

استفاده از مدل جاذبه در سنجش از دور به منظور بررسی شاخص توپوگرافی خیسی

مرضیه مکرم^۱، مجید حجتی^۲، عبدالرسول زارعی^{۳*}

۱. عضو هیئت علمی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

۲. کارشناسی ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران

۳. عضو هیئت علمی، گروه مهندسی منابع طبیعی (مرتع و آبخیزداری)، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا

(تاریخ دریافت ۱۳۹۵/۰۹/۱۷؛ تاریخ تصویب ۱۳۹۵/۱۰/۳۰)

چکیده

هدف از این مطالعه بررسی شاخص توپوگرافی خیسی (TWI) با استفاده از مدل جاذبه در شمال استان فارس است. مدل جاذبه برای اولین بار به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع (DEM) استفاده شد. در این تحقیق از دو مدل همسایگی پیکسل‌های مماس (Touching) و مدل همسایگی چهارگانه (Quadrant) به منظور تخمین مقادیر زیرپیکسل‌ها استفاده شد. پس از ساخت تصاویر خروجی برای زیرپیکسل‌ها در مقیاس‌های ۲، ۳ و ۴ با همسایگی‌های متفاوت، بهترین مقیاس با مناسب‌ترین نوع همسایگی با استفاده از نقاط کنترل زمینی تعیین و مقادیر RMSE برای آنها محاسبه شد. تعداد کل نقاط کنترل زمینی به دست آمده از عملیات نقشه‌برداری، ۲۱۱۸ نقطه بود. نتایج نشان داد از بین مقیاس‌ها با همسایگی‌های مختلف، مقیاس ۳ و مدل همسایگی چهارگانه نسبت به بقیه روش‌ها بیشترین دقت با کمترین میزان RMSE برای DEM ۹۰ متری را دارد. سپس با استفاده از DEM به دست آمده از مقیاس ۳ و مدل همسایگی چهارگانه شاخص خیسی حوضه مطالعه شده تعیین شد. نتایج نشان داد شاخص توپوگرافی خیسی در منطقه مطالعه شده بین ۴/۴۵- تا ۶/۰۶+ متغیر است. بخش‌های مرکزی منطقه مطالعه شده بیشترین مقادیر خیسی را دارند. مقایسه شاخص خیسی به دست آمده از مدل جاذبه (با قدرت تفکیک مکانی بیشتر) با DEM ۹۰ متری (با قدرت تفکیک مکانی کمتر)، نشان داد با استفاده از مدل جاذبه، جزئیات بیشتری از میزان رطوبت در منطقه مطالعه شده، قابل مشاهده است.

کلیدواژگان: شاخص توپوگرافی خیسی (TWI)، قدرت تفکیک مکانی، مدل جاذبه، مدل رقومی ارتفاع (DEM).

مقدمه

در بین خصوصیات توپوگرافی، شاخص توپوگرافی خیزی (TWI) ابزار مفیدی برای تعیین وضعیت رطوبت خاک به حساب می‌آید. این شاخص ارتباط زیادی با میزان سطح آب زیرزمینی در یک منطقه دارد [۱] و در مطالعات مختلف به کار می‌رود. به‌طور نمونه برای بررسی شیب زمین و مواد آلی خاک [۲]، ویژگی‌های هیدرولوژیکی و شیمیایی خاک‌ها [۳]، به‌منظور تعیین مسیرهای هیدرولوژیکی یا حتی فرایندهای بیولوژیکی [۴]، پیش‌بینی مواد آلی خاک [۵] کاربرد دارد. لوکا و همکارانش (۲۰۰۷) ارتباط بین خیزی خاک (TWI) و خصوصیات توپوگرافی را بررسی و اثبات کردند که توپوگرافی کنترل‌کننده توزیع مکانی رطوبت خاک، پوشش گیاهی، شوری خاک، بافت خاک و... است [۶]. در مطالعات علوم طبیعی توپوگرافی از عوامل مهم حوضه‌های آبخیز محسوب می‌شود. توپوگرافی فاکتور مهمی در تغییر ویژگی‌های خاک و فرایندهای هیدرولوژیکی به‌شمار می‌رود [۷]. با توجه به اهمیت توپوگرافی به‌منظور استخراج اطلاعات مختلف از جمله شاخص خیزی، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی زیاد بسیار ضروری به‌نظر می‌رسد. تا کنون از روش‌های مختلفی به‌منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای (مدل رقومی ارتفاع (DEM)) استفاده شده است، یکی از این روش‌ها استفاده از تکنیک زیرپیکسل‌هاست. در این تکنیک پیکسل‌ها با توجه به مقادیر پیکسل‌های همسایه، به چندین زیرپیکسل تقسیم می‌شوند. در این روش نقشه‌برداری زیرپیکسل یک پیکسل درشت به زیرپیکسل تقسیم می‌شود و یک کلاس پوشش زمین به هر زیرپیکسل اختصاص می‌یابد، با این محدودیت که تعداد کل زیرپیکسل هر کلاس به‌طور مستقیم با درصد تاج پوشش پیکسل اصلی بزرگ‌تر متناسب می‌شود. با این روش، طبقات نرم ورودی را می‌توان به طبقه‌بندی سخت با قدرت تفکیک مکانی بهتر تبدیل کرد. مشکل اصلی در نقشه‌برداری زیرپیکسل‌ها، تعیین محل هر کلاس پوشش زمین در پیکسل بزرگ‌تر است [۸]. روش‌های متفاوتی برای حل این مشکل ارائه شده است که از جمله می‌توان به الگوریتم جابه‌جایی پیکسل [۱]، مدل جاذبه مکانی [۳]، شبکه هوفیلد [۴]، شبکه عصبی BP [۹]، تکنیک

