

ارزیابی و مقایسه دقت مدل‌های ارتفاعی رقومی آزاد GDEM و SRTM و بررسی نحوه انتشار خطاها به نقشه شیب و جهت شیب

سعید نادى^{۱*}، یوسف غیائی^۲، شهرام هداوند^۳

^۱ استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده عمران و حمل و نقل - دانشگاه اصفهان
snadi@eng.ui.ac.ir

^۲ کارشناس ارشد ژئودزی - گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه اصفهان
yusuf.ghiasi@gmail.com

^۳ کارشناس ارشد نقشه برداری - مدیریت اکتشاف نفت - شرکت ملی نفت ایران
geonav.had@gmail.com

(تاریخ دریافت فروردین ۱۳۹۵، تاریخ تصویب مهر ۱۳۹۵)

چکیده

با گسترش مدل‌های ارتفاعی رقومی آزاد، کاربرد این مدل‌ها در زمینه‌های مختلف در چند سال اخیر رشد روزافزونی داشته است. عدم اطلاع کامل از دقت ارتفاعی این مدل‌ها در مناطق با ویژگیهای مختلف یکی از معضلاتی می‌باشد که نتایج مطالعات در حوزه‌های مختلف بر پایه این مدل‌ها را غیر قابل ارزیابی و اطمینان می‌کند. نتایج حاصل از مدل‌های آماری رایج ارزیابی دقت نظیر خطای میانگین، انحراف استاندارد و خطای مجذور میانگین مربعات با فرض پیروی خطاها از توزیع نرمال قابل اتکا می‌باشند در حالیکه این شرط عمدتاً با توجه به احتمال وجود خطاهای بزرگ در داده‌ها قابل تأمین نمی‌باشد. در این مقاله ابتدا به بررسی رفتار آماری خطای مدل‌های ارتفاعی زمین GDEM و SRTM پرداخته و با استفاده از تعریف یک محدوده اطمینان برای خطای مجذور میانگین مربعات روشی برای تعیین تعداد نقاط مرجع مناسب ارائه شده است. سپس با استفاده از مدل‌های آماری رایج و نیز مدل‌های با استحکام به ارزیابی دقت این مدل‌ها در مقایسه با نقاط مرجع پرداخته‌ایم. برای این منظور ابتدا شاخصهای آماری لازم تعریف شده و سپس در چهار کلاس مناطق شهری، مسطح، تپه ماهور و کوهستان در مناطق غربی و مرکزی ایران با محاسبه این شاخصها به مقایسه و تحلیل خطای مدل‌های رقومی مذکور پرداخته شده است. عدم توجه به ویژگیهای متفاوت مناطق مختلف و تأثیری که این ویژگیها در مراحل مختلف تعیین ارتفاع و تهیه مدل ارتفاعی خواهند داشت یکی از نواقص مطالعات پیشین می‌باشد که در این مطالعه به آن پرداخته شده است. علاوه بر این بررسی تأثیر خطا بر محصولات ثانویه از طریق محاسبه انتشار خطاها در نقشه‌های شیب و جهت شیب حاصل از مدل‌های مذکور از جنبه‌های نوآورانه بسیار مهمی می‌باشد که در این تحقیق به آن پرداخته شده است. نتایج تحقیق انجام شده نشان داد که علی‌رغم قدرت تفکیک پایین‌تر، دقت SRTM در همه مناطق بهتر از GDEM است. علاوه بر این در هر دو مدل دقت در مناطق شهری به میزان قابل ملاحظه‌ای بهتر از دیگر مناطق می‌باشد.

واژگان کلیدی: مدل ارتفاعی رقومی، مقایسه دقت و صحت، مدل‌های آماری با استحکام، انتشار خطاها، محدوده اطمینان

۱- مقدمه

مدل ارتفاعی رقومی (DEM)^۱ از دهه ۵۰ میلادی در پردازش‌های مختلف علوم زمین به‌عنوان یکی از منابع اصلی اطلاعات بکار گرفته شده است [۱]. این مدل‌ها به همراه مشتقات آن همچون شیب و جهت شیب در علوم مختلف مهندسی استفاده شده و امکان انجام آنالیزهای مختلف بر روی سطح زمین را فراهم کرده است. گسترش استفاده از این مدل‌های ضرورت تعیین دقت آنها را بیش از پیش نمایان می‌کند.

امروزه مدل‌های ارتفاعی رقومی جهانی متعددی بصورت آزاد از طریق وب قابل دسترس می‌باشند. بعنوان مثال می‌توان از SRTM^۲ و GDEM^۳ بعنوان دو نمونه از پرکاربردترین مدل‌های جهانی در دسترس نام برد [۲]. GDEM یکی از محصولات سنسور ASTER^۴ ژاپن می‌باشد. این سنسور در سال ۲۰۰۰ با همکاری وزارت اقتصاد، تجارت و صنعت این کشور بر روی ماهواره Terra ناسا نصب شد. اولین نسخه DEM جهانی تهیه شده از تصاویر ASTER در سال ۲۰۰۹ برای استفاده عموم بر روی اینترنت قرار گرفت. SRTM نیز در سال ۲۰۰۰ و طی یک مأموریت ۱۱ روزه شاتل Endeavour در یک پروژه بین المللی با همکاری NASA و NGA^۵ تهیه شد. در دسترس بودن عمومی این مدل‌ها باعث شده در بسیاری از علوم مانند حمل و نقل، هیدرولوژی، علوم نظامی و ... بطور وسیع مورد استفاده قرار بگیرند. علاوه بر این در بسیاری از کاربردهای عملی مانند تعیین حوزه‌های آبریز، مکانیابی، مسیریابی و غیره، استفاده از این مدل‌ها بعنوان یکی از اصلی‌ترین لایه‌های اطلاعاتی رایج می‌باشد. این موضوع باعث می‌شود که خروجی‌های حاصل از آنالیزها و تحلیلها بر روی این مدل‌ها بطور گسترده در تصمیم‌گیری‌های متعدد ملاک عمل قرار گیرند [۳-۸]. اطلاع در خصوص دقت این مدل‌ها در مناطق با ویژگیهای مختلف تاثیر بسزایی بر قابلیت اطمینان در استفاده از نتایج حاصل از تحلیل بر روی این مدل‌ها در تصمیم‌گیریها خواهد داشت.

بطور کلی می‌توان گفت که یک DEM از دو جزء اصلی یعنی اطلاعات اولیه و مدل‌های محاسباتی تشکیل شده است. بدین معنی که ابتدا داده‌های اولیه مورد نیاز مانند نقاط ارتفاعی، منحنی میزانها و غیره از منابع مربوطه جمع‌آوری می‌شوند. سپس با استفاده از مدل‌های درونیابی مناسب، مدل ارتفاعی رقومی ایجاد می‌گردد. دقت مدل حاصل، تابعی از دقت هر یک از این مراحل خواهد بود. درواقع دقت مسطحاتی، دقت ارتفاعی، توزیع، چگالی و الگوی پراکنش داده‌های اولیه، خصوصیات الگوریتم‌های درونیابی و نیز ساختار داده بکار گرفته شده، بر روی دقت و صحت مدل ایجاد شده تاثیر می‌گذارد. علاوه بر این در مواردی که مدل با استفاده از تکنیکهای فتوگرامتری یا اسکن لیزری و LiDAR^۶ تهیه می‌شود برخی ملاحظات می‌توانند تاثیر بسزایی در دقت و صحت مدل ایجاد شده در مناطق با ویژگیهای مختلف داشته باشند. این ملاحظات شامل انتخاب روش حذف نقاط روی عوارض مصنوعی و درختان و نیز روش یافتن عوارض مناسب برای توجیه هندسی و ثبت تصاویر می‌باشند [۹].

تاکنون بررسی‌ها و مطالعات زیادی در خصوص ارزیابی و بررسی دقت مدل‌های ارتفاعی رقومی انجام گرفته است. مقالات زیادی انتشار یافته‌اند که با استفاده از روش‌ها و معیارهای آماری مانند RMSE^۷ بر اساس مقایسه با نقاط مرجع زمینی و یا یک DEM مرجع به بررسی دقت ارتفاعی این مدل‌ها پرداخته‌اند [۹-۲۰]. علاوه بر آن مطالعات متعددی نیز نشان داده‌اند که استفاده از پارامترهای آماری رایج نظیر RMSE برای برآورد دقت DEM ها منوط به توزیع نرمال خطاها می‌باشد [۹، ۲۱-۲۳]. در این مقاله ما ابتدا مناسبیت پارامترهای آماری متداول نظیر معیار RMSE یا پارامترهای آماری پایدار مانند NMAD^۸ را با بررسی نوع توزیع خطاهای موجود در مدل‌های رقومی ارتفاعی GDEM V2 و SRTM ارزیابی می‌نماییم. سپس دقت ارتفاعی مدل‌های مذکور در مناطق مختلف با ویژگیهای توپوگرافی متفاوت را بررسی کرده و تاثیر تغییر توپوگرافی زمین بر دقت آنها را ارزیابی می‌کنیم. علاوه بر این انتشار خطاها در محصولات مستخرج از این مدل‌ها نظیر شیب و جهت شیب محاسبه

^۱ Digital Elevation Model

^۲ Shuttle Radar Topography Mission

^۳ Global Digital Elevation Model

^۴ Advanced Spaceborne Thermal Emission And Reflection Radiometer

^۵ National Geospatial-Intelligent Agency

^۶ Light Detection And Ranging

^۷ Root Mean Square Error

^۸ Normalized Median Absolute Deviation

شده و تحلیل و ارزیابی می‌گردند. در نهایت به منظور بررسی دقت مدل‌های مذکور از نقاط مرجع ارتفاعی در چهار منطقه شهری، مسطح، تپه ماهور و کوهستانی استفاده شده است. برای منطقه شهری از ۴۲۱ نقطه مرجع ارتفاعی در سطح شهر اصفهان و برای مناطق مسطح، تپه ماهور و کوهستانی به ترتیب از ۴۴۸۳، ۴۲۳۵۵ و ۱۲۷۳۵ نقطه مرجع در استان ایلام استفاده شد. نتایج حاصل در مناطق شهری نشان دهنده RMSE و NMAD برابر ۵/۸۹ و ۴/۵ برای GDEM و ۳/۱۲ و ۱/۷۹ برای SRTM می‌باشد. این مقادیر در مناطق مسطح برابر ۸/۳۷ و ۴/۹۵ برای GDEM و ۵/۲۷ و ۲/۹۶ برای SRTM، در مناطق تپه ماهور برابر ۹/۷۵ و ۶/۶۶ برای GDEM و ۶/۳۷ و ۴/۸۵ برای SRTM و در مناطق کوهستانی برابر ۹/۸۴ و ۷/۳۴ برای GDEM و ۸/۹۳ و ۶/۶۳ برای SRTM حاصل شد. نتایج تحقیق بر اساس هر دو دسته پارامترهای آماری متداول و پایدار نشان داد که دقت SRTM در همه مناطق بهتر از GDEM است. علاوه بر این دقت مدل‌ها در مناطق شهری به مراتب بهتر از دیگر مناطق بود. دقت مدل‌ها در مناطق مسطح در رتبه بعدی قرار دارد و دقت در مناطق تپه ماهور و کوهستانی تقریباً با هم برابر بود.

در ادامه، در بخش ۲ به معرفی اجمالی مدل‌های رقومی جهانی پرداخته شده است. بخش ۳ به معرفی برخی مطالعات قبلی انجام شده در زمینه ارزیابی دقت این مدل‌ها پرداخته است و در بخش ۴ مفاهیم مطرح در ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی بررسی شده‌اند. در بخش ۵ روش مورد استفاده در این مقاله شامل تعیین تعداد نقاط مرجع مورد نیاز بر پایه تعریف فاصله اطمینان و نیز تعریف شاخصهای آماری مورد نیاز آورده شده است. در بخش ۶ انتشار خطاها به نقشه شیب و جهت شیب بررسی شده و در بخش ۷ بررسی خطاها و مقایسه مدل‌ها در مناطق نمونه ارائه شده است. در نهایت در بخش ۸ به ارائه نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی پرداخته شده است.

۲- مدل‌های ارتفاعی رقومی جهانی

تاکنون مدل‌های رقومی ارتفاعی متعددی بصورت جهانی تولید شده‌اند که هر کدام از نظر پوشش، دقت، قدرت تفکیک و ... متفاوت می‌باشند.

