

جغرافیا و آمایش شهری - منطقه‌ای، شماره ۱۳، زمستان ۱۳۹۳

وصول مقاله : ۱۳۹۲/۹/۳

تأیید نهایی : ۱۳۹۳/۲/۷

صفحات : ۱۴۰ - ۱۱۹

## مقایسه روش‌های مختلف تهیه مدل ارتفاع رقومی مورد شناسی: حوضه آبخیز نوفرست، شهرستان بیرجند، استان خراسان جنوبی

علی اشرفی<sup>۱</sup>، محمد امیر علیمی<sup>۲</sup>

### چکیده

برآورد دقیق خصوصیات کمی و کیفی پدیده‌های طبیعی، مستلزم صرف زمان و هزینه زیادی می‌باشد. بنابراین، روش‌های درون‌یابی به‌عنوان راه حل مناسبی در تخمین محل‌های بدون اطلاعات و نمونه‌برداری نشده مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که نقشه‌های مشتق شده از مدل ارتفاع رقومی زیاد است و این نقشه در تحلیل‌های مختلف کاربرد دارند و ممکن است با وزن‌های متفاوت در نتایج یک کار تحلیلی، نقش داشته‌باشند. اگر منبع اصلی که همان نقشه مدل ارتفاع رقومی است، ایرادی داشته‌باشد؛ اشکال در کل پروژه زیاد خواهد شد. انتخاب مناسب‌ترین روش ساخت مدل ارتفاع رقومی که با دقت بالاتری بتواند مدل واقعی تری را از شرایط طبیعی زمین ارائه نماید، موضوع اصلی این تحقیق است. هدف از این تحقیق، مقایسه برخی روش‌های تهیه مدل ارتفاع رقومی شامل: TOPOGRID<sup>۳</sup>، TIN<sup>۴</sup> و نیز مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از تصاویر ماهواره‌ای سه بعدی است. روش‌های مذکور بر روی داده‌های حوضه آبخیز نوفرست در ۴۰ کیلومتری شرق شهر بیرجند انجام شده و نتایج آن با همدیگر و نیز با داده‌های برداشت شده از سیستم‌های تعیین موقعیت جهانی دو فرکانسه مورد ارزیابی دقت، قرار گرفته‌است. نتایج حاصل از مقایسه مقادیر حداقل و حداکثر اختلافات و نیز مقایسه مقادیر RMSE بین مدل‌های ارتفاعی رقومی و داده‌های سیستم موقعیت جهانی دو فرکانسه DGPS<sup>۵</sup> در ۱۰ محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد که روش TIN با پنج بار کسب مقادیر، حداکثر اختلاف و کسب نکردن هیچ مقدار حداقلی، بیشترین خطا و مدل رقومی SRTM با سه بار کسب مقادیر حداقلی اختلاف و کسب نکردن هیچ مقدار حداکثری از دقت بالاتری برخوردار می‌باشد. در این مقایسه روش TOPOGRID و TOPOGRID IN<sup>۵</sup> و مدل رقومی استخراج شده از تصاویر ASTER در رتبه‌های بعدی قرار دارند.

کلید واژگان: مدل ارتفاع رقومی، سیستم اطلاعات جغرافیایی، تصاویر ماهواره‌ای، خراسان جنوبی

Aashrafi@birjand.ac.ir

۱- عضو هیات علمی دانشگاه بیرجند، دانشجوی دکتری سنجش از دور دانشگاه تهران (نویسنده مسؤل)

۲- دانشجوی دکتری زمین شناسی، دانشگاه بیرجند

3 - Triangulated Irregular Network  
4- Differential Global Positioning System  
5- INFORCE

## مقدمه

حروف اختصاری DEM و DTM، جهت توصیف مجموعه‌ای از داده‌های رقومی در مدل‌سازی سطح توپوگرافی (سطحی که داده‌های ارتفاعی را نشان می‌دهد) بکار می‌رود. به منظور مدل‌سازی دقیق یک سطح، باید تعداد زیادی از مشاهدات را ثبت کرد. از آنجا که این امر میسر نیست، مدل سطح بطور تقریبی به یک سطح پیوسته همانند است که با استفاده از تعداد محدودی از مشاهدات فراهم می‌آید. بنابراین، تعداد مناسبی از مشاهدات باید به همراه موقعیت جغرافی آنها انتخاب شوند (هایوود و دیگران، ۱۳۸۱: ۶۰). 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 عبارتست از بهره‌گیری از اطلاعات ارتفاعی نیمرخ (مقطع) بمنظور تشریح شکل زمین. این اطلاعات ارتفاعی می‌تواند هم منظم (رئوس شبکه قائم الزاویه) و هم غیر منظم باشد. واژه‌های دیگری هم معمولاً به عنوان معادل مدل رقومی زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند که تعدادی از آنها عبارتند از: مدل رقومی زمین<sup>۱</sup>، مدل ارتفاع رقومی<sup>۲</sup>، مدل ارتفاع رقومی<sup>۳</sup>، مدل رقومی زمین<sup>۴</sup>، مدل ارتفاع رقومی زمین<sup>۵</sup> (همراه و دیگران، ۱۳۸۲: ۱۵۲-۱۵۱). مدل ارتفاع رقومی و دیگر زیرشاخه‌های منشعب از آن (شاخص‌های شیب، حوضه، شبکه، منحنی، توپوگرافیکی و ...) پارامترهای مهمی است، برای استخراج اطلاعات یا ارزیابی هرگونه پردازشی که برای تحلیل زمین بکار می‌رود. از این زیرشاخه‌ها برای موارد متعدد استفاده می‌شود؛ مانند: مدل جریان آب، ارزیابی میزان رواناب،

شبیه‌سازی سیل و مدیریت، حرکت توده‌ها، تحلیل کاربری زمین، تهیه نقشه ناهمواری‌ها، خطرات آتشفشانی، مجازی‌سازی زمین و نقشه‌کشی، مطالعات اقلیمی و آب و هوا شناختی. برون‌داد این مدلها بستگی به صحت مدل ارتفاع رقومی دارد. (Sandip Mukherjee et al, 2013: 205)

## طرح مسئله و پیشینه پژوهش

از آنجا که نقشه‌های مشتق شده از مدل ارتفاع رقومی زیاد است و این نقشه در تحلیل‌های مختلف کاربرد دارند و ممکن است با وزن‌های متفاوت در نتایج یک کار تحلیلی نقش داشته باشند. اگر منبع اصلی که همان نقشه مدل ارتفاع رقومی است، ایرادی داشته باشد، در کل پروژه مشکلات زیادی را در پی خواهد شد. مدل‌های توزیعی هیدرولوژیکی برآورد رواناب و رسوب جهت شبیه‌سازی فرآیند بارش، رواناب و رسوب در سطح حوضه‌های آبخیز، نیاز به نقشه‌های رقومی ارتفاع و مشتقات آن دارند. به عنوان مثال؛ صحت اجرای مدل‌های برآورد فرسایش و حجم رسوب، حجم رواناب سطحی، برآورد حجم عملیات خاکی در یک پروژه عمرانی و ... به شدت تابع کیفیت نقشه‌های رقومی ارتفاع حوضه می‌باشد. کارشناسان در مطالعات مختلف مانند: زمین‌شناسی، معدن، محیط زیست، عمران و ... از مدل ارتفاع رقومی بعنوان یک لایه پایه استفاده می‌کنند. در مطالعات آبخیزداری مدل ارتفاع رقومی تهیه شده برای حوضه پیش نیاز، تعداد زیادی مطالعه دیگر و در نهایت مؤثر بر امر تلفیق و نیز طراحی سازه‌ها خواهد بود. نقشه‌های شیب، جهت جریان و جریان تجمعی، طبقات ارتفاعی و ... از جمله مشتقات مدل ارتفاعی رقومی محسوب می‌گردند. بنابراین انتخاب مناسب‌ترین روش ساخت مدل ارتفاع رقومی که با دقت بالاتری بتواند مدل واقعی‌تری را از

1. Digital Terrain Modelling
2. Digital Elevation Modelling
3. Digital Height Modelling
4. Digital Ground Modelling
5. Digital Terrain Elevation Modelling

(Quinn, P. F. et al., 1991:59-79). ژانگ و مونتگومری (۱۹۹۴) با استفاده از مدل رقومی ارتفاعی، به شبیه‌سازی هیدرولوژیکی پرداختند (Zhang, W.H. & Montgomery, D.R., 1994:1019-1028). گیلز<sup>۲</sup> مدل رقومی ارتفاعی را برای طبقه‌بندی شیب‌ها به کار گرفت (Giles, P. T., 1988:581-594). ونبرگن و تورن<sup>۳</sup> یک تحلیل کمی از توپوگرافی سطح زمین ارائه کردند (Zevenbergen, L. W. & Thorne, C. R., 1987:45-56). حسن‌زاده و دیگران، ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاع و الگوریتم‌های سیستم اطلاعات جغرافیایی در تحلیل‌های مورفومتری رودخانه‌ای را مورد بررسی قرار داده‌اند (حسین‌زاده و جهادی طرقي، ۱۳۸۹: ۱۸۳-۲۱۲). تامپسون و همکاران (۲۰۰۱) در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که خطاهای بزرگ در شبیه‌سازی هیدرولوژیکی، اغلب به دلیل تخمین اشتباه ارتفاع عوارض و شیب اتفاق می‌افتد (Thompson, J., Bell, J., and Butler, C. 2001: 67-89). تحقیقات لین و اگوچی (۲۰۰۶)، با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی و سیستم اطلاعات جغرافیایی و تکنیک برنامه‌نویسی رایانه‌ای، تعدادی نیم‌رخ طولی و عرضی را در چندین حوضه آبریز ژاپن ترسیم کردند (Lin, Z., And Oguchi, T., 2006: 77, 78). در تحقیقی که توسط Cheng و Toutin در سال ۲۰۰۱ انجام شده‌است، دقت مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از تصاویر ASTER، ۲۵ متر بدست آمده که (با استفاده از نرم افزار PCI Geomatica) با مقایسه با مدل ارتفاع رقومی سازمان زمین‌شناسی آمریکا انحراف معیار به دست آمده ۱۱.۸ می‌باشد که کمتر از اندازه پیکسل است. (Toutin, Thierry, and Philip Cheng., 2002: 2102-2106)

تانگ ژئو آن و دیگران (۲۰۰۱) در پژوهش، با تمرکز بر روی مفهوم خطای نمایش زمین در مدل

شرایط طبیعی زمین ارائه نماید، یکی از الزامات انجام پروژه‌های مرتبط با منابع طبیعی می‌باشد. 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 پرهزینه‌است (Chaplot, V et al, 2004: 271-293). استفاده از روش‌های مدل‌سازی رقومی زمین در سیستم اطلاعات جغرافیایی به چگونگی روش درونیابی تهیه مدل ارتفاع رقومی که نمایش دهنده پستی و بلندی رقومی سطح زمین است، بستگی دارد. (Miller, C. L. and Laflamme, R. A., 1958: 433-442). پژوهش‌های فراوانی برای ارزیابی و سنجش میزان صحت در مدل‌های دیجیتالی ارتفاع انجام می‌گیرد. با این حال، شماری از افراد دارای نگرش‌های غیرمتعادلی نسبت به خطاهای مدل ارتفاع رقومی هستند. این افراد بر این نکته تأکید می‌کنند که خطاهای نمونه‌برداری مدل ارتفاع رقومی از میزان معمولی بالاتر است، اما از این نکته غافلند که قدرت تفکیک مدل ارتفاع رقومی و ناهمواری زمین یکی از عواملی است که بر روی صحت نمایش‌ها تأثیر می‌گذارد (Guo-an, Tang, et al., 2001: 209-216).

