ - ۰/۸ میکرومتر را با استفاده از دو تلسکوپ عمودنگر^۱ و بعدنگر^۲ و از ارتفاع اسمی ۷۰۵ و با سنجنده‌ی پوشبروم با آرایه‌های خطی ثبت می‌شود. این تصاویر سنجنده حدود ۶۰ کیلومتر را با قدرت تفکیک ۱۵ متر ثبت می‌نماید. فاصله زمانی بین تلسکوپ عمودنگر و بعدنگر ۶۰ ثانیه می‌باشد که

1-Nadir-Looking
 2-Aft-Looking

۴-۱- محاسبه خطای مدل‌های رقومی ارتفاع

خطای $e(x_0)$ در موقعیت (x_0) ، به تفاوت بین مقدار صحیح $Z(x_0)$ و مقدار محاسبه شده $\hat{Z}(x_0)$ گفته می‌شود. در واقع خطا وابسته به مقدار داده‌ی واقعی و مقدار اندازه‌گیری شده‌ی آن است. وجود خطا، باعث افزایش عدم قطعیت می‌شود. عدم قطعیت نیز وابسته به مقادیری است که "ناشناخته‌اند". بنابراین عدم قطعیت همراه با استنتاج آماری است و از لحاظ آماری قابل پیش‌بینی است.

دقت، بایاس و صحت بازگوکننده‌ی اطلاعاتی درباره‌ی عدم قطعیت هستند که در ارزیابی عدم قطعیت مدل‌های رقومی ارتفاع کاربرد گسترده‌ای دارند. در تحقیق حاضر به منظور ارزیابی و مقایسه میزان خطا و عدم قطعیت مدل ارتفاع رقومی SRTM قبل و بعد از شبیه‌سازی خطا از شاخص‌های آماری میانگین، انحراف معیار خطا و RMSE استفاده شد.

در راستای محاسبه خطا و برای مشخص کردن و تعیین دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی، خطای مدل براساس نقاط درجه دوم ژئودزی و با استفاده از رابطه زیر به دست آمد.

$$e(x_0) = Z(x_0) - \hat{Z}(x_0)$$

$$e(x_0) = \text{خطا در موقعیت}$$

$$Z(x_0) = \text{مقدار صحیح}$$

$$\hat{Z}(x_0) = \text{مقدار محاسبه شده}$$

بایاس

برعکس خطا، بایاس مدل-مبنا است. یعنی بایاس وابسته به یک مدل آماری که برای یک مجموعه داده برازش شده، می‌باشد. بایاس اصولاً با میانگین خطا قابل محاسبه است.

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\hat{Z}(x_i) - Z(x_i))$$

دقت

مانند بایاس، دقت نیز مدل-مبناست و دقت اصولاً با اندازه‌گیری پراکندگی خطاها در اطراف میانگین خطا

(انحراف معیار) محاسبه می‌شود.

$$STD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{e}_i - \hat{e}_i)^2}{n-1}}$$

صحت

صحت، در واقع مجموع دقت و آن‌بایاس^۱ است. زمانی که از یک سری داده مستقل برای ارزیابی عدم قطعیت استفاده شود، صحت به دست می‌آید. ریشه میانگین خطای (RMSE) حساس به خطاهای تصادفی و سیستماتیک است و بنابراین می‌توان برای محاسبه صحت از آن استفاده کرد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{e}_i - \hat{e}_i)^2}{n}}$$

صحت مانند دقت و بایاس وابسته به مدل آماری و یک امید ریاضی برای کل خطاست. تمیز دادن بین خطا و صحت ضروری است. خطا وابسته به یک مقدار و داده-مبناست ولی صحت، وابسته به میانگین یک مجموعه از مقادیر و مدل-مبناست.

۴-۲- شبیه‌سازی خطا

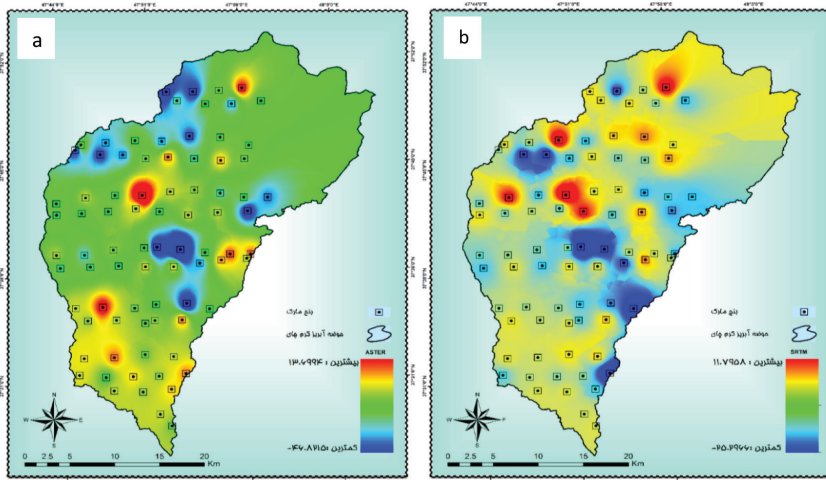
مدلسازی خطا در متغیرهای پیوسته به دو روش صورت می‌گیرد: مشتق‌گیری خطا بطور تحلیلی و شبیه‌سازی خطا شرطی تقسیم شود.