یکی از اولین مدل‌های جهانی که توسط سازمان زمین‌شناسی آمریکا تولید شد GTOPO30 می‌باشد که با قدرت تفکیک ۳۰ ثانیه (تقریباً ۱ کیلومتر) از سال ۱۹۹۶ در دسترس عموم می‌باشد. GTOPO30 با ترکیب اطلاعات از منابع مختلف ایجاد شده و به همین دلیل کیفیت آن در مناطق مختلف متفاوت بوده و در برخی مناطق خیلی پایین گزارش شده است. یکی دیگر از مدل‌های جهانی که با قدرت تفکیک ۱ ثانیه (تقریباً ۳۰ متر) تهیه شد SRTM می‌باشد. اولین نسخه آن بجز آمریکا در بقیه مناطق جهان با قدرت تفکیک ۳ ثانیه (تقریباً ۹۰ متر) در اختیار عموم گذاشته شد. SRTM مناطق قطبی را شامل نشده و در مناطق کوهستانی و بیابانی فاقد اطلاعات می‌باشد. در آخرین نسخه این مدل با نام SRTM Plus که در سال ۲۰۱۴ در دسترس قرار گرفت، بجز خاورمیانه و شمال آفریقا در بقیه مناطق قدرت تفکیک ۱ ثانیه ارائه شده است. مدل رقومی ارتفاعی دیگری که با پوشش ۹۹٪، یکی از کاملترین مدل‌های موجود با پوشش سراسری می‌باشد GDEM نام دارد. اولین نسخه این مدل از سال ۲۰۰۹ در دسترس عموم است. این مدل که از مدار ۸۳ درجه شمالی تا ۸۳ درجه جنوبی را پوشش می‌دهد دارای قدرت تفکیک ۳۰ متر می‌باشد. آخرین نسخه این مدل در سال ۲۰۱۱ با بهبود در قدرت تفکیک مسطحاتی و نیز دقت مسطحاتی و ارتفاعی تهیه شده است. علاوه بر این مدل‌های رقومی ارتفاعی که بصورت آزاد در اختیار می‌باشند تعدادی مدل جهانی نیز بصورت تجاری تهیه شده‌اند که از آن جمله می‌توان به WorldDEM اشاره کرد. این مدل در سال ۲۰۱۴ بعنوان یکی از محصولات خروجی از ماهواره TerraSAR-X تهیه شده است و قدرت تفکیک مسطحاتی آن ۱۲ متر و دقت ارتفاعی نسبی و مطلق آن به ترتیب ۲ و ۴ متر گزارش شده است.

در این مقاله با توجه به امکان دسترسی آزاد به مدل‌های GDEM و SRTM و نیز کیفیت بهتر آنها نسبت به GTOPO30، به ارزیابی دقت آخرین نسخه موجود از این دو مدل در منطقه مطالعاتی پرداخته شده است. جدول ۱ مشخصات کلی آخرین نسخه این دو مدل را نشان می‌دهد.

جدول ۱- مشخصات عمومی SRTM و GDEM

مدل	GDEM	SRTM
منبع داده	تصاویر سنجنده Aster ماهواره Terra	تصاویر رادار شاتل Endeavour
آخرین نسخه	ورژن ۲ در تاریخ ۲۰۱۱	ورژن ۳ (Plus) در ۲۰۱۴
قدرت تفکیک	۱ ثانیه (تقریباً ۳۰ متر)	۱ ثانیه (تقریباً ۳۰ متر) در آمریکا و ثانیه (تقریباً ۹۰ متر) بقیه مناطق
پوشش	۸۳ درجه جنوب تا ۸۳ درجه شمال (/۹۹)	۵۶ درجه جنوب تا ۶۰ درجه شمال (/۸۰)
سیستم مرجع	WGS 84	WGS 84
مبنای ارتفاعات	ژئوئید EGM96	ژئوئید EGM96

۳- مطالعات پیشین

با پیشرفت پژوهشهای دانشمندان در حوزه‌های مختلف علمی به مرور ابعاد متنوع‌تری از DEM و کاربردهای آن مورد مطالعه قرار گرفت، به طوری که امکان مطالعه و نمایش پدیده‌های مرتبط به سطح ۳ بعدی زمین را برای پژوهشگران فراهم ساخته است [۲۴]. به عنوان مثال Cai و Wang (۲۰۰۶) و همچنین Chapell و همکاران (۲۰۰۶) مطالعاتی را بر روی آب‌های سطحی انجام دادند که در آن مستقیماً از داده‌های مربوط به DEM استفاده شده است [۳، ۲۵]. این مطالعات به آب‌های سطحی محدود نشد و گستره استفاده از DEM به شبیه‌سازی سیالات و مدیریت آن‌ها رسید [۶]. همچنین Romanowicz و همکاران (۲۰۰۸) محصولات DEM را در حوزه امنیت و مدل‌سازی راه‌ها مورد استفاده قرار داده‌اند [۷]. در حوزه ژئودزی نیز تحقیقات متعددی بر پایه DEM انجام شده است که از آن جمله می‌توان به تعیین ژئوئید اشاره کرد [۸، ۲۶، ۲۷].

خطاهای موجود در داده‌های اولیه استفاده شده برای تولید DEM، نحوه توزیع و پراکندگی آن‌ها، و همچنین ساختار مورد استفاده در تولید DEM از مهم‌ترین مواردی هستند که ارزیابی دقت به واسطه مطالعه آن‌ها انجام می‌گیرد [۱۷]. مطالعات پیشین در زمینه ارزیابی خطاهای موجود در DEM را می‌توان از نظر روش مورد استفاده و شاخصهای مورد استفاده دسته‌بندی نمود. از نظر روش مورد استفاده، یکی از رایج‌ترین شیوه‌های ارزیابی دقت

DEM استفاده از تعدادی نقطه کنترل و اندازه‌گیری خطای میانگین مربعات (RMSE) می‌باشد. در روش دیگر، ارزیابی دقت از طریق مقایسه محصولات حاصل از DEM نظیر شیب و منحنی‌های میزان با محصولات حاصل از یک منبع با دقت بالاتر صورت می‌گیرد. از منظر شاخصهای مورد استفاده در اندازه‌گیری میزان خطا نیز عمدتاً از دو دسته شاخصهای آماری متداول مانند انحراف استاندارد و RMSE یا شاخصهای آماری پایدار مانند NMAD استفاده می‌گردد. از تحقیقاتی که با روش استفاده از نقاط مرجع صورت گرفته‌اند می‌توان به Eckert و همکاران (۲۰۰۴) اشاره کرد. ایشان دقت مدل GDEM را در نواحی کوهستانی سوئیس با مقایسه ارتفاع حاصل از DEM و ارتفاع حاصل از نقاط مرجع در مناطق نمونه ارزیابی کردند [۱۳]. ارزیابی دقت مدل‌های GTOPO30 و SRTM نیز به همین روش در کشور هندوستان انجام شده است [۱۷]. ارزیابی دقت مدل رگه‌های نمکی تولید شده توسط LIDAR نیز توسط Alber و Hladik (۲۰۱۲) به همین روش صورت گرفته است. نقاط کنترل زمینی در این تحقیق از داده‌های متراکم GPS/RTK به دست آمده بود [۱۴]. از نمونه تحقیقاتی که ارزیابی دقت DEM را به روش بررسی محصولات حاصل مانند شیب و منحنی میزانها انجام داده‌اند می‌توان به باز تولید منحنی میزان در منطقه نمونه با استفاده از نقاط کنترل و DEM و مقایسه آنها اشاره کرد. این تحقیق توسط Xiao و Liu (۲۰۱۱) در جنوب غربی چین انجام گرفته است [۲۸]. تعیین شیب از روی DEM و نقاط کنترل زمینی برای سلولهای مختلف و مقایسه آنها از دیگر تحقیقاتی است که در آن از این روش برای ارزیابی دقت مدل‌ها استفاده شده است [۲۹]. Demall و همکاران (۲۰۰۸) نیز با مقایسه شیب‌ها به روش فازی به ارزیابی دقت داده‌های LIDAR پرداخته‌اند [۱۱].

در خصوص شاخصهای اندازه‌گیری دقت، در بسیاری از مقالات شاخصهای آماری رایج مانند RMSE مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۱۰، ۱۳، ۱۷، ۲۰، ۳۰]. علاوه بر RMSE، استفاده از روش‌های آماری با استحکام نیز در ارزیابی دقت DEM در مواردی که خطاها از توزیع نرمال پیروی نمی‌کنند مورد اشاره قرار گرفته که از آن جمله می‌توان به Hohle and Hohle (۲۰۰۹) اشاره کرد. ایشان نشان دادند که در مواردی که خطاها دارای توزیع نرمال نمی‌باشند استفاده از پارامترهای آماری با استحکام برآورد مناسب‌تری از دقت DEM را ارائه می‌دهند [۹]. علاوه بر

۴-۱- خطاهای تصادفی

این خطاها ناشی از خطای مشاهداتی یک کمیت منفرد می‌باشد که هیچ قانون مشخصی را دنبال نکرده و از توزیع نرمال پیروی می‌کنند. جهت کاهش تاثیر آنها اغلب از فیلترهای پائین گذر استفاده می‌شود. فیلترها را اغلب بصورت یک کانولوشن نمایش می‌دهند که بصورت رابطه ۱ می‌باشد [۳۱]:

$$B = f(x, y) * g(x, y) = \iint f(\alpha, \beta) g(x - \alpha, y - \beta) d\alpha d\beta \quad (1)$$

در این رابطه $f(\alpha, \beta)$ مقادیر ورودی از DEM می‌باشد و $g(x - \alpha, y - \beta)$ تابعی می‌باشد که تعیین کننده پائین گذر بودن فیلتر می‌باشد. این تابع در حالت پیوسته نوشته شده است، در مورد DTM که سطح پیوسته زمین را به صورت گسسته نمایش می‌دهد حالت گسسته این تابع برای $x=0,1,2,\dots,m$ و $y=0,1,2,\dots,n$ بصورت رابطه ۲ نمایش داده می‌شود [۳۱].

$$f(x, y) * g(x, y) = \frac{1}{nm} \sum_{m=0}^{m-1} \sum_{n=0}^{n-1} f(m, n) g(x - m, y - n) \quad (2)$$

در این تابع اگر $g(x, y) = 1$ باشد آنگاه فیلتر حاصل عملگر میانگین خواهد بود که برای یک کرنل 3×3 میانگین عناصر را به سلول وسط نسبت خواهد داد.

۴-۲- خطاهای سیستماتیک

این خطاها غالباً از یک الگوی مشخص پیروی می‌کنند و ناشی از عدم تنظیم ابزارهای اندازه‌گیری یا شرایط جوی و آب و هوایی انجام اندازه‌گیریها می‌باشد. برای برطرف کردن اثرات این خطاها اغلب الگوهای خطاها شناسایی شده و با استفاده از مدل‌های ریاضی مشخص خطاها بطور کامل برطرف می‌شوند. از آنجائیکه رنج وسیعی از ابزارها و روشها در جمع‌آوری اطلاعات لازم برای تهیه DEM می‌توانند به خدمت گرفته شوند برای برطرف کردن خطای سیستماتیک مربوطه می‌بایست اطلاع کامل از روشها و ابزارهای بکار گرفته شده در فرآیند تهیه آن داشت.

این Wang و همکاران (۲۰۱۵) نیز با استفاده از پارامترهای آماری با استحکام برآوردهای m -به بررسی دقت DEM پرداختند. ایشان استفاده از این مدل‌ها را برای بررسی دقت DEM قویا توصیه نمودند [۲۳].

در مطالعات پیشین کمتر به بررسی دقت DEM در مناطق با ویژگیهای توپوگرافی مختلف پرداخته شده است. علاوه بر این استفاده از پارامترهای آماری رایج در کنار پارامترهای آماری پایدار با توجه به نوع توزیع خطاها و نحوه انتشار خطاها به محصولات DEM نظیر شیب و جهت شیب مورد توجه واقع نشده‌اند که در این مقاله به تفصیل به آنها خواهیم پرداخت.

۴- کیفیت مدل‌های رقومی ارتفاعی

کیفیت مدل‌های رقومی ارتفاعی را می‌توان به میزان انطباق آن با زمین طبیعی نسبت داد. درواقع هرچه این انطباق بیشتر باشد مدل رقومی دارای کیفیت بهتری بوده است. اغلب کیفیت مدل‌های رقومی را با اندازه‌گیری صحت ارتفاعی و مسطحاتی آن می‌سنجند در حالیکه پارامترهای دیگری نظیر میزان بهنگام بودن نیز نقش فراوانی را در کیفیت مدل‌های رقومی ارتفاعی بازی می‌کند.

سه دسته خطا را می‌توان در مورد یک DTM بررسی نمود که عبارتند از [۳۰]:

- خطاهای تصادفی
 - خطاهای سیستماتیک
 - خطاهای بزرگ (اشتباهات)
- هر کدام از این خطاهای می‌توانند ناشی از یکی از موارد زیر بوده باشد [۳۰]:
- خطاهای موجود در داده‌های اولیه که DEM از روی آنها ایجاد شده است.
 - خطاهای مربوط به دستگاه‌هایی که این داده‌ها توسط آنها جمع‌آوری شده‌اند.
 - خطاهای انسانی که در فرایند اخذ داده‌های اولیه ایجاد شده‌اند.
 - خطاهای ناشی از مدل‌های بکار گرفته شده در مراحل مختلف پردازش انجام شده روی داده‌های اولیه برای تبدیل آنها به DEM

۳-۴- خطاهای بزرگ (اشتباهات)

این خطاها که به مقدار کم رخ می‌دهند اغلب ناشی از خطای انسانی در اندازه‌گیریها یا ثبت اطلاعات بوده و از طریق الگوریتمهای محاسباتی قابل شناسایی و برطرف شدن می‌باشند. روشهای متعددی جهت شناسایی اشتباهات تاکنون ارائه شده‌اند که یکی از مؤثرترین آنها توسط Li (۱۹۹۰) ارائه شد بر اساس تعریف یک حد آستانه روی اختلاف تغییرات شیب در هر نقطه می‌باشد [۳۱].

