

ارزیابی جامع دقت مدل رقومی ارتفاعی GDEM V2

فاطمه علیدوست^{۱*}، فرزانه دادرس جوان^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد فتوگرامتری - گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
falidoost@ut.ac.ir

^۲ دانشجوی دکتری فتوگرامتری - گروه مهندسی نقشه برداری - پردیس دانشکده های فنی - دانشگاه تهران
fdadrasjavan@ut.ac.ir

(تاریخ دریافت فرودین ۱۳۹۲، تاریخ تصویب آذر ۱۳۹۲)

چکیده

مدل های رقومی ارتفاعی، یکی از مهمترین داده های مکانی در کاربردهای مختلف از قبیل مطالعات هیدرولوژیکی، نقشه برداری توپوگرافی، تصحیح هندسی تصاویر، استخراج پارامترهای سطح زمین، مدیریت بلایای طبیعی و غیره هستند. مدل های رقومی ارتفاعی می توانند از طریق روش های مختلف و با دقت های ارتفاعی متفاوت به دست آیند. در روش های فتوگرامتری، این داده ها از زوج تصاویر ماهواره ای طی پردازش های زیادی حاصل می شوند. نسخه دوم مدل رقومی ارتفاعی جهانی به نام GDEM V2 مبتنی بر تصاویر ماهواره ای ASTER با قدرت تفکیک مکانی یک ثانیه کمانی است. تا کنون تحقیقات متعددی در کشورهای مختلف به منظور ارزیابی کیفی و تعیین پارامترهای دقت این مدل در مقایسه با سایر مدل های رقومی ارتفاعی مرجع و یا نقاط کنترل زمینی انجام پذیرفته است. در این مقاله، نتایج حاصل از ارزیابی دقت GDEM V2 با مدل رقومی ارتفاعی SRTM و یک مدل رقومی ارتفاعی محلی مربوط به منطقه ای در جنوب غربی ایران ارائه گردیده است. پارامترهای دقت برای ارزیابی اختلاف ارتفاع بین هر دو مدل رقومی ارتفاعی، بر اساس شاخص های متداول (میانگین خطا، جذر میانگین مربعات خطا، انحراف استاندارد) و شاخص های پایدار (میان، انحراف مطلق نرمال شده ی میانه (NMAD)، چندک های نمونه) محاسبه می شوند. نتایج حاصل شده، وجود یک بایاس ارتفاعی منفی در حدود ۴/۵- متر و ۲/۸- متر را در مدل GDEM V2 به ترتیب نسبت به دو مدل SRTM و مدل محلی نشان می دهند. علاوه براین میانه خطای GDEM V2 نسبت به مدل محلی برابر ۳/۷- متر است که از میانه ی خطای این مدل نسبت به SRTM کمتر است (۶- متر). جذر میانگین مربعات خطای اختلاف ارتفاعات در GDEM V2 نسبت به دو مدل SRTM و مدل محلی با هم برابر و حدود ۸/۳ متر است با این حال انحراف معیار خطای بین دو مدل GDEM V2 و مدل محلی کمی بیشتر از GDEM V2 و SRTM است. برای مقایسه ی بهتر دقت داده ها، از فاکتور NMAD استفاده می شود که مقدار آن برای مدل GDEM V2 نسبت به دو مدل محلی و SRTM به ترتیب ۵/۵ و ۵/۹ متر است. همچنین حدود ۶۸٪ خطاهای مدل GDEM V2 در مقابل مدل محلی در بازه ی ۰ تا ۷/۵ متر قرار دارد این در حالی است که این بازه برای اختلاف ارتفاع دو مدل GDEM V2 و SRTM برابر ۰ تا ۹ متر است.

واژگان کلیدی: ASTER GDEM V2، مدل رقومی ارتفاعی، دقت مطلق ارتفاعی، ASTER، قدرت تفکیک.

* نویسنده رابط

۱- مقدمه

بهبود داده شده است که مناطق وسیعی از جهان را پوشش می‌دهد. در این نسخه، برای بهبود دقت‌های ارتفاعی و مسطحاتی از الگوریتم‌های پردازشی اصلاح شده و منابع ارتفاعی مختلفی استفاده شده است [۳،۱]. با این وجود، به منظور داشتن یک منبع مناسب برای اطلاعات توپوگرافی کلی در کاربردهای مختلف علمی، ارزیابی کیفیت و دقت GDEM V2 اهمیت می‌یابد.

۲- مدل رقومی جهانی ASTER GDEM2

یک دست آورد مهم از همکاری بین سازمان ناسا^۲ و وزارت صنعت و تجارت ژاپن^۳، نصب سنجنده‌ی زمین نگر بر روی ماهواره‌ی TERRA بود. این ماهواره در سال ۱۹۹۹ پرتاب شد و به مدت ۹ سال فعالیت داشت. داده‌های ماهواره‌ی ASTER^۴ توسط سنجنده‌ی نصب شده بر روی ماهواره‌ی TERRA به صورت تصاویر استریو در جهت پرواز و تصاویر مادون قرمز در دید عقب جمع‌آوری شده‌اند. از تصاویر ASTER برای شناسایی عوارض سطح زمین مانند پوشش گیاهی، عوارض زمین شناسی، بررسی دمای سطح زمین و غیره استفاده می‌شود. از سال ۲۰۰۰، جفت تصاویر استریو حاصل از این ماهواره، برای تولید یک مدل ارتفاعی رقومی یکپارچه (۶۰ × ۶۰ کیلومتر) استفاده شدند که دقت ارتفاعی آن (ریشه میانگین مربع خطا) به طور کلی بین ۱۰ الی ۲۵ متر است.

در ۲۹ ژوئن سال ۲۰۰۹، دو سازمان مذکور، یک مدل رقومی ارتفاعی جهانی به نام GDEM^۵ برای کاربردهای جهانی توسعه دادند. نسخه‌ی اول این مدل به نام GDEM V1 از حدود ۱/۲ میلیون تصاویر ماهواره‌ی ASTER به وجود آمد که ناحیه‌ی وسیعی از عرض جغرافیایی ۸۳ درجه شمالی تا ۸۳ درجه جنوبی را پوشش می‌داد. ابعاد هر فریم این مدل یک درجه در یک درجه است. ارزیابی دقت GDEM V1 توسط یک تیم ژاپنی

امروزه، مدل‌های رقومی ارتفاعی به عنوان یکی از مهمترین منابع فراهم کننده‌ی اطلاعات ارتفاعی از سطح زمین هستند و به طور گسترده در کاربردهای نقشه‌برداری، سنجش از دور، مهندسی عمران، مهندسی معدن، زمین شناسی، ژئومورفولوژی، نظامی و دفاعی، برنامه ریزی و آمایش سرزمین و ارتباطات مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶،۵]. بنا به تعریف، مدل رقومی ارتفاعی، داده‌ای مکانی است که در آن مقادیر ارتفاعی در موقعیت‌های جغرافیایی مشخص قرار گرفته‌اند. بنابراین، برای تولید یک مدل رقومی ارتفاعی ابتدا باید موقعیت X,Y,Z نقاط نمونه که تعیین کننده شکل و دقت مدل است، جمع آوری شود. معمولاً نقاط به صورت شبکه نقاط منظم یا نامنظم برداشت می‌شوند. پس از تعیین موقعیت نقاط نمونه، سطحی ناپیوسته از سطح پیوسته زمین بدست می‌آید که باید دوباره به یک سطح پیوسته تبدیل شود. برای این کار باید برای مدل، یک ساختار تعریف شود و در نهایت برای تکمیل مدل بوسیله درونیابی، ارتفاع در نقاط برداشت نشده بین نقاط نمونه تخمین زده شود [۷،۸].

