

مقایسه مدل‌های تبدیل خطی مستقیم و افاین سه‌بعدی در مدلسازی تصاویر با هندسه خطی در سطوح مختلف تصحیحات هندسی

مجتبی جنتی^۱، امین باغان^۲، علیرضا صفدری‌نژاد^۳، محمدجواد ولدان‌زوج^۴، مهدی مختارزاده^۵، علی محمدزاده^۵

۱. دانشجوی کارشناس‌ارشد سنجش از دور، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
m.jannati@sina.kntu.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناس‌ارشد فتوگرامتری، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
amin_baghani@mail.kntu.ac.ir

۳. کارشناس‌ارشد سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
safdari_nezhad@sina.kntu.ac.ir

۴. دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
valadanjouj@kntu.ac.ir

۵. استادیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی
(m_mokhtarzade & mohammadzade)@kntu.ac.ir

چکیده

در تحقیق حاضر دقت مدل‌های افاین سه‌بعدی و تبدیل خطی مستقیم در مدلسازی تصاویر خطی با سطوح مختلف تصحیح هندسی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای این منظور دو مدل بر روی تصاویر با قدرت تفکیک مکانی و سطوح مختلف تصحیحات هندسی، با تعداد مختلف نقاط کنترل زمینی در چهار سیستم‌مختصات مختلف پیاده‌سازی، و در سطح نقاط چک مستقل ارزیابی دقت گردید. براساس نتایج تحقیق می‌توان گفت در تصاویر خام با هندسه تصویربرداری خطی، دقت مدل DLT از مدل افاین سه‌بعدی بیشتر است (به ترتیب ۰/۸۴ و ۳/۲ پیکسل). اما در مورد تصاویری که اثر دید غیرقائم سنجنده در آنها کاهش یافته است، مدل افاین سه‌بعدی دقت‌های بالاتری را نسبت به مدل DLT فراهم می‌آورد (به ترتیب ۰/۸۳ و ۱/۰۵ پیکسل). افزون بر این، کاهش FOV سنجنده (افزایش قدرت تفکیک مکانی) نیز این دقت‌ها را بهبود می‌بخشد.

کلیدواژه: تصحیح هندسی، افاین سه‌بعدی، تبدیل خطی مستقیم، تصاویر خطی پوش‌بروم

۱- مقدمه

ظهور و پیشرفت تکنولوژی‌های مربوط به تهیه تصاویر ماهواره‌ای، این محصولات را به عنوان ابزاری مناسب جهت تولید اطلاعات مکانی دقیق و قابل اعتماد تبدیل نموده است. عواملی همچون سرعت، دقت، هزینه و تکرارپذیری، موجب افزایش انگیزه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به منظور تهیه و بهنگام‌سازی اطلاعات مکانی در سیستم‌های اطلاعات مکانی شده‌اند. مدلسازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای به عنوان اولین ضرورت در فرآیند تهیه اطلاعات مکانی دقیق و قابل اعتماد،

نقش مهمی را در پروژه‌های سنجش از دوری مبتنی بر تولید اطلاعات مکانی ایفا می‌نماید. نتیجه فرآیند مدلسازی هندسی، برقراری ارتباط ریاضی بین فضای تصویر و زمین می‌باشد [۱].

بیشتر سنجنده‌های اپتیکی در سکوه‌های ماهواره‌ای امروزی از هندسه تصویربرداری با آرایه‌های خطی^۱ و تکنولوژی پوش‌بروم^۲ بهره می‌برند [۲]. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان مدل‌های ریاضی تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای را به دو بخش اصلی: (۱) مدل‌های فیزیکی و (۲) مدل‌های غیرفیزیکی تقسیم‌بندی نمود [۱]. در مدل‌های فیزیکی، شرایط فیزیکی و هندسی حاکم بر زمان تصویربرداری، مبنای مدلسازی قرار می‌گیرد. در سوی مقابل، مدل‌های غیرفیزیکی قرار دارند. در این مدل‌ها، توابع متنوع ریاضی با نقشی درونیاب، وظیفه برقراری ارتباط میان فضای تصویر و فضای زمین را به عهده می‌گیرند [۳]. از نمونه‌های رایج این دسته از مدل‌ها می‌توان به توابع کسری^۳ و چندجمله‌ای‌های دوبعدی و سه‌بعدی اشاره نمود. پارامترهای این دسته از مدل‌ها تنها به کمک نقاط کنترلی و طی فرایند سرشکنی محاسبه شده و عمدتاً دارای تعابیر هندسی نمی‌باشند.

در مقاله پیش‌رو، به مقایسه دو مدل تبدیل خطی مستقیم^۴ (DLT) به عنوان نوع خاصی از توابع کسری و مدل افاین سه‌بعدی^۵ به عنوان نوع خاصی از چندجمله‌ای‌های سه‌بعدی در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای پرداخته شده است. برای این منظور، دو مدل مذکور برای مدلسازی تصاویری با سطوح متفاوت تصحیح هندسی در چهار سیستم‌مختصات UTM، CT، ژئودتیک و ژئودتیک محلی پیاده‌سازی و نتایج حاصل از آنها با یکدیگر مقایسه گردید.

در ادامه، در بخش دوم پس از معرفی مجموعه داده‌های مورد استفاده به معرفی دو مدل افاین سه‌بعدی و تبدیل خطی مستقیم پرداخته می‌شود. در بخش سوم، نتایج حاصل از پیاده‌سازی دو مدل ارائه می‌گردد؛ و در نهایت، در بخش پنجم، نتایج تحقیق مورد بحث قرار خواهد گرفت.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- داده‌های مورد استفاده

در این تحقیق، سه مجموعه داده شامل تصاویر Level 1A و Level 1B ماهواره SPOT متعلق به شهر اصفهان، و یک تصویر IKONOS (محصول GEO) از شهر همدان مورد استفاده قرار گرفت (جدول ۱).

جدول ۱: داده‌های مورد استفاده

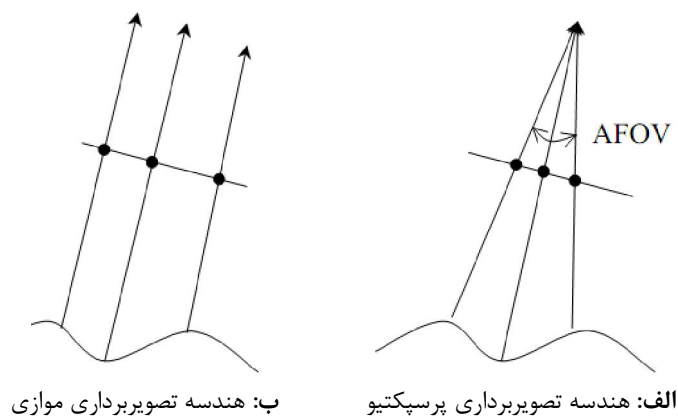
سکو	سنجنده	محصول	GSD (m)	نوع تصحیحات محصول	مرجع نقاط کنترل و چک
SPOT-1	HRV	Level 1A	۱۰	تصحیح رادیومتریکی	نقشه رقومی ۱:۱۰۰۰ تولید شده از عکس‌های هوایی ۱:۴۰۰۰ توسط سازمان نقشه برداری کشور
		Level 1B	۱۰	تصحیح رادیومتریکی، دوران زمین، انحنای زمین و اثر پانورامیک ناشی از دید غیرقائم	
IKONOS	Panchromatic	Geo	۱	تصحیح رادیومتریکی، دوران زمین، انحنای زمین و اثر پانورامیک ناشی از دید غیرقائم	

۲-۲- مدل افاین سه‌بعدی

مدل افاین سه‌بعدی نوع خاصی از چندجمله‌ای‌های سه‌بعدی است؛ که می‌تواند شرایط تصویرسازی موازی^۶ دو سطح را مدلسازی نماید (رابطه ۱).

$$\begin{aligned} r &= a_1X + a_2Y + a_3Z + a_4 \\ c &= a_5X + a_6Y + a_7Z + a_8 \end{aligned} \quad (1)$$

که در این رابطه، (r, c) مختصات در فضای تصویر، (X, Y, Z) مختصات در فضای زمین، و a_1 تا a_8 پارامترهای مدل افاین سه‌بعدی هستند. در تصاویر با قدرت تفکیک مکانی بالا (که دارای FOV باریکی هستند)، با فرض وضعیت^۷ ثابت و حرکت یکنواخت سنجنده در مسیر مستقیم، می‌توان خطوط تصویربرداری را موازی و در امتداد یکدیگر در نظر گرفت (شکل ۱-ب). از اینرو، در صورت باریک بودن میدان دید^۸ (FOV) سنجنده به نظر می‌رسد بتوان از این مدل ریاضی برای مدلسازی تصویر ماهواره‌ای استفاده نمود [۴].



شکل ۱: نمایش شماتیک هندسه تصویربرداری پرسپکتیو و موازی

۲-۳- تبدیل خطی مستقیم

تبدیل خطی مستقیم (Abdel-Aziz and Karara, 1971) یک روش استاندارد فتوگرامتری برای محاسبه پارامترهای

توجیه داخلی^۹ (IOP) و خارجی^{۱۰} (EOP) تک تصویر به کمک مجموعه‌ای از نقاط کنترل سه‌بعدی است (رابطه ۲) [۵].

$$r = \frac{a_1 X + a_2 Y + a_3 Z + a_4}{1 + a_9 X + a_{10} Y + a_{11} Z} \quad (2)$$

$$c = \frac{a_5 X + a_6 Y + a_7 Z + a_8}{1 + a_9 X + a_{10} Y + a_{11} Z}$$

در این رابطه، (r, c) مختصات در فضای تصویر، (X, Y, Z) مختصات در فضای زمین، و a_1 تا a_{11} پارامترهای مدل DLT هستند. لازم به یادآوری است که معادلات DLT شامل جملات درجه اول مدل توابع کسری مستقیم با مخرج‌های مشترک است (رابطه ۲). در نتیجه، پارامترهای این مدل هم به صورت مستقیم (با استفاده از IOP و EOP) و هم به صورت غیرمستقیم (با استفاده از نقاط کنترل زمینی) قابل محاسبه هستند [۶]. به بیان دیگر، در مورد تصاویر فریم مدل DLT می‌تواند به عنوان یک مدل فیزیکی در فرآیند تصحیح هندسی مورد استفاده قرار گیرد. اما در مورد تصاویر با هندسه خطی، این مدل، یک مدل تقریبی است؛ زیرا پارامترهای توجیه خارجی تصاویر ماهواره‌ای از سطری به سطر دیگر متفاوت است [۱].

۳- پیاده‌سازی و نتایج

دو مدل افاین سه‌بعدی و DLT (با مخرج‌های غیریکسان)، به ازای تعداد متفاوت نقاط کنترلی و چهار سیستم مختصات UTM، CT، ژئودتیک و ژئودتیک محلی بر روی مجموعه داده‌های معرفی شده در بخش (۲-۱) پیاده‌سازی گردید (جدول ۲ و ۳). برای پرهیز از بروز مشکلات عددی در حل دستگاه معادلات، مختصات عکسی و زمینی نقاط نرمال‌سازی شد. دقت‌های ارائه شده در این بخش، در فضای تصویر و در سطح نقاط چک مستقل می‌باشد.

جدول ۲: نتایج پیاده‌سازی مدل افاین سه‌بعدی

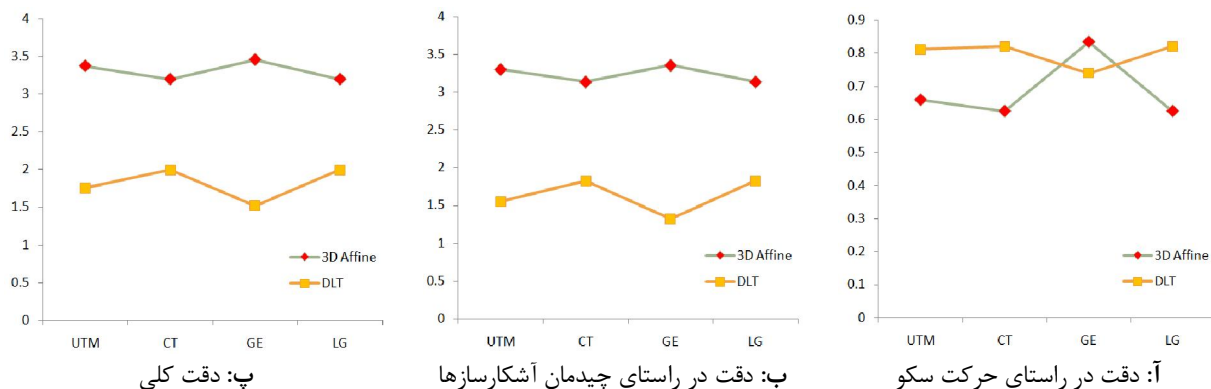
تصویر	سیستم مختصات	دقت مدل (۱۰ نقطه کنترل و ۱۸ نقطه چک)			دقت مدل (۱۵ نقطه کنترل و ۱۳ نقطه چک)		
		Δr (in pix)	Δc (in pix)	Δ (in pix)	Δr (in pix)	Δc (in pix)	Δ (in pix)
SPOT 1A	UTM	۰/۶۵۹	۳/۳۰۲	۳/۳۶۷	۰/۶۵۶	۳/۴۲۲	۳/۴۸۴
	CT	۰/۶۲۵	۳/۱۳۷	۳/۱۹۹	۰/۶۲۸	۳/۲۷۴	۳/۳۳۴
	Geodetic	۰/۸۳۴	۳/۳۵۷	۳/۴۵۹	۰/۸۰۲	۳/۳۴۸	۳/۴۴۳
	Local	۰/۶۲۵	۳/۱۳۷	۳/۱۹۹	۰/۶۲۸	۳/۲۷۴	۳/۳۳۴

SPOT 1B	UTM	۰/۶۵۸	۰/۶۷۶	۰/۹۴۳	۰/۵۹۵	۰/۶۱۳	۰/۸۵۵
	CT	۰/۶۴۲	۰/۷۷۹	۱/۰۰۹	۰/۵۷۶	۰/۷۳۷	۰/۹۳۵
	Geodetic	۰/۸۱۵	۱/۱۶۴	۱/۴۲۱	۰/۶۴۳	۱/۰۲۵	۱/۳۱۰
	Local	۰/۶۴۲	۰/۷۷۹	۱/۰۰۹	۰/۵۷۶	۰/۷۳۷	۰/۹۳۵
IKONOS	UTM	۰/۵۷۳	۰/۶۰۶	۰/۸۳۴	۰/۵۴۹	۰/۵۶۶	۰/۷۸۸
	CT	۰/۵۶۸	۰/۶۲۱	۰/۸۴۱	۰/۵۳۶	۰/۵۷۶	۰/۷۸۷
	Geodetic	۰/۷۰۲	۰/۷۴۸	۱/۰۲۶	۰/۷۱۲	۰/۷۵۵	۱/۰۳۸
	Local	۰/۵۶۸	۰/۶۲۱	۰/۸۴۱	۰/۵۳۶	۰/۵۷۶	۰/۷۸۷

جدول ۳: نتایج پیاده‌سازی مدل DLT

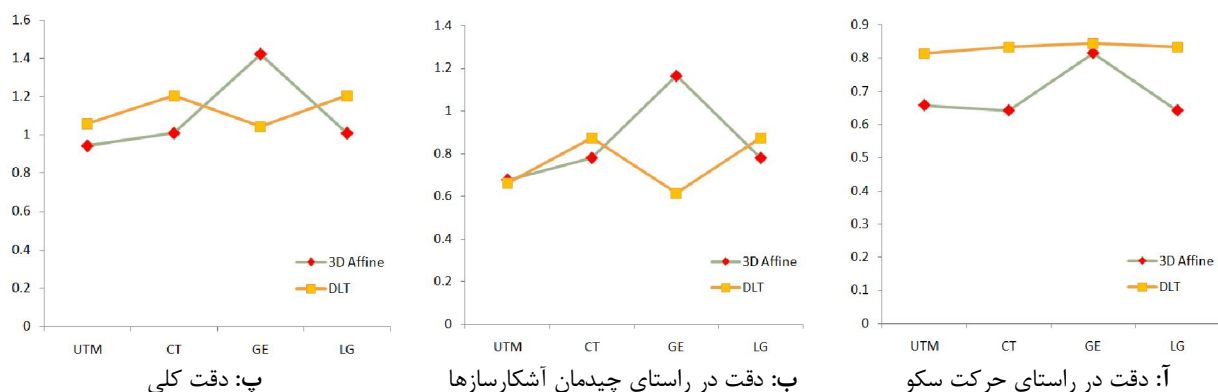
تصویر	سیستم مختصات	دقت مدل (۱۰ نقطه کنترل و ۱۸ نقطه چک)			دقت مدل (۱۵ نقطه کنترل و ۱۳ نقطه چک)		
		Δr (in pix)	Δc (in pix)	Δ (in pix)	Δr (in pix)	Δc (in pix)	Δ (in pix)
SPOT 1A	UTM	۰/۸۱۱	۱/۵۵۴	۱/۷۵۳	۰/۶۹۶	۰/۴۴۲	۰/۸۲۴
	CT	۰/۸۲۰	۱/۸۲۰	۱/۹۹۶	۰/۶۹۶	۰/۴۳۰	۰/۸۱۸
	Geodetic	۰/۷۳۹	۱/۳۲۴	۱/۵۱۷	۰/۷۰۷	۰/۵۲۹	۰/۸۸۳
	Local	۰/۸۲۰	۱/۸۲۰	۱/۹۹۶	۰/۶۹۶	۰/۴۳۰	۰/۸۱۸
SPOT 1B	UTM	۰/۸۱۳	۰/۶۶۰	۱/۰۶۱	۰/۶۳۶	۰/۷۱۸	۰/۹۵۹
	CT	۰/۸۳۲	۰/۸۷۳	۱/۲۰۵	۰/۶۳۶	۱/۸۰۱	۱/۰۲۳
	Geodetic	۰/۸۴۴	۰/۶۱۴	۱/۰۴۴	۰/۶۵۵	۰/۶۹۸	۰/۹۵۷
	Local	۰/۸۳۲	۰/۸۷۳	۱/۲۰۵	۰/۶۳۶	۰/۸۰۱	۱/۰۲۳
IKONOS	UTM	۰/۶۷۱	۰/۶۲۴	۰/۹۱۶	۰/۵۰۹	۰/۶۱۸	۰/۸۰۰
	CT	۰/۶۶۷	۰/۶۲۹	۰/۹۱۷	۰/۵۰۹	۰/۶۲۵	۰/۸۰۶
	Geodetic	۰/۷۱۷	۰/۶۲۵	۰/۹۵۱	۰/۵۳۹	۰/۶۱۹	۰/۸۲۱
	Local	۰/۶۶۷	۰/۶۲۹	۰/۹۱۷	۰/۵۰۹	۰/۶۲۵	۰/۸۰۶

به طوریکه در جدول (۲) و (۳) قابل مشاهده است، اختلاف نتایج به دست آمده به ازای چهار سیستم مختصات مختلف در هر دو مدل و به ازای هر سه تصویر مورد بررسی، بسیار ناچیز است و می‌توان عملکرد دو مدل را مستقل از تعریف سیستم مختصات زمینی دانست. در ادامه عملکرد دو مدل، بر روی تصاویر با سطوح مختلف تصحیحات هندسی مورد ارزیابی قرار گرفت.



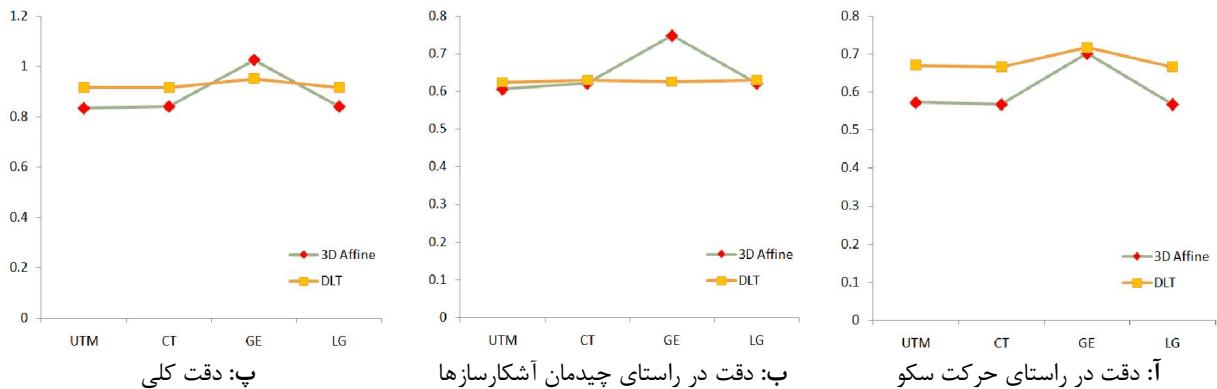
شکل ۲: مقایسه دقت حاصل از دو مدل افاین سه‌بعدی و DLT برای تصویر Level 1A ماهواره SPOT

با مقایسه شکل‌های (۲-آ) و (۲-ب)، به وضوح مشخص است که در مورد تصویر Level 1A ماهواره SPOT دقت مدل افاین سه‌بعدی در راستای حرکت سکو و دقت مدل DLT در راستای چیدمان آشکارسازها بهتر است. البته اختلاف دقت دو مدل در راستای حرکت سکو بسیار ناچیز است، اما در راستای چیدمان آشکارسازها دو مدل اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارند.



شکل ۳: مقایسه دقت حاصل از دو مدل افاین سه‌بعدی و DLT برای تصویر Level 1B ماهواره SPOT

در ارتباط با تصویر Level 1B ماهواره SPOT، مدل افاین سه‌بعدی در مجموع عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. البته اختلاف دو مدل اندک و قابل چشم‌پوشی است (شکل ۳).



شکل ۴: مقایسه دقت حاصل از دو مدل افاین سه‌بعدی و DLT برای تصویر IKONOS

با توجه به شکل‌های (۳) و (۴)، رفتار دو مدل در مورد تصویر IKONOS درست مشابه تصویر Level 1B ماهواره SPOT است؛ اما مقدار خطاها به طور کلی برای تصویر IKONOS کمتر است.

۴- نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر، دقت‌های حاصل از دو مدل افاین سه‌بعدی و DLT در تصحیح هندسی سه تصویر ماهواره‌ای، که دارای قدرت تفکیک مکانی و سطوح مختلف تصحیحات هندسی بودند، مورد ارزیابی قرار گرفت. به عنوان نخستین نتیجه تحقیق، می‌توان به دقت پائین مدل افاین سه‌بعدی در تصحیح هندسی تصویر Level 1A ماهواره SPOT (که فاقد هرگونه تصحیح هندسی است) اشاره نمود. در تصاویر با هندسه خطی پوش‌بروم، با فرضیات اندکی (بخش ۲-۲) می‌توان هندسه تصویربرداری را در راستای حرکت سنجنده موازی در نظر گرفت. اما در راستای چیدمان آشکارسازها، هندسه تصویربرداری پرسپکتیو است و دقت نسبتاً پائین مدل افاین سه‌بعدی در این راستا (شکل ۲-ب) و دقت مناسب (کسری از ابعاد پیکسل) در راستای چیدمان آشکارسازها (شکل ۲-آ) را در مورد تصویر Level 1A ماهواره SPOT می‌توان به این دلیل دانست. از طرف دیگر، در تصویر Level 1B ماهواره SPOT و تصویر IKONOS، به دلیل تصحیح اثرات ناشی از دید غیرقائم سنجنده، دقت مدل افاین سه‌بعدی در راستای چیدمان آشکارسازها افزایش یافته است. دقت نسبتاً بالاتر تصویر IKONOS در این راستا، به دلیل کوچکتر بودن FOV این سنجنده و تطابق بیشتر با شرایط تصویربرداری موازی قابل توضیح است. به عنوان آخرین نتیجه در ارتباط با مدل افاین سه‌بعدی، انتظار می‌رفت با استفاده از سیستم تصویر UTM

