

امروزه با پیشرفت قابلیت سامانه اطلاعات مکانی، بجای ترسیم دستی با استفاده نقشه کاغذی، نقشه‌ها بصورت رقومی ثبت و ترسیم میگردند. با وجود این هنوز نقشه‌های قدیمی کاغذی به جهت ارزش مالکیت و ثبتي آنها، همچنان کاربرد فراوانی دارند. بنابراین، برای ایجاد یک پایگاه داده مکانی، لازم است گاه نقشه‌های رقومی و نقشه‌های کاغذی تلفیق شوند. برای استفاده از نقشه‌های کاغذی، لازم است ابتدا با تفکیک مکانی مناسب (روزلوشن با DPI حداقل ۳۰۰) اسکن گردند تا به تصویر (داده رستری) تبدیل گردند، سپس، برای تبدیل به حالت برداری با استفاده از نرم افزار QGIS بصورت رقومی ترسیم گردند. ولی قبل از هرگونه عملیات رقومی نمودن و یا استفاده مستقیم، نیاز است که این نقشه‌های رستری به صورت دقیق زمین مرجع (ژئورفرنس)^۱ گردند؛ یعنی ارتباط موقعیت پیکسل‌ها با مختصات واقعی آن‌ها در روی نقشه و کره زمین برقرار گردد و معادله بین آنها حل شوند؛ به این مرحله تبدیل هندسی^۲ نیز گویند که با انتخاب نقاط کنترل زمینی در روی تصاویر انجام می‌گیرد یا گوشه‌های تصویر با تابع تبدیل، زمین مرجع می‌شوند. سپس، ارزش‌های پیکسل رستر قبلی براساس موقعیت جدید پیکسل‌ها مجدداً محاسبه و نوشته می‌شود به این مرحله نمونه برداری مجدد گویند.

در این درس، هدف بر این است در ابتدا تعاریف این دو بصورت مفصل بحث گردد و سپس، در محیط نرم‌افزار سامانه اطلاعات مکانی QGIS بصورت عملی این دو مرحله زمین مرجع بروش انتخاب نقطه کنترل زمینی اجرا می‌گردد.

۲ تبدیل هندسی

تبدیل هندسی داده رستری زمانی لازم است که این داده مکانی از لحاظ موقعیت نیاز به اصلاح باشد؛ زمانی نوع سیستم تصویر (پروژکشن) آن تغییر داده می‌شود؛ به عبارت دیگر، از پروژکشنی به پروژکشن دیگر تبدیل شود؛ یا با تغییر اندازه پیکسل، نمونه برداری مجدد لازم گردد. تبدیل هندسی در واقع فرایند تغییر هندسی رستر از فضای یک مختصات به مختصات دیگری است. به عبارت دیگر، عملیاتی را که بر روی توصیف هندسی جسمی برای تغییر موقعیت، جهت یا اندازه آن اعمال می‌گردند، تبدیل هندسی می‌نامند. تبدیل هندسی، تبدیل خطی نیز گویند که در واقع عملی است یک نقطه $P(x,y)$ به نقطه $P'(x', y')$ با یک موقعیت جدید تبدیل می‌نماید.

۳ انواع تبدیل هندسی

تبدیل هندسی انواع مختلفی دارد:

- ✓ ژئورفرنس: حل تابع هندسی بین مختصات نقاط کنترل (به عنوان موقعیت واقعی در روی نقشه) و موقعیت پیکسل (ردیف و ستون) یک تصویر است؛ برای تصویر که مختصات را درست نشان نمی‌دهد اجرا می‌گردد.
 - ✓ تبدیل نوع سیستم تصویر رسترها: تبدیل یک تصویر رستری از پروژکشنی به پروژکشن دیگر است.
 - ✓ تغییر مکان و انتقال^۳: حرکت دادن موقعیت یک پیکسل در امتداد یک خط راست از نقطه ای به نقطه دیگر است.
 - ✓ چرخش^۴ مختصات در یک زاویه: عمل دوران حول مبدا مختصات است.
 - ✓ تغییر اندازه پیکسل: تغییر تفکیک مکانی (یا روزلوشن) نقشه رستری است.
- بعد از اجرای تبدیل هندسی بندرت مرکز پیکسل رستر ورودی به مرکز پیکسل رستر خروجی انطباق می‌یابد.

