

برآورد خودکار ضریب کاهش حد تفکیک تصاویر پهپاد مبتنی بر تارگت ستاره‌ی زیمنس

سید آریا فخری^{۱*}، محمد سعادت سرشت^۲، مسعود ورشوساز^۳، حمزه ذاکری^۴

^۱ کارشناس ارشد فتوگرامتری - دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی -

دانشگاه تهران

aryafakhri@ut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری و اطلاعات مکانی - پردیس دانشکده‌های فنی - دانشگاه تهران

msaadat@ut.ac.ir

^۳ دانشیار دانشکده مهندسی نقشه‌برداری - دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی

varshosazm@kntu.ac.ir

^۴ استاد پژوهشگر دانشکده عمران و محیط‌زیست - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

h-zakeri@aut.ac.ir

(تاریخ دریافت خرداد ۱۳۹۹، تاریخ تصویب اسفند ۱۳۹۹)

چکیده

در چند سال اخیر، به‌کارگیری پرنده‌های بدون سرنشین باقابلیت هدایت از راه دور که به پهپاد معروف است به شکل گسترده‌ای در مهندسی نقشه‌برداری تحت عنوان فتوگرامتری پهپاد مطرح شده است و از طرفی به دلیل در اختیار داشتن پهپادها به‌عنوان یکی از مهم‌ترین سکوها جهت کاربردهای فتوگرامتری از مناطق مختلف شهری و غیرشهری در مقیاس‌های متفاوت، شرایط بررسی و ارزیابی دقت هندسی این تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا، در تولید و به‌روزرسانی نقشه‌های بزرگ‌مقیاس پوششی را فراهم می‌کند. یکی از مهم‌ترین پارامترهای هندسی در تصاویر پهپاد، تعیین حد تفکیک مکانی بوده که به‌عنوان معیاری جهت تشخیص کوچک‌ترین فاصله بین دو شی مجاور قابل تفکیک در تصاویر شناخته شده است. روش‌های مختلفی جهت اندازه‌گیری دقیق حد تفکیک مکانی تصاویر وجود دارد؛ که در این پژوهش از ستاره زیمنس، به‌عنوان یکی از پرکاربردترین تارگت‌های مصنوعی مورد استفاده در اندازه‌گیری حد تفکیک مکانی، استفاده شده است. هدف از این مقاله ارائه روشی خودکار جهت تشخیص شعاع دایره ابهام و محاسبه حد تفکیک مکانی در تصاویر اخذ شده از پهپاد می‌باشد. نتایج این تحقیق نشان داد اولاً با توجه به ارتفاع پرواز و میزان تاری تصویر باید از تارگت ستاره زیمنس با ابعاد و تعداد بازو مناسب استفاده کرد و ثانیاً میزان کاهش حد تفکیک تصاویر در پهپادهای مورد آزمون اعدادی بین ۱/۲ تا ۳/۷ بوده است.

واژگان کلیدی: پهپاد، حد تفکیک مکانی، ستاره زیمنس

۱- مقدمه

فتوگرامتری، علم، هنر و فناوری استخراج اطلاعات مکانی از طریق ثبت، اندازه‌گیری و تفسیر عوارض بر روی تصاویر رقومی و یا آنالوگ می‌باشد که بر اساس فاصله جسم تا تصویر به سه دسته‌ی فضایی، هوایی و برد کوتاه تقسیم می‌شود [۱، ۲]. در فتوگرامتری برد کوتاه بر اساس آنالیز تصاویر اخذ شده از فاصله نزدیک (حداکثر ۳۰۰ متر)، به اندازه‌گیری، برداشت و مدل‌سازی اجسام و محوطه‌ها پرداخته می‌شود [۳، ۴]. یکی از مهم‌ترین تجهیزاتی که در این فناوری به‌منظور سکوی اخذ داده مورد استفاده قرار می‌گیرد، سامانه فتوگرامتری پهپاد است. این فناوری در سال‌های اخیر به دلیل هزینه پایین، دسترسی و سرعت نسبی بالا به یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین موضوعات روز فتوگرامتری تبدیل شده است [۵، ۶]. از این پرنده‌ها می‌توان جهت تولید محصولات مکانی با کیفیت، از جمله ابر نقاط متراکم، مدل رقومی ارتفاعی زمین و سطح، ارتوفتوموزائیک و مدل‌سازی‌های سه‌بعدی استفاده کرد [۵]. جهت تولید محصولات مکانی باید قبل از انجام عملیات فتوگرامتری با پهپاد، طراحی شبکه انجام گردد [۷]. این طراحی شامل انتخاب GSD^1 (فاصله نمونه‌برداری بر روی زمین) متناسب با مقیاس نقشه و یا دقت اطلاعات مکانی مورد نیاز و همچنین وضوح تصاویر دوربین مورد استفاده، طراحی خطوط پرواز متناسب با شکل و ابعاد محدوده مورد نظر، پوشش عرضی مورد نیاز، تعیین ارتفاع پرواز در خطوط مختلف پروازی با توجه به فاصله کانونی دوربین و با لحاظ نمودن تغییرات ارتفاع منطقه، تعیین پوشش طولی، طراحی خطوط پروازی کراس (در صورت نیاز)، برآورد تعداد پرواز لازم برای پوشش کامل منطقه با توجه به مشخصات پرنده و مداومت پروازی آن و همچنین برآورد میزان کشیدگی تصویر در امتداد پرواز با توجه به سرعت پرنده است [۸]. دوربین‌های مورد استفاده در پهپادها دارای مزایایی از قبیل قیمت، وزن و قدرت تفکیک بالا می‌باشند اما از جمله نکات منفی و تأثیرگذار در مدل‌سازی‌های دقیق سه‌بعدی، استحکام پایین عدسی در دوربین‌های غیر تخصصی مورد استفاده در این پرنده‌ها است [۹] که موجب پایین‌تر شدن وضوح تصویر نسبت به GSD می‌باشد [۸].

بر این اساس حد تفکیک مکانی^۲ سنجنده که توصیف‌کننده کیفیت تفکیک‌پذیری عوارض هندسی و تشخیص جزئیات آن‌ها است با معیار حداقل فاصله‌ی قابل تشخیص بر روی زمین^۳ (GRD) تعریف می‌شود که ارتباط مستقیمی به فاصله نمونه‌برداری تصویر بر روی زمین (GSD) دارد. علاوه بر این عواملی نظیر وضوح عدسی، لرزش سکو، کشیدگی تصویری خطی و دورانی، عدم قابلیت دید ناشی از گردوغبار و دود و مه، شرایط نوری مؤثر بر روشنایی و کنتراست تصویر و بالاخره شرایط ایجاد پدیده تفرق ناشی از فیزیک نور موجی (وقتی دریچه دیافراگم یا ابعاد پیکسل سنجنده خیلی کوچک است) روی کاهش حد تفکیک تصویر تأثیر می‌گذارند. لذا کلیه این عوامل به‌صورت یک ضریب k در رابطه $GRD=k.GSD$ مدل‌سازی می‌شود. از آنجاکه طراحی ارتفاع پرواز بر اساس GSD بوده پس تخمین مناسبی از k به‌عنوان بخشی از گزارش فنی عملیات تهیه نقشه و اطلاعات مکانی ضروری می‌باشد. با توجه به اینکه در طراحی ارتفاع پرواز از رابطه $H=f/ps*GSD$ استفاده می‌شود که در آن f فاصله کانونی عدسی، ps ابعاد پیکسل سنجنده و GSD ابعاد پیکسل روی زمین است باید GSD مشخص شود. از طرفی GSD از روی GRD به دست می‌آید $GSD=GRD/k$ و GRD از روی مقیاس نقشه طبق دستورالعمل تعیین می‌شود. اساساً برای تهیه نقشه‌ای که مقیاس آن به‌عنوان مثال ۱:۵۰۰، ۱:۱۰۰۰ یا ۱:۲۰۰۰ باشد، باید مقدار GRD برابر ۸٪ عدد مقیاس نقشه که معادل ۴-۸-۱۶ سانتیمتر با ۲۵٪ کاهش یا افزایش باشد؛ بنابراین مقیاس نقشه درخواستی منجر به تعیین GRD شده و با داشتن k مقدار GSD محاسبه شده و با داشتن آن، f و ps مقدار ارتفاع پرواز H طراحی می‌شود.

