

بررسی سطوح همبستگی بین پارامترهای مدل مداری در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای

علیرضا صفدری نژاد^{۱*}، محمدجواد ولدان زوج^۲، مهدی مختارزاده^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی عمران- نقشه برداری دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۲- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

۳- دانشیار گروه فتوگرامتری و سنجش از دور دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۲/۱۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۷/۲۰

چکیده

مدل پارامترهای مداری یکی از مقیدترین مدل‌های فیزیکی تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای محسوب می‌شود. ساختار این مدل به نحوی تدوین شده که شرایط فیزیکی حاکم در سکوی ماهواره‌ای را در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر مدلسازی نماید. در این مدل، تعدد پارامترهای موجود در مدلسازی و همبستگی میان پارامترهای مدل موجب ایجاد مشکلاتی در حل دستگاه معادلات می‌شود. عموماً مشکلات موجود با افزودن پارامترهای مدل به شکل شبه‌مشاهده و همچنین کنترل روند تصحیح‌پذیری هر پارامتر به کمک مقادیر وزن، تا حد زیادی کاسته می‌شود. اما تعیین مقادیر صحیح وزن شبه‌مشاهدات با توجه به دقت‌های تقریبی اطلاعات کمکی امری دشوار بوده و عمدتاً عدم تعیین وزن مناسب برای شبه‌مشاهدات، تحمیل پارامترهای اضافی را در ساختار مدلسازی به همراه دارد. در این مقاله با تدوین سناریوهایی، به بررسی سطح همبستگی پارامترهای مدل مداری پرداخته شد. برای این منظور قابلیت پارامترهای مدل مداری صلب در پوشش اثر اغتشاشات وضعیتی سنجنده مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که محدوده‌ی مشخصی از اغتشاشات وضعیتی سنجنده بواسطه‌ی همبستگی بین پارامترهای مدل مداری، توسط مدل مداری صلب قابل پوشش می‌باشد. از سوی دیگر اثبات شد که توانایی مدل مداری صلب زمانی که از شبه‌مشاهدات در روند مدلسازی استفاده نگردند، بارزتر خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: مدل پارامترهای مداری، همبستگی، تقاطع فضای، شرط هم‌خطی، پارامترهای کپلری، تصاویر ماهواره‌ای، تصحیح هندسی.

* نویسنده مکاتبه کننده: علیرضا صفدری نژاد، آدرس: دانشکده‌ی ژئودزی و ژئوماتیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تلفن همراه، ۰۹۱۲۳۲۵۸۸۵۲

۱- مقدمه

بر مکان هندسی یک بیضی داشته و وضعیت لحظه‌ای ایده‌آل آن کاملاً وابسته به موقعیت لحظه‌ای ماهواره مدلسازی می‌شود.

در مدل پارامترهای مداری به‌منظور لحاظ کردن اغتشاشات^۶ موجود در وضعیت سنجنده از راهکارهایی مانند ماتریس‌های دوران اضافی استفاده شده که بدون تاثیرگذاری بر موقعیت سنجنده، تنها اغتشاشات وضعیتی سنجنده را در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر مدلسازی می‌کنند [۹]. اما وجود همبستگی بالا بین پارامترهای مدل غنی شده توسط پارامترهای تصحیح‌کننده‌ی اغتشاش و عدم کنترل پارامترهای مدل به‌کمک وزن شبه‌مشاهدات^۷، در بیشتر موارد منجر به واگرایی و یا همگرایی به جواب‌های نامناسب در دستگاه معادلات خواهد شد. از طرفی تعیین وزن نادرست شبه‌مشاهدات نیز موجب مشکلاتی مانند: ۱- تحمیل پارامترهای دوران اضافی بیشتر جهت تامین دقت مناسب و یا ۲- منجر به کاهش دقت مدل در نتایج ارزیابی نقاط چک خواهد شد.

در این مقاله با ارائه‌ی روشی جدید، به بررسی سطح همبستگی پارامترهای موجود در مدل پارامترهای مداری پرداخته شده است. ضرورت این بررسی را می‌توان در شناسایی و سطح‌بندی پارامترهایی دانست که اثر آنها توسط سایر پارامترها در ساختار مدلسازی قابل پوشش می‌باشد. این امر با کاهش پارامترهای لازم در مدلسازی، از مشکلاتی مانند بزرگی فضای جواب و احتمال واگرایی دستگاه معادلات جلوگیری می‌کند. این ضرورت در مواردی که اطلاعات کمکی موجود از اعتبار کافی جهت استفاده به‌عنوان شبه‌مشاهده برخوردار نباشند، بارزتر خواهد بود. در چنین حالتی استفاده از داده‌های کمکی به‌عنوان شبه‌مشاهده،

مدلسازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای به‌عنوان اولین ضرورت در فرآیند تهیه‌ی اطلاعات مکانی دقیق و قابل‌اعتماد، نقش مهمی را در پروژه‌های سنجنش از دوری مبتنی بر تولید اطلاعات مکانی ایفا می‌نماید [۱]. بیشتر مدل‌های موجود با هدف تامین حداکثری دقت (بر اساس کاربرد مورد نیاز)، قابلیت تعمیم‌پذیری بالا در سراسر تصویر، سهولت استفاده و کاهش پیچیدگی‌های اجرایی توسعه یافته و با یکدیگر در رقابت هستند [۲]. فرآیند مدلسازی هندسی با دو رویکرد مدل‌های درونیاب^۱ (توابع کسری^۲، چندجمله‌ای‌های دوبعدی و سه‌بعدی^۳ و ...) و استفاده از مدل‌های مبتنی بر فیزیک تشکیل تصویر صورت می‌پذیرد [۲ و ۳].

در مدلسازی فیزیکی مربوط به تصاویر ماهواره‌ای با آرایه‌های خطی^۴، با مبنا قرار دادن معادله‌ی شرط هم‌خطی، پارامترهای مربوط به توجیه خارجی^۵ لحظه‌ای هر سطر از تصویر بر مبنای شرایط حرکتی و وضعیتی سنجنده تعیین می‌گردد [۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱]. تامین دقت مطلوب توام با کاهش پیچیدگی‌های اجرایی، بواسطه‌ی حضور کمترین پارامترهای موجود در ساختار مدلسازی یکی از اهداف فتوگرامتریست‌ها در طراحی و استفاده از مدل‌های فیزیکی محسوب می‌شود.

مدلسازی مبتنی بر پارامترهای مداری را می‌توان مقیدترین استراتژی مدلسازی فیزیکی تصاویر ماهواره‌ای دانست که در آن موقعیت و وضعیت لحظه‌ای سکوی ماهواره بطور کامل توسط پارامترهای کپلری مدلسازی می‌گردد [۴، ۸ و ۱۲]. در این استراتژی، سکوی ماهواره عموماً حرکتی منطبق

1 Interpolative Models

2 Rational Functions

3 2D & 3D Polynomials

4 Linear Pushbroom Imagery

5 Exterior Orientation Parameters

6 Perturbations

7 Quasi Observations

چهار سیستم مختصات سه بعدی و ارتباط لحظه‌ای میان آنها، هندسه‌ی حاکم بر لحظه‌ی ثبت تصویر را مدلسازی نمود. سیستم مختصات زمینی (GCS³)، سیستم مختصات ایده‌آل مداری ماهواره (ORF⁴)، سیستم مختصات سکوی ماهواره (PRF⁵) و سیستم مختصات سنسور (SRF⁶)، چهار سیستم مختصات مطرح در مدلسازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای می‌باشند.

GCS به‌عنوان مبنای تعیین مختصات در فضای زمین، معمولاً یک سیستم ژئوسنتریک و قفل شده به حرکت وضعی زمین⁷ [۱۳] در نظر گرفته می‌شود. ORF با مبداءای منطبق بر مرکز ثقل ماهواره، سیستمی دست‌راستی بوده که راستای محور Z در آن، هم‌جهت با بردار موقعیت ماهواره در یک سیستم مختصات ژئوسنتریک و جهت‌گیری محور X در آن منطبق بر راستای بردار سرعت لحظه‌ای ماهواره در یک سیستم مختصات لخت⁸ [۱۳] می‌باشد. PRF نیز هم‌مبداء با ORF بوده که نسبت به بدنه‌ی سکوی ماهواره قفل شده‌است. انتظار می‌رود که این سیستم مختصات در حالتی که اغتشاشی در وضعیت سکو وجود نداشته باشد کاملاً منطبق بر ORF باشد. نهایتاً SRF نیز یک سیستم دست‌راستی بوده که دارای مبداءای منطبق بر مرکز تصویر سیستم اپتیکی سنجنده می‌باشد. راستای محور Z در SRF هم‌جهت با امتداد محور اصلی سیستم اپتیکی و راستای محور Y هم‌جهت با راستای چیدمان CCD⁹ها در فضای تصویر تعریف شده به نحوی که جهت‌گیری مثبت محور Y در هنگام حرکت نزولی ماهواره به سمت شرق جغرافیایی معطوف خواهد بود.

مشکلات مربوط به تعیین وزن مناسب برای هر پارامتر را به همراه داشته به همین جهت تنها می‌توان مقادیر مذکور را به‌عنوان مقادیر اولیه در حل دستگاه معادلات در نظر گرفت.

دانش نسبت به میزان وابستگی پارامترهای مدل و همچنین میزان پوشش اثرات مربوط به فقدان هر پارامتر در ساختار مدلسازی توسط سایر پارامترها در هنگام حل دستگاه معادلات، در تشخیص و رده‌بندی اهمیت حضور هر پارامتر در ساختار مدلسازی موثر خواهد بود. به عبارت دیگر، می‌توان با توجه به میزان استقلال عملکرد هر پارامتر نسبت به سایر پارامترهای موجود، در مواقعی که اغتشاشات وضعیتی سنجنده زیاد باشد، نوع پارامترهای لازم جهت افزودن به ساختار مدلسازی را با تدبیر و استدلال نسبت به سطح همبستگی بین پارامترها انجام داد.

مقاله‌ی پیش رو در چهار بخش اصلی تنظیم شده‌است. بخش اول با مقدمه‌ای به طرح مساله در حوزه‌ی استفاده‌ی اجرایی از مدل پارامترهای مداری می‌پردازد. در بخش دوم این مقاله، بعد از تشریح مدل پارامترهای مداری و ساختارهای مدلسازی اغتشاشات وضعیتی در مدل مداری، مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده معرفی می‌گردد. بخش سوم از این مقاله که ساختار تحقیق صورت پذیرفته را شامل می‌شود، روند اجرای تحقیق را بیان نموده و نهایتاً بخش چهارم به بحث و نتیجه‌گیری اختصاص دارد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مدل پارامترهای مداری (O.P.M)

در تشکیل یک صحنه² با هندسه‌ی تصویربرداری خطی در سکوه‌ای ماهواره‌ای، شرایط فیزیکی خاصی حکم‌فرما بوده که به‌طور کلی می‌توان با تعریف

3 Ground Coordinate System
4 Orbital Reference Frame
5 Platform Reference Frame
6 Sensor Reference Frame
7 Earth Fixed – Geocentric Coordinate System
8 Inertia / Space fixed Coordinate System
9 Charge Coupled Devise (CCD)

1 Orbital Parameter Model
2 Scene

خواهند بود. در این ساختار مدلسازی، ماتریس $[R_{Orbital}]$ و بردار $[X_S, Y_S, Z_S]^T$ وابسته به زمان بوده و $[R_{Pointing}]$ ساختار مستقل از زمان خواهد داشت. ماتریس $[R_{Attitude}]$ نیز دارای ساختار انتخابی وابسته به زمان و یا مستقل از زمان خواهد بود.

موقعیت و وضعیت لحظه‌ای سیستم مختصات ایده‌آل ماهواره نسبت به یک سیستم مختصات ژئوسنتریک لخت و قفل به فضا، توسط پارامترهای کپلری تعیین می‌گردد. از میان پارامترهای کپلری سه پارامتر میل^۱ (i)، بعد نقطه‌ی گره‌ی صعودی^۲ (Ω) و آرگمان‌پریمی^۳ (ω_P) وضعیت مدار ماهواره را تبیین نموده و دو پارامتر خروج از مرکزیت^۴ (e) و نیم‌قطر طول مدار ماهواره (a) ابعاد بیضی مدار و نهایتاً پارامتر آنامولی واقعی^۵ (f) مبین موقعیت لحظه‌ای ماهواره در مدار خواهد بود [۱۳]. در حالت ایده‌آل، تنها پارامتر وابسته به زمان آنامولی واقعی بوده، اما پارامتر بعد نقطه‌ی گره‌ی صعودی نیز به‌منظور تصحیح اثر دوران زمین در سیستم‌های مختصات قفل شده به زمین و اثر ناچیز نرخ تغییرات Ω به زمان در مدارهای خورشیدآهنگ^۶ [۱۳] در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر، وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شود (رابطه‌ی ۲).

$$\begin{aligned} \Omega &= \Omega_0 + \Omega_1 t \\ f &= f_0 + f_1 t \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲)}$$

در رابطه‌ی (۲)، (Ω_0, f_0) بعد نقطه‌ی گره‌ی صعودی و آنامولی واقعی یک سطر مرجع از صحنه؛ (Ω_1, f_1)

حرکت ماهواره‌ها توسط قوانین کپلری قابل تشریح بوده و صرف‌نظر از اغتشاشات و نیروهای خارجی موثر، ماهواره‌ها در یک مدار بیضی شکل و قابل پیش‌بینی در حرکت می‌باشند [۱۴]. از آنجاییکه موقعیت مبداء و راستای محور سوم سیستم مختصات ایده‌آل (ORF) در مدار بیضی شکل ماهواره بر اساس قوانین مکانیک سماوی در حال تغییر است، موقعیت و وضعیت سیستم مختصات ایده‌آل مداری ماهواره به یکدیگر وابسته و تابعی از پارامترهای کپلری خواهند بود. به‌طور کلی می‌توان ساختار معادله‌ی شرط هم‌خطی مورد استفاده در استراتژی استفاده از پارامترهای کپلری در مدلسازی تصاویر ماهواره‌ای با هندسه‌ی تصویربرداری خطی را به‌صورت ساختار کلی موجود در رابطه‌ی (۱) نشان داد (۹).

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 رابطه‌ی (۱)، (x, y) مختصات نقاط در فضای تصویر با هندسه‌ی خطی و تکنولوژی پوش‌بروم در سیستم SRF؛ c فاصله‌ی اصلی سیستم اپتیکی؛ $[X_S, Y_S, Z_S]^T$ مختصات لحظه‌ای مرکز تصویر در سیستم GCS که توسط پارامترهای کپلری تعیین می‌شود؛ $[X, Y, Z]^T$ مختصات نقاط زمینی در سیستم GCS؛ λ ضریب مقیاس؛ $[R_{Pointing}]$ ماتریس دوران سه‌بعدی جهت موازی ساختن سیستم SRF با سیستم PRF به کمک زوایای نشانه‌روی سنجنده، $[R_{Attitude}]$ ماتریس دوران سه‌بعدی جهت موازی ساختن سیستم PRF با سیستم ORF به کمک مدلسازی اغتشاشات وضعیتی ماهواره و $[R_{Orbital}]$ نیز ماتریس دوران سه‌بعدی جهت موازی ساختن سیستم ORF با سیستم GCS توسط پارامترهای کپلری

- 1 Inclination
- 2 Right Ascension of the Ascending Node
- 3 Argument of Perigee
- 4 Eccentricity
- 5 True Anomaly
- 6 Sun Synchrony

موجب تغییر وضعیت بدنه‌ی سکوی ماهواره نسبت به سیستم مختصات ایده‌آل مداری (ORF) خواهد شد. سیستم‌های ناوبری تعبیه شده در ماهواره، همواره با اندازه‌گیری این انحرافات و متعاقباً بوسیله‌ی اعمال نیروهای گشتاوری سعی بر موازی ساختن سیستم مختصات واقعی سکوی ماهواره (PRF) با سیستم مختصات ایده‌آل مداری (ORF) دارند [۱۴]. این فرآیند با توجه دقت سیستم‌های اندازه‌گیری وضعیت ماهواره و تکنولوژی‌های مربوط به سیستم‌های حفظ وضعیت ماهواره به‌طور کامل صورت نپذیرفته و اغتشاشات تصحیح نشده‌ی اندکی در وضعیت ماهواره نسبت به سیستم مختصات ایده‌آل مداری باقی خواهند ماند. ماتریس $[R_{Attitude}]$ در رابطه‌ی (۲) وظیفه‌ی تصحیح اثر این اغتشاشات را به عهده خواهد داشت. ساختار مدلسازی در این ماتریس به‌صورت توابعی مستقل یا وابسته به زمان از سه دوران حول سه محور مختصاتی تحت عنوان رول (ω) ، پیچ (φ) و یاو (κ) ، به صورت یکی از ترکیبات موجود در رابطه‌ی (۵) استفاده می‌شود [۹].

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 \\ \varphi &= \varphi_0 \\ \kappa &= \kappa_0 \end{aligned} \quad \text{a)}$$

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \omega_1 t \\ \varphi &= \varphi_0 + \varphi_1 t \\ \kappa &= \kappa_0 + \kappa_1 t \end{aligned} \quad \text{b)}$$

$$\begin{aligned} \omega &= \omega_0 + \omega_1 t + \omega_2 t^2 \\ \varphi &= \varphi_0 + \varphi_1 t + \varphi_2 t^2 \\ \kappa &= \kappa_0 + \kappa_1 t + \kappa_2 t^2 \end{aligned} \quad \text{c)}$$

1 Roll
 2 Pitch
 3 Yaw

نرخ تغییرات (Ω_0, f_0) نسبت به زمان در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر و t نماد زمان بوده که عمدتاً هم ارز با شماره‌ی سطر در فضای تصویر لحاظ می‌شود.

در این ساختار مدلسازی، پارامتر ω_P به‌دلیل همبستگی مستقیم با پارامتر f و پارامتر e به‌علت ثبات مداری توسط داده‌های افریز محاسبه شده و به صورت پارامتر ثابت در دستگاه معادلات حضور پیدا می‌کنند [۹].

وضعیت لحظه‌ای سیستم مختصات ایده‌آل مداری ماهواره (ORF) نسبت به سیستم (GCS) توسط ماتریس دوران $[R_{Orbital}]$ قابل تشریح بوده که با توجه به خروج از مرکزیت اندک در مدار مربوط به ماهواره‌های سنجنش از دوری، به شکل رابطه‌ی (۳) قابل بیان خواهد بود. در رابطه‌ی (۳)، (R_1, R_2, R_3) به ترتیب ماتریس‌های دوران سه بعدی حول سه محور (X, Y, Z) می‌باشند.

رابطه (۳)

$$[R_{Orbital}] = \left[R_3(\pi - \Omega) \times R_1\left(i - \frac{\pi}{2}\right) \times R_2\left(\frac{\pi}{2} - (\omega_P + f)\right) \right] \quad \text{رابطه (۵)}$$

از آنجاییکه طول بردار شعاعی موقعیت لحظه‌ای ماهواره نسبت به سیستم مختصات (GCS) مطابق با قوانین مکانیک سماوی از پارامترهای کپلری قابل تعیین می‌باشد [۱۳]، موقعیت لحظه‌ای مبداء سیستم مختصات ایده‌آل مداری ماهواره در سیستم (GCS) مطابق رابطه‌ی (۴) تعیین می‌شود [۹].

رابطه (۴)

$$[X_S, Y_S, Z_S]^T = [R_{Orbital}] \times [0, 0, r]^T$$

در رابطه‌ی (۴)، r طول بردار شعاعی ماهواره نسبت به مبداء سیستم (GCS) می‌باشد.

۲-۲- مدلسازی اغتشاشات وضعیتی سنجنده

بدیهی است که نیروهای خارجی موثر بر ماهواره موجب به وجود آمدن اغتشاشاتی در حرکت ماهواره شده که

۲-۳- مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده

به منظور بررسی امکان استفاده از مدل صلب (مدل (O.P.M) بدون ماتریس $[R_{Attitude}]$) در مدلسازی اغتشاشات در وضعیت ماهواره از دو مجموعه‌ی تصاویر استریو از سنجنده‌ی SPOT مربوط به دو شهر زنجان و اصفهان و یک مجموعه‌ی تصویر استریو از سنجنده‌ی Rapid Eye مربوط به شهر شیراز در ایران استفاده شد. جدول (۱) اطلاعات هندسی مربوط به مجموعه‌های داده و نقاط کنترلی موجود در هر مجموعه تصاویر را نشان می‌دهد. نقاط کنترلی در دو منطقه‌ی زنجان و اصفهان توسط دستگاه GPS دو فرکانسه و نقاط کنترلی در منطقه‌ی شیراز از روی نقشه‌ی شهری با مقیاس 1:2000 جمع‌آوری شده‌اند. از سوی دیگر نقاط کنترلی در فضای تصویر، در مجموعه‌ی تصاویر منطقه‌ی شهر زنجان با دقت تقریبی نیم پیکسل و دو مجموعه تصاویر دیگر با دقتی معادل یک پیکسل اندازه‌گیری شده‌اند.

چیدمان نقاط کنترلی در فضای تصاویر مربوط به هر مجموعه‌ی داده و نحوه‌ی پوشش تصاویر استریو در شکل (۱) نشان داده شده‌است.

تمامی تصاویر مورد استفاده در این تحقیق فاقد هرگونه تصحیح هندسی بوده و اطلاعات افمیز آنها در اختیار قرار داشت. در هر تصویر به کمک اطلاعات افمیز موجود، بعد از درونیابی زمانی لاگرانژ [۱] و [۹]، بر اساس زمان اخذ اطلاعات افمیز و زمان یک سطر مرجع از هر صحنه، بردار موقعیت و سرعت لحظه‌ای سنجنده برای سطر مذکور تخمین زده شد و نهایتاً بر اساس روابط موجود در مکانیک سماوی شش پارامتر کپلری $(a, e, i, \Omega_0, \omega_p, f_0)$ برای سطر مرجع

محاسبه گردید [۱۳].

تعداد و نوع ترم‌های مورد استفاده از چندجمله‌ای‌های موجود در ساختار ماتریس $[R_{Attitude}]$ متناسب با میزان اغتشاشات موجود در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر بوده که بر اساس میزان تاثیر در دقت برازش مدل در نقاط چک تعیین می‌گردد. بازه‌ی زمانی اندک اخذ یک صحنه‌ی تصویر احتمال وجود تغییرات زمانی فاحش و غیرخطی را در اغتشاشات منتفی می‌سازد و عمدتاً ساختارهای $(5-a$ و $b)$ قابلیت مدلسازی اغتشاشات وضعیتی را به نحو مطلوبی تامین می‌کنند. در ادامه به نقد ساختار مدل حل اغتشاش در استراتژی پارامترهای مداری پرداخته شده است. تعدد ماتریس‌های دورانی موجب بزرگی فضای جواب و همچنین نزدیکی مقادیر جواب به یکدیگر خواهند شد؛ اساساً موازی‌سازی دو سیستم مختصات سه بعدی حداکثر با سه دوران حول سه محور مختصات ممکن خواهد بود. در صورت دقیق نبودن مقادیر اولیه و یا عدم اعمال پارامترهای دوران کپلری به صورت شبه‌مشاهده، احتمال واگرا شدن و سرگردانی در فضای جواب افزایش می‌یابد که موجب تخمین اشتباه پارامترهای مدل می‌گردد. از سوی دیگر ضرب شدن ماتریس‌های دورانی موجب افزایش پیچیدگی خطی‌سازی معادله‌ی شرط هم‌خطی نسبت به پارامترهای مدل نیز خواهد شد.

در مواقعی که سطح مدلسازی اغتشاشات (درجه‌ی ترم‌های ماتریس دوران اضافی) بیشتر از اغتشاش واقعی سنجنده باشد با پدیده‌ی بیش پارامتری^۱ مواجه خواهیم بود که برای کاهش همبستگی پارامترهای دورانی، اضافه ساختن پارامترهای دوران اضافی به صورت شبه‌مشاهده و تعیین وزن مناسب برای آنها جهت جلوگیری از واگرایی و سرگردانی دستگاه معادلات امری ضروری می‌باشد.

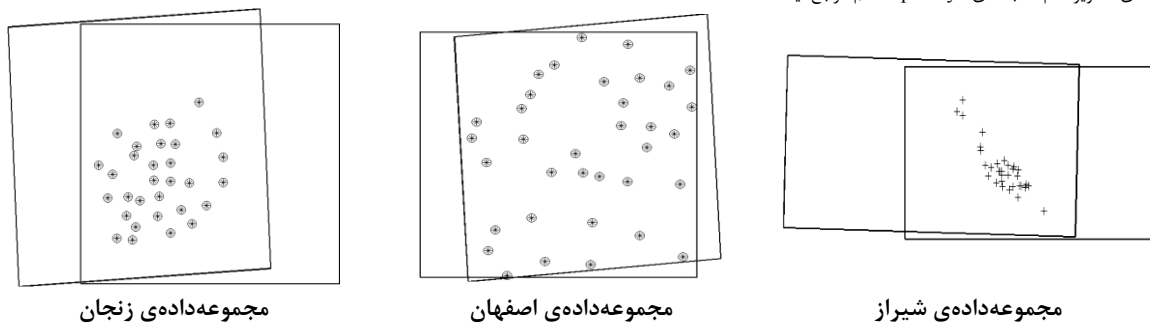
1 Over Parameterization

بررسی سطوح همبستگی بین پارامترهای مدل مداری...
 علیرضا صفدری نژاد، محمدجواد ولدان زوج، مهدی مختارزاده

جدول ۱: مجموعه‌ی داده‌ها و اطلاعات مربوط به هر کدام

زنجان		اصفهان		شیراز		مجموعه داده
SPOT-3		SPOT-1		Rapid Eye-2		سکو
HRV		HRV		Green-Band*		سنجنده
July 1993	July 1993	Aug 1987	Jun 1987	Mar 2010	Mar 2010	تاریخ اخذ
19.01 W	16.66 E	24.7 W	20.84 E	19.64 W	7.09 E	زاویه دید (درجه)
10m		10m		6.5m		قدرت تفکیک مکانی در نادر
0.737		0.974		0.534		نسبت باز به ارتفاع
31		35		34		تعداد نقاط کنترل

* باندهای تصاویر خام سنجنده‌ی Rapid Eye هم مرجع نیستند.