### پیشینه پژوهش

در خصوص کاربرد مدل ارتفاع رقومی، تحقیقات گسترده‌ای انجام شده‌است. اما تحقیقات در خصوص ارزیابی دقت و مقایسه مدل‌ها، محدود است. کارهای انجام شده نیز محدود به ارزیابی یک مدل استوار است. در ادامه نمونه‌هایی از پژوهش‌های مرتبط با موضوع تحقیق آورده شده‌است.

کوبین<sup>۱</sup> با استفاده از مدل رقومی زمینی مسیرهای حرکت آب بر روی دامنه‌ها را پیش‌بینی کرد

2 . Giles

3 . Zevenbergen & Thorne

1 . Quinn

رود، شکل و دینامیک رودخانه‌ها فراهم نمودند.  
(Reinfelds, I. et al., 2004: 403).

هایاکاوا و اگوچی (۲۰۰۶)، با استفاده از سیستم اطلاعات جغرافیایی و مدل ارتفاع رقومی به تشخیص نقاط شکست شیب در رودخانه‌های کوهستانی ژاپن پرداخته و به این نتیجه رسیده‌اند که شیب رودخانه و وسعت حوضه زهکشی، فاکتورهای اساسی در تشخیص هیدرولیک رودخانه و نیروی فرسایشی بر روی سنگ بستر رودخانه می‌باشند که به طور مستقیم دبی آب و فشار برشی را نشان می‌دهند

(Hayakawa, Y.S. and Oguchi, T., 2006: 90).  
ندیم احمد و دیگران (۲۰۰۷) در پژوهشی، ارزیابی داده‌های سه بعدی کارتوست ۱، از طریق تولید و اعتبارسنجی ابعاد، برای مناطق نسبتاً موج‌دار پراز تپه، مورد بررسی قرار داده‌اند. تکنیک‌های فتوگرامتری برای تولید ابعاد و تصویر ارتو برای دو مورد شامل استفاده از ضرایب چندجمله‌ای منطقی و استفاده از ضرایب چند جمله‌ای منطقی همراه با نقاط کنترل زمین، مورد استفاده قرار گرفته‌است. مقدار RMSE برای مقادیر ارتفاع برای مناطق نسبتاً موج‌دار و پراز تپه، به ترتیب ۴.۳۸ و ۳.۶۹ متر تعیین شده‌است

(Ahmed, Nadeem, et al., 2007: 121-127)  
سفرسیک (۲۰۱۲) در پژوهش تخمین عملکرد مدل ارتفاع رقومی جهانی سنجنده Aster را بسته به شیب عوارض زمینی در سه منطقه بارسلونا در اسپانیا، استانبول ترکیه و زان گلداک در غرب دریای سیاه در شمال غربی ترکیه، را مورد بررسی قرار داده‌است. در مناطق شهری بارسلونا و استانبول دقت مدل ارتفاع رقومی جهانی سنجنده Aster، در مقایسه با مدل ارتفاع رقومی مرجع تقریباً به ۴ متر می‌رسد. دقت در شهر زان گلداک ۸ متر بود، دلیل اصلی این نتیجه‌گیری ویژگی‌های توپوگرافی آن ذکر شده‌است که دلیل آن شیب بسیار تند زمین در این منطقه می‌باشد. در بارسلونا و استانبول ۷۰ درصد زمین صاف

ارتفاع رقومی، کوشید تا انواع نسخه‌ها، فاکتورها، اندازه‌گیری و شبیه‌سازی را در خطاهای نمایش زمین در مدل ارتفاع رقومی بررسی کنند. رویکرد مقایسه چند تفکیکی و چند ناهمواری، به عنوان یک تکنولوژی رایج و اساسی در این تحقیق استفاده شده‌است. نتایج تجربی بدست آمده از تحقیق، نشانگر آنست که یک رابطه کمی میان خطا و اختلاف، قدرت تفکیک و ناهمواری زمین در سطحی جهانی وجود دارد  
(Guo-an, Tang, et al., 2001: 209-216).

در تحقیق دیگری که توسط گون کالوز و اولیوریا در سال ۲۰۰۴ انجام شده‌است، دقت مدل ارتفاع رقومی حاصل از تصاویر سنجنده ASTER در ناحیه‌ای در کشور پرتغال مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. دقت مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از تصویر، ۳۰ متر بوده‌است که مقایسه مدل ارتفاع رقومی استخراج شده و مدل ارتفاع رقومی کنترلی انحراف معیار ۸.۷ به دست آمده که نتیجه خوبی است (Goncalves, J. A., and A. M. Oliveira, 2004: 168-172).  
در تحقیق دیگری که توسط Cuartero و همکاران در سال ۲۰۰۳ انجام شده، از تصاویر ASTER با استفاده از نرم افزارهای PCI, ERDAS مدل ارتفاع رقومی استخراج شد است. آنها به این نتیجه رسیدند که بهترین اندازه سلول جهت مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از تصاویر ASTER دو برابر اندازه پیکسل ۳۰ متر می‌باشد و نتیجه دیگر این که نرم افزار ERDAS نتایج خوبی از داده‌های ASTER به دست نمی‌دهد  
(Cuartero, A. et al., 2004: 559-563).

رینفلدز و همکاران (۲۰۰۴)، با استفاده از مدل ارتفاعی رقومی و سیستم اطلاعات جغرافیایی، قدرت رود را در مجراهای رودخانه‌ها به صورت پیوسته محاسبه نمودند و بدین طریق چهارچوبی برای ارائه مدل‌های مفهومی و تجربی بین گرادیان مجرا، قدرت

ارتفاع رقومی در مناطق دشتی کمتر می‌باشد. همچنین در مناطق با شیب زیاد و در محل درز و شکاف‌ها روش تطابق‌یابی خوب عمل نکرده و اختلاف ارتفاع بسیار زیاد است. نویسندگان دقت مدل ارتفاع رقومی تولید شده را متأثر از تعداد و پراکنش نقاط GCP و TP<sup>۲</sup> می‌دانند.

متکان و دیگران (۱۳۸۶)، به منظور بررسی روش‌های مختلف حذف خطاهای مدل ارتفاع رقومی، سه الگوریتم را مورد مقایسه قرار داده‌اند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که، الگوریتمی که در آن ابتدا عملیات (DE) (Drainage Enforcement) و سپس حذف گودال به شیوه مرسوم در برخی از نرم‌افزارهای سیستم اطلاعات جغرافیایی اجرا گردد، مناسب‌ترین روش می‌باشد. در پژوهشی عاشورلو و دیگران (۱۳۸۷)، اینگونه نتیجه گرفته‌اند که اندازه ی پیکسل‌های ۵ متر و ۱۰ متر به دلیل خطای کم در برآورد طول آبراهه، جابجایی کم و تشابه بعد فراکتال با رودخانه رقومی ۱:۲۵۰۰۰ به عنوان اندازه پیکسل مناسب تر هستند.

باقری بداغ‌آبادی و دیگران (۱۳۹۰)، در پژوهشی تحت عنوان، بررسی کارایی مدل رقومی ارتفاع و مشتقات آن در پیش‌بینی و برآورد کلاس‌های خاک، با استفاده از مدل SoLIM و اعتبارسنجی نتایج این مدل در منطقه بروجن - استان چهارمحال و بختیاری، از ۱۸ ویژگی مختلف مدل رقومی استفاده کردند. نتایج نشان داده که تنها با توجه به مدل رقومی ارتفاع می‌توان در سطح زیرگروه با دقت حدود ۶۵ درصد در درون‌یابی و ۴۰ درصد در تعمیم برون‌یابی نتایج، برآورد درستی از کلاس‌های خاک داشت.

عرب و دیگران (۱۳۸۷)، شاخص‌های مدل تجزیه رقومی زمین را برای مطالعه سطوح ژئومرفیک و لندفرمها در یک ردیف پستی و بلندی در منطقه سد

و هموار و شیب نسبی آن میانگینی حدود ۰/۲ درصد است. توپوگرافی زان گلداک بسیار ناهنجار و میانگین شیب زمین ۳۵ درصد است. نتایج نشان داد که کیفیت مدل ارتفاع رقومی از داده‌های ماهواره فضایی در رابطه مستقیم با شیب زمین تغییر می‌کند

(Sefercik. U.G., 2012:565-576)

ساندپ، ماخرجی و دیگران (۲۰۱۳) در پژوهش در پی ارزیابی صحت مدل ارتفاع رقومی، به چهار شیوه، دست به اقدام زده‌اند. نخست، تصویرسازی تأثیر اندازه شبکه مدل ارتفاع رقومی برای نمایش سطح زمین و تحلیل هموارسازی تأثیر آن بر روی نمایش عوارض سطح زمین. دوم، آزمون دامنه خطای عمودی در نسخه دوم ASTER GDEM و STRM با استفاده از داده‌های میدانی، پیمایشی (GCPs)<sup>۱</sup> که با ترکیب اطلاعات پیمایش هند (SOI)<sup>۲</sup> که برگه‌های توپوگرافیکی و یک شبکه منظم با قدرت تفکیک بالا را با استفاده از مدل ارتفاع رقومی سنجنده کارتوست ۱ ارائه می‌دهد. سوم، آزمون پیوستگی خطاهای مدل ارتفاع رقومی با مورفولوژی زمین و شناسایی گوناگونی خطاها در مناطق مرتفع با توجه به پستی و بلندی‌ها و شیب. چهارم، تحلیل صحت مدل ارتفاع رقومی که از خصوصیات زمینی مانند شیب و شبکه زهکشی حوضه استفاده می‌کند

(Sandip Mukherjee et al., 2013:205-217).