تاکنون انواع مختلفی از مدل‌های رقومی ارتفاعی با روش‌های متنوعی از جمله فتوگرامتری رقومی، لیزر اسکنرها و فناوری رادار با دقت‌ها و کیفیت‌های متفاوت حاصل شده‌اند. یکی از مدل‌های رقومی ارتفاعی که به طور گسترده در جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد، مدل رقومی ارتفاعی حاصل از ماموریت شاتل توپوگرافی راداری^۱ موسوم به SRTM است. این ماموریت یک مدل رقومی ارتفاعی جهانی برای عرض‌های جغرافیایی کمتر از ۶۰ درجه شمالی توسط اینترفرومتری راداری [۶، ۱۴، ۱۵] با قدرت تفکیک مکانی ۳ ثانیه کمانی (تقریباً ۹۰ متر) برای ۸۰ درصد مناطق زمین تولید می‌کند [۱۶]. قدرت تفکیک مکانی SRTM برای مناطق ایالات متحده ۱ ثانیه کمانی (تقریباً ۳۰ متر) است.

یکی از جدیدترین مدل‌های رقومی ارتفاعی، نسخه دوم مدل رقومی ارتفاعی جهانی به نام ASTER GDEM است که در ۱۷ اکتبر سال ۲۰۱۱ به دنیا معرفی شد. این مدل بر مبنای تصاویر ماهواره‌ی ASTER با دقت‌های

^۲ National Aeronautics and Space Administration (NASA)

^۳ Ministry of Economy, Trade and Industry (METI)

^۴ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)

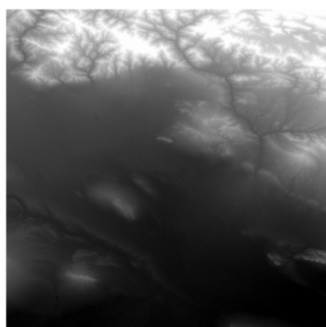
^۵ Global Digital Elevation Model (GDEM)

^۱ Shuttle Radar Topography Mission

مدل، ناحیه وسیعی از عرض جغرافیایی ۸۳ درجه شمالی تا ۸۳ درجه جنوبی را پوشش می‌دهد که معادل ۲۲۷۰۲ فریم به ابعاد $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ است. حداقل پوشش این فریم‌ها با هم ۰/۰۱ درصد است. فرمت داده نهایی مدل رقومی ارتفاعی GDEM V2 به صورت GeoTIFF و در مختصات جغرافیایی (طول و عرض جغرافیایی) است. خصوصیات کلی مدل رقومی ارتفاعی GDEM2 در جدول (۲) آمده است [۴].

جدول ۲- خصوصیات مدل رقومی ارتفاعی جهانی	
اندازه فریم	۳۶۰۱×۳۶۰۱ پیکسل ($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)
ابعاد پیکسل	۱ ثانیه کمانی (تقریباً ۳۰ متر در استوا)
سیستم مختصات جغرافیایی	طول و عرض جغرافیایی
فرمت داده خروجی	GeoTIFF ۱۶ بیتی، در بیضوی WGS84
مقادیر درجه خاکستری خاص	۹۹۹۹- برای پیکسل خالی، ۰ برای مناطق آبی
پوشش	از عرض جغرافیایی ۸۳ درجه شمالی تا ۸۳ درجه جنوبی، ۲۲۷۰۲ فریم

واحد پایه مدل رقومی ارتفاعی GDEM2 فریم‌های $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ است. هر کدام از این فریم‌ها شامل ۳ فایل است که عبارتند از: فایل DEM اصلی با فرمت dem، فایل ارزیابی کیفی با فرمت num، فایل راهنما با فرمت pdf. هر دو فایل اول دارای ابعاد برابر ۳۶۰۱ در ۳۶۰۱ و متناظر با فریم $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ است. در شکل (۱) و (۲) این دو داده نمونه مشاهده می‌شود.



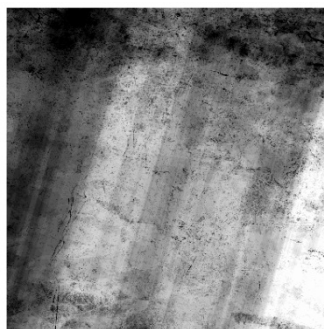
شکل ۱- نمونه‌ای از مدل رقومی ارتفاعی GDEM V2

بررسی شد و دقت کلی آن در حدود ۲۰ متر در سطح اطمینان ۹۵ درصد به دست آمد. همچنین بر اساس ارزیابی‌ها معلوم شد که این مدل دارای خطاهایی به علت پوشش کم تصاویر استریو در عرض‌های جغرافیایی بالا، پوشش ابر، وجود آب و پروسه‌ی موزاییک کردن برای رسیدن به یک مدل یکپارچه است. علاوه بر این، دو مطالعه‌ی مستقل بر روی دقت مسطحاتی این مدل انجام شد که نشان داد قدرت تفکیک مکانی موثر در GDEM V1 در حدود ۱۲۰ متر است [۱،۳].

نسخه‌ی دوم GDEM توسط دو سازمان NASA و METI در سال ۲۰۱۱ توسعه داده شد. به منظور بهبود این مدل حدود ۲۶۰۰۰۰ تصویر استریو اضافی برای جبران فقدان پوشش استفاده شد. همچنین از کرنل‌های شباهت کوچکتری که قدرت تفکیک مکانی بالاتری را ایجاد می‌کرد (استفاده از کرنل‌های 5×5 به جای 9×9) و ماسک‌های اصلاح شده برای نواحی آبی استفاده شد. علاوه بر این یک بایاس کلی ۵ متری در GDEM V1 وجود داشت که در نسخه‌ی جدید کاملاً حذف شد [۱،۳]. اختلاف بین دو مدل GDEM1 و GDEM2 در جدول (۱) آمده است:

جدول ۱- فاکتورهای کلیدی مدل GDEM2 در مقایسه با نسخه اول		
فاکتورهای پردازشی کلیدی	نسخه اول	نسخه دوم
تعداد سین‌های DEM ورودی	۱۲۶۴۱۱۸	۱۵۱۴۳۵۰
بازه‌های نمونه برداری	۱ ثانیه کمانی	۱ ثانیه کمانی
سایز کرنل شباهت	۹ پیکسل	۵ پیکسل
حداقل ابعاد ناحیه آبی پردازش‌های مربوط به مناطق آبی	۱۲ کیلومتر مربع	۱ کیلومتر مربع
مقدار حد آستانه فیلترینگ	انجام نشده	انجام شده
میزان جابجایی	۴۰ متر	۴۰ متر
تاریخ ایجاد داده	۲۹ ژوئن ۲۰۰۹	نیمه اکتبر ۲۰۱۱