بهبوده‌سازی خطی [۱۰]، الگوریتم ژنتیک [۱۱] و سیستم ایمنی مصنوعی [۱۲] اشاره کرد.

آخرین مطالعات توسط ژو و همکارانش (۲۰۱۴) به‌منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی با استفاده از مدل جاذبه روی تصاویر ماهواره‌ای انجام شد. نتایج پژوهش آنها نشان داد استفاده از این مدل به‌منظور افزایش قدرت تفکیک بسیار مفید است [۱۳]. در مدل جاذبه پیکسل‌ها طبقه‌بندی می‌شوند؛ در واقع هر پیکسل به چند کلاس طبقه‌بندی می‌شود. این مدل با فرض وابستگی مکانی بیشتر داده‌های نزدیک‌تر در مقایسه با داده‌های دورتر اجرا می‌شود. نقشه‌برداری زیرپیکسل روشی برای به‌دست‌آوردن توزیع فضایی از طبقات مختلف در مقیاس زیرپیکسل است. فرض آماری وابستگی مکانی پیکسل‌ها، توسط اتکینسون (۱۹۹۷) با استفاده از یک تکنیک بهینه‌سازی خطی برای نقشه‌برداری زیرپیکسل انجام شد. یکی از روش‌های تقسیم پیکسل‌ها استفاده از وابستگی مکانی موقعیت پیکسل جاذب زیرپیکسل است [۱]. احتمال دیگر این فرض، تعامل پیکسل فرعی زیرپیکسل است که مرتنس و همکارانش (۲۰۰۳) تصویب کردند. استفاده از الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به بیشترین تعداد زیرپیکسل از کلاس‌های یکسان همسایه بود [۷]. در حالی که اتکینسون (۱۹۹۷) جابه‌جایی پیکسل تا به حداکثر رساندن همبستگی مکانی بین زیرپیکسل همسایه را ارائه کرد. در هر دو روش یادشده استفاده از بخش کوچکی از مقادیر اولیه پیکسل به‌عنوان یک محدودیت شناخته شد [۱]. یکی از مزایای روش زیرپیکسل استفاده از مقیاس است. به‌طور کلی، روش زیرپیکسل (الگوریتم جاذبه)، نسبتاً جدید است که کمتر در علوم طبیعی به‌منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر از آن استفاده شده است [۱۴]. در مطالعه حاضر از این الگوریتم برای افزایش قدرت تفکیک مکانی به‌عنوان اولین الگوریتم برای افزایش قدرت تفکیک DEM استفاده شد. بنابراین، در این مطالعه انتظار می‌رود که استفاده از زیرپیکسل‌ها سبب افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM شود. در مطالعه حاضر از این الگوریتم برای بررسی شاخص توپوگرافی خیزی در شمال استان فارس استفاده می‌شود.

روش کار (مواد و روش‌ها)

منطقه مطالعه‌شده

منطقه مطالعه‌شده در شمال استان فارس واقع شده است.

مختلفی دارند که به کمک آنها مقادیر جاذبه هر زیرپیکسل محاسبه می‌شود [۱۳].

مدل همسایگی پیکسل‌های مماس

در این مدل فقط پیکسل‌هایی که از نظر فیزیکی مماس به زیرپیکسل مد نظر است به منظور محاسبه مقادیر جاذبه استفاده می‌شوند.