دقت مدل افزایش یابد، که با استناد به نتایج حاصل می‌توان گفت دقت مدل افاین سه‌بعدی تقریباً مستقل از تعریف سیستم مختصات است و استفاده یا عدم استفاده از سیستم تصویر تفاوت زیادی در نتایج بوجود نخواهد آورد.

دقت مدل DLT در قیاس با مدل افاین سه‌بعدی در مورد تصویر Level 1A ماهواره SPOT، در راستای چیدمان آشکارسازها بالاتر و در راستای حرکت سکو پائین‌تر است. بهتر بودن دقت در راستای چیدمان آشکارسازها به دلیل طبیعت پرسپکتیو هندسه تصویربرداری در این راستا است که با مدل DLT تطابق بیشتری دارد. از طرف دیگر، با توجه به اینکه در تصاویر با هندسه خطی هندسه تصویربرداری در راستای حرکت سکو تقریباً موازی است، دقت بهتر مدل افاین سه‌بعدی در این راستا قابل توضیح است. اما در مورد تصویر Level 1B ماهواره SPOT و تصویر IKONOS، دقت مدل DLT (تقریباً به طور مستقل از تعریف سیستم مختصات زمینی) نسبت به مدل افاین سه‌بعدی پائین‌تر است. به نظر می‌رسد با تصحیحاتی که به این تصاویر اعمال می‌شود، میزان انطباق این تصاویر با هندسه پرسپکتیو کمتر و با هندسه موازی بیشتر می‌شود.

۵- پانوشتها

1. Linear Array Scanner
2. Pushbroom
3. Rational Functions
4. Direct Linear Transformation
5. 3D Affine
6. Parallel Projection
7. Attitude
8. Field of View
9. Interior Orientation Parameters
10. Exterior Orientation Parameters

منابع و مراجع

[۱] صفدری‌نژاد، علیرضا، ۱۳۹۱. استفاده از پارامترهای اضافی در مدل پارامترهای مداری به منظور بهبود دقت تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای! پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده ژئودزی و ژئوماتیک، دانشگاه صنعتی خواجه‌نصیرالدین طوسی.

[2] Valadan Zoej, M.J.; Petrie, G., 1998. 'Mathematical Modeling and Accuracy Testing of SPOT Level 1B Stereo Pairs'. Photogrammetric Record, 91(16), pp: 67-82.

- [3] Valadan Zoej, M.J.; Mokhtarzadeh, M.; Mansourian, A.; Ebadi, H.; Sadeghian, S., 2007. 'Rational Function Optimization Using Genetic Algorithms'. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 4(9), pp: 403-413.
- [4] Morgan, M., 2004. 'Epipolar Resampling of Linear Array Scanner Scenes'. Ph.D. theses, Department of Geomatics Engineering, Calgary University.
- [5] Toutin, T., 2003. 'Geometric Processing Of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods'. International Journal of Remote Sensing (24).
- [6] Blonquist, K.F., 2008. 'Development of a Mathematical Model for 3D Reconstruction of Target Objects by Photogrammetry'. M.Sc. Theses, Utah State University.