مدل رقومی ارتفاعی ASTER GDEM V2 یک مدل با دقت بالا و قابلیت دسترسی آسان است که کل نواحی زمین را پوشش می‌دهد و متناسب با ابعاد و اهداف کاربران، به طور رایگان در اختیار آنها قرار می‌گیرد. این



شکل ۲- نمونه‌ای از فایل ارزیابی کیفی GDEM V2

سمت غرب و ۰/۲۰ ثانیه کمانی به سمت جنوب گزارش داده شده است که در مقایسه با خطای موقعیتی در نسخه‌ی اول (حدود ۰/۸۲ ثانیه کمانی به سمت غرب و ۰/۴۷ ثانیه کمانی به سمت جنوب) بهبود قابل توجهی داشته است. همچنین مقدار بایاس ارتفاعی ۱- متر (مقدار ۶- متر در نسخه‌ی اول) و انحراف استاندارد ۱۲/۶ متر (مقدار ۱۴/۸ متر در نسخه اول) برای مدل GDEM V2 به دست آمده است. قدرت تفکیک مکانی در GDEM V2 ۲/۴ ثانیه کمانی و در نسخه‌ی اول ۳/۸ ثانیه کمانی تخمین زده شده است. به طور کلی نتایج حاصل از این مطالعات، بهبود زیاد دقت ارتفاعی و قدرت تفکیک مسطحاتی را در GDEM V2 تأیید می‌کنند [۱۳].

در سال ۲۰۱۱، یک گزارش ارزیابی GDEM V2 توسط تیم تحقیقات ژاپن ارائه شد [۱۱]. در این گزارش فنی، شیفت مسطحاتی و دقت ارتفاعی، قدرت تفکیک مسطحاتی، نواحی خالی، وجود artifact ها و منابع تولید آنها مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی شیفت مسطحاتی از یک مدل رقومی ارتفاعی محلی با قدرت تفکیک مکانی ۱۰ متر استفاده شد. بر اساس نتایج حاصل از محاسبات مربوط به شیفت مسطحاتی، مقدار میانگین خطا حدود ۰/۱۳ ثانیه کمانی به سمت غرب و ۰/۱۹ ثانیه کمانی به سمت جنوب و انحراف استاندارد حدود ۰/۲۱ ثانیه کمانی در جهت شرق به غرب و ۰/۱۴ ثانیه کمانی در جهت شمال به جنوب بوده است. همچنین، میانگین خطای ارتفاعی ۷/۴ متر و انحراف معیار ۱۲/۷ متر گزارش داده شد. وجود artifact ها به علت وجود مناطق آبی و همچنین کمبود تصاویر استریو در نسخه‌ی دوم GDEM به مراتب کمتر از نسخه‌ی اول است که نشان‌دهنده‌ی موفقیت الگوریتم‌های جدید تشخیص مناطق آبی و همچنین موثر بودن افزایش تصاویر برای جبران فقدان پوشش در GDEM V2 می‌باشد [۱۱].

در سال ۲۰۱۱، ارزیابی دیگری بر روی GDEM V2 توسط تیم تحقیقاتی امریکایی- ژاپنی ASTER و با همکاری سازمان ناسا انجام شد. در این تحقیق، ارزیابی‌های ارتفاعی با استفاده از منابع ژئودتیک، ارزیابی دقت ارتفاعی و مسطحاتی با استفاده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مرجع، و ارزیابی کیفیت و artifact بر اساس پوشش‌های زمینی مختلف در GDEM V2 انجام شد. به طور کلی نتایج حاصل از این تحقیق، بهبودهای دقتی و

فایل ارزیابی کیفی نشان دهنده‌ی تعداد تصاویر استریو به کار گرفته شده برای تعیین ارتفاع هر پیکسل است که در این صورت عدد درجه خاکستری در آن پیکسل مقداری مثبت خواهد بود و در صورتی که از منابعی غیر از تصاویر ASTER برای محاسبه‌ی ارتفاع یک پیکسل استفاده شود، در این فایل، عدد درجه خاکستری پیکسل مربوطه، منفی خواهد بود. طبق جدول (۳)، هر مقدار منفی مشخص کننده‌ی مرجعی است که برای این منظور استفاده شده است [۴].

جدول ۳- منابع مورد استفاده در محاسبه‌ی ارتفاع پیکسل‌های

GDEM V2		
منبع	توصیف	مقدار درجه خاکستری
SRTM V3	دارای دقت ۳ ثانیه کمانی، با پوشش ۶۰ درجه شمالی تا ۵۶ درجه جنوبی	-۱
SRTM V2	دارای دقت ۳ ثانیه کمانی، با پوشش ۶۰ درجه شمالی تا ۵۶ درجه جنوبی	-۲
NED	دارای دقت ۱ ثانیه کمانی، با پوشش کل ایالات متحده	-۵
CDED	دارای دقت ۳، ۶ و ۱۲ ثانیه کمانی، با پوشش کل کانادا	-۶
Alaska DEM	دارای دقت ۲ ثانیه کمانی، با پوشش کل آلاسکا	-۱۱

۳- مروری بر تحقیقات مرتبط

یک ارزیابی و مقایسه بین نسخه‌ی اول مدل رقومی ارتفاعی GDEM و نسخه‌ی دوم در حالت آزمایشی (نسخه‌ی بتا)، توسط Tachikawa و همکارانش در جولای سال ۲۰۱۱ انجام شد. در این ارزیابی خصوصیات GDEM V2 از قبیل خطاهای موقعیتی، خطاهای ارتفاعی، قدرت تفکیک مسطحاتی مورد بررسی قرار گرفتند. مقدار خطای موقعیتی در نسخه‌ی دوم حدود ۰/۱۱ ثانیه کمانی به

ایران را شامل نمی‌شود. لذا در تحقیق حاضر، تلاش شده است یک ارزیابی بر اساس پارامترهای آماری به منظور بررسی کیفیت و دقت GDEM V2 در یک منطقه‌ی مطالعاتی در جنوب غربی ایران انجام شود.

