

ارزیابی معیارهای مقایسه در تناظریابی الگو

امین صداقت^{۱*}، نازیلا محمدی^۱

^۱ استادیار گروه مهندسی نقشه‌برداری - دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه تبریز
{a.sedaghat, n.mohammadi}@tabrizu.ac.ir

(تاریخ دریافت تیر ۱۳۹۷، تاریخ تصویب اردیبهشت ۱۳۹۸)

چکیده

معیارهای مقایسه نقشی اساسی در کیفیت فرآیند تناظریابی الگو در فتوگرامتری و سنجش‌ازدور ایفا می‌کنند. در این تحقیق قابلیت انواع مختلف از معیارهای مقایسه در تناظریابی انواع مختلف از تصاویر با اختلافات مختلف هندسی و رادیومتریکی ارزیابی شده است. علاوه بر این یک روش جدید برای وزن‌دهی درجات خاکستری در محاسبه معیارهای مقایسه برای افزایش پایداری در برابر اختلافات هندسی و رادیومتریکی معرفی شده است. روش پیشنهادی بر مبنای حاصل ضرب سه پارامتر وزنی است. دو پارامتر وزن اول بر مبنای اندازه و جهت گرادیان بوده و پارامتر وزن سوم نیز بر مبنای یک تابع گوسی دوبعدی است. روش وزن‌دهی پیشنهادی برای معیار ضریب همبستگی اعمال شده و معیار جدیدی با عنوان ضریب همبستگی وزن‌دار، WCC (Weighted Cross-Correlation)، ارائه شده است. الگوریتم‌های تناظریابی الگوی مورد مقایسه در این تحقیق شامل ۱۰ الگوریتم SSD، LSSD، NSSD، JF، Tanimoto، ISD، IRV، CC، MI و WCC هستند. فرآیند ارزیابی بر روی دو دسته داده ساختگی و واقعی و برای تغییرات هندسی مختلف شامل مقیاس، دوران، تغییرمنظر، تار شدگی و تغییرات روشنایی انجام شده است. برای مقایسه عملکرد الگوریتم‌ها نیز از سه معیار درصد موفقیت تناظریابی، دقت مکانی و زمان تناظریابی استفاده شده است. بر اساس نتایج آزمایش‌های انجام شده الگوریتم پیشنهادی WCC بهترین عملکرد را برای دو معیار درصد موفقیت و دقت مکانی داشته و الگوریتم ISD نیز ضعیف‌ترین عملکرد را دارد. از لحاظ سرعت محاسباتی نیز الگوریتم MI کندترین الگوریتم و الگوریتم ISD نیز سریع‌ترین الگوریتم است.

واژگان کلیدی: تناظریابی الگو، معیارهای مقایسه، وزن‌دهی، تابع گوسی، ضریب همبستگی

۱- مقدمه

تناظریابی یکی از فرآیندهای بنیادی در فتوگرامتری است که هدف اساسی آن تعیین مطابقت میان موقعیت‌های نظیر در دو یا چند تصویر از یک منظره یکسان است. به‌طور کلی روش‌های تناظریابی به دو دسته اصلی شامل روش‌های تناظریابی الگو^۱ و روش‌های عارضه‌مبنا^۲ تقسیم‌بندی می‌شوند.

روش‌های تناظریابی الگو که با عنوان روش‌های ناحیه‌مبنا^۳ نیز شناخته می‌شوند، بر مبنای مقایسه مستقیم درجات خاکستری تصاویر درون پنجره‌های تصویری هستند. برای این منظور از انواع مختلف از معیارهای مقایسه مثل قدر مطلق اختلافات درجات خاکستری (SSD)^۴ و یا ضریب همبستگی (CC)^۵ استفاده می‌کنند [۱]. اساس روش‌های تناظریابی الگو بر مبنای فرض پیوستگی^۶ است. درواقع فرض بر این است که در سطح معینی از مقیاس که فرآیند تناظریابی انجام می‌گیرد، بیشترین قسمت پنجره تناظریابی، جزئی از یک سطح مسطح و پیوسته از شیء است [۲].

تناظریابی بر مبنای معیار SSD یکی از رایج‌ترین روش‌های تناظریابی الگو است. این روش نسبتاً سریع بوده و اگر محتوای اطلاعاتی پنجره تناظریابی به‌اندازه کافی بالا بوده و اعوجاجات هندسی میان تصاویر نیز نسبتاً کم باشد، عملکرد خوبی دارد؛ اما پایداری آن در برابر تغییرات روشنایی بسیار پایین بوده و دچار اشکال می‌شود [۳]. معیارهای زیادی به‌منظور افزایش پایداری در برابر تغییرات روشنایی ارائه شده است که یکی از مشهورترین آن‌ها معیار اطلاعات متقابل (MI)^۷ است که بر مبنای نظریه اطلاعات و وابستگی آماری میان دو پنجره می‌باشد [۴، ۵].

روش‌های تناظریابی الگو توانایی تناظریابی با دقت‌های بسیار بالا را دارند [۶]. علاوه بر این برای افزایش قابلیت اطمینان و کارایی این دسته از روش‌ها، الگوریتم‌های سلسله مراتبی^۸ و قیود هندسی مختلفی نظیر هرم تصویر و خط اپی‌پولار استفاده می‌شوند [۲]. اما این روش‌ها برای انجام

فرآیند تناظریابی نیاز به فضای جستجو و مقدار اولیه مناسب دارند. همچنین در مناطق با بافت ضعیف و یکنواخت و نیز در مناطقی که پنهان‌شدگی و ناپیوستگی وجود دارد، دچار ضعف هستند [۷، ۸]. علاوه بر این نسبت به تغییرات درجات خاکستری ناشی از نویز، تغییرات روشنایی و تصاویر مربوط به سنسورهای مختلف حساسیت دارند و تنها برای تصاویر با اعوجاجات کم (اختلاف مقیاس، دوران و تغییرمنظر^۹ تصویربرداری میان تصاویر کم باشد) مناسب هستند [۷، ۸].

در مقابل روش‌های تناظریابی عارضه‌مبنا، مطابقت میان تصاویر را با استفاده از عوارض تصویری و ارتباط هندسی میان آن‌ها تعیین می‌کنند. عوارض تصویری ساختارهای متمایز تصویر هستند که نسبت به انواع مختلف از تبدیل‌های هندسی و رادیومتریکی نظیر مقیاس، دوران، تغییر شکل ناشی از تغییرمنظر اخذ تصویر، تغییرات روشنایی، تار شدگی و نویز، پایدار هستند [۹]. روش‌های مختلفی برای استخراج عوارض و انجام تناظریابی میان آن‌ها ارائه شده است که در مقالات مروری متعددی مورد مقایسه و ارزیابی قرار گرفته‌اند که به‌عنوان نمونه می‌توان به منابع [۹-۱۵] اشاره کرد. ازجمله الگوریتم‌های شاخص برای استخراج موقعیت عوارض می‌توان به الگوریتم‌های Hessian [۱۶، ۱۷]، Harris [۱۸]، FAST [۱۹]، SIFT [۲۰]، SURF [۲۱]، MSER [۲۱] و KAZE [۲۲] اشاره کرد.

در مقایسه با روش‌های تناظریابی الگو، روش‌های عارضه‌مبنا قابلیت اطمینان بالاتری داشته و در برابر اختلافات هندسی و رادیومتریکی عملکرد نسبتاً بهتری دارند [۷]. البته بایستی توجه داشت که روش‌های عارضه‌مبنا برای استخراج عوارض، نیاز به الگوریتم‌های پردازش تصویری پیچیده داشته و پیاده‌سازی آن‌ها به‌سادگی روش‌های ناحیه‌مبنا نیست. به‌علاوه قابلیت اطمینان تناظریابی در آن‌ها به‌شدت تحت تأثیر کیفیت عوارض استخراج شده است. همچنین به علت جابه‌جایی موقعیت مکانی عوارض در دو تصویر، دقت تناظریابی در آن‌ها محدود به دقت استخراج عوارض است [۶]. مشکل بزرگ دیگر روش‌های عارضه‌مبنا وجود تناظرهای اشتباه در نتایج است که حذف آن‌ها فرآیندی نسبتاً دشوار و زمان‌بر است [۲۳].

^۹ Viewpoint

^{۱۰} Features from Accelerated Segment Test

^{۱۱} Scale-Invariant Feature Transform

^{۱۲} Speeded-Up Robust Features

^{۱۳} Maximally Stable Extremal Regions

^{۱۴} در زبان ژاپنی به معنای باد

^۱ Template Matching

^۲ Feature-Based Matching

^۳ Area-Based Matching

^۴ Sum of Squared Differences

^۵ Cross Correlation

^۶ Continuity Assumption

^۷ Mutual Information

^۸ Hierarchical Matching

یک مزیت بسیار مهم روش‌های تناظریابی الگو در مقایسه با روش‌های عارضه‌منا امکان تناظریابی در هر موقعیت دلخواه است. بر این اساس روش‌های تناظریابی الگو برای انجام تناظریابی متراکم به‌منظور بازسازی سه‌بعدی تصاویر کاربرد بسیار بیشتری دارند. علاوه بر این روش‌های تناظریابی الگو امکان جستجوی اهداف و الگوهای مشخص نظیر هواپیما و خودرو در تصاویر را با سرعت بسیار بالایی دارا هستند [۲۴].

تمرکز اصلی این تحقیق بر روی الگوریتم‌های تناظریابی الگو است. معیارهای مقایسه مختلفی برای انجام تناظریابی الگو ارائه شده‌اند. هر یک از معیارها ویژگی‌های مخصوص به خود را داشته و برای تصاویر با شرایط و خصوصیات مختلفی مناسب هستند. استفاده از هر یک از این معیارها در کاربردهای مختلف، نیازمند شناخت قابلیت‌ها و نقاط ضعف آن‌هاست. بنابراین ارزیابی الگوریتم‌های مختلف تناظریابی الگو و شناخت عملکرد و خصوصیات آن‌ها در کاربردهای مختلف یک نیاز اساسی است. هدف اصلی این تحقیق ارزیابی قابلیت انواع مختلف از معیارهای مقایسه در تناظریابی الگو است.

تحقیقات نسبتاً محدودی به‌منظور ارزیابی معیارهای مقایسه در روش‌های تناظریابی الگو انجام شده است. Goshtasby [۳] انواع مختلف از معیارهای مقایسه نظیر CC، MI، SSD، معیار Tanimoto [۲۵] و فاصله علامت افزایشی ^۱ISD [۲۶] را در تصاویر مختلف و از جنبه‌های متفاوتی نظیر سرعت، پایداری در برابر نویز، تار شدگی و تغییرات روشنایی ارزیابی کرده است. نتایج ارزیابی بیانگر این است که هر معیار دارای نقاط قوت و ضعف مربوط به خود بوده و ممکن است در یک تصویر بهترین نتیجه را داشته و در تصاویر دیگر نتایج خوبی ارائه نکند. البته به‌طور کلی معیار ضریب همبستگی و معیار Tanimoto در بیشتر موارد نتایج بهتری را ارائه کرده‌اند.

Kääb و Heid [۲۷] عملکرد شش معیار مقایسه مختلف شامل ضریب همبستگی، همبستگی فاز و چهار معیار مبتنی بر تبدیل فوریه را به‌منظور پایش تغییرات یخچال‌های طبیعی با استفاده از تصاویر ماهواره‌ای اپتیک‌ی ارزیابی کرده‌اند. بر اساس نتایج این تحقیق معیاری که در تمام موارد برتر از دیگر معیارها باشد، مشاهده نشد هرچند در بیشتر موارد

الگوریتم مبتنی بر همبستگی فاز نتایج بهتری را نشان داده است. Scharstein و Hirschmuller [۲۸] عملکرد بعضی از معیارهای مقایسه نظیر مجموع قدر مطلق اختلافات، SAD^۲، CC و MI را برای انجام تناظریابی متراکم به‌منظور تولید مدل سه‌بعدی از تصاویر ارزیابی کرده‌اند. برای این منظور از سه روش تناظریابی متراکم مختلف استفاده شده است. نتایج بیانگر وابستگی میان نوع معیار مقایسه و روش مورد استفاده برای انجام تناظریابی متراکم بوده است.

در تحقیقات قبلی انجام شده تنوع تصاویر بسیار کم بوده و تنها از تعداد محدودی از تصاویر استفاده شده و علاوه بر این بیشتر از تصاویر برد کوتاه معمولی استفاده شده است. همچنین عملکرد الگوریتم‌ها در شرایط مختلف هندسی و رادیومتریکی و برای اختلافات مختلف نظیر تغییرات مقیاس، دوران، تغییرمنظر و روشنایی ارزیابی نشده است. در این تحقیق ارزیابی کاملی از انواع مختلف از معیارهای مقایسه با خصوصیات متفاوت انجام شده است. برای این منظور از انواع مختلف از تصاویر برد کوتاه، هوایی و ماهواره‌ای با انواع مختلف از اختلافات نظیر اختلافات مقیاس، دوران، تغییرمنظر، روشنایی و تار شدگی استفاده شده است. از طرف دیگر یک محدودیت مهم روش‌های تناظریابی الگو حساسیت بالا در برابر اختلافات هندسی و رادیومتریکی است. در این تحقیق به‌منظور افزایش پایداری در برابر تغییرات هندسی و روشنایی یک روش وزن‌دهی جدید ارائه شده است. در روش پیشنهادی پیکسل‌های پنجره تناظریابی بر اساس سه پارامتر وزن اندازه گردان، مطابقت جهت گردان و همچنین فاصله از مرکز پنجره تناظریابی، وزن‌دهی می‌شوند.

در ادامه در بخش دوم اصول تناظریابی الگو ارائه شده و معیارهای مقایسه مورد ارزیابی بیان می‌شود. سپس در بخش سوم روش پیشنهادی به‌منظور وزن‌دهی فرآیند تناظریابی معرفی می‌شود. بعد از آن در بخش چهارم نتایج پیاده‌سازی و ارزیابی الگوریتم‌ها بیان شده و در نهایت در بخش پنجم نتیجه‌گیری تحقیق بیان خواهد شد.

۲- اصول تناظریابی الگو

فرآیند تناظریابی الگو بر اساس مقایسه پنجره‌های تصویری است. یک پنجره تصویری، یک ناحیه از مقادیر درجات خاکستری تصویر است که عموماً مربعی یا دایره‌ای

^۲ sum of absolute differences

^۱ Incremental Sign Distance

۲-۱- معیارهای مقایسه در تناظریابی الگو

به منظور سادگی بیان روابط در این بخش، هر پنجره تناظریابی به صورت یک بردار فرض می شود که درجات خاکستری درون آن در یک ترتیب مشخص مرتب شده اند. بر این اساس $U = \{u_i : i = 1, \dots, n\}$ به عنوان بردار درجات خاکستری پنجره الگو و $V = \{v_i : i = 1, \dots, n\}$ به عنوان بردار درجات خاکستری پنجره تناظریابی در نظر گرفته می شوند که در آن n بیانگر تعداد پیکسل های درون پنجره است.

همان طور که پیش تر بیان شد معیارهای مقایسه به دو دسته کلی معیارهای مشابهت و نا شباهتی قابل تقسیم بندی هستند. یک معیار مشابهت، معیاری است که هرچه قدر میزان مطابقت و وابستگی بین دو پنجره مورد مقایسه بیشتر باشد، مقدار آن افزایش می یابد. در مقابل یک معیار نا شباهتی معیاری است که هرچه قدر میزان مطابقت و وابستگی بین دو پنجره مورد مقایسه بیشتر باشد، مقدار آن کاهش می یابد. در ادامه این بخش، بعضی از شاخص ترین معیارهای مشابهت و نا شباهتی که در این تحقیق مورد مقایسه و ارزیابی قرار خواهند گرفت، معرفی می شوند.

۲-۱-۱- معیار فاصله اقلیدسی

همان طور که پیش تر بیان شد یکی از ساده ترین معیارهای مقایسه، معیار مبتنی بر مجموع مربعات اختلافات درجات خاکستری، SSD، است که با عنوان فاصله اقلیدسی شناخته می شود. برای دو بردار U و V با n مؤلفه، معیار SSD به ترتیب زیر محاسبه می شود:

$$SSD(U, V) = \sum_{i=1}^n (u_i - v_i)^2 \quad (1)$$

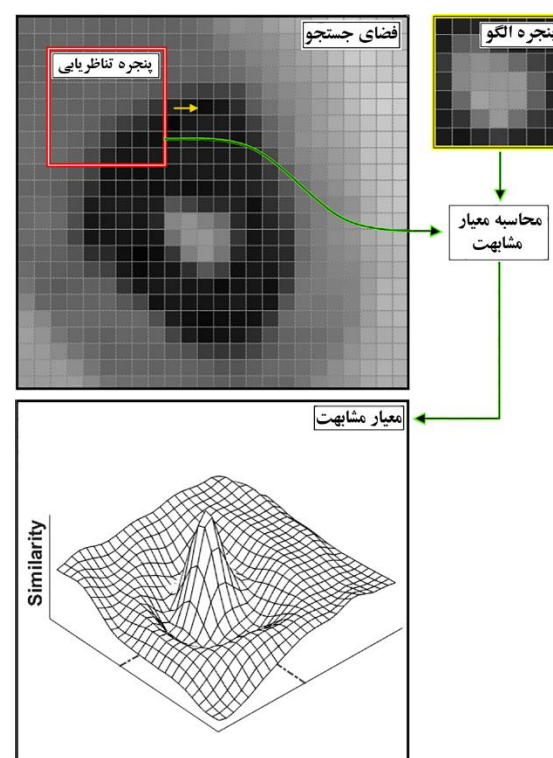
این معیار یک معیار نا شباهتی بوده و مینیمم مقدار آن در فضای جستجو به عنوان موقعیت متناظر در نظر گرفته می شود.

۲-۱-۲- معیار LSSSD

Aschwanden و Guggenbuhl [۲۹] محاسبه معیار SSD را با استفاده از یک ضریب مقیاس ویژه مبتنی بر نسبت میانگین ها پیشنهاد نموده اند که با عنوان معیار LSSSD شناخته می شود. هدف از این معیار همسان سازی

شکل است. به منظور انجام فرآیند تناظریابی الگو مطابق با شکل ۱، در ابتدا یک پنجره از پیکسل ها به عنوان الگو در تصویر اول انتخاب می شود. سپس یک فضای جستجو در تصویر دوم انتخاب شده و پنجره ای هم اندازه با الگوی مورد نظر با عنوان پنجره تناظریابی^۱، به صورت پیکسل به پیکسل در این فضا حرکت داده می شود. در هر تغییر مکان، میزان مطابقت پنجره الگو با پنجره تناظریابی با استفاده از یک معیار مشابهت^۲ (یا نا شباهتی^۳) تعیین می شود. در نهایت موقعیت ماکزیمم معیار مشابهت (یا مینیمم معیار نا شباهتی)، به عنوان موقعیت متناظر انتخاب می شود.

مهم ترین موضوع در تناظریابی الگو، معیار مقایسه (مشابهت یا نا شباهتی) مورد استفاده برای تعیین میزان مطابقت میان پنجره های الگو و تناظریابی است. معیارهای متنوعی برای این منظور ارائه شده اند که هریک از آنها ویژگی های مختلفی داشته و نقاط ضعف و قوت مخصوص به خود را دارند. در ادامه این بخش بعضی از معیارهای مقایسه شاخص در تناظریابی الگو معرفی شده و در بخش های بعدی مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت.



شکل ۱- فرآیند تناظریابی الگو

^۱ Matching Window

^۲ Similarity Measure

^۳ Dissimilarity measure

£ Locally Scaled Sum of Square Differences

۲-۱-۶- معیار فاصله علامت افزایشی (ISD)

اساس این معیار بر این فرض است که اگر دو بردار U و V مربوط به دو پنجره متناظر باشند، آنگاه روند تغییر عناصر آن‌ها مشابه خواهد بود [۲۶]. برای بردار U ، بردار باینری ترتیبی B_U به ترتیب زیر ایجاد می‌شود:

$$U = \{u_i : i = 1, \dots, n\} \rightarrow B_U = \{b_i : i = 1, \dots, n-1\} \quad (6)$$

که در آن b_i بیانگر علامت مقایسه درجه خاکستری مؤلفه u_i و u_{i+1} است. بدین ترتیب که اگر $u_{i+1} > u_i$ باشد، آنگاه $b_i = 1$ و در غیر این صورت $b_i = 0$ است. به‌طور مشابه بردار B_V برای بردار V محاسبه می‌شود. در نهایت معیار ISD با استفاده از فاصله همینگ^۲ میان دو بردار باینری B_U و B_V محاسبه می‌شود:

$$ISD(U, V) = \sum_{i=1}^n |B_{U_i} - B_{V_i}| \quad (7)$$

۲-۱-۷- معیار واریانس نسبت درجات خاکستری (IRV)

برای محاسبه این معیار در ابتدا برای دو بردار U و V نسبت درجات خاکستری به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$r_i = \frac{u_i + \varepsilon}{v_i + \varepsilon} \quad (8)$$

که در آن ε بیانگر یک مقدار کوچک (معمولاً یک) است که به‌منظور جلوگیری از تقسیم بر صفر استفاده می‌شود. در این صورت معیار IRV به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$IRV(U, V) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_i - \bar{r})^2 \quad (9)$$

که در آن $\bar{r}$ میانگین نسبت درجات خاکستری است.

۲-۱-۸- معیار ضریب همبستگی (CC)

معیار ضریب همبستگی، رایج‌ترین معیار مورد استفاده در تناظریابی الگو است. برای دو بردار U و V با n مؤلفه، معیار ضریب همبستگی به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$CC(U, V) = \frac{\sigma_{UV}}{\sigma_U \cdot \sigma_V} \quad (10)$$

درجات خاکستری دو بردار مورد مقایسه، جهت افزایش پایداری در برابر تغییرات روشنایی است که به ترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$LSSSD(U, V) = \sum_{i=1}^n (u_i - \frac{\bar{u}}{\bar{v}} v_i)^2 \quad (2)$$

که در آن $\bar{u}$ و $\bar{v}$ به ترتیب میانگین بردارهای U و V هستند.

۲-۱-۳- معیار NSSD

معیار مجموع مربعات اختلافات نرمالیزه، NSSD، از مقدار میانگین و انحراف معیار بردارها مطابق با رابطه (۳) به‌منظور افزایش پایداری در برابر تغییرات روشنایی استفاده می‌کند:

$$NSSD(U, V) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{u_i - \bar{u}}{\sigma_u} - \frac{v_i - \bar{v}}{\sigma_v} \right)^2 \quad (3)$$

که در آن $\bar{u}$ و $\bar{v}$ به ترتیب میانگین و σ_u و σ_v انحراف معیار بردارهای U و V هستند.

۲-۱-۴- معیار Jeffrey Divergence (JD)

این معیار بر اساس نظریه اطلاعات بوده و برای دو بردار U و V با n مؤلفه به ترتیب زیر محاسبه می‌شود [۳۰]:

$$JD(U, V) = \sum_{i=1}^n (u_i \cdot \log \frac{u_i}{v_i} + v_i \cdot \log \frac{v_i}{u_i}) \quad (4)$$

که در آن $\log$ بیانگر عملگر لگاریتم در مبنای ۱۰ است.

۲-۱-۵- معیار Tanimoto

معیار Tanimoto بر اساس نسبت ضرب داخلی دو بردار و اندازه آن‌ها بوده و شباهت نزدیکی به معیار ضریب همبستگی دارد [۲۵]. برای دو بردار U و V با n مؤلفه معیار Tanimoto به ترتیب زیر محاسبه می‌شود [۲۵]:

$$T(U, V) = \frac{U^t \cdot V}{\|U\|^2 + \|V\|^2 - U^t \cdot V} \quad (5)$$

که در آن عملگر $\| \cdot \|$ بیانگر اندازه بردار بوده و t نیز بیانگر ترانپوز بردار است.

^۲ Hamming distance

^۳ Intensity-Ratio Variance

^۱ Normalized Sum of Square Differences

که در آن σ_U انحراف معیار بردار U ، σ_V انحراف معیار بردار V و σ_{UV} کواریانس بردار U و V است.

۲-۱-۹- معیار اطلاعات متقابل (MI)

معیار MI بیانگر میزان وابستگی آماری میان دو دسته داده است [۱]. برای دو بردار U و V با ابعاد n فرض می‌شود که احتمال درجه خاکستری i در هر پیکسل درون پنجره تناظریابی U ، برابر p_i بوده و احتمال درجه خاکستری j در هر پیکسل درون پنجره تناظریابی V ، برابر p_j باشد. آنگاه اگر دو پنجره تناظریابی U و V را با هم همپوشانی کنیم، احتمال اینکه درجه خاکستری i در پنجره U در محل درجه خاکستری j در پنجره V قرار گیرد برابر احتمال توأم آن‌ها، یعنی p_{ij} است. بر این اساس معیار MI برای دو بردار U و V به ترتیب زیر محاسبه می‌شود [۳۱]:

$$MI(U, V) = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^h p_{ij} \cdot \log_r \frac{p_{ij}}{p_i \cdot p_j} \quad (11)$$

که در آن p_i بیانگر احتمال درجه خاکستری i در پنجره U ، p_j بیانگر احتمال درجه خاکستری j در پنجره V ، p_{ij} بیانگر احتمال توأم آن‌ها و h نیز بیانگر بعد هیستوگرام تصویر است. اگر دو پنجره U و V به‌درستی متناظر یکدیگر باشند آنگاه درجات خاکستری آن‌ها به‌شدت وابسته بوده و در نتیجه احتمال توأم آن‌ها بالا خواهد بود. در مقابل اگر دو پنجره تناظریابی فوق متناظر یکدیگر نباشند، آنگاه احتمال توأم آن‌ها مقدار کمی خواهد بود. رابطه (۱۱) به‌صورت زیر قابل بیان است:

$$MI(U, V) = \sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^h p_{ij} \cdot \log_r p_{ij} - \sum_{i=1}^h p_i \cdot \log_r p_i - \sum_{j=1}^h p_j \cdot \log_r p_j \quad (12)$$

که در آن احتمال‌های p_i و p_j به ترتیب زیر قابل برآورد هستند:

$$p_i = \sum_{j=1}^h p_{ij}; \quad p_j = \sum_{i=1}^h p_{ij} \quad (13)$$

در عمل برای محاسبه میزان احتمال‌ها از یک هیستوگرام ویژه با عنوان هیستوگرام پیکسل‌های متناظر یا هیستوگرام توأم، H ، استفاده می‌شود. ابعاد این هیستوگرام، برابر $h \times h$ بوده و اگر درجه خاکستری یک پیکسل خاص در پنجره U برابر i و در پنجره V برابر j باشد، آنگاه به درایه (i, j) (درایه سطر i ام و ستون j ام) از این هیستوگرام یک

واحد افزوده می‌شود. بعد از بررسی تمامی پیکسل‌های درون پنجره‌های تناظریابی U و V ، هیستوگرام به صورتی حاصل خواهد شد که درایه (i, j) در آن نشان دهنده تعداد پیکسل‌هایی است که در پنجره U درجه خاکستری i را داشته و موقعیت نظیر آن در پنجره V درجه خاکستری j را دارد. در نهایت برای برآورد مقادیر احتمالات توأم p_{ij} هیستوگرام H به ترتیب زیر نرمالیزه می‌شود:

$$p_{ij} = \frac{1}{n} \cdot H_{ij} \quad (14)$$

که در آن H بیانگر هیستوگرام پیکسل‌های متناظر و n نیز بیانگر تعداد مؤلفه‌های پنجره تناظریابی است. در محاسبه معیار MI، ابعاد هیستوگرام (h) را می‌توان مستقیماً برابر دامنه تغییرات درجات خاکستری در نظر گرفت. یعنی در صورتی که تصاویر ۸ بیتی باشند، ابعاد هیستوگرام برابر 256×256 در نظر گرفته می‌شود. البته معمولاً مقدار کوچک‌تری برای آن در نظر گرفته می‌شود که در این صورت باید دامنه درجات خاکستری تصاویر به محدوده انتخاب شده تغییر داده شود. به‌عنوان مثال اگر تصاویر ۸ بیتی بوده و مقدار h برابر ۵۰ انتخاب شود، آنگاه محدوده درجات خاکستری از صفر تا ۲۵۵ باید به بین صفر تا ۴۹ منتقل شده و سپس هیستوگرام ایجاد شود.

۲-۲- روند انجام و جزئیات تناظریابی الگو

به‌منظور انجام تناظریابی الگو در ابتدا موقعیت مرکز مربوط به پنجره الگو در تصویر اول انتخاب شده و سپس موقعیت تقریبی آن در تصویر دوم تعیین می‌شود. سپس ابعاد پنجره تناظریابی و فضای جستجو تعیین می‌شود. در مرحله بعد فرآیند تناظریابی برای هر نقطه با محاسبه معیار مقایسه انجام شده و موقعیت اکسترمم مطلق آن در فضای جستجو در صورتی که از یک مقدار آستانه بزرگ‌تر باشد به‌عنوان نقطه متناظر آن انتخاب می‌شود. عوامل مختلفی در فرآیند تناظریابی الگو مؤثر هستند که در این بخش جزئیات بعضی از آن‌ها بیان می‌شود.

۲-۲-۱- شکل و ابعاد پنجره تناظریابی

شکل و خصوصاً ابعاد پنجره تناظریابی تأثیر مستقیمی در نتیجه تناظریابی الگو دارد. پنجره تناظریابی می‌تواند به‌صورت مربعی، مستطیلی، دایره‌ای، بیضی‌شکل و یا هر

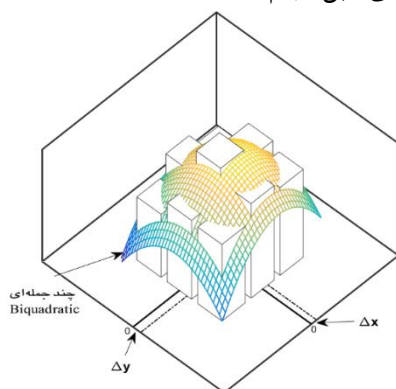
دستیابی به میزان مناسبی از معیار خودهمبستگی^۱ و آنتروپی افزایش می‌یابد [۳۳]. در عمل شعاع پنجره تناظریابی عموماً بین ۴ تا ۲۰ پیکسل انتخاب می‌شود.

۲-۲-۲- دقت زیر پیکسل در تناظریابی الگو

موقعیت تناظریابی در روش‌های تناظریابی الگو با دقت زیر پیکسل قابل تعیین است. روش متداول برای این منظور، برازش یک چندجمله‌ای Biquadratic به مقادیر معیار مقایسه تناظریابی الگو در یک پنجره 3×3 به مرکزیت پیکسل متناظر به دست آمده است. این چندجمله‌ای مطابق با رابطه (۱۵) دارای ۶ پارامتر مجهول بوده و با استفاده از ۹ پیکسل واقع در پنجره 3×3 به روش کمترین مربعات برآورد می‌شود و اکسترم آن به عنوان موقعیت زیر پیکسل فرآیند تناظریابی در نظر گرفته می‌شود.

$$S(x, y) = a + b \cdot x + c \cdot y + d \cdot x \cdot y + e \cdot x^2 + f \cdot y^2 \quad (15)$$

که در آن ضرایب a, b, c, d, e, f شش پارامتر مجهول چندجمله‌ای Biquadratic هستند. در رابطه (۱۵) اگر فرض کنیم موقعیت پیکسل مرکزی $(0, 0)$ باشد آنگاه مقادیر x و y بین ۱ و -۱ تغییر می‌کند. اکسترم این تابع بیانگر آفست مورد نیاز به منظور بهبود دقت موقعیت تناظریابی خواهد بود. واضح است که برای تعیین موقعیت اکسترم تابع S باید مشتق آن برابر صفر قرار داده شود. در شکل ۲ یک مثال از فرآیند تناظریابی با دقت زیر پیکسل با برازش چندجمله‌ای Biquadratic نشان داده شده است. قابل ذکر است که فرآیند تناظریابی در بعضی از روش‌های تناظریابی ناحیه‌مبنا نظیر کمترین مربعات نیز به صورت زیر پیکسل و بدون برازش یک چندجمله‌ای قابل انجام است [۳۴].



شکل ۲- تناظریابی الگو با دقت زیر پیکسل با برازش یک چندجمله‌ای به همسایگی 3×3

شکل هندسی دیگری باشد. متداول‌ترین شکل پنجره تناظریابی به صورت مربعی است؛ اما به منظور پایداری بهتر در برابر اختلافات هندسی خصوصاً دوران، بهتر است شکل پنجره تناظریابی به صورت دایره‌ای استفاده شود [۳۲]. در مواقع خاصی که محتوای درجات خاکستری اطراف نقطه موردنظر در یک بعد کم باشد می‌توان ابعاد پنجره را به صورت مستطیلی و یا بیضی‌شکل در نظر گرفت تا این کمبود محتوا در بعد دیگر جبران شده و پیچیدگی محاسباتی را نیز بی‌دلیل افزایش ندهد. در مواقعی که هدف یافتن متناظر یک الگوی مشخص نظیر یک هواپیما در یک تصویر است می‌توان شکل پنجره تناظریابی را مطابق با الگوی مربوطه در نظر گرفت.

مساله بسیار مهم دیگر ابعاد پنجره تناظریابی است. مهم‌ترین عامل در تعیین ابعاد پنجره تناظریابی، محتوای اطلاعاتی است. در صورتی که نقطه موردنظر درون یک منطقه یکنواخت قرار داشته باشد، آنگاه میزان تغییرات درجات خاکستری پنجره کم بوده و احتمال انجام تناظریابی صحیح بسیار کم است. بنابراین برای اجتناب از این موضوع ابعاد پنجره تناظریابی را باید تا حد ممکن بزرگ انتخاب کرد. موضوع مهم دیگر ارتباط بین دقت تناظریابی با ابعاد پنجره است. به منظور دستیابی به تناظریابی دقیق و با قابلیت اطمینان بالا، پنجره تناظریابی باید به اندازه کافی منحصربه‌فرد بوده و دارای محتوای اطلاعات کافی باشد. میزان منحصربه‌فردی و همچنین میزان محتوای اطلاعاتی پنجره تناظریابی با افزایش ابعاد آن افزایش می‌یابد؛ اما در مقابل با افزایش ابعاد پنجره تناظریابی معمولاً میزان تأثیر اعوجاجات هندسی و عامل پنهان‌شدگی افزایش یافته و دقت در بسیاری از موارد کاهش می‌یابد.

یک راه حل اساسی برای بررسی موضوع میزان محتوای اطلاعاتی و منحصربه‌فردی، انتخاب مناسب موقعیت مرکز پنجره است. برای این منظور مرکز پنجره را باید در نقاط متمایز تصویر انتخاب کرد به طوری که میزان تغییرات روشنایی در همسایگی آن‌ها شدید بوده و به اندازه کافی دارای عوارض ساختاری در اطراف خود باشند. راه حل متداول برای این منظور استفاده از الگوریتم‌های استخراج عوارض نقطه‌ای مثل Hessian و انتخاب آن‌ها به عنوان مرکز پنجره الگو است. راه حل متداول دیگر استفاده از معیار آنتروپی و خود همبستگی برای توصیف میزان محتوای اطلاعاتی و منحصربه‌فردی پنجره است. برای این منظور ابعاد پنجره به صورت انطباقی تا زمان

^۱ Autocorrelation

۳- روش وزن دهی پیشنهادی مبتنی بر اندازه و جهت گرادیان

در این بخش روش پیشنهادی به منظور وزن دهی پنجره تناظریابی برای بهبود عملکرد روش های تناظریابی الگو و افزایش پایداری در برابر تغییرات هندسی و روشنایی معرفی می شود. روش پیشنهادی از سه پارامتر وزنی به ترتیب زیر استفاده می کند:

تابع گرادیان: پارامتر وزن اول مورد استفاده در روش پیشنهادی استفاده از تابع گرادیان به ترتیب زیر است:

$$m(x, y) = \sqrt{I_x^T + I_y^T} \quad (16)$$

که در آن I_x و I_y به ترتیب بیانگر گرادیان تصویر در جهت x و y هستند. در این روش میزان گرادیان پیکسل ها درون پنجره الگو محاسبه شده و به پیکسل هایی که میزان گرادیان آن ها بیشتر است وزن بیشتری اختصاص داده می شود. از آنجاکه پنجره الگو در طول فرآیند تناظریابی ثابت در نظر گرفته شده و هدف یافتن موقعیت نظیر آن در فضای جستجو است، لذا از پیکسل های این پنجره برای وزن دهی استفاده شده است. پیکسل های با گرادیان بیشتر مربوط به لبه ها و عوارض ساختاری بوده و انتظار می رود پایداری بیشتر در برابر تغییرات روشنایی در مقایسه با مناطق یکنواخت تصویر داشته باشند.

جهت گرادیان: پارامتر وزن دوم پیشنهادی یک پارامتر ویژه بر مبنای جهت گرادیان است. جهت گرادیان پیکسل ها پایداری بسیار بالایی در برابر تغییرات روشنایی در مقایسه با خود درجات خاکستری تصویر دارد. بر این اساس هرچه میزان اختلاف جهت گرادیان پیکسل هایی مورد مقایسه در دو پنجره تناظریابی و الگو کمتر باشد باید تأثیر بیشتری در محاسبه معیار شباهت یا نا شباهتی داشته باشند. برای محاسبه پارامتر وزن در ابتدا میزان جهت گرادیان برای پیکسل های درون پنجره تناظریابی و الگو به ترتیب زیر محاسبه می شود:

$$\alpha(x, y) = \tan^{-1}\left(\frac{I_y}{I_x}\right) \quad (17)$$

که در آن I_x و I_y به ترتیب بیانگر گرادیان تصویر در جهت x و y هستند. سپس پارامتر وزن پیشنهادی، ρ با استفاده از یک تابع گوسی یک بعدی به ترتیب زیر محاسبه می شود:

$$p(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_\alpha} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta\alpha(x, y)}{\sigma_\alpha}\right)^2} \quad (18)$$

که در آن σ_α بیانگر مقیاس تابع گوسی و $\Delta\alpha$ نیز اختلاف جهت گرادیان برای هر پیکسل مورد مقایسه در دو پنجره تناظریابی و الگو است که به ترتیب زیر محاسبه می شود:

$$\Delta\alpha(x, y) = \alpha_M(x, y) - \alpha_T(x, y) \quad (19)$$

که در آن α_T و α_M به ترتیب بیانگر جهت گرادیان پیکسل های مورد مقایسه در دو پنجره الگو و تناظریابی است. بر اساس پارامتر وزن پیشنهادی هرچه اختلاف جهت گرادیان پیکسل های مورد مقایسه کمتر باشند وزن بیشتری خواهند داشت. این پارامتر پایداری فرآیند تناظریابی را در برابر پنهان شدگی و نویز که در آن ها پیکسل ها در دو پنجره دارای اختلاف شدید در جهت گرادیان هستند به میزان بسیار زیادی افزایش خواهد داد. مقدار پارامتر مقیاس تابع گوسی بر اساس نتایج آزمایش ها برابر π پیشنهاد می شود.

فاصله از مرکز پنجره: میزان اعوجاجات هندسی برای دو موقعیت متناظر در دو تصویر مختلف، با فاصله گرفتن از مرکز آن ها افزایش می یابد. برای افزایش پایداری در برابر این نوع از اعوجاجات هندسی باید پیکسل های مرکزی تأثیر بیشتری در مقایسه با پیکسل های دورتر در محاسبه معیار مقایسه داشته باشند. بر این اساس برای محاسبه پارامتر وزن سوم در روش پیشنهادی، G ، از یک تابع گوسی دوبعدی به ترتیب زیر استفاده می شود:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma_G^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma_G^2}} \quad (20)$$

که در آن σ_G بیانگر مقیاس تابع گوسی است. بدین ترتیب مرکز پنجره بیشترین تأثیر را داشته و میزان وزن هر پیکسل با فاصله گرفتن از مرکز پنجره کاهش می یابد. در این تحقیق میزان مقیاس تابع گوسی بر اساس نتایج آزمایش ها به اندازه شعاع پنجره تناظریابی پیشنهاد می شود.

در نهایت پارامتر وزن مورد استفاده در روش پیشنهادی از حاصل ضرب سه پارامتر وزنی مربوط به تابع گرادیان، تابع اختلاف جهت گرادیان و تابع گوسی به ترتیب زیر محاسبه می شود:

$$w(x, y) = G(x, y) \cdot p(x, y) \cdot m(x, y) \quad (21)$$

باند طیفی متفاوت مربوط به یک تصویر چند طیفی استفاده شده است. در این تحقیق از دو باند طیفی اول و سوم مربوط به هر داده استفاده شده است.

▪ **تصاویر واقعی:** در این دسته از تصاویر واقعی که دارای تغییرات هندسی و روشنایی واقعی ناشی از اخذ در شرایط مختلف هستند، استفاده می‌شود. برای این منظور از دسته داده Oxford [۳۶، ۳۷] که برای ارزیابی الگوریتم‌های استخراج و تناظرابی عوارض ارائه شده است، استفاده می‌شود. هر دسته داده شامل ۶ تصویر مختلف است که میزان اختلافات آن‌ها در یک روند افزایشی بیشتر می‌شود. تصاویر اول و ششم مربوط به هر حالت در شکل ۴ نشان داده شده است. ارتباط هندسی میان هر جفت از این تصاویر با استفاده از یک تبدیل پروژکتیو با دقت مناسبی معلوم است. در این تحقیق از سری تصاویر مربوط به تغییرات مقیاس، دوران، تغییرمنظر، روشنایی و تاری شدگی استفاده می‌شود. برای هر کدام از تغییرات نیز از دو سری از تصاویر مربوط به مناظر مختلف استفاده شده است. علاوه بر تصاویر فوق به منظور ارزیابی عملکرد الگوریتم‌ها در تصاویر ماهواره‌ای، از ۵ جفت تصویر واقعی ماهواره‌ای دو زمانه مربوط به سنجنده‌های مختلف مطابق با جدول ۱ استفاده شده است. در شکل ۵ تصاویر واقعی ماهواره‌ای نشان داده شده است. قابل ذکر است که تمامی تصاویر ماهواره‌ای در این بخش تصاویر پانکروماتیک بوده و اندازه‌ی پیکسل زمینی آن‌ها مطابق با جدول ۱ است. با توجه به اینکه روش‌های تناظرابی الگو از مقایسه مستقیم درجات خاکستری پیکسل‌ها در پنجره‌های تصویری استفاده می‌کنند بنابراین حساسیت آن‌ها به اختلافات هندسی مقیاس، دوران و تغییرمنظر زیاد است. بنابراین تصاویر به گونه‌ای انتخاب یا شبیه‌سازی شده‌اند که اعوجاجات هندسی میان آن‌ها خیلی زیاد نباشد.

که در آن G بیانگر پارامتر وزن حاصل از تابع گوسی، m بیانگر پارامتر وزن حاصل از تابع گرادیان در پنجره الگو و p نیز بیانگر پارامتر وزن حاصل از اختلاف جهت گرادیان پیکسل‌های مورد مقایسه در دو پنجره است. پارامتر وزن مورد استفاده برای هر پیکسل از پنجره‌ی تناظرابی محاسبه می‌شود. بدین ترتیب پیکسل‌هایی که وزن بیشتری دارند، تأثیر بیشتری در محاسبه میزان معیار مقایسه و در نتیجه تعیین موقعیت متناظر خواهند داشت. در این تحقیق از روش وزن‌دهی پیشنهادی برای معیار ضریب همبستگی استفاده شده و معیار کارآمدی با عنوان ضریب همبستگی وزن‌دار، WCC^1 ، ارائه شده است که عملکرد آن در مقایسه با دیگر روش‌ها در بخش بعدی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت.

۴- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

در این بخش تصاویر مورد استفاده، معیارهای ارزیابی، جزئیات پیاده‌سازی و نتایج ارزیابی و مقایسه معیارهای مقایسه تناظرابی الگو بیان می‌شود.

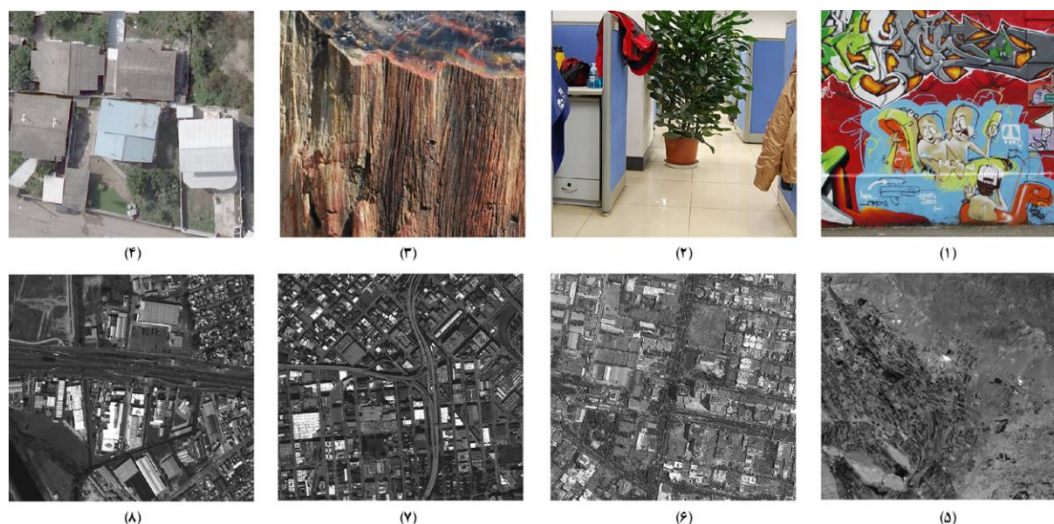
۴-۱- داده‌های مورد استفاده و جزئیات پیاده‌سازی

به منظور ارزیابی معیارها، دو مجموعه مختلف از تصاویر شامل تصاویر ساختگی^۲ و واقعی با شرایط زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند.