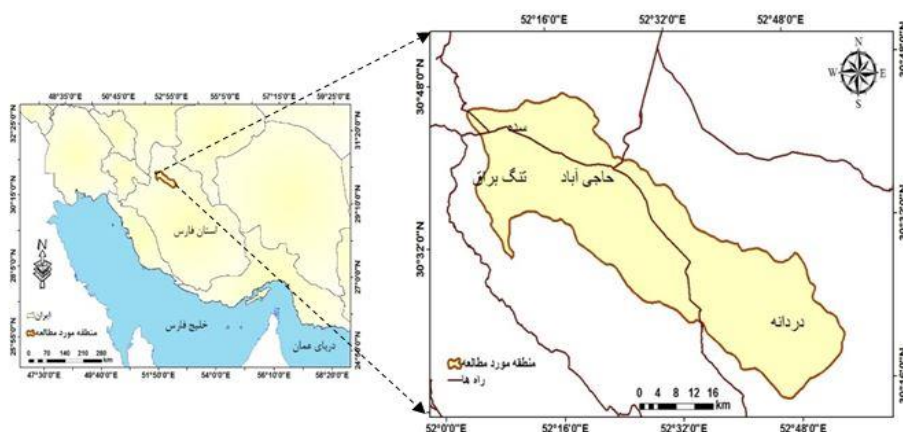
مدل همسایگی چهارگانه

در این مدل فقط پیکسل‌ها در ربع همان زیرپیکسل با توجه به مرکز پیکسل در محاسبات دخیل می‌شوند. این دو نوع همسایگی در شکل ۲ با توجه به تفاوت‌هایشان نشان داده شده است. در این تصویر هر مدل با سه مقیاس مختلف نشان داده شده است. فاکتور مقیاس تعداد زیرپیکسل‌ها را در داخل هر پیکسل اصلی تعیین می‌کند. یک فاکتور مقیاس S مربوط به $S \times S$ زیرپیکسل در هر پیکسل مرکزی است.

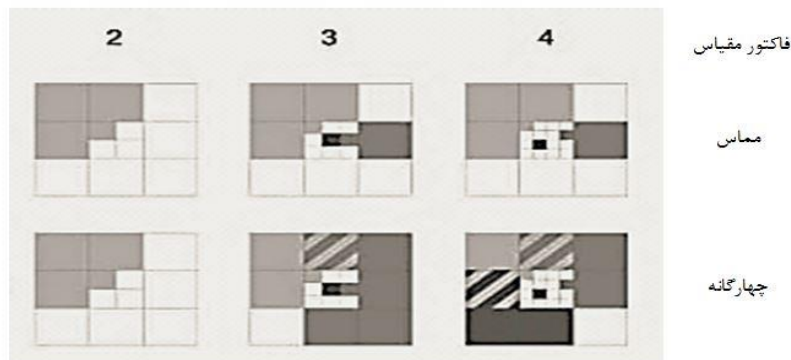
موقعیت جغرافیایی منطقه مطالعه شده در ۳۰ درجه و ۱۴ دقیقه تا ۳۰ درجه و ۴۶ دقیقه شرقی و ۵۲ درجه و ۴ دقیقه تا ۵۲ درجه و ۵۴ دقیقه شمالی واقع شده است (شکل ۱). مساحت منطقه مطالعه شده ۱۶۴۳ کیلومترمربع است. منطقه مطالعه شده در ارتفاع بین ۲۰۶۱ تا ۳۴۹۵ واقع شده است.

مدل جاذبه در زیرپیکسل‌ها

مدل جاذبه در زیرپیکسل‌ها براساس مقادیر پیکسل‌های همسایه است که روی زیرپیکسل‌های داخل یک پیکسل مرکزی اثرگذار هستند. زیرپیکسل می‌تواند فقط با پیکسل‌های اطراف پیکسل مرکزی جذب شود؛ یعنی حداکثر هشت همسایه برای پیکسل می‌توان در نظر گرفت. پیکسل‌های دیگر دور از پیکسل مرکزی فرض می‌شوند و جاذبه آنها بر پیکسل مرکزی اثرگذار نیست. در این تحقیق دو مدل همسایگی در به دست آوردن مقادیر زیرپیکسل‌ها ارزیابی شد. هر مدل پیکسل‌های همسایه



شکل ۱. موقعیت منطقه مطالعه شده



شکل ۲. پیکسل‌های اثرگذار روی زیرپیکسل‌های موجود در پیکسل مرکزی در پنجره 3×3 در دو مدل همسایگی مماس و چهارگانه با مقیاس ۲ و ۳ و ۴

که در آن: a شماره سطر زیرپیکسل، b شماره ستون زیرپیکسل مربوط به آن، s فاکتور مقیاس و i شماره سطر پیکسل همسایه و j نیز شماره ستون پیکسل همسایه است. همسایگی‌های تعریف شده در مرحله قبل به صورت زیر نیز تعریف می‌شوند:

$$N_1[P_{ab}] = \left\{ P_{i;j} \mid d(p_{ab}, P_{i;j}) \leq \frac{1}{\sqrt{2}}(S+1) \right\} \quad (2)$$

$$N_2[P_{ab}] = \left\{ P_{i;j} \mid d(p_{ab}, P_{i;j}) \leq \frac{1}{\sqrt{2}}(2S-1) \right\} \quad (3)$$

که در آن: $N1$ مدل همسایگی مماس و $N2$ مدل همسایگی چهارگانه است. فاصله بین هر زیرپیکسل و پیکسل اطراف (d) به صورت زیر محاسبه می‌شود [۶ و ۱۳]:

$$d(p_{ab}, P_{i;j}) = \sqrt{[a + 0.5 - S(i + 0.5)]^2 + [b + 0.5 - S(j + 0.5)]^2} \quad (4)$$

در این مطالعه از مدل جاذبه با اندازه پیکسل 3×3 استفاده شده است و کدنویسی آن در نرم افزار Matlab انجام شد که قسمتی از توابع مربوط به آن در معادله ۵ آمده است:

`function [result]= Attraction Model(S,t, input)`

`result=nan(S,S);`

`for a=0:S-1`

`for b=0:S-1`

`[Classes, Attraction Values, class_ without_ normalization]=neighborhood (S,t ,input, a,b);`

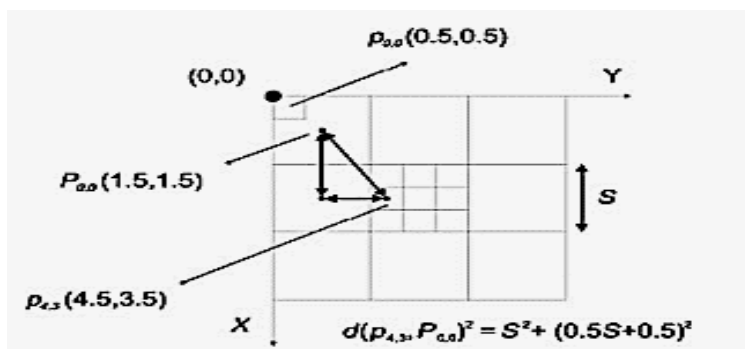
`result(a+1,b+1)=class_ without_ normalization;`

`end`

در کدنویسی انجام شده ورودی پنجره‌های 3×3 ، S : فاکتور مقیاس، T : روش همسایگی، a و b موقعیت زیرپیکسل هاست. در شکل ۳ نمایی از چگونگی محاسبه مقدار فاصله و سیستم مختصات تعریف شده نشان داده شده است [۱۳ و ۱۶].

برای مثال، با داشتن $S=2$ و همسایگی چهارگانه در شکل ۲ زیرپیکسل با تیره‌ترین رنگ درون پیکسل مرکزی فقط توسط پیکسل وسط سمت چپ، پایین سمت چپ و پیکسل ردیف وسط و پایین جذب می‌شود. در مدل جاذبه باید توجه داشت که برای $S=2$ دو مدل همسایگی مماس و چهارگانه مشابه یکدیگرند. مقادیر جاذبه همواره توسط فاصله اقلیدسی وزن دهی می‌شوند که هر زیرپیکسل در محاسبه آن استفاده می‌کند. در مدل یادشده فرض بر این است که پیکسل‌های نزدیک بیشتر از پیکسل‌های با فاصله بیشتر جذب می‌شوند. فاصله از مرکز هر زیرپیکسل به مرکز پیکسل مد نظر محاسبه می‌شود و فرض بر این است که تمام جاذبه از مرکز پیکسل‌ها به یکدیگر اعمال می‌شود. مقادیر عددی جاذبه محاسبه و سپس میانگین گیری می‌شوند. این میانگین گیری بدین منظور است که احتمال دارد برخی از زیرپیکسل‌ها مقادیر جاذبه بیشتری نسبت به دیگر پیکسل‌ها داشته باشند. در این مدل پیکسل‌ها براساس موقعیت نسبی خود به پیکسل بالا سمت چپ که با عنوان $P_{0,0}$ شناخته می‌شود، نام گذاری می‌شوند. همین ساختار برای زیرپیکسل‌ها نیز استفاده می‌شود. بدین معنا که برای $S=2$ زیرپیکسل‌های $P_{0,0}$, $P_{0,1}$, $P_{1,0}$, $P_{1,1}$ دارد. به منظور آسان تر شدن محاسبه، فاصله بین زیرپیکسل‌ها و پیکسل‌ها با یک سیستم مختصات اقلیدسی با محورهای افقی و عمودی در نظر گرفته شده است. مرکز این سیستم نقطه (و) است که بالا سمت چپ زیرپیکسل‌ها قرار می‌گیرد. واحد فاصله برابر با اندازه یک زیرپیکسل است. یک زیرپیکسل $P_{a,b}$ درون یک پیکسل $P_{i,j}$ قرار می‌گیرد هنگامی که معادله زیر برقرار باشد [۱۳ و ۱۵]:

$$P_{a,b} \in P_{i,j} \Leftrightarrow \left(\frac{a}{S} = i \right) \wedge \left(\frac{b}{S} = j \right) \quad (1)$$



شکل ۳. نمایی از سیستم مختصات استفاده شده به منظور محاسبه فاصله بین زیرپیکسل‌ها و هر پیکسل اطراف از طریق محاسبه فاصله اقلیدسی

برای مطالعات هیدرولوژیکی حوضه آبخیز مفید باشد [۱۹]. یکی از شاخص‌های موجود در ژئومورفولوژی که برای مطالعات کمی حوضه آبخیز به کار می‌رود، شاخص توپوگرافی مرکب یا شاخص خیزی یک حوضه آبخیز است. طبق معادله زیر با استفاده از مدل رقومی ارتفاع به راحتی می‌توان این شاخص را محاسبه کرد. این شاخص با جریان‌های سطحی موجود در حوضه آبخیز و مساحت حوضه آبخیز ارتباط مستقیم و با شیب حوضه آبخیز نسبت عکس دارد [۱۸].

$$TWI = \ln(As / (\tan(\beta))) \quad (7)$$

که در آن: AS سطح ویژه حوضه آبخیز برحسب مساحت جمعی بالادست، β درجه شیب. در واقع به کمک شاخص TWI می‌توان گرایش آب به تجمع در هر نقطه از حوضه آبخیز و تمایل به انتقال آب به پایین دست حوضه آبخیز را توصیف کرد.