مدل‌های شبیه‌سازی غیر شرطی

این مدل‌ها جهت ایجاد توابع تصادفی^۲ (RF)، متکی بر شبیه‌سازی تصادفی (استواستیک) هستند. ادعا براین است که این مدل‌ها از خواص توزیع خطا برخوردار هستند. این مدل‌ها در پایه‌ای‌ترین شکل خود، از یک الگوریتم برای انتخاب مقادیر مستقل و غیر همبسته که از یک توزیع نرمال استخراج شده‌اند، استفاده می‌کنند که این مقادیر می‌توانند به DEM اصلی افزوده شوند (فیشر، ۱۹۹۱). چنین مدل‌هایی، توصیفی از الگوی وابستگی مکانی خطا را ارائه می‌دهند. با استفاده از یک الگوریتم که در جهت یک مقدار مطلوب

1-Unbias

2-Random Functional



نگاره ۳: الگوی انتشار خطا برای مدل‌های رقومی ارتفاع، (a) خطای مدل رقومی ارتفاع براساس ASTER و (b) خطای مدل رقومی ارتفاعی براساس SRTM

این، مزیت مهم استفاده از روش‌های تصادفی تبیین فرآیند بر مبنای فرض‌ها و حالت‌های غیرواقعی است.

بدین معنی که حتی در حالات غیر واقعی نیز سناریوی ارائه شده می‌تواند رفتار سامانه را پیش‌بینی کند. شبیه‌سازی خطای نرم‌افزار Risk@ انجام پذیرفت. ابتدا به دلیل اینکه اغلب خطای موجود در مدل‌های رقومی ارتفاعی با توزیع نرمال نشان داده می‌شوند بنابراین توزیع نرمال از بین مدل‌های مختلف موجود در نرم‌افزار انتخاب و شبیه‌سازی مونت کارلو با ۱۰۰۰۰ بار تکرار و ۱۰۰ دوره بر روی داده‌ها اجرا گردید. داده‌های شبیه‌سازی شده به محیط ArcMap فراخوانی شد تا الگوی انتشار خطای موجود در مدل رقومی ارتفاعی بتواند محاسبه گردد. در مرحله بعد از توابع تحلیلی آماری مونت کارلو استفاده شده و با محاسبه ضرایب آماری، حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار نسبت به مدلسازی عدم قطعیت اقدام گردید.

۴-۴- الگوی انتشار خطا

جهت دستیابی به الگوی انتشار خطا و نمایش مکانی توزیع خطا، از روش‌های درونیابی استفاده شد و خطاهای شبیه‌سازی شده به روش مونت کارلو به عنوان ورودی در تابع معکوس فاصله معرفی شد. روش پهنه‌بندی IDW بر این فرض استوار است که تأثیر پدیده مورد نظر با افزایش مسافت کاهش می‌یابد. در این مدل از فاصله به عنوان وزن متغیر معلوم در

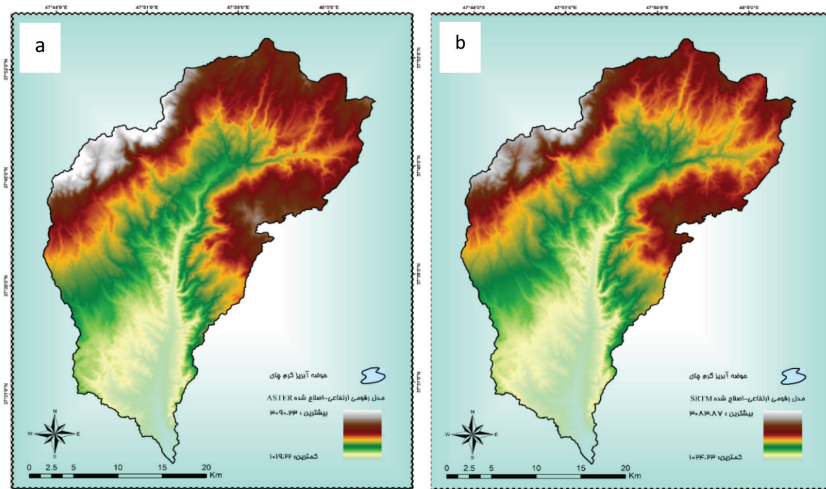
به صورت تصادفی به دفعات تکرار شود (فیشر، ۱۹۹۱؛ هاتر و گوجا، ۱۹۹۷). می‌توان برآوردی از خطا را تعیین کرد (اینگلر، ۲۰۰۷؛ فیشر، ۱۹۹۱). از مهمترین این روش‌ها می‌توان از روش مونت کارلو، زنجیره مارکوف، نظریه صف، پیمایش تصادفی، نظریه پرکولیشن، فراکتال‌ها و نظریه اغتشاش نام برد.

۴-۳- روش شبیه‌سازی مونت کارلو

در یک تقسیم‌بندی می‌توان روش‌های تجزیه و تحلیل نظری و ریاضی را به دو گروه روش‌های جبرگرایانه^۱ و روش‌های تصادفی^۲ تقسیم کرد. مشخصه بسیار مهم تجزیه و تحلیل جبرگرایانه، قطعیت، دقت و جامعیت، منطقی بودن و مهمتر از همه با خطا همراه بودن به معنای فاصله نتایج نظری با نتایج طبیعی و فیزیکی است.