با توجه به شکل ۱ برای هر نقطه (i,j) چهار مقدار DSC (دو مقدار در راستای i و دو مقدار در راستای j) طبق رابطه ۳ محاسبه می‌شود [۳۱].

	i+1,j-1	i+1,j	i+1,j+1	
	i,j-1	i,j	i,j+1	
	i-1,j-1	i-1,j	i-1,j+1	

شکل ۱- هشت همسایگی یک پیکسل

$$\begin{aligned}
 slope_j(i+1, j-1) &= \frac{z(i+1, j) - z(i+1, j-1)}{d} \\
 slope_j(i+1, j) &= \frac{z(i+1, j+1) - z(i+1, j)}{d} \\
 slope_j(i, j-1) &= \frac{z(i, j) - z(i, j-1)}{d} \\
 slope_j(i, j) &= \frac{z(i, j+1) - z(i, j)}{d} \\
 slope_j(i-1, j-1) &= \frac{z(i-1, j) - z(i-1, j-1)}{d} \\
 slope_j(i+1, j-1) &= \frac{z(i-1, j+1) - z(i-1, j)}{d} \\
 slope_i(i+1, j-1) &= \frac{z(i, j-1) - z(i+1, j-1)}{d} \\
 slope_i(i, j-1) &= \frac{z(i-1, j-1) - z(i, j-1)}{d} \\
 slope_i(i+1, j) &= \frac{z(i, j) - z(i+1, j)}{d} \\
 slope_i(i, j) &= \frac{z(i-1, j) - z(i, j)}{d} \\
 slope_i(i+1, j+1) &= \frac{z(i, j+1) - z(i+1, j+1)}{d} \\
 slope_i(i, j+1) &= \frac{z(i-1, j+1) - z(i, j+1)}{d}
 \end{aligned} \quad (5)$$

بر این اساس فرآیند شناسایی خطاهای بزرگ بصورت زیر می‌باشد:

۱) برای هر یک از چهار DSC در تمام نقاط یک مقدار آستانه بر اساس رابطه ۶ محاسبه می‌کنیم:

$$Threshold = 3 \times \sigma(DSC) \quad (6)$$

که در آن σ انحراف استاندارد DSC ها می‌باشد.

۲) برای هر نقطه مقادیر DSC آنرا با حد آستانه مربوطه مقایسه می‌کنیم، در صورتیکه از حد آستانه بیشتر بود آن نقطه دارای خطا می‌باشد.

این روش بر روی هر یک از مدل‌های رقومی مورد بررسی در این مقاله اعمال شد و با اعمال حد آستانه ارائه شده در رابطه ۶ هیچ‌گونه خطای بزرگی در این مدل‌ها مشاهده نشد. برای برآورد و ارزیابی خطاهای باقی مانده و دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی از روشهای آماری استفاده می‌شود. در ادامه روش پیشنهادی در این مقاله معرفی می‌شود.

۵- روش پیشنهادی برای ارزیابی دقت

خطا می‌تواند در مراحل مختلف تولید DTM در آن وارد شود. اگر چه روشهای مختلف شناسایی و حذف یا کاهش اثرات این خطاها معمولاً بکار گرفته می‌شوند ولی ارزیابی دقت این مدل‌ها به منظور حصول اطمینان از قابلیت بکار گیری آنها در کاربردهای مختلف ضروری

$$\begin{aligned}
 DSC_I(i, j)_1 &= SlopeC_I(i, j) - SlopeC_I(i+1, j) \\
 DSC_I(i, j)_2 &= SlopeC_I(i, j) - SlopeC_I(i-1, j) \\
 DSC_J(i, j)_1 &= SlopeC_J(i, j) - SlopeC_J(i, j-1) \\
 DSC_J(i, j)_2 &= SlopeC_J(i, j) - SlopeC_J(i, j+1)
 \end{aligned} \quad (3)$$

جائیکه $SlopeC_I$ و $SlopeC_J$ تغییرات شیب برای هر نقطه در راستای z و i می‌باشند و با استفاده از روابط ۴ محاسبه می‌شوند [۳۱].

$$\begin{aligned}
 SlopeC_J(i+1, j) &= Slope_J(i+1, j) - Slope_J(i+1, j-1) \\
 SlopeC_J(i, j) &= Slope_J(i, j) - Slope_J(i, j-1) \\
 SlopeC_J(i-1, j) &= Slope_J(i-1, j) - Slope_J(i-1, j-1) \\
 SlopeC_I(i, j-1) &= Slope_I(i, j-1) - Slope_I(i+1, j-1) \\
 SlopeC_I(i, j) &= Slope_I(i, j) - Slope_I(i+1, j) \\
 SlopeC_I(i, j+1) &= Slope_I(i, j+1) - Slope_I(i+1, j+1)
 \end{aligned} \quad (4)$$

در این روابط مقادیر شیب در جهت I ($Slope_I$) و شیب در جهت J ($Slope_J$) برای هر پیکسل از روابط ۵ بدست می‌آیند [۳۱].

۵-۱- انتخاب نقاط مرجع

استفاده از نقاط مرجع و نمونه برداری از داده‌ها یکی از مراحل مهم در ارزیابی دقت یک DEM می‌باشد. پراکنش مکانی، دقت و تعداد نقاط مرجع مورد استفاده تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر صحت اندازه‌گیری و قابلیت تعمیم نتایج حاصل از ارزیابی روی نقاط نمونه به کل مدل خواهد داشت. با توجه به استفاده از پارامترهای آمار توصیفی در ارزیابی دقت DEM و ضرورت همگن بودن توزیع خطاها در نواحی مورد بررسی در این مقاله محدوده مورد مطالعه برای ۴ ناحیه کوهستانی، شهری، مسطح و تپه ماهور بطور مجزا مورد ارزیابی قرار گرفت. هر یک از این نواحی بدلیل ویژگیهای توپوگرافی و پوشش سطح متفاوت می‌تواند رفتارهای متفاوتی از دید خطاها داشته باشند.

در این مقاله به منظور تعیین تعداد نقاط نمونه مورد نیاز ابتدا یک محدوده اطمینان برای محاسبه RMSE بعنوان یکی از مهمترین شاخصهای ارزیابی دقت تعریف شده است. سپس با در نظر گرفتن یک اندازه برای این محدوده تعداد نمونه مورد نیاز برای برآورده کردن آن محدوده اطمینان تخمین زده می‌شود.

روش مورد استفاده در این مقاله برای تعیین محدوده اطمینان برای RMSE بر اساس تعریف یک آماره برای RMSE برآورد شده و RMSE واقعی می‌باشد. برای این منظور از آماره مربوط به نسبت واریانسها کمک می‌گیریم. طبق رابطه ۷ نسبت واریانس نمونه به واریانس واقعی از توزیع خی دو با n-1 درجه آزادی پیروی می‌کند [۳۲].

$$\frac{(n-1)S^2}{\sigma^2} \sim \chi^2_{(n-1)} \quad (7)$$

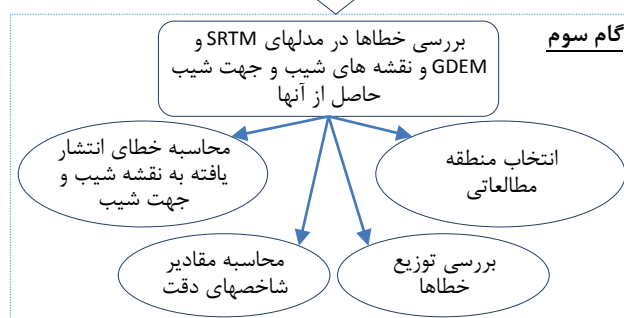
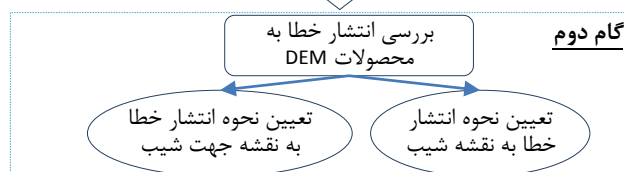
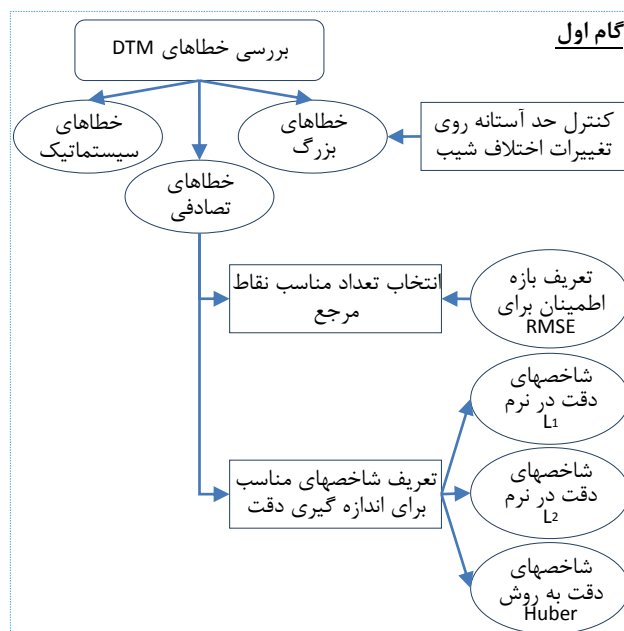
جائیکه S^2 و σ^2 به ترتیب واریانس نمونه و واریانس واقعی می‌باشند. در صورتیکه Δh معرف بردار اختلاف ارتفاع واقعی هر نقطه از ارتفاع ثبت شده برای آن نقطه در DEM با ابعاد N سلول باشد و $\mu_{\Delta h}$ معرف میانگین واقعی این اختلاف ارتفاعها باشد رابطه ۸ واریانس واقعی اختلاف ارتفاعها را نشان می‌دهد.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta h_i - \mu_{\Delta h})^2}{N} \quad (8)$$

با بست این رابطه می‌توان رابطه RMSE و واریانس را طبق رابطه ۹ بدست آورد.

می‌باشد. برای این منظور عمدتاً از نقاط مرجع با دقت بالا و شاخصهای اندازه‌گیری دقت استفاده می‌شود.

شکل ۲ مراحل مختلف روش پیشنهادی در این مقاله برای بررسی دقت مدل‌های رقومی زمین را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، در گام اول به تعیین تعداد مناسب نقاط مرجع پرداخته می‌شود سپس شاخصهای مناسب برای اندازه‌گیری دقت تعریف می‌شوند. در گام بعدی مبانی انتشار خطا به محصولات حاصل از DEM یعنی نقشه شیب و جهت شیب بررسی می‌شود. در گام آخر نیز با استفاده از مبانی ارائه شده در گامهای قبل دقت مدل‌های SRTM و GDEM در منطقه مطالعاتی انتخاب شده بررسی می‌شود و انتشار خطاها در محصولات حاصل در منطقه مذکور بررسی می‌شوند.



شکل ۲- مراحل روش پیشنهادی

$$\begin{aligned}\sigma^2 &= \frac{\sum_{i=1}^N (\Delta h_i - \mu_{\Delta h})^2}{N} \\ &= \sum_{i=1}^N \frac{\Delta h_i^2}{N} + \sum_{i=1}^N \frac{\mu_{\Delta h}^2}{N} \\ &\quad - \sum_{i=1}^N \frac{2\Delta h_i \mu_{\Delta h}}{N} \\ &= RMSE^2 - \mu_{\Delta h}^2\end{aligned}\quad (9)$$

که در آن $RMSE^2$ خطای مجذور میانگین واقعی می‌باشد. به همین ترتیب برای S^2 نیز رابطه ۱۰ قابل اثبات می‌باشد.

$$S^2 = \overline{RMSE^2} - \overline{\Delta h^2} \quad (10)$$

که در آن $\overline{RMSE^2}$ خطای مجذور میانگین برآورد شده از روی داده‌های نمونه بوده و $\overline{\Delta h^2}$ میانگین اختلاف ارتفاعها می‌باشد.

