



ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و GDEM با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی NIDEM

عبداله سیف^۱، بابک ابراهیمی^{۲*}

۱. استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه اصفهان
۲. دانشجوی دوره دکتری ژئومورفولوژی، دانشکده جغرافیا، دانشگاه اصفهان

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۲/۱/۱۷

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۹/۲۳

چکیده

هدف اصلی این پژوهش بررسی دقت و صحت ویرایش اول و دوم مدل‌های رقومی ارتفاعی استخراجی از ماهواره آستر (GDME1, 2009) با دقت تفکیک مکانی ۳۰ متر و مقایسه آن با مدل رقومی SRTM (تفکیک مکانی ۹۰ متر) و مدل رقومی تهیه‌شده به‌وسیله سازمان نقشه‌برداری کشور (تفکیک مکانی ۱۰ متر) است. به این منظور سه نوار مطالعاتی که دربرگیرنده نواحی‌ای از کشور با خصوصیات ژئومورفولوژی مختلف‌اند انتخاب شدند و مدل‌های مذکور در این سه نوار مورد بررسی قرار گرفتند. پس از حذف محدوده دریاچه‌ها، هر سه لایه به روش موسوم به کویک به مدل‌های رقومی با دقت مکانی یک آرک ثانیه تبدیل شده‌اند. همچنین لایه‌های تفاضلی بین مدل‌های رقومی مختلف محاسبه گردید و توزیع خطا در گستره محدوده‌های مطالعاتی در مدل‌های مختلف به صورت دو به دو بررسی شد. با استفاده از دیگرام پراکندگی بین مدل‌های رقومی مختلف و بررسی ابر پراکنش آنها، به مطالعه نوع و میزان خطاهای مختلف پرداخته شد. برای مقایسه بصری بهتر، مدل سایه روشن ارتفاعی سه‌بعدی و نیم‌رخ‌های توپوگرافی در امتداد خطاهای شناسایی‌شده برای هر سه مدل رقومی ترسیم گردید. نتایج این تحقیق نشان داده است که مدل GDME1 دارای خطاهای عمده‌ای در مقایسه با مدل SRTM است که بیشتر از ماهیت و نحوه تهیه این مدل ناشی می‌شود. نتایج حاکی از انواع ناهنجاری‌ها همچون خطای پله‌ای، ناهنجاری‌های حفره‌ای، برآمدگی و برآمدگی‌های حفره‌دار است که در مرز بین زون‌های دو استاک مختلف ایجاد شده‌اند. دامنه خطای این ناهنجاری‌ها از چند ده متر تا بیش از ۳۰۰ متر مشاهده می‌شود. نتایج این پژوهش در عین حال نشان داد که میانگین خطای مدل GDME1 در حدود ۴/۸ متر با انحراف استاندارد ۱۳/۸ متر، و در سطح اطمینان ۹۵ درصد دامنه تغییرات آن بین ۳۱/۹ و ۲۲/۳- متر است. بررسی مدل رقومی GDME2 نشان از بهبود جدی کیفیت این مدل در قیاس با ویرایش قبلی دارد. در مدل GDME2 بسیاری از خطاهای ویرایش نخست حذف شده و میانگین خطای آن کمتر از ۳ متر با انحراف استاندارد ۹/۱ متر است که در سطح اطمینان ۹۵ درصد دامنه تغییرات آن بین ۱۴/۸ و ۲۰/۸- متر خواهد بود. بررسی مدل رقومی SRTM نشان داده است که میانگین خطای آن کمتر از ۲ متر با انحراف استاندارد ۸/۷ متر، و در سطح اطمینان ۹۵ درصد دامنه تغییرات میانگین بین ۱۹/۱ و ۱۵/۱- متر است. نتایج نشان می‌دهد مدل GDME1 به‌رغم آنکه با تفکیک مکانی ۳۰ متر منتشر شده است، عملاً فاقد جزئیات مدل رقومی ارتفاعی ۳۰ متری است و کاربرد آن محدودیت‌های عمده‌ای دارد. همچنین مدل GDME2 با توجه به رفع بسیاری از مشکلات ویرایش نخست دقت مناسبی در مقایسه با SRTM و NIDEM دارد و صرف‌نظر از خطاهای با دامنه کوتاه (نویز) این مدل در صورت اطمینان از نبود خطاهای محلی می‌تواند به عنوان مدل رقومی ارتفاعی سی‌متری به کار رود.

کلیدواژه‌ها: SRTM، NIDEM، GDME1، GDME2، مدل رقومی ارتفاعی، ناهنجاری.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: اصفهان، بلوار هزار جریب، دانشکده علوم جغرافیایی و برنامه‌ریزی، دانشگاه اصفهان

۱- مقدمه

امریکا (NASA)، آژانس ملی اطلاعات زمینی امریکا (NGA) و مشارکت آژانس فضایی ایتالیا و آلمان با نام داده‌های شاتل رادار برای تهیه نقشه‌های توپوگرافی^۳ (SRTM) منتشر گردید. مدل رقومی ارتفاعی SRTM با تفکیک مکانی متفاوتی منتشر شده اما آنچه در محدوده منطقه ایران به رایگان در اختیار عموم کاربران قرار گرفته است دارای تفکیک مکانی ۳ آرک ثانیه است. به گفته تولیدکنندگان داده‌های SRTM، اشعه رادار توان عبور از ابر را دارد و بدین ترتیب سنجنده‌های راداری با محدودیتی از نظر پوشش ابر مواجه نیستند. داده‌های رادار در مناطق دارای پوشش گیاهی نیز عملکرد خوبی دارند لیکن در مناطق دارای پوشش بسیار متراکم جنگلی میزان نفوذ رادار کاهش می‌یابد و این خود می‌تواند منجر به افزایش خطا گردد. البته با به‌کارگیری فیلترهای خاص می‌توان این مشکل را تا حدود زیادی رفع کرد (Rodriguez et al., 2005؛ Carabajal and Harding؛ Hofton et al., 2006). لازم به ذکر است که داده‌های SRTM ممکن است تحت تأثیر خطاهای ناشی از کاهش برگشت امواج رادار - یا برنگشتن این امواج - قرار گیرند در این حالت کم شدن موج برگشتی عموماً ناشی از سایه‌های راداری در شیب‌های بسیار تند، نواحی بسیار صاف (مانند سطح آب) و سطوح متفرق‌کننده امواج (مانند سطوح ماسه‌ای) است (Ham, 2005). امواج رادار در زمین‌های پوشیده از یخ یا خاک بسیار خشک نیز نفوذ می‌کنند و در این حالت موج برگشتی معرف سطح واقعی زمین نیست (Seal et al., 2007).

علاوه بر مدل SRTM، در سالیان اخیر استخراج داده‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر تحلیل داده‌های ماهواره ASTER^۴ نیز مورد توجه قرار گرفته است (Hirano et al., 2003؛ Kamp et al., 2003). مدل

مدل‌های رقومی ارتفاعی^۱ امروزه در بسیاری از رشته‌های علوم زمین به کار گرفته می‌شوند. تحلیل‌های معمول توپوگرافی مانند استخراج متوسط، حداقل و حداکثر ارتفاع، تفکیک سیستم‌های ارضی، استخراج پارامترهای مرتبط با برجستگی^۲ های توپوگرافی، داده‌های هیپسومتری، شیب سطوح، بررسی گرادیان طولی رودخانه‌ها، استخراج خصوصیات هندسی لندفرم‌ها، مخروط‌افکنه‌ها، مورن‌های یخچالی، زمین‌لغزش‌ها، لندفرم‌های بیابانی، استخراج شبکه آبراهه‌ها، میزان اشعه دریافتی از خورشید در سطوح مختلف و بسیاری تحلیل‌های دیگر همچون کاربردهای مدل‌های رقومی ارتفاعی در بررسی‌های ژئومورفیک است (Irvin 1997؛ Roberts and Cunningham؛ Klingseisen 2004؛ Bubenzer؛ Paul, et al., 2004؛ Bolch et al., 2008؛ Desmet and Kirkby 1990؛ and Bolten 2008؛ Sobel et al.,؛ Dietrich et al., 1993؛ Govers 1995). با توجه به دامنه فراوان کاربرد مدل‌های رقومی ارتفاعی در مطالعات یادشده، اطمینان یافتن از دقت و صحت این مدل‌ها بسیار اهمیت دارد. ارزش و دقت داده‌های یادشده می‌تواند تأثیر مستقیمی بر دقت تحلیل‌های ژئومورفیک بگذارد و بی‌توجهی به آن، ارزش و اعتبار تحلیل‌ها را با تردید جدی مواجه می‌سازد.

اگرچه در مطالعات محلی می‌توان با انجام نقشه‌برداری‌های زمینی یا هوایی و یا استفاده از تکنیک‌های خاصی چون لیزر اسکن و جز آن، مدل‌های رقومی با دقت و صحت بالا تهیه کرد؛ اما هزینه تهیه این نوع داده‌ها معمولاً زیاد است و در همه طرح‌ها نیز توجیه‌شدنی نیست. در کنار این داده‌ها، امروزه داده‌های رقومی ارتفاعی با دقت کمتری وجود دارند که در اختیار عموم پژوهشگران علوم زمین قرار می‌گیرند. از جمله این داده‌ها می‌توان به داده‌های رقومی ارتفاعی SRTM، GDEM و مدل رقومی ارتفاعی منتشرشده سازمان نقشه‌برداری کشور اشاره کرد.