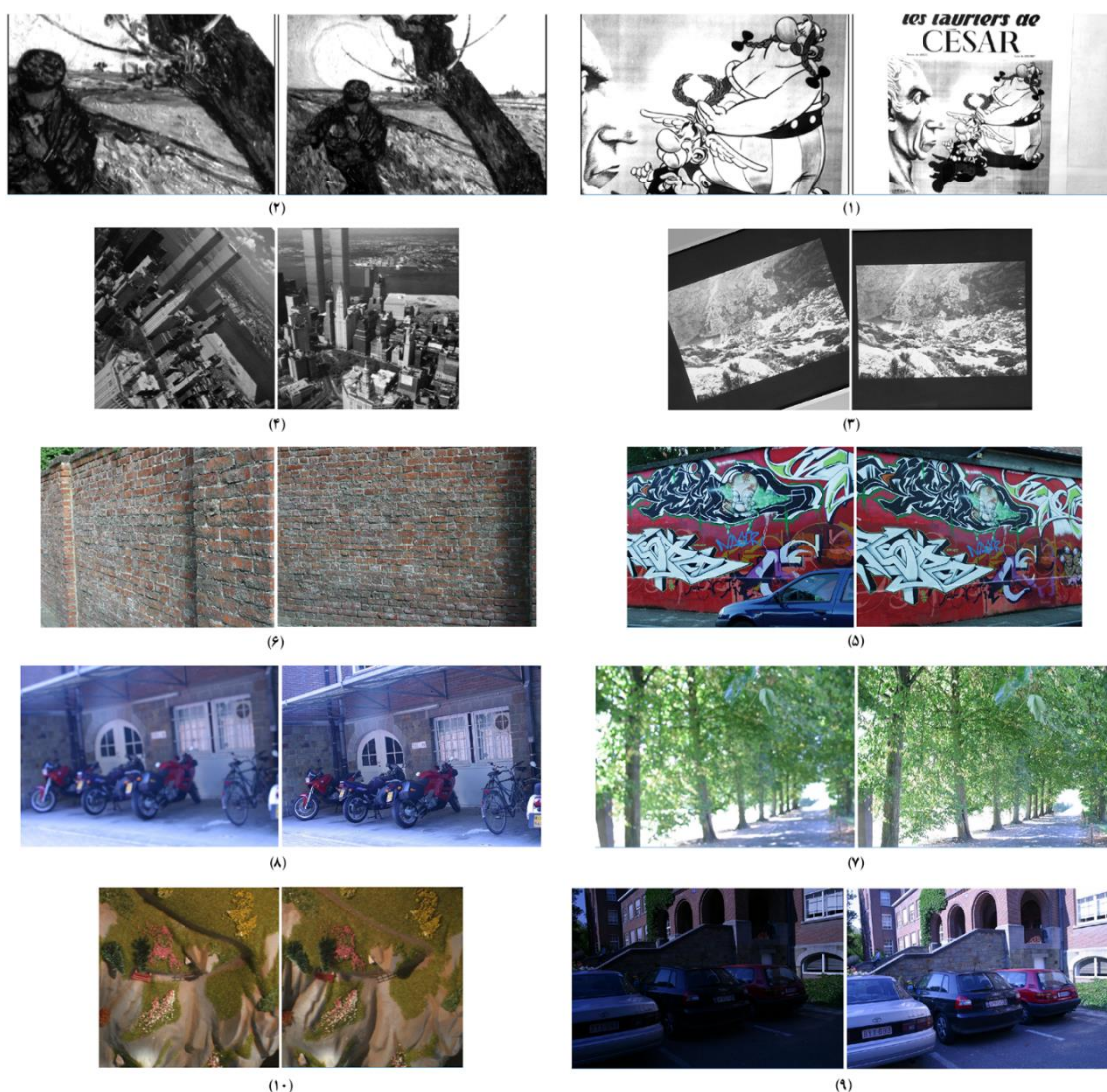
▪ **تصاویر ساختگی:** این دسته شامل تعداد ۸ تصویر مختلف شامل تصاویر برد کوتاه، هوایی و ماهواره‌ای مربوط به مناظر گوناگون مطابق با شکل ۳ هستند. برای ایجاد تصاویر ساختگی از پنج نوع مختلف از تغییرات شامل مقیاس، دوران، تغییرمنظر، نرم‌شدگی و همچنین تصاویر بین‌بندی استفاده شده است. شبیه‌سازی تغییرات مقیاس و دوران به سادگی با استفاده از یک ضریب مقیاس و زاویه دوران مشخص ایجاد می‌شود. برای شبیه‌سازی تصاویر با تغییرمنظر مختلف از یک تبدیل پروژکتیو مطابق با تحقیق [۳۵] استفاده می‌شود. برای شبیه‌سازی نرم‌شدگی در تصاویر از یک تابع گوسی با انحراف معیارهای مختلف استفاده می‌شود. در حالت تصاویر بین‌بندی نیز از دو

^۱ Weighted Cross Correlation

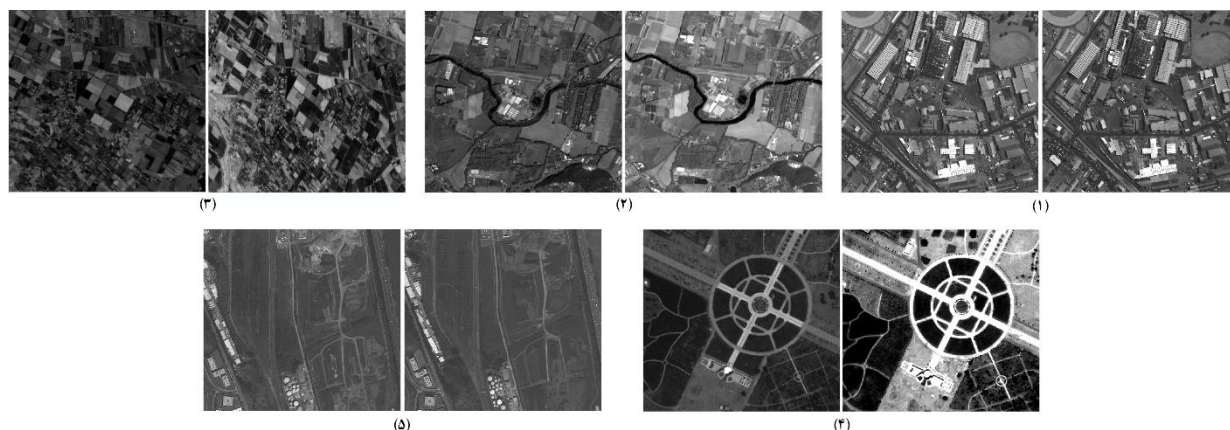
^۲ Synthetic Image



شکل ۳- تصاویر مورد استفاده برای ایجاد تصاویر ساختگی مورد ارزیابی، تصاویر (۱)، (۲) و (۳) تصاویر برد کوتاه، (۴) تصویر هوایی UltracamD (۵) تصویر ماهواره‌ای ETM+ با ۳۰ متر (۶) تصویر ماهواره‌ای IKONOS با ۴ متر، (۷) تصویر ماهواره‌ای Quickbird با ۲٫۴ متر، (۸) تصویر ماهواره‌ای Worldview3 با ۱٫۲ متر



شکل ۴- تصاویر واقعی مورد ارزیابی از دسته داده Oxford [۳۷، ۳۶]، (۱) تصاویر Asterix با تغییر مقیاس، (۲) تصاویر vanghogh با تغییر مقیاس، (۳) تصاویر Mars با تغییر دوران، (۴) تصاویر NewYork با تغییر دوران، (۵) تصاویر Grafity با تغییر منظر، (۶) تصاویر Wall با تغییر منظر، (۷) تصاویر Trees با تغییر تار شدگی، (۸) تصاویر Bikes با تغییر تار شدگی، (۹) تصاویر Leuven با تغییر روشنایی، (۱۰) تصاویر Toy با تغییر روشنایی



شکل ۵- تصاویر ماهواره‌ای واقعی، (۱) جفت تصویر IKONOS، (۲) جفت تصویر ZY3، (۳) جفت تصویر SPOT 4، (۴) جفت تصویر Quickbird و (۵) جفت تصویر Geoeye و Quickbird.

جدول ۱- مشخصات تصاویر واقعی ماهواره‌ای مورد استفاده (شکل ۵ ملاحظه شود)

شمار	جفت تصویر	ابعاد تصویر (پیکسل)	GSD (متر)	بیت در هر پیکسل	تاریخ اخذ
۱	IKONOS	۶۵۰×۶۰۰	۱	۱۱	۲۰۱۱
	IKONOS	۶۵۰×۶۰۰	۱	۱۱	۲۰۱۱
۲	ZY3	۶۵۰×۶۰۰	۲.۵	۱۱	۲۰۱۴
	ZY3	۶۵۰×۶۰۰	۲.۵	۱۱	۲۰۱۴
۳	SPOT 4	۶۵۰×۶۰۰	۱۰	۸	۲۰۰۴
	SPOT 4	۶۵۰×۶۰۰	۱۰	۸	۲۰۰۴
۴	Quickbird	۶۵۰×۶۰۰	۰.۶	۱۱	۲۰۰۹
	Geoeye	۸۰۰×۷۴۰	۰.۵	۱۱	۲۰۱۱
۵	Quickbird	۵۷۰×۵۳۰	۰.۶	۱۱	۲۰۰۷
	Worldview	۶۹۰×۳۶۰	۰.۵	۱۱	۲۰۱۱

۴-۲- معیارهای ارزیابی

به منظور ارزیابی عملکرد فرآیند تناظریابی از سه معیار درصد موفقیت^۱، دقت مکانی و زمان محاسباتی به ترتیب زیر استفاده می‌شود:

▪ **درصد موفقیت:** این معیار به عنوان نسبت تعداد نقاطی که فرآیند تناظریابی در آن‌ها به صورت موفقیت‌آمیز بوده، به تعداد کل نقاط تعریف می‌شود. برای تعیین تناظرهای موفق نیز از یک حد آستانه مکانی (۱.۵ پیکسل) استفاده می‌شود. درواقع جفت نقاطی که خطای تناظریابی آن‌ها کمتر از یک و نیم پیکسل است به عنوان نقاط موفق در نظر گرفته می‌شوند.

▪ **دقت مکانی:** میزان ریشه میانگین مربعات خطای (RMSE) مکانی عوارض موفق به عنوان دقت مکانی

در نظر گرفته می‌شود. به منظور ارزیابی خطای مکانی عوارض نیز از تبدیل هندسی معلوم یا برآورد شده برای هر جفت تصویر استفاده می‌شود.

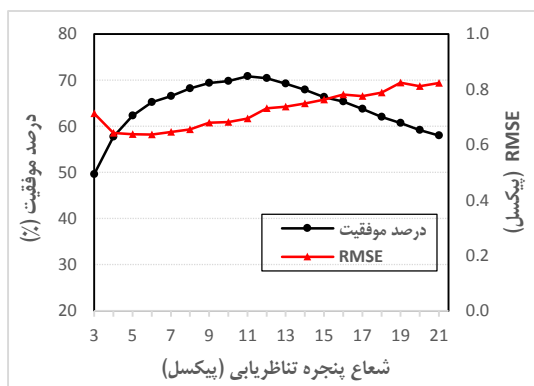
▪ **زمان محاسبات:** به منظور ارزیابی سرعت و کارایی الگوریتم‌های مختلف تناظریابی الگو از معیار زمان انجام محاسبات تناظریابی استفاده شده است. لازم به ذکر است که پیاده‌سازی فرآیند تناظریابی تمامی الگوریتم‌ها در یک محیط برنامه‌نویسی یکسان و با استفاده از یک کامپیوتر با سرعت پردازشی ۲.۵۴ گیگاهرتز و حافظه هشت گیگابایت انجام شده است. به منظور ارزیابی درصد موفقیت و دقت مکانی تناظریابی در تصاویر ساختگی از تبدیل هندسی معلومی که در تصاویر اعمال شده است استفاده می‌شود. در تصاویر واقعی نیز همان‌طور که پیش‌تر بیان شد از تبدیل پروژکتیو معلوم میان تصاویر استفاده می‌شود.

ذکر این نکته ضروری است که مطابق شکل ۴، تصاویر واقعی مربوط به دسته داده Oxford یا مربوط به یک منطقه مسطح نظیر دیوار بوده و یا بدون تغییر موقعیت دوربین تصویربرداری و تنها با تغییر دوران و یا شرایط نوری اخذ شده‌اند و بنابراین تبدیل پروژکتیو با دقت بسیار بالایی در آن‌ها صدق می‌کند. از طرف دیگر به منظور دستیابی به دقت مطلوب تبدیل پروژکتیو در تصاویر واقعی ماهواره‌ای سعی بر این بوده تا تصویر انتخابی مربوط به مناطق کشاورزی با تغییرات ارتفاعی جزئی بوده و یا میزان تغییرمنظر تصاویر و همچنین جابه‌جایی ارتفاعی در آن‌ها نسبتاً ناچیز باشد.

لازم به ذکر است که موقعیت نقاط در فرآیند تناظریابی با استفاده از عوارض نقطه‌ای حاصل از الگوریتم Hessian

^۱ Success Rate

داشته و میزان اختلاف دقت آن با پنجره به شعاع ۸ پیکسل نیز بسیار ناچیز (در حدود ۰,۰۵ پیکسل) است.



شکل ۶- نمودار میانگین میزان درصد موفقیت و دقت مکانی برای تمامی معیارها در تمامی تصاویر مورد ارزیابی برای پنجره‌های تناظریابی با شعاع‌های مختلف

۴-۴- نتایج و بحث

در این بخش نتایج تناظریابی برای تمامی ۱۰ معیار مقایسه مورد بررسی بیان شده و بحث خواهد شد. در شکل ۷ نتایج درصد موفقیت و RMSE معیارهای مقایسه در تصاویر ساختگی و برای تغییرات (۱) مقیاس، (۲) دوران، (۳) تغییرمنظر، (۴) نرم‌شدگی و (۵) تناظریابی مربوط به تصاویر بین‌باندی، نشان داده شده است. یادآوری می‌شود که در تناظریابی مربوط به تصاویر بین‌باندی، دو باند مختلف از هر یک از تصاویر در نظر گرفته شده و یکی از آن‌ها با استفاده از یک تبدیل هندسی تغییر داده می‌شود. با توجه به اینکه تصاویر مربوط به دو باند متفاوت بوده و شدت درجات خاکستری متفاوتی دارند لذا عملکرد الگوریتم‌ها در برابر تغییرات رادیومتریکی به‌خوبی قابل بررسی خواهد بود. در شکل ۷- (ه) نتایج تناظریابی مربوط به این تصاویر بین‌باندی نشان داده شده است.

در شکل ۸ نتایج تناظریابی روش‌های مورد ارزیابی برای معیارهای درصد موفقیت و RMSE در تصاویر واقعی بردکوتاه و برای تغییرات (۱) مقیاس، (۲) دوران، (۳) تغییرمنظر، (۴) تار شدگی و (۵) تغییرات روشنایی نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز نتایج تناظریابی روش‌های مختلف در تصاویر ماهواره‌ای واقعی نشان داده شده است. در شکل ۹ میانگین زمان انجام محاسبات تناظریابی در تمامی تصاویر مورد ارزیابی و برای حالت‌های مختلف تغییرات هندسی و روشنایی نشان داده شده است. بر اساس نتایج حاصل شده در این اشکال موارد زیر قابل بیان است:

[۱۶] استخراج شده است. تعداد عوارض اولیه Hessian نیز در هر جفت تصویر برابر ۵۰۰ نقطه انتخاب شده است. شکل پنجره تناظریابی به‌منظور پایداری بهتر در برابر تغییرات هندسی به‌صورت دایره‌ای در نظر گرفته شده و شعاع آن نیز بر اساس نتایج ارزیابی که در بخش بعد بیان خواهد شد به‌صورت ثابت و برابر ۱۱ پیکسل انتخاب شده است. به‌منظور بهبود کارایی روش‌های تناظریابی الگو عموماً به‌جای جستجوی فرآیند تناظریابی در کل تصویر که ممکن است بسیار زمان‌بر باشد، فضای جستجوی تناظریابی با تعیین یک پنجره با ابعاد مشخص محدود می‌شود. فضای جستجوی مورد استفاده برای این منظور یک ناحیه مربعی به ابعاد ۲۱×۲۱ پیکسل در تصویر دوم است که برای تعیین موقعیت آن از تابع تبدیل معلوم میان تصاویر استفاده شده است.

۴-۳- انتخاب ابعاد پنجره تناظریابی

همان‌طور که پیش‌تر بیان گردید، ابعاد پنجره تناظریابی پارامتر بسیار مهمی در فرآیند تناظریابی الگو است. به‌منظور ارزیابی در شرایط یکسان، بهتر است ابعاد پنجره تناظریابی برای تمام الگوریتم‌ها و در تمامی آزمون‌ها ثابت در نظر گرفته شود. به‌منظور بررسی اثر ابعاد پنجره تناظریابی و انتخاب شعاع مناسب، فرآیند تناظریابی برای پنجره‌های تناظریابی با ابعاد مختلف از شعاع ۳ پیکسل تا ۲۱ پیکسل و برای تمامی الگوریتم‌های مورد ارزیابی در این تحقیق انجام شده است. برای این منظور از تعداد ۱۰ جفت تصویر بردکوتاه، هوایی و ماهواره‌ای با تغییرات هندسی مختلف، استفاده شده است. قابل‌ذکر است که تصاویر مورد استفاده در این بخش با تصاویر اصلی مورد ارزیابی که در بخش ۴-۳ بیان شد، متفاوت هستند.

در شکل ۶ میانگین درصد موفقیت و دقت برای تمامی الگوریتم‌ها و در تمامی حالت‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای پنجره‌ها با شعاع کوچک میزان درصد موفقیت بسیار پایین است. با افزایش شعاع پنجره تا ۱۱ پیکسل میزان درصد موفقیت افزایش یافته و بعد از آن نیز مجدداً کاهش می‌یابد. در مقابل میزان دقت مکانی تناظریابی با افزایش شعاع پنجره تناظریابی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد. پنجره با شعاع ۸ پیکسل بالاترین دقت مکانی تناظریابی را دارد. با توجه به نتایج شعاع پنجره تناظریابی به‌منظور انجام آزمایش‌ها برابر ۱۱ پیکسل انتخاب می‌شود. پنجره با این شعاع بالاترین درصد موفقیت را

■ عملکرد بعضی از الگوریتم‌ها در حالت مربوط به تغییرات روشنایی تفاوت شدیدی در برابر تغییرات هندسی دارد. در شکل ۷-۵) نتایج تناظریابی در تصاویر ساختگی بین‌بندی و شکل ۸-۵) نتایج را در تصاویر واقعی در حالت مربوط به تغییرات روشنایی را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود الگوریتم‌های MI، ISD و WCC بهترین عملکرد را در این تصاویر دارند. نکته قابل توجه افت شدید عملکرد الگوریتم‌های MI و ISD با افزایش تغییرات هندسی است. بنابراین هرچند الگوریتم‌های MI و ISD پایداری بالایی در برابر تغییرات روشنایی دارند اما اگر تصاویر مورد مقایسه علاوه بر اختلافات روشنایی دارای اختلافات هندسی و تاری شدگی نیز باشند عملکرد این الگوریتم‌ها با افت شدید مواجه خواهد شد و استفاده از آن‌ها پیشنهاد نمی‌شود. در برابر اختلافات روشنایی الگوریتم‌های SSD، JF و Tanimto ضعیف‌ترین نتایج را حاصل کرده‌اند.

■ نتایج در تصاویر واقعی و ساختگی روند نسبتاً مشابهی را نشان داده و تفاوت فاحشی مشاهده نمی‌شود. هرچند بعضی از معیارها نظیر معیار ساده SSD در تصاویر ماهواره‌ای واقعی در مقایسه با تصاویر ساختگی و واقعی برد کوتاه نتایج بسیار ضعیف‌تری را حاصل کرده‌اند.

■ دقت مکانی در بیشتر روش‌های تناظریابی الگو کمتر از یک پیکسل است که نشان از دقت نسبتاً بالای روش‌های تناظریابی الگو دارد. به‌طور کلی روش پیشنهادی WCC بالاترین دقت مکانی و الگوریتم ISD نیز پایین‌ترین دقت مکانی را دارد.

■ بر اساس نتایج مربوط به میانگین زمان محاسبات مطابق با شکل ۹ الگوریتم MI بیشتری زمان محاسباتی و الگوریتم ISD نیز که به‌صورت باینری بوده و از فاصله همینگ برای مقایسه استفاده می‌کند کمترین زمان محاسباتی را دارد. زمان محاسباتی دیگر الگوریتم‌ها نیز تقریباً در حدود یکدیگر است. استفاده از روش وزن‌دهی پیشنهادی در الگوریتم WCC در مقایسه با الگوریتم CC باعث افزایش حدود ۳۰ درصد زمان محاسبات شده است که با توجه به افزایش نسبتاً زیاد درصد موفقیت و RMSE قابل چشم‌پوشی است. هرچند که متوسط زمان محاسباتی این روش به‌طور کلی در حدود ۲ ثانیه است که نشان از سرعت محاسباتی نسبتاً بالا دارد.

■ به‌طور کلی بهترین عملکرد برای معیارهای درصد موفقیت و RMSE در بیشتر تصاویر مورد ارزیابی و برای انواع مختلف از اختلافات هندسی و رادیومتریکی مربوط به الگوریتم پیشنهادی ضریب همبستگی، WCC، است. ضریب همبستگی پایداری مناسبی در برابر تغییرات هندسی و روشنایی داشته و علاوه بر این روش وزن‌دهی پیشنهادی باعث افزایش پایداری این روش در برابر تغییرات هندسی و روشنایی در مقایسه با دیگر معیارها شده است.

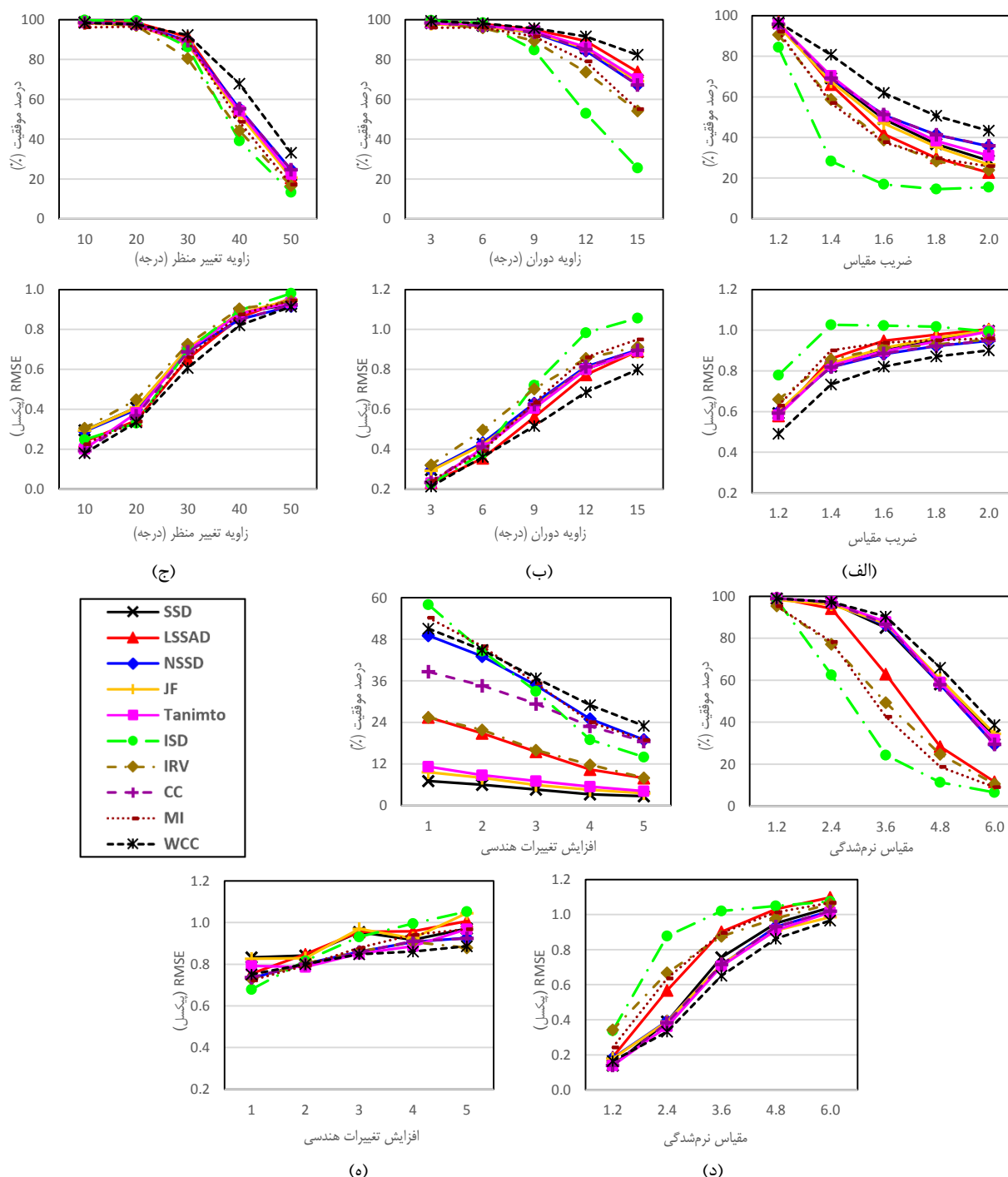
■ به‌طور کلی الگوریتمی که در تمامی موارد نتایج بدتری در مقایسه با دیگر الگوریتم‌ها داشته باشد، مشاهده نمی‌شود هر چند که در بیشتر آزمایش‌ها مربوط به تغییرات هندسی مقیاس، دوران، تغییرمنظر و تاری شدگی، معیار ISD نتایج ضعیف‌تری را در مقایسه با دیگر معیارها حاصل کرده است. در مقابل این معیار در تصاویر بین‌بندی ساختگی و تصاویر واقعی با تغییرات روشنایی عملکرد بسیار خوبی در مقایسه با دیگر معیارها دارد. از آنجاکه در این الگوریتم روند تغییرات مقدار عناصر پنجره‌های الگو و تناظریابی مقایسه می‌شود لذا پایداری آن در برابر تغییرات روشنایی بسیار بالا خواهد بود. در مقابل با تغییرات هندسی نظیر دوران و مقیاس درجات خاکستری مجاور یکدیگر تغییر کرده و الگوی تغییرات آن‌ها عوض شده و در نتیجه قابلیت این روش دچار افت شدیدی می‌شود.