با جایگذاری روابط ۹ و ۱۰ در ۷ آماره مناسب برای ایجاد محدوده اطمینان RMSE طبق رابطه ۱۱ حاصل می‌شود:

$$\frac{(n-1)(\overline{RMSE^2} - \overline{\Delta h^2})}{(RMSE^2 - \mu_{\Delta h}^2)} \sim \chi^2_{(n-1)} \quad (11)$$

همانطور که مشاهده می‌شود در این آماره $\mu_{\Delta h}^2$ مجهول می‌باشد لذا با جایگذاری آن از مقدار برآورد آن یعنی $\overline{\Delta h^2}$ یک درجه از آزادی توزیع خی دو کم می‌کنیم. لذا آماره مناسب طبق رابطه ۱۲ بدست می‌آید.

$$\frac{(n-1)(\overline{RMSE^2} - \overline{\Delta h^2})}{(RMSE^2 - \overline{\Delta h^2})} \sim \chi^2_{(n-2)} \quad (12)$$

رابطه ۱۳ نحوه بدست آوردن محدوده اطمینان برای آماره ۱۲ را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned}P\left(\chi^2_{(n-2, \frac{\alpha}{2})} < \frac{(n-1)(\overline{RMSE^2} - \overline{\Delta h^2})}{(RMSE^2 - \overline{\Delta h^2})} \right. \\ \left. < \chi^2_{(n-2, 1-\frac{\alpha}{2})}\right) \\ = 1 - \alpha\end{aligned}\quad (13)$$

با جابجایی روابط در ۱۳ محدوده اطمینان RMSE طبق رابطه ۱۴ حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned}P\left(\frac{(n-1)(\overline{RMSE^2} - \overline{\Delta h^2})}{\chi^2_{(n-2, 1-\frac{\alpha}{2})}} + \overline{\Delta h^2} \leq RMSE^2 \right. \\ \left. < \frac{(n-1)(\overline{RMSE^2} - \overline{\Delta h^2})}{\chi^2_{(n-2, \frac{\alpha}{2})}} + \overline{\Delta h^2}\right) \\ = 1 - \alpha\end{aligned}\quad (14)$$

محدوده بدست آمده در رابطه ۱۴ بیانگر این موضوع می‌باشد که چنانچه با استفاده از n نقطه کنترل، $RMSE^2$ برای یک DEM اندازه‌گیری گردد و این کار برای تعداد زیادی نمونه تکرار گردد $RMSE$ واقعی DEM به احتمال $100 * (1 - \alpha)$ درصد در این بازه خواهد بود.

بر این اساس و برای تعیین تعداد نقاط نمونه مناسب می‌بایست ابتدا با استفاده از یک نمونه با تعداد کم مقادیر $\overline{RMSE^2}$ و $\overline{\Delta h^2}$ را محاسبه نمود و سپس با تشکیل بازه بالا و در نظر گرفتن یک مقدار α می‌توان با تکرار مقدار n مناسب را تعیین کرد.

۵-۲- شاخص‌های اندازه‌گیری دقت

همانطور که پیش از این اشاره شد رایج‌ترین و معروفترین روش اندازه‌گیری دقت، RMSE است که به نوعی متناسب با تعریف واریانس داده‌ها می‌باشد. اما نرمال نبودن توزیع خطاها در داده‌های مکانی، مانند DEM، استفاده از روش‌های دیگر آنالیز دقت، به ویژه روش‌های با استحکام^۱ را اجتناب ناپذیر کرده است [۳۳]. طبق تعریف، یک برآوردگر پارامتر با استحکام نسبت به اشتباهات و خطاهای بزرگ حساس نمی‌باشد [۲۲]. در واقع مزیت شاخصهای با استحکام نسبت به معیارهای معمول مانند RMSE حساسیت کمتر آنها نسبت به اشتباهات و خطاهای بزرگ است [۳۴]. این شاخصها و ویژگیهای آنها معمولاً در قالب نُرمهای^۲ تعریف شده در فضای هیلبرت تعریف می‌شوند. نرم L_p برای هر بردار k بعدی x در فضای هیلبرت R^k ، با استفاده از رابطه ۱۵ تعریف می‌شود [۳۵]:

$$\|x\|_p = \left(\sum_{n=1}^k |x_n|^p\right)^{1/p} \quad (15)$$

^۱ Robust

^۲ Norm

مقدار Δh قرار گرفته در وسط رشته مقادیر اختلاف ارتفاعات مرتب شده می‌باشد.

انحراف استاندارد در این نرم بعنوان برآوردی از پراکندگی Δh ها، یکی از شاخصهای آنالیز دقت با استحکام می‌باشد که از طریق رابطه ۱۸ محاسبه می‌شود [۲۲].

$$NMAD = \frac{Median(|\Delta h_i - M|)}{0.6745} \quad (18)$$

جائیکه M میانه Δh ها بوده و $Median$ تابعی می‌باشد که میانه اختلاف Δh ها از میانه آنها را محاسبه می‌کند. رابطه ۱۹ یکی دیگر از شاخصهای با استحکام برای برآورد میزان پراکندگی Δh ها می‌باشد [۲۲].

$$\sigma_m = \frac{1}{2\sqrt{n}f(x_{0.5})} \quad (19)$$

که در آن n تعداد داده‌هاست و $f(x_{0.5})$ از رابطه ۲۰ به دست می‌آید:

$$f(x_{0.5}) = \frac{A - B}{2nh} \quad (20)$$

و h از رابطه ۲۱ بدست می‌آید.

$$h = \frac{1.2(q_{0.75} - q_{0.25})}{\sqrt[5]{n}} \quad (21)$$

جائیکه $q_{0.75}$ و $q_{0.25}$ به ترتیب بزرگترین داده‌های چارک اول و چارک سوم می‌باشند. علاوه بر این در رابطه ۲۰، A برابر با تعداد داده‌های کوچکتر یا مساوی $(M + h)$ و B تعداد داده‌های کوچکتر یا مساوی $(M - h)$ می‌باشند.

۵-۲-۲- شاخص‌های دقت به روش Huber

در این روش ابتدا برآورد اولیه از پارامترهای موقعیت $(\hat{\mu}_0)$ و پراکندگی $(\hat{\sigma}_0)$ بر مبنای نرم L_1 (میانه و NMAD) یا نرم L_2 (میانگین و انحراف استاندارد) با استفاده از کل داده‌ها در نظر گرفته شده و هریک از مقادیر Δh ها با استفاده از رابطه ۲۱ تبدیل می‌شوند [۲۱].

$$\tilde{\Delta h}_i = \begin{cases} \hat{\mu}_0 + 1.5\hat{\sigma}_0 & \Delta h_i > \hat{\mu}_0 + 1.5\hat{\sigma}_0 \\ \hat{\mu}_0 - 1.5\hat{\sigma}_0 & \Delta h_i < \hat{\mu}_0 - 1.5\hat{\sigma}_0 \\ \Delta h_i & otherwise \end{cases} \quad (21)$$

جائیکه $\tilde{\Delta h}_i$ مقدار جدید Δh_i می‌باشد. سپس با استفاده از مقادیر $\tilde{\Delta h}_i$ های جدید مقادیر جدید برای $\hat{\sigma}_0$ و

با در نظر گرفتن مقادیر مختلف p نرمهای مختلف L_p ساخته می‌شوند که L_1 و L_2 در این میان به دلیل ویژگیهای خاص خود از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشند. در این بخش به بررسی شاخص‌های مختلف اندازه‌گیری دقت مانند پارامتر موقعیت و پارامتر پراکندگی بر مبنای این نرمها و نیز روش Huber می‌پردازیم.

۵-۲-۱- شاخص‌های دقت در نرم L_2

تعبیر آماری نرم L_2 همان فاصله اقلیدسی یا میانگین هندسی می‌باشد که در محاسبه RMSE و سرشکنی کمترین مربعات مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این نرم پارامتر موقعیت، میانگین ریاضی Δh ها می‌باشد که بعنوان خطای میانگین اختلاف ارتفاعات بعنوان برآوردی از خطای ارتفاعات از رابطه ۱۶ بدست می‌آید.

$$\mu_{\Delta h} = 1/n \sum_{i=1}^n \Delta h_i \quad (16)$$

جائیکه در آن Δh اختلاف ارتفاع DEM از نقاط رفرنس می‌باشد. وریانس به عنوان پارامتر معرف میزان پراکندگی اختلاف ارتفاعات یکی دیگر از شاخصهای مطرح در این نرم می‌باشد و با استفاده از رابطه ۸ که در بخش ۵-۱ ارائه شد قابل محاسبه می‌باشد. علاوه بر این در این نرم RMSE مربوط به Δh ها بعنوان معیاری دیگر از خطای ارتفاعات از رابطه ۱۷ بدست می‌آید.

$$RMSE = \frac{1}{n} \|\Delta h\|_2 \quad (17)$$

استفاده از نرم L_2 و معادله ۱۷ در صورتی مناسب‌ترین روش ارزیابی دقت است که تابع توزیع خطاها نرمال باشد اما در صورتی که مشاهده اشتباه در داده‌ها وجود داشته باشد تاثیر این نوع خطاها بر روی نرم L_2 بسیار زیاد خواهد بود. به عبارت دیگر نرم L_2 نسبت به خطاهای بزرگ حساسیت بسیاری دارد [۳۴].

۵-۲-۲- شاخص‌های دقت در نرم L_1

نرم L_1 که تعبیر آماری آن همان میانه است، حساسیت کمتری نسبت به خطاهای بزرگ و اشتباهات دارد (Koch 1997). یکی از شاخصهای با استحکام در این نرم برای تخمین پارامتر موقعیت، میانه است و برابر با

μ_0 محاسبه می‌گردد. این فرآیند ادامه می‌یابد تا جاییکه مقادیر برآورد شده همگرا شوند و $\hat{\mu}_{Huber}$ و $\hat{\sigma}_{Huber}$ بدست آیند. در این صورت این مقادیر برآوردهای با استحکام از پارامترهای موقعیت و پراکندگی Δh خواهد بود.

۶- انتشار خطا به محصولات حاصل از DEM

با توجه به اینکه یکی از استفاده‌های رایج از DEM تهیه محصولات جانبی با استفاده از آنها می‌باشد در این قسمت به بررسی نحوه انتشار خطاها بر روی دو نمونه از پرکاربردترین محصولات یعنی شیب و جهت شیب می‌پردازیم.

۶-۱- انتشار خطا به نقشه شیب

به منظور تعیین نحوه اثر خطا به نقشه شیب از قانون انتشار خطاهای استفاده می‌کنیم. با توجه به شکل ۱ شیب هر سلول از رابطه ۲۲ قابل محاسبه می‌باشد [۳۶].

$$Slope = \tan^{-1} \left(\sqrt{s_x^2 + s_y^2} \right) \quad (22)$$

که در آن s_x و s_y به ترتیب شیب در جهت x و y می‌باشند و از روابط ۲۳ محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} s_x &= \frac{(z_{(i+1,j+1)} + 2z_{(i,j+1)} + z_{(i-1,j+1)})}{8d} \\ &\quad - \frac{(z_{(i+1,j-1)} + 2z_{(i,j-1)} + z_{(i-1,j-1)})}{8d} \\ s_y &= \frac{(z_{(i+1,j-1)} + 2z_{(i+1,j)} + z_{(i+1,j+1)})}{8d} \\ &\quad - \frac{(z_{(i-1,j-1)} + 2z_{(i-1,j)} + z_{(i-1,j+1)})}{8d} \end{aligned} \quad (23)$$

جائیکه d قدرت تفکیک DEM می‌باشد. با اعمال قانون انتشار خطاها بر روی رابطه ۲۲ رابطه ۲۴ بعنوان رابطه اصلی خطای شیب حاصل می‌شود.

$$\delta_{slope}^2 = \left(\frac{\partial slope}{\partial s_x} \right)^2 \delta_{s_x}^2 + \left(\frac{\partial slope}{\partial s_y} \right)^2 \delta_{s_y}^2 \quad (24)$$

در این رابطه مقادیر $\delta_{s_x}^2$ و $\delta_{s_y}^2$ مقادیر خطای شیب در جهت x و y می‌باشند. رابطه ۲۵ نحوه محاسبه این مقادیر با استفاده از اعمال قانون انتشار خطاها بر روی روابط ۲۳ را نشان می‌دهد.

$$\begin{aligned} \delta_{s_x}^2 &= \left(\frac{\partial s_x}{\partial z_{(i+1,j+1)}} \right)^2 \delta_{z_{(i+1,j+1)}}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial s_x}{\partial z_{(i,j+1)}} \right)^2 \delta_{z_{(i,j+1)}}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial s_x}{\partial z_{(i-1,j+1)}} \right)^2 \delta_{z_{(i-1,j+1)}}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial s_x}{\partial z_{(i+1,j-1)}} \right)^2 \delta_{z_{(i+1,j-1)}}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial s_x}{\partial z_{(i,j-1)}} \right)^2 \delta_{z_{(i,j-1)}}^2 \\ &+ \left(\frac{\partial s_x}{\partial z_{(i-1,j-1)}} \right)^2 \delta_{z_{(i-1,j-1)}}^2 \end{aligned} \quad (25)$$

که در آن $\delta_{z_{(i,j)}}^2$ خطای ارتفاعی سلول (i,j) می‌باشد. با فرض یکسان بودن خطای ارتفاعی همه سلولها (برابر مقدار متوسط δ_z^2) و محاسبه مقادیر مشتقها از رابطه ۲۳، مقدار خطای $\delta_{s_x}^2$ و به همین ترتیب مقدار خطای $\delta_{s_y}^2$ از رابطه ۲۶ حاصل می‌شود.

$$\delta_{s_x}^2 = \delta_{s_y}^2 = \frac{3}{16d^2} \delta_z^2 \quad (26)$$

خطای شیب هر سلول با جایگذاری رابطه ۲۶ در رابطه ۲۴ و جایگذاری مشتقات مربوطه بصورت رابطه ۲۷ بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} \delta_{slope}^2 &= \frac{3}{16d^2(1 + s_x^2 + s_y^2)^2} \delta_z^2 \\ &= \frac{3}{16d^2(1 + [\tan(slope)]^2)^2} \delta_z^2 \end{aligned} \quad (27)$$

همانطور که مشاهده می‌شود خطای شیب برای هر سلول ضریبی از خطای ارتفاعی آن سلول می‌باشد و با افزایش شیب میزان این خطا کاهش می‌یابد.

