

Proposition of a methodology to choice the appropriate empirical for geometric correction of satellite images.

Dr. Fayz Deeb*
Dr. Omar Al Khalil**
Dr. Wael Dayoub***
Dr. Ahmad Ali****

(Received 18 / 4 / 2017. Accepted 26 / 9 / 2017)

□ ABSTRACT □

In recent years, high resolution satellite images (HRSI) become one of the basic source of information required for producing and updating big scale maps. The accuracy of extracted data from these images depends on accuracy of mathematical models for the satellite sensor that describe the relationship between image and objects spaces. But, in most cases, there is no satellite orbit information for these new sensors. In this case, we apply empirical methods based on control points to define this relationship (e.g. geometric correction of images) and to transform image to source of spatial information.

In this research, we experimented some of these empirical methods to achieve the geometric correction of a High Resolution Satellite Images (HRSI) covered a part of Lattakia state (a QUICKBIRD image white a spatial resolution equal to 0.6 m). When applying these methods, the coordinates of control points were measured by GPS, in WGS-84, using static method. These coordinates were then transformed into the Syrian local coordinate system. The results of the experiment show that the second and third order polynomials, are appropriate to correct satellite images that cover limited areas. In the case of planimetric areas, we found that the projective transformation is very effective; and the rubber sheet is the most appropriate when a large amount of control points, covering the whole imaged scene, is available.

Key words: geometric correction, High Resolution Satellite Images (HRSI), Empirical method, Root Main Square.

*Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associated Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Associated Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**** Associated Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

اقترح منهجية لاختيار الطريقة التجريبية الأنسب لتصحيح المرئيات الفضائية

- د. فايز ديب *
- د. عمر الخليل **
- د. وائل ديوب ***
- د. أحمد علي ****

(تاريخ الإيداع 18 / 4 / 2017. قُبل للنشر في 26 / 9 / 2017)

□ ملخص □

في السنوات الأخيرة، صارت المرئيات الفضائية ذات دقة التمييز المكانية العالية مصدراً أساسياً للمعلومات اللازمة من أجل صناعة الخرائط ذات المقاييس الكبيرة أو تحديثها. هذا، وتعتمد دقة البيانات المكانية المقطعة من هذه المرئيات على دقة النماذج الرياضية للمستشعرات والتي تصف العلاقة بين حيز المرئية وحيز العنصر. ولكن في أغلب الحالات، لا تتوفر معلومات حول مدار التابع الصناعي الحامل لهذه المستشعرات الجديدة. وهنا، يتم تطبيق طرائق تجريبية قائمة على استخدام نقاط الضبط في تعريف هذه العلاقة (أو ما يسمى بالتصحيح الهندسي للمرئيات) وذلك لتحويل المرئيات إلى مصدر للبيانات المكانية. يهدف البحث بشكل اساسي الى وضع منهجية علمية لاختيار أفضل طريقة تجريبية لتصحيح مرئية فضائية ما.

تم في هذا البحث اختبار بعض الطرائق التجريبية في إنجاز التصحيح الهندسي لمرئية فضائية ذات دقة تمييز عالية تغطي منطقة من محافظة اللاذقية (هذه المرئية من النوع QUICKBIRD والتي دقة تمييزها المكانية تساوي 0.6 m). حيث تم قياس إحداثيات نقاط الضبط في الجملة العالمية WGS-84 باستخدام أجهزة الاستقبال GPS بالطريقة الساكنة وتحويلها الى الجملة المحلية في سوريا. وجدنا أن كثيرات الحدود من الدرجتين الثانية والثالثة هي الانسب لمسألة التصحيح الهندسي للصور الفضائية التي تغطي مشاهد محدودة الاتساع. في حين أن التحويل الإسقاطي يكون فعالاً في حالة المشاهد المستوية والشد المرن يكون أكثر الطرق فعاليةً في حال توفر عدد كبير من نقاط الضبط التي تغطي كامل المشهد المصور.

الكلمات المفتاحية : التصحيح الهندسي، مرئيات فضائية عالية الدقة، طرائق تجريبية، الخطأ المتوسط التريبع.

* أستاذ - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
** أستاذ مساعد - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
*** أستاذ مساعد - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.
**** أستاذ مساعد - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة

تتضمن معالجة المرئيات الفضائية تحليلاً للمواصفات الراديومترية Radiometric والهندسية Geometric. وإنجاز هذه المعالجة، سيكون من الممكن تصحيح تشوهات المرئية وتحسين موثوقيتها ونوعيتها. في الواقع، تتألف المعالجة من سلسلة من العمليات المتتابعة تضم التصحيح الهندسي، تصحيح تأثيرات الغلاف الجوي، التعميم Normalization، الحجب Masking (حجب الغيوم، الماء، السمات التي لا علاقة لها بموضوع التحليل)، تقويم المرئية Image rectification وإعادة اعيان المرئية Image resampling [1]. فيما يخص التصحيح الهندسي، فإنه يأخذ بعين الاعتبار مواصفات التجهيزات، حركة التابع الصناعي، دوران الأرض، تأثيرات طبوغرافية الأرض ونقاط الضبط في نفس الوقت. الهدف من هذا التصحيح تحويل المرئية التي التقطها المستشعر بحيث ترتبط بنظام ارتسام كارتوغرافي Cartographic projection محدد ويحيث تكون خالية من التشوهات ويكون كل بكسل Pixel فيها مرفقاً بإحداثيات محددة.