۴- روش پیشنهادی در ارزیابی آماری مدل GDEM V2

امروزه، مدل‌های رقومی ارتفاعی توسط روش‌های خیلی دقیق و موثر حاصل می‌شوند و تراکم اطلاعات ارتفاعی در آنها بسیار بالا است. با این حال، امکان وجود خطا و اشتباه در این مدل‌ها وجود دارد. خطاها و اشتباهات می‌توانند در طی پردازش‌های مختلف و از منابع مختلفی وارد مدل رقومی ارتفاعی شوند. در این تحقیق، به منظور بررسی کیفیت و دقت یک مدل رقومی ارتفاعی در مقایسه با داده‌های مرجع، دو نوع ارزیابی آماری و بصری انجام می‌شود. طی فرایند ارزیابی آماری، دو دسته پارامتر دقت موسوم به پارامترهای متداول و پارامترهای پایدار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این فرایند، بررسی می‌گردد که آیا مدل رقومی ارتفاعی دارای دقت‌های مورد نظر است و یا خیر. دقت داده‌های مرجع مورد استفاده برای ارزیابی باید سه برابر دقیق تر از مدل ارتفاعی رقومی مورد نظر باشد [۱۷]. بر این اساس، تاثیر انتشار خطا بر روی دقت DEM از رابطه‌ی زیر قابل تخمین است:

$$\sigma_{DEM-REF}^2 = \sigma_{DEM}^2 + \sigma_{REF}^2 \leq \frac{10}{9} \sigma_{DEM}^2 \quad (1)$$

طبق رابطه‌ی فوق:

$$\sigma_{DEM-REF} \leq 1.05 \sigma_{DEM}$$

در نتیجه می‌توان گفت که دقت حاصل شده برای مدل رقومی ارتفاعی حدود ۵ درصد غیر دقیق است که این اندازه، قابل قبول است. برای مثال، اگر دقت یک مدل رقومی ارتفاعی برابر ۱۰ سانتیمتر تعیین شود، دقت داده‌های مرجع مورد استفاده باید کمتر از ۳/۳ سانتیمتر باشد [۱۳].

در صورتی که فرض نرمال بودن توزیع برقرار باشد، و هیچ گونه اشتباهی در مجموعه داده حضور نداشته باشد، می‌توان از پارامترهای دقت معمولی موجود در جدول (۴) برای ارزیابی دقت مدل رقومی ارتفاعی استفاده کرد [۱۳].

کیفیتی قابل توجهی را در GDEM V2 نسبت به نسخه‌ی اول نشان می‌دهد. این بهبودها، شامل افزایش دقت ارتفاعی و مسطحاتی در ارزیابی با نقاط GPS و همچنین مقایسه با مدل‌های رقومی ارتفاعی دیگری از جمله GSI، NED و SRTM DTED2 است [۱۲].

در سال ۲۰۱۲، Li و همکارانش، یک ارزیابی بر روی دقت مطلق ارتفاعی GDEM V2 با استفاده از اندازه‌گیری‌های حاصل از GPS و نسخه‌ی چهارم مدل ارتفاعی SRTM در پنج منطقه‌ی مطالعاتی با خصوصیات ارتفاعی متفاوت در کشور چین انجام دادند. به منظور نمایش الگوی مکانی خطا، نتایج در پوشش‌های زمینی متفاوت ارائه شدند. نتایج حاصل از این بررسی نشان دادند که مقادیر RMSE (۱۹ متر) و میانگین (۱۳- متر) بین GDEM V2 و نقاط GPS در پنج منطقه‌ی مطالعاتی کمتر از نسخه‌ی اول GDEM (با RMSE ۲۶ متر و میانگین ۲۱- متر) می‌باشد. همچنین، بر اساس مقایسه‌ی پیکسل به پیکسل بین GDEM V2 و SRTM پوشش‌های زمینی متفاوت، GDEM V2 دارای بایاس ارتفاعی منفی در حدود ۱۰ متر است [۹].

ارزیابی دیگری بر روی دقت ارتفاعی و مسطحاتی GDEM V2 در مناطق ایالات متحده امریکا توسط Gesch و همکارانش در سال ۲۰۱۲ انجام شد. در این تحقیق، دقت مطلق ارتفاعی GDEM V2 از طریق مقایسه با بیش از ۱۸۰۰۰ نقطه کنترل زمینی مرجع و مستقل محاسبه شد. بر اساس نتایج، مقدار RMSE برای GDEM V2 حدود ۸/۶۸ متر و مقدار خطای میانگین آن ۰/۲- متر است که در مقایسه با نسخه‌ی اول، بهبودهای زیادی حاصل شده است. به منظور بررسی اثر پوشش‌های زمینی بر روی خطاهای اندازه‌گیری شده، دو پارامتر خطای میانگین و RMSE بر اساس پوشش زمینی نیز محاسبه شدند. وجود یک بایاس ارتفاعی مثبت در مناطقی با عوارض ساختمانی و پوشش انبوه درختان گزارش داده شده است که ناشی از خصوصیت سیستم‌های تصویربرداری مانند ASTER است. علاوه بر این در مناطق باز (پوشش گیاهی کم و ناچیز) یک بایاس ارتفاعی منفی حدود یک متر در GDEM V2 مشاهده شده است [۱۰].

اگرچه مطالعات زیادی بر روی ارزیابی و مقایسه‌ی مدل رقومی ارتفاعی GDEM V2 با سایر منابع ارتفاعی در جهان انجام شده است، اما این مطالعات، مناطق داخل

جدول ۴- پارامترهای آماری متداول

پارامتر	نحوه محاسبه
جذر میانگین مربعات خطا	$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2}$
خطای میانگین	$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i$
انحراف استاندارد	$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \hat{\mu})^2}$

در جدول (۴)، Δh_i نشان دهنده اختلاف ارتفاع بین داده‌ی مورد نظر و داده‌ی مرجع، و n تعداد نقاط مورد آزمایش (اندازه‌ی نمونه) است. در صورتی که یک توزیع نرمال برای خطاها فرض شود، با توجه به تئوری خطاها، ۶۸/۳ درصد داده‌ها در بازه‌ی $\mu \pm \sigma$ قرار می‌گیرند به طوری که μ خطای سیستماتیک و σ انحراف استاندارد است [۱۹]. در صورتی که اندازه‌گیری دقت بر اساس ۹۵ درصد سطح اطمینان باشد، این بازه برابر $\mu \pm 1.96\sigma$ خواهد بود.

از خصوصیات پارامترهای متداول ارزیابی دقت، این است که فرض می‌کند خطاهای موجود در داده‌های ارتفاعی دارای یک توزیع گوسین هستند و خطاهای بزرگ و اشتباهات در داده‌ها وجود ندارد. با این حال از لحاظ عملی، این دو فرض هیچ گاه صادق نیست و عوارض غیر زمینی مانند پوشش گیاهی، ساختمان‌ها و سایر عوارض ناخواسته ممکن است همچنان با وجود فیلترسازی، در داده‌ها باقی بمانند. علاوه بر این خطاها، خطاهای سیستماتیک نیز وجود دارند. در نتیجه در یک مجموعه داده‌ی ارتفاعی خطاها و اشتباهات متفاوتی می‌تواند وجود داشته باشد که حضور آنها بر روی دقت نهایی محصول تاثیر گذار است. به دلیل وجود این خطاها و علاوه بر این نرمال نبودن توزیع خطا، در روش پیشنهادی، ارزیابی دقت با استفاده از پارامترهایی انجام می‌شود که تحت تاثیر حضور اشتباهات و نوع توزیع آنها نباشند. این پارامترها، تحت عنوان پارامترهای پایدار در ادامه معرفی می‌شوند.