۳-۱ زمین مرجع (ژئورفرنس) یک نقشه رستری: تبدیل هندسی

همان طور که قبلاً اشاره شد؛ زمین مرجع یا ژئورفرنس فرایند تبدیل موقعیت داده از سیستم مختصات (شبکه) به یک سیستم مختصات با استفاده از تبدیل هندسی^۵ است؛ انواع مختلفی دارد (گوشه‌ای، نقاط کنترل و تصحیح ارتفاعی). فرایند معرفی یک سیستم مختصات نقشه به یک تصویر، به عبارت دیگر فرایندی است برای برقراری ارتباط ردیف و ستون تصویر (فضای تصویر) با سیستم مختصات نقشه (فضای نقشه) است (شکل ۱-۳). گاه فرایند انطباق یک تصویر به یک تصویر دیگر ثبت^۶ گویند (در این حالت، حتی می‌تواند تصاویر سیستم مختصات نداشته باشند). تصحیح هندسی ارتفاعی^۷ نیز

¹ Georeference

² Transformation

³ Translation

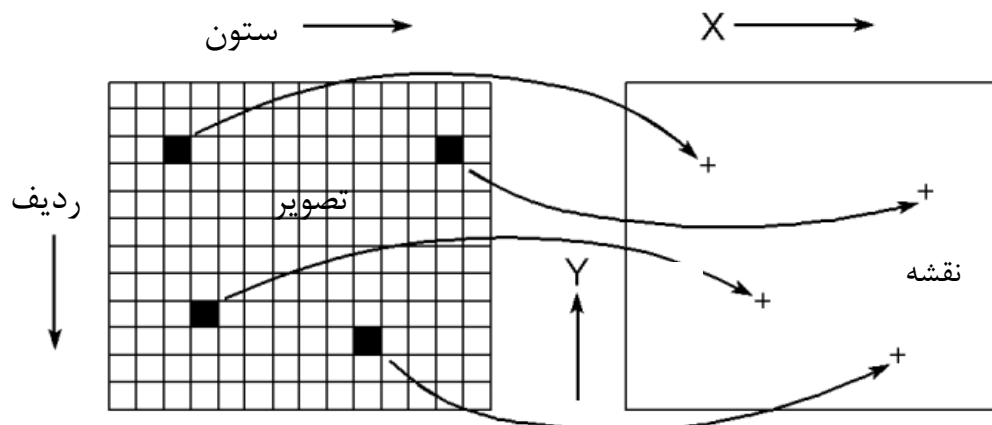
⁴ Rotation

⁵ Geometric Transformation

⁶ Registration

⁷ Orthorectification

یک نوع تصحیح جابجایی ارتفاعی پیکسلها در یک نقشه رستری با استفاده از مدل رقومی ارتفاع DEM^۱ است؛ در این حالت علاوه بر موقعیت افقی طول X و عرض Y پیکسل، از لحاظ موقعیت ارتفاعی Z هم، موقعیت پیکسل نیز اصلاح می‌گردد.



شکل ۱-۳: زمین مرجع نمودن یک تصویر رستری (سمت چپ، موقعیت پیکسل با علامت مربع توپر نمایش داده شده) بر اساس یک نقشه (سمت راست، نقاط کنترل زمینی با علامت + نشان داده شده است): مبدأ ردیف و ستون در تصویر گوشه سمت چپ فوقانی و در نقشه گوشه سمت چپ تحتانی است. در ابتدا برای زمین مرجع، در عمل نقاط کنترل زمینی به عنوان واقعیت موقعیت مکانی پیکسل در روی زمین تعیین می‌گردند: نقاط کنترل زمینی^۲ موقعیت پیکسل‌هایی معین در یک تصویر هستند که برای آنها مختصات نقشه خروجی (یا سایر مختصات‌ها) معلوم است که شامل مختصات زوج X و Y هستند. مختصات مرجع^۳ مختصات های فایل داده تصویر، روی آن تصحیح صورت می‌گیرد. **مختصات مرجع**: مختصات های نقشه یا تصویر مرجع به تصویر منبع به آن ثبت می‌شوند.