نکته دیگر از آنجاکه وضوح عدسی ممکن است در پروژه‌های تصویربرداری مختلف تغییر نماید، قرار دادن تارگت تست حد تفکیک متناسب (ستاره زیمنس^۴ یا میله ای) با مشخصات دوربین تصویربرداری، ارتفاع پرواز، پوشش منطقه و GSD تصویربرداری ضروری می‌باشد [۸]. در این راستا، مقاله به هفت بخش تقسیم شده است. بعد از مقدمه و در بخش پیشینه تحقیق، به تحقیقاتی انجام شده

^۲ Spatial Resolution^۳ Ground Resolved Distance^۴ Siemens star^۱ Ground Sampling Distance

ثابت به ترتیب ۴/۰۸ و ۷/۹۴ به دست آمد و همچنین مقدار به دست آمده در ارتفاع ۱۳۰ متر ۴/۱۰ محاسبه گردید. بر این اساس آن‌ها به این نتیجه رسیدند که اولاً تعیین حد تفکیک مکانی تصاویر حاصل از ارتوفتو به دست آمده توسط پهپاد در ارتفاع‌های مختلف با حالت تئوری مطابقت دارد و ثانیاً حد تفکیک مکانی در ارتفاع‌های ثابت در هر دو نوع پهپاد بال ثابت و مولتی‌روتور تقریباً یکسان بوده که عمده تفاوت آن‌ها در میزان رنگ تصاویر می‌باشد.

Lim و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۲] به دلیل اینکه آب‌وهوا می‌تواند موجب تاری در تصاویر شود مطالعاتی را در خصوص وضوح مکانی تصاویر با استفاده از شاخص‌های عملکرد واقعی از قبیل GRD و NIIRS انجام دادند سپس با استخراج پارامترهای مربوط به کیفیت تصویر از قبیل MTF، RER و SNR از طریق استفاده از روش آنالیز لبه در پهپادها شروع به تحلیل نتایج نمودند؛ که نتیجه تجزیه و تحلیل آن‌ها نشان دهنده وابستگی GSD و NIIRS به ارتفاع تصویربرداری بود و همچنین GRD و حد تفکیک مکانی تصاویر دامنه ارتقاء بهینه را نشان داد درحالی که در شرایط مختلف آب و هوایی عملکرد متفاوت است.

Lee و همکاران در سال ۲۰۱۹ [۱۳] با توجه به اینکه یکی از مهم‌ترین پارامترهای ارزیابی کیفیت تصاویر پهپاد، تشخیص حد تفکیک مکانی است مطالعاتی را با رویکرد ارزیابی وضوح مکانی و تعیین MTF با استفاده از تارگت نواری و ستاره زیمنس به عنوان بخشی از ارزیابی کیفیت تصاویر UAV پیشنهاد کردند. بدین منظور تصاویری را در ارتفاع‌های ۱۳۰ و ۲۶۰ متر با پهپاد بال ثابت eBee(Canon IXUS) و در ارتفاع‌های ۱۳۰ و ۹۰ متر با پهپادهای مولتی روتور GD-800(SONY NEX-5N) و Phantom 4 (pro(FC 6310 اخذ نمودند. GSD به دست آمده توسط پهپادهای مولتی‌روتور و بال ثابت، با صرف نظر از تفاوت نوع دوربین‌های بکار گرفته شده، تقریباً یکسان بوده و همچنین وضوح اندازه‌گیری شده توسط ستاره زیمنس حدود ۱ الی ۲ سانتی‌متر کمتر از تارگت نواری در هر ارتفاع پرواز بود.

۳- تئوری حد تفکیک مکانی

حد تفکیک مکانی در یک سامانه اپتیکی به عوامل مختلفی از قبیل وضوح صحنه، شفافیت عدسی، ابعاد

در زمینه تعیین حد تفکیک مکانی تصاویر هوایی پرداخته شده است. پس از آن در بخش سوم، مبانی مرتبط با حد تفکیک مکانی و عوامل مؤثر بر آن بحث می‌شود. سپس روند تشخیص خودکار حد تفکیک مکانی به شکلی که در این مقاله توسعه یافته است، توضیح داده می‌شود. در بخش ششم آزمون‌های انجام شده جهت ارزیابی روش پیشنهادی گزارش و نتایج مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرند. در نهایت در بخش هفتم مطالب مقاله جمع‌بندی شده و پیشنهادهایی برای ادامه کار ارائه می‌گردد.

۲- پیشینه تحقیق

به طور کلی روش‌های اندازه‌گیری پارامترهای حد تفکیک مکانی به دودسته روش‌های آزمایشگاهی و میدانی تقسیم‌بندی می‌شوند که امکان انجام روش‌های آزمایشگاهی در هر شرایط و زمانی وجود ندارد و بر این اساس روش‌های میدانی به عنوان پرکاربردترین روش‌ها جهت اندازه‌گیری این پارامترها بوده که خود به دودسته کلی شامل استفاده از تارگتهایی با شکل هندسی مشخص و یا استفاده از عوارض طبیعی موجود در تصاویر تقسیم می‌شوند [۱۰] که در اینجا به برخی از روش‌های استفاده از تارگت‌های دارای اشکال هندسی اشاره می‌گردد:

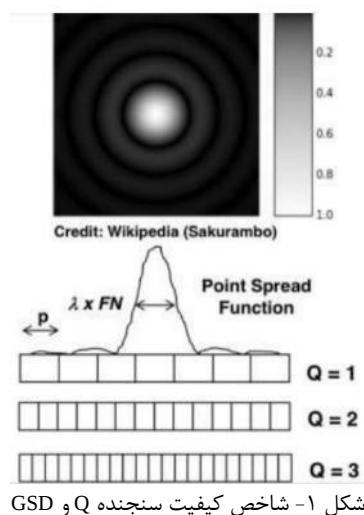
Azimi و همکاران در سال ۲۰۱۳ [۱۰] در پژوهشی جهت تعیین حد تفکیک مکانی تصاویر سنجنده Ultra Camd با استفاده از ستاره زیمنس مطالعاتی را انجام دادند. مراحل کلی روش آن‌ها به ۳ دسته تقسیم می‌شود که عبارت‌اند از: تشکیل پروفیل‌های دایره‌ای به مرکز ستاره زیمنس، برآورد تابع گسسته کنتراست و تخمین حد تفکیک مکانی دوربین. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که حد تفکیک اندازه‌گیری شده، اندکی از مقدار اسمی آن کمتر می‌باشد.

Lee و همکاران در سال ۲۰۱۶ [۱۱] با بهره‌گیری از تصاویر پهپادهای بال ثابت و مولتی‌روتور مطالعاتی را در خصوص ارزیابی حد تفکیک مکانی تصاویر انجام دادند. آن‌ها تصاویری را از ارتفاع‌های ۱۳۰ و ۲۶۰ متر با دوربین Canon IXUS 127 HS نصب شده بر روی پهپاد بال ثابت و مولتی‌روتور از ستاره زیمنس اخذ نمودند که GSD به دست آمده در ارتفاع ۱۳۰ و ۲۶۰ متر با پهپاد بال

ناشی از لرزش دوربین، جابه‌جایی سریع و نسبی عدسی و سنجنده در خلاف جهت لرزش است که به آن پایداری سازی عدسی^۴ یا سنجنده می‌گویند. البته به علت تغییر لحظه‌ای پارامترهای نقطه اصلی در توجیه داخلی استفاده از این روش به‌هیچ‌وجه در فتوگرامتری توصیه نمی‌شود.