در صورتی که هیستوگرام توزیع خطاها دارای چولگی، کشیدگی و یا مقدار زیادی اشتباه باشد، روش موردنظر در این تحقیق، به منظور استخراج پارامترهای دقت، استفاده

از اندازه‌گیری‌های پایدار است. چنین روش‌هایی در برابر اشتباهات پایدار هستند و نیازی به فرض‌های نرمال بودن توزیع در آنها نیست. در این روش، از چندک‌های نمونه‌ی توزیع خطا استفاده می‌شود [۱۳]. چندک یک توزیع توسط معکوس تابع توزیع تجمعی (CDF) تعریف می‌شود:

$$Q(p) = F^{-1}(p), 0 < p < 1 \quad (2)$$

برای مثال، چندک ۵۰ درصد، $Q(0.5)$ ، مقدار میانه توزیع را می‌دهد. یک تعریف دیگر برای چندک، استفاده از مفهوم مینیمم برای هنگامی است که تابع F یک تابع پله‌ای باشد و در نتیجه دارای تعریف واحدی برای معکوس آن وجود نداشته باشد:

$$Q(p) = \min\{x : F(x) \geq p\} \quad (3)$$

چندک‌های نمونه، برآوردهای غیر پارامتریک هستند که بر اساس نمونه‌ای از مشاهدات مستقل $\{x_1, \dots, x_n\}$ در توزیع محاسبه می‌شوند. در این حالت، آماره‌ی ترتیب نمونه به صورت $\{x_{(1)}, \dots, x_{(n)}\}$ تعریف می‌شود به طوریکه $x_{(1)}$ نشان‌دهنده‌ی کمترین مقدار و $x_{(n)}$ نشان‌دهنده‌ی بیشترین مقدار مجموعه‌ی $\{x_1, \dots, x_n\}$ است.

یک تعریف ساده از چندک نمونه برابر است با: $\hat{Q}(p) = x_{(j)}$ به طوری که $j = [p.n]$ و $[p.n]$ نشان‌دهنده‌ی کوچکترین عدد صحیح گرد شده است که از $p.n$ کوچکتر نیست [۱۳].

در رابطه با اندازه‌گیری پارامترهای دقت مربوط به یک مدل رقومی ارتفاعی معمولاً از توزیع اختلاف ارتفاع (Δh) و قدر مطلق اختلاف ارتفاع ($|\Delta h|$) استفاده می‌شود. یکی از پارامترهای کیفی پایدار، میانه $\hat{Q}_{\Delta h}(0.5)$ است که در این تحقیق با $m\Delta h$ نمایش داده می‌شود. میانه یک برآوردرگر پایدار و معرف مقدار شیفت سیستماتیک (بایاس) در داده‌ی DEM است. این پارامتر نسبت به پارامتر میانگین خطا در برابر اشتباهات و خطاهای بزرگ موجود در داده حساسیت کمتری دارد و می‌تواند انحراف موجود در توزیع خطا را بهتر نمایش دهد [۱۳].

یکی دیگر از پارامترهای اندازه‌گیری دقت که پایدار و مستقل از نوع توزیع است، پارامتر چندک نمونه‌ی توزیع مربوط به اختلافات مطلق برای مثال $|\Delta h|$ است. در

تعداد نقاط چک (n) خیلی زیاد باشد، این مقدار معادل انحراف استاندارد است [۱۳].

به طور خلاصه، به منظور برخورد با اشتباهات موجود در یک توزیع غیر نرمال، پیشنهاد می‌شود از پارامترهای پایدار اندازه‌گیری دقت ارائه شده در جدول (۵) به عنوان یک روش پایدار و مستقل از نوع توزیع در کنار پارامترهای معمولی استفاده شود.

جدول ۵- پارامترهای آماری پایدار		
پارامتر اندازه‌گیری دقت	نوع خطا	نحوه‌ی بیان
میان (چندک ۵۰٪)	Δh	$\hat{Q}_{ \Delta h }(0.5) = m_{\Delta h}$
انحراف مطلق نرمال میان	Δh	$NMAD = 1.4826 \cdot median_j(\Delta h_j - m_{\Delta h})$
چندک ۶۸/۳٪	$ \Delta h $	$\hat{Q}_{ \Delta h }(0.683)$
چندک ۹۵٪	$ \Delta h $	$\hat{Q}_{ \Delta h }(0.95)$

به منظور ارزیابی بصری یک مدل رقومی ارتفاعی، نمایش توزیع خطاها می‌تواند با استفاده از هیستوگرام خطاهای نمونه باشد که در آن تعداد خطاها با بازه‌های مشخصی ترسیم می‌شوند. چنین هیستوگرامی، می‌تواند اولین دید از میزان نرمال بودن توزیع خطاها را نمایش دهد. برای مقایسه میزان نرمال بودن، می‌توان یک منحنی اضافی که نشان‌دهنده‌ی یک توزیع گوسین است و از طریق تخمین خطای میانگین و واریانس حاصل شده است، ایجاد کرد. به علت وجود اشتباهات در داده‌ها، نمودار توزیع کاملاً منطبق بر نمودار نرمال نیست. دلایل مختلفی وجود دارند که سبب می‌شود خطاها دارای توزیع نرمال نباشند، برای مثال، به علت اینکه یک توزیع نامتوازن وجود دارد که در اطراف مقدار میانگین، متقارن نیست و یا به علت اینکه توزیع در اطراف میانگین خیلی نوک تیز شده است، و بر خلاف یک توزیع نرمال، دارای دنباله‌های طولانی‌تر است. تاثیر بلند بودن دنباله‌ها و نوک تیز شدن توزیع، توسط چولگی توزیع که در این حالت بزرگتر از صفر است، اندازه‌گیری می‌شود [۱۳].

یک نمایش بهتر به منظور ارزیابی میزان انحراف از توزیع نرمال ترسیم نموداری موسوم به نمودار چندک-چندک (نمودار Q-Q) است. چندک‌های مربوط به تابع توزیع تجربی در مقابل چندک‌های تئوری توزیع نرمال

