نشریه علمی پژوهشی مهندسی فناوری اطلاعات مکانی

سال پنجم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۶

Vol.5, No.3, Autumn 2017

۱۵۳-۱۷۳

بررسی تاثیر پارامترهای پروازی در نتایج کالیبراسیون هندسی دوربین رقومی التراکم

هادی باباپور[۱]، مهدی مختارزاده[۲]، محمد جواد ولدان زوج[۳]

۱- دانشجوی دکترای فتوگرامتری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار دانشکده مهندسی نقشه¬برداری- دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۸/۱۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۲/۰۴

چکیده

با توجه به ظهور دوربین¬های رقومی جدید و تنوع در ساخت و تکنولوژی به‌کاررفته در این نوع از دوربین‌ها ضرورت کالیبراسیون آنها به‌عنوان یک نیاز اولیه شناخته می‌شود. هزینه‌های بالا و مشکلات اجرایی در انجام کالیبراسیون آزمایشگاهی، استفاده از معادلات خودکالیبراسیون در سایت‌های میدانی را به‌عنوان یکی از راه حل‌های عملی در این زمینه مطرح می‌نماید. یکی از عوامل مهم و تاثیر گذار در دقت نهایی حاصل از روش خود کالیبراسیون میدانی، پارامترهای پروازی و نحوه طراحی و شرایط اخذ تصاویر می‌باشد. به این منظور در این مقاله ضمن طراحی یک روش شبیه‌سازی بلوک‌های فتوگرامتری در شرایط مختلف پروازی و اعتبارسنجی آن، به پیاده‌سازی روشهای خودکالیبراسیون هندسی بر روی انواع بلوک¬های فتوگرامتری پرداخته شده و تاثیر پارامترهای پروازی بر نتایج خودکالیبراسیون هندسی مورد مطالعه قرارگرفته است. بر اساس نتایج حاصل مشخص شد که افزایش پوشش طولی و عرضی به‌عنوان مهمترین عامل موثر بر بهبود دقت نتایج هندسی روش‌های خود کالیبراسیون مطرح می‌باشد به طوری که افزایش پوشش طولی ۶۰ درصد به ۸۰ درصد و افزایش پوشش عرضی ۲۰ درصد به ۶۰ درصد، بهبود ۱۸ درصدی دقت موقعیتی را به همراه داشت. همچنین عکسبرداری غیرقائم موثرترین عامل پروازی در کاهش همبستگی بین پارامترهای توجیه خارجی و پارامترهای مدل خودکالیبراسیون شناخته شد، به نحوی که افزایش دامنه تغییرات پارامتر ۲۵-< ω <۲۵° ω°) باعث کاهش نسبی ۳ تا ۵ درصدی همبستگی خارجی شده است. علاوه بر این موارد در این تحقیق مشخص شد که سرشکنی همزمان بلوک‌های عکسی در دو ارتفاع مختلف باعث افزایش تعداد معادلات و در نتیجه باعث افزایش دقت در مقایسه با سرشکنی بلوک در یک ارتفاع پرواز می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: خودکالیبراسیون، پارامترهای اضافه، پارامترهای پرواز، دوربین رقومی التراکم.

*نویسنده مکاتبه کننده: بلوار کشاورز – خیابان شهید شوریده- پلاک ۷ دانشکده فنی نقشه برداری سازمان جغرافیایی.

تلفن: ۰۹۱۲۳۳۵۰۷۱۸

Email : hbabapour@mail.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

۱- مقدمه

به‌منظور امکان استحصال اطلاعات موقعیتی پدیده‌های مورد تصویربرداری لازم است تا ارتباط ریاضی سیستم مختصات تصویری با سیستم مختصات زمینی تعیین گردد. این امر مستلزم داشتن آگاهی کامل از خطاهای احتمالی و مدلسازی دقیق خطاهای فیزیکی و هندسی در روند تشکیل تصویر می‌باشد. بدیهی است تفاوت عملکرد سنجنده‌های مختلف در این نحوه مدلسازی لحاظ می‌گردند. در مدلسازی هندسی و فیزیکی تشکیل تصویر در سنجنده‌های هوایی بایستی مجموعه عوامل موثر در تشکیل تصویر بطور دقیق مشخص باشند. به‌عبارت دیگر، لازم است تا پارامترهای فیزیکی و هندسی موثر بر موقعیت ثبت تصویر از پدیده‌های زمینی، در این مدلسازی معلوم بوده و مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از جمله پارامترهای موثر در مدلسازی هندسی و فیزیکی تشکیل تصویر در سیستم‌های تصویربرداری، می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

- موقعیت و وضعیت استقرار سنجنده نسبت به سیستم مختصات زمینی (پارامترهای توجیه خارجی)
- شرایط فیزیکی و هندسی سیستم تصویربرداری (پارامترهای توجیه داخلی)

پارامترهای فوق، بعنوان پارامترهای توجیه سنجنده شناخته می‌شوند. تعیین این پارامترها یکی از اهداف فعالیت‌های کالیبراسیون هندسی در سنجنده‌های اپتیکی تلقی می‌گردد. در تعیین پارامترهای توجیه جهت کالیبراسیون هندسی دوربین های رقومی هوایی، طراحی پرواز و نحوه آرایش بلوک عکسی تاثیر بسزایی در دقت نهایی این پارامترها دارند [۱۳] سه پارامتر اصلی موثر در طراحی پرواز جهت کالیبراسیون دوربین‌های هوایی عبارتند از:

۱- شکل و ساختار نوارهای پرواز (تعداد نوار، تعداد تصویر، میزان پوشش طولی و عرضی) [۱۳ و ۱۲].
۲- ارتفاع پرواز [۱].
۳- نحوه عکسبرداری (قائم، تیلت دار) [۴].

از این رو جهت دستیابی به دقت های مطلوب در تعیین پارامترهای توجیه سنجنده نیاز به بررسی جامع در مورد طراحی پرواز و نحوه عکسبرداری می‌باشد. در این راستا در سال ۲۰۰۴ سه ساختار مناسب بلوک کالیبراسیون را به منظور کالیبراسیون همزمان هندسی دوربین‌های فتوگرامتری و سیستم‌های ناوبری پیشنهاد شده است [۹].

۱- بلوک جامع مشتمل بر ۲ تا ۴ خط پرواز موازی و ۲ تا ۴ خط پرواز متقاطع.
۲- بلوک متقاطع مشتمل بر دو خط پرواز متقاطع با زاویه‌ی تقاطع نزدیک به ۹۰ درجه.
۳- بلوک خطی شامل یک نوار خطی پیوسته.

مطابق طرح پیشنهادی، عکس‌های اخذ شده در بلوک‌های ذکر شده می‌بایست از همپوشانی‌های طولی و عرضی بزرگی برخوردار باشند. این مقدار همپوشانی می‌بایست پوشش عرضی ۶۰ درصدی و پوشش ۸۰ درصدی طولی را تامین سازد. در بین ساختارهای ذکر شده‌ی فوق، ساختار بلوک جامع توان تامین دقت‌های بالاتری را داشته اما بواسطه‌ی هزینه‌های اجرایی آن در مقایسه با دو روش دیگر، می‌توان بسته به هدف و دقت مورد نیاز از ساختارهای دیگر نیز بهره گرفت [۹].

بر اساس مقالات ارائه شده بهترین دقت در سرشکنی به روش باندل اجسمنت با معادلات خود کالیبراسیون زمانی به‌دست می‌آید که پوشش تصاویر با یکدیگر در حد بالایی باشد و تصاویر دارای تیلت کم و هر عارضه در چهار تصویر یا بیشتر دیده شود. پیشنهاد شده است در مواردی که تست فیلد در مناطق مسطح احداث گردیده، تصویربرداری در چند ارتفاع مختلف و با زوایای مختلف انجام شود [۱۱].

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

ذکر این نکته ضروری است که تعیین دقیق فاصله‌ی اصلی سیستم اپتیکی به یکی از دو شرط: ۱-وجود اختلاف ارتفاع در بلوک کالیبراسیون و یا ۲- داشتن موقعیت دقیق مراکز عکسی با دقت بالا توسط مشاهدات جی پی اس وابسته می‌باشد. بر این اساس، مساله‌ی ارتفاع پرواز یکی دیگر از پارامترهای مهم در بلوک‌های کالیبراسیون به‌شمار می‌رود [۱۲].

در دوربین‌های آنالوگ، فرایند کالیبراسیون به‌طور معمول برای هر مقیاس تصویربرداری به‌طور مستقل انجام می‌پذیرد. راهکار پیشنهاد شده برای کالیبراسیون دوربین‌های رقومی استفاده از دو مقیاس تصویربرداری و سرشکنی همزمان آنها در یک دستگاه تصویربرداری معتبر بوده و بتوان با یک درونیابی خطی بین پارامترهای کالیبراسیون در دو ارتفاع پرواز، پارامترهای کالیبراسیون سیستم اپتیکی را در ارتفاعات میانی (بین دو مقیاس کالیبراسیون) برآورد نمود [۱۲].

کرامر[1] و هونکاوارا[2] در سال ۲۰۱۰ شرایط استاندارد جهت اخذ تصاویر از سایت میدانی را مورد بررسی قرارداده‌اند. در این تحقیق بهترین شرایط جهت اخذ تصویر به منظور کالیبراسیون هندسی دوربین رقومی، شامل ۵ تا ۷ نوار پروازی به همراه دو نوار پروازی به‌صورت عمود بر مسیر پرواز با پوشش طولی و عرضی بین ۶۰ تا ۸۰ درصد عنوان شده است [۵].

کرامر در سال ۲۰۰۹ تحقیق وسیعی در زمینه کالیبراسیون دوربین‌های رقومی به انجام رسانده است. یکی از نتایج این تحقیق حاکی از آن است که استفاده از روش خودکالیبراسیون با پارامترهای اضافه مطلوب، قطعاً در بهبود نتایج حاصل سرشکنی بلوک عکسی دوربین‌های رقومی موثر می‌باشد.

در این تحقیق از دوربین رقومی دی ام سی[3] جهت سرشکنی همزمان در دو ارتفاع مختلف بهره گرفته شده است. برای این منظور از دو بلوک عکسبرداری در مقیاس‌های مختلف و یک بلوک ترکیبی استفاده شده‌است. بلوک اول شامل ۱۳۲ تصویر با ۱۶۸۷۵ نقطه عکسی و ۲۰ نقطه کنترل زمینی در مقیاس ۱۸۸۷۰و با یک خط پرواز به صورت عرضی[4]، بلوک دوم شامل ۲۹ تصویر با ۱۲۶۴۰ نقطه عکسی و ۱۱نقطه کنترل زمینی در مقیاس ۳۷۸۰۰ و بلوک سوم ترکیب دو بلوک فوق و در یک حل همزمان (سرشکنی بلوک به صورت همزمان در دو ارتفاع مختلف) طراحی گردید. نتایج حاصل از این تحقیق نشان داد یک خط پروازی به‌صورت عرضی می‌تواند دقت حاصل از سرشکنی به‌روش خود کالیبراسیون را به طور محسوسی افزایش دهد. البته ترکیب دو بلوک عکسی در دو ارتفاع مختلف باعث بهبود دقت مسطحاتی می‌گردد ولی بر روی دقت ارتفاعی تاثیر چندانی ندارد [۱۳].

با توجه به تحقیقات انجام شده، علاوه بر ساختار بلوک عکسبرداری، طراحی پارامترهای پروازی بر روی دقت نهایی کالیبراسیون هندسی دوربین‌های هوایی بسیار تاثیر گذار است. با توجه به این که دوربین رقومی التراکم به‌عنوان دوربین عملیاتی مورد بهره‌برداری سازمان‌های متولی تولید نقشه در کشور ما می‌باشد، عوامل موثر بر دقت هندسی قابل حصول از این سنجنده کانون تحقیق فعلی است. علیرغم بررسی‌های نسبتاً جامع در خصوص تاثیر ساختار بلوک عکسبرداری، تاثیر سایر پارامترهای پروازی مانند تغییر در زوایه عکسبرداری، حل همزمان در ارتفاعات مختلف با تصاویر تیلت دار و یا تغییر در پوشش طولی و عرضی و ...

[1] Cramer
[2] Honkavaara
[3] DMC
[4] Cross

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

برای دوربین رقومی التراکم مورد بحث و بررسی جامع قرار نگرفته است.

برای این منظور در این مقاله سعی می‌گردد به‌صورت جامع تمامی پارامترهای پروازی که بر روی دقت نهایی سرشکنی بلوک عکسی استاندارد دوربین التراکم به‌روش خودکالیبراسیون تاثیر گذارند مورد ارزیابی قرار گیرند.

از این رو ابتدا یک روال جدید جهت شبیه‌سازی بلوک‌های عکسی برای این سنجنده طراحی و صحت آن توسط داده‌های واقعی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. سپس با تغییر در شرایط پروازی بر روی بلوک‌های مختلف عکسی شبیه‌سازی شده نتایج با یکدیگر مقایسه تا بهترین پارامترهای پروازی و بلوک عکسی جهت دستیابی به بالاترین دقت در روش خود کالیبراسیون دوربین رقومی التراکم مشخص گردد. در این تحقیق امکان مقایسه میزان تاثیر پوشش طولی و عرضی، تغییر در زاویه عکسبرداری و سرشکنی همزمان در دو ارتفاع مختلف بر روی دقت ارتفاعی و مسطحاتی برای اولین بار حاصل می‌شود.

در ادامه روش‌های مختلف خود کالیبراسیون دوربین هوایی رقومی که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، به‌طور مختصر بیان می‌گردد. در نهایت تاثیر پارامترهای پروازی و بلوک عکسبرداری بر روی این معادلات مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

۲- پیشنه زمینه نظری تحقیق

در این بخش ابتدا مدل‌های خود کالیبراسیون که بیشترین سابقه در تحقیقات گذشته را داشته‌اند و در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است، معرفی می‌گردد. سپس روش‌های ارزیابی دقت هندسی نتایج خود کالیبراسیون که در بخش ارزیابی نتایج مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، ارائه می‌گردد.

۲-۱- مدل‌های خود کالیبراسیون

روش خود کالیبراسیون به‌عنوان روشی کارآمد به‌منظور مشارکت تمامی اندازه‌گیری‌های تصویری نقاط تارگت‌گذاری شده در تمامی تصاویر اخذ شده از منطقه‌ی مشترک تصویربرداری، در برآورد پارامترهای مجهول سرشکنی به‌شمار می‌رود [۲و۱].

در ادامه مدلهای مورد استفاده در مقاله به تفصیل توضیح داده شده است.

- **پارامترهای اضافه بر پایه و بنیان روابط فیزیکی (براون، ۱۹۷۱)**

این نوع از پارامترهای اضافی با توجه به منابع خطاهای سیستماتیک عکس‌ها مانند تغییر بعد منظم فیلم، اعوجاج شعاعی و مماسی لنز دوربین و ...، ارائه شده است. نکته قابل توجه اینکه در این نوع از پارامترهای اضافی فقط کشیدگی و یا فشردگی فیلم لحاظ شده است و از تغییر بعدهای غیر منظم آن صرف نظر گردیده است [۱ و ۲]. رابطه (۱) مدل خود کالیبراسیون بر اساس روابط فیزیکی بروان را نشان می‌دهد.

رابطه (۱)

$$\Delta x_p = dr_x + dp_x + dg_x$$
$$\Delta y_p = dr_y + dp_y + dg_y$$
$$dr_x = (x - x_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)$$
$$dr_y = (y - y_0)(K_1 r^2 + K_2 r^4 + K_3 r^6)$$
$$r = ((x - x_0)^2 + (y - y_0)^2)^{\frac{1}{2}}$$
$$dp_x = p_1(r^2 + 2(x - x_0)^2) + 2p_2(x - x_0)(y - y_0)$$
$$dp_y = p_2(r^2 + 2(y - y_0)^2) + 2p_1(x - x_0)(y - y_0)$$
$$dg_x = A(x - x_0) \quad , \quad dg_y = B(y - y_0)$$

Δx_pوΔy_p تصحیحات در امتداد محورهای x وy

dr_x و dr_y تصحیحات مربوط به اعوجاج شعاعی لنز در امتداد محورهای x وy

dp_xوdp_y تصحیحات مربوط به اعوجاج مماسی لنز در امتداد محورهای x وy

dg_x و dg_y تصحیحات مربوط به تغییر بعد فیلم در امتداد محورهای x وy

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

K_2و K_1 پارامترهای اعوجاج شعاعی عدسی
P_2و P_1 پارامترهای اعوجاج مماسی عدسی
Bو A پارامترهای تغییر بعد فیلم در امتداد محورهای x وy

- **پارامترهای اضافه بر پایه و بنیان چند جمله‌ایی‌های جبری**
  - **پلی‌نومیال جبری درجه دو (ابنر، ۱۹۷۶)و درجه چهار (گرون، ۱۹۷۸)**

این معادلات از نوع چند جمله‌ای‌های متعامد بوده و به دلیل استفاده از تعداد ضرائب مجهول بالا (مدل ریاضی ابنر با ۱۲پارامتر و مدل ریاضی گرون با ۴۴پارامتر) قابلیت مدل کردن بردارهای خطا با دقت بالا را دارند. نتایج حاصل از مدل ریاضی گرون در اکثر مقالات بسیار نزدیک به مدل ریاضی لژاندر (در ادامه توضیح داده می شود) می‌باشد از این‌رو در این مقاله از مدل ریاضی ابنر با ۱۲ پارامتر بهره گرفته شده است [۳]. (رابطه (۲))

رابطه (۲)

$$x_p = a_1x + a_2y - a_3\left(2x^2 - \frac{4r^2}{3}\right) + a_4xy + a_5\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_7x\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_9y\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_{11}\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right)\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right)$$

$$y_p = -a_1x + a_2y + a_3xy - a_4\left(2y^2 - \frac{4r^2}{3}\right) + a_6\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_8y\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_{10}x\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right) + a_{12}\left(x^2 - \frac{2r^2}{3}\right)\left(y^2 - \frac{2r^2}{3}\right)$$

Δy_pوΔx_p تصحیحات در امتداد محورهای x وy
a_1وa_2وa_3وa_4پارامترهای مشترک تغییر شکل فیلم در امتداد محورهای x وy
وa_5وa_7 وa_9وa_{11} پارامترهای تغییر بعد فیلم در امتداد محورx
و a_6وa_8وa_{10}وa_{12}پارامترهای تغییر بعد فیلم در امتداد محور y

- **معادلات لژاندر**

پارامترهای خانواده‌ی لژاندر انعطاف بسیار بیشتری را برای کالیبره کردن اعوجاج تصاویر پیچیده به خصوص در زمانی که درجه‌ی بالایی مد نظر است نشان می‌دهند. ترم‌های اضافه لژاندر برای تصاویر با قاب مستطیل شکل مناسب می‌باشند [۱۵]. این معادلات از نوع چند جمله‌ای‌های متعامد بوده و به دلیل استفاده از تعداد ضرائب مجهول بالا (۶۶ پارامتر) قابلیت مدل کردن بردارهای خطا با دقت بالا را دارند. چندجمله‌ای‌های لژاندر جواب‌های معادله دیفرانسیل معمولی زیر، موسوم به معادله دیفرانسیل لژاندر هستند. (رابطه (۳))

رابطه (۳)

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{dx}}\left[\frac{(1-x^2)d}{dx}L_n(x)\right] + n(n+1)L_n(x) = 0$$

در این رابطه $n = 0,1,2,\dots$ قابل تغییر است و درجه چند جمله‌ای را مشخص می‌کند. تابع متعامد لژاندر از ضرب داخلی دو چندجمله‌ایی $L_n(y/$ و $L_m(x/b_x)$ (b_yبه‌دست می‌آید، که در آن $x\ ,y \in [-1,1]$ مختصات عکسی نرمال شده و $2b_x$ و$2b_y$ را به‌ترتیب عرض و طول عکس در نظر بگیرید. در رابطه (۴) $a_{1,2,3,\dots}$ ضرایب مجهول (پارامترهایی) هستند که در محاسبات خودکالیبراسیون برآورد می‌شوند.

- **پارامترهای اضافه بر اساس سری فوریه**

با توجه به مقاله ارائه شده توسط کرامر و تانگ در سال ۲۰۱۳ بهترین پارامترهای اضافه استفاده شده در خود کالیبراسیون دوربین های رقومی هوایی با فرمت بزرگ معادلات فوریه عنوان گردیده است. در این تحقیق پس از بررسی مدل‌های ریاضی و فیزیکی گذشته و مقایسه آنها با معادلات فوریه، پارامترهای اضافه براساس معادلات فوریه به‌عنوان بهترین تقریب جهت انجام خود کالیبراسیون دوربین رقومی امروزی معرفی گردیده است [۱۶].

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

قضیه‌ی فوریه در حالت دوبعدی بیان می‌کند که هر تابع دو متغیره $f(x,y)$ ، که در آن $x\ ,y\ \in$ $[-\pi,\pi]$می‌باشد، با دقت مشخص به وسیله‌ی ترکیب دو متغیره از ترم‌های سینوسی و کسینوسی با فرکانس‌های مختلف (رابطه (۵)) می‌تواند تخمین زده‌شود.

رابطه (۴)

$$l_m(x,b_x)=L_m(x/b_x),\quad l_n(y,b_y)=L_n(y/b_y)$$
$$p_{m,n}=10^{-6}l_m(x,b_x)l_n(y,b_y)$$
$$\begin{aligned}\Delta x=\ & a_1p_{1,0}+a_2p_{0,1}+a_3p_{2,0}+a_4p_{1,1}+a_5p_{0,2}+a_6p_{3,0}+a_7p_{2,1}+a_8p_{1,2}+a_9p_{0,3}\\ &+a_{10}p_{4,0}+a_{11}p_{3,1}+a_{12}p_{2,2}+a_{13}p_{1,3}+a_{14}p_{0,4}+a_{15}p_{5,0}+a_{16}p_{4,1}\\ &+a_{17}p_{3,2}+a_{18}p_{2,3}+a_{19}p_{1,4}+a_{20}p_{0,5}+a_{21}p_{5,1}+a_{22}p_{4,2}+a_{23}p_{3,3}\\ &+a_{24}p_{2,4}+a_{25}p_{1,5}+a_{26}p_{5,2}+a_{27}p_{4,3}+a_{28}p_{3,4}+a_{29}p_{2,5}+a_{30}p_{5,3}\\ &+a_{31}p_{4,4}+a_{32}p_{3,5}+a_{33}p_{5,4}+a_{34}p_{4,5}+a_{35}p_{5,5}\end{aligned}$$
$$\begin{aligned}\Delta y=\ & a_2p_{1,0}-a_1p_{0,1}+a_{36}p_{2,0}-a_3p_{1,1}-a_4p_{0,2}+a_{37}p_{3,0}+a_{38}p_{2,1}+a_{39}p_{1,2}\\ &+a_{40}p_{0,3}+a_{41}p_{4,0}+a_{42}p_{3,1}+a_{43}p_{2,2}+a_{44}p_{1,3}+a_{45}p_{0,4}+a_{46}p_{5,0}\\ &+a_{47}p_{4,1}+a_{48}p_{3,2}+a_{49}p_{2,3}+a_{50}p_{1,4}+a_{51}p_{0,5}+a_{52}p_{5,1}+a_{53}p_{4,2}\\ &+a_{54}p_{3,3}+a_{55}p_{2,4}+a_{56}p_{1,5}+a_{57}p_{5,2}+a_{58}p_{4,3}+a_{59}p_{3,4}+a_{60}p_{2,5}\\ &+a_{61}p_{5,3}+a_{62}p_{4,4}+a_{63}p_{3,5}+a_{64}p_{5,4}+a_{65}p_{4,5}+a_{66}p_{5,5}\end{aligned}$$

رابطه (۵)

$$\cos(mx\pm ny),\sin(mx\pm ny),m,n=0,1,2,\dots$$

در استفاده از این سری جهت تخمین رفتار اعوجاجات هندسی در سطح تصویر (Δx و Δy) از رابطه (۶) داریم:

رابطه (۶)

$$\Delta x=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=-N}^{N}(a_{m,n}c_{m,n}+b_{m,n}s_{m,n})+\sum_{n=1}^{N}(a_{0,n}c_{0,n}+b_{0,n}s_{0,n})$$
$$\Delta y=\sum_{m=1}^{M}\sum_{n=-N}^{N}(a'_{m,n}c_{m,n}+b'_{m,n}s_{m,n})+\sum_{n=1}^{N}(a'_{0,n}c_{0,n}+b'_{0,n}s_{0,n})$$

که پارامترهای آن در رابطه (۷) ارائه شده است.

رابطه (۷)

$$-b_x\le\bar{x}\le b_x\ ,-b_y\le\bar{y}\le b_y$$
$$u=\bar{x}\pi/b_x\quad v=\bar{y}\pi/b_y\quad u\in[-\pi,\pi],\ \ v\in[-\pi,\pi]$$
$$c_{m,n}=10^{-6}\cos(mu+nv)\ s_{m,n}=10^{-6}\sin(mu+nv)$$

$2b_x$ و $2b_y$ را به ترتیب عرض و طول عکس، $\bar{x}$ و $\bar{y}$ نیز مختصات نرمال عکس می‌باشند. در روابط فوق $C_{m,n}$ و $S_{m,n}$ معادلات متعامد را ایجاد می‌کنند که متعامد بودن $C_{m,n}$ و $S_{m,n}$ در ابعاد کامل در رابطه (۸) نشان داده شده است.

رابطه (۸)

$$\int_{-b_y}^{b_y}\int_{-b_x}^{b_x}C_{m,n}\,C_{m'n'}dxdy=0$$
$$if\ m\neq m'\ or\ n\neq n'$$

$$\int_{-b_y}^{b_y}\int_{-b_x}^{b_x}S_{m,n}\,S_{m'n'}dxdy=0$$
$$if\ m\neq m'\ or\ n\neq n'$$
$$\int_{-b_y}^{b_y}\int_{-b_x}^{b_x}C_{m,n}\,S_{m'n'}dxdy=0$$

در رابطه (۶) $b'_{m,n}$ و $a'_{m,n}$ ،$a_{m,n}$ ، $b_{m,n}$ ضرایب مجهول (پارامترهایی) هستند که در محاسبات خودکالیبراسیون برآورد می‌شوند. m و n حداکثر درجه‌ی انتخاب شده توسط کاربر است که تعیین کننده تعداد ترم‌های به‌کارگرفته شده در

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

این سری می‌باشد. با توجه به مدل‌های ریاضی عنوان شده سه مدل ریاضی ابنر، لژاندر و فوریه که در اکثر تحقیقات گذشته بیشترین کارایی را داشته‌اند، جهت پیاده‌سازی در این مقاله در نظر گرفته شده‌اند. همچنین مدل فیزیکی براون در شبیه‌سازی تصاویر مورد استفاده قرار گرفته‌است.

۲-۲- معیارهای ارزیابی

در کلیه بررسی‌ها، حل مدل‌های خودکالیبراسیون به‌کمک نقاط کنترل و ارزیابی آنها توسط نقاط چک مستقل صورت گرفته است. در ارزیابی‌های این مقاله، علاوه بر پارامترهای دقت موقعیتی نقاط چک، تحلیل آماری رفتار بردارخطا از نقطه نظر وابستگی نیز انجام شده است. برای این‌کار از ماتریس همبستگی مجهولات سرشکنی باندل اجسمنت با ساختار زیر که در رابطه (۹) ارائه شده، استفاده شده است.

$$\rho = \left[\begin{array}{c|c} E_{u\times u} & E\&S_{u\times v} \\ \hline E\&S^{T}{}_{u\times v} & S_{v\times v} \end{array}\right] \qquad \text{رابطه (۹)}$$

در این رابطه زیرماتریس‌های E و S به ترتیب ماتریس همبستگی بین پارامترهای توجیه خارجی و ماتریس همبستگی بین پارامترهای چندجمله‌ای روابط خودکالیبراسیون می‌باشند. همچنین u تعداد پارامترهای توجیه خارجی عکس‌های بلوک (۶ برابر تعداد تصاویر) و v تعداد ضرایب مجهول روابط خودکالیبراسیون می‌باشد. $E\&S$ ماتریس همبستگی بین پارامترهای توجیه خارجی و ضرایب چندجمله‌ای می‌باشد. بر اساس این ماتریس معیار همبستگی خارجی مطابق رابطه (۱۰) قابل محاسبه می‌باشد.

$$External_{correlation} = Mean_{i,j}\{E\&S[i,j] | i,j = 1,2,\dots,u\ ,\ j = 1,\dots,v\} \qquad \text{رابطه (۱۰)}$$

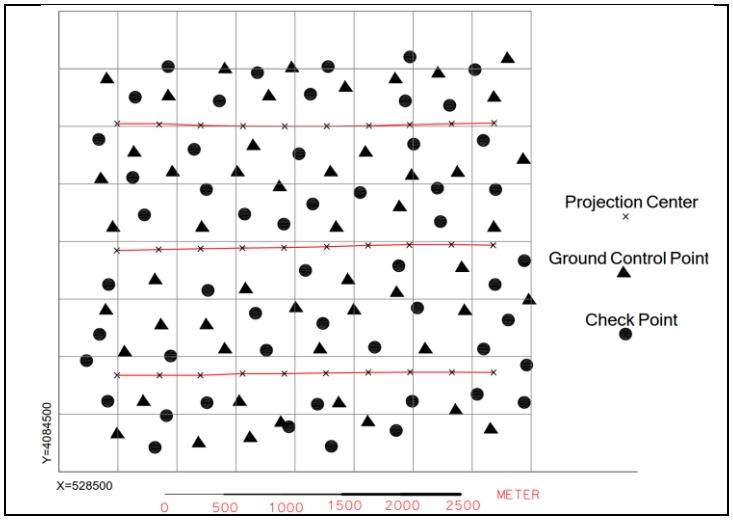
مطابق با رابطه (۱۰) معیار $External_{correlation}$ میانگین کلیه درایه‌های ماتریس $E\&S$ بوده، که معیاری از متوسط همبستگی بین ضرائب چندجمله‌ای‌ها با پارامترهای توجیه خارجی حاصل از سرشکنی می‌باشد.

۳- داده ورودی

منطقه مورد عکسبرداری جهت تهیه داده، شهرستان نَقَده یکی از شهرهای جنوبی استان آذربایجان غربی و مرکز شهرستان نقده با بافت کوهستانی و شهری و تغییرات ارتفاعی حدود ۲۵۰ متر انتخاب گردید. این شهر در ۹۵ کیلومتری جنوب شرق ارومیه واقع شده است. موقعیت جغرافیایی این شهر 36.9564° شمالی, 45.3881° شرقی و در ارتفاع ۱۲۹۹ متری از سطح دریای آزاد واقع شده است. دوربین مورد استفاده التراکم ایکس پی در سال ۱۳۹۳با فاصله کانونی ۱۰۰.۵ میلیمتر در مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰، در سه نوار پروازی شامل ۳۰ تصویر با پوشش طولی ۶۰ درصد و پوشش عرضی ۲۰ درصد عکسبرداری قائم نموده است. در این بلوک پروازی ۵۲ نقطه کنترل زمینی و ۵۲ نقطه چک مطابق با شکل (۱) طراحی شده است.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]



شکل ۱: طراحی پرواز به‌همراه نقاط کنترل و چک در منطقه نقده

۴- روش تحقیق و پیاده‌سازی

با توجه به تحقیقات انجام شده جهت بررسی تاثیر طراحی پرواز بر روی پارامترهای کالیبراسیون نیاز به بلوک‌های مختلف پروازی و ارزیابی نتایج می‌باشد. با توجه به محدودیت‌های اجرایی و هزینه‌های بالا، تهیه تصاویر واقعی در تمامی حالات پروازی و ارزیابی آنها امکان پذیر نمی‌باشد، از این‌رو در این تحقیق بلوک‌های عکسی در حالات مختلف شبیه‌سازی شده و سپس مورد تحلیل و بررسی جامع قرار گرفتند [۱۸ و ۱۷]. روند کلی انجام این تحقیق در شکل (۲) ارائه گردیده است.

همانطور که در شکل(۲) بیان شده است، جهت بررسی صحت داده‌های شبیه‌سازی شده، از داده واقعی بهره گرفته شد. از این رو در ادامه دو موضوع مورد بحث و بررسی قرار خواهد گرفت:

۱- طراحی و ارزیابی یک روش شبیه‌سازی بلوک تصاویر التراکم
۲- ارزیابی پارامترهای پرواز بر روی دقت خودکالیبراسیون با استفاده از داده‌های شبیه‌سازی شده.

۴-۱-طراحی و ارزیابی روش شبیه‌سازی رفتار بلوک تصاویر التراکم

در این بخش در ابتدا نحوه ایجاد داده‌های شبیه‌سازی شده بیان می‌گردد و در ادامه صحت ساختار بلوک‌های شبیه‌سازی شده از طریق مقایسه با داده واقعی ارزیابی می‌گردد.

۴-۱-۱- طراحی یک روش شبیه سازی

برای ایجاد داده‌های شبیه‌سازی شده دوربین التراکم نیاز به مطالعه و بررسی بر روی خطاهای سیستماتیک محتمل در فضای تصویر این دوربین رقومی می‌باشد، به نحوی که می‌توان با تولید بردارهای خطا به‌طور اتفاقی و منطقی در فضای تصویر دوربین التراکم، عملکرد هر یک از مدل‌های ریاضی و میزان موفقیت هر یک در برازش روی داده‌های تولید شده را بررسی نمود. در سنجنده التراکم ، چهار دوربین رقومی مجزا برای عکسبرداری طراحی شده‌اند. هریک از دوربین‌های مذکور با محورهای اصلی نسبتاً موازی بر بدنه‌ی التراکم جای گرفته‌اند. تفاوت هر یک از این دوربین‌ها در نحوه‌ی طراحی و چیدمان سی سی دی[1] ها در فضای تصویرمی‌باشد. همانطورکه گفته شد، این نوع

[1] CCD(Charge Couple Device)

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

دوربین خود شامل ۴ دوربین رقومی می‌باشد که ویژگی هریک از این دوربین‌ها در ادامه ارائه شده است.

- **دوربین شماره ۱ (پانکروماتیک)**

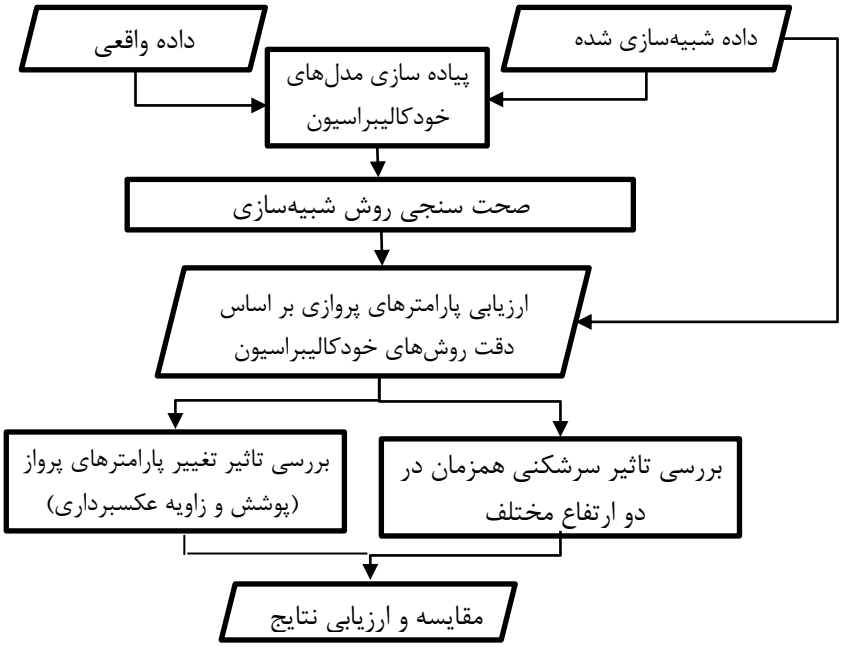
این دوربین از یک مجموعه‌ی CCD سطحی نصب شده در فضای تصویر تشکیل شده است. ابعاد اسمی فضای تصویر (مختصات دو گوشه از CCD) و سایر مشخصات هندسی آن در جدول(۱) ارائه شده است.

- **دوربین شماره ۲ (پانکروماتیک)**

این دوربین از دو مجموعه‌ی CCD سطحی نصب شده در فضای تصویر تشکیل شده است. ابعاد اسمی فضای تصویر (مختصات دو گوشه از CCD) و سایر مشخصات هندسی آن در جدول(۲) ارائه شده است.

- **دوربین شماره ۳ (دوربین Master) - پانکروماتیک**

دوربین شماره‌ی۳ به‌عنوان دوربین اصلی، از چهار CCD درچهار گوشه‌ی میدان دید خود تشکیل شده است. در تولید محصول نهایی، از تصویر اخذ شده توسط دوربین اصلی بعنوان مبنای اتصال تصاویر اخذ شده توسط باقی CCDها استفاده می‌شود.همانطور که بیان شد، این دوربین از چهار مجموعه‌ی CCD سطحی نصب شده در فضای تصویر تشکیل شده است. ابعاد اسمی فضای تصویر (مختصات دو گوشه از CCD) و سایر مشخصات هندسی در جدول(۳) ارائه شده است.



شکل ۲: روند کلی تحقیق

جدول ۱: مشخصات هندسی دوربین شماره ۱ سنجنده‌ی التراکم

مشخصات	التراکم دی	التراکم ایکس پی
گستره‌ی مختصاتی تصویر	LL[1]: (-12.01, -18.04)mm UR[2]: (12.01, 18.04)mm	LL: (-11.98, -17.97)mm UR: (11.98, 17.97)mm
CCD0	LL: (-12.01, -18.04)mm UR: (12.01, 18.04)mm	LL: (-11.98, -17.97)mm UR: (11.98, 17.97)mm

[1] Lower Left
[2] Upper Right

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

جدول ۲: مشخصات هندسی دوربین شماره ۲ سنجنده‌ی التراکم

مشخصات	التراکم دی	التراکم ایکس پی
گستره‌ی مختصاتی تصویر	LL: (-12.01, -51.75)mm UR: (-12.01, -51.75)mm	LL: (-11.98, -52.22)mm UR: (11.98, 52.22)mm
CCD0	LL: (-12.01, -51.75)mm UR: (12.01, -15.75)mm	LL: (-11.98, -52.22)mm UR: (11.98, -16.28)mm
CCD1	LL: (-12.01, 15.75)mm UR: (12.01, 51.75)mm	LL: (-11.98, 16.28)mm UR: (11.98, 52.22)mm

جدول ۳: مشخصات هندسی دوربین شماره ۳ سنجنده‌ی التراکم

مشخصات	التراکم دی	التراکم ایکس پی
گستره‌ی مختصاتی تصویر	LL: (-33.75, -51.75)mm UR: (33.75, 51.75)mm	LL: (-34.28, -52.22)mm UR: (34.28, 52.22)mm
CCD0	LL: (-33.75, -51.75)mm UR: (-9.75, -15.75)mm	LL: (-34.28, -51.75)mm UR: (-10.32, -16.28)mm
CCD1	LL: (-33.75, 15.75)mm UR: (-9.75, 51.75)mm	LL: (-34.28, 16.28)mm UR: (-10.32, 51.75)mm
CCD2	LL: (-9.75, -51.75)mm UR: (33.75,-15.75)mm	LL: (-10.32, -51.75)mm UR: (34.28,-16.28)mm
CCD3	LL: (9.75, 15.75)mm UR: (33.75,51.75)mm	LL: (10.32, 16.28)mm UR: (34.28,51.75)mm

- **دوربین شماره ۴ (پانکروماتیک)**

این دوربین از دو مجموعه‌ی CCD سطحی نصب شده در فضای تصویر تشکیل شده است. ابعاد اسمی فضای تصویر (مختصات دو گوشه از CCD) و سایر مشخصات هندسی آن در جدول(۴) ارائه شده است.

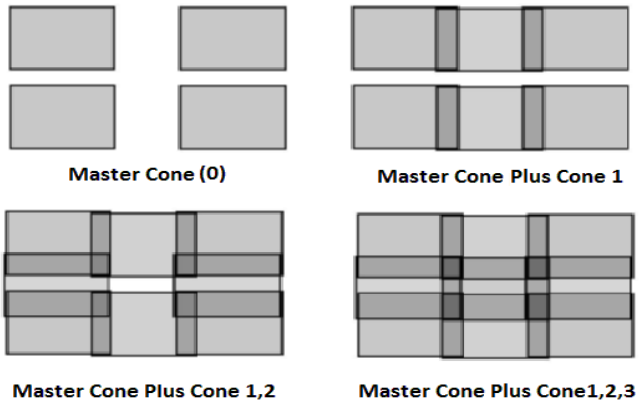
جدول ۴: مشخصات هندسی دوربین شماره ۴ سنجنده‌ی التراکم

مشخصات	التراکم دی	التراکم ایکس پی
گستره‌ی مختصاتی تصویر	LL: (-12.01, -51.75)mm UR: (12.01, 51.75)mm	LL: (-11.98, 52.22)mm UR: (11.98, 52.22)mm
CCD0	LL: (-12.01, -51.75)mm UR: (12.01, -15.75)mm	LL: (-11.98, -52.22)mm UR: (11.98, -16.28)mm
CCD1	LL: (-12.01, 15.75)mm UR: (12.01, 51.75)mm	LL: (-11.98, 16.28)mm UR: (11.98, 52.22)mm

با توجه به مطالب گفته شده، مجموعه‌ای از ۹ CCD مجزا در تشکیل یک تصویر پانکروماتیک نقش داشته که هر یک از CCDهای مذکور در موقعیت خاصی در فضای تصویر قرار گرفته‌اند. دوربین شماره‌ی ۳ به‌عنوان دوربین اصلی، از چهار CCD درچهار گوشه‌ی میدان دید خود تشکیل شده است. در تولید محصول نهایی، از تصویر اخذ شده توسط دوربین اصلی به‌عنوان مبنای اتصال تصاویر اخذ شده توسط باقی CCDها استفاده می‌شود. شکل (۳) نحوه چیدمان تصاویر را نشان می‌دهد [۶و۷،۸].

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]



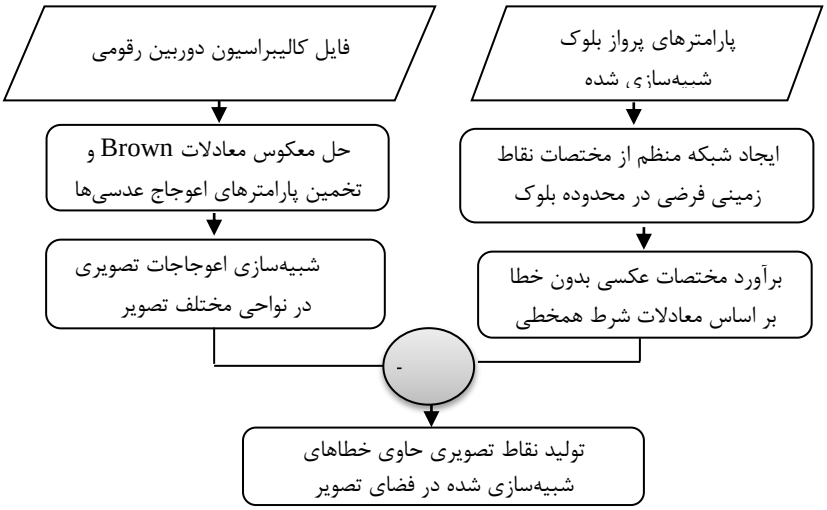
شکل ۳: نحوه قرار گرفتن تصاویر از هرعدسی در دوربین التراکم [۸]

بر اساس مطالعات انجام شده بر روی نحوه تشکیل تصویر دوربین رقومی التراکم و سایر تحقیقات انجام شده در حوزه شبیه سازی تصاویر رقومی، روند کلی تولید داده های شبیه سازی در شکل(۴) ارائه می‌گردد [۱۸و۱۷].

بر اساس شکل (۴) فوق، شبیه‌سازی تصاویر بلوک التراکم شامل سه مرحله اصلی به شرح زیر است:

- ایجاد بلوک عکسی بر اساس پارامترهای پروازی
- ایجاد نقاط مجازی بدون حضور خطا
- افزودن خطای شبیه‌سازی شده التراکم بر روی نقاط

برای ایجاد بلوک شبیه سازی شده ابتدا نسبت به انتخاب پارامترهای پرواز (تعداد نوار، تعداد تصویر، مقیاس عکسبرداری، زاویه عکسبرداری، میزان پوشش طولی و عرضی)اقدام می‌شود. سپس با توجه به تعداد تصاویر و تعداد نوارها، پارامترهای توجیه خارجی (مرکز تصویر و وضعیت دوربین) برای هر تصویر به‌صورت تصادفی ایجاد می‌گردد. یک شبکه منظم فرضی از مختصات نقاط زمینی با توجه به مقیاس عکس و میزان پوشش طولی و عرضی، تعداد تصاویر و تعداد نوارهای پروازی به‌صورت شبیه‌سازی شده ایجاد می‌گردد. شبکه نقاط زمینی به‌عنوان نقطه کنترل زمینی و مقادیر پارامترهای توجیه خارجی که به‌صورت تصادفی ایجاد شده‌اند، وارد معادلات شرط همخطی می‌گردند. در نهایت نقاط عکسی با حل معکوس معادلات شرط همخطی بدون خطا در فضای تصویر تولید می‌شود.



شکل ۴: روند تولید داده‌های شبیه سازی شده

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

در ادامه بایستی شبیه‌سازی اعوجاجات تصویر در نواحی مختلف تصویر صورت پذیرد. هر کدام از عدسی‌ها از رفتار اعوجاجی خاص خود برخوردار است. برای هر شبیه‌سازی رفتار خطا، اعوجاجات شعاعی به‌عنوان اعوجاج غالب در شعاع‌های مختلف تصویری منظور شده است. بر اساس فایل کالیبراسیون ارائه شده از سوی کارخانه سازنده برای هر عدسی از دوربین رقومی التراکم میزان اعوجاج شعاعی و مماسی اعلام گردیده است. براساس حل معکوس معادلات بروان (رابطه (۱)) می‌توان مقادیر هر یک از پارامترهای اضافه(ضرائب اعوجاج عدسی) جهت سلف کالیبراسیون را محاسبه نمود.

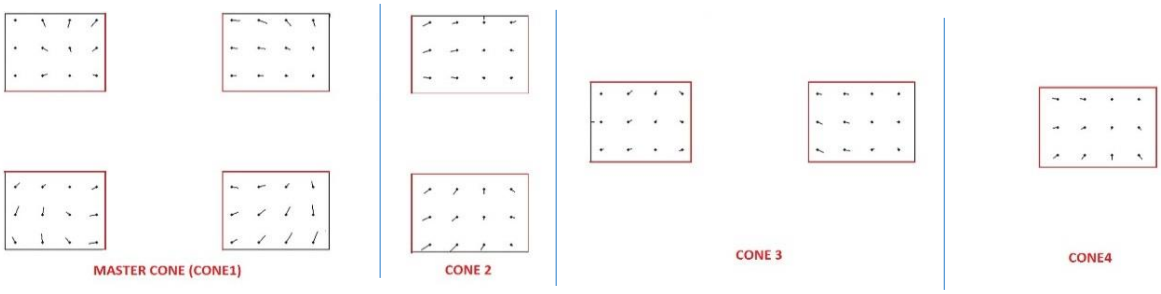
در واقع به‌منظور تخمین مقادیر اولیه و دامنه تغییرات ضرایب اعوجاج عدسی با بهره‌گیری از اطلاعات فایل کالیبراسیون دوربین، رابطه (۱) به‌طور معکوس حل و مقادیر اولیه طبق جدول(۵) حاصل شد [۱۴و۱].

جدول ۵: مقادیر اولیه پارامترهای اعوجاج حاصل از فایل کالیبراسیون دوربین رقومی التراکم ایکس پی

پارامتر	عدسی۰	عدسی۱	عدسی۲	عدسی۳	دامنه
K1	3.03E-04	-2.85E-05	-1.18E-04	2.75E-04	$\pm 10^{-5}$
K2	-1.55E-07	-3.68E-08	-8.21E-08	-7.17E-07	$\pm 10^{-8}$
K3	7.52E-11	4.34E-11	5.45E-11	1.27E-09	$\pm 10^{-11}$
B1	8.15E-05	3.11E-05	1.26E-05	9.46E-05	$\pm 10^{-5}$
B2	-1.02E-05	5.14E-06	-2.11E-05	-5.11E-05	$\pm 10^{-5}$
P1	-6.17E-07	6.98E-08	3.30E-07	6.41E-07	$\pm 10^{-7}$
P2	8.34E-06	3.99E-06	-1.09E-06	-5.11E-06	$\pm 10^{-6}$

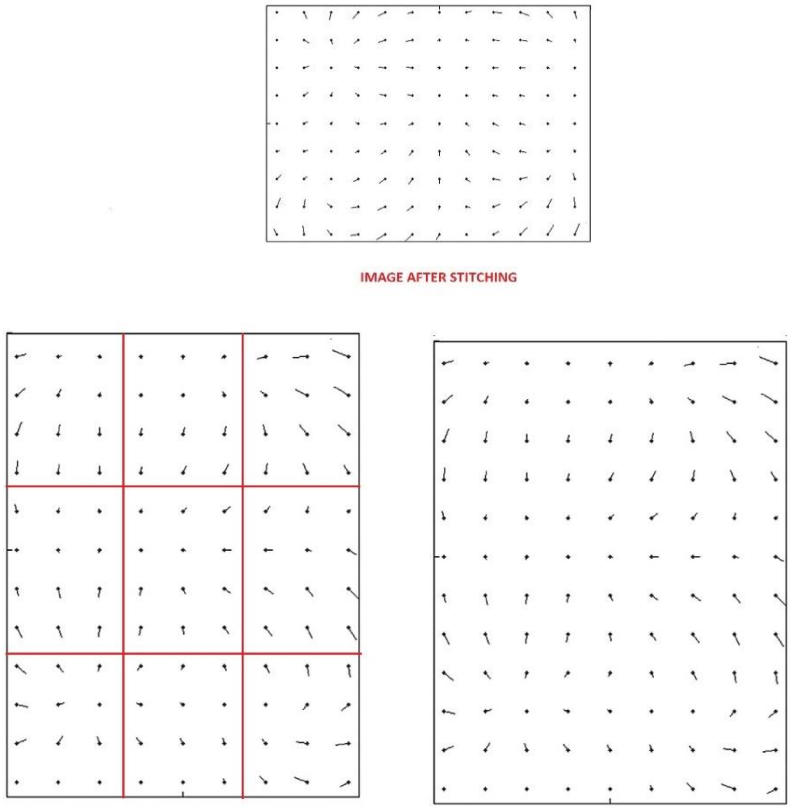
به‌منظور شبیه‌سازی رفتار اعوجاجات عدسی‌ها در سطح تصویر ابتدا با در نظر گرفتن دامنه‌ای محدود از تغییرات (ستون آخر جدول(۵)) نسبت به انتخاب تصادفی ضرائب هر کدام از عدسی‌ها اقدام شده است. این مقادیر تصادفی در رابطه (۱) وارد و به کمک آن بردارخطای عدسی‌ها در مناطق مختلف تصویر بازسازی شد. همانطور که گفته شد برای هریک از نقاط شبکه منظم فرضی، مختصات، عکسی بدون خطا برآورد شده است. بر اساس این مختصات ابتدا عدسی مربوطه شناسایی (بر اساس گستره مختصاتی ارائه شده در جداول) و میزان خطا در آن نقطه برآورد می‌گردد. با افزودن خطای برآورد شده به مختصات اولیه، مجموعه‌ای از تصاویر با خطای شبیه‌سازی شده در اختیار خواهیم داشت.

متناسب با هر تصویر با توجه به اینکه هر تصویر دارای اعوجاجات عدسی مربوط به خود است، بردارهای خطا در تصویر نهایی مجموعه‌ایی از بردارهای خطا از هر زیر تصویرمی‌باشد. شکل (۵ و ۶) بردارهای خطا به‌صورت تفکیکی در هر تصویر و تصویر نهایی را نشان می‌دهد.



شکل ۵: بردارهای خطای هر عدسی به تفکیک

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]



شکل ۶: تصویر پیچیده (مجموع بردارهای خطا در یک تصویر)

۴-۱-۲- اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی بر اساس داده واقعی

برای اعتبارسنجی روش شبیه‌سازی از مقایسه نتایج مدل‌های خودکالیبراسیون بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده و داده واقعی معادل آن استفاده شده است. به این منظور بلوک عکسی واقعی شهرستان نقده به روش توضیح داده شده در بخش ۴-۱-۱ شبیه‌سازی شد و مدل‌های مختلف کالیبراسیون بر روی این دو بلوک (واقعی و شبیه‌سازی شده معادل آن) پیاده‌سازی گردید. مقایسه نتایج حاصل از این دو مدل (واقعی و شبیه‌سازی شده معادل آن) در جدول (۶) ارائه شده است.

جدول ۶: نتایج ارزیابی دقت مسطحاتی و ارتفاعی تصاویر واقعی و تصاویر شبیه سازی شده با پوشش طولی۶۰ درصد و پوشش عرضی۲۰ درصد در مقیاس۱:۱۰،۰۰۰

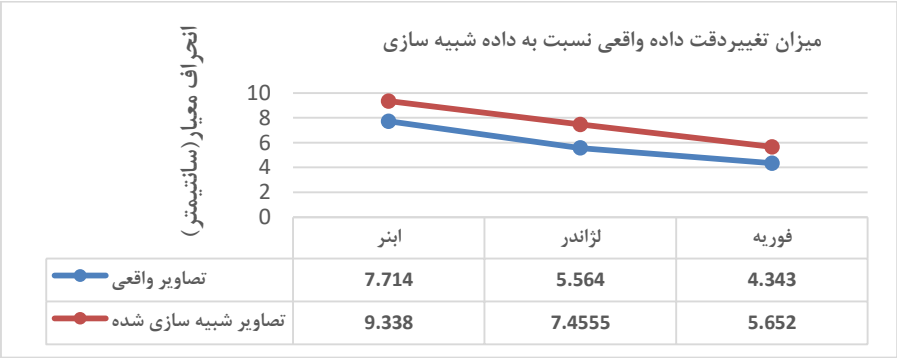
مقایسه نتایج	دقت مسطحاتی(RMSE)			دقت ارتفاعی(RMSE) سانتیمتر		
	ابنر	لژاندر	فوریه	ابنر	لژاندر	فوریه
داده شبیه	۹٫۹۳۸	۷٫۴۵۵	۵٫۶۵۲	۱۲٫۴۷۲	۹٫۱۸۴	۸٫۲۲۴
داده واقعی	۷٫۷۱۴	۵٫۵۶۴	۴٫۳۴۳	۹٫۴۸۱	۶٫۹۰۸	۶٫۲۱۳
نسبت دقت	۱٫۲۸	۱٫۳۳	۱٫۳۰	۱٫۳۱	۱٫۳۳	۱٫۳۲

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

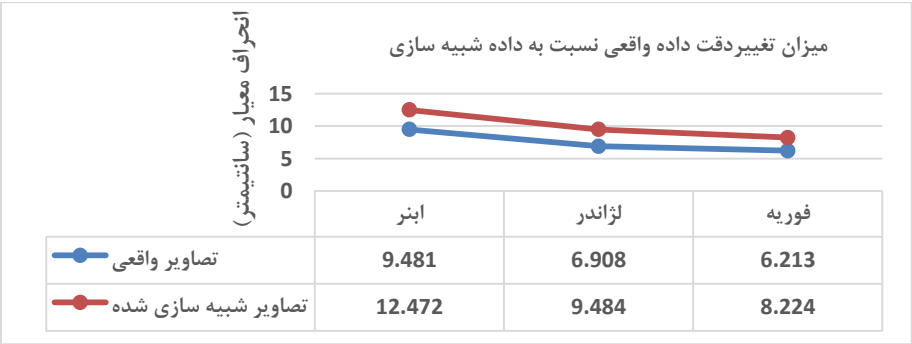
باتوجه به شکل‌های (۷ و ۸) مشاهده می‌شود که دقت در هر روش کالیبراسیون بر اساس داده واقعی نسبت به‌داده شبیه‌سازی شده بالاتر است. در واقع در تصاویر شبیه‌سازی شده به‌دلیل تغییر در تمامی پارامترهای اعوجاج به‌صورت تصادفی، احتمال وقوع بردارهای خطا بزرگ در تصویر وجود دارد، از این رو میزان دقت در تصاویر شبیه‌سازی شده از تصاویر واقعی کمتر است.

در جدول(۲) سطر آخر دقت نسبی داده واقعی در مقایسه با داده شبیه‌سازی شده ارائه گردیده است. درصد تغییرات نسبت دقت حاصل از داده واقعی به داده شبیه‌سازی شده کمتر از ۳ درصد می‌باشد. میزان تغییر دقت در داده واقعی نسبت به داده شبیه‌سازی مبین الگوی تغییرات یکنواخت بین این دو نوع داده می‌باشد. این الگوی یکنواخت برای دقت ارتفاعی در شکل (۸) نیز نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های (۷ و ۸) می‌توان نتیجه گرفت که در تصاویر شبیه‌سازی امکان کوچک‌نمایی و بزرگ‌نمایی دقت حاصل از خودکالیبراسیون وجود دارد، ولی میزان دقت ارائه شده به‌صورت نسبی با دقت حاصل از تصاویر واقعی مطابقت دارد. در نتیجه روند شبیه‌سازی پیشنهادی، روندی منطقی و قابل اعتماد است، و داده شبیه‌سازی شده جایگزین مناسبی برای داده واقعی خواهد بود. همان‌طور که بیان شد تهیه تصاویر واقعی در تمامی حالات پروازی و ارزیابی آنها امکان پذیر نمی‌باشد، از این رو در ادامه از بلوک‌های عکسی مختلف شبیه سازی شده جهت تحلیل و بررسی تاثیر پارامترهای پرواز در دقت کالیبراسیون استفاده شده است.



شکل ۷: نمودار مقایسه دقت مسطحاتی داده واقعی در مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰ و داده شبیه‌سازی شده با پوشش طولی ۶۰ درصد و عرضی ۲۰ درصد



شکل ۸: نمودار مقایسه دقت ارتفاعی داده واقعی در مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰ و داده شبیه‌سازی شده با پوشش طولی ۶۰ درصد و عرضی ۲۰ درصد

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

۴-۲- ارزیابی پارامترهای پروازی بر روی دقت خودکالیبراسیون

با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده در زمینه طراحی پرواز به‌منظور کالیبراسیون دو موضوع در ادامه مورد بحث و بررسی قرار گرفته است.

۱- بررسی تاثیر پارامترهای پرواز (ارتفاع، پوشش و زاویه عکسبرداری)

۲- بررسی تاثیر تلفیق دو ارتفاع مختلف و سرشکنی همزمان در روش خود کالیبراسیون

جهت ارزیابی پارامترهای پروازی بر روی نتایج خودکالیبراسیون نیاز به ایجاد بلوک‌های عکسی در مقیاس‌های مختلف و زوایای پروازی متفاوت در فاز شبیه‌سازی می‌باشد. بلوک عکسی شبیه‌سازی شده در حالات مختلف در دو مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰ و ۱:۷،۰۰۰طبق جدول‌های (۷ و ۸) طراحی گردید. با توجه به‌بررسی انجام شده در سازمان‌های متولی تولید نقشه در کشور اکثر عکسبرداری‌های انجام شده با دوربین رقومی التراکم در مقیاس متوسط (بین ۱:۶۰۰۰ تا ۱:۱۶۰۰۰) بوده است. از این‌رو در این تحقیق جهت شبیه‌سازی پارامترهای پروازی از دو مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰ و ۱:۷،۰۰۰ بهره گرفته شده است. حالت اول عکسبرداری در حالت نرمال با پوشش طولی ۶۰٪ و پوشش عرضی ۲۰٪ می‌باشد. حالت دوم تمامی شرایط حالت اول را داراست با این اختلاف که دوربین با حالت تیلت‌دار شبیه‌سازی شده است ($-۲۵^\circ<\omega<۲۵^\circ$). در حالت سوم پوشش طولی و عرضی افزایش یافته است.

محورهای ارزیابی به چهار حالت زیر تقسیم بندی می‌شوند:

۱- تغییر در پوشش تصویر

۲- تغییر در ارتفاع پرواز

۳- تغییر در زاویه عکسبرداری

۴- سرشکنی همزمان در دو ارتفاع مختلف

جدول ۷: طراحی پرواز و تعداد نقاط کنترل زمینی و چک در حالت داده‌های شبیه‌سازی شده در مقیاس۱:۱۰،۰۰۰

پارامترهای پرواز	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
تعداد نوار	۵	۵	۷
تعداد تصویر	۴۵	۴۵	۶۰
پوشش طولی	٪۶۰	٪۶۰	٪۸۰
پوشش عرضی	٪۲۰	٪۲۰	٪۶۰
زاویه تقارب	قائم	$(-۲۵^\circ<\omega<۲۵^\circ)$	قائم

جدول (۸) مشخصات این سه بلوک شبیه‌سازی شده در مقیاس ۱:۷،۰۰۰ را نشان می‌دهد.

جدول ۸: طراحی پرواز و تعداد نقاط کنترل زمینی و چک در حالت داده های شبیه سازی شده در مقیاس۱:۷،۰۰۰

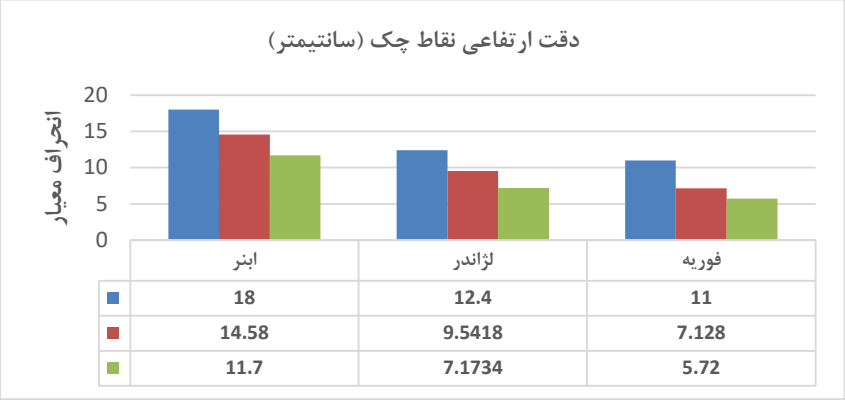
پارامترهای پرواز	حالت اول	حالت دوم	حالت سوم
تعداد نوار	۷	۷	۹
تعداد تصویر	۶۰	۶۰	۷۵
پوشش طولی	٪۶۰	٪۶۰	٪۸۰
پوشش عرضی	٪۲۰	٪۲۰	٪۶۰
زاویه تقارب	قائم	$(-۲۵^\circ<\omega<۲۵^\circ)$	قائم

۴-۲-۱- بررسی تاثیر تغییر پارامترهای پرواز (پوشش و زاویه عکسبرداری)

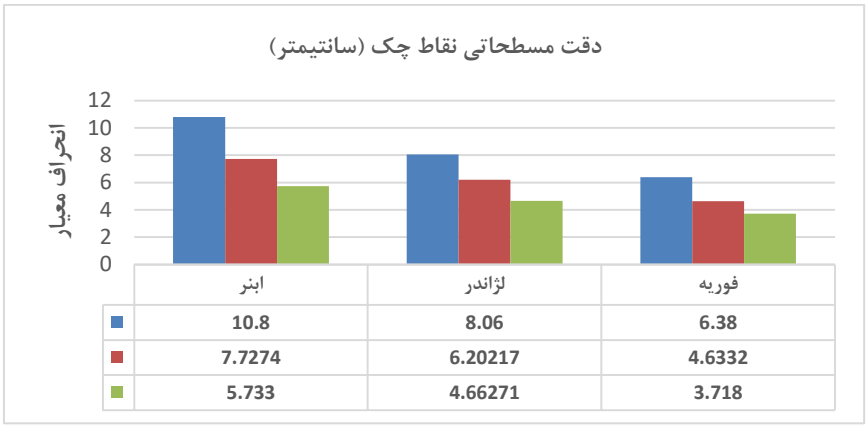
هدف اصلی از این بررسی تعیین میزان تاثیر تغییر پارامترهای پروازی از نقطه نظر پوشش تصویر و تغییر در زاویه عکسبرداری می‌باشد. شکل‌های (۹ و ۱۰) به‌ترتیب دقت‌های ارتفاعی و مسطحاتی حاصل از پیاده‌سازی مدل‌های مختلف بر روی بلوک‌های شبیه‌سازی شده در مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰را نشان می‌دهند. همچنین شکل (۱۱) همبستگی خارجی بین روش‌های مختلف را نشان می‌دهد.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

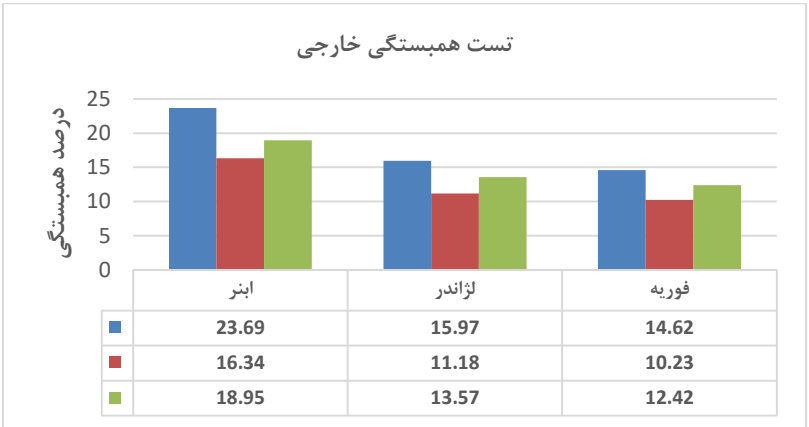
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]



شکل ۹: نمودار نتایج ارزیابی دقت ارتفاعی بلوک‌های شبیه‌سازی حالت اول، دوم و سوم در مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰



شکل ۱۰: نمودار نتایج ارزیابی دقت مسطحاتی بلوک‌های شبیه‌سازی حالت اول، دوم و سوم در مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰



شکل ۱۱: نمودار تست همبستگی خارجی بلوک‌های مختلف شبیه‌سازی حالت اول، دوم و سوم در مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰

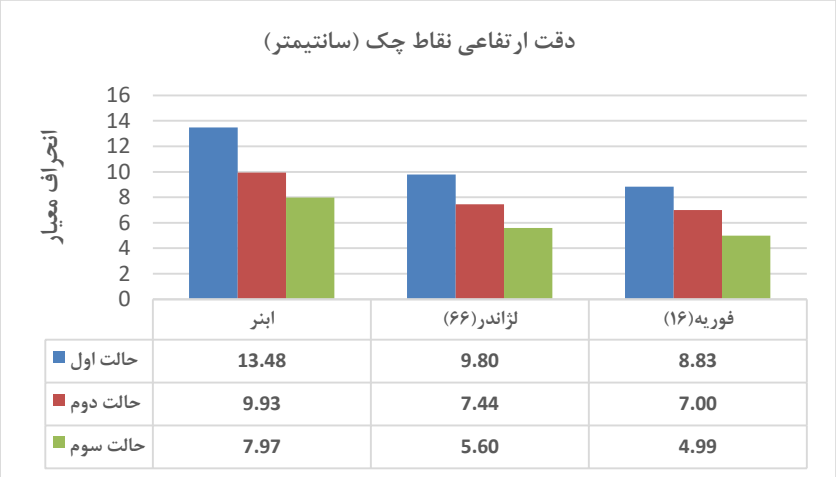
- از مقایسه حالت اول و دوم تاثیر تغییر در زاویه عکسبرداری مشخص می‌گردد. بر اساس شکل‌های (۹ و ۱۰) افزایش دامنه تغییرات زاویه ω (عکسبرداری غیر قائم) باعث افزایش دقت مسطحاتی و ارتفاعی نسبت به حالت عکسبرداری نرمال می‌گردد.
- از مقایسه حالت اول و سوم تاثیر تغییر در پوشش طولی و عرضی مشخص می‌گردد. بر اساس نتایج حاصل این افزایش نیز باعث بهبود ۱۸ درصدی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

دقت مسطحاتی و ارتفاعی نسبت به حالت عکسبرداری نرمال می‌شود.

- از مقایسه حالت دوم و سوم تاثیر تغییر در زاویه عکسبرداری و تغییر در میزان پوشش مشخص می‌گردد. تاثیر میزان پوشش بر دقت مسطحاتی و ارتفاعی بیشتر از تغییر در زاویه عکسبرداری می‌باشد. البته بر اساس شکل (۱۱) میزان وابستگی خارجی بین پارامترهای اضافه و پارامترهای توجیه خارجی در حالت عکسبرداری غیر قائم کمتر از سایر حالات می‌باشد. به نحوی که در بلوک‌های شبیه‌سازی شده افزایش دامنه تغییرات پارامتر ω ($-۲۵^{\circ}<\omega<۲۵^{\circ}$) باعث کاهش نسبی ۳ تا ۵ درصدی همبستگی خارجی شده است.

به‌طور خلاصه براساس شکل های (۹ و ۱۰) بهترین دقت ارتفاعی و مسطحاتی در بلوک شبیه‌سازی شده حالت سوم (افزایش پوشش طولی و عرضی) ایجاد شده است. دلیل اصلی این امر را می‌توان افزایش تعداد مشاهدات عکسی برشمرد. این در حالی است که طبق شکل (۱۱) از نقطه نظر کاهش همبستگی خارجی (همبستگی بین پارامترهای توجیه خارجی و ضرائب روابط خودکالیبراسیون) حالت دوم (افزایش زاویه تقارب) موثرتر می‌باشد. به‌عبارت دیگر افزایش پوشش‌های طولی و عرضی به بهبود دقت ارتفاعی و عکسبرداری غیر قائم منجر به کاهش همبستگی خارجی می‌گردد. این آزمایش در مقیاس ۱:۷،۰۰۰ نیز نتایج مشابهی را در برداشته است. شکل‌های (۱۲ و ۱۳) دقت ارتفاعی و مسطحاتی در مقیاس ۱:۷،۰۰۰ را نشان می‌دهد.

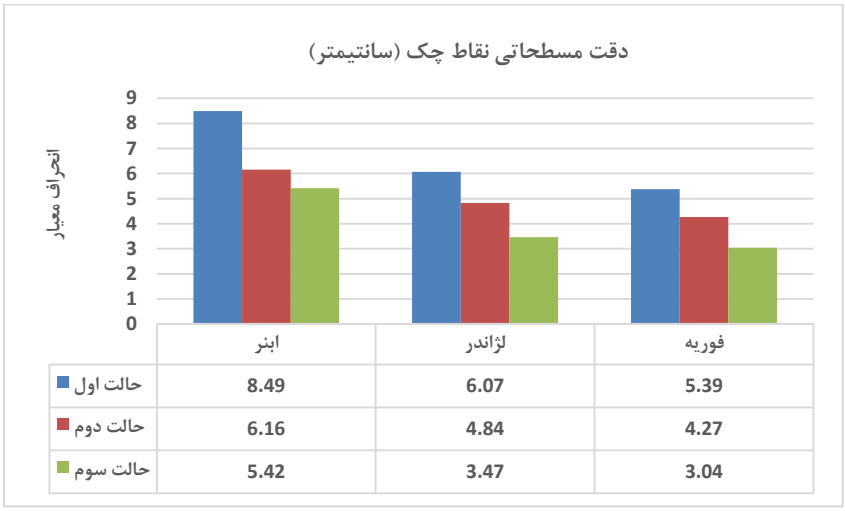


	ابنر	لژاندر(۶۶)	فوریه(۱۶)
حالت اول	13.48	9.80	8.83
حالت دوم	9.93	7.44	7.00
حالت سوم	7.97	5.60	4.99

شکل ۱۲: نمودار نتایج ارزیابی دقت ارتفاعی شبیه‌سازی حالت اول، دوم و سوم در مقیاس ۱:۷،۰۰۰

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

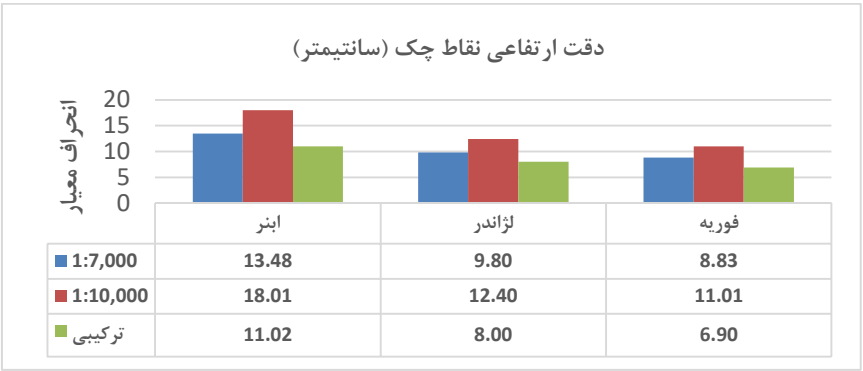


	ابنر	لژاندر	فوریه
حالت اول	8.49	6.07	5.39
حالت دوم	6.16	4.84	4.27
حالت سوم	5.42	3.47	3.04

شکل ۱۳: نمودار نتایج ارزیابی دقت مسطحاتی شبیه‌سازی حالت اول، دوم و سوم در مقیاس ۱:۷،۰۰۰

۴-۲-۲- بررسی تاثیر سرشکنی همزمان در دو ارتفاع مختلف

جهت بررسی تاثیر سرشکنی همزمان در دو ارتفاع مختلف از دو بلوک عکسی شبیه‌سازی شده در دو مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰ و ۱:۷،۰۰۰ بهره گرفته شده است. برای انجام این سرشکنی ترکیبی از تمام تصاویر در دو مقیاس مختلف در یک حل همزمان استفاده شده است. شکل‌های (۱۴ و ۱۵) نتایج ارزیابی دقت ارتفاعی و مسطحاتی حاصل از این نوع سرشکنی مربوط به حالت اول (عکسبرداری نرمال) در مقیاس ۱:۱۰،۰۰۰ و ۱:۷،۰۰۰ و حالت ترکیبی (سرشکنی همزمان تمام مشاهدات در دو مقیاس مختلف) را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۶) همبستگی خارجی بین پارامترها در حالت اول شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

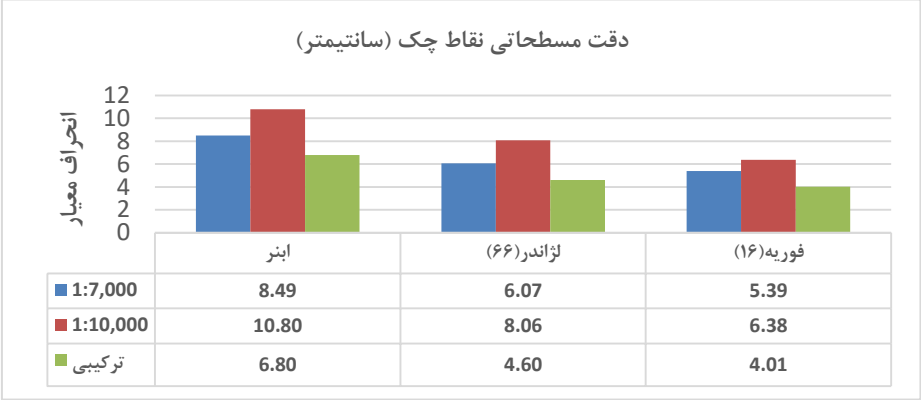


	ابنر	لژاندر	فوریه
1:7,000	13.48	9.80	8.83
1:10,000	18.01	12.40	11.01
ترکیبی	11.02	8.00	6.90

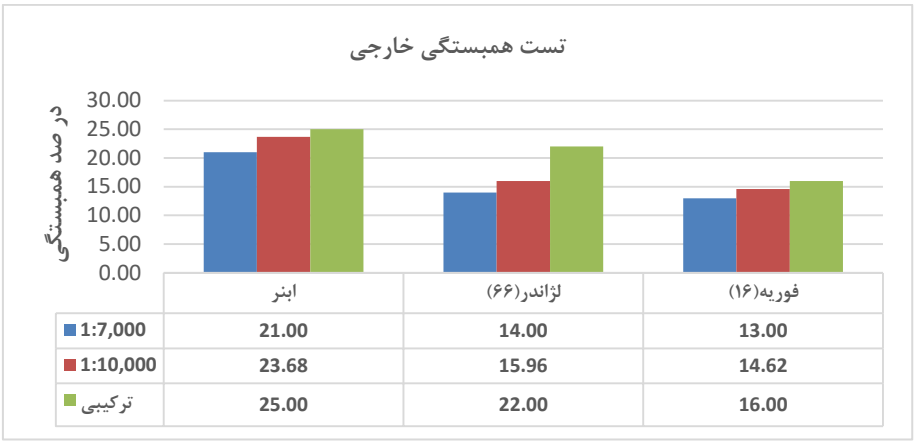
شکل ۱۴: نمودار نتایج ارزیابی دقت ارتفاعی در مقیاس های ۱:۷،۰۰۰، ۱:۱۰،۰۰۰ و سرشکنی ترکیبی حالت اول شبیه‌سازی شده

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]



شکل ۱۵: نمودار نتایج ارزیابی دقت مسطحاتی در مقیاس های ۱:۷،۰۰۰، ۱:۱۰،۰۰۰ و سرشکنی ترکیبی حالت اول شبیه‌سازی شده



شکل ۱۶: نمودار تست همبستگی خارجی در مقیاس‌های ۱:۷،۰۰۰، ۱:۱۰،۰۰۰ و سرشکنی ترکیبی حالت اول شبیه‌سازی شده

با توجه به شکل (۱۴ و ۱۵) حل همزمان دو بلوک عکسی مربوط به دو ارتفاع مختلف باعث افزایش دقت در مقایسه با سرشکنی یک بلوک در یک مقیاس می‌گردد. در واقع حل همزمان بلوک عکسی در دو ارتفاع مختلف باعث بهبود دقت ارتفاعی در حدود ۲۵ درصد و دقت مسطحاتی در حدود ۱۵ درصد می‌گردد. بر اساس شکل (۱۶) میزان همبستگی خارجی در حالت ترکیبی از الگوی منظمی پیروی نمی‌کند. از این رو سرشکنی همزمان در دو ارتفاع مختلف باعث بهبود همبستگی خارجی در مقایسه با سرشکنی در یک ارتفاع نمی‌گردد.