دیلمی، بشیر و دیگران (۱۳۸۶) در پژوهشی دقت تهیه مدل رقومی ارتفاع با استفاده از تصاویر ASTER، را در منطقه‌ای در شهرستان فسا مورد بررسی قرار داده‌اند. روش مورد استفاده در تولید مدل ارتفاع رقومی روش تطابق‌یابی می‌باشد، دقت ارتفاعی برای مدل ارتفاع رقومی حاصله از ASTER در این مطالعه ۲۶/۴ ± به دست آمده‌است. نتایج RMSE در مناطق دشتی و کوهستانی نشان داد که دقت مدل

1 . Ground Control Points  
2. Survey of India

استفاده می‌شود. در این تحقیق از روش جنبشی زمان واقعی برای تعیین موقعیت نقاط بهره گرفته 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. در این روش تصحیحات به صورت زمان واقعی در حین انجام مشاهدات، محاسبه و در تعیین موقعیت Rover لحاظ می‌شود. در این تحقیق از گیرنده‌های<sup>۶</sup> لایکا مدل GNSS GS10 استفاده شده است. ابتدا دو ایستگاه مرجع<sup>۷</sup> با روش سریع تعیین گردید و سپس روش جنبشی زمان واقعی<sup>۸</sup> (RTK) بکار گرفته شد.

### شبکه نامنظم مثلث‌بندی (TIN)

شبکه نامنظم مثلث‌بندی سیستمی است که توسط پیوکر و همکارانش (۱۹۷۸) جهت مدل‌سازی رقومی ارتفاع پیشنهاد شده است. این سیستم عاری از ماتریس‌های ارتفاعی غیر ضروری و زاید است و در عین حال برای بسیاری از محاسبات، مثل محاسبه شیب‌ها، مؤثرتر از سیستم‌هایی است که فقط بر پایه خطوط تراز رقومی شده، ایجاد شده‌اند. شبکه نامنظم مثلث‌بندی، یک مدل زمینی است که در آن از یک دسته وجوه مثلثی به هم پیوسته و پی در پی استفاده می‌شود. این شبکه مثلث‌بندی دلایونی بر پایه گروه‌ها و نقاط مشاهده مکانی نامنظم، ایجاد می‌شود. مدل شبکه نامنظم مثلث‌بندی، عموماً دارای یک ساختار توپولوژیک برداری مشابه ساختار شبکه‌های چند ضلعی می‌باشد (بارو، ۱۳۷۶: ۹۵-۹۴). در سیستم اطلاعات جغرافیایی برداری، در یک TIN برای ایجاد DTM از

خاکی آبیج، شرق شهرستان جوققان، استان چهارمحال و بختیاری به خدمت گرفته‌اند. نتیجه اینکه، درصد شیب، نفوذ آب و حجم رسوبات از مهمترین عوامل اثرگذار بر روی پیکربندی زمین نما و لندفرم در محدوده مورد مطالعه می‌باشد. جیرانی، و دیگران (۱۳۹۰)، در پژوهشی به این نتیجه رسیدند که، استفاده از دقت‌های مختلف مدل ارتفاع رقومی، نتایج نسبتاً یکسانی را برای برآورد رواناب و رسوب در منطقه مطالعاتی به همراه دارد، هرچند تغییرات در برآورد رسوب بیشتر بود. علت این شباهت در نتایج را مربوط به منطق مدل‌سازی معکوس در مرحله واسنجی می‌دانند. در مجموع نتایج نشان داد که با توجه به محدودیت در نوع اطلاعات در مرحله واسنجی، تفاوت مختلف مشاهده چندان در نتایج شبیه‌سازی‌های رواناب و رسوب به واسطه استفاده از سه مدل ارتفاع رقومی ۵۰، ۹۰ و ۱۰۰۰ متری نمی‌شود.

### مواد و روش‌ها

#### دستگاه DGPS

سیستم GPS، یکی از گسترده‌ترین تکنولوژی‌های فضا-مبنا<sup>۱</sup> است که هدف آن تعیین موقعیت نقاط روی سطح زمین با هزینه و زمان کمتر می‌باشد. برای دستیابی به موقعیت یک نقطه باید بسته به هدف پروژه و دقت مطالعه، از روش‌های ثابت<sup>۲</sup>، ثابت سریع<sup>۳</sup>، جنبشی<sup>۴</sup> و جنبشی زمان واقعی<sup>۵</sup> استفاده کرد. روش استاتیک برای مطالعه زمین ساخت فعال، جهت تعیین نقاط کنترلی محلی با دقت بالا و روش جنبشی و جنبشی زمان واقعی، برای تعیین موقعیت نقاط با سرعت بالا و دقت قابل قبول (کمتر از ۱ سانتیمتر)

6. Receivers  
7. Reference  
8. Real Time Kinematic

1. Space-base  
2. Static  
3. Rapid static  
4. Kinematic  
5. Real time Kinematic

متنوعی در این خصوص وجود دارد؛ ولی بیشتر نرم افزارها از روش مثلث بندی دلایونی<sup>۱</sup> استفاده می‌کنند (همراه، ۱۳۸۲: ۱۷۲-۱۶۹).

### الگوریتم TOPOGRID

این ابزار یک مجموعه از داده سلولی ارتفاعی ایجاد می‌کند که از نظر هیدرولوژیکی صحیح می‌باشد. داده‌های آبراهه‌ها همیشه نسبت به داده‌های نقطه‌ای و داده‌های توپوگرافی در اولویت قرار می‌گیرند. استفاده از داده‌های آبراهه‌ها، روش قدرتمندی برای افزودن اطلاعات توپوگرافی درون‌یابی می‌باشد و علاوه بر این کیفیت مدل ارتفاع رقومی خروجی را نیز مشخص می‌کند. این الگوریتم شامل سه قسمت داده‌های ورودی، تنظیمات پارامترها و داده‌های خروجی است. داده‌های ورودی، مجموعه داده‌های ورودی و در صورت نیاز فیلدها را شناسایی می‌کنند. شش نوع ورودی وجود دارد: خطوط میزان<sup>۲</sup>، نقاط، حفره‌ها<sup>۳</sup>، آبراهه‌ها<sup>۴</sup>، آبراهه‌ها<sup>۴</sup>، دریاچه‌ها<sup>۵</sup> و مرزها<sup>۶</sup>. از هر تعداد ورودی دلخواه می‌توان استفاده کرد. ترتیب وارد کردن داده‌های ورودی هیچ تأثیری بر نتیجه نخواهد داشت. ساختمان فایل پارامتر، به گونه‌ای است که ابتدا مجموعه داده‌ها، سپس تنظیمات مختلف پارامتر و سپس گزینه‌های خروجی لیست شده‌است. در این الگوریتم تعدادی تنظیمات پارامتر نیز وجود دارد که استفاده مناسب از آنها در نتیجه کار تأثیر زیادی دارد. گزینه اعمال شدن یا نشدن عملیات زهکشی، نوع اولیه داده‌های ورودی، حد اکثر تعداد تکرارهای الگوریتم، اندازه‌گیری سختی سطح، مقداری برای تنظیم هموارسازی داده‌های ورودی، میزان خطای اتفافی در

داده‌های ارتفاعی منظم یا نامنظم استفاده می‌شود. در مدل TIN سطح رئوس مثلث‌های ایجاد شده، عوارض زمین را مانند قله‌ها، فرورفتگی‌ها و گذرگاه‌ها و لبه‌ها، برآمدگی‌ها و دره‌ها نشان می‌دهد. سطح مثلث‌های منفرد، ناحیه، گرادیان شیب و جهت را ارائه می‌کند. مزیت عمده مدل TIN، کارایی در ذخیره‌سازی داده‌ها است؛ زیرا تعداد اندکی از نقاط مهم در تولید مجدد سطح باید ذخیره شود. از آنجا که TIN، از نقاط فاصله‌گذاری شده نامنظم بدست می‌آیند، از نقاط بیشتری برای ارائه مناطق کوهستانی و از نقاط کمتری برای ارائه مناطق صاف استفاده می‌شود (یان هاپوود و دیگران به نقل از لی ۱۹۹۱).

مزیت شبکه نامنظم مثلثی TIN در ساخت مدل‌های ارتفاعی، به دلیل مشارکت پدیده‌های مورفولوژیکی اعم از خطی، نقطه‌ای و سطحی می‌باشد. در این روش سطوح هم ارتفاع توسط مثلث‌ها جدا می‌شود و تغییر شیب‌ها در اضلاع مثلث‌ها قرار می‌گیرند و در نتیجه نواحی با تضاریب زیاد نسبت به سایر نواحی، با مثلث‌های کوچکتر پوشیده می‌شوند. این لایه ارتفاعی توسط نقاط نمونه‌برداری، شبکه هیدروگرافی و خطوط تقسیم آب ایجاد شده‌است و در نتیجه می‌تواند مورفولوژی دره‌ها و خط‌القعرها را در سطح زمین نشان دهد (قهرودی، ۱۳۸۵: ۳۵). TIN بطور فراگیری در مدل‌سازی زمین مورد استفاده قرار می‌گیرد. دلیل فراگیر شدن آن به این خاطر است که هر نقطه اندازه‌گیری شده، به‌طور مستقیم مورد استفاده قرار می‌گیرد. مجموعه این نقاط، رئوس مثلث‌هایی را تشکیل می‌دهد که مدل زمین را می‌سازد و با استفاده از آن است که سایر نقاط با واسطه‌یابی تعیین می‌شود که منحنی میزان ساخته می‌شود. بهره‌گیری از مثلث‌ها باعث می‌شود که مثلث‌هایی که بوجود می‌آید، دارای کوتاهترین ضلع باشد و اضلاع نسبتاً هم اندازه باشند. اگرچه روش‌های

1. Delaunay
2. contours
3. sinks
4. streams
5. lakes
6. boundaries

مقادیر Z داده‌های ورودی، اولین آستانه، دقت داده‌های ارتفاعی به نسبت، سطح زهکشی<sup>۱</sup> را نشان می‌دهد و آستانه دیگر، از پاکسازی سطح زهکشی جلوگیری می‌کند. برای داده‌های نقطه‌ای در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰، مقادیر فوق به ترتیب ۵ و ۲۰۰ پیشنهاد می‌شود. محدوده ارتفاع بالا و پایین، ماکزیمم X، مینیمم Y و محدوده مینیمم مختصات Y، کیفیت وضوح مدل ارتفاع رقومی خروجی، فاصله موجود در سلول‌ها برای درون‌یابی در خارج از محدوده خروجی و مرزها، تنظیماتی در خصوص گزینه‌های خروجی نیز است که برای اطلاعات بیشتر می‌توان به راهنمای ( ArcGIS, Geoprocessing Commands Quick Reference Guide) مراجعه نمود.