در مقابل روش‌های تصادفی، دامنه گسترده‌ای از تجزیه و تحلیل‌های شبه ریاضی را برای تشریح رفتار یک سامانه تشکیل می‌دهند. اساس روش‌های تصادفی بر مبنای بیان رفتار فیزیکی یک فرایند با مجموعه‌ای از رخدادهای تصادفی است. در این نوع نگرش برای تشریح یک فرآیند، احتمال رخداد هر رویداد در مقایسه با یک عدد تصادفی معین می‌شود. در حالتی که مقدار تکرار این رخداد بسیار زیاد باشد، مقدار متوسط آن در طول یک زمان مشخص، معیاری از رفتار واقعی سامانه فیزیکی خواهد بود. افزون بر

1 - Deterministic
2- Stochastic



نگاره ۴: مدل‌های رقومی ارتفاعی
 تصحیح شده
 (a) مدل رقومی ارتفاعی ASTER و
 (b) مدل رقومی ارتفاعی SRTM

۴-۵- اصلاح و بهینه سازی مدل رقومی ارتفاعی
 در نهایت، با شناسایی الگوی انتشار خطا و حذف آن از مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM، مدل‌های رقومی ارتفاع ثانویه تهیه شد. در طی این فرایند با محاسبه مجدد شاخص‌های توصیف کننده خطا میزان خطا و صحت مدل ارتفاع رقومی قبل و بعد از شبیه‌سازی تعیین شده و اعمال گردید. نگاره ۴ نتایج حاصل از تصحیح مدل‌های رقومی ارتفاع را نشان می‌دهد.

۵- یافته‌های تحقیق

در این تحقیق به منظور بررسی دقت مدل‌های یاد شده، نتایج حاصل از الگوهای انتشار خطا و همچنین نسبت بهینه سازی شده هریک از مدل‌ها در فرمت تصحیح شده آنها با نقاط مرجع مقایسه شدند.

در نگاره ۵ روند خطا در مدل‌های رقومی ارتفاع قبل و بعد از شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داده شده است. همانگونه که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد، دامنه تغییرات خطا در مدل ارتفاعی SRTM بین حداقل ۲۴/۹۹- متر و حداکثر ۱۵/۹۷ متر، میانگین خطای ۳/۵۶ متر است.

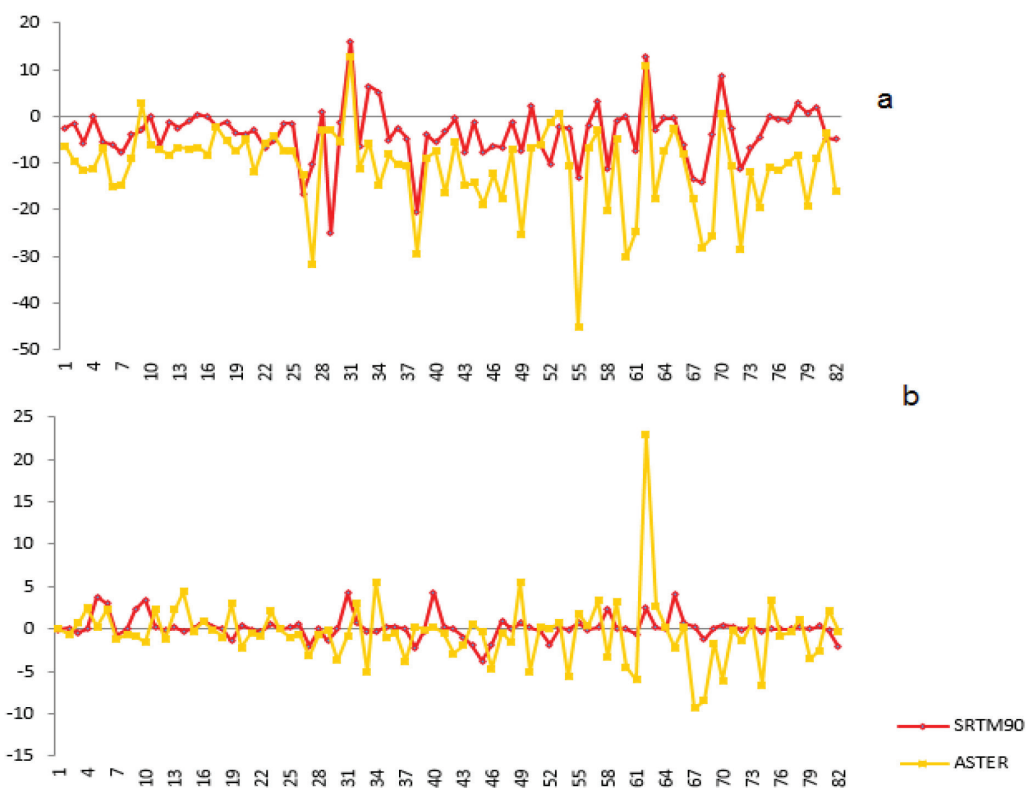
با اجرای روش مونت کارلو خطای این مدل رقومی دامنه تغییراتی بین حداقل ۳/۷۸- متر و حداکثر ۴/۳ متر می‌باشد و میانگین خطای آن به ۰/۱۷۱ کاهش یافت. علاوه بر این، مقادیر انحراف معیار خطا در مدل ارتفاع رقومی SRTM قبل و بعد از مونت کارلو به ترتیب ۶۹۷ و ۱/۳۷ متر و RMSE این مدل قبل