مع إطلاق الجيل الجديد من التوابع الصناعية التجارية التي تولد مرئيات ذات دقة تمييز مكانية عالية -High resolution، مثل التابع الهندي IRS-1C/1D، النظام IKONOS، التابع الصناعي SPOT 5 والنظام QUICKBIRD، صار من الممكن الحصول على خرائط رقمية دقيقة انطلاقاً من هذه المرئيات واستخدامها في مجال صناعة المعلومات المكانية. ونذكر أنه خلال العقود الماضية، كانت الصور الجوية هي المصدر الأساسي لإنتاج الخرائط الوطنية وذلك بفضل دقتها العالية [2]. وفي كل الأحوال، لا يمكن استخدام هذه الصور في المناطق التي لا تستطيع الطائرات الوصول إليها إضافة لكلفتها العالية مقارنةً بالمرئيات الفضائية كما أنها مقيدة بخطة طيران (Flight planning) صارمة [3]. مع ظهور عصر النظم التي تنتج مرئيات فضائية ذات دقة تمييز مكانية عالية، صار من الممكن الحصول على خرائط رقمية دقيقة ذات مقياس صغير ومتوسط وذلك دون الحاجة إلى خطة طيران وبكلفة أقل. وهنا تجب الإشارة إلى أن الاستخدام الناجح لإمكانات الدقة العالية لهذه النظم يعتمد على النماذج الرياضية Mathematical models الدقيقة لمستشعرات التوابع الصناعية [4]. لا بد من الإشارة إلى أنه في أغلب الحالات، لا يمكن القيام بالتعريف الدقيق لهذه النماذج وذلك بسبب عدم توفر معلومات حول مدار التابع الصناعي، مما يدفعنا إلى تطبيق طرائق تجريبية قائمة على استخدام نقاط الضبط في التصحيح الهندسي للمرئيات لتحضيرها لاقتطاع البيانات المكانية التي تستخدم في صناعة وتحديث الخرائط [5].

سنقوم في هذا البحث، بتطبيق عدد من الطرائق التجريبية وتحليل دقتها ومقارنة نتائجها وذلك من خلال استخدامها في إنجاز التصحيح الهندسي لمرئية فضائية عالية الدقة من النوع IKONS تغطي جزءاً من مدينة اللاذقية.

أهمية البحث وأهدافه

تم استخدام المرئيات الفضائية ذات دقة التمييز العالية في الكثير من البلدان (نذكر منها إيران على سبيل المثال [6]) كمصدر أساسي للمعطيات المكانية ثنائية البعد 2D spatial data من أجل تحديث الخرائط المكانية والموضوعية، وهذا ما يدفعنا لتوطين مثل هذا النوع من التجارب في سوريا. وبما أن الحصول على النماذج الرياضية التي تصف مدارات التوابع الصناعية التي تلتقط هذا النوع من المرئيات ليست دائماً متاحة، فإن هذا البحث يهدف إلى :

1. عرض لأكثر الطرائق التجريبية انتشاراً في إنجاز التصحيح الهندسي للمرئيات الفضائية عالية الدقة والتي يمكن اعتبارها كبديل مقبول للنماذج الدقيقة. تعتمد هذه الطرائق كلها على استخدام مجموعة موزعة بشكل جيد من نقاط الضبط.
2. تطبيق هذه الطرائق من أجل إنجاز التصحيح الهندسي على مرئية ذات دقة تمييز مكانية عالية من النوع QUICKBIRD ومقارنة نتائجها من أجل اختيار الطريقة التجريبية الأفضل والتي يؤمن تطبيقها الحصول على خريطة ذات أكبر مقياس ممكن.
3. تقديم منهجية واضحة لتصحيح المرئيات الفضائية عالية الدقة يمكن للعاملين في مجال صناعة وتحديث الخرائط الاستفادة منها. الغاية هنا هي توضيح آلية لاختيار الطريقة التجريبية المناسبة أكثر للتصحيح، وذلك بتطبيق معايير مقارنة واضحة.

طرائق البحث ومواده

-الطرائق التجريبية لتصحيح المرئيات الفضائية

يتوفر العديد من الطرائق التجريبية المستخدمة في التصحيح الهندسي للمرئيات الفضائية نذكر منها :

✓ نموذج التابع التنسيبي Rational function

يستخدم هذا النموذج النسبة بين تحويلات كثير الحدود Polynomial transformations كما أنه يأخذ المناسيب الأرضية بعين الاعتبار. وعند عدم توفر أية معلومات حول المستشعر المستخدم في النقاط المرئية أو أية معلومات مساعدة أخرى، فإننا نستخدم هذا النوع من النماذج [7].
يتيح هذا النموذج ربط الإحداثيات الصورية ثنائية البعد (x)، (y مع الإحداثيات الأرضية ثلاثية الأبعاد (X،Y،Z) لمجموعة من نقاط الضبط كما هو موضح في المعادلة (1) :

$$x = \frac{P_1(X, Y, Z)}{P_2(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^m a_{ijk} \cdot X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n b_{ijk} \cdot X^i Y^j Z^k} \quad (1)$$

$$y = \frac{P_3(X, Y, Z)}{P_4(X, Y, Z)} = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^m c_{ijk} \cdot X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \sum_{k=0}^n d_{ijk} \cdot X^i Y^j Z^k}$$

حيث P_1, P_2, P_3, P_4 هي كثيرات حدود عادةً ما تكون درجاتها العظمى مساوية لـ 3 مما يعني الحاجة إلى تحديد 20 معاملاً (المعاملات a, b, c, d).