مرحله بعدی، تعیین نوع تبدیل هندسی و آزمون دقت آن است و براساس آن موقعیت جدید پیکسل ها برآورد می‌گردد؛ در حال حاضر، در نرم‌افزار QGIS انواع تبدیل هندسی زیر ممکن است:

✓ حالت خطی^۴: برای ایجاد یک فایل کمکی^۵ استفاده می‌شود؛ این نوع تبدیل از بقیه تبدیل‌ها متفاوت است. در واقع، موقعیت پیکسل در رستر را تبدیل هندسی نمی‌کند. برای تبدیل تصاویر اسکن‌شده مناسب نیست.

✓ تبدیل هلمرت^۶: تبدیل هندسی ساده که فقط تغییر مقیاس و چرخش را انجام می‌دهد.

✓ تبدیل توابع چندجمله‌ای^۷ با رتبه ۱ تا ۳: اغلب برای تبدیل هندسی مختصات منبع و مرجع بکار گرفته شده است

تبدیل هندسی چندجمله‌ای رتبه یک (همگر یا آفین)^۸ حالت هم‌خطی و نسبت فاصله‌ها را در شکل حفظ می‌کند؛ در این تبدیل، خطوط مستقیم حفظ می‌شوند تمامی نقاط روی یک خط در ورودی، در خروجی نیز روی یک خط خواهند ماند. با این وجود در تبدیل‌های همگر طول و زاویه^۹ بین خط‌ها لزوماً حفظ نمی‌شود. این تبدیل می‌تواند تبدیل هندسی ساده مثل تغییر انتقال، تغییر مقیاس (تجانس)، کجی و چرخش را انجام دهد. به عبارتی دیگر، اگر نقشه شما بصورت کج شده (انحراف) و مقیاس آن تغییر داده شده، چرخش (دوران) داشته باشد، تبدیل هندسی آفین کافی است. این روش برای تصاویر ماهواره‌ای (و بیشتر برای نقشه‌های برداری) با تعیین نقاط کنترل توصیه می‌شود. در تبدیل هندسی آفین حداقل نقطه کنترل مورد نیاز **سه نقطه** است تا ضرایب معادله آن حل شوند و مقدار خطا برآورد گردند؛ البته برای اجرای دقیق ژئورفرنس تعداد نقاط بیشتری لازم است؛ همچنین، میزان پراکنش نقاط در سطح تصویر هم مهم است.

فرمول خروجی تبدیل هندسی آفین به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$X_{out} = a_{11}X + a_{12}Y + b_1$$

$$Y_{out} = a_{12}X + a_{22}Y + b_2$$

^۱ Digital Elevation Model

^۲ Ground Control Point

^۳ Source

^۴ Linear

^۵ world file

^۶ Helmert

^۷ Polynomial

^۸ First-Order Polynomial Transformation

که X و Y موقعیت پیکسل است و X و Y موقعیت پیکسل در نقشه مرجع و حروف کوچک ضرایب تبدیل هستند؛ ضرایب با حروف $a11$ تا $b11$ که برای تغییر در راستای محور افقی/شرقی-غربی X و در راستای محور عمودی/ شمالی-جنوبی Y است تا خروجی X_{out} و Y_{out} حاصل شود.

تبدیل هندسی چندجمله‌ای رتبه ۲ بصورت زیاد استفاده می شود که می تواند برخی تغییرات انحنا را نیز در نظر گیرد. برای حل معادله، حداقل شش **نقطه** کنترل مورد نیاز است. در این نوع تبدیل، خطوط مستقیم دیگر حفظ نمی شوند. فرمول خروجی به صورت زیر می باشد:

