بررسی دقت ارتفاعی مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) مبتنی بر سنجش از دور در کاربری‌های مختلف

سکینه کوهی [۱] اصغر عزیزیان [۲]

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۸/۱۵ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۱/۳۰

****

چکیده

مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) از روش‌های متداول برای نمایش تغییرات توپوگرافی سطح زمین هستند، که با توجه به هزینه بالای تهیه نقشه‌های توپوگرافی زمینی، از کاربرد بسیار زیادی در زمینه‌های مختلف برخوردار می‌باشند. پژوهش حاضر با هدف بررسی کارایی منابع ارتفاعی با توان تفکیک مکانی مختلف در کاربری‌های گوناگون دو استان قزوین و مازندران به انجام رسیده است. در این تحقیق برای ارزیابی منابع ارتفاعی ۳۰ متری SRTM، ASTER و ۹۰ متری SRTM از داده‌های GPS دو فرکانسه (داده مبنا) استفاده شد و بر اساس شاخص‌های آماری همچون MD، RMSE، STD و MAD دقت ارتفاعی این منابع در سطح هر دو استان و در کاربری‌های مختلف بررسی گردید. نتایج به‌دست آمده حاکی از آن است که DEM ۳۰متری SRTM از قابلیت به مراتب مناسب‌تری در تخمین رقوم ارتفاعی برخوردار می‌باشد. به طوری‌که شاخص RMSE این منبع در هردو بازه استان قزوین و مازندران به ترتیب برابر با ۳/۸ و ۵/۸ متر می‌باشد. همچنین ارزیابی دقت ارتفاعی منابع مختلف در کاربری‌های گوناگون حاکی از عملکرد قابل قبول منبع ۳۰ متری SRTM در اکثر کاربری‌ها و پوشش‌ها به غیر از نواحی کوهستانی و جنگلی می‌باشد. علت اصلی این عملکردِ پائین به ویژه در اراضی با پوشش جنگلی، عدم نفوذ امواج راداری در سطوح دارای پوشش و همچنین تراکم کم داده‌های برداشت شده توسط سنجنده SRTM می‌باشد. منبع ارتفاعی ۹۰ متری SRTM نیز علی‌رغم دارا بودن توان تفکیک پائین از عملکرد به مراتب بهتری نسبت به منبع ۳۰ متری ASTER برخوردار می‌باشند. در یک جمع‌بندی کلی می‌توان چنین عنوان نمود که منبع ارتفاعی SRTM-30m می‌تواند در حوضه‌های فاقد آمار زمینیِ مناسب و یا با کمبود آمار بسیار راه‌گشا باشد. البته لازم به‌ذکر است که با توجه به تأثیر قابل توجه نوع پوشش گیاهی بر دقت ارتفاعی این منابع، توصیه می‌شود تا به‌منظور حصول نتایج قابل‌اطمینان‌تر، در ابتدا با توجه به نوع پوشش گیاهی موجود در محدوده مطالعاتی به انتخاب منبع ارتفاعی مناسب اقدام شده و سپس با استفاده از داده‌های زمینی (نقاط کنترل زمینی)، مقادیر ارتفاعی اصلاح شود.

واژه‌های کلیدی: مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs)، سنجش از دور، ارتفاع، پوشش سطح زمین.

****

۱- دانشجوی دکتری مهندسی منابع آب، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران (نویسنده مسئول). sakinekoohi.ikiu@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)، قزوین، ایران. azizian@eng.ikiu.ac.ir

۱- مقدمه

مدل‌های رقومی ارتفاعی[1] یکی از منابع مهم برای کسب اطلاعات در خصوص تغییرات توپوگرافی در سطح زمین می‌باشند. در واقع این منبع اطلاعاتی، با استفاده از یک ساختار سلولی نمایانگر پستی و بلندی‌های سطح زمین می‌باشد که در آن هر سلول بیانگر متوسط ارتفاع آن ناحیه می‌باشد. مدل‌های رقومی ارتفاعی و نقشه‌های استخراج شده از آن (همانند نقشه شیب، شاخص توپوگرافی، شبکه زهکشی و غیره) در زمینه‌های مختلفی همچون محیط زیست، بررسی رخدادهای طبیعی، مدل‌سازی هیدرولوژیکی/هیدرولیکی، مطالعات شناسایی تغییرات ژئومورفولوژیکی حوضه‌ها و نیز مدل‌سازی فرآیند فرسایش و رسوب در سطح حوضه‌های آبریز در مقیاس جهانی و منطقه‌ای کاربرد دارد ***(Wolock and Price, 1994; Sanders, 2007; Fan et al, 2009; Hinkel et al, 2014; Shokoohi and Azizian, 2014)***. نقشه‌های توپوگرافی، تکنیک‌های مبتنی بر سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای از منابع مهم تهیه مدل‌های رقومی ارتفاعی بشمار می‌آیند.

با توجه به هزینه بالا و وقت‌گیر بودن تهیه نقشه‌های توپوگرافی با استفاده از تکنیک‌های زمینی، امروزه مدل‌های رقومی ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور با توجه به اینکه از حیث دقت ارتفاعی دارای تنوع زیادی بوده و دسترسی به آن‌ها بدون هیچگونه هزینه‌ای به راحتی امکان‌پذیر می‌باشد، مورد توجه گسترده بسیاری از محققین و مهندسین قرار گرفته است. تاکنون مطالعات مختلفی در زمینه بررسی کارایی منابع مختلف به ویژه در زمینه ارزیابی دقت ارتفاعی آن‌ها در نقاط مختلف دنیا صورت گرفته است.

به‌عنوان مثال، ***(Amans et al, 2014)*** با ارزیابی دقت ارتفاعی منابع SRTM و ASTER نسبت به مقادیر ارتفاعی به‌دست آمده از GPS در ایالت اوندو[2] نیجریه به این نتیجه رسیدند که بر اساس شاخص RMSE، میزان خطای حاصل از منبع SRTM نسبت به ASTER در نواحی کوهستانی بیشتر می‌باشد. همچنین این محققین نشان دادند که در صورت استفاده از نقشه ASTER تغییرات ارتفاعی محدوده مورد مطالعه را بهتر می‌توان نمایش داد. ***(Thomas et al, 2014)*** با ارزیابی سه منبع ارتفاعی SRTM، ASTER و GMTED نسبت به نقشه‌های توپوگرافی در دو حوضه آبریز مودیراپوژا[3] و پامبار[4] واقع در کشور هند به این نتیجه رسیدند که منابع ASTER و SRTM از قابلیت مناسبی برای نمایش تغییرات توپوگرافی و وضعیت پستی و بلندی منطقه برخوردار می‌باشند. همچنین محاسبات صورت گرفته در بررسی دقت ارتفاعی این منابع نشان داد که علی‌رغم قدرت تفکیک کمتر نقشه SRTM، این منبع دارای مقدار RMSEکمتری بوده (RMSE=23) و لذا از دقت ارتفاعی به مراتب بهتری برخوردار می‌باشد.

از طرفی منبع GMTED با دارا بودن بیشترین میزان RMSE (RMSE=59) از عملکرد پائین‌تری به ویژه در حوضه‌های کوهستانی برخوردار می‌باشد.

(Elkhrachy, 2016) به ارزیابی دقت مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM و ASTER با استفاده از داده‌های به‌دست آمده از دستگاه GPS و نقشه‌های توپوگرافی زمینی در شهر نجران[5] عربستان سعودی پرداخت. نتایج نشان داد با مبنا قرار دادن ارتفاع حاصل از GPS، دقت ارتفاعی نقشه‌های SRTM و ASTER به ترتیب ۵/۹٤± و ۵/۰۷± می‌باشد و این در حالی است که درصورت استفاده از نقشه‌های توپوگرافی به‌عنوان سطح مبنا این دقت به ٦/۸۷± و ۷/۹۷± تغییر می‌یابد. همچنین نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که می‌توان از این دو منبع برای توسعه نقشه‌های توپوگرافی در مناطقی که امکان برداشت زمینی وجود ندارد، استفاده نمود. ***(Pakoksung and Takagi, 2016)*** دقت ارتفاعی شش مدل ارتفاعی مختلف (GSI-DEM، ASTER، SRTM، GMTED، HydroSHEDS، GTOPO30) را در شیکوکو[6]ژاپن مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست آمده نشان داد که نقشه GSI-DEM دارای بالاترین میزان دقت ارتفاعی نسبت به

1- DEMs
2-. Ondo
3-Muthirapuzha
4-Pambar
5- Najran
6- Shikoku

سایر منابع می‌باشد. (Zhao et al, 2018) در پژوهشی به بررسی دقت ارتفاعی نقشه SRTM در مناطق با کاربری پوشش گیاهی پرداختند و به این نتیجه رسیدند که میزان خطای این منبع در برآورد رقوم ارتفاعی سطح زمین در حدود ٦متر (بیش برآورد) می‌باشد. همچنین این محققین نشان دادند با اصلاح این منبع ارتفاعی بر اساس داده‌های زمینی، می‌توان مقدار خطای آن را تا حدود بسیار زیادی کاهش داد. همچنین(Azizian, 2018) کارایی منابع سنجش از دوری SRTM، ASTER و ALOS را در استخراج مدل هندسی رودخانه و برآورد مؤلفه‌های هیدرولیکی سیلاب در دو رودخانه سجاس‌رود و سرباز مورد ارزیابی قرار داد. نتایج به‌دست آمده نشان داد که منابع ارتفاعی ۳۰ متری ALOS نسبت به منابع دیگر، بهترین عملکرد را داشته و از قابلیت به مراتب بالاتری جهت ساخت مدل هندسی و مدل‌سازی هیدرولیکی سیلاب برخوردار می‌باشند.

