

تصحیح ساختار هندسی تصاویر رقومی غیرمتریک در فتوگرامتری و بینایی کامپیوتر به منظور استخراج اطلاعات سه بعدی اجسام

فرهاد صمدزادگان

استادیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

علی عزیزی

دانشیار گروه مهندسی نقشه برداری - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

محمد سرپولکی

کارشناس ارشد فتوگرامتری - سازمان نقشه برداری کشور

(تاریخ دریافت ۱۵/۶/۸۱، تاریخ دریافت روایت جدید ۳/۱۱/۸۲، تاریخ تصویب ۲۹/۱/۸۳)

چکیده

با توجه به عدم دسترسی آسان به تصاویر رقومی متریک و هزینه بالای تهیه این تصاویر، بررسی امکان استفاده از این تصاویر به منظور استخراج اطلاعات هندسی از شی و فرمولسازی اعوجاجات موجود در آنها همواره از مسائل مورد بحث در فتوگرامتری رقومی و بینایی کامپیوتر بوده است. ساختار ریاضی روشهای موجود اغلب بر اساس بکارگیری چندجمله ایها و تنها بر اساس نحوه عملکرد سیستم تصویر برداری (اپتیک) بهینه گردیده‌اند و تاثیر همزمان سیستم اپتیک و سیستم رقومی ساز در کاربردهایی که در آنها ساختار هندسی سیستم تصویربرداری و یا رقومی ساز متریک نبوده کمتر بررسی شده است. در این مقاله پس از بررسی ساختار هندسی تصاویر غیرمتریک و روشهای متداول در بازسازی ساختار هندسی آنها، توانایی هر یک از آنها در تصحیح خطاهایی مختلف موجود در این تصاویر بررسی گردیده و بر مبنای مدل ریاضی بهینه نسبت به تصحیح ساختار هندسی آنها اقدام گردید. در این راستا، با استفاده از دوربین غیرمتریک Hasselblad از چهار ایستگاه، تصاویری با پوشش ۶۰٪ از بنای تاریخی "نقش برجسته چشمه علی" برداشته شد. این تصاویر با اسکنر غیرمتریک توپاز با قدرت تفکیک ۱۴ میکرون رقومی گردیده و خطاهای سیستماتیک آنها با استفاده از مدل ریاضی مالتی کوادریک با دقت ± 36 میکرون تصحیح شد. در مرحله بعد با استفاده از پارامترهای مدل مالتی کوادریک تصاویر رقومی بازسازی گردید. مدل هندسی سه بعدی کل نقش برجسته در یک سیستم استرئو فتوگرامتری رقومی با اتصال چهار تصویر به صورت کامل بازیابی شد. بر مبنای اندازه گیری مستقیم روی سطح اینیه، دقت سطح سه بعدی بازیابی شده ± 5 میلیمتر ارزیابی گردید.

واژه‌های کلیدی: فتوگرامتری برد کوتاه، خطاهای سیستماتیک، مدلسازی هندسی، بازسازی تصویر، مدل ریاضی مالتی کوادریک

مقدمه

متریک، سیستم رقومی ساز: غیرمتریک، سیستم تصویربرداری/فیلم: غیرمتریک، سیستم رقومی ساز: متریک، سیستم تصویربرداری/فیلم: غیرمتریک، سیستم رقومی ساز: غیرمتریک، است (شکل ۱). اعوجاجات ایجاد شده می توانند از نوع اتفاقی، شبه سیستماتیک، سیستماتیک و یا ترکیبی از موارد فوق در مراحل ایجاد تصویر باشند.

با توجه به عدم دسترسی آسان به تصاویر رقومی متریک و هزینه بالای تهیه این تصاویر، بررسی امکان استفاده از تصاویر رقومی غیرمتریک به منظور استخراج اطلاعات هندسی از شی و فرمولسازی اعوجاجات موجود در آنها همواره از مسائل مورد بحث در فتوگرامتری و بینایی کامپیوتر بوده است [۱]-[۹]. اعوجاجات موجود در این تصاویر متأثر از عملکرد سیستم تصویر برداری و رقومی ساز در یکی از روندهای: سیستم تصویربرداری/فیلم:

ریاضی بهینه نسبت به بازسازی ساختار هندسی تصاویر اقدام می‌گردد.

تعیین مدل ریاضی بهینه در تصحیح ساختار هندسی تصاویر رقومی غیر متریک

بسیاری از محققان بر روی هندسه تصاویر غیرمتریک کار نموده و در این راستا مدل‌های ریاضی متفاوتی برای ترمیم و بازسازی دو بعدی ساختار هندسی این تصاویر ارائه داده اند [۱]، [۲]، [۶]. صرف نظر از نحوه اعمال تصحیحات، فرمولسازی مورد استفاده در روش‌های موجود اغلب بر اساس بکارگیری چندجمله ایها و تنها بر اساس ساختار سیستم تصویر برداری بهینه گردیده‌اند و هنوز یک بررسی جامع در رابطه با تاثیر همزمان سیستم اپتیک و سیستم رقومی ساز و نتیجتاً مدل ریاضی جامع در این ارتباط ارائه نگردیده است.

این مدلها را میتوان به سه گروه عمده: چندجمله ایها، پروژکتیو دو بعدی و روش مالتی کوادریک تقسیم بندی نمود.

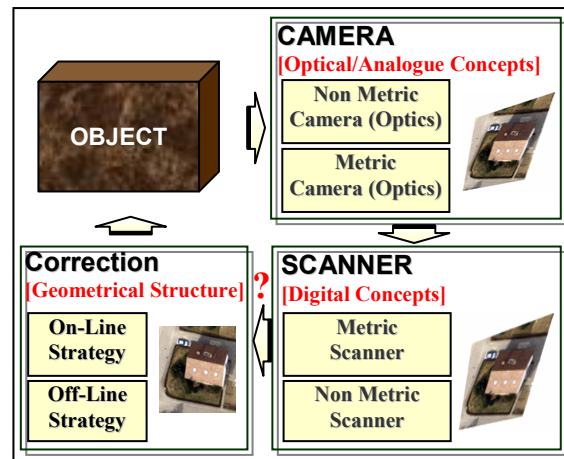
مدل ریاضی پروژکتیو: در روش پروژکتیو تغییرات خطی غیر یکسان در جهت های x و y قابل فرمولسازی بوده و روش فوق کاملترین مدل ریاضی در فرمولسازی اعوجاجات خطی دو بعدی است. مدل ریاضی این روش عبارت است از:

$$X = \frac{a_1x + a_2y + a_3}{c_1x + c_2y + 1}, \quad Y = \frac{b_1x + b_2y + b_3}{c_1x + c_2y + 1} \quad (1)$$

در این رابطه X, Y مختصات کالیبره نقاط، x, y مختصات تصویری مربوطه و a_i, b_i, c_i پارامترهای تبدیل پروژکتیو هستند.

مدل ریاضی درون یابی چند جمله ای: روش درون یابی چندجمله ای با استفاده از انواع مختلف چند جمله ایها قابل انجام می باشد. مدل ریاضی این روش در حالت استاندارد بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} X &= a_1 + \\ &+ a_2x + a_3y \\ &+ b_2x + b_3y \\ &+ a_4xy + a_5x^2 + a_6y^2 \end{aligned}$$



شکل ۱: روندهای معمول در تهیه تصاویر رقومی غیر متریک.