$$X_{out} = a_1 + b_1X + c_1Y + d_1XY + e_1X^2 + f_1Y^2$$

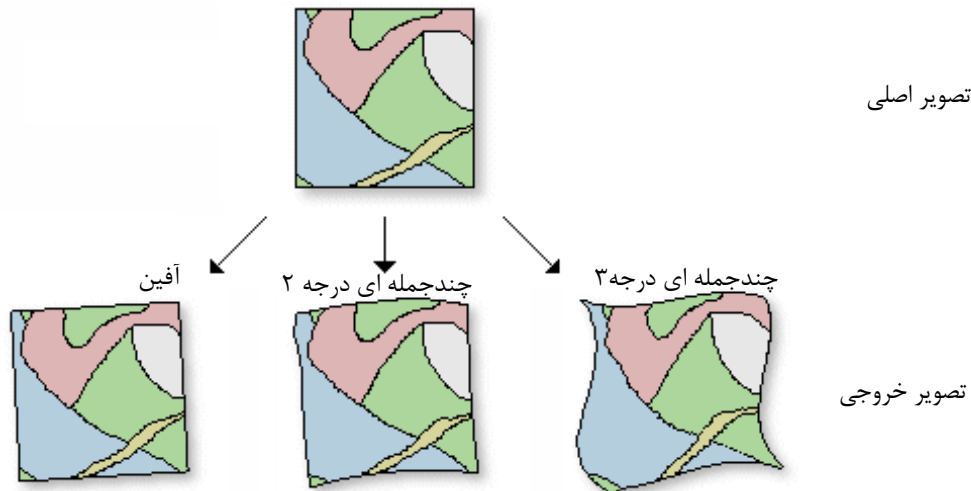
$$Y_{out} = a_2 + b_2X + c_2Y + d_2XY + e_2X^2 + f_2Y^2$$

تابع درجه سوم خطی: برای حل معادله این نوع تابع هندسی، حداقل نقطه کنترل مورد نیاز ده عدد می باشد.

$$X_{out} = a_1 + b_1X + c_1Y + d_1XY + e_1X^2 + f_1Y^2 + g_1X^3 + h_1X^2Y + i_1XY^2 + j_1Y^3$$

$$Y_{out} = a_2 + b_2X + c_2Y + d_2XY + e_2X^2 + f_2Y^2 + g_2X^3 + h_2X^2Y + i_2XY^2 + j_2Y^3$$

اگر نقشه حالت انحنا و خمیدگی داشت، تبدیل هندسی رتبه دوم یا سوم را بکار ببرید؛ رتبه دوم برای تبدیل طول/عرض داده به یک پروژکشن مسطح که برای داده با وسعت زیاد (با در نظر داشتن تصحیح انحنا زمین) و داده‌های با کج‌شدگی و تحریف جابجایی (به عنوان مثال انحراف لنز دوربین) مناسب است. تبدیل رتبه سوم، برای عکس‌هوایی با کج/ انحراف موقعیت/جابجایی، نقشه‌های تاخورد و تصاویر راداری مناسب است. در ضمن، هرچه رتبه توابع چندجمله‌ای بیشتر شوند، مقدار نقاط کنترل زیادتری لازم است. چون با افزایش رتبه چندجمله‌ای تغییرات در شکل خطی نبوده و تغییرات محلی بیشتر خواهد بود. علاوه بر این، پراکنش نقاط نقش مهمی در صحت زمین مرجع دارد (شکل ۲-۳).



شکل ۲-۳: اثر افزایش رتبه در تابع هندسی چندجمله‌ای بر تغییرات محلی در نقشه خروجی

- ✓ تبدیل اسپلاین: برنامه صفحه نازک اسپلاین (TPS¹) یک روش نوین زمین مرجع نمودن است که می تواند تغییرات محلی را در داده ها در نظر بگیرد. این برنامه زمانی مفید است که کیفیت داده اصلی موردنظر خیلی کم باشد.
- ✓ روش پروجکتیو^۲: تبدیل دوران و انتقال خطی سیستم مختصات هاست. برای تعریف و ایجاد سیستم مختصات برای یک نقشه اسکن شده به کار برده می شود و حداقل **چهار نقطه** برای محاسبه حل معادله لازم است؛ هنوز، در این صورت خطا صفر خواهد بود. با افزایش تعداد نقاط کنترل میزان خطا بیشتر از صفر می شود.

$$X_{out} = (aX + bY + c) / (gX + hY + 1)$$

$$Y_{out} = (dX + eY + f) / (gX + hY + 1)$$

تبدیل هندسی پروجکتیو، خطوط را طوری تاب می دهد که آنها بصورت خط راست بمانند. لذا خطوطی که زمانی موازی بودند، دیگر موازی نخواهند بود. برای تصاویر با برداشت اریب و نقشه‌های اسکن شده و برای محصولات لندست^۳ و Digital Globe مناسب است.