پیش‌بینی نقاط اندازه‌گیری نشده استفاده می‌شود. بنابراین هرچه فاصله داده‌ی معلوم از نقطه‌ی مجهول افزایش می‌یابد، لازم است وزن‌ها براساس فاصله کاهش یابد. از معکوس فاصله به عنوان وزن نقاط اندازه‌گیری شده در پیش‌بینی نقاط مجهول استفاده می‌شود. به همین دلیل این مدل تابع معکوس فاصله وزنی نام گرفته است و از طرف دیگر تأثیر شدت وابستگی مکانی در داده‌ها را با استفاده از توان در معکوس فاصله می‌توان اعمال نمود. توان دوم معکوس فاصله از این مدل بطور مکرر توسط پژوهشگران استفاده شده است.

$$\widehat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^N \lambda z(s_i)$$

که در آن $z(s_i)$ مقدار اندازه‌گیری شده در موقعیت i^{th} است و I_i وزن مقدار اندازه‌گیری شده در موقعیت i^{th} است. S_0 موقعیت پیش‌بینی و N تعداد نقاط اندازه‌گیری شده یا معلوم می‌باشد. I_i تابعی از فاصله بین آنها می‌باشد یا به عبارتی هرچه فاصله کمتر است، تأثیر نقطه مجهول بیشتر می‌باشد. لذا معکوس فواصل بین آنها به عنوان وزن در مدل به کار می‌رود (فلیپ و واتسن، ۱۹۸۵).

در نتیجه خطاهای شبیه‌سازی شده برای هر یک از مدل‌های ارتفاع رقومی به شکل یک لایه رستری تهیه شد. در نگاره ۳ الگوی انتشار خطا برای هر یک از مدل‌های ارتفاع رقومی ارائه شده است.



نگاره ۵: مقایسه روند خطا در مدل‌های رقومی ارتفاع قبل و بعد از اصلاح (a) قبل از اصلاح و (b) بعد از اصلاح مدل‌های رقومی ارتفاعی)

و بعد (۱۲۳۵ تا ۲۹۴۷) از شبیه‌سازی در مدل‌های ارتفاعی SRTM تفاوت چندانی را با هم نشان نمی‌دهند ولی این طبقه بزرگترین دامنه تغییرات خطایی که از ۲۵- متر شروع و تا ۱۳ متر ادامه دارد را قبل از شبیه‌سازی به خود اختصاص داده است که بعد از شبیه‌سازی دامنه‌ی خطایی به حداقل ۲-متر تا حداکثر ۴ متر رسید. دره‌های مستخرج از مدل ارتفاع رقومی ASTER قبل از مونتاژ در ارتفاعاتی بین ۱۱۳۹ تا ۲۳۴۶ متر قرار گرفته‌اند در حالیکه بعد از اجرای شبیه‌سازی دامنه تغییرات ارتفاعی دره‌ها به ۱۱۴۸ تا ۲۳۴۵ رسید. دره‌ها در مدل ارتفاعی SRTM قبل از مونتاژ کارلو مساحتی حدود ۴۶ کیلومترمربع را به خود اختصاص داده‌اند و مساحت همین طبقه بعد از اجرای مونتاژ کارلو به ۱۲۱ کیلومترمربع رسید. مساحت دره‌ها در مدل ارتفاع رقومی ASTER چه قبل و چه بعد از شبیه‌سازی، ۱۱۷ کیلومترمربع می‌باشد.

از شبیه‌سازی ۶۰۳ و بعد از آن ۱/۳ محاسبه شد. لازم به ذکر است که دامنه تغییرات خطا نیز در مدل ارتفاع رقومی ASTER قبل از مونتاژ کارلو بین حداقل ۴۵- و حداکثر ۱۲/۹۷ متر و بعد از شبیه‌سازی حداقل ۹/۳۷- و حداکثر ۲۲/۸ می‌باشد. شاخص‌های آماری میانگین، انحراف معیار و RSME در مدل ارتفاعی ASTER قبل از شبیه‌سازی مونتاژ کارلو به ترتیب دارای این مقادیر می‌باشد: ۱۰/۷۵- ، ۹/۰۵ ، ۹ و بعد از انجام شبیه‌سازی تغییر مقادیر این شاخص‌ها ۰/۴۰- ، ۳/۸۴ ، ۳/۸۲ به اینگونه است.

جهت تعیین موقعیت توپوگرافی حوضه‌ی گرم‌چای، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) برای هر دو مدل رقومی ارتفاعی قبل و بعد از شبیه‌سازی اجرا شد. نتایج حاصل از این شاخص به صورت خلاصه در جداول (۲ و ۳) مشاهده می‌گردد.