یافته‌ها

به منظور تهیه شاخص خیزی برای منطقه مطالعه شده از مدل جاذبه استفاده شد. در شکل ۴ تصاویر خروجی زیرپیکسل‌ها برای تصاویر ورودی به الگوریتم جاذبه نمایش داده شده است. پس از تولید تصاویر خروجی برای زیرپیکسل‌ها برای مقیاس ۲ و ۳ و ۴ و همسایگی‌های تماس و چهارگانه نتایج آن در شکل زیر آمده است. هر تصویر خروجی از الگوریتم به صورت جداگانه با نقاط کنترل زمینی مقایسه شد و مقادیر RMSE برای آنها محاسبه شده است.

به منظور مقایسه و تعیین بهترین مقیاس و همسایگی، ارتفاعات تعیین شده برای هر یک از زیرپیکسل‌ها توسط مدل جاذبه با نقاط زمینی مقایسه شد. تعداد کل نقاط کنترل زمینی ۲۱۲ نقطه بود که به صورت تصادفی در منطقه پراکنده شده‌اند. این نقاط کنترل زمینی از طریق عملیات نقشه برداری استخراج شده بودند. در شکل ۵ موقعیت این نقاط و پراکندگی مربوط به آنها نمایش داده شده است. مقدار RMSE برای هر DEM به صورت جداگانه محاسبه شد. در جدول ۱ نتایج این مقادیر نمایش داده شده است. مطالعات نشان می‌دهند استفاده از روش‌های زیرپیکسل موجب افزایش قدرت تفکیک زمینی مدل‌های رقومی زمین و این امر موجب افزایش دقت این مدل‌ها می‌شود.

در روابط یادشده فاکتور مقیاس و نوع همسایگی مد نظر قبل از اجرای الگوریتم باید مشخص شود. تعداد زیرپیکسل‌ها برای هر کلاس محاسبه و فقط محدود به اعداد صحیح می‌شود. بقیه زیرپیکسل‌ها نیز استفاده نمی‌شوند. مقدار جاذبه^۱ خام برای زیرپیکسل $p_{a,b}$ که در پیکسل $P_{i,j}$ قرار دارد به عنوان میانگین همه مقادیر پیکسل‌های کلاس c برای پیکسل $P_{i,j}$ در همسایگی زیرپیکسل $p_{a,b}$ تقسیم بر فاصله بین پیکسل $P_{i,j}$ و زیرپیکسل $p_{a,b}$ به دست می‌آید [۱۳ و ۱۷].

$$p_{ab}(c) = Avg \left\{ \frac{P_{i,j}(c)}{d(p_{ab}, P_{i,j})} \mid P_{i,j} \in N_t [p_{ab}] \right\} \quad (8)$$

بنابراین، با در نظر گرفتن همسایگی‌های مختلف مقادیر جاذبه برای همه زیرپیکسل‌ها درون پیکسل مرکزی محاسبه می‌شود. این مقادیر جاذبه در حقیقت مقادیر جاذبه به ازای هر کلاس هستند. با این فرض که مقادیر هر پیکسل روی سایر پیکسل‌ها اثرگذار است، مقادیر جاذبه می‌تواند برای هر کلاس زیرپیکسل محاسبه شود. با این حال، مقادیر جاذبه زیرپیکسل برای پیکسل‌های مختلف قابل میانگین‌گیری است. پس از مشخص شدن قوانین جاذبه مقادیر خام جاذبه محاسبه می‌شوند. این مقادیر بعداً می‌توانند برای نسبت دادن هر زیرپیکسل به یک کلاس خاص استفاده شوند. زیرپیکسل‌هایی با بیشترین مقدار جاذبه به کلاس مربوط به آن اختصاص می‌یابد [۹ و ۱۳].