إن ما يجعل هذه الطريقة تجريبيةً هي عدم قدرتها على التخلص من كامل التشوهات بين نقاط الضبط، كما يتطلب تطبيقها عدداً كبيراً من هذه النقاط [8].

✓ نموذج كثيرات الحدود Polynomials

تستخدم نماذج كثيرات الحدود من أجل ربط إحداثيات نقاط المرئية مع مقابلاتها في نظام إحداثيات مرجعي Reference coordinate system. ولهذه النماذج شكل معادلات من درجات متعددة. نوضح في المعادلة (2) الشكل العام لهذه المعادلات :

$$x = \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i a_k X^{i-j} Y^j \quad (2)$$

$$y = \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i b_k X^{i-j} Y^j$$

حيث x, y هي الإحداثيات المقاسة في المرئية أما X, Y فهي الإحداثيات المرجعية و a_k, b_k هي وسطاء كثير الحدود. أما عدد هذه الوسطاء (M) فيتبع لدرجة كثير الحدود ويعطى في المعادلة (3) :

$$M = (t+1).(t+2) \quad (3)$$

وأخيراً، تعطى العلاقة بين درجة كثير الحدود (t) والعدد الأصغري لنقاط الضبط الواجب توفرها (N) في الصورة من خلال المعادلة (4):

$$N = \frac{(t+1).(t+2)}{2} \quad (4)$$

إن ما يجعل هذه الطريقة تجريبية هي عدم قدرتها على التخلص من كامل التشوهات بين نقاط الضبط (كما في حالة التوابع التنسيبية) كما أنها لا تأخذ طبوغرافية الأرض بعين الاعتبار، مما يجعلها مناسبة أكثر للمناطق المنبسطة ومحدودة الاتساع [9].

✓ النموذج الإسقاطي Projective

يعبر هذا النموذج عن العلاقة بين حيزين مستنداً إلى فكرة الإسقاط المنظوري Perspective projection. والعناصر الأساسية لهذا الإسقاط هي مركز الإسقاط، حزمة من الأشعة تمر من هذا المركز ومستويان هما مستوى العنصر ومستوى المرئية والذان يقطعان الحزمة ولا يحويان المركز. أما العلاقة بين إحداثيات النقاط في المرئية (X)، (y) ومقابلاتها في العنصر (X)، (Y) فهي تتبع لمعاملات التحويل L_1, L_2, \dots, L_8 وموضحة بالعلاقة (5) :

$$x = \frac{L_1 X + L_2 Y + L_3}{L_7 X + L_8 Y + 1} \quad (5)$$

$$y = \frac{L_4 X + L_5 Y + L_6}{L_7 X + L_8 Y + 1}$$

كما في حالة النموذج السابق، فإن النموذج الإسقاطي لا يأخذ تغيرات المناسيب في المشهد المصور بعين الاعتبار ولذلك فهو نموذج تجريبي.

✓ الشد المرن Rubber Sheeting

يُعتبر التحليل باستخدام العناصر المنتهية finite elements أداة قوية لحل المسائل الحسابية المعقدة، والتي يمكن توصيفها بواسطة أجزاء صغيرة و بسيطة، وهذه الطريقة هي مستخدمة بشكل واسع كتقنية استقراء محلي في التطبيقات الجغرافية. وعند تطبيق هذه الطريقة لتصحيح المرئيات الفضائية، فإنه يتم استخدام نقاط الضبط المعروفة لبناء العديد من المثلثات بحيث تكون رؤوس كل مثلث (عنصر منته) هي ثلاث نقاط ضبط. يتم بعد ذلك تطبيق

التحويل كثير الحدود لإنشاء علاقات رياضية بين نظام إحداثيات المرئية ونظام إحداثيات العنصر لكل من هذه المثلثات. وفي هذه الحالة، نسمي التحليل بالعناصر المنتهية بالشد المرن، كما يمكن أن يسمى أيضاً بالتصحيح على أساس مثلثاتي و ذلك لأن التحويل و إعادة التشكيل يمان بتطبيق قاعدة تحويل مثلث ثلو الآخر. يجب أن تستخدم طريقة الشد المرن عندما لا تستطيع طرائق التصحيح الأخرى (مثل التحويل كثير الحدود) إعطاء نتائج مقبولة. ولكن تطبيق هذه الطريقة يحتاج إلى عدد كبير من نقاط الضبط والتي تغطي كامل المرئية. وهنا تجب الإشارة إلى أنه يتم بناء سطح مرن من شبكة النقاط وأن النقاط الواقعة خارج هذه الشبكة ستكون عرضة لأخطاء كبيرة ولذلك نعتبر هذه الطريقة تجريبية أيضاً.