همانطور که در جداول (۲ و ۳) مشاهده می‌گردد، با وجود اینکه دامنه‌ی تغییرات ارتفاعی دره‌ها قبل (۱۲۳۴ تا ۲۹۴۴)

جدول ۱: مقایسه شاخص ها در مدل های رقومی ارتفاع قبل و بعد از انجام تصحیحات

مدل داده	ME	RMSE	STD	حداقل	حداکثر
مدل رقومی ارتفاعی SRTM اولیه	۳/۵۶	۶/۰۳	۶/۹۷	-۲۴/۹۹	۱۵/۹۷
مدل رقومی ارتفاعی SRTM اصلاح شده	۰/۱۷۱	۱/۳	۱/۳۷	-۳/۷۸	۴/۳۱
مدل رقومی ارتفاعی ASTER اولیه	-۱۰/۷۵۱	۹	۹/۰۵	-۴۵	۱۲/۹۷
مدل رقومی ارتفاعی ASTER اصلاح شده	۰/۴۰	۳/۸۲	۳/۸۴	-۹/۳۷	۲۲/۸

میانگین و انحراف معیار و RMSE این طبقه در مدل ارتفاع رقومی SRTM قبل از شبیه سازی به ترتیب ۴/۵- و ۵/۳ متر است و در مدل ارتفاعی اصلاح شده SRTM این گونه تغییر نمودند: ۲۳/۰-، ۱/۰۸ و ۱/۰۵ متر. در مدل ارتفاع رقومی ASTER قبل از شبیه سازی مقادیر محاسبه شده برای شاخص های آماری خطا (میانگین، انحراف معیار و RMSE) ۱۱/۹-، ۷/۹ و ۷/۶ متر می باشد که بعد از مونت کارلو به ۱/۸-، ۲/۷ و ۲/۶ تغییر یافت. شیب های ملایم حاصل از مدل ارتفاع رقومی SRTM بیشترین تغییرات مساحتی را قبل از (۵۶۲) و بعد از مونت کارلو (۴۰۰) نشان می دهند و تغییرات ارتفاعی در آن قبل (۱۱۰۳ تا ۲۷۴۳) و بعد از مونت کارلو (۱۰۶۶ تا ۲۷۴۵) به این شکل می باشد و شیب های ملایم در مدل ارتفاع رقومی ASTER دامنه خطا قبل از شبیه سازی نیز تغییرات زیادی را داراست. حداقل خطا ۴/۲۰- متر و حداکثر ۱۶ متر می باشد.

شاخص های آماری محاسبه شده شامل میانگین، انحراف معیار و RMSE ۳/۵-، ۵/۶ و ۵ هستند. دامنه خطا بعد از شبیه سازی به ۲- تا ۳ متر کاهش یافت. مقادیر محاسبه شده میانگین، انحراف معیار و RMSE بعد از مونت کارلو به ترتیب ۱۴/۰، ۱/۳ و ۱/۲ می باشد. به دلیل فقدان نقاط پنج مارک در شیب های تند مقایسه شاخص های آماری خطا قبل و بعد از مونت کارلو در مدل ارتفاع رقومی SRTM مسیر نیست ولی در مدل ارتفاع رقومی ASTER قبل از اجرای روش مونت کارلو، شیب های تند در حد فاصل ۱۳۲۹ تا ۲۸۱۱ متر قرار دارند. در حالیکه بعد از اجرای شبیه سازی شیب های تند ارتفاعاتی بین ۱۰۶۵ تا ۲۷۴۸ متر را نشان می دهند.

شاخص های میانگین و انحراف معیار و RMSE محاسبه شده برای دره ها قبل از شبیه سازی در مدل ارتفاعی SRTM به این گونه می باشد: ۳/۶-، ۹/۶ و ۹/۱ متر. این مقادیر بعد از شبیه سازی و تصحیح به ۵/۰، ۱/۵ و ۱/۴ متر کاهش یافتند. شاخص های آماری محاسبه شده (میانگین، انحراف معیار و RMSE) برای مدل ارتفاعی رقومی ASTER قبل از شبیه سازی مونت کارلو ۹/۷، ۱۱/۷ و ۱۱/۵ متر می باشد و این مقادیر بعد از شبیه سازی به ۴/۱، ۵/۵ و ۵/۳ متر کاهش می یابد.

در مدل ارتفاع رقومی SRTM، ۲۴ عدد از نقاط پنج مارک در شیب های پایین قرار دارند و بعد از اجرای مونت کارلو این مقدار به ۱۷ عدد کاهش یافت.

قبل از شبیه سازی پایین ترین ارتفاع در این طبقه ۱۰۶۴ متر و حداکثر ارتفاع ۲۹۲۲ متر است و بعد از شبیه سازی حداقل ارتفاع در این طبقه ۱۱۸۲ متر یافت شد ولی تغییری در حداکثر ارتفاع ایجاد نشد.

شیب های رو به پایین در مدل ارتفاع رقومی ASTER قبل از اجرای روش مونت کارلو در فاصله ۱۰۵۷ تا ۲۷۲۹ متری قرار دارند و بعد از اجرای روش مذکور در حدفاصل ۱۱۰۴ تا ۲۹۴۶ متر قرار می گیرد.