۶-۲- انتشار خطا به نقشه جهت شیب

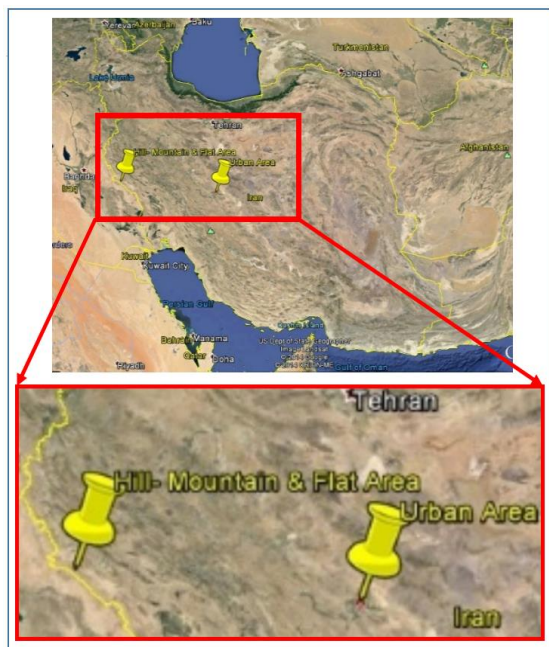
به منظور محاسبه جهت شیب برای هر سلول با توجه به شکل ۱ از رابطه ۲۸ استفاده می‌شود [۳۶].

$$Aspect = \tan^{-1} \left| \frac{s_x}{s_y} \right| \quad (28)$$

با اعمال قانون انتشار خطاها، خطای جهت شیب از رابطه ۲۹ بدست می‌آید.

$$\delta_{aspect}^2 = \left(\frac{\partial aspect}{\partial s_x} \right)^2 \delta_{s_x}^2 + \left(\frac{\partial aspect}{\partial s_y} \right)^2 \delta_{s_y}^2 \quad (29)$$

تاثیر تغییرات شدید ارتفاع بر روی دقت DEM انجام شد. این تقسیم‌بندی بر اساس شیب انجام می‌شود. مناطق دارای شیب زیر ۲ درجه، بین ۲ درجه تا ۲۵ درجه و بالای ۲۵ درجه به ترتیب مسطح، تپه ماهور و کوهستانی نامیده می‌شوند و مناطقی دارای فضا‌های مسکونی بعنوان مناطق شهری در نظر گرفته می‌شوند [۳۱]. داده‌های مورد استفاده برای منطقه شهری مربوط به شهر اصفهان می‌باشد که از شهرداری اصفهان اخذ شده است. برای مناطق کوهستانی، مسطح و تپه ماهور از داده‌های مربوط به وزارت نفت در منطقه‌ای غیر مسکونی در استان ایلام استفاده شده است. شکل ۳ جانمایی مناطق مورد بررسی را نمایش می‌دهد.



شکل ۳- جانمایی مناطق مطالعاتی

برای منطقه شهری تعداد ۴۲۱ نقطه ارتفاعی در سطح شهر اصفهان از شهرداری اصفهان اخذ شد. این نقاط توسط GPS و در سیستم WGS84 در سطح خیابان‌ها و چهار راه‌های شهر برداشت شده و ارتفاع آنها از سطح بیضوی با استفاده از مدل جهانی EGM96 به سطح مرجع ژئوئید تبدیل شده است. دقت ارتفاعی این نقاط ± 2 سانتی متر و دقت مسطحاتی آنها ± 5 میلیمتر گزارش شده است. شکل ۴ پراکنش این نقاط در سطح شهر اصفهان را با لکه‌های قرمز رنگ نمایش می‌دهد.

با جایگذاری مقادیر δ_{sx}^2 و δ_{sy}^2 از رابطه ۲۶ و مشتقات مربوطه، خطای جهت شیب برای هر سلول از رابطه ۳۰ بدست می‌آید.

$$\delta_{aspect}^2 = \frac{3}{16d^2(s_x^2 + s_y^2)} \delta_z^2 \quad (30)$$

$$= \frac{3}{16d^2[\tan(\text{slope})]^2} \delta_z^2$$

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش مقدار شیب خطای محاسبه جهت شیب هر سلول کمتر خواهد شد. ولی نرخ کمتر شدن آن نسبت به خود شیب کمتر می‌باشد.

۷- ارزیابی دقت GDEM V2 و SRTM 2

در این بخش ابتدا به معرفی داده‌های مورد استفاده در ارزیابی دقت مدل‌های SRTM و GDEM پرداخته‌ایم. سپس با بررسی تطابق روند ارائه شده توسط هر یک از دو مدل با روند حاصل از نقاط رفرنس در هر یک از چهار منطقه، به بررسی وجود خطای سیستماتیک در داده‌ها پرداخته و نیز با استفاده از هیستوگرام فراوانی خطاهای هریک از این مدل‌ها به بررسی میزان تطابق توزیع خطاهای هر یک از این دو مدل با توزیع نرمال می‌پردازیم. سپس با مقایسه شاخص‌های آماری ارائه شده در بخش ۵-۲ در مورد هر یک از دو مجموعه داده‌ها با داده‌های رفرنس، ارزیابی در مورد دقت مدل‌های مورد بررسی انجام می‌شود در نهایت انتشار خطاها در نقشه‌های شیب و جهت شیب بررسی می‌شود.

۷-۱- منطقه مطالعاتی و داده‌های مورد استفاده

همانطور که در بخش ۵-۱ ذکر شد، با توجه به تاثیر ویژگی‌های توپوگرافی در مراحل مختلف تهیه DEM، یکی از اهداف اصلی این مقاله بررسی تاثیر این ویژگی‌های توپوگرافی بر روی دقت هریک از مدل‌های رقومی مورد بررسی می‌باشد. به همین منظور در این مقاله بررسی و مقایسه دقت مدل‌های رقومی در چهار منطقه شهری (به منظور تعیین میزان تاثیر وجود عوارض مصنوعی در دقت DEM)، منطقه مسطح (به منظور تعیین کمبود نقاط مناسب برای توجیه مدل‌ها بر روی دقت DEM)، مناطق تپه ماهور (برای بررسی تاثیر تغییرات تدریجی ارتفاع بر روی دقت DEM) و مناطق کوهستانی (به منظور تعیین

جدول ۲ تعداد نقاط در هر منطقه به همراه مشخصات آماری آنها را نمایش می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات آماری نقاط رفرنس در هر یک از مناطق مطالعاتی

ارتفاع متری	مساحت هکتار	تپه‌ای درصد	کوهستانی درصد
ارتفاع کمینه ۱۵۴۵/۸۸	۳۰۰/۰۶	۱۱۷/۹۵	۴۵۰/۰۳
ارتفاع بیشینه ۱۷۲۸/۴۳	۳۹۹/۹۹	۴۴۹/۹۷	۱۶۲۲/۹۴
میانگین ارتفاعات ۱۵۸۰/۸۵	۳۵۵/۱۵	۲۵۳/۷۸	۸۴۵/۵۶
وریانس ارتفاعات ۲۵/۸۴	۲۵/۷۹	۷۸/۹۴	۳۰۴/۳۳
تعداد نقاط ۴۲۱	۴۴۸۳	۴۲۳۵۵	۱۲۷۳۵

برای بررسی کفایت تعداد نقاط مورد نیاز، از رابطه ۱۴ استفاده می‌شود. با در نظر گرفتن یک نمونه اولیه شامل ۵۰ نقطه کنترل مقادیر $RMSE^2$ و $\overline{\Delta h^2}$ برای GDEM به ترتیب ۸/۸۱ و ۱/۵۹- و برای SRTM به ترتیب ۹/۶۷ و ۲/۶۱- بدست آمد. جدول ۳ تعداد نقاط کنترل لازم برای GDEM و SRTM را برای مقادیر مختلف α و تعداد نقاط نمونه مختلف نشان می‌دهد.

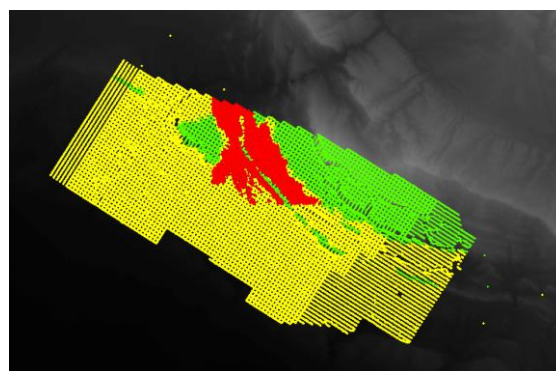
همانطور که مشاهده می‌گردد برای تعداد نقاط رفرنس مورد استفاده در مناطق مسطح، تپه‌ای و کوهستانی RMSE واقعی با احتمال بیش از ۹۹ درصد در محدوده اطمینان کوچکتر از ± 1 متری از مقدار برآورد شده در این مقاله قرار خواهد داشت و در منطقه شهری با احتمال بیش از ۹۹ درصد در محدوده حدود ± 3 متری قرار خواهد داشت.

لازم به ذکر است، تعیین تعداد نقاط نمونه با این روش نسبت به مقدار $\overline{\Delta h^2}$ بسیار حساس می‌باشد بگونه‌ای که با تغییر این مقدار تعداد نقاط نمونه برای برآورده کردن محدوده اطمینان به شدت تغییر می‌کند. لذا توصیه می‌شود در تعیین $\overline{\Delta h^2}$ اولیه نقاط نمونه با پراکندگی مناسب مورد استفاده قرار بگیرد.



شکل ۴- پراکندگی نقاط رفرنس در منطقه شهری اصفهان

در منطقه غرب کشور در استان ایلام و در مساحتی حدود ۲۰۰ کیلومتر مربع ۵۹،۵۷۳ نقطه ارتفاعی با استفاده از دستگاه GPS در سیستم WGS84 با دقت ارتفاعی ± 15 سانتی متر و دقت مسطحاتی ± 7 سانتی متر توسط شرکت نفت برداشت شده که شامل مناطق کوهستانی، مسطح و تپه ماهوری می‌باشد. این مناطق فاقد پوشش گیاهی انبوه و عوارض مصنوعی قابل توجه بوده و ارتفاعات آن مشابه داده‌های منطقه شهری اصفهان توسط مدل جهانی EGM2008 به سطح ژئوئید تبدیل شده است. این نقاط پس از اخذ از مدیریت اکتشاف شرکت نفت با طبقه‌بندی شیبه‌ها، بررسی تغییرات ارتفاعی، تفسیر بصری با استفاده از تصاویر ماهواره و نیز بررسی میدانی به ۳ منطقه کوهستانی، تپه ماهور و مسطح تقسیم‌بندی شدند. شکل ۵ پراکنش این داده را نمایش می‌دهد. در این شکل نقاط کوهستانی با رنگ سبز، مسطح با رنگ قرمز و تپه ماهور با رنگ زرد نمایش داده شده است.



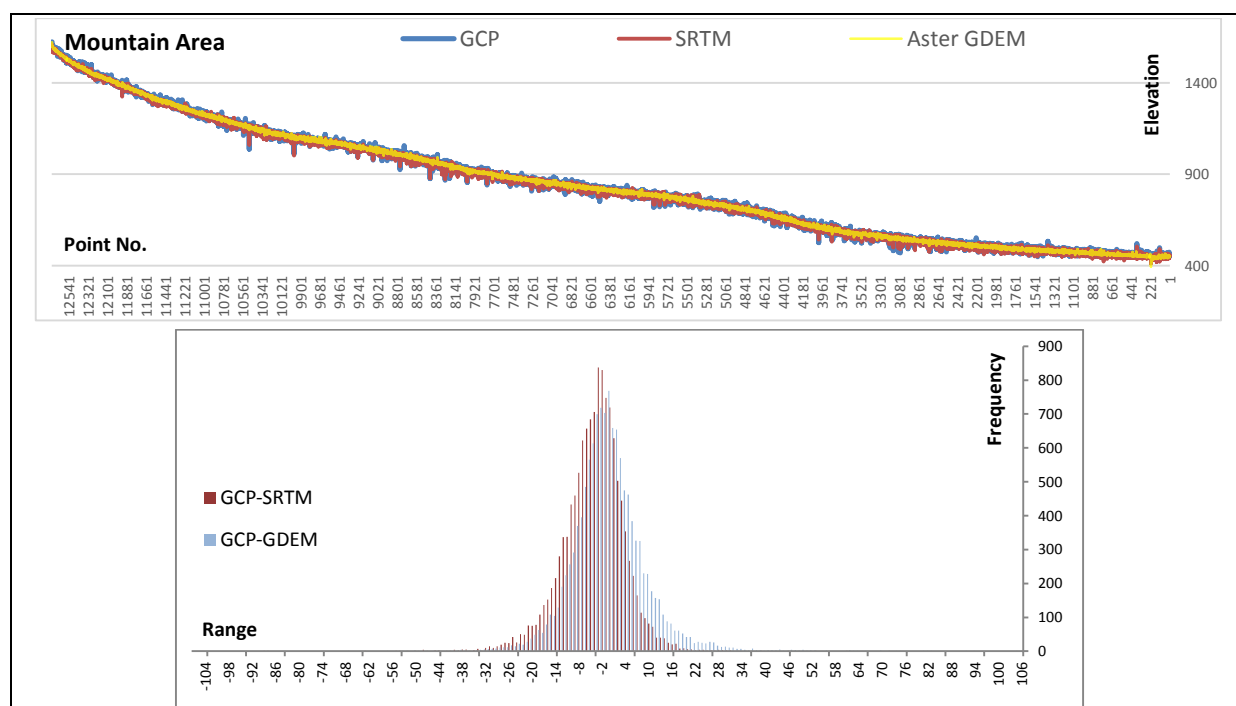
شکل ۵- پراکندگی نقاط رفرنس در مناطق کوهستانی، تپه ماهور و مسطح بر روی GDEM

۷-۲- بررسی روند ارتفاعات و توزیع خطاها

تطابق روند ارتفاعات هر یک از مدل‌های مورد بررسی با روند ارتفاعات زمین طبیعی اولین و مهمترین پارامتری می‌باشد که می‌بایست بررسی شود. برای این منظور از نمودار خطی ترکیبی استفاده شده است. علاوه بر این برای بررسی آماری تفاوت فراوانی و پراکندگی خطاهای دو مدل SRTM و GDEM نسبت به نقاط رفرنس از هیستوگرام فراوانی اختلاف ارتفاع نقاط رفرنس از هر یک از این دو مدل استفاده شد. شکل ۶ این نمودارها را در منطقه کوهستانی نمایش می‌دهد. همانطور که در شکل ۶ دیده می‌شود روند هر دو مدل SRTM و GDEM با روند نقاط رفرنس در منطقه کوهستانی تطابق دارد با این وجود GDEM نسبت به SRTM از نوسانات بسیار کمتری برخوردار می‌باشد که می‌تواند معرف اعمال فیلترهای میانگین‌گیری بر روی این داده‌ها یا مدل‌های درونیابی مورد استفاده در فرآیند تولید باشد.