### مدل ارتفاع رقومی از تصاویر سه بعدی

معمولترین روش استخراج مدل ارتفاع رقومی از تصاویر ماهواره‌ای، استفاده از اطلاعات پارالاکس موجود در زوج تصویر یک منطقه است که از دو زاویه مختلف برداشت شده‌اند. پایه و اساس ساخت مدل ارتفاع رقومی، بر تکنیک‌های تطابق‌یابی که مبنای آن شباهت بین درجات خاکستری پیکسل‌های دو تصویر پوشش‌دار می‌باشد، استوار است (ویلیامز، جانانان: ۱۳۷۶:۷۳). مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از تصاویر سنجنده ASTER، می‌تواند مورد استفاده برای برنامه‌های کاربردی مختلف در رشته‌های مختلف، زمانی که مقیاس نقشه ۱:۲۵۰۰۰ تا ۱:۱۰۰۰۰۰، باشد کافی است. برای مناطق شهری، این سنجنده کاملاً موفق به نظر می‌رسد و تولید نقشه تا مقیاس ۱:۲۵۰۰۰ با توجه به استانداردهای USGS ممکن است (Sefereik, 2012:575).

ASTER GDEM رایج‌ترین محصول مدل ارتفاع رقومی است که از تصاویر برجسته‌سازی بصری فضایی

گرفته می‌شود. این محصول با دقت و دسترسی بالا، به مهم‌ترین منبع داده توپوگرافی تبدیل شده است؛ از این جهت مطالعات بر روی صحت داده‌ها برای کاربردهای مختلف، بسیار بااهمیت هستند (Yang et al. 2001: 566). سنجنده‌های ASTER در دسامبر سال ۱۹۹۹ بوسیله سکوی پرتاب زمینی ناسا، در مدار قرار گرفت. این سنجنده دارای قابلیت برجسته‌بینی طولی است که از باند طیفی فرورسرخ نزدیک (3N) استفاده می‌کند. دید نادیر این سنجنده و تلسکوپهای (با زاویه ۲۷.۷) واپسگر (3B) آن، این امکان را فراهم می‌آورد تا تصاویر برجسته با چرخش ارتفاعی ۰.۶ را استخراج کنیم. محصول GDEM، از فرایند خودکار جفت‌های برجسته ۱.۵ میلیون عددی و با بکار بردن روش تصحیح استریواسکوپی بدست آمده‌است. قدرت تفکیک فضایی باند 3N و 3B، ۱۵ متر است و مدل ارتفاع رقومی تولید شده بر اساس آن، دارای قدرت تفکیک ۳۰ متر خواهد بود. این باندها، پوشش‌های زمین واقع شده میان مدار ۸۳ درجه شمالی و ۸۳ درجه جنوبی را پوشش می‌دهد. صحت عمودی مطلق نسخه-۱ ASTER GDEM، ۲۰ متر در سطح اطمینان ۹۵٪ است. صحت عمودی ارتقا یافته در نسخه-۲ ASTER GDEM که در ۱۷ اکتبر ۲۰۱۱ میلادی در دسترس آزاد همگان قرار گرفت، برابر با ۸.۸۶ متر است (Sandip Mukherjee et al. 2013:205-217). نامبردگان برای پژوهش، نسخه ۲ ASTER GDEM، از وبسایت:

<http://demex.cr.usgs.gov/DEMEX/> دانلود کردند. می‌توان انتظار داشت که یک مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از تصاویر ASTER، دارای دقت افقی در حدود ۲۵ متر باشد. هرچند در مناطق بدون پوشش گیاهی و عوارض دست ساز انسانی، دقت می‌تواند تا حدود ۱۱ متر نیز افزایش یابد (Selby, Richard., 2003:1). پس از تولید مدل ارتفاع رقومی، گام بعدی باید ارزیابی



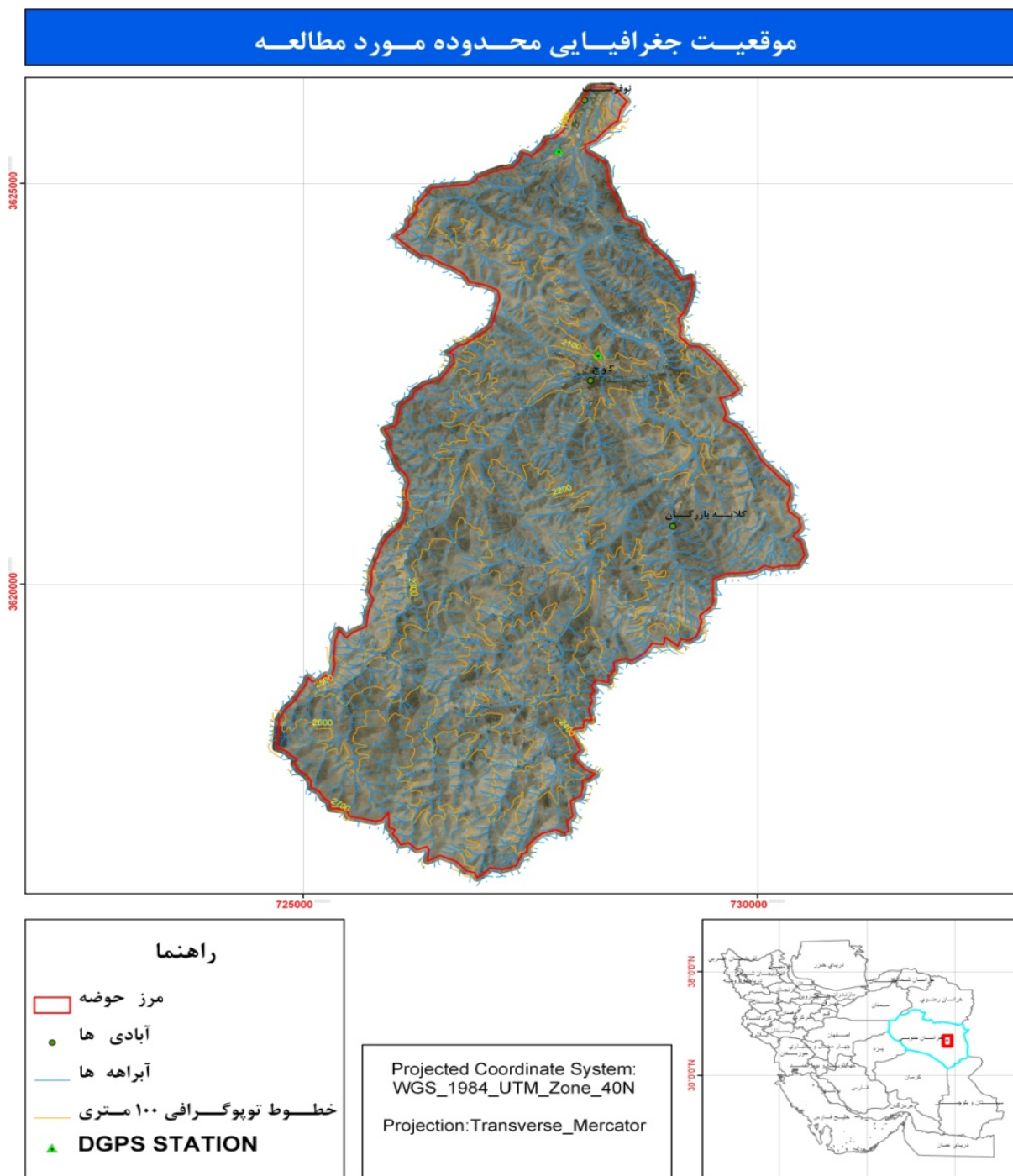
### معرفی محدوده مورد مطالعه

محدوده مورد مطالعه، حوضه نوفرست در ۴۰ کیلومتری شرق شهر بیرجند، مرکز استان خراسان جنوبی، از حوضه‌های آبریز دشت بیرجند و در سمت شمالی رشته کوه باقران واقع شده است. مساحت این حوضه ۲۷/۷۵ کیلومتر مربع، محیط حوضه ۲۴/۴ کیلومتر، ضریب فرم حوضه طبق فرمول هورتون ۰.۲۷ و طبق ضریب گراولیوس ۱.۳ می‌باشد؛ بنابراین این حوضه از نظر شکل جزء حوضه‌های کشیده بحساب می‌آید.

عملکرد به منظور تعیین دقت و ویژگی برای مشخص کردن قابلیت استفاده احتمالی آن در برنامه‌های کاربردی باشد. بعنوان مثال، بررسی زمین نیاز به مدل ارتفاع رقومی با کیفیت بالا دارد؛ در حالی که جنگل نیاز ندارد. یک مدل ارتفاع رقومی فشرده‌ای از ASTER، در صفحه وب در دسترس می‌باشد. اما آن موضوعات بسیار مهم، تحلیل مدل‌های ارتفاع و بلندی را کاملاً پوشش نمی‌دهد؛ برای مثال شامل هیچ‌گونه تحلیلی از وابستگی دقت از سراسیابی زمین نمی‌شود و تنها محدود به جنبه‌های ریخت‌شناسی شده است (Jacobsen 2010: 521-526) کیفیت یک مدل ارتفاع رقومی، می‌تواند توسط پروژه‌های متنوع و مختلف ارزیابی گردد. در پروژه‌های استاندارد مقایسه با مدل ارتفاع رقومی با دقت بالا انجام می‌شود

(Lin et al. 1994: 1775-1790).

مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از تصاویر ASTER، دارای انحرافات به خصوص در شیب، توپوگرافی کوهستانی و جنگل است. دقت کار مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از ASTER، بین ۶ تا ۹ متر برای زمین‌های آزمایشی وسیع دارای اشکال توپوگرافی، خواهند بود. در مناطق بررسی شده در محدوده شهری مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از ASTER کاملاً راضی کننده است و دقت آن حدود ۴ متر است (Sefercik, 2012:575).



شکل ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده مورد مطالعه

منبع: نقشه‌های ۱:۲۵۰۰ سازمان نقشه برداری، پس زمینه، تصویر سنجنده ASTER سال ۲۰۰۴

ب) مطالعات میدانی: در این مرحله از تحقیق ابتدا منطقه مورد مطالعه مورد بازبینی صحرائی قرار گرفت و پس از شناسایی و مشاهده عینی منطقه، برای ارزیابی نتایج مرحله قبل، اقدام به برداشت مسیرها یا نقاطی توسط دستگاه تعیین موقعیت جهانی دو فرکانسه (DGPS) شد.

