



بسمه تعالی

پژوهشگران گرامی:

علیرضا صندری تران، محمد جواد ولدان نوج، مهدی محمدزاده

بدین وسیله از حضور ارزنده شما و ارائه مقاله علمی تحت عنوان ارزیابی پتانسیل چندجدای نامی دو بعدی در
مدلسازی اثرات تعیین نادقیق پارامترهای مداری در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره ای با هندسه خطی به صورت
شغای در دسترس همایش ملی نقشه و اطلاعات مکانی (ژئوماتیک ۹۲) شکر و قدردانی می‌گردد.
از درگاه خداوند سبحان سلامتی، سعادت و توفیق روز افزون بر ایقان آرزو نمیدیم.

فاطمه و اعظمی

معاون فنی سازمان نقشه برداری کشور

دوید کمالی

ارزیابی پتانسیل چندجمله‌ای‌های دوبعدی در مدلسازی اثرات تعیین نادقیق پارامترهای مداری در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با هندسه خطی

علیرضا صفدری نژاد¹، محمدجواد ولدان زوج²، مهدی مختارزاده³

1. دانشجوی دکترای مهندسی نقشه‌برداری، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
Safdari_nezhad@sina.kntu.ac.ir
2. دانشیار، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
valadanzouj@kntu.ac.ir
3. استادیار، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
m_mokhtarzade@kntu.ac.ir

چکیده

مدل پارامترهای مداری (OPM^1) به عنوان یکی از مقیدترین مدل‌های موجود در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، توان بالایی را در مدلسازی شرایط فیزیکی و هندسی حاکم بر بازه‌ی زمانی اخذ تصویر در سکوه‌های ماهواره‌ای برخوردار می‌باشد. پارامترهای این مدل از دو طریق: 1- اندازه‌گیری پارامترهای مداری از طریق سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ها و 2- از طریق نقاط کنترل زمینی و حل دستگاه معادلات غیرخطی قابل برآورد می‌باشد. با توجه به مشکلات حل دستگاه معادلات غیرخطی، در این تحقیق امکان تصحیح اثرات تعیین نادقیق پارامترهای OPM در فضای تصویر مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. ایده‌ی اصلی اینکار، استفاده از پارامترهای تقریبی مداری در مدل OPM و بهبود دقت این مدل بکمک پارامترهای اضافی در فضای تصویر می‌باشد. نتایج نشان داد که چندجمله‌ای‌های دوبعدی از درجه‌ی 2 پتانسیل کافی در مدلسازی عدم قطعیت‌های موجود در پارامترهای مداری اندازه‌گیری شده توسط ماهواره را برخوردار هستند.

واژه‌های کلیدی: مدل پارامترهای مداری، تصحیح هندسی، تصاویر با هندسه‌ی خطی، پارامترهای اضافی

1- مقدمه

تهیه‌ی اطلاعات مکانی قابل اعتماد از تصاویر اخذ شده توسط سکوه‌های ماهواره‌ای یکی از اهداف فناوری سنجش از دور به شمار می‌رود [8]. دقت، سرعت، هزینه و تکرارپذیری، مواردی بوده که موجب افزایش انگیزه‌ی استفاده از تصاویر ماهواره‌ای به‌منظور تهیه و بهنگام‌سازی اطلاعات مکانی در سیستم‌های اطلاعات مکانی شده‌است [4]. مدلسازی ریاضی با هدف تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، اولین ضرورت در فرآیند استخراج اطلاعات مکانی از تصاویر ماهواره‌ای محسوب می‌شود [4]. به‌طور کلی می‌توان مدل‌های ریاضی مورد بحث در حوزه تصحیح هندسی را به دو بخش مدل‌های فیزیکی و درونیاب دسته‌بندی نمود [4، 8]. کاهش پیچیدگی‌های اجرایی، سطح دقت قابل حصول و تعمیم‌پذیری سراسری در صحنه‌های تصاویر ماهواره‌ای را می‌توان از شاخص‌های یک مدل ریاضی مناسب برشمرد.

یکی از مدل‌های فیزیکی که از انطباق بالایی با شرایط تصویربرداری Push broom در سکوه‌های ماهواره‌ای برخوردار است، مدل پارامترهای مداری می‌باشد. در این مدل فیزیکی، پویایی پارامترهای توجیه‌خارجی تصاویر با هندسه‌ی تصویربرداری خطی و تکنولوژی Push broom توسط پارامترهای کپلری مدلسازی می‌شود و بیشتر پارامترهای کپلری آن توسط اطلاعات کمکی ثبت شده توسط سیستم‌های ناوبری سنجنده قابل تعیین می‌باشد [1, 2, 9, 10, 11].

تاکنون از پارامترهای اضافی در فضای تصویر در هر دو حوزه‌ی مدل‌های ریاضی فیزیکی و درونیاب استفاده شده است. در این مدل‌ها، از پارامترهای اضافی در فضای تصویر صرفاً با هدف کاهش خطاهای سیستم اپتیکی مثل اعوجاج عدسی استفاده نمی‌شود. به عنوان مثال، در برخی از تحقیقات صورت گرفته تاکنون، مواردی مانند: 1- ضعف در طراحی ساختار معادله‌ی شرط هم‌خطی و 2- خطای سیستماتیک باقیمانده در حل مدل توابع کسری به روش مستقل از زمین²، به عنوان انگیزه‌ی استفاده از پارامترهای اضافی محسوب شده است [1, 2, 3, 7].

در این مقاله، با در نظر گرفتن مدل پارامترهای مداری بعنوان مدل فیزیکی تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، به ارزیابی پتانسیل پارامترهای اضافی در مدلسازی اثرات بکارگیری پارامترهای مدار تقریبی، پرداخته شده است. این ارزیابی در قالب یک شبیه‌سازی جامع به اجرا درآمده است. در این شبیه‌سازی، کفایت چند جمله‌ای‌های دوبعدی بعنوان پارامترهای اضافی فضای تصویر در جبرای این عدم قطعیت‌ها مورد آزمون قرار گرفته است.

ساختار این مقاله در پنج بخش تدوین شده است. در بخش حاضر بعنوان بخش نخست به بیان مقدمه و جایگاه تحقیق حاضر اختصاص یافته است. در بخش دوم، ساختار مدل پارامترهای مداری تشریح شده است. دو بخش سوم و چهارم به بیان متدولوژی و نتایج پیاده‌سازی‌های تحقیق اختصاص یافته و نهایتاً در بخش پنجم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات این تحقیق بیان شده است.

2- مدل پارامترهای مداری (OPM)

در تشکیل یک صحنه³ با هندسه‌ی تصویربرداری خطی در سکوه‌های ماهواره‌ای، شرایط فیزیکی خاصی حکم‌فرما بوده که به طور کلی می‌توان با تعریف چهار سیستم‌مختصات سه‌بعدی⁴ و ارتباط لحظه‌ای میان آنها، هندسه‌ی حاکم بر لحظه‌ی ثبت تصویر را مدلسازی نمود. سیستم‌مختصات زمینی (GCS)⁵، سیستم‌مختصات ایده‌آل مداری ماهواره (ORF)⁶، سیستم‌مختصات سکوی ماهواره (PRF)⁷ و سیستم‌مختصات سنسور (SRF)⁸، چهار سیستم‌مختصات مطرح در مدلسازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای می‌باشند.

GCS به عنوان مبنای تعیین مختصات در فضای زمین، معمولاً یک سیستم ژئوسنتریک⁹ و Earthfixed در نظر گرفته می‌شود. ORF با مبداءای منطبق بر مرکز ثقل ماهواره، سیستمی دست‌راستی¹⁰ بوده که راستای محور z در آن، هم‌جهت با بردار موقعیت ماهواره در یک سیستم‌مختصات ژئوسنتریک و جهت‌گیری محور x در آن منطبق بر راستای بردار سرعت لحظه‌ای ماهواره در یک سیستم‌مختصات Space fixed می‌باشد. سیستم‌مختصات PRF نیز هم‌مبداء با ORF بوده که نسبت به بدنه‌ی سکوی ماهواره قفل شده است. انتظار می‌رود که این سیستم‌مختصات 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 هم جهت با راستای چیدمان CCD¹¹ها در فضای تصویر تعریف شده به نحوی که جهت گیری مثبت محور y در هنگام حرکت نزولی¹² ماهواره به سمت شرق جغرافیایی معطوف خواهد بود. به طور کلی می توان ساختار معادله ی شرط هم خطی مورد استفاده در استراتژی استفاده از پارامترهای کپلری در مدلسازی تصاویر ماهواره ای با هندسه ی تصویربرداری خطی را به صورت ساختار کلی موجود در رابطه ی (1) نشان داد [1, 2, 9].

$$\begin{pmatrix} X - X_S \\ Y - Y_S \\ Z - Z_S \end{pmatrix}_{GCS} = \lambda \times [R_{Orbital}] \times [R_{Attitude}] \times [R_{Pointing}] \times \begin{pmatrix} x=0 \\ y \\ -c \end{pmatrix}_{SRF} \quad (1)$$

در رابطه ی (1)، (x, y) مختصات نقاط در فضای تصویر با هندسه ی تصویربرداری خطی و تکنولوژی Push Broom در سیستم SRF؛ c فاصله ی اصلی¹³ سیستم اپتیکی؛ $[X_S, Y_S, Z_S]^T$ مختصات لحظه ای مرکز تصویر در سیستم GCS که توسط پارامترهای کپلری تعیین می شود؛ $[X, Y, Z]^T$ مختصات نقاط زمینی در سیستم GCS؛ λ ضریب مقیاس¹⁴؛ $[R_{Pointing}]$ ماتریس دوران¹⁵ سه بعدی جهت موازی ساختن سیستم SRF با سیستم PRF به کمک زوایای نشانه روی¹⁶ سنجنده، $[R_{Attitude}]$ ماتریس دوران سه بعدی جهت موازی ساختن سیستم PRF با سیستم ORF به کمک مدلسازی اغتشاشات وضعیتی ماهواره و $[R_{Orbital}]$ نیز ماتریس دوران سه بعدی جهت موازی ساختن سیستم ORF با سیستم GCS توسط پارامترهای کپلری 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 لحظه ای سیستم مختصات ایده آل ماهواره نسبت به یک سیستم مختصات ژئوسنتریک Space Fixed توسط پارامترهای کپلری تعیین می گردد. از میان پارامترهای کپلری سه پارامتر میل¹⁷ (i)، بعد نقطه ی گرهی صعودی¹⁸ (Ω) و آرگمان پریجی¹⁹ (ω_p) جهت گیری مدار ماهواره را تبیین می نمایند. دو پارامتر خروج از مرکزیت²⁰ (e) و نیم قطر طول مدار ماهواره (a) ابعاد بیضی مدار و نهایتاً پارامتر آنامولی واقعی²¹ (f) مبین موقعیت لحظه ای ماهواره در مدار خواهد بود [5, 9, 1]. در حالت ایده آل، تنها پارامتر وابسته به زمان آنامولی واقعی بوده، اما پارامتر بعد نقطه ی گرهی صعودی نیز به منظور تصحیح اثر دوران زمین²² در سیستم های مختصات Earth Fixed و اثر ناچیز نرخ تغییرات Ω به زمان در مدارهای خورشید آهنگ²³ [5, 1, 2] در بازه ی زمانی اخذ تصویر، وابسته به زمان در نظر گرفته می شود (رابطه ی 2).

$$\Omega = \Omega_0 + \Omega_1 t \quad (2)$$

$$f = f_0 + f_1 t$$

در رابطه ی (2)، (Ω_0, f_0) بعد نقطه ی 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 ی زمانی اخذ تصویر و t نماد زمان بوده که عمده تاً هم ارز با شماره ی سطر²³ در فضای تصویر لحاظ می شود.

وضعیت لحظه ای سیستم مختصات ایده آل 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 ماهواره های سنجنش از دوری، به شکل رابطه ی (3) قابل بیان خواهد بود. در رابطه ی (3)، (R_1, R_2, R_3) به ترتیب ماتریس های دوران سه بعدی حول سه محور (x, y, z) می باشند.

$$[R_{Orbital}] = \left[R_3(\pi - \Omega) \times R_1\left(i - \frac{\pi}{2}\right) \times R_2\left(\frac{\pi}{2} - (\omega_P + f)\right) \right] \quad (3)$$

از آنجاییکه طول بردار شعاعی موقعیت لحظه‌ای ماهواره نسبت به سیستم مختصات (GCS) مطابق با قوانین مکانیک سماوی از پارامترهای کپلری قابل تعیین می‌باشد [1, 5, 6, 9]، موقعیت لحظه‌ای مبداء سیستم مختصات ایده‌آل مداری ماهواره در سیستم (GCS) مطابق رابطه‌ی (4) تعیین می‌شود.

$$[X_S, Y_S, Z_S]^T = [R_{Orbital}] \times [0, 0, r]^T \quad (4)$$

در رابطه‌ی (4)، r طول بردار شعاعی ماهواره نسبت به مبداء سیستم (GCS) می‌باشد.

ماتریس دوران سه‌بعدی $[R_{Attitude}]$ که مسئولیت مدلسازی اغتشاشات در وضعیت سنجنده را بدون تاثیرگذاری بر موقعیت لحظه‌ای ماهواره به عهده دارد، متشکل از سه ماتریس دوران سه بعدی حول سه محور مختصاتی بوده که زوایای دوران در ساختار هر یک از این ماتریس‌ها توسط چندجمله‌ای‌های وابسته به زمان تدوین شده‌است (رابطه‌ی 5).

$$\begin{aligned} \omega(t) &= \omega_0 + \omega_1 t + \omega_2 t^2 \\ \varphi(t) &= \varphi_0 + \varphi_1 t + \varphi_2 t^2 \\ \kappa(t) &= \kappa_0 + \kappa_1 t + \kappa_2 t^2 \end{aligned} \quad (5)$$

تعداد و نوع ترم‌های مورد استفاده از چندجمله‌ای‌های وابسته به زمان در ساختار ماتریس $[R_{Attitude}]$ متناسب با میزان اغتشاشات موجود در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر و بر اساس میزان تاثیر در دقت برازش مدل در نقاط چک تعیین می‌گردد. از مزایای این استراتژی، نیاز کمتر به تعداد اطلاعات افمیریز (تنها یک سری داده‌ی افمیریز برای لحظه‌ی ثبت یک سطر از تصویر) و امکان استفاده‌ی مستقیم از پارامترهای کپلری در دستگاه معادلات خواهد بود.

3- سناریوی برآورد اثرات تعیین نادقیق پارامترهای OPM در فضای تصویر

در حالت ایده‌آل برای یک سیستم تصویربرداری Push Broom، بواسطه‌ی نحوه‌ی چیدمان CCDها در فضای تصویر، موقعیت هر آرایه در سیستم SRF، صرفاً دارای مولفه‌ی y بوده و مولفه‌ی x آن صفر در نظر گرفته می‌شود. از سوی دیگر، باید توجه داشت که صرفنظر از نحوه‌ی قرارگیری آرایه‌ی خطی نسبت به سیستم SRF، بعد از نوردهی این آرایه‌ها در زمان تصویربرداری، مقادیر ثبت شده هر CCD در یک ساختار منظم ماتریسی ثبت شده که به آن تصویر خام اطلاق می‌شود. از این رو، تصاویر خام از نقطه‌نظر هندسی، حاوی اطلاعات کاملی از نحوه‌ی آرایش و مختصات CCDها نسبت به سیستم SRF نمی‌باشند.

در هنگام ثبت هر سطر از تصویر، موقعیت و وضعیت لحظه‌ای سنجنده تنها در منطقه‌ی تحت پوشش همان سطر از تصویر در فضای زمین تاثیر می‌گذارد. به عبارت دیگر در صورتی که هر سطر از تصویر در موقعیت و وضعیت خود در لحظه‌ی تصویربرداری قرار گیرد، فضای تحت پوشش زمینی آن معادل واقعیت ثبت شده خواهد بود. این امر مستلزم تعیین صحیح پارامترهای توجیه‌خارجی برای هر سطر از تصویر با هندسه‌ی تصویربرداری خطی خواهد بود.

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 تعیین نادرست پارامترهای مدل OPM، می‌بایست جهت ثبت مناطق زمینی مشابه با واقعیت ثبت شده در هر سطر از تصویر خام اولیه، نحوه‌ی چیدمان CCDها در فضای تصویر نسبت به سیستم مختصات

تصویری تغییر کند. با مبنا قرار دادن سناریوی ذکر شده، به منظور برآورد اثرات ایجاد شده در فضای تصویر، ناشی از تعیین نادرست پارامترهای توجیه خارجی مدل OPM، شبیه‌سازی‌هایی صورت گرفته شد. در این شبیه‌سازی‌ها، سنجنده‌ای فضایی با هندسه‌ی تصویربرداری خطی و تکنولوژی Push Broom طراحی گردید که پارامترهای توجیه داخلی و خارجی آن مطابق با جدول (1) انتخاب شده است.

جدول 1: پارامترهای هندسی، توجیه داخلی و خارجی سنجنده‌ی شبیه‌سازی شده

واحد	مقادیر عددی هر پارامتر	مشخصه‌ی هندسی سنجنده شبیه‌سازی شده
m	1.082	فاصله‌ی اصلی سیستم اپتیکی (C)
μm	13	ابعاد CCD در فضای تصویر
Pixel	6000	تعداد CCDها در فضای تصویر
m	9.85	قدرت تفکیک مکانی در نادر
Km	7200	نیم‌قطر اطول مدار (a)
--	0.001	خروج از مرکزیت مدار (e)
Deg	98.7°	میل صفحه‌ی مداری (i)
Deg	200°	بعد نقطه‌ی گرهی صعودی سطر مرجع از صحنه (Ω_0)
Deg	90°	آرگمان پریجی (ω_p)
Deg	55°	آناملوی واقعی سطر مرجع از صحنه (f_0)
Deg/Line	$-6.22e-6$	نرخ تغییرات بعد نقطه‌ی گرهی صعودی (Ω_1)
Deg/Line	$8.85e-5$	نرخ تغییرات آناملوی واقعی (f_1)
عدم یکسانی واحدها	0.00	پارامترهای مدل‌سازی اغتشاش $[R_{Attitude}]$
Deg	15°	زاویه‌ی نشانه‌روی Cross Track (α)

مقادیر عددی انتخاب شده برای سنجنده‌ی شبیه‌سازی شده، مشابه با مشخصات هندسی سنجنده‌ی HRV از سری ماهواره‌های SPOT می‌باشد. آرایه‌ی خطی شبیه‌سازی شده شامل 6000 پیکسل بوده اما به منظور جلوگیری از افزایش حجم محاسبات، شبکه‌ی تصویر اولیه در فواصل منظم 150 پیکسلی نمونه‌برداری شده و تمامی ترسیمات و محاسبات در این شبکه‌ی کاهش یافته صورت گرفته است. با فرض برابری تعداد سطرها و ستون‌های تصویر و همچنین وجود 6000 پیکسل در هر سطر از تصویر شبیه‌سازی شده، شبکه‌ی 6000×6000 پیکسلی بعد از نمونه‌برداری کاهش یافته به شبکه‌ی 40×40 پیکسلی کاهش یافته است.

با مبنا قرار دادن سنجنده‌ی شبیه‌سازی شده، موقعیت حاصل از تقاطع پرتوهای گذرنده از مراکز پیکسل‌های تصویر با صفحه‌ای مماس بر سطح زمین تعیین گردید. بردار نرمال این صفحه در راستای بردار موقعیت ماهواره در لحظه‌ی اخذ سطر مرجع تصویر، و صفحه‌ی مذکور مماس با کره‌ای به شعاع متوسط زمین (6380 Km) در نظر گرفته شد. در این تقاطع فضایی، نحوه‌ی چیدمان آرایه‌ی خطی مطابق با شرایط ایده‌آل آن نسبت به سیستم SRF در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر، هر پیکسل در سیستم SRF صرفاً دارای مولفه‌ی y بوده و مولفه‌ی x آن صفر لحاظ شده است.

به منظور برآورد اعوجاج ناشی از وجود عدم قطعیت در برآورد پارامترهای OPM، بعد از برآورد مختصات‌های زمینی متناظر برای هر سطر از تصویر شبیه‌سازی شده، روند برآورد موقعیت نقاط متناظر همان سطر، در فضای تصویر به ازای تغییر پارامترهای توجیه خارجی انجام پذیرفت. بدین ترتیب، موقعیت و الگوی چیدمان مجازی آرایه‌ی خطی در فضای تصویر برای ثبت یک تصویر خام، مشابه با تصویر اولیه برآورد خواهد شد. بدیهی است که در صورت عدم وجود خطا در تعیین پارامترهای توجیه خارجی، الگو و شکل چیدمان آرایه‌ی خطی بعد از ثبت مجدد در فضای تصویر بدون تغییر باقی خواهد ماند.

در این سناریو، مجموعه‌ای 1000 عضوی از الگوهای ایجاد شده در فضای تصویر ناشی از تعیین نادرست پارامترهای توجیه خارجی OPM برآورد گردید. این الگوها از طریق افزودن مقادیر اتفاقی در بازه‌های مشخص به پارامترهای توجیه خارجی سنجنده‌ی شبیه‌سازی شده (جدول 1) صورت گرفت. دامنه‌ی خطاهای اتفاقی اعمال شده به پارامترهای توجیه خارجی مدل OPM در جدول (2) ارائه شده است. باید توجه داشت که در تولید مقادیر خطاهای اعمال شده به پارامترهای توجیه خارجی OPM از تابع توزیع احتمال یکنواخت استفاده شده است.

جدول 2: دامنه‌ی خطاهای اتفاقی اعمال شده به پارامترهای توجیه خارجی مدل OPM در سنجنده‌ی شبیه‌سازی شده

پارامتر	دامنه‌ی تغییر	واحد
a	± 20	Km
i, f_0, Ω_0	$\pm 2^\circ$	Degree
Ω_1	$\pm 2.e-5$	Deg / Row
f_1	$\pm 2.e-4$	Deg / Row
$\omega_0, \phi_0, \kappa_0$	$\pm 2^\circ$	Degree
$\omega_1, \phi_1, \kappa_1$	$\pm 2.e-4$	Deg / Row
$\omega_2, \phi_2, \kappa_2$	$\pm 2.e-7$	Deg / Row ²

در انتخاب دامنه‌ی تغییر هر یک از پارامترهای توجیه خارجی (جدول 2)، شرایط منطقی و حتی بزرگتری از واقعیت محتمل در سنجنده‌های ماهواره‌ای رایج متصور شده است. به عبارت دیگر، به طور معمول تغییرات و اختلافاتی که مقادیر تقریبی پارامترهای مدل OPM (پارامترهای کلیریدست آمده از داده‌های افریز و مقادیر اولیه‌ی سایر پارامترهای مدل) در مقایسه با مقادیر واقعی این پارامترها بعد از کالیبراسیون توسط نقاط کنترل زمینی حاصل می‌کنند، کمتر از دامنه‌های تعیین شده در جدول (2) می‌باشد [6].

4- ارزیابی پتانسیل چندجمله‌ای‌های دوبعدی در مدلسازی اثرات تعیین نادقیق پارامترهای OPM

با مقدمه‌ی ذکر شده و با توجه به الگوهای ایجاد شده در فضای تصویر ناشی از تعیین نادرست پارامترهای مدل OPM، در این بخش، امکان استفاده از پارامترهای اضافی در فضای تصویر به عنوان راهکاری در کاهش اثرات تعیین نادقیق پارامترهای توجیه خارجی، مورد بررسی قرار گرفته شده که برای این هدف، از چندجمله‌ای‌های دوبعدی به عنوان پارامترهای اضافی در فضای تصویر استفاده شده است (رابطه‌ی 6).

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} x^i y^j = a_0 + a_1 x + a_2 y + a_3 xy + a_4 x^2 + a_5 y^2 + \dots \quad (6)$$

چندجمله‌های دوبعدی، نمونه‌ای از تبدیلات ساده‌ی دوبعدی بوده که توان بالایی را در مدلسازی و تبدیل الگوهای دوبعدی برخوردار می‌باشند [1, 2, 3, 9]. در این بررسی، با مینا قرار دادن سنجنده‌ی شبیه‌سازی شده در بخش (3)، شبکه‌ی حاصل از تقاطع پرتوهای تصویری با صفحه‌ی مماس بر کره‌ای به شعاع متوسط زمین، تعیین گردید. سپس با تغییر پارامترهای توجیه خارجی مدل OPM، مختصات متناظر هر سطر از تصویر اولیه، از طریق مختصات زمینی برآورد شده‌ی آن در فضای زمین، در سطر متناظری در تصویر دوم محاسبه گردید. همانطور که در بخش قبلی (بخش 3) اشاره شد، از نقطه‌نظر هندسی، تصویر خام ثبت شده در این دو حالت با یکدیگر برابر خواهند بود. اما مختصات‌های ثبت شده برای هر CCD در فضای تصویر، مغایر با حالت ایده‌آل آن نسبت به سیستم SRF ($x=0, y$) خواهند بود. از این روی به نظر می‌رسد، جهت

استفاده از پارامترهای نادقیق توجیه خارجی، اعمال تصحیحاتی به مختصات ایده‌ال نقاط در سیستم SRF الزامیست. این تصحیحات با انتقال موقعیت نقاط در سیستم SRF، هر نقطه را به مکانی منتقل کرده که در معادله‌ی شرط هم‌خطی با پارامترهای نادقیق توجیه خارجی صدق نمایند.

نحوه‌ی اعمال تصحیحات در فضای تصویر به کمک پارامترهای اضافی به شکل رابطه‌ی (7) تدوین شده که Δx و Δy تصحیحاتی بوده که به مختصات ایده‌آل $(x=0, y)$ تصویری در سیستم SRF اعمال می‌شوند.

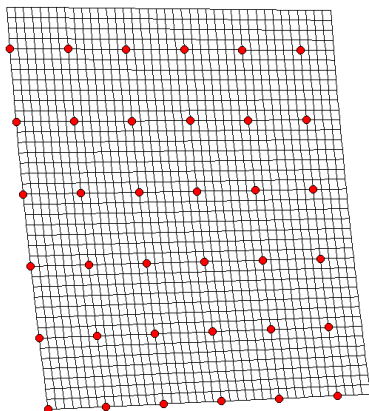
$$\begin{aligned} x' &= 0 + \Delta x \\ y' &= y + \Delta y \end{aligned} \quad (7)$$

در رابطه‌ی (7)، x' و y' موقعیت تصحیح شده‌ی نقاط در سیستم SRF هنگام استفاده از پارامترهای نادقیق توجیه خارجی خواهند بود. تصحیحات Δy و Δx ، چندجمله‌ای‌های دوبعدی از مختصات ماتریسی تصویر خام بوده که مطابق رابطه‌ی (8) برآورد می‌گردند.

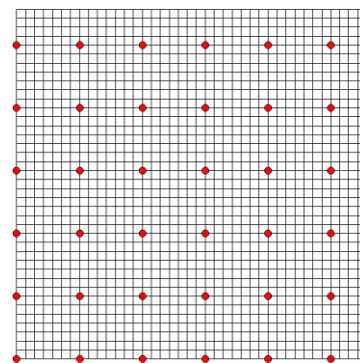
$$\begin{aligned} \Delta x &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} a_{ij} r^i c^j = a_0 + a_1 r + a_2 c + a_3 r c + a_4 r^2 + a_5 c^2 + \dots \\ \Delta y &= \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^{n-i} b_{ij} r^i c^j = b_0 + b_1 r + b_2 c + b_3 r c + b_4 r^2 + b_5 c^2 + \dots \end{aligned} \quad (8)$$

رابطه‌ی (8)، ساختار کامل یک چندجمله‌ای دوبعدی از درجه‌ی n را نشان داده که r ، شماره‌ی سطر و c ، شماره‌ی ستون در سیستم مختصات ماتریسی یک تصویر رقومی می‌باشند.

در ادامه‌ی بررسی، با مبنا قرار دادن رابطه (7) و انتخاب 2 درصد از نقاط شبکه کاهش یافته به عنوان نقاط کنترلی به منظور برآورد ضرایب مربوط به چندجمله‌ای‌های دوبعدی (رابطه‌ی 8)، توان و پتانسیل چندجمله‌ای‌های دوبعدی در انتقال موقعیت ایده‌آل نقاط تصویری $(x=0, y)$ به موقعیت صادق در معادله‌ی شرط هم‌خطی با پارامترهای نادقیق، مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل (1-الف) شبکه‌ی نقاط در حالت ایده‌آل $(x=0, y)$ و شکل (1-ب) نمونه‌ای از الگوهای ایجاد شده در فضای تصویر ناشی از تعیین نادرست پارامترهای توجیه خارجی OPM می‌باشد. در این اشکال، نحوه‌ی انتخاب نقاط کنترلی (نقاط توپر دایره‌ای) جهت برآورد ضرایب مربوط به چندجمله‌ای‌های دوبعدی نیز نشان داده شده است.



ب: نمونه‌ای از الگوی ثبت نقاط در سیستم SRF همراه با عدم قطعیت در تعیین پارامترهای OPM



الف: الگوی ثبت نقاط در سیستم SRF بدون وجود خطا در تعیین پارامترهای OPM

شکل 4-12: نمونه‌ای از اعوجاجات ایجاد شده در فضای تصویر ناشی از عدم قطعیت در تعیین پارامترهای OPM

از آنجاییکه در این تحقیق، چندجمله‌ای‌های دوبعدی نقش تصحیح‌کننده‌ی موقعیت نقاط در فضای تصویر را ایفا می‌کنند، انتخاب ترکیب بهینه از ترم‌های چندجمله‌ای وابسته به سطح پیچیدگی الگوی شبکه‌ی

نقاط در فضای تصویر خواهد بود. میزان انطباق پارامترهای توجیه خارجی با شرایط واقعی حرکتی و وضعیت سنجنده در بازه زمانی اخذ تصویر، ارتباط مستقیم با سطح پیچیدگی الگوی نقاط در فضای تصویر داشته که به تبع آن بر تعداد ترم‌های لازم از چندجمله‌ای تاثیرگذار خواهد بود. بر این مبنایا در نظر گرفتن چندجمله‌ای‌هایی برای ساختارهای Δy و Δx با حداکثر از درجه‌ی چهار (رابطه‌ی 7)، استراتژی انتخاب ساختار چندجمله‌ای‌های بهینه به صورت پیشرونده بواسطه‌ی افزودن ترم به ترم چندجمله‌ای‌های دوبعدی، تدوین گردید. باید توجه داشت که در هر گام مربوط به افزودن یک ترم به ساختار مدل چندجمله‌ای، هدف بهبود قدرت برازش مدل مد نظر قرار دارد. ترتیب افزودن ترم‌های چندجمله‌ای مطابق با افزایش اندیس مربوط به ضرایب چندجمله‌ای (a_i) در رابطه‌ی (9) می‌باشد.

a_1	Zero Degree Terms	
$a_2r + a_3c$	First Degree Terms	
$a_4c^2 + a_5r^2 + a_6rc$	Second Degree Terms	(9)
$a_7r^2c + a_8c^3 + a_9rc^2 + a_{10}r^3$	Third Degree Terms	
$a_{11}r^2c^2 + a_{12}r^4 + a_{13}c^4 + a_{14}rc^3 + a_{15}r^3c$	Fourth Degree Terms	

باید توجه داشت که در استراتژی افزودن ترم به ترم چندجمله‌ای، ترم‌ها به هر دو ساختار Δy و Δx اضافه می‌گردند. به عبارت دیگر، با افزودن هر ترم از چندجمله‌ای، دو مجهول به دستگاه معادلات اضافه شده که جهت برآورد آن حداقل به یک نقطه‌ی کنترلی نیاز خواهد بود. منظور از نقطه‌ی کنترلی در این حوزه، نقطه‌ای بوده که موقعیت آن در: 1- سیستم‌مختصات ایده‌آل تصاویر Push Broom ($x=0, y$), 2- سیستم‌مختصات تصویر رقومی خام (r, c) و 3- سیستم SRF با در نظر گرفتن پارامترهای نادقیق توجیه خارجی (x', y')، مشخص باشد (رابطه‌ی 7).

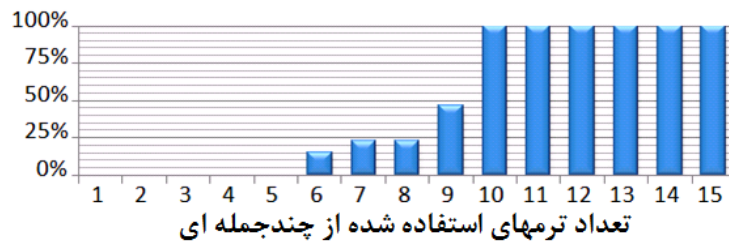
از آنجاییکه چندجمله‌ای دوبعدی مورد استفاده، شامل 15 ترم می‌باشد؛ روند افزودن ترم‌های چندجمله‌ای در 15 گام صورت می‌پذیرد. دقت هر ساختار چندجمله‌ای، از طریق مقایسه‌ی: 1- شبکه‌ی زمینی حاصل از تقاطع پرتوهای تصویر مینا با صفحه‌ی مماس با کره و 2- شبکه‌ی بدست آمده از تقاطع نقاط تصحیح‌شده در فضای تصویر با صفحه‌ی مماس با کره هنگام استفاده از مدل OPM با پارامترهای تقریبی، انجام خواهد شد. معیار این ارزیابی، محاسبه‌ی RMSE شبکه‌ی نقاط زمینی خواهد بود.

به منظور ارزیابی روش پیشنهادی، به ازای هر عضو از جامعه‌ی آماری (1000 عضو) مربوط به الگوی ایجاد شده در فضای تصویر ناشی از تعیین نادرست پارامترهای OPM، هر یک از 15 حالت استفاده از چندجمله‌ای دوبعدی (رابطه‌ی 9) به عنوان ساختار Δy و Δx در نظر گرفته شد. بعد از برآورد ضرایب پارامترهای چندجمله‌ای به کمک نقاط کنترلی (2 درصد نقاط شبکه‌ی کاهش یافته)، با تصحیح موقعیت نقاط در فضای تصویر، شبکه‌ی حاصل از تقاطع پرتوهای نقاط تصویری تصحیح شده با صفحه‌ی مماس بر کره به کمک مدل OPM با پارامترهای نادقیق، برآورد گردید.

نهایتاً طی این روند، جامعه‌ی آماری 1000 عضوی از RMSE، برای هر یک از 15 حالت استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی حاصل شد. معیار کفایت هر یک از ساختارهای استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی (ساختارهای 15 گانه)، کسب حداقل RMSE ممکن به ازای کل نقاط شبکه خواهد بود. شایان ذکر است که تمامی نقاط شبکه‌ی کاهش یافته (40×40 پیکسلی) در محاسبه‌ی RMSE حضور خواهند داشت.

با توجه به قدرت تفکیک مکانی سنجنده‌ی شبیه‌سازی شده ($9/85$ متر در نادر)، بعد از شمارش مقادیر دقت کمتر از یک متر ($RMSE < 1m$) از مجموعه‌ی RMSE‌های تولید شده از جوامع آماری، احتمال وقوع

این شرط در هر یک از جوامع آماری مربوط به استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی تعیین گردید. نمودار ارائه شده در شکل (2)، احتمال وقوع دقت کمتر از یک متر در هنگام استفاده از هر یک از ساختارهای 15 گانه‌ی چندجمله‌ای‌های دوبعدی به عنوان پارامترهای تصحیح‌کننده در فضای شیئی را نشان می‌دهد.



شکل 2: نمودار احتمال وقوع ($RMSE < 1m$) هنگام استفاده از هر یک از ساختارهای 15 گانه‌ی چندجمله‌ای

همانطور که در نمودار شکل (2) مشاهده می‌شود، حضور کمتر از 6 ترم از چندجمله‌ای، توفیق کسب دقت‌های کمتر از یک متر را نداشته و استفاده از حداقل 10 ترم از چندجمله‌ای، با احتمال 100 درصد اثرات مربوط به عدم قطعیت‌های تعیین پارامترهای OPM را در فضای تصویر به نحو مطلوبی مدلسازی می‌کند (جدول 2).

5- نتیجه‌گیری

با استناد به نتایج بدست آمده از این تحقیق، پتانسیل بالای استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی در فضای تصویر به منظور پوشش عدم قطعیت‌های مربوط به تعیین نادقیق پارامترهای توجیه‌خارجی مدل OPM به اثبات رسید. با توجه به اینکه در تولید جوامع آماری مربوط به اعمال مقادیر خطا برای پارامترهای توجیه‌خارجی، دامنه‌ی بزرگتری از مقادیر خطا نسبت به شرایط واقعی در نظر گرفته شده بود، به نظر می‌رسد سطح پیچیدگی الگوهای ایجاد شده در فضای تصویر هنگام استفاده از داده‌های افمریز کمتر از شرایط ایجاد شده در جوامع آماری باشد و بتوان حتی با اعمال تصحیحات ساده‌تری روند تصحیح نقاط در فضای تصویر را نیز دنبال نمود. بر این مبنا بعنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی، متدولوژی پیشنهادی استفاده از پارامترهای اضافی در فضای تصویر برای مدل OPM در تصاویر مختلف ماهواره‌ای پیاده‌سازی شده و نتایج آن مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت.

6- پانوش

- | | |
|------------------------------------|---|
| 1. Orbital Parameters Model | 13. Principal Distance |
| 2. Terrain Independent | 14. Scale Factor |
| 3. Scene | 15. Rotation Matrix |
| 4. 3D Coordinate System | 16. Pointing |
| 5. Ground Coordinate System | 17. Inclination |
| 6. Orbital Reference Frame | 18. Right Ascension of the Ascending Node |
| 7. Platform Reference Frame | 19. Argument of Perigee |
| 8. Sensor Reference Frame | 20. Eccentricity |
| 9. Geocentric | 21. True Anomaly |
| 10. Right Handed Coordinate System | 22. Earth Rotation Effect |
| 11. Charge Coupled Device (CCD) | 23. Sun Synchronize |
| 12. Descending Pass | 24. Row |

مراجع

- [1] علیرضا صفدری نژاد، استفاده از پارامترهای اضافی در مدل پارامترهای مداری به منظور بهبود دقت تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای، 1390، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، گروه فتوگرامتری و سنجش از دور.
- [2] علیرضا صفدری نژاد، محمدجواد ولدان‌زوج، مهدی مختارزاده؛ مدلی جدید جهت تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با استفاده از چندجمله‌ای‌های دوبعدی و اطلاعات ناوبری ماهواره؛ نشریه علمی پژوهشی سنجش از دور و GIS ایران، دانشگاه شهید بهشتی، در دست چاپ
- [3] Fraser, C. and Hanley, H., 2003, *Bias compensation in rational functions for Ikonos satellite imagery*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 69, pp. 53-58.
- [4] McGlone, J.C., 2004, *Manual of Photogrammetry*. 5th Edition. Bethesda : American Society of Photogrammetry and Remote Sensing, p. 1151.
- [5] Seeber, G., 2003, *Satellite Geodesy*., 2nd Edition. New York : DeGruyter.
- [6] SPOT-Image., 2002, *SPOT Satellite Geometry Handbook*., s.l. : S-NT-73-12-SI.
- [7] Tao, C.V. and Hu, Y., 2001, *A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol. 67, pp. 1347-1357.
- [8] Toutin, T., 2004, *Review Article: geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods*, International Journal of Remote Sensing, Vol. 25, pp. 1893-1924.
- [9] Valadan Zoej, M.J., 1997, *Photogrammetric Evaluation of Space Linear Array Imagery for Medium Scale Topographic Mapping*. University of Glasgow.. p. 303, Ph.D Thesis.
- [10] Valadan Zoej, M.J. and Sadeghian, S., 2003, *Orbital parameter modeling accuracy testing of Ikonos Geo image*, Photogramm. J. Finland, Vol. 18, pp. 70-80.
- [11] Valadan Zoej, M.J.; Mansourian, A.; Mojaradi, B.; Sadeghian, S., 2002, *2D geometric correction of Ikonos imagery using genetic algorithms*, Symposium on Geospatial Theory, Processing and Applications, Ottawa, not paginated CD-ROM.