



بهبود عملکرد مدل پارامترهای مداری در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای از طریق بکارگیری تکنیک تخمین مولفه‌های واریانس

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

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

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

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

چکیده:

مدل پارامترهای مداری به عنوان یکی از مقیدترین روش‌های مدلسازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای، از قابلیت تامین دقت‌های سراسری و مطلوبی در تصاویر ماهواره‌ای با هندسه‌ی تصویربرداری پویا برخوردار است. با توجه به اینکه این مدل مبتنی بر فیزیک تشکیل تصویر می‌باشد، امکان معرفی برخی از اندازه‌گیری صورت گرفته توسط سیستم‌های ناوبری در ماهواره‌ها در قالب شبهه‌مشاهده و یا مقادیر ثابت (در صورت دقت کافی) به دستگاه معادلات موجود بوده که این امر ضمن افزایش قابلیت کنترل‌پذیری حل مدل پارامترهای مداری، کاهش نقاط کنترل زمینی بعنوان داده‌های کنترلی را نیز به همراه دارد. با اینحال بدلیل تعدد پارامترهای موجود در مدل پارامترهای مداری و همچنین همبستگی میان آنها، تعریف وزن صحیح برای مشاهدات و شبهه‌مشاهدات به شدت بر دقت مدل و تعداد پارامترهای اضافی در ساختار مدل موثر می‌باشد. از اینرو لازم است تا میزان تصحیح‌پذیری هر پارامتر توسط وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات به درستی تعیین و مورد کنترل قرار گیرد. در این پژوهش ابتدا به بررسی اهمیت و نقش ماتریس وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در دقت مدل پارامترهای مداری پرداخته شد. نتایج نشان داد که جایگاه تعریف وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات هم سطح با انتخاب ساختارهای متنوع از جهت تعداد پارامترهای مجهول، در ساختار مدل پارامترهای مداری می‌باشد. در ادامه برای اولین بار، یکی از تکنیک‌های تخمین مولفه‌های واریانس در فرآیند سرشکنی به منظور بهینه‌سازی مقادیر ماتریس وزن در مدل پارامترهای مداری استفاده گردید. این فرآیند نشان داد که روش مذکور قادر به تعیین وزن مناسب جهت حفظ انعطاف لازم برای تصحیح مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در فرآیند سرشکنی می‌باشد. نهایتاً استفاده از روش بهینه‌سازی وزن در مدل مداری صلب تنها با شش پارامتر منجر به تامین دقت‌های مطلوبی در سطح تعیین موقعیت سه‌بعدی در فضای زمین گردید.

واژه‌های کلیدی: مدل پارامترهای مداری، تخمین مولفه‌های واریانس، ماتریس وزن، شرط هم‌خطی، شبه‌مشاهدات.



۱- مقدمه

مدلسازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای به عنوان اولین ضرورت در فرآیند تهیه‌ی اطلاعات مکانی دقیق و قابل اعتماد، نقش مهمی را در پروژه‌های سنجش از دوری مبتنی بر تولید اطلاعات مکانی ایفا می‌نماید [۱]. فرآیند مدلسازی هندسی با دو رویکرد مدل‌های درونیاب (توابع کسری، چندجمله‌ای‌های دوبعدی و سه‌بعدی و ...) و استفاده از مدل‌های مبتنی بر فیزیک تشکیل تصویر صورت می‌پذیرد [۲ و ۱].

امکان بهره‌مندی از اندازه‌گیری‌های مربوط به سیستم‌های ناوبری سنجنده در فرآیند مدلسازی به صورت مقادیر اولیه، شبهه‌مشاهده و یا استفاده‌ی مستقیم در تکنیک‌های زمین مرجع ساختن مستقیم، از مزایای مدل‌های فیزیکی محسوب شده که نیاز به نقاط کنترلی کمتر و تامین درجات آزادی بالاتر در فرایند سرشکنی بلوک را به همراه خواهند داشت [۳].

در مدلسازی فیزیکی مربوط به تصاویر ماهواره‌ای با تکنولوژی pushbroom، با مبنا قرار دادن معادله‌ی شرط هم‌خطی، پارامترهای مربوط به توجیه خارجی لحظه‌ای هر سطر از تصویر بر مبنای شرایط حرکتی و وضعیت سنجنده تعیین می‌شود. تامین دقت مطلوب توأم با کاهش پیچیدگی‌های اجرایی بواسطه‌ی حضور کمترین پارامترهای موجود در ساختار مدلسازی یکی از اهداف فتوگرامتریست‌ها در طراحی مدل‌های فیزیکی محسوب می‌شود.

استراتژی مراکز تصویر چندگانه (M.P.C)، استراتژی مبتنی بر بردارهای سرعت و موقعیت لحظه‌ای ماهواره (O.A.M) و استراتژی مبتنی بر پارامترهای کپلری مدار ماهواره (O.P.M) سه استراتژی رایج در مدلسازی پارامترهای پویای توجیه خارجی در تصاویر ماهواره‌ای با هندسه‌ی تصویربرداری خطی محسوب می‌شوند [۴]. استراتژی‌های مورد بحث در این حوزه، بر اساس میزان انطباق با شرایط واقعی تصویربرداری و امکان اندازه‌گیری پارامترهای مدل و همچنین تعداد پارامترهای تدوین شده در ساختار مدل به سطوح مختلفی تقسیم می‌شوند

- استراتژی (M.P.C) با حداکثر ۱۸ پارامتر در ساختار مدلسازی، به کمک وابسته ساختن پارامترهای توجیه خارجی معادله‌ی شرط هم‌خطی به زمان، پویایی پارامترهای توجیه خارجی در تصاویر با هندسه‌ی تصویربرداری خطی را مدلسازی می‌کند. در این مدلسازی مفهوم پویایی پارامترهای توجیه خارجی تنها از نقطه نظر ریاضی مدنظر قرار گرفته و قید تبعیت حرکت ماهواره از قوانین مکانیک سماوی لحاظ نشده است. این امر عدم امکان تعیین و معرفی پارامترهای مدل توسط اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در سیستم‌های ناوبری سنجنده را بدنال خواهد داشت.
- استراتژی (O.A.M) با حداکثر ۲۷ پارامتر در ساختار مدلسازی، با وابسته ساختن موقعیت و وضعیت لحظه‌ای به یکدیگر، افزایش انطباق ساختار مدلسازی را با شرایط واقعی تصویربرداری در سکوهای ماهواره‌ای به همراه دارد. این استراتژی امکان استفاده از اطلاعات افمریز ماهواره (اطلاعات افمریز شامل بردار موقعیت و سرعت لحظه‌ای ماهواره بوده که در بازه‌های مشخص زمانی توسط سیستم‌های ناوبری ماهواره اندازه‌گیری می‌شود) را در ساختار معادله‌ی شرط هم‌خطی به منظور برقراری ارتباط بین سیستم‌مختصات‌های تصویری و زمینی تامین می‌کند. حفظ تعامد بردارهای موقعیت و سرعت لحظه‌ای ماهواره در یک سیستم‌مختصات ژئوسنتریک و تاثیر موقعیت لحظه‌ای ماهواره بر وضعیت آن قیودی بوده که توسط این استراتژی لحاظ شده است. در مقابل عدم لحاظ قیودی چون تبعیت موقعیت ماهواره‌ها از مکان هندسی بیضی و وابستگی سرعت ایده‌آل ماهواره‌ها به موقعیت لحظه‌ای آن از جمله نواقص این مدل محسوب می‌شود که این امر موجب کاهش انطباق مدل با شرایط واقعی تصویربرداری در سکوهای ماهواره‌ای می‌گردد [۵].



• استراتژی (O.P.M) را می‌توان مقیدترین استراتژی مدلسازی تصاویر ماهواره‌ای با هندسه‌ی تصویربرداری خطی به کمک پارامترهای مداری دانست که در آن موقعیت و وضعیت لحظه‌ای سکوی ماهواره بطور کامل توسط پارامترهای کپلری مدلسازی می‌گردد. در این استراتژی، سکوی ماهواره عموماً حرکتی منطبق بر مکان هندسی یک بیضی داشته و وضعیت لحظه‌ای ایده‌آل آن کاملاً وابسته به موقعیت لحظه‌ای ماهواره خواهد بود. فرض‌های صورت پذیرفته در این استراتژی‌ها به جهت بازه‌ی اندک زمانی اخذ یک صحنه و تبعیت ماهواره‌ها از قوانین مکانیک سماوی، فرض‌های نزدیک به واقعیتی محسوب می‌شوند. مدل‌های متنوعی بر پایه‌ی استراتژی پارامترهای مداری توسعه یافته‌اند که تعداد پارامترهای موجود در هر مدل وابسته به فرضیات حرکتی متفاوت در تدوین ساختار مدلسازی می‌باشد [۶، ۷ و ۸]. مدل مورد استفاده در این مقاله حداکثر ۱۵ پارامتر را به خود اختصاص می‌دهد. جزئیات کامل حاکم بر این مدل در بخش ۲-۱ تشریح خواهد شد.