تصحیح خطای موجود در تصاویر رقومی غیرمتریک معمولاً در قالب یکی از دو روش on line و off -line انجام می‌پذیرد. در روش اول مجموعه تصحیحات مورد نیاز در مرحله‌ای بعنوان پردازش اولیه صورت پذیرفته و عملاً در آن سعی در ایجاد تصاویری می‌گردد که تا حد امکان فاقد اعوجاجات ناشی از سیستم تصویرگر/رقومی ساز باشد و در نتیجه با استفاده از روابط متداول و موجود در سیستم‌های فتوگرامتری رقومی، بازسازی هندسی تصاویر می‌تواند تحقق یابد. در روش on line، اعوجاجات هندسی به صورت پارامترهای اضافی مستقیماً به معادلاتی که ارتباط تصویر شیء را برقرار میکنند الحاق میشوند و همزمان با سایر عناصر معادله حل میگردند.

از آنجایی که در این تحقیق هدف بکارگیری یک سیستم فتوگرامتری رقومی موجود در استخراج مدل رقومی شی استفاده شده است، استفاده از راه حل on line به دلیل نیاز به تغییر مدل ریاضی سیستم فتوگرامتری رقومی، امکان پذیر نبود. بدین لحاظ راه حل پیش پردازشی off -line برای تصحیح خطاهای سیستماتیک در نظر گرفته شد.

برای اجرای پیش پردازش به منظور تصحیح خطای سیستماتیک، میبایست ابتدا نسبت به انتخاب مدل ریاضی بهینه برای تصحیح خطاهای موجود در تصاویر رقومی غیرمتریک که ناشی از ترکیب خطاهای سیستم های اپتیکی و رقومی ساز است، اقدام نمود.

در این مقاله پس از بررسی اجمالی مدل‌های ریاضی متداول، نتایج حاصل از بکارگیری این مدلها در رابطه با تصاویر غیر متریک ارائه گردیده و با تعیین مدل

$$(\hat{X}, \hat{Y}) = (X', Y') + (dX, dY) \quad (7)$$

عمده ترین فواید الگوریتم مالتی کوادریک عبارتند از: اعمال یک تابع درون یابی پیوسته، بکارگیری تمام نقاط کنترل زمینی در مدلسازی، قابلیت صدق نمودن هندسه تصویر در هر قید و شرط داده شده، انطباق کامل در نقاط کنترل.

روش تعیین مدل بهینه

جهت ارزیابی کارایی روشهای مطرح شده، یک سیستم نرم افزاری طراحی و پیاده سازی شد. این نرم افزار قابلیت فرمولسازی ساختارهای متفاوت تصاویر غیر متریک را دارا بوده و بر مبنای آن توانایی روشهای فوق در مدلسازی حالتیهای مختلف مطرح در تصاویر رقومی غیر متریک ارزیابی گردید. با توجه به سه گروه متفاوت موجود در تصاویر غیر متریک، ارزیابی های انجام شده در این تحقیق نیز در قالب سه گروه فوق انجام پذیرفت.

مدلهای ریاضی مورد بررسی در این تحقیق عبارتند از: ۱- پروژکتیو، ۲- چندجمله ایها، ۳- مالتی کوادریک. با توجه به عدم توانایی چندجمله ایهای درجه یک در مواجهه با رفتارهای غیر خطی و خطر نوسان منحنی در چندجمله ایهای بالاتر از درجه سه، چندجمله ایهای مورد استفاده در این تحقیق از درجات دو و سه بودند. در هر حالت، پس از رقومی نمودن تصویر تهیه شده از یک شبکه کالیبره، نسبت به قرائت نقاط اقدام گردید. کلیه نقاط در ارزیابی های انجام شده توسط یکنفر و با بزرگنمایی ۸ برابر قرائت گردیده و با اعمال یک مدل ریاضی کانفورمال نسبت به ارزیابی اولیه از دقت سیستم فوق اقدام گردید.

سیستم تصویربرداری/فیلم متریک، سیستم رقومی ساز غیر متریک

به منظور ارزیابی توانایی مدلسازی انجام شده در رابطه با یک سیستم رقومی ساز غیر متریک، یک شبکه کالیبره بادقت هندسی ± 2 میکرون با اسکنر توپاز و با قدرت تفکیک ۱۴ میکرون اسکن گردید. هرچند در روند فوق تاثیر سیستم تصویربرداری در نظر گرفته نشده است، دقت بالای شبکه کالیبره می تواند معادل رفتار سیستم تصویربرداری متریک در نظر گرفته شود. اسکنر

$$\begin{aligned} &+ b_4xy + b_5x^2 + b_6y^2 \\ &+ a_7x^2y + a_8xy^2 + a_9x^3 + a_{10}y^3 + \dots \\ &+ b_7x^2y + b_8xy^2 + b_9x^3 + b_{10}y^3 + \dots \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه بالا X, Y : مختصات کالیبره نقاط، x, y : مختصات تصویری و a_i, b_i پارامترهای مجهول این مدل ریاضی هستند.

مدل ریاضی مالتی کوادریک: این روش بوسیله هاردی در سال ۱۹۶۸ ابداع شده است و اولین بار توسط خود وی در سال ۱۹۷۱ برای درون یابی سطوح نامنظم مورد استفاده قرار گرفت [۴] و [۵]. روند محاسباتی روش فوق، پس از اعمال یک مدل ریاضی چندجمله ای از درجات پایین (حداکثر درجه ۳) و محاسبه باقیمانده ها (dX, dY) بروی نقاط کنترل، عبارت است از:

- محاسبه فاصله $f_j(X', Y')$ بین نقطه (X', Y') در تصویر و هر نقطه کنترل (X_j, Y_j) :

$$f_j(X', Y') = [(X' - X_j)^2 + (Y' - Y_j)^2]^{0.5} \quad (3)$$

- محاسبه فاصله f_{ij} بین نقاط کنترل i, j :

$$f_{ij} = [(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2]^{0.5} \quad (4)$$

- تشکیل ماتریس درون یابی $F = (f_{ij})$.