¹ Thin Plate Spline

² Projective

³ Landsat

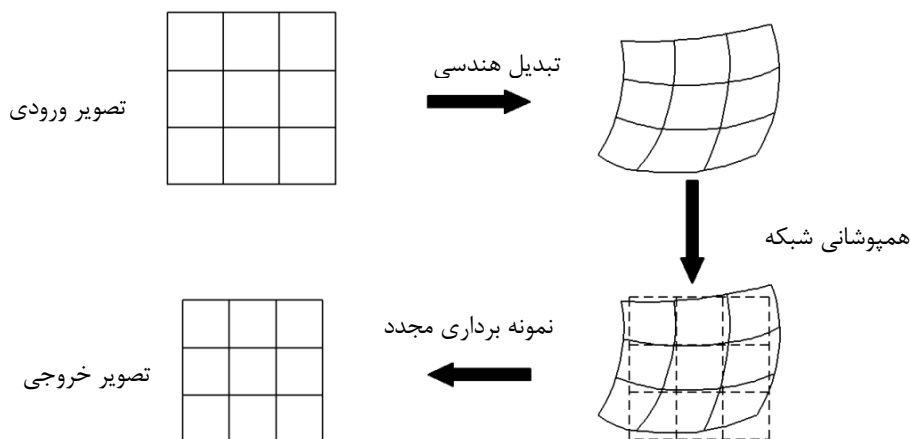
لازم به ذکر است که این برآورد موقعیت همیشه همراه با خطا است. میزان خطا (خطای جذر میانگین مربعات^۱) یعنی تفاوت بین مکان هایی که نقاط کنترل زمین (واقعی) قرار داده شده با موقعیت برآورد شده بر اساس معادله آنهاست. در هر صورت، با انتخاب تعداد مناسب نقطه کنترل و پراکنش مناسب آنها مقدار خطا باید به حداقل برسد. پذیرش میزان خطا بسته به نوع تصاویر و اندازه پیکسل آنها متفاوت می باشد که این مقدار از حاصلضرب RMSE در اندازه پیکسل به دست می آید که در تصاویری ماهواره ای لندست به دست آمده اند، میزان خطای نیم پیکسل یعنی ۱۵ متر قابل قبول است. وقتی فرمول کلی استخراج می شود و نقاط کنترل اجرا می شود، اندازه خطا را می توان بدست آورد. در واقع این رقم چگونگی سازگاری تبدیل در بین نقاط کنترل است. وقتی خطا بزرگ است، باید برخی نقطه کنترل خطا ویرایش یا برداشته شوند و نقاط جدیدی ایجاد شوند. با وجود ارزیابی مناسب دقت تبدیل با این خطا، خطای کم دال بر ثبت دقیق نیست. مثلاً، هنوز تبدیل هندسی ممکن است به علت وارد نمودن نقاط کنترل زمینی غیرکافی، خطای معناداری در صحت نقشه داشته باشد. با افزایش میزان نقاط کنترل میزان صحت بهبود می یابد. در تبدیل اسپلاین خطای بدست آمده در حد صفر است. این نیز بدین معنا نیست که تصویر کاملاً صحیح ژئورفرنس شده است. بدین منظور برای بررسی نهایی هماهنگی موقعیت مختصات نقشه باید با سایر موقعیت مکانی داده های موجود (مثل گوگل ارث) بررسی گردد.

۲-۳ نمونه برداری مجدد و ایجاد یک تصویر خروجی

بعد از انجام وارد نمودن نقاط کنترل و تنظیم تبدیل هندسی، ذخیره تصویر ژئورفرنس شده لازم است تا به عنوان یک فایل خروجی ذخیره گردد. همانطور که گفته شد تبدیل هندسی برای ایجاد ارتباط بین دو سیستم مختصات و انتقال مختصات یک رشته نقاط و یا پیکسل های تصویری از سیستمی به سیستم است (همچون تبدیل هندسی پروژکتیو، چندجمله ای، آفین و ...). اما از نظر پردازش رقومی تصاویر تبدیل هندسی یک تصویر و یا نقشه رستری اسکن شده، از دو عمل پایه ای تشکیل می شود:

۱- یک تبدیل مکانی که بازآرایی پیکسل ها روی صفحه تصویر را تعریف میکند (شبکه)،

۲- یک درون یابی مقادیر ارزش های رقومی پیکسل (سطح خاکستری) که این ارزش ها را به پیکسل های تصویر خروجی از تبدیل مکانی نسبت داده می شوند.