- البرنامج ArcGIS 10.2

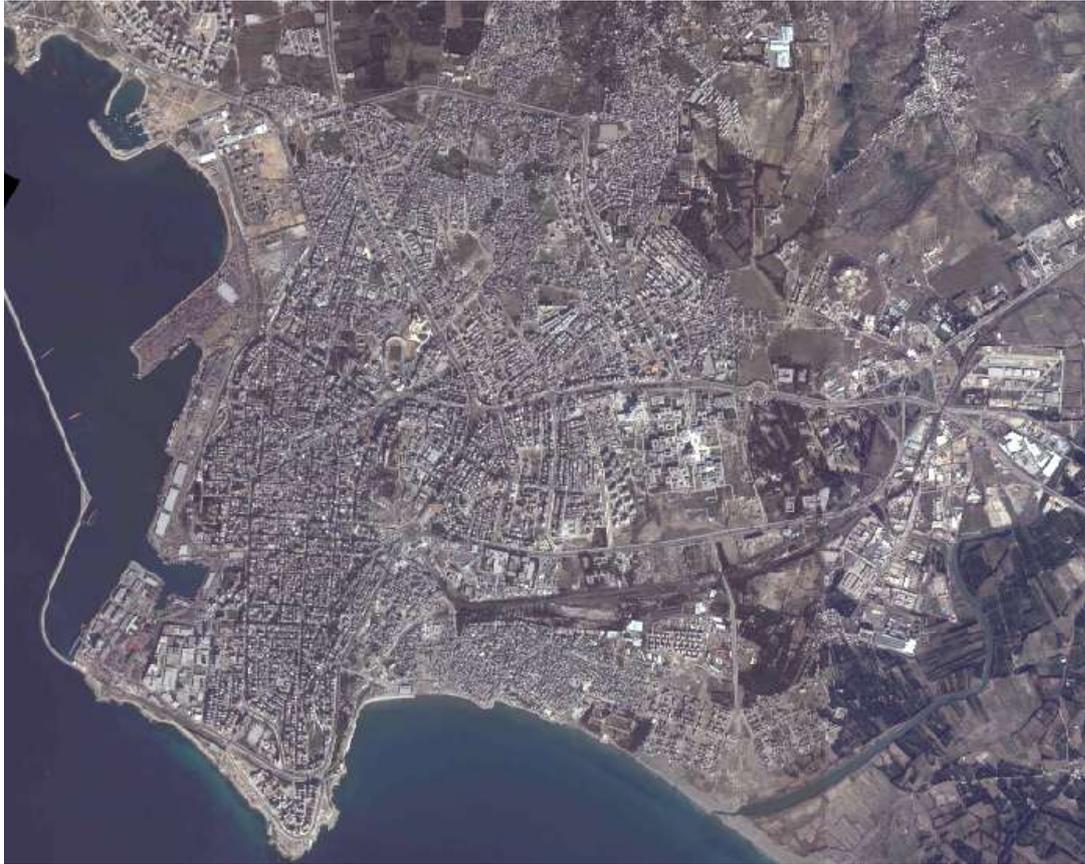
هذا البرنامج هو المستخدم في بحثنا من أجل تصحيح المرئية QUICKBIRD وذلك لاحتوائه على معظم الطرائق التجريبية التي عرضناها سابقاً. نود الإشارة هنا إلى أننا لم نطبق طريقة التتابع التنسيبية وذلك كي نضمن القيام بمقارنة واقعية بين الطرائق السابقة. في الواقع، تأخذ طريقة التتابع التنسيبية تغيرات المناسيب بعين الاعتبار (طريقة ثلاثية الأبعاد) عند تصحيح المرئية وهذه ما لا تقوم به باقي الطرائق (طرائق ثنائية البعد)، وبالتالي فإنه من غير المنطقي مقارنتها مع باقي الطرائق.

- المرئية الفضائية QUICKBIRD

تتوفر لدينا مرئية فضائية عالية الدقة من النوع QUICKBIRD (التقطت في العام 2007) دقة تمييزها المكانية تساوي إلى 0.6 m. تغطي هذه المرئية جزءاً من محافظة اللاذقية وهي موضحة في الشكل (1). المرجع المكاني الأصلي لهذه المرئية هو نظام الارتسام العالمي WGS84 UTM Zone 37N ولهذا كنا مضطرين إلى تغيير هذا النظام إلى نظام الارتسام السوري (الستيريوغرافي). إن عملية التغيير هذه اقتضت القيام بمعالجة مسبقة للمرئية وتحويل صيغتها لتأمين إمكانية تصحيحها بمساعدة نقاط ضبط معطاة في النظام الستيريوغرافي. ونشير هنا إلى ان هذه المعالجة قد تمت بمساعدة البرنامج المتخصص ArcToolBox من ArcGIS 10 وذلك لضمان الحفاظ على النوعية الهندسية والراديو مترية للمرئية الأصل.

- مخطط قديم لجزء من محافظة اللاذقية

يتوفر لدينا أيضاً مخطط قديم (يعود للعام 2005) لجزء من محافظة اللاذقية من النوع AutoCAD مقياسه 1/1000. تم استخدام هذا المخطط في اختيار توزيع نقاط الضبط اللازمة لتصحيح المرئية وتطبيق الطرائق التجريبية بدرجاتها المختلفة. حيث تم اختيار هذه النقاط بحيث تكون موزعة توزيع هندسي منتظم قدر الإمكان على كامل المرئية وأن يكون عددها كافياً (بلغ عددها 19 نقطة). كما يجب تحديد نقاط واضحة ومميزة على الصورة مثل زوايا المباني أو تقاطعات الطرق. يراعى في اختيار النقاط سهولة الوصول إلى الموقع وذلك لضمان جودة وسرعة التنفيذ.



الشكل (1). الصورة الفضائية QUICKBIRD لجزء من محافظة اللاذقية.