- حل دستگاه معادلات ذیل به منظور تعیین پارامترهای مدل ریاضی مالتی کوادریک:

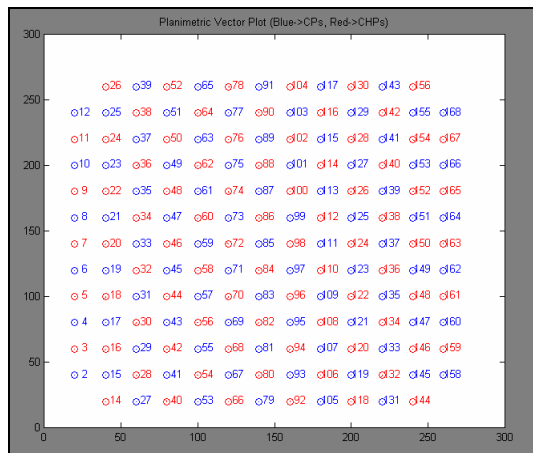
$$\begin{aligned} f_{k1} \cdot a_1 + f_{k2} \cdot a_2 + \dots + f_{kn} \cdot a_n &= dX_k \\ f_{k1} \cdot b_1 + f_{k2} \cdot b_2 + \dots + f_{kn} \cdot b_n &= dY_k \end{aligned} \quad (5)$$

- مقادیر تصحیح هر پیکسل (X', Y') ، با بکار بردن فاصله $f_j(X', Y')$ از معادله ۳ و ضرایب مدل درونیابی مالتی کوادریک به شکل زیر محاسبه میگردد:

$$\begin{cases} f_1 \cdot a_1 + f_2 \cdot a_2 + \dots + f_n \cdot a_n = dX \\ f_1 \cdot b_1 + f_2 \cdot b_2 + \dots + f_n \cdot b_n = dY \end{cases} \quad (6)$$

موقعیت واقعی هر نقطه (X', Y') را می توان با بکار بردن بردارهای بهبود یافته (dX, dY) بصورت زیر محاسبه نمود:

در این مرحله بر مبنای مدل های ریاضی پیاده سازی شده، این خطاها مدل سازی گردیده و توانایی آنها در حالات مختلف بررسی شد. نتایج حاصل از ارزیابی انجام شده در جدول (۲) ارائه گردیده است. همانگونه که مشاهده می گردد بهترین نتایج حاصل در این مرحله مربوط به روش مالتی کوادریک است که در شکل (۳) وضعیت بردارهای خطای نقاط این روش ارائه گردیده است. همانگونه که در جدول (۲) مشاهده می گردد، برخلاف روش های دیگر، در مدل سازی مالتی کوادریک در نقاط کنترل انطباق کامل برقرار گردیده که این امر باعث خواهد گردید دقت و کیفیت کلی روند کار که مجموع نتایج موجود در نقاط کنترل و چک می باشد از وضعیت بهتری برخوردار باشد.



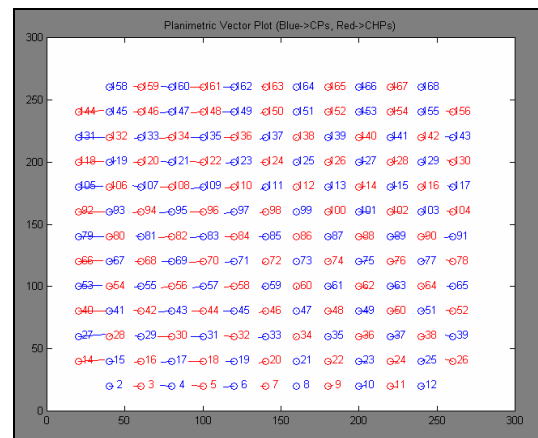
شکل ۳: بردار خطاهای باقیمانده در نقاط شبکه کالیبره، سیستم تصویربرداری متریک، سیستم رقومی ساز غیر متریک، روش مالتی کوادریک.

فوق در عین برخوردار بودن از یک ساختار کاملا غیر متریک در اسکن نمودن تصاویر، از مشخصات طیفی مناسبی برخوردار می باشد. مشخصات عمومی اسکنرفوق در جدول (۱) ارائه گردیده است.

جدول ۱: مشخصات سیستم رقومی ساز توپاز.

| | |
|----------------------------|------------------------------------------------------|
| Geometrical Resolution | Optical: 3800 dpi Interpolative : 8150 |
| Pictorial Resolution | 1bit /pixel |
| Scanning Capability | Transparency / Reflective Color / Black and White |
| Maximum Format of Original | Reflective: 305x457 mm Transparency: 210x457mm |

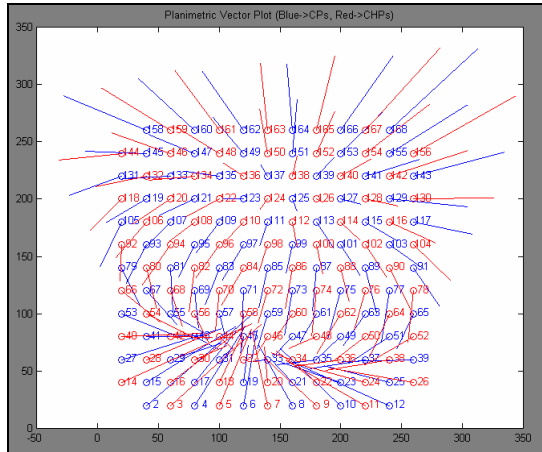
شکل (۲) بیانگر وضعیت خطاها در نقاط شبکه می باشد. مقادیر RMSE محاسبه شده برای مولفه های X و Y نقاط شبکه به ترتیب با استفاده از تبدیل کانفورمال عبارت بودند از: $\pm 7/11$ و $\pm 66/25$ میکرون. شکل (۲) بیانگر وضعیت خطاها در نقاط شبکه است. با توجه به مقادیر RMSE و نحوه پراکندگی آنها در تصویر رقومی ایجاد شده، نیاز به اعمال یک مدل ریاضی به منظور حذف و یا تعدیل خطاهای موجود در تصویر ضروری است.



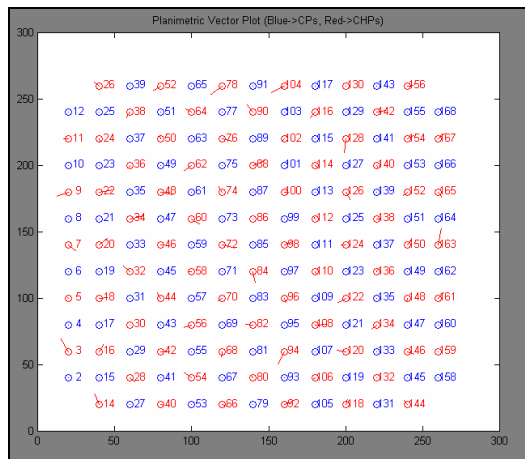
شکل ۲: بردار خطاهای باقیمانده در نقاط شبکه کالیبره پس از رقومی گردیدن با سیستم توپاز.

جدول ۲: مقادیر RMSE باقیمانده در نقاط کنترل و چک شبکه کالیبره در روش های مختلف.

| سیستم تصویربرداری متریک، سیستم رقومی ساز غیر متریک | | | | درجه | مدل ریاضی |
|----------------------------------------------------|--------|-------------------------------|--------|------|---------------|
| خطا در ۸۲ نقطه چک (میکرون) | | خطا در ۸۳ نقطه کنترل (میکرون) | | | |
| RMSE_E | RMSE_N | RMSE_E | RMSE_N | | |
| ۶۳/۷ | ۱۷/۷ | ۶۰/۲ | ۱۸/۱ | — | پروژکتیو |
| ۶۰/۸ | ۶/۱۶ | ۶/۱ | ۵۷/۲۴ | ۲ | چند جمله ای |
| ۶/۶۴ | ۷/۸۱ | ۶ | ۷/۰۷ | ۳ | |
| ۶/۳ | ۷/۹ | ۰/۰ | ۰/۰ | — | مالتی کوادریک |



شکل ۴: بردار خطاهای باقیمانده در نقاط شبکه کالیبره تصویر دوربین Hasselblad پس از رقومی گردیدن با اسکتر TD.