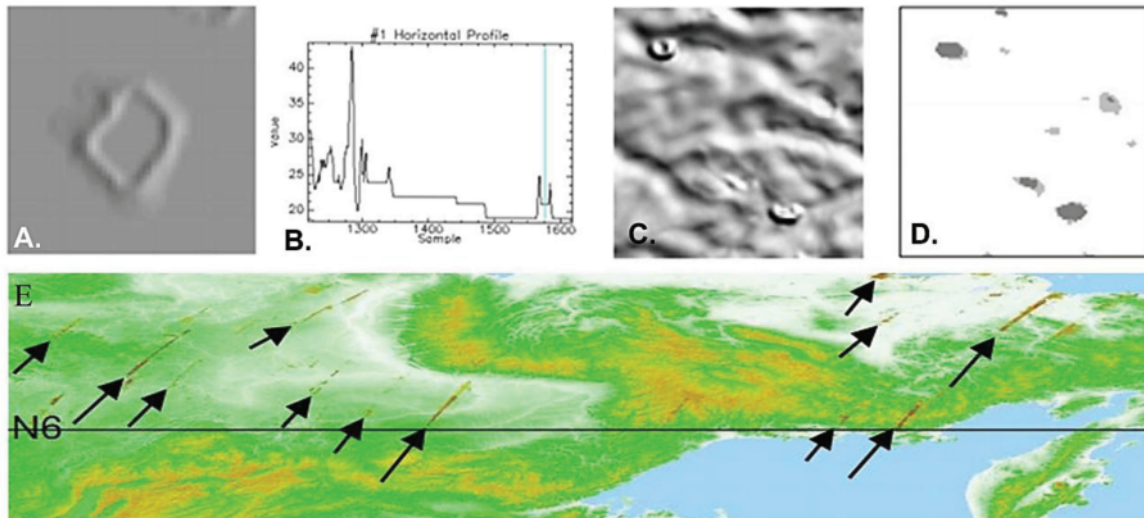
مدل رقومی ارتفاعی موسوم به SRTM در فوریه سال ۲۰۰۰ با همکاری مشترک سازمان فضانوردی

1. Digital Elevation Model (DEM)
2. Relief
3. Shuttle Radar Topography Mission
4. Advanced Space borne Thermal Emission and Reflection Radiometer-ASTER

ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و GDEM با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی NIDEM

ناهنجاری رفتاری خطی دارند و طول‌شان ممکن است به چندین کیلومتر برسد و در عرض‌های پایین‌تر نیز مشاهده می‌شوند. خطای رایج دیگر در تصاویر GDEM ناهنجاری پله‌ای^۴ است. این ناهنجاری در مرزهای خطی بین زون‌های مربوط به دو عدد استاک متفاوت ایجاد می‌گردد و حداکثر آن برابر با ۱۰ متر ارزیابی شده است. این مدل رقومی علاوه بر خطای یادشده دارای برخی خطاهای خاصی است که در شکل ۱ به تعدادی از آنها اشاره شده است. خطای ارتفاعی داده‌های ویرایش اول برای کل محدوده تهیه شده (عرض ۸۳ شمالی ۸۳ جنوبی) در سطح اطمینان ۹۵ درصد برابر با ۲۰ متر (تیم ارزیابی مدل رقومی ارتفاعی آستر، ۲۰۰۹) و برای ویرایش دوم داده‌ها برابر با ۱۷ متر ارزیابی شده است (تیم ارزیابی مدل رقومی ارتفاعی آستر، ۲۰۱۱).

رقومی ارتفاعی موسوم به GDEM^۱ براساس تحلیل داده‌های ماهواره یادشده در ۲۹ ژوئن ۲۰۰۹ به‌وسیله وزارت اقتصاد ژاپن بخش تجارت و صنعت^۲ و سازمان فضایی آمریکا^۳ با تفکیک مکانی ۱ آرک ثانیه منتشر گردید. این داده‌ها که به مدل رقومی ارتفاعی ویرایش اول (GDEM۱) موسوم‌اند، محدوده‌ای از کره زمین را در حد فاصل عرض جغرافیایی ۸۳ درجه شمالی تا ۸۳ درجه جنوبی پوشش می‌دهد. ویرایش دوم این مدل رقومی (GDEM۲) را در اکتبر سال ۲۰۱۱ همان تهیه‌کنندگان ویرایش اول ارائه کردند، که در آن برخی از خطاها و عیوب مدل اول اصلاح شده است. در تهیه مدل GDEM به تصاویر بدون پوشش ابر نیاز است. در غیر این صورت ناهنجاری خطی ناشی از باقی‌مانده ابرها به‌خصوص در عرض شمالی بالای ۶۰ و عرض جنوبی زیر ۵۶ بر روی مدل رقومی بسیار تأثیرگذار است. این



شکل ۱. برخی از انواع ناهنجاری مدل GDEM: برآمدگی‌های حفره‌دار^۵ به همراه نیمرخ طولی مرتبط (A-B)، ناهنجاری برآمدگی^۶ (C-D) و ناهنجاری خطی ناشی از اثر پوشش ابر (E)

1. Global Digital Elevation Model
2. METI
3. NASA
4. Step anomalies
5. Pit in Bump
6. Bump

نوار به ابعاد ۴۰۰ در ۵۵، ۴۰۰ در ۵۲، و ۲۸۸ در ۵۰ کیلومتر با مساحت مجموع ۵۶ هزار کیلومتر مربع در محدوده داخلی کشور انتخاب گردید. سه نوار انتخابی به گونه‌ای در نظر گرفته شدند که عمود بر ۵ ناحیه مورفوتکتونیک ایران باشند و چشم‌اندازهای مختلفی چون کوهستان، دشت، تپه و نظایر اینها را با صفحات شیبدار مختلف در برگیرند و نواحی مهمی چون زون زاگرس چین خورده، زاگرس مرتفع، سنندج سیرجان، ایران مرکزی و بخش‌هایی از گودال‌های مرکزی ایران را پوشش دهند (شکل ۲). مساحت این نوارها به ترتیب ۲۲۰۴۴، ۲۰۰۹۴ و ۱۳۸۹۴ کیلومتر مربع برای نوارهای شماره ۱، ۲ و ۳ است که در محدوده جغرافیایی ۴۴'-۴۹° تا ۳۰'-۵۵° طول شرقی و ۵۴'-۳۱° تا ۱۲'-۳۴° عرض شمالی قرار گرفته‌اند.

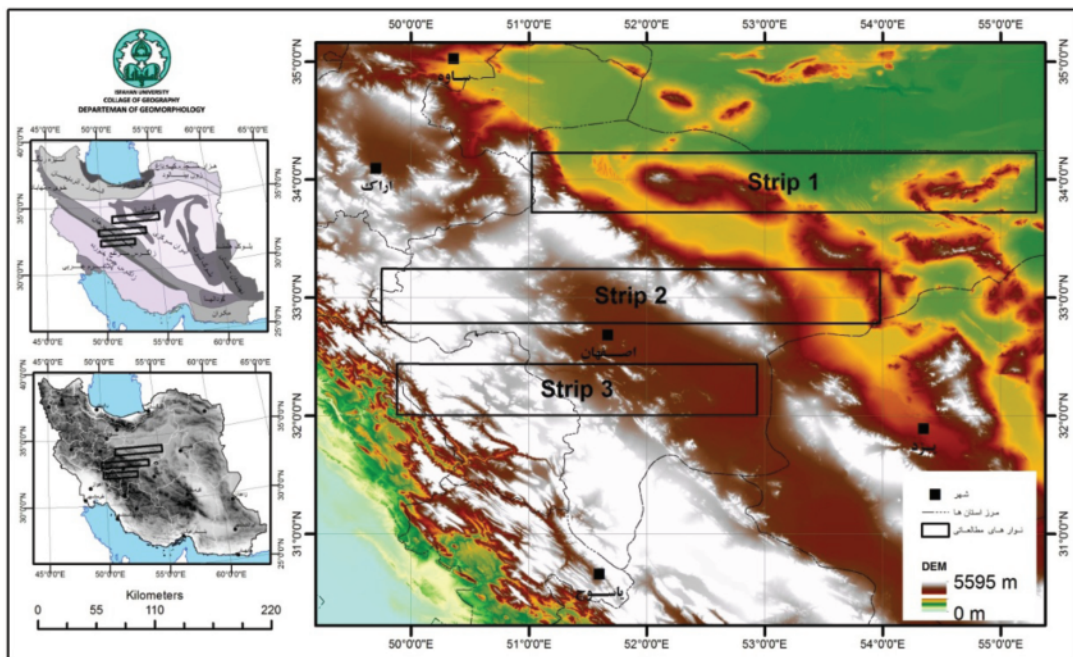
داده‌های رقومی ارزیابی شده، عبارت‌اند از داده‌های رقومی ارتفاعی SRTM، داده‌های رقومی ارتفاعی GDEM (ویرایش اول و دوم) و داده‌های رقومی ارتفاعی سازمان نقشه‌برداری که خصوصیات اصلی آنها در ادامه ارائه می‌گردد.

مدل‌های رقومی ارتفاعی تهیه‌شده سازمان نقشه‌برداری کشور، از دیگر مدل‌های رقومی ارتفاعی است که می‌توان در مطالعات ناحیه‌ای ایران به کار گرفت. این مدل با تفکیک مکانی ۱۰ متر برای اکثر نقاط کشور با هزینه اندک در دسترس است.

با توجه به اینکه تیم ارزیابی مدل رقومی ارتفاعی GDEM دقت مدل را در عرض‌های مختلف عنوان کرده (Krieger et al., 2011)، در این تحقیق بررسی دقت و به‌خصوص صحت ویرایش‌های اول و دوم مدل GDEM و SRTM در سرزمین ایران در نظر گرفته شده است. به این منظور مدل‌های رقومی SRTM و ویرایش اول و دوم GDEM با مدل‌های رقومی ۱۰ متری ایران (تهیه‌شده در سازمان نقشه‌برداری) مقایسه شده و حدود و دامنه کاربرد این داده‌ها بررسی گردیده و مهم‌ترین انواع خطاهای مشاهده‌شده در این داده‌ها معرفی شده است.

۲- مواد و روش‌ها

به‌منظور مقایسه مدل‌های رقومی ارتفاعی مختلف، سه



شکل ۲. موقعیت نوارهای مطالعاتی در نقشه ایران، نواحی مورفوتکتونیک ایران و مدل رقومی ارتفاعی SRTM

منتشر شده است. در فرایند تولید و تهیه GDEM^۱ از آرشيو ۱/۲ میلیون فریم تصویر ماهواره ASTER استفاده شده است. در ویرایش دوم این مدل رقومی (GDEM^۲)، افزون بر داده‌های قبلی، از ۲۶۰ هزار فریم ماهواره آستر استفاده شده است تا برخی از خطاها و عیوب مدل اول اصلاح گردد. عدد موسوم به استاک^۳ که برای هر یک از پیکسل‌های مدل رقومی در فایل جداگانه منتشر شده، معرف تعداد سین مورد استفاده در تولید رقم ارتفاعی آن پیکسل است.