جدول ۳- تعداد نمونه‌های مورد نیاز بر حسب α و بازه اطمینان

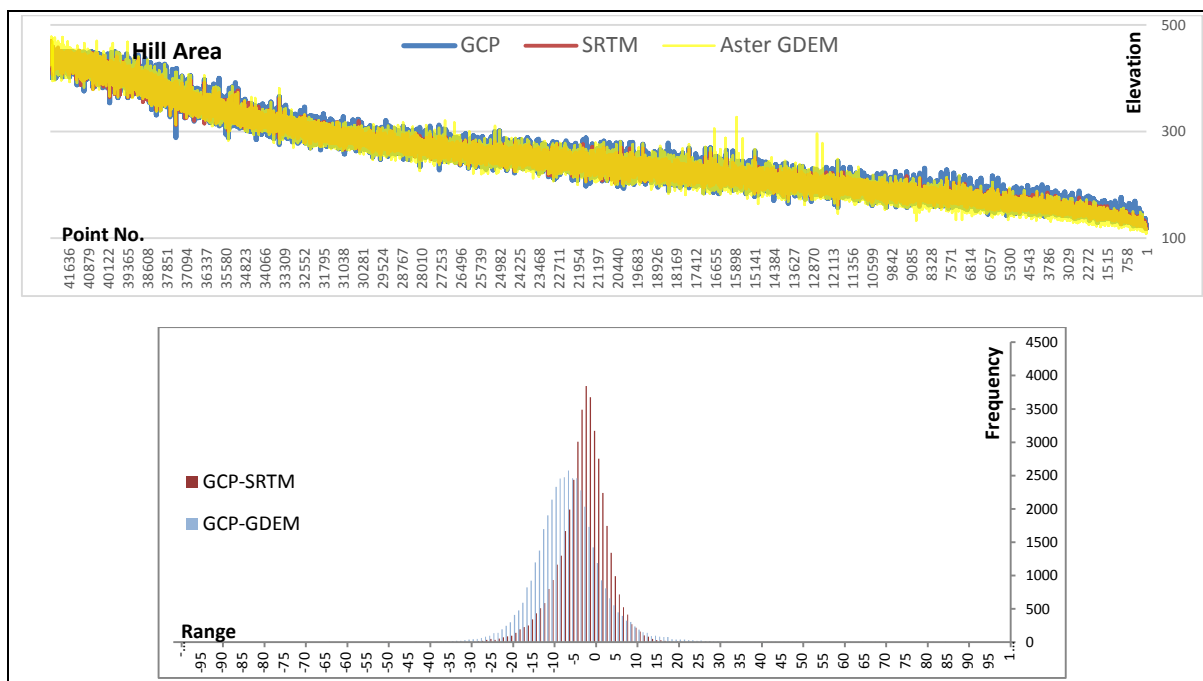
مدل	α	طول محدوده اطمینان (متر)	تعداد نقاط نمونه مورد نیاز
GDEM 2	۰/۰۱	۱	۲۱۱۰
		۲	۵۳۸
		۳	۲۴۷
	۰/۰۵	۱	۱۲۲۴
		۲	۳۱۴
		۳	۱۴۵
	۰/۱	۱	۸۶۳
		۲	۲۲۳
		۳	۱۰۴
SRTM V2	۰/۰۱	۱	۱۴۸۳
		۲	۳۸۲
		۳	۱۷۸
	۰/۰۵	۱	۸۶۱
		۲	۲۲۳
		۳	۱۰۵
	۰/۱	۱	۶۰۸
		۲	۱۵۹
		۳	۷۵



شکل ۶- نمودار مقایسه ارتفاعات حاصل از SRTM و GDEM در نقاط رفرنس (GCP) به همراه هیستوگرام فراوانی اختلاف ارتفاع هر یک از این مدل‌ها نسبت به نقاط رفرنس در منطقه کوهستانی

خطاهای هر دو مدل می‌تواند نشان دهنده وجود خطا در این مدل‌ها باشد. شکل ۷ نمودارهای مربوط به منطقه تپه ماهور را نمایش می‌دهد.

با توجه به هیستوگرام فراوانی نیز می‌توان دید اختلاف نقاط رفرنس نسبت به هر یک از دو مدل از توزیع نسبتاً مشابهی برخوردار است. با این وجود چولگی نمودار فراوانی



شکل ۷- نمودار مقایسه ارتفاعات حاصل از SRTM و GDEM در نقاط رفرنس (GCP) به همراه هیستوگرام فراوانی اختلاف ارتفاع هر یک از این مدل‌ها نسبت به نقاط رفرنس در منطقه تپه ماهور

همانطور که در شکل ۹ دیده می‌شود در مناطق شهری نیز روند مدل‌های SRTM و GDEM مشابه روند حاصل از نقاط مرجع می‌باشد. علاوه بر این نوسانات هر دو مدل در این مناطق تطابق بیشتری با نوسانات حاصل از نقاط مرجع دارند که نشان دهنده دقت بیشتر این مدل‌ها در مناطق شهری می‌باشد. با این وجود با بررسی هیستوگرام فراوانی خطاهای دو مدل می‌توان دریافت، نسبت SRTM پراکنش بیشتری دارد و در نتیجه از دقت کمتری در این مناطق برخوردار می‌باشد.

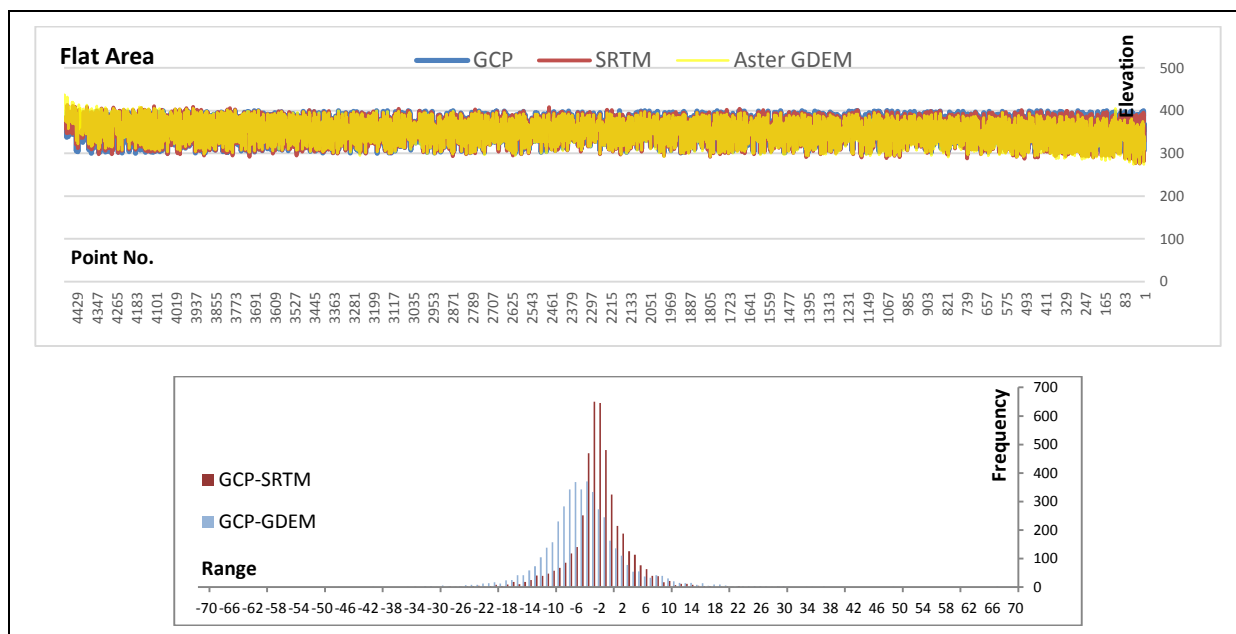
با توجه به نمودارهای ارائه شده، در هیچ یک از مناطق اریب^۱ در هیچ یک از مدل‌ها نسبت به ارتفاعات در نقاط کنترل مشاهده نشد و در همه مناطق روند (تغییرات ارتفاع با فرکانس کم) مشابه دیده می‌شود به بیان دیگر خطای سیستماتیک در مدل‌ها وجود ندارد. ولی تغییرات ارتفاعی با فرکانس زیاد بین مدل‌ها دارای اختلاف می‌باشد.

همانطور که در نمودار خطی شکل ۷ دیده می‌شود هر دو مدل از روند نسبتاً مشابهی با نقاط رفرنس برخوردار می‌باشد ولی بر خلاف مناطق کوهستانی در مناطق تپه ماهور نوسانات GDEM نیز با نوسانات SRTM و نقاط رفرنس مشابه می‌باشد. هیستوگرام فراوانی خطای مدل SRTM نسبت به GDEM از دامنه کمتری برخوردار می‌باشد و نشان می‌دهد که خطای مدل SRTM در مناطق تپه ماهوری نسبت به مدل GDEM از پراکندگی کمتری برخوردار می‌باشد. با این وجود در هیستوگرام خطاهای SRTM مقداری چولگی و انحراف از نرمال مشاهده می‌شود که می‌تواند نشان دهنده وجود خطاهای قابل ملاحظه در این داده‌ها باشد.

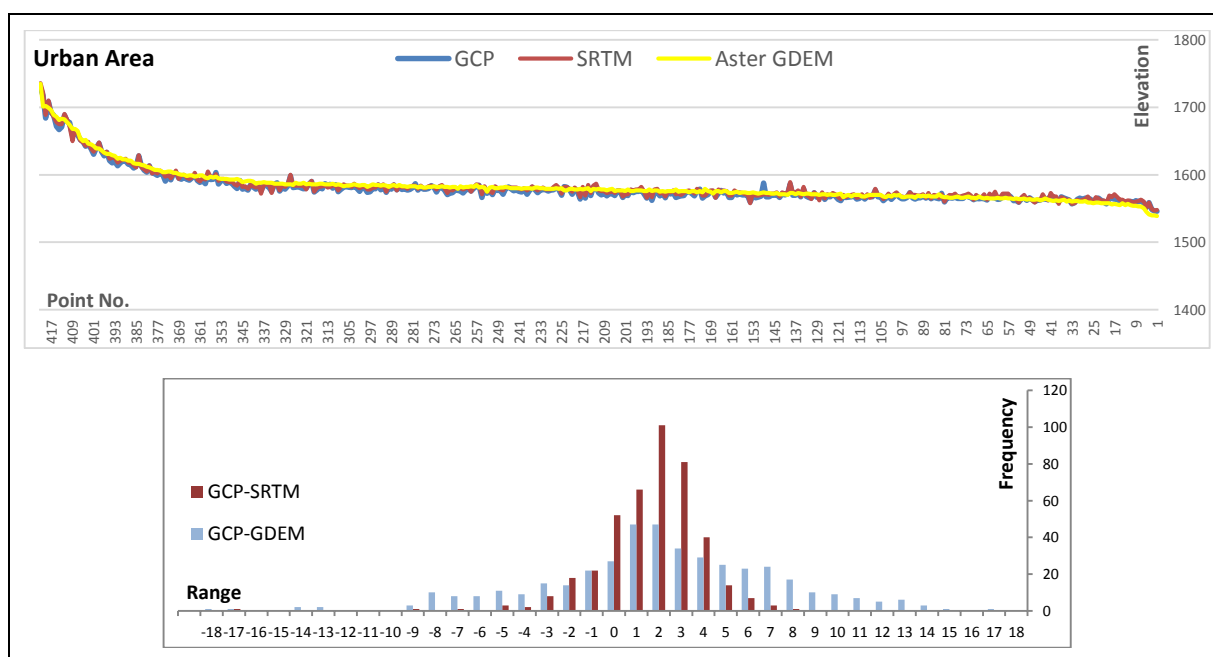
نمودارهای مربوط به مناطق مسطح در شکل ۸ شرایطی مشابه مناطق تپه ماهور را نمایش می‌دهد.