۳-۱- محاسبه حد تفکیک مکانی

جهت محاسبه حد تفکیک مکانی GRD بر اساس ابعاد پیکسل زمینی GSD و از طریق شاخص کیفیت سنجنده Q مطابق شکل ۱ عمل می‌گردد. Q به پارامترهای ابعاد پیکسل (p)، سرعت عدسی (FN) و طول موج نور (λ) وابسته بوده و بایستی پارامترها به‌گونه‌ای تنظیم شوند که Q نزدیک ۲ شود.



▪ حد تفکیک مکانی با اعمال محدودیت تفرق سنجنده و لحاظ معیار رایلی (رابطه ۱):

$$GRD = 1.22 \times \frac{\lambda}{D} \times H \quad (1)$$

▪ ابعاد پیکسل زمینی سنجنده (رابطه ۲):

$$GSD = \frac{p}{L} \times H = IFOV \times H \quad (2)$$

▪ شاخص کیفیت سنجنده (رابطه ۳):

$$Q = \frac{\lambda \times FN}{p}, FN = \frac{L}{D} \quad (3)$$

▪ بر اساس روابط GRD-GSD-Q (رابطه ۴):

$$GRD = 1.22 \times Q \times QSD \quad (4)$$

پیکسل سنجنده و پدیده تفرق^۱ و کشیدگی تصویری^۲ بستگی دارد:

(۱) وضوح صحنه: دربرگیرنده قابلیت مشاهده جزئیات در صحنه است و به عواملی همچون نور محیط، گردوغبار و مه وابسته است.

(۲) شفافیت عدسی: وابسته به میزان وضوح است و با تابع پخش نقطه^۳ اندازه‌گیری می‌شود. هرچه شفافیت عدسی بیشتر باشد PSF آن کمتر بوده و تاری تصویر کمتر است. شفافیت عدسی به کیفیت، همگونی و جنس مواد به‌کاررفته در عدسی و کیفیت تراش آن بستگی دارد.

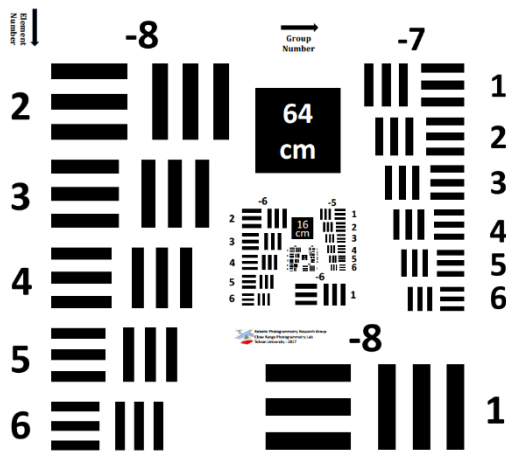
(۳) ابعاد پیکسل سنجنده: درواقع فاصله نمونه‌برداری تصویری است که اگر در مقیاس عکس ضرب شود، فاصله نمونه‌برداری زمینی به دست می‌آید که شاخص تأثیرگذار در دقت مکانی عوارض برداشت‌شده است. گفتنی است حد تفکیک سنجنده که در عموم اصطلاحاً با مگاپیکسل دوربین شناخته می‌شود همان ابعاد پیکسل سنجنده است. با کاهش ابعاد پیکسل سنجنده، کیفیت تصویر و سطح جزئیات قابل بازیابی از آن افزایش می‌یابد اما از یک حد آستانه به بعد، کیفیت تصویر با کوچک‌تر شدن ابعاد پیکسل‌ها بهبود نمی‌یابد. علت این مسئله آن است که اگر ابعاد پیکسل از یک حد کوچک‌تر شود، علاوه بر کاهش سطح مؤثر ثبت نور که منجر به افزایش نویز مقادیر درجات روشنایی می‌شود، پدیده تفرق نور رخ می‌دهد و در نتیجه به خاطر رفتار موجی نور، تصویر تار شده و جزئیات از دست می‌رود. در ضمن باید دقت کرد که افزایش حد تفکیک علاوه بر مشکلات بالا، منجر به طولانی شدن زمان پردازش نیز می‌گردد.

(۴) کشیدگی تصویری: درواقع ناشی از ثبت یک نقطه از شیء در مکان‌های مختلف تصویر بوده و علت اصلی آن جابه‌جایی نسبی دوربین و شیء در فاصله زمانی باز بودن شاتر است. لرزش دوربین، تصویربرداری از جسم متحرک و تصویربرداری در حین حرکت مانند آنچه در فتوگرامتری پهپاد رخ می‌دهد از عوامل ایجاد کشیدگی تصویری هستند. برای کاهش کشیدگی تصویری باید سرعت شاتر را افزایش داد، فاصله تا شیء را بیشتر کرد و فاصله کانونی را کاهش داد. روش دیگر برای کاهش کشیدگی تصویری

^۱ Diffraction

^۲ Image Motion

^۳ Point Spread Function - PSF

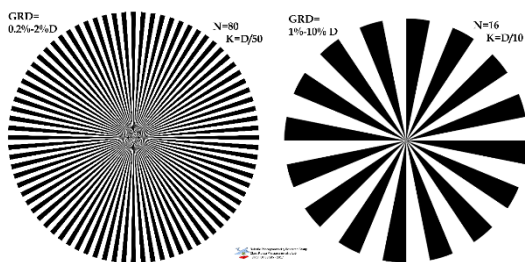


شکل ۲- صفحه آزمون USAF

۳-۲-۲- صفحه آزمون زیمنس

صفحه آزمون زیمنس به صورت قطاع‌های سیاه و سفید از یک دایره بوده که هرچه به سمت مرکز می‌رویم، تشخیص آن‌ها از هم مشکل‌تر می‌شود. در یک شعاع خاص، قطاع‌های سیاه و سفید در هم محوشده و به صورت دایره خاکستری خود را نشان می‌دهند. نسبت قدرت تفکیک مکانی به اندازه پیکسل زمینی برابر ضریبی از قطر این دایره خاکستری خواهد بود که این ضریب به تعداد قطاع‌ها بستگی داشته و از رابطه ۶ قابل محاسبه است (n تعداد جفت بازوی تارگت و D قطر دایره ابهام). مهم‌ترین مزایای صفحه آزمون زیمنس سادگی کار با آن، عدم وابستگی به جهت پرواز و مقیاس پلات، دقت و پایداری بالای آن در محاسبه قدرت تفکیک مکانی به واسطه در نظر گرفتن همه جهات است. افزون بر این، مستقل از ارتفاع پرواز و ابعاد پیکسل زمینی، مقدار نسبی کاهش حد تفکیک را به طور مستقیم محاسبه می‌کند.

$$\frac{GRD}{GSD} = K = \frac{D}{2 \sin \frac{\pi}{n}} \quad (6)$$



شکل ۳- دو نمونه از صفحه آزمون زیمنس جهت تعیین حد تفکیک مکانی تصاویر هوایی

با توجه به نمونه‌برداری Nyquist با لحاظ کردن مقدار $Q=2$ منجر به حد تفکیک بهینه می‌شود. انتخاب مقدار Q یک پارامتر مهم در طراحی می‌باشد.

۳-۲- محاسبه حد تفکیک مکانی بر اساس صفحات آزمون

جهت محاسبه حد تفکیک مکانی از صفحات آزمون حد تفکیک استفاده می‌شود که دو نمونه از پرکاربردترین آن‌ها عبارتند از صفحه آزمون USAF (شکل ۲) و صفحه آزمون زیمنس (شکل ۳).

۳-۲-۱- صفحه آزمون USAF

این صفحه آزمون ابتدا توسط نیروی هوایی آمریکا در سال ۱۹۵۱ میلادی ارائه شد و بعدها اصلاحات گوناگونی روی آن صورت گرفت. جهت انجام این آزمون ابتدا باید این صفحه را با ابعاد صحیح پلات گرفت و پیش از پرواز روی زمین در جهت پرواز پهن کرد. به راین اساس توسط خطوط افقی و قائم می‌توان حد تفکیک مکانی را در دو جهت پرواز و عمود بر آن تخمین زد. به طور معمول به خاطر کشیدگی تصویری، حد تفکیک مکانی در جهت پرواز کمتر از جهت عمود بر آن است. برای آنکه صفحه آزمون باریک و دراز نشود، دسته‌های خطوط را به صورت مارپیچ کنار هم چیده شده است و دو شماره گروه (منفی هشت تا منفی سه) و شماره المان (یک تا شش) به هر یک نسبت داده شده است. ابعاد و ضخامت خطوط هر گروه نصف گروه بعدی است. در داخل هر گروه نیز ابعاد هر المان به اندازه دوازده درصد نسبت به المان پیشین کوچک می‌شود. به این ترتیب با یک محاسبه ساده مطابق رابطه ۵ می‌توان قدرت تفکیک مکانی را بر حسب تعداد جفت خط در میلی‌متر lp/mm به دست آورد. البته برای محاسبه آن بر حسب میلی‌متر، کافی است عدد دو را به آن تقسیم کرد.

$$GRD \left(\frac{lp}{mm} \right) = 2 \left(GroupNumber + \frac{ElementNumber-1}{6} \right) \quad (5)$$

۴- مواد و روش

۴-۱- منطقه مورد مطالعه

جهت محاسبه حد تفکیک مکانی، از تصاویر اخذشده توسط پهپاد در ارتفاع‌های مختلف واقع در ناحیه‌ی جنوبی بهشت سکینه در شهرستان کرج با مختصات عرض جغرافیایی ۳۵,۵۳۲۲ و طول جغرافیایی ۵۰,۵۲۴۴ [۱۴] و ناحیه‌ی غربی شهرستان طالقان از توابع استان البرز با مختصات عرض جغرافیایی ۳۶,۱۷۸۰ و طول جغرافیایی ۵۰,۷۶۸۱ تصویربرداری گردید. این نواحی به لحاظ توپوگرافی، تپه‌ماهور محسوب می‌گردند. تصویربرداری طی ساعات ۹ الی ۱۲ و در شرایط هوایی آفتابی صورت گرفته است. شکل ۴ نمونه‌ای از تصاویر گرفته‌شده از تارگت زیمنس را توسط پهپادهای موردنظر را نشان می‌دهد.



الف - تصویر اخذشده توسط پهپاد فانتوم ۴ پرو (ارتفاع ۱۱ متر)



ب - تصویر اخذشده توسط پهپاد ماویک پرو (ارتفاع ۱۲ متر)

ج - تصویر اخذشده توسط پهپاد هگزاتور (ارتفاع ۱۰۰ متر)
شکل ۴ - نمونه‌ای از تصاویر اخذشده توسط پهپادهای موردنظر

۴-۲- پهپادهای مورد استفاده

جهت اخذ تصاویر، از دو پهپاد فانتوم ۴ پرو نو و کارکرده، پهپاد ماویک پرو و پهپاد هگزاتور با دوربین Canon-M (شکل ۵) استفاده گردیده است. این پهپادها توسط کنترلر، کنترل می‌شوند. میانگین پرواز در پهپاد فانتوم ۴ پرو، ۳۰ دقیقه، پهپاد ماویک پرو، ۲۷ دقیقه و پهپاد هگزاتور با دوربین Canon-M، ۳۰ دقیقه می‌باشد. این پهپادها دارای یک دوربین غیر متریک به مشخصات جدول ۱ می‌باشند:



شکل ۵- الف: پهپاد فانتوم ۴ پرو، ب: پهپاد ماویک پرو، ج: پهپاد هگزاتور با دوربین Canon-M

جدول ۱- مشخصات دوربین بکار گرفته شده در پهپادهای موردنظر

مشخصات	فانتوم ۴ پرو	ماویک پرو	هگزاتور
فاصله کانونی (mm)	۸/۸	۵	۲۲
کیفیت دوربین	۲۰	۱۲	۱۸
ابعاد عکس	۵۴۷۲×۳۶۴۸	۴۰۰۰×۳۰۰۰	۵۱۸۵×۳۴۵۶
ابعاد حس گر (mm)	۱۳/۲×۸/۸	۶/۱۷×۴/۵۵	۲۲/۳×۱۴/۹

۴-۳- نرم‌افزار مورد استفاده

جهت پیاده‌سازی الگوریتم تعیین حد تفکیک مکانی به صورت خودکار، از برنامه Matlab 2019a استفاده شد.

۴-۴- روش کار

روش پیشنهادی جهت محاسبه خودکار حد تفکیک مکانی تصاویر اخذشده توسط پهپاد، شامل ۲ گام عملیاتی و پردازشی است:

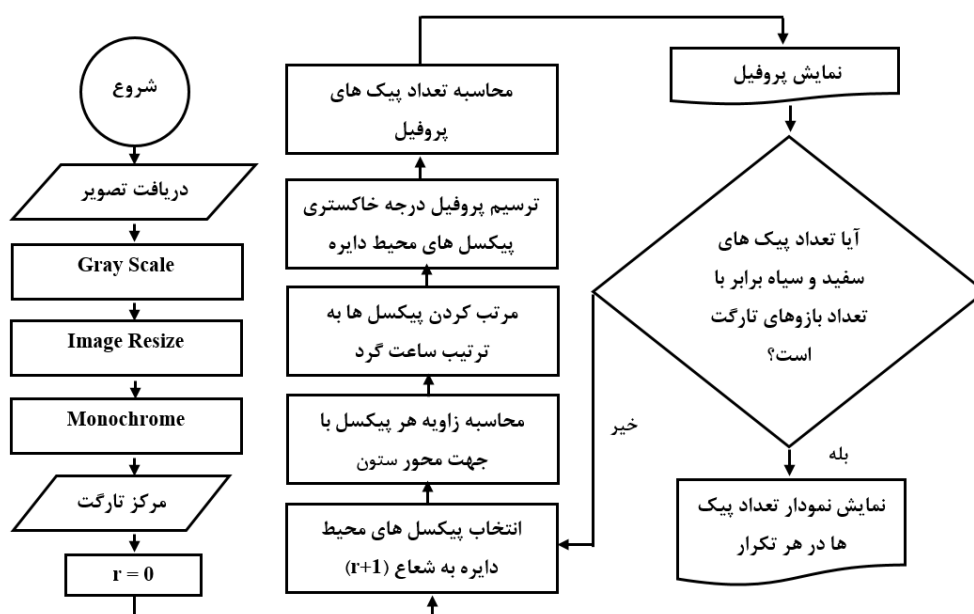
فاز عملیاتی شامل طراحی تارگت و تصویربرداری از آن در ارتفاع‌های مختلف می‌باشد.

فاز پردازشی شامل محاسبه خودکار ضریب GRD به GSD بر اساس قطر دایره ابهام می‌باشد. در این مرحله، جهت محاسبه حد تفکیک مکانی به صورت خودکار، ابتدا باید دایره‌ی ابهام را در مرکز تارگت به نحوی ایجاد نماییم

پیکسل‌های محیط دایره جهت تهیه پروفیل طولی آن‌ها.

- محاسبه تعداد پیک‌های پروفیل طولی و مقایسه‌ی آن با تعداد بازوی تارگت، که در صورت کمتر بودن تعداد بازو، به شعاع دایره یک پیکسل اضافه‌شده و مجدد روند بالا تا زمانی که تعداد پیک‌های پروفیل و تعداد بازو برابر باشد تکرار می‌گردد و سپس برنامه متوقف‌شده و بر اساس قطر دایره ضریب حد تفکیک مکانی محاسبه می‌شود.

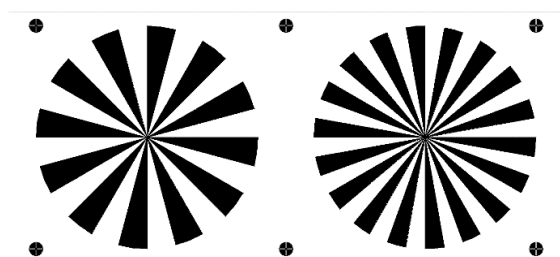
فلوچارت کلی این مراحل در شکل ۶ نشان داده‌شده است.



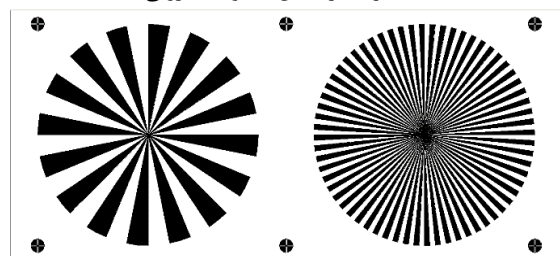
شکل ۶- فلوچارت روش پیشنهادی جهت تشخیص حد تفکیک مکانی

۵- تعیین حد تفکیک مکانی پرنده‌های مورد استفاده

جهت تعیین حد تفکیک مکانی پرنده‌های مورد استفاده بر اساس تارگت زیمنس و مطابق روش پیشنهادی در دو فاز عملیاتی و پردازشی اقدام گردید که در فاز عملیاتی لازم است ابتدا تارگت زیمنس طراحی و چاپ‌شده و در محدوده‌ی تصویربرداری بر روی زمین ثابت گردد. بر این اساس ابتدا ستاره‌های زیمنس را به قطر ۸۰ سانتی‌متر طراحی کرده و در گوشه‌های صفحه، دایره‌هایی به قطر ۵ سانتی‌متر و به فاصله ۱ متر از یکدیگر مطابق شکل ۷ قرار می‌گیرد.



الف: تارگت زیمنس ۱۶ و ۶۴ بازویی



ب: تارگت زیمنس ۱۲ و ۱۸ بازویی
شکل ۷- نحوه طراحی تارگت زیمنس

فانتوم ۴ پرو کارکرده و همچنین پهپاد مویک پرو در ارتفاع‌های مختلف مطابق شکل ۸ و ۹ ثبت گردید.

پس از ثابت شدن تارگت زیمنس ۱۶ و ۶۴ بازویی در منطقه موردنظر (کرج)، تصاویر اخذشده توسط پهپادهای



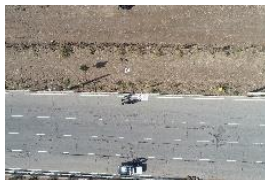
پ: ارتفاع ۱۵ متر



ب: ارتفاع ۱۱ متر



الف: ارتفاع ۵ متر



ج: ارتفاع ۳۶ متر



ث: ارتفاع ۳۱ متر



ت: ارتفاع ۲۵ متر

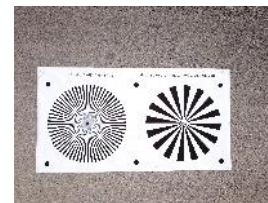
شکل ۸- تصویربرداری از تارگت زیمنس ۱۶ و ۶۴ بازویی توسط دوربین فانتوم ۴ پرو کارکرده از ارتفاع ۵ الی ۳۶ متری نسبت به سطح تارگت



پ: ارتفاع ۲۲ متر



ب: ارتفاع ۱۲ متر



الف: ارتفاع ۵ متر



ج: ارتفاع ۶۲ متر



ث: ارتفاع ۴۳ متر

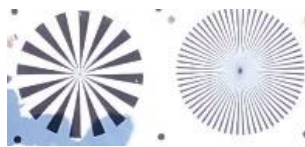


ت: ارتفاع ۳۲ متر

شکل ۹- تصویربرداری از تارگت زیمنس ۱۶ و ۶۴ بازویی توسط دوربین مویک پرو از ارتفاع ۵ الی ۶۲ متری نسبت به سطح تارگت

تصاویر جهت ورود به الگوریتم پیشنهادی تشخیص حد تفکیک مکانی مطابق شکل ۱۰ و ۱۱ گردید.

جهت تعیین حد تفکیک مکانی پهپادهای مورد استفاده، در مرحله‌ی اول اقدام به حذف حاشیه‌های



پ: ارتفاع ۱۵ متر



ب: ارتفاع ۱۱ متر



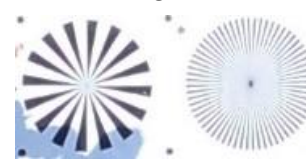
الف: ارتفاع ۵ متر



ج: ارتفاع ۳۶ متر

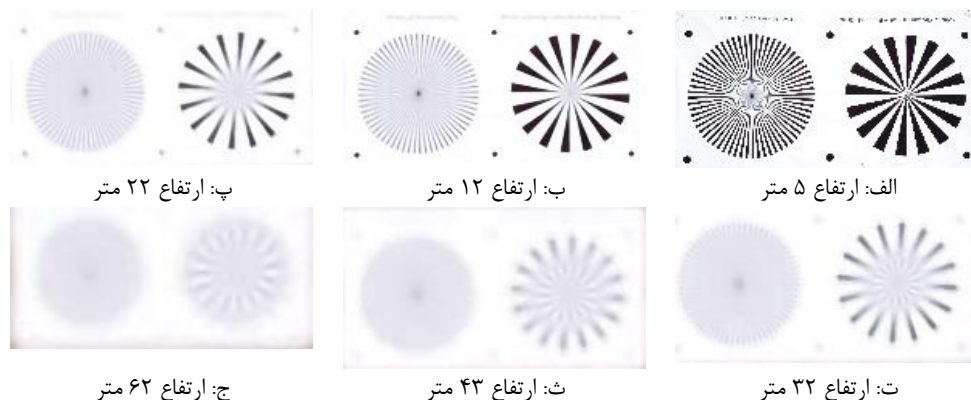


ث: ارتفاع ۳۱ متر



ت: ارتفاع ۲۵ متر

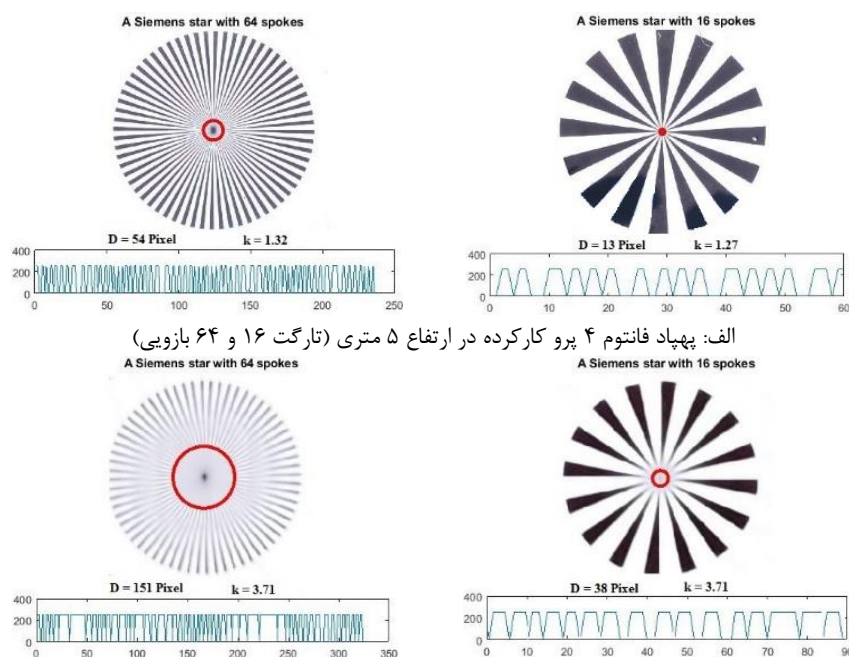
شکل ۱۰- حذف حاشیه‌های اضافی از تصاویر اخذشده توسط دوربین فانتوم ۴ پرو



شکل ۱۱- حذف حاشیه‌های اضافی از تصاویر اخذشده توسط دوربین مایک پرو

یک پیکسل ترسیم نموده، سپس پروفیل محیط دایره بر اساس درجات خاکستری ۰ و ۱ ترسیم گردید که نمونه‌ای از خروجی الگوریتم در پهنادهای موردنظر مطابق شکل ۱۲ نشان داده شده است.

سپس جهت تشخیص خودکار دایره‌ی ابهام در تصاویر مختلف اخذشده توسط پهنادهای موردنظر، پس از تعیین حد آستانه و تبدیل تصاویر رنگی به سیاه‌وسفید، مرکز تارگت مشخص و به صورت خودکار دایره‌هایی را به شعاع



الف: پهناد فانتوم ۴ پرو کارکرده در ارتفاع ۵ متری (تارگت ۱۶ و ۶۴ بازویی)

ب: پهناد مایک پرو در ارتفاع ۱۲ متری (تارگت ۱۶ و ۶۴ بازویی)

شکل ۱۲- نمونه‌ای از خروجی الگوریتم تعیین حد تفکیک مکانی در تصاویر اخذشده توسط پهنادهای موردنظر

کارکرده مقدار $1/30$ را به عنوان ضریب حد تفکیک مکانی در محاسبات لحاظ نمود.

پس از اعمال خروجی‌های متعدد از تصاویر اخذشده توسط پهنادهای موردنظر، حد تفکیک مکانی در پهناد فانتوم ۴ پرو کارکرده مطابق جدول ۲ مشخص گردید. بر اساس تارگت زیمنس ۱۶ جفت بازو از ارتفاع ۵ الی ۳۶ متری مطابق روش پیشنهادی و روش دستی مقداری برابر با $1/27$ و با تارگت ۶۴ جفت بازو از ارتفاع ۵ الی ۳۶ متری در حدود $1/30$ الی $1/32$ متغیر بوده است. بر این اساس می‌توان جهت استفاده از پهناد فانتوم ۴ پرو

جدول ۲- محاسبه حد تفکیک مکانی تصاویر اخذشده توسط پهپاد فانتوم ۴ پرو کارکرده

تصویر	ارتفاع پرنده	فاصله پرنده نسبت به تارگت	تارگت زمینس (۱۶)			تارگت زمینس (۶۴)		
			روش پیشنهادی		روش دستی	روش پیشنهادی		روش دستی
			D	k	k	D	k	k
۱	۱۳۷۰	۵	۱۳	۱/۲۷	۱/۲۷	۵۴	۱/۳۲	۱/۳۰
۲	۱۳۷۶	۱۱	۱۳	۱/۲۷	۱/۲۷	۵۳	۱/۳۰	۱/۳۰
۳	۱۳۸۰	۱۵	۱۳	۱/۲۷	۱/۲۷	۵۴	۱/۳۲	۱/۳۰
۴	۱۳۹۰	۲۵	۱۳	۱/۲۷	۱/۲۷	۵۴	۱/۳۲	۱/۳۰
۵	۱۳۹۶	۳۱	۱۳	۱/۲۷	۱/۲۷	۵۳	۱/۳۰	۱/۳۰
۶	۱۴۰۱	۳۶	۱۳	۱/۲۷	۱/۲۷	۵۳	۱/۳۰	۱/۳۰

تارگت ۶۴ جفت بازو از ارتفاع ۵ الی ۱۲ متری در حدود ۳/۶۸ الی ۳/۷۰ متغیر بوده است که بر این اساس می‌توان جهت استفاده از پهپاد ماویک پرو مقدار ۳/۷۰ را به‌عنوان ضریب حد تفکیک مکانی در محاسبات لحاظ نمود.

مطابق جدول ۳ مشخص گردید که حد تفکیک مکانی تصاویر اخذشده توسط پهپاد ماویک پرو بر اساس تارگت زمینس ۱۶ جفت بازو از ارتفاع ۱۲ الی ۶۲ متری، مطابق روش پیشنهادی و روش دستی مقداری برابر با ۳/۷۱ و با

جدول ۳- محاسبه حد تفکیک مکانی تصاویر اخذشده توسط پهپاد ماویک پرو

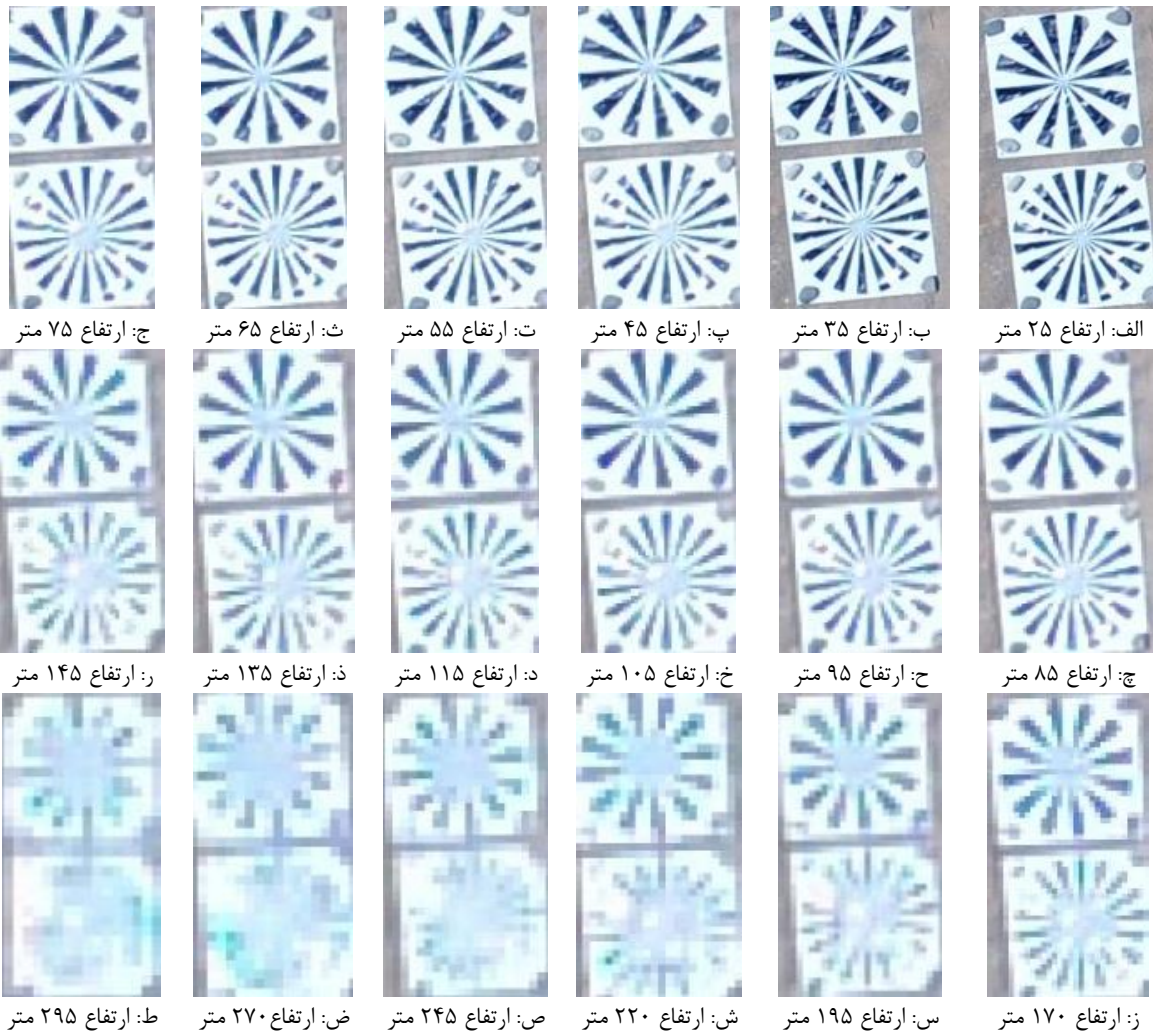
تصویر	ارتفاع پرنده	فاصله پرنده نسبت به تارگت	تارگت زمینس (۱۶)			تارگت زمینس (۶۴)		
			روش پیشنهادی		روش دستی	روش پیشنهادی		روش دستی
			D	k	k	D	k	k
۱	۱۳۴۷	۵	-	-	-	۱۵۰	۳/۶۸	۳/۷۰
۲	۱۳۵۴	۱۲	۳۸	۳/۷۱	۳/۷۱	۱۵۱	۳/۷۰	۳/۷۰
۳	۱۳۶۴	۲۲	۳۸	۳/۷۱	۳/۷۱	-	-	-
۴	۱۳۷۴	۳۲	۳۸	۳/۷۱	۳/۷۱	-	-	-
۵	۱۳۸۵	۴۳	۳۸	۳/۷۱	۳/۷۱	-	-	-
۶	۱۴۰۴	۶۲	۳۸	۳/۷۱	۳/۷۱	-	-	-

سپس جهت تشخیص خودکار دایره‌ی ابهام در تصاویر مختلف اخذشده توسط پهپادهای موردنظر، پس از تعیین حد آستانه و تبدیل تصاویر رنگی به سیاه‌وسفید، مرکز تارگت، مشخص‌شده و به‌صورت خودکار دایره‌هایی را به شعاع یک پیکسل ترسیم نموده و پروفیل محیط دایره بر اساس درجات خاکستری ۰ و ۱ ترسیم گردید. شکل ۱۵ نمونه‌ای از خروجی الگوریتم در پهپادهای موردنظر را نشان می‌دهد.

۶- ارزیابی روش پیشنهادی

جهت تست الگوریتم پیشنهادی در تعیین حد تفکیک مکانی از تصاویر اخذشده توسط پهپادهای فانتوم ۴ پرو نو و هگزاروتور با دوربین Canon-M و تصویربرداری در ارتفاع‌های مختلف در ناحیه‌ی غربی شهرستان طالقان از توابع استان البرز بر روی تارگت زمینس ۱۲ و ۱۸ بازویی اقدام به عمل آمد. بر این اساس پس از ثابت شدن تارگت زمینس بر روی زمین و اخذ تصاویر در ارتفاع‌های مختلف از طریق پهپاد فانتوم ۴ پرو نو و برش حواشی اضافی تصاویر جهت ورود به الگوریتم مطابق شکل ۱۳ اقدام می‌گردد.

همچنین مطابق شکل ۱۴ توسط پهپاد هگزاروتور با دوربین Canon-M در دو ارتفاع مختلف تصویربرداری انجام و حواشی اضافی تصاویر جهت ورود به الگوریتم پیشنهادی حذف گردید.



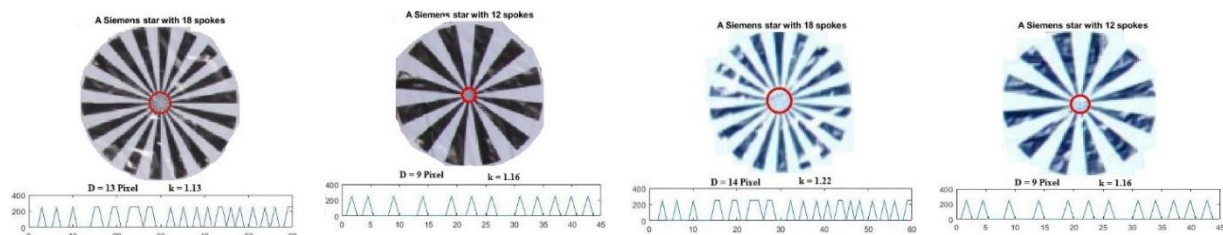
شکل ۱۳- تصویربرداری از تارگت زمینس توسط پهپاد فانتوم ۴ پرو نو از ارتفاع ۲۵ الی ۲۹۵ متری



ب: ارتفاع ۲۰۰ متر

الف: ارتفاع ۱۰۰ متر

شکل ۱۴- تصویربرداری از تارگت زمینس توسط پهپاد هگزاتور با دوربین Canon-M در ارتفاع ۱۰۰ و ۲۰۰ متری



ب: پهپاد هگزاتور با دوربین Canon-M در ارتفاع ۱۰۰ متری

الف: پهپاد فانتوم ۴ پرو نو در ارتفاع ۲۵ متری

شکل ۱۵- نمونه‌ای از خروجی الگوریتم تعیین حد تفکیک مکانی در تصاویر اخذ شده توسط پهپادهای موردنظر

پس از اعمال خروجی‌های متعدد از تصاویر اخذشده توسط پهپادهای موردنظر و تعیین حد تفکیک مکانی مطابق جدول ۴ مشخص گردید که حد تفکیک مکانی تصاویر اخذشده توسط پهپاد فانتوم ۴ پرو نو بر اساس تارگت زمینس ۱۲ جفت بازو از ارتفاع ۲۵ الی ۲۹۵ متری بر اساس روش پیشنهادی و روش دستی مقداری برابر با

۱/۱۶ و با تارگت ۱۸ جفت بازو از ارتفاع ۲۵ الی ۲۴۵ متری در حدود ۱/۱۳ الی ۱/۲۲ متغیر بوده و همچنین مشخص گردید که از ارتفاع ۲۴۵ متر به بالاتر نمی‌توان از تارگت زمینس ۱۸ جفت بازو استفاده کرد. بر این اساس می‌توان جهت استفاده از پهپاد فانتوم ۴ پرو نو مقدار ۱/۲ را به‌عنوان ضریب حد تفکیک مکانی در محاسبات لحاظ نمود.

جدول ۴- محاسبه حد تفکیک مکانی تصاویر اخذشده توسط پهپاد فانتوم ۴ پرو نو

تصویر	ارتفاع پرنده	فاصله پرنده نسبت به تارگت	تارگت زمینس (۱۲)			تارگت زمینس (۱۸)		
			روش پیشنهادی		روش دستی	روش پیشنهادی		روش دستی
			D	k	k	D	k	k
۱	۱۸۴۶	۲۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۴	۱/۲۲	۱/۲۲
۲	۱۸۵۶	۳۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۴	۱/۲۲	۱/۲۲
۳	۱۸۶۶	۴۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۴	۱/۲۲	۱/۲۲
۴	۱۸۷۶	۵۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۴	۱/۲۲	۱/۲۲
۵	۱۸۸۶	۶۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳	۱/۱۳	۱/۲۲
۶	۱۸۹۶	۷۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳	۱/۱۳	۱/۲۲
۷	۱۹۰۶	۸۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۴	۱/۲۲	۱/۲۲
۸	۱۹۱۶	۹۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳	۱/۱۳	۱/۲۲
۹	۱۹۲۶	۱۰۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳	۱/۱۳	۱/۲۲
۱۰	۱۹۳۶	۱۱۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۴	۱/۲۲	۱/۲۲
۱۱	۱۹۵۶	۱۳۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۴	۱/۲۲	۱/۲۲
۱۲	۱۹۶۶	۱۴۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳	۱/۱۳	۱/۲۲
۱۳	۱۹۹۱	۱۷۰	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳	۱/۱۳	۱/۲۲
۱۴	۲۰۱۶	۱۹۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳	۱/۱۳	۱/۲۲
۱۵	۲۰۴۱	۲۲۰	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۴	۱/۲۲	۱/۲۲
۱۶	۲۰۶۶	۲۴۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۴	۱/۲۲	۱/۲۲
۱۷	۲۰۹۱	۲۷۰	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	-	-	-
۱۸	۲۱۱۶	۲۹۵	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	-	-	-