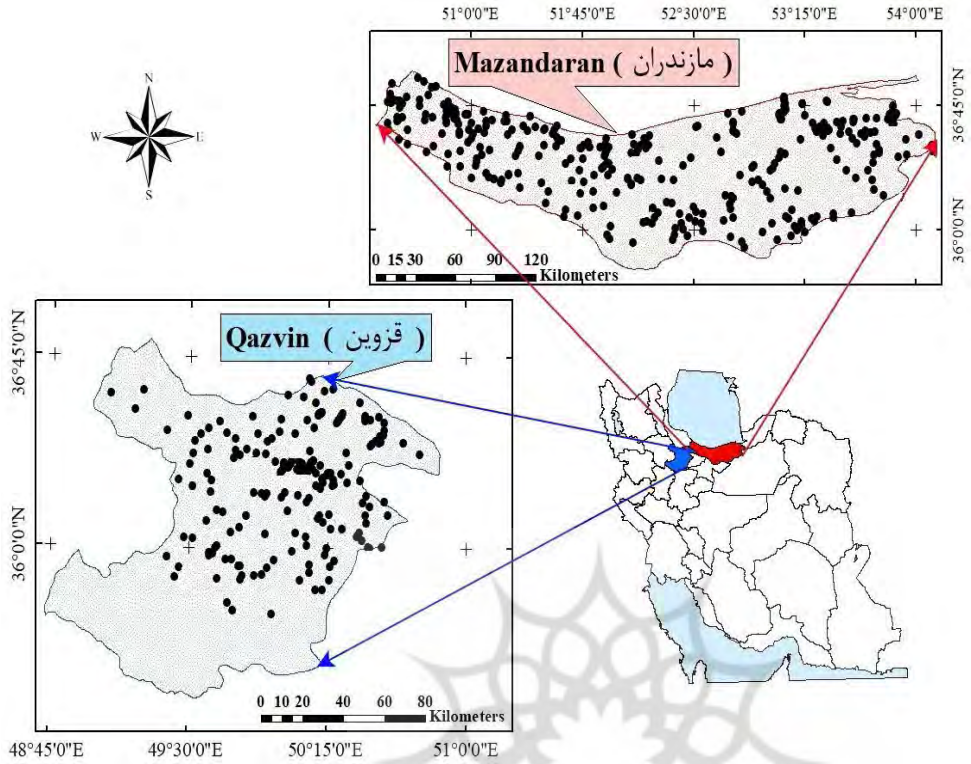
نکته حائز اهمیت و مهم در استفاده از منابع ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور، دقت ارتفاعی آن‌ها در کاربری‌های مختلف می‌باشد. ***(Gamba et al, 2002)*** به ارزیابی نقشه‌های ۳۰ متری SRTM در دو منطقه شهری لس‌آنجلس[1] و سالت‌لیک[2] پرداختند. نتایج نشان داد که علی‌رغم وجود برخی مشکلات اعم از ابعاد سلولی نسبتاً بزرگ این نقشه‌ها، این منبع توانایی بالایی در شناسایی ساختمان‌های اصلی منطقه داشته و قابل استفاده در برنامه‌ها و مطالعات شهری می‌باشد. همچنین ***(Gesch et al, 2012)*** با ارزیابی منابع ارتفاعی مختلف نشان دادند که رابطه کاملاً مشخصی بین نوع پوشش سطح زمین و دقت ارتفاعی نقشه‌های SRTM و ASTER وجود دارد، به این صورت که با افزایش تراکم پوشش گیاهی میزان دقت ارتفاعی منابع موردنظر، کاهش می‌یابد.

(Santillan and Makinano-Santillan, 2016) نیز به بررسی دقت ارتفاعی سه منبع ارتفاعی SRTM، ALOS، ASTER در کاربری‌های مختلف در شمال‌شرقی میندانائو[3] (واقع در کشور فیلیپین) پرداخته و به این نتیجه رسیدند که با توجه به مقدار کم شاخص RMSE (در محدوده ٤/٢٩ تا ٦/٦٧ برای انواع کاربری‌ها) نقشه‌های ۳۰ متری ALOS از توانایی به مراتب بالاتری نسبت به منابع SRTM و ASTER برخوردار می‌باشد. همانطور که ملاحظه می‌گردد با توجه به اهمیت برآورد صحیح رقوم ارتفاعی سطح زمین در بسیاری از مطالعات (ازجمله: مطالعات هیدرولوژیکی، برآورد مؤلفه‌های ژئومورفولوژیکی، شبیه‌سازی هیدرولیکی سیلاب و . . .) تحقیقات مختلفی به ویژه در کشورهای جهان سوم که با مشکل دسترسی به داده‌های زمینی با کیفیت روبرو هستند، انجام شده است. کشور ایران نیز از این قاعده مستثنا نبوده و در بسیاری از بخش‌های آن به علت عدم وجود نقشه‌های با وضوح مکانی بالا، انجام بسیاری از مطالعات و پروژه‌های مهندسی امکان‌پذیر نبوده و در صورت انجام نیز نیازمند هزینه‌های بسیار زیادی می‌باشند.

همانطور که عنوان شد، با توسعه روز افزون تکنولوژی‌های مبتنی بر سنجش از دور امکان دسترسی به طیف وسیعی از اطلاعات از جمله رقومی ارتفاعی سطح زمین برای بخش‌های مختلفی از جهان میسر می‌گردد، ولی متأسفانه علی‌رغم کاربرد گسترده منابع ارتفاعی، تاکنون به چگونگی عملکرد و دقت این منابع در کاربری‌های مختلف در کشور پرداخته نشده است و در بیشتر مطالعات از نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس ۱/۱۰۰۰ و ۱/۲۰۰۰ که دستیابی به آن‌ها با صرف هزینه زیادی نیز همراه است استفاده می‌شود. در حال حاضر منابع ۳۰متری ASTER و SRTM از جمله مهم‌ترین منابع ارتفاعی پرکاربرد و قابل دسترس برای همگان بشمار می‌آید.

با توجه به توضیحات مذکور، پژوهش حاضر با هدف ارزیابی منابع ارتفاعی ۳۰متری SRTM / ASTER و ۹۰متری SRTM در کاربری‌های مختلف دو استان مازندران و قزوین به انجام رسیده است. به عبارت بهتر این پژوهش به دنبال یافتن پاسخی مناسب برای این مسأله است که DEMهای مبتنی بر سنجش از دور در کدامیک از کاربری‌های موجود

1- Los Angeles
2- Salt Lake
3- Mindanao



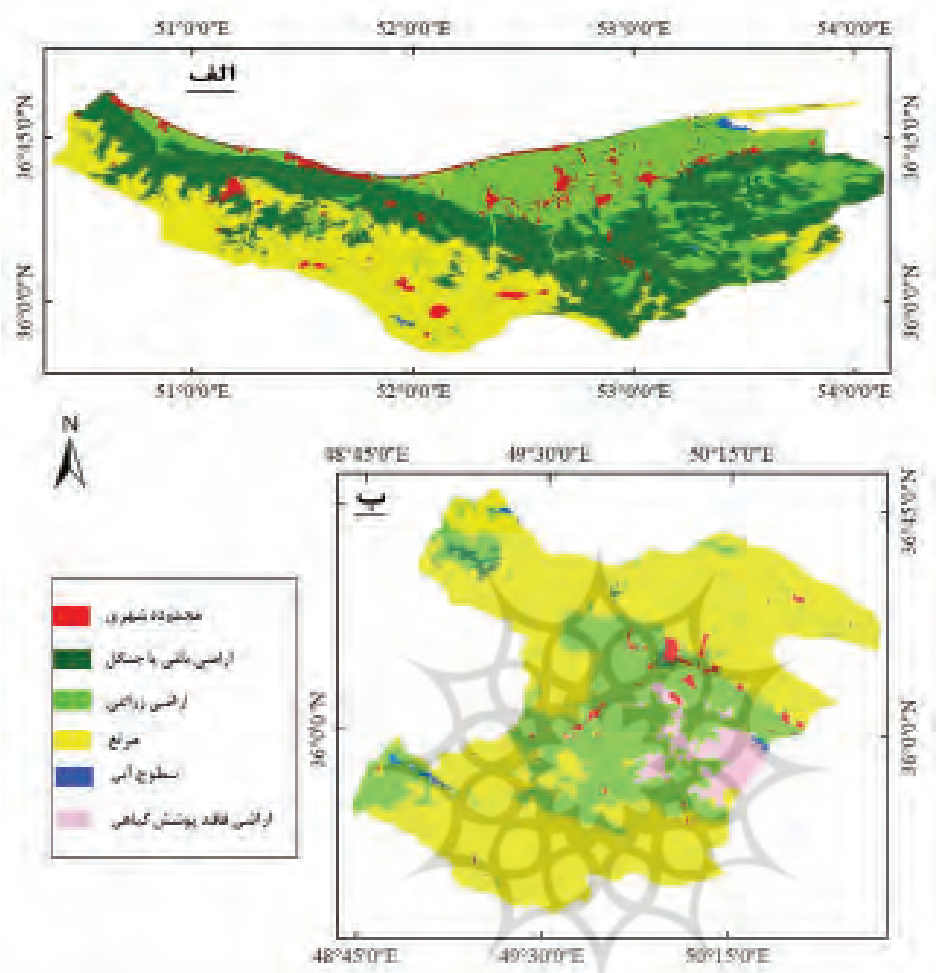
نگاره ۱: موقعیت جغرافیایی محدوده‌های مطالعاتی و نقاط برداشت شده زمینی.

در سطح زمین از قابلیت کاربرد بیشتری برخوردار می‌باشند و از کدامیک از آن‌ها می‌توان به‌عنوان نزدیک‌ترین جانشین برای نقشه‌های زمینی استفاده نمود. همچنین لازم به ذکر است که برای ارزیابی منابع ارتفاعی مذکور از برداشت‌های زمینی (با استفاده از دستگاه GPS دو فرکانسه) و نیز نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس بالا در محدوده‌های مطالعاتی استفاده شده است.

۲-مواد و روش‌ها

۲-۱-منطقه مورد مطالعه

پژوهش حاضر در دو استان مازندران و قزوین که دارای شرایط اقلیمی و توپوگرافی متفاوت می‌باشند، صورت پذیرفته است. استان قزوین با وسعتی معادل ۱۵۶۲۳کیلومتر مربع و بین طول‌های جغرافیایی ۴۸ درجه و ٤٤ دقیقه تا ۵۰ درجه و ۵۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۲٤ دقیقه تا ۳٦ درجه و ٤۸ دقیقه شمالی قرار گرفته است. پست‌ترین نقطه ارتفاعی آن ۲۵۲ متر و مرتفع‌ترین نقطه استان دارای ارتفاع ٤۱۲۵ متر می‌باشد. انواع کاربری باغ، کوهستان، کشاورزی، دشت و رودخانه در این استان موجود می‌باشند. حوضه مطالعاتی استان مازندران نیز در شمال کشور بین طول‌های جغرافیایی ۵۰ درجه و ۱۵ دقیقه تا ٥٤ درجه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ٤۵ دقیقه تا ۳۷ درجه شمالی قرار گرفته و با وسعتی معادل ٤ /۲۳۷۵٦ کیلومترمربع حدود ۱/٤٦درصد از مساحت کشوررابه خود اختصاص داده است. بخش کوهستانی منطقه تا ارتفاع ۲۰۰۰ متری پوشیده از جنگل بوده و بخش مسطح آن دارای پوشش متراکمی از جنگل، باغ و اراضی کشاورزی می‌باشد، از این رو منطقه مورد مطالعه از حیث تغییرات توپوگرافی و نوع کاربری از تنوع گسترده‌ای برخوردار است. در نگاره ۱ نمائی از موقعیت جغرافیایی محدوده‌های مطالعاتی و نیز محل برداشت نقاط ارتفاعی (به دست آمده از برداشت‌های زمینی و نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس بالا) نشان داده شده است.همچنین نقشه کاربری اراضی محدوده‌های مورد مطالعه در نگاره ۲ ارائه شده است.



نگاره ۲: نقشه کاربری اراضی محدوده‌های مورد مطالعه: الف) مازندران، ب) قزوین.

۲-۲- داده‌های مورد استفاده

مدل‌های رقومی ارتفاعی، حاوی اطلاعات ارتفاعی نقاط یک محدوده می‌باشند و پستی و بلندی زمین را توسط یک شبکه سلولی نمایش می‌دهند *(Peralvo, 2017)* . امروزه منابع تهیه، که این مدل‌ها را به صورت رایگان در دسترس همگان قرار می‌دهند، گسترش چشمگیری داشته است. در حال حاضر منابع ارتفاعی مختلف وجود دارد که می‌توان آن‌ها را در دو دسته با توان تفکیک بالا (High Resolution) و پائین (Low Resolution) دسته‌بندی نمود. از مهم‌ترین منابع موجود در دسته اول، می‌توان به منابع ۳۰ متری SRTM، ASTER و نقشه‌های ۹۰ متری SRTM اشاره نمود. همچنین منابع ۴۵۰ و ۹۰۰ متری HydroSHEDS و نقشه‌های ۱ کیلومتری GTOPO30 نیز در رده منابع ارتفاعی با توان تفکیک پائین قرار می‌گیرند. داده‌های SRTM مبتنی بر تصاویر راداری است که از قدرت تفکیک مکانی ۳۰ و ۹۰ متری برخوردار می‌باشند *(Falorni et al, 2005)* . نقشه‌های ASTER نیز از دیگر منابع ارتفاعی با توان تفکیک بالا می‌باشند که طی یک پروژه مشترک بین NIMA[1] و NASA[2] تهیه شده و به‌عنوان یکی از پرکاربردترین منابع ارتفاعی به ویژه در مطالعات هیدرولوژیکی به شمار می‌آیند *(Pakoksung and Takagi, 2016)*.

در جدول ۱ مشخصات مربوط به هر کدام از منابع مزبور و نحوه دسترسی به آن‌ها ارائه شده است. لازم به‌ذکر است که مقادیر ارتفاعی به‌دست آمده از برداشت زمینی توسط دستگاه GPS دوفرکانسه که از دقت بالا و سرعت آنی برخوردار می‌باشد و همچنین نقشه‌های توپوگرافی ۱/۱۰۰۰

1- National Imagery and Mapping Agency
2- National Aeronautics and Space Administration

و ۱/۲۰۰۰ (برای مناطق با کاربری رودخانه) به‌عنوان سطح مبنا برای ارزیابی دقت منابع ارتفاعی سنجش از دور در نظر گرفته شده است.

سرعت آنی در این دستگاه GPS به این معنی است که اطلاعات توسط این دستگاه به‌صورت شناور و لحظه‌ای در اختیار کاربر بوده و دقت آن نیز لحظه‌ای می‌باشد. در نهایت با توجه به اینکه منابع ارتفاعی مورد استفاده در این پژوهش از ماهیت رستری برخوردار می‌باشند درحالی‌که نقاط کنترل (۱۸۳ نقطه در سطح استان قزوین و ۲۱۶ نقطه در سطح استان مازندران)، ماهیت برداری دارند در پژوهش پیش‌رو از تابع آماری منطقه‌ای[1] موجود در برنامه ArcMap به‌منظور استخراج ارزش پیکسل‌های هریک از نقاط کنترل استفاده شده است.

جدول ۱: مشخصات مدل‌های رقومی ارتفاعی مورد استفاده در پژوهش حاضر

نام محصول	SRTM-90m	ASTER-30m	SRTM-30m
توسعه‌دهنده	NASA/USGS	METI/NASA	NASA/USGS
سال انتشار	2000	2009	2000
دقت مکانی	3arc-second	1arc-second	1arc-second and
سیستم مختصات	WGS84	EGM96	WGS84
فرمت	GeoTiff	GeoTiff	GeoTiff
منبع دسترسی	http://www.opentopography./org	http://earthexplorer.usgs.gov	http://www.opentopography./org

۲-۳-شاخص‌های آماری ارزیابی منابع ارتفاعی مختلف

شاخص‌های مختلفی برای ارزیابی دقت ارتفاعی منابع ارتفاعی وجود دارد که در این پژوهش از شاخص‌هایی همچون RMSE[2]، ME[3]، MAE[4] و STD[5] برای بررسی اختلاف بین منابع ارتفاعی و برداشت‌های زمینی استفاده شد. RMSE از شاخص‌های رایج آماری برای بررسی اختلاف میان دو جامعه به‌شمار می‌آید، که در این پژوهش این شاخص مبین اختلاف بین ارتفاع به‌دست آمده از منبع ارتفاعی مورد نظر و سطح مبنا (به‌دست آمده از برداشت‌های زمینی) می‌باشد.

هرچه مقدار این شاخص برای یک منبع ارتفاعی کمتر باشد، حاکی از شباهت آن منبع به داده‌های زمینی است. ME نیز مبین میانگین اختلاف بین منبع ارتفاعی موردنظر و داده‌های زمینی است که مقادیر مثبت و منفی آن به ترتیب حاکی از بیش‌برآوردی و کم برآوردی منبع ارتفاعی است. MAE نیز تقریباً مشابه با ME بوده با این تفاوت که این شاخص میانگین قدر مطلق اختلاف بین منبع ارتفاعی موردنظر و برداشت‌های زمینی می‌باشد. در نهایت برای بررسی میزان پراکندگی اختلاف ارتفاعی مذکور از شاخص STD استفاده گردید. در جدول ۲ نحوه محاسبه هر کدام از شاخص‌های مزبور ارائه شده است.

همچنین لازم به ذکر است که با توجه به وجود داده‌های پرت در مقادیر ارتفاعی به‌دست آمده از منابع مختلف و نیز برداشت‌های زمینی که مهم‌ترین علت آن خطای ناشی از تکنیک‌های سنجش از دور، روش‌های درونیابی برای ساخت منابع ارتفاعی و نیز ابزارهای اندازه‌گیری می‌باشد، بایستی قبل از استفاده از داده‌های مذکور اصلاحاتی بر روی آن‌ها صورت گیرد.

وجود داده‌های پرت در مراحل مربوط به آنالیز و تفسیر اطلاعات (از لحاظ ساختاری و مفهومی) تأثیرگذار بوده و با ایجاد خطاهای آماری امکان نتیجه‌گیری منطقی از اطلاعات را غیرممکن می‌نمایند ***(Montgomery et al, 1981)***. بنابراین مشخصات آماری فوق‌الذکر قبل و پس از حذف داده‌های پرت محاسبه شده‌اند تا اثر وجود چنین داده‌هایی در تحلیل نهایی مشخص گردد.

برای شناسایی داده‌های پرت در پژوهش حاضر از روش نمودار جعبه‌ای که از روش‌های دامنه برای این مهم محسوب می‌شود، استفاده شده است (رینمن و همکاران،

1-Zonal Statistics
2-. Root Mean Square Error-RMSE
3- MeanAbsolute Difference-MAD
4- Mean Difference -MD
5- Standard Deviation Error-STD

۲۰۰۵). در نمودار جعبه‌ای، داده‌هایی که کوچک‌تر از (دامنه چارکی۱/۵-چارک اول) و بزرگ‌تر از (دامنه چارکی۱/۵+چارک سوم) می‌باشند، مقادیر پرت ضعیف و داده‌هایی که کوچک‌تر از (دامنه چارکی۳-چارک اول) و بزرگ‌تر از (دامنه چارکی۳+چارک سوم) می‌باشند، به‌عنوان داده پرت قوی شناخته می‌شوند.

جدول ۲: شاخص‌های آماری مورد استفاده در این پژوهش

شاخص آماری	رابطه ریاضی
اختلاف ارتفاع	$H=H_{Reference}-H_{DEM}$
انحراف از معیار	$STD=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(H_i-MD)^2}{n-1}}$
میانگین اختلاف	$MD=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}H_i$
میانگین قدر مطلق اختلاف	$MAD=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\lvert H_i\rvert$
جذر میانگین مربعات خطا	$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(H_i)^2}{n}}$

۳- نتایج

۳-۱- ارزیابی دقت ارتفاعی منابع ارتفاعی با توان تفکیک بالا

همانطور که در بخش‌های قبل نیز عنوان شد در این تحقیق از منابع ارتفاعی مختلفی در دو محدوده مطالعاتی استان مازندران و قزوین استفاده شد، نمودار پراکنش مقادیر ارتفاعی مستخرج از منابع مورد بررسی در برابر مقادیر کنترل زمینی در نگاره ۳ ارائه شده است.

