

استفاده از مدل زیرپیکسل جاذبه (attraction) به منظور طبقه‌بندی لندفرم‌ها

مجید حجتی - دانشجوی کارشناسی ارشد سنجش‌ازدور و GIS، دانشکده جغرافیا، دانشگاه تهران
مرضیه مکرّم* - استادیار دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز

پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۰۶/۱۹ تأیید نهایی: ۱۳۹۵/۰۱/۲۶

چکیده

از مهم‌ترین موضوعات در علم ژئومورفولوژی کمی افزایش قدرت تفکیک مکانی به‌منظور افزایش میزان اطلاعات در مدل رقومی ارتفاع (DEM) است. مدل‌های مختلفی به‌منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی تاکنون استفاده شده‌اند. از بین مدل‌های مختلف مدل جاذبه به‌عنوان جدیدترین مدل، دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد. در این تحقیق از مدل جاذبه برای اولین بار به‌منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM در جنوب شهرستان داراب (قلاتویه) استفاده شد. در این تحقیق از دو مدل همسایگی پیکسل‌های مماس و مدل همسایگی چهارگانه برای تخمین مقادیر زیر پیکسل‌ها بر روی DEM استفاده شد. هر مدل دارای پیکسل‌های همسایه متفاوت هستند که به کمک آن‌ها مقادیر جاذبه هر زیرپیکسل محاسبه می‌شود. پس از تولید تصاویر خروجی برای زیر پیکسل‌ها در مقیاس‌های ۲، ۳، ۴ با همسایگی‌های متفاوت، بهترین مقیاس با مناسب‌ترین نوع همسایگی با استفاده از نقاط کنترل زمینی تعیین شد و مقادیر RMSE برای آن‌ها محاسبه شد. از بین مقیاس‌ها با همسایگی‌های مختلف مشخص شد که فاکتور مقیاس ۳ و مدل همسایگی چهارگانه نسبت به بقیه روش‌ها دارای بیشترین دقت با کمترین میزان RMSE (8/07) برای DEM ۹۰ متر (8/09) می‌باشد. نتایج حاصل از بررسی میزان RMSE نشان می‌دهد که مدل چهارگانه نتایج بهتری نسبت به مدل مماس نشان می‌دهد و میانگین RMSE خروجی‌های این مدل کمتر از مدل همسایگی مماس است. در حالت S=2 مدل همسایگی و چهارگانه به‌طور استثنای نتایج یکسانی ارائه می‌کنند که موجب می‌شود RMSE این دو مدل در این حالت مقدار یکسانی را ارائه می‌کند که این مقدار همچنین کمترین مقدار مربوطه در بین سایر شاخص‌های مقیاس (۳ و ۴) است. در نهایت از بهترین مدل رقومی ارتفاع حاصل از مدل جاذبه، به‌عنوان داده ورودی برای تهیه لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه با استفاده از روش TPI استفاده شد. نتایج نشان داد مساحت لندفرم‌های قله کوه، یال‌های مرتفع، یال‌های شیب میانی، تپه‌های کوچک موجود در دشت، شیب‌های بالایی، مساه‌ها، شیب‌های باز، دشت و دره‌های u شکل در لندفرم حاصل از مدل جاذبه نسبت به DEM ۹۰ متری افزایش یافت. در حالی که مساحت لندفرم‌های دره‌های باریک، آبراهه‌ها، زهکش‌های شیب میانی، دره‌های کم‌عمق، زهکش‌های مناطق مرتفع و یال‌های موضعی، تپه‌های موجود در دره کاهش یافت. با استفاده از این تحقیق مشخص شد که استفاده از مدل رقومی ارتفاع (DEM) حاصل از الگوریتم جاذبه نسبت به DEM ۹۰ متری دارای جزئیات بیشتری می‌باشد و اطلاعات بیشتری را از منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

واژگان کلیدی: مدل جاذبه، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، قدرت تفکیک مکانی، شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)، لندفرم.

مقدمه

با افزایش قدرت تفکیک مکانی امکان استخراج اطلاعات با جزئیات بیشتر امکان پذیر است. از نقشه‌های با قدرت تفکیک مکانی بیشتر برای استخراج جزئیات بیشتر لندفرم‌ها در علوم ژئومورفولوژی می‌توان استفاده کرد. نقشه لندفرم به‌طور اعم نمایانگر اشکال سطح زمین و ماهیت فرایندهایی است که در یک ناحیه عمل کرده و یا در حال حاضر فعال هستند. این نقشه‌ها دارای ارزش اطلاعاتی بسیار زیادی برای برنامه‌ریزی محیطی، مهندسی عمران، کشاورزی، حفاظت منابع طبیعی، پیش‌بینی و پیشگیری از بلایای طبیعی احتمالی هستند. در مناطق مرتفع یا کویری که دسترسی به آن‌ها سخت است، بررسی‌های مورفولوژیکی این مناطق در مدت‌زمان کوتاه مهم می‌باشد، در این صورت استفاده از داده‌های با قدرت تفکیک مکانی بالا مهم به نظر می‌رسد (شایان و همکاران، ۱۳۸۴). شناسایی لندفرم‌ها و طبقه‌بندی زمین بر اساس آن‌ها در علوم مختلف قابل استفاده است. شناسایی خاص‌ترین اشکال هندسی پدیده‌های ژئومرفیک، از مهم‌ترین مواردی است که توسط طبیعت تعریف می‌شود. دو مورد از این موارد شامل شناسایی مرزها و محدوده‌های طبیعی پدیده‌های ژئومرفیک، با حداکثر تغییرات در شکل‌گیری و هندسه آن‌ها، و دیگری اختصاص الگوریتم‌های واضح برای تفکیک عوارض مختلف سطح زمین با حداقل تعداد پارامترها می‌باشد (مکرم و نگهبان، ۱۳۹۳). وتورا و ایروین ۲۰۰۰ با استفاده از ویژگی‌های مورفومتریکی لندفرم‌ها را طبقه‌بندی نمودند.

با توجه به اهمیت توپوگرافی به‌منظور استخراج اطلاعات مختلف (اقلیم، خاک، هیدرولوژی، لندفرم و ...)، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا بسیار ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون روش‌های مختلفی به‌منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است ولی هیچ‌کدام از این روش‌ها بر روی مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) اعمال نشده‌اند. به دست آوردن جزئیات بیشتر از پیکسل‌ها به‌وسیله نقشه‌برداری زیر پیکسل‌ها اولین بار توسط اتکینسون (۱۹۹۷) ارائه شد. در این تکنیک پیکسل‌ها به چندین زیر پیکسل با توجه به مقادیر پیکسل‌های همسایه تقسیم می‌شوند. این روش نقشه‌برداری زیر پیکسل یک پیکسل درشت به زیر پیکسل تقسیم می‌شود و یک کلاس پوشش زمین به هر زیر پیکسل اختصاص می‌یابد، با این محدودیت که تعداد کل زیر پیکسل هر یک کلاس به‌طور مستقیم با درصد تاج پوشش پیکسل اصلی بزرگ‌تر متناسب می‌شود (اتکینسون، ۱۹۹۷). با این روش، طبقات نرم ورودی را می‌توان به طبقه‌بندی سخت با رزولوشن بهتر تبدیل نمود. مشکل اصلی در نقشه‌برداری زیر پیکسل‌ها تعیین محل هر کلاس پوشش زمین در پیکسل بزرگ‌تر است (ورهوی و ولف، ۲۰۰۲). روش‌های متفاوتی برای حل این مشکل ارائه شده است که از جمله می‌توان به شبکه هویفیلدا (تاتم و همکاران، ۲۰۰۱ و مواد و فودید، ۲۰۱۲)، شبکه عصبی BP (زانگ و همکاران، ۲۰۰۸ و وو و همکاران ۲۰۱۱، نگوسی و همکاران، ۲۰۱۱)، تکنیک بهینه‌سازی خطی (تاتم و همکاران، ۲۰۰۱)، مدل جاذبه مکانی (مرتن و همکاران، ۲۰۰۶، وانگ و همکاران، ۲۰۱۱)، الگوریتم جابجایی پیکسل (آدکینسون، ۲۰۰۵)، الگوریتم ژنتیک (مرتس و همکاران، ۲۰۰۳)، سیستم ایمنی مصنوعی (زانگ و همکاران، ۲۰۰۹)، زنجیره تصادفی مارکوف (کاستکاسم و همکاران، ۲۰۰۵ و تولپکین و استین، ۲۰۰۹، آردیلا و همکاران، ۲۰۱۱) و زمین‌آمار (بوچر و کیریایدیس، ۲۰۰۶ و بوچر و همکاران، ۲۰۰۸) اشاره نمود.