النتائج والمناقشة

تم تطبيق الطرائق التجريبية ثنائية البعد لتصحيح المرئية الرقمية وفق الخطوات الآتية:

1. اختيار نقاط الضبط على المخطط الطبوغرافي وحساب احداثياتها باستخدام نظام تحديد المواقع العالمي في الجملة العالمية وتحويلها الى نظام الارتسام الستيريوجرافي السوري. يجب أن تكون كافية من حيث العدد (العدد يصلح لتطبيق كثيرات حدود من درجات عالية نسبياً) وموزعة على شكل موحد في كامل المشهد.

2. قياس نقاط الضبط السابقة على المرئية QUICKBIRD والقيام بالتصحيح الهندسي للمرئية بتطبيق الطرائق

ثنائية البعد التجريبية التالية :

a. طريقة كثيرات الحدود.

b. طريقة التحويل الإسقاطي.

c. طريقة الشد المرن.

3. مناقشة نتائج التصحيح لكل طريقة على حده واستقراء مقياس الخارطة التي يمكن إنجازها من المرئية

المصححة.

4. مقارنة نتائج الطرائق مع بعضها البعض للوصول إلى أفضل طريقة تجريبية ممكنة لتصحيح المرئية

واعتمادها كأساس لتحديث الخرائط.

✓ قياس إحداثيات نقاط الضبط باستخدام نظام تحديد المواقع العالمي GPS

تم اختيار مجموعة من نقاط الضبط الموزعة بشكل متجانس على كامل المرئية بمساعدة المخطط الطبوغرافي والصورة الفضائية. يوضح الشكل (2) توزع النقاط على المخطط الطبوغرافي. تم قياس إحداثيات نقاط الضبط في الجملة العالمية WGS-1984 باستخدام أجهزة استقبال GPS من نوع HD8200X HI TARGET، وذلك بالطريقة الساكنة ولمدة 20 دقيقة في كل فترة قياس. تمت عملية الرصد بوضع احد أجهزة الاستقبال على النقطة المعلومة الإحداثيات وتسمى النقطة الثابتة والتحرك بالجهازين الثاني والثالث على كل النقاط بطريقة معينة لرصد عدد من خطوط القواعد من النقطة الثابتة إلى النقطة المتحركة. بعد الانتهاء من عملية الرصد تمت معالجة القياسات باستخدام البرنامج التابع للشركة الصانعة لأجهزة الاستقبال HDS2003 استنادا إلى النقطة الواقعة في الوسط (رقم 4) باعتبارها نقطة ثابتة. تم اختيار نظام الإسقاط UTM الموافق لنظام GPS والإسقاط الستيريوغرافي، وإدخال معاملات التحويل المناسبة بين الإسقاطين. يبين الجدول (1) إحداثيات نقاط الضبط في النظام العالمي WGS-84 والنظام الستيريوغرافي السوري.



الشكل (2). توزع نقاط الضبط على المخطط الطبوغرافي.

الجدول (1). إحداثيات نقاط الضبط في النظام الستيريوغرافي السوري والعالمي WGS-84

Point	WGS-84						ستيريوغرافي	
	Phi			Lamda			X (m)	Y (m)
	درجة	دقيقة	ثانية	درجة	دقيقة	ثانية		
1	35	31	32.03	35	48	32.53	-303052.55	152056.09
2	35	31	12.25	35	48	32	-303085.99	151447.10
3	35	31	37.98	35	47	4.16	-305272.10	152313.77
4	35	31	32.35	35	48	26.84	-303195.41	152070.71
5	35	31	28.49	35	48	27.18	-303190.75	151951.68

6	35	31	13.16	35	49	25.36	-301741.01	151430.70
7	35	30	56.83	35	47	50.81	-304139.43	151006.68
8	35	30	12.64	35	46	25.17	-306342.38	149717.34
9	35	30	49.81	35	45	58.24	-306982.35	150885.55
10	35	32	19.17	35	46	21.74	-306297.87	153618.56
11	35	31	39.12	35	45	56.74	-306968.93	152406.03
12	35	31	38.68	35	46	15.57	-306495.21	152376.48
13	35	32	33.05	35	47	54.59	-303945.25	153967.95
14	35	30	22.23	35	49	7.85	-302234.04	149876.18
15	35	31	0.39	35	47	12.04	-305112.45	151149.15
16	35	31	2.64	35	47	13.16	-305081.84	151217.45
17	35	32	31.41	35	47	55.33	-303928.52	153916.83
18	35	31	26.8	35	49	53.17	-301026.84	151827.84
19	35	31	45.14	35	50	4.11	-300732.60	152383.69

✓ التصحيح الهندسي للمرئية

تم قياس نقاط الضبط كلها في مواقعها الصحيحة على المرئية الفضائية ومن ثم تم تنفيذ عملية التصحيح الهندسي لهذه المرئية بالاستعانة بالبرنامج ArcGIS 10.2 فحصلنا على النتائج التالية:

أولاً : حالة التصحيح باعتماد كثيرات الحدود

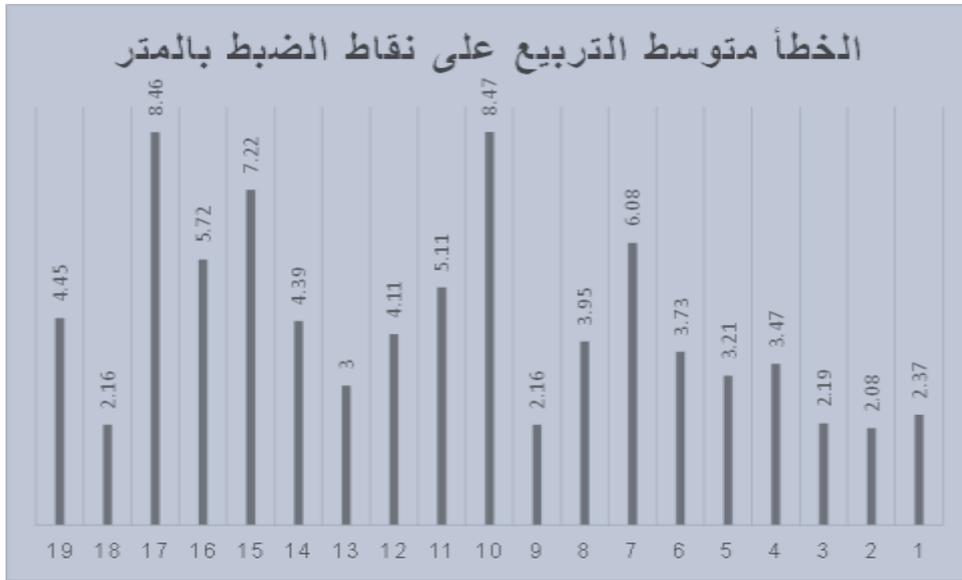
➤ تطبيق كثير حدود من الدرجة الأولى

عند تطبيق كثير حدود من الدرجة الأولى لتصحيح المرئية الفضائية تم الحصول على خطأ متوسط التربيع كلي قيمته $RMS_T = \pm 4.77m$ وهنا لا نستطيع إعطاء قيمة لحدّ التساهل وذلك لأننا لا نعرف مقياس هذه المرئية. أما قيم الأخطاء متوسطة التربيع على نقاط الضبط المستخدمة، فهي موضحة في كل من الجدول (2) والشكل (3).

الجدول (2). الرواسب الكلية على نقاط الضبط- حالة كثير حدود من الدرجة الأولى.

النقطة	الخطأ متوسط التربيع (متر)
1	2.37
2	2.08
3	2.19
4	3.47
5	3.21
6	3.73
7	6.08
8	3.95
9	2.16

10	8.47
11	5.11
12	4.11
13	3.00
14	4.39
15	7.22
16	5.72
17	8.46
18	2.16
19	4.45



الشكل (3). الخطأ متوسط التربيع على نقاط الضبط- حالة كثير حدود من الدرجة الأولى.

من خلال دراسة الأخطاء متوسطة التربيع على نقاط الضبط، فإننا نجد أن ما مقداره 68% من هذه النقاط (13 نقطة) هو أقل من $\pm RMS_T$ (الخطأ متوسط التربيع الكلي للتصحيح) وبالتالي، يمكن اعتبارها مقبولة [9]. ولكن هذا لا يعني عدم إمكانية الاستغناء عن بعض هذه النقاط (على الأخص النقطتين 10 و 17) لتحسين نوعية التصحيح. من جهة أخرى، يمكن تبرير تفاوت قيم هذه الأخطاء من نقطة إلى أخرى بحسب ارتفاع العنصر المقاسة عليه أو قربها أو بعدها عن مركز الصورة حيث أن التشوهات تزداد بازدياد قيمة هذا البعد (لاحظ مثلاً أن النقطتين 17 و 10 تقعان في طرف الصورة في حين أن النقطة 2 (صاحبة أقل خطأ) تقع تقريباً في مركز الصورة. بإخراج النقطتين 17 و 10 من الحساب، حصلنا على خطأ متوسط تربيع كلي مساو لـ $RMS_T = 4.07m$ وبالتالي يمكن حساب مقياس الخارطة التي يمكن إنجازها من المرئية المرجعة باستخدام المعادلة (5) التي تربط بين RMS_T ومخرج مقياس الخارطة :

$$(5) \quad RMS_T \leq \frac{(0.2 \rightarrow 0.3).S}{1000}$$

بتطبيق المعادلة السابقة نجد أن $S=16280$ وهو مخرج مقياس الخارطة التي يمكن صناعتها من هذه المرئية المصححة. إن المقياس النظامي الأقرب هو $1/25000$.

➤ تطبيق كثير حدود من الدرجة الثانية

عند تطبيق كثير حدود من الدرجة الثانية لتصحيح المرئية الفضائية حصلنا على خطأ متوسط التربيع كلي قيمته $RMS_T = 2.98m$. أما قيم الأخطاء متوسطة التربيع على نقاط الضبط المستخدمة، فهي موضحة في الشكل (4).



الشكل (4). الخطأ متوسط التربيع على نقاط الضبط- حالة كثير حدود من الدرجة الثانية.

بتطبيق نفس المنهجية السابقة في الحكم على نوعية نقاط الضبط، نجد أيضاً أن ما مقداره 68% من هذه النقاط (13 نقطة) هو أقل من $\pm RMS_T$ (الخطأ متوسط التربيع الكلي لتصحيح) وبالتالي، يمكن اعتبارها مقبولة. إذا حذفنا النقطة 7 ذات الخطأ الأعظمي فإننا نحصل على خطأ متوسط تربيع كلي مساو لـ $RMS_T = 2.16m$. وبتطبيق المعادلة (5) نجد أن مخرج مقياس الخارطة التي يمكن صناعتها من هذه المرئية المصححة هو $S=8640$ وبالتالي فإن المقياس النظامي الأقرب هو $1/10000$.