در تبدیل هندسی یک ماتریس خالی پیکسل ها براساس مختصات نقشه ایجاد می شود، در این شبکه جدید، ارزش هر پیکسل خالی براساس فرایند نمونه برداری مجدد از ارزش های پیکسل های تصویر قبلی تعیین می شود:

سه روش میانجیابی^۲ در نمونه برداری مجدد وجود دارد:

۱. نزدیکترین همسایه^۳: در حین ژئورفرنس کردن، نرم افزار بر روی تصویر شبکه ای بر اساس معیارهای تعریف شده (اندازه پیکسل) قرار می دهد

که در حالت نزدیکترین همسایه، ارزش نزدیکترین پیکسل تصویر قبلی به پیکسل تصویر جدید (شبکه) داده می شود.

سریعترین روش در محاسبه نمونه برداری مجدد است. برای نقشه های کلاس و یا نقشه موضوعی مناسب است. چون تغییری در ارزش های تصویر خروجی اتفاق نمی افتد؛ فقط براساس نزدیکی موقعیت، ارزش پیکسل ها تعیین می شوند؛ ارزش داده های اصلی را بدون محاسبه جبری مثل میانگین انتقال داده می شود. به عبارت دیگر، این تابع ارزش هیچ یک از پیکسل ورودی تصویر در تصویر خروجی را تغییر نمی دهد؛ مثلاً عدد ۲ حتماً ۲ باقی خواهد ماند به

¹ root-mean-square error

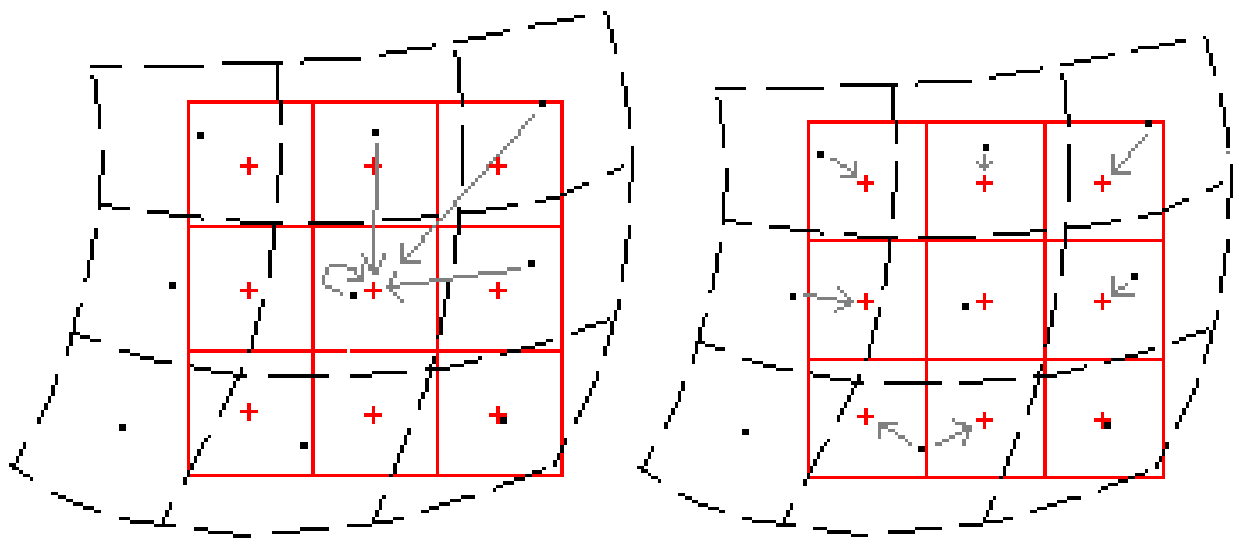
² Interpolation

³ Nearest Neighbor

۲/۲ یا ۳/۲ تبدیل نمی‌شود. بنابراین، برای نقشه‌های کیفی با داده اسمی و یا ترتیبی که هر ارزش یک کلاس، عضو و طبقه را نشان می‌دهند و یا برای داده‌های طبقه‌بندی شده مثل کاربری اراضی، نقشه خاک و تیپ جنگل مناسب است.