ج) داده‌های رقومی ارتفاعی سازمان نقشه‌برداری کشور: گروه سوم از مدل‌های رقومی موجود در ایران، مدل‌های رقومی تهیه‌شده سازمان نقشه‌برداری کشورند که دقت و اعتبار به مراتب بالاتری از مدل‌های یادشده دارند. کار تهیه مدل ارتفاعی رقومی (DEM) ایران از چند سال قبل در سازمان نقشه‌برداری کشور آغاز شد. تهیه این داده‌ها که در این مقاله نامیده می‌شوند، براساس اطلاعات ارتفاعی نقشه‌های رقومی ۱/۲۵۰۰۰ انجام گرفته است. براساس اطلاعات منتشرشده سازمان نقشه‌برداری کشور، تا کنون مدل رقومی زمین با وضوح ۱۰ متر و دقت ارتفاعی بهتر از ۶ متر برای بیش از ۸۵ درصد کشور تهیه شده است. قدرت تفکیک مکانی این داده‌ها ۱۰ متر است، که در سیستم تصویر UTM منتشر شده‌اند. مبنای تولید این داده‌ها نقشه‌های ارتفاعی رقومی در مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ است که با شبکه نقاط ارتفاعی مرجع کشور کنترل شده و مبنای سطح ارتفاعی آن ایستگاه بندرعباس است. این داده‌ها در فرمت TIF و GRD منتشر گردیده‌اند.

به‌منظور مقایسه مدل‌های مختلف، تمامی مدل‌ها به سیستم مختصات جغرافیایی با سیستم تصویر USGS۸۴ تبدیل گردیده است. از آنجا که محدوده دریاچه‌های داخلی در تمامی مدل‌ها خطای معنی‌داری

الف) مدل رقومی ارتفاعی SRTM: این مدل حدود ۸۰ درصد سطح زمین (دارای پوشش جهانی از ۵۶ درجه جنوبی تا ۶۰ درجه شمالی) را پوشش می‌دهد و با استفاده از شاتل فضایی اندیور^۱ در ۱۱ فوریه سال ۲۰۰۰ مبتنی بر روش تکنیک تداخل سنجی رادار^۲ تهیه شده (Rosen et al., 2000)؛ و داده‌های SRTM از ارتفاع ۲۲۳۳ کیلومتری با پهنای باند ۲۳۲۵ کیلومتر تهیه شده است. مدل رقومی ارتفاعی رادار شاتل در ساختاری رستری (در فرمت ۱۶ بیتی) سازمان یافته است که هر یک از آنها محدوده‌ای برابر با یک درجه طول و عرض جغرافیایی را پوشش می‌دهد. این داده‌ها در ویرایش‌های مختلف و با نام‌های SRTM^۱، SRTM^۳ و SRTM^{۳۰} (با قدرت تفکیک مکانی یک آرک ثانیه، ۳ آرک ثانیه و ۳۰ آرک ثانیه) نام‌گذاری و منتشر شده‌اند. قدرت تفکیک مکانی یک آرک ثانیه در خط استوا تقریباً حدود ۳۰ متر زمین است و به همین خاطر در برخی از منابع آنها را داده‌های ۳۰ متری و ۹۰ متری می‌نامند.

ب) مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر ماهواره ASTER: این داده‌ها در دو ویرایش (GDEM^۲)، ماهواره آستر تهیه و منتشر شده است. سنجنده‌های ماهواره‌ای آستر شامل ۳ باند در محدوده طیفی بصری و مادون قرمز نزدیک (VNIR)، شش باند در محدوده مادون قرمز طول موج کوتاه (SWIR) و پنج باند در محدوده طیفی مادون قرمز حرارتی (TIR) است. در محدوده طیفی VNIR به‌وسیله تلسکوپ‌های ۳N و ۳B تصاویر استریو قائم و اریب (با زاویه دید ۲۷/۷ درجه) برداشت شده‌اند که مبنای استخراج داده‌های رقومی ارتفاعی است. این داده‌ها با دقت تفکیک زمینی یک آرک ثانیه (تقریباً ۳۰ متر) در قالب چهارگوش‌هایی به ابعاد درجه در ۱ درجه منتشر شده است و محدوده بین عرض‌های ۸۳ درجه شمالی و ۸۳ درجه جنوبی را پوشش می‌دهد. فرمت داده‌های GDEM از نوع GEOTIFF است و در مختصات سیستم جغرافیایی

1. Endeavour
2. Radar interferometry
3. Stack number

را نشان می‌دهد - و تهیه‌کنندگان مدل‌ها نیز به آن اشاره کرده‌اند - محدوده دریاچه‌ها از هر چهار مدل رقومی ارتفاعی حذف شده است تا امکان مقایسه بهتر بین آنها فراهم آید. در مرحله بعد تمام مدل‌ها به روش موسوم به Cubic به مدل‌های رقومی با دقت مکانی یک آرک ثانیه (حدود ۳۰ متر) تبدیل شده‌اند (Keeratikasikorn and Trisirisatayawong, 2008).

در مرحله بعد لایه‌های تفاضلی بین مدل‌های رقومی مختلف با یکدیگر و با مدل رقومی NIDEM، به‌منظور برآورد خطا، مدل‌ها در نواحی مختلف مناطق مطالعاتی محاسبه شدند. به این منظور اختلاف بین لایه رقومی NIDEM با لایه‌های GDEM (ویرایش اول و دوم) و SRTM، و همین‌طور اختلاف بین لایه GDEM (ویرایش اول) و لایه SRTM به ازای هر نوار مطالعاتی محاسبه و در لایه‌های مجزا ذخیره گردید. در شکل‌های ۳ تا ۵ لایه‌های رقومی منتج از محاسبه تفاضل مدل‌های مختلف در هر سه نوار مطالعاتی ارائه شده است. در این شکل‌ها به‌خوبی می‌توان توزیع خطای ارتفاعی ارائه‌شده در مدل‌ها را به صورت دودویی مشاهده و آنها را مقایسه کرد. مهم‌ترین پارامترهای آماری لایه‌های تفاضلی تولیدشده، در جدول ۱ مشاهده می‌شود. مقادیر آماری ارائه‌شده در این جدول مربوط به حدود ۲۸ و ۲۵/۵ و ۱۶ میلیون سلول، به ترتیب به ازای نوارهای ۱ و ۲ و ۳ است.

به‌منظور تحلیل دقیق‌تر خطای مدل‌های رقومی، نمودارهای توزیع خطای آنها نسبت به مدل NIDEM نیز تهیه و ارائه شده است. برای تهیه این نمودارها ابتدا لایه‌های تفاضلی با کلاسه‌بندی مناسب در محیط GIS طبقه‌بندی گردید و سپس با توجه به مساحت هر کلاس اقدام به ترسیم نمودارها شد. اهمیت این نمودارها در مقایسه توزیع مکانی خطاهای مدل‌های رقومی است. در شکل ۶ نمودارهای توزیع خطای کلاسه‌بندی شده مدل‌های GDEM۲ نسبت NIDEM (راست)، GDEM۱ نسبت NIDEM (وسط) و SRTM نسبت NIDEM (چپ) برحسب درصد مساحت هر سه

نوار ارائه شده است.

به‌منظور شناخت نوع خطاها در مدل‌های رقومی اقدام به ترسیم دیاگرام پراکندگی^۱ بین مدل‌های رقومی مختلف در محیط نرم‌افزار ENVI شد. بدین منظور محدوده‌ای از هر سه مدل رقومی که براساس بررسی لایه‌های تفاضلی، خطای جدی داشته‌اند، انتخاب گردید و دیاگرام‌های پراکنش بین مدل‌های رقومی GDEM1-NIDEM، GDEM2-NIDEM و SRTM-NIDEM ترسیم شد. بدیهی است در صورت مشابهت کامل دو مدل رقومی تمامی نقاط باید بر روی یک خط با ضریب زاویه یک قرار گیرند و هر گونه تفاوت بین دو مدل باعث انحراف از این خط می‌شود. در شکل ۷ سه دیاگرام پراکندگی به همراه محدوده متناظر در مدل‌های رقومی مربوط به نوار شماره ارائه شده است. دو نمودار سمت چپ مربوط به دیاگرام پراکندگی GDEM2-NIDEM و GDEM1-NIDEM است که در ذیل آنها تصویری از چهارگوش مرتبط با نمودار پراکندگی از مدل‌های GDEM1 و GDEM2 ارائه شده است. محدوده‌های مشخص‌شده به رنگ قرمز، با نواحی مشخص‌شده در مدل‌های رقومی ارتفاعی ذیل هر نمودار، متناظرند. نمودار سوم نیز مربوط به پراکنش SRTM-NIDEM به همراه تصویر متناظر آن در چهارگوش انتخابی مدل SRTM است. در سمت راست این تصویر مدل رقومی ارتفاعی NIDEM چهارگوش انتخابی ارائه شده است. دیاگرام و تصاویر مشابهی برای چهارگوش‌های انتخابی در نوارهای مطالعاتی دوم و سوم نیز تهیه شده است (شکل‌های ۸ و ۹).

علاوه بر موارد مذکور، به منظور مشاهده و آشکارسازی بیشتر خطاها در مدل‌های مختلف، نیمرخ توپوگرافی در امتداد خطاهای عمده برای تمام مدل‌ها ترسیم گردید و پس از مقایسه آنها با یکدیگر ارائه شد. مدل‌های سایه روشن ارتفاعی نیز به منظور مشاهده بصری بهتر در تفکیک خطاها برای تمامی مدل‌ها تهیه

1. Scatter Diagram

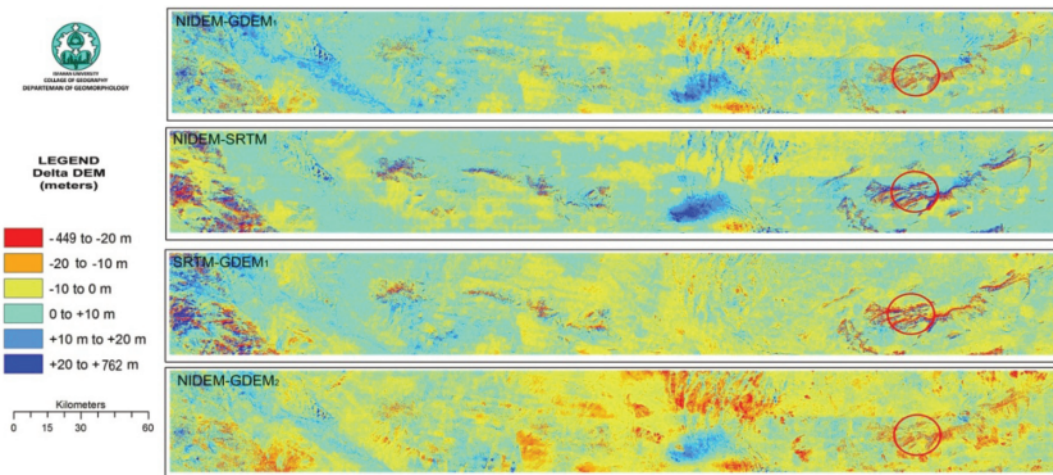
ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و GDEM با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی NIDEM

توپوگرافی در شکل ۱۰ در امتداد یکی از خط‌های بارز مشاهده شده (امتداد AB) ترسیم گردیده است. مدل سایه روشن ارتفاعی، مدل رقومی ارتفاعی و نیمرخ توپوگرافی محدوده‌های انتخابی در نوارهای مطالعاتی شماره دو و سه نیز در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ مشاهده می‌شوند.