و همچنین مطابق جدول ۵ مشخص گردید که حد تفکیک مکانی تصاویر اخذشده توسط پهپاد هگزاروتور با دوربین Canon-M بر اساس تارگت زمینس ۱۲ جفت بازو از ارتفاع ۱۰۰ و ۲۰۰ متری بر اساس روش پیشنهادی و روش دستی مقداری برابر با ۱/۱۶ و با تارگت ۱۸ جفت

بازو از ارتفاع ۱۰۰ و ۲۰۰ متری مقداری برابر با ۱/۱۳ متغیر بوده. بر این اساس می‌توان جهت استفاده از پهپاد هگزاروتور با دوربین Canon-M مقدار ۱/۲ را به‌عنوان ضریب حد تفکیک مکانی در محاسبات لحاظ نمود.

جدول ۵- محاسبه حد تفکیک مکانی تصاویر اخذشده توسط پهپاد هگزاروتور با دوربین Canon-M

تصویر	ارتفاع پرنده	فاصله پرنده نسبت به تارگت	تارگت زمینس (۱۲)			تارگت زمینس (۱۸)		
			روش پیشنهادی		روش دستی	روش پیشنهادی		روش دستی
			D	k	k	D	k	k
۱	۱۹۳۰	۱۰۰	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳
۲	۲۰۳۰	۲۰۰	۹	۱/۱۶	۱/۱۶	۱۳	۱/۱۳	۱/۱۳

۷- نتیجه گیری

مقایسه با روش دستی مشخص گردید که ضریب کاهش حد تفکیک $1/3$ در پهپاد فانتوم ۴ پرو کارکرده، ضریب $1/2$ در پهپاد فانتوم ۴ پرو نو، ضریب $3/7$ در پهپاد ماویک پرو و ضریب $1/2$ در پهپاد هگزاروتور با دوربین Canon-M تقریباً مستقل از ارتفاع پرواز برآورد می گردد. همچنین تجربیات نگارنده نشان می دهد در شرایط هوایی متفاوت از قبیل نور کمتر، زمان غروب آفتاب، آلودگی هوا و گردوخاک، لرزش و تکان های شدید، گذشت عمر سنجنده و ... ضریب فوق افزایش می یابد.

در ضمن جهت محاسبه حد تفکیک مکانی بر اساس این تارگت نیاز به طراحی تعداد بازوی و ابعاد آن بر اساس GSD موردنظر است که بر اساس نتیجه ی به دست آمده در GSD های مختلف طراحی تارگت زیمنس به صورت زیر می باشد:

- GSD ۱۰ تا ۲۰ سانتی متر: n برابر ۸ و ابعاد ۲ متر مورد استفاده قرار گیرد.
- GSD ۵ تا ۱۰ سانتی متر: n برابر ۱۶ و ابعاد ۲ متر یا n برابر ۸ و ابعاد ۱ متر مورد استفاده قرار گیرد.
- GSD زیر ۵ سانتی متر: n برابر ۳۲ و ابعاد ۲ متر یا n برابر ۱۶ و ابعاد ۱ متر مورد استفاده قرار گیرد.

با توجه به تنوع دوربین های مورد استفاده در انواع پهپادها و تأثیر وضوح عدسی بر کیفیت داده های مکانی قابل استخراج از تصاویر پهپاد، می بایست وضوح تصویر دوربین مورد استفاده در سیستم پهپاد فتوگرامتری قبل از انجام تصویربرداری تعیین شده و در تعیین GSD تصاویر مورد استفاده قرار گیرد. از آنجاکه وضوح عدسی ممکن است در پروژه های تصویربرداری مختلف تغییر نماید تعیین وضوح تصاویر در هر پرواز با قرار دادن ضریب متناسب با مشخصات دوربین تصویربرداری، ارتفاع پرواز، پوشش منطقه و GSD تصویربرداری موردنظر ضروری می باشد. لذا بدین منظور از ستاره زیمنس به عنوان یکی از روش های مهم در تعیین حد تفکیک مکانی استفاده شد. بر اساس نتایج به دست آمده مشخص گردید که در این تارگت، مقدار ضریب کاهش حد تفکیک در جهت تار شدگی و حرکت پرندۀ بیشتر بوده و کارایی آن نسبت به تارگت های متعامد مناسب تر است. همچنین با بررسی نتایج ارائه شده حاصل از عکس برداری در شرایط مختلف می توان نتیجه گرفت که با افزایش فاصله عکس برداری که معادل افزایش ارتفاع پرواز در پهپاد می باشد، ضریب k به آرامی افزایش می یابد. بر اساس روش پیشنهادی و در

مراجع

- [1] Mikhail, E., Bethel, J. and McGlone, J. (2001). "Introduction to modern photogrammetry." p. 19.
- [2] Linder, W. (2009). "Digital photogrammetry." Springer.
- [3] Luhmann, T. (2010). "Close range photogrammetry for industrial applications." vol. 65, no. 6, pp. 558-569.
- [4] Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S. and Boehm, J. (2013). "Close-range photogrammetry and 3D imaging." Walter de Gruyter.
- [5] Homaei, M. and Saadatseresht, M. (2018). "UAV Photogrammetric Image Network Design for Optimization of 3D Reconstruction." School of Surveying and Geospatial Engineering, University of Tehran, (in Persian).
- [6] Zhou, H., Kong, H., Wei, L., Creighton, D. and Nahavandi, S. (2014). "Efficient road detection and tracking for unmanned aerial vehicle." 297-309, 1524-9050.
- [7] Mahdinezhad, A. and Ebadi, H. (2018). "UAV – based photogrammetric network design based on DEM and controlling the matching of imaging conditions with on Emphasis on Large Scale Mapping for mountainous areas." Faculty of Geodesy and Geomatic, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, (in Persian).
- [8] Authors contributions. (2016). "Instructions for monitoring and technical control of maps and spatial information prepared using UAVs." National Cartographic Center - Country Program and Budget Organization.
- [9] Samadzadegan, F., Dadrasjavan, F., Savadkoobi, M., and Hakimi, J. (2018). "3D modeling of open pit mines using UAV photogrammetry." National Cartographic Center - K. N. Toosi University of Technology, The 25th National Conference and Exhibition of Geomatics and the 3rd Conference on Information Technology Engineering, (in Persian).

- [10] Azimi, S., Mokhtarzade, M. and Valadan Zoej, M. J. (2013). "Spatial Resolution Measurement of UltraCamd Images Using Siemens Star Print." Geospatial Engineering Journal, 13-24, (in Persian).
- [11] Lee, J. and Sung, S. (2016). "Evaluating spatial resolution for quality assurance of UAV images." 141-154.
- [12] Lim, P., Son, J. and Kim, T. (2019). "Development and Comparative Analysis of Mapping Quality Prediction Technology Using Orientation Parameters Processed in UAV Software." 895-905.
- [13] LEE, J-O. and Sung, M. (2019). "Quality Evaluation of UAV Images Using Resolution Target." 103-113.
- [14] Fakhri, S-A., Saadatseresht, M., Varshosaz, M., and Zakeri, H. (2020). "Application of UAV photogrammetry in obtaining qualitative road pavement information." 7 National Conference on Applied Research in Civil Engineering, Architecture and Urban Management, (in Persian).