در این نمودارها روند مدل‌های SRTM و GDEM با روند نقاط رفرنس تطابق داشته و هیستوگرام فراوانی خطاهای SRTM پراکندگی کمتری را نسبت به GDEM نمایش می‌دهد. این در حالیست که چولگی و انحراف از استاندارد در هیستوگرام خطاهای SRTM می‌تواند نشان دهنده وجود خطاهای بزرگ در این داده در منطقه تپه ماهور باشد درحالیکه هیستوگرام خطاهای GDEM تطابق قابل قبولی با نمودار نرمال را نشان می‌دهد.

^۱ Bias



شکل ۸- نمودار مقایسه ارتفاعات حاصل از SRTM و GDEM در نقاط رفرنس (GCP) به همراه هیستوگرام فراوانی اختلاف ارتفاع هر یک از این مدل‌ها نسبت به نقاط رفرنس در منطقه مسطح



شکل ۹- نمودار مقایسه ارتفاعات حاصل از SRTM و GDEM در نقاط رفرنس (GCP) به همراه هیستوگرام فراوانی اختلاف ارتفاع هر یک از این مدل‌ها نسبت به نقاط رفرنس در منطقه شهری

۷-۳- بررسی شاخصهای آماری دقت در مورد هر یک از مدل‌ها

با توجه به مطالب عنوان شده در بخش ۵-۲ استفاده از پارامترهای آماری رایج برای مواردی که خطاها دارای توزیع نرمال می‌باشند تخمین قابل قبولی را برای دقت داده‌های مورد بررسی ارائه می‌دهد و چنانچه به دلیل وجود برخی خطاهای بزرگ نمودار توزیع خطاها با نمودار توزیع نرمال

اختلاف داشته باشد می‌بایست از شاخصهای آماری دارای استحکام برای این منظور استفاده کرد. همانطور که در هیستوگرامهای فراوانی ارائه شکل‌های ۶، ۷، ۸ و ۹ دیده می‌شود، تقریباً در همه مناطق مورد بررسی، چولگی و انحراف مختصر نسبت به توزیع نرمال وجود دارد. بر این پایه علاوه بر محاسبه شاخصهای آماری رایج نظیر خطای میانگین، انحراف استاندارد و RMSE در نرم L_2 و شاخصهای آماری با استحکام نظیر میانه و NMAD در نرم L_1 ، برآورد پارامترهای

موقعیت و پراکندگی بر اساس روش Huber نیز محاسبه شده‌اند که نتایج آن در جدول ۴ ارائه شده است. مقایسه شاخصهای ارائه شده در جدول ۴ نشان می‌دهد که علی‌رغم قدرت تفکیک مسطحاتی پایین‌تر، در مورد همه شاخصها، دقت مدل SRTM بهتر از دقت مدل GDEM در همه مناطق می‌باشد. علاوه بر این دقت در مناطق شهری در هر دو مدل به میزان قابل توجهی بهتر از دیگر مناطق می‌باشد و بدترین دقت در مناطق کوهستانی مشاهده می‌شود.

جدول ۴- مقایسه شاخصهای آماری مدل‌های SRTM و GDEM و نقاط رفرنس

		GCP	GDEM	SRTM	GCP-GDEM	GCP-SRTM
شهری	Max	۱۷۲۸/۴۳	۱۷۳۵/۰۰	۱۷۳۶/۰۰	۱۷/۹۷	۱۶/۶۱
	Min	۱۵۴۵/۸۸	۱۵۳۹/۰۰	۱۵۴۷/۰۰	-۱۷/۸۸	-۸/۹۱
	STD	۲۵/۸۴	۲۶/۷۲	۲۵/۹۷	۵/۲۶	۲/۳۲
	ME				-۲/۶۵	-۲/۱۰
	RMSE				۵/۸۹	۳/۱۲
	Median				-۲/۷۶	-۲/۳۷
	NMAD				۴/۵۰	۱/۷۹
	$\hat{\mu}_{Huber}$				-۲/۷۲	-۲/۱۷
	$\hat{\sigma}_{Huber}$				۷/۳۷	۲/۸۸
	درصد نقاط با اختلاف بیش از ۲۰ متر				۰	۰
	درصد نقاط با اختلاف کمتر از ۲۰- متر				۰	۰
	تعداد کل نقاط بررسی شده			۴۲۱		
مسطح	Max	۳۹۹/۹۹	۴۳۷/۰۰	۴۱۳/۰۰	۴۶/۷۹	۳۳/۳۸
	Min	۳۰۰/۰۶	۲۷۴/۰۰	۲۷۶/۰۰	-۷۰/۰۰	-۲۹/۸۷
	STD	۲۵/۷۹	۲۷/۰۱	۲۶/۴۱	۷/۴۶	۴/۹۹
	ME				۳/۸۰	۱/۷۱
	RMSE				۸/۳۷	۵/۲۷
	Median				۴/۲۴	۱/۷۸
	NMAD				۴/۹۵	۲/۹۶
	$\hat{\mu}_{Huber}$				۴/۰۱	۱/۶۶
	$\hat{\sigma}_{Huber}$				۸/۸۱	۶/۱۰
	درصد نقاط با اختلاف بیش از ۲۰ متر				% ۱/۶	% ۰/۴۵
	درصد نقاط با اختلاف کمتر از ۲۰- متر				% ۰/۹۵	% ۰/۱۸
	تعداد کل نقاط بررسی شده			۴۴۸۳		
تپه ماهور	Max	۴۴۹/۹۷	۴۷۸/۰۰	۴۷۰/۰۰	۵۰/۲۱	۶۳/۲۱
	Min	۱۱۷/۹۵	۱۰۸/۰۰	۱۱۷/۰۰	-۹۹/۴۸	-۳۲/۷۶
	STD	۷۸/۹۴	۸۰/۶۷	۷۸/۶۳	۸/۱۵	۵/۹۹
	ME				۵/۳۶	۲/۱۸
	RMSE				۹/۷۵	۶/۳۷
	Median				۵/۶۵	۱/۶۹
	NMAD				۶/۶۶	۴/۸۵
	$\hat{\mu}_{Huber}$				۵/۵۱	۲/۰۸
	$\hat{\sigma}_{Huber}$				۱۰/۵۷	۸/۲۹
	درصد نقاط با اختلاف بیش از ۲۰ متر				% ۲/۸	% ۰/۹۴
	درصد نقاط با اختلاف کمتر از ۲۰- متر				% ۰/۸۰	% ۰/۰۶
	تعداد کل نقاط بررسی شده			۴۲۳۵۵		
کوهستان	Max	۱۶۲۲/۸۴	۱۶۲۲/۰۰	۱۶۱۱/۰۰	۶۶/۲۹	۸۸/۹۳
	Min	۴۵۰/۰۳	۳۹۶/۰۰	۴۱۲/۰۰	-۱۰۵/۷۵	-۷۲/۰۰
	STD	۳۰۴/۳۳	۳۰۵/۴۷	۳۰۴/۵۰	۹/۸۳	۸/۱۱
	ME				-۰/۶۰	۳/۷۴
	RMSE				۹/۸۴	۸/۹۳
	Median				-۰/۰۵	۳/۰۶
	NMAD				۷/۳۴	۶/۶۳
	$\hat{\mu}_{Huber}$				-۰/۳۷	۳/۶۳
	$\hat{\sigma}_{Huber}$				۱۲/۰۶	۱۰/۵۶
	درصد نقاط با اختلاف بیش از ۲۰ متر				% ۱/۴۹	% ۳/۲
	درصد نقاط با اختلاف کمتر از ۲۰- متر				% ۳/۰۸	% ۰/۳۶
	تعداد کل نقاط بررسی شده			۱۲۷۳۵		

طول محدوده اطمینان برای برآورد RMSE در مورد SRTM و GDEM در منطقه شهری به ترتیب ۰/۴۷ و ۰/۴۱ می‌باشد. این مقادیر در مناطق مسطح ۰/۲۱ و ۰/۶۷ در مناطق تپه ماهور ۰/۰۶ و ۰/۶۸ و در مناطق کوهستانی ۰/۲۸ و ۰/۶۱ می‌باشند. این مقادیر معرف دقت RMSE های برآورد شده در هر یک مناطق می‌باشد. از آنجایی که مقادیر RMSE های محاسبه شده در جدول ۴ همگی بالای ۱ متر بوده و طول بازه‌های ارائه شده در جدول ۵ همگی زیر ۱ متر می‌باشند نشان دهنده مناسب بودن دقت تست انجام شده و کفایت تعداد نقاط انتخاب شده می‌باشد.

۷-۴- بررسی انتشار خطاها به نقشه شیب و جهت شیب

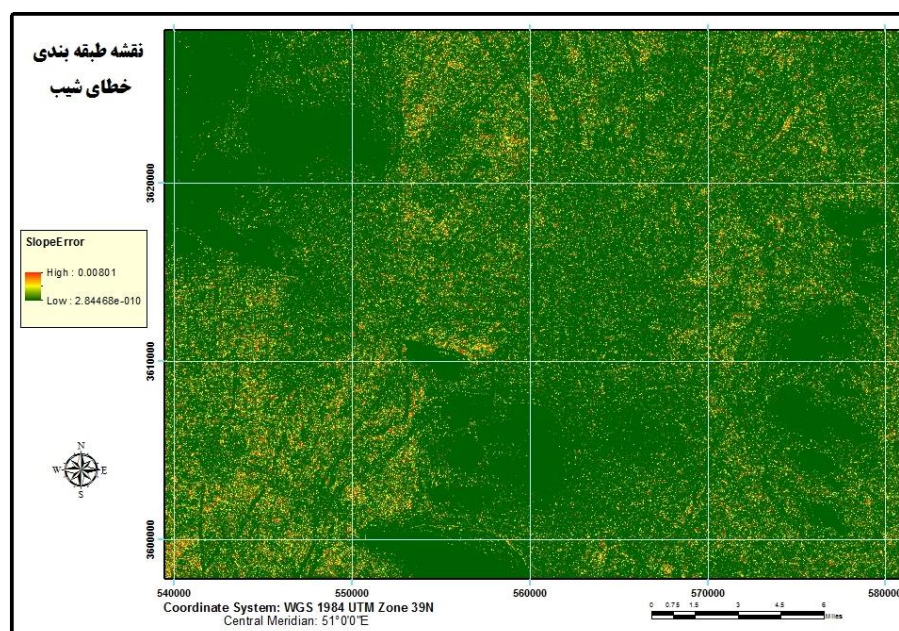
همانطور که در بخش ۵ آورده شد، خطای DEM از طریق روابط ۲۷ و ۳۰ در نقشه‌های شیب و جهت شیب تاثیر می‌گذارد. شکل ۱۰ نحوه انتشار خطا در نقشه شیب حاصل از GDEM را برای منطقه شهری نمایش می‌دهد. مقدار δ_z^2 در رابطه ۲۷ برای GDEM در منطقه شهری از جدول ۴ برابر ۵/۸۹ متر جایگذاری شده است.