و ارائه شده‌اند. در شکل ۱۰ برای هر چهار مدل رقومی مورد مطالعه در نوار یک، مدل سایه روشن ارتفاعی^۱ (بالا)، مدل رقومی ارتفاعی (میانه) و نیمرخ توپوگرافی (پایین) تهیه گردید. محدوده ارائه شده در این شکل، همان محدوده انتخابی در شکل ۷ است. مدل سایه روشن ارتفاعی به منظور مشاهده بصری بهتر هر چهار مدل و تفکیک و مقایسه خط‌ها ارائه شده است. نیمرخ

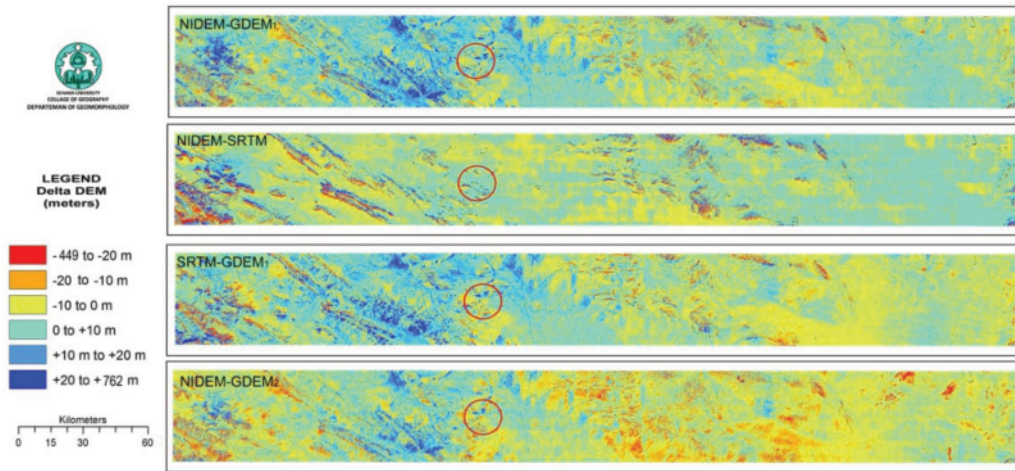
جدول ۱. پارامترهای آماری لایه اختلاف میان مدل‌های رقومی برای هر سه نوار مطالعاتی (برحسب متر)

نوار مطالعاتی	لايه تفاضلی	مساحت نوار مطالعاتی (km ²)	حداقل	حداکثر	میانگین در سطح اطمینان ۹۵ درصد	انحراف معیار	RMSE (est.)
Strip-۱	NIDEM-GDEM _۱	۲۲۰۴۴	-۳۳۰	۴۵۲	۲/۴±۱۶/۶	۸/۵	۹/۷
	NIDEM-GDEM _۲	۲۲۰۴۴	-۲۶۲	۲۴۳	-۳±۱۷/۸	۹/۱	۱۰/۶
	NIDEM-SRTM	۲۲۰۴۴	-۳۱۰	۱۸۸	۲±۱۷/۱	۸/۷	۹/۷
	SRTM-GDEM _۱	۲۲۰۴۴	-۳۱۳	۳۸۶	۰/۴±۱۸/۲	۹/۳	۹/۵
Strip-۲	NIDEM-GDEM _۱	۲۰۰۹۴	-۳۲۹	۴۸۸	۳/۲±۲۰/۴	۱۰/۴	۱۲
	NIDEM-GDEM _۲	۲۰۰۹۴	-۳۳۵	۲۶۲	-۱/۹±۱۹/۴	۹/۹	۱۰/۹
	NIDEM-SRTM	۲۰۰۹۴	-۳۲۳	۲۶۴	۱/۳±۱۷/۴	۸/۹	۹/۵۵
	SRTM-GDEM _۱	۲۰۰۹۴	-۲۹۷	۴۷۱	۱/۹±۲۰/۶	۱۰/۵	۱۱/۴۵
Strip-۳	NIDEM-GDEM _۱	۱۳۸۹۴	-۴۴۹	۶۵۴	۴/۸±۲۷/۱	۱۳/۸	۱۶/۲
	NIDEM-GDEM _۲	۱۳۸۹۴	-۳۲۴	۳۵۱	-۰/۴±۲۰/۶	۱۰/۵	۱۰/۷
	NIDEM-SRTM	۱۳۸۹۴	-۷۴۷	۵۴۵	۰/۵±۲۹/۶	۱۵/۱	۱۵/۳۵
	SRTM-GDEM _۱	۱۳۸۹۴	-۵۱۶	۷۶۲	۴/۳±۳۵/۵	۱۸/۱	۲۰/۲۵