در روش‌های سنتی استفاده از مدل پارامترهای مداری، روند اجرایی به منظور استحصال دقت مطلوب در نتایج ارزیابی نقاط چک از طریق تغییر نوع و تعداد پارامترهای مجهول در فرآیند مدلسازی صورت می‌گیرد. این امر علاوه بر ابهام در شناسایی ساختار بهینه از جهت نوع و تعداد پارامترهای مجهول در روند مدلسازی، عمدتاً افزایش تعداد پارامترهای مدل را جهت تامین دقت مطلوب به همراه خواهد داشت. تعدد پارامترهای مجهول علاوه بر افزایش پیچیدگی‌های مربوط به خطی‌سازی مدل در حل دستگاه معادلات، افزایش نیاز به نقاط کنترلی و همبستگی بین پارامترها را به دنبال دارد.

امکان اندازه‌گیری پارامترهای مدل و افزودن کمیات کپلری بدست آمده از اطلاعات افمریز به صورت شبیه‌مشاهده، از مزایای مدلسازی (O.P.M) محسوب می‌شود. افزودن کمیات بدست آمده از اطلاعات افمریز به صورت مشاهدات وزن‌دار در دستگاه معادلات می‌تواند با افزایش قابلیت اعتمادپذیری روند سرشکنی بلوک و افزایش درجه‌ی آزادی دستگاه معادلات، موجب جلوگیری از واگرایی و یا همگرا شدن دستگاه معادلات به جواب‌های اشتباه شده و همچنین در صورت بالا بودن دقت هر یک از کمیات مطرح شده، می‌توان با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای دقیق، از تعداد نقاط کنترل مورد نیاز کاست. تعیین صحیح دقت/وزن مشاهدات و شبیه‌مشاهدات در روند سرشکنی، همواره مهم و استراتژیک بوده که موجب تامین آزادی عمل مناسب پارامترها در فرآیند تصحیح شده و نهایتاً در صورت صحت مدل ریاضی، افزایش صحت محاسبه‌ی پارامترهای مدل را به دنبال خواهد داشت. در بعضی از مواقع انتساب وزن نادرست به مشاهدات و شبیه‌مشاهدات موجب تحمیل پارامترهای اضافی (دوران‌های تکمیلی در فضای شئی و یا پارامترهای تصحیح کننده اضافی در فضای تصویر) در ساختار مدل و یا منجر به کاهش دقت مدل در نتایج ارزیابی نقاط چک خواهد شد. با توجه به این که مشاهدات وزن‌داری که از طریق اطلاعات افمریز تامین می‌شوند؛ دارای دقت تقریبی بوده، به همین جهت انتظار می‌رود که تعیین وزن صحیح برای آنها در دستگاه معادلات، علاوه بر کاهش حضور پارامترهای اضافی در مدلسازی، منجر به دقت‌های بهتری در نقاط چک گردد.

تکنیک‌های تخمین مولفه‌ی واریانس (V.C.E) با هدف بهینه‌سازی وزن مشاهدات هم‌جنس در فرآیند سرشکنی تدوین شده‌اند که در مواقع عدم اطلاع از وزن دقیق مشاهدات مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های متنوعی از نقطه‌نظر محاسباتی به منظور تخمین مولفه‌های واریانس مشاهدات توسعه یافته‌اند. از نقطه‌نظر کاربرد این تکنیک‌ها، در ژئودزی ماهواره‌ای با توجه به تنوع مشاهدات از نقطه‌نظر جنس و دقت اندازه‌گیری، تحقیقات متنوعی در راستای استفاده از تکنیک‌های (V.C.E) به منظور بهینه‌سازی وزن در دستگاه معادلات صورت پذیرفته است [۹].

وجود ارتباط مفهومی نزدیک میان پارامترهای مدل (O.P.M) و برخی از مفاهیم و اندازه‌گیری‌های مورد بحث در ژئودزی ماهواره‌ای از یک سو و دقت تقریبی اندازه‌گیری اطلاعات افمریز در سکوه‌های ماهواره‌ای از سوی دیگر، و



همچنین تنوع مشاهدات و شبهه‌مشاهدات مورد استفاده در این مدل، انگیزه‌های لازم جهت استفاده از تکنیک بهینه‌سازی وزن مشاهدات در فرآیند مدلسازی در مدل (O.P.M) را فراهم می‌آورد.

با مقدمه‌ی مطرح شده و با در نظر گرفتن استراتژی (O.P.M) به عنوان مدل مناسب ارتباطی بین فضای تصویر و زمین، در این مقاله ابتدا جایگاه و تاثیر مقادیر وزن مشاهدات تصویری و شبهه‌مشاهدات کپلری در حل دستگاه معادلات مورد بررسی قرار گرفته است. سپس وزن صحیح مشاهدات و شبهه‌مشاهدات طی فرآیند بهینه‌سازی وزن تعیین شده و میزان موفقیت روش بهینه‌سازی وزن در بهبود دقت مدل (O.P.M) مورد بررسی قرار می‌گیرد.

مقاله‌ی پیش رو در چهار بخش اصلی تنظیم شده است. بخش اول با مقدمه‌ای به منظور آشنایی با قابلیت‌ها و محدودیت‌های مربوط به مدل‌های پارامتریک اقدام به طرح مساله در حوزه‌ی استفاده‌ی اجرایی از مدل پارامترهای مداری می‌نماید. بخش دوم از این مقاله مبانی تئوریک مورد نیاز شامل ساختار مدل پارامترهای مداری و روش بهینه‌سازی وزن مشاهدات در فرآیند سرشکنی را در خود جای دارد. بخش سوم از این مقاله، روند اجرای تحقیق را شامل شده و نهایتاً بخش چهارم، نتیجه‌گیری و پیشنهادات را به خود اختصاص می‌دهد.

۲- بهینه‌سازی وزن مشاهدات و شبهه مشاهدات در مدل پارامترهای مداری

۲-۱- مدل پارامترهای مداری (O.P.M)

در تشکیل یک صحنه با هندسه‌ی تصویربرداری خطی در سکوه‌های ماهواره‌ای، شرایط فیزیکی خاصی حکم‌فرما بوده که به طور کلی می‌توان با تعریف چهار سیستم‌مختصات سه‌بعدی و ارتباط لحظه‌ای میان آنها، هندسه‌ی حاکم بر لحظه‌ی ثبت تصویر را مدلسازی نمود. سیستم‌مختصات زمینی (GCS)، سیستم‌مختصات ایده‌آل مداری ماهواره (ORF)، سیستم‌مختصات سکوی ماهواره (PRF) و سیستم‌مختصات سنسور (SRF)، چهار سیستم‌مختصات مطرح در مدلسازی هندسی تصاویر ماهواره‌ای می‌باشند [۳ و ۴].

GCS به عنوان مبنای تعیین مختصات در فضای زمین، معمولاً یک سیستم ژئوسنتریک و Earth fixed 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 سیستم‌مختصات ژئوسنتریک و جهت‌گیری محور x در آن منطبق بر راستای بردار سرعت لحظه‌ای ماهواره در یک سیستم‌مختصات Space fixed می‌باشد. 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 دست راستی 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 CCDها در فضای تصویر تعریف شده به نحوی که جهت‌گیری مثبت محور y در هنگام حرکت نزولی ماهواره به سمت شرق جغرافیایی معطوف خواهد بود [۳].

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. 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 سیستم‌مختصات ایده‌آل مداری ماهواره به یکدیگر وابسته و تابعی از پارامترهای کپلری خواهند بود [۳، ۴ و ۶].