دامنه ی خطا در شیب های پایین قبل از شبیه سازی مدل ارتفاع رقومی SRTM بین حداقل ۱۶/۵- متر تا حداکثر ۸/۷ متر می باشد و بعد از اجرای روش مونت کارلو به حداقل ۳/۷- متر و حداکثر ۰/۶ متر تغییر کرد. همچنین در مدل ارتفاع رقومی ASTER، خطا قبل از شبیه سازی دارای دامنه تغییراتی ما بین ۴/۲۹- تا ۴/۵- می باشد. این دامنه ی تغییرات بعد اجرای شبیه سازی به ۵/۹- تا ۲ متر تغییر یافت. مقادیر

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (مهر)
 مدل‌سازی عدم قطعیت حاصل از داده‌های ارتفاعی ... / ۳۹

سالی است که برای مقاصد مختلف به کار می‌روند. اخیراً داده‌های رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر زوجی ماهواره ASTER از سال ۲۰۰۹ با تفکیک مکانی ۳۰ متر نیز در اختیار عموم قرار گرفته است.

در این تحقیق دقت و صحت این مدل‌ها قبل و بعد از شبیه‌سازی مونت کارلو براساس مقایسه با نقاط بِنچ‌مارک، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داده است که مدل ارتفاع رقومی ASTER قبل از شبیه‌سازی دارای خطای معنی‌داری نسبت به نقاط بِنچ‌مارک است. میانگین خطای مدل رقومی ASTER قبل از شبیه‌سازی ۱۰/۷۵- متر ارزیابی شد در حالیکه مدل ارتفاع رقومی SRTM میانگین خطای ۳/۵۶ متری را نسبت به نقاط بِنچ‌مارک نشان داد. علاوه بر این شاخص‌های RMSE و انحراف معیار در مدل ASTER (۹ و ۹/۰۵) مقادیر بالاتری نسبت به SRTM (۶/۳ و ۶/۳۷) دارا می‌باشند. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل ارتفاع رقومی ASTER اگر چه با دقت ۳۰ متر منتشر شده اما فاقد دقت و جزئیات مدل ارتفاعی SRTM با دقت مکانی ۹۰ متری است. در حقیقت وجود خطاها و ناهنجاری‌های معنی‌دار از

خطا قبل از شبیه‌سازی تغییراتی در بازه‌ی ۲۸- تا ۵/۶- متر دارد، بعد از شبیه‌سازی خطا دامنه‌ای بین ۸/۵- تا ۲/۴ متر را شامل می‌گردد.

مقادیر شاخص‌های ME، STD و RMSE قبل از مونت-کارلو به ترتیب ۱۳/۱۶-، ۸/۳ و ۷/۷ و بعد از آن ۱/۹-، ۳/۲ و ۳/۱ می‌باشند. قبل از شبیه‌سازی مدل ارتفاع رقومی SRTM، شیب‌های بالایی در بازه‌ی ارتفاعی بین ۱۵۵۴ تا ۲۰۵۵ متر قرار دارند و بعد از اجرای مونت کارلو بازه ارتفاعی (۱۸۱۱ تا ۲۵۹۵) تغییرات زیادی را نسبت به قبل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. این طبقه در مدل ارتفاعی ASTER نیز تغییرات ارتفاعی زیادی را نشان می‌دهد. به طوری که دامنه ارتفاعی قبل از شبیه‌سازی در بازه‌ی ۱۵۰۷ تا ۲۰۲۰ متر و بعد از شبیه‌سازی ۱۱۱۴ تا ۱۸۱۴ متر قرار گرفتند. در ستیغ‌ها و قله به علت فقدان یا کاهش نقاط بِنچ‌مارک نمی‌شود اتکای زیادی به نتایج نمود.

۶- نتیجه‌گیری

در ایران داده‌های رقومی ارتفاعی موسوم به SRTM چند

جدول ۲: طبقات شاخص TPI قبل و بعد از شبیه‌سازی مونت کارلو در مدل ارتفاع رقومی SRTM

لندفرم	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
دره	۱۰	۴۶	۵۱۲۳۴ تا ۲۹۴۴	۲۵- تا ۱۳	۳/۶-	۹/۶	۹/۱	۱۹	۱۲۱	۱۲۳۵ تا ۲۹۴۷	۴/۳ تا ۲-	۰/۵	۱/۵	۱/۴
شیب‌های پابین	۲۴	۱۵۰	۵۱۰۶۴ تا ۲۸۱۸	۱۶/۵- تا ۸/۷	۴/۲-	۵/۴	۵/۳	۱۷	۱۵۱	۱۱۸۲ تا ۲۸۱۸	۰/۶ تا ۳/۷-	- ۰/۲۳	۱/۰۸	۱/۰۵
شیب ملایم	۴۴	۵۶۲	۱۱۰۳ تا ۲۷۴۳	۲۰/۴- تا ۱۶	۳/۵-	۵/۶	۵	۴۱	۴۰۰	۱۰۶۶ تا ۲۷۴۵	۳/۷ تا ۲-	۰/۱۴	۱/۲	۱/۳
شیب‌های تند	۰	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۱۲	۰	۰	۰	۰	۰
شیب‌های بالایی	۴	۹۰	۱۵۵۴ تا ۲۰۵۵	۳۳۹- تا ۶/۴	۰/۱۹	۴/۶	۳/۶	۳	۱۰۳	۱۸۱۱ تا ۲۵۹۵	۴ تا ۱/۸-	۰/۷	۳	۲/۵
قلل و ستیغ	۰	۵۸	۰	۰	۰	۰	۰	۲	۱۳۶	۱۴۵۳ تا ۱۵۵۷	۰/۰۲ تا ۰/۰۴	۰/۰۱۲	۰/۰۰۸	۰/۰۰۸
۱: RMSE ۲: انحراف معیار ۳: میانگین ۴: دامنه خطا بعد از مونت کارلو ۵: ارتفاع بعد از مونت کارلو ۶: مساحت هر سطح ۷: تعداد بعد از مونت کارلو ۸: RMSE ۹: میانگین ۱۰: دامنه خطا در هر طبقه ۱۱: دامنه خطا در هر طبقه ۱۲: ارتفاع ۱۳: مساحت هر سطح ۱۴: تعداد قبل از مونت کارلو														