➤ تطبيق كثير حدود من الدرجة الثالثة

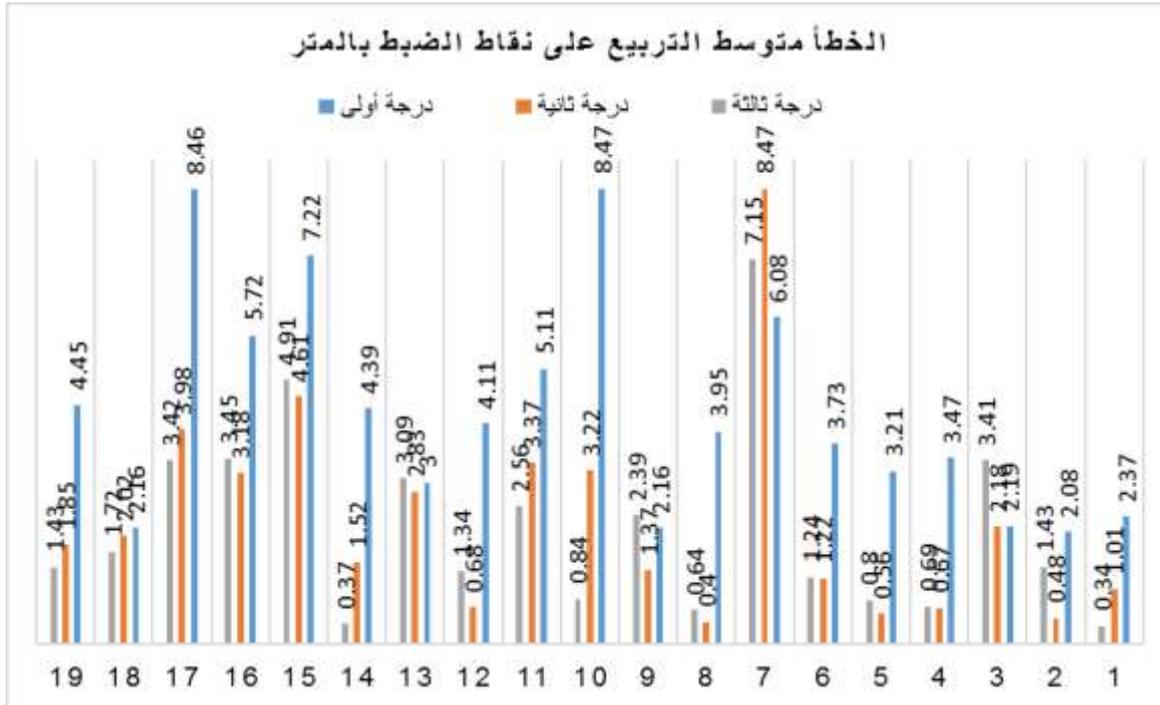
عند تطبيق كثير حدود من الدرجة الثالثة لتصحيح المرئية الفضائية حصلنا على خطأ متوسط التربيع كلي قيمته $RMS_T = \pm 2.76m$. أما قيم الأخطاء متوسطة التربيع على نقاط الضبط المستخدمة، فهي موضحة في الشكل (5).



الشكل (5). الخطأ متوسط التربيع على نقاط الضبط- حالة كثير حدود من الدرجة الثالثة.

بتحليل القيم السابقة لنقاط الضبط، نجد أيضاً أن ما مقداره فإننا نجد ان ما مقداره 68% من هذه النقاط (13 نقطة) هو أقل من $\pm RMS_T$ (الخطأ متوسط التربيع الكلي للتصحيح) وبالتالي، يمكن اعتبارها مقبولة. إذا حذفنا النقطة 7 ذات الخطأ الأعظمي فإننا نحصل على خطأ متوسط تربيع كلي مساو لـ $RMS_T = 1.86m$. وبتطبيق المعادلة (5) نجد أن مخرج مقياس الخارطة التي يمكن صناعتها من هذه المرئية المصححة هو $S=7440$ وبالتالي فإن المقياس النظامي الأقرب هو $1/7500$.

نستنتج مما سبق، أن تطبيق كثيرات حدود من الدرجة الأولى في تصحيح المرئية غير فعال مقارنةً بالدرجتين الثانية والثالثة. كما نجد تقارباً كبيراً بين نتائج التصحيح المرئية باعتماد كثيرات الحدود من الدرجة الثانية والثالثة مع عدم وجود فرق كبير في مقاييس الخرائط الممكن إنجازها من هذه المرئية في كلتا الحالتين. نوضح في الشكل (6) مقارنة بين الأخطاء متوسطة التربيع على نقاط الضبط في حالة تطبيق كثيرات الحدود (راجع أيضاً الجدول (7)). لاحظ الانسجام بين المنحنيات والتقارب بين نتائج الدرجتين الثانية والثالثة وكذلك الفروق الكبيرة بين نتائج هاتين الدرجتين ونتائج كثير الحدود من الدرجة الأولى.



الشكل (6). مقارنة الأخطاء متوسطة التربيع على نقاط الضبط باعتماد طريقة كثيرات الحدود.