بررسی اعتبار هر یک از مدل‌ها

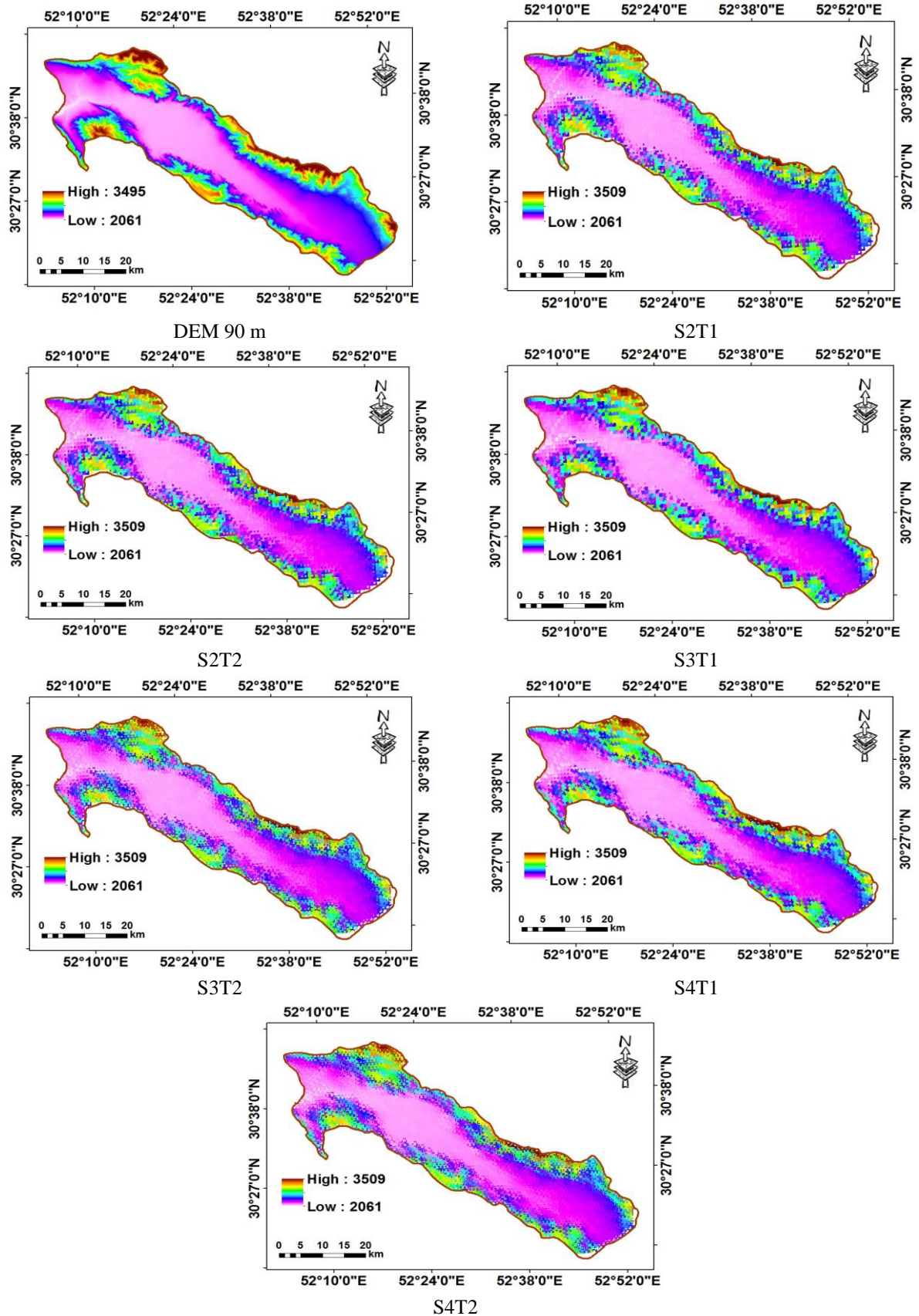
به منظور ارزیابی و تعیین بهترین مدل برای تخمین ارتفاع با استفاده از الگوریتم جاذبه، از ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شد. به کمک RMSE تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی تعیین می‌شود (معادله ۶).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{Z(x_i) - \hat{z}(x_i)\}^2} \quad (6)$$

که در آن: $\hat{z}(x_i)$ مقادیر پیش‌بینی شده، $Z(x_i)$ مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد مقادیر در پایگاه داده بررسی شده است [۱۷ و ۱۸].

شاخص خیزی (TWI)

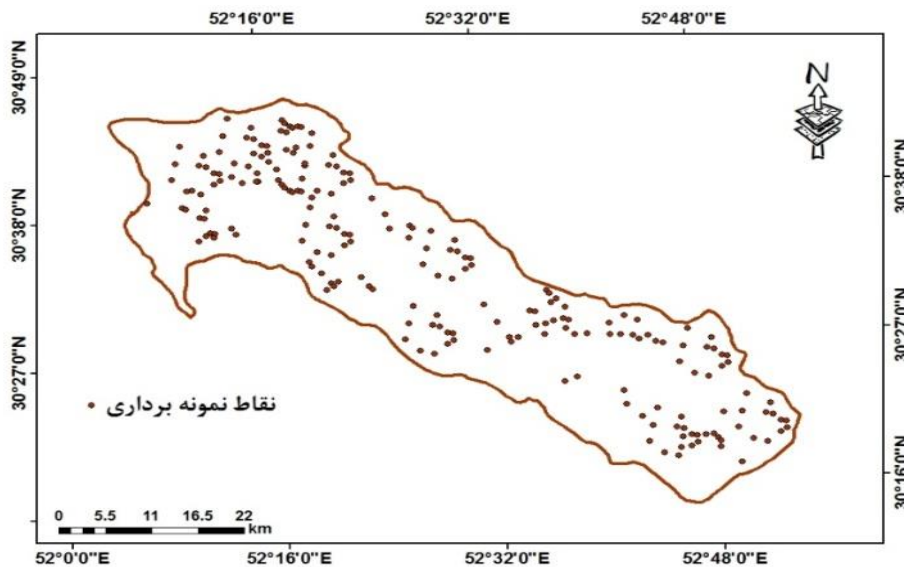
اطلاعات مربوط به بالادست یک حوضه آبخیز می‌تواند



شکل ۴. مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک زیاد با استفاده از الگوریتم جاذبه با مقیاس ها و همسایگی های مختلف

جریان تجمعی تهیه شد و سپس به کمک فرمول ۳ نقشه شاخص خیسی (TWI) تهیه شد. با توجه به شکل ۶ مشخص می‌شود که بیشترین و کمترین مقدار TWI ۶/۰۶ و ۴/۴۵- است. همچنین با استفاده از DEM ۹۰ متر، نقشه شیب و جریان تجمعی و سپس به کمک فرمول ۳ نقشه شاخص خیسی (TWI) تهیه شد. با استفاده از DEM ۹۰ متر با قدرت تفکیک کم، بیشترین و کمترین مقدار TWI ۱۰/۱۶ و ۴/۰۸- تعیین شد (شکل ۶).

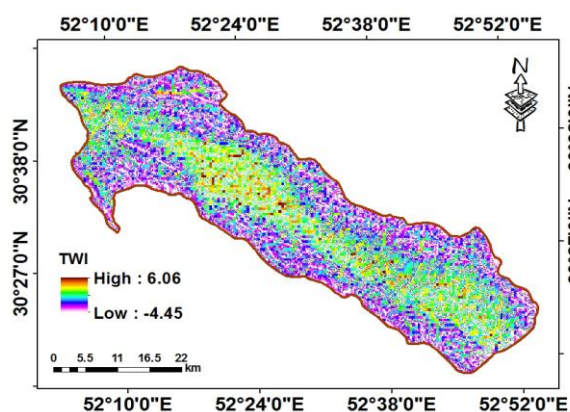
با توجه به مقادیر ارتفاع برای هر یک از نقاط (شکل ۵) و مقادیر پیش‌بینی شده ارتفاع با استفاده از الگوریتم جاذبه برای هر یک از زیرپیکسل‌ها، مقادیر RMSE محاسبه شد. با توجه به مقادیر RMSE مشخص می‌شود که بهترین مدل به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی، مدل $T=1,2$ و $S=2$ برای DEM ۹۰ متر است. در نهایت از مدل $T=2$ و $S=2$ به عنوان داده ورودی (DEM) برای محاسبه شاخص خیسی استفاده شد. به طوری که با استفاده از مدل $T=1,2$ و $S=2$ نقشه شیب و



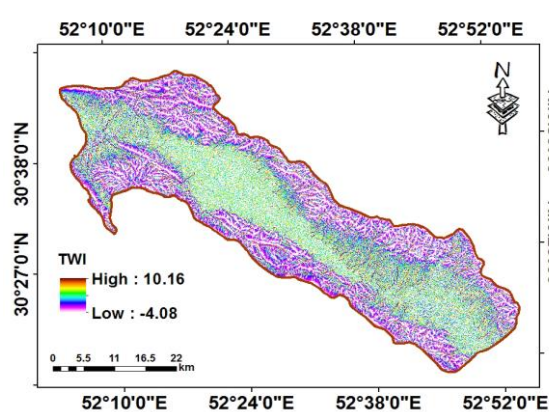
شکل ۵. موقعیت و پراکندگی نقاط کنترل زمینی در منطقه

جدول ۱. مقادیر RMSE برای هر یک از روش‌ها

روش	مقادیر RMSE
S2T1	۵/۴۹
S2T2	۵/۴۹
S3T1	۵/۶۱
S3T2	۵/۸۱
S4T1	۵/۵۷
S4T2	۵/۶۲



S2-T2



DEM 90

شکل ۶. نقشه شاخص خیسی با استفاده از DEM ۹۰ متر و مدل جاذبه برای منطقه مطالعه شده

دقت بیشتر منجر شد. در حقیقت با بهبود قدرت تفکیک مکانی تصاویر می توان اطلاعات دقیق تری از تصاویر استخراج کرد که پیرو آن مدیریت حوضه های آبخیز با دقت بیشتری انجام خواهد شد [۱۳]. حجتی و مکرم (۲۰۱۶) با استفاده از این مدل توانستند لندفرم های منطقه را با جزئیات بیشتری طبقه بندی کنند که نشان دهنده دقت زیاد این مدل است [۱۴].

منابع

- [1]. Atkinson PM. Sub-pixel target mapping from soft-classified, remotely sensed imagery Photogram. Engineering Remote Sensing. 1997;71 (7): 839-846.
- [2]. Guo PT, Liu HB, Wu W. spatial prediction of soil organic matter using terrain attributes in a hilly area, International Conference on Environmental Science and Information Application Technology. China. 2009: (3) 1: 759-762.
- [3]. Wang QM, Wang DF. Sub-pixel mapping based on sub-pixel to sub-pixel spatial attraction model. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS. 2011: 593-596.
- [4]. Muad AM, Foody GM. Super-resolution mapping of lakes from imagery with a coarse spatial and fine temporal resolution. Journal of Applied Earth Observation Geo information. 2012: (12) 1: 79-91.
- [5]. Chen CY, Chen LK, Yu FC, Lin SC, Lin YC, Lee C L, et al. Characteristics analysis for the flash flood-induced debris flows. Journal of Natural Hazards. 2008: 47(1): 245-261.

با توجه به شکل ۶ مشخص می شود که شاخص خیسی با استفاده از مدل جاذبه حاوی اطلاعات دقیق تری از منطقه مطالعه شده است.

بحث و نتیجه گیری

در این تحقیق به منظور محاسبه شاخص خیسی از مدل جاذبه استفاده شد. در واقع قدرت تفکیک مدل های رقومی زمین با استفاده از مدل جاذبه زیرپیکسل افزایش یافت. سپس از داده های مدل جاذبه برای محاسبه شاخص خیسی استفاده شد. الگوریتم مربوط به آن به صورت بصری و آماری بررسی و شاخص RMSE برای آن محاسبه شد. وابستگی مکانی در این تحقیق با مقیاس های مختلف بررسی شد. نتایج نشان داد مدل جاذبه ($T=1,2$ و $S=2$) بیشترین دقت را دارد. به طوری که بیشترین و کمترین مقدار TWI این مدل ۶/۰۶ و ۴/۴۵- است. در حالی که شاخص خیسی DEM ۹۰ متر با قدرت تفکیک کم، بین ۱۰/۱۶ و ۴/۰۸- تعیین شد. در حقیقت، شاخص خیسی با استفاده از مدل جاذبه دقت بیشتر و جزئیات بیشتری از منطقه مطالعه شده دارد. به طور کلی، نتایج نشان داد با استفاده از این روش قدرت تفکیک مدل رقومی زمین با صرف هزینه و زمان کمتر بهبود می یابد. در برخی موارد صحت مدل خروجی هم با استفاده از این مدل بهبود یافت. مدل های رقومی زمین با قدرت تفکیک بهتر می تواند برای استخراج عوارض و اطلاعات بیشتر از زمین استفاده شوند. ژو و همکارانش (۲۰۱۴) با استفاده از این مدل توانستند قدرت تفکیک تصاویر ماهواره ای را بهبود بخشند که با استخراج نقشه مدل رقومی ارتفاع، کاربری اراضی و... با

- [6]. Luca C, Si BC, Farrell RE. Upslope length improves spatial estimation of soil organic carbon content. *Canada Journal of Soil Science*. 2007; (87) 1: 291-300.
- [7]. Mertens JC, Verbeke LPC, Ducheyne EI, Wulf RD. Using genetic algorithms in sub-pixel mapping. *International Journal of Remote Sensing*. 2003; (24) 21: 4241-4247.
- [8]. Grabs T, Seibert J, Bishop K, Laudon H. Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model. *Journal of Hydrology*. 2009; (373) 1: 15-23.
- [9]. Whelan MJ, Gandolfi C. Modeling of spatial controls on de-nitrification in the landscapes scales. *Hydrology Process*. 2002; (16) 7: 1437-1450.
- [10]. Tatem AT, Lewis HG, Atkinson PM. Super resolution target identification from remotely sensed images using a Hopfield neural network. *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*. 2001; (39) 4: 781-796.
- [11]. Sorensen R, Zinko U, Seibert J. On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observation. *Hydrology and Earth System Sciences*. 2005; (10): 1-10.
- [12]. Zhong LP, Zhang PX, Li HF. A sub-pixel mapping algorithm based on artificial immune systems for remote sensing imagery. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS: III-1007-III-1010*.
- [13]. Xu X, Zhong Y, Zhang L. A sub-pixel mapping method based on an attraction model for multiple shifted remotely sensed images. *Neuron computing*. 2014; (134): 79-91.
- [14]. Hojati M, Mokarram M. Using attraction method to landform classification. *quantity geomorphology*. 2016; (4) 4: 40-55.
- [15]. Zhang K, Wu YF, Zhong PX. A new sub-pixel mapping algorithm based on a BP neural network with an observation model. *Neuron computing*. 2008; (71): 2046-2054.
- [16]. Maleki S, khormali GH, Karemi AR. The introduction of streaming algorithms for mapping wetness index and organic carbon in the loess land, Tvshn logic Golestan Province. *Journal of soil and water*. 2014; 21 (1): 145-162. (In Persian)
- [17]. Welsch DL, Kroll CN, Mc Donnell JJ, Burns DA. Topographic controls on the chemistry of subsurface storm flow. *Hydrology Process*. 2001; (15) 10: 1925-1938.
- [18]. Gessler PE, Moore N, McKenzie J, Ryan P J. Soil landscape modeling and spatial prediction of soil attributes. *International Journal of GIS*. 1995; 9 (4): 421-432.
- [19]. Khiavi K, Ghalami A. Application of artificial neural network in precipitation and runoff modeling case study Ghareso watershed, Ardabil. 2011, 3th national congress of Civil Engineering.