آخرین مطالعات توسط ایکسو و همکاران (۲۰۱۴) به‌منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی با استفاده از مدل جاذبه بر روی تصاویر ماهواره‌ای انجام شد. نتایج نشان داد که استفاده از این مدل به‌منظور افزایش قدرت تفکیک بسیار مفید است. در مدل جاذبه پیکسل‌ها طبقه‌بندی می‌شوند و در واقع هر پیکسل به چند کلاس طبقه‌بندی می‌شود. با فرض وابستگی مکانی بیشتر داده‌ها نزدیک‌تر در مقایسه با داده‌های دورتر این مدل اجرا می‌شود (اتکینسون، ۱۹۹۷). نقشه‌برداری زیر-پیکسل یک روش برای به دست آوردن توزیع فضایی از طبقات مختلف در مقیاس زیرپیکسل است. فرض آماری

وابستگی مکانی پیکسل‌ها، توسط اتکینسون (۱۹۹۷) ورهوی و ولف (۲۰۰۲) با استفاده از یک تکنیک بهینه‌سازی خطی برای نقشه‌برداری زیر پیکسل انجام شد. یکی از روش‌های تقسیم پیکسل‌ها، استفاده از وابستگی مکانی موقعیت پیکسل جاذب زیرپیکسل است. احتمال دیگر این فرض تعامل پیکسل فرعی زیر پیکسل است که توسط مرتنز و همکاران (۲۰۰۳) و اتکینسون (۲۰۰۵) به تصویب رسید. مرتنز و همکاران (۲۰۰۳) استفاده از الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به حداکثر تعداد زیر پیکسل از کلاس‌های یکسان همسایه را پیشنهاد کردند. درحالی‌که اتکینسون (۲۰۰۵) جابجایی پیکسل تا به حداکثر رساندن همبستگی مکانی بین زیر پیکسل همسایه را ارائه نمود. در هر دو روش مذکور استفاده از بخش کوچکی از مقادیر اولیه پیکسل به‌عنوان یک محدودیت شناخته شد. یکی از مزایای روش زیرپیکسل جاذبه استفاده از مقیاس است.

با توجه به اهمیت موضوع در این مطالعه از الگوریتم جاذبه برای افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM به‌عنوان اولین الگوریتم برای افزایش قدرت تفکیک DEM و استخراج لندفرم‌ها استفاده شد. بنابراین در این مطالعه انتظار می‌رود که استفاده از زیرپیکسل‌ها باعث افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM می‌شود. این مطالعه در جنوب شهرستان داراب (قلاویه) با توجه به در دسترس بودن نقاط نقشه‌برداری انجام شد.

مواد و روش‌ها

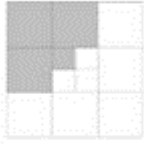


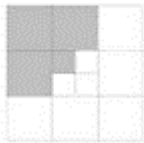


در این مطالعه از مدل جاذبه به‌منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM استفاده شد. اساس مدل جاذبه به شرح زیر است:

مدل جاذبه در زیرپیکسل‌ها بر اساس مقادیر پیکسل‌های همسایه است که بر روی زیر پیکسل‌های داخل یک پیکسل مرکزی اثرگذار هستند. زیر پیکسل می‌تواند تنها با پیکسل‌های اطراف پیکسل مرکزی جذب شود. این به این معنی است که حداکثر هشت همسایه برای پیکسل می‌توان در نظر گرفت. دیگر پیکسل 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 زیر پیکسل‌ها ارزیابی شد. هر مدل دارای پیکسل‌های همسایه مختلف هستند که به کمک آن‌ها مقادیر جاذبه هر زیرپیکسل محاسبه می‌شود (ایکسو و همکاران، ۲۰۱۴).

- **مدل همسایگی پیکسل‌های مماس:** در این مدل فقط پیکسل‌هایی که از نظر فیزیکی مماس به زیر پیکسل موردنظر است به‌منظور محاسبه مقادیر جاذبه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

- **مدل همسایگی چهارگانه:** فقط پیکسل‌ها در ربع همان زیر پیکسل با توجه به مرکز پیکسل شامل محاسبات می‌شود.

این دو نوع همسایگی در شکل ۱ 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 $S * S$ زیر پیکسل در هر پیکسل مرکزی است.

فاکتور مقیاس	2	3	4
مماس			
چهارگانه			

شکل ۱: پیکسل‌های اثرگذار روی زیر پیکسل‌های موجود در پیکسل مرکزی در پنجره ۳*۳ در دو مدل همسایگی مماس و

چهارگانه با مقیاس ۲ و ۳ و ۴

برای مثال با داشتن $S=2$ و همسایگی چهارگانه در شکل ۲ زیرپیکسل با تیره‌ترین رنگ درون پیکسل مرکزی تنها توسط پیکسل وسط سمت چپ، پایین سمت چپ و پیکسل ردیف وسط و پایین جذب می‌شود. در مدل جاذبه بایستی توجه داشت که برای $S=2$ دو مدل همسایگی مماس و چهارگانه مشابه یکدیگر هستند. مقادیر جاذبه همواره توسط فاصله اقلیدسی که هر زیرپیکسل در محاسبه آن مورد استفاده قرار می‌دهد وزن دهی می‌شود. در این مدل فرض بر این است که پیکسل‌های نزدیک بیشتر از پیکسل‌های بافاصله بیشتر جذب می‌شوند. فاصله از مرکز هر زیر پیکسل به مرکز پیکسل مورد نظر محاسبه می‌شود و فرض بر این است که تمام جاذبه از مرکز پیکسل‌ها به یکدیگر اعمال می‌شود. مقادیر عددی جاذبه محاسبه شده و سپس میانگین گیری می‌شوند. این میانگین گیری به این منظور است که ممکن است برخی از زیر پیکسل‌ها مقادیر جاذبه بیشتری نسبت به دیگر پیکسل‌ها داشته باشند. در این مدل پیکسل‌ها بر اساس موقعیت نسبی خود به پیکسل بالا سمت چپ که با عنوان $P_{0,0}$ شناخته می‌شود، نام گذاری می‌شوند. همین ساختار برای زیرپیکسل‌ها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. به این معنا که برای $S=2$ دارای زیر پیکسل‌های $P_{0,0}$, $P_{0,1}$, $P_{1,0}$, $P_{1,1}$ می‌باشد. به منظور آسان تر شدن محاسبه، فاصله بین زیر پیکسل‌ها و پیکسل‌ها با یک سیستم مختصات اقلیدسی با محورهای افقی و عمودی در نظر گرفته شده است. مرکز این سیستم نقطه $(0,0)$ است که بالا سمت چپ زیرپیکسل‌ها قرار می‌گیرد. واحد فاصله برابر با اندازه یک زیرپیکسل است. یک زیر پیکسل $P_{a,b}$ درون یک پیکسل $P_{i,j}$ قرار می‌گیرد هنگامی که معادله زیر برقرار باشد (ایکسو و همکاران، ۲۰۱۴):

$$p_{a,b} \in P_{i,j} \Leftrightarrow \left(\frac{a}{S} = i\right) \wedge \left(\frac{b}{S} = j\right) \quad \text{معادله ۱}$$

که در آن a شماره سطر زیر پیکسل، b شماره ستون زیر پیکسل مربوطه، 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:

$$N1[p_{a,b}] = \left\{ P_{i,j} \mid d(p_{a,b}, P_{i,j}) \leq \frac{1}{\sqrt{2}}(S+1) \right\} \quad \text{معادله ۲}$$

$$N2[p_{a,b}] = \left\{ P_{i,j} \mid d(p_{a,b}, P_{i,j}) \leq \frac{1}{\sqrt{2}}(2S-1) \right\} \quad \text{معادله ۳}$$

که در آن $N1$ مدل همسایگی مماس و $N2$ مدل همسایگی چهارگانه است. فاصله بین هر زیر پیکسل و پیکسل اطراف (d) به صورت زیر محاسبه می‌شود (ایکسو و همکاران، ۲۰۱۴):

معادله ۴

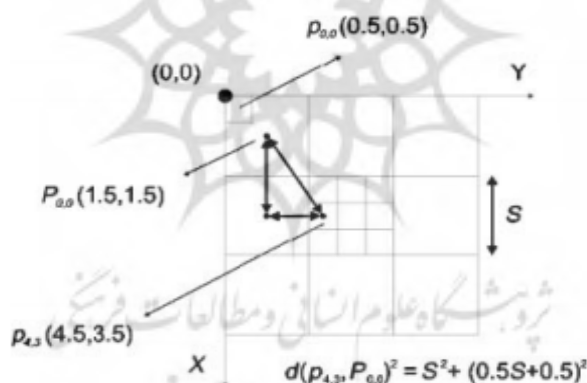
$$d(p_{a;b}, P_{i;j}) = \sqrt{[a + 0.5 - S(i + 0.5)]^2 + [b + 0.5 - S(j + 0.5)]^2}$$

در این مطالعه برای از مدل جاذبه با اندازه پیکسل ۳×۳ استفاده شده است و کد نویسی آن در نرم‌افزار 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
end
```

معادله ۵

که ورودی: پنجره‌های ۳×۳، S: فاکتور مقیاس، T: روش همسایگی، a و b موقعیت زیر پیکسل‌ها می‌باشد. در شکل ۲ نمایی از چگونگی محاسبه مقدار فاصله و سیستم مختصات تعریف شده نشان داده شده است (ایکسو و همکاران، ۲۰۱۴).



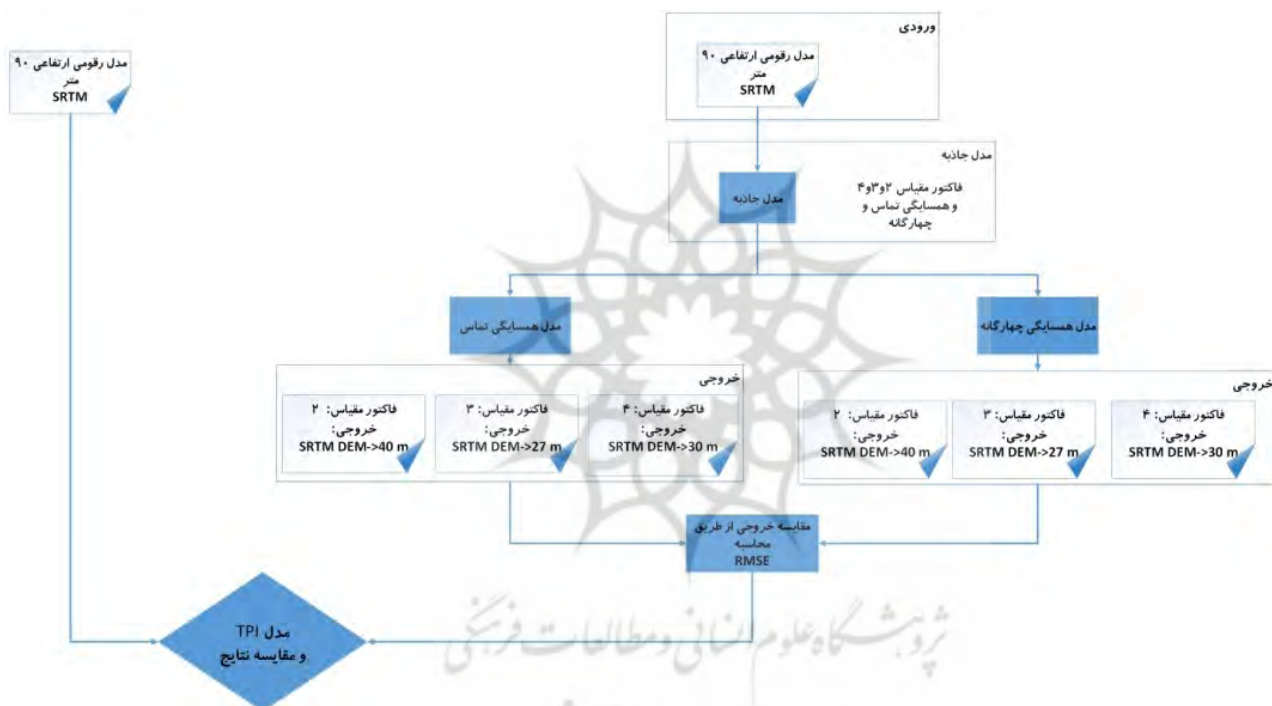
شکل ۲: نمایی از سیستم مختصات مورد استفاده به منظور محاسبه فاصله بین زیر پیکسل‌ها و هر پیکسل اطراف از طریق محاسبه فاصله اقلیدسی

در روابط بالا فاکتور مقیاس و نوع همسایگی مورد نظر قبل از اجرای الگوریتم بایستی مشخص شود. تعداد زیر پیکسل‌ها برای هر کلاس محاسبه شده و فقط محدود به اعداد صحیح می‌شود. بقیه زیر پیکسل‌ها نیز مورد استفاده قرار نمی‌گیرند. مقدار جاذبه^۱ خام برای زیر پیکسل $p_{a,b}$ که در پیکسل $P_{i,j}$ قرار دارد به عنوان میانگین تمام مقادیر پیکسل‌های کلاس C برای پیکسل $P_{i,j}$ در همسایگی زیر پیکسل $p_{a,b}$ تقسیم بر فاصله بین پیکسل $P_{i,j}$ و زیر پیکسل $p_{a,b}$ به دست می‌آید (ایکسو و همکاران، ۲۰۱۴).

$$p_{a;b} (c) = Avg\left\{\frac{P_{i;j} (c)}{d(p_{a;b}, P_{i;j})} \mid P_{i;j} \in N_t[p_{a;b}]\right\} \quad \text{معادله ۶}$$

^۱ Attraction Value

بنابراین با در نظر گرفتن همسایگی‌های مختلف مقادیر جاذبه برای تمامی زیر پیکسل‌ها درون پیکسل مرکزی محاسبه می‌شود. این مقادیر جاذبه در حقیقت مقادیر جاذبه به ازای هر کلاس هستند. با این فرض که مقادیر هر پیکسل بر روی سایر پیکسل‌ها اثرگذار است، مقادیر جاذبه می‌تواند برای هر کلاس زیرپیکسل محاسبه شود. با این حال مقادیر جاذبه زیر پیکسل 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 مورد استفاده قرار گیرد. زیر پیکسل‌هایی با بیشترین مقدار جاذبه به کلاس مربوطه اختصاص می‌یابد (ایکسو و همکاران، ۲۰۱۴). مراحل مختلف مدل جاذبه به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی در مدل رقومی ارتفاع (DEM) در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل ۳. مراحل مختلف اجرا شده در این تحقیق به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع (DEM) با استفاده از الگوریتم جاذبه

بررسی اعتبار هر یک از مدل‌ها

به منظور ارزیابی و تعیین بهترین مدل به منظور 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 ۷).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \{Z(x_i) - \hat{z}(x_i)\}^2} \quad \text{معادله ۷}$$

که در آن $\hat{z}(x_i)$ مقادیر پیش‌بینی شده، $Z(x_i)$ مقادیر اندازه‌گیری شده و N تعداد مقادیر در پایگاه داده مورد بررسی می‌باشد (Johnston et al., 2001). بررسی صحت تصاویر با استفاده از RMSE شبیه به مطالعات Tatem و همکاران (۲۰۰۲) می‌باشد.

شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI)

برای جداسازی لندفرم‌های منطقه از مدل رقومی ارتفاع با رزولیشن ۹۰ متر با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) در نرم‌افزار GIS استفاده شد. تعداد ۱۰ نوع لندفرم بر اساس TPI یا شاخص موقعیت توپوگرافی شناسایی شد (Weiss, 2006).

به منظور محاسبه TPI طبق معادله زیر ارتفاع هر سلول در یک مدل رقومی ارتفاع با میانگین ارتفاع سلول‌های همسایه بررسی می‌شود. در نهایت ارتفاع میانگین از مقدار ارتفاع در مرکز کم می‌شود (معادله ۸).

$$TPI_i = Z_0 - \sum_{n-1} Z_n/n \quad \text{معادله ۸}$$

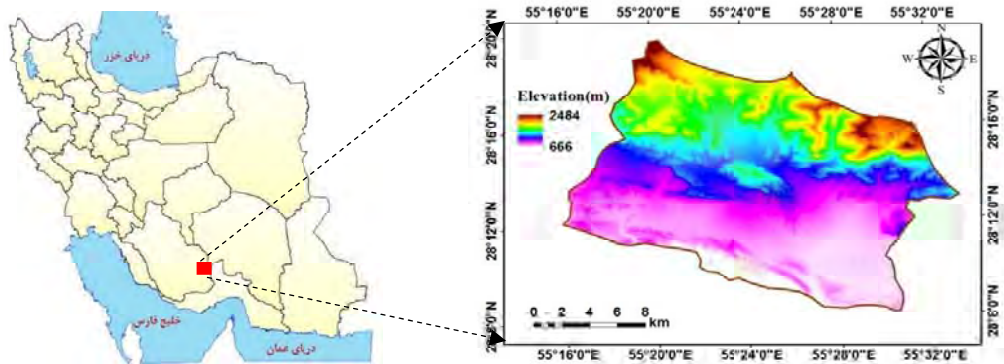
که Z_0 ارتفاع نقطه مدل تحت ارزیابی، Z_n ارتفاع از شبکه و n تعداد کل نقاط اطراف در نظر گرفته شده در ارزیابی است. ترکیب TPI در مقیاس کوچک و بزرگ اجازه می‌دهد تا انواع اشکال ایجاد شود (جدول ۱). برای طبقه‌بندی بهتر می‌توان از در بین کلاس‌ها نیز طبقه‌بندی به صورت دستی انجام داد تا یک طبقه‌بندی بهینه برای چشم‌انداز منطقه مورد مطالعه داشته باشیم. شاخص موقعیت توپوگرافی، ارتفاع هر پیکسل در مدل رقومی ارتفاع را با پیکسل مشخص اطراف آن پیکسل مقایسه می‌کند. مقادیر مثبت TPI نشان‌دهنده مناطقی است که بالاتر از نقاط اطراف قرار گرفته (تپه‌ها) و مقادیر منفی TPI نشان‌دهنده مناطقی است که پایین‌تر از اطرافشان هستند (دره‌ها). مقادیر صفر و نزدیک صفر نیز نشان‌دهنده مناطق مسطح (جایی که شیب نزدیک صفر است) یا مناطقی با شیب ثابت هستند.

جدول ۱. طبقه‌بندی انواع لندفرم‌ها بر اساس شاخص موقعیت توپوگرافی

نوع لندفرم	مقدار TPI
دره‌های باریک، آبراهه‌ها	$TPI \leq -1$
زهکش‌های شیب میانی، دره‌های کم عمق	$-1 < TPI < 1$
زهکش‌های مناطق مرتفع	$TPI \geq 1$
دره‌های U شکل	$TPI \leq -1$
دشت	$-1 < TPI < 1$, Slope $\leq 5^\circ$
شیب‌های باز	$-1 < TPI < 1$, Slope $> 5^\circ$
شیب‌های بالایی، مساه‌ها	$TPI \geq 1$
یال‌های موضعی، تپه‌های موجود در دره	$TPI \leq -1$
یال‌های شیب میانی، تپه‌های کوچک موجود در دشت	$-1 < TPI < 1$
قله کوه، یال‌های مرتفع	$TPI \geq 1$

منطقه مورد مطالعه

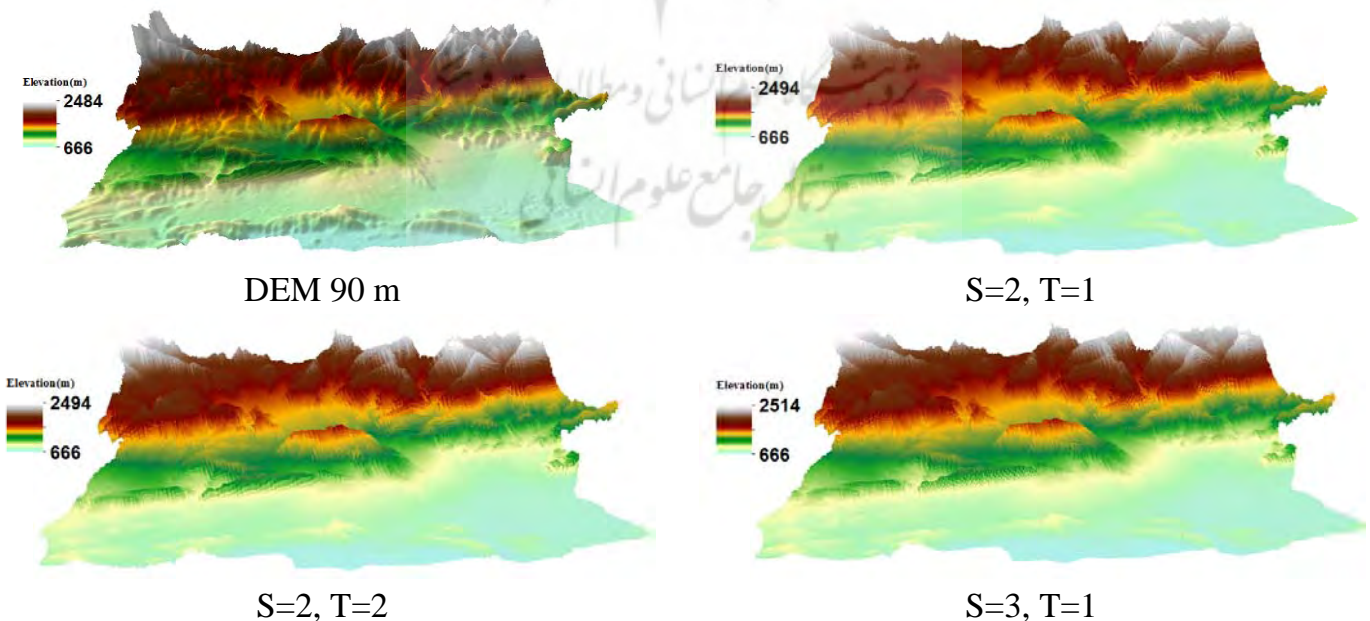
منطقه مورد مطالعه در جنوب شهرستان داراب (قلاتویه) در ۴۵ درجه و ۱۵ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۳۳ دقیقه طول جغرافیایی و ۲۸ درجه و ۷ دقیقه تا ۲۸ درجه و ۱۹ دقیقه عرض جغرافیایی با مساحت ۳۳۹/۱۴ کیلومتر مربع واقع شده است (شکل ۴). منطقه مورد مطالعه در ۱۲۵ کیلومتری شهرستان داراب از توابع استان فارس می‌باشد که تا اولین روستای استان هرمزگان (طاشکویه) ۱۸ کیلومتر فاصله دارد، آب‌وهوای آن در تابستان گرم و خشک و در زمستان نسبتاً سرد و معتدل است.

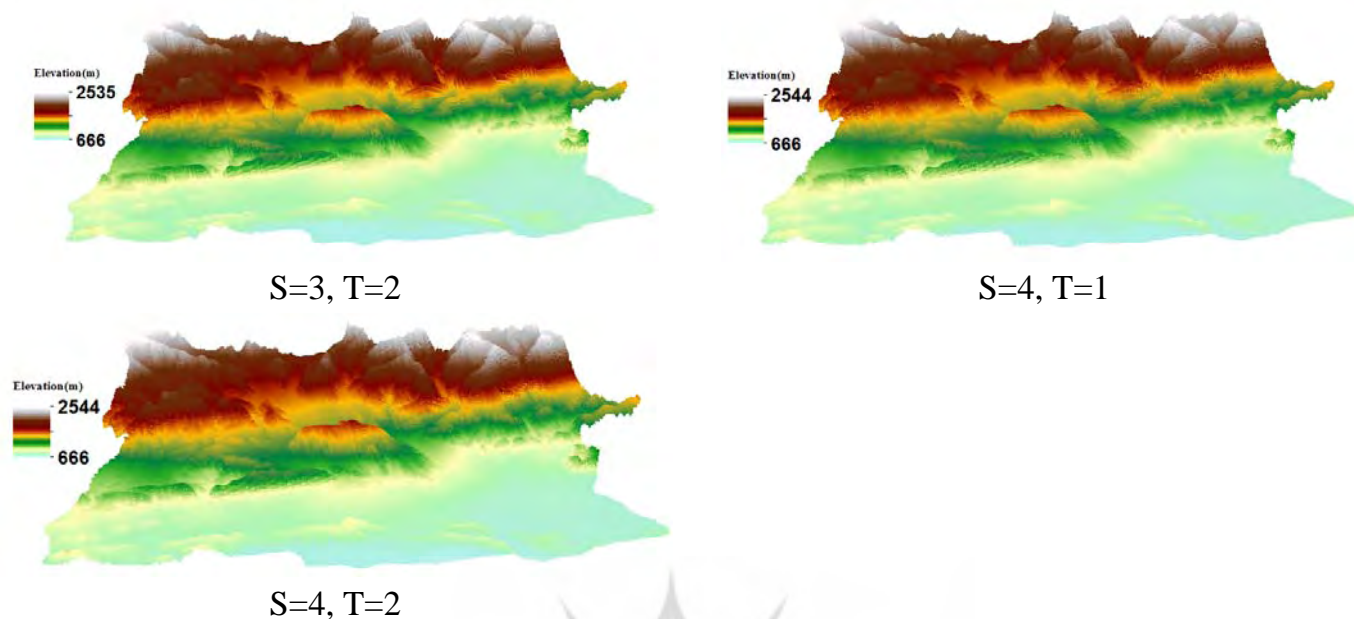


شکل ۴. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر)

بحث و نتایج

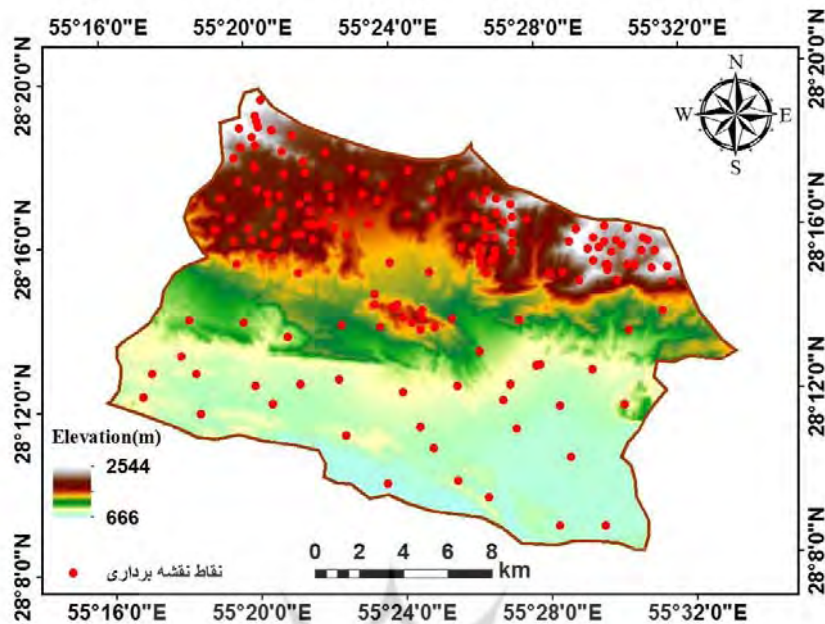
به منظور بررسی مدل جاذبه به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی از DEM ۹۰ متری استفاده شد. نتایج حاصل از این الگوریتم برای DEM ۹۰ متری در شکل ۵ نشان داده شده است. در این مطالعه به منظور یافتن بهترین مدل به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی از همسایگی‌های مختلف (تماس و چهارگانه) با مقیاس‌های مختلف ۲، ۳ و ۴ استفاده شد. با توجه به شکل ۵ مشخص می‌شود که با افزایش فاکتور مقیاس تعداد زیرپیکسل‌ها افزایش می‌یابد. به طوری که اطلاعات در زیر پیکسل‌ها نسبت به پیکسل اولیه بیشتر شده و تغییرات ارتفاعی را بهتر نشان می‌دهد. بنابراین از اینجا می‌توان نتیجه گرفت که افزایش مقیاس باعث افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM می‌شود. همان‌طور که در شکل نشان داده شده در مقیاس‌های بزرگ‌تر (S4) تعداد پیکسل‌ها افزایش یافته است. با افزایش تعداد پیکسل‌ها جزئیات تصویر افزایش می‌یابد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از همسایگی مماس (T1) نسبت به همسایگی چهارگانه (T2) باعث افزایش تعداد زیرپیکسل‌ها و افزایش قدرت تفکیک مکانی می‌شود.





شکل ۵: نمای سه‌بعدی از زیرپیکسل‌ها با استفاده از الگوریتم جاذبه با مقیاس‌ها و همسایگی‌های مختلف برای DEM 90 متر (S: مقیاس، T1: همسایگی مماس و T2: همسایگی چهارگانه)

به‌منظور مقایسه و تعیین بهترین مقیاس و همسایگی، ارتفاعات تعیین‌شده برای هر یک از زیرپیکسل‌ها توسط مدل جاذبه با نقاط زمینی مقایسه شد. تعداد کل نقاط کنترل زمینی 153 نقطه بود که به‌صورت تصادفی در منطقه پراکنده‌شده‌اند. این نقاط کنترل زمینی از طریق عملیات نقشه‌برداری زمینی به‌وسیله سازمان نقشه‌برداری استخراج‌شده‌اند. در شکل ۶ موقعیت این نقاط و پراکندگی مربوطه به آن‌ها نمایش داده‌شده است. مقدار RMSE برای هر DEM به‌صورت جداگانه محاسبه شد. در جدول ۱ و ۲ نتایج حاصل از این مقادیر نمایش داده‌شده است. مطالعات نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های زیرپیکسل موجب افزایش قدرت تفکیک زمینی مدل‌های رقومی زمین شده و این امر موجب افزایش دقت این مدل‌ها می‌شود.



شکل ۶: موقعیت و پراکندگی نقاط کنترل زمینی در منطقه

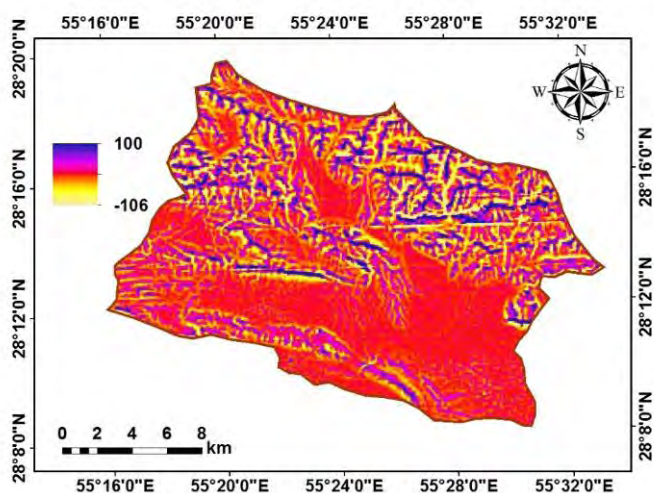
با توجه به مقادیر ارتفاع برای هر یک از نقاط (شکل ۶) و مقادیر پیش‌بینی شده ارتفاع با استفاده از الگوریتم جاذبه برای هر یک از زیرپیکسل‌ها، مقادیر RMSE در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر RMSE مشخص می‌شود که بهترین مدل به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی، مدل $S=3$ برای DEM ۹۰ متر می‌باشد.

جدول ۲: مقادیر RMSE برای هر یک از روش‌ها با استفاده از DEM ۹۰ متر (S: مقیاس، T1: همسایگی مماس و

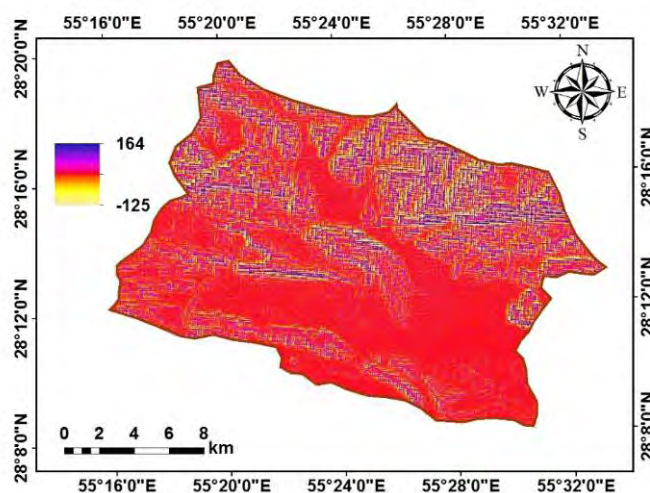
T2: همسایگی چهارگانه)

روش	$S=2, T=2$	$S=3, T=1$	$S=3, T=2$	$S=4, T=1$	$S=4, T=2$	DEM ۹۰ متری
مقادیر RMSE	۸.۰۷	۹.۷۶	۹.۱۳	۸.۲۳	۸.۸۹	۸.۰۹

بنابراین از مدل رقومی ارتفاع (DEM) $S=3$ و $T=2$ برای تهیه نقشه لندفرم های منطقه با استفاده از شاخص موقعیت توپوگرافی استفاده شد. به منظور استخراج نقشه لندفرم منطقه مورد مطالعه از شاخص موقعیت توپوگرافی (TPI) استفاده گردید. نقشه TPI با در نظر گرفتن دو پنجره 3×3 (حداقل مقیاس) و 45×45 (حداکثر مقیاس) تهیه گردید (شکل ۷). به منظور مقایسه لندفرم های تهیه شده با استفاده از مدل جاذبه، نقشه لندفرم DEM ۹۰ متر هم تهیه شد که در ادامه آمده است.

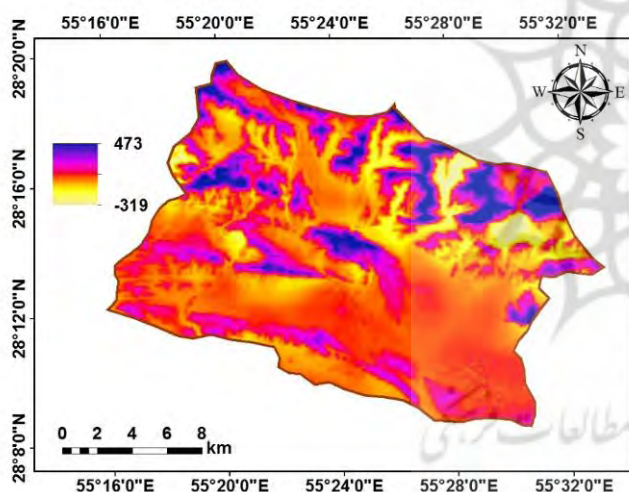


DEM 90

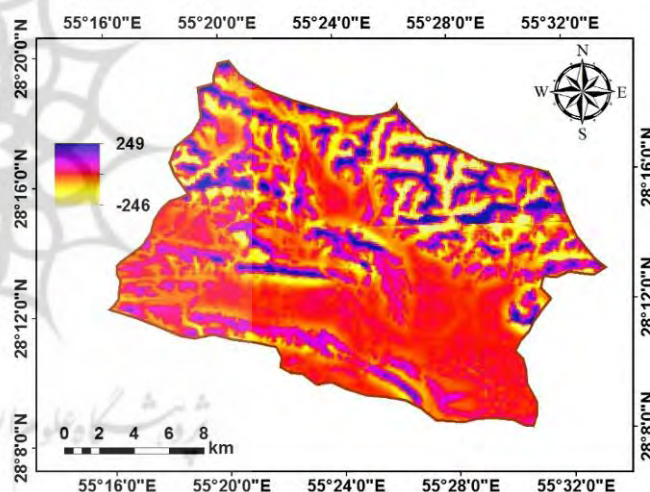


S=3, T=2

(الف)



DEM 90

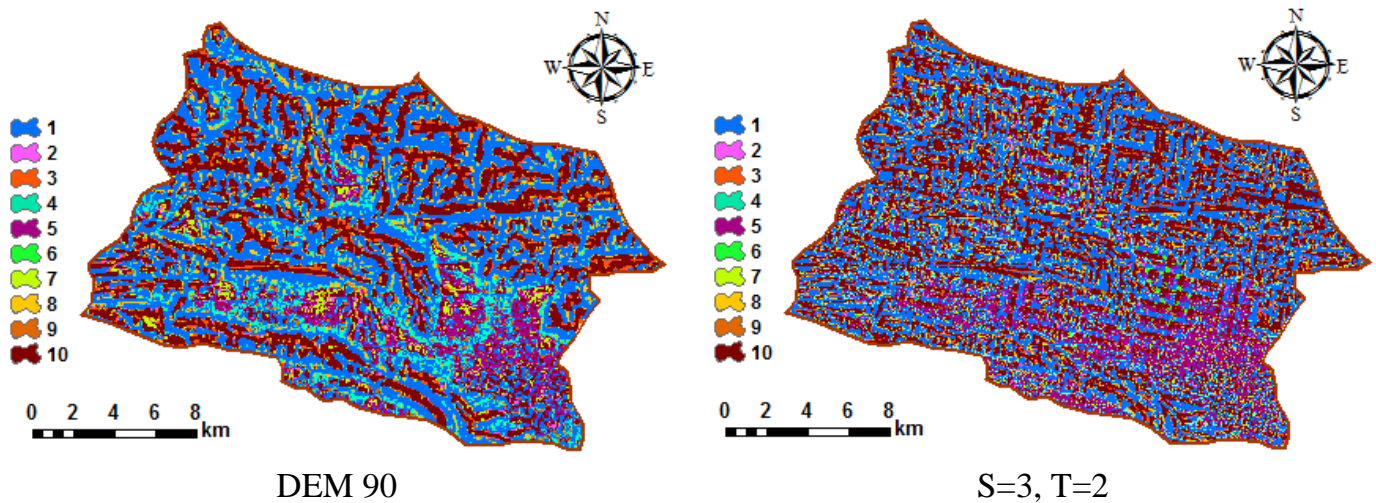


S=3, T=2

(ب)

شکل ۷. نقشه TPI منطقه مورد مطالعه. (الف): مقیاس کوچک (۳×۳)، (ب): مقیاس بزرگ (۴۵×۴۵).

نتایج نشان می‌دهد که مقادیر TPI منطقه مورد مطالعه بین -۱۰۶ تا +۱۰۰ برای اندازه ۳×۳ و -۳۱۹ تا +۴۷۳ مقیاس ۴۵×۴۵ برای DEM ۹۰ متر است. در حالی که مقادیر TPI بین -۱۲۵ تا +۱۶۴ برای اندازه ۳×۳ و -۲۴۶ تا +۲۴۹ مقیاس ۴۵×۴۵ است همان‌طور که در شکل ۷ نشان داده شده است، مناطق مرتفع مانند یال و تپه‌ها دارای مقادیر TPI نزدیک به صفر هستند. همچنین مناطق مسطح یا مناطقی با تغییرات شیب کم دارای مقادیر TPI صفر و یا منفی می‌باشند. هر کدام از لندفرم‌های طبقه‌بندی شده بخشی از منطقه را در برمی‌گیرند که در شکل ۸ نشان داده شده است.

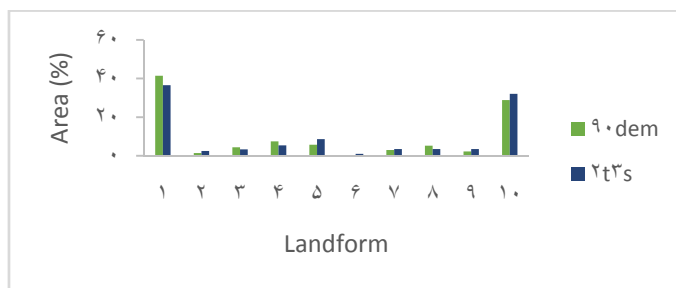


شکل ۸: نقشه لندفرم های منطقه مورد مطالعه

درصد مساحت برای هر یک از کلاس‌های لندفرم در شکل ۹ و جدول ۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۸ و ۹ مشخص می‌شود که نقشه لندفرم های تهیه شد با استفاده از مدل جاذبه بسیار متفاوت است. همان‌طور که در جدول نشان داده شده است، مساحت لندفرم های قله کوه، یال های مرتفع، یال های شیب میانی، تپه‌های کوچک موجود در دشت، شیب‌های بالایی، مساهای، شیب‌های باز، دشت و دره‌های U شکل در لندفرم حاصل از مدل جاذبه نسبت به DEM ۹۰ متری افزایش یافته است. درحالی‌که مساحت لندفرم های دره‌های باریک، آبراهه‌ها، زهکش‌های شیب میانی، دره‌های کم‌عمق، زهکش‌های مناطق مرتفع و یال های موضعی، تپه‌های موجود در دره کاهش یافته است.

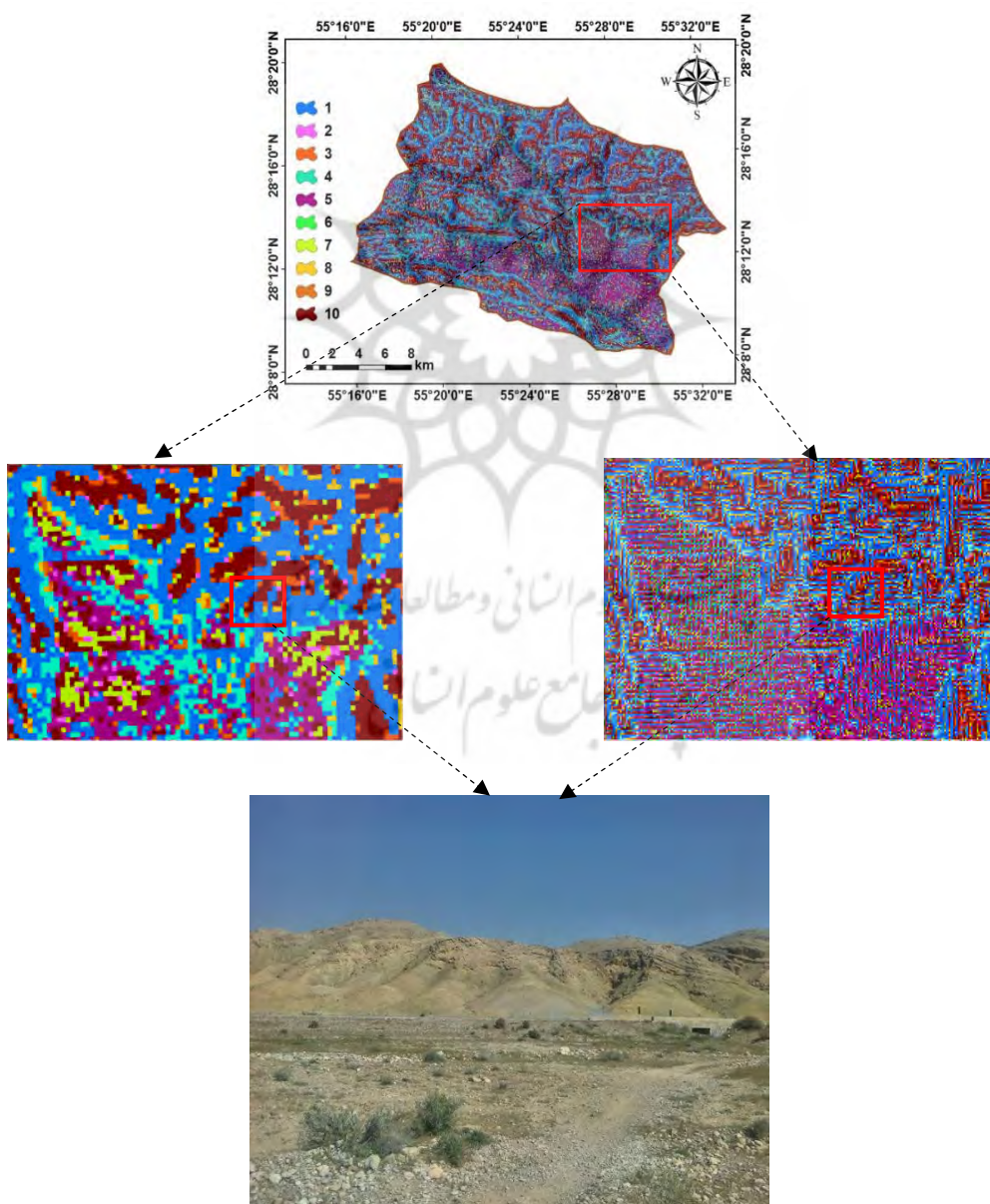
جدول ۳. مساحت هر یک از لندفرم ها در منطقه مورد مطالعه با استفاده از مدل جاذبه و DEM ۹۰ متر.

کلاس لندفرم	توصیفات کلاس‌های لندفرم	DEM 90 m		S=3, T=2	
		%	Km ²	%	Km ²
۱	دره‌های باریک، آبراهه‌ها	41.41	140.45	36.58	124.07
۲	زهکش‌های شیب میانی، دره‌های کم‌عمق	1.41	4.80	2.50	8.49
۳	زهکش‌های مناطق مرتفع	4.38	14.86	3.35	11.37
۴	دره‌های U شکل	7.47	25.32	5.36	18.18
۵	دشت	5.76	19.52	8.66	29.36
۶	شیب‌های باز	0.22	0.76	1.03	3.50
۷	شیب‌های بالایی، مساهای	3.01	10.20	3.52	11.94
۸	یال های موضعی، تپه‌های موجود در دره	5.21	17.65	3.45	11.70
۹	یال های شیب میانی، تپه‌های کوچک موجود در دشت	2.26	7.67	3.49	11.82
۱۰	قله کوه، یال های مرتفع	28.87	97.91	32.05	108.70
	مجموع	100.00	339.14	100.00	339.14



شکل ۹. درصد مساحت هر یک از لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه

در نهایت به منظور مقایسه لندفرم‌های تهیه‌شده از منطقه مورد مطالعه توسط مدل جاذبه و DEM ۹۰ متر از دونقطه از منطقه بازدید به عمل آمده که در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۱۰. نمونه‌ای از لندفرم‌های منطقه مورد مطالعه و مقایسه آن با مدل جاذبه و DEM ۹۰ متر

با توجه به شکل ۱۰ مشخص می‌شود که مدل جاذبه جزئیات بیشتری از لندفرم های منطقه مورد مطالعه نسبت به DEM ۹۰ متر نشان می‌دهد. در حقیقت در مدل جاذبه اتصال یک پیکسل به یک کلاس از طریق یک فرایند یک مرحله‌ای انجام می‌پذیرد و همواره یک خروجی را ایجاد می‌کند که موجب می‌شود که حلقه‌ها و تکرار در خروجی حذف شود که مزایای دیگر این مدل می‌باشد. در این مدل احتیاجی به کالیبره کردن و آموزش الگوریتم همانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیست. این امر موجب می‌شود که زمان محاسبات برای اجرای الگوریتم کم شود. برای مثال برای اجرای این مدل بر روی منطقه مورد مطالعه کمتر از ۳ دقیقه برای فاکتور مقیاس ۲ و همسایگی تماس در تصویر با ۳۶۰۱*۳۶۰۱ پیکسل با یک سیستم هفت هسته‌ای (core I7) با پردازنده ۱.۶ گیگاهرتزی به طول انجامید. مزیت دیگر این الگوریتم این است که می‌تواند با طبقه‌بندی نرم با بیش از ۲ کلاس کار کند (مارتینز و همکاران، ۲۰۱۴). مدل جاذبه برای محاسبه زیرپیکسل‌ها بر روی تصاویر ماهواره‌ای توسط مارتینز و همکاران (۲۰۱۴) اعمال شده است و طراحی الگوریتم مربوطه با استفاده از تصاویر ساختگی توسط نگارندگان بوده است اما بر روی تصاویر ماهواره‌ای واقعی نیز این الگوریتم‌ها اجرا شده‌اند و نتایج قابل قبولی را ارائه کرده‌اند. الگوریتم هم از نظر بصری و هم از نظر آماری مورد بررسی قرار گرفته است و شاخص‌های مورد نظر به منظور نشان دادن صحت انجام الگوریتم بر روی آن‌ها اجرا شده است. تصاویر ماهواره‌ای خروجی نشان‌دهنده افزایش دقت زمانی در مقایسه با تصاویر ورودی هستند.

نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل جاذبه برای اولین بار به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM در جنوب شهرستان داراب (قالتویه) استفاده شد. در این مطالعه قدرت تفکیک مدل‌های رقومی زمین با استفاده از مدل زیرپیکسل جاذبه افزایش پیدا کرد. الگوریتم مربوطه هم به صورت بصری هم به صورت آماری مورد بررسی قرار گرفت و شاخص RMSE برای آن محاسبه شد. فرض اصلی در این تحقیق وابستگی مکانی بین پیکسل‌ها است که توسط مارتینز و همکاران (۲۰۱۴) مورد مطالعه قرار گرفته است. با این حال وابستگی مکانی در این تحقیق با مقیاس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی شاخص RSME نشان‌دهنده این امر است که با افزایش شاخص مقیاس به عددی بزرگ‌تر از ۲ میزان صحت مدل رقومی ارتفاعی کاهش پیدا کرده و مقدار RMSE بیشتر می‌شود. همچنین با توجه به مدل جاذبه و با در نظر گرفتن این امر که دو مدل همسایگی چهارگانه و مماس در این مدل مورد استفاده قرار گرفته است نتایج حاصل از بررسی میزان RMSE نشان می‌دهد که مدل چهارگانه نتایج بهتری نسبت به مدل مماس نشان می‌دهد و میانگین RMSE خروجی‌های این مدل کمتر از مدل همسایگی مماس است. در حالت $S=2$ مدل همسایگی و چهارگانه به طور استثنای نتایج یکسانی ارائه می‌کنند که موجب می‌شود RMSE این دو مدل در این حالت مقدار یکسانی را ارائه می‌کند که این مقدار همچنین کمترین مقدار مربوطه در بین سایر شاخص‌های مقیاس (۳ و ۴) است. به طور کلی نتایج نشان داد که با استفاده از این روش قدرت تفکیک مدل رقومی زمین با صرف هزینه و زمان کمتر بهبود پیدا می‌کند. این بهبود قدرت تفکیک به همراه بهبود جزئی در صحت مدل خروجی هم است. مدل‌های رقومی زمین با قدرت تفکیک بهتر می‌تواند برای استخراج عوارض و اطلاعات بیشتر از زمین مورد استفاده قرار گیرند. از جمله این عوارض می‌توان به روش‌های استخراج پارامترهای سطح زمین همچون شیب، جهت شیب و یا الگوریتم‌های استخراج لندفرم‌ها و حوزه‌های آبریز و سایر پارامترها اشاره کرد. نتایج حاصل از طبقه‌بندی لندفرم‌ها با استفاده از مدل رقومی حاصل مدل جاذبه نشان‌دهنده جزئیات بیشتر از منطقه مورد مطالعه می‌باشد. با در نظر گرفتن این امر که روش TPI خود نیز جز روش‌های مؤثر در طبقه‌بندی لندفرم‌ها است بنابراین نتایج حاصل از ترکیب دو مدل TPI و مدل جاذبه نتایج مناسب و قابل قبولی را از خود ارائه داده است.

ترکیب دو مدل TPI و جاذبه می‌تواند موجب شود که دقت طبقه‌بندی لندفرم‌ها در مقیاس محلی بیشتر شود. افزایش جزئیات در ارائه لندفرم‌ها موجب می‌شود که بررسی دقیق‌تر و بهتری بتوان از آن ارائه داد. بنابراین برای مطالعات مختلف و پیش‌بینی پارامترهای مختلف حوضه آبخیز مانند میزان پوشش گیاهی، دما، بارندگی، وضعیت هیدرولوژیکی و غیره می‌توان از الگوریتم مدل جاذبه به‌منظور بهینه‌سازی قدرت تفکیک مدل‌های رقومی زمین استفاده کرد.

منابع

- Janzen, H.H., Ellert, B.H., and Anderson, D.W. 2002. Organic matter in the landscape. P 905-909, In: Lal, R. (Ed.), *Encyclopedia of Soil Science*. Marcel Dekker, Inc. New York.
- Boucher, P.C. Kyriakidis, C.C. Ratcliff, *Geostatistical solutions for superresolution land cover mapping*, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 46 (1) (2008) 272–283.
- Boucher, P.C. Kyriakidis, *Super-resolution land cover mapping with indicator geostatistics*, *Remote Sens. Environ.* 104 (3) (2006) 264–282.
- A.J. Tatem, H.G. Lewis, P.M. Atkinson, M.S. Nixon, *Super-resolution target identification from remotely sensed images using a Hopfield neural network*, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 39 (4) (2001) 781–796.
- A.M. Muad, G.M. Foody, *Super-resolution mapping of lakes from imagery with a coarse spatial and fine temporal resolution*, *J. Appl. Earth Obs. Geoinform.* 12 (2012) 79–91.
- D. Nigussie, R.Z. Milla, J.G.P.W. Clevers, *Possibilities and limitations of artificial neural networks for subpixel mapping of land cover*, *Int. J. Remote Sens.* 32 (22) (2011) 7203–7226.
- Grabs, T., Seibert, J., Bishop, K., and Laudon, H. 2009. *Modeling spatial patterns of saturated areas: A comparison of the topographic wetness index and a dynamic distributed model*. *J. Hydrol.* 373: 15-23.
- J.P. Ardila, V.A. Tolpekin, W. Bijker, A. Stein, *Markov-random-field-based super-resolution mapping for identification of urban trees in VHR images*, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 66 (2011) 762–775.
- K. Wu, L.P. Zhang, R.Q. Niu, B. Du, Y. Wang, *Super-resolution land-cover mapping based on the selective endmember spectral mixture model in hyperspectral imagery*, *Opt. Eng.* 50 (12) (2011) 126201.
- K.C. Mertens, B.D. Baets, L.P.C. Verbeke, R.D. Wulf, *A sub-pixel mapping algorithm based on sub-pixel/pixel spatial attraction models*, *Int. J. Remote Sens.* 27 (15) (2006) 3293–3310.
- K.C. Mertens, L.P.C. Verbeke, E.I. Ducheyne, R.D. Wulf, *Using genetic algorithms in sub-pixel mapping*, *Int. J. Remote Sens.* 24 (21) (2003) 4241–4247.
- L.G. Wang, Q.M. Wang, D.F. Liu, *Sub-pixel mapping based on sub-pixel to subpixel spatial attraction model*, in: *Proceedings of the 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, 2011*, 593–596.
- L.P. Zhang, K. Wu, Y.F. Zhong, P.X. Li, *A new sub-pixel mapping algorithm based on a BP neural network with an observation model*, *Neurocomputing* 71 (2008) 2046–2054.
- Maleki, S. Khormali, F. Karimi A.R. 2014. *Introducing different flow direction algorithms to map topographic wetness index and soil organic carbon in a loess*

- hillslope of Toshan area, Golestan Province, Iran. *J. of Water and Soil Conservation*, Vol. 21(1), 2014. <http://jwsc.gau.ac.ir>.
- P.M. Atkinson, *Sub-pixel target mapping from soft-classified, remotely sensed imagery*, *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 71 (7) (2005) 839–846.
 - Sorensen, R., Zinko, U., and Seibert, J. 2005. *On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observation*. *Hydrology and Earth System Sciences*. 10: 101-112.
 - Starr, G.C., Lal, R., Malone, R., Hothem, D., Owens, L., and Kimble, J. 2000. *Modeling soil carbon transported by water erosion processes*. *Land Degradation and Development*. 11: 83-91.
 - T. Kasetkasem, M.K. Arora, P.K. Varshney, *Super-resolution land cover mapping using a Markov random field based approach*, *Remote Sens. Environ.* 96 (3/4) (2005) 302–314.
 - V.A. Tolpekin, A. Stein, *Quantification of the effects of land-cover-class spectral separability on the accuracy of markov-random-field-based superresolution mapping*, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47 (9) (2009) 3283–3297.
 - Verhoeye, R.D. Wulf, *Land cover mapping at sub-pixel scales using linear optimization techniques*, *Remote Sens. Environ.* 79 (1) (2002) 96–104.
 - Xu, X., Zhong, Y., Zhang, L., 2014. *A sub-pixel mapping method based on an attraction model for multiple shifted remotely sensed images*. *Neurocomputing* 134 (2014) 79–91.
 - Y.F. Zhong, L.P. Zhang, P.X. Li, H.F. Shen, *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, 2009*, pp. III-1007–III-1010.
 - Azizian, A., Shekuhi, A., 1392. *Assess the impact of resolution Digital Elevation Models and ahead of the formation of rivers on the results of the rainfall-runoff models Geomorphological based on kinematic wave*. *Journal of Hydraulic*. Volume 8, Number 3. 1-18.
 - Shayan, S.; Mullah Mehralizadeh F., Jannati, M., 2006. *Performance data of remote sensing (RS) in mapping landforms and its role in environmental planning*. *The Journal of Spatial Planning*. Volume 9, Issue 4, Pages 111-148