محاسبه‌ی چندک‌های نمونه، خطاهای مطلق استفاده می‌شوند زیرا تنها بزرگی خطاها و نه علامت آنها مهم است. علاوه بر این، با استفاده از خطاهای مطلق، می‌توان عبارت‌های احتمالاتی را بدون در نظر گرفتن فرض توزیع متقارن به کار برد [۱۳]. برای مثال، چندک نمونه‌ی ۹۵٪ از $|\Delta h|$ به این معنی است که ۹۵ درصد خطاها دارای اندازه‌هایی در بازه‌ی بین صفر تا $\hat{Q}_{|\Delta h|}(0.95)$ هستند (یعنی $[0, \hat{Q}_{|\Delta h|}(0.95)]$). ۵ درصد خطای باقیمانده می‌تواند دارای هر مقداری باشد که باعث می‌شود این اندازه‌گیری تا حداکثر ۵٪ اشتباهات پایدار باقی بماند [۱۳]. چنین عبارات احتمالاتی در مورد بخش مشخصی از خطا که در یک بازه‌ی معین قرار می‌گیرد، معمولاً با فرض نرمال بودن توزیع به دست می‌آید. برای مثال، یکی از این عبارات احتمالاتی فرض می‌کند که یک بازه‌ی متقارن از $\pm 1.96 \cdot \hat{\sigma}$ (که σ انحراف استاندارد تخمین زده شده است) شامل ۹۵٪ خطا است (با فرض نبودن خطای سیستماتیک). به طور معادل، این عبارت احتمالاتی به این معنی است که ۹۵٪ خطای مطلق در بازه‌ی $[0, 1.96 \cdot \hat{\sigma}]$ قرار دارد. بنابراین در صورتی که توزیع مقادیر Δh واقعا نرمال باشد، مقدار $\hat{Q}_{|\Delta h|}(0.95)$ به سمت آماره‌ی $1.96 \cdot \hat{\sigma}$ همگرا می‌شود [۱۴]. در صورتی که مجموعه داده به علت وجود مقادیر زیادی از اشتباهات دارای دنباله‌ی قوی در توزیع خطاها باشد، یک روش اختیاری برای تخمین مقیاس توزیع Δh استفاده از یک آماره‌ی مقیاس پایدار مانند انحراف مطلق نرمال شده‌ی میانه ($NAMD^1$) است که به طبق رابطه‌ی زیر تعریف می‌شود:

$$NMAD = 1.4826 \cdot median_j(|\Delta h_j - m_{\Delta h}|) \quad (4)$$

در رابطه‌ی فوق، Δh_j نماینده‌ی خطاهای تکی z است که تعداد آن از ۱ الی n خطا می‌تواند باشد و $m_{\Delta h}$ میانه‌ی خطاها است. بنابراین پارامتر $NAMD$ نسبتی از میانه‌ی اختلافات مطلق بین خطاها و میانه‌ی خطا است. این پارامتر می‌تواند به عنوان یک تخمین به ازای انحراف استاندارد باشد که در مقابل اشتباهات موجود در مجموعه داده پایدارتر است. در حالتی که توزیع خطاها نرمال و

^۱ Normalized Median Absolute Deviation

ترسیم می‌شوند. در صورتی که توزیع مورد نظر، واقعا نرمال باشد، نمودار Q-Q باید به صورت یک خط مستقیم باشد. یک انحراف قابل توجه از خط مستقیم در نمودار Q-Q نشان‌دهنده‌ی آن است که توزیع اختلاف ارتفاعات نرمال نیست [۱۳].

۴- پیاده سازی و ارزیابی نتایج

در این تحقیق، به منظور بررسی دقت GDEM V2، منطقه‌ای از بندر گناوه در جنوب غربی ایران و به مساحت حدودا ۱۳۸۰ کیلومتر مربع انتخاب شده است (شکل ۳).



شکل ۳- منطقه‌ی مورد مطالعه در جنوب غربی ایران

در این ارزیابی، از SRTM و یک مدل رقومی ارتفاعی محلی (Local DEM) به عنوان داده‌های ارتفاعی مرجع استفاده شده است و یک مقایسه‌ی DEM با DEM بین GDEM V2 و Local DEM، SRTM و GDEM V2 همچنین بین SRTM و Local DEM انجام شده است. مدل رقومی ارتفاعی محلی حاصل از داده‌های برداری در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ است که با فواصل نمونه‌برداری ۱۰ متر تولید شده است. همچنین از نسخه‌ی چهارم SRTM محصول CGIAR-CSI با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر استفاده شده است. هر سه مدل رقومی ارتفاعی فوق، در یک دیتوم ارتفاعی و مسطحاتی یکسان (سیستم مختصات

جهانی WGS84 و ژئوئید EGM96^۲ قرار دارند. اما از آنجایی که قدرت تفکیک مکانی داده‌های مرجع (۱۰ متر و ۹۰ متر) با GDEM V2 (۳۰ متر) برابر نیست، نیاز به انجام یک دورنمایی از نوع Bilinear بر روی داده‌های مرجع است. در شکل (۴) منطقه‌ی انتخاب شده از هر سه مدل رقومی ارتفاعی و در جدول (۶) ابعاد هر منطقه ارائه شده است.



شکل ۴- ناحیه‌ی انتخاب شده از هر سه مدل رقومی ارتفاعی با قدرت تفکیک ۳۰ متر و ابعاد رستری ۱۳۲۹×۸۷۶ پیکسل

جدول ۶- ابعاد مدل‌های رقومی ارتفاعی

داده	ابعاد پیکسل	ابعاد داده رستر (پیکسل)
SRTM	۳ ثانیه کمانی (حدود ۰/۰۰۰۸۲۳ درجه معادل تقریبا ۹۰ متر)	۶۰۰۱ × ۶۰۰۱
GDEM	۱ ثانیه کمانی (حدود ۰/۰۰۰۲۷۷ درجه معادل تقریبا ۳۰ متر)	۳۶۰۱ × ۳۶۰۱
Local DEM	۱۰ متر	۶۷۷۳ × ۲۷۱۸

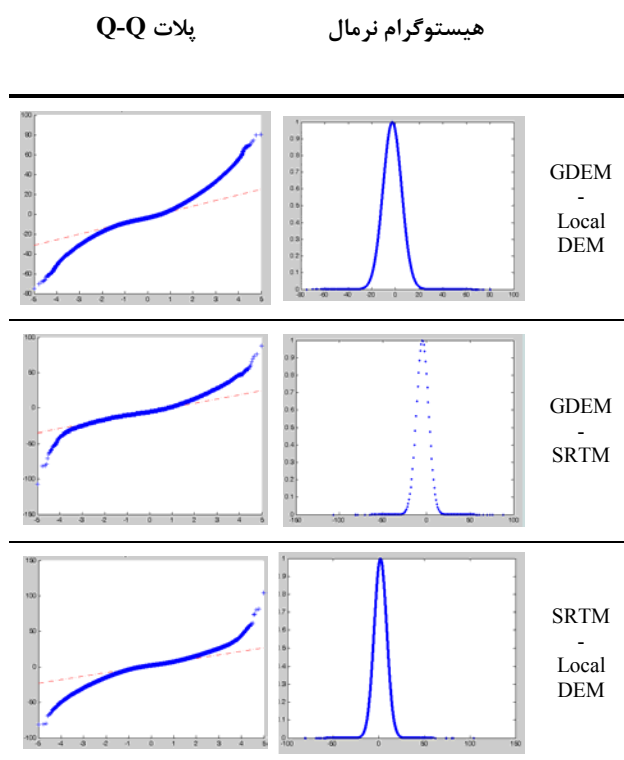
به منظور ارزیابی هر مجموعه داده، اختلاف ارتفاعات بین هر دو مدل رقومی ارتفاعی محاسبه و سپس پارامترهای آماری معمولی و پایدار برای این اختلاف، محاسبه شده است. در جدول (۷) این مقادیر مشاهده می‌شود.

همچنین، در این ارزیابی، تعداد داده‌هایی که قدر مطلق اختلاف ارتفاع آنها بیش از ۵۰ متر بود، مشخص شدند. در شکل‌های جدول (۸)، این نقاط با رنگ قرمز بر روی تصویر اختلاف ارتفاع هر مجموعه داده دیده می‌شوند. تعداد این نقاط در مجموعه داده‌ی اول، ۱۷۹ عدد، در مجموعه داده‌ی دوم، ۵۰ عدد و در مجموعه داده‌ی سوم ۷۹ عدد است. علاوه براین، هیستوگرام نرمال

^۱ 1996 Earth Gravitational Model

بودن خطاها، پلات Q-Q و پلات mesh مقادیر اختلاف ارتفاع برای هر مجموعه داده ترسیم شده است (جدول ۸) و جدول (۹).

جدول ۹- هیستوگرام نرمال و پلات Q-Q مقادیر اختلاف ارتفاع سه مجموعه داده



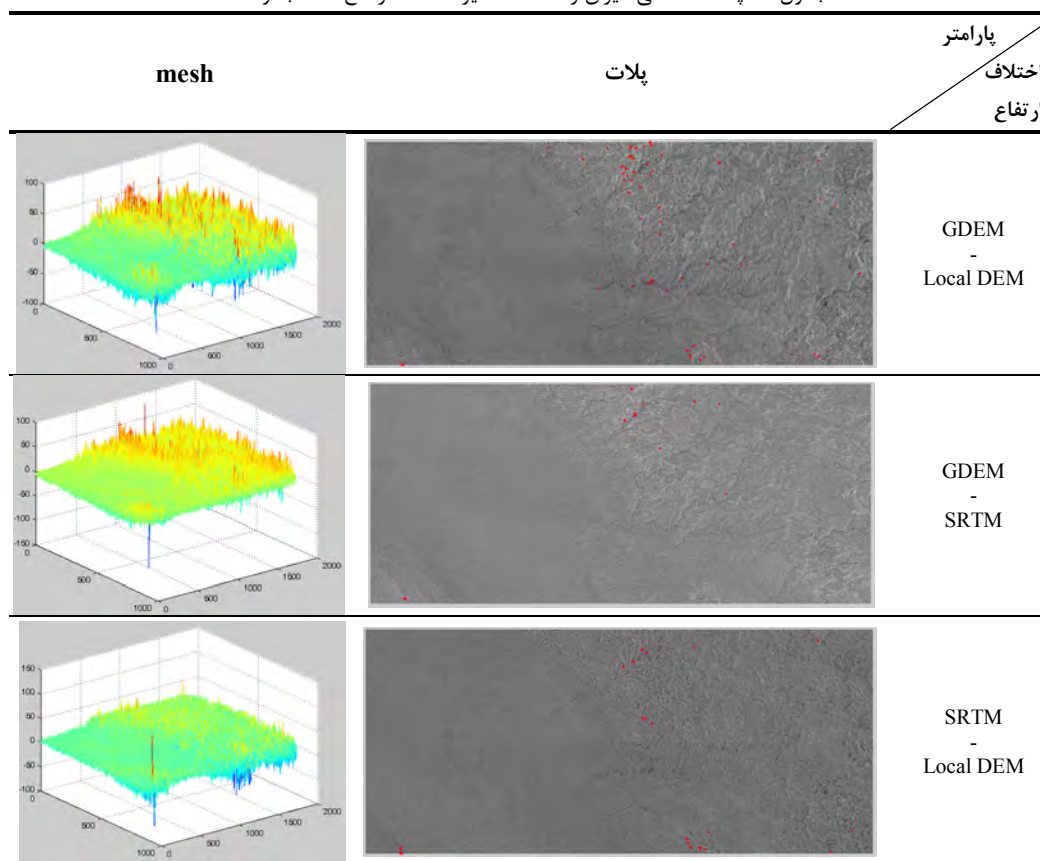
با توجه به مقادیر حاصل از محاسبات آماری در جدول (۷)، وجود خطای میانگین منفی در دو مجموعه داده‌ی اول و خطای میانگین مثبت در مجموعه داده‌ی سوم، دلیلی بر این است که GDEM V2 ذاتا دارای یک بایاس منفی است که در اکثر تحقیقات انجام شده، به این مساله اشاره شده است. این بایاس منفی، نشان دهنده وجود یک خطای سیستماتیک در GDEM V2 است که می‌تواند ناشی از مشکلات موجود در تناظریابی تصاویر استریو،

پوشش گیاهی، نواحی با پوشش آب و حتی پوشش ابر در تصاویر ASTER باشد. مقدار بایاس GDEM V2 به SRTM (۴/۵- متر) بیشتر از مدل رقومی ارتفاعی محلی (۲/۸- متر) است. در صورتی که اثر اشتباهات و خطاهای فاحش را در محاسبات آماری در نظر نگیریم، باز هم این بایاس منفی بر روی مقادیر میانه به وضوح دیده می‌شود. مقدار این خطا برای مجموعه داده‌ی اول حدود ۳/۷- متر و در مجموعه داده‌ی دوم ۶- متر است. برابر نبودن دو مقدار RMSE و انحراف استاندارد و صفر نبودن میانگین، نشان دهنده‌ی نرمال نبودن توزیع خطاها است. این امر ناشی از وجود اشتباهات در مجموعه داده است. در جدول (۹)، به صورت بصری نرمال نبودن توزیع برای سه مجموعه داده مشاهده می‌شود. دنباله‌های موجود در هیستوگرام نرمال، و یا کشیدگی نمودار به یک سمت (به خصوص در مجموعه داده‌ی دوم) و همچنین انحراف نمودار چندک نمونه از چندک تئوری، همگی نشان دهنده‌ی خطاهای تصادفی و اشتباهات در مجموعه داده‌های مذکور هستند. در نتیجه مقادیر RMSE و انحراف استاندارد تحت تاثیر این اشتباهات محاسبه شده‌اند. برای ارزیابی بهتر در مورد دقت مجموعه داده‌ها، از مقادیر NMAD استفاده می‌شود که در برابر خطاهای تصادفی و اشتباهات و نرمال نبودن توزیع خطا پایدار هستند. با توجه به جدول (۷)، مقدار NMAD بین GDEM V2 و مدل رقومی ارتفاعی محلی کمی کمتر از مقدار آن بین GDEM V2 و SRTM است. همچنین دو مقدار خطای میانه، چندک ۳/۶۸٪ RMSE همانند NMAD بین GDEM V2 و مدل رقومی ارتفاعی محلی کمتر از GDEM V2 و SRTM است که نشان دهنده‌ی سازگاری بیشتر GDEM V2 با مدل رقومی ارتفاعی محلی است. دو پارامتر چندک ۳/۶۸٪ و ۹۵٪ میزان توزیع این خطاها را مشخص می‌کند. در مجموعه داده‌ی اول، حدود

جدول ۷- پارامترهای آماری متداول و پایدار

پارامتر اختلاف ارتفاع	حداکثر ارتفاع (متر)	حداقل ارتفاع (متر)	میانگین (متر)	RMSE (متر)	انحراف استاندارد (متر)	میانه (متر)	NMAD (متر)	چندک ۳/۶۸٪ (متر)	چندک ۹۵٪ (متر)
GDEM - Local DEM	۸۰/۱	-۷۵/۳	-۲/۸	۸/۳	۷/۹	-۳/۷	۵/۶	۷/۵	۱۶/۸
GDEM - SRTM	۸۸	-۱۰۷	-۴/۵	۸/۳	۷	-۶	۵/۹	۹	۱۵
SRTM - Local DEM	۱۰۴/۳	-۸۱/۴	۱/۸	۷/۱	۶/۹	۲/۱	۵	۶/۱	۱۴/۸

جدول ۸- پلات، منحنی میزان و mesh مقادیر اختلاف ارتفاع سه مجموعه داده



۶۸/۳٪ قدر مطلق خطاها دارای مقداری در بازه‌ی [۷/۵ و ۰] (بر حسب متر) و ۹۵٪ آنها دارای مقداری در بازه‌ی [۱۶/۸ و ۰] (بر حسب متر) دارند. در حالی که در مجموعه داده‌ی دوم، حدود ۶۸/۳٪ قدر مطلق خطاها دارای مقداری در بازه‌ی [۹ و ۰] (بر حسب متر) و ۹۵٪ آنها دارای مقداری در بازه‌ی [۱۵ و ۰] (بر حسب متر) هستند.

۵- نتیجه گیری

تصاویر ماهواره‌ای استریو با قدرت تفکیک مکانی بالا ابزار مناسبی برای تولید مدل‌های رقومی ارتفاعی هستند. در این تحقیق محصول مشترک دو سازمان NASA و وزارت صنعت و تجارت ژاپن (METI) به نام ASTER GDEM V2 مورد بررسی قرار گرفت. مدل رقومی ارتفاعی جهانی GDEM V2 مبتنی بر تصاویر ماهواره‌ای ASTER است که در سال ۲۰۱۱ دوباره بازبینی گردید و بعد از انجام بهبودهای قابل توجه بر روی دقت ارتفاعی، مسطحاتی، قدرت تفکیک مسطحاتی و کیفیت کلی آن، به

عنوان یک نسخه جدید به جهان معرفی شد. ارزیابی‌های انجام شده در منطقه‌ای از ایران، حاکی از وجود یک بایاس منفی در داده‌ی GDEM V2 است که این مورد از خصوصیات ذاتی مدل GDEM V2 ذکر شده است و ناشی از خطاهای سیستماتیک می‌باشد. همچنین مقدار RMSE در این منطقه نسبت به SRTM و مدل رقومی ارتفاعی محلی با هم برابر و حدوده ۸/۳ متر حاصل شده است. با توجه به این مقادیر و همچنین بر اساس سایر مقادیر آماری محاسبه شده و ارزیابی‌های بصری، انطباق بیشتر مقادیر ارتفاعی GDEM V2 بر روی مدل رقومی ارتفاعی محلی مشاهده می‌شود. با توجه به اهمیت مدل‌های رقومی ارتفاعی و کاربردهای گسترده این داده‌ها در زمینه‌های مختلف، پیشنهاد می‌شود داده‌های این مدل در مناطق داخل کشور و بر اساس پوشش‌های زمینی مختلف (پوشش گیاهی، شهری، کویر و زمین‌های باز) نیز مورد ارزیابی قرار گیرد و مقادیر حاصل از آن با نتایج حاصل از مطالعات انجام یافته در سطح جهان مقایسه گردد.

مراجع

- [1] ASTER GDEM Validation Team, 2009. "ASTER global DEM validation summary report", METI & NASA, 28pp.
- [2] T. Tachikawa, M. Hato, M. Kaku, A. Iwasaki, 2011. "CHARACTERISTICS OF ASTER GDEM VERSION 2", Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2011 IEEE International.
- [3] D. Gesch, M. Oimoen, Z. Zhang, J. Danielson, D. Meyer, 2011. "Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) Version 2 over the Conterminous United States", U.S. Geological Survey, Earth Resources Observation Science (EROS) Center, August 12, 2011.
- [4] "ADVANCED SPACEBORNE THERMAL EMISSION AND REFLECTION RADIOMETER (ASTER) GLOBAL DIGITAL ELEVATION MODEL (GDEM) VERSION 2", October 2011, Earth Remote Sensing Data Analysis Center, ASTER GDS User Service.
- [5] T.G. Farr, P.A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, et. al., 2007, "The Shuttle Radar Topography Mission: Reviews of Geophysics", v. 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- [6] T. Toutin, 2008. "ASTER DEMs for Geomatic and Geoscientific Applications: A Review." International Journal of Remote Sensing 29: 1855–75.
- [7] Li, Z., Zhu, Q., and Gold, C., "Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology", CRC Press, Boca Raton, eBook.
- [8] Lee, C., Ryu, J., 2005. "Comparative Study On Generation Of Optimal Digital Elevation Model", ESRI International Proceeding.
- [9] Peng Li, Chuang Shia, Zhenhong Li, et. al., 2012. "EVALUATION OF ASTER GDEM VER2 USING GPS MEASUREMENTS AND SRTM VER4.1 IN CHINA", ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume I-4, 2012, XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia.
- [10] D. Gesch, M. Oimoen, Z. Zhang, D. Meye, J. Danielson, 2012. "VALIDATION OF THE ASTER GLOBAL DIGITAL ELEVATION MODEL VERSION 2 OVER THE CONTERMINOUS UNITED STATES", International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXIX-B4, 2012, XXII ISPRS Congress, 25 August – 01 September 2012, Melbourne, Australia
- [11] T. Tachikawa, M. Kaku, A. Iwasaki, 2011. "ASTER GDEM Version 2 Validation Report", Japan's Validation Report, August 12th, 2011.
- [12] ASTER GDEM Validation Team, 2011. "ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results", Archive Center and the Joint Japan-US ASTER Science Team, August 31, 2011.
- [13] J. Höhle, M. Höhle, 2009. "Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 64 (2009) 398_406.
- [14] Hayakawa, Y. S., T. Oguchi, and Z. Lin. 2008. "Comparison of New and Existing Global Digital Elevation Models: ASTER G-DEM and SRTM-3." Geophysical Research Letters 35: L17404. doi:10.1029/2008GL035036.
- [15] Rodriguez, E., C. S. Morris, and J. E. Belz. 2006. "A Global Assessment of the SRTM Performance." Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 72: 249–60.
- [16] CGIAR-CSI. 2009. "SRTM 90m Digital Elevation Data". Accessed August 20, 2009. <http://srtm.csi.cgiar.org/>.
- [17] Maune, D.F. (Ed.), 2007. "Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM User Manual", 2nd ed. ISBN: 1-57083-082-7.
- [18] Mikhail, E., Ackermann, F., 1976. "Observations and Least Squares". IEP _ A Dun- Donnelley Publisher, New York, USA, ISBN: 0-7002-2481-5.