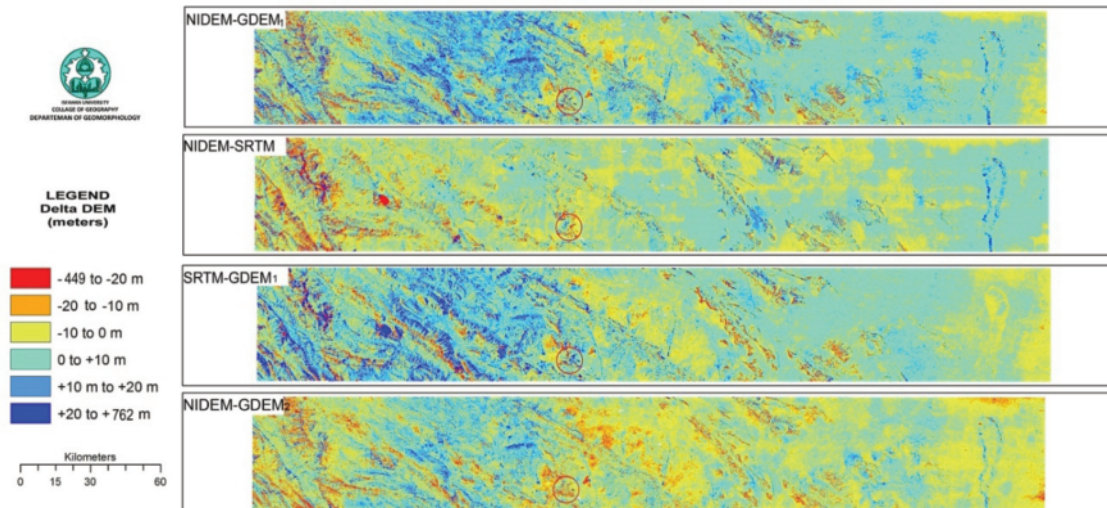


شکل ۳. لایه اختلاف ارتفاع بین مدل‌های رقومی مختلف در نوار مطالعاتی شماره ۱

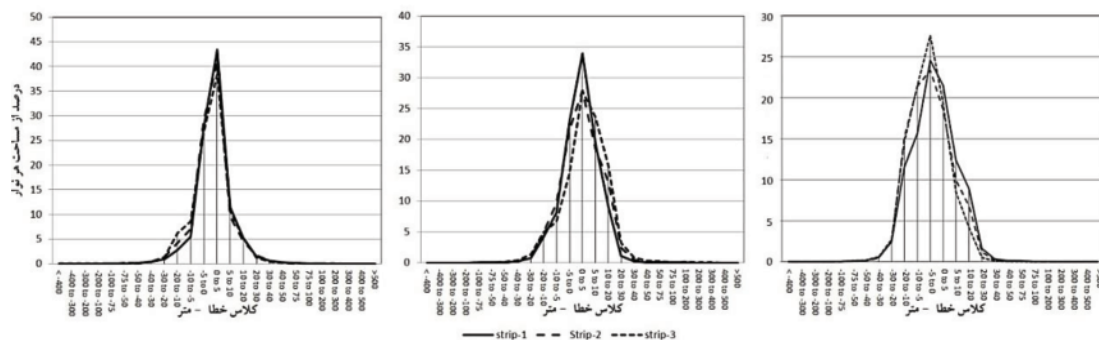
1. Hill Shade



شکل ۴. لایه اختلاف ارتفاع بین مدل‌های رقومی مختلف در نوار مطالعاتی شماره ۲

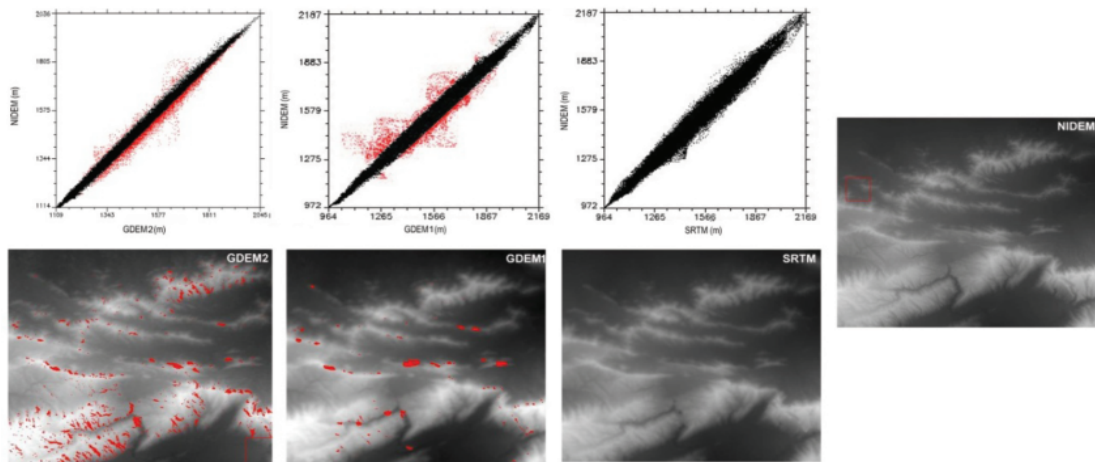


شکل ۵. لایه اختلاف ارتفاع بین مدل‌های رقومی مختلف در نوار مطالعاتی شماره ۳

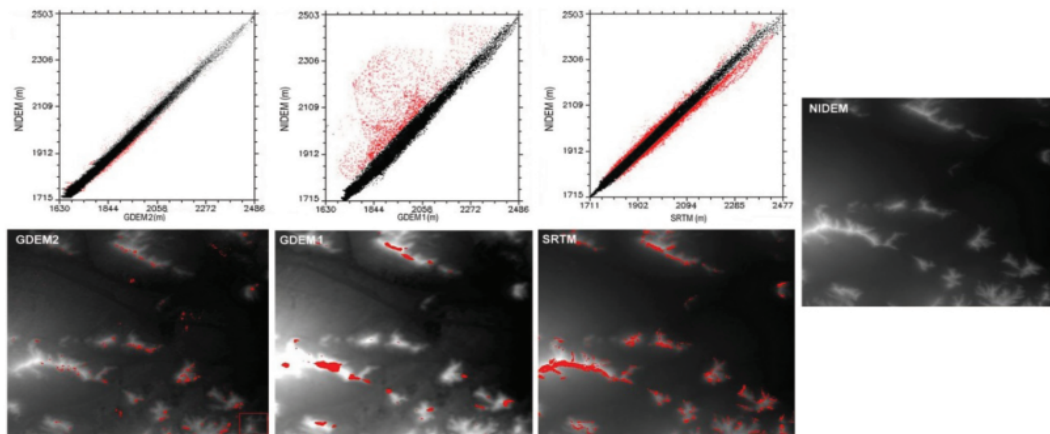


شکل ۶. در صد از مساحت هر نوار و دامنه خطای متناظر در مدل GDEM (ویرایش دوم) نسبت به مدل رقومی ارتفاعی NIDEM (سمت راست)، مدل GDEM (ویرایش اول) نسبت به مدل رقومی ارتفاعی NIDEM (وسط) و مدل STRM نسبت به مدل رقومی ارتفاعی NIDEM (سمت چپ).

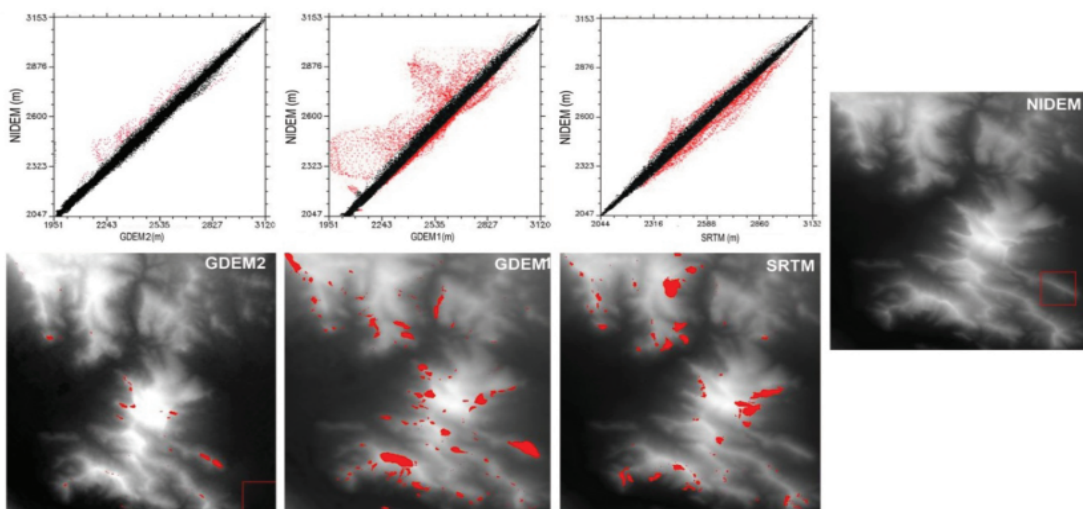
ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و GDEM با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی NIDEM



شکل ۷. دیاگرام پراکنش بین مدل‌های رقومی ارتفاعی و تصاویر متناظر از محدوده انتخابی در نوار مطالعاتی شماره ۱



شکل ۸. دیاگرام پراکنش بین مدل‌های رقومی ارتفاعی و تصاویر متناظر از محدوده انتخابی در نوار مطالعاتی شماره ۲



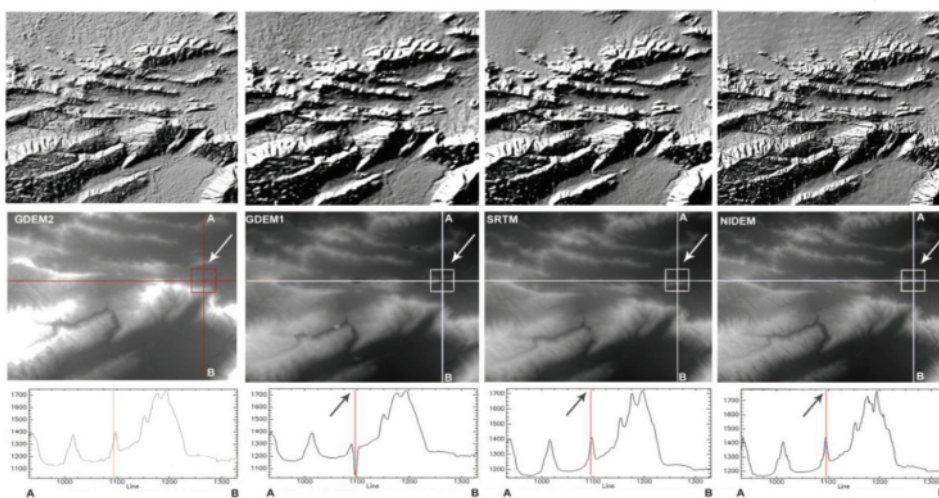
شکل ۹. دیاگرام پراکنش بین مدل‌های رقومی ارتفاعی و تصاویر متناظر از محدوده انتخابی در نوار مطالعاتی شماره ۳

۳- یافته‌های تحقیق

در این تحقیق به منظور بررسی دقت مدل‌های یادشده، آنها با مدل رقومی ارتفاعی NIDEM مقایسه شدند. برای این منظور تفکیک مکانی داده‌های دو مدل SRTM و NIDEM به یک آرک ثانیه (1 Arc Sec) تبدیل گردید. تغییر ابعاد پیکسل‌ها در مدل‌های SRTM و NIDEM به روش کوبیک منجر به تغییر معنی‌دار در پارامترهای آماری رقوم ارتفاعی (میانگین و انحراف استاندارد) نمی‌گردد (Keeratikasikorn and Trisirisatayawong, 2008). اگرچه براساس نتایج تحقیق تیم ارزیابی مدل GDEM2 دقت سطوح دریاچه‌ها در ویرایش دوم - در قیاس با ویرایش اول - بهبود زیادی یافته است، اما با توجه به معنی‌دار بودن این خطا در مدل‌های GDEM1 و SRTM، قبل از مقایسه این داده‌ها اقدام به جداسازی محدوده آب‌ها از تمامی مدل‌ها شد.

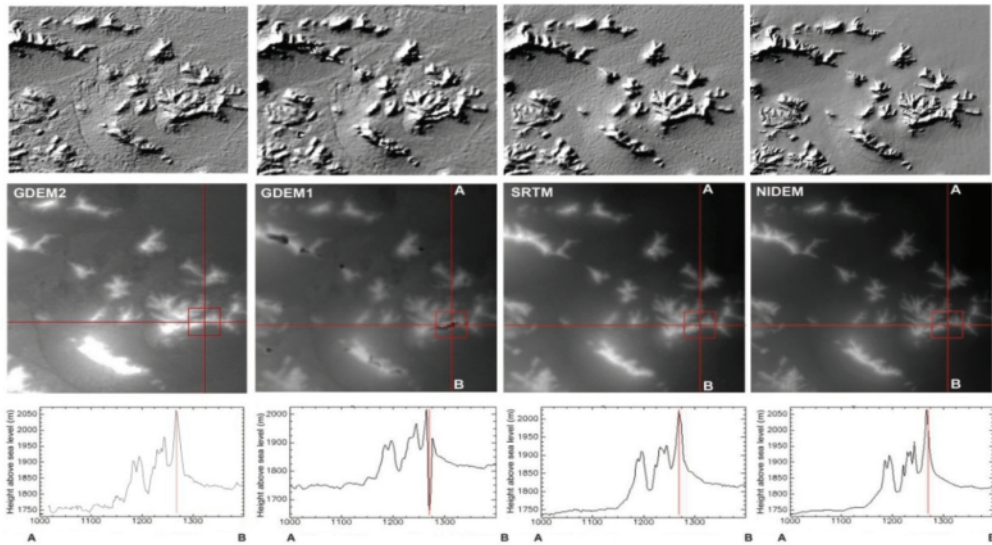
همان‌گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌گردد، دامنه تغییرات لایه تفاضلی NIDEM-GDEM1 بین حداقل ۴۴۹- متر تا حداکثر ۶۵۴ متر (در نوار سوم)، و میانگین این اختلاف بین ۲/۴ متر الی ۴/۸ متر است. با در نظر گرفتن انحراف استاندارد ۱۳/۸ متری در نوار سوم (متناظر با میانگین حداکثر مشاهده‌شده در نوار سوم) دامنه تغییرات میانگین خطا در سطح اطمینان ۹۵ درصد دامنه بین ۳۱/۹ و ۲۲/۳- متر خواهد بود.

