

استخراج الگوی زهکشی دامنه‌ها در نواحی فشرده جنگلی جنوب بهشهر با استفاده از داده‌های

فرکانس پایین راداری

محمد شریفی کیا- دانشیار سنجش از دور و سیستم اطلاعات مکانی، دانشگاه تربیت مدرس
سیاوش شایان - دانشیار ژئومورفولوژی، دانشگاه تربیت مدرس
مجتبی یمانی - استاد گروه جغرافیای طبیعی، دانشگاه تهران
علیرضا عرب عامری* - دانشجوی دکتری ژئومورفولوژی، دانشگاه تربیت مدرس

پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۰۱/۱۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۷/۰۵/۱۹

چکیده

الگوی شبکه زهکشی از بارزترین لندفرم‌های سطح زمین محسوب می‌گردد که تحت تاثیر فرآیندهای دامنه‌ای شکل می‌گیرند و گسترش مکانی این عارضه به میزان عملکرد این فرآیندها بستگی دارد. هدف از این پژوهش قابلیت سنجی داده‌های فرکانس پایین راداری در استخراج الگوی زهکشی دامنه‌ها در نواحی فشرده جنگلی می‌باشد، بدین منظور به ارزیابی مقایسه‌ای مدل‌های رقومی ارتفاعی SRTM، ASTER و مدل رقومی ارتفاعی حاصل از داده‌های فرکانس پایین راداری PALSAR در استخراج شبکه‌های زهکشی پرداخته شده است. ابتدا مدل‌های رقومی ارتفاعی در محیط ArcHydro اصلاح و شبکه‌های زهکشی در محیط ArcGIS10.2 استخراج گردید. جهت استخراج شبکه‌های زهکشی از آستانه‌های سلولی ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ استفاده گردید. طبق نتایج مدل رقومی ارتفاعی داده‌های فرکانس پایین راداری PALSAR با آستانه سلولی ۱۰۰ با استخراج ۸۰۲۵۳۲۶ متر آبراهه بهترین دقت را نسبت به مدل‌های رقومی و آستانه‌های سلولی دیگر داشته است. نتایج بررسی تراکم زهکشی نیز نشان داد که در مدل رقومی ارتفاعی حاصل از داده‌های راداری PALSAR (۷۱/۱۰۲۶ کیلومتر مربع (۷۰/۸۳ درصد) از منطقه مطالعاتی در طبقه تراکم خیلی زیاد (بیش از ۸) قرار گرفته است که این موضوع بیانگر کارایی بالاتر مدل رقومی ارتفاعی حاصل از داده‌های فرکانس پایین راداری PALSAR در استخراج شبکه‌های زهکشی می‌باشد. نتایج بررسی تراکم زهکشی استخراج شده در مناطق جنگلی فشرده نشان داد که از کل مساحت ۷۱۷/۰۶ کیلومتر مربع جنگل‌های فشرده در منطقه، بر اساس نتایج حاصل از مدل رقومی ارتفاعی فرکانس پایین راداری، ۷۳/۶۲ درصد (۵۲۰/۹۷ کیلومتر مربع) از مساحت جنگل‌های فشرده در کلاس تراکم زهکشی بسیار بالا (بالتر از ۸) قرار گرفته است در حالی این مساحت در مدل رقومی ASTER، تنها ۳۳/۰۰ درصد (۲۴۰/۰ کیلومتر مربع) و در مدل رقومی ارتفاعی SRTM، ۶۷۲/۰ درصد (۴/۸۲۷ کیلومتر مربع) می‌باشد که این موضوع نشانگر توانایی داده‌های فرکانس پایین راداری در نفوذ از مناطق جنگلی و استخراج شبکه‌های زهکشی زیر جنگل با دقت بالا می‌باشد.

واژگان کلیدی: الگوی زهکشی، تصاویر راداری، جنگل متراکم، بهشهر

مقدمه

سیستم‌های راداری با روزه ترکیبی (SAR) در دو دهه گذشته به دلیل تهیه نقشه با قدرت تفکیک بالا به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است (سان و همکاران^۱، ۲۰۱۱؛ کلبرو و همکاران^۲، ۲۰۱۰). قابلیت نفوذ از ابر، قابلیت عملیات در شب و روز و تحت تاثیر شرایط اتمسفری قرار نگرفتن، سیستم‌های SAR را نسبت به سیستم‌های اپتیکی منحصر به فرد کرده است (کارجالاینن و همکاران^۳، ۲۰۱۲). داده‌های SAR به طور فزاینده‌ای در حال استفاده در مسائل ژئوفیزیکی و ژئومورفولوژیکی می‌باشند (بیرو و همکاران^۴، ۲۰۱۳؛ پرادهان و همکاران^۵، ۲۰۱۳). که از آن جمله می‌توان به تهیه نقشه کاربری اراضی (چن و همکاران^۶، ۲۰۱۳)، اندازه‌گیری پوشش گیاهی (لاردوکس و همکاران^۷، ۲۰۱۱) و خطرات طبیعی (بیلا و پرادهان^۸، ۲۰۱۱؛ هررا و همکاران^۹، ۲۰۱۳) اشاره نمود. با توجه به این که منطقه مورد مطالعه در این پژوهش در یک منطقه جنگلی فشرده واقع شده است، شناسایی لندفرم‌های زیر جنگل از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. بالاترین مقادیر نفوذ سیگنال‌های SAR از میان پوشش جنگلی را می‌توان با استفاده از باند L ماهواره ALOS با سنجنده PALSAR با سیگنال‌هایی با طول موج ۲۴ سانتیمتر بدست آورد (هررا و همکاران، ۲۰۱۳؛ نیماجیبور و همکاران^{۱۰}، ۲۰۱۳). در بسیاری از مطالعات در رابطه با تغییرات لندفرم‌های سطح زمین در نواحی جنگلی، استفاده از داده‌های فرکانس پایین راداری را توصیه کرده‌اند (هندا و همکاران^{۱۱}، ۲۰۱۲؛ گارس داوالیلو و همکاران^{۱۲}، ۲۰۱۳). این داده‌ها، برای تولید مدل دقیق رقومی ارتفاعی^{۱۳} و پایش تغییر شکل زمین بسیار مفید می‌باشد (فاراتا و همکاران^{۱۴}، ۲۰۰۵). همچنین با توجه به قابلیت نفوذ بالای این نوع داده‌ها برای شناسایی تغییرات سطحی مناطق با پوشش گیاهی بسیار مناسب می‌باشد (استروزی و همکاران^{۱۵}، ۲۰۰۵؛ هررا و همکاران، ۲۰۱۳؛ پرادهان و همکاران، ۲۰۱۳). لندفرم یک فاکتور کنترلی کلیدی در زمینه عملکرد فرایندهای طبیعی متنوع می‌باشد (مونتگومری و براندون^{۱۶}، ۲۰۰۲)، از این رو تجزیه و تحلیل کمی آن به منظور مشخص نمودن اثر نسبی اجزای آن و مکانیزم‌های عملکردی و به منظور اندازه‌گیری پاسخ سیستم‌های ژئومورفیک به محرک‌های مختلف مورد نیاز می‌باشد (لاگو و همکاران^{۱۷}، ۲۰۰۳؛ فیلیپس^{۱۸}، ۲۰۰۷؛ احمد و همکاران^{۱۹}، ۲۰۱۰). آبراهه‌ها یکی از مهمترین و حساس‌ترین لندفرم‌های سطح زمین می‌باشند (اسمدبرگ و همکاران^{۲۰}، ۲۰۰۹).