شکل ۵: بردار خطاهای باقیمانده در نقاط شبکه کالیبره، سیستم تصویربرداری غیرمتریک، سیستم رقومی ساز متریک، روش مالتی کوادریک.

سیستم تصویربرداری/فیلم غیرمتریک، سیستم رقومی ساز غیرمتریک

در این مرحله تصاویر غیر متریک دوربین Hasselblad (بخش سیستم تصویربرداری) با استفاده از اسکتر غیر متریک توپاز (بخش روش تعیین مدل بهینه) و با قدرت تفکیک ۱۴ میکرون رقومی گردیده و نقاط شبکه فوق قرائت گردیدند. RMSE موجود در مولفه های X و Y نقاط شبکه پس از اعمال ترانسفورماسیون افاین عبارتند از: $\pm 379/30$ ، $\pm 371/61$ میکرون. شکل (۶) بیانگر وضعیت خطاها در نقاط شبکه است.

جدول ۳: مشخصات دوربین Hasselblad.

| | |
|------------------|-------------|
| Maximum Aperture | 3.5 |
| Focal Length | 100.3mm |
| Diaphragm | 3.5 – 22 |
| Focusing Range | 90m - ∞ |
| Frame Dimension | 5.۵ × 5.5cm |

جدول ۴: مشخصات سیستم تصویر برداری متریک TD.

| | |
|----------------------------|--------------------------------------------|
| Geometrical Resolution | 7,14,28,56,112 224Micron |
| Geometrical accuracy | <2 Micron |
| Scanning Capability | Transparency Color / Black and White |
| Maximum Format of Original | 27 × 256mm |

سیستم تصویربرداری/فیلم غیرمتریک، سیستم رقومی ساز متریک

به منظور ایجاد داده های مناسب برای این گروه، نسبت به عکسبرداری از یک شبکه کالیبره با دقت هندسی ± 2 میکرون با دوربین Hasselblad اقدام گردید. مشخصات عمومی دوربین فوق در جدول (۳) ارائه گردیده است.

تصاویر حاصل در مرحله بعد با استفاده از سیستم رقومی ساز متریک اینترگراف TD با قدرت تفکیک ۱۴ میکرون رقومی گردیده و نقاط شبکه فوق قرائت گردیدند. مشخصات عمومی اسکتر فوق در جدول (۴) ارائه گردیده است.

RMSE موجود در مولفه های X و Y نقاط شبکه پس از اعمال ترانسفورماسیون افاین به ترتیب عبارتند از: $\pm 330/05$ و $\pm 365/28$ میکرون. شکل (۴) بیانگر وضعیت خطاها در نقاط شبکه است. نتایج حاصل از بکارگیری مدل‌های ریاضی مورد نظر بر روی این نقاط و نمایش بردار خطاهای بهترین نتیجه که مربوط به روش مالتی کوادریک بوده است در جدول (۵) و شکل (۵) ارائه گردیده است.

جدول ۵: مقادیر RMSE باقیمانده در نقاط کنترل و چک شبکه کالیبره در روش های مختلف.

| سیستم تصویربرداری متریک، سیستم رقومی ساز غیر متریک | | | | درجه | مدل ریاضی |
|----------------------------------------------------|--------|-------------------------------|--------|------|---------------|
| خطا در ۸۲ نقطه چک (میکرون) | | خطا در ۸۳ نقطه کنترل (میکرون) | | | |
| RMSE_E | RMSE_N | RMSE_E | RMSE_N | | |
| ۵۴/۶ | ۴۶/۹ | ۵۴/۷ | ۴۹/۴ | — | پروژکتیو |
| ۴۶/۵۷ | ۵۵/۸۸ | ۴۸/۵۸ | ۵۱/۷۶ | ۲ | چند جمله ای |
| ۴۴/۰۶ | ۴۳/۷۱ | ۳۵/۴۶ | ۴۰/۵۳ | ۳ | |
| ۴۴/۰ | ۴۲/۳ | ۰/۰ | ۰/۰ | — | مالتی کوادریک |

در جدول (۶) ارائه گردیده است. بهترین نتایج حاصل در این مرحله مجدداً مربوط به روش مالتی کوادریک است که در شکل (۷) وضعیت بردارهای خطای نقاط در این روش ارائه گردیده است

نتایج

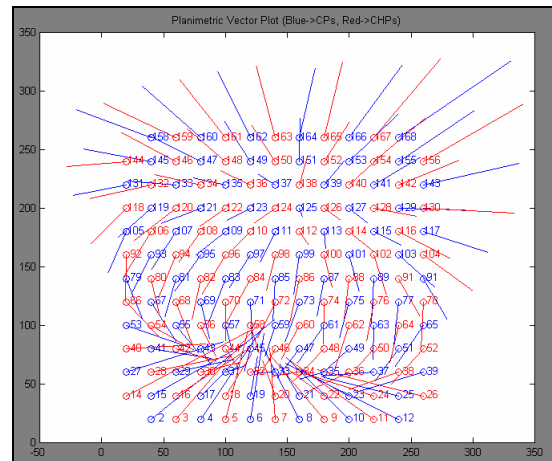
با توجه به مقادیر بدست آمده RMSE در روشها و ترکیب های متفاوت، نکات زیر قابل طرح است:

- بهترین دقت بدست آمده مربوط به مدل مالتی کوادریک است که برای تصاویر گروه اول ($\pm 7/9$ ، $\pm 6/3$) میکرون، تصاویر گروه دوم ($\pm 42/3$ ، $\pm 44/0$) میکرون، تصاویر گروه سوم ($\pm 56/1$ ، $\pm 46/5$) میکرون روی نقاط چک و صفر بر روی نقاط کنترل است.

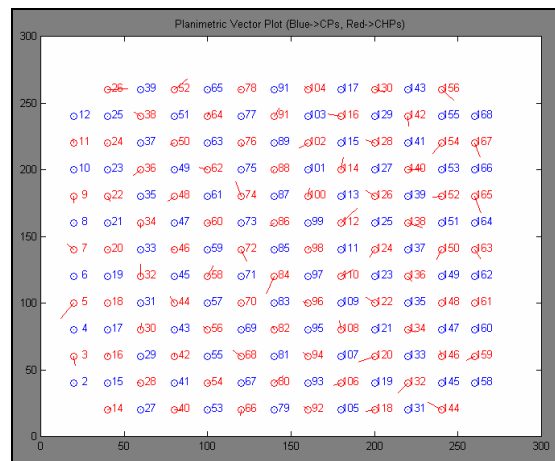
با افزایش درجه ترهما (سه به بالا) در روش چندجمله ای، هرچند خطای باقیمانده در نقاط کنترل کاهش می یابد، مدل ریاضی فوق دچار نوسان در بین نقاط کنترل گردیده و خطای مدلسازی بر روی نقاط چک افزایش می یابد.

- نوع و تعداد ترم های مدل ریاضی چندجمله ای کاملاً وابسته به خصوصیات رفتاری تصویر غیرمتریک مورد نظر بوده و در نتیجه این پارامترها در رابطه با هر تصویر دیگر متفاوت بوده و میبایست تعیین گردند. این در حالیست که در عمل یک روش کاملاً خودکار که دارای کارایی مناسبی هم باشد نیز برای انجام این روند موجود نیست.

- هرچند مدل ریاضی پروژکتیو، کامل ترین مدل ریاضی جهت فرموله کردن اعوجاجات خطی می باشد، با توجه به رفتارهای پیچیده سیستمهای اپتیک و رقومی سازهای غیر متریک، چنین دگرگونی هایی به هیچ عنوان قابل فرمولسازی با روش پروژکتیو، که در بسیاری از سیستمهای معمول فتوگرامتری رقومی و بیسنایی



شکل ۶: بردار خطاهای باقیمانده در نقاط شبکه کالیبره تصویر دوربین Hasselblad پس از رقومی گردیدن با اسکتر توپاز.



شکل ۷: بردار خطاهای باقیمانده در نقاط شبکه کالیبره، سیستم تصویربرداری متریک، سیستم رقومی ساز غیر متریک، روش مالتی کوادریک.

مشابه با حالت قبل، داده های موجود در غالب سه گروه فرمول ریاضی مدلسازی گردیده و توانایی آنها در حالات مختلف بررسی گردید. نتایج حاصل از ارزیابی انجام شده

جدول ۶: مقادیر RMSE باقیمانده در نقاط کنترل و چک شبکه کالیبره در روش های مختلف.

| سیستم تصویربرداری متریک، سیستم رقومی ساز غیر متریک | | | | | |
|----------------------------------------------------|--------|-------------------------------|--------|------|---------------|
| خطا در ۸۲ نقطه چک (میکرون) | | خطا در ۸۳ نقطه کنترل (میکرون) | | درجه | مدل ریاضی |
| RMSE_E | RMSE_N | RMSE_E | RMSE_N | | |
| ۶۷/۹ | ۶۳/۸ | ۶۳/۱ | ۵۴/۶ | — | پروژکتیو |
| ۶۱/۰۰ | ۶۶/۶۷ | ۵۳/۹۱ | ۶۲/۴ | ۲ | چند جمله ای |
| ۴۶/۶۵ | ۵۳/۲۳ | ۳۴/۱۶ | ۴۹/۱۷ | ۳ | |
| ۴۶/۵ | ۵۶/۱ | ۰/۰ | ۰/۰ | — | مالتی کوادریک |

در ادامه، پس از مروری مختصر بر تاریخچه و موقعیت نقش برجسته چشمه علی، مراحل مختلف اجرای پروژه شامل طراحی محل ایستگاههای تصویربرداری، عملیات نقشه برداری ژئودتیک، تصحیح ساختار هندسی تصاویر و مدلسازی سه بعدی هندسی این نقش برجسته مورد بحث قرار خواهد گرفت.

تاریخچه و موقعیت نقش برجسته "چشمه علی"

در شمال شهر قدیم ری صخره‌ای سخت وجود دارد که از میان آن چشمه جوشانی جاری است. این چشمه را امروزه "چشمه علی" می‌گویند (شکل ۸). لکن در روزگار پیشین آنرا "نهر سورنی" یا "نهر سورنا" می‌نامیدند. طبق اسناد بدست آمده، در کنار و امتداد سبز این چشمه نخستین بنای شهر ری پی افکنده شد و آنرا ری برین یا ری میانه می‌نامیدند. این شهر بتدریج از سوی جنوب شرقی گسترش یافت. بخش جدید ری که پهنه ای است در جنوب شرقی و دامنه کوه بی بی شهر بانو، آنرا ری زیرین یا ری سفلی نامگذاری کردند.



شکل ۸: تصویر ماهواره ای آیکونوس از تپه چشمه علی.

کامپیوتری مورد استفاده می باشد، نیست.

استخراج اطلاعات هندسی و مدلسازی رقومی نقش برجسته "چشمه علی" با استفاده از فتوگرامتری رقومی برد کوتاه

با تعیین مدل ریاضی بهینه در تصحیح ساختار هندسی تصاویر غیرمتریک رقومی، نسبت به بکارگیری روند فوق به منظور استخراج اطلاعات هندسی یکی از نقش برجسته‌های مطرح در کشور که برای سازمان میراث فرهنگی کشور از اهمیت ویژه ای برخوردار بود اقدام گردید.

• ثبت ساختار و اطلاعات هندسی بناهای تاریخی همواره یکی از نیازهای ضروری و مطرح در میراث فرهنگی کشور و سایر ارگانهای مرتبط بوده است. وجود این اطلاعات به منظور حفظ، حراست و در مواقع لزوم بازسازی این بناها بسیار حائز اهمیت است. از اینرو با توجه به اهمیت ثبت اطلاعات هندسی بناهای تاریخی با دقت مطلوب، سازمانهای ذیربط همواره در جستجوی روشی کارا و دقیق برای این منظور بوده اند. این در حالی است که متدهای متداول در مواجهه با تصاویر غیرمتریک اساساً یا دارای دقت مطلوب نبوده و یا بعضاً در پوشش کامل جزئیات بنا ناتوان هستند. روش فتوگرامتری برد کوتاه روشی کارا است که در آن با بکارگیری مدل ریاضی مناسب امکان رسیدن به دقت مطلوب کاملاً میسر است. در این تحقیق نقش برجسته "چشمه علی" واقع در شمال شهر قدیمی ری بعنوان بنای نمونه به منظور استخراج و مدلسازی سه بعدی هندسی آن با استفاده از فتوگرامتری رقومی برد کوتاه انتخاب گردید.

استفاده از چنین دوربینهایی، بعلت وجود اعوجاجات قابل توجه غیرقابل کنترل، که ناشی از خطای اعوجاج عدسی، تغییر بعد فیلم، مسطح نبودن صفحه فیلم و نظایر آن است، سبب عدم امکان تقاطع همزمان کلیه شعاعهای متناظر و در نتیجه عدم امکان تشکیل مدل هندسی سه بعدی با دقت مطلوب خواهد گردید و در نتیجه استفاده از دستگاههای تبدیل متدوال در فتوگرامتری نا میسر می شود [۲].

اولین مرحله در انجام پروژه، طراحی موقعیت صحیح قرار گرفتن دوربین ها است. در تعیین وضعیت فوق عوامل بسیار متفاوتی از قبیل: مشخصات فیزیکی دوربین، مشخصات شی و دقت مورد نیاز در پروژه مطرح است.

با توجه به اینکه کاهش فاصله عکسبرداری سبب افزایش مقیاس تصویر شده و این امر موجب افزایش دقت اندازه گیری می شود، میبایست تصویربرداری حتی المقدور با بزرگترین مقیاس ممکن صورت گیرد، ولی در صورت بزرگی نسبی ابعاد شی، کاهش فاصله تصویربرداری سبب افزایش تعداد تصاویر جهت پوشش کلی بنا خواهد گردید. این امر به نوبه خود مشکل اتصال قطعات تصویر را بدنبال خواهد داشت. بنابراین، ایستگاه بهینه تصویربرداری باید در محلی انتخاب گردد که علاوه بر ایجاد مقیاس قابل قبول، تعداد تصاویر نیز به حداقل برسد. عامل دیگری که تعیین محل تصویربرداری را محدود می نمود، امکان استقرار دوربین با توجه به وضعیت توپوگرافی و سایر موانع غیر طبیعی موجود در اطراف بنا است (شکل ۸).

با توجه به وضعیت خاص بنا و با در نظر گرفتن کلیه ملاحظات مطرح شده در بالا و نیز با توجه به پارامترهای دوربین Hasselblad (ارائه شده در جدول ۳)،

نهر سورین یا رود که بعدها آنرا چشمه علی نامیدند نام خود را از خاندان بزرگ سورن که منصب سپهسالاری در دستگاه اشکانیان داشته اند، اتخاذ کرده است. در خصوص نقش برجسته چشمه علی در کتاب مرآةالبلدان چنین آمده است: خاقان خُلد آشیان، فتحعلی شاه طاب ا... ثراه، که اغلب به چشمه علی به تفرج می رفتند، در سال ۱۲۴۸، حکم فرمودند در بالای چشمه علی صفا ای را هموار کرده، بر روی سنگ تمثال آن پادشاه ذی جاه را با بعضی از شاهزادگان منقور سازند و بعضی اشعار در دور آن صفا کتیبه کرده که از تاریخ این عمل خبر دهد.

در این نقش برجسته فتحعلیشاه قاجار بر روی تخت نشسته است و ملازمان و درباریان اطراف او را گرفته اند. و باز از سمت راست فتحعلیشاه قاجار دیده می شود که در زیر چتر ایستاده است افراد دیگر نواب شیخ علی میرزا، نواب مجیدقلی میرزا، نواب اشرف والا بهمن میرزا هستند. (شکل ۹).

انتخاب دوربین و طراحی موقعیت

ایستگاههای تصویربرداری

به منظور اجرای این پروژه مهمترین مشکلی که میبایست حل می گردید مسئله عدم امکان استفاده از دوربین متریک برای تصویربرداری بود. این امر استفاده از دوربینهای غیر متریک را اجتناب ناپذیر می کرد. در این راستا، با توجه به توان تفکیکی بسیار مطلوب عدسی دوربین غیرمتریک Hasselblad موجود در سازمان نقشه برداری کشور، تصمیم بر این گرفته شد تا از این دوربین برای اجرای پروژه استفاده شود.



شکل ۹: نقش برجسته چشمه علی.

اجرای عملیات نقشه برداری ژئودتیک

به منظور تصحیح ساختار غیرمتریک تصاویر تهیه شده و تعیین پارامترهای مجهول انتقال از فضای تصویر به شی، در پروژه فوق از مختصات اندازه گیری شده یک شبکه نقاط متراکم در سطح نقش برجسته استفاده گردید (شکل ۱۱). مختصات همین نقاط در سیستم مختصات تصویر نیز اندازه گیری شد.

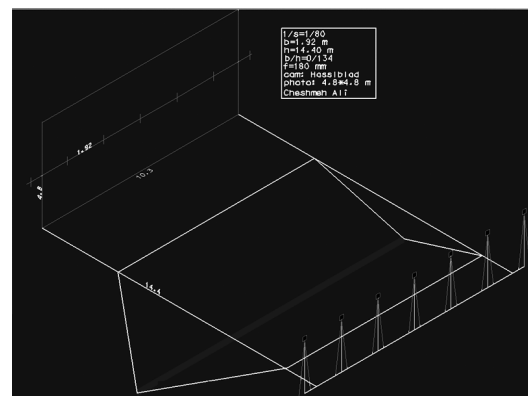
از آنجاییکه نقاط فوق میبایست در مرحله بعد در فضای تصویر قرائت گردند، در انتخاب آنها سعی گردید از عوارض طبیعی قابل آدرس دهی که از نقطه نظر مسطحاتی و ارتفاعاتی قابل اندازه گیری در سیستم فتوگرامتری باشند استفاده گردد. شکل (۱۲) نمایش دهنده محل انتخاب برخی از نقاط اندازه گیری شده در سطح اینیه است. عمل اندازه گیری این شبکه نقاط بر مبنای نصب و مشاهده تارگت های چسبی بروی اینیه و استفاده از یک دستگاه توتال استیشن سوکیشا صورت گرفت (شکل ۱۲).

مدلسازی و تصحیح خطای سیستماتیک دوربین Hasselblad

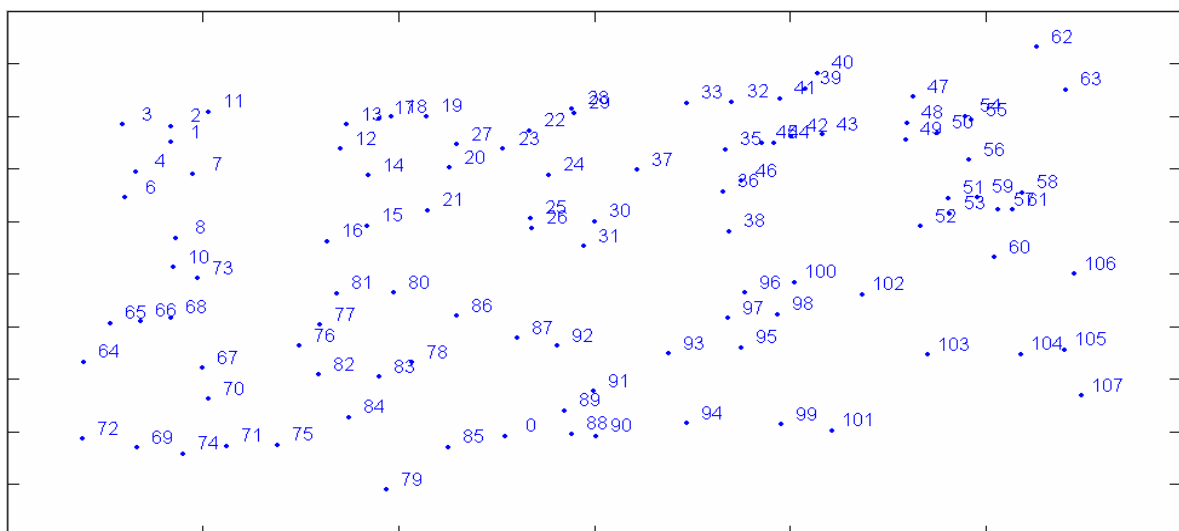
یکی از نکات مطرح در بکارگیری معادلات مالتی کوادریک، وضعیت و تراکم نقاط کنترل است. در پروژه حاضر شرایط زیر در ایجاد نقاط کنترل در نظر گرفته شده است:

و نیز پوشش ۶۰٪ تصاویر، فاصله تصویربرداری حدود ۱۶ متر انتخاب گردید. از آنجایی که سطح بنا تقریباً تشکیل یک صفحه مستوی را می داد محل ایستگاههای تصویربرداری در امتداد یک خط مستقیم با فاصله ۱۶ متر نسبت به نقش برجسته در نظر گرفته شد. برای پوشش کل سطح نقش برجسته چهار ایستگاه تصویربرداری با فواصل مساوی انتخاب گردید. مقدار B/H برای وضعیت تصویربرداری فوق ۰/۲۴ محاسبه گردید. شکل (۱۰) وضعیت قرار گرفتن دوربینها نسبت به نقش برجسته را نشان می دهد.

با تعیین موقعیت مناسب قرارگیری دوربین ها، تصاویر مورد نیاز تهیه گردیده و در مرحله بعد این تصاویر با استفاده از اسکنر غیرمتریک توپاز رقومی گردیدند (مشخصات مندرج در جدول ۱).

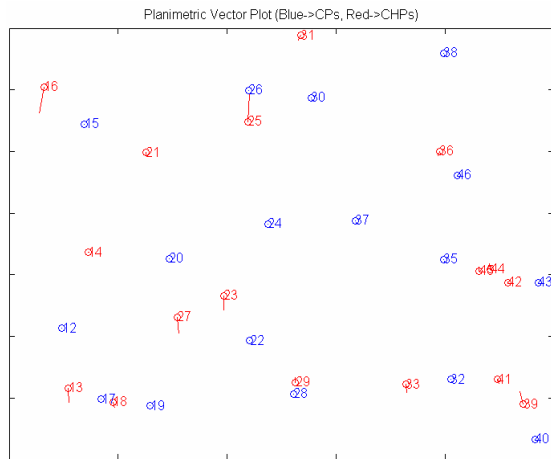


شکل ۱۰: وضعیت ایستگاه های تصویربرداری .



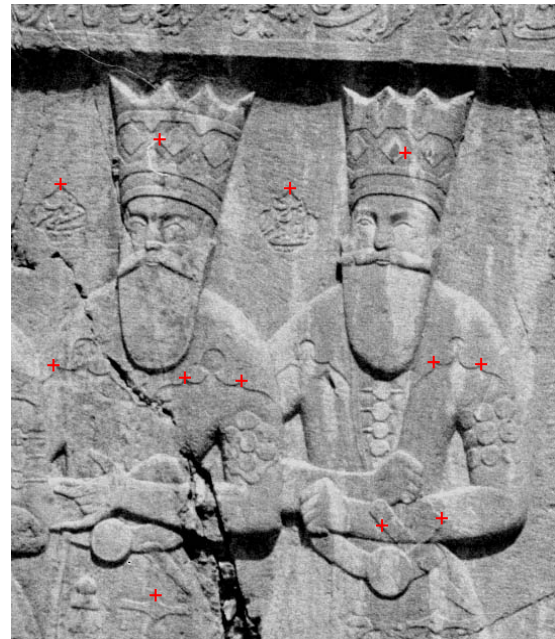
شکل ۱۱: پراکندگی نقاط کنترل در سطح نقش برجسته.

پس از اعمال مدل مالتی کوادریک در صفحه تصویر و محاسبه ضرایب آن بر مبنای نقاط کنترل موجود در هر تصویر، نسبت به نمونه برداری مجدد تصاویر رقومی بر مبنای ترانسفورماسیون مالتی کوادریک معکوس اقدام گردید.



شکل ۱۳: بردار خطاهای باقیمانده در نقاط مورد استفاده در تصحیح عکس دوم.

بازسازی مدل سه بعدی نقش برجسته چشمه علی با تصحیح ساختار تصاویر و حذف و یا کاهش تاثیر خطاهای سیستماتیک بر روی تصاویر بازسازی شده، تصاویر فوق بعنوان تصاویر تقریباً فاقد خطا به منظور بکارگیری در یک سیستم فتوگرامتری رقومی در نظر گرفته شدند. در سیستم فوق تصاویر بازسازی شده و نقاط کنترل موجود در هر تصویر بعنوان ورودی در نظر گرفته شده و بر مبنای بکارگیری یک ترانسفورماسیون DLT

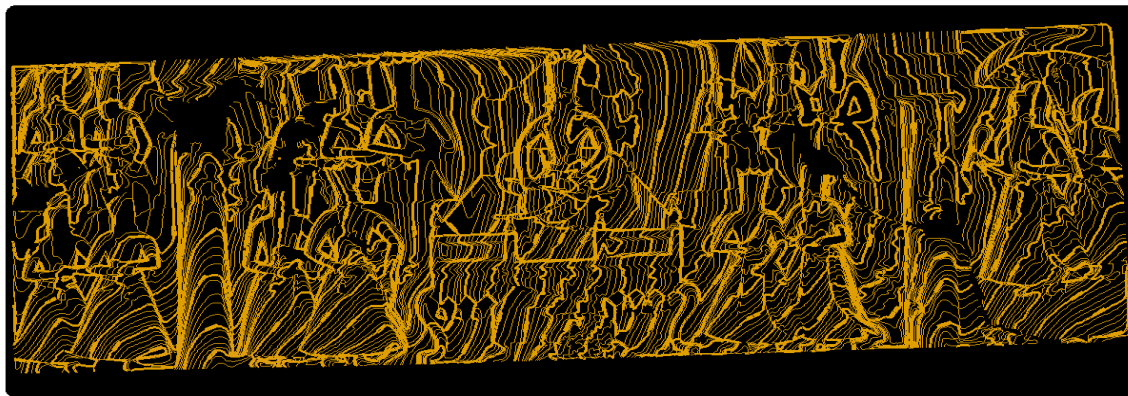


شکل ۱۲. نمونه هایی از نقاط کنترل اندازه گیری شده در سطح کتیبه.

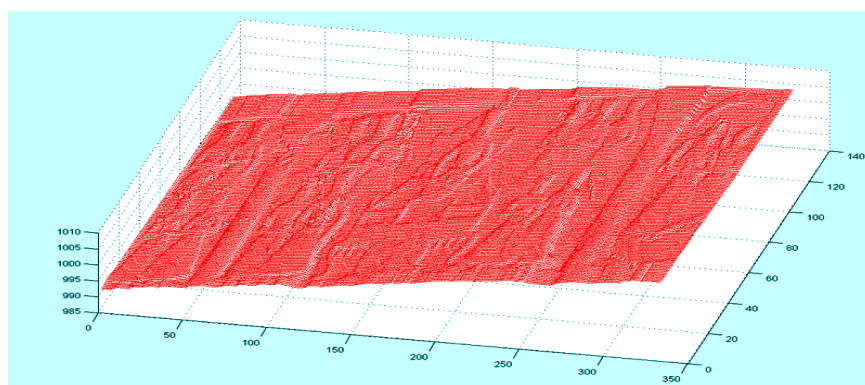
- نقاط کنترل در سطح زمینه شیء با تراکم قابل توجه و با پراکندگی یکنواخت طراحی گردیدند.
- این نقاط تشکیل یک صفحه مستوی را داده و از اینرو جابجایی ارتفاعی قابل توجهی در صفحه تصویر برای این نقاط ایجاد نگردید.
RMSE بروی نقاط چک پس از ترانسفورماسیون با ضرایب مالتی کوادریک، ± 36 میکرون ارزیابی گردید. شکل (۱۳) بیانگر وضعیت بردار خطاها در تصویر دوم است.



شکل ۱۴: اطلاعات مسطحاتی استخراج شده از نقش برجسته چشمه علی.



شکل ۱۵: اطلاعات ارتفاعی استخراج شده از نقش برجسته چشمه علی.



شکل ۱۶: مدل رقومی بازیابی شده سطح نقش برجسته چشمه علی.

می گردد، صورت گرفت و بدین وسیله اتصال پیوسته و نرم بین عوارض مشترک مدلها در سرتاسر داده های خروجی برقرار گردید.

با توجه به روند تصحیح خطاهای سیستماتیک تصاویر، مجموعه پردازش های مورد نظر به منظور تعیین مدل رقومی سطح شی از تصاویر در سیستم فتوگرامتری مورد استفاده نیز بدون تغییر قابل بکارگیری بود. از اینرو در این مرحله نسبت به مدل سازی سه بعدی اتوماتیک سطح نقش برجسته اقدام گردید. نمایش سه بعدی نتایج حاصل از مدلسازی فوق در شکل (۱۶) نمایش داده شده است.

نتیجه گیری

در این تحقیق مدل ریاضی مالتی کوادریک در پیش پردازش مورد بررسی قرار گرفت و توانایی آن برای تصحیح خطای سیستماتیک کاملاً نشان داده شد. البته موفقیت این مدل ریاضی به مقدار قابل توجهی به تعداد و پراکندگی نقاط کنترل بستگی دارد. در این پروژه، به علت

ارتباط بین فضای شی و تصویر برقرار گردید:

$$x = \frac{a_0 + a_1X + a_2Y + a_3Z}{1 + c_1X + c_2Y + c_3Z}, y = \frac{b_0 + b_1X + b_2Y + b_3Z}{1 + c_1X + c_2Y + c_3Z} \quad (۸)$$

در رابطه بالا: X, Y, Z مختصات سه بعدی نقاط در فضای شی، x, y مختصات متناظر در فضای تصویر، و $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, c_1, c_2, c_3$ ضرایب تبدیل می باشند. برای ارزیابی دقت مدل سه بعدی تشکیل شده در سیستم، تعداد ۲۰ طول مشخص بروی مدل بازیابی شده اندازه گیری شده و همین طولها مستقیماً در روی سطح بنا نیز اندازه گیری گردید. دقت حاصل از مقایسه مقادیر متناظر در حدود ± 5 میلی متر برآورد گردید. با توجه به قابل قبول بودن دقت بدست آمده در مدلسازی، اطلاعات سه بعدی (مسطحاتی و ارتفاعی) ابنیه در سیستم فتوگرامتری رقومی استخراج گردید (اشکال ۱۴ و ۱۵). اتصال گرافیکی عوارض بین مدلها با استفاده از تکنیک تطابق عوارض^۲ بروی مدل سه بعدی که از طریق آن عوارض برداشت شده مدل قبل در مدل جدید ظاهر

انجام دو اسکن متوالی (اسکن نمودن شبکه و عکس) باشد، ۲- در این تحقیق تنها جنبه هندسی بخشهای اپتیک و رقومی ساز سیستم در نظر گرفته شده است و بدیهی است این سیستمها میبایست از حداقل ویژگیهای مورد نیاز به منظور ثبت اطلاعات طیفی برخوردار باشند.

تشکر و قدردانی

پروژه تحقیقاتی ارائه شده با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه تهران (شماره ۶۲۱/۳/۵۸۹)، امکانات سازمان نقشه برداری کشور و گروه مهندسی نقشه برداری دانشکده فنی اجرا گردید. نگارندگان بدینوسیله مراتب قدردانی خود را از این سازمان ها اعلام می‌دارند. نگارندگان همچنین بدینوسیله از زحمات آقایان مهندس محمدعلی شریفی، مهندس عباس عابدینی و سایر اعضا گروه مهندسی نقشه برداری که در اجرای این پروژه همکاری نموده اند و نیز آقای ناصر پازوکی ریاست محترم سازمان میراث فرهنگی تهران که علاوه بر سایر زحمات، متن تاریخچه چشمه علی را در اختیار نگارندگان قرار دادند، تشکر می‌نمایند.

ماهیت خاص شیء مورد نظر هیچگونه مانعی در افزایش تراکم نقاط کنترل وجود نداشت و این نقاط مترکم تضمین خوبی برای رسیدن به دقت مطلوب در مدل مالتی کوادریک را ایجاد کردند.

با توجه به نتایج فوق به نظر می‌رسد روش ارائه شده در این تحقیق به خوبی قابلیت مدلسازی کلیه تصاویر غیر متریک مطرح را دارا باشد.

در روند ارائه شده (Off-line)، مدل ریاضی از پیش طراحی شده برای تشکیل مدل هندسی سه بعدی در سیستم استروئو فتوگرامتری می‌تواند بدون تغییر باقیمانده و در عوض تغییرات لازم در یک مرحله پیش پردازشی به یکایک پیکسلها اعمال گردد.

هرچند نتایج حاصل از تحقیق فوق بیانگر افق جدیدی در بکارگیری سیستم های غیر متریک به منظور استخراج اطلاعات متریک است، این بدان معنی نیست که با بکارگیری هر نوع سیستم غیرمتریکی میتوان به نتایج مطلوب دست یافت. در این راستا میبایست نکات ذیل در نظر گرفته شود: ۱- در مدلسازی ارائه شده فرض بر ثابت بودن رفتار سیستم رقومی ساز در یک بازه زمانی است که این بازه زمانی در بدترین شرایط میبایست معادل زمان

مراجع

- 1 - Baltasvias, E. et. al. (1998). *Geometric and Radiometric Evaluation of the DSW300 Roll Film Scanner*, IAPRS, PP. 217-234.
- 2 - Clowell, R. N. (1980). *Manual of Photogrammetry (2nd Edition)*, American Society of Photogrammetry.
- 3 - Ehlers, M. and Fogel, D. N. (1990). *High Precision Geometric Correction of Airborne Remote Sensing Revisited: The Multiquadric Interpolation*, Spie, Vol. 2315, PP. 814-823.
- 4 - Ehlers, M. (1993). "Mapping requirements for GIS applications." *Proceedings, Workshop and Conference on International Mapping from Space*, ISPRS Working Group IV/2, Hannover, PP. 245-253.
- 5 - Ehlers, M. (1996). "Rectification and registration." *Integration of Geographic Information Systems and Remote Sensing*, Cambridge University Press, PP. 1-20.
- ۶- سرپولکی، م. و صمدزادگان، ف. "تصحیح ساختار هندسی تصاویر غیرمتریک در فتوگرامتری رقومی و بینایی کامپیوتر." کنفرانس ژئوماتیک، تهران (۱۳۸۰).
- ۷- ابوطالبی، ا.، صمدزادگان، ف. و رضاییان، م. "بکارگیری و ارزیابی توانایی روش مالتی کوادریک در تصحیح هندسی تصاویر ماهواره‌ای با آرایش خطی." کنفرانس ژئوماتیک، تهران (۱۳۸۰).
- ۸- صمدزادگان، ف.، سرپولکی، م. و عزیزی، ع. "استخراج اطلاعات هندسی و مدلسازی رقومی نقش برجسته "چشمه علی" با استفاده از فتوگرامتری رقومی برد کوتاه." کنفرانس ژئوماتیک، تهران (۱۳۸۱).

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 - Resampling

2 - Superimposition