توجه به لایه تفاضلی نشان می‌دهد که عمده این خطاها مربوط به نواحی کوهستانی است. با بررسی شکل ۵ (نمودار سمت راست) مشخص می‌گردد که در مدل تفاضلی NIDEM-GDEM1 به ترتیب ۵۷ و ۴۹ و ۴۲ درصد از مساحت نوارهای ۱ و ۲ و ۳ دارای خطایی در محدوده ± 5 متر و ۸۴ و ۷۷ و ۷۲ درصد دارای خطایی در محدوده ± 10 متر هستند. به عبارت دیگر، براساس مقایسه با مدل NIDEM، در نوارهای مطالعاتی ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب ۱۶ و ۲۳ و ۲۸ درصد مناطق، خطایی بیش از ۱۰ متر دارند. تیم ارزیابی مدل GDEM1 (Aster GDEM Validation Team, 2009) متوسط این خطا را در مقایسه با SRTM برابر با ۵/۳- متر (با انحراف معیار برابر با ۷/۷۵ متر و RMSE برابر با ۹/۷۳ ارزیابی کرده‌اند. همچنین متوسط این خطا در محدوده غربی و شمال عراق حدود ۵- متر برآورد شده است. نیز براساس ارزیابی این تیم و در پی مقایسه با دیگر منابع مرجع خطای مدل GDEM1 در جمع‌بندی کلی در سطح اطمینان ۹۵ درصد حدود ۲۰ متر برآورد شده است. تیم ارزیابی مدل GDEM2 (Aster GDEM Validation Team, 2011) متوسط این خطا را برای GDEM1 برابر با ۶/۱- متر نیز گزارش کرده‌اند (در سطح اطمینان ۹۵ درصد در دامنه ۲۳/۱- الی ۱۰/۹ متر) (Krieger et al., 2011).

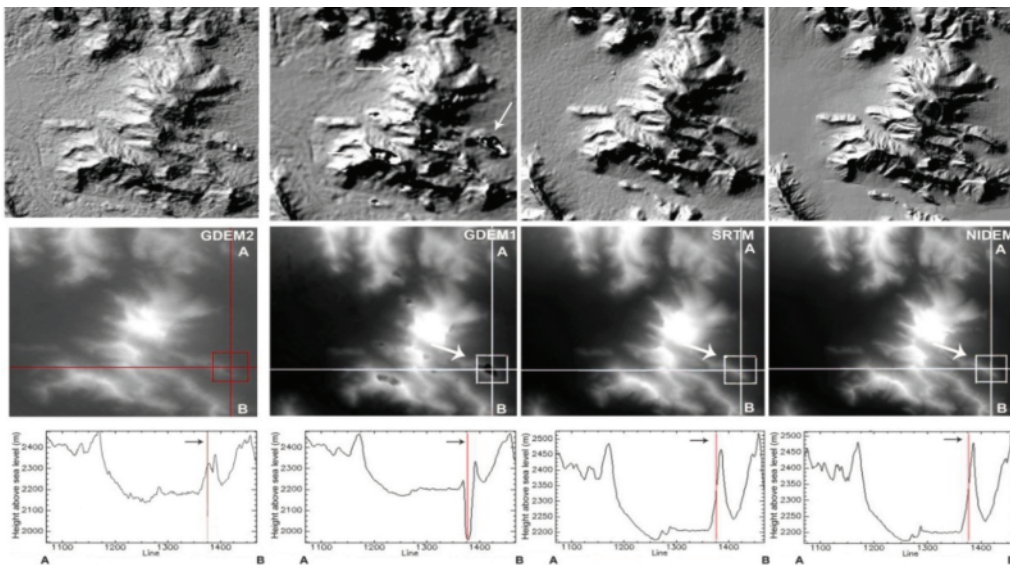


شکل ۱۰. مدل سایه روشن ارتفاعی (بالا)، مدل رقومی (میان) و نیمرخ توپوگرافی (پایین) در راستای محور A-B در مدل‌های رقومی GDEM2، GDEM1، SRTM و NIDEM مربوط به محدوده انتخابی در نوار مطالعاتی شماره یک

ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و GDEM با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی NIDEM



شکل ۱۱. مدل سایه روشن ارتفاعی (بالا)، مدل رقومی (میان) و نیمرخ توپوگرافی (پایین) در راستای محور A-B در مدل‌های رقومی GDEM2، GDEM1، SRTM و NIDEM مربوط به محدوده انتخابی در نوار مطالعاتی شماره دو



شکل ۱۲. مدل سایه روشن ارتفاعی (بالا)، مدل رقومی (میان) و نیمرخ توپوگرافی (پایین) در راستای محور A-B در مدل‌های رقومی GDEM2، GDEM1، SRTM و NIDEM مربوط به محدوده انتخابی در نوار مطالعاتی شماره سه

انحراف استاندارد ۹/۱ متری در نوار اول (متناظر با میانگین حداکثر مشاهده شده در نوار اول (قدر مطلق خطا)، دامنه تغییرات میانگین خطا در سطح اطمینان ۹۵ درصد، دامنه بین ۱۴/۸ و ۲۰/۸ متر خواهد بود. بررسی شکل ۵ نمودار میانی) مشخص می‌سازد که در

در جدول ۱ دامنه تغییرات لایه تفاضلی NIDEM-GDEM2 ارائه شده، و دامنه این تغییرات بین حداقل ۳۳۵- متر تا حداکثر ۳۵۱ متر (در نوار دوم و سوم) مشاهده شده است. میانگین این اختلاف نیز بین ۰/۴- متر الی ۳- متر است. با در نظر گرفتن

تفاضلی NIDEM-SRTM (شکل ۶ سمت چپ) به ترتیب ۷۱ و ۷۰ و ۶۵ درصد از مساحت نوارهای ۱ و ۲ و ۳ دارای خطایی در محدوده ± 5 مترند؛ و ۸۶ و ۸۷ و ۸۴ درصد دارای خطایی در محدوده ± 10 متر هستند. یعنی در نوارهای مطالعاتی ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب ۱۳ و ۱۴ و ۱۶ درصد مناطق دارای خطایی بیش از ۱۰ متر هستند؛ و این قرابت بیشتر داده‌های SRTM به NIDEM را (نسبت به GDEM۱) نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که در مقالات مختلف منتشر شده، خطای داده‌های SRTM از نظر ارتفاع مطلق کمتر از ۱۶ متر و از نظر ارتفاع نسبی کمتر از ۱۰ متر در سطح اطمینان ۹۰ درصد ارزیابی شده است. طبق بررسی‌های تیم ارزیابی مدل رقومی GDEM۲ خطای مدل SRTM۱ (مدل ۳۰ متری) نسبت به نقاط کنترل زمینی به طور متوسط ۰/۷۶ متر ($RMSE=3/88$) و برای مدل SRTM۳ (مدل ۹۰ متری) برابر با ۰/۸۱ متر ($RMSE=4/12$) است (Aster GDEM Validation Team, 2011). شکل ۵ نشان می‌دهد که بالا بودن دامنه اختلاف در مدل SRTM عمومیت ندارد و تنها تحت تأثیر محدوده‌ای کوچک در بخش غربی نوار شماره ۳ است؛ و در دو نوار دیگر این دامنه کمتر از مدل GDEM۱ است. این در حالی است که توزیع خطا در مدل GDEM۱ در هر سه نوار مطالعاتی عمومیت می‌یابد و مقادیر بالاتری در مقایسه با SRTM دارد. همچنین ملاحظه می‌گردد که به‌رغم قرابت زیاد مدل GDEM۲ با SRTM، همچنان خطای مدل SRTM کمتر از مدل‌های استخراجی از داده‌های ماهواره آستر است.

با توجه به نمودارهای ارائه‌شده در شکل‌های ۷ و ۸ و ۹ خطای نسبتاً بالای مدل GDEM۱ را می‌توان مشاهده کرد. در واقع بسیاری از پیکسل‌های این مدل رقومی واقع در ابر نمودار پراکنش دارای اعداد ارتفاعی غیرواقعی است و در قیاس با مدل SRTM تطابق کمتری با خط ۴۵ درجه دارد. شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و

مدل تفاضلی NIDEM-GDEM۲ به ترتیب ۴۶ و ۴۲ و ۴۷ درصد از مساحت نوارهای ۱ و ۲ و ۳ دارای خطایی در محدوده ± 5 متر هستند؛ و ۷۴، ۷۳ و ۷۷ درصد دارای خطایی در محدوده ± 10 متر. به عبارت دیگر، براساس مقایسه با مدل NIDEM، در نوارهای مطالعاتی ۱ و ۲ و ۳ به ترتیب ۲۶ و ۲۷ و ۲۳ درصد مناطق خطایی بیش از ۱۰ متر دارند. مقایسه میانگین خطای مدل GDEM۲ با مدل GDEM۱ و بررسی نمودار شکل ۵، نشان می‌دهد که با وجود کاهش معنی‌دار خطا در ویرایش دوم مدل، ضریب رعنایی^۱ توزیع خطاها در مدل GDEM۲ کمتر از GDEM۱ است. به عبارت دیگر، در مدل GDEM۲ خطا دارای پراکنش بیشتری (حول میانگین) در مقایسه با مدل اول است؛ و گستره خطاها با دامنه کوچک در ویرایش دوم بیش از ویرایش اول است. به علاوه، مقادیر رقوم ارتفاعی نیز در ویرایش دوم به طور عمومی بیشتر از ویرایش اول است. تیم ارزیابی مدل GDEM۲ (Aster GDEM Validation Team, 2011) متوسط این خطا را در پی مقایسه با SRTM برابر با ۱/۵۷- متر (با انحراف معیار برابر با ۸/۸۲ متر در سطح اطمینان ۹۵ درصد در دامنه ۱۸/۱- الی ۱۵/۷ متر) ارزیابی کرده‌اند. براساس ارزیابی این تیم و با مقایسه با دیگر منابع مرجع خطای مدل GDEM۲ در جمع‌بندی کلی در سطح اطمینان ۹۵ درصد حدود ۱۷ متر برآورد شده است. براساس تحقیقات قبلی، متوسط اختلاف ویرایش دوم با اول در نواحی غربی ایران و شمال عراق بین ۵- الی ۱۰- متر است و داده‌های مدل دوم قرابت بیشتری با مدل SRTM دارند (Krieger et al., 2011).

