

استفاده از مدل زیرپیکسل جاذبه به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع (DEM)

مرضیه مکرّم^۱ مجید حجتی^۲
عبدالرسول زارعی^۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۰۲/۰۱

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۲/۰۶

چکیده

افزایش قدرت تفکیک مکانی به منظور افزایش میزان اطلاعات در مدل رقومی ارتفاع (DEM) از جمله مهمترین موضوعات در ژئومورفولوژی کمی محسوب می‌شود. تاکنون مدل‌های مختلفی به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی ارائه شده است که از بین مدل‌ها، مدل جاذبه به عنوان جدیدترین مدل، دارای دقت بسیار بالایی می‌باشد. این مدل برای اولین بار به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی بر روی تصاویر ماهواره‌ای استفاده شده است. در این تحقیق از مدل جاذبه برای اولین بار به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM استفاده شد. در بررسی حاضر، از دو مدل همسایگی پیکسل‌های مماس (Touching) و مدل همسایگی چهارگانه (Quadrant) به منظور تخمین مقادیر زیر پیکسل‌ها استفاده گردید. در مدل جاذبه احتیاجی به کالیبره کردن و آموزش الگوریتم همانند الگوریتم‌های یادگیری ماشین نیست، این امر موجب می‌شود که زمان محاسبات برای اجرای الگوریتم کم شود. پس از تولید تصاویر خروجی برای زیر پیکسل‌ها، در مقیاس‌های ۲، ۳ و 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. تعداد کل نقاط کنترل زمین مستخرج از عملیات نقشه برداری، ۲۱۱۸ نقطه بود. مقدار RMSE برای هر DEM به صورت جداگانه محاسبه شد. نتایج نشان داد که با استفاده از مدل جاذبه صحت تصاویر خروجی بهبود بخشیده شده و همچنین قدرت تفکیک مکانی آن‌ها نیز افزایش پیدا کرده است. بر اساس نتایج از بین مقیاس‌ها با همسایگی‌های مختلف، مقیاس ۳ و مدل همسایگی چهارگانه نسبت به سایر روش‌ها دارای بیشترین دقت با کمترین میزان RMSE (۵/۵۴) برای DEM ۳۰ متر و DEM ۹۰ متر (۹/۱۳) می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: زیرپیکسل، مدل رقومی ارتفاع (DEM)، قدرت تفکیک مکانی، مدل جاذبه.

۱- استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی داراب، دانشگاه شیراز m.mokarram@shirazu.ac.ir

۲- کارشناس ارشد سنجش از دور و سیستم اطلاعات جغرافیایی، دانشگاه تهران majid.hojati@ut.ac.ir

۳- استادیار گروه مهندسی مرتع و آبخیزداری، دانشکده کشاورزی، دانشگاه فسا (نویسنده مسئول) Ar_Zareiee@fasau.ac.ir و Ar_Zareiee@Yahoo.com

مقدمه

(Wang et al, 2011) الگوریتم جابجایی پیکسل (Atkinson, 2005).

الگوریتم ژنتیک (Mertens et al, 2014)، سیستم ایمنی مصنوعی (Kasetkasem et al, 2009)، زنجیره تصادفی مارکوف (Ardila et al, 2011) و زمین آمار (Al, 2005; Tolpekin and Stein, 2009; Boucher et al, 2006; Boucher and Kyriakidis, 2008) اشاره نمود.

نتایج بررسی بوچر و همکاران در رابطه با افزایش قدرت تفکیک مکانی با استفاده از مدل جاذبه بر روی تصاویر ماهواره‌ای، نشان داد که استفاده از این مدل در افزایش قدرت تفکیک بسیار مفید است (Boucher, et al., 2008). 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 (Atkinson, 2005). نقشه‌برداری زیرپیکسل یک روش برای به دست آوردن توزیع فضایی از طبقات مختلف در مقیاس زیرپیکسل است. فرض آماری وابستگی مکانی پیکسل‌ها، توسط اتکینسون و ورهوی و ولف با استفاده از یک تکنیک بهینه‌سازی خطی برای نقشه‌برداری زیر پیکسل انجام شد (Atkinson, 2005; Verhoeve, R.D. Wulf, 2001).