جدول ۳: طبقات شاخص TPI قبل و بعد از شبیه سازی مونت کارلو در مدل ارتفاع رقومی ASTER

لندفرم	۱۴	۱۳	۱۲	۱۱	۱۰	۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱
دره	۲۴	۱۱۷	تا ۱۱۳۹ ۲۳۴۶	-۱۰/۴۶ تا ۱۳	۹/۷	۱۱/۷	۱۱/۵	۱۸	۱۱۷	تا ۱۱۴۸ ۲۳۴۵	تا ۳ ۳/۲	۱/۴	۵/۵	۵/۳
شیب های پایین	۱۶	۱۵۷	تا ۱۰۵۷ ۲۹۲۲	-۲۹/۴ تا ۵/۴	-۱۱/۹	۷/۹	۷/۶	۱۶	۱۵۷	۱۱۰۴ تا ۲۹۴۶	تا ۹/۵ ۲	-۱/۸	۲/۷	۲/۶
شیب ملایم	۲۹	۲۹۱	تا ۱۰۶۰ ۲۷۲۹	تا ۳۰ ۳	-۹/۸	۷/۷۶	۷/۶	۳۱	۲۹۲	۱۰۶۶ تا ۲۸۱۸	تا ۶/۵ ۵/۵	-۰/۲۴	۲/۹	۲/۹
شیب های تند	۷	۱۱۹	تا ۱۳۲۹ ۲۸۱۱	تا ۲۸ ۵/۶	-۱۳/۱۶	۸/۳	۷/۷	۱۲	۱۱۸	۱۰۶۵ تا ۲۷۴۸	تا ۸/۵ ۲/۴	-۱/۹	۳/۲	۳/۱
شیب های بالایی	۵	۱۰۸	تا ۱۵۰۷ ۲۰۲۰	-۱۹/۵ تا ۱۰/۶	-۱۶	۳/۶	۳/۲	۳	۱۰۸	۱۱۱۴ تا ۱۸۱۴	تا ۳/۵ ۳	-۰/۲	۳/۲۵	۲/۶
قلل و ستیغ	۱	۱۳۱	۲۰۴۵	۰/۷۵	۰/۷۵	۰	۰	۲	۱۳۱	۱۵۲۷ تا ۱۹۸۶	-۳/۸ تا ۵/۵	۰/۸	۶/۶	۴/۶
۱: RMSE ۲: انحراف معیار ۳: میانگین ۴: دامنه خطا بعد از مونت کارلو ۵: ارتفاع بعد از مونت کارلو ۶: مساحت هر سطح ۷: تعداد بعد از مونت کارلو ۸: RMSE ۹: انحراف معیار ۱۰: میانگین ۱۱: دامنه خطا در هر طبقه ۱۲: ارتفاع ۱۳: مساحت هر سطح ۱۴: تعداد قبل از مونت کارلو														

هر دو مدل حاکی از توانایی روش مونت کارلو در کاهش خطای تصادفی مدل های ارتفاع رقومی است. کاهش خطا بعد از شبیه سازی در کلیه طبقات به جز طبقه قلل نیز بخوبی مشهود است. طبقاتی که دارای میانگین خطا و انحراف معیار و RMSE بزرگتری بودند، تغییرات بیشتری را بعد از شبیه سازی نشان می دهند.

طبقات مستخرج شده از مدل ارتفاع رقومی SRTM بعد از اجرای مونت کارلو دارای همگونی زیادی در میانگین، انحراف معیار و RMSE هستند در حالی که در مدل ASTER این همگونی کمتر مشاهده می شود.

بر اساس نتایج تحقیق داده های اولیه مدل های رقومی ارتفاع دارای خطای قابل توجهی هستند و عدم توجه به رفع این خطا می تواند منجر به کاهش دقت نتایج و افزایش عدم قطعیت در نتایج گردد. این در حالی است که بر اساس نتایج تحقیق اعمال روش های آنالیز عدم قطعیت می تواند خطای مدل های رقومی ارتفاع را به شکل قابل توجهی کاهش داده

جمله ناهنجاری های حفره های، برآمدگی حفره دار و پلهایی که تأثیر کمی آنها در مقیاس محلی زیاد است در داده های رقومی ارتفاعی ویرایش اول حاصل از تصاویر ماهواره ای ASTER، کاربرد آنها را در برخی از مقاصد محدود می سازد و می بایست در کاربردهای محلی حتماً به خطاهای یادشده در آن بسیار دقت کرد.