ج- در این مرحله نتایج بدست آمده از بند الف، با یکدیگر و نیز با داده‌های با دقت بالا که توسط دستگاه مذکور بدست آمده مقایسه شده و نتایج ارزیابی در ادامه آورده شده است.

### نتایج

در حوضه مورد مطالعه، محدوده ارتفاعی ASTER ۲۷۰۵-۱۸۶۸ متر، میانگین ارتفاعی ۲۲۴۹ متر و انحراف معیار ۱۸۹ متر است. برای سایر مدلها مقادیر محاسبه شده در جدول (۲) آورده شده است. آمارهای کلی مربوط به روش‌های مختلف ساخت مدل ارتفاع رقومی در حوضه نوفرست به شرح زیر می‌باشد.

### مواد و داده‌های مورد استفاده در این پژوهش شامل موارد زیر می‌باشد:

۱. لایه‌های اطلاعاتی نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ مربوط به حوضه آبخیز نوفرست، تهیه شده از سازمان نقشه برداری
۲. تصاویر ماهواره‌ای سنجنده Aster
۳. دستگاه GPS دو فرکانسه، گیرنده‌های ۱ لایکا مدل GNSS GS10
۴. نقشه استان‌های ایران با مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰ برای تهیه نقشه کلیدی
۵. نرم افزار ARCGIS9.3 محیطی برای تشکیل سیستم اطلاعات جغرافیایی این تحقیق و انجام تحلیل‌های مختلف
۶. نرم افزار ENVI برای تهیه مدل ارتفاع رقومی از تصاویر ماهواره‌ای

### روش انجام کار

در راستای انجام این پژوهش، از روش تحلیلی-مقایسه‌ای استفاده شده که مراحل انجام آن به شرح ذیل بیان می‌گردد:

الف) مطالعات اسنادی: در این مرحله ابتدا ادبیات موضوعی در خصوص روش‌های ساخت مدل ارتفاع رقومی از طریق منابع کتابخانه‌ای (off line) و منابع اینترنتی (on line) و بانک‌های اطلاعاتی مورد کنکاش قرار گرفت، سپس جهت جمع‌آوری لایه داده‌های مورد نیاز در محدوده مورد مطالعه اقدام شد. انواع مختلف الگوریتم‌های موجود جهت استخراج مدل ارتفاع رقومی بر روی داده‌های موجود اعمال شد. داده‌های مدل رقومی ASTER و SRTM برای محدوده مورد مطالعه که بصورت رایگان در اختیار پژوهشگران است، از وبگاه <http://earthexplorer.usgs.gov> دریافت شد.

جدول ۲: مقادیر ارتفاع محاسبه شده برای لایه‌های ارتفاع رقومی مختلف در حوضه مورد مطالعه

انحراف معیار	حداکثر	متوسط	حداقل
ASTER	۲۷۰۵	۲۲۴۹	۱۸۶۸
TIN	۲۷۰۹.۱	۲۲۵۲.۹	۱۸۸۰
SRTM	۲۶۹۵	۲۲۴۷	۱۸۷۳
TOPOGRID	۲۷۱۰	۲۲۴۸.۵	۱۸۷۶.۸
TOPOGRID-INFORCE	۲۷۰۳	۲۲۴۸.۴	۱۸۷۸.۸

منبع: نتایج پژوهش سال ۱۳۹۲

با توجه به نتایج فوق بیشترین اختلاف در مقدار میانگین‌ها، مربوط به داده‌های TIN و SRTM به مقدار ۵.۹ متر است. برای مقادیر حداقل ارتفاع مربوط به TOPOGRID و SRTM با اختلاف ۱۲ متر و برای حداکثر ارتفاع برای داده‌های TIN و ASTER با اختلاف حدود ۱۴.۹۹ متر می‌باشد. لازم به ذکر است که در این پژوهش بیضوی ارتفاعی داده‌های SRTM، ASTER و نیز داده‌های برداشت شده توسط دستگاه DGPS مطابق با نقشه‌های توپوگرافی: ۱:۲۵۰۰۰ WGS84 است. بنابراین انطباق بیضوی‌ها لازم نیست.

صحت مدل ارتفاع رقومی بدین معناست که مدل ارتفاعی تولید شده تا چه حد نمایانگر عوارض واقعی در سطح زمین است. مقادیر خطا در مدل ارتفاع رقومی، اغلب به عنوان معیاری برای ارزیابی صحت در این مدل استفاده می‌گردد. خطا در مدل ارتفاع رقومی، اغلب به صورت تفاوت ارتفاع میان آنچه که در مدل ارتفاع رقومی ساخته شده و آنچه در واقعیت وجود دارد، تعریف می‌شود. این تعریف به عنوان دریافتی همگانی از مفهوم خطا در مدل ارتفاع رقومی، مورد پذیرش همگان است. با این حال، بیشتر افراد دارای فهمی یک جانبه و نه همه جانبه به این موضوع هستند. این افراد، اغلب خطای نمونه‌برداری در مدل ارتفاع رقومی را به عنوان تعریفی کامل از خطای مدل ارتفاع رقومی تلقی می‌کنند. در حالی که خطای

نمونه‌برداری (Es) در مدل ارتفاع رقومی، شامل عدم تطبیق نقاط نمونه‌برداری شده در مدل ارتفاع رقومی با نظایر همان نقاط در سطح زمین است. تردیدی وجود ندارد که Es عاملی مهم در ارزیابی صحت مدل ارتفاع رقومی است؛ اما در کنار این عوامل، عوامل مهم و سرنوشت‌ساز دیگری هم قرار دارند. عوارض در سطح زمین، پیچیده، نامنظم و متغیر هستند. اساسی‌ترین مبنا برای یک شبکه مدل ارتفاع رقومی که بر پایه آن بتواند عوارض زمین را نشان دهد، مدلسازی این عوارض با استفاده از نقاط مشبک است. با این نقاط مشبک، ارتفاع نمونه‌برداری می‌شود و یک عارضه مصنوعی و تقریبی ساخته می‌شود. به لحاظ نظری، اگر بتوانیم مدل ارتفاع رقومی را از خطای نمونه‌برداری مصون سازیم و یک شبکه کوچک قابل قبول را تهیه کنیم، مدل ارتفاعی بدست آمده از آن صد در صد با عارضه واقعی در محیط بیرونی مطابقت خواهد داشت. اما در عمل، محدودیت‌های موجود در تکنیک نمونه‌برداری مدل ارتفاع رقومی، پردازش رایانه‌ای و قابلیت ذخیره‌سازی شماری از واقعیت‌هایی هستند که اجازه نمی‌دهد این فرضیه به صورت کامل، جامه عمل بر تن کند. بنابراین، مهم نیست که کار نمونه‌برداری تا چه حد دقیق و صحیح انجام گرفته است، چرا که در هر صورت آنچه که از مدل ارتفاع رقومی منتج خواهد شد، مدلی تقریبی از واقعیت خواهد بود (Guo-an, Tang, et al., 2001: 211).

مقدار RMSE با استفاده از رابطه ذکر شده محاسبه شد و مقادیر آن برای مدل‌های رقومی ارتفاعی برای ۱۰ محدوده مختلف، انتخابی در حوضه مورد مطالعه به شرح زیر می‌باشد. بیشترین مقدار خطا مربوط به مدل استخراج شده به روش TIN و بعد ASTER می‌باشد. در این مقایسه کمترین مقدار RMSE مربوط به روش TOPOGRID می‌باشد که مقدار اختلاف آن با روش TOPOGRID و SRTM ناچیز است. همچنین نتایج حاصل از مقایسه مقادیر حداقل و حداکثر اختلافات بین مدل‌های ارتفاع رقومی و داده‌های DGPS در ۱۰ محدوده مطالعاتی نشان می‌دهد که روش TIN با پنج بار کسب مقادیر حداکثر اختلاف با مقدار واقعی و کسب نکردن هیچ مقدار حداقلی، بیشترین خطا و مدل رقومی استخراج شده از SRTM با سه بار کسب مقادیر حداقلی اختلاف با مقدار واقعی و کسب نکردن هیچ مقدار حداکثری از TOPOGRID و TOPOGRID IN و مدل رقومی استخراج شده از تصاویر ASTER در رتبه‌های بعدی قرار دارند. مقادیر میانگین اختلاف نیز مطابق جدول زیر است. مقدار RMSE برای ۲۴۰ نقطه انتخابی در ۱۰ محدوده مطالعاتی آورده شده است.

## 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 از دستگاه DGPS صورت گرفت. در این پژوهش برای اعتباریابی، از مجذور مربع خطای میانگین (RMSE) استفاده گردید. نتایج بدست آمده از RMSE، میانگین تفاوت مقادیر با توجه به مقادیر واقعی را نشان می‌دهد. 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<sup>۱</sup> انجام شد و در لندفرم‌های مطالعاتی نیز برای مثال در ستیغ‌های منطقه کوهستانی، حریم‌هایی در اطراف نقاط مرجع ایجاد شد و حداکثر ارتفاع از کلیه لایه‌ها استخراج شد. در آبراهه‌ها حداقل ارتفاعات مورد بررسی قرار گرفت. به منظور ارزیابی دقت روش‌های مختلف ساخت مدل‌های رقومی ارتفاعی، از نرم افزار ArcGIS توانایی انجام تکنیک ارزیابی متقابل و معیار آماری ریشه دوم میانگین مربع خطا را دارد، استفاده شد که معادله ریشه دوم میانگین مربع خطا به قرار رابطه زیر است.

$$RMSE = \sqrt{\left[ \sum_{i=1}^n (\bar{Z}(x_i) - Z(x_i))^2 \right] / n}$$

$\bar{Z}(x_i)$  : مقدار برآورد شده در نقطه  $x_i$

$Z(x_i)$  : مقدار اندازه‌گیری شده در نقطه  $x_i$

جدول ۳: مقادیر RMSE محاسبه شده برای ۱۰ لندفرم مطالعاتی

	معیار سنجش	ASTER	TIN	TOPOGRID	SRTM	TOPOGRID-IN
زمین‌های کشاورزی	حداقل	10.5	17.9	12.6	13.5	12.5
	حداکثر	22.6	27.9	25.8	24.8	30.3
	میانگین	15.6	27.9	18.0	19.7	18.6
	میانه	15.3	23.56	18.3	19.3	19.1
	RMSE	15.8	23.8	18.2	19.9	20.7
تپه ماهور ۱	حداقل	-0.3	5.5	-15.7	-1.9	-13.2
	حداکثر	25.2	20.7	19.9	18.2	17.9
	میانگین	13.5	13.1	5.3	8.8	5.4
	میانه	14.0	13.8	9.0	8.6	5.1
	RMSE	14.5	13.6	11.2	10.0	9.8
تپه ماهور ۲	حداقل	5.7	6.6	3.3	5.5	4.2
	حداکثر	21.8	28.9	28.2	18.9	28.6
	میانگین	14.0	17.4	14.4	13.1	15.3
	میانه	14.4	15.5	14.0	14.4	15.3
	RMSE	15.3	19.6	16.8	14.1	17.7
کوهستان ۱	حداقل	-9.9	2.0	-6.4	-21.7	-15.5
	حداکثر	22.2	17.3	23.5	7.8	18.6
	متوسط	12.6	9.5	13.7	-3.9	9.0
	میانه	12.9	8.8	15.4	-4.2	10.3
	RMSE	14.1	10.2	15.2	7.3	11.8
کوهستان ۲	حداقل	-0.3	1.3	-10.3	-13.3	-9.6
	حداکثر	23.9	18.1	26.6	5.8	21.8
	متوسط	18.1	10.5	14.6	-5.4	12.8
	میانه	19.4	10.6	16.9	-5.9	14.8
	RMSE	18.7	11.3	16.4	7.5	14.5
در مسیر رودخانه	حداقل	18.9	17.4	-23.9	16.1	-23.8
	حداکثر	29.1	27.1	21.0	22.1	20.9
	متوسط	24.4	21.8	-5.9	19.6	-5.7
	میانه	24.3	21.5	-6.8	19.9	-6.7
	RMSE	24.6	21.9	11.8	19.7	11.8
پروفیل عرضی رودخانه ۱	حداقل	8.2	16.0	4.1	11.1	4.7
	حداکثر	14.3	25.1	15.6	18.6	16.2
	متوسط	12.4	22.3	8.2	15.9	11.7
	میانه	12.7	23.2	6.2	16.5	12.7
	RMSE	12.5	22.5	9.2	16.0	12.2
پروفیل عرضی رودخانه ۲	حداقل	12.3	16.0	-0.9	16.9	-0.9
	حداکثر	17.8	20.1	16.7	18.6	16.8
	متوسط	15.5	18.3	9.7	17.7	10.5
	میانه	16.6	18.2	10.6	17.6	12.0
	RMSE	15.6	18.3	11.3	17.7	12.0

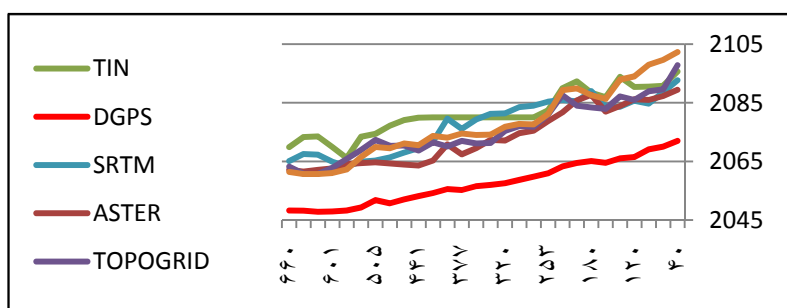
در مسیر جاده	حداقل	1.4	10.2	10.0	10.2	8.1
	حداکثر	16.5	14.5	15.6	13.8	15.9
	متوسط	7.8	12.3	12.5	11.2	11.8
	میانه	7.7	11.9	12.1	10.8	11.8
	RMSE	8.8	12.4	12.7	11.2	12.1
در مسیر دره	حداقل	12.9	15.4	-11.2	-3.8	-10.6
	حداکثر	24.4	32.0	25.8	24.3	29.3
	متوسط	18.2	21.9	16.9	18.0	18.0
	میانه	17.3	21.1	19.1	20.3	19.3
	RMSE	18.5	22.3	18.9	19.4	20.1
خطای کل	T-RMSE	15.8	17.6	14.2	14.3	14.3

منبع: نتایج پژوهش سال ۱۳۹۲

### بررسی دقت مدل‌ها در زمین‌های کشاورزی

اطلاعات مورد نیاز از زمین‌های کشاورزی روستای کوچ در حوالی مرکز حوضه مورد مطالعه، برداشت شد. مسیری به طول ۶۵۰ متر و تعداد ۳۵ نقطه با توجه به اندازه متوسط پیکسل‌های مربوط به مدل‌های مذکور،

فاصله ۱۰ تا ۲۰ متری انتخاب شد. زمین‌های کشاورزی در مسیر آبراهه ایجاد شده و دارای تراس‌بندی می‌باشد. (توضیح اینکه در کلیه اشکال زیر محور افقی نشان دهنده فاصله بر حسب متر و محور عمودی ارتفاع بر حسب متر است).



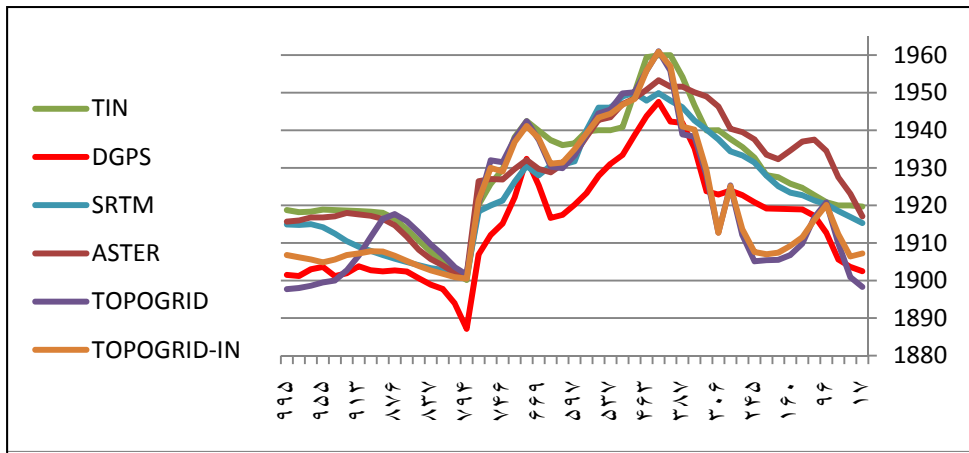
شکل ۲: مقایسه مدل ارتفاع رقومی در زمین‌های کشاورزی

منبع: نتایج پژوهش سال ۱۳۹۲

### بررسی دقت مدل‌ها در مناطق تپه ماهور

برای این منظور در حوالی ایستگاه ثابت DGPS شماره یک، در محدوده خروجی حوضه اقدام به برداشت داده‌های ارتفاعی شد. طول مسیری به اندازه ۱۰۰۰ متر و با تعداد ۵۰ نقطه مورد ارزیابی قرار گرفته‌است که نتایج آن در شکل شماره ۲ آورده شده‌است. با توجه به شکل ۲ روند تغییرات ارتفاعی روش‌های مختلف با داده‌های واقعی برداشت شده توسط دستگاه DGPS مطابقت دارد. مقدار اختلاف در آستانه‌های ارتفاعی و میانگین و میانه در جدول (۳) آورده شده‌است.

با توجه به شکل (۱)، در کلیه موارد مقادیر ارتفاع برآوردی توسط مدل‌ها، نسبت به مقدار واقعی بیشتر می‌باشد. مقدار اختلاف در آستانه‌های ارتفاعی و میانگین در جدول (۳) آورده شده‌است. با توجه به جدول (۳) کمترین میانگین خطا مربوط به مدل ارتفاع رقومی استخراج شده از تصاویر سنجنده ASTER با مقدار ۱۵.۸ متر و بیشترین میانگین خطا مربوط به روش TIN با مقدار ۲۳.۸ متر می‌باشد.

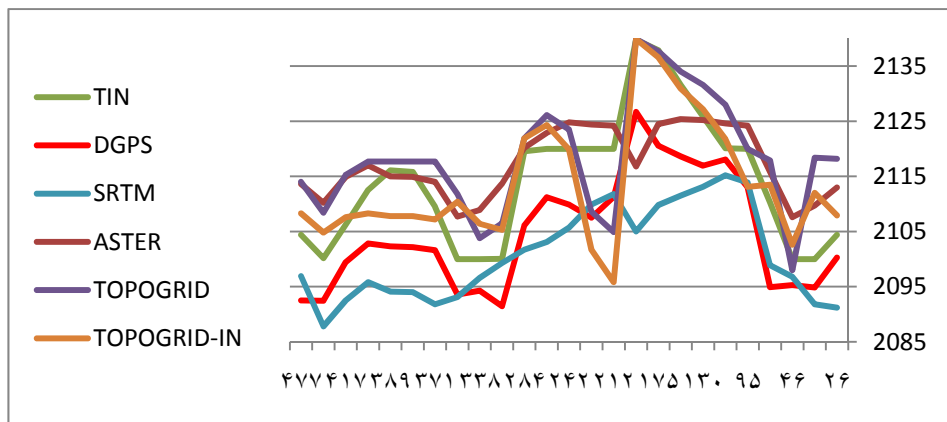


شکل ۳: مقایسه مدل‌های ارتفاع رقومی در مسیر ۱ تپه ماهور

منبع: نتایج پژوهش سال ۱۳۹۲

روش TOPOGRID با مقدار RMSE برابر با ۱۵.۲ متر و کمترین مقدار خطا مربوط به SRTM است. در مسیر دوم، بیشترین مقدار خطا مربوط به مدل رقومی استخراج شده از تصاویر ASTER با مقدار RMSE برابر با ۱۸.۷ متر و کمترین مقدار خطا مربوط به SRTM می‌باشد. داده‌های SRTM، با خطای متوسط ۷.۵ متر دقت خوبی را برای تهیه مدل ارتفاع رقومی در مناطق کوهستانی محدوده مورد مطالعه دارا می‌باشد.

تعداد ۸ نقطه در مسیر دیگری به طول حدود ۲۰۰ متر برداشت شد. (به علت رعایت فرمت فصلنامه، آوردن کلیه نمودارها امکانپذیر نشد) در دو مسیر مجزا هر یک به تعداد ۲۵ نقطه بطول ۵۰۰ و ۷۰۰ متر در محدوده مرکز حوزه در حوالی روستای کوچ برداشت شد، برای این منظور در حوالی ایستگاه ثابت DGPS شماره دو در ارتفاعات کوهستانی، اقدام به برداشت داده‌های ارتفاعی در دو مسیر متفاوت شد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳، بیشترین مقدار خطا در مسیر یک مربوط به



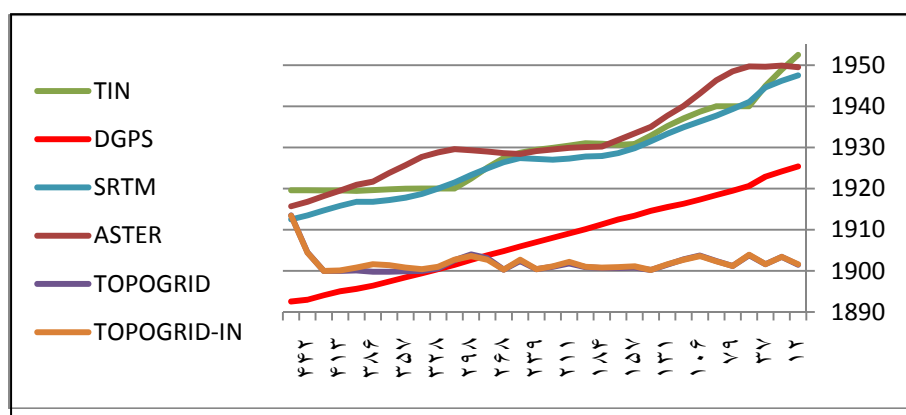
شکل ۴: مقایسه مدل ارتفاع رقومی در مسیر ۱ کوهستان

منبع: نتایج پژوهش سال ۱۳۹۲



متر می‌باشد. با توجه به شکل ۵، اگر چه مقدار خطا در دو روش TOPOGRID کمتر است؛ اما روند تغییرات ارتفاعی در این روش‌ها درست نیست و سه روش دیگر از نظر روند تغییرات ارتفاعی شرایط بهتری دارند. نتیجه‌ای که از مقایسه مدل‌ها حاصل می‌شود که تنها مقدار RMSE نمی‌تواند برای اظهار نظر در خصوص دقت یک مدل مناسب باشد.

در حوالی ایستگاه یک DGPS، در مسیر آبراه‌های بطول ۴۵۰ متر اقدام به برداشت ۳۲ نقطه ارتفاعی شد. نتایج استخراج شده از مقایسه ارتفاعات در مدل‌های مختلف نشان می‌دهد که کمترین مقدار خطا مربوط به مدل‌های استخراج شده از دو روش TOPOGRID با مقدار خطای ۱۱.۸ متر و بیشترین خطا مربوط به مدل استخراج شده از تصاویر ASTER با مقدار خطای ۲۴.۶



شکل ۵: مقایسه مدل‌های ارتفاع رقومی در مسیر طولی رودخانه

منبع: نتایج پژوهش سال ۱۳۹۲

واقعی تغییرات شدیدی را نشان می‌دهد و روند سایر مدل‌ها در عرض رودخانه، مشابه داده‌های واقعی است. در مسیر جاده با تغییرات ارتفاعی کم بطول ۲۲۰ متر، ۱۸ نقطه ارتفاعی برداشت شده. هر چند میزان RMSE برای داده‌های ASTER نسبت به سایر روش‌ها کمتر است؛ اما روند تغییرات ارتفاعی داده‌های ASTER با داده‌های واقعی مشابه نیست. ولی داده‌های استخراج شده از سایر روش‌ها از نظر روند تغییرات، مشابه داده‌های واقعی هستند. اما در همه روش‌ها، مقدار ارتفاع برآوردی بیشتر از مقدار واقعی می‌باشد. در مسیر دره‌ای با تغییرات ارتفاعی حدود ۱۰۰ متر و بطول ۳۹۰ متر، ۲۷ نقطه ارتفاعی برداشت شده‌است. نتایج تحلیل‌ها نشان می‌دهد که روند تغییرات ارتفاعی داده‌های استخراج شده از همه مدل‌ها با داده‌های

در دو مسیر مجزا یکی در محدوده خروجی حوضه، به تعداد ۱۰ نقطه در حوالی روستای نوفرست و مسیر دیگر در فاصله‌ای بالاتر به تعداد ۱۴ نقطه اقدام به برداشت شد. با توجه به نتایج ارائه شده در جدول ۳ بیشترین مقدار خطا در مسیر یک مربوط به روش TIN با مقدار RMSE برابر با ۲۲.۵ متر و کمترین مقدار خطا مربوط به TOPOGRID با مقدار خطای ۹.۲ متر و در مسیر دوم، بیشترین مقدار خطا مربوط به مدل رقومی استخراج شده از TIN با مقدار RMSE برابر با ۱۸.۳ متر و کمترین مقدار خطا مربوط به TOPOGRID با خطای ۱۱.۳ متر دقت خوبی را برای تهیه مدل ارتفاع رقومی در آبراه‌ها، در محدوده مورد مطالعه دارا می‌باشد. در پروفیل دوم حاصل شده از روش TOPOGRID روند تغییرات نسبت به داده‌های

عرض رودخانه اگر چه مقدار خطا در دو روش TOPOGRID کمتر است؛ اما روند تغییرات ارتفاعی در این روش‌ها با داده‌های واقعی و شرایط محیطی مطابقت ندارد. این موضوع در طول یک جاده با تغییرات ارتفاعی کم برای داده‌های ASTER دیده می‌شود. در مسیر دره با تغییرات ارتفاعی زیاد بیشترین مقدار RMSE مربوط به داده‌های TIN با مقدار ۲۲.۳ متر می‌باشد. با توجه به نتایج حاصل شده از این پژوهش و نظر به گستردگی استفاده از مدل TIN برای اکثر پروژه‌های منابع طبیعی و نیز پایان‌نامه‌های دانشجویی، تجدید نظر در استفاده از روش‌های جایگزین متناسب با نوع مطالعات پیشنهاد می‌شود. الگوریتم TOPOGRID دارای قابلیت‌های زیادی برای ساخت مدل رقومی ارتفاعی است؛ اما در محیط WORKSTATION نرم افزار ARCGIS قابل استفاده است و اکثر کاربران یا با قابلیت‌های آن آشنا نیستند، یا تمایلی به استفاده از این امکانات ندارند اما می‌تواند بعنوان یک جایگزین برای مدل TIN پیشنهاد شود. با توجه به محدودیت‌های اطلاعاتی مکانی برای مناطق مرزی، برای مثال در خراسان جنوبی از طول ۶۰ درجه شرقی، از شروع زون ۴۰ در سیستم UTM، داده‌های نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ موجود نیست. پیشنهاد می‌شود با توجه به دقت بالای داده‌های ASTER و SRTM که بصورت رایگان در اختیار پژوهشگران قرار می‌گیرد، می‌تواند بعنوان داده‌های جایگزین مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به نتایج این پژوهش که دقت ارتفاعی داده‌های نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ چه از طریق ارزیابی مدل‌های استخراج شده و نیز ارزیابی مستقیم نقاط ارتفاعی در این نقشه‌ها، حدود ۱۵ متر می‌باشد. اما در منابع مختلف دقت این نقشه‌ها را بین ۵ تا ۷ متر برآورد می‌کنند. پیشنهاد می‌شود با توجه به توسعه

واقعی مشابه است؛ اما در همه روش‌ها مقدار ارتفاع برآوردی بیشتر از مقدار واقعی می‌باشد. مقدار RMSE در تمامی روش‌ها بالا است. بیشترین مقدار آن برای داده‌های TIN با مقدار ۲۲.۳ متر و کمترین مقدار آن برای داده‌های ASTER به مقدار ۱۸.۵ متر می‌باشد. تعداد ۹ نقطه ارتفاعی از نقشه توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰ در محدوده داده‌های DGPS وجود داشت. پراکندگی این نقاط در مناطق تپه ماهور تا قله کوهها می‌باشد. ارتفاع نقاط مذکور و نیز اختلاف آن‌ها با داده‌های دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. حداکثر اختلاف ۱۷.۹۵ و مقدار RMSE برابر ۱۵.۹۰ متر می‌باشد. همچنین تعداد ۷۲۰ نقطه ارتفاعی توسط دستگاه GPS دستی مدل 76CX در محدوده داده‌های DGPS برداشت شد. پراکندگی این نقاط در مناطق تپه ماهور تا قله کوهها و زمین‌های کشاورزی است. ارتفاع نقاط مذکور و نیز اختلاف آن‌ها با داده‌های دقیق مورد بررسی قرار گرفته است. حداکثر اختلاف ۲۷.۹ متر و مقدار RMSE برابر ۱۷.۹۱ متر می‌باشد.

### بحث و نتیجه‌گیری

برای ۱۰ محدوده مختلف مطالعاتی در این پژوهش، بیشترین مقدار خطا مربوط به روش TIN و بعد ASTER است. در این مقایسه کمترین مقدار RMSE مربوط به روش TOPOGRID می‌باشد که مقدار اختلاف آن با روش TOPOGRID و SRTM ناچیز است. بیشترین میانگین خطای ارتفاعی در زمین‌های کشاورزی مربوط به روش TIN با مقدار ۲۳.۸ متر می‌باشد. سنجنده SRTM با خطای متوسط ارتفاعی ۷.۵ متر، دقت خوبی را برای تهیه مدل ارتفاع رقومی در مناطق کوهستانی محدوده مورد مطالعه دارا می‌باشد. در عرض رودخانه بیشترین مقدار خطا در مسیر یک مربوط به روش TIN و کمترین مقدار خطا مربوط به TOPOGRID می‌باشد. در مسیر رودخانه و نیز در

استفاده از دستگاه‌های دقیق DGPS دقت ارتفاعی این نقشه‌ها در پروژه‌های تحقیقاتی مورد بازنگری قرار گیرد.

## منابع

باقری بداع‌آبادی، محسن و دیگران (۱۳۹۰) "کارایی مدل رقومی ارتفاع و مشتقات آن در نقشه‌برداری خاک با استفاده از مدل استنباطی خاک -سرزمین (SoLIM)" نشریه آب و خاک، جلد ۲۵، شماره ۵، آذر - دی ۱۳۹۰، دانشگاه فردوسی مشهد.

پی. ای. بارو، سیستم اطلاعات جغرافیایی (۱۳۷۶). ترجمه حسن طاهری کیا، انتشارات سمت، تهران.

جیرانی، فرزین؛ مرید، سعید؛ مریدی، علی (۱۳۹۰). "اثر دقت مکانی نقشه رقومی ارتفاع در واسنجی و برآورد رواناب و رسوب با استفاده از مدل SWAT-CUP"، فصلنامه پژوهش‌های حفاظت آب و خاک (علوم کشاورزی و منابع طبیعی)، جلد هجدهم، شماره چهارم، دانشگاه گرگان.

حسین‌زاده، سیدرضا، جهادی، طرقي، مهناز (۱۳۸۹) "ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاع (DEMs) و الگوریتم‌های GIS در تحلیل‌های مورفومتری رودخانه‌ای (نمونه مورد مطالعه: حوزه آبریز رباط قره بیل در خراسان شمالی)"، جغرافیا و توسعه ناحیه‌ای، شماره چهاردهم، بهار و تابستان، دانشگاه فردوسی مشهد.

خورشیددوس، علی محمد؛ رضایی مقدم، محمدحسین؛ خالقی، سمیه (۱۳۸۹)، "تحلیل میزان تحول و فرسایش رودخانه‌ای در حوزه آبریز سنقرچای با استفاده از نیمرخ طولی و عرضی و مدل ارتفاعی رقومی (DEM)"، نشریه علمی-پژوهشی جغرافیا و برنامه‌ریزی، سال ۱۵، شماره ۳۴ زمستان ۱۳۸۹، دانشگاه تبریز.

رکنی دیلمی، بشیر؛ ضیائی‌ان فیروزآبادی، پرویز؛ فرج‌زاده‌اصل، منوچهر (۱۳۸۶) "ارزیابی دقت تهیه مدل رقومی ارتفاع با استفاده از تصاویر ASTER، همایش ژئوماتیک، تهران.

رنگزن، کاظم و دیگران (۱۳۸۴) "ارزیابی دقت مدل‌های IDW و Kriging جهت درون‌یابی داده‌های سطح آب زیر زمینی دشت میان آب شوشتر" همایش ژئوماتیک، تهران.

شفیعی خورشیدی، فاطمه؛ متین‌فر، حمیدرضا؛ متین‌فر، علوی‌پناه، سیدکاظم؛ فرخی، مهدی (۱۳۹۰) "تولید مدل رقومی ارتفاع با استفاده از زوج تصویر سنجنده ASTER" کاربرد سنجش از دور و GIS در علوم منابع طبیعی سال دوم شماره ۳ پاییز، دانشگاه آزاد بوشهر.

صفری، هرمز (۱۳۸۵) "مقایسه دو روش درون‌یابی IDW و Kriging جهت تهیه نقشه پهنه‌بندی املاک، مطالعه موردی: ناحیه ۵ شهرداری منطقه یک شهرداری تهران" مجله شهرنگار، شماره ۴۰، تهران.

عاشورلو، داوود و همکاران (۱۳۸۷) "تعیین حداقل اندازه پیکسل برای نقشه‌های توپوگرافی ۱:۲۵۰۰۰" فصلنامه زمین‌شناسی ایران، شماره هشتم، دانشگاه شهید بهشتی تهران.

عرب، سعید؛ نادری خوراسگانی، مهدی؛ جواد گیوی (۱۳۸۷) "تجزیه زمین‌نما و مدل‌سازی رقومی زمین با استفاده از سطوح ژئومرفیک در بخشی از کوه‌های زاگرس مرکزی" پژوهش کشاورزی: آب، خاک و گیاه در کشاورزی، جلد هشتم، شماره چهارم، زمستان ۸۷، دانشگاه بوعلی سینا، همدان.

قهرودی‌تالی، منیژه (۱۳۸۵) "ارزیابی روش‌های ساخت و اصلاح مدل‌های ارتفاعی" مطالعه موردی: حوضه سد گلستان ۲" مجله پژوهش‌های جغرافیایی، شماره ۵۷، دانشگاه تهران.

کمالی، اردوان؛ سرمیدان، فریدون؛ محمودی، شهلا (۱۳۸۸) "تولید مدل رقومی ارتفاع از تصاویر ASTER و ارزیابی دقت آن در منطقه ایوانکی استان سمنان" مجله تحقیقات آب و خاک ایران، شماره ۴۰، دانشگاه تهران.

متکان، علی اکبر و دیگران (۱۳۸۶) "مقایسه تطبیقی روش‌های حذف خط‌های مدل ارتفاعی رقومی (DEM) نمونه موردی، حوضه‌های آبخیز اکباتان" مجله علوم محیطی سال چهارم، شماره سوم، دانشگاه شهید بهشتی، تهران.

وحیدنیا، محمدحسن؛ آ شیخ، علی‌اصغر؛ ورشوساز، مسعود (۱۳۸۹) "ارزیابی شبکه پرسپترون چندلایه با مدل‌های موجود درونیابی مکانی" مهندسی فناوری اطلاعات مکانی، سال یکم، شماره یکم، تابستان ۸۹، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران.

ویلیامز، جانانان، (۱۳۷۶)، اطلاعات جغرافیایی از فضا، ترجمه علی‌اصغر روشن‌نژاد، تهران: انتشارات مرکز جغرافیایی شهر تهران.

- Gyozo Jordan (2007) "Adaptive smoothing of valleys in DEMs using TIN interpolation from ridgeline elevations: An application to morphotectonic aspect analysis" *Computers & Geosciences* 33, 573-585
- Hayakawa, Y.S. and Oguchi, T. (2006), "DEM-based Identification of Fluvial Knick Zones and its Application to Japanese Mountain rivers", *Journal of Geomorphology*, 78.
- Irvin, B.J. et al, 1997. "fuzzy & isodata classification of landform elements from digital terrain data in pleasant valley, Wisconsin". *Geoderma*, 77:137-154.
- Jacobsen, K. (2010). Comparison of ASTER GDEMs with SRTM height models. Earsel symposium, remote sensing for science, education, and natural and cultural heritage, Paris, France, 31 May-03rd June.
- Jing Li, et al (2005) "Accuracy and reliability of map-matched GPS coordinates the dependence on terrain model resolution and interpolation algorithm" *Computers & Geosciences* 31, 241-251.
- Lin, Q., Vesecky, J. F., & Zebker, H. A. (1994). Comparison of elevation derived from InSAR data with DEM over large relief terrain. *International Journal of Remote Sensing*, 15, 1775-1790.
- Lin, Z., and Oguchi, T. (2006), "DEM Analysis on Longitudinal and Transverse Profile of Steep Mountainous Watersheds", *Geomorphology*, 78.
- Mark, D. M. 1975. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. *Geografiska Annaler* 57A, 165-177.
- McBratney, A., Mendoc-a Santos, M., Minasny, B., 2003. On digital soil mapping. *Geoderma* 117 (1-2), 3-52.
- Michael B. Gousie, et al (2003) *CompSurf: an environment for exploring surface reconstruction methods on a grid*" *Computers & Geosciences* 29, 1165-1173
- Miller, C. L. and Laflamme, R. A. 1958. The digital terrain model - theory and application. *Photogrammetric Engineering*, 24, 433-442
- Moameni, A. 1994. Assessment of the prevailing irrigation practices and their relation to soil, using remote sensing and GIS in the amadan area (Iran). M. Sc. Thesis, International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). Enschede, the Netherlands.
- همراه، مجید، کارتوگرافی به کمک رایانه "تولید و انتشار نقشه‌های الکترونیکی" (۱۳۸۲)، انتشارات نشر انگیزه، تهران.
- یان هایوود و سارا کورنلیوس (۱۳۸۱). مقدمه ای بر سیستم‌های اطلاعات جغرافیایی، ترجمه گیتی تجویدی، انتشارات سازمان نقشه برداری کشور، تهران.
- Ahmed, Nadeem, et al. "Extraction and validation of cartosat-1 DEM." *Journal of the Indian Society of Remote Sensing* 35.2 (2007): 121-127.
- Ashourloo, D. et al, 2007. "An Evaluation of Hydrological Pit Filling Methods in the Ekbatan Watersheds, ENVIRONMENTAL SCIENCES Vol.4, No.3, Spring 2007 49-60
- Chaplot, V., Saleh, A., Jaynes, D.B., and Arnold, J. 2004. Predicting water, sediment and NO<sub>3</sub>-N loads under scenarios of land-use and management practices in a flat watershed. *Water, Air, and Soil pollution*, 154(1-4), 271-293.
- Cuartero, A., A. M. Felicísimo, and F. J. Ariza. "Accuracy of DEM generation from Terra-Aster stereo data." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 35.B2 (2004): 559-563.
- ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center), ASTER GDEM web site, last visit September, 2011, <http://www.ersdac.or.jp/GDEM/E/4.html>.
- Frank Kenny, Bryce Matthews (2005) "A methodology for aligning raster flow direction data" *Computers & Geosciences* 31, 768-779.
- Gallant, J. C & Wilson, J. P (1996) "TAPES-G: a grid-based terrain analysis program for environmental sciences". *computer & geosciences* .22(7).
- Giles, P. T (1988) "Geomorphological signatures :classification of aggregated slope unit objects from digital elevation & remote sensing data". *Earth surface processes & landforms*.20:581-594.
- Goncalves, J. A., and A. M. Oliveira. "Accuracy analysis of DEMs derived from ASTER imagery." *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* 35 (2004): 168-172.
- Guo-an, Tang, et al. "Evaluation on the accuracy of digital elevation models." *Journal of Geographical Sciences* 11.2 (2001): 209-216.

- Geomatics Support Center Technical Papers (2003).
- Thompson, J., Bell, J., and Butler, C. 2001. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma* 100: 67–89.
- Toutin, Thierry, and Philip Cheng. "Comparison of automated digital elevation model extraction results using along-track ASTER and across-track SPOT stereo images." *Optical engineering* 41.9 (2002): 2102-2106.
- Wilson, J. P. and Gallant, J. C. 2000. *Terrain analysis: principles and application*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Yang, X., Zhang, W., Zhu, S. (2001). Accuracy assessment of ASTER DEM in North Shaanxi of China. *Advances in cartography and GIS science*, volume 2, lecture notes in geoinformation and cartography, 6(Part 6), 371–382
- Zevenbergen, L. W. & Thorne, C. R. (1987) "Quantitative Analysis of land surface topography". *Earth surface processes and landforms*, 12.
- Zhang, W.H. & Montgomery, D.R. (1994) "Digital elevation model grid size, landscape representation & hydrologic simulations". *Water Resources Research* 30:1019-1028.
- NADEEM AHMED et al. (2007). Extraction and validation of CARTOSAT-1 DEM, *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, Vol. 35, No. 2.
- Quinn, P. F. et al. (1991) "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models". *Hydrological Processes* 5:59-79.
- Reinfelds, I., Cohen, T., Batten, P. and Brierley, G. (2004), "Assessment of Downstream Trends in Channel Gradient, Total and Specific Stream Power: A GIS Approach", *Geomorphology*, 60.
- S.M. Wise (2007) "Effect of differing DEM creation methods on the Frank Kenny, et al (2008) "Routing overland flow through sinks and flats in interpolated raster" *Computers & Geosciences* 34, 1417– 1430.
- Sandip Mukherjee et al. (2013) Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM), *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 21 (2013) 205–217
- 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
- Selby, Richard. "Creating Digital Elevation Models and Orthoimages from ASTER Imagery." *PCI*