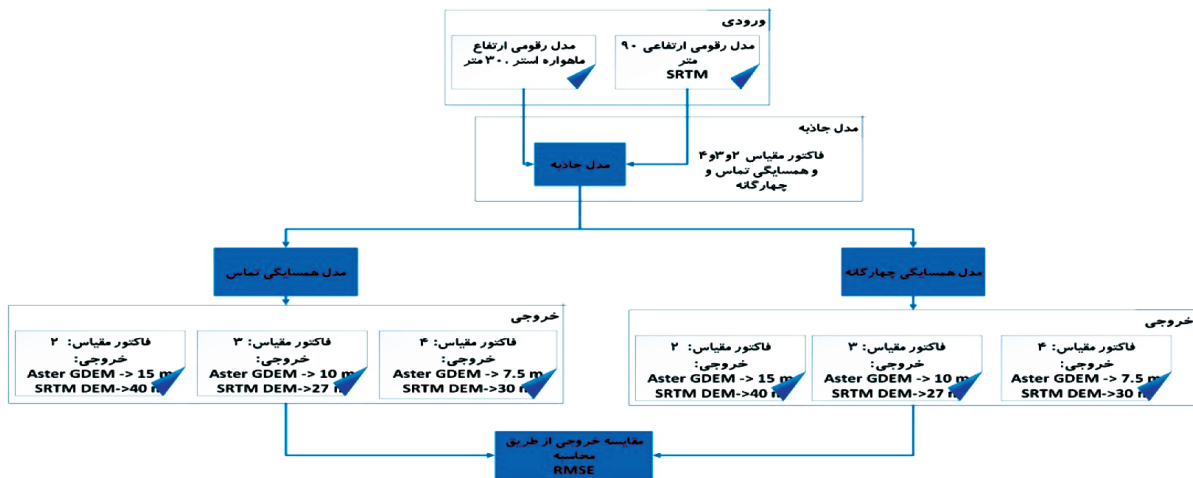
یکی از روش‌های تقسیم پیکسل‌ها، استفاده از وابستگی مکانی موقعیت پیکسل جاذب زیرپیکسل است. احتمال دیگر این فرض تعامل پیکسل فرعی زیر پیکسل است که توسط مرتنز و همکاران و اتکینسون به تصویب رسید (Atkinson, 2005; Mertens et al, 2006). مرتنز و همکاران استفاده از الگوریتم ژنتیک برای رسیدن به حداکثر تعداد زیر پیکسل از کلاس‌های یکسان همسایه را پیشنهاد کردند (Mertens et al, 2006). در حالی که اتکینسون جابجایی پیکسل تا به حداکثر رساندن همبستگی مکانی بین زیر پیکسل همسایه را ارائه نمود (Atkinson, 2005). در هر دو روش مذکور استفاده از بخش کوچکی از مقادیر اولیه پیکسل به عنوان یک محدودیت شناخته شد. یکی از مزایای روش زیرپیکسل جاذبه استفاده از مقیاس است.

به طور کلی روش زیر پیکسل جاذبه روش نسبتاً جدیدی است که کمتر در علوم طبیعی به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر از آن استفاده شده است. در

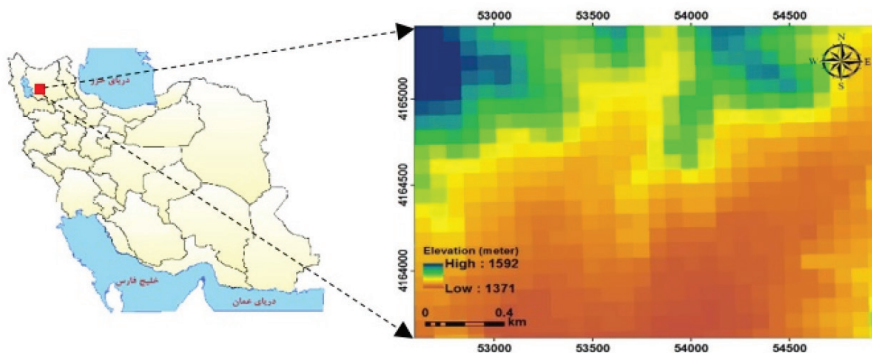
توپوگرافی به عنوان عامل کنترل کننده توزیع مکانی رطوبت خاک، پوشش گیاهی، شوری خاک، بافت خاک و غیره است که دارای نقش مهمی در تغییر ویژگی‌های خاک و فرایندهای هیدرولوژیکی می‌باشد (Sorensen et al, 2005; Grabs et al, 2009). در سال‌های اخیر از توپوگرافی به عنوان یک فاکتور مهم برای پیش بینی خصوصیات خاک، اقلیم، جنس زمین و غیره استفاده شده است (Janzen et al, 2000; Starr et al, 2002). با توجه به اهمیت توپوگرافی به منظور استخراج اطلاعات مختلف، استفاده از تصاویر ماهواره‌ای با قدرت تفکیک مکانی بالا بسیار ضروری به نظر می‌رسد. تاکنون روش‌های مختلفی به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است ولی هیچ کدام از این روش‌ها بر روی مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) اعمال نشده‌اند. بدست آوردن جزئیات بیشتر از پیکسل‌ها بوسیله نقشه برداری زیر پیکسل‌ها اولین بار توسط اتکینسون ارائه شد (Atkinson, 2005). در این تکنیک پیکسل‌ها به چندین زیر پیکسل با توجه به مقادیر پیکسل‌های همسایه تقسیم می‌شوند. در 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 به طور مستقیم با درصد تاج پوشش پیکسل اصلی بزرگتر متناسب می‌شود (Atkinson, 2005).