ثانياً : حالة التصحيح باعتماد التحويل الإسقاطي

باعتماد نفس نقاط الضبط، قمنا بتصحيح المرئية الفضائية وذلك باعتماد التحويل الإسقاطي فحصلنا على خطأ متوسط التربيع كلي قيمته $RMS_T = \pm 3.75m$. أما قيم الأخطاء متوسطة التربيع على نقاط الضبط المستخدمة، فهي موضحة في الجدول (3).

الجدول (3). الرواسب الكلية على نقاط الضبط- حالة التحويل الإسقاطي.

النقطة	الخطأ متوسط التربيع (متر)
1	0.18
2	0.49
3	2.85
4	1.34
5	1.22
6	2.11
7	8.07
8	2.37
9	3.13
10	4.46
11	1.89
12	1.77
13	3.57
14	6.23

15	5.11
16	3.61
17	5.99
18	1.93
19	3.72

بتطبيق نفس المنهجية السابقة في الحكم على نوعية نقاط الضبط، نجد أيضاً أن ما مقداره فإننا نجد ان ما مقداره 68% من هذه النقاط (13 نقطة) هو أقل من $RMS_T \pm$ (الخطأ متوسط التربيع الكلي للتصحيح) وبالتالي، يمكن اعتبارها مقبولة. إذا حذفنا النقطة 7 ذات الخطأ الأعظمي فإننا نحصل على خطأ متوسط تربيع كلي مساو لـ $RMS_T = 3.28m$. وبتطبيق المعادلة (5) نجد أن مخرج مقياس الخارطة التي يمكن صناعتها من هذه المرئية المصححة هو $S=13120$ وبالتالي فإن المقياس النظامي الأقرب هو $1/25000$.

مما سبق نجد أن نوعية هذا التحويل أفضل من نوعية التصحيح باعتماد كثير حدود من الدرجة الأولى ولكنها أقل من حالتنا كثيرات الحدود من الدرجتين الثانية والثالثة (الجدول (3)).

ثالثاً : حالة التصحيح باعتماد الشد المرن

في حالة تطبيق الشد المرن، تعتبر نقاط الضبط التي تبني شبكة المثلثات (السطح المرن) خالية من الأخطاء وبالتالي لا توجد قيمة للخطأ متوسط التربيع. في الواقع، يتم حساب معاملات التحويل المثلث Affine transformation لكل مثلث من مثلثات هذه الشبكة من جملة إحداثيات المرئية إلى جملة إحداثيات العنصر. وبما أن عدد معاملات التحويل المثلث هو 6 معاملات، فإنه يلزمنا على الأقل ثلاث نقاط هي رؤوس المثلث لإيجاد حل وحيد ولا يمكن هنا تطبيق المربعات الصغرى وبالتالي فالرواسب (وبالتالي الخطأ المتوسط التربيع) على النقاط معدومة. ومنه، فإن الطريقة الوحيدة التي ستمكننا من الحكم على نوعية التصحيح باستخدام الشد المرن هي قياس إحداثيات مجموعة من نقاط الاختبار على المرئية المصححة ومقارنة إحداثياتها مع تلك المقاسة بالأجهزة المساحية الحديثة. قمنا بقياس أربع نقاط اختبار بحيث تقع اثنتان منها بعيداً عن حدود الشبكة المنشأة من نقاط الضبط (السطح المرن) وواحدة على حدود هذه الشبكة والأخيرة داخل الشبكة (الشكل (7)). نبين في الجدول (4) إحداثيات هذه النقاط على المرئية المصححة وفي المخطط والمقارنة بينهما.



الشكل (7). مواقع نقاط الاختبار بالنسبة للشبكة.

الجدول (4). الرواسب الكلية على نقاط الضبط- حالة التحويل الإسقاطي.

النقطة	X (m) مخطط	Y (m) مخطط	X (m) مرئية	Y (m) مرئية	VX(m)	VY(m)
1 خارج الشبكة	-300169.23	152571.70	- 300166.21	152566.48	-3.02	5.22
2 خارج الشبكة	-300128.85	152023.99	- 300125.08	152022.61	-3.77	1.38
3 حدود الشبكة	-301450.57	150608.19	- 301449.54	150607.68	-1.03	0.51
4 داخل الشبكة	-303322.99	151795.78	- 303323.85	151795.97	0.86	-0.19

نلاحظ من الجدول أن الأخطاء تتناقص عند التحرك من خارج الشبكة إلى داخلها وهذا أمر متوقع. لا تظهر فعالية هذا التحويل إلا في حال توفر عدد كبير جداً من نقاط الضبط الموزعة على كامل المرئية الأمر الذي يتيح بناء شبكة متكاملة.

قمنا بحساب الخطأ المتوسط التربيع الكلي على نقاط الاختبار فوجدنا أنه مساو لـ $RMS_T = \pm 2.28m$. وبتطبيق المعادلة (5) نجد أن مخرج مقياس الخارطة التي يمكن صناعتها من هذه المرئية المصححة هو $S=9120$. نلاحظ أن نتائج الشد المرن أفضل من التصحيح بكثير حدود من الدرجة الأولى ومن التحويل الإسقاطي وهي قريبة إلى حد ما من نتائج كثيرات الحدود من الدرجتين الثانية والثالثة (الجدول (5)).

الجدول (5). مقارنة نتائج طرائق التصحيح للمرئية الرقمية.

الطريقة	الخطأ المتوسط التربيع الكلي	مقياس الخارطة الممكن إنتاجها من الصورة	مقياس الخارطة النظامي الأقرب
كثير حدود من الