



سنجش از دور

و
GIS ایران



سنجش از دور و GIS ایران
Iranian Remote Sensing & GIS

سال چهارم، شماره سوم، پاییز ۱۳۹۱
Vol.4, No.3, Autumn 2012

۱-۱۴

مدلی جدید به منظور تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی و اطلاعات ناوبری ماهواره

علیرضا صفدری‌نژاد*^۱، محمدجواد ولدان‌زوج^۲، مهدی مختارزاده^۳

۱. کارشناس ارشد مهندسی سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
۲. دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری
۳. استادیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده مهندسی نقشه‌برداری

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۰/۱۲/۲۳

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۰/۶/۲۹

چکیده

در این مقاله با ارائه روش جدیدی در مدل‌سازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای، از چندجمله‌ای‌های دوبعدی به منظور تعیین موقعیت سه‌بعدی در تصاویر ماهواره‌ای استریو استفاده شده است. در این مدل‌سازی، چند جمله‌ای‌های دوبعدی نقش برقراری ارتباط بین فضای زمین و تصویر را ندارند و در روند مدل‌سازی به عنوان پارامترهای اضافی در معادله شرط هم‌خطی در نظر گرفته شده‌اند. معادله شرط هم‌خطی به‌کاررفته در این مدل‌سازی نیز با مدل پارامترهای مداری است، و پارامترهای موجود در این مدل با استفاده از اطلاعات افمریز ماهواره تعیین می‌شوند و به صورت مقادیری ثابت در روند مدل‌سازی قرار می‌گیرند. در این مدل‌سازی ضرایب چندجمله‌ای تنها مجهول‌های مدل‌سازی‌اند و ضرایب مذکور به کمک نقاط کنترل زمینی در دستگاه معادلات خطی تعیین می‌شوند. مزایای عمده این مدل‌سازی عبارت‌اند از: کاهش پیچیدگی‌های اجرایی مربوط به استفاده از مدل‌های فیزیکی، سهولت پیاده‌سازی، امکان استفاده در تصاویر خام و تصاویری با سطوح پایین تصحیحات هندسی، امکان استفاده حداکثری از داده‌های کمکی ماهواره و همچنین خطی بودن دستگاه معادلات در پروسه تقاطع فضایی. آزمون مدل پیشنهادی در مجموعه داده‌های مختلف، حاکی از توان بالای این مدل‌سازی در تأمین دقت‌های مطلوب در تعیین موقعیت سه‌بعدی از تصاویر ماهواره‌ای استریو است.

کلیدواژه‌ها: چندجمله‌ای‌های دوبعدی، مدل پارامترهای مداری، پارامترهای اضافی، داده افمریز، تصحیح هندسی.

* نویسنده مکاتبه‌کننده: تهران، خیابان ولی عصر (عج)، تقاطع میرداماد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، دانشکده نقشه‌برداری، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور،

تلفن: ۰۹۱۲۳۲۵۸۸۵۲

۱- مقدمه

تصویربرداری Push Broom در سکوه‌های ماهواره‌ای، مدل پارامترهای مداری است (Valadan Zoej, 1997). در این مدل فیزیکی، پویایی پارامترهای توجیه خارجی تصاویر با هندسه، تصویربرداری خطی و تکنولوژی Push Broom به وسیله پارامترهای کپلری مدل‌سازی می‌شود و بیشتر پارامترهای کپلری آن را می‌توان با اطلاعات کمکی ثبت‌شده در سیستم‌های ناوبری سنجنده، تعیین کرد (Valadan Zoej, 1997). البته ناگفته نماند که پیچیدگی‌ها و محدودیت‌های معمول و مشترک بین مدل‌های فیزیکی در مدل پارامترهای مداری، به‌رغم دقت‌های مطلوب مدل مذکور، مانع استفاده گسترده از آن می‌شوند.

چندجمله‌ای‌های دوبعدی از ساده‌ترین مدل‌های مورد استفاده در ثبت^۱ و تصحیح هندسی دوبعدی تصاویر ماهواره‌ای‌اند (Toutin, 2004). رویکرد استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی به عنوان مدل برقرارکننده ارتباط میان فضای تصویر و زمین به دلیل در نظر نگرفتن یکی از مؤلفه‌های سه‌بعدی فضای زمین در فرایند مدل‌سازی، نمی‌توانند موقعیت سه‌بعدی را در فضای زمین تعیین کنند و مدل‌های اشاره‌شده صرفاً در حوزه ترمیم و ثبت دوبعدی تصاویر ماهواره‌ای به کار می‌روند. استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی، به‌عنوان مدل ارتباطی میان دو فضای تصویری، از موارد پرکاربرد استفاده از آنهاست. هم‌مرجع کردن دو تصویر با استفاده از نقاط گرهی، پالایش غیرمستقیم توابع کسری در فضای تصویر، پارامترهای اضافی به‌دلیل حذف خطاهای سیستماتیک تصویربرداری در ساختار مدل شرط هم‌خطی، نمونه‌هایی از تبدیلات چندجمله‌ای دوبعدی هستند که صرفاً با هدف برقراری ارتباط فضاهای دوبعدی تدوین شده‌اند.

در این مقاله با مینا قرار دادن مدل چندجمله‌ای دوبعدی به‌دلیل سادگی آن، هدف تعیین موقعیت سه‌بعدی دقیق از تصاویر ماهواره‌ای استریو در نظر

تهیه اطلاعات مکانی دقیق و درخور اطمینان از تصاویر گرفته‌شده به وسیله سکوه‌های ماهواره‌ای، از اهداف فناوری سنجنش از دور به شمار می‌رود (Toutin, 2004). دقت و سرعت و نیز هزینه و تکرارپذیری، عواملی هستند که انگیزه استفاده از تصاویر ماهواره‌ای را، به منظور تهیه و بهنگام‌سازی اطلاعات مکانی در سیستم‌های اطلاعات مکانی، ارتقا داده‌اند (Jensen, 2007). مدل‌سازی ریاضی با هدف تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، نخستین ضرورت در فرایند استخراج اطلاعات مکانی از تصاویر ماهواره‌ای به شمار می‌آید (McGlone, 2004). کاهش پیچیدگی‌های اجرایی، سطح دقت دست‌یافتنی و تعمیم‌پذیری سراسری در صحنه‌های تصاویر ماهواره‌ای را می‌توان جزو شاخص‌های هر مدل ریاضی مناسب برشمرد.

به‌طور کلی مدل‌های ریاضی در حوزه تصحیح هندسی به دو بخش تقسیم می‌شوند: مدل‌های فیزیکی و درون‌یاب (Toutin, 2004; McGlone, 2004). مدل‌های فیزیکی به‌واسطه پیچیدگی‌های اجرایی‌شان، مانند غیرخطی بودن مدل، وجود همبستگی میان پارامترها، وابستگی به مقادیر اولیه در حل دستگاه معادلات و همچنین ناممکن بودن به‌کارگیری در تصاویری که به‌دلیل نمونه‌برداری مجدد از هندسه تصویربرداری خارج شده‌اند (Konecny, et al., 1987; Valadan Zoej et al., 1998)، مورد استقبال کمتری قرار گرفته‌اند. مزایای مدل‌های درون‌یاب در تقابل با معایب مدل‌های فیزیکی‌اند؛ و استفاده آسان از آنها در انواع تصاویر ماهواره‌ای، نمونه‌ای از دلایل استقبال از این دسته از مدل‌ها به شمار می‌آیند (Valadan Zoej et al., 2007; Tao et al., 2001; Valadan Zoej et al., 2002). توابع کسری، مدل تصویربرداری موازی، چندجمله‌ای‌های دوبعدی و سه‌بعدی نمونه‌هایی از مدل‌های درون‌یاب‌اند که هر کدام حوزه‌های کاربردی خاص خود را دارد (Toutin, 2004).

از جمله مدل‌های فیزیکی بسیار منطبق با شرایط

درج شده است، و بخش چهارم نیز به نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل شرط هم‌خطی مبتنی بر پارامترهای مداری

در تشکیل هر صحنه^۲ با هندسه^۳ تصویربرداری خط سکوه‌های ماهواره‌ای، شرایط فیزیکی خاصی حکم‌فرماست؛ و به طور کلی می‌توان با تعریف چهار سیستم مختصات سه‌بعدی^۴ و ارتباط لحظه‌ای میان آنها، هندسه^۵ حاکم بر لحظه ثبت تصویر را مدل‌سازی کرد. سیستم مختصات زمینی (GCS^۶)، سیستم مختصات ایده‌آل مداری ماهواره (ORF^۷)، سیستم مختصات سکوی ماهواره (PRF^۸) و سیستم مختصات سنسور (SRF^۹)، چهار سیستم مختصات مطرح در مدل‌سازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای‌اند.

GCS به عنوان مبنای تعیین مختصات در فضای زمین، معمولاً سیستمی ژئوسنتریک^۱ و Earth fixed در نظر گرفته می‌شود. ORF با مبدأ منطبق بر مرکز ثقل ماهواره، سیستمی دست‌راستی^۲ است که محور z در آن، هم‌سو با بردار موقعیت ماهواره در سیستم مختصات ژئوسنتریک است، و جهت‌گیری محور x در آن منطبق بر راستای بردار سرعت لحظه‌ای ماهواره در سیستم مختصات Space fixed است. سیستم مختصات PRF نیز هم‌مبدأ با ORF، و نسبت به بدنه سکوی ماهواره قفل شده است. انتظار می‌رود که این سیستم مختصات در حالت نبود اغتشاش در وضعیت سکوی

گرفته شد. نیز از آنجا که مدل‌های دوبعدی قابلیت تعیین موقعیت سه‌بعدی را ندارند، چندجمله‌ای‌های دوبعدی به صورت پارامترهای اضافی در مدل فیزیکی مداری به کار رفتند. هدف این مقاله استفاده توأمان از دو مزیت مدل‌های فیزیکی و درون‌یاب در مدل‌سازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای است. مدل پارامترهای مداری به دلیل امکان تأمین پارامترهای آن از طریق اندازه‌گیری‌های سیستم ناوبری ماهواره‌ها، و مدل چندجمله‌ای دوبعدی - به خاطر سادگی و آسان بودن پیاده‌سازی، زوج تلفیقی مورد استفاده را در این مدل‌سازی به خود اختصاص دادند.

در این فرایند هیچ یک از پارامترهای توجیه خارجی مدل مداری به صورت مجهول در نظر گرفته نشد. پارامترها با اطلاعات تقریبی افریز تعیین شدند و به صورت مقادیر ثابت در ساختار مدل جای گرفتند. این امر موجب شد که تنها مجهولات مدل‌سازی، پارامترهای اضافی در فضای تصویر باشند و دستگاه معادلات برای تعیین پارامترهای مدل نیز خطی باشد. از ویژگی‌های این روش می‌توان به اینها اشاره کرد: ۱- امکان استفاده حداکثری از اطلاعات افریز ارائه‌شده در تصاویر ماهواره‌ای؛ ۲- سهولت پیاده‌سازی مدل به خاطر خطی بودن روند برآورد پارامترهای آن؛ ۳- خطی شدن معادلات مربوط به فرایند بازسازی سه‌بعدی^۱ فضای زمین در تصاویر استریو؛ ۴- امکان استفاده از مدل مداری در مدل‌سازی تصاویری که از هندسه^۲ تصویربرداری خارج شده‌اند؛ و ۵- کاهش نیاز به نقاط کنترلی به دلیل استفاده از اطلاعات مداری ماهواره در روند مدل‌سازی.

مقاله^۱ پیش رو در چهار بخش تنظیم شده است. در بخش اول با طرح مقدمه، ایده اجرایی پژوهش بیان می‌گردد؛ و در بخش دوم، مدل پارامترهای مداری به اختصار تشریح می‌شوند؛ و سپس با بیان تحلیلی روش‌شناسی (متدولوژی) پیشنهاد شده و داده‌های مورد استفاده، روند اجرایی پژوهش بیان می‌گردد. گزارش نتایج اجرای روش پیشنهادی در بخش سوم

1. 3D Reconstruction
2. Scene
3. 3D Coordinate System
4. Ground Coordinate System
5. Orbital Reference Frame
6. Platform Reference Frame
7. Sensor Reference Frame
8. Geocentric
9. Right Handed Coordinate System

PRF به کمک زوایای نشان‌رویی^۸ سنجنده، $[R_{Attitude}]$ ماتریس دوران سه‌بعدی برای موازی ساختن سیستم PRF با سیستم ORF به کمک مدل‌سازی اغتشاشات وضعیتی ماهواره و $[R_{Orbital}]$ نیز ماتریس دوران سه‌بعدی برای موازی ساختن سیستم ORF با سیستم GCS به‌وسیله پارامترهای کیلری خواهند بود. در این ساختار مدل‌سازی، ماتریس $[R_{Orbital}]$ و بردار $[X_S, Y_S, Z_S]^T$ وابسته به زمان‌اند و $[R_{Pointing}]$ ساختاری مستقل از زمان دارد. ماتریس $[R_{Attitude}]$ نیز دارای ساختار انتخابی وابسته به زمان و یا مستقل از زمان است.

موقعیت و وضعیت لحظه‌ای سیستم مختصات ایده‌آل ماهواره نسبت به سیستم مختصات ژئوسنتریک Space Fixed پارامترهای کیلری تعیین می‌گردد. از میان پارامترهای کیلری، سه پارامتر: میل^۹ (i)، بعد نقطه گره‌ی صعودی^{۱۰} (Ω) و آرگمان‌پریجی^{۱۱} (ω_p) جهت‌گیری مدار ماهواره را تبیین می‌کنند. دو پارامتر: خروج از مرکزیت^{۱۲} (e) و نیم قطر اطول مدار ماهواره (a) ابعاد بیضی مدار است و پارامتر آنامولی واقعی^{۱۳} (f) نیز مبین موقعیت لحظه‌ای ماهواره در مدار (Seeber, 2003). در حالت ایده‌آل، تنها پارامتر وابسته به زمان آنامولی واقعی است؛ اما پارامتر بعد نقطه گره‌ی صعودی نیز به منظور تصحیح اثر دوران زمین^{۱۴} در سیستم‌های مختصات Earth Fixed و اثر

کاملاً منطبق بر ORF باشد. سرانجام اینکه SRF نیز سیستم، دست راستی و دارای مبدأ منطبق بر مرکز تصویر سیستم اپتیکی سنجنده است. محور z در SRF هم سو با امتداد محور اصلی سیستم اپتیکی، و محور y هم سو با راستای چیدمان^۱ CCDها در فضای تصویر تعریف شده است، به گونه‌ای که جهت‌گیری مثبت محور y در هنگام حرکت نزولی^۲ ماهواره، معطوف به سمت شرقی جغرافیایی است.

حرکت ماهواره‌ها با قوانین کیلری تشریح‌شدنی است و صرف‌نظر از اغتشاش‌ها^۳ و نیروهای خارجی مؤثر، ماهواره‌ها در مداری بیضی‌شکل و پیش‌بینی‌شدنی^۴ در حرکت‌اند (Wertz, 1978). از آنجا که موقعیت مبدأ و راستای محور سوم سیستم مختصات ایده‌آل (ORF) در مدار بیضی شکل ماهواره براساس قوانین مکانیک سماوی در حال تغییر است، موقعیت و وضعیت سیستم مختصات ایده‌آل مداری ماهواره به یکدیگر وابسته خواهند بود و تابعی از پارامترهای کیلری نیز.

به طور کلی می‌توان ساختار معادله شرط هم‌خطی به‌کاررفته در استراتژی استفاده از پارامترهای کیلری را در مدل‌سازی تصاویر ماهواره‌ای با هندسه تصویربرداری خطی، به صورت ساختار کلی موجود در رابطه (۱) نشان داد (Valadan Zoej, 1997).

رابطه (۱)

$$\begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix}_{GCS} = \lambda [R_{Orbital}] \times [R_{Attitude}] \times [R_{Pointing}] \times \begin{pmatrix} x = 0 \\ y \\ -c \end{pmatrix}_{SRF}$$

در رابطه مذکور، x, y مختصات نقاط در فضای تصویر با هندسه تصویربرداری خطی و تکنولوژی Push Broom در سیستم SRF؛ c فاصله اصلی^۵ سیستم اپتیکی؛ $[X_S, Y_S, Z_S]^T$ مختصات لحظه‌ای مرکز تصویر در سیستم GCS که با پارامترهای کیلری تعیین می‌شود؛ $[X, Y, Z]^T$ مختصات نقاط زمینی در سیستم GCS؛ λ ضریب مقیاس^۶؛ $[R_{Pointing}]$ ماتریس دوران^۷ سه‌بعدی برای موازی ساختن سیستم SRF با سیستم

1. Charge Coupled Device (CCD)
2. Descending Pass
3. Perturbation
4. Predictable
5. Principal Distance
6. Scale Factor
7. Rotation Matrix
8. Pointing
9. Inclination
10. Right Ascension of the Ascending Node
11. Argument of Perigee
12. Eccentricity
13. True Anomaly
14. Earth Rotation Effect

تأثیرگذاری بر موقعیت لحظه‌ای ماهواره به عهده دارد، متشکل از سه ماتریس دوران سه بعدی حول سه محور مختصاتی است که زوایای دوران در ساختار هر یک از این ماتریس‌ها را چندجمله‌ای‌های وابسته به زمان تدوین کرده‌اند (رابطه ۵).

رابطه (۵)

$$[R_{Attitude}]^T = [R_3(\kappa(t)) \times R_2(\varphi(t)) \times R_1(\omega(t))]$$

$$\omega(t) = \omega_0 + \omega_1 t + \omega_2 t^2$$

$$\varphi(t) = \varphi_0 + \varphi_1 t + \varphi_2 t^2$$

$$\kappa(t) = \kappa_0 + \kappa_1 t + \kappa_2 t^2$$

تعداد و نوع ترم‌های مورد استفاده از چندجمله‌ای‌های وابسته به زمان در ساختار ماتریس $[R_{Attitude}]$ متناسب با میزان اغتشاشات موجود در بازه زمانی تصویرگیری و براساس میزان تأثیر در دقت برازش مدل در نقاط چک تعیین می‌گردد.

از مزایای این استراتژی، نیاز کمتر به تعداد اطلاعات افریز است (تنها یک سری داده افریز برای لحظه ثبت یک سطر از تصویر) و نیز استفاده مستقیم از پارامترهای کیلری در دستگاه معادلات در آن امکان‌پذیر است.

۲-۲- روش‌شناسی مدل پیشنهادی

نحوه مدل‌سازی در مدل پارامترهای مداری، انطباق زیادی با شرایط واقعی تصویربرداری در سکوی ماهواره‌ای دارد (Valadan zoej, 1997). از سوی دیگر، پارامترهای این مدل دارای تعابیر فیزیکی‌اند و قابلیت تعیین آنها از طریق سیستم‌های ناوبری ماهواره ممکن است. از این‌رو می‌توان انتظار داشت که استفاده از پارامترهای کیلری به دست‌آمده از اطلاعات افریز در مدل پارامترهای مداری، شرایط کلی حرکتی و وضعیتی سنجنده را در بازه زمانی گرفتن تصویر مدل کنند. کالیبراسیون پارامترهای کیلری و ساختارهای مربوط به

ناچیز نرخ تغییرات Ω به زمان در مدارهای خورشیدآهنگ^۱ (Seeber, 2003) در بازه زمانی تصویرگیری، وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شود (رابطه ۲).

رابطه (۲)

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega_1 t$$

$$f = f_0 + f_1 t$$

در رابطه مذکور، Ω_0, f_0 بعد نقطه گرهی صعودی و آنامولی واقعی یک سطر مرجع از صحنه؛ (Ω_1, f_1) نرخ تغییرات (Ω_0, f_0) نسبت به زمان در بازه زمانی تصویرگیری و t نماد زمان است که عمدتاً هم‌ارز با شماره سطر^۲ در فضای تصویر در نظر گرفته می‌شود.

وضعیت لحظه‌ای سیستم سیستم مختصات ایده‌آل مداری ماهواره (ORF) نسبت به سیستم (GCS) از طریق ماتریس دوران $[R_{Orbital}]$ تشریح شدنی است که با توجه به خروج از مرکزیت اندک در مدار مربوط به ماهواره‌های سنجش از دوری، به شکل رابطه (۳) بیان می‌شود. در رابطه اشاره شده R_3 و R_2 و R_1 به ترتیب ماتریس‌های دوران سه‌بعدی حول سه محور (x, y, z) هستند.

رابطه (۳)

$$[R_{Orbital}] = \left[R_3(\pi - \Omega) \times R_1\left(i - \frac{\pi}{2}\right) \times R_2\left(\frac{\pi}{2} - (\omega_p + f)\right) \right]$$

از آنجا که طول بردار شعاعی موقعیت لحظه‌ای ماهواره نسبت به سیستم مختصات (GCS) مطابق با قوانین مکانیک سماوی از پارامترهای کیلری تعیین‌شدنی است (Seeber, 2003; Valadan Zoej, 1997)، موقعیت لحظه‌ای مبدأ سیستم مختصات ایده‌آل مداری ماهواره در سیستم (GCS) مطابق رابطه (۴) تعیین می‌شود.

رابطه (۴)

$$[X_S, Y_S, Z_S]^T = [R_{Orbital}] \times [r_0, \theta, \tau]^T$$

در آن، r طول بردار شعاعی ماهواره نسبت به مبدأ سیستم (GCI) است.

ماتریس دوران سه‌بعدی $[R_{Attitude}]$ که مسئولیت مدل‌سازی اغتشاشات را در وضعیت سنجنده، بدون

1. Sun Synchronize
2. Row

فضای زمین تأثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر، در صورتی که هر سطر از تصویر در وضعیت معین خود در لحظه تصویربرداری قرار گیرد، فضای تحت پوشش زمینی آن معادل واقعیت ثبت شده خواهد بود. این امر مستلزم تعیین صحیح پارامترهای توجیه خارجی برای هر سطر از تصویر با هندسه تصویربرداری خطی است. اگر پارامترهای کپلری و اغتشاشات وضعیتی سنجنده مغایر با مقادیر واقعی در نظر گرفته شود، موقعیت زمینی متناظر با هر سطر از تصویر خام به شکل دیگری در فضای تصویر ثبت خواهد شد. به عبارت جامع‌تر، در صورت انتخاب پارامترهای کپلری تقریبی و در نظر نگرفتن تأثیر اغتشاشات در وضعیت سنجنده در مدل پارامترهای مداری، می‌بایست برای ثبت مناطق زمینی مشابه با واقعیت ثبت شده در هر سطر از تصویر خام اولیه، نحوه چیدمان CCDها در فضای تصویر نسبت به سیستم مختصات تصویری تغییر کند. از این‌روی به نظر می‌رسد بتوان تأثیر پارامترهای توجیه خارجی تقریبی را به نحوی با تغییر موقعیت نقاط در فضای تصویر به کمک پارامترهای اضافی دنبال کرد، به گونه‌ای که در معادله شرط هم‌خطی مبتنی بر پارامترهای مداری تقریبی صادق باشد.

از سوی دیگر، با توجه به تنوع محصولات تولیدکنندگان تصاویر ماهواره‌ای از نظر اعمال تصحیحات هندسی و رادیومتریکی، مادامی که تأثیر جابه‌جایی ناشی از اختلاف ارتفاع در تصاویر وجود داشته باشد، تعیین موقعیت سه‌بعدی از تصاویر استریو امکان‌پذیر است. از آنجا که تصحیح تأثیر هر نوع خطای هندسی با نمونه‌برداری مجدد همراه است، موقعیت ثبت نقاط در فضای تصاویر تصحیح شده از هندسه تصویربرداری در لحظه تصویربرداری خارج می‌شوند. مدل پارامترهای مداری، مبتنی بر استفاده از تصاویر خام هندسی تدوین شده و این امر امکان استفاده مستقیم از مدل پارامترهای مداری را به منظور برقراری ارتباط میان فضای تصویر و زمین در تصاویر تصحیح شده هندسی منتفی می‌سازد. به نظر می‌رسد

مدل‌سازی اغتشاشات وضعیتی سنجنده به کمک نقاط کنترل زمینی، موجب افزایش دقت تخمین پارامترهای مدل می‌شود که سرانجام بهبود دقت برازش مدل را به همراه خواهند داشت. اما غیرخطی بودن مدل مداری نسبت به پارامترهای آن و همچنین وجود همبستگی بین پارامترها، موجب افزایش پیچیدگی‌های اجرایی در فرایند کالیبراسیون پارامترهای مدل به‌وسیله نقاط کنترلی می‌شود.

در مدل پیشنهاد شده در این مقاله، با هدف کاهش پیچیدگی‌های اجرایی مربوط به حل دستگاه معادلات غیرخطی در مدل پارامترهای مداری، هیچ یک از پارامترهای توجیه خارجی مدل مداری به عنوان پارامترهای مجهول در نظر گرفته نمی‌شود. در این مدل‌سازی بدون در نظر گرفتن ماتریس مربوط به مدل‌سازی اغتشاشات وضعیتی سنجنده ($R_{Attitude}$) از یک سو و همچنین تعیین پارامترهای کپلری موجود در مدل $(a, e, i, \omega_p, f_0, f_1, \Omega_0, \Omega_1)$ به‌وسیله اطلاعات افریز (Seeber, 2003)، مقادیر مذکور با نقش پارامترهای ثابت در ساختار مدل حضور پیدا می‌کنند. بدیهی است که این شرایط به‌واسطه کالیبره نبودن پارامترهای کپلری و در نظر گرفته نشدن اغتشاشات وضعیتی ماهواره در بازه زمانی گرفتن تصویر، دقت مطلوبی را در آزمون مدل به‌وسیله نقاط کنترل زمینی تأمین نمی‌کند. تمهیدی که در این روش‌شناسی به منظور افزایش دقت برازش مدل مداری در نظر گرفته شد، استفاده از پارامترهای اضافی در فضای تصویر است. تحلیل استفاده از پارامترهای اضافی در ادامه تشریح می‌گردد.

در تصویری خام از نظر هندسی و با تکنولوژی Push Broom، هر سطر از تصویر پس از ثبت در فضای آن، در ساختار منظم ماتریسی به صورت متوالی ذخیره‌سازی می‌گردد. تعداد ستون‌های ماتریس مذکور معادل تعداد CCDهای موجود در سیستم اپتیکی سنجنده است؛ و موقعیت و وضعیت لحظه‌ای سنجنده تنها در منطقه تحت پوشش همان سطر از تصویر در

می‌توان از دیگر مزایای روش پیشنهادی در مقایسه با روش بازسازی سه‌بعدی رایج در مدل‌های توابع کسری دانست.

۲-۲-۱- تعیین پارامترهای مدل مداری به کمک داده‌های افمریز

داده‌های افمریز مشتمل‌اند بر بردارهای موقعیت و سرعت لحظه‌ای ماهواره در یک سیستم مختصات ژئوسنتریک در بازه‌های مشخص زمانی (SPOT-Image, 2002). با در اختیار داشتن داده‌های افمریز و زمان ثبت آنها می‌توان با استفاده از درون‌یابی زمانی لاگرانژ (Valadan Zoej, 1997)، براساس زمان دریافت یا گرفتن داده‌های افمریز و زمان یک سطر مرجع از صحنه تصویر، بردار موقعیت و سرعت لحظه‌ای ماهواره را برای لحظه ثبت سطر مذکور تخمین زد. سرانجام نیز به کمک بردارهای تخمین زده شده و بر اساس روابط موجود در مکانیک سماوی، شش پارامتر کپلری $(a, e, i, \Omega_0, \omega_p, f_0)$ برای سطر مرجع می‌توان محاسبه کرد (Seeber, 2003). دو پارامتر (Ω_1, f_1) هم براساس قدرت تفکیک مکانی (GSD) پای قائم و دوره تناوب ماهواره (T) به کمک رابطه‌های (۸) و (۹) تعیین می‌شوند (Safdarinezhad, 2011).

رابطه (۸)

$$f_1 = \frac{GSD}{R_e}$$

رابطه (۹)

$$\Omega_1 = \frac{GSD \times T}{P_e} \times \omega_e$$

در روابط (۸) و (۹)، R_e شعاع زمین است، P_e محیط زمین با فرض کروی بودن و ω_e سرعت زاویه‌ای دوران وضعی زمین.

۲-۲-۲- روش انتخاب ساختار چندجمله‌ای‌های دوبعدی

چون در این تحقیق چندجمله‌ای‌های دوبعدی نقش تصحیح‌کننده موقعیت نقاط در فضای تصویر را دارند،

بازگرداندن موقعیت نقاط در فضای تصاویر تصحیح‌شده هندسی (به غیر از تصاویر آرتوشده و تصاویر دارای سطوح بالای تصحیحات هندسی) به موقعیتی که در معادله شرط هم‌خطی مبتنی پارامترهای مداری تقریبی صدق کند نیز به کمک پارامترهای اضافی در فضای تصویر ممکن باشد.

در این تحقیق چندجمله‌ای‌های دوبعدی با توجه به توان و انعطاف زیادی که در تغییر الگوی شبکه‌های دوبعدی دارند، به عنوان پارامترهای اضافی در فضای تصویر در نظر گرفته شدند، رابطه (۶) شکل عمومی مدل شرط هم‌خطی پیشنهادی را نشان می‌دهد.

رابطه (۶)

$$\begin{pmatrix} x + \Delta x \\ y + \Delta y \\ -c \end{pmatrix}_{SRF} = \frac{1}{\lambda} [R_{Pointing}]^T \times [R_{Orbital}]^T \begin{pmatrix} X - X_s \\ Y - Y_s \\ Z - Z_s \end{pmatrix}_{GCS}$$

نمادگذاری در رابطه مذکور مشابه رابطه ۱ است و $(\Delta x, \Delta y)$ چندجمله‌ای‌های دوبعدی از مختصات سطر (T) و ستون (c) ماتریسی در سیستم مختصات تصویر رقومی هستند (رابطه ۷).

رابطه (۷)

$$\Delta x = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{i,j} \times r^i \times c^j$$

$$\Delta y = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{i,j} \times r^i \times c^j$$

با توجه به اینکه تنها مجهولات در مدل پیشنهادی همانا ضرایب چندجمله‌ای‌های دوبعدی‌اند، تعیین پارامترهای مجهول به‌وسیله نقاط کنترل زمینی با حل یک دستگاه معادلات خطی ممکن خواهد بود. از سوی دیگر با توجه به جایگاه مشخص چندجمله‌ای‌های دوبعدی به عنوان پارامترهای اضافی در معادله شرط هم‌خطی، می‌توان با جمع‌آوری نقاط متناظر در تصاویر استریو، در فرایند تقاطع فضایی و بدون نیاز به خطی‌سازی و روش تکرار در حل دستگاه معادلات، اقدام به بازسازی سه‌بعدی فضای زمین کرد. این را

گرفته شده برای افزودن ترم‌های چندجمله‌ای مطابق با افزایش اندیس مربوط به ضرایب چندجمله‌ای (a_i) در رابطه (۱۰) است.