در جدول ۱ دامنه تغییرات لایه تفاضلی NIDEM-SRTM را می‌توان مشاهده کرد. حداکثر میزان اختلاف رقوم ارتفاعی ارائه‌شده بین این دو مدل ۷۴۷ متر (در نوار سوم) است. میانگین این اختلاف نیز حداکثر ۲ متر با انحراف استاندارد ۸/۷ متر است که در سطح اطمینان ۹۵ درصد دامنه تغییرات میانگین بین ۱۹/۱ و ۱۵/۱- متر (در نوار اول) خواهد بود. از سوی دیگر در مدل

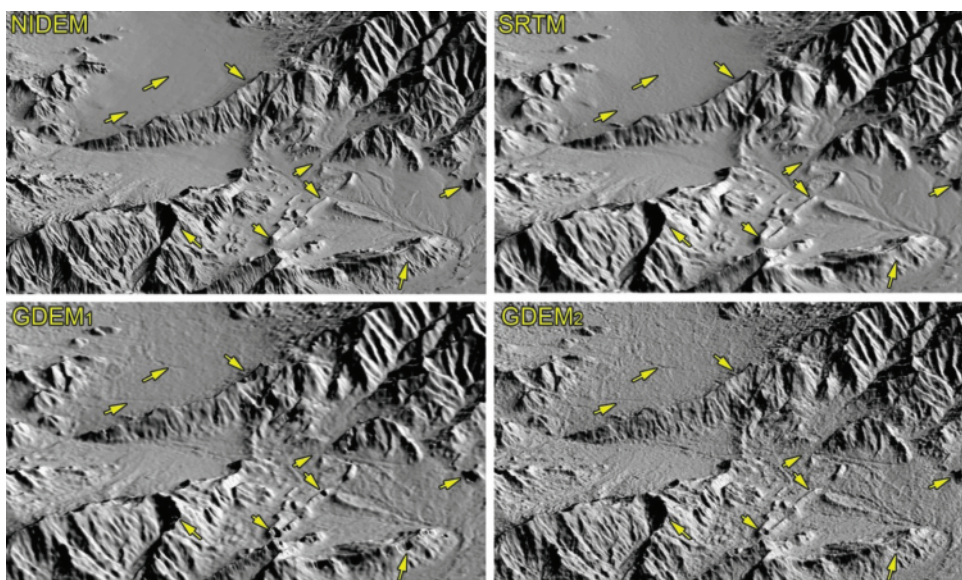
1. Kurtosis

ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و GDEM با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی NIDEM

ناهنجاری‌هایی هم در ویرایش دوم وجود دارد، اما شباهت زیادی بین این داده‌ها و مدل SRTM به چشم می‌خورد.

مدل سایه روشن ارتفاعی سه‌بعدی تمامی مدل‌های رقومی بررسی‌شده در بخشی از نوار شماره یک به‌منظور مقایسه میزان تفکیک مکانی و ناهنجاری‌ها در شکل ۱۳ ارائه شده است. در این شکل علاوه بر مشاهده نوع خطا و تأثیر آن بر توپوگرافی، می‌توان به مقایسه دقت هر چهار مدل ارائه‌شده نیز پرداخت. همان‌طور که اشاره شد، هر چهار مدل به‌منظور همسان شدن به روش کویک به مدل‌های رقومی با دقت مکانی یک آرک ثانیه (حدود ۳۰ متر) تبدیل شده‌اند. مقایسه مدل NIDEM با مدل‌های دیگر حاکی از آن است که مدل یادشده (به‌رغم کاهش دقت تفکیک مکانی از ۱۰ متر به ۳۰ متر) همچنان بیشترین جزئیات را نشان می‌دهد. برای این منظور کافی است نگاهی انداخته شود به مسیر آبراهه‌ها در بخش شرقی و بافت تصویر در نواحی کوهستانی.

۱۲، خصوصاً نیمرخ‌های توپوگرافی ارائه شده، شدت این خطاها را نشان می‌دهند. همان‌گونه که ملاحظه می‌گردد، مناطقی که به‌وضوح برجستگی مثبت دارند، در مدل GDEM₁ از خود برجستگی منفی غیرعادی نشان می‌دهند. این خطا در حقیقت یکی از انواع خطاها در مدل GDEM₁ است که اغلب شکل نامنظم و منحنی‌وار دارند و در میان زون‌های با عدد استاک مختلف ایجاد می‌شوند و به ناهنجاری‌های حفره‌ای^۱، برآمدگی و برآمدگی‌های حفره‌دار موسوم‌اند. بررسی ابر پراکنش NIDEM-GDEM₂ ارتقای کیفیت ویرایش دوم مدل رقومی آستر را در قیاس با ویرایش اول نشان می‌دهد. توجه به اشکال ۱۰ و ۱۱ و ۱۲، خصوصاً نیمرخ‌های توپوگرافی ارائه‌شده، حاکی از کاهش فراوان ناهنجاری‌های حفره‌ای، برآمدگی و برآمدگی‌های حفره‌دار در ویرایش دوم داده است. همچنین با بررسی شکل‌های ۷ الی ۹، ملاحظه می‌گردد در هر سه نوار مطالعاتی، ابر پراکنش داده‌ها اطراف خط ۴۵ درجه دارای تراکم بیشتری است و اگر چه هنوز



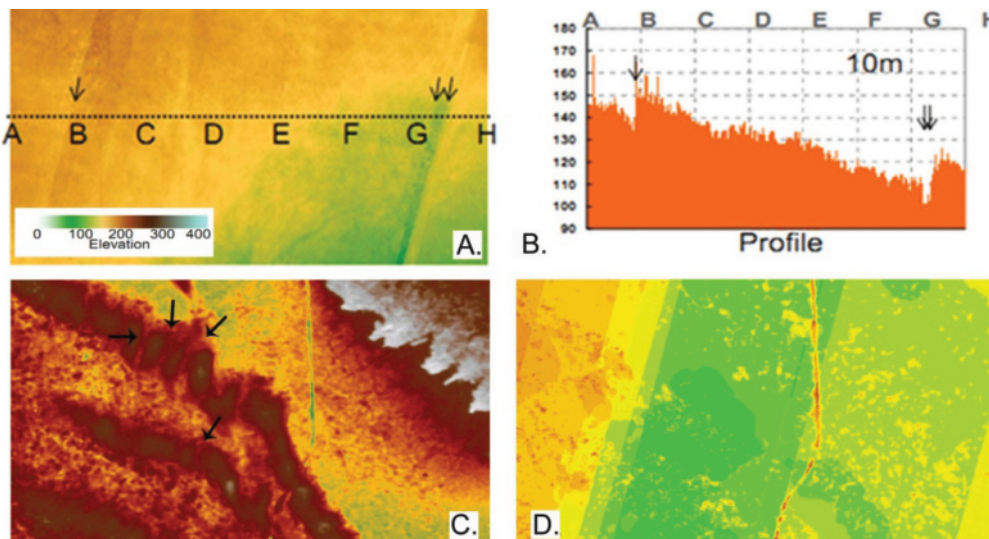
شکل ۱۳. مدل سایه روشن ارتفاعی سه‌بعدی بخشی از نوار شماره یک، برای مقایسه میزان تفکیک مکانی و ناهنجاری‌ها در دو مدل رقومی NIDEM و SRTM (بالا) با ویرایش‌های اول و دوم مدل GDEM (دو تصویر پایین).

1. Kurtosis

جالب توجه دیگری که از مقایسه تصاویر شکل ۱۳ استنتاج می‌گردد، بافت خشن‌تر تصویر حاصل از مدل GDEM۲ از دیگر مدل‌ها (حتی GDEM۱) است. این بافت خشن‌تر که نشان از توزیع نوعی خطای گسترده به صورت نویز دارد، به خوبی رفتار مزوکورتیک^۱ نمودار توزیع خطاهای مدل GDEM۲ را نسبت به رفتار لپتوکورتیک^۲ مدل GDEM۱ (شکل ۵) نشان می‌دهد. به عبارت دیگر، به‌رغم بهبود معنی‌دار ویرایش دوم داده‌های ماهواره آستر، در مقیاس‌های محلی خطاهای با دامنه کوتاه افزایش یافته است. این مطلب در نتایج کار تیم Krieger و همکاران (۲۰۱۱) نیز دیده می‌شود. در تحقیق اخیر بافت خشن‌تر مدل GDEM۲ ناشی از افزایش تعداد ریزحفره‌ها^۳ عنوان شده است. یکی از خطاهایی که در مدل‌های رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر ماهواره آستر گزارش شده است، ناهنجاری پله‌ای است که در سه نوار بررسی‌شده در این مطالعه دیده نشد اما نمونه‌ای از آن در جنوب ایران مشاهده شده است (شکل ۱۴).

مقایسه مدل SRTM با مدل GDEM۱ مشخص می‌سازد که مدل SRTM (که در اصل دقت مکانی ۹۰ متری دارد)، جزئیات بسیار بیشتری از زمین را در قیاس با مدل GDEM۱ (که با دقت ۳۰ متر مکانی منتشر شده است) به دست می‌دهد. در ضمن، خطاهای بسیاری که در ویرایش اول مدل رقومی آستر مشاهده می‌گردد در مدل SRTM دیده نمی‌شود. برای این منظور کافی است نگاهی مجدد به مسیر آبراهه‌ها در بخش شرقی و همین‌طور سیخ ارتفاعات در بخش میانی و جنوبی تصاویر انداخته شود.

مقایسه مدل GDEM۲ با مدل GDEM۱ مشخص می‌سازد که ویرایش دوم داده‌های رقومی آستر جزئیات بسیار بیشتری از زمین را در مقایسه با مدل GDEM۱ ارائه می‌کند. به علاوه، خطاهای بسیاری که در ویرایش اول مدل رقومی آستر مشاهده می‌گردد در مدل ویرایش دوم حذف شده است؛ گرچه هنوز می‌توان برخی آثار آن را در تصاویر مشاهده کرد (ن.ک). خط‌الرأس ارتفاعات در بخش جنوبی تصاویر). مطلب



شکل ۱۴. مثالی از ناهنجاری پله‌ای ناشی از قرارگیری کنار هم عدد استاک مختلف به همراه پروفیل مرتبط با آن (E-F) و مثالی از آنومالی مشاهده‌شده در بخش جنوبی کشور (G-D) که خارج از محدوده نوارهای مطالعاتی واقع شده است.

1. Mesokurtic
2. Leptokurtic
3. Voids

۴- نتیجه‌گیری

در ایران داده‌های رقومی ارتفاعی موسوم به SRTM چند سالی است که برای مقاصد مختلف به کار می‌روند. اخیراً داده‌های رقومی ارتفاعی حاصل از تصاویر زوجی ماهواره آستر در دو ویرایش مجزا بین سال‌های ۲۰۰۹ الی ۲۰۱۱ با تفکیکی مکانی ۳۰ متر نیز در اختیار عموم قرار گرفته است. در این تحقیق دقت و صحت و نوع خطاهای این مدل‌ها براساس مقایسه با مدل رقومی ارتفاعی تولیدشده در سازمان نقشه‌برداری کشور (NIDEM)، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این بررسی نشان داده است که ویرایش اول مدل رقومی ارتفاعی آستر موسوم به GDEM۱ دارای خطای معنی‌داری نسبت به مدل NIDEM است. میانگین خطای این مدل در مناطق مطالعاتی بین ۲/۴ متر الی ۴/۸ متر محاسبه شده که در سطح اطمینان ۹۵ درصد دامنه این خطا بین ۱۴/۸- این خطا بین ۳۱/۹ و ۲۲/۳- متر است. مطالعات پیشین تیم ارزیابی مدل GDEM۱ در سال ۲۰۰۹ متوسط این خطا را با مقایسه با SRTM برابر با ۲۰ متر (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) گزارش کرده‌اند. نتایج این بررسی وجود خطاهای متعدد را علاوه بر خطای میانگین عمومی در داده‌های GDEM۱ نشان داده است. انواع ناهنجاری‌ها از جمله ناهنجاری‌های حفره‌ای، برآمدگی، برآمدگی‌های حفره‌دار و پله‌ای از جمله این خطاهاست. تأثیر کمی این نوع خطاها در مقیاس محلی زیاد است و در برخی نوارهای مطالعاتی گاه به بیش از ۳۰۰ متر نیز می‌رسد. از دیگر نقاط ضعف داده‌های GDEM۱، واضح نبودن جزئیات توپوگرافیک در مقایسه با DEM سی‌متری است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که مدل GDEM۱ اگرچه با دقت مکانی ۳۰ متر منتشر شده اما به واقع فاقد دقت و جزئیات مدل رقومی ارتفاعی SRTM با دقت تفکیک مکانی ۹۰ متری است. در حقیقت وجود خطاها و ناهنجاری‌های معنی‌داری در داده‌های رقومی ارتفاعی ویرایش اول حاصل از تصاویر ماهواره آستر، کاربرد آن را در برخی از مقاصد محدود می‌سازد و می‌بایست در کاربردهای

محلی حتماً به خطاهای یادشده در آن، بسیار دقت کرد.

بررسی مدل رقومی ارتفاعی آستر موسوم به GDEM۲ نشان از بهبود فراوان دقت مدل در قیاس با ویرایش قبلی است. میانگین خطای این مدل در مناطق مطالعاتی بین ۰/۴- متر الی ۳//۰ متر محاسبه شده که در سطح اطمینان ۹۵ درصد دامنه این خطا بین ۱۴/۸ و ۲۰/۸- متر است. مطالعات پیشین تیم ارزیابی مدل GDEM۲ در سال ۲۰۱۱ متوسط این خطا را با مقایسه با SRTM برابر با ۱۷ متر (در سطح اطمینان ۹۵ درصد) گزارش کرده‌اند. تیم ارزیابی مدل GDEM۲ عنوان کرده‌اند که این مدل در مناطق دارای عرض جغرافیایی ۶۰ درجه به بالا بسیار بهبود یافته؛ اما نتایج این بررسی نشان می‌دهد که این اصلاحات در منطقه مطالعاتی نیز جدی بوده است. نتایج این بررسی رفع گسترده خطاها و ناهنجاری‌های حفره‌ای، برآمدگی و برآمدگی‌های حفره‌دار را نشان می‌دهد. مقایسه مدل GDEM۲ با مدل GDEM۱ حاکی از آن است که ویرایش دوم داده‌های رقومی آستر جزئیات به مراتب بیشتری از زمین را در قیاس با مدل GDEM۱ ارائه می‌کند؛ ضمن اینکه رقومی ارتفاعی حاصل از مدل GDEM۲ بالاتر از GDEM۱ و البته نزدیک‌تر به مدل SRTM و NIDEM است. به‌رغم بهبود معنی‌دار ویرایش دوم داده‌های ماهواره آستر، در مقیاس‌های محلی خطاهای با دامنه کوتاه (نویز) افزایش یافته که نتیجه آن بافت خشن‌تر مدل رقومی ارتفاعی مذکور در گستره کلی تصویر است.

بررسی مدل رقومی ارتفاعی SRTM نشان داده است که این مدل صرف‌نظر از قدرت تفکیک مکانی، خطای کمتری در مقایسه با GDEM۱ دارد. میانگین خطا در مدل SRTM با مقایسه با NIDEM کمتر از ۲ متر است. طبق بررسی‌های تیم ارزیابی مدل رقومی GDEM۲ خطای مدل SRTM۳ (مدل ۹۰ متری) برابر با ۰/۸۱ متر است. نتایج این تحقیق قرابت زیاد مدل GDEM۲ با SRTM را نشان می‌دهد.

Bolch B., Kamp U., Olsenholler J., 2005, **Using ASTER and SRTM DEMs for Studying Geomorphology and Glaciation in High Mountain Areas**, New Strategies for European Remote Sensing, Oluij, Millpress, Rotterdam.

Carabajal, C., D.J. Harding, 2006, **SRTM C-Band and ICESat Laser Altimetry Elevation Comparisons as a Function of Tree Cover and Relief**, Photogramm, Eng. Rem. Sens., 72, 287-298.

Dietrich, W.E., Wilson, C.J., Montgomery, D.R. and McKean, J., 1993, **Analysis of Erosion Thresholds, Channel Networks, and Landscape Morphology Using a Digital Terrain Model**, Journal of Geology, 101: 259-278.

Desmet, P.J.J. and Govers, G., 1995, **GIS-based Simulation of Erosion and Deposition Patterns in an Agricultura Landscape: a Comparison of Model Results with Soil Map Information**, Catena, 25: 389-401.

Farr, T.G., M. Kobrick, 2000, **Shuttle Radar Topography Mission Produces a Wealth of Data**, Amer, Geophys. Union Eos, v. 81, 583-585.

Farr, T.G., E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, P. Rosen, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, D. Alsdorf, 2007, **The Shuttle Radar Topography Mission**, v. 45, Reviews of Geophysics, doi: 1029/2005RG000183.

نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که صرف‌نظر از مدل رقومی ارتفاعی NIDEM که کیفیت و دقت زیادی دارد و در این تحقیق به عنوان مبنای مقایسه به کار رفته است، مدل SRTM با تفکیک مکانی ۹۰ متری دارای دقت ارتفاعی خوبی است و در بررسی‌های محلی می‌توان به خوبی از آن بهره برد. مدل GDEM۲ با توجه به رفع بسیاری از مشکلات ویرایش اول، دارای دقت مناسبی در مقایسه با SRTM است و در صورت اطمینان از نبود خطاهای محلی می‌توان به عنوان یک DEM سی‌متری مورد استفاده قرار گیرد. همچنین کاربرد مدل GDEM۱ به دلایل متعددی که به آن اشاره شد، محدودیت‌های فراوانی دارد، که از حیطة کاربرد آن برای برخی از مقاصد می‌کاهد.

۵- سپاس‌گزاری

این تحقیق با حمایت گروه جغرافیای طبیعی دانشگاه اصفهان صورت گرفته است و بدین‌وسیله از پشتیبانی این دانشگاه قدردانی می‌شود.

۶- منابع

Aster GDEM Validation Team, 2009, **Aster Global DEM Validation (Summary Report)**, METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS.

Aster GDEM Validation Team, 2011, **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results**, METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS.

Bubenzer, O., Bolten, A., 2008, **The Use of New Elevation Data (SRTM/ASTER) for the Detection and Morphometric Quantification of Pleistocene Megadunes (draa) in the Eastern Sahara and the Southern Namib**, Geomorphology 102, 221-231.

- German Space Agency: <http://www.dlr.de/srtm>.
- Hirano, A., Welch, R., Lang, H., 2003, **Mapping from ASTER Stereo Image Data: DEM Validation and Accuracy Assessment**, Photogrammetry & Remote Sensing, 57, USA, 356-370
- Ham, A., 2005, **A Standardized Approach to Phase Unwrap Detection/removal and Void fill of the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Data**, abs., SRTM – Data Validation and Applications Workshop, Reston, VA, 14-16 June. See also: <http://edc.usgs.gov/conferences/SRTM/>.
- Hofton, M., R. Dubayah, J.B. Blair, D. Rabine, 2006, **Validation of SRTM Elevations Over Vegetated and Non-vegetated Terrain Using Medium Footprint Lidar, Photogramm**, Eng. Rem. Sens., 72, 279-285.
- Irvin, B.J. et al., 1997, **Fuzzy & Isodata Classification of Landform Elements from Digital Terrain Data in Pleasant Valley, Wisconsin**, Geoderma, 77: 137-154.
- Kirkby, M.J., 1990, **The Landscape Viewed Through Models**, Zeitschrift für Geomorphologie, N.F., SupplBd.,79: 63-81.
- Klingseisen, B., 2004, **GIS Based Generation of Topographic Attributes for Landform Classification**, Ph.D. Thesis, university of Applied Sciences. School of Geoinformation Karnten, Germany.
- Kamp, U., Bolch, T., Olsenholler, J., 2003, **DEM Generation from ASTER Satellite Data Forgeomorphometric Analysis of Cerro Sillajhuay**, chile/bolivia, ASPRS Annual Conference Proceedings, Anchorage, Alaska.
- Keeratikasikorn C.C., Trisirisatayawong I., 2008, **Reconstruction of 30m DEM from 90m SRTM Dem with Bicubic Polynomial Interpolation Method**, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing.
- Krieger, T., W. Curtis, and J. Haase, 2011, **Global Validation of the ASTER Global Digital Elevation Model (GDEM) Version 2**, Report to the ASTER GDEM Version 2 Validation Team.
- Paul, F., Huggel, C. and A. Käab, 2004, **Combining Satellite Multispectral Image Data and a Digital Elevation Model for Mapping Debris-covered Glaciers**, Remote Sensing of Environment. 89(4). 510-518
- Roberts N. and Cunningham D., 2008, **Automated Alluvial Fan Discrimination, Quaternary Fault Identification, and the Distribution of Tectonically Reactivated Crust in the Gobi Altai Region, Southern Mongolia**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 29, No. 23, 6957–6969

Rodriguez, E., C.S. Morris, J.E. Belz, E.C. Chapin, J.M. Martin, W. Daffer, S. Hensley, 2005, **An Assessment of the SRTM Topographic Products**, Technical Report JPL D-31639, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California, 143 pp.

Sobel, E.R., M. Oskin, D. Burbank, A. Mikolaichuk, 2006, **Exhumation of Basement-cored Uplifts-Example of the Kyrgyz Range Quantified with Apatite Fission Track Thermochronology**, Tectonics, 25, doi: 10.1029/2005TC001809.