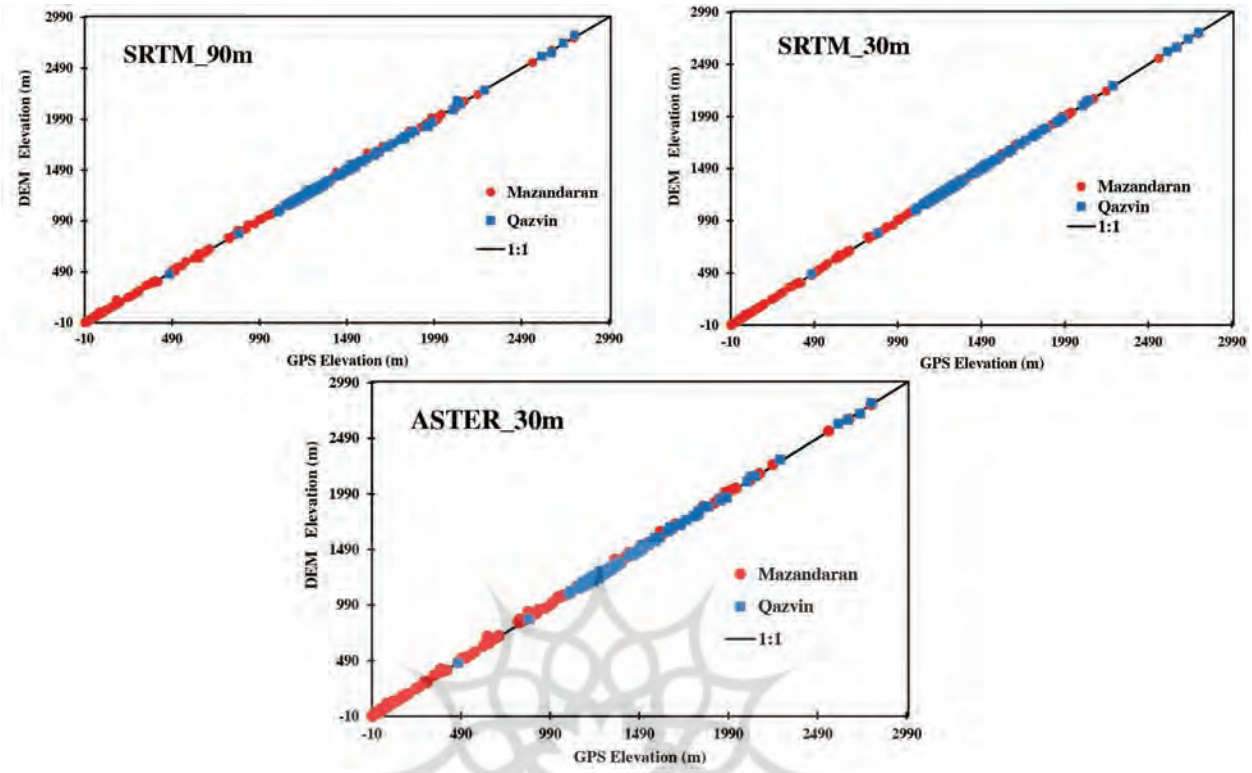
با توجه به وجود اختلاف ارتفاعی زیاد بدلیل واقع شدن نقاط کنترل در کاربری‌های مختلف و برای ارزیابی بهتر میزان دقت منابع ارتفاعی مذکور، شاخص‌های آماری مربوط به آن‌ها نسبت به داده‌های زمینی برآورد گردید. مشخصات آماری به‌دست آمده از کاربرد منابع ارتفاعی در جداول ۳ و ٤ قبل و پس از حذف داده‌های پرت ارائه شده است. همانگونه که در جداول مذکور مشاهده می‌گردد، اختلاف بین هر کدام از منابع با داده‌های زمینی در هر دو محدوده پس از حذف داده‌های پرت کاهش یافته است.

به‌عنوان نمونه، انحراف از معیار مربوط به داده‌های ۳۰ متری SRTM در استان‌های قزوین و مازندران قبل از حذف داده‌های پرت[1] به ترتیب ٤/٦ و ۷/۱ بوده و این مقادیر پس از حذف داده‌های پرت به ۳/۸ و ۵/۸ کاهش یافته است، که این امر نشان‌دهنده تأثیر قابل توجه داده‌های پرت در پراکندگی مجموعه داده‌ها می‌باشد و اینکه با حذف آن‌ها، از میزان پراکندگی داده‌ها کاسته شده است. بررسی عملکرد منابع ارتفاعی مختلف بر اساس شاخص میانگین خطاحاکی از آن است که تمامی منابع ارتفاعی مورد استفاده در استان قزوین تمایل به بیش‌برآوردی دارند.

طبق محاسبات صورت گرفته، منابع ۳۰ متری SRTM و ASTER به ترتیب با دارا بودن مقدار MD معادل ۰/۵ و ۷/۵ متر به ترتیب دارای بهترین و بدترین عملکرد در تخمین ارتفاع می‌باشند. بر خلاف استان قزوین، در استان مازندران هر سه منبع مورد مطالعه تمایل به کم‌برآوردی داشته و مقدار ارتفاع را کمتر از داده‌های زمینی برآورد نموده‌اند.

این میزان در خصوص داده‌های ۳۰ متری ASTER نسبتاً قابل توجه می‌باشد، به‌طوری که بر اساس شاخص MD مقدار ارتفاع به طور متوسط در حدود ٤/۹ متر کم برآورد شده است. در کل با توجه به دیگر شاخص‌های آماری همچون SD و RMSE، منابع ارتفاعی SRTM-30m و SRTM-90m از توانایی مناسبی برای برآورد مقادیر ارتفاع در هر دو محدوده مطالعاتی برخوردار هستند، در صورتی‌که منابع ارتفاعی ۳۰متری ASTER از کارایی قابل‌قبولی برخوردار نمی‌باشند.

1- Outlier



نگاره ۳: نمودار پراکنش مقادیر ارتفاع مستخرج از منابع مختلف و مقادیر GPS برای نقاط کنترل

جدول ۳: شاخص‌های آماری قبل از حذف داده‌های پرت

منطقه مورد مطالعه	منبع ارتفاعی	میانگین قدرمطلق‌خطا (متر)	انحراف‌ازمعیار (متر)	مجذور مربعات خطا (متر)	میانگین اختلاف (متر)	حداکثر (متر)	حداقل (متر)
قزوین	SRTM-30m	۲/۹	٤/۷	٤/۷	۰/۵	٦۸/۰	-۳٤/۰
	SRTM-90m	۷/٤	٦/۱	۸/۹	٦/۵	۷۸/۰	-۳۱/۰
	ASTER-30m	۱۰/۳	۹/۷	۱۲/۱	۷/۳	٦٤/۰	-٤٦/۰
مازندران	SRTM-30m	٤/۱	۷/۱	۷/۱	-۰/٦	۵۷/۰	-۱۰۱/۰
	SRTM-90m	۵/٤	۹/۵	۹/۷	-۱/٦	۷۱/۰	-۱۱۱/۰
	ASTER-30m	۷/۸	۱۰/٦	۱۱/۹	-۵/٤	٤۷/۰	-۱۳٤/۰

میزان شاخص RMSE مربوط به داده‌های ۳۰ متری ASTER در استان‌های قزوین و مازندران به ترتیب معادل ۹ و ۱۰/٤ متر است، در صورتی‌که مقدار شاخص RMSE مربوط به منابع ۹۰ متری SRTM به ترتیب ٤۷/۸ و ۲۲/۱ درصد کمتر از منبع ASTER می‌باشد.

در پژوهش حاضر بازه عددی بین ۵- تا ۵ متر به‌عنوان بازه قابل قبول برای مقدار اختلاف بین منابع ارتفاعی و داده‌های زمینی انتخاب گردید(*Zhao et al, 2018*). در جدول ۵، درصد داده‌های واقع در بازه مذکور برای هر کدام از منابع ارتفاعی و برای استان‌های قزوین و مازندران ارائه شده است. همانطور که در جدول ۵ ملاحظه می‌گردد، در صورت استفاده از منابع ۳۰ متری SRTM به ترتیب ۸۷ درصد (استان قزوین) و ۷۹/۷ درصد (استان مازندارن) نقاط مورد بررسی در بازه ۵- تا ۵ قرار می‌گیرند. همچنین نتایج

جدول ٤: شاخص‌های آماری بعد از حذف داده‌های پرت

منطقه مورد مطالعه	منبع ارتفاعی	میانگین قدرمطلق‌خطا (متر)	انحراف‌ازمعیار (متر)	مجذور مربعات خطا (متر)	میانگین اختلاف (متر)	حداکثر (متر)	حداقل (متر)
قزوین	SRTM-30m	۲/٦	۳/۸	۳/۸	۰/۵	۱۳/۰	-۱۵/۰
	SRTM-90m	۷/۰	٤/۲	۷/۹	٦/٦	۲٤/۰	-۱۰/۰
	ASTER-30m	۱۰/۱	۸/۸	۱۱/٦	۷/۵	۳۷/۰	-۲٦/۰
مازندران	SRTM-30m	۳/۷۳	۵/۸	۵/۸	-۰/۳	۲٦/۰	-۲۷/۰
	SRTM-90m	٤/۹۲	۸/۰	۸/۱	-۱/۳	۳۵/۰	-۳۸/۰
	ASTER-30m	۷/۳	۹/۲	۱۰/٤	-٤/۹	۳۷/۰	-٤۷/۰

جدول ۵: درصد داده‌های اختلاف ارتفاع موجود در بازه ۵-تا۵ متر

منبع ارتفاعی	مازندران		قزوین	
	انحراف از معیار (متر)	درصد داده‌ها (٪)	انحراف از معیار (متر)	درصد داده‌ها (٪)
SRTM-90m	۲/٤	۷٤/۱	۲/۲	۲۹/۰
SRTM-30m	۲/٤	۷۹/۷	۲/۳	۸۷/۰
ASTER-30m	۲/۹	۵۳/۰	۳/۱	۲۰/۳

نشان می‌دهد که بیش از ۷۹ درصد از داده‌های به‌دست آمده از منبع ارتفاعی ASTER در استان قزوین دارای اختلاف بیش از ۵ متر با داده‌های زمینی می‌باشند و این در حالی است که مقدار مذکور در استان مازندران در حدود ۵۳ درصد می‌باشد. عملکرد SRTM-90m نیز اگرچه در استان قزوین چندان مطلوب نمی‌باشد، اما طبق محاسبات به عمل آمده در استان مازندران درصد نقاطی که در بازه ۵- تا ۵ قرار می‌گیرند در حدود ۷٤/۱ درصد می‌باشد که تقریباً عملکردی مشابه با SRTM-30m را دارا است.

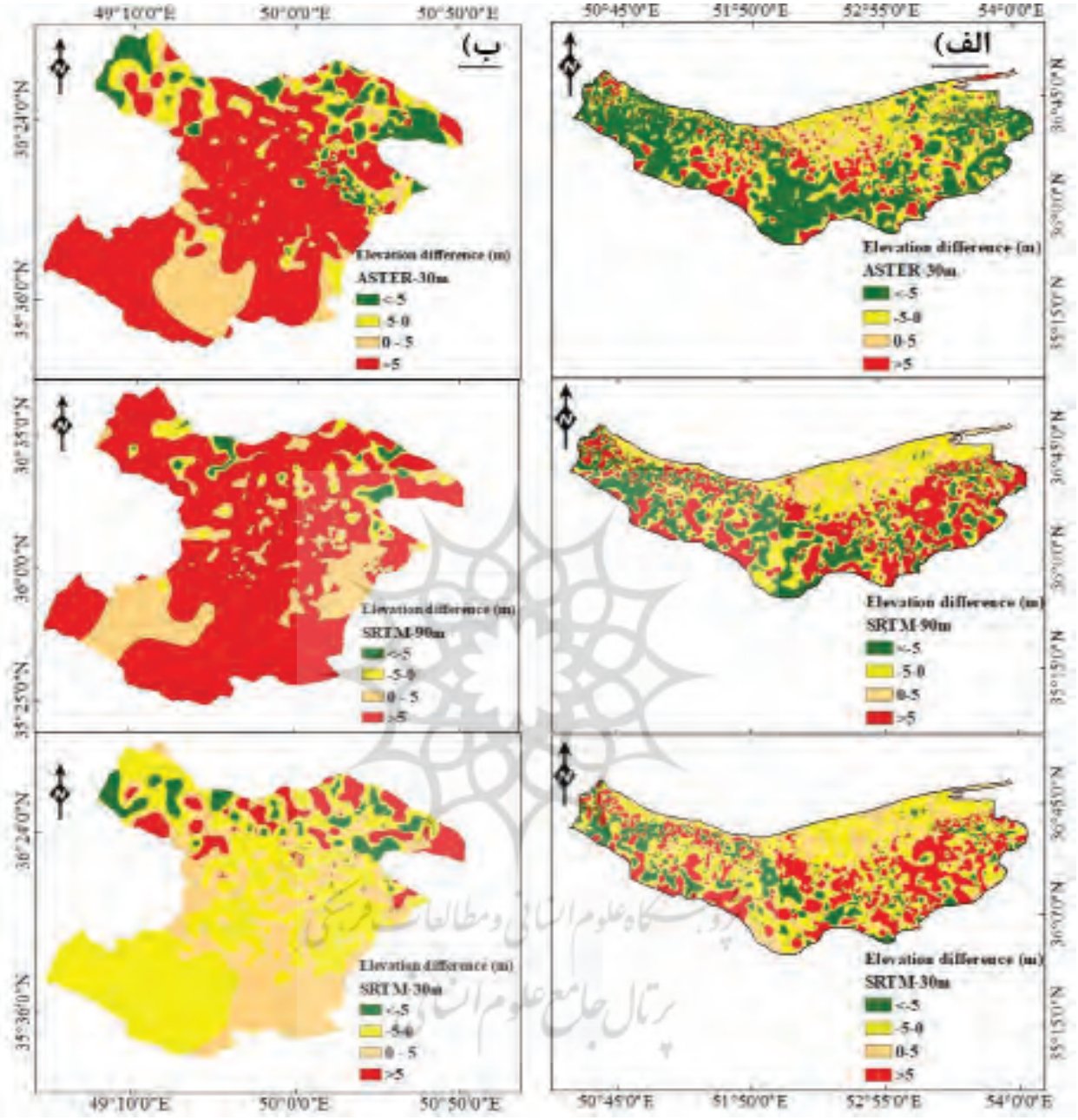
به‌طور کلی با توجه به نتایج می‌توان چنین عنوان نمود که منبع ارتفاعی ASTER از ضعیف‌ترین عملکرد در تخمین ارتفاع در سطح هر دو استان برخوردار بوده و لازم است تا استفاده از آن در مطالعات با احتیاط و اصلاح مقادیر ارتفاعی صورت پذیرد. نتایج به‌دست آمده در این پژوهش با تحقیقات صورت گرفته در جهان از تطابق خوبی برخوردار می‌باشد. به‌عنوان مثال ***(Nadi, Ghiasi,& Hadavand, 2016; Santillan & Makinano-Santillan,2016)*** نشان دادند که منبع ASTER دارای بیشترین میزان خطا در تخمین رقوم ارتفاعی می‌باشد. همچنین صحت ارتفاعی منبع SRTM بیش منبع ASTER است.

در پژوهش حاضر برای بررسی هرچه بهتر اختلاف ارتفاع بین منابع ارتفاعی مختلف و داده‌های زمینی، نقشه تغییرات مکانی مربوط به اختلاف ارتفاع برای تمامی آن‌ها تهیه گردید که در نگاره٤ قابل مشاهده می‌باشد.

نتایج به‌دست آمده در استان قزوین نشان می‌دهد که منبع SRTM-30m در بخش‌های مرکزی و جنوبی استان که عمدتاً از اراضی دشتی و کم‌ارتفاع تشکیل شده‌اند، دارای عملکرد بهتری می‌باشد. همچنین در بخش‌های شمالی استان که متشکل از مناطق کوهستانی و مرتفع می‌باشند، اختلاف بین داده‌های این منبع ارتفاعی و داده‌های زمینی به بیش از ۵ متر می‌رسد.

در مناطق کوهستانی و مرتفع عواملی همچون شیب، جهت شیب[1] و نحوه برخورد پرتوهای راداری با سطح زمین بر میزان صحت رقوم ارتفاعی مؤثر می‌باشند ***(Kolecka and Kozak, 2013)*** و همین مسأله موجب شده تا تمامی منابع

1- Aspect



نگاره٤: تغییرات مکانی اختلاف ارتفاع مربوط به منابع ارتفاعی مختلف در حوضه‌های الف) مازندران، ب) قزوین

ارتفاعی در بخش‌های شمالی استان قزوین دارای خطای زیادی در برآورد ارتفاع گردند.

نتایج پژوهش صورت گرفته توسط (Gorokhovich and Voustianiouk, 2006) نیز نشان داد که دو عامل شیب و جهت شیب از تأثیر معنی‌داری بر دقت ارتفاعی به‌دست آمده از داده‌های SRTM برخوردار می‌باشند، به‌طوری‌که در شیب‌های بزرگ‌تر از ۱۰ درجه مقدار خطا در برآورد ارتفاع افزایش می‌یابد. همچنین محاسبات آن‌ها نشان داد که منبع SRTM مقدار ارتفاع را در سطوحی که جهت شیب در آن‌ها به سمت شمال - غرب (NW) می‌باشد، کم برآورد و برای سطوحی که دارای جهت شیب معادل جنوب - شرق (SE) هستند، بیش‌برآورد می‌نماید. برخلاف منبع ۳۰ متری

SRTM توزیع مکانی به‌دست آمده از کاربرد ASTER و منابع ۹۰ متری SRTM حاکی از آن است که این منابع در تخمین ارتفاع مناطق دشتی و کم‌ارتفاع نیز دارای خطای قابل توجهی می‌باشد.

همانطور که در نگاره٤ نشان داده شده است، این منابع مقدار ارتفاع در بخش‌های مرکزی استان را با اختلاف بیش از ۵ متر بیش‌برآورد نموده است و این در حالی است که منبع ۳۰ متری SRTM مقدار اختلاف ارتفاع را برای بخش‌های مذکور بین ۵- تا ۵ متر برآورد کرده است. در استان مازندران نیز عملکرد منابع ارتفاعی مختلف تقریباً مشابه با نتایج به‌دست آمده در استان قزوین می‌باشد. در این استان نیز دقت ارتفاعی تمامی منابع در بخش‌های مرتفع (که دارای پوشش گیاهی جنگلی بسیار متراکمی هستند) بسیار پائین می‌باشد.

در این بخش‌ها DEMهای ۳۰ و ۹۰ متری SRTM تمایل به بیش‌برآوردی دارند، به‌طوری‌که در بیشتر نقاط مورد بررسی مقدار ارتفاع را با اختلافی بیش از ۵ متر برآورد کرده‌اند. علت اصلی این بیش‌برآوردی را می‌توان به عدم نفوذ پرتوهای راداری SRTM در مناطق دارای پوشش گیاهی مرتبط نمود.

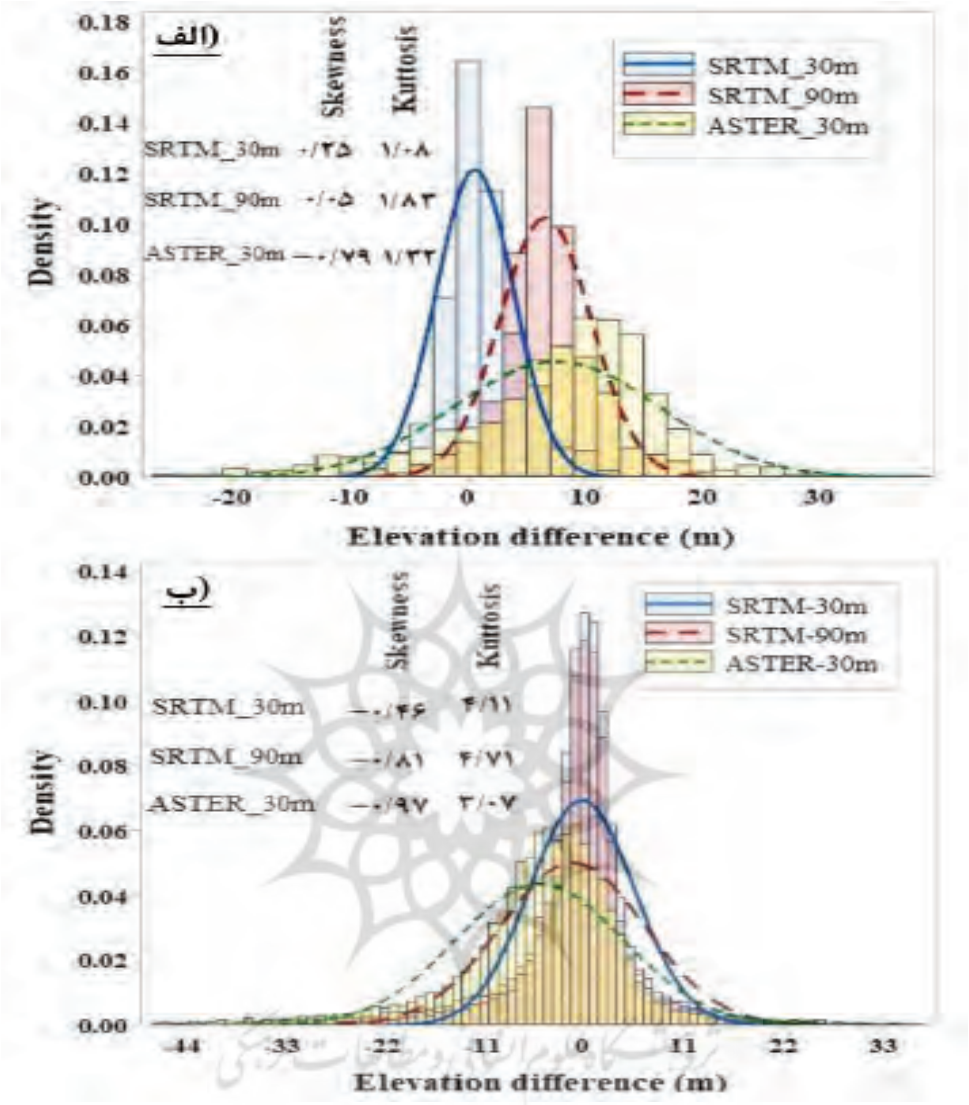
پرتوهای راداری از توانایی لازم برای نفوذ در سطوح آبی و گیاهی برخوردار نمی‌باشند و تنها رقوم ارتفاعی سطح آب و یا تاج پوشش گیاهان را محاسبه می‌نمایند (***Bhang and Schwartz, 2008; Miliaresis, 2008***). همین مسأله موجب بیش‌برآوردی آن‌ها در تخمین ارتفاع سطح زمین می‌گردد. لازم به ذکر است که تاکنون مطالعاتی در زمینه اصلاح منابع ارتفاعی مذکور صورت گرفته است که در عمده آن‌ها سعی شده با استفاده از پایگاه‌های جهانی و تخمین ارتفاع پوشش‌های گیاهی، مقدار ارتفاع سطح زمین برآورد شود (***Zhao et al, 2018***).

همچنین برای بررسی نحوه پراکنش مقادیر مربوط به اختلاف ارتفاع بین منابع ارتفاعی و داده‌های زمینی، نمودار فراوانی مربوط به هر منبع در حوضه‌های مورد مطالعه تهیه گردید که نتایج آن در نگاره۵ نشان داده شده است. همانطور که در نگاره (۵- الف) نشان داده شده است، تغییرات اختلاف ارتفاع مربوط به هر سه منبع مورد استفاده در استان قزوین از توزیع نسبتاً متقارنی[1] برخوردار می‌باشند، که اندکی چولگی به چپ و تمرکز داده‌ها در سمت راست، نشان‌دهنده مقداری بیش‌برآورد در تخمین مقادیر ارتفاعی توسط هر سه منبع مورد بررسی در این حوضه می‌باشد. علاوه بر این همانطور که در این نگاره نشان داده است، مقادیر اختلاف ارتفاعی مربوط به داده‌های ۳۰متری ASTER دارای پخشیدگی بیشتری بوده و در نتیجه از پراکندگی بیشتری نیز برخوردار می‌باشند.

به‌منظور بررسی میزان تقارن توزیع اختلاف ارتفاع، مقدار شاخص‌های چولگی[2] و کشیدگی[3] مربوط به آن‌ها محاسبه گردید. نتایج به‌دست آمده در استان مازندران (نگاره۵- ب) حاکی از آن می‌باشد که مقادیر اختلاف ارتفاع به‌دست آمده از منابع مختلف از توزیع متقارنی برخوردار نبوده و دارای مقداری چولگی به چپ است، به‌طوری‌که مقدار شاخص چولگی مربوط به منابع مختلف در سطح این استان منفی می‌باشد. در این استان همچنین توزیع فراوانی مربوط به داده‌های ۳۰متری ASTER از پخشیدگی و تغییرات بیشتری برخوردار می‌باشد (مقدار شاخص کشیدگی برای این منبع حداقل و معادل ۳/۰۷ است).

با توجه به نگاره (۵- الف) مشخص گردید که مقدار شاخص چولگی در منابع SRTM برخلاف منبع ASTER مثبت بوده که حاکی از اندکی چولگی به راست در این داده‌ها می‌باشد. همچنین در سطح استان قزوین نیز مقادیر منبع ASTER با برخورداری از شاخص چولگی منفی دارای بیشترین مقدار پراکندگی و چولگی به چپ است. در دو استان قزوین و مازندران مقادیر حداقل و حداکثر اختلاف ارتفاعی به ترتیب بین ٣٤- تا ٣٢ متر و ٤٦- تا ٣٤ متر برای منبع ارتفاعی ASTER متغیر می‌باشد.

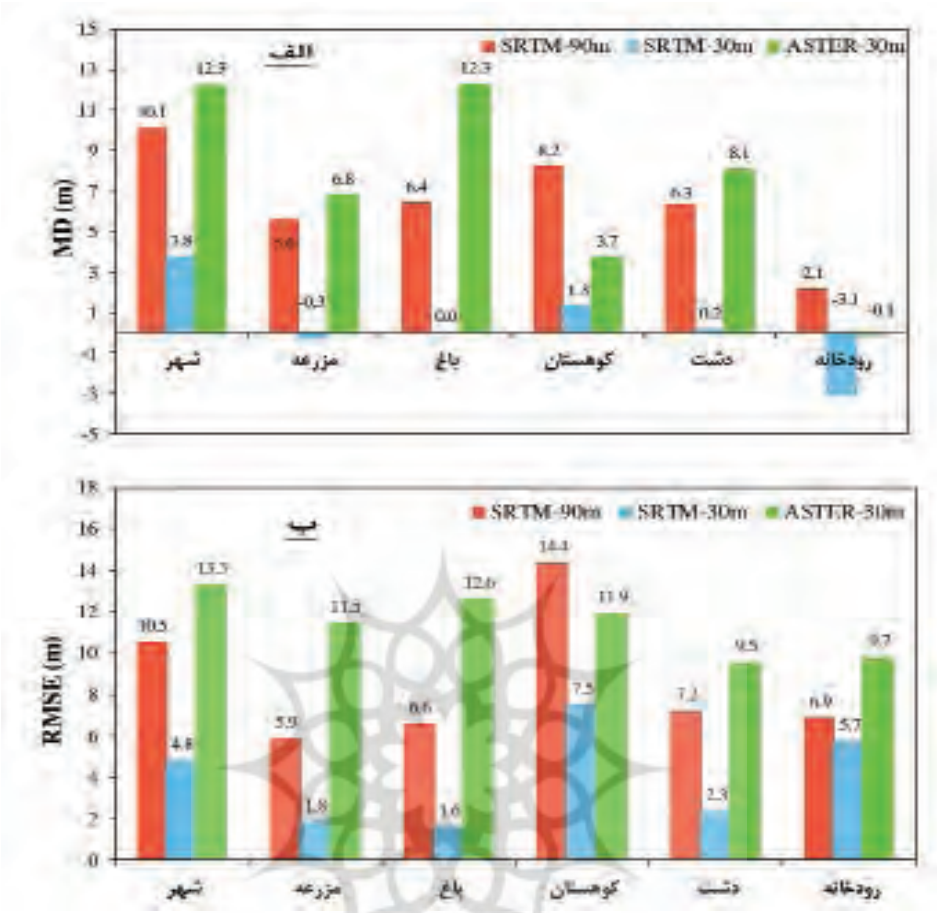
1- Symmetric
2- Skewness
3- Kurtosis



نگاره۵: توزیع فراوانی اختلاف ارتفاع مربوط به منابع ارتفاعی مختلف در الف) قزوین و ب) مازندران

۳-۲- تأثیر نوع پوشش و کاربری اراضی بر دقت ارتفاعی DEMها

در این بخش به ارزیابی کارایی هر کدام از منابع ارتفاعی در پوشش‌ها و لندفرم‌های مختلف موجود در محدوده‌های مطالعاتی پرداخته شده است. پوشش‌ها و کاربری‌های مورد بررسی در سطح استان قزوین عبارتند از: شهری، اراضی کشاورزی، اراضی باغی و جنگلی، مناطق کوهستانی، اراضی دشتی کم شیب و رودخانه. در سطح استان مازندران نیز کاربری‌های شهری، کشاورزی، جنگلی/کوهستانی، مراتع، سطوح آبی و رودخانه مورد بررسی قرار گرفته‌اند. همچنین لازم به ذکر است که در این استان با توجه به واقع شدن اراضی جنگلی در بازه‌های کوهستانی، امکان تفکیک این دو کاربری از یکدیگر بسیار مشکل می‌باشد و به همین علت هر دوی آن‌ها در یک دسته ارزیابی شدند. در جدول ٦ درصد داده‌های اختلاف ارتفاع مربوط به کاربری‌های مختلف در بازه ۵- تا ۵ متر و برای استان قزوین ارائه شده است. همچنین در نگاره٦ نیز مقادیر شاخص‌های آماری MD و RMSE مربوط به منابع ارتفاعی و کاربری‌های مختلف استان قزوین نشان داده شده است. همانطور که در نگاره (٦- الف) نشان داده

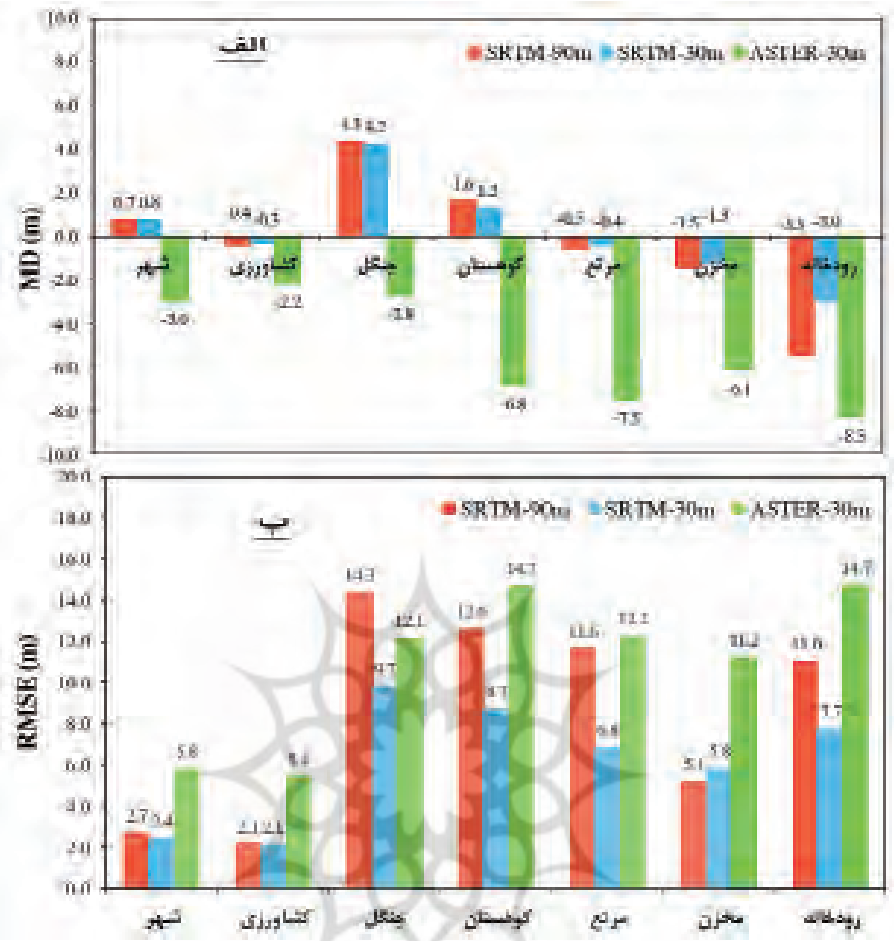


نگاره۶: مقادیر شاخص‌های MD و RMSE منابع ارتفاعی و کاربری‌های مختلف در استان قزوین

جدول۶: درصد داده‌های اختلاف ارتفاع مربوط به کاربری‌های مختلف در بازه ۵-تا ۵ متر در حوضه قزوین

منبع ارتفاعی	رودخانه	دشت	کوهستان	باغ	مزرعه	شهر
SRTM-90m	٤٦/٥	٣٧/٤	٢٦/٠	١٢/٠	٣٨/٩	٤/٧
SRTM-30m	٧٨/٦	٩٨/٠	٥٣/٤	١٠٠/٠	٩٩/٢	٧٤/٥
ASTER-30m	٤٣/٠	٢١/٩	٣٠/٠	٢/٩	٢٢/٠	٦/٩

شده است، در استان قزوین و در مناطق شهری هر سه منبع ارتفاعی مورد استفاده تمایل به بیش‌برآوردی دارند که علت اصلی آن همانطور که قبلاً نیز عنوان شد، عدم نفوذ امواج راداری در داخل سطوح سنگی، آبی و دارای پوشش گیاهی می‌باشد. به عبارت بهتر در منابع ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دور، رقوم ارتفاعی سطح موردنظر برآورد می‌شود و امکان تخمین عمق لایه موردنظر وجود ندارد. همچنین لازم به ذکر است که خطای ناشی از کاربرد منبع ASTER در برآورد ارتفاع نقاط واقع در بازه‌های شهری نسبت به منبع ۳۰ متری SRTM تقریباً ۳ برابر می‌باشد. بر خلاف دو منبع دیگر، DEMهای ۳۰ متری SRTM در کاربری‌هایی همچون کشاورزی، باغی، دشتی (مناطق مسطح) و کوهستانی دارای عملکرد بسیار مناسبی می‌باشد، به‌طوری‌که مقدار شاخص MD در کاربری‌های مذکور بین ۰/۲ تا ۱/۳ متر متغیر است. نتایج مذکور به خوبی حاکی از آن است که در حوضه‌های فاقد آمار و یا حوضه‌هایی که در آن‌ها نقشه‌های زمینی با



نگاره۷: مقادیر شاخص‌های MD و RMSE منابع ارتفاعی و کاربری‌های مختلف در استان مازندران

جدول ۷: درصد داده‌های اختلاف ارتفاع مربوط به کاربری‌های مختلف در بازه ۵-تا۵متر در حوضه مازندران

منبع ارتفاعی	رودخانه	سطوح آبی	مرتع	کوهستان	جنگل	کشاورزی	شهر
SRTM-90m	٦٢/٣	٧٩/٤	٤٤/٦	٣٩/٩	٣٣/٧	٩٧/٧	٩٧/٤
SRTM-30m	٧٠/٧	٧٩/٦	٦٢/٢	٤٧/٣	٤٢/٧	٩٨/٤	٩٤/٦
ASTER-30m	٤٣/٣	٤٩/٥	٣١/٩	٣١/٤	٤٠/٤	٧٠/٢	٦٤/٩

مقیاس مناسب موجود نیست، منبع ارتفاعی SRTM-30m می‌تواند جایگزین مناسبی برای نقشه‌های زمینی باشد. همچنین محاسبات صورت گرفته حاکی از آن است که در کاربری‌های مختلف، منبع ۳۰متری ASTER از قابلیت چندان مناسبی در برآورد رقوم ارتفاعی برخوردار نمی‌باشد. به‌عنوان مثال مقدار شاخص RMSE مربوط به این منبع در کاربری‌های مختلف از ۹/۵ متر در مناطق دشتی تا ۱۳/۳ متر در اراضی شهری متغیر است. همچنین مقدار شاخص MD نیز از ۳/۷ متر در اراضی کوهستانی تا ۱۲/۳متر در اراضی شهری و باغی متغیر است.

جدول٦ نیز به خوبی نشان می‌دهد که در بیشتر کاربری‌ها (به جز کاربری از نوع کوهستانی) مقدار اختلاف بین داده‌های این منبع و داده‌های زمینی در بازه ۵- تا ۵ متر قرار می‌گیرد و این در حالی است که برای دو منبع دیگر

درصد نقاط واقع در بازه مذکور حتی در بهترین حالت نیز کمتر از ۵۰ درصد می‌باشد و این بدان معناست که منابع ۳۰ متری ASTER و ۹۰ متری SRTM دارای خطای بیش از ۵ متر در بسیاری از کاربری‌ها هستند.در خصوص کارایی DEMهای۹۰ متری SRTM نیز می‌توان چنین بیان نمود که این منبع با وجود توان تفکیک بالاتر نسبت به منبع ۳۰ متری ASTER در بسیاری از کاربری‌ها (به غیر از مناطق کوهستانی) از قابلیت بهتری در برآورد رقوم ارتفاعی برخوردار می‌باشند.

نتایج به‌دست آمده در استان مازندران (نگاره۷) نیز نشان داد که منبع۳۰ متری ASTER در تمام کاربری‌ها مقدار ارتفاع را کم برآورد نموده‌اند. این کم برآوردی در کاربری‌هایی همچون کوهستانی، مرتع، رودخانه و سطوح آبی (مانند استخر و دریاچه‌های کوچک واقع در سطح استان مازندران) به بیش از ٦ متر می‌رسد.

این منبع ارتفاعی در مناطق شهری و اراضی کشاورزی از قابلیت نسبتاً خوبی در برآورد رقوم ارتفاعی برخوردار است به نحوی که در این کاربری‌ها به ترتیب ٦٤/٩ و ۷۰/۲ درصد از داده‌ها دارای اختلاف ارتفاعی کمتر از ۵ متر با داده‌های زمینی می‌باشند.

هرچند این منبع با دارا بودن شاخص RMSE بین ۵/٤ متر (کاربری از نوع کشاورزی) تا ١٤/٧ متر (کاربری از نوع کوهستانی) یکی از ضعیف‌ترین داده‌های ارتفاعی در سطح استان مازندران بشمار می‌آید. DEMهای۳۰ و ۹۰ متری SRTM نیز به غیر از مناطق جنگلی و رودخانه‌ها در سایر کاربری‌ها مقدار ارتفاع را با خطای نسبتاً کمی برآورد می‌نمایند.

نکته حائز اهمیت عملکرد مناسب منابع ارتفاعی در منطقه شهری برخلاف استان قزوین می‌باشد. از آنجایی‌که González-Moradas and Viveen, 2020) نشان دادند که دقت منبع ASTER به شدت تحت‌تأثیر ساختمان‌های موجود در منطقه می‌باشد، بنابراین می‌توان چنین عنوان نمود که قرارگیری استان مازندران در ارتفاع پایین‌تر نسبت به سطح آزاد دریا در مقایسه با استان قزوین و همچنین وجود ساختمان‌های با ارتفاع پایین‌تر در این محدوده مطالعاتی منجر به کاهش خطای منابع مورد مطالعه در تخمین ارتفاع شده است.

در این استان نیز عملکرد تمامی منابع ارتفاعی مبتنی بر تکنیک‌های سنجش از دور در کاربری‌های از نوع کوهستانی و جنگلی به شدت پائین می‌باشد، به‌طوری که در کاربری‌های مذکور به طور متوسط بیش از ٦٠ درصد نقاط مورد بررسی دارای اختلاف ارتفاعی بیش از ۵ متر با داده‌های زمینی هستند. لذا توصیه می‌شود برای استفاده از چنین منابعی در مناطق کوهستانی مرتفع و نواحی جنگلی بایستی اصلاحاتی بر روی آن‌ها صورت گیرد. به‌عنوان مثال می‌توان با استفاده از روش‌های رگرسیونی ارتباط بین منابع ارتفاعی و داده‌های زمینی را استخراج و بر اساس آن‌ها منابع ارتفاعی مذکور را اصلاح نمود ***(Zhao et al, 2018)***.

همچنین با تخمین ارتفاع پوشش‌های گیاهی در مناطق جنگلی و مرتعی می‌توان تا حدود زیادی خطای منابع ارتفاعی را کاهش داد ***(Su et al, 2015; Su et al, 2017)*** . مقدار شاخص RMSE برای منبع SRTM-30m نیز بین ۲/۱ متر (کاربری از نوع کشاورزی) تا ۹/۷ متر (کاربری از نوع جنگلی) متغیر می‌باشد و این در حالی است که مقدار شاخص مذکور برای منبع SRTM-90m بین ۲/۱ متر تا ١٤/٣ متر متغیر است.

٤- نتیجه‌گیری

علی‌رغم کاربرد بسیار بالای منابع ارتفاعی مبتنی بر سنجش از دوردر بسیاری از زمینه‌های مهندسی و پژوهشی، تاکنون مطالعات نسبتاً کمی در رابطه با بررسی کارایی و دقت ارتفاعی آن‌ها در کاربری‌های مختلف به ویژه کشور ایران (که همواره با مشکل عدم وجود نقشه‌های توپوگرافی با مقیاس مناسب روبه‌رو می‌باشد) صورت پذیرفته است. لذا با توجه به توضیحات فوق، هدف اصلی پژوهش حاضر بررسی دقت ارتفاعی منابع با توان تفکیک مختلف

در کاربری‌های مختلف در دو استان قزوین و مازندران می‌باشد. برای ارزیابی عملکرد منابع ارتفاعی مذکور، اطلاعات ارتفاعی حاصل از برداشت‌های زمینی با استفاده از GPS دو فرکانسه به‌عنوان سطح مبنا در نظر گرفته شد.

نتایج حاصل از کاربرد منابع ارتفاعی مختلف در دو استان قزوین و مازندران به خوبی گویای این مطلب است که منابع ۳۰ متری SRTM از کارایی به مراتب مناسب‌تری در برآورد رقوم ارتفاعی برخوردار می‌باشند. به‌عنوان مثال مقدار شاخص RMSE ناشی از کاربرد این منبع در سطح دو استان قزوین و مازندران به ترتیب برابر با ۳/۸ و ۵/۸ متر می‌باشد. در همین زمینه (González-Moradas and Viveen, 2020) نیز با ارزیابی دقت منابع ارتفاعی مختلف در چند حوضه دقت عمودی (RMSE) منبع SRTM را ۵ متر گزارش نمودند.