رابطه (۱۰)

a_1	<i>Zero Degree Terms</i>
$a_2 r + a_3 c$	<i>First Degree Terms</i>
$a_4 c^2 + a_5 r^2 + a_6 rc$	<i>Second Degree Terms</i>
$a_7 r^2 c + a_8 c^3 + a_9 rc^2 + a_{10} r^3$	<i>Third Degree Terms</i>
$a_{11} r^2 c^2 + a_{12} r^4 + a_{13} c^4 + a_{14} rc^3 + a_{15} r^3 c$	<i>Fourth Degree Terms</i>

۲-۳- مجموعه داده‌های مورد استفاده

داده‌های به‌کاررفته در این تحقیق شامل پنج مجموعه تصاویر استریو از سه منطقه زنجان و اصفهان و شیراز در کشور ایران‌اند. داده‌های مربوط به مناطق زنجان و اصفهان از سری سنجنده‌های SPOT هستند که دو مجموعه تصاویر استریوی خام و دو مجموعه تصاویر محصول سطح ۱B (SPOT-Image, 2002) همان تصاویر خام را شامل می‌شوند. مجموعه تصاویر استریوی منطقه شیراز مربوط به سنجنده Rapid Eye است و تصاویر این مجموعه فاقد تصحیح هندسی‌اند. در جدول ۱ اطلاعات هندسی مربوط به مجموعه‌های داده و نقاط کنترلی موجود در هر مجموعه تصاویر نشان داده شده است.

انتخاب ترکیب بهینه از ترم‌های چندجمله‌ای وابسته به سطح پیچیدگی و الگوی تصحیح نقاط در فضای تصویر خواهد بود. میزان انطباق پارامترهای توجیه خارجی در معادله شرط هم‌خطی با شرایط واقعی حرکتی و وضعیتی سنجنده در بازه زمانی گرفتن تصویر، ارتباط مستقیم با سطح پیچیدگی الگوی تصحیح نقاط در فضای تصویر به کمک پارامترهای اضافی خواهد داشت. از همین رو دقت تخمین پارامترهای کپلری، میزان اغتشاشات سنجنده در بازه زمانی گرفتن تصویر و همچنین سطوح تصحیحات هندسی اعمال‌شده در فضای تصویر در تصاویر تصحیح شده هندسی، بر تعداد ترم‌های لازم از چندجمله‌ای تأثیرگذار خواهد بود.

در این تحقیق با در نظر گرفتن چندجمله‌ای‌های با حداکثر از درجه چهار به عنوان پارامترهای اضافی ($\Delta x, \Delta y$) در فضای تصویر، استراتژی انتخاب ساختار چندجمله‌ای‌های بهینه به صورت پیش‌رونده و به کمک افزایش اغنای مدل با افزودن ترم به ترم چندجمله‌ای‌های دوبعدی، طراحی گردید. از آنجا که چندجمله‌ای دوبعدی مورد استفاده مشتمل بر ۱۵ ترم است، روند افزودن ترم‌های چندجمله‌ای در ۱۵ گام صورت می‌پذیرد و ساختاری که بهترین دقت را در سطح نتایج ترفیع فضایی برای نقاط چک تأمین کند به عنوان مدل بهینه معرفی خواهد شد. ترتیب در نظر

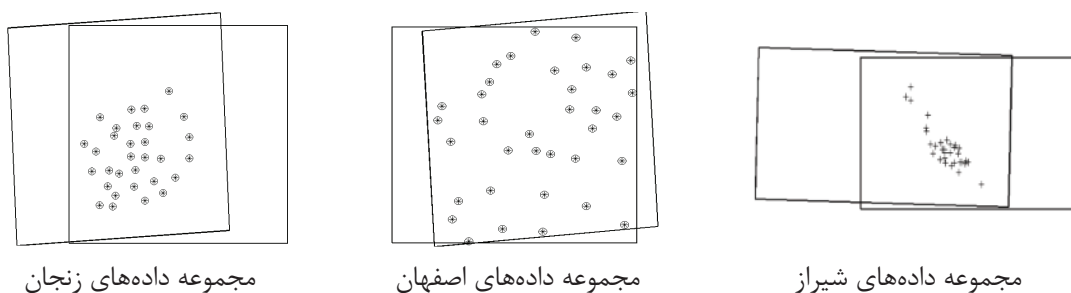
جدول ۱. مجموعه داده‌ها و اطلاعات مربوط به هر کدام

مجموعه داده		شیراز		اصفهان		زنجان	
سطح تصحیح هندسی		خام		خام و ۱B°		خام و ۱B	
سکو		Rapid Eye-2		SPOT-1		SPOT-3	
سنجنده		Green-Band**		HRV		HRV	
تاریخ گرفته شدن		Mar ۲۰۱۰	Mar ۲۰۱۰	Aug ۱۹۸۷	Jun ۱۹۸۷	July ۱۹۹۳	July ۱۹۹۳
زاویه دید (درجه)		۱۹/۶۴W	۷/۰۹E	۲۴/۷W	۲۰/۸۴E	۱۹/۰۱W	۱۶/۶۶E
قدرت تفکیک مکانی در نادیر		۶/۵M		۱۰-M		۱۰-M	
نسبت باز به ارتفاع		۰/۵۳۴		۰/۹۷۴		۰/۷۳۷	
تعداد نقاط کنترل		۳۴		۳۵		۳۱	

* جزئیات مربوط به تصحیحات صورت گرفته در این محصول در مرجع (SPOT-Image, 2002) ارائه شده است.

** باندهای تصاویر خام سنجنده Rapid Eye هم مرجع نیستند.

مدلی جدید به منظور تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی و اطلاعات ناوبری ماهواره



شکل ۱. توزیع نقاط کنترلی در هر مجموعه داده

بزرگی میانگین بردارهای خطا در تمامی تصاویر گویای وجود خطای سیستماتیک در هنگام استفاده از مدل مداری با پارامترهای تقریبی است. این امر در تصاویر تصحیح‌شده هندسی وجود خطای سیستماتیک بزرگ‌تری را نشان خواهد داد، و نتایج جدول ۲ نیز همین موضوع را تأیید می‌کنند. اختلاف فاحش در بزرگی بردارهای خطا در دو راستای x و y برای تصاویر سطح ۱B ناشی از نوع تصحیحات هندسی است که در این محصولات اعمال شده است. در محصول سطح ۱B سنجنده SPOT، اثر کرویت و دوران زمین و همچنین اثر پانورامیک (دید غیرقائم) در فضای تصویر تصحیح می‌گردد که تمامی این تأثیرات موجب تصحیحات بزرگ‌تری در چیدمان CCDها در فضای تصویر (محور y در سیستم SRF) می‌شوند.

نکته جالب در جدول ۲ انحراف معیار کم بردارهای خطا در تصاویر خام دو منطقه زنجان و اصفهان بوده است، و نشان می‌دهد که استفاده از پارامترهای به‌دست‌آمده از اطلاعات افمریز تنها مشتمل بر جابه‌جایی سیستماتیک در فضای تصویر است و می‌توان اثر آنها را با تعداد محدودی از پارامترهای اضافی در فضای تصویر تصحیح کرد.

سرانجام اینکه در تمامی مجموعه داده‌های موجود، بی‌کفایتی مدل مداری با پارامترهای تقریبی در تأمین دقت مطلوب در فضای تصویر به اثبات رسید. در ادامه میزان توفیق پارامترهای اضافی در تصحیح تأثیر خطاهای باقی‌مانده در فضای تصویر بررسی و ارزیابی می‌گردند.

چیدمان نقاط کنترلی در فضای تصاویر مربوط به هر مجموعه داده و نحوه پوشش تصاویر استریو در شکل ۱ نشان داده شده است.