علاوه بر پارامترهای آماری ذکر شده محدوده اطمینان مربوطه به RMSE برآورد شده برای هر یک از مدل‌ها در هر منطقه طبق رابطه ۱۴ محاسبه شده است. این محدوده اطمینان برای چهار منطقه مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۹٪ در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵- محدوده اطمینان (C.I.) برای RMSE برآورد شده مدل‌ها در هر منطقه در سطح اطمینان ۹۹٪

	C.I. (RMSE _{GDEM})	C.I. (RMSE _{SRTM})
شهری	[۵/۶۵ ۶/۰۶]	[۲/۸۵ ۳/۳۲]
مسطح	[۸/۰۲ ۸/۶۹]	[۵/۱۵ ۵/۴۰]
تپه ماهور	[۹/۴۰ ۱۰/۰۸]	[۶/۳۴ ۶/۴۰]
کوهستان	[۹/۵۴ ۱۰/۱۵]	[۸/۷۷ ۹/۰۵]

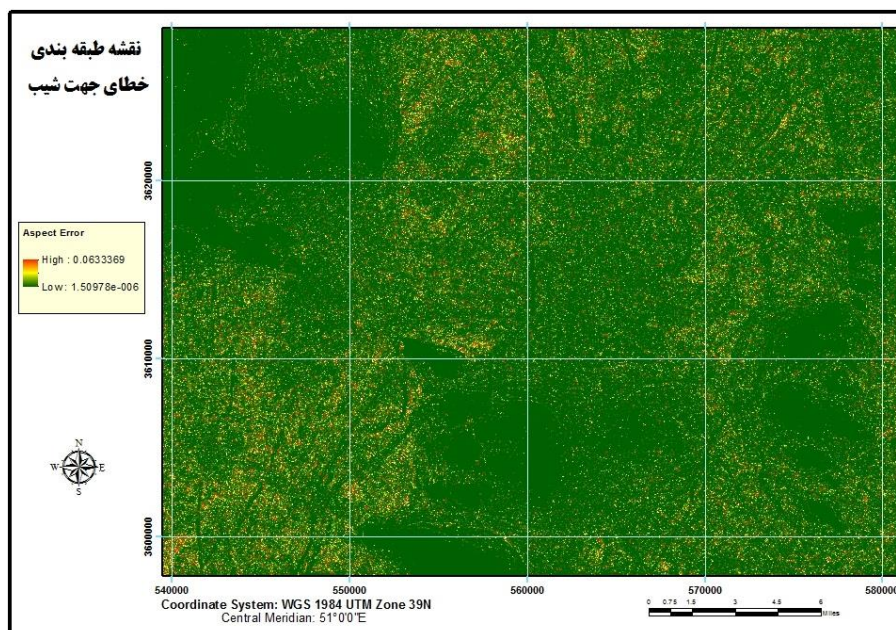
این سطح اطمینان بدین معناست که چنانچه به تعداد زیاد مجموعه نقاط کنترل انتخاب شود و برای هر مجموعه نقاط RMSE برآورد گردد به احتمال ۹۹٪، RMSE های برآورد شده برای هر مجموعه داده در هر منطقه، در بازه ارائه شده قرار خواهند گرفت. بر این اساس طول بازه‌های اطمینان محاسبه شده می‌تواند شاخصی برای دقت تست انجام شده باشد. همانطور که در این جدول دیده می‌شود



شکل ۱۰- نقشه طبقه‌بندی مجذور خطای شیب حاصل از GDEM در منطقه شهری

کمتر اتفاق می‌افتد. این مناطق در شکل ۱۰ با لکه‌های قرمز و زرد رنگ نمایش داده شده‌اند. به همین ترتیب شکل ۱۱ نیز نمایش دهنده نحوه پراکنش خطا در نقشه جهت شیب حاصل از GDEM در منطقه شهری را نمایش می‌دهد.

همانطور که در این شکل دیده می‌شود حداقل و حداکثر مجذور خطای شیب برای این منطقه به ترتیب $10^{-10} \times 2/8$ و $0/08$ رادیان می‌باشد. بیشترین خطا همانطور که از تفسیر رابطه ۲۷ نیز انتظار داشتیم در مناطق با شیب



شکل ۱۱- نقشه طبقه‌بندی مجذور خطای جهت شیب حاصل از GDEM در منطقه شهری

همانطور که در شکل ۱۱ دیده می‌شود خطای جهت شیب نیز در مناطق با شیب زیاد کمتر می‌باشد. حداقل و حداکثر مجذور خطای جهت شیب برابر $10^{-6} \times 1/5$ و 0.063 رادیان می‌باشد.

۸- نتیجه‌گیری

رشد روز افزون استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی آزاد در تحلیل‌ها و تصمیم‌گیری‌های مختلف، بررسی خطاهای موجود در این مدل‌ها و تاثیر و انتشار آنها بر محصولات خروجی حاصل از این مدل‌ها را بسیار ضروری نموده است. در این مقاله با بررسی خطای مدل‌های GDEM و SRTM در چهار ناحیه شهری، مسطح، تپه ماهور و کوهستانی، تاثیر تغییرات توپوگرافی بر خطای این مدل‌ها بررسی شد. برای این منظور از شاخصهای آماری مختلف در نرم‌های L_1 ، L_2 و نیز روش Huber استفاده شد. شاخصهای مورد استفاده در نرم L_1 و نیز روش Huber، شاخصهای آماری با استحکام بوده و با توجه به اینکه در برابر وجود خطاهای بزرگ حساسیت کمتری دارند در کنار شاخصهای رایج در نرم L_2 امکان مقایسه و تحلیل دقیق خطاهای موجود در این مدل‌ها را فراهم کرده‌اند. علاوه بر این، در این مقاله روشی برای تعیین تعداد نقاط مرجع مورد نیاز، بر اساس تعریف یک ناحیه اطمینان برای RMSE، ارائه شد که دقت و کفایت تست‌های انجام شده

را در سطح ۹۹٪ اثبات می‌کند. از دیگر نوآوریهای ارائه شده در این مقاله بررسی انتشار خطاهای موجود در این مدل‌ها بر محصولات رایج حاصل از آنها یعنی شیب و جهت شیب می‌باشد. نتایج حاصل نشان داد در همه مناطق مورد بررسی دقت SRTM از دقت GDEM بهتر بود. علاوه بر این برای هر دو مدل دقت در مناطق شهری بهتر از سایر مناطق بدست آمد. نتایج حاصل از بررسی انتشار خطاها نیز نشان داد خطا در نقشه‌های شیب و جهت شیب با افزایش شیب رابطه مستقیم دارد بگونه‌ای که در حداکثر خطا در مناطق با شیب بیشتر دیده می‌شود.

سپاسگزاری

بر خود لازم می‌دانیم از شهرداری اصفهان بدلیل در اختیار قرار دادن نقاط شبکه ارتفاعی شهر اصفهان و نیز از مدیریت اکتشاف شرکت نفت بدلیل ارائه نقاط شبکه ارتفاعی در مناطق کوهستانی، تپه ماهور و مسطح در غرب کشور تشکر و قدردانی نماییم. علاوه بر این از دکتر علیرضا امیری سیمکویی به دلیل ارائه نقطه نظرات ارزشمند در این تحقیق صمیمانه قدردانی می‌گردد.

- [1] El-Sheimy, N., Valeo, C. and Habib, A. (2005), "Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation, and Application." Artech House. Massachusetts.
- [2] Hirt, C., Filmer, M. and Featherstone, W. (2010), "Comparison and Validation of the Recent Freely Available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4. 1 and GEODATA DEM-9S ver3 Digital Elevation Models over Australia." Australian Journal of Earth Sciences. vol. 57, pp. 337-347.
- [3] Chappell, N.A., Vongtanaboon, S., Jiang, Y. and Tangtham, N. (2006), "Return-Flow Prediction and Buffer Designation in Two Rainforest Headwaters." Forest ecology and management. vol. 224, pp. 131-146.
- [4] Dragut, L. and Eisank, C. (2011), "Object Representations at Multiple Scales From Digital Elevation Models." Geomorphology. vol. 129, pp. 183-189.
- [5] Frey, H. and Paul, F. (2012), "On the Suitability of the SRTM DEM and ASTER GDEM for the Compilation of Topographic Parameters in Glacier Inventories." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. vol. 18, pp. ۴۸۰-۴۹۰.
- [6] Ramlal, B. and Baban, S.M. (2008), "Developing a GIS Based Integrated Approach to Flood Management in Trinidad, West Indies." Journal of environmental management. vol. 88, pp. 1131-1140.
- [7] Romanowicz, R.J., Young, P.C., Beven, K.J. and Pappenberger, F. (2008), "A Data Based Mechanistic Approach to Nonlinear Flood Routing and Adaptive Flood Level Forecasting." Advances in Water Resources. vol. 31, pp. 1048-1056.
- [8] Zhu, L. and Jekeli, C. (2009), "Gravity Gradient Modeling Using Gravity and DEM." Journal of Geodesy. vol. 83, pp. 557-567.
- [9] Höhle, J. and Höhle, M. (2009), "Accuracy Assessment of Digital Elevation Models by Means of Robust Statistical Methods." ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. vol. 64, pp. 398-406.
- [10] Czubski, K. (2013), "Accuracy of SRTM-X and ASTER Elevation Data and its Influence on Topographical and Hydrological Modeling: Case Study of the Pieniny Mts. in Poland." International Journal of Geoinformatics. vol. 9, pp. 7-14.
- [11] Darnell, A.R., Tate, N.J. and Brunsdon, C. (2008), "Improving User Assessment of Error Implications in Digital Elevation Models." Computers, Environment and Urban Systems. vol. 32, pp. 268-277.
- [12] Du, X., Guo, H., Fan, X., Zhu, J., Yan, Z. and Zhan, Q. (2015), "Vertical Accuracy Assessment of Freely Available Digital Elevation Models Over Low-Lying Coastal Plains." International Journal of Digital Earth. pp. 1-20.
- [13] Eckert, S., Kellenberger, T. and Itten, K. (2005), "Accuracy Assessment of Automatically Derived Digital Elevation Models from Aster Data in Mountainous Terrain." International Journal of Remote Sensing. vol. 26, pp. 1943-1957.
- [14] Hladik, C. and Alber, M. (2012), "Accuracy Assessment and Correction of a LIDAR-Derived Salt Marsh Digital Elevation Model." Remote Sensing of Environment. vol. 121, pp. 224-235.
- [15] Holmes, K., Chadwick, O. and Kyriakidis, P.C. (2000), "Error in a USGS 30-Meter Digital Elevation Model and Its Impact on Terrain Modeling." Journal of Hydrology. vol. 233, pp. 154-173.
- [16] Mispan, M.R., Rasid, M.Z.A., Rahman, N.F.A., Khalid, K., Haron, S.H. and Ahmad, N. (2015), "Assessment of ASTER and SRTM Derived Digital Elevation Model for Highland Areas of Peninsular Malaysia Region." International Research Journal of Engineering and Technology. vol. 02, pp. 316-320.
- [17] Mukherjee, S., Joshi, P., Mukherjee, S., Ghosh, A., Garg, R. and Mukhopadhyay, A. (2013), "Evaluation of Vertical Accuracy of Open Source Digital Elevation Model (DEM)." International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. vol. 21, pp. 205-217.
- [18] Rexer, M. and Hirt, C. (2014), "Comparison of Free High Resolution Digital Elevation Data Sets (ASTER GDEM2, SRTM v2. 1/v4. 1) and Validation against Accurate Heights from the Australian National Gravity Database." Australian Journal of Earth Sciences. vol. 61, pp. 213-226.
- [19] Rodriguez, E., Morris, C.S. and Belz, J.E. (2006), "A Global Assessment of the SRTM Performance." Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. vol. 72, pp. 249-260.
- [20] Zhao, S., Cheng, W., Zhou, C., Chen, X., Zhang, S., Zhou, Z., et al. (2011), "Accuracy Assessment of the ASTER GDEM and SRTM3 DEM: An Example in the Loess Plateau and North China Plain of China." International Journal of Remote Sensing. vol. 32, pp. 8081-80.۹۳
- [21] Huber, P.J. (2011), "Robust Statistics." Springer. Berlin Heidelberg.

- [22] Wilcox, R. (2012), "Introduction to Robust Estimation and Hypothesis Testing (Third Edition)." Academic Press. Boston.
- [23] Wang, B., Shi, W. and Liu, E. (2015), "Robust Methods for Assessing the Accuracy of Linear Interpolated DEM." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. vol. 34, pp. 198-206.
- [24] Wolock, D.M. and Price, C.V. (1994), "Effects of Digital Elevation Model Map Scale and Data Resolution." *Water Resources Research*. vol. 30, pp. 3041-3052.
- [25] Cai, X. and Wang, D. (2006), "Spatial Autocorrelation of Topographic Index in Catchments." *Journal of Hydrology*. vol. 328, pp. 581-591.
- [26] Kiamehr, R. and Sjöberg, L. (2005), "Effect of the SRTM Global DEM on the Determination of a High-Resolution Geoid Model: A Case Study in Iran." *Journal of Geodesy*. vol. 79, pp. 540-551.
- [27] Merry, C. (2003), "DEM-Induced Errors in Developing a Quasi-Geoid Model for Africa." *Journal of Geodesy*. vol. 77, pp. 537-542.
- [28] Xiao, L.-L. and Liu, H.-B. (2012), "A Novel Approach for Quantitative Assessment of DEM Accuracy Using Reconstructed Contours." *Procedia Environmental Sciences*. vol. 12, pp. 772-776.
- [29] Szabó, G., Singh, S.K. and Szabó, S" (۲۰۱۰). Slope Angle and Aspect as Influencing Factors on the Accuracy of the SRTM and the ASTER GDEM Databases." *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. vol. 83-84, pp. 137-145.
- [30] Shi, W., Wang, B. and Tian, Y. (2014), "Accuracy Analysis of Digital Elevation Model Relating to Spatial Resolution and Terrain Slope by Bilinear Interpolation." *Mathematical Geosciences*. vol. 46, pp. 445-481.
- [31] Li, Z., Zhu, C. and Gold, C. (2004), "Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology." CRC press. Florida.
- [32] Montgomery, D.C. and Runger, G.C. (2010), "Applied Statistics and Probability for Engineers." John Wiley & Sons. New York.
- [33] Zandbergen, P.A. (2008), "Positional Accuracy of Spatial Data: Non-Normal Distributions and a Critique of the National Standard for Spatial Data Accuracy." *Transactions in GIS*. vol. 12, pp. 103-130.
- [34] Amiri-Simkooei, A. (2003), "Formulation of L 1 Norm Minimization in Gauss-Markov Models." *Journal of Surveying Engineering*. vol. 129, pp. 37-43.
- [35] Rudin, W. (1964), "Principles of Mathematical Analysis." McGraw-Hill. New York.
- [36] DeMers, M.N. (2002), "GIS Modeling in Raster." Wiley. New York.