به طور کلی می‌توان ساختار معادله‌ی شرط‌هم‌خطی مورد استفاده در استراتژی استفاده از پارامترهای کپلری در مدل‌سازی تصاویر ماهواره‌ای با هندسه‌ی تصویربرداری خطی را به صورت ساختار کلی موجود در رابطه‌ی (۱) نشان داد [۳ و ۴].

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

در رابطه‌ی (۱)، (x, y) مختصات نقاط در فضای تصویر با هندسه‌ی خطی و تکنولوژی Push Broom 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 نشان‌رویی 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 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 [۴].

موقعیت و وضعیت لحظه‌ای سیستم مختصات ایده‌آل ماهواره نسبت به یک سیستم مختصات ژئوسنتریک Space Fixed توسط پارامترهای کپلری تعیین می‌گردد. از میان پارامترهای کپلری سه پارامتر میل (i) ، بعد نقطه‌ی گره‌ی صعودی (Ω) و آرگمان‌پریجی (ω_p) وضعیت مدار ماهواره را تبیین نموده و دو پارامتر خروج از مرکزیت (e) و نیم‌قطر اطول مدار ماهواره (a) ابعاد بیضی مدار و نهایتاً پارامتر آنامولی واقعی (f) مبین موقعیت لحظه‌ای ماهواره در مدار خواهد بود. در حالت ایده‌آل، تنها پارامتر وابسته به زمان آنامولی واقعی بوده، اما پارامتر بعد نقطه‌ی گره‌ی صعودی نیز به منظور تصحیح اثر دوران زمین در سیستم‌های مختصات Earth Fixed و اثر ناچیز نرخ تغییرات Ω به زمان در مدارهای خورشیدآهنگ در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر، وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شود (رابطه‌ی ۲).

$$\begin{aligned} \Omega &= \Omega_0 + \Omega_1 t \\ f &= f_0 + f_1 t \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه‌ی (۲)، (Ω_0, f_0) بعد نقطه‌ی گره‌ی صعودی و آنامولی واقعی یک سطر مرجع از صحنه؛ (Ω_1, f_1) نرخ تغییرات (Ω_0, f_0) نسبت به زمان در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر و t نماد زمان بوده که عمدتاً هم‌ارز با شماره‌ی سطر در فضای تصویر لحاظ می‌شود.

در این ساختار مدلسازی، پارامتر ω_p به‌خاطر همبستگی مستقیم با پارامتر f و پارامتر e بواسطه‌ی ثبات مداری بکمک داده‌های افمریز محاسبه شده و به صورت پارامتر ثابت در دستگاه معادلات حضور پیدا می‌کند [۶].

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 سنجش از دوری، به شکل رابطه‌ی (۳) قابل بیان خواهد بود. در رابطه‌ی (۳)، (R_1, R_2, R_3) به ترتیب ماتریس‌های دوران سه‌بعدی حول سه محور (x, y, z) می‌باشند.



$$[R_{Orbital}] = \left[R_3(\pi - \Omega) \times R_1(i - \frac{\pi}{2}) \times R_2(\frac{\pi}{2} - (\omega_p + f)) \right] \quad (۳)$$

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

$$[X_S, Y_S, Z_S]^T = [R_{Orbital}] \times [0, 0, r]^T \quad (۴)$$

در رابطه‌ی (۴)، r طول بردار شعاعی ماهواره نسبت به مبداء سیستم (GCS) می‌باشد [۴ و ۶].

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 دورانها توسط چندجمله‌ای های وابسته به زمان تدوین شده است (رابطه‌ی ۵).

$$[R_{Attitude}]^T = [R_3(\kappa(t)) \times R_2(\varphi(t)) \times R_1(\omega(t))] \quad (۵)$$

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

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 [۳ و ۶].

از مزایای این استراتژی، نیاز کمتر به تعداد اطلاعات افمیریز (تنها یک سری داده‌ی افمیریز برای لحظه‌ی ثبت یک سطر از تصویر) و امکان افزودن مستقیم پارامترهای کپلری به شکل شبه‌مشاهده در دستگاه معادلات خواهد بود.

۲-۲- بهینه‌سازی وزن مشاهدات و شبهه مشاهدات در مدل سرشکنی پارامتریک

وزن مشاهدات به عنوان فاکتور تعیین کننده در میزان انعطاف یک مشاهده از نقطه‌نظر تصحیح‌پذیری در فرآیند سرشکنی، نقش مهمی را در کیفیت محاسبه‌ی پارامترهای مجهول در دستگاه معادلات ایفا می‌کند. در صورت تعریف صحیح مدل ریاضی و اطمینان از عدم وجود خطاهای فاحش در مجموعه‌ی مشاهدات، آزمون آماری فاکتور واریانس ثانویه (σ_0^2) نشانه‌ای از میزان صحت تعیین ماتریس وزن محسوب می‌شود. کیفیت یک ماتریس وزن صحیح در فرآیند سرشکنی مستلزم مشخص بودن تناسب صحیح میان وزن مشاهدات می‌باشد در حالیکه آماره‌ی فاکتور واریانس ثانویه بواسطه‌ی نقش مقیاسی که در سراسر ماتریس کواریانس مشاهدات ایفا می‌کند قادر به تصحیح نسبت وزن مشاهدات مختلف در ساختار ماتریس وزن نخواهد بود [۳، ۹ و ۱۰].

وجود تفاوت در مجموعه‌ی مشاهدات از نقطه‌نظر نوع و تکنیک اندازه‌گیری، موجب تمایز دقت نسبی مشاهدات شده که در صورت تعیین اشتباه دقت نسبی مجموعه‌های متفاوت مشاهدات موجود در یک دستگاه معادلات، تعیین پارامترهای مجهول توأم با خطا خواهد بود.

روش‌های متنوعی با هدف بهینه‌سازی ماتریس وزن مشاهدات در دستگاه معادلات، تحت عنوان روش‌های تخمین مولفه‌های واریانس (V.C.E) توسعه یافته‌اند که روش استفاده از اعداد آزادی یکی از این روش‌ها محسوب می‌شود [۹]. هدف در روش‌های (V.C.E) تعیین مولفه‌های واریانس مشاهدات هم‌جنس در ساختار ماتریس کواریانس مشاهدات



می‌باشد. با دسته‌بندی مشاهدات موجود در یک دستگاه معادلات (\bar{l}) به مجموعه‌های همگن از نظر نوع مشاهده و دقت اندازه‌گیری مطابق رابطه‌ی (۶) در این تکنیک با تجزیه‌ی ماتریس کواریانس به شکل رابطه‌ی (۷) برای هر مجموعه از مشاهدات مشابه یک مولفه‌ی واریانس محاسبه می‌شود.

$$\bar{l} = [\bar{l}_1^T, \bar{l}_2^T, \dots, \bar{l}_k^T]^T \quad (6)$$

$$C_{ll} = \sum_{i=1}^k \sigma_i^2 V_i \quad (7)$$

در رابطه‌ی (۷)، C_{ll} ماتریس کواریانس مشاهدات، k تعداد مجموعه مشاهدات همگن، V_i ماتریس مربعی با ابعاد فضای مشاهدات ($n \times n$) مطابق ساختار موجود در رابطه‌ی (۸) و σ_i^2 مولفه‌ی واریانس مربوط به مجموعه‌ی مشاهدات همگن i ام از کل مشاهدات موجود در دستگاه معادلات می‌باشند.

$$V_1 = \begin{pmatrix} [Q_1] & 0 & \dots & 0 \\ & 0 & & 0 \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & 0 \end{pmatrix}_{n \times n}, V_2 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ & [Q_2] & & 0 \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & 0 \end{pmatrix}_{n \times n} \dots V_k = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 \\ & 0 & & 0 \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & [Q_k] \end{pmatrix}_{n \times n} \quad (8)$$

در رابطه‌ی (۸)، Q_i ($i = 1, 2, \dots, k$)، زیرماتریس‌هایی از ماتریس کوفکتور مشاهدات که متناظر با مجموعه‌ی مشاهدات همگن i ام از کل مشاهدات موجود می‌باشند.

با در نظر گرفتن دستگاه معادلات خطی Over Determined به صورت رابطه‌ی (۹) که در آن، \bar{l} بردار مشاهدات، \bar{v} بردار باقیمانده‌ها، B ماتریس ژاکوبین مشاهدات نسبت به مجهولات و $\bar{\Delta}$ بردار مجهولات می‌باشند؛ در صورتی که $W = C_{ll}^{-1}$ ماتریس وزن مشاهدات در نظر گرفته شود، ماتریس R به عنوان ماتریس آزادی از طریق رابطه‌ی (۱۰) محاسبه می‌شود که در آن I ماتریس واحد می‌باشد.

$$\bar{l} + \bar{v} = B \bar{\Delta} \quad (9)$$

$$R = I - B(B^T W B)^{-1} B^T W \quad (10)$$

ماتریس R تبدیلی بوده که فضای مشاهدات را به فضای باقیمانده‌ها منتقل می‌کند و از ویژگی‌های این ماتریس می‌توان به عناصر قطر اصلی آن اشاره نمود؛ مقادیر مذکور که با r_{ii} نمایش داده می‌شوند، اعداد آزادی اطلاق شده که دارای دامنه‌ی تغییرات بین $[0, 1]$ می‌باشند. اثر ماتریس آزادی معادل درجه‌ی آزادی (df) دستگاه معادلات بوده و اعداد آزادی هر مشاهده به نحوی میزان کنترل‌پذیری مشاهده مذکور را در فرآیند سرشکنی نمایش می‌دهد.

به منظور تصحیح نسبی مقادیر ماتریس کواریانس مشاهدات در صورت اطمینان از صحت مدل ریاضی، می‌توان بعد از حل دستگاه معادلات با وزن‌های اولیه و محاسبه‌ی بردار باقیمانده‌ها، مولفه‌ی واریانس ($\hat{\sigma}_i^2$) را برای هر یک از مجموعه مشاهدات همگن از طریق رابطه‌ی (۱۱) محاسبه نمود [۱۱].

$$\hat{\sigma}_i^2 = \frac{v_i^T W_i v_i}{n_i - \text{tr}((B^T W B)^{-1} B_i^T W_i B_i)} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (11)$$

در رابطه‌ی (۱۱)، v_i باقیمانده‌ی مجموعه مشاهدات i ام، W_i و B_i به ترتیب زیرماتریس‌هایی از ماتریس وزن و ماتریس B که متناظر با مجموعه مشاهدات i ام بوده، n_i معادل تعداد مشاهدات موجود در مجموعه‌ی مشاهدات i ام و tr عملگر محاسبه‌ی اثر ماتریس می‌باشند. در رابطه‌ی (۱۱) عبارت موجود در مخرج کسر، معادل مجموع اعداد آزادی مربوط به مجموعه مشاهدات i ام بوده و از این‌رو به این روش تخمین مولفه‌ی واریانس، روش استفاده از اعداد آزادی



اطلاق می‌گردد. در این روش، طی پروسه‌ی تکرار، مقادیر موجود در ماتریس C_{ii} مطابق رابطه‌ی (۸) بوسیله‌ی مقادیر محاسبه‌شده‌ی $\hat{\sigma}_i^2$ ($i = 1, 2, \dots, k$) در هر تکرار به صورت ضرب‌شونده تصحیح شده و این فرایند تا زمانیکه مقادیر $\hat{\sigma}_i^2$ ها با اختلاف اندکی به عدد یک میل کنند، ادامه پیدا می‌کند.

استفاده‌ی حداکثری از قابلیت‌های ممکن هر یک از پارامترهای موجود در مدل (O.P.M) در فرآیند یافتن مجهولات به منظور هم‌خط‌سازی پرتوهای تصویر، مستلزم تعیین مناسب وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات خواهد بود. از نقطه‌نظر اجرایی در مورد حل دستگاه معادلات مربوط به مدل (O.P.M)، مشاهدات موجود را می‌توان به دو دسته‌ی اندازه‌گیری نقاط در فضای تصویر و مشاهدات مربوط به پارامترهای کپلری تقسیم‌بندی نمود. از آنجائیکه عموماً دقت اندازه‌گیری در فضای تصویر مشخص می‌باشد، مشاهدات موجود در فضای تصویر را می‌توان به دو بخش همگن، X (مولفه‌ی در راستای حرکت سنسور) و Y (مولفه‌ی عمود بر راستای حرکت سنسور) دسته‌بندی نمود. علت این دسته‌بندی را می‌توان به تفاوت هندسه‌ی تصویربرداری در دو راستای ذکر شده در تصاویر با هندسه‌ی خطی مرتبط دانست. از سوی دیگر، شبهه‌مشاهدات کپلری نیز بواسطه‌ی تفاوت داخلی با یکدیگر از نقطه‌نظر نوع مشاهده (طولی، زاویه‌ای) و همچنین تفاوت خارجی با مشاهدات تصویری، هر کدام به طور مستقل به عنوان یک مجموعه‌ی همگن تک‌عضوی در نظر گرفته می‌شوند.

۳- پیاده‌سازی و ارزیابی نتایج

۳-۱- مجموعه‌ی داده‌های مورد استفاده

به‌منظور پیاده‌سازی و ارزیابی روش تخمین مولفه‌ی وارینانس در بهینه‌سازی وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات مدل پارامترهای مداری (O.P.M) از دو مجموعه‌ی تصاویر استریو از سنجنده‌ی SPOT مربوط به دو شهر زنجان و اصفهان (در ایران) 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 سیستم 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.

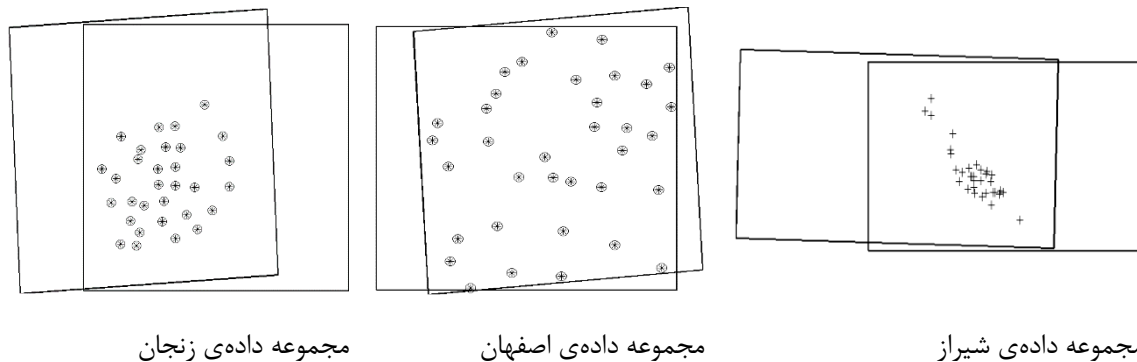
جدول (۱) : مجموعه‌ی داده‌ها و اطلاعات مربوط به هر کدام

زنجان		اصفهان		شیراز		مجموعه داده
خام		خام		خام		سطح تصحیح هندسی
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.



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



شکل (۱): توزیع نقاط کنترلی در هر مجموعه داده

تمامی تصاویر مورد استفاده در این تحقیق فاقد هرگونه تصحیح هندسی بوده و اطلاعات افمیریز آنها در اختیار قرار داشت. در هر تصویر به کمک اطلاعات افمیریز موجود، بعد از درونیابی زمانی لاگرائز، بر اساس زمان اخذ اطلاعات افمیریز 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 ($a, e, i, \Omega_o, \omega_p, f_o$) برای سطر مرجع محاسبه گردید.

۳-۲- نتایج و بحث

در این بخش ابتدا به بررسی روش‌های سنتی استفاده از مدل پارامترهای مداری پرداخته و در ادامه اهمیت جایگاه وزن مشاهدات و شبیه‌مشاهدات در نتایج دقت مدل مداری مورد بحث و تحلیل قرار می‌گیرد. در انتها به منظور بررسی قابلیت و جامعیت روش بهینه‌سازی وزن مشاهدات و شبیه‌مشاهدات در مدل پارامترهای مداری، نتایج بدست آمده ارائه شده است.

۳-۲-۱- بررسی مدل پارامترهای مداری (O.P.M) از دیدگاه سنتی

در روش سنتی استفاده از مدل پارامترهای مداری تغییر تعداد پارامترهای مجهول در مدل به منظور تامین دقت مطلوب در نتایج ارزیابی نقاط کنترلی امری رایج محسوب می‌شود. افزایش پارامترهای مدل با اضافه کردن ساختارهای مختلفی از ماتریس مدل‌سازی اغتشاشات ($R_{Attitude}$) صورت می‌پذیرد. در این راستا از هفت ساختار مختلف در ماتریس $R_{Attitude}$ که هر کدام سطح مختلفی از مدل‌سازی اغتشاشات در وضعیت سنجنده را در مدل‌سازی متصور می‌شوند، استفاده شد. ساختارهای مختلف به صورت جدول (۲) نمایش داده شده‌است.

جدول ۲: ساختارهای مختلف ماتریس $R_{Attitude}$

Id	$R_{Attitude}$ Configuration
A1	None
A2	$\omega_o, \phi_o, \kappa_o$
A3	$\omega_o, \omega_1, \phi_o, \phi_1, \kappa_o, \kappa_1$
A4	$\omega_o, \omega_1, \omega_2, \phi_o, \phi_1, \phi_2, \kappa_o, \kappa_1, \kappa_2$
A5	$\omega_1, \phi_1, \kappa_1$
A6	$\omega_1, \omega_2, \phi_1, \phi_2, \kappa_1, \kappa_2$
A7	$\omega_2, \phi_2, \kappa_2$



ساختار A1 در جدول (۲) مبین مدل صلب مداری بوده که ماتریس $[R_{Attitude}]$ در ساختار مدل (O.P.M) حضور ندارد. سه ساختار A1 تا A3 ساختارهای رایج در بررسی سطوح اغتشاشات مداری بوده که در تحقیقات مختلف از آنها استفاده شده است. ستون اول از جدول (۲) مشخصه‌ی ساختار استفاده شده و ستون دوم، پارامترهای مورد استفاده از ساختار مدل‌سازی اغتشاشات وضعیتی (رابطه‌ی ۵) را نشان می‌دهد.

از دیگر مواردی که در روش سنتی استفاده از مدل پارامترهای مداری برای حل دستگاه معادلات لحاظ می‌شود، ثبات ساختار ماتریس وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات می‌باشد. وزن مربوط به مشاهدات در فضای تصویر بر مبنای دقت اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در فضای تصویر بوده و نهایتاً وزن مربوط به شبهه‌مشاهدات بر اساس دقت‌های اسمی اندازه‌گیری‌های مربوط به سیستم‌های ناوبری ماهواره‌ها تعیین می‌شوند. در این تحقیق دقت‌های مورد استفاده برای شبهه‌مشاهدات در ساختار ماتریس وزن مطابق جدول (۳) می‌باشد.

جدول ۳: انحراف استاندارد در نظر گرفته شده برای شبهه‌مشاهدات مدل

OPM		
Quasi Observations	Standard Deviations	Units
a	100	Meter
i, f_0, Ω_0	$0^\circ 15' 0''$	Degree
$\omega_0, \varphi_0, \kappa_0$	$0^\circ 10' 0''$	Degree
$f_1, \Omega_1, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1$	$2.e-5$	Deg / Row
$\omega_2, \varphi_2, \kappa_2$	$2.e-7$	Deg / Row ²

ارزیابی دقت نتایج تقاطع فضایی به ازای ۱۰ نقطه‌ی کنترل با توزیع مناسب در هر یک از سه مجموعه‌ی داده‌ی موجود برای هر یک ساختارهای موجود در جدول (۲) صورت پذیرفت. شایان ذکر است که تمامی مجهولات اعم از پارامترهای کپلری و پارامترهای موجود در ماتریس $[R_{Attitude}]$ در هر یک از ساختارهای مورد بحث در جدول (۲) به صورت شبهه‌مشاهده به دستگاه معادلات افزوده شده‌اند. نتایج این بررسی در جدول (۴) گزارش شده است.

جدول ۴: دقت بدست آمده از تقاطع فضایی در نقاط چک برای هر یک از ساختارهای

جدول ۲

Dats ets Id	Zanjan		Esfahan		Shiraz	
	PL (m)	H (m)	PL (m)	H (m)	PL (m)	H (m)
A1	7.1 0	12 .58	12. 66	13 .17	12. 75	4. 33
A2	6.8 8	6. 33	12. 21	6. 55	7.3 0	5. 73
A3	6.9 7	6. 38	12. 15	6. 75	7.3 1	5. 10
A4	6.8 7	6. 41	12. 23	6. 38	7.3 6	4. 55
A5	7.0 7	11 .14	12. 52	13 .10	12. 56	4. 07
A6	6.9 8	11 .04	12. 84	13 .43	12. 62	4. 12
A7	7.0 1	12 .67	12. 81	13 .15	12. 92	3. 98

نتایج جدول (۴) حاکی از کیفیت ساختارهای A2 تا A4 در تعیین موقعیت سه‌بعدی در فضای زمین، متناسب با قدرت تفکیک مکانی تصاویر مورد استفاده می‌باشد. ساختارهای A5 تا A7 نشان دادند که حضور پارامترهای $(\omega_0, \varphi_0, \kappa_0)$ نقش کلیدی در مدل‌سازی اغتشاشات و تامین دقت‌های مطلوب ایفا می‌کنند.



نتایج بررسی مدل پارامترهای مداری در مجموعه داده‌های مورد استفاده، لزوم حضور پارامترهای مربوط مدلسازی اغتشاشات وضعیتی سنجنده را در جهت تامین دقت‌های مطلوب به اثبات رساند و از طرفی ساختار بهینه‌ی مربوط به ماتریس $[R_{Attitude}]$ بسته به نوع تصویر مورد استفاده می‌بایست تعیین گردد. در ادامه به بررسی اهمیت جایگاه ماتریس وزن در دقت مدل (O.P.M) پرداخته شده و قابلیت تکنیک بهینه‌سازی وزن مورد ارزیابی قرار گرفت.

۳-۲-۲- بررسی مدل پارامترهای مداری (O.P.M) از دیدگاه سنتی

در این بخش به عنوان دومین گام تحقیق، تاثیر وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در حل دستگاه معادلات مربوط به مدل پارامترهای مداری (O.P.M) به ازای ساختارهای مختلف استفاده از ماتریس $[R_{Attitude}]$ مورد بررسی قرار گرفت.

به‌منظور بررسی اثر وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در نتایج برازش مدل مداری از ترکیبات اتفاقی مقادیر وزن در ماتریس وزن دستگاه معادلات استفاده شد. برای این امر، با تولید جوامع آماری از مقادیر اتفاقی وزن برای مشاهدات و شبهه‌مشاهدات که وزن هر نوع از مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در بازه‌ی مشخصی قرار می‌گرفت، دقت تقاطع فضایی در نقاط چک، به ازای ساختارهای مختلف ماتریس وزن مورد بررسی قرار گرفت. بازه‌های مشخص مورد استفاده در تولید جوامع آماری برای مقادیر اتفاقی وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات را می‌توان در جدول (۵) مشاهده نمود.

جدول ۵: دامنه‌ی تغییر دقت شبهه‌مشاهدات بمنظور تولید جوامع آماری از وزن‌های

اتفاقی		
Type of Observations & Quasi Observations	Standard Deviations	Units
Image Space Observations (x & y)	0.5 ~ 2	Pixel
a	10 ~ 1000	Meter
$i, f_0, \Omega_0, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0$	10" ~ 1°	Degree
$f_1, \Omega_1, \omega_1, \varphi_1, \kappa_1$	$\varepsilon^* \sim 2.e-4$	Deg / Row
$\omega_2, \varphi_2, \kappa_2$	$\varepsilon^* \sim 2.e-4$	Deg / Row2

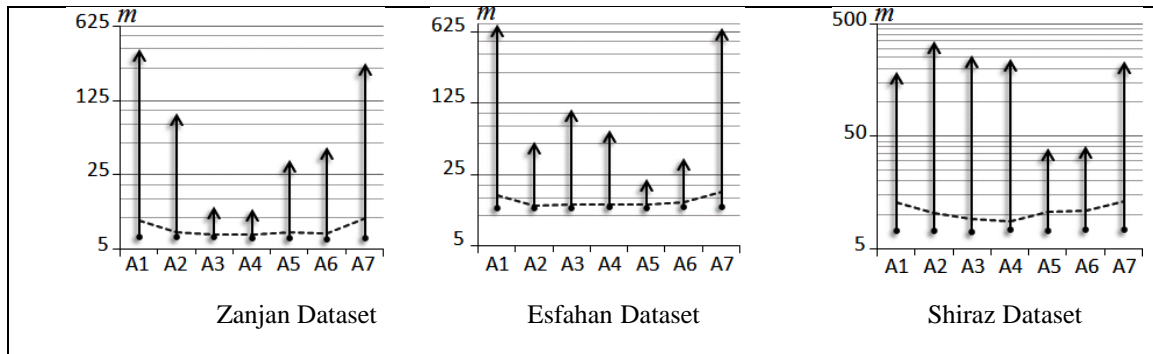
$$\varepsilon = 2.0e-16$$

در جدول (۵) با تفکیک تمامی مشاهدات و شبهه‌مشاهدات ممکن در مدل (O.P.M) به چهار بخش (مشاهدات تصویری، مشاهدات طولی، مشاهدات زاویه‌ای و مشاهدات زاویه‌ای وابسته به زمان)، بازه‌ی تغییرات دقت مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در فرآیند تولید جامعه‌ی آماری برای هر بخش به طور مستقل تعیین شد.

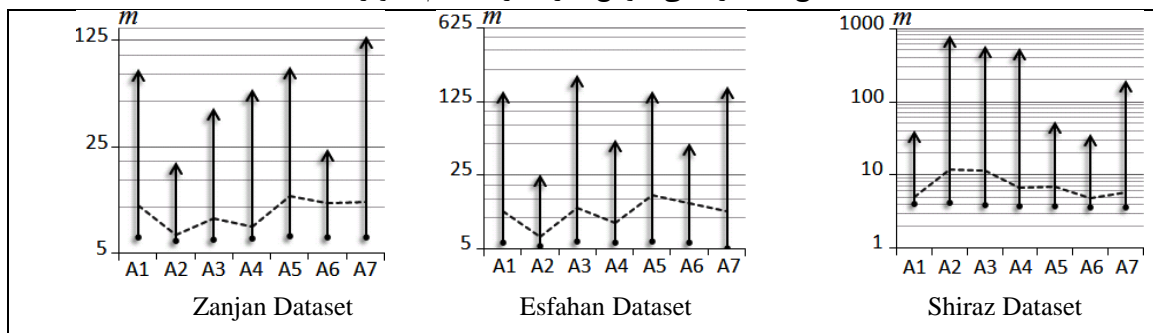
این تحلیل نیز به ازای نقاط کنترلی مشابه با نقاط استفاده شده در بخش (۳-۲-۱) برای هر یک از سه مجموعه‌ی داده‌ی موجود اجرا شد. در هر مجموعه‌ی داده به ازای هر ساختار مورد بحث در جدول (۲)، جامعه‌ی آماری با ۱۰۰۰ عضو برای ساختارهای اتفاقی ماتریس وزن تولید گردید. نتایج آماری دقت فرآیند تقاطع فضایی در نقاط چک برای ساختارهای متفاوت ماتریس وزن در نمودارهای شکل (۲) نشان داده شده‌است. نکته‌ی حائز اهمیت در مورد غربال نتایج اعضای جوامع آماری، حذف نتایج واگرا شده در حل دستگاه معادلات از فرآیند تعیین پارامترهای آماری ترسیم شده در نمودارهای شکل (۲) می‌باشد. محور افق در نمودارهای شکل (۲)، ساختارهای مورد استفاده از ماتریس $[R_{Attitude}]$ مطابق با جدول (۲) و محور عمودی، RMSE نقاط چک را در مقیاس لگاریتمی نشان می‌دهد. در نمودارهای مورد بحث، به ازای هر یک از ساختارهای هفت‌گانه ماتریس $[R_{Attitude}]$ ، سه پارامتر آماری ماکزیمم، مینیمم و میانگین RMSE های تولید شده از جامعه‌ی آماری را به تفکیک مولفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی نمایش می‌دهد.



الف: نتایج دقت مسطحاتی جوامع آماری در سیستم تصویر UTM



ب: نتایج دقت ارتفاعی جوامع آماری در سیستم تصویر UTM



▲ کمترین دقت ▼ بالاترین دقت ---- نمودار میانگین دقت جوامع آماری

شکل ۲: دامنه و میانگین دقت‌های کسب شده از جوامع آماری ماتریس وزن در هر یک از ساختارهای ماتریس $R_{Attitude}$

نتایج موجود در نمودارهای شکل (۲) حاکی از تاثیر مستقیم وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در دقت تعیین موقعیت نقاط زمینی بوده و همگرایی مدل به جواب‌های مختلف در فرآیند حل دستگاه معادلات به ازای تنوع در ساختار ماتریس وزن، گویای گستردگی فضای جواب‌های ممکن در فضای جواب می‌باشد.

از دیگر مواردی که می‌توان از نمودارهای شکل (۲) استنباط نمود، تفاوت اندک میان کمینه‌های RMSE بدست آمده از ساختارهای مختلف مدل می‌باشد. این امر اهمیت انتخاب وزن را هم‌سطح با انتخاب ساختارهای ماتریس $[R_{Attitude}]$ نشان داده، به طوری که اغناء مدل بواسطه‌ی حضور ساختارهای مربوط به مدلسازی اغتشاش به تنهایی شرط تامین دقت بالا در برازش مدل محسوب نمی‌شود.

بواسطه‌ی اثرپذیری بالای نتایج دقت مدل به تغییر مقادیر وزن و همچنین بهینه‌ی دقت‌های بسیار نزدیک بدست آمده به ازای تعریف ساختارهای متنوع مدل مداری از جهت تعداد پارامترهای مجهول، به نظر می‌رسد بتوان با بهینه‌سازی مقادیر وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در فرآیند سرشکنی، نیاز به حضور پارامترهای تصحیح کننده‌ی اضافی را به حداقل رساند. این ایده با در نظر گرفتن مدل مداری صلب (ساختار A1) بواسطه‌ی حضور کمترین پارامترهای مجهول در مدل با انجام فرآیند بهینه‌سازی وزن در بخش آتی مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۲-۳- بهینه‌سازی وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در مدل (O.P.M)

با توجه به نتایج موجود در نمودارهای شکل (۲)، به نظر می‌رسد که مدل مداری صلب (ساختار A1) بتواند با تعریف مناسب مقادیر وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات به عنوان یک مدل کامل ارتباطی میان فضای تصویر و شئی در نظر گرفته شود. به نظر می‌رسد که استفاده از پارامترهای کپلری و مدلسازی پویایی پارامترهای توجیه‌خارجی در تصاویر با



تکنولوژی Push Broom با وابسته ساختن دو پارامتر f و Ω به زمان، گویای شرایط کامل ارتباطی بین دو فضای تصویر باشد و اثر اغتشاشات اندک وضعیتی سنجنده در بازه‌ی کوتاه اخذ یک صحنه‌ی تصویر را بتوان توسط پارامترهای مدل صلب پوشش داد. اما انتخاب مقادیر وزن در نیل به چنین هدفی بسیار مهم خواهد بود.

تعیین مقادیر مناسب برای ماتریس وزن به کمک جستجو در بین مقادیر و ترکیبات مختلف مطابق روش اجرا شده در بخش (۲-۳) با افزایش قابل توجه در هزینه‌های محاسباتی روبرو می‌باشد. از این روی به نظر می‌رسد که استفاده از روش تخمین مولفه‌های واریانس با هدف بهینه‌سازی وزن دستگاه معادلات در فرآیند سرشکنی در کاهش پیچیدگی‌های مربوط شناسایی وزن‌های بهینه کمک شایانی کند. انتظار می‌رود که در صورت استفاده از تکنیک (V.C.E) و متعاقباً تعیین وزن مناسب برای مشاهدات و شبهه‌مشاهدات بتوان با حداقل پارامترهای مدل مداری، با دقت‌های مطلوبی در نتایج ارزیابی دقت در نقاط چک مواجه شد. از سوی دیگر با کاهش تعداد پارامترهای مجهول در مدل می‌توان از تعداد نقاط کنترلی مورد نیاز جهت تخمین و کالیبره کردن پارامترهای مدل کاست که هزینه‌های اجرایی مربوط به تهیه نقاط کنترلی را کاهش می‌دهد.

در ادامه، توان و قابلیت تکنیک تخمین مولفه‌های واریانس مطرح شده در این مقاله در میزان نیل به اهداف مدنظر مورد بررسی قرار گرفت. به همین منظور با مبنا قرار دادن مجموعه‌ی نقاط کنترلی مورد استفاده در بخش (۳-۲-۱) و در نظر گرفتن زیرماتریس واحد برای وزن اولیه شبهه‌مشاهدات و همچنین دقت اندازه‌گیری یک پیکسل برای مشاهدات موجود در فضای تصویر به عنوان مقادیر اولیه در فرآیند بهینه‌سازی وزن، نتایج دقت تقاطع فضایی برای نقاط چک محاسبه گردید. نتیجه‌ی بهینه‌سازی وزن برای هر مجموعه‌ی داده در جدول (۶) نمایش داده شده است.

جدول ۶: دقت نتایج تقاطع فضایی برای نقاط چک هنگام بکارگیری مدل مداری صلب به‌همراه بهینه‌سازی ماتریس وزن

مشاهدات از طریق تکنیک VCE

Zanjan Dataset		Esfahan Dataset		Shiraz Dataset	
PL (m)	H (m)	PL (m)	H (m)	PL (m)	H (m)
7.02	6.85	12.26	6.39	7.72	4.83

مقایسه‌ی نتایج بدست آمده از فرآیند بهینه‌سازی ماتریس وزن در جدول (۶) با بهترین نتایج استفاده‌ی سنتی از مدل پارامترهای مداری در جدول (۴) دقت‌های مطلوب و قابل رقابت نتایج مدل صلب توأم با بهینه‌سازی وزن را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که در ترسیم بردارهای خطا در فضای زمین عدم وجود خطاهای سیستماتیک تأیید شد که این امر گویای تعمیم‌پذیری سراسری مدل صلب در سراسر صحنه‌ی تصاویر مورد استفاده می‌باشد.

به منظور بررسی جامعیت روش بهینه‌سازی وزن و مقایسه‌ی نتایج حاصله از این روش با تکنیک‌های سنتی استفاده از مدل پارامترهای مداری، روند بررسی به ازای ترکیبات مختلفی از نقاط کنترلی در هر مجموعه‌ی داده صورت پذیرفت. نتایج این بررسی در جدول (۷) ارائه شده است.

جدول (۷) ارزیابی بین بهترین نتایج روش سنتی (انتخاب ساختار بهینه‌ی $[R_{Attitude}]$ جهت تامین دقت مطلوب) و نتایج بدست آمده از مدل صلب توأم با بهینه‌سازی وزن را برای تعداد مختلفی از ترکیبات نقاط کنترلی در هر مجموعه‌ی داده نشان می‌دهد. هر سطر از جدول مذکور بعد از معرفی تعداد نقاط کنترل و چک در هر مجموعه‌ی داده، ابتدا بهترین RMSE بدست آمده از تقاطع فضایی در نقاط چک و مشخصه‌ی مربوط به بهترین ساختار پارامترهای مورد استفاده در روش سنتی را نشان می‌دهد. در ادامه با محوریت مدل صلب، دقت‌های حاصل شده از این مدل در دو حالت بهینه‌سازی وزن و ثبات ساختار ماتریس وزن گزارش شده است. وزن‌های استفاده شده در روش سنتی و همچنین مدل صلب با ثبات ساختار ماتریس وزن مطابق با مقادیر جدول (۳) در نظر گرفته شده است. از طرفی تمامی نتایج ارزیابی دقت با تفکیک مولفه‌های مسطحاتی و ارتفاعی گزارش شده است.



جدول ۷: مقایسه دقت کسب شده از حل سنتی مدل مداری با مدل صلب در دو حالت بکارگیری تکنیک VCE و عدم آن به ازای تعداد مختلفی از نقاط کنترلی

Datasets	GCPs		Traditional Method			Solid Model			
	Ctrl	Chk	ID	PL (m)	H (m)	Const. Weights		Weight Opt.	
						PL (m)	H (m)	PL (m)	H (m)
Zanjan	4	29	A3	6.75	6.50	6.95	13.88	6.80	6.51
	6	27	A3	6.47	7.14	6.78	12.76	6.69	7.29
	14	19	A2	6.02	7.32	5.79	11.54	6.13	7.20
	18	15	A2	5.55	5.72	5.79	11.54	5.75	5.85
	20	13	A3	5.81	4.78	5.52	10.82	5.95	5.01
Esfahan	4	31	A2	10.56	7.36	11.31	16.38	11.13	5.45
	5	30	A2	10.60	7.35	11.37	16.67	10.84	5.74
	13	22	A2	10.92	5.90	11.26	13.60	11.00	6.21
	18	17	A2	9.42	6.10	9.54	12.51	9.57	6.46
	20	15	A2	11.08	6.04	11.57	9.00	10.96	5.87
Shiraz	4	34	A4	7.80	6.62	13.74	5.47	8.10	5.08
	6	28	A4	8.85	6.61	14.30	5.54	8.09	4.97
	8	26	A3	8.85	7.09	15.47	5.77	8.31	5.58
	14	20	A2	6.64	3.99	11.53	4.10	6.55	4.37
	20	14	A4	7.74	5.69	11.16	5.35	7.70	5.22

با بررسی و مقایسه‌ی نتایج ارائه شده در جدول (۷)، دقت‌های قابل رقابت و حتی بهتری از نتایج بهینه‌سازی وزن در مدل مداری صلب نسبت به روش سنتی استفاده از مدل پارامترهای مداری مشاهده شد. از این روی می‌توان استنباط نمود که التزام به حضور پارامترهای ماتریس $[R_{Attitude}]$ ، به جهت پوشش اثرات تعیین نامناسب وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات می‌باشد. به همین جهت به نظر می‌رسد مدل مداری صلب با تعریف ماتریس وزن مناسب در دستگاه معادلات، قابلیت مدلسازی کامل شرایط پویای تصویربرداری را داشته و می‌توان آنرا به عنوان یک مدل کامل ارتباطی بین دو فضای زمین و تصویر قلمداد کرد.

بازه‌ی زمانی کوتاه اخذ صحنه‌های تصویربرداری و وجود سیستم‌های حفظ وضعیت در سکوه‌های ماهواره‌ای موجب آنامولی‌های اندکی در وضعیت ایده‌آل ماهواره شده که به نظر می‌رسد مدل مداری صلب قادر به پوشش اثر این اغتشاشات اندک می‌باشد. این پوشش نیز با ایجاد انعطاف مناسب برای تصحیح‌پذیری پارامترهای مدل به کمک وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات میسر می‌باشد. تفاوت دقت‌های بدست آمده در دو حالت بهینه‌سازی وزن و ساختار ثابت ماتریس وزن برای مدل مداری صلب در جدول (۷) گویای این امر می‌باشد.

کاهش تعداد پارامترهای مجهول در مدل مداری صلب، پیچیدگی‌های موجود از جهت تعداد دسته‌پرتوهای لازم به منظور تامین هندسه‌ی مطلوب را برای تخمین و کالیبره کردن پارامترهای مدل کاهش می‌دهد. به همین جهت مدل مداری صلب با نیاز کمتری به نقاط کنترلی، هندسه‌ی لازم برای برآورد پارامترهای مدل را تامین می‌کند. افزایش دقت ارتفاعی در دو منطقه‌ی اصفهان و شیراز به ازای چهار نقطه‌ی کنترلی گویای این استدلال می‌باشد. به همین جهت می‌توان انتظار داشت که دقت‌های حاصل شده از مدل صلب با بهینه‌سازی وزن در نقاط کنترلی با تعداد کم موجب تامین دقت‌های قابل رقابت و حتی بهتری نسبت به روش سنتی استفاده از مدل پارامترهای مداری شود.

۴- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

روش سنتی در حل مدل پارامترهای مداری به منظور تامین دقت مطلوب در نتایج برآزش مدل، مبتنی بر تغییر تعداد و نوع پارامترهای مجهول در ساختار مدلسازی می‌باشد. ماتریس وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در این روش ثابت



بوده و مقادیر آن بر اساس دقت‌های تقریبی تعیین می‌گردد. این روش عموماً با عدم تامین دقت‌های مطلوب در مدل مداری صلب همراه بوده و حضور پارامترهای مربوط به مدلسازی اغتشاشات وضعیتی بر افزایش دقت مدل تاثیرگذار خواهد بود. ابهامات در انتخاب ساختار مطلوب از جهت نوع و تعداد پارامترهای مدلسازی و وابستگی موارد مذکور به تصاویر مورد استفاده از معایب روش سنتی در حل مدل پارامترهای مداری محسوب می‌گردد. از طرفی افزایش پارامترهای مجهول در این روش افزایش همبستگی بین پارامترها و نیاز به نقاط کنترلی را افزایش می‌دهد.

در این مقاله ابتدا به بررسی جایگاه وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در حل مدل پارامترهای مداری پرداخته شد. نتایج نشان داد که تاثیر انتخاب وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات هم سطح با انتخاب سطوح مختلف مدلسازی اغتشاشات وضعیت سنجنده می‌باشد. تولید جوامع آماری از نتایج حل مدل مداری به ازای ساختارهای مختلف ماتریس وزن نشان داد که بهترین دقت‌های بدست آمده در سطوح متفاوت از نقطه‌نظر مدلسازی اغتشاشات وضعیت سنجنده دارای تفاوت چندانی نمی‌باشند. از این روی می‌توان با تنظیم وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات در مدل مداری صلب و در صورت وجود اغتشاشات اندک در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر، با قابلیت تعمیم‌پذیری بالا در سراسر منطقه‌ی تحت پوشش از تصاویر ماهواره‌ای، دقت‌های مطلوبی را بدست آورد.

روش تخمین مولفه‌های واریانس به کمک اعداد آزادی به عنوان یکی از روش‌های موجود در حوزه‌ی تخمین مولفه‌های واریانس، با تعیین وزن مناسب برای مشاهدات و شبهه‌مشاهدات موجب امکان استفاده از مدل مداری صلب تنها با شش پارامتر مجهول $(a, i, f_0, f_1, \Omega_0, \Omega_1)$ در تعیین موقعیت دقیق و بدون حضور خطای سیستماتیک در فضای زمین شد. از سوی دیگر، آزمون استفاده از روش بهینه‌سازی وزن در ترکیبات مختلف نقاط کنترلی در مجموعه‌داده‌های مختلف و مقایسه با بهترین نتایج حاصله از روش سنتی حل مدل پارامترهای مداری گویای جامعیت روش بهینه‌سازی وزن و دقت‌های قابل رقابت این دو روش می‌باشد. البته بررسی قابلیت سایر روش‌های مربوط به تخمین مولفه‌ی واریانس در حل مدل پارامترهای مداری و یا استفاده از این روش‌ها در سایر مدل‌های فیزیکی می‌تواند به عنوان نمونه‌هایی از افق‌های تحقیقاتی در این حوزه محسوب گردد.

از دیگر دستاوردهای پژوهش پیش رو را می‌توان دقت‌های حاصل شده از مدل صلب با بهینه‌سازی وزن در نقاط کنترلی کم دانست. این امر موجب تامین دقت‌های قابل رقابت و حتی بهتری نسبت به روش سنتی استفاده از مدل پارامترهای مداری شود. افزایش دقت تقاطع فضایی برای نقاط چک در دو منطقه‌ی اصفهان و شیراز به ازای چهار نقطه‌ی کنترلی در حل پارامترهای مدل سند این مدعا محسوب می‌گردد.

تامین دقت‌های مطلوب مدل مداری صلب تنها با شش پارامتر مجهول در بدنه‌ی مدلسازی، بواسطه‌ی گنجایش این شش پارامتر در پوشش اثر اغتشاشات وضعیتی سنجنده می‌باشد. بررسی گنجایش مدل مداری صلب در پوشش سطوح مختلف از اغتشاشات وضعیتی سنجنده به منظور تعیین سطح اطمینان استفاده از مدل مداری صلب می‌تواند افق تحقیقاتی در این حوزه مطرح شود. بالطبع حضور اغتشاشات وضعیتی بزرگ در بازه‌ی زمانی اخذ تصویر، استقلال عملکرد ساختارهای مدلسازی اغتشاش را از سایر پارامترهای مدل بارز می‌کند. به نظر می‌رسد در این شرایط، مدل صلب قادر به پوشش اثر اغتشاشات نبوده و به همین جهت پارامترهای تخمین زده شده در مدل صلب قادر به تامین دقت‌های مطلوب نباشند. ایده‌ای که در چنین شرایطی به منظور تحمیل حداقل پارامترهای مربوط به مدلسازی اغتشاشات، به ذهن می‌رسد تفکیک مراحل حل مدل (O.P.M) به دو بخش خواهد بود. نخست حل مدل مداری صلب با استفاده از روش بهینه‌سازی وزن مشاهدات و شبهه‌مشاهدات و در نظر گرفتن مقادیر بدست آمده در این مرحله به عنوان پارامترهای ثابت در ساختار مدل به عنوان ورودی در بخش دوم؛ با این کار انتظار می‌رود که از حداکثر گنجایش پارامترهای مدل مداری صلب استفاده شده باشد. بخش دوم از حل مدل مداری تنها با مجهول در نظر گرفتن پارامترهای حل اغتشاش در ماتریس $[R_{Attitude}]$ انجام می‌پذیرد. شناسایی پارامتر بهینه منوط به تامین برآزش بهتر و



دقت بالاتر در نقاط چک خواهد بود. انتظار می‌رود طی این روند از تعدد پارامترهای موجود در مدل و به تبع آن از ایجاد همبستگی میان پارامترهای مدل کاسته شود.

۵- مراجع

- [1] 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.
- [2] Kim, T., Kim, H. and Rhee, S., 2007, Investigation of Physical Sensor Models for Modeling SPOT 3 Orbits, *Photogrammetric Record*, Vol. 22, pp. 257-273.
- [3] Safdarinezhad, A. and Valadan Zoej, M. J., 2015, 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).
- [4] Safdarinezhad, A. R., 2012, Using Additional Parametres in Orbital Parameters Model for Improvement of Precision in Geometric Correction of Satellite Images., K. N. Toosi University of Technology, Msc Thesis.
- [5] Kim, T. and Dowman, I., 2006, Comparision of two physical sensor models for satellite images: Position-Rotation model and Orbit-Attitude Model, *Photogrammetric Record*, Vol. 21, pp. 110-123.
- [6] Valadan Zoej, M.J., 1997, Photogrammetric Evaluation of Space Linear Array Imagery for Medium Scale Topographic Mapping. University of Glasgow., Ph.D Thesis.
- [7] Konecny, G.; Lohmann, P.; Engel, H.; Kruck, E., 1987, Evaluation of SPOT imagery on analytical photogrammetric instruments, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, Vol. 53, pp. 1223-1230.
- [8] SPOT-Image., 2002, SPOT Satellite Geometry Handbook., s.l. : S-NT-73-12-SI,.
- [9] Amiri-Simkooei, A., 2007, Least-Squares Variance Component Estimation Theory and GPS Applications. Rotterdam : Geodesy 64, p. 208, Ph.D. Thesis.
- [10] Ghilani, C.D. and Wolf, P.R., 2006, Adjustment Computations Spatial Data Analysis. Fourth Edition. New Jersey : John Wiley, p. 610.
- [11] Bahr, H., Altamimi, Z. and Heck, B., 2007, Variance Component Estimation for Combination of Terrestrial Reference Frames. Karlsruhe : University of Karlsruhe (TH)



Optimized solution of the Orbital Parameters Model through Variance Component Estimation in the Geometric Correction of Satellite Imagery

Alireza Safdarinezhad^{1*}, Mehdi Mokhtarzade², Mohammad Javad Valadan Zoej³

1. Ph.D student of remote sensing in Department of Geomatics, KN.Toosi University of technology
2. Assistance 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 (OPM) is a physically constrained model for geometrical correction of satellite imagery. In traditional OPM, It is a common way to change the types and numbers of unknown model parameters in order to achieve desired accuracy. This tedious and time consuming effort is mainly focused on finding a suitable structure for perturbation parameters. Furthermore, defining the fixed structure of weight matrix in adjustment process requires a rich knowledge about the precisions of observations and quasi-observations which is another limitation of traditional OPM. In this paper, the high impact of observation weight matrix in traditional OPM is proved first and then a Variance Components Estimation (VCE) technique is applied to optimize the weight matrix design. Practical results, obtained on 3 different datasets of SPOT and RapidEye stereo images, proved the efficiency of proposed method where acceptable accuracies are achieved. These results are obtained for a rigid OPM where no knowledge of observations and quasi-observations precisions is required and also there is no need to look for optimum structure of perturbation model.

KEYWORDS: Orbital Parameters Model (OPM), Variance Components Estimation (VCE), Colinearity, Weight Matrix, Quasi Observations.

Correspondence Address: Department of the Photogrammetry and Remote Sensing, Faculty of Geodesy and Geomatics, K.N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran. **Tel: +98 9123258852.**

Email: safdari_nezhad@sian.kntu.ac.ir