نقاط کنترلی در دو منطقه زنجان و اصفهان از طریق سیستم GPS دو فرکانسه، و نقاط کنترلی در منطقه شیراز به کمک نقشه شهری با مقیاس ۱:۲۰۰۰ جمع‌آوری شده‌اند. از سوی دیگر نقاط کنترلی در فضای تصویر، در مجموعه تصاویر منطقه شهر زنجان با دقت تقریبی نیم پیکسل، و دو مجموعه تصاویر دیگر با دقتی معادل یک پیکسل اندازه‌گیری شده‌اند.

۳- پیاده‌سازی و نتایج

۳-۱- بررسی مدل مداری بدون در نظرگیری

پارامترهای اضافی

در این بخش با مبنا قرار دادن رابطه ۶ به عنوان مدل ارتباطی بین فضای زمین و تصویر، تأثیر فقدان پارامترهای اضافی در فضای تصویر و همچنین تعیین پارامترهای مدل مداری (بخش ۲-۱) به صورت مقادیر ثابت مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور موقعیت نقاط کنترلی در فضای تصویر برای هر صحنه از مجموعه داده‌های موجود به وسیله مدل مداری برآورد شد و نتایج به دست‌آمده با موقعیت صحیح نقاط کنترلی در فضای تصویر مقایسه گردید. جدول ۲ گزارش آماری (میانگین، انحراف معیار و RMSE) را از وضعیت بردارهای خطا در نقاط کنترلی به تفکیک مؤلفه‌های x و y برای هر تصویر در هر مجموعه، داده‌ها نشان می‌دهد.

جدول ۲. ارزیابی دقت در فضای تصویر برای مدل مداری بدون پارامترهای اضافی در فضای تصویر (پارامترهای مدل از طریق اطلاعات افمریز تعیین شدند (بخش ۲-۲) و به صورت مقادیر ثابت در ساختار مدل جای گرفتند)

میانگین بردارهای خطا (pixel)		انحراف معیار بردارهای خطا (pixel)		RMSE بردارهای خطا (pixel)		تصویر	محصول	مجموعه داده‌ها
x	y	x	y	x	y			
۸۱۵/۹۷	۶۹/۷۶	۱/۷۶	۰/۴۳	۸۱۵/۹۷	۶۹/۷۶	۱	خام	SPOT-3 زنجان
۸۲۰/۲۱	۹۳/۳۳	۱/۸۰	۰/۴۳	۸۲۰/۲۲	۹۳/۳۳	۲		
۸۵۲/۵۶	۲۷۴۸۲/۵۶	۲/۷۳	۸۸۲/۰۴	۸۵۲/۵۶	۲۷۴۹۶/۲۶	۱	1B	SPOT-1 اصفهان
۸۶۰/۷۴	-۲۴۳۹۱/۸۳	۳/۹۶	۸۹۴/۶۰	۸۶۰/۷۵	۲۴۴۰۷/۷۰	۲		
۸۴۴/۳۰	۹۹/۴۹	۱/۳۴	۰/۶۷	۸۴۴/۳۰	۹۹/۴۹	۱	خام	Rapid Eye- II شیراز
۷۹۹/۲۱	۳۶/۸۰	۱/۳۷	۰/۷۶	۷۹۹/۲۱	۳۶/۸۰	۲		
۹۲۸/۶۲	۳۹۳۰۵/۵۲	۸/۲۸	۱۷۶۲/۳۹	۹۲۸/۶۵	۳۹۳۴۳/۸۸	۱	1B	
۸۶۲/۱۰	-۳۱۷۰۳/۶۶	۷/۵۳	۱۸۲۵/۳۸	۸۶۲/۱۳	۳۱۷۵۴/۶۷	۲		
۳۴۰/۶۸	-۱۰۶/۱۱	۵۵۰/۹۵	۳۴/۷۷	۶۴۰/۸۴	۱۱۱/۵۰	۱	خام	
۹۰۵/۷۲	-۱۳۱/۱۱	۴۹۹/۹۲	۲۷/۹۴	۱۰۳۰/۹۷	۱۳۳/۹۷	۲		

۲-۳- پیاده‌سازی مدل مداری به همراه پارامترهای اضافی

در این بخش روش‌شناسی مطرح‌شده در بخش ۲-۲ برای مجموعه داده‌های مختلف پیاده‌سازی گردیده و در ادامه به بررسی و تحلیل نتایج به‌دست‌آمده از آن پرداخته شده است. روند پیاده‌سازی با تفکیک تصاویر خام از نظر هندسی و تصاویر تصحیح‌شده هندسی صورت گرفت. هر مجموعه تصاویر استریو به ازای تعداد نقاط کنترلی مختلفی بررسی شدند و برای هر مجموعه نقاط کنترل در هر تصویر بهترین ساختار چندجمله‌ای براساس استراتژی مطرح‌شده در بخش ۲-۲-۲ شناسایی گردید. جدول ۳ نتایج دقت نقاط چک در دو فضای تصویر و زمین را برای تصاویر خام از مجموعه داده‌های موجود نشان می‌دهد.

در جدول ۳ برای هر یک از مجموع داده‌های موجود به ازای تعداد مختلفی از نقاط کنترلی و چک، گزارشی از RMSE بردارهای خطا در فضای تصویر و همچنین دقت به‌دست‌آمده از فرایند تقاطع فضای به تفکیک مؤلفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی در سیستم تصویر UTM ارائه شده است. در هر صحنه از تصاویر

استریو، تعداد پارامترهای اضافی مورد استفاده برای تأمین بهترین دقت (NoAP) نیز ارائه شده است. به عنوان مثال عدد ۴ نشان‌دهنده استفاده چهار ترم اول (a_1 تا a_4) از چندجمله‌ای موجود در رابطه ۱۰ برای پارامترهای اضافی هر دو مؤلفه x و y در فضای تصویر است. نتایج ارائه‌شده در جدول ۳ حاکی از کفایت چندجمله‌ای‌های دوبعدی در تصحیح موقعیت نقاط در فضای تصویرند؛ به نحوی که موقعیت نقاط بعد از تصحیح، در معادله شرط هم‌خطی مورد استفاده در این مدل‌سازی با دقت مطلوبی صادق خواهند بود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، بهترین جواب‌های به‌دست‌آمده در موارد انتخاب تعداد نقاط کنترلی کمتر، شامل درجات پایین چندجمله‌ای است که این را می‌توان ناشی از پدیده نوسانی چندجمله‌ای‌های دارای درجات بالا دانست. کاهش تأثیر نوسانی ترم‌های چندجمله‌ای با افزایش تعداد و بهبود توزیع نقاط کنترلی در سراسر صحنه تصویر امکان‌پذیر است؛ و حضور ترم‌های پیچیده‌تر به هنگام استفاده از تعداد نقاط کنترلی بیشتر نیز این را تأیید می‌کنند.