۴-۳- مقایسه و ارزیابی نتایج

با توجه به استفاده از داده شبیه‌سازی دوربین رقومی التراکم ایکس پی برای اولین بار در این مقاله امکان بررسی و ارزیابی میزان تاثیر زاویه عکسبرداری و مقایسه آن با شرایط تغییر در پوشش طولی و عرضی به‌وجود آمد که این امر در سایر مقالات ارائه شده در این حوزه مورد ارزیابی قرار نگرفته است. همانطور که بیان گردید براساس شکل‌های (۹ و ۱۰) بهترین دقت ارتفاعی و مسطحاتی در بلوک شبیه‌سازی شده حالت سوم (افزایش پوشش طولی و عرضی) ایجاد شده است. این در حالی است که طبق شکل (۱۱) از نقطه نظر کاهش همبستگی خارجی (همبستگی بین پارامترهای توجیه خارجی و ضرائب روابط خودکالیبراسیون) حالت دوم (افزایش زاویه تقارب) موثرتر می‌باشد. به‌عبارت دیگر تغییر پوشش‌های طولی و عرضی در دقت ارتفاعی و مسطحاتی و تغییر در زاویه عکسبرداری در همبستگی

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]
[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

خارجی بین پارامترهای توجیه خارجی و ضرائب خودکالیبراسیون سهم بیشتری دارند.

سرشکنی همزمان در دو ارتفاع مختلف در مقاله ارائه شده توسط کرامر نیز مورد بررسی قرار گرفته است، ولی در این مقاله می توان تاثیر سرشکنی همزمان در دوارتفاع مختلف و سرشکنی در حالت تغییر در پوشش طولی و عرضی و تغییر در طول عکسبرداری را نیز با یکدیگر مقایسه نمود. بر اساس نتایج بهدست آمده و مقایسه شکل‌های (۱۲ و ۱۳) با شکل‌های (۱۴ و ۱۵) تاثیر تغییر در پوشش طولی و عرضی در دقت ارتفاعی و مسطحاتی بیشتر از سرشکنی همزمان در دو ارتفاع مختلف می‌باشد. البته سرشکنی همزمان در دو ارتفاع مختلف نتایج مطلوبتری در دقت ارتفاعی و مسطحاتی نسبت به تغییر در زاویه عکسبرداری را ارئه نموده است.

۵- نتیجه گیری و پیشنهادات

با توجه به ظهور تکنولوژی پیچیده در ساخت دوربین‌های رقومی استفاده از معادلات خودکالیبراسیون می‌تواند یک راه حل بهینه و مناسب تلقی گردد. در این راستا انجام فرایند خودکالیبراسیون بر اساس سایت میدانی لازم است تا در مورد نقطه نظر طراحی بلوک پرواز بررسی‌های دقیقی انجام شود.

در این تحقیق تاثیر پارامترهای پروازی بر دقت نهایی حاصل از خودکالیبراسیون دوربین رقومی التراکم مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. دستاوردهای کلی این تحقیق شامل طراحی و اعتبارسنجی یک روش شبیه‌سازی بلوک‌های عکسی دوربین التراکم و تعیین تاثیر پارامترهای مختلف پروازی بر دقت مدل‌های خودکالیبراسیون مربوط به این نوع دوربین می‌باشد

بر اساس نتایج حاصل از این تحقیق افزایش پوشش طولی و عرضی بهبود بالاتری از دقت ارتفاعی و مسطحاتی را در مقایسه با تغییر در زاویه عکسبرداری ($-25^{\circ} < \omega < 25^{\circ}$) به همراه دارد. همچنین عکسبرداری غیر قائم باعث کاهش همبستگی خارجی (پارامترهای توجیه خارجی و ضرائب روابط خودکالیبراسیون) در مقایسه با سایر تغییرات در پارامترهای پروازی می‌گردد. سرشکنی همزمان دو ارتفاع پروازی مختلف در مقایسه با سرشکنی در یک ارتفاع، باعث افزایش دقت مسطحاتی و ارتفاعی می‌گردد.

بهترین راهکار برای کاهش همبستگی خارجی عکسبرداری غیر قائم است، این حالت در عکسبرداری قائم از مناطق با اختلاف ارتفاع زیاد نیز حاصل می‌شود.

با توجه به هزینه بالای ایجاد سایت میدانی و عکسبرداری در حالات مختلف، امکان استفاده از داده‌های واقعی فقط در حالت حل همزمان در دو ارتفاع مختلف در این تحقیق میسر گردید و کلیه ارزیابی‌ها بر اساس داده‌های شبیه‌سازی انجام شده است. از این رو استفاده از داده‌های واقعی می‌تواند در پیشبرد اهداف این تحقیق کمک شایانی داشته باشد.

مراجع

[1] D. C. Brown, " Close range camera calibration", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol. 37 (8),pp. 855-866, 1971.

[2] D. C. Brown, "The bundle method – progress and prospects", International Archives of Photogrammetry vol. 21, pp. 1–33, 1976.

[3] H. Ebner, "Self-calibrating block adjustment", Bildmessung und Luftbildwesen, vol. 44 (4), pp. 128–139, 1976.

[4] C. Fraser, "Digital camera self-calibration", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 52 (4), pp. 149–159, 1997.

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

[5] M. Cramer, G. Grenzdörffer and E. Honkavaara, "In-situ digital airborne camera validation and certification – the future standard?" International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 38(Part 1), 2010.

[6] T. Clarke, J. Fryer, "The development of camera calibration methods and models", Photogrammetric Record, vol. 16 (91), pp. 51–66, 1998.

[7] X. Clarck, J. Wang and G. Freyer,"The principle point and CCD cameras", Photogrammetric Record, vol. 16(92), pp. 293–312, 1998.

[8] Anzengrubergasse. "Calibration Report (Geometric Calibration) Ultra cam Xp", Serial Number UC-SXp-1-30719440, Vexcel Imaging GmbH •, www.ultra cam x.com Page 2 of 14, 2010.

[9] E. Honkavaara, " Calibration in direct georeferencing: theoretical considerations and practical results", Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, vol. 63 (8), pp. 1207–1208, 2004.

[10] M. Cramer, "Digital airborne cameras-Status and future", In Proceedings of ISPRS Hannover Workshop, 2005.

[11] E. Honkavaara, E. Ahokas, J. Hyypp, J. Jaakkola, H. Kaartinen, R. Kuittinen, L. Markelin and M. Nurminen" , Geometric test field calibration of digital photogrammetric sensors", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 60 (6), pp. 387–399, 2006.

[12] E. Honkavaara. "Calibrating digital photogrammetric airborne imaging system using a test field ", Ph.D. thesis, Helsinki University of Technology (Espoo, Finland), 2008.

[13] M. Cramer,"Digital Camera Calibration, European Spatial Data Research (EuroSDR)", Official Publication No. 55, 2009.

[14] S.F. Moniwa, "Advanced photogrammetric system with self-calibration and its applications", Ph.D. thesis, Department of Surveying Engineering, U.N.B., Fredericton, 1977.

[15] R. Tang, D. Fritsch, M. Cramer, and W. Schneider, "A flexible mathematical method for camera calibration in digital aerial photogrammetry", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, vol.78 (10), pp.1069-1077, 2012.

[16] R. Tang, D. Fritsch, and M. Cramer." New rigorous and flexible Fourier self-calibration models for airborne camera calibration", ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 71, pp.76–8, 2013.

[17] E. Rupnik, F. Nex, I. Toschi and F. Remondino, "Aerial multi-camera systems: Accuracy and block triangulation Issues". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. 101, pp. 233-46, 2015.

[18] H.Babapour, M. Mokhtarzade, M.J. Valadan zouj and M. Modiri, "Fourier optimization mathematical model for modeling the geometric error of the digital camera ", Journal of geographic information (sphere), Vol. 23, pp. 95-109, 2015(Persian).

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]

K. N. TOOSI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
FACULTY OF GEODESY AND GEOMATICS ENGINEERING

Journal of Geospatial Information Technology
Vol.5, No.3, Autumn 2017

The effect of flight parameters in geometric calibration results for Digital Camera Ultra Cam

Hadi babapour[1], Mahdi mokhtarzade[2], Mohamad javad valadan zouj[3]

1- PhD student in photogrammetry – K.N.Toosi
2- Associate Professor, PhD in Photogrammetry & Remote Sensing– K.N.Toosi
3- Associate Professor, PhD in Photogrammetry & Remote Sensing– K.N.Toosi

Abstract

Due to the appearance of new digital cameras and variability in manufacturing and technology, the necessity to camera calibration used in this type become a primary need. The high cost and difficulty of implementing the calibration laboratory, made using equations self-calibration in field sites as a practical solution in this regard. One of the important factors that influence investor in the ultimate accuracy of self-calibration method, is flying parameters, designing methods and Conditions of obtaining images. In this article, we design a photogrammetric blocks in different flight simulation and validation, to implement self-calibration geometric methods on a variety of photogrammetric blocks studied and also the effects of flying on geometric self-calibration results has been studied. Forward and side overlap as the most important factor in improving the accuracy of their methods of geometrical calibration results are presented. Forward overlap of 60 percent to 80 percent and increased side overlap of 20 percent to 60 percent, improving positioning accuracy of 18% were obtained. As well as non-vertical photograph flight, most effective factor in reducing the correlation between the exterior orientation and self-calibration parameters known, so as to increase the range of parameter ω (˚25> ω> -25˚) relative reduction of 3 to 5 percent of the external correlation. In addition, in this study it was found that the same adjustment image blocks in two different heights increase the number of equations and thus increase the accuracy in the adjustment block is at a height of flight.

Key words: Self calibration, Additional parameters, Flight parameters, Digital camera Ultra cam.

Correspondence Address. 7 Shahid Sharideh St- Keshavarz Blvd - Tehran- Iran
Tel: +98- 21-88960122 +98-9123350718
Emailhbabapour@mail.kntu.ac.ir

[Downloaded from jgit.kntu.ac.ir on 2026-11-19]

[DOI: 10.29252/jgit.5.3.153]