■ الگوریتم‌های LSSSD، NSSD و CC عملکرد نسبتاً مشابهی داشته و نتایج آن‌ها تفاوت خیلی زیادی با یکدیگر ندارد. هر سه معیار روند محاسباتی نسبتاً مشابهی داشته و از میانگین و انحراف معیار پنجره‌ها برای نرمالیزه کردن و پایداری در برابر تغییرات روشنایی استفاده می‌کنند. دو معیار JF و Tanimto نیز در بسیاری از حالت‌ها عملکردی مشابه با سه معیار فوق دارند اما عملکرد آن‌ها در تصاویر ساختگی بین‌بندی، تصاویر واقعی با تغییرات شدید روشنایی و تصاویر ماهواره‌ای به‌شدت دچار افت می‌شود که دلیل آن نیز استفاده مستقیم از درجات خاکستری تصاویر است.

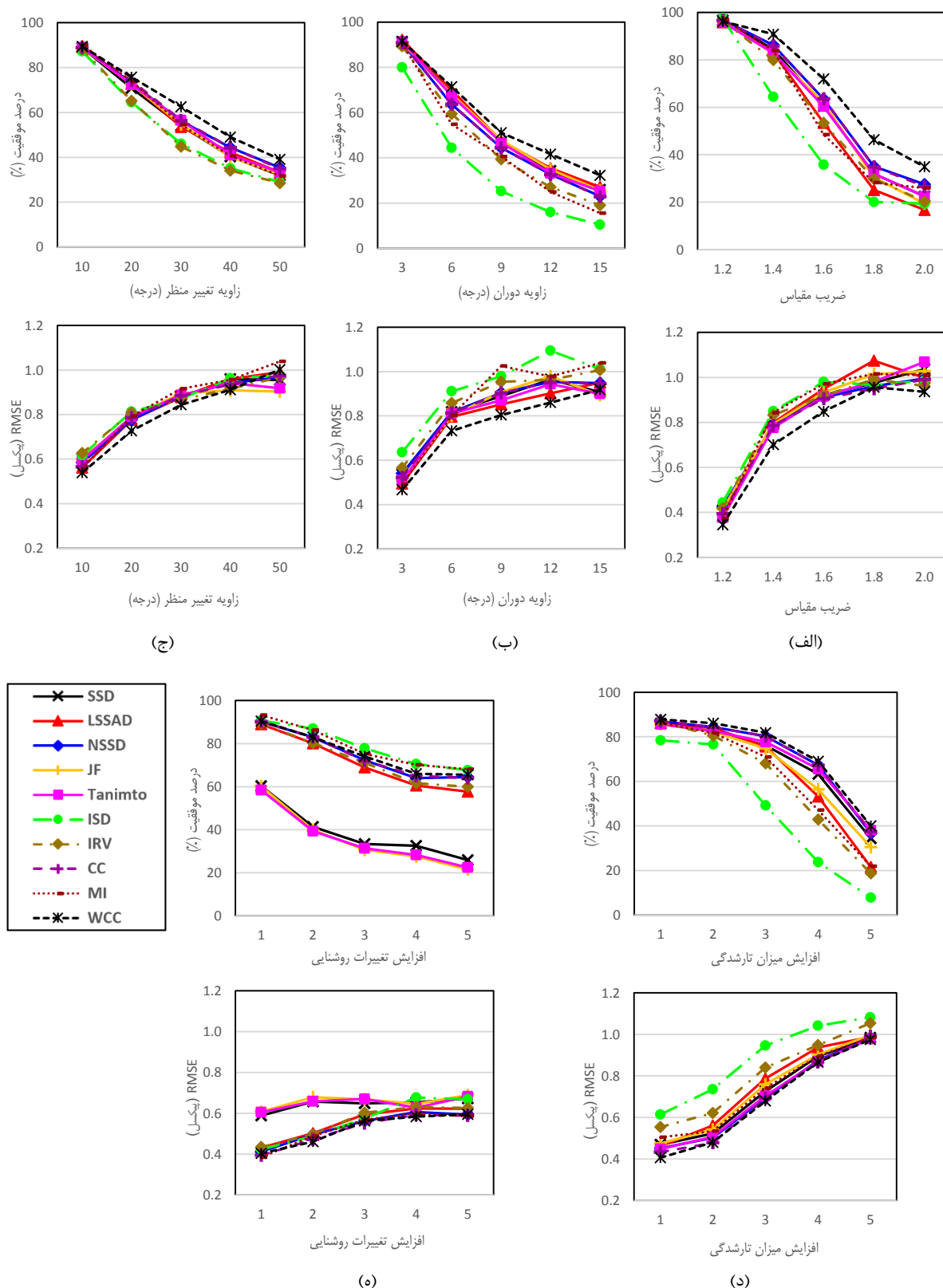
■ عملکرد تمامی الگوریتم‌های تناظریابی الگو در برابر تغییرات هندسی و رادیومتریکی دچار افت شده و هیچ‌کدام مستقل از این تغییرات نیستند هر چند که استفاده از روش وزن‌دهی پیشنهادی برای معیار ضریب همبستگی WCC باعث افزایش پایداری آن در برابر تغییرات هندسی و روشنایی شده است.

■ به طور متوسط میزان درصد موفقیت و دقت مکانی الگوریتم WCC در تصاویر برد کوتاه واقعی و برای انواع مختلف از اختلافات هندسی و روشنایی به ترتیب برابر ۷۴ درصد و ۰٫۷ پیکسل حاصل شده است و برای تصاویر ماهواره‌ای واقعی نیز به ترتیب برابر ۷۰ درصد و ۰٫۸ پیکسل حاصل شده است. بنابراین عملکرد این معیار در تصاویر برد کوتاه تا حدودی بهتر از تصاویر ماهواره‌ای است. این نتایج در دیگر معیارهای مقایسه نیز روند مشابهی را نشان می‌دهد.

ذکر این نکته ضروری است که در ارزیابی انجام شده در این تحقیق مطابق با هدف اصلی آن، هیچ فرآیند تصحیح و پیش‌پردازش بر روی تصاویر انجام نشده و معیارها بر روی درجات خاکستری اصلی تصاویر محاسبه شده‌اند. واضح است که استفاده از تصحیح‌های مختلف نظیر یک پارامتر انتقال یا مقیاس رادیومتریکی برای درجات خاکستری تصاویر مورد مقایسه ممکن است بر روی تغییر و بهبود عملکرد بعضی از الگوریتم‌ها تأثیر داشته باشد.



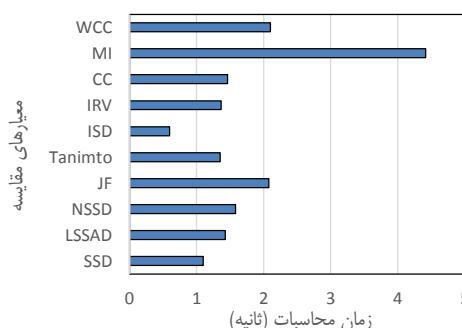
شکل ۷- نتایج درصد موفقیت و RMSE معیارهای مقایسه در تصاویر ساختگی و برای تغییرات مختلف هندسی و روشنایی (الف) تغییر مقیاس، (ب) تغییر دوران، (ج) تغییر منظر، (د) نرم‌شدگی، (ه) تناظریابی در باندهای متفاوت



شکل ۸- نتایج درصد موفقیت و RMSE معیارهای مقایسه در تصاویر واقعی و برای تغییرات مختلف هندسی و روشنایی (الف) تغییر مقیاس، (ب) تغییر دوران، (ج) تغییر منظر، (د) تار شدگی، (ه) تغییر روشنایی

جدول ۲- نتایج درصد موفقیت و RMSE برای تصاویر واقعی ماهواره‌ای (شماره تصاویر مطابق با شکل ۵ هستند)

شماره تصویر	درصد موفقیت (%)					دقت مکانی، RMSE (پیکسل)				
	۱	۲	۳	۴	۵	۱	۲	۳	۴	۵
SSD	۹۲٫۷	۲۰٫۲	۶۵	۱٫۸	۱٫۰	۰٫۷۱	۰٫۸۷	۰٫۹۶	۱٫۰۲	۱٫۰۵
LSSSD	۹۲٫۱	۸۷٫۷	۶۹٫۳	۳۹٫۸	۳۵٫۶	۰٫۷۱	۰٫۶۱	۰٫۸۴	۰٫۹۰	۰٫۹۱
NSSD	۹۳٫۵	۹۰٫۳	۷۰٫۳	۵۲٫۲	۳۶٫۴	۰٫۷۰	۰٫۶۳	۰٫۸۳	۰٫۹۲	۰٫۹۵
JF	۹۲٫۵	۲۴٫۳	۶٫۷	۳٫۰	۱٫۲	۰٫۷۱	۰٫۸۴	۰٫۹۵	۰٫۹۳	۱٫۱۰
Tanimto	۹۲٫۳	۳۰٫۸	۱۰٫۲	۸٫۶	۲٫۴	۰٫۷۲	۰٫۸۴	۰٫۸۸	۰٫۹۲	۱٫۰۳
ISD	۸۷٫۲	۹۱٫۷	۶۰٫۵	۳۴٫۸	۲۱٫۰	۰٫۸۱	۰٫۶۲	۰٫۸۵	۰٫۹۴	۱٫۰۰
IRV	۹۲٫۵	۸۵٫۶	۶۶٫۹	۳۴٫۴	۳۶٫۴	۰٫۷۲	۰٫۶۵	۰٫۸۶	۰٫۸۹	۰٫۹۲
CC	۹۳٫۳	۹۰٫۳	۷۰٫۸	۵۲٫۴	۳۵٫۸	۰٫۷۱	۰٫۶۳	۰٫۸۴	۰٫۹۲	۰٫۹۲
MI	۹۳٫۳	۹۱٫۳	۷۱٫۴	۴۳٫۶	۳۰٫۹	۰٫۷۵	۰٫۵۸	۰٫۸۷	۰٫۹۰	۰٫۹۵
WCC	۹۳٫۷	۹۰٫۳	۷۵٫۷	۵۵٫۲	۳۶٫۶	۰٫۷۳	۰٫۶۴	۰٫۷۷	۰٫۸۵	۰٫۸۸