مدلی جدید به منظور تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، با استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی و اطلاعات ناوبری ماهواره

جدول ۳. ارزیابی دقت تصاویر خام در نقاط چک در دو فضای زمین (UTM) و تصویر برای بهترین ساختار پارامترهای اضافی

تقاطع فضایی RMSE		تصویر دوم		تصویر اول		نقاط کنترلی		مجموعه داده‌ها
H (m)	PL (m)	RMSE (pixel)	NoAP*	RMSE (pixel)	NoAP*	Chk	Ctrl	
۶/۴۵	۷/۴۹	۰/۸۲	۳	۰/۶۸	۲	۲۸	۳	SPOT-3 زنجان
۷/۱۴	۶/۴۲	۰/۷۱	۳	۰/۶۷	۳	۲۵	۶	
۶/۳۲	۶/۷۷	۰/۶۸	۳	۰/۷۲	۳	۲۱	۱۰	
۶/۶۶	۵/۰۹	۰/۵۹	۴	۰/۴۹	۵	۱۵	۱۶	
۴/۵۸	۵/۲۰	۰/۵۸	۴	۰/۵۰	۵	۱۱	۲۰	SPOT-1 اصفهان
۶/۰۳	۱۱/۹۷	۱/۶۷	۱	۰/۹۷	۳	۳۲	۳	
۵/۵۲	۱۰/۴۷	۱/۱۹	۳	۰/۹۵	۲	۲۹	۶	
۵/۶۶	۱۱/۰۶	۱/۲۵	۳	۰/۹۰	۳	۲۴	۱۱	
۷/۲۴	۹/۸۲	۱/۱۵	۵	۰/۸۷	۳	۱۸	۱۷	Rapid Eye- II شیراز
۵/۵۶	۱۱/۵	۱/۱۷	۶	۱/۰۲	۲	۱۵	۲۰	
۵/۴۱	۷/۴۱	۱/۵۹	۴	۱/۴۸	۴	۳۰	۴	
۵/۵۶	۸/۸۰	۱/۳۷	۴	۱/۵۷	۴	۲۷	۷	
۴/۶۵	۷/۶۹	۱/۲۷	۴	۱/۱۵	۴	۲۴	۱۰	
۴/۸۲	۷/۲۳	۱/۲۱	۴	۱/۲۵	۴	۲۱	۱۳	
۳/۶۴	۶/۹۹	۱/۰۸	۵	۱/۰۶	۵	۱۶	۱۸	

* تعداد ترم‌های استفاده‌شده از چندجمله‌ای دوبعدی برای مؤلفه‌های x و y در فضای تصویر مطابق با ترتیب ارائه‌شده در رابطه (۱۰)

خطا در هنگام استفاده از تصاویر تصحیح‌شده (SPOT1B) نسبت به تصاویر خام (جدول ۲)، به نظر می‌رسد تصحیح موقعیت نقاط در این تصاویر با پیچیدگی‌های بیشتری در قیاس با تصاویر خام همراه باشد. به نظر می‌رسد این امر علاوه بر نیاز به حضور ترم‌های با درجات بالاتر از چندجمله‌ای‌ها، اهمیت توزیع مکانی و تعداد نقاط کنترلی را به منظور برآزش بهتر افزایش خواهد داد.

در ادامه، کفایت چندجمله‌ای‌های دوبعدی در پوشش تأثیرات تصحیح‌نشده به‌وسیله مدل مداری برای تصاویر سطح ۱B بررسی می‌شود. روند بررسی برای تصاویر سطح ۱B مشابه با تصاویر خام است، با این تفاوت که تحلیل ارزیابی دقت در فضای تصویر تفاوت اندکی با تصاویر خام دارد.

از دیگر نتایج جدول ۳، امکان تأمین دقت‌های مطلوب در تصحیح موقعیت نقاط در فضای تصویر با چندجمله‌ای‌های حداکثر از درجه دو است. این امر از التزام به جست‌وجو در ترم‌های با درجات بالاتر در روند شناسایی چندجمله‌ای‌های بهینه می‌کاهد. به عبارت دیگر، مجموعه ترم‌های چندجمله‌ای دو بعدی حداکثر از درجه دو، پتانسیل کافی برای تصحیح موقعیت نقاط تصویری را - به نحوی که در معادله شرط هم‌خطی مربوط به مدل مداری با پارامترهای تقریبی صادق باشد - دارند. این چندجمله‌ای‌ها تأثیرات مربوط به عدم تعیین دقیق پارامترهای کپلری و همچنین اغتشاشات وضعیتی موجود در بازه زمانی گرفتن تصویر را با تصحیح در موقعیت نقاط در فضای تصویر تعدیل کرده‌اند و توان‌شان در این زمینه به اثبات رسیده است. با توجه به اختلاف فاحش در نتایج آماری بردارهای

جدول ۴. ارزیابی دقت تصاویر 1B در نقاط چک در دو فضای زمین (UTM) و تصویر برای بهترین ساختار پارامترهای اضافی

تقاطع فضایی RMSE		تصویر دوم		تصویر اول		نقاط کنترلی		مجموعه داده‌ها
H (m)	PL (m)	RMSE (pixel)	NoAP*	RMSE (pixel)	NoAP*	Chk	Ctrl	
۸/۱۱	۱۰/۱۱	۱/۱۶	۴	۱/۱۲	۴	۲۷	۴	SPOT-3 زنجان
۷/۴۳	۹/۲۷	۱/۰۵	۵	۰/۹۵	۵	۲۵	۶	
۶/۴۴	۷/۷۲	۰/۹۴	۴	۰/۷۷	۴	۲۲	۹	
۶/۹۵	۷/۱۰	۰/۹۱	۵	۰/۶۷	۴	۱۵	۱۶	
۵/۷۱	۷/۳۷	۰/۸۹	۴	۰/۷۳	۴	۱۱	۲۰	SPOT-1 اصفهان
۱۱/۷۸	۱۰/۹۰	۱/۱۴	۵	۱/۳۸	۵	۲۸	۷	
۷/۱۷	۱۱/۵۷	۱/۲۶	۶	۱/۲۲	۶	۲۵	۱۰	
۶/۷۷	۱۱/۱۳	۱/۳۴	۶	۱/۰۸	۶	۱۹	۱۶	
۵/۹۱	۹/۹۴	۱/۰۹	۶	۱/۰۲	۶	۱۷	۱۸	
۷/۸۸	۱۰/۵۶	۱/۱۷	۶	۱/۱۷	۵	۱۵	۲۰	

* تعداد ترم‌های استفاده‌شده از چندجمله‌ای دوبعدی برای مؤلفه‌های x و y در فضای تصویر مطابق با ترتیب ارائه‌شده در رابطه (۱۰)

چندجمله‌ای‌های دوبعدی در این بخش نیز تأیید گردید. مقایسه دقت‌های به‌دست‌آمده در دو جدول ۳ و ۴ وابستگی بیشتر تصاویر سطح 1B را به تعداد نقاط کنترلی برای تأمین دقت مطلوب، نشان می‌دهد. در تحلیل این موضوع می‌توان به پیچیدگی سطوح تصحیحات اعمال‌شده در فضای تصاویر 1B اشاره کرد. نتایج به‌دست‌آمده از پیاده‌سازی روش‌شناسی پیشنهادی در مجموعه داده‌های مختلف همگی کفایت روش مذکور را در استفاده از تصاویر خام و همچنین تصاویری که سطوح پایینی از تصحیحات هندسی را در خود دارند، نشان دادند. افزودن پارامترهای اضافی در معادله شرط هم‌خطی را می‌توان به عنوان بخشی از روند فیزیکی تصحیح هندسی و یا به عنوان رویکرد جدید استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی به مثابه مدل‌های درون‌یاب برشمرد. از آنجا که تمامی پارامترهای توجیه خارجی مدل مداری نقش ثابتی در روند حل پارامترها دارند و مقادیر آنها را تنها با وجود یک سری داده‌های افریز می‌توان محاسبه کرد، تمامی اطلاعات مربوط به توجیه خارجی مدل مداری می‌بایست به عنوان اطلاعات کمکی در استفاده از مدل چندجمله‌ای‌های دوبعدی در نظر گرفته شوند. با این

تعریف مختصات نقاط تصویری در مدل‌های فیزیکی در سیستم متریک و با واحدهای طولی (میکرومتر) صورت می‌گیرد. این کمیات طولی تنها در صورت استفاده از تصاویر خام، با تقسیم بر ابعاد پیکسل قابل تبدیل به واحد پیکسلی خواهند بود. در تصاویر تصحیح‌شده هندسی به‌واسطه تصحیحات هندسی صورت گرفته و همچنین فرایند نمونه‌برداری مجدد، برآورد اندازه خطا برحسب واحد طولی در فضای تصویر و تقسیم مقادیر مذکور بر ابعاد پیکسل‌های تصویر خام، اندازه دقیق خطا را براساس واحد پیکسل در تصاویر تصحیح‌شده هندسی تعیین نمی‌کنند. به همین دلیل مقادیر RMSE ارائه شده در نتایج دقت در فضای تصویر برای این تصاویر که براساس ابعاد پیکسل تصویر خام متناظرشان برآورد شده‌اند، اعتبار پایین‌تری در مقایسه با تصاویر خام دارند. جدول ۴ نتایج دقت نقاط چک در دو فضای تصویر و زمین را برای تصاویر تصحیح‌شده هندسی (1B) از مجموعه داده‌های موجود نشان می‌دهد.

نحوه ارائه نتایج در جدول ۴ عیناً مشابه با جدول ۳ است. با توجه به دقت‌های به‌دست‌آمده در تصاویر سطح 1B از سنجنده SPOT (جدول ۴)، توانایی

در نظر گرفته نشده است. سهولت پیاده‌سازی، نیاز نداشتن به خطی‌سازی و روند تکرار در برآورد پارامترهای مدل و فرایند تقاطع فضایی از مزایای این مدل‌سازی است که تنها با استفاده از تصحیح خطاهای مدل‌سازی نشده به‌وسیله مدل مداری در فضای تصویر امکان تأمین دقت‌های مطلوبی را در تهیه اطلاعات هندسی از تصاویر ماهواره‌ای را ممکن می‌سازد.

ناممکن بودن استفاده از مدل‌های فیزیکی در تصاویری که از هندسه تصویربرداری در لحظه تصویربرداری خارج شده‌اند، از معایبی است که موجب محدودیت استفاده از مدل‌های فیزیکی می‌شود. در ادامه این تحقیق، میزان توفیق چندجمله‌ای‌های دوبعدی در انتقال موقعیت نقاط تصویری مربوط به تصاویر تصحیح‌شده هندسی (SPOT 1B) به موقعیت صادق در مدل مداری با پارامترهای تقریبی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج این ارزیابی نیز کفایت روش‌شناسی پیشنهادی را به اثبات رسانید و امکان استفاده از معادله شرط هم‌خطی پارامترهای مداری را در استفاده از تصاویر سطح 1B ممکن ساخت.

۵- منابع

Gugan, D., 1986, **Practical Aspects of Topographic Mapping from SPOT Imagery**, Photogrammetric Record, Vol.12, No. 69, 349-355.

Jensen, J., 2007. **Remote Sensing of the Environment - An Earth Resource Perspective (2nd Edition ed.)**, Upper Saddle River, NJ 07458, United States of America: Pearson Prentice Hall.

Kim, T., & Dowman, I., 2006, **Comparison of Two Physical Sensor Models for Satellite Images: Position-Rotation Model and Orbit-Attitude Model**. Photogrammetric Record, Vol. 21, No. 114, 110-123.

دیدگاه مدل پیشنهادشده در این مقاله، چندجمله‌ای دوبعدی تصحیح شده‌ای به شمار می‌آید، که می‌تواند دقت‌های مطلوبی را در تأمین اطلاعات سه‌بعدی در فضای شیء از تصاویر ماهواره‌ای استریو تأمین کند.

۴- نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی به عنوان مدلی دقیق به منظور تعیین موقعیت سه‌بعدی به‌وسیله تصاویر ماهواره‌ای تدوین گردید. چندجمله‌ای‌های دوبعدی به عنوان مدل ارتباطی بین دو فضای تصویر و زمین به‌واسطه ضعف ذاتی در استفاده نکردن از یکی از مؤلفه‌های سه‌بعدی فضای زمین در ساختار مدل‌سازی، قابلیت تعیین موقعیت سه‌بعدی را در تصاویر ماهواره‌ای استریو ندارند. به همین دلیل از چندجمله‌ای‌های دوبعدی به عنوان مدل ارتباطی در فضای تصویر استفاده شد.

چندجمله‌ای‌های دوبعدی به‌کاررفته در این مقاله با نقش پارامترهای اضافی فضای تصویر در مدل مداری حضور یافتند. مدل پارامترهای مداری استفاده‌شده در این مقاله شامل پارامترهای مربوط به مدل‌سازی اغتشاشات وضعیتی سنجنده نبوده است و تمامی پارامترهای آن به کمک اطلاعات ناوبری ماهواره محاسبه شدند و به صورت مقادیر ثابت در ساختار مدل مداری قرار گرفتند.

ایده این روش‌شناسی، بررسی پتانسیل چندجمله‌ای‌های دوبعدی در تصحیح موقعیت نقاط در فضای تصویر خام از جنبه هندسی است، به گونه‌ای که نقاط تصحیح‌شده در معادله شرط هم‌خطی مدل مداری صادق باشند. تأثیراتی که پارامترهای اضافی در این شرایط مسئولیت مدل‌سازی آنها را به عهده داشتند، مشتمل‌اند بر خطا در تعیین دقیق پارامترهای کپلری و اغتشاشات وضعیتی سنجنده در بازه زمانی گرفتن تصویر. نتایج نشان داد که این روش قابلیت تأمین دقت‌های مطلوبی را در نتایج ارزیابی نقاط چک دارد. این امر حاکی از پتانسیل بالای چندجمله‌ای‌های دوبعدی در تصحیح تأثیراتی است که در مدل مداری

- Konecny, G., Lohmann, P., Engel, H. & Kruck, E., 1987, **Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing , Vol. 53, No. 9, 1223-1230.
- McGlone, J., 2004, **Manual of Photogrammetry (5th Edition ed.)**, Bethesda, Maryland: American Society of Photogrammetry and Remote Sensing.
- Radhadevi, P., 1999, **Pass Processing of IRS-1C/1D PAN Subscene Blocks**, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing , Vol. 14, No. 33, 289-297.
- Safdarinezhad, A.R., 2011, **Using Additional Parameters in Orbital Parameters Model for Improvement of Precision in Geometric Correction of Satellite Images**, M.Sc. Thesis, Geodesy and Geomatic Faculty, K.N. Toosi University of Technology, 149-151.
- Salamonowicz, P., 1986, **Satellite Orientation and Position for Geometric Correction of Scanner Imagery**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing , Vol. 12, No. 62, 491-499.
- Seeber, G., 2003, **Satellite Geodesy (2nd Edition ed.)**, New York: DeGruyter.
- SPOT-Image, 2002, **SPOT Satellite Geometry Handbook**, S-NT-73-12-SI.
- Tao, C. & Hu, Y., 2001, **A Comprehensive Study of the Rational Function Model Photogrammetric Processing**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing ,Vol. 67, No. 12, 1347-1357.
- Toutin, T., 2004, **Review Article: Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods**, International Journal of Remote Sensing, Vol. 25, No.10, 1893-1924.
- Valadan Zoej, M., 1997, **Photogrammetric Evaluation of Space Linear Array Imagery for Medium Scale Topographic Mapping**, Ph.D. Thesis, University of Glasgow.
- Valadan Zoej, M., & Petrie, G., 1998, **Mathematical Modeling and Accuracy Testing of SPOT Level 1B Stereo Pairs**, Photogrammetric Record , Vol. 16, No. 91, 67-82.
- Valadan Zoej, M. & Sadeghian, S., 2003, **Orbital Parameter Modeling Accuracy Testing of Ikonos Geo Image**, Photogramm, J. Finland , Vol. 18, No. 2, 70-80.
- Valadan Zoej, M., Mansourian, A., Mojaradi, B. & Sadeghian, S., 2002, **2D Geometric Correction of Ikonos Imagery Using Genetic Algorithms**, Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa.
- Valadan Zoej, M., Mokhtarzadeh, M., Mansourian, A., Ebadi, H. & Sadeghian, S., 2007, **Rational Function Optimization Using Genetic Algorithms**, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation , Vol. 9, No. 4, 403-413.
- Wertz, J., 1978, **Spacecraft Attitude Determination and Control**, Dordrecht: Reidel.
- Westin, T., 1990, **Precision Rectification of SPOT Imagery**, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing , Vol. 56, No. 2, 247-253.