همچنین در سطح این دو استان به ترتیب ۸۶/۸ درصد (قزوین) و ۷۹/۷ درصد (مازندران) از نقاط مورد بررسی دارای اختلاف ارتفاعی کمتر از ۵ متر با داده‌های زمینی هستند. بر خلاف این منبع ارتفاعی SRTM-30m، نتایج از حاصل از کاربرد DEMهای ۳۰ متری ASTER در دو بازه مطالعاتی چندان رضایت‌بخش نبوده به نحوی‌که تقریباً بیش از ۵۰ درصد از نقاط مورد بررسی دارای اختلاف ارتفاعی بیش از ۵ متر با سطح مبنا می‌باشند. ارزیابی دقت ارتفاعی منابع مختلف در سطح بازه‌های مورد مطالعه حاکی از عملکرد قابل قبول منبع SRTM در اکثر کاربری‌ها و پوشش‌ها به غیر از نواحی کوهستانی و جنگلی می‌باشد. نتایج نشان داد که در کابری‌های مذکور در هر دو استان قزوین و مازندران به ترتیب بیش از ۴۵ و ۶۰ درصد نقاط مورد بررسی دارای اختلاف ارتفاعی بیش از ۵ متر با سطح مبنا می‌باشند.

علت اصلی این عملکرد پائین به ویژه در اراضی با پوشش جنگلی، عدم نفوذ امواج راداری در سطوحی که دارای پوشش هستند می‌باشد. در این حالت ارتفاعی که توسط سنجنده‌های ماهواره‌ای به‌عنوان ارتفاع نقطه موردنظر ثبت می‌شود، مقدار ارتفاع تاج پوشش گیاهی می‌باشد و نه رقوم سطح زمین. عملکرد منبع ۳۰ متری ASTER در کاربری‌های مختلف نیز چندان مناسب نبوده و بهترین عملکرد آن‌ها مربوط به نواحی با کاربری دشت در قزوین و اراضی کشاورزی و مناطق شهری در استان مازندران است. منابع ۹۰متری SRTM نیز علی‌رغم دارا بودن توان تفکیک بالا از عملکرد به مراتب بهتری نسبت به منبع ۳۰ متری ASTER برخوردار می‌باشند.

لازم به‌ذکر است که نتایج حاصل از این پژوهش منطبق بر تحقیقات صورت گرفته در بخش‌های مختلف جهان می‌باشد، به‌طوری‌که به‌عنوان مثال (Gesch et al., 2012) نیز با بررسی تأثیر پوشش زمین بر روی عملکرد منابع ارتفاعی نشان دادند که رابطه مستقیمی بین میزان پوشش سطح زمین و مقدار خطای منبع ارتفاعی وجود دارد، به‌طوری‌که با تغییر پوشش زمین از خاک لخت به سمت زمین با تراکم پوشش گیاهی زیاد میزان خطای منابع افزایش می‌یابد.

از آنجایی‌که این منابعِ ارتفاعی، ارتفاع مربوط به سطح بازتابنده را ثبت می‌نمایند، بنابراین در کاربری‌هایی همچون اراضی جنگلی بعلت تراکم و ارتفاع پوشش گیاهی و همچنین مناطق شهریِ با تراکم زیاد ساختمان‌ها از خطای بسیار زیادی برخوردار می‌باشند. زیرا در این موارد سطح بازتابنده، سطح برگ و همچنین سطح سازه‌های موجود در منطقه می‌باشد.

بنابراین هرچه ارتفاع گیاه یا ساختمان‌ها بیشتر باشد، میزان خطای منابع ارتفاعی در تخمین ارتفاع نیز بیشتر می‌شود. لذا استفاده از منابع فوق در کاربری‌های مزبور به هیچ وجه توصیه نمی‌شود و همچنان نیاز به وجود نقشه‌های توپوگرافی، برای اصلاح و کاستن از میزان خطای منابع ارتفاعی ماهواره‌ای محسوس می‌باشد.

در یک جمع‌بندی کلی می‌توان چنین عنوان نمود که نوع پوشش گیاهی تأثیر غیرقابل انکار و قابل توجهی بر دقت ارتفاعی منابع ارتفاعی دارد به نحوی‌که با افزایش پوشش گیاهی، از دقت مقادیر ارتفاعی برآورد شده کاسته

می‌گردد. لذا در حوضه‌های فاقد آمار توصیه می‌شود ابتدا با توجه به نوع پوشش گیاهی موجود در محدوده مطالعاتی به انتخاب منبع ارتفاعی مناسب اقدام شود و سپس با استفاده از داده‌های زمینی (نقاط کنترل زمینی)، مقادیر ارتفاعی نقشه‌ها اصلاح شود.

منابع و مآخذ

1- Amans, O. C., Beiping, P. W., & Ziggah, Y. Y. (2014). Assessing Vertical Accuracy of SRTM Ver 4 . 1 and ASTER GDEM Ver 2 Using Differential GPS Measurements – Case Study in Ondo State. International Journal of Scientific & Engineering Research, 4(12), 523–531.

2- Azizian, A. (2018). Investigating the Application of Remote-Sensing Based DEMs on Flood Inundation Mapping and Hydraulic Modeling (In Persian). Iran-WaterResourcesResearch.

3- Bhang, K. J., & Schwartz, F. (2008). Limitations in the Hydrologic Applications of C-Band SRTM DEMs in Low-Relief Settings. IEEE Geoscience. Remote Sensing, 5(3), 497–501.

4- del Rosario González-Moradas, M., & Viveen, W. (2020). Evaluation of ASTER GDEM2, SRTMv3.0, ALOS AW3D30 and TanDEM-X DEMs for the Peruvian Andes against highly accurate GNSS ground control points and geomorphological-hydrological metrics. Remote Sensing of Environment, 237. https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111509

5- Elkhrachy, I. (2016). Vertical accuracy assessment for SRTM and ASTER Digital Elevation Models: A case study of Najran city, Saudi Arabia. Ain Shams Engineering Journal, 2. https://doi.org/10.1016/j.asej.2017.01.007

6- Falorni, G., Teles, V., Vivoni, E. R., Bras, R. L., & S., A. K. (2005). Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, 10.

7- Fan, X. T., Du, X. P., Tan, J., & Zhu, J. J. (2009). Three-dimensional visualization simulation assessment system based on multi-source data fusion for the Wenchuan earthquake. Journal of Applied Remote Sensing, 3(May), 1–9. https://doi.org/10.1117/1.3154425

8- Gamba, P., Acqua, F. D., & Houshmand, B. (2002). SRTM data characterization in urban areas. International Archives of Photogrammetry, 1–4.

9- Gesch, D., Oimoen, M., Zhang, Z., Meyer, D., & Danielson, J. (2012). Validation of the Aster Global Digital Elevation Model Version 2 Over the Conterminous United States. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXIX-B4(September), 281–286.https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B4-281-2012

10- Gorokhovich, Y., & Voustianiouk, A. (2006). Accuracy assessment of the processed SRTM-based elevation data by CGIAR using field data from USA and Thailand and its relation to the terrain characteristics. Journal of Remote Sensing of Environment, 104(4), 409–415.

11- Hinkel, J., Lincke, D., Vafeidis, A. T., Perrette, M., Nicholls, R. J., Tol, R. S. J., … Levermann, A. (2014). Coastal flood damage and adaptation costs under 21st century sea-level rise. Proceedings of the National Academy of Sciences, 111(9), 3292–3297. https://doi.org/10.1073/pnas.1222469111

12- Kolecka, N., & Kozak, J. (2013). Assessment of the Accuracy of SRTM C- and X-Band High Mountain Elevation Data: a Case Study of the Polish Tatra Mountains. Pure and Applied Geophysics.

13- Miliaresis, G. C. (2008). The Land Cover Impact on the Aspect/Slope Accuracy Dependence of the SRTM-1 Elevation Data for the Humboldt Range. Sensors, 8, 3134–3149.

14- Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. . (1981). Introduction to linear regression analysis. 504.

Nadi, S., Ghiasi, Y., & Hadavand, S. (2016). Vertical Accuracy Assessment of SRTM and GDEM Open Source Digital Elevation Models and Error Propagation for Slope and Aspect Maps. Journal of Geomatics Science and Technology, 6(2), 99–118.

15- Pakoksung, K., & Takagi, M. (2016). Digital

elevation models on accuracy validation and bias correction in vertical. Modeling Earth Systems and Environment, 2(1), 11. https://doi.org/10.1007/s40808-015-0069-3

16- Peralvo, M. (2017). Influence of DEM Interpolation Methods in Drainage Analysis.December.

17- Sanders, B. F. (2007). Evaluation of on-line DEMs for flood inundation modeling. Advances in Water Resources, 30(8), 1831–1843. https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2007.02.005

18- Santillan, J. R., & Makinano-Santillan, M. (2016). Vertical accuracy assessment of 30-M resolution ALOS, ASTER, and SRTM global DEMS over Northeastern Mindanao, Philippines. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives, 41(July), 149–156. https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XLI-B4-149-2016

19- Shokoohi, A., & Azizian, A. (2014). Evaluating the effects of topographic and radar based DEMs on the simulation results of geomorphologic model (In Persian). Journal of Watershed Engineering and Management, 6(January), 52–62.

20- Su, Y., Guo, Q., Ma, Q., & Li, W. (2015). SRTM DEM Correction in Vegetated Mountain Areas through the Integration of Spaceborne LiDAR, Airborne LiDAR, and Optical Imagery. Remote Sensing, 7(9), 11202–11225.

21- Su, Y., Ma, Q., & Q., G. (2017). Fine-Resolution Forest Tree Height Estimation across the Sierra Nevada through the Integration of Spaceborne LiDAR, Airborne LiDAR, and Optical Imagery. International Journal of Digital Earth, 10(3), 307–323.

22- Thomas, J., Joseph, S., Thrivikramji, K. P., & Arunkumar, K. S. (2014). Sensitivity of digital elevation models: The scenario from two tropical mountain river basins of the Western Ghats, India. Geoscience Frontiers, 5(6), 893–909. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.12.008

23- Wolock, D. M., & Price, C. V. (1994). Effects of Digital Elevation Model map scale and data resolution on a topographic based watershed. Water Resources Research, 30(11), 3041–3052. https://doi.org/10.1029/94WR01971

24- Zhao, X., Su, Y., Hu, T., Chen, L., Gao, S., Wang, R., … Guo, Q. (2018). A global corrected SRTM DEM product for vegetated areas. Remote Sensing Letters, 9(4), 393–402. https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1425560