شکل ۹- میانگین زمان انجام محاسبات تناظریابی برای تمامی معیارهای مورد مقایسه

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق ارزیابی کاملی از عملکرد انواع مختلف از الگوریتم‌های تناظریابی الگو در انواع مختلف از تصاویر برد کوتاه و ماهواره‌ای انجام شد. علاوه بر این به منظور افزایش پایداری الگوریتم‌ها در برابر اختلافات هندسی و روشنایی یک روش جدید وزن‌دهی بر مبنای سه پارامتر وزن مبتنی بر تابع گرادیان و تابع گوسی ارائه شد. در روش وزن‌دهی پیشنهادی پارامتر وزن اول برابر اندازه گرادیان پیکسل‌ها، پارامتر وزن دوم مربوط به اختلاف جهت گرادیان پیکسل‌ها در دو پنجره مورد مقایسه و پارامتر وزن سوم نیز بر اساس یک تابع گوسی دوبعدی است. روش وزن‌دهی پیشنهادی برای معیار شاخص ضریب همبستگی، CC، اعمال شده و روش جدیدی با عنوان ضریب همبستگی وزن‌دار، WCC، ارائه شد. الگوریتم‌های مورد مقایسه شامل ۹ الگوریتم SSD، LSSSD، NSSD، JF، Tanimto، ISD، IRV، CC و MI به همراه الگوریتم پیشنهادی WCC در مجموع ۱۰ الگوریتم بودند.

برای ارزیابی از دو دسته از تصاویر شامل تصاویر ساختمانی و تصاویر واقعی استفاده شد. تصاویر ساختمانی شامل ۸ تصویر برد کوتاه و ماهواره‌ای بوده که با استفاده از ۵ تغییر مختلف شامل مقیاس، دوران، تغییرمنظر، نرم‌شدگی و تصاویر بین‌باندی ایجاد شدند. تصاویر واقعی نیز شامل دو دسته تصاویر واقعی و ماهواره‌ای بودند. در تصاویر واقعی برد کوتاه از ۱۰ دسته داده Oxford در ۵ حالت مختلف شامل تغییرات مقیاس، دوران، تغییرمنظر، تار شدگی و تغییرات روشنایی استفاده شد. تصاویر واقعی ماهواره‌ای نیز شامل ۵ جفت تصویر ماهواره‌ای از سنجنده‌های IKONOS، Worldview و Geoeye، Quickbird، SPOT 4، ZY3 بودند. برای ارزیابی نیز از سه معیار درصد موفقیت، دقت مکانی و زمان محاسباتی استفاده شد.

بر اساس ارزیابی‌های انجام شده الگوریتم پیشنهادی WCC در بیشتر تصاویر و حالت‌ها بهترین نتیجه را داشته و الگوریتم ISD نیز بدترین نتایج را حاصل می‌کند. عملکرد الگوریتم‌های NSSD، LSSSD و CC در حدود یکدیگر هستند. الگوریتم ISD و MI بهترین پایداری را در برابر تغییرات روشنایی داشته اما عملکرد آن‌ها خصوصاً معیار ISD، با افزایش تغییرات هندسی دچار افت شدید می‌شود. الگوریتم‌های SSD، JF و Tanimto نیز ضعیف‌ترین الگوریتم‌ها در برابر تغییرات شدید روشنایی هستند. روند کلی عملکرد الگوریتم‌ها در هر دو دسته تصاویر ساختمانی و تصاویر واقعی و همچنین تصاویر برد کوتاه و تصاویر ماهواره‌ای تقریباً مشابه است. از نظر زمان محاسباتی الگوریتم MI کندترین الگوریتم و الگوریتم

ارزیابی قرار گیرد. در ارزیابی انجام شده در این تحقیق از یک پنجره با ابعاد یکسان برای ارزیابی عملکرد روش‌ها در مقایسه با یکدیگر استفاده شد، پیشنهاد می‌شود عملکرد الگوریتم‌ها برای پنجره‌های تناظریابی با ابعاد مختلف نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.

ISD نیز سریع‌ترین الگوریتم بوده و زمان محاسباتی دیگر الگوریتم‌ها نیز تقریباً در حدود یکدیگر است. پیشنهاد می‌شود معیارهای تناظریابی ناحیه‌مبنا در کاربردهای دیگر نظیر تناظریابی متراکم در تصاویر مختلف نظیر تصاویر با اختلاف‌های هندسی و مقیاس نیز مورد

مراجع

- [1] Zitova, B., and Flusser, J., (2003). "Image registration methods: a survey" Image and vision computing, Vol. 21, No. 11, PP. 977-1000.
- [2] Remondino, F., El-Hakim, S., Gruen, A., and Zhang, L., (2008). "Turning images into 3-D models" IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 25, No. 4, PP. 55-65.
- [3] Goshtasby, A. A., (2012). Image registration methods Principles, Tools and Methods, Springer.
- [4] Maes, F., Collignon, A., Vandermeulen, D., Marchal, G., and Suetens, P., (1997). "Multimodality image registration by maximization of mutual information" IEEE Transactions on Medical Imaging, Vol. 16, No. 2, PP. 187-198.
- [5] Chen, S., Li, X., Zhao, L., and Yang, H., (2018). "Medium-low resolution multisource remote sensing image registration based on SIFT and robust regional mutual information" International Journal of Remote Sensing, Vol. 39, No. 10, PP. 3215-3242.
- [6] Gruen, A., (2012). "Development and Status of Image Matching in Photogrammetry" The Photogrammetric Record, Vol. 27, No. 137, PP. 36-57.
- [7] Xiong, Z., and Zhang, Y., (2009). "A novel interest-point-matching algorithm for high-resolution satellite images" IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 47, No. 12, PP. 4189-4200.
- [8] Zhao, M., Wu, Y., Pan, S., Zhou, F., An, B., and Kaup, A., (2018). "Automatic Registration of Images with Inconsistent Content Through Line-Support Region Segmentation and Geometrical Outlier Removal" IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 27, No. 6, PP. 2731-2746.
- [9] Tuytelaars, T., and Mikolajczyk, K., (2008). "Local invariant feature detectors: a survey" Foundations and Trend in Computer Graphics and Vision, Vol. 3, No. 3, PP. 177-280.
- [10] Fan, B., Kong, Q., Wang, X., Wang, Z., Xiang, S., Pan, C., and Fua, P., (2017). "A Performance Evaluation of Local Features for Image Based 3D Reconstruction," Computer Vision and Pattern Recognition.
- [11] Wu, S., Oerlemans, A., Bakker, E. M., and Lew, M. S., (2017). "A comprehensive evaluation of local detectors and descriptors" Signal Processing: Image Communication, Vol. 59, No., PP. 150-167.
- [12] Lee, M. H., and Park, I. K., (2017). "Performance Evaluation of Local Descriptors for Maximally Stable Extremal Regions" Journal of Visual Communication and Image Representation, Vol. 47, No. 1, PP. 62-72.
- [13] Gesto-Diaz, M., Tombari, F., Gonzalez-Aguilera, D., Lopez-Fernandez, L., and Rodriguez-Gonzalez, P., (2017). "Feature matching evaluation for multimodal correspondence" ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 129, No., PP. 179-188.
- [14] Sedaghat, A., and Mohammadi, N., (2018). "Performance Evaluation of 2D Transformation Models for Satellite Image Registration" Journal of Geomatics Science and Technology, Vol. 8, No. 2, PP. 83-97.
- [15] Sedaghat, A., and Ebadi, H., (2016). "A Performance Evaluation of Local Descriptors in Optical Satellite Images" Iranian Remote Sensing & GIS, Vol. 7, No. 4, PP. 61-84.
- [16] Beaudet, P. R., (1978). "Rotationally invariant image operators" Proceedings of the International Joint Conference on Pattern Recognition, PP. 579-583.
- [17] Sedaghat, A., and Mohammadi, N., (2017). "Reliable Image Matching based On Hessian-Affine Detector and MROGH Descriptor" Journal of Geomatics Science and Technology, Vol. 7, No. 3, PP. 1-15.
- [18] Harris, C., and Stephens, M., (1988). "A combined corner and edge detector" Alvey vision conference, Manchester, UK, PP. 147-151.
- [19] Rosten, E., Porter, R., and Drummond, T., (2010). "Faster and better: A machine learning approach to corner detection" IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 32, No. 1, PP. 105-119.
- [20] Lowe, D. G., (2004). "Distinctive image features from scale-invariant keypoints" International journal of computer vision, Vol. 60, No. 2, PP. 91-110.

- [21] Matas, J., Chum, O., Urban, M., and Pajdla, T., (2004). "Robust wide-baseline stereo from maximally stable extremal regions" *Image and vision computing*, Vol. 22, No. 10, PP. 761-767.
- [22] Alcantarilla, P. F., Bartoli, A., and Davison, A. J., 2012, "KAZE features," *Computer Vision—ECCV 2012*, Springer, PP. 214-227.
- [23] Ramos, J. S., Watanabe, C. Y., Traina, C., and Traina, A. J., (2018). "How to speed up outliers removal in image matching" *Pattern Recognition Letters*, Vol. 114, No., PP. 31-40.
- [24] Korman, S., Reichman, D., Tsur, G., and Avidan, S., (2017). "Fast-match: Fast affine template matching", *International Journal of Computer Vision*, PP. 2331-2338.
- [25] Theodoridis, S., and Koutroumbas, K., (2009). *Pattern recognition*, Academic Press, New York.
- [26] Kaneko, S. i., Murase, I., and Igarashi, S., (2002). "Robust image registration by increment sign correlation" *Pattern Recognition*, Vol. 35, No. 10, PP. 2223-2234.
- [27] Heid, T., and Käab, A., (2012). "Evaluation of existing image matching methods for deriving glacier surface displacements globally from optical satellite imagery" *Remote Sensing of Environment*, Vol. 118, No., PP. 339-355.
- [28] Hirschmuller, H., and Scharstein, D., (2007). "Evaluation of cost functions for stereo matching" *Computer Vision and Pattern Recognition*, , PP. 1-8.
- [29] Aschwanden, P., and Guggenbuhl, W., (1992). "Experimental results from a comparative study on correlation-type registration algorithms" *Robust computer vision*, Vol., No., PP. 268-289.
- [30] Puzicha, J., Hofmann, T., and Buhmann, J. M., (1997). "Non-parametric similarity measures for unsupervised texture segmentation and image retrieval" *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, IEEE, PP. 267-272.
- [31] Vajda, I., (1989). *Theory of statistical inference and information*, Kluwer Academic Pub.
- [32] Goshtasby, A. A., (2005). *2-D and 3-D image registration: for medical, remote sensing, and industrial applications*, John Wiley & Sons.
- [33] Schenk, T., (1999). *Digital photogrammetry*, Volume I, TerraScience.
- [34] Gruen, A., (1985). "Adaptive least squares correlation: a powerful image matching technique" *South African Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Cartography*, Vol. 14, No. 3, PP. 175-187.
- [35] Liu, W., Wang, Y., Chen, J., Guo, J., and Lu, Y., (2012). "A completely affine invariant image-matching method based on perspective projection" *Machine Vision and Applications*, Vol. 23, No. 2, PP. 231-242.
- [36] Mikolajczyk, K., and Schmid, C., (2005). "A performance evaluation of local descriptors" *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 27, No. 10, PP. 1615-1630.
- [37] Schmid, C., Mohr, R., and Bauckhage, C., (2000). "Evaluation of interest point detectors" *International Journal of computer vision*, Vol. 37, No. 2, PP. 151-172.