

ارزیابی دقت آزمایشی مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) ماهواره‌های ASTER و SRTM با مشاهدات دقیق زمینی (DGPS) مطالعه موردی: از سد آزاد به دشت قروه-دهگلان، سندج

مصطفی خبازی^۱

علی مهرابی^۲

جواد اعرابی^۳

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۰۹/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۷/۰۶/۰۲

چکیده

مدل‌های رقومی ارتفاعی برای بسیاری از اهداف، مهم بوده و در بسیاری از کاربردها و مطالعات جزء الزامات اولیه می‌باشند. هدف این مقاله بررسی میزان دقت و صحت مدل‌های رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر ماهواره ASTER و داده‌های SRTM با ابعاد پیکسل ۳۰ و ۹۰ متر و همچنین مدل رقومی ارتفاعی به دست آمده از نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ با مشاهدات دقیق زمینی (DGPS) در لندفرم‌های مختلف شامل دشت، تپه‌ماهور و کوهستان می‌باشد. میزان انطباق این داده‌ها با استفاده از تحلیل همبستگی پیرسون آزمون شد. دقت و صحت مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف مورد بررسی با استفاده از RMSE، خطای میانگین و انحراف استاندارد بررسی شد. براساس نتایج ضریب تعیین رابطه داده‌های زمینی با مدل‌های رقومی ارتفاعی بین ۹۷ تا ۹۹ بود. بیشترین انطباق مربوط به مدل رقومی مستخرج از داده‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و مدل رقومی ASTER30 متر و کمترین انطباق مربوط به داده‌های SRTM90 متر بود. در مجموع با دشوارتر شدن شرایط عرصه یعنی از دشت به کوهستان، انطباق مدل‌های رقومی ارتفاعی با داده‌های زمینی برداشت شده کاهش می‌یافت. نتایج بررسی صحت و دقت مدل‌های رقومی نشان داد که کمترین خطا در وهله اول مربوط به مدل رقومی ارتفاعی استخراج شده از خطوطمیزان نقشه ۱:۲۵۰۰۰ ($RMSE=۶/۲۷$) و پس از آن مدل رقومی ارتفاعی ASTER30 متر ($RMSE=۷/۴۳$) است. همواره اندازه پیکسل ۳۰ متر نتایج بهتری نسبت به پیکسل ۹۰ متر داشته است. بر اساس معیار خطای میانگین، کمترین اریبی مربوط به ASTER30 متر (۲ متر اریبی) و پس از آن مربوط به مدل رقومی ۱:۲۵۰۰۰ (۲/۱۷) است. بیشترین اریبی مربوط به مدل‌های ۳۰ و ۹۰ متری استخراج شده از داده‌های SRTM بود. نتایج خطای انحراف استاندارد منطبق بر نتایج RMSE بود که تأیید کننده بهتر بودن مدل‌های رقومی ارتفاعی مستخرج از داده‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ و ASTER30 متر بود.

واژه‌های کلیدی: دقت آزمایشی، مدل رقومی ارتفاعی، ASTER، SRTM، DGPS.

۱- استادیار گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران mostafakhabazi@uk.ac.ir

۲- استادیار گروه جغرافیا و برنامه ریزی شهری، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران (نویسنده مسئول) mehrabi@uk.ac.ir

۳- کارشناس ارشد سنجش از دور و GIS دانشگاه آزاد اسلامی واحد لارستان، ایران javadarabi_se@yahoo.com

مقدمه

بلندی‌ها، دید سه بعدی و غیره است (Jacobsen, 2004: 440). مدل رقومی ارتفاع می‌تواند با دقت‌های مختلف برای یک منطقه تهیه شود. دقت بالای نقشه رقومی ارتفاع تخمین‌های دقیق‌تری از مشخصات فیزیوگرافی حوضه را به همراه دارد؛ اما تهیه چنین نقشه‌هایی بسیار پرهزینه است (Ashourloo, 2007: 53). استفاده از مدل رقومی ارتفاع برای نمایش و تجزیه و تحلیل ناهمواری‌ها و نیز مدل‌سازی فرآیندهای سطحی زمین در دهه‌های اخیر کاربرد بسیاری پیدا کرده است (Sandip, 2013: 211; Ebaid, 2014: 1231; Chaieb et al, 2016: 231).

مدل‌های سطح زمین همیشه مورد درخواست افراد نظامی، طراحان، معماران، مهندسين عمران و همچنین سایر متخصصین در علوم مختلف زمین بوده‌اند. در ابتدا مدل‌های زمین، مدل‌های فیزیکی بودند که از کائوچو، پلاستیک، گل رس، شن و غیره درست می‌شدند. معرفی مدل‌های ریاضی، عددی و روش‌های رقومی در مدل‌سازی سطح زمین، مديون فعالیت‌های مهندسين فتوگرامتری می‌باشد که در حوزه مهندسی عمران فعالیت داشته‌اند (Lin and Oguchi, 2006: 131). دقت مدل رقومی ارتفاع در دقت اطلاعاتی که از آن بدست می‌آید تأثیر گذار است، لذا محققان همواره به دنبال راهکاری برای افزایش دقت مدل‌های رقومی ارتفاع هستند. از جمله منابع اطلاعاتی که برای تولید این مدل بکار گرفته می‌شوند عبارتند از نقشه‌برداری زمینی، عکسبرداری هوایی، تصاویر ماهواره‌ای، داده‌های رادار و لیدار. برخی از این داده‌ها به دلیل کافی نبودن اطلاعات ارتفاعی مدل رقومی ارتفاع را با دقت کمی تولید می‌نمایند. درکل دقت مدل رقومی ارتفاع از دو جنبه مورد توجه است: ۱- دقت مسطحاتی (Horizontal Accuracy) و ۲- دقت ارتفاعی (Vertical Accuracy). دقت مسطحاتی برای اندازه‌گیری X و Y در مدل رقومی ارتفاع است و دقت ارتفاعی خطایی است که در اندازه‌گیری آن فرض بر آنست که X و Y صحیح است و تنها بعد سوم یعنی ارتفاع مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اگرچه به نظر می‌رسد درستی و دقت تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر DEM ها تا اندازه زیادی به قدرت تفکیک DEM‌های اولیه بستگی

مفهوم اولیه مدل ارتفاع رقومی در اواخر دهه ۱۹۵۰ میلادی از ایالات متحده آمریکا آغاز شد. از آن زمان تاکنون پیشرفت‌های قابل توجهی بویژه در مورد روش‌های گردآوری و پردازش اطلاعات زمینی، حاصل گردید. اصطلاح مدل رقومی زمین عبارت است از بهره‌گیری از اطلاعات ارتفاعی نیمرخ (مقطع) به منظور تشریح شکل زمین. این اطلاعات ارتفاعی می‌تواند هم منظم (رئوس شبکه قائم الزاویه) و هم غیر منظم باشد (اشرئی و علمبی، ۱۳۹۳: ۱۲۰). مدل رقومی ارتفاع (DEM) که حاصل جمع آوری و تبدیل داده‌های ارتفاعی به روش‌های دور سنجی، نقشه برداری مستقیم یا رقومی سازی نقشه‌های توپوگرافی کاغذی است، در سال‌های اخیر به ابزاری مؤثر در نمایش و تحلیل ناهمواری تبدیل شده است. گرچه به نظر می‌رسد درستی و دقت تجزیه و تحلیل‌های مبتنی بر DEM‌ها تا اندازه‌ی زیادی به قدرت تفکیک DEM‌های اولیه بستگی داشته باشد، ولی بنا به گفته‌ی بسیاری از پژوهشگران، نمی‌توان پذیرفت که رسترهای با ابعاد سلولی کوچکتر، همیشه نتایج رضایت‌بخش‌تری دارند (حسین زاده و جهادی، ۱۳۸۹: ۷۲؛ فیضی‌زاده و همکاران، ۱۳۹۵: ۳۳).