نمونه برداری مجدد نزدیکترین همسایه البته معایبی نیز دارد؛ وقتی این روش از یک شبکه بزرگتر به یک شبکه کوچکتر نمونه‌برداری مجدد شود، اثر پله‌ای در اطراف خطوط مورب و منحنی‌ها دیده می‌شوند. ارزش داده‌ها ممکن است حذف شوند، در حالی که ارزش‌های دیگر ممکن است تکرار شود. در هنگام استفاده داده‌های موضوعی خطی (برای مثال، جاده‌ها، رودخانه‌ها) ممکن است شکاف در شبکه‌ای داده‌ها ایجاد شود.

۲. نمونه‌برداری مجدد دوخطی^۱: در این نمونه برداری مجدد ارزش چهار پیکسل نزدیک در تصویر ورودی به پیکسل مرکزی تصویر خروجی مورد محاسبه قرار می‌گیرد. ارزش جدید برای پیکسل خروجی حاصل میانگین وزنی ارزش‌های این چهار پیکسل تصویر ورودی است. این روش میان‌یابی سطحی صاف‌تری /نرم‌تر از روش نزدیکترین همسایه ایجاد می‌کند و بدون اثر پله‌ای است. چون که ارزش‌ها برای پیکسل خروجی براساس موقعیت نسبی و ارزش داده ورودی محاسبه می‌شوند. برای داده‌های سطحی پیوسته مثل میزان تغییرات میزان ارتفاع، میزان شیب، میزان آلودگی صدای فرودگاه، میزان شوری آب زیرزمینی مناسب است و یا این روش هنگام تغییر اندازه سلول داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد؛ مثلاً در ادغام تصاویر SPOT/TM نمونه برداری مجدد ماتریس 2×2 . انجام می‌گیرد.



شکل ۳-۳: نمونه برداری مجدد نزدیکترین همسایه (سمت راست) و نمونه برداری مجدد دوخطی (سمت چپ): در یک شبکه جدید: پیکسل‌های خروجی خط قرمز توپر و مختصات آنها علامت مثبت + قرمز رنگ نمایش داده شدند، به علاوه علائم، پیکسل ورودی‌ها با خطوط منقطع تیره و مختصات آنها نیز با علامت نقطه نشانه گذاری شدند، فلش خاکستری رنگ نشان می‌دهد که چگونه ارزش‌های خروجی از داده‌های ورودی محاسبه می‌گردد.

از معایب نمونه‌برداری مجدد دوخطی، از آنجا که میانگین پیکسل‌ها محاسبه می‌گردند، درون‌یابی دوخطی دارای اثر فیلتر میانگین دارد. لذا لبه‌ها هموار شده، و بعضی از ارزش‌های فایل داده‌ها از دست می‌روند.

۳. نمونه‌برداری مجدد مکعبی^۲: میانگین ارزش ۱۶ پیکسلی مجاور در رستر ورودی به عنوان مبنای محاسبه ارزش پیکسل خروجی در نظر گرفته می‌شود؛ اثر این نمونه‌برداری مجدد نیز همانند روش میان‌یابی دوخطی است؛ برای تصویر مثل عکس هوایی و تصاویر ماهواره‌ای مناسب است. روش میان‌یابی مکعبی و دوخطی برای داده طبقه‌بندی مناسب نیست؛ به توجه تغییرات خط در این روش‌ها، خروجی روش میان‌یابی مکعبی حالت تیز، در روش میان‌یابی دوخطی حالت نرم و در روش نزدیکترین حالت چهار گوش و منقطع ایجاد می‌گردد.

از مزایای این نوع نمونه‌برداری مجدد، نمونه برداری این است که در اغلب موارد، میانگین و انحراف استاندارد پیکسل خروجی با میانگین و انحراف معیار پیکسل ورودی نزدیک مطابقت می‌نماید. اثر وزن‌دهی منحنی مکعب هم می‌تواند تصویر تیز و صاف نماید. این روش هنگام تغییر زیاد اندازه سلول داده‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد. مثلاً در ادغام تصاویر عکس هوایی / تصاویر ماهواره‌ای نمونه برداری مجدد ماتریس 4×4 . انجام می‌گیرد. از معایب آن این است ارزش داده‌ها ممکن است تغییر کند.

¹ Bilinear

² cubic