با این روش، طبقات نرم ورودی را می‌توان به طبقه بندی سخت بارزولوشن بهتر تبدیل نمود. مشکل اصلی در نقشه‌برداری زیر پیکسل‌ها تعیین محل هر کلاس پوشش زمین در پیکسل بزرگتر است (Verhoeve, R.D. Wulf, 2001). روش‌های متفاوتی برای حل این مشکل ارائه شده است که از جمله می‌توان به شبکه هوفیلد^۱ (Tatem et al, 2001; Muad and Foody, 2012)، شبکه عصبی (Wu et al, 2011; Wang et al, 2011)، تکنیک بهینه سازی خطی (Tatem et al, 2001)، مدل جاذبه مکانی (Mertens et al, 2006)

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (ص ۱۰۱)
 استفاده از مدل زیرپیکسل جاذبه به منظور ... / ۱۰۱



نگاره ۱: مدل اجرایی این تحقیق جهت افزایش قدرت تفکیک مکانی مدل رقومی ارتفاع (DEM) با استفاده از الگوریتم جاذبه



نگاره ۲: موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (مدل رقومی ارتفاع (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۹۰ متر)

تفکیک مکانی در مدل رقومی ارتفاع (DEM) در نگاره ۱ نشان داده شده است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در شرق قله سهند در ۴۵ درجه و ۵۵ دقیقه تا ۴۵ درجه و ۵۸ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۷ درجه و ۳۱ دقیقه تا ۳۷ درجه و ۳۰ دقیقه عرض جغرافیایی واقع شده است (نگاره ۲). بزرگترین رود در منطقه آبی چای یا تلخه رود به طول ۱۶۰ کیلومتر متشکل از اجتماع چند رود به نام‌های آب سهند قوری چای و ارجان چای که از کوه‌های سبلان و بلندی‌های جنوب شرقی، قراداغ و قوشه داغ، سرچشمه می‌گیرد و پس از عبور از دره‌های

مطالعه حاضر، از این الگوریتم برای افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM به عنوان اولین الگوریتم برای افزایش قدرت تفکیک DEM استفاده شد. بنابراین در این مطالعه انتظار می‌رود که استفاده از زیرپیکسل‌ها باعث افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM شود. این مطالعه در جنوب شرقی تبریز (دریاچه ارومیه) با توجه به در دسترس بودن نقاط نقشه برداری انجام شد.

با توجه به اینکه روستاها و دهستان‌های زیادی در پایین دست این منطقه واقع شده است، بررسی وضعیت ارتفاعات با مدل‌های رقومی با قدرت تفکیک بالا مهم به نظر می‌رسد. بنابراین در این مطالعه هدف تعیین مدل رقومی ارتفاع با قدرت تفکیک مکانی بیشتر در جنوب شرقی تبریز می‌باشد. مراحل مختلف این تحقیق به منظور افزایش قدرت

این دو نوع همسایگی در نگاره ۳ با توجه به تفاوت‌هایشان نشان داده شده است. در این تصویر هر مدل با سه مقیاس مختلف نشان داده شد. فاکتور مقیاس، تعداد زیرپیکسل‌ها را در داخل هر پیکسل اصلی تعیین می‌کند. یک فاکتور مقیاس S مربوط به $S \times S$ زیر پیکسل در هر پیکسل مرکزی است. برای مثال با داشتن $S = 2$ و همسایگی چهارگانه در نگاره ۳ 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.

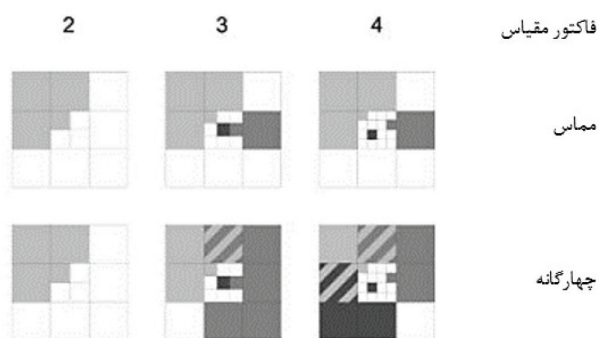
مقادیر جاذبه همواره توسط فاصله اقلیدسی که هر زیرپیکسل در محاسبه آن مورد استفاده قرار می‌دهد وزن دهی می‌شود. در این مدل فرض بر این است که پیکسل‌های نزدیک بیشتر از پیکسل‌های با فاصله بیشتر جذب می‌شوند. فاصله از مرکز هر زیر پیکسل به مرکز پیکسل مورد نظر محاسبه می‌شود و فرض بر این است که تمام جاذبه از مرکز پیکسل‌ها به یکدیگر اعمال می‌شود. مقادیر عددی جاذبه محاسبه شده و سپس میانگین‌گیری می‌شوند.

این میانگین‌گیری 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، نامگذاری 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 آسان‌تر 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 (Boucher, et al., 2008):

بین کوه سرخاب و پکه چین از شمال تبریز و بخش اسکو می‌گذرد و به دریاچه ارومیه می‌ریزد. منطقه مورد مطالعه دارای هوایی اقلیمی و کم رطوبت است.

روش کار

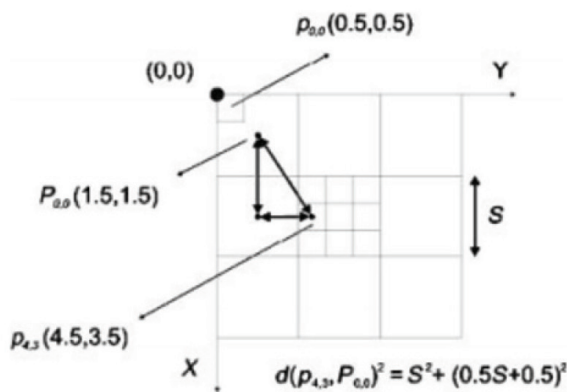
در این مطالعه از مدل جاذبه به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی DEM استفاده گردید. مدل جاذبه در زیرپیکسل‌ها بر اساس مقادیر پیکسل‌های همسایه است که بر روی زیر پیکسل‌های داخل یک پیکسل مرکزی اثر گذار هستند. زیر پیکسل می‌تواند تنها به پیکسل‌های اطراف پیکسل مرکزی جذب شود. این به این معنی است که حداکثر هشت همسایه برای پیکسل می‌توان در نظر گرفت. دیگر پیکسل دور از پیکسل مرکزی فرض می‌شوند و جاذبه آن‌ها بر پیکسل مرکزی اثر گذار نیست. در این تحقیق دو مدل همسایگی در بدست آوردن مقادیر زیر پیکسل‌ها ارزیابی شد. هر مدل دارای پیکسل‌های همسایه مختلف هستند که به کمک آن‌ها مقادیر جاذبه هر زیرپیکسل محاسبه می‌شود (Boucher, et al., 2008).



نگاره ۳: پیکسل‌های اثر گذار روی زیر پیکسل‌های موجود در پیکسل مرکزی در پنجره 3×3 در دو مدل همسایگی مماس و چهارگانه با مقیاس ۲ و ۳ و ۴

مدل همسایگی پیکسل‌های مماس: در این مدل فقط پیکسل‌هایی که از نظر فیزیکی مماس به زیر پیکسل مورد نظر است به منظور 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.

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (ص ۱۰۳)
 استفاده از مدل زیر پیکسل جاذبه به منظور ... / ۱۰۳



نگاره ۴: نمایی از سیستم مختصات مورد استفاده به منظور محاسبه فاصله بین زیر پیکسل‌ها و هر پیکسل اطراف از طریق محاسبه فاصله اقلیدسی

در روابط مذکور 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 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 $P_{a,b}$ بدست می‌آید.

$$p_{a;b}(c) = Avg \left\{ \frac{P_{i;j}(c)}{d(p_{a;b}, P_{i;j})} \mid P_{i;j} \in N_t[p_{a;b}] \right\} \quad (6)$$

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 اثر گذار است، مقادیر جاذبه می‌تواند برای هر کلاس زیر پیکسل 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

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

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 شماره ستون پیکسل همسایه است. همسایگی‌های تعریف شده در مرحله قبل به صورت زیر نیز تعریف می‌شوند:

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

$$N2[p_{a;b}] = \left\{ P_{i;j} \mid d(p_{a;b}, P_{i;j}) \leq \frac{1}{\sqrt{2}}(2S-1) \right\} \quad (3)$$

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 (Boucher, et al., 2008):

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

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

```
(5)
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
```

که در آن ورودی پنجره‌های 3×3 ، S : فاکتور مقیاس، t : روش همسایگی، a و b موقعیت زیر پیکسل‌ها می‌باشد.

در نگاره ۴ نمایی از چگونگی محاسبه مقدار فاصله و سیستم مختصات تعریف شده نشان داده شده است (Boucher, et al., 2008)

حاصل از این الگوریتم برای DEMهای ۳۰ و ۹۰ متری در نگاره‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است. با مقایسه DEM های ۳۰ و ۹۰ متری به عنوان داده‌های ورودی الگوریتم جاذبه، مشخص می‌شود که DEM ۳۰ متری دارای قدرت تفکیک بهتری نسبت به DEM ۹۰ متری است (عزیزیان و شکوهی، ۱۳۹۲). 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 نگاره‌های ۵ و ۶ 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 نگاره مربوطه 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. نتایج

هر زیرپیکسل به یک کلاس خاص مورد استفاده قرار گیرد. زیر پیکسل‌هایی با بیشترین مقدار جاذبه به کلاس مربوطه اختصاص می‌یابد (Boucher, et al., 2008).

بررسی اعتبار هر یک از مدل‌ها

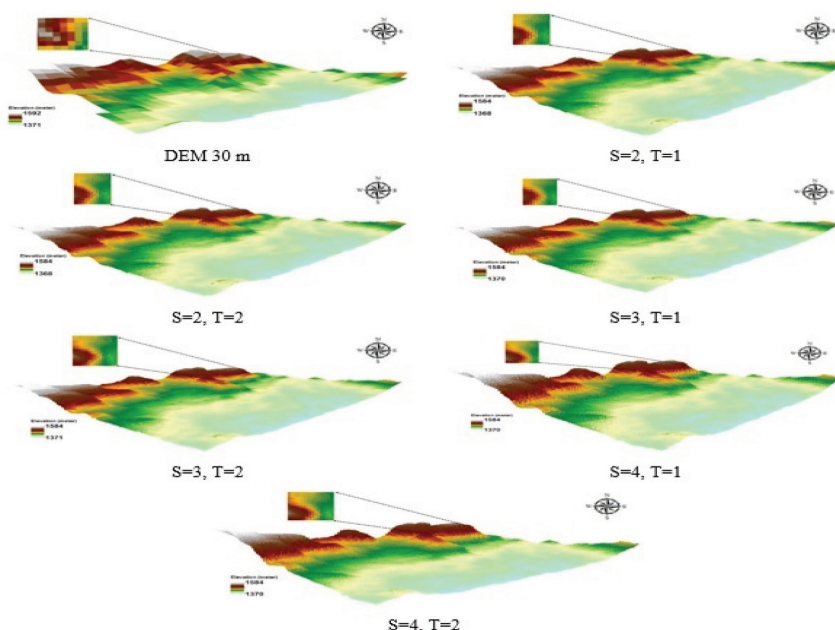
به منظور ارزیابی و تعیین بهترین مدل به منظور تخمین ارتفاع با استفاده از الگوریتم جاذبه، از ریشه میانگین مربع خطا (RMSE) استفاده شد. به کمک RMSE تفاوت میان مقدار پیش‌بینی شده توسط مدل و مقدار واقعی تعیین می‌شود (معادله ۷).

$$RMSE = \sqrt{-\sum \{Z(x_i) - \hat{z}(x_i)\}} \quad (7)$$

که در آن $\hat{z}(xi)$ مقادیر پیش‌بینی شده، $Z(xi)$ 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 تاتیم و همکاران می‌باشد (Tatem et al., 2001).

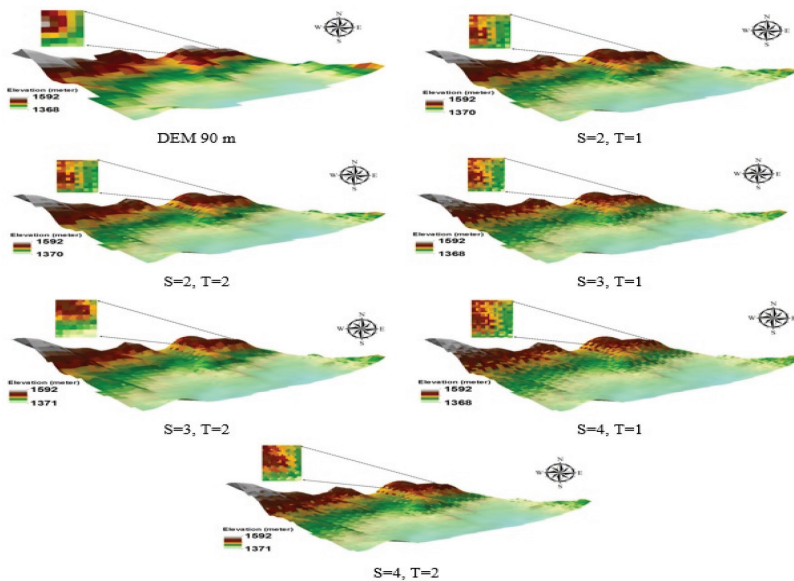
نتایج

به منظور بررسی مدل جاذبه جهت افزایش قدرت تفکیک مکانی از DEM ۳۰ و ۹۰ متری استفاده شد. نتایج



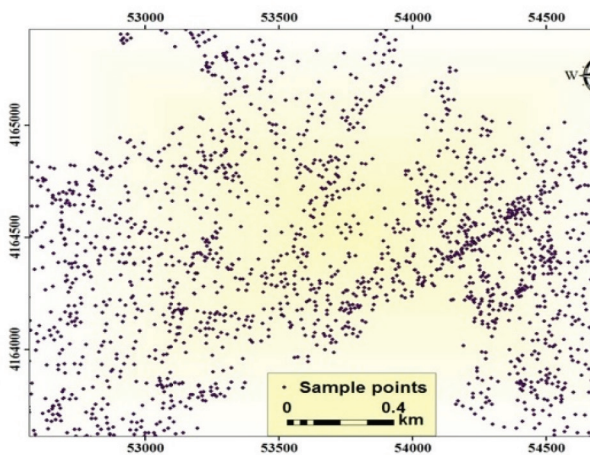
نگاره ۵: نمای سه بعدی از زیرپیکسل‌ها با استفاده از الگوریتم جاذبه با مقیاس‌ها و همسایگی‌های مختلف برای DEM ۳۰ متر (S): مقیاس، T1: همسایگی مماس و T2: همسایگی چهارگانه

فصلنامه علمی - پژوهشی اطلاعات جغرافیایی (سپهر)
 استفاده از مدل زیرپیکسل جاذبه به منظور ... / ۱۰۵



نگاره ۶: نمای سه بعدی از زیرپیکسل‌ها با استفاده از الگوریتم جاذبه با مقیاس‌ها و همسایگی‌های مختلف برای DEM ۹۰ متر (S: مقیاس، T1: همسایگی مماس و T2: همسایگی چهارگانه)

متر و ۹۰ متر می‌باشد. همچنین با توجه به مقادیر RMSE مشخص می‌شود که DEM ۳۰ متر دارای RMSE کمتر (۵/۵۴) نسبت به DEM ۹۰ متر (۹/۱۳) می‌باشد.



نگاره ۷: موقعیت و پراکندگی نقاط کنترل زمینی در منطقه

با توجه به نتایج مشخص می‌شود که کیفیت تصویر ورودی (انتخاب DEM ۳۰ متر یا DEM ۹۰ متر) یکی از عوامل مؤثر در تصاویر خروجی است. هر تصویر ورودی که وارد این زنجیره شود نتیجه آن یک تصویر خروجی با همان کیفیت است. بنابراین می‌توان گفت یکی از عوامل

حاصل از DEM ۹۰ متری و DEM ۳۰ متری نشان می‌دهد که تعداد زیرپیکسل‌ها در DEM ۳۰ متری بیشتر 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 ۲۱۱۸ نقطه بود که به صورت تصادفی در منطقه پراکنده شده‌اند. این نقاط کنترل زمینی از طریق عملیات نقشه برداری استخراج شده‌اند. در نگاره ۷ موقعیت این نقاط و پراکندگی مربوطه به آن‌ها نمایش داده شده است. مقدار RMSE برای هر DEM به صورت جداگانه محاسبه شد. در جدول ۱ و ۲ نتایج حاصل از این مقادیر نمایش داده شده 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.

با توجه به مقادیر ارتفاع برای هر یک از نقاط (نگاره‌های ۵ و ۶) و مقادیر پیش بینی شده ارتفاع با استفاده از الگوریتم جاذبه برای هر یک از زیرپیکسل‌ها، مقادیر RMSE در جدول ۱ و ۲ نشان داده شده است. با توجه به مقادیر RMSE مشخص می‌شود که بهترین مدل به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی، مدل S=3 و T=2 برای DEM ۳۰

جدول ۱: مقادیر RMSE برای هر یک از روش‌ها با استفاده از DEM ۳۰ متر

(S: مقیاس، T1: همسایگی مماس و T2: همسایگی چهارگانه)

روش	S=۲, T=۱	S=۲, T=۲	S=۳, T=۱	S=۳, T=۲	S=۴, T=۱	S=۴, T=۲	DEM ۳۰ متری
مقادیر RMSE	۵/۵۹	۵/۵۹	۵/۶۱	۵/۵۴	۵/۵۷	۵/۶۲	۵/۳۹

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=۲, T=۱	S=۲, T=۲	S=۳, T=۱	S=۳, T=۲	S=۴, T=۱	S=۴, T=۲	DEM ۹۰ متری
مقادیر RMSE	۸/۰۹	۸/۰۹	۷/۷۶	۹/۱۳	۸/۲۳	۸/۸۹	۸/۰۷

قابل قبولی را ارائه کرده‌اند (Mertens et al, 2014). 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 نشان دهنده افزایش دقت زمانی در مقایسه با تصاویر ورودی هستند.

بحث

با توجه به اهمیت توپوگرافی به منظور 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 به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی تصاویر ماهواره‌ای مورد استفاده قرار گرفته است ولی هیچ کدام از این روش‌ها بر روی مدل‌های رقومی ارتفاعی (DEM) اعمال نشده‌اند. در این تحقیق قدرت تفکیک مدل‌های رقومی زمین با استفاده از مدل زیرپیکسل جاذبه افزایش پیدا کرد. الگوریتم مربوطه هم به صورت بصری و 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 مورد مطالعه قرار گرفته است (Mertens et al, 2014). با این حال وابستگی مکانی در این تحقیق با مقیاس‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از بررسی میزان RMSE نشان می‌دهد که مدل چهارگانه نتایج بهتری نسبت به مدل مماس داشته است و میانگین RMSE خروجی‌های این مدل کمتر از مدل

مؤثر در ایجاد تصاویر زیرپیکسل‌ها کیفیت تصویر ورودی الگوریتم است. الگوریتم زیرپیکسل از چند قانون ساده را پیروی می‌کند. 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 3601×3601 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 طبقه بندی نرم با بیش از ۲ کلاس کار کند (Mertens et al, 2014). همچنین این تحقیق نشان می‌دهد که می‌توان این الگوریتم را برای مدل رقومی ASTER اجرا کرد و مدل رقومی ۱۰ متری با صحت قابل قبول و تنها اختلاف میزان RMSE مقدار ۰/۱۳ متر، ایجاد نمود. در حقیقت DEM با قدرت تفکیک ۱۰ متری با اجرای الگوریتم جاذبه بر روی DEM ۳۰ متری می‌توان استخراج نمود.

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 ساختمانی توسط نگارندگان بوده است اما بر روی تصاویر ماهواره‌ای واقعی نیز این الگوریتم‌ها اجرا شده‌اند و نتایج

random field based approach, *Remote Sens. Environ.* 96 (3/4):302-314.

8. Mertens, K.C., Baets, B.D., Verbeke, L.P.C., Wulf, R.D. (2006). A sub-pixel mapping algorithm based on sub-pixel/pixel spatial attraction models, *Int. J. Remote Sens.* 27 (15): 3293-3310.

9. Mertens, K.C., Verbeke, L.P.C., Ducheyne, E.I., Wulf, R.D. (2014). Using genetic algorithms in sub-pixel mapping, *Int. J. Remote Sens.* 24 (21): 4241-4247.

10. Muad, A.M., Foody, G.M. (2012). Super-resolution mapping of lakes from imagery with a coarse spatial and fine temporal resolution, *Journal of Applied Earth Obs. Geoformation.* 12: 79-91.

11. 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.

12. 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.

13. Tatem, A. J., Lewis, H.G., Atkinson, P.M., Nixon, M.S. (2001). Super-resolution target identification from remotely sensed images using a Hopfield neural network, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing.* 39 (4):781-796.

14. Tolpekin, V.A., Stein, A. (2009). Quantification of the effects of land-cover-class spectral reparability on the accuracy of markov-random-field-based super resolution mapping, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 47 (9): 3283-3297.

15. Verhoeve, R.D. Wulf. (2002). Land cover mapping at sub-pixel scales using linear optimization techniques, *Remote Sens. Environ.* 79 (1): 96-104.

16. Wu, K., Zhang, L.P., Niu, R.Q., Du, B., Wang, Y. (2011). Super-resolution land-cover mapping based on the selective endmember spectral mixture model in hyperspectral imagery, *Opt. Eng.* 50 (12) 126201.

17. Wang, L.G., Wang, Q.M., Liu D.F. (2011). 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,* 593-596.

18. Zhong, Y.F., Zhang, L.P., Li, P.X., Shen, H.F. (2009). 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,* 1007 -1010.

همسایگی مماس است. با توجه به مقادیر RMSE مشخص می‌شود که بهترین مدل به منظور افزایش قدرت تفکیک مکانی، مدل $S=3$ و $T=2$ برای DEM ۳۰ متر و ۹۰ متر می‌باشد. همچنین با توجه به مقادیر RMSE مشخص می‌شود که DEM ۳۰ متر دارای RMSE کمتر (۵/۵۴) نسبت به DEM ۹۰ متر (۹/۱۳) می‌باشد. نتایج نشان داد که با استفاده از این روش قدرت تفکیک مدل رقومی زمین با صرف هزینه و زمان کمتر بهبود پیدا می‌کند. در برخی موارد صحت مدل خروجی هم با استفاده از این مدل بهبود پیدا کرد. مدل های رقومی زمین با قدرت تفکیک بهتر می‌تواند برای استخراج عوارض و اطلاعات بیشتر از زمین مورد استفاده قرار گیرند. برای مطالعات مختلف و پیش‌بینی پارامترهای مختلف حوضه آبخیز مانند میزان پوشش گیاهی، دما، بارندگی، وضعیت هیدرولوژیکی و غیره با استفاده از ارتفاع می‌توان از خروجی این الگوریتم استفاده کرد و به جزئیات بیشتر دست پیدا کرد.

منابع و مأخذ

1. Ardila, J.P., Tolpekin, V.A., Bijker, W., Stein, A. (2011). Markov-random-field-based super-resolution mapping for identification of urban trees in VHR images, *ISPRS J. Photogram. Remote Sens.* 66: 762-775.
2. Atkinson, P.M. (2005). Sub-pixel target mapping from soft-classified, remotely sensed imagery, *Photogramm. Eng. Remote Sens.* 71 (7): 839-846.
3. Boucher, P.C. Kyriakidis. (2006). Super-resolution land cover mapping with indicator geostatistics, *Remote Sens. Environ.* 104 (3): 264-282.
4. Boucher, P.C. Kyriakidis, C.C. Ratcliff. (2008). Geostatistical solutions for super resolution land cover mapping, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing.* 46 (1): 272-283.
5. 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.
6. 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.
7. Kasetkasem, T., Arora, M.K., Varshney, P.K. (2005). Super-resolution land cover mapping using a Markov