شکل ۱: توزیع نقاط کنترلی در هر مجموعه داده

با در نظر گرفتن ساختارهای مختلف مدلسازی اغتشاش (رابطه‌ی ۵)، در همگرایی دستگاه معادلات مورد بررسی قرار گرفت. برای این بررسی، با در نظر گرفتن ۸ تا ۲۰ نقطه‌ی کنترلی در هر مجموعه‌ی داده، حل دستگاه معادلات به‌منظور برآورد پارامترهای مدل صورت پذیرفت. بررسی‌های صورت گرفته نشان داد که ساختارهای (۵- b و c) عمدتاً به همگرایی در دستگاه معادلات منجر نشده و ساختار (۵- a) در موارد بیشتری به همگرایی می‌انجامد. با غربال نتایج همگرا شده از ساختار (۵- a) به ازای ترکیبات مختلف نقاط کنترلی، به بررسی میزان همبستگی میان پارامترهای ساختار (۵- a) پرداخته شد. با در نظر گرفتن ساختار (۵- a) به‌عنوان ساختار مدلسازی اغتشاش، دامنه‌ی تغییرات مربوط به پارامترهای برآورد شده در مدل مداری به ازای تغییر در تعداد نقاط کنترلی برای هر مجموعه‌ی داده در جدول (۲) نشان داده شده است.

۳- پیاده‌سازی و نتایج

۳-۱- بررسی وجود همبستگی میان پارامترهای مدل مداری

وجود همبستگی بین پارامترهای مدل مداری، امکان پوشش اثر یک یا چند پارامتر را توسط پارامترهای دیگر ممکن می‌سازد. این امر موجب بزرگی فضای جواب‌های ممکن و در نتیجه افزایش احتمال بروز واگرایی در حل دستگاه معادلات می‌گردد. افزودن پارامترهای مدل مداری به صورت شبه‌مشاهده به دستگاه معادلات و کنترل میزان تصحیح‌پذیری هر پارامتر به کمک مقادیر وزن، راهکار جلوگیری از واگرایی در شرایط وجود همبستگی بین پارامترها محسوب می‌شود. با توجه به معایب مطرح شده در مدل پارامترهای مداری، این بخش با هدف نمایان ساختن وجود همبستگی بین پارامترهای مدل مداری تدوین شده است. در این بررسی بدون اضافه کردن پارامترهای مدل مداری به صورت شبه‌مشاهده، توفیق این مدل

شایان ذکر است که نتایج همگرا شده در ساختار (a-5) دقت‌های مطلوب و نسبتاً یکسانی در سطح نتایج تقاطع فضایی برای نقاط چک تامین نمودند.

جدول ۲: دامنه‌ی تغییرات پارامترهای برآورد شده‌ی مدل مداری با ساختار اغتشاش (a-5) به ازای تعداد مختلف نقاط کنترل

Dataset	Parameter	<i>a</i>	<i>i</i>	<i>f</i> ₀	Ω_0	ω_0	ϕ_0	κ_0	<i>f</i> ₁	Ω_1
		(Km)	(Deg)	(Deg)	(Deg)	(Deg)	(Deg)	(Deg)	(Deg/Line)	(Deg/Line)
زنجان	تصویر اول	6.96	19.49	1.21	14.17	0.63	1.07	23.97	5.0E-06	4.6E-05
	تصویر دوم	5.79	17.99	0.65	12.62	0.86	1.01	21.94	2.6E-06	4.2E-05
اصفهان	تصویر اول	17.46	10.09	1.14	6.81	0.99	3.91	11.99	5.3E-06	2.3E-05
	تصویر دوم	8.75	8.81	0.87	5.64	0.82	3.02	10.51	2.0E-06	1.9E-05
شیراز	تصویر اول	12.62	28.97	0.90	16.50	3.58	11.36	33.38	9.9E-06	1.2E-04
	تصویر دوم	61.87	36.63	2.06	22.07	5.39	12.89	42.01	2.2E-05	1.6E-04

توسط پارامترهای مدل صلب مداری در سه گام، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت.

(۱): انتساب مقادیر تعمدی برای هر یک سه دوران $(\omega_0, \phi_0, \kappa_0)$ ، در بازه‌ی $[-3^\circ, 3^\circ]$ طی ۲۰۰ گام منظم، به‌عنوان مقادیر ثابت در ساختار مدل پارامترهای مداری و بررسی امکان پوشش دادن این خطای سیستماتیک در حل دستگاه معادلات توسط تنها شش پارامتر مدل صلب مداری $(a, i, \Omega_0, \Omega_1, f_0, f_1)$ ، اولین بخش از این بررسی را به خود اختصاص داد. انتظار می‌رود که این روند، امکان مدل‌سازی اغتشاشات موجود در وضعیت سنجنده به کمک پتانسیل پارامترهای مداری را مشخص نموده؛ که در صورت این امر، میزان همبستگی میان پارامترهای مداری و دوران‌های اضافی اثبات می‌شود.

داده‌ی مورد استفاده در این سناریو، تصاویر استریوی منطقه‌ی زنجان با ۱۰ نقطه‌ی کنترلی می‌باشد. از علل انتخاب این مجموعه‌ی داده می‌توان به دقت اندازه‌گیری بالاتر در فضای تصویر، یکنواختی نسبتاً مناسب توزیع نقاط کنترلی در پوشش مشترک دو تصویر و توزیع ارتفاعی مناسب‌تر نقاط کنترل زمینی در این مجموعه‌ی داده نسبت به سایر مناطق مورد مطالعه، اشاره نمود.

در هر یک از گام‌های مربوط به تحمیل مقادیر تعمدی برای پارامترهای ω_0 ، ϕ_0 و κ_0 ، بعد از حل دستگاه معادلات، اختلاف پارامترهای محاسبه‌شده برای

همانگونه که در جدول فوق دیده می‌شود، تنها با تغییر تعداد نقاط کنترل، دامنه‌ی تغییرات قابل توجهی در تخمین پارامترهای مدل حاصل گردید که این امر گویای گستردگی فضای جواب برای دستگاه معادلات می‌باشد. از طرفی دقت مناسب مدل مداری در ارزیابی نقاط چک، حاکی از توان پوشش پارامترهای این ساختار (a-5) در مدل‌سازی اثرات یکدیگر می‌باشد. با توجه به وابستگی قابل توجه بین پارامترهای مدل و با هدف کاهش پارامترهای موجود در ساختار مدل‌سازی، در ادامه میزان توان مدل مداری صلب در پوشش اثر اغتشاشات وضعیتی مورد بررسی قرار گرفته است. به نظر می‌رسد که مدل مداری صلب قادر به پوشش اثر سطح محدودی از اغتشاشات مداری بوده که در ادامه در چندین گام تحلیلی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

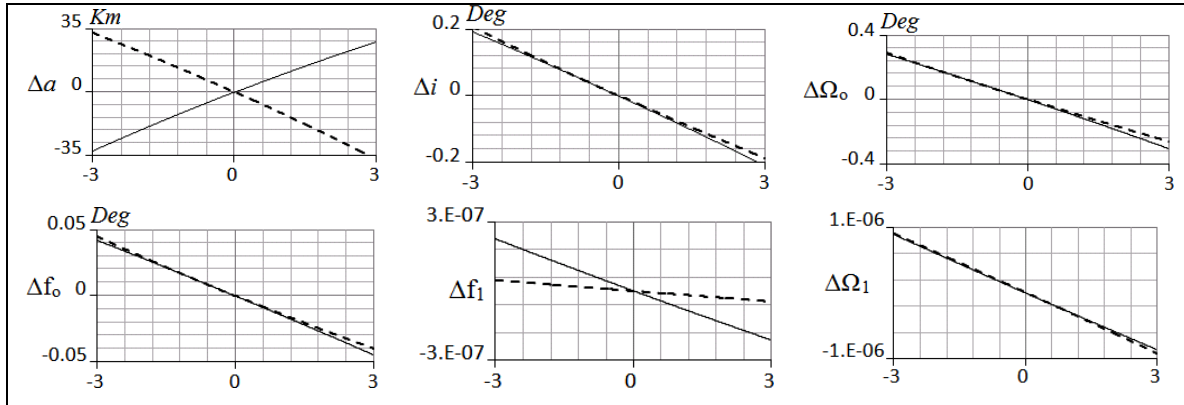
۳-۲- بررسی قابلیت پوشش اثر اغتشاشات وضعیتی توسط مدل صلب مداری

بررسی توان پارامترهای مدل صلب مداری در مدل‌سازی اغتشاشات وضعیتی سنجنده در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر، هدف این بخش از مقاله می‌باشد. از آنجایی‌که بازه‌ی زمانی اخذ یک صحنه در سکوه‌های ماهواره‌ای اندک است، فرض ثبات وضعیت سنجنده نسبت به سیستم‌مختصات ایده‌آل مداری (ORF) در بازه‌ی زمانی اخذ صحنه، صحیح به نظر می‌رسد. با این فرض در ادامه، امکان پوشش اثر اغتشاش وضعیتی سنجنده

بررسی سطوح همبستگی بین پارامترهای مدل مداری...
 علیرضا صفدری نژاد، محمدجواد ولدان زوج، مهدی مختارزاده

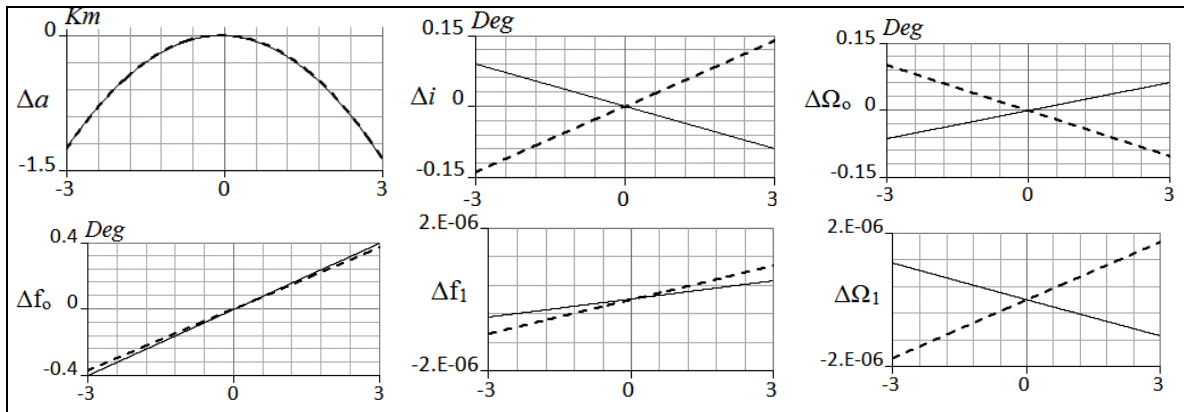
پارامترهای ω_0 ، φ_0 و K_0 نسبت به نتایج مدل صلب مداری که در آن $\omega_0 = \varphi_0 = K_0 = 0$ لحاظ شده است، نشان می‌دهد.

شش پارامتر a ، i ، Ω_0 ، Ω_1 ، f_0 و f_1 نسبت به حالتی که سه پارامتر ω_0 ، φ_0 و K_0 صفر در نظر گرفته شده‌اند، تعیین گردید. شکل‌های ۲، ۳ و ۴، اختلاف مقادیر برآورد شده برای ۶ پارامتر مداری را برای هر یک



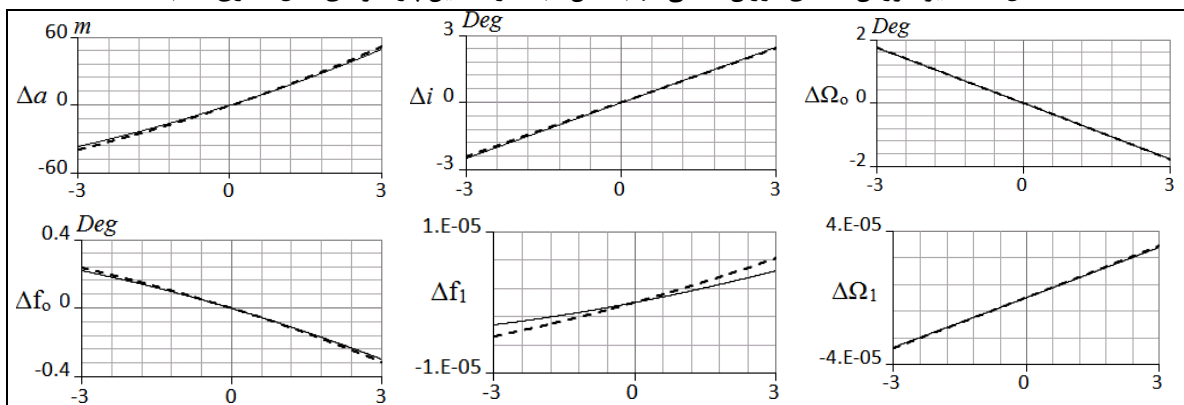
تصویر اول با زاویه دید به سمت شرق — تصویر دوم با زاویه دید به سمت غرب - - - -

شکل ۲: تاثیر افزودن تعددی دوران اضافی ω_0 با نقش ثابت در تخمین پارامترهای مدل مداری صلب



تصویر اول با زاویه دید به سمت شرق — تصویر دوم با زاویه دید به سمت غرب - - - -

شکل ۳: تاثیر افزودن تعددی دوران اضافی φ_0 با نقش ثابت در تخمین پارامترهای مدل مداری صلب



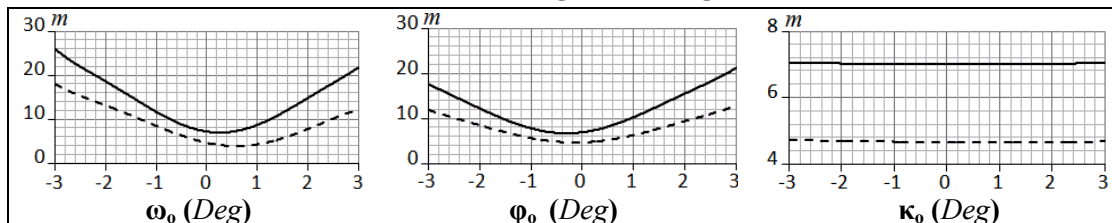
تصویر اول با زاویه دید به سمت شرق — تصویر دوم با زاویه دید به سمت غرب - - - -

شکل ۴: تاثیر افزودن تعددی دوران اضافی K_0 با نقش ثابت در تخمین پارامترهای مدل مداری صلب

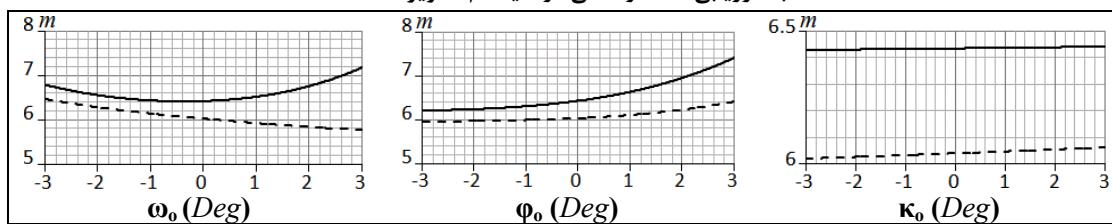
سنسور بوده و برخی دیگر مستقل از این عامل رفتار می کنند. در ادامه میزان واقعی همبستگی، در تاثیری که این سناریو بر دقت برازش مدل در نقاط کنترلی و چک ایجاد می کند، مورد ارزیابی قرار گرفته است. به عبارت دیگر، در صورت استقلال دقت برازش مدل از اثر حضور تعدمی هر یک از پارامترهای دورانی مطرح در این سناریو ($\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$)، می توان ادعا نمود که ۶ پارامتر مدل مداری صلب ($\alpha, i, \Omega_0, \Omega_1, f_0, f_1$)، اثر آن پارامتر را به طور کامل پوشش می دهند. نمودارهای موجود در شکل (۵)، تغییرات RMSE مسطحاتی و ارتفاعی برای نتایج تقاطع فضایی را برای هر یک از موارد بررسی دوران های $\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$ نشان می دهد.

محور افق نمودارهای موجود در اشکال (۲، ۳ و ۴)، مبین مقادیر انتخاب شده برای هر یک از سه دوران ($\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$) بوده که به صورت مقادیر ثابت در ساختار مدل صلب مداری لحاظ شده اند؛ و موقعیت در محور عمود نمودارهای مورد بحث، میزان اختلاف برآورد هر یک از پارامترهای مدل صلب با حضور تعدمی پارامترهای دورانی ($\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$) را با مدلی که هر یک از سه دوران $\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$ در آن، مقادیر صفر لحاظ شده اند، نمایش می دهد. شایان ذکر است که نمودارهای مربوط به مجموعه داده های اصفهان و شیراز نیز، ثبات رفتاری نمودارها را تایید نمودند. تمامی نمودارهای موجود در شکل های (۲، ۳ و ۴) گویای وجود ارتباط سیستماتیک میان پارامترهای مداری و دوران های مستقل از زمان در ساختار ماتریس $[R_{Attitud}]$ می باشند. برخی از اثرات وابسته به جهت گیری سنجنده توسط زوایای دید

الف: ارزیابی دقت مسطحاتی در سیستم تصویر UTM



ب: ارزیابی دقت ارتفاعی در سیستم تصویر UTM



— — — — — نقاط کنترلی RMSE ————— نقاط چک RMSE

شکل ۵: ارزیابی دقت در نتایج تقاطع فضایی در شرایط انتخاب گام های تعدمی دوران های اضافی ($\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$)

تفاوت تاثیرگذاری حضور تعدمی هر یک از پارامترهای $\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$ به شکل یک خطای سیستماتیک، بر روی نتایج RMSE ها کاملاً واضح می باشد. این اثر بر نتایج دقت مسطحاتی، دارای اختلافات فاحش تری در دو پارامتر ω_0 و φ_0

محور افق در نمودارهای موجود در شکل (۵) دارای تعبیری مشابه با نمودارهای (۲، ۳ و ۴) بوده و محور عمود در نمودارهای این شکل، RMSE در نقاط کنترل و چک را در واحد متر نشان می دهد. همانطور که از نمودارهای شکل (۵) مشاهده می شود،

برای هر یک از ۹ پارامتر موجود در ساختار ماتریس $[R_{Attitude}]$ ، طی ۲۰۰ گام تعمدی در بازه‌ی $[-3^\circ, 3^\circ]$ ، مقیاس‌های ثابتی به صورت خطای سیستماتیک در مدل مداری تحمیل شد. در انتخاب مقادیر تعمدی برای پارامترهای وابسته به زمان مثل ω_1 ، این مقادیر به نحوی تعیین شدند که در بازه‌ی زمانی ابتدا تا انتهای صحنه‌ی تصویر زاویه‌ای به اندازه‌ی مقدار تحمیل شده در هر گام را جاروب کنند. نتایج این بررسی در جدول (۳) گزارش شده‌است. در این جدول، بیشترین و کمترین دقت حاصل شده در نقاط چک با تفکیک مولفه‌ی مسطحاتی و ارتفاعی، به ازای انتخاب گام‌های تعمدی هر ترم از ساختار ماتریس $[R_{Attitude}]$ ارائه شده است.

می‌باشند. از این روی به نظر می‌رسد که مدل صلب مداری در میزان پوشش هر یک از پارامترهای $\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$ ، دارای ظرفیت یکسان نبوده و بسته به نوع پارامتر، رفتار متفاوتی خواهد داشت. نکته‌ی قابل توجه، پوشش کامل اثر κ_0 توسط پارامترهای مدل صلب مداری بوده که مبین همبستگی بالای این پارامتر با پارامترهای مداری می‌باشد.

(۲) گام دوم در این بخش، تعیین حدود آستانه مناسب برای هر یک از پارامترهای موجود در ساختار ماتریس $[R_{Attitude}]$ به طور مستقل بوده، به طوری که مدل پارامترهای مداری صلب قادر به پوشش اثر آنها باشد و فقدان پارامترهای مورد بحث به عنوان پارامتر مجهول در فرآیند مدلسازی، موجب کاهش فاحش دقت در برازش مدل نگردد. برای این منظور با در نظر گرفتن تعداد ۱۰ نقطه‌ی کنترلی در هر یک از مجموعه داده‌های موجود،

جدول ۳: بیشترین و کمترین دقت بدست آمده در نقاط چک به ازای حضور تعمدی ساختارهای ماتریس $R_{Attitude}$ با نقش ثابت در حل دستگاه معادلات

مجموعه‌ی داده‌ها		پارامترهای ماتریس $R_{Attitude}$								
		ω_0	ω_1	ω_2	φ_0	φ_1	φ_2	κ_0	κ_1	κ_2
مجموعه‌ی داده‌ی زنجان	Max Rmse (m)	25.6	7.81	233.12	21.08	7.16	209.29	7.04	22.05	10.19
	Min Rmse (m)	6.74	6.98	6.80	6.73	6.99	7.00	7.01	6.65	6.50
Orthometric	Max Rmse (m)	7.18	45.76	35.53	7.41	7.17	20.87	6.44	7.16	6.45
	Min Rmse (m)	6.43	6.41	6.36	6.21	6.43	6.42	6.42	6.41	6.38
مجموعه‌ی داده‌ی اصفهان		ω_0	ω_1	ω_2	φ_0	φ_1	φ_2	κ_0	κ_1	κ_2
Planimetric	Max Rmse (m)	28.43	17.35	873.82	13.97	12.23	725.80	12.54	86.13	47.01
	Min Rmse (m)	12.18	12.17	12.06	12.09	12.11	12.01	12.14	12.17	11.81
Orthometric	Max Rmse (m)	7.59	189.19	169.69	6.66	7.47	65.34	6.56	13.30	7.33
	Min Rmse (m)	6.48	6.57	6.56	6.47	6.53	6.23	6.52	6.53	6.11
مجموعه‌ی داده‌ی شیراز		ω_0	ω_1	ω_2	φ_0	φ_1	φ_2	κ_0	κ_1	κ_2
Planimetric	Max Rmse (m)	8.78	7.76	26.96	8.08	7.62	26.16	7.64	11.33	8.26
	Min Rmse (m)	7.55	7.44	7.53	7.38	7.52	7.35	7.51	7.4	7.31
Orthometric	Max Rmse (m)	4.86	16.89	6.11	4.82	4.81	5.40	4.82	5.13	4.85
	Min Rmse (m)	4.62	4.17	4.23	4.81	4.66	4.38	4.81	4.78	4.79

اثر حذف نشده هر کدام از پارامترهای نه گانه‌ی مورد بحث از ماتریس $[R_{Attitude}]$ که به صورت مقادیر تعمدی و ثابت در مدل مداری حضور دارند، دارای شدت‌های متفاوت بوده و نحوه‌ی تاثیرگذاری آنها بر مولفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی متفاوت می‌باشند.

در ادامه، با شناسایی مولفه‌ای که بیشترین تاثیرگذاری هر پارامتر به آن اختصاص دارد (مسطحاتی یا ارتفاعی)، بازه‌ی زاویه‌ای که موجب افزایش کمتر از یک متر در کمینه‌ی RMSE آن مولفه ایجاد می‌کند، شناسایی شد. مجموعه‌ی داده‌ی اصفهان به دلیل توزیع مکانی بالاتر نقاط کنترلی در سطح صحنه‌های تصاویر استریو و همچنین دامنه‌ی بزرگ تغییرات دقتی که در نقاط چک به ازای گام‌های تعمدی پارامترهای ماتریس $[R_{Attitude}]$ ایجاد نمود (جدول ۳)، برای بررسی در این قسمت انتخاب شد. به عبارت دیگر بعد از شناسایی مولفه‌ای (مسطحاتی یا ارتفاعی) که تغییرات هر پارامتر از ساختار ماتریس $[R_{Attitude}]$ بیشترین اثر را در آن می‌گذارد، بازه‌ی زاویه‌ای از ۲۰۰ گام موجود جدا شده، به نحوی که افزایش کمتر از یک متر نسبت به کمینه‌ی دقت حاصل شده از آن پارامتر در دقت نقاط چک حاصل شود. جدول (۴) بازه‌های زاویه‌ای تعیین شده را برای هر یک از پارامترهای ماتریس $[R_{Attitude}]$ نشان می‌دهد.

همانطور که در جدول (۳) مشاهده می‌شود، رفتار مشابه تغییر در مقادیر دقت مدل هنگام حضور تعمدی هر یک از پارامترها در سه مجموعه داده، گویای مستقل بودن همبستگی پارامترهای مداری و دوران‌های اضافی از ماهیست داده‌ی مورد استفاده می‌باشد. از سوی دیگر، نتایج این جدول نشان داد که تاثیر هر یک از پارامترهای ۹ گانه، در کدام یک از مولفه‌های دقت (مسطحاتی یا ارتفاعی) تاثیر بیشتری می‌گذارد. به عنوان نمونه، پارامترهای ω_2 و φ_2 تاثیرگذاری بیشتری در مولفه‌ی مسطحاتی داشته و پارامتر ω_1 در دقت ارتفاعی تاثیرگذاری بیشتری دارد. به نظر می‌رسد، تفاوت‌های قابل مشاهده در دامنه‌ی تغییرات مربوط به RMSE برای پارامترهای وابسته به زمان در ساختار ماتریس $[R_{Attitude}]$ ، وابسته به گسترش توزیع نقاط کنترلی در سطح هر یک از تصاویر استریو باشد. به عبارت دیگر، تمرکز نقاط کنترلی در محدوده‌ی کوچک از سطوح صحنه (مولفه‌ی در راستای حرکت سنجنده)، موجب در نظر گرفته شدن دامنه‌ی کوچکتری از اثرگذاری پارامترهای وابسته به زمان می‌شود. بدین معنی که، مقدار جاروب زاویه‌ای ترم‌های وابسته برای کل صحنه، معادل گام تعمدی آن بوده و در صورت عدم پوشش نقاط کنترلی در کل صحنه، دامنه‌ی کمتری از آن لحاظ می‌شود.

مطابق با نتایج موجود در جدول (۳)، از بین پارامترهای ماتریس $[R_{Attitude}]$ ، دو پارامتر κ_0 و φ_1 بیشترین قابلیت پوشش را توسط پارامترهای مداری را به خود اختصاص می‌دهند. از طرف دیگر،

جدول ۴: دامنه‌ی زاویه‌ای پارامترهای ماتریس $R_{Attitude}$ که بدون تاثیر فاحش در دقت، اثر آن توسط مدل مداری صلب

قابل پوشش می‌باشد

ω_0	ω_1	ω_2	φ_0	φ_1	φ_2	κ_0	κ_1	κ_2
$-0.53^\circ \sim 0.65^\circ$	$-0.05^\circ \sim 0.05^\circ$	$-0.01^\circ \sim 0.01^\circ$	$-1.91^\circ \sim 3^\circ$	$-3^\circ \sim 3^\circ$	$-0.01^\circ \sim 0.01^\circ$	$-3^\circ \sim 3^\circ$	$-0.2^\circ \sim 0.14^\circ$	$-0.14^\circ \sim 0.56^\circ$

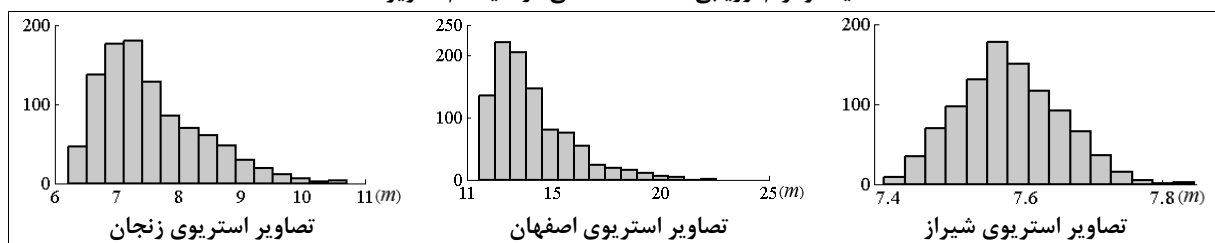
جدول (۴) اثراتی قابل پوشش توسط پارامترهای مدل مداری صلب دارد. از آنجاییکه در تمامی بازه‌های

انتخاب مقادیر تصادفی برای پارامترهای ۹ گانه‌ی ماتریس $[R_{Attitude}]$ در بازه‌های تعیین شده در

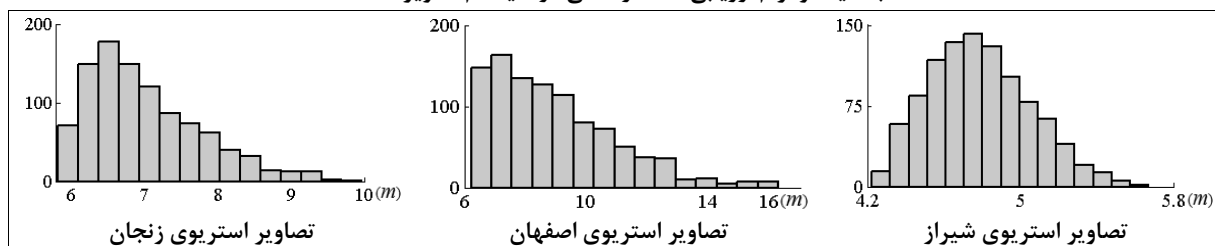
پارامترهای موجود در ماتریس $[R_{Attitude}]$ مورد بررسی قرار گرفت. در گام سوم از این سناریو، با تولید ۱۰۰۰ ساختار اتفاقی از ۹ پارامتر موجود در ماتریس $[R_{Attitude}]$ که دامنه‌ی تغییرات هر یک از پارامترها، بزرگترین دامنه‌ی متقارن ممکن از جدول (۴) بود، فرآیند بررسی مدل مداری صلب مورد آزمون قرار گرفت. هیستوگرام RMSE های مربوط به هر دو مولفه‌ی مسطحاتی و ارتفاعی در سیستم UTM برای هر یک از سه مجموعه‌ی داده، در شکل (۶) نشان داده شده‌است.

فوق می‌توان مقدار صفر را اختیار نمود، بنابراین مدل صلب مداری قادر به تامین دقت‌هایی قابل قبول در حدود ۰/۱ پیکسل از کمینه‌ی RMSE می‌باشد. (۳): با توجه به اینکه تمام بررسی‌های صورت پذیرفته در این سناریو تنها با حضور تعمدی یک پارامتر از ۹ پارامتر ماتریس $[R_{Attitude}]$ انجام شده و از دیگر سوی، احتمال این امر که اغتشاشات واقعی سنجنده توسط یک پارامتر قابل تشریح باشد، اندک است؛ در ادامه، و در گام سوم، قابلیت مدل مداری صلب در پوشش اثر حضور تعمدی همه‌ی

الف: هیستوگرام ارزیابی دقت مسطحاتی در سیستم تصویر UTM



ب: هیستوگرام ارزیابی دقت ارتفاعی در سیستم تصویر UTM



شکل ۶: هیستوگرام مربوط به دقت تقاطع فضایی در مدل مداری با حضور تعمدی مقادیر پارامترهای ماتریس $R_{Attitude}$ با نقش ثابت در بازه‌های مشخص

در نقاط چک، دقت قابل قبولی تامین گردد.

۳-۳- بررسی حساسیت تخمین پارامترهای مدل صلب به تعداد نقاط کنترلی

با توجه به اثبات وجود همبستگی میان پارامترهای مدل مداری هنگام حضور پارامترهای مدلسازی اغتشاش (بخش ۳-۱)، در بخش (۳-۲) بازه‌ی مشخصی از هر پارامتر ماتریس $[R_{Attitude}]$ که توسط پتانسیل پارامترهای مدل مداری صلب قابلیت پوشش داشت، شناسایی گردید. هدف این بخش از مقاله، ارزیابی دامنه‌ی تغییرات در تخمین پارامترهای مدل صلب

رفتار هیستوگرام‌های موجود در شکل (۶) گویای تمرکز مطلوب دقت در نقاط چک، علی‌رغم حضور تعمدی ساختارهای دوران اضافی به صورت خطای سیستماتیک در مدل (O.P.M) و حل دستگاه معادلات تنها با مجهول در نظر گرفتن تنها شش پارامتر مداری می‌باشد.

نتایج این سناریو حاکی از همبستگی نسبی میان پارامترهای مداری و پارامترهای موجود در ماتریس $[R_{Attitude}]$ بوده که می‌توان بازه‌های محدودی از اغتشاشات وضعیتی را به کمک مدل صلب پوشش داد به نحوی که بدون تاثیر فاحش در سطح دقت برازش

فضای جواب‌های ممکن برای دستگاه معادلات و همچنین حساسیت تخمین پارامترهای مدل به تعداد و توزیع نقاط کنترلی مانند رفتار ساختار (۵- a) در جدول (۲)، احتمال وجود همبستگی بین پارامترهای مدل صلب قوت می‌گیرد. جدول (۶) دامنه‌ی تغییرات پارامترهای تخمین زده شده در مدل صلب را به ازای ۳ تا ۲۰ نقطه‌ی کنترلی در هر مجموعه‌ی داده نشان می‌دهد.

به‌ازای تعداد مختلف نقاط کنترلی می‌باشد. در این بررسی، ماتریس $[R_{Attitude}]$ از ساختار مدل مداری حذف شده و تنها ۶ پارامتر $a, i, \Omega_0, \Omega_1, f_0$ و f_1 به عنوان پارامترهای مجهول در نظر گرفته شده‌اند. استدلال انجام این کار را می‌توان بررسی همبستگی پارامترهای مدل صلب مداری و میزان اثر پذیری تخمین پارامترهای مدل از تعداد و توزیع نقاط کنترلی قلمداد کرد. در صورت بزرگی

جدول ۶: دامنه‌ی تغییرات تخمین پارامترهای مدل مداری صلب به ازای تعداد مختلف نقاط کنترلی

Parameters	Datasets	a	I	f_0	Ω_0	f_1	Ω_1
		(m)	(Deg)	(Deg)	(Deg)	(Deg/Line)	(Deg/Line)
تصویر اول	زنجان	181.55	0.01	2.3E-03	1.0E-02	4.2E-08	3.2E-08
		تصویر دوم	356.71	0.03	1.7E-03	2.0E-02	3.0E-08
تصویر اول	اصفهان	384.05	0.01	1.1E-03	4.6E-03	2.0E-08	5.0E-08
		تصویر دوم	323.36	0.02	8.5E-04	1.3E-02	3.2E-08
تصویر اول	شیراز	815.66	0.09	5.8E-03	5.1E-02	3.9E-07	4.9E-07
		تصویر دوم	724.12	0.10	1.3E-02	6.0E-02	4.5E-07

دستگاه معادلات افزوده نشده است. ارزیابی دقت نتایج تقاطع فضایی در این بررسی به ازای تعداد نقاط کنترلی مختلف، گویای تامین دقت‌های مطلوب از مدل مداری صلب می‌باشد. نتایج دقت مدل مداری صلب در تقاطع فضایی نقاط چک به ازای تعداد مختلفی از نقاط کنترلی برای هر مجموعه‌ی داده در جدول (۷) گزارش شده است.

نتایج جدول (۶) دامنه‌ی تغییرات اندکی را در مقایسه با استفاده از ساختار (۵- a) در جدول (۲) نشان می‌دهد. وجود این دامنه‌ی اندک حساسیت نتایج تخمین پارامترهای مدل صلب به تعداد و توزیع نقاط کنترلی را منتفی می‌سازد. شایان ذکر است که در این بخش مشابه با بخش (۳-۱)، هیچ یک از پارامترهای مدل به صورت شبه‌مشاهده به

جدول ۷: دقت نتایج تقاطع فضایی در نقاط چک برای مدل مداری صلب به ازای تعداد مختلف نقاط کنترلی

RMSE (m)		GCPs		مجموعه‌ی داده
Orthometric	Planimetric	Check	Control	
7.09	6.88	28	3	زنجان
7.20	6.68	25	6	
6.43	7.01	21	10	
5.38	6.13	15	16	
4.92	5.95	11	20	
7.64	10.57	31	4	اصفهان
7.13	10.54	29	6	
6.12	10.35	23	12	
6.65	9.59	18	17	
5.89	10.98	15	20	
5.09	8.10	30	4	شیراز
4.96	8.15	28	6	
4.79	7.36	22	12	
4.75	7.40	17	17	
5.22	7.59	14	20	

میان پارامترهای مداری و پارامترهای موجود در ساختار ماتریس دوران اضافی مورد بررسی قرار گرفت. در این بررسی، مدل مداری صلب گنجایش‌های متفاوتی در مدلسازی ساختارهای اغتشاشی مختلف از خود نشان داد و دو پارامتر ϕ_1 و κ_0 از جمله پارامترهایی بودند که بیشترین سطح پوشش اثرات آنها توسط مدل مداری صلب ممکن می‌باشد.

عدم کنترل مدل صلب مداری توسط شبه‌مشاهدات امکان تامین پوشش اغتشاشات اندک در مدل مداری را تامین کرده و می‌تواند به‌عنوان یک مدل کامل ارتباطی مورد استفاده قرار گیرد. این نتیجه نیز با تولید جوامع آماری از حضور سیستماتیک اغتشاشات در ماتریس $[R_{Attitud}]$ و بررسی می‌تواند میزان توفیق مدل مداری در پوشش اثر اغتشاشات مذکور مورد ارزیابی قرار گرفت.

در آخر به نظر می‌رسد که نتایج استفاده از مدل صلب مداری در مورد صحنه‌هایی از تصاویر ماهواره‌ای صادق بوده که بازه‌ی زمانی اخذ تصویر در آنها اندک باشد و نتوان از مدل مذکور در مدلسازی یک نوار طولانی که بازه‌ی زیاد زمانی صرف اخذ آن شده باشد، استفاده نمود؛ علت این امر را می‌توان در گسترش دامنه‌ی اثر پارامترهای اغتشاشی دانست به‌نحوی که مدل صلب توان پوشش اثر آنها را نخواهد داشت. در این شرایط ساختارهای مدلسازی اغتشاش مفهومی مستقل از پارامترهای مدل صلب پیدا کرده و انتظار می‌رود از سطح همبستگی بین پارامترهای نی‌ز کاسته شود. بررسی مدل پارامترهای مداری بدون لحاظ کردن ساختارهای مدلسازی اغتشاش در چنین شرایطی می‌تواند به‌عنوان افق تحقیقاتی پیش رو مطرح گردد.

با توجه به تامین دقت مطلوب در نتایج تقاطع فضایی نقاط چک (جدول ۷) و همچنین عدم حساسیت نتایج تخمین پارامترهای مدل به ازای تغییر تعداد نقاط کنترلی، انتخاب مدل مداری صلب را به‌عنوان یک مدل کامل ارتباطی برای تصاویر با هندسه‌ی تصویربرداری خطی در سکوه‌های ماهواره‌ای تأیید می‌کند. این مدل با همبستگی پایین در پارامترهای خود، تنها با شش پارامتر مجهول شرایط حرکتی و وضعیتی سنجنده را به نحو مطلوبی مدلسازی کرده و پتانسیل تامین دقت‌های مطلوب را برخوردار می‌باشد.

۴- بحث و نتیجه‌گیری

این مقاله با هدف بررسی و تعیین سطح همبستگی بین پارامترهای مدل مداری تدوین گردید. ضرورت این بررسی را می‌توان در شناسایی پارامترهایی دانست که اثر آنها توسط سایر پارامترها در ساختار مدلسازی قابل پوشش می‌باشد. این امر با کاهش پارامترهای لازم در مدلسازی از مشکلاتی مانند بزرگی فضای جواب و احتمال واگرایی دستگاه معادلات جلوگیری می‌کند.

روند بررسی ابتدا با هدف اثبات همبستگی بین پارامترهای مدل آغاز شد. نتایج نشان داد که عدم کنترل پارامترهای مدل مداری در هنگام حضور سطوح مختلف از مدلسازی اغتشاشات وضعیتی به‌وسیله‌ی وزن شبه‌مشاهدات موجب واگرایی و یا بزرگی فضای جواب می‌شود. فضای جواب گسترده توام با دقت برازش مناسب در نقاط چک، مبین حضور پارامترهایی در مدل بوده که اثرات آنها توسط سایر پارامترها قابل جبران می‌باشد. حضور چنین پارامترهایی صرفاً موجب افزایش همبستگی و نیاز به نقاط کنترلی بیشتر خواهد بود.

نتایج نشان داد که می‌توان سطوح محدودی از اغتشاشات وضعیتی سنجنده را توسط مدل مداری صلب پوشش داد و نهایتاً ارتباط سیستماتیک

مراجع

- [1] Safdarinezhad, A. R., "Using Additional Parametres in Orbital Parameters Model for Improvement of Precision in Geometric Correction of Satellite Images," Msc Thesis, K. N. Toosi University of Technology, 2012.
- [2] Toutin, T., "Review Article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods", International Journal of Remote Sensing, Vol. 25, pp. 1893-1924, 2004.
- [3] Tao, C.V. and Hu, Y., "A comprehensive study of the rational function model photogrammetric processing.", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 67, pp. 1347-1357, 2001.
- [4] Westin, T. 2, "Precision rectification of SPOT imagery," Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 56, pp. 247-253, 1990.
- [5] Kim, T. and Dowman, I., "Comparsion of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude Model.", Photogrammetric Record, Vol. 21, pp. 110-123, 2006.
- [6] Konecny, G., Lohmann, P., Engel, H., Kruck, E., "Evaluation of SPOT imagery on analytical photogrammetric instruments.", Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 53 (9), pp. 1223-1230, 1987.
- [7] Riazanoff, S., Gleyzes, J.P., Zobler, D., *SPOT Satellite Geometry Handbook*, GAEL Consultant, SPOT 123-4-5, 2004.
- [8] Gugan, D., "Practical aspects of topographic mapping from SPOT imagery," Photogrammetric Record, Vol. 12, pp. 349-355, 1986.
- [9] Safdarinezhad, A. and Valadan Zoej, M. J., "An optimized orbital parameters model for geometric correction of space images," Advances in Space Research, vol. 55, no. 5, pp. 1328-1338, 2015. DOI: [10.1016/j.asr.2014.12.018](https://doi.org/10.1016/j.asr.2014.12.018).
- [10] Radhadevi, P.V., "Pass processing of IRS-1C/1D PAN subscene blocks," *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, pp. 289-297, 1999.
- [11] Salamonowicz, P.H., "Satellite orientation and position for geometric correction of scanner imagery," Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, pp. 491-499, 1986.
- [12] Valadan Zoej, M.J., Sadeghian, S., "Orbital parameter modeling accuracy testing of Ikonos Geo image," *Photogramm. J. Finland*, Vol. 18, pp. 70-80, 2003.
- [13] Seeber, G., *Satellite Geodesy*. 2nd Edition. New York : DeGruyter, 2003.
- [14] Wertz, J.R., *Spacecraft Attitude Determination and Control*. Dordrecht : Reidel, 1978.



Investigation level of correlation between orbital parameters model for geometric correction of satellite imagery

Alireza Safdari Nezhad^{1*}, Mohammad Javad Valadan Zoej², Mehdi Mokhtarzade³

¹ Phd student of remote sensing in Department of Geomatics, KN.Toosi University of technology

² Associate professor in Department of Geomatics, KN.Toosi University of technology

³ Associate professor in Department of Geomatics, KN.Toosi University of technology

Abstract

Orbital parameters model is one of the fully constrained physical models for geometrical correction of satellite imagery. The model has been developed to cover the physical conditions prevailing in the acquisition period of satellite platforms. The multiplicity of parameters in the modeling and correlation between them causes difficulties in solving the system of equations. Generally, problems are greatly reduced by adding the model parameters in the form of quasi observations and controlling trend of corrections by the values of each parameter's weights. However, it is difficult to determine the correct values of quasi observations' weight due to the approximate precision of auxiliary data. Furthermore wrong weights of quasi observations impose additional parameters in the model structure. In this article, by providing some scenarios, the level of correlations between orbital model parameters and also the capability of rigid orbital model in the covering effect of perturbations are evaluated. The obtained results proved that unconsidered perturbations, occurring in a specified domain, are coverable by other correlated parameters of rigid orbital parameters model. This ability of the rigid orbital parameters model is more evident when quasi observations are not applied in the model.

Key words: Orbital Parameters Model, Correlation, Space Intersection, Colinearity Equation, Keplerian Parameters, Satellite Imagery.

Correspondence Address: Alireza Safdari Nezhad: Remote Sensing Group, Department of Geomatics, K.N. Toosi Universty of technology, Tehran, Iran.

Tel: +98 9123258852 . Email: Safdari_Nezhad@sina.kntu.ac.ir.