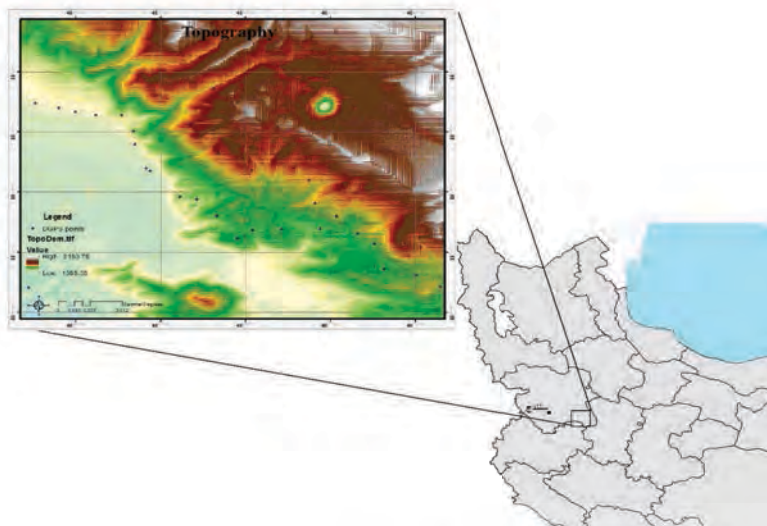
مدل‌های رقومی ارتفاعی می‌توانند از روش‌های مختلفی با درجه صحت و هزینه متفاوت استخراج شوند. بطور سنتی آنها از طریق منحنی میزان‌هایی که با تکنیک‌های فتوگرامتری از عکس‌های هوایی استریو استخراج شده‌اند، تولید می‌شوند. در حال حاضر این مدل‌ها عمدتاً از تصاویر ماهواره‌ای استخراج می‌گردند. سنجنده‌های ماهواره‌ای داده‌های ارتفاعی معتبری از مناطق وسیع با قدرت تفکیک مکانی کمتر از ۱۰۰ متر و با صحت ارتفاعی بین ۱۰ تا ۲۰ متر تولید می‌کنند (Jing, 2005: 243; Stage et al. 2015: 541). مدل رقومی ارتفاع، نمایش رستری سطح زمین است به شکلی که اطلاعات هر سلول بر روی تصویر دارای ارزشی برابر با ارتفاع از سطح دریا متناظر با همان نقطه بر روی زمین است. مدل رقومی ارتفاع ابزار مناسبی برای تولید نقشه‌های توپوگرافی و خطوط میزان، دستیابی به اطلاعات پستی

داشته باشد، ولی بنا به گفته بسیار از پژوهشگران نمی‌توان پذیرفت که رسترهای با ابعاد سلولی کوچکتر همیشه نتایج رضایت بخش‌تری دارند (حسین‌زاده و جهادی، ۱۳۹۱: ۶۱؛ Alganzi, ۲۰۱۸: ۹). حتی اگر بپذیریم که DEMهای با اندازه پیکسل کوچکتر دقت بیشتری دارند، متأسفانه دسترسی به آنها به سادگی امکان‌پذیر نبوده و از طرفی به اصلاحات زیاد و حتی تغییر به DEMهای با قدرت تفکیک پایین‌تر نیاز دارند (حسین‌زاده و نداف سنگانی، ۱۳۹۲: ۱۲). بنابراین انتخاب مناسب‌ترین مدل ارتفاع رقومی با اندازه پیکسل مناسب که با دقت بالاتری بتواند مدل واقعی‌تری را از شرایط طبیعی زمین ارائه نماید، موضوع اصلی این تحقیق قرار گرفت. از جمله مطالعات انجام گرفته در این زمینه می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

حسین‌زاده و نداف سنگانی (۱۳۹۲)، با ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) حاصل از نقشه‌های توپوگرافی و مقایسه‌ی تطبیقی آن با DEMهای ماهواره‌ای (مطالعه موردی: DEMهای توپوگرافی و ASTER منطقه‌ی آبه در خراسان رضوی) به این نتیجه رسیدند که DEMهای حاصل از نقشه‌های توپوگرافی در مقایسه با زمین واقعی، از خطاهای چشمگیری برخوردارند، اما در مقایسه با DEMهای ماهواره‌ای درجه اعتبار مناسبی را ارائه می‌کنند. آقا طاهر و همکاران (۱۳۹۵)، با ارزیابی مقایسه‌ی صحت ارتفاعی مدل‌های رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM به این نتیجه رسیدند که RMSE به عنوان شاخص خطا برای مناطق مورد مطالعه در آذربایجان شرقی، سیستان و بلوچستان و بوشهر در مدل SRTM به ترتیب ۶/۱، ۷/۴ و ۲/۹ و در ADSTER GDEM به ترتیب ۸/۷، ۸/۳ و ۷/۲ متر می‌باشد. همچنین صحت ارتفاعی بالای SRTM در مقایسه با ASTER GDEM در ایران می‌باشد. مروج و همکاران (۱۳۹۴)، با بررسی اهمیت انتخاب مدل رقومی ارتفاعی مناسب در مدیریت و حفاظت منابع خاک و آب (مطالعه موردی: سد تهم، استان زنجان) به این نتیجه رسیدند که مدل تولید شده با روش همسایگی طبیعی و اطلاعات سنجنده

موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه مابین عرض‌های جغرافیایی ۳۵° تا ۱۸° ۳۵' شمالی و طول‌های جغرافیایی ۳۰° ۴۷' تا ۵۰° ۴۷' شرقی، بخشی از پروژه سد و سامانه انتقال آب از



نگاره ۱: محدوده مورد مطالعه و DEM منطقه

سد آزاد به دشت قروه-دهگلان (که هدف از این کار انتقال آب از سرشاخه‌های رودخانه سیروان به داخل کشور است) در استان کردستان، شهرستان سنندج می‌باشد. این محدوده با مساحتی حدود ۱۱۰ کیلومترمربع اشکال مختلفی از ناهمواری زمین را در بر گرفته است. فاز اجرایی و عملیاتی پروژه مذکور از سال ۱۳۸۸ شروع و بخش اول آن که انتقال آب از سد آزاد به سد قشلاق بود در سال ۱۳۹۳ افتتاح گردید. نگاره ۱، محدوده مورد مطالعه و DEM منطقه را نشان می‌دهد. نقاط سفید رنگ مکان‌های تعیین دقیق ارتفاع از سطح دریا با DGPS را نشان می‌دهد.