نتایج تحقیق نشان می دهد که بعد از اجرای شبیه سازی و ایجاد مدل ارتفاع رقومی اصلاح شده، مقادیر میانگین، انحراف معیار و RMSE خطا در هر دو مدل ارتفاع رقومی کاهش می یابد. بطوریکه میانگین خطای مدل ارتفاع رقومی SRTM از ۳/۵۶ متر قبل از مونت کارلو به ۰/۱۷ متر بعد از شبیه سازی می رسد و در مدل ارتفاع رقومی ASTER کاهش شدید میانگین خطا در داده ها چشمگیر است. بطوری که میانگین خطا از ۱۰/۵۷- متر در مدل اولیه به ۰/۴- متر در مدل اصلاح شده رسید.

کاهش شاخص های آماری بعد از روش مونت کارلو در

assessment. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 57, pp. 356-370.

8. Heuvelink, G.B.M., Burrough, P.A., Leenaers, H., 1990, Error propagation in spatial modelling with GIS. Proceedings of the First European Conference on Geographical Information Systems, EGIS '90, Amsterdam, The Netherlands, pp. 453-462.

9. Hunter, G.J. and Goodchild, M.F. (1997), Modeling the uncertainty of slope and aspect estimates derived from spatial databases. Geographical Analysis 29, 35-49.

10. Kamp, U., Bolch, T. and Olsenholler, J. (2003). DEM generation from ASTER satellite data for geomorphic analysis of Cerro Sillajhuay, Chile/Bolivia. Proc. Of ASPRS Annual Conference, Anchorage, Alaska.

11. May, R., 2001, Risk and uncertainty, Nature, 411, 891.

12. Miller, D.R., Morrice, J.G., 1996. Assessing uncertainty in catchment boundary delimitation. Proceedings of the Third International Conference/ Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, NM.

13. Oksanen, J., Sarjakoski, T., 2005. Error propagation analysis of DEM-based drainage basin delineation. International Journal of Remote Sensing, in press.

14. PCI Geomatics, 2001. User's Guide, version 8.2, 50 West Wilmot Street, Richmond Hill, Ontario, Canada.

15. Rosen, P.A., S. Hensley, I.R. Joughin, F.K. Li, S.N. Madsen, E. Rodriguez, R.M. Goldstein, 2000, Synthetic aperture radar interferometry, Proceedings of the IEEE, v. 88, no. 3, p. 333-382.

16. Wechsler, S. P.: Perceptions of Digital Elevation Model Uncertainty by DEM Users, URISA Journal, 15, 57-64, 2003.

17. Yamaguchi, Y., A.B. Kahle, H. Tsu, T. Kawakami, and M. Pniel, 1998, Overview of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER). IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 36, no. 4, p. 1,062-1,071.

18. Zhang, J. and Goodchild, M.F. (2002), "Uncertainty in geographical information. Research Monographs in GIS Series". London: Taylor and Francis.

و افزایش دقت در نتایج را فراهم سازد. نتایج این تحقیق برای شناسایی منابع خطا در مدل‌های رقومی ارتفاعی و همچنین نسبت اعتماد به نتایج آنها دارای اهمیت فراوانی است.

علاوه بر این از منظر کاربردی نتایج این تحقیق می‌تواند راهگشای سایر مطالعات در زمینه‌های منابع طبیعی، مخاطرات محیطی، مهندسی و طرح‌های عمرانی و برنامه‌ریزی قرار گیرد و برای سازمان‌های اجرایی در سطح استان نظیر منابع طبیعی، جهاد کشاورزی، سازمان نقشه برداری قابل استفاده می‌باشد. علاوه بر موارد فوق در خصوص استفاده از مدل‌های عدم قطعیت، نتایج تحقیق نشان می‌دهد که تکنیک‌های مونت کارلو از کارآمدی بالایی برای محاسبه عدم قطعیت برخوردار هستند و می‌توانند به خوبی در مدل‌سازی عدم قطعیت مورد استفاده قرار گیرند.

منابع و مأخذ

1. Cobb, M., Petry, F. and Robinson, V., 2000, Uncertainty in geographic information systems and spatial data, Fuzzy Sets and Systems, 113, 1.

2. Engler, N., Hall, B. (2007). The Internet, Spatial Data Globalization and Data use : The case of Tibet, The Information Society : An International Journal, 23:5, 345-359.

3. Fisher, P.F., 1991. First experiments in viewshed uncertainty: the accuracy of the viewshed area. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 57 (10), 1321-1327.

4. Fisher, P.F., 1993. Algorithm and implementation uncertainty in viewshed analysis. International Journal of Geographical Information Systems 7 (4), 331-347.

5. Fisher, P.F. (1998), Improved modelling of elevation error with geostatistic. GeoInformatica 2, 21-33.

6. Fujisada, H., M. Urai, and A. Iwasaki, 2011, Advanced methodology for ASTER DEM generation. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 49, no. 12, p. 5,080-5,091.

7. Hirano, A., Welch, R. and Lang, H. (2003). Mapping from ASTER stereo image data: DEM validation and accuracy