¹ Sun et al

² Calabro et al

³ Karjalainen et al

⁴ Biro et al

⁵ Pradhan et al

⁶ Chen et al

⁷ Lardeux et al

⁸ Billa & Pradhan

⁹ Herrera et al

¹⁰ NeamahJebur et al

¹¹ Honda et al

¹² GarcDavalillo et al

¹³ Digital Elevation Model

¹⁴ Furuta et al

¹⁵ Strozzi et al

¹⁶ Montgomery and Brandon

¹⁷ Lague et al

¹⁸ Phillips

¹⁹ Ahmed et al

²⁰ Smedberg et al

که الگوی گسترش آنها بیانگر دامنه و نحوه عملکرد فرایندها، مواد و زمان می باشد (سولیرو-ریبولیدو و همکاران^۱، ۲۰۱۱؛ ویتاکر^۲، ۲۰۱۲؛ کیربی و وایپل^۳، ۲۰۱۲؛ بهرامی^۴، ۲۰۱۳). ارزیابی سیستماتیک سطح زمین و ویژگی های آبراهه از موضوعات مهم در علم ژئومورفولوژی (مینر و ایوانس^۵، ۲۰۰۸؛ سیارت و همکاران^۶، ۲۰۰۹؛ پیک و کومر^۷، ۲۰۱۰؛ پراساناکومر و همکاران^۸، ۲۰۱۳) و در نتیجه ژئومورفومتری (بیشاپ و همکاران^۹، ۲۰۱۲؛ ایوانس^{۱۰}، ۲۰۱۲) می باشد. مدل های رقومی ارتفاعی (DEMs) بهترین ابزار برای آنالیز بصری و ریاضی توپوگرافی، چشم اندازها، لندفرم ها و همچنین مدل کردن فرایندهای سطح زمین می باشند (میلارسیس و آرجیالاس^{۱۱}، ۲۰۰۰؛ توکر و همکاران^{۱۲}، ۲۰۰۱). این مدل ها به منظور آنالیز مورفومتری یک حوضه های آبخیز از طریق استخراج پارامترهای توپوگرافیک و شبکه های آبراهه بارها مورد استفاده قرار گرفته است، و نسبت به نقشه های توپوگرافی سنتی دارای مزایای زیادی از جمله ارائه یکپارچه اطلاعات و داشتن پوشش جهانی و همچنین استفاده آسان از آنها می باشند (داس و همکاران^{۱۳}، ۲۰۱۶). دقت بالای نقشه رقومی ارتفاع تخمین دقیق تری از مشخصات فیزیوگرافی حوضه را در اختیار ما قرار می دهد (چاپلات و همکاران^{۱۴}، ۲۰۰۴). مدل های رقومی با قدرت تفکیک بالاتر دارای دقت بیشتری می باشند (سارن و همکاران^{۱۵}، ۲۰۰۹) و اینکه این دقت بالاتر دلالت بر درجات بالاتری از صحت و استخراج دقیق اجزای سطح زمین بویژه جهت شیب (دراگوت و بلسچک^{۱۶}، ۲۰۰۶؛ فوجیتا و همکاران^{۱۷}، ۲۰۰۸) و خطوط آبراهه (آنورنو و همکاران^{۱۸}، ۲۰۱۲) دارد. از این رو، جستجو برای قدرت تفکیک و اندازه پیکسل مناسب برای مدل های رقومی ارتفاعی به یک موضوع پژوهش در چند سال اخیر تبدیل شده است (احمد و همکاران، ۲۰۱۰). در رابطه با مقایسه دقت مدل های رقومی ارتفاعی و قابلیت نفوذ سیگنال های فرکانس پایین رادری در مناطق جنگلی تحقیقاتی صورت گرفته است به طوری که نیماجیبور و همکاران (۲۰۱۳) به شناسایی زمین لغزش های کند در مناطق جنگلی استوایی با استفاده از داده های ALOS PALSAR پرداختند و به این نتیجه رسیدند که داده های PALSAR توانایی بالایی در نفوذ از مناطق جنگلی و شناسایی تغییر شکل های زیرجنگل دارد. نیماجیبور و همکاران (۲۰۱۴) به شناسایی زمین لغزش ها در مناطق جنگلی فشرده در مالزی با استفاده از داده های PALSAR پرداخته اند و به این نتیجه رسیدند که این داده ها توانایی بالایی در شناسایی زمین لغزش های زیرجنگل دارند. داس و همکاران (۲۰۱۶) به ارزیابی مدل های رقومی ارتفاعی متفاوت به منظور آنالیز پارامترهای مورفومتری آبراهه در منطقه کوهستانی هیمالیا در حوضه آبخیز سوپین آپر پرداخته اند و به این نتیجه رسیدند که مدل های رقومی ارتفاعی مستخرج از نقشه های

¹ Solleiro-Rebolledo et al

² Whittaker

³ Kirby and Whipple

⁴ Bahrami

⁵ Minar and Evans

⁶ Siart et al

⁷ Paik and Kumar

⁸ Prasannakumar et al

⁹ Bishop et al

¹⁰ Evans

¹¹ Millaresis and Argialas

¹² Tucker et al

¹³ Das et al

¹⁴ Chaplot, et al

¹⁵ Saran et al

¹⁶ Dragut and Blaschke

¹⁷ Fujita et al

¹⁸ Anornu et al

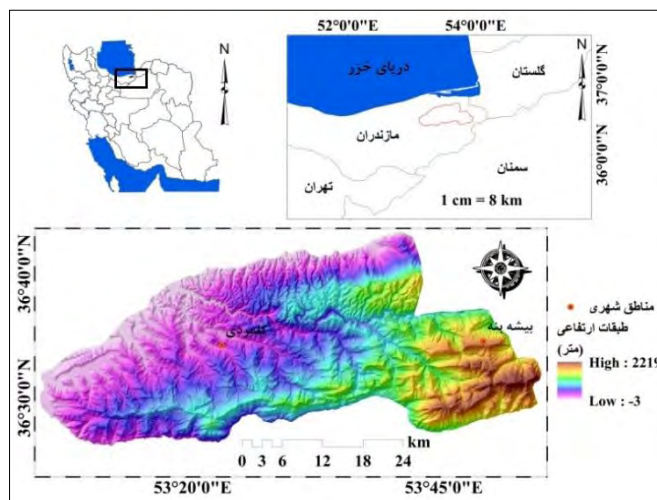
توپوگرافی ۱:۵۰۰۰۰ و ASTER دارای دقت بالاتری در استخراج شبکه های آبراهه در مقایسه با مدل رقومی ارتفاعی SRTM می باشند. در ایران نیز، شیرانی و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی کارایی سنجنده های ASAR و PALSAR در شناسایی و پایش زمین لغزش ها در زاگرس پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تصاویر PALSAR به دلیل طول موج بلندتر، نفوذ بیشتر و کاهش ناهمدوسی نسبت به تصاویر ASAR توانایی بیشتری در تهیه نقشه پراکنش زمین لغزش دارند. رفیعی (۱۳۹۴) به بررسی قابلیت دو سنجنده راداری ASAR و PALSAR با دو فرکانس متفاوت در نفوذ به سطح منطقه و آشکارسازی حرکات توده‌ایی در منطقه متراکم جنگلی جنوب نکا با استفاده از تکنیک تداخل سنجی تفاضلی راداری (D-InSAR) در بازه زمانی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ پرداخته است. نتایج نشان داد تداخل نگار حاصل از سنجنده PALSAR به دلیل ویژگی خاص منطقه مورد مطالعه از لحاظ پوشش گیاهی و رطوبت دارای مقادیر پایین تری از مقادیر همدوسی نسبت به تداخل نگارهای ASAR بوده که خود بر کیفیت نقشه زمین لغزش‌های حاصله مؤثر بوده است. سنگانی و همکاران (۱۳۹۴) به مقایسه اثر روش های مختلف تهیه مدل رقومی ارتفاعی بر خصوصیات مورفومتری شبکه های رودخانه ای در حوضه آبخیز آبه پرداختند و به این نتیجه رسیدند که آستانه ۵۰ سلول نتایج نزدیک تری با آبراهه های مستخرج از تصاویر ماهواره ای دارد و رتبه رودخانه ها و فراوانی سلولی در مقادیر آستانه بالا کاهش می یابد و مقایسه درصد فراوانی سلولی و وکتوری برای همه رتبه های آبراهه تناسب قابل قبولی ارائه داده است، اما برای رتبه های چهار و پنج و شش آبراهه ها تفاوت زیادی وجود دارد و این تفاوت بیش از ۸۰ درصد برای آبراهه های چهار و پنج و شش اندازه گیری شده است. با توجه به این که یکی از کاربردهای مهم مدل های رقومی ارتفاعی استخراج شبکه های زهکشی برای تحلیل های مورفومتری می باشد، در این پژوهش به ارزیابی کارایی و دقت مدل های رقومی ارتفاعی ^۱ASTER، ^۲SRTM و مدل رقومی ارتفاعی حاصل از داده های فرکانس پایین راداری PALSAR در استخراج الگوی شبکه زهکشی در مناطق جنگلی جنوب بهشهر پرداخته شده است.

موقعیت منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه با مساحت ۱۴۴۵/۴۲ کیلومتر مربع در محدوده جغرافیایی ۵۳ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۳ درجه و ۵۴ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۲۵ دقیقه و ۳۰ ثانیه تا ۳۶ درجه و ۴۳ دقیقه و ۳۰ ثانیه قرار گرفته است (شکل ۱). ارتفاع منطقه از ۳- تا ۲۲۱۹ متر متغیر می باشد. متوسط بارندگی سالیانه منطقه بین ۷۰۰ تا ۱۰۰۰ میلیمتر در سال می باشد و دمای سالیانه آن ۱۴ درجه سانتیگراد می باشد. منطقه مورد مطالعه بیشتر در اراضی جنگلی متراکم و حفاظت شده استان مازندران قرار دارد که از نظر پوشش درختی یکی از نواحی متراکم ایران محسوب می شود. در این منطقه بیشتر گونه های درختی پهن برگ وجود داشته که از این گونه ها میتوان به بلوط، ممرز، نارون، راش، توسکا، ارس و... اشاره نمود. لیتولوژی منطقه غالباً مارن، ماسه سنگ آهکی، سنگ آهک ماسه ای و کمی کنگلومرا که گاه میان لایه هایی از گچ نیز دارا است می باشد.

¹ Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER)

² Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)

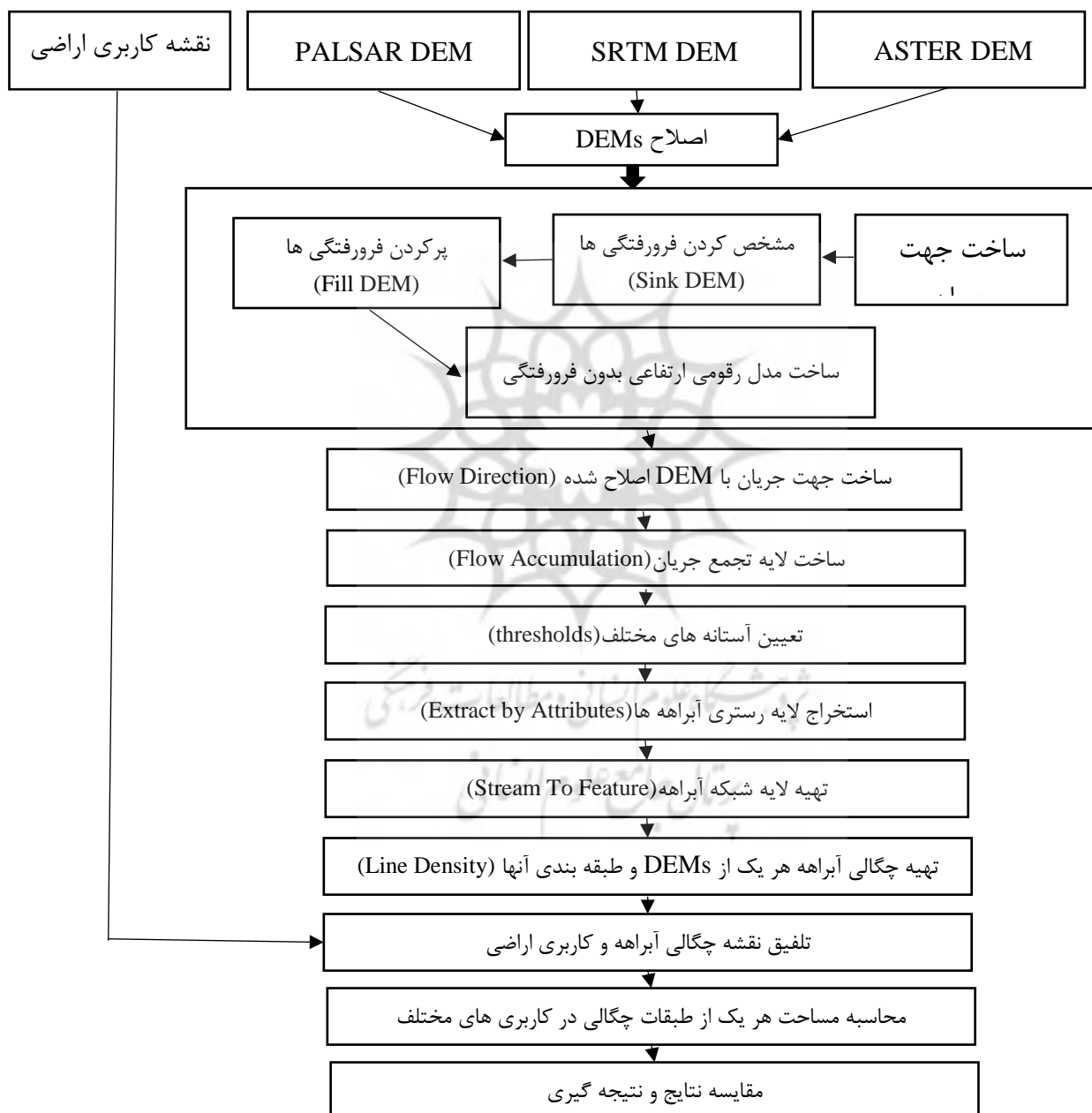


شکل ۱. موقعیت ریاضی منطقه مورد مطالعه

داده ها و روش ها

داده های مورد استفاده در این پژوهش شامل تصاویر ماهواره ای Landsat8 مربوط به سال ۲۰۱۶ با اندازه پیکسل ۳۰ متر، SRTM DEM مربوط به سال ۲۰۰۰ با اندازه پیکسل ۳۰ متر، ASTER DEM مربوط به سال ۲۰۰۹ با اندازه پیکسل ۳۰ متر و مدل رقومی ارتفاعی حاصل از داده های فرکانس پایین راداری (L band) سنجنده PALSAR ژاپنی از ماهواره ALOS مربوط به سال ۲۰۰۷-۲۰۰۹ با اندازه پیکسلی ۱۲٫۵ متر می باشد. مشخصات سنجنده ALOS-PALSAR در جدول (۱) نشان داده شده است. به منظور استخراج شبکه های آبراهه از مدل های رقومی ارتفاعی ابتدا سه مدل رقومی ارتفاعی ASTER، SRTM و PALSAR اصلاح گردید بدین صورت که نخست برای بررسی خطاهای DEMs، لایه جهت جریان ساخته شد و با استفاده از تابع sink در الحاقیه Archydro حفره های موجود در لایه جهت جریان شناسایی شد که تعداد ۲۵۵ حفره را نشان داد که از ابزار fill در الحاقیه Archydro به منظور پر کردن این چاله ها استفاده گردید و بدین صورت مدل های رقومی ارتفاعی اصلاح گردید. در مرحله بعد لایه رستری جهت جریان از DEM اصلاح شده تهیه گردید. روشی که برای تعیین جهت جریان مورد استفاده قرار می گیرد به روش D8 شهرت دارد، این روش جهت جریان یک سلول را به یکی از ۸ سلول دربرگیرنده آن که دارای بیشترین اختلاف شیب است، هدایت می کند، روش D8 اجازه تقسیم جریان به چند سلول را نمی دهد و نتایج پژوهشگران عدم موفقیت روش D8 در مناطق کم را نشان می دهد (گاریسیا و کاماراسا، ۱۹۹۹). لذا الگوریتم های دیگری مانند D^{∞} اختراع و در نرم افزار ArcGIS گنجانده شد (حسین زاده و بیدخوری، ۱۳۷۸). در این پژوهش از الگوریتم D^{∞} برای تهیه جهت جریان استفاده گردید. پس از تهیه لایه رستری جهت جریان، لایه رستری تجمع جریان از آن استخراج گردید. لایه تجمع جریان برای هر سلول، تعداد سلول هایی که جریان خود را به سلول مذکور هدایت می کنند تعیین و درجه بندی می کند. در این لایه تعداد سلول هایی که بالاترین مقدار تجمعی را دارند منطبق بر کانال رودها و و سلول های با مقدار تجمعی صفر منطبق بر خط الراس ها هستند. لایه شبکه آبراهه از لایه رستری تجمع جریان با استفاده از ابزار Raster Calculator محاسبه گردید، بدین منظور ابتدا باید آستانه مقدار تجمع را تعیین نمود، که در این پژوهش آستانه های ۲۰۰۰، ۱۰۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰ برای ساخت لایه شبکه آبراهه مورد آزمایش قرار گرفت و با توجه به این که مقدار آستانه بالاتر تراکم زهکشی پایین تر و مقدار آستانه پایین تر تراکم زهکشی بالاتری را ایجاد می کند، در نهایت مقدار آستانه ۱۰۰ سلول برای استخراج شبکه آبراهه انتخاب گردید و در مرحله بعد با استفاده از ابزار Extract by Attributes آبراهه ها استخراج گردید و در نهایت با کمک ابزار Stream

To Feature لایه شبکه آبراهه‌ها تهیه گردید. پس از تهیه لایه شبکه آبراهه، طول آبراهه‌ها برای هر یک از مدل‌های رقومی ارتفاعی محاسبه شد و در گام بعد با استفاده از ابزار Line density چگالی آبراهه‌ها در هر یک از مدل‌های رقومی ارتفاعی محاسبه و به ۸ کلاس تقسیم بندی و در فرجامین مرحله نقشه کاربری اراضی با استفاده از تصاویر Landsat8 در محیط نرم افزار ENVI 4.8 به روش طبقه بندی نظارت شده و ابزار حداقل فاصله (Minimum Distance) استخراج و مساحت طبقات چگالی در هر یک از کاربری‌ها مشخص گردید و در نهایت به تجزیه و تحلیل نتایج پرداخته شد. در شکل ۲ مراحل انجام پژوهش نشان داده شده است.

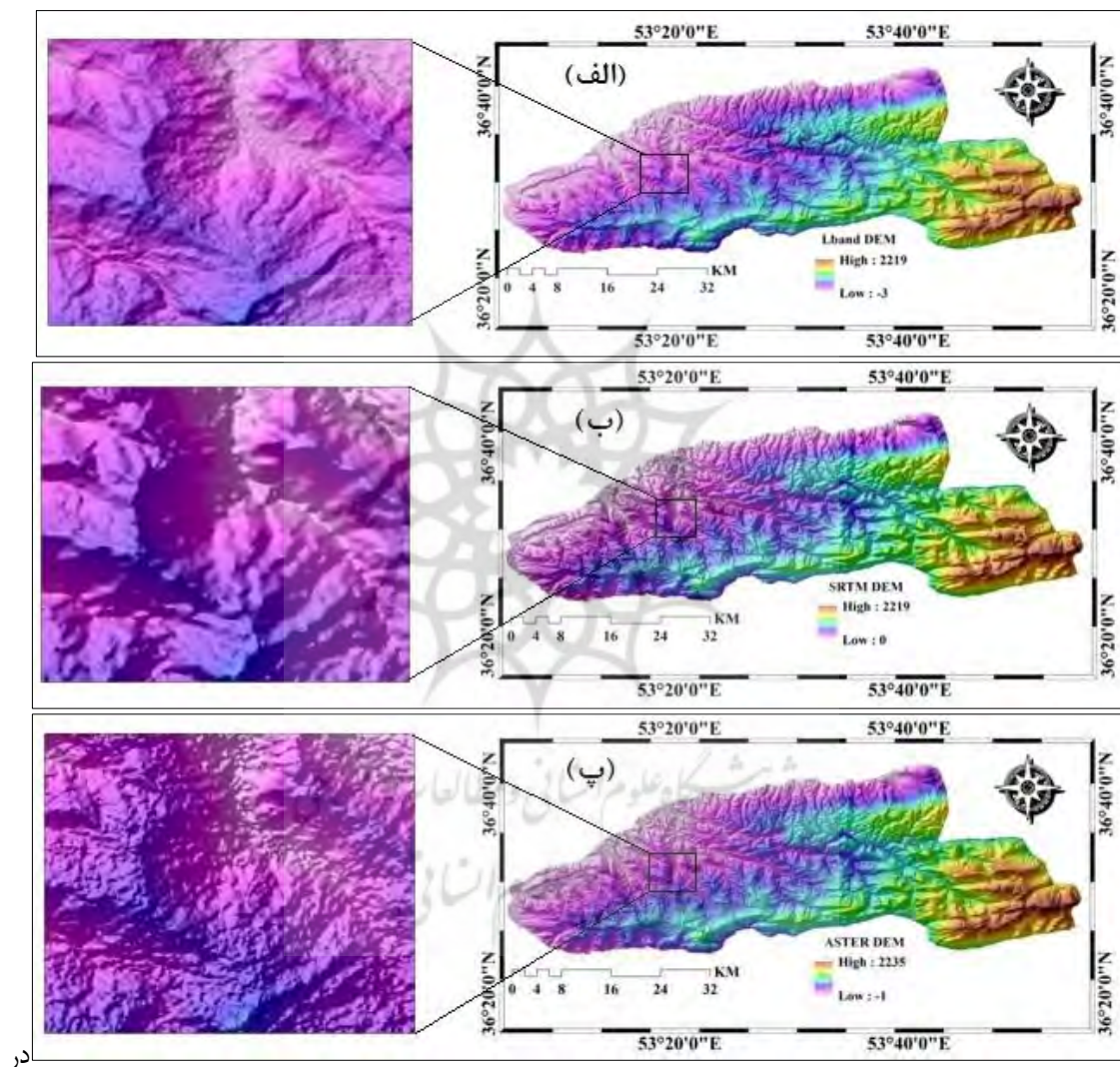


شکل ۲. فرآیند تحقیق

یافته‌ها و بحث

این پژوهش به ارزیابی قابلیت مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEMs) مستخرج از PALSAR و ASTER, SRTM در استخراج الگوی شبکه زهکشی در مناطق فشرده جنگلی پرداخته شده است. در شکل ۳ و جدول ۲ مقادیر ارتفاعی مستخرج

از هر یک از مدل های رقومی ارتفاعی به همراه انحراف معیار نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می گردد مدل رقومی ارتفاعی PALSAR با میانگین ارتفاعی ۶۹۲/۳۱ متر دارای کمترین مقدار انحراف از معیار (۴۶۷/۵۲) می باشد، در حالی که مدل رقومی ارتفاعی SRTM با میانگین ارتفاعی ۶۹۸/۱۶ متر دارای بیشترین میزان انحراف از معیار (۴۶۷/۷۵) می باشد. مدل رقومی ارتفاعی ASTER با میانگین ارتفاعی ۷۰۴/۵۸ متر دارای انحراف از معیار ۴۶۷/۶۶ می باشد. اختلاف میانگین ارتفاعی نشان داده شده بین مدل رقومی ارتفاعی PALSAR و SRTM حدود ۶ متر می باشد.

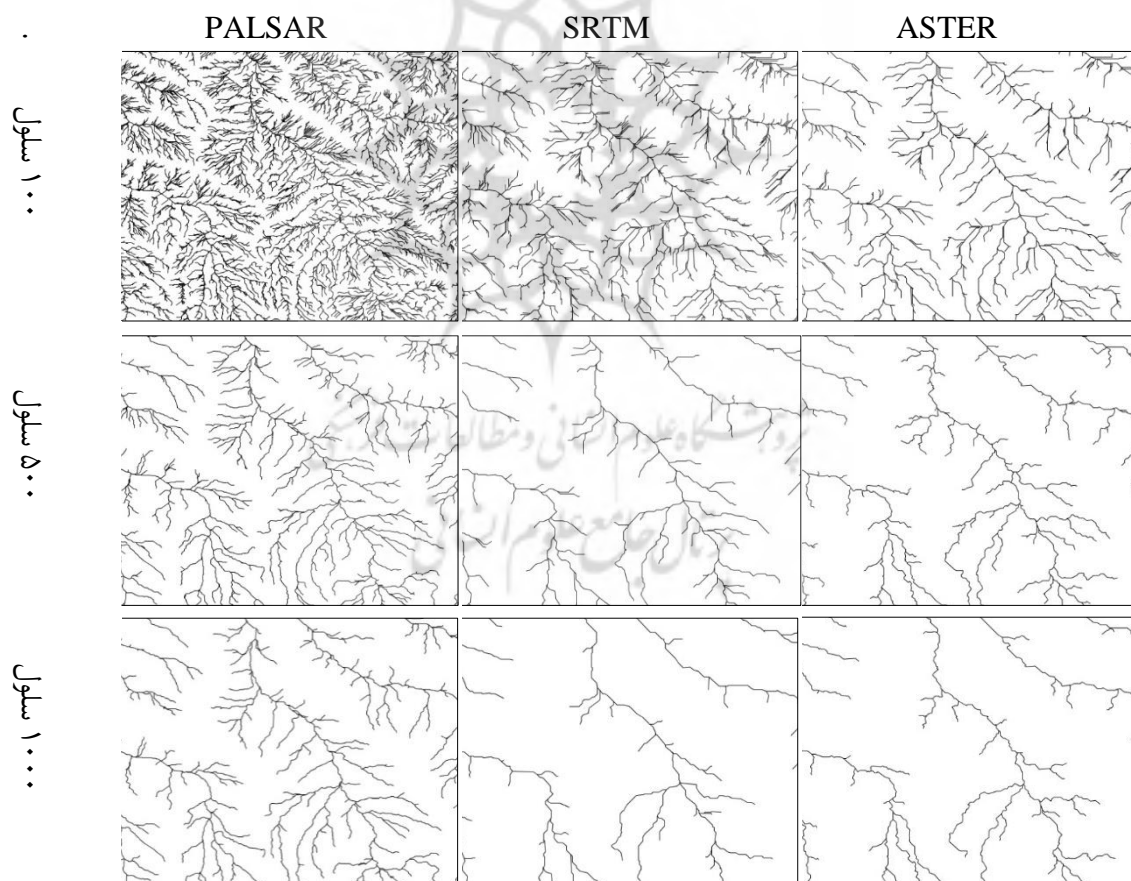


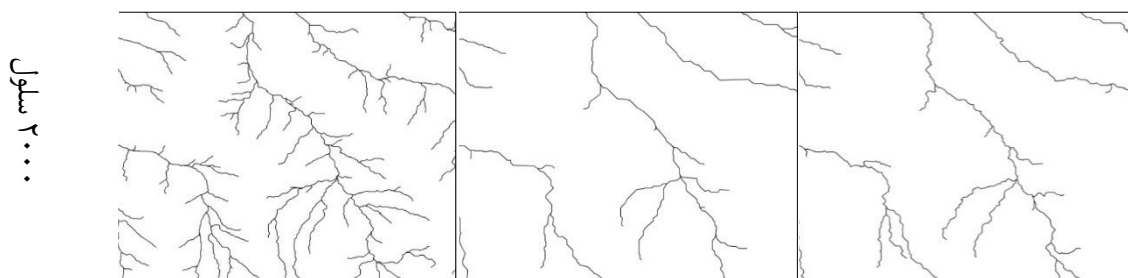
شکل ۳. مدل های رقومی ارتفاعی. الف. PALSAR، ب. SRTM، پ. ASTER

جدول ۲. حداقل و حداکثر ارتفاع مدل های رقومی ارتفاعی

انحراف از معیار	میانگین	حداکثر ارتفاع	حداقل ارتفاع
۴۶۷/۵۲	۶۹۲/۳۱	۲۲۱۹	-۳
۴۶۷/۶۶	۷۰۴/۵۸	۲۲۳۵	-۱
۴۶۷/۷۵	۶۹۸/۱۶	۲۲۱۹	۰

پس از تهیه مدل‌های رقومی ارتفاعی، اقدام به استخراج شبکه‌های زهکشی با استفاده از هر یک از مدل‌های رقومی ارتفاعی گردید. شکل ۴ شبکه‌های زهکشی مستخرج از مدل‌های رقومی ارتفاعی با آستانه‌های ۱۰۰، ۵۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سلول را نشان می‌دهد. در جدول ۳ مقادیر طول آبراهه مستخرج از مدل‌های رقومی ارتفاعی مورد نظر با آستانه‌های سلولی مختلف نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می‌گردد مدل‌های رقومی مختلف در دقت استخراج شبکه‌های زهکشی تاثیر زیادی داشته است به گونه‌ای که در مدل ارتفاعی حاصل از تصاویر راداری PALSAR طول کل آبراهه‌های مستخرج در آستانه ۱۰۰ سلول ۸۰۲۵۳۲۶ متر می‌باشد در حالی که در مدل‌های رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM این مقدار به ترتیب (۵۰۵۱۸۰۵/۲ و ۳۱۷۸۰۹۱/۱) متر می‌باشد. همچنین آستانه‌های مختلف سلولی نیز در دقت استخراج شبکه‌های زهکشی تاثیر زیادی دارند و با کاهش عدد آستانه سلولی، شبکه‌های زهکشی را می‌توان با دقت بالاتری استخراج نمود و بالعکس. همانگونه که در جدول ۳ ملاحظه می‌گردد در مدل ارتفاعی PALSAR با افزایش آستانه سلولی از ۱۰۰ به ۲۰۰۰ مقادیر طول شبکه‌های زهکشی استخراج شده از ۸۰۲۵۳۲۶ متر به ۱۶۲۶۸۵۷/۶ متر کاهش یافته است. با توجه به دقت بالای آستانه ۱۰۰ متر و نزدیک بودن نتایج حاصل از آن با واقعیت زمینی در این پژوهش از آستانه ۱۰۰ متر برای آنالیزهای بعدی استفاده گردید.



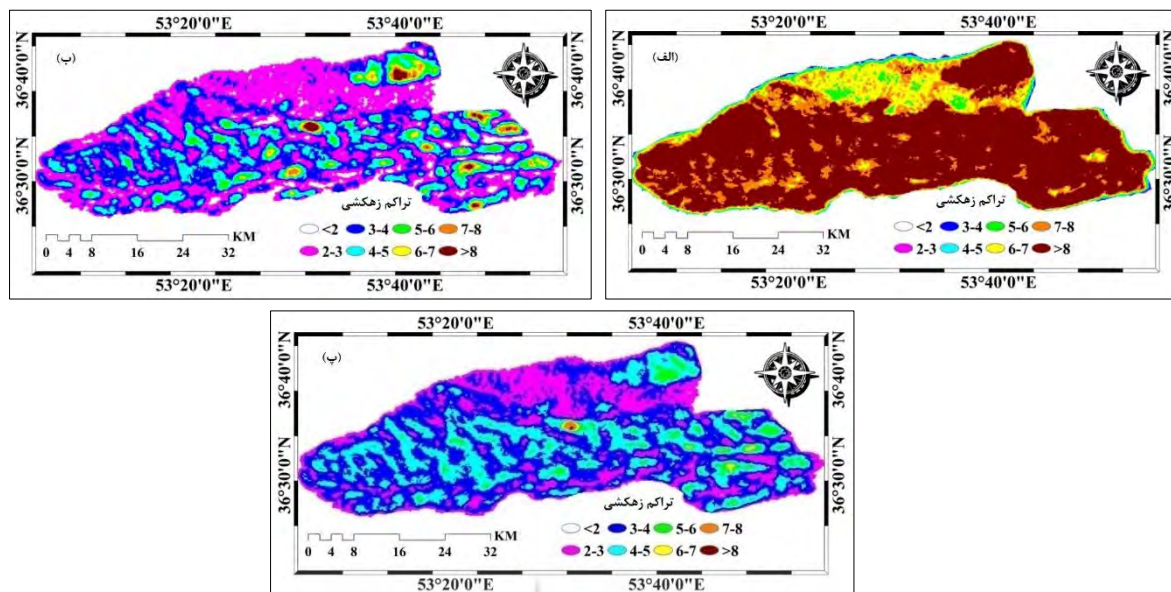


شکل ۴. شبکه های زهکشی مستخرج از مدل های رقومی ارتفاعی با آستانه های متفاوت

جدول ۳. مقادیر طول آبراهه (کیلومتر) مستخرج از مدل های رقومی ارتفاعی متفاوت با آستانه های مختلف

آستانه ها DEMs	سلول ۱۰۰	سلول ۵۰۰	سلول ۱۰۰۰	سلول ۲۰۰۰
PALSAR	۸۰۲۵۳۲۶	۳۳۶۷۷۲۳/۴	۲۳۵۶۰۱۳/۶	۱۶۲۶۸۵۷/۶
SRTM	۵۰۵۱۸۰۵/۲	۱۳۴۳۹۲۳/۳	۹۳۹۱۵۹/۸	۶۶۰۵۴۰/۹
ASTER	۳۱۷۸۰۹۱/۱	۱۵۲۲۳۳۶/۳	۱۰۳۴۰۷۱/۱	۷۱۵۵۴۵/۰۴

پس از استخراج شبکه زهکشی با آستانه سلولی ۱۰۰، مقادیر چگالی آبراهه مستخرج از هر یک از مدل های رقومی ارتفاعی محاسبه گردید (شکل ۵ و جدول ۴). همانگونه که در جدول ۴ نشان داده شده است در مدل قومی ارتفاعی PALSAR حدود ۱۰۲۶/۷۱ کیلومتر مربع (۷۰/۸۳ درصد) از منطقه مطالعاتی در طبقه تراکم بیش از ۸ قرار گرفته است در حالی که در مدل ارتفاعی SRTM حدود ۸/۲۲۸ کیلومتر (۵۶۸ درصد) و در مدل ارتفاعی ۰/۲۵۰ کیلومتر مربع (۰/۱۷) از منطقه در طبقه تراکم بالای ۸ قرار گرفته اند که این موضوع بیانگر توانایی بالای مدل رقومی ارتفاعی PALSAR در استخراج شبکه های زهکشی با دقت بالا می باشد در حالی که این توانایی در مدل های رقومی ارتفاعی دیگر مشاهده نمی گردد. در مدل رقومی SRTM بیشترین درصد از مساحت منطقه (۳۸/۳۵) در کلاس چگالی ۲-۳ قرار گرفته است و در مدل رقومی ASTER بیشترین درصد از مساحت منطقه (۴۵/۵۲) در کلاس ۳-۴ قرار گرفته است در حالی که در مدل رقومی PALSAR بیشترین درصد از منطقه (۷۰/۸۳) در متراکم ترین کلاس یعنی بیش از ۸ قرار گرفته است.



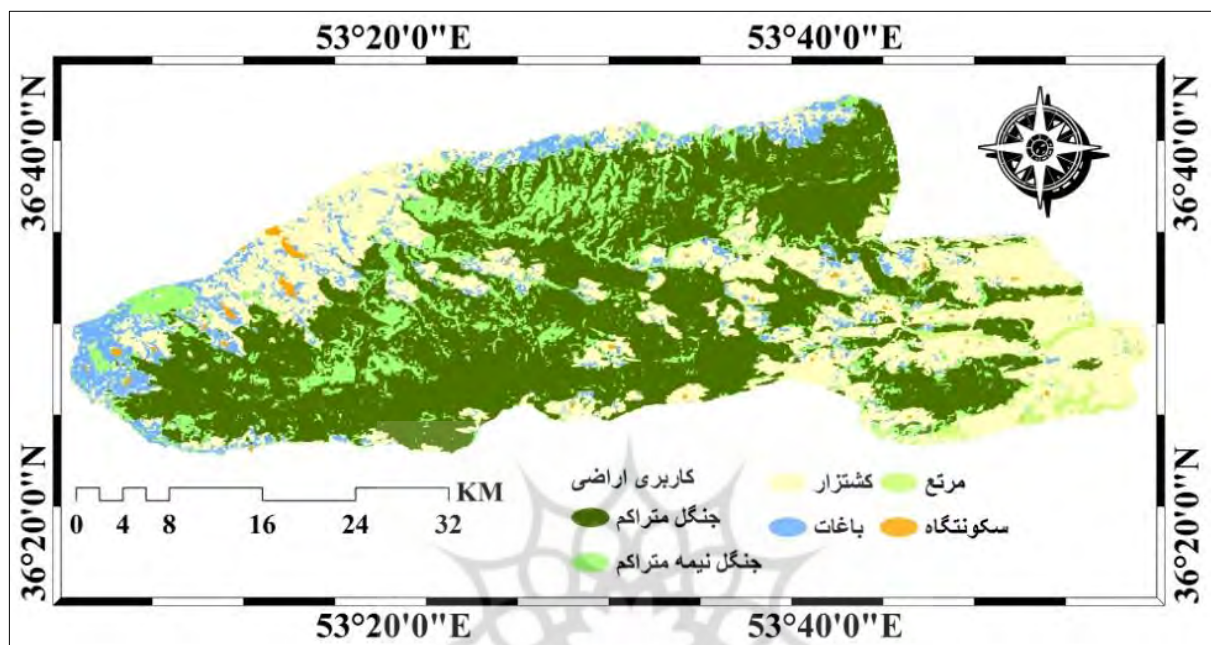
شکل ۵. تراکم زهکشی. الف، PALSAR DEM، ب، SRTM DEM، پ، ASTER DEM

جدول ۴. مساحت و درصد طبقات چگالی زهکشی مستخرج از مدل‌های رقمی ارتفاعی

	PALSAR		SRTM		ASTER	
	مساحت Km ²	%	مساحت Km ²	%	مساحت Km ²	%
<۲	۰/۰۱۴	۰/۰۰۱	۱۰۳/۴۱	۷/۱۴۲	۲۹/۲۰	۲/۰۱
۳-۲	۰/۶۶۳	۰/۰۴۵	۵۵۵/۳	۳۸/۳۵	۳۲۵/۶۹	۲۲/۴۷
۴-۳	۷/۶۷۶	۰/۵۲۹	۴۴۷/۷۸	۳۰/۹۲	۶۵۹/۷۲	۴۵/۵۲
۵-۴	۱۸/۶۵۲	۱/۲۸۶	۲۲۴/۷۷	۱۵/۵۲	۳۷۱/۶۱	۲۵/۶۴
۶-۵	۴۸/۴۹۵	۳/۳۴۵	۷۱/۲۹	۴/۹۲	۵۶/۲۹	۳/۸۸
۷-۶	۱۵۲/۰۱	۱۰/۴۸۷	۲۴/۲۹	۱/۶۷	۴/۵۰۴	۰/۳۱
۸-۷	۱۹۵/۲۵	۱۳/۴۷	۱۲/۸۲۹	۰/۸۸۶	۱/۹۵۷	۰/۱۳۵
>۸	۱۰۲۶/۷۱	۷۰/۸۳	۸/۲۲۸	۰/۵۶۸	۰/۲۵۰	۰/۰۱۷

پس از محاسبه تراکم زهکشی برای هر یک از مدل‌های رقمی ارتفاعی، نخست نقشه کاربری اراضی برای منطقه تهیه گردید (شکل ۶). طبق نقشه ۶ کاربری شامل جنگل متراکم، جنگل نیمه متراکم، کشتزار، باغات، مرتع و سکونتگاه در منطقه مطالعاتی شناسایی گردید. نتایج حاصل از کلاسه بندی کاربری اراضی نشان داد که از کل مساحت منطقه (۱۴۴۵/۴۲) کیلومتر مربع) حدود ۴۹/۶ درصد (۷۱۷/۰۶ کیلومتر مربع) در کلاس جنگل متراکم، ۱۳/۶۹ درصد (۱۹۷/۹۹ کیلومتر مربع) در کلاس جنگل نیمه متراکم، ۲۸/۵ درصد (۴۱۱/۹۴ کیلومتر مربع) در کلاس کشتزار، ۶/۷۲ درصد (۹۷/۲۶ کیلومتر مربع)

در کلاس باغات، ۰/۹۸۵ درصد (۱۴/۲۴ کیلومتر مربع) در کلاس مرتع و ۰/۴۷۶ درصد (۶/۸۹۱ کیلومتر مربع) در کلاس سکونتگاه قرار گرفته است. پس از مشخص کردن کاربری های مختلف و مساحت هر یک از آنها در منطقه، مساحت هر یک از طبقات تراکم زهکشی در هر یک از کاربری ها مشخص گردید (جدول ۵).



شکل ۶. نقشه کاربری اراضی منطقه مطالعاتی

جدول ۵. مساحت طبقات زهکشی در هر یک از کاربری ها (کیلومتر مربع)

		جنگل متراکم	جنگل نیمه متراکم	کشتزار	باغات	مرتع	سکونتگاه
PALSAR DEM	<۲	۰	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰	۰	۰
	۳-۲	۰	۰/۰۷۴	۰/۲۹	۰/۰۸	۰/۰۲۶	۰
	۴-۳	۰/۲۶۵	۰/۷۲	۴/۱۵	۰/۹۹	۰/۳۳	۰/۰۱۲
	۵-۴	۰/۹۶۷	۲/۲۵	۹/۸۶	۳/۶	۰/۶۹	۰/۱۷
	۶-۵	۱۳/۷۸	۹/۲۶	۱۶/۴۴	۶/۸	۱/۰۲	۰/۲۶
	۷-۶	۷۴/۲۷	۳۸/۰۹	۲۶/۳۱	۱۱/۷	۱/۰۲۵	۰/۱۸
	۸-۷	۱۰۷/۱۳	۳۶/۴۴	۳۹/۳۹	۱۰/۸۹	۰/۹۹۷	۰/۳۰
	>۸	۵۲۰/۹۷	۱۱۱/۳۷	۳۱۵/۳۲	۶۲/۸۳	۱۰/۱۶	۵/۹۵
	مساحت (KM ²)	۷۱۷/۰۶	۱۹۷/۹۹	۴۱۱/۹۴	۹۷/۲۶	۱۴/۲۴	۶/۸۹۱
SRTM DEM	<۲	۴۴/۹۵	۱۱/۷۸	۳۲/۴۷	۸/۹۵	۲/۹۸	۰/۳۹
	۳-۲	۲۸۷/۱۵	۹۲/۶۴	۱۳۴/۵۷	۳۵/۱۰	۴/۳۶	۰/۷۷
	۴-۳	۲۲۲/۴۷	۶۲/۰۵	۱۲۵/۱۷	۳۰/۵۲	۴/۲۴	۳/۰۶
	۵-۴	۱۰۸/۷۷	۲۳/۱۰	۷۲/۱۶	۱۶/۸۴	۱/۹۰	۹/۹۱
	۶-۵	۳۳/۶۷	۵/۴۴	۲۷/۲۹	۳/۷۹	۰/۴۴	۰/۵۶

	۶-۷	۱۰/۵۵	۱/۵۷	۱۰/۶۸	۱/۱۷	۰/۱۸	۰/۱۱
	۷-۸	۴/۸۷	۰/۸۵	۶/۶۱	۰/۳۸	۰/۱۰	۰/۰۰۹
	>۸	۴/۸۲	۰/۵۱	۲/۶۵	۰/۱۸	۰/۰۱	۰/۰۲
	مساحت (KM ²)	۷۱۷/۰۶	۱۹۷/۹۹	۴۱۱/۹۴	۹۷/۲۶	۱۴/۲۴	۶/۸۹۱
ASTER DEM	<۲	۳/۶۷	۲/۸۸	۱۴/۰۱	۴/۵۱	۱/۳۹	۰/۲۴۶
	۲-۳	۱۶۰/۲	۵۸/۰۱	۷۷/۸۸	۲۴/۰۱	۳/۷۰	۰/۶۷۵
	۳-۴	۳۴۱/۹	۹۱/۰۲	۱۸۰/۲	۳۸/۴۱	۶/۰۲	۱/۹۴۵
	۴-۵	۱۸۷/۵	۴۰/۶۲	۱۱۰/۴	۲۷/۶۸	۲/۸۰	۳/۵۱۰
	۵-۶	۲۲/۲۶	۴/۶۲	۲۶/۲۳	۲/۴	۰/۳۱۴	۰/۴۴۲
	۶-۷	۰/۹۷	۰/۴۶	۲/۸۸	۰/۱۱۶	.	۰/۰۶۹
	۷-۸	۱/۲۱	۰/۳۴	۰/۲۷۱	۰/۱۲۶	.	.
	>۸	۰/۲۴	۰/۰۰۶	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	.	.
	مساحت (KM ²)	۷۱۷/۰۶	۱۹۷/۹۹	۴۱۱/۹۴	۹۷/۲۶	۱۴/۲۴	۶/۸۹۱

همانگونه که در جدول ۵ نشان داده شده است از کل مساحت ۷۱۷/۰۶ کیلومتر مربع جنگل فشرده در منطقه، بر اساس نتایج حاصل از مدل رقومی ارتفاعی PALSAR، ۷۳/۶۲ درصد (۵۲۰/۹۷ کیلومتر مربع) از مساحت جنگل های فشرده در کلاس تراکم زهکشی بسیار بالا (بالتر از ۸) قرار گرفته است و همچنین از ۱۹۸/۲۳ کیلومتر مربع کاربری جنگل نیمه متراکم در منطقه، ۵۶/۱۸ درصد (۱۱۱/۳۷ کیلومتر مربع) از مساحت آن در رده تراکم بسیار بالا قرار گرفته است که این موضوع بیانگر توانایی بالای داده های فرکانس پایین راداری در استخراج شبکه های زهکشی زیرجنگل می باشد. در مقابل بر اساس نتایج مدل رقومی ASTER، تنها ۰/۳۳ درصد (۰/۲۴۰ کیلومتر مربع) از مساحت جنگل فشرده در منطقه دارای تراکم زهکشی بالاتر از ۸ می باشد و همچنین تنها ۰/۰۳۲ درصد (۰/۰۰۶۴ کیلومتر مربع) از مساحت جنگل نیمه متراکم دارای تراکم زهکشی بسیار بالا می باشد و همچنین بر اساس نتایج مدل رقومی ارتفاعی SRTM، ۰/۶۷۲ درصد (۴/۸۲۷ کیلومتر مربع) از جنگل های فشرده در رده تراکم زهکشی بسیار بالا و ۰/۲۶۱ درصد (۰/۵۱۸ کیلومتر مربع) از مساحت جنگل نیمه متراکم در رده تراکم زهکشی بسیار بالا قرار گرفته است. که این موضوع بیانگر عدم قابلیت مدل های رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM در استخراج شبکه های زهکشی در مناطق جنگلی با دقت مناسب می باشد.

نتیجه گیری

هدف از این پژوهش قابلیت سنجی داده های فرکانس پایین راداری در استخراج شبکه های زهکشی در مناطق جنگلی فشرده می باشد و بدین منظور سه مدل رقومی ارتفاعی شامل ASTER، SRTM و مدل رقومی ارتفاعی حاصل از داده های فرکانس پایین راداری PALSAR مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از استخراج شبکه زهکشی با استفاده از آستانه های سلولی متفاوت نشان داد که آستانه سلولی ۱۰۰ که کمترین مقدار آستانه سلولی مورد بررسی می باشد، بیشترین دقت را در استخراج شبکه های زهکشی در هر سه مدل رقومی ارتفاعی داشته است که با واقعیت زمینی نیز مطابقت دارد. نداف سنگانی و همکاران نیز در پژوهش تحت عنوان مقایسه اثر روش های مختلف تهیه DEM بر خصوصیات مورفومتری شبکه های رودخانه ای در حوضه آبخیز آبغه نیز به این نتیجه رسیدند که آستانه های سلولی در دقت استخراج شبکه های زهکشی تاثیر زیادی داشته است و با کاهش آستانه سلولی دقت استخراج شبکه های زهکشی افزایش می یابد (نداف سنگانی و همکاران، ۱۳۹۴). طبق نتایج حاصل از استخراج شبکه های زهکشی با استفاده از آستانه سلولی ۱۰۰، مدل رقومی ارتفاعی حاصل از داده های فرکانس پایین راداری PALSAR بیشترین مقدار طول آبراهه را

نسبت به مدل های رقومی ارتفاعی دیگر استخراج نموده است که بیانگر دقت بیشتر این مدل رقومی در استخراج شبکه های زهکشی می باشد. نتایج حاصل از طبقه بندی تراکم شبکه زه کشی نشان داد که در مدل رقومی ارتفاعی PALSAR بیشترین مساحت منطقه در طبقه تراکم زهکشی بسیار زیاد (بیش از ۸) قرار گرفته است که بیانگر استخراج شبکه زه کشی با تراکم بالا می باشد، در حالی که در مدل های رقومی ASTER و SRTM مساحت بسیار ناچیزی از منطقه در کلاس تراکم بیش از ۸ قرار گرفته است. نتایج حاصل از تلفیق نقشه کاربری اراضی و طبقات تراکم زهکشی نیز نشان داد که مدل رقومی حاصل از داده های فرکانس پایین راداری PALSAR توانسته است در مناطق جنگلی متراکم و نیمه متراکم شبکه های زهکشی را با تراکم بالا استخراج کند که این موضوع بیانگر توانایی داده های فرکانس پایین راداری در نفوذ از مناطق جنگلی و استخراج شبکه های زهکشی زیر جنگل با دقت بالا می باشد، در حالی که مدل های رقومی ارتفاعی ASTER و SRTM این توانایی را نداشته و قادر به استخراج شبکه های زهکشی زیر جنگل با دقت مناسب و بالا نمی باشند. نتایج حاصل از این پژوهش با نتایج فوروتا و همکاران (۲۰۰۵) که استفاده از داده های فرکانس پایین راداری PALSAR را در تهیه مدل های رقومی ارتفاعی دقیق بسیار مفید دانسته اند و همچنین با نتایج گارس داوالیلو و همکاران (۲۰۱۳) که استفاده از داده های فرکانس پایین راداری را در شناسایی تغییر لندفرم های سطح زمین در مناطق جنگلی بسیار کارآمد دانسته اند مطابقت دارد.

منابع

- شیرانی، کورش، سیف، عبدالله و محمد شریفی کیا. ۱۳۹۳، ارزیابی کارایی سنجنده های ASAR و PALSAR به کمک تداخل سنجی تفاضلی در شناسایی و پایش زمین لغزش ها در زاگرس، مهندسی و مدیریت آبخیز، شماره ۳، ۳۰۱-۲۸۸.
- حسین زاده، سیدرضا و علیرضا بیدخوری. ۱۳۸۹، سیستم های اطلاعات جغرافیایی (چاپ دوم)، انتشارات جهاد دانشگاهی مشهد.
- نداف سنگانی، مهوش، حسین زاده، سیدرضا و مرتضی اکبری. ۱۳۹۴، مقایسه ی اثر روش های مختلف تهیه (DEM) بر خصوصیات مورفومتری شبکه های رودخانه ای (مطالعه موردی: حوضه آبخیز آبنه، استان خراسان رضوی)، علوم و مهندسی آبخیزداری ایران، سال نهم، شماره ۲۰، صص ۶۶-۵۹.
- رفیعی، مجتبی. ۱۳۹۳، قابلیت نفوذ سیگنال فرکانس پایین (باند L) راداری به منظور شناسایی ناپایداری دامنه ای واقع در اراضی جنگلی فشرده جنوب ساری، پایان نامه کارشناسی ارشد. دانشگاه تربیت مدرس. ۱۱۵ ص.
- Ahmed, SA., Chandrashekarappa, KN., Raj, SK., Nischitha, V., Kavitha, G., 2010. Evaluation of morphometric parameters derived from ASTER and SRTM DEM: a study on Bandihole sub-watershed basin in Karnataka. *J Indian Soc Remote Sens.* 38: 227-238.
- Anornu, G., Kabo-Bah, A., Kortatsi, B. 2012. Comparability studies of high and low resolution digital elevation models for watershed delineation in the tropics: case of Densu River Basin of Ghana. *Int J Coop Stud.* 1: 9-14.
- Bahrami, S. 2013. Analyzing the drainage system anomaly of Zagros basins: implications for active tectonics. *Tectonophysics.* 608: 914-928.
- Bishop, MP., James, LA., Shroder, JF., Walsh, SJ. 2012. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: concepts, issues and research. *Geomorphology.* 137(1): 5-26.
- Biro, K., Pradhan, B., Suleiman, H., Buchroithner, MF. 2013. Evaluation of TerraSAR-X data for land use/land cover analysis using object-oriented classification approach in the AfricanSahel area, Sudan. *J Indian SocRemot Sens.* 41: 539-553.
- Billa, L., Pradhan, B. 2011. Semi-automated procedures for shoreline extraction using singleRadarsat-1 SAR image. *Estuarine Coastal Shelf Sci.* 95:395-400.

- Calabro, MD., Schmidt, DA., Roering, JJ. 2010. An examination of seasonal deformation at the Portuguese bend landslide, Southern California, using radar interferometry. *J GeophysRes:Earth Surf.* 115:1–10.
- Chen, Z., Zhang, Y., Guindon, B., Esch, T., Roth, A., Shang, J. 2013. Urban land use mapping using high resolution SAR data based on density analysis and contextual information. *Can JRemote Sensing.* 38:738–749.
- Das, S., Pravin Patel, P., Sen Gupta, S. 2016. Evaluation of different digital elevation models for analyzing drainage morphometric parameters in a mountainous terrain: a case study of the Supin–Upper Tons Basin, Indian Himalayas, *Springerplus.* 5(1): 1544.
- Dragut, L., Blaschke, T. 2012. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology.* 81:330–344.
- Evans, IE. 2012. Geomorphometry and landform mapping: what is a landform? *Geomorphology.* 137:94–106.
- Fujita, K., Suzuki, R., Nuimura, T., Sakai, A. 2008. Performance of ASTER and SRTM DEMs, and their potential for assessing glacial lakes in the Lunana region, Bhutan Himalaya. *J Glaciol.* 54(185):220–228.
- Furuta, R., Shimada, M., Tadono, T., Watanabe, M. 2005. Interferometric capabilities of ALOS PALSAR and its utilization. Paper presented at: the Fringe 2005 Workshop; Italy.
- García-Davalillo, J.-C., Herrera, G., Notti, D., Strozzi, T., Álvarez-Fernández, I. 2014. DInSAR analysis of ALOS PALSAR images for the assessment of very slow landslides: the Tena Valley case study. *Landslides* 11: 225–246.
- Garcia, MJL., camarasa, AM. 1999. use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM: *JAG Journal*, 1(3/4) :187-195.
- Honda, K., Nakanishi, T., Haraguchi, M., Mushiake, N., Iwasaki, T., Satoh, H., Kobori Yamaguchi, Y. 2012. Application of exterior deformation monitoring of dams by DInSAR analysis using ALOS PALSAR. Paper presented at: the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS); Munich, Germany.
- Herrera, G., Gutierrez, F., García-Davalillo, J.C., Guerrero, J., Notti, D., Galve, J.P., Fernández-Merodo, J.A., Cooksley, G. 2013. Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: the Tena valley case study (Central Spanish Pyrenees)., *Remote Sensing Environ.* 128:31–43.
- Karjalainen, M., Kankare, V., Vastaranta, M., Holopainen, M., Hyypä, J. 2012. Prediction of plot-level forest variables using Terrasar-X Stereo SAR data. *Remote Sensing Environ.* 117:338–347.
- Kirby, E., Whipple, KX. 2012. Expression of active tectonics in erosional landscapes. *J Struct Geol.* 44:54–75.
- Lague, D., Crave, A., Davy, P. 2003. Laboratory experiments simulating the geomorphic response to tectonic uplift. *J Geophys Res Solid Earth.* 108(B1):ETG 3-1–ETG 3-20.
- Lardeux, C., Frison, PL., Tison, C., Souyris, JC., Stoll, B., Fruneau, B., Rudant, JP. 2011. Classification of tropical vegetation using multifrequency partial SAR polarimetry. *IEEE GeosciRemote Sensing Lett.* 8:133–137.
- Minar, J., Evans, IS. 2008. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology.* 95(3–4):236–259.
- Millaresis, GC., Argialas, DP. 2000. Extraction and delineation of alluvial fans from digital elevation models and Landsat Thematic Mapper images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66,1093-1101.
- Montgomery, DR., Brandon, MT. 2002. Topographic controls on erosion rates in tectonically active mountain ranges. *Earth Planet Sci Lett.* 201:481–489.

- NeamahJebur, M., Pradhan, B., Tehrani, M.S. 2013. Using ALOS PALSAR derived high-resolution DInSAR to detect slow-moving landslides in tropical forest: Cameron Highlands, Malaysia, *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, <http://dx.doi.org/10.1080/19475705.2013.860407>.
- NeamahJebur, M., Pradhan, B., Tehrani, M.S. 2014. Detection of vertical slope movement in highly vegetated tropical area of Gunung pass landslide, Malaysia, using L-band InSAR technique, *Geosciences Journal*, 18, 1: 61 – 68.
- Paik, K., Kumar P. 2010. Optimality approaches to describe characteristic fluvial patterns on landscapes. *Philos Trans R Soc B Biol Sci*. 365(1545):1387–1395.
- Phillips, JD. 2007. The perfect landscape. *Geomorphology*. 284:159–169.
- Prasannakumar, V., Vijith, H., Geetha, N. 2013. Terrain evaluation through the assessment of geomorphometric parameters using DEM and GIS: case study of two major sub-watersheds in Attapady, South India. *Arab J Geosci*. 6(4):1141–1151.
- Pradhan, B., Hagemann, U., Tehrani, M., Prechtel, N. 2013. An easy to use ArcMap based texture analysis program for extraction of flooded areas from TerraSAR-X satellite image. *ComputGeosci*. (Article online first available).
- Saran, S., Sterk, G., Peters, P., Dadhwal, VK. 2009. Evaluation of digital elevation models for delineation of hydrological response units in a Himalayan watershed. *GeoCarto Int*. 25:105–122.
- Smith, M. J. and Pain, C.F. 2009: Applications of remote sensing in geomorphology: progress in physical Geography, 33(4) pp. 568-582.
- Siart, C., Bubbenzer, O., Eitel, B. 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: a multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology*. 112(1–2):106–121.
- Smedberg, E., Humborg, C., Jakobsson, M., Morth, C-M. 2009. Landscape elements and river chemistry as affected by river regulation—a 3-D perspective. *Hydrol Earth Syst Sci*. 13:1597–1606. doi: 10.5194/hess-13-1597-2009.
- Strozzi, T., Farina, P., Corsini, A., Ambrosi, C., Thüring, M., Zilger, J., Wiesmann, A., Wegmüller, U., Werner, C. 2005. Survey and monitoring of landslide displacements by means of L-band satellite SAR interferometry. *Landslides*, 2:193-201.
- Solleiro-Rebolledo, E., Sycheva, S., Sedov, S. 2011. McClung de Tapia E, Rivera-Uria Y, Salcido-Berkovich C, Kuznetsova A. Fluvial processes and paleopedogenesis in the Teotihuacan Valley, Mexico: responses to late Quaternary environmental changes. *Quat Int*. 233:40–52.
- Sun, G., Ranson, K.J., Guo, Z., Zhang, Z., Montesano, P., Kimes, D. 2011. Forest biomass mapping from LiDAR and Radar synergies. *Remote Sensing Environ*. 115:2906–2916.
- Tucker, GE., Catani, F., Rinaldo, A., Bras, RL. (2001). Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. *Geomorphology*, 36: 187-202.
- Whittaker, AC. 2012. How do landscapes record tectonics and climate? *Lithosphere*. 4(2):160–164.