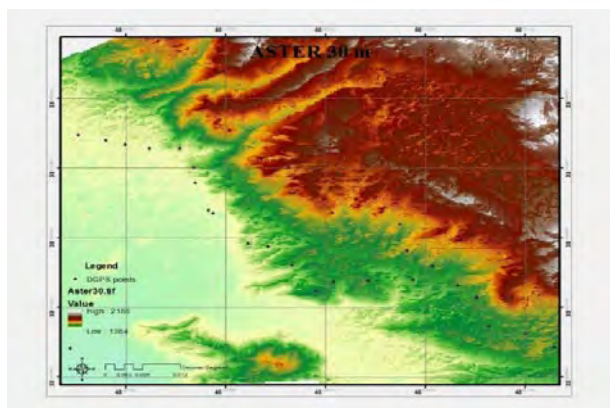
مواد و روش‌ها

روش پژوهش تحلیلی - مقایسه‌ای می‌باشد. در این تحقیق از روش جنبشی زمان واقعی (RTK) برای تعیین موقعیت نقاط استفاده شد و با توجه به وسعت منطقه تعداد ۴۵ نقطه در لندفرم‌های مختلف برداشت شد. در این روش با فرض معلوم بودن مختصات ایستگاه مرجع و مقایسه آن با موقعیت بدست آمده از گیرنده GPS، مقدار تصحیحی بدست می‌آید که به مختصات بدست آمده برای ایستگاه Rover اعمال می‌گردد که به روش نسبی یا تفاضلی معروف است (Zhang and Montgomery, 1994: 1023; Zevenbergen and Thorne, 1987: 47 Sefercik,

سد آزاد به دشت قروه-دهگلان (که هدف از این کار انتقال آب از سرشاخه‌های رودخانه سیروان به داخل کشور است) در استان کردستان، شهرستان سنندج می‌باشد. این محدوده با مساحتی حدود ۱۱۰ کیلومترمربع اشکال مختلفی از ناهمواری زمین را در بر گرفته است. فاز اجرایی و عملیاتی پروژه مذکور از سال ۱۳۸۸ شروع و بخش اول آن که انتقال آب از سد آزاد به سد قشلاق بود در سال ۱۳۹۳ افتتاح گردید. نگاره ۱، محدوده مورد مطالعه و DEM منطقه را نشان می‌دهد. نقاط سفید رنگ مکان‌های تعیین دقیق ارتفاع از سطح دریا با DGPS را نشان می‌دهد.

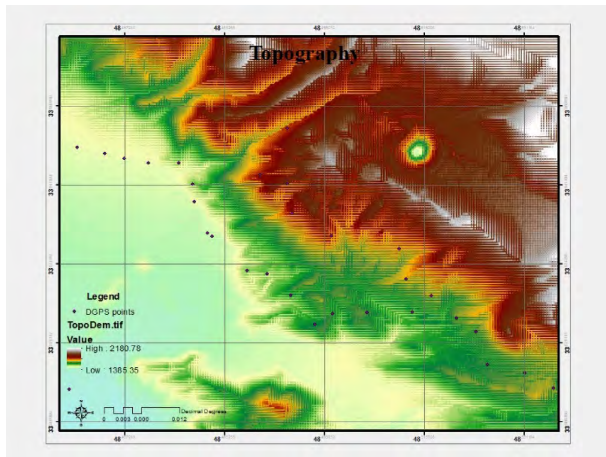
مواد و روش‌ها

روش پژوهش تحلیلی - مقایسه‌ای می‌باشد. در این تحقیق از روش جنبشی زمان واقعی (RTK) برای تعیین موقعیت نقاط استفاده شد و با توجه به وسعت منطقه تعداد ۴۵ نقطه در لندفرم‌های مختلف برداشت شد. در این روش با فرض معلوم بودن مختصات ایستگاه مرجع و مقایسه آن با موقعیت بدست آمده از گیرنده GPS، مقدار تصحیحی بدست می‌آید که به مختصات بدست آمده برای ایستگاه Rover اعمال می‌گردد که به روش نسبی یا تفاضلی معروف است (Zhang and Montgomery, 1994: 1023; Zevenbergen and Thorne, 1987: 47 Sefercik,

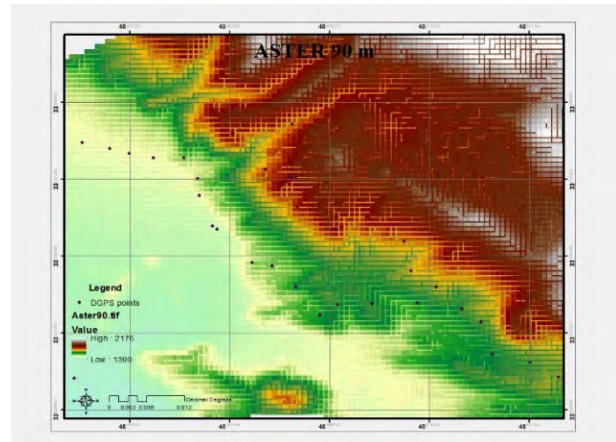


نگاره ۲: مدل رقومی ارتفاعی ASTER با تفکیک مکانی ۳۰ متر

۱- گیرنده متحرک GPS که توسط رادیو به گیرنده ثابت (استاتیک) متصل می‌گردد



نگاره ۶: مدل رقومی ارتفاعی تهیه شده از خطوط میزان نقشه‌های ۱:۲۵۰۰۰



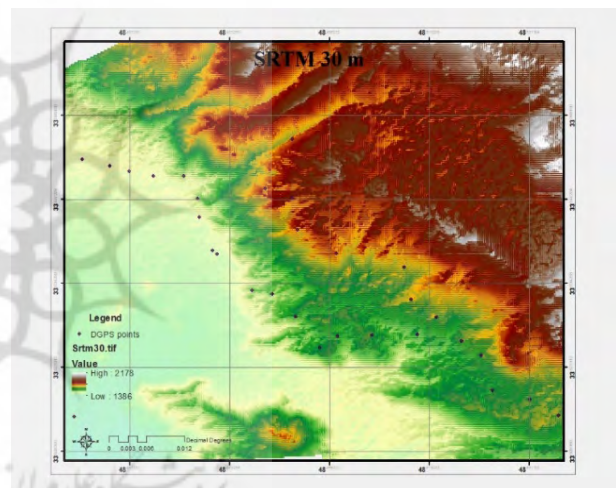
نگاره ۳: مدل رقومی ارتفاعی ASTER با تفکیک مکانی ۹۰ متر

اعتباریابی

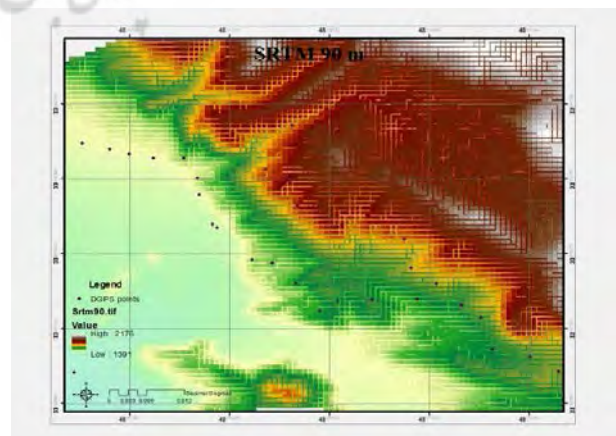
صحت، به معنای نزدیکی و مطابقت پدیده‌های مشاهده شده با مقادیر واقعی همان پدیده‌ها است. ارزیابی صحت در مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از روش‌های مختلف با استفاده از داده‌های دریافت شده دستگاه DGPS صورت گرفت.

در این پژوهش برای اعتباریابی، از مجذور مربع خطای میانگین (RMSE) که میانگین تفاوت مقادیر با توجه به مقادیر واقعی را نشان می‌دهد استفاده شد. همچنین، خطای میانگین و انحراف استاندارد محاسبه گردید (جدول ۱).

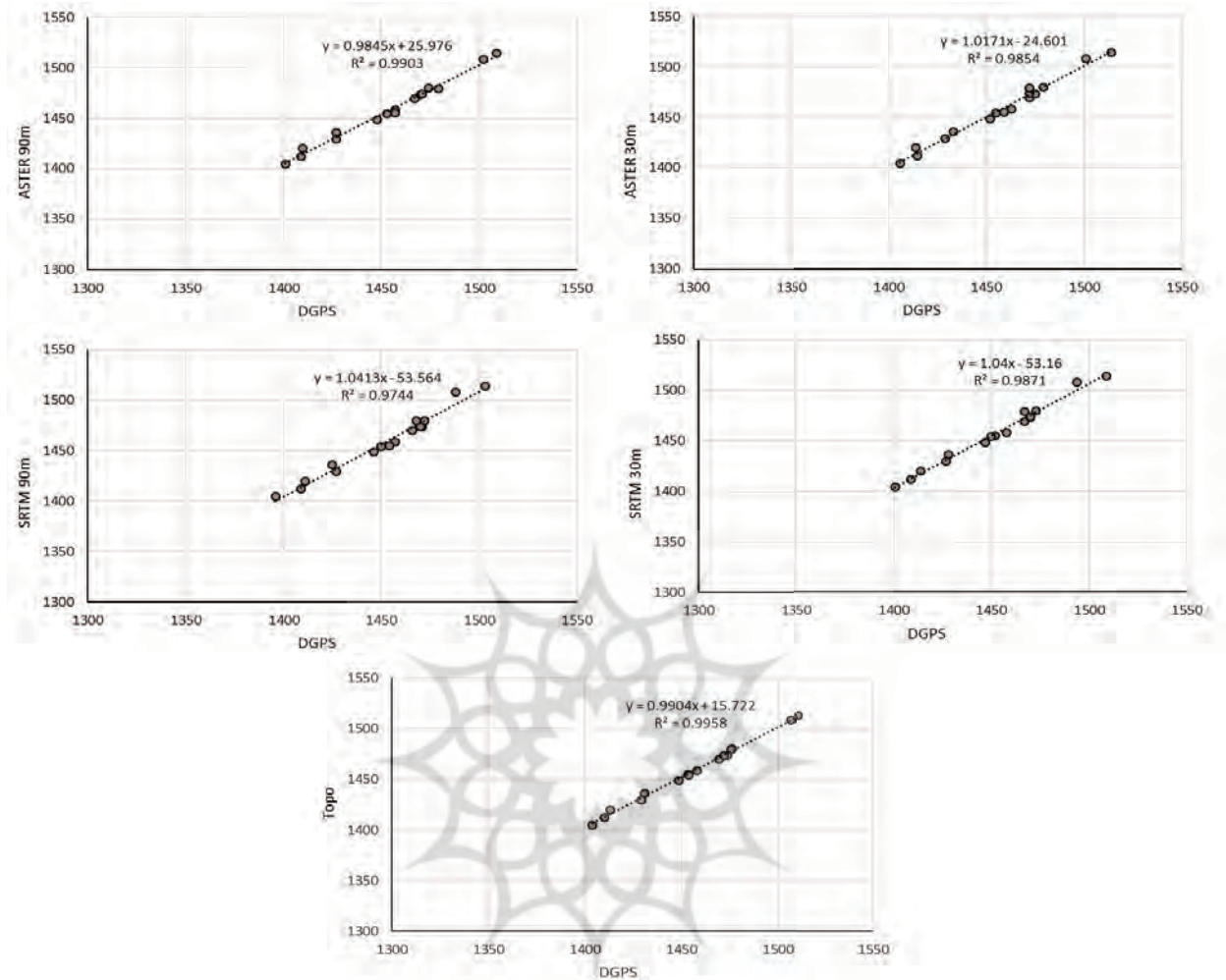
RMSE یک واحد کمی است که مشخصات خطا در سطح را نشان می‌دهد و میانگین خطا را بر اساس خطای سطح، محاسبه می‌کند. برای کاهش تأثیرات خطاهای هندسی در نتایج نهایی کار، ابتدا بین کلیه لایه‌های اطلاعاتی، تنظیم‌های فضایی انجام شده و در لندفرم‌های مطالعاتی نیز برای مثال در ستیغ‌های منطقه کوهستانی، حریم‌هایی در اطراف نقاط مرجع ایجاد شده و حداکثر ارتفاع از کلیه لایه‌ها استخراج شد. همچنین در آبراهه‌ها حداقل ارتفاعات مورد بررسی قرار گرفت.



نگاره ۴: مدل رقومی ارتفاعی SRTM با تفکیک مکانی ۳۰ متر



نگاره ۵: مدل رقومی ارتفاعی SRTM با تفکیک مکانی ۹۰ متر



نگاره ۷: تحلیل همبستگی خطی پیرسون مربوط به مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در دشت

جدول ۱: فرمول‌های اعتبار یابی، که در آن: μ میانگین، Δh مقدار اختلاف ارتفاعی مدل رقومی ارتفاعی و مقدار مرجع و n تعداد مشاهدات است

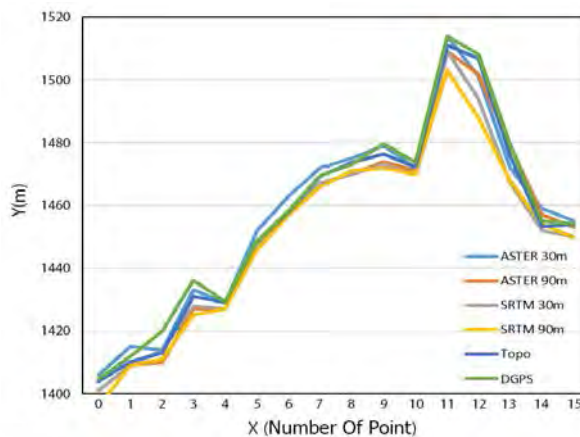
نتایج و بحث
 ● بررسی میزان انطباق مشاهدات در مدل‌های رقومی ارتفاعی مورد مطالعه

● بررسی میزان انطباق مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در دشت
 برای بررسی میزان ارتباط مقادیر ارتفاع به دست آمده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف با داده‌های مرجع به دست آمده از نمونه برداری زمینی با استفاده از DGPS از تحلیل همبستگی خطی پیرسون استفاده گردید. در تمامی موارد میزان انطباق بسیار عالی بوده و همواره بیش از ۹۷ درصد است. کمترین مقدار انطباق مشاهدات مربوط به SRTM ۹۰ متر (۹۷/۴۴ درصد) و بیشترین آن مربوط به مدل رقومی

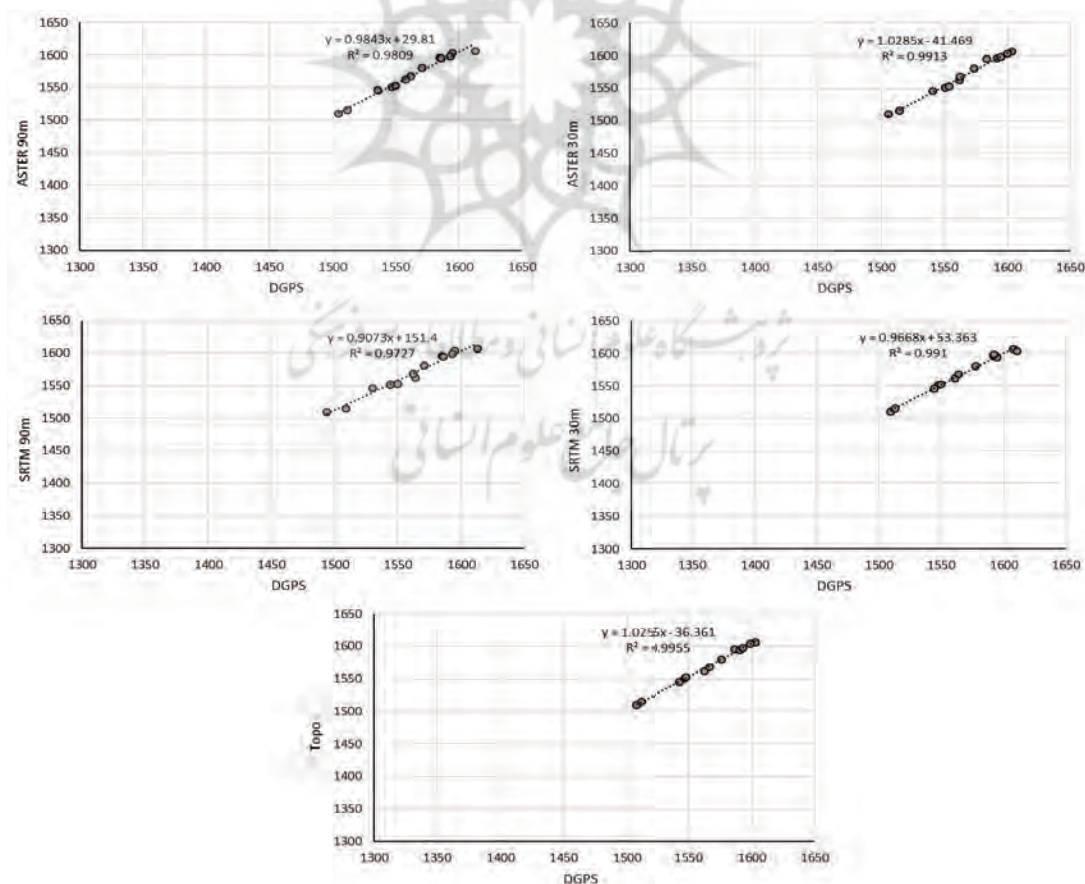
نحوه محاسبه	پارامتر
$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i^2}$	جذر میانگین مربعات خطا
$\hat{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i$	خطای میانگین
$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \hat{\mu})^2}$	انحراف استاندارد

● بررسی میزان انطباق مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در تپه ماهور ارتفاعی به دست آمده از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ (۹۹/۵۸) درصد است (نگاره ۷ و ۸).

برای بررسی میزان ارتباط مقادیر ارتفاع به دست آمده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف با داده‌های مرجع به دست آمده از نمونه‌برداری زمینی با استفاده از DGPS در منطقه تپه ماهور در تمامی موارد میزان انطباق بسیار عالی بوده و همواره بیش از ۹۷ درصد است.
 کمترین مقدار انطباق مشاهدات مربوط به SRTM90 به مدل رقومی ارتفاعی نقشه ۱:۲۵۰۰۰ متر (۹۷/۲۷ درصد) و بیشترین آن مربوط به مدل رقومی ارتفاعی نقشه ۱:۲۵۰۰۰ (۹۹/۵۵ درصد) می‌باشد (نگاره‌های ۹ و ۱۰).



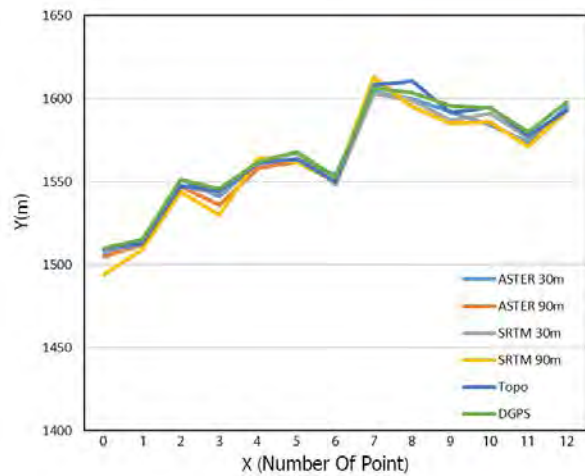
نگاره ۸: میزان انطباق ارتفاع به دست آمده از مدل رقومی ارتفاعی مختلف با داده‌های DGPS در لندفرم دشت



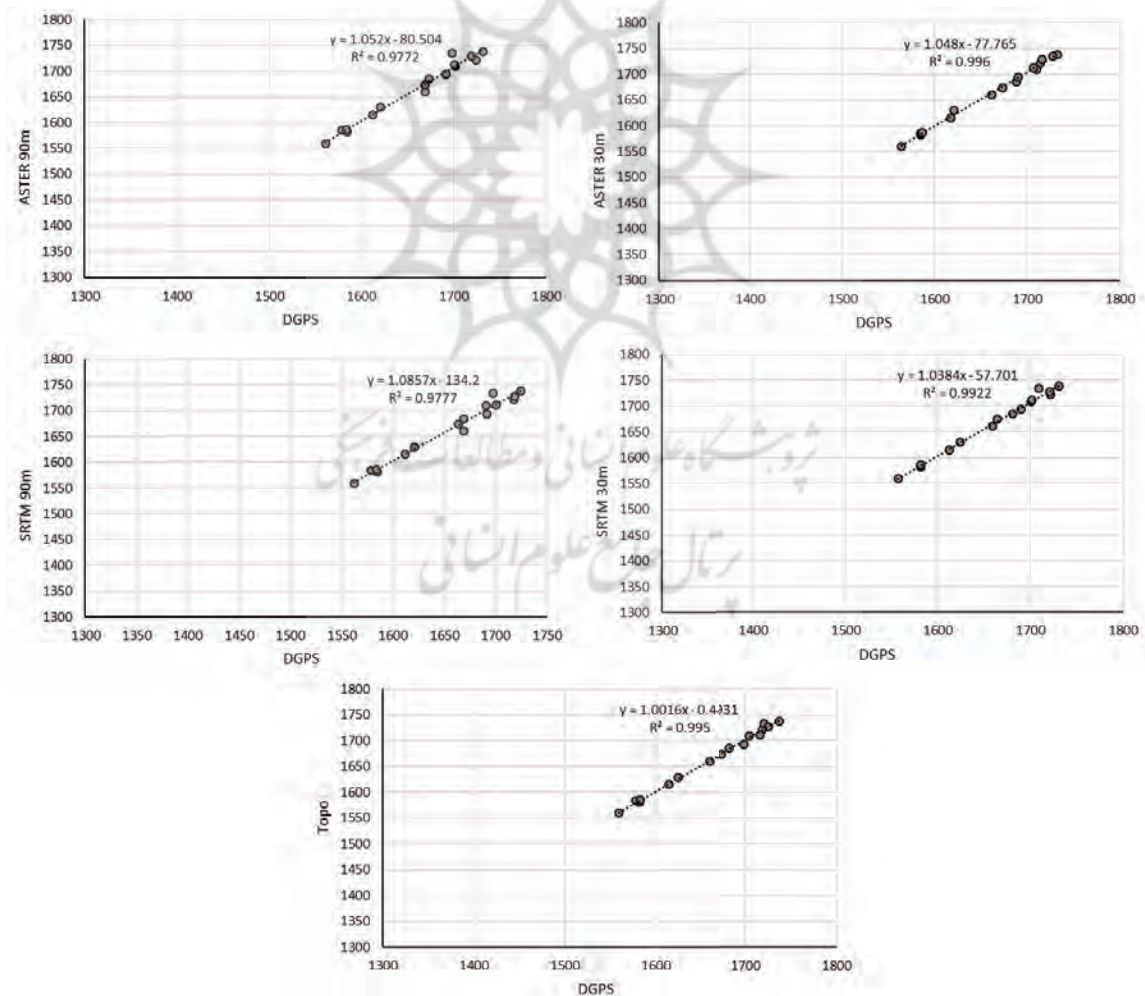
نگاره ۹: تحلیل همبستگی خطی پیرسون مربوط به مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در تپه ماهور

● بررسی میزان انطباق مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در کوهستان

بررسی میزان ارتباط مقادیر ارتفاع به دست آمده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف با داده‌های مرجع به دست آمده از نمونه برداری زمینی با استفاده از DGPS در منطقه کوهستان در نگاره‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌گردد در تمامی موارد میزان انطباق بسیار عالی بوده و همواره بیش از ۹۷ درصد است. کمترین مقدار انطباق مشاهدات مربوط به ASTER90 متر (۹۷/۷۰ درصد) و بیشترین آن مربوط به ASTER30 متر (۹۹/۶۰ درصد) است.



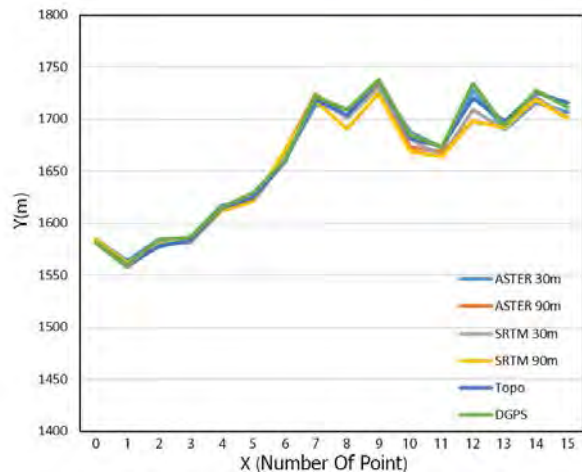
نگاره ۱۰: میزان انطباق ارتفاع به دست آمده از مدل رقومی ارتفاعی مختلف با داده‌های DGPS در لندفرم تپه ماهور



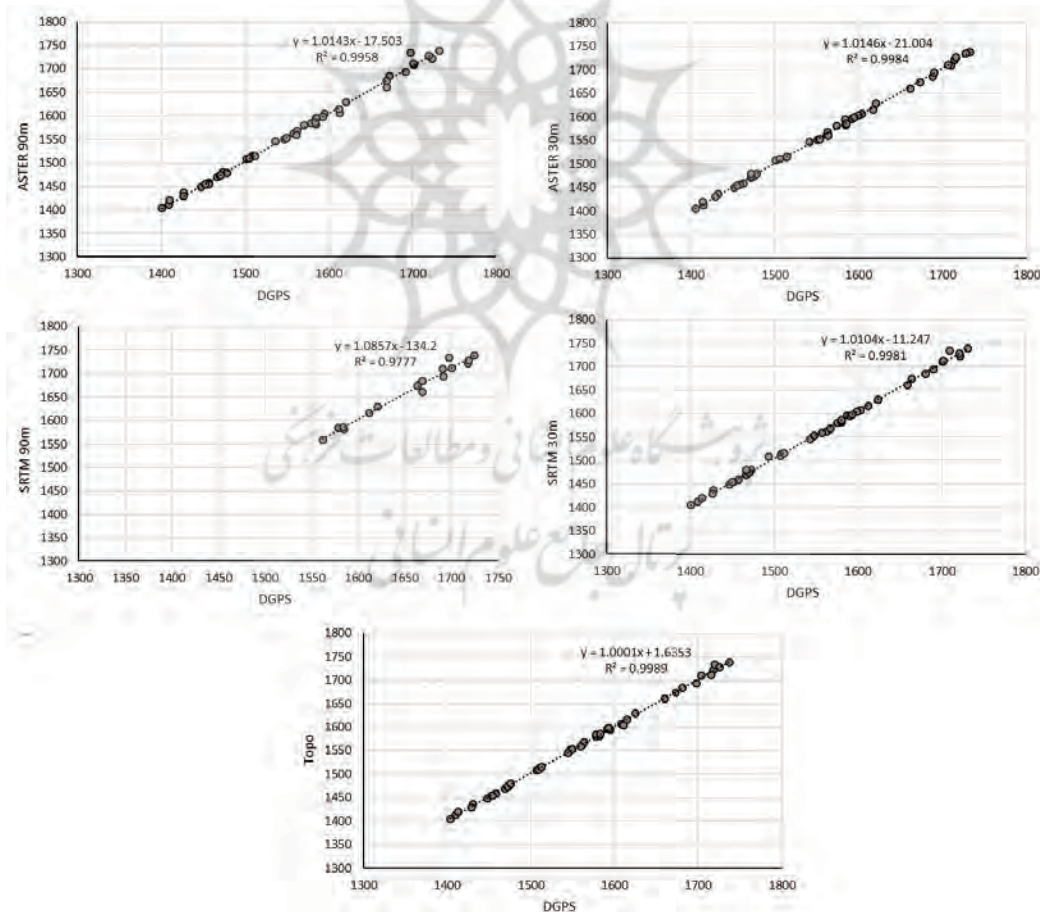
نگاره ۱۱: تحلیل همبستگی خطی پیرسون مربوط به مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در کوهستان

● بررسی میزان انطباق مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در کل منطقه

نتایج بررسی میزان ارتباط مقادیر ارتفاع به دست آمده از مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف با داده‌های مرجع به دست آمده از نمونه برداری زمینی با استفاده از DGPS در کل منطقه در نگاره‌های ۱۳ و ۱۴ نشان داده شده است. چنان که ملاحظه می‌گردد در تمامی موارد میزان انطباق بسیار عالی بوده و همواره بیش از ۹۹ درصد است. بیشترین مقدار انطباق مربوط به مدل رقومی ارتفاعی نقشه ۱:۲۵۰۰۰ می‌باشد.



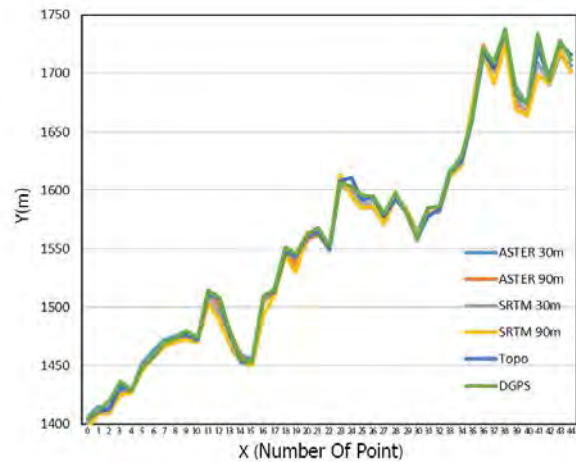
نگاره ۱۲: میزان انطباق ارتفاع به دست آمده از مدل رقومی ارتفاعی مختلف با داده‌های DGPS در لندفرم کوهستان



نگاره ۱۳: تحلیل همبستگی خطی پیرسون مربوط به مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف در کل منطقه

جدول ۲: پارامترهای آماری مختلف مدل‌های رقومی مورد

Topo	بررسی				
	SRTM 90m	SRTM 30m	ASTER 90m	ASTER 30m	
۱۳۸۶۰۰	۱۳۹۱۰۰	۱۳۸۶۰۰	۱۳۹۰۰۰	۱۳۸۴۰۰	Min
۲۱۷۷۰۰	۲۱۷۶۰۰	۲۱۷۷۰۰	۲۱۷۶۰۰	۲۱۸۷۰۰	Max
۱۶۷۷۱۰	۱۶۷۷۰۵	۱۶۷۷۱۰	۱۶۷۷۴۹	۱۶۸۰۶۰	Mean
۲۰۰/۱۰	۲۰۰/۰۷	۲۰۰/۱۰	۲۰۰/۱۱	۱۹۹/۴۱	Std



نگاره ۱۴: میزان انطباق ارتفاع به دست آمده از مدل رقومی ارتفاعی مختلف با داده‌های DGPS در کل منطقه

برای بررسی دقت و صحت هر یک از مدل‌های رقومی مورد مطالعه از پارامترهای آماری جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، اربیبی (μ) و انحراف (δ) استاندارد استفاده شد (جدول ۳). چنانکه ملاحظه می‌گردد عموماً میزان جذر میانگین مربعات خطا که نشان دهنده خطای مدل رقومی ارتفاعی است با سخت تر شدن ناهمواری‌ها افزایش می‌یابد. این امر در خصوص همگی مدل‌های رقومی ارتفاعی مورد بررسی صادق است. با مقایسه منابع مختلف ایجاد DEM می‌توان ملاحظه نمود که کمترین خطا در وهله اول مربوط به مدل رقومی ارتفاعی استخراج شده از خطوط میزان نقشه ۱:۲۵۰۰۰ ($RMSE=6/27$) و پس از آن مدل رقومی ارتفاعی ASTER با اندازه پیکسل ۳۰ متر ($RMSE=7/43$) است. همواره اندازه پیکسل ۳۰ متر نتایج بهتری نسبت به پیکسل

مقایسه دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی

برای مقایسه دقت و صحت مدل‌های رقومی ارتفاعی ابتدا پارامترهای توصیفی هر یک از مدل‌های ارتفاعی استخراج گردید. جدول ۲ نشان دهنده پارامترهای استخراج شده است. نتایج نشان می‌دهد که تقریباً مدل‌های رقومی استخراج شده انطباق کاملی با هم دارند. چنانکه ملاحظه می‌گردد، میانگین ارتفاع به دست آمده از هر یک از مدل‌های رقومی ارتفاعی در یک بازه ۱۰ متری می‌گنجد.

جدول ۳: مقایسه دقت و صحت مدل‌های رقومی مورد بررسی

Topo	SRTM 90m	SRTM 30m	ASTER 90m	ASTER 30m	لندفرم
۲/۷۰	۸/۱۵	۶/۱۷	۴/۵۷	۳/۷۵	دشت
-۱/۸۱	-۶/۴۰	-۴/۹۶	-۳/۴۰	-۰/۲۷	
۲/۰۷	۵/۲۱	۳/۷۹	۳/۱۶	۳/۸۶	
۳/۰۸	۸/۰۵	۳/۷۱	۶/۱۷	۳/۹۴	تپه ماهور
-۱/۳۷	-۶/۶۲	-۳/۴۷	-۵/۳۱	-۳/۱۶	
۳/۲۶	۶/۲۴	۲/۳۱	۴/۴۹	۳/۱۵	
۴/۷۴	۱۲/۶۴	۸/۲۵	۱۱/۰۳	۵/۰۶	کوهستان
-۲/۱۷	-۷/۶۳	-۵/۹۴	-۵/۶۳	-۲/۰۰	
۴/۳۵	۱۰/۴۱	۵/۹۱	۹/۸۰	۴/۸۰	
۶/۲۷	۱۷/۰۶	۱۰/۹۵	۱۳/۴۴	۷/۴۳	کل
-۲/۱۷	-۷/۶۳	-۵/۹۴	-۵/۶۳	-۲/۰۰	
۴/۳۵	۱۰/۴۱	۵/۹۱	۹/۸۰	۴/۸۰	

رقومی ارتفاع (ASTER) با مدل رقومی ارتفاعی SRTM و یک مدل رقومی ارتفاعی محلی مربوط به منطقه‌ای در جنوب غربی ایران را بررسی نمودند. نتایج حاصل، وجود بایاس ارتفاعی منفی در حدود $5/4$ - متر و $8/2$ - متر را در مدل GDEM V2 به ترتیب نسبت به دو مدل SRTM و مدل محلی نشان داد. علاوه بر این میان خطای GDEM V2 نسبت به مدل محلی برابر $7/3$ - متر بود که از میانه‌ی خطای این مدل نسبت به SRTM کمتر بود. جذر میانگین مربعات خطای اختلاف ارتفاعات نیز در GDEM V2 نسبت به دو مدل SRTM و مدل محلی با هم برابر و حدود $3/8$ متر بود. برتری مدل رقومی ارتفاعی ASTER نسبت به SRTM را شفيعی خورشیدی و همکاران (۱۳۹۰) به این دلیل دانسته‌اند که سنجنده ASTER به علت تصویربرداری در امتداد پرواز، مدل رقومی ارتفاع دقیق‌تری را به دست می‌دهد. رکنی دیلمی و همکاران (۱۳۸۶) نیز در تحقیقی از تصاویر ASTER جهت تولید DEM استفاده نمودند. دقت ارتفاعی برای DEM حاصله از ASTER در این مطالعه $\pm 26/4$ به دست آمده است.

بر خلاف تحقیق ما، نتایج RMSEZ این تحقیق در مناطق دشتی و کوهستانی نشان داد که دقت DEM در مناطق دشتی کمتر می‌باشد. و لذا با توجه به نتایج حاصله از تحقیق پیش‌رو می‌توان نتیجه گرفت که جهت انجام مطالعات فاز صفر و یک پروژه‌ها و همچنین کاهش هزینه‌های هنگفت مطالعات و برداشت‌های زمینی می‌توان از تصاویر سنجنده استر با اندازه‌ی پیکسل 30 متر و نقشه‌های $1:250000$ موجود با دقت قابل قبول بهره برد که نسبت به دیگر منابع به‌روزتر و دارای تطابق بهتری بوده و به سهولت قابل دسترس می‌باشند. البته امروزه با ورود فناوری‌های راداری پیشرفته‌تر در عرصه تحقیقات جغرافیایی، می‌توان از این تصاویر راداری نیز در تهیه مدل‌های ارتفاع رقومی استفاده کرد، یکی از این مدل‌ها، مدل ارتفاع رقومی 15 متری ماهواره ALOS است، که مقایسه دقت این مدل با مدل‌های کار شده کنونی، می‌تواند موضوع مطالعات بعدی قرار گیرد.

90 متر داشته است. بر اساس معیار خطای میانگین، کمترین اریبی مربوط به ASTER30 متر (2 متر اریبی) و پس از آن مربوط به مدل رقومی $1:250000$ ($2/17$) است. بیشترین اریبی مربوط به مدل‌های 30 و 90 متری استخراج شده از داده‌های SRTM بود. نتایج خطای انحراف استاندارد منطبق بر نتایج RMSE بود که تأیید کننده بهتر بودن مدل رقومی ارتفاعی $1:250000$ و ASTER30 متر بود.

جمع بندی و نتیجه گیری

در این پژوهش براساس نتایج، ضریب تعیین رابطه داده‌های زمینی با مدل‌های رقومی ارتفاعی بین 97 تا 99 به دست آمد. بیشترین انطباق مربوط به مدل رقومی ASTER30 متر و مدل رقومی مستخرج از داده‌های توپوگرافی $1:250000$ و کمترین انطباق مربوط به داده‌های SRTM90 متر می‌باشد. در مجموع با دشوارتر شدن شرایط عرصه یعنی از دشت به کوهستان، انطباق مدل‌های رقومی زمین با داده‌های زمینی برداشت شده کاهش یافت. نتایج بررسی صحت و دقت مدل‌های رقومی نشان داد که کمترین خطا در وهله اول مربوط به مدل رقومی ارتفاعی استخراج شده از خطوط میزان نقشه $1:250000$ ($RMSE=6/27$) و پس از آن مدل رقومی ارتفاعی ASTER با اندازه پیکسل 30 متر ($RMSE=7/43$) است. همواره اندازه پیکسل 30 متر نتایج بهتری نسبت به پیکس 90 متر داشته است. بر اساس معیار خطای میانگین، کمترین اریبی مربوط به ASTER30 متر (2 متر اریبی) و پس از آن مربوط به مدل رقومی $1:250000$ ($2/17$) است. بیشترین اریبی مربوط به مدل‌های 30 و 90 متری استخراج شده از داده‌های SRTM بود. نتایج خطای انحراف استاندارد منطبق بر نتایج RMSE بود که تأیید کنند بهتر بودن مدل‌های رقومی ارتفاعی مستخرج از داده‌های توپوگرافی $1:250000$ و مدل رقومی ارتفاعی ASTER30 متر می‌باشد.

مقایسه مطالعات قبلی در این زمینه نسبتاً با نتایج به دست آمده از این تحقیق همخوانی دارند بطور مثال، علیدوست و دادرس جوان (۱۳۹۲) نیز نتایج دقت GDEM V2 (مدل جهانی

منابع و مآخذ

سد تهم، استان زنجان)، تحقیقات کاربردی خاک، جلد ۳،

شماره ۲، صص ۴۲-۵۴.

8. Alganci, U., Besol, B., Sertel, E., (2018). Accuracy Assessment of Different Digital Surface Models, *International Journal of Geo-Information* 7(114): 1-16.

9. Ashourloo, D., (2007). An Evaluation of Hydrological Pit Filling Methods in the Ekbatan Watersheds. *Environmental sciences* 4(3): 49-60.

10. Chaieb A., Rebai, N., Bouaziz, S., 2016, Vertical Accuracy Assessment of SRTM Ver 4.1 and ASTER GDEM Ver 2 Using GPS Measurements in Central West of Tunisia, *Earth & Environmental Sciences*, 8(1): 231-252.

11. Ebaid, H., 2014, Accuracy Enhancement of SRTM and ASTER Dems Using Weight Estimation Regression Model. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 3(8): 1231-1244.

12. Jacobsen, K., 2004- DEM Generated by SPOT HRS. *ISPRS Congress, Istanbul*, 20: 439-444.

13. Jing L., (2005). Accuracy and reliability of map-matched GPS coordinates the dependence on terrain model resolution and interpolation algorithm. *Computers&Geosciences* 31: 241-251.

14. Lin, Z. and Oguchi, T., (2006). DEM Analysis on Longitudinal and Transverse Profile of Steep Mountainous Watersheds. *Geomorphology* 78: 125- 135.

15. Sandip M., 2013- Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21(2): 205-217.

16. Sefercik.U.G. (2012). Performance Estimation of Aster Global DEM Depending upon the Terrain Inclination, *J Indian Society of Remote Sensing* (December 2012) 40(4):565-576.

17. Stage, F., Bonnet, M., Timouk, F., Garnier, J., 2015, Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat/GLAS data, *International Journal of Remote Sensing* 36(2): 541-562.

18. Thompson, J., Bell, J. and Butler, C., (2001). Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soillandscape modeling. *Geoderma* 100: 67-89.

19. Zevenbergen, L. W. and Thorne, C. R., (1987). Quantitative Analysis of land surface topography. *Earth surface processes and landforms*, 12: 45 - 56.

20. Zhang, W.H. and Montgomery, D.R., (1994). Digital elevation model grid size, landscape representation & hydrologic simulations. *Water Resources Research* 30:1019-1028.

۱. آقا طاهر، صمدی، لعلی نیت، نجفی؛ رضا، مهدی، ایلیا، ایمان؛ ۱۳۹۵؛ ارزیابی مقایسه ای صحت ارتفاعی مدل های رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM، فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۵، شماره ۹۹، صص ۱۰۳ - ۱۱۳.

۲. اشرفی، علیمی؛ علی، محمد امیر؛ ۱۳۹۳؛ مقایسه روش های مختلف تهیه مدل ارتفاع رقومی مورد شناسی: حوضه آبخیز نوفرست، شهرستان بیرجند، استان خراسان جنوبی، جغرافیا و آمایش شهری - منطقه ای، دوره ۴، شماره ۱۴، صص ۱۱۹ - ۱۴۰.

۳. حسین زاده، نداف سنگانی؛ سیدرضا، مهوش؛ ۱۳۹۲؛ ارزیابی دقت مدل های رقومی ارتفاع (DEMs) حاصل از نقشه های توپوگرافی و مقایسه ی تطبیقی آن با DEM های ماهواره ای (مطالعه ی موردی: DEM های توپوگرافی و ASTER منطقه ی آبنغه در خراسان رضوی، مجله پژوهش های جغرافیای طبیعی، دوره ۴۵، شماره ۱، صص ۷۱ - ۸۶.

۴. حسین زاده، جهادی؛ سید رضا، مهناز؛ ۱۳۸۹؛ ارزیابی دقت مدل های رقومی ارتفاع (DEMs) و الگوریتم های GIS در تحلیل های مورفومتری رودخانه ای (نمونه مورد مطالعه : حوضه آبریز رباط قره بیل در خراسان شمالی)، جغرافیا و توسعه ناحیه ای، دوره ۱۷، شماره ۱۴، صص ۶۶ - ۷۶.

۵. عزیزیان، شکوهی؛ اصغر؛ علیرضا؛ ۱۳۹۳؛ بررسی اثر روش های مختلف ساخت مدل های رقومی ارتفاعی بر عملکرد مدل نیمه توزیعی TOPMODEL، تحقیقات منابع آب و خاک ایران، سال دهم، شماره ۱، صص ۱۱۱-۱۱۶.

۶. فیضی زاده، عبدالله آبادی، ولی زاده؛ بختیار، سلیمه، خلیل؛ ۱۳۹۵؛ مدل سازی عدم قطعیت حاصل از داده های ارتفاعی SRTM و ASTER و تأثیر آن بر طبقه بندی لندفرم ها در حوضه ی آبریز گرم چای. فصلنامه علمی پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)، دوره ۲۶، شماره ۱۰۳، صص ۲۹ - ۴۱.

۷. مروج، دلاور، صادق بیگی؛ کامران، محمد امیر، اکرم؛ ۱۳۹۴؛ عنوان اهمیت انتخاب مدل رقومی ارتفاعی مناسب در مدیریت و حفاظت منابع خاک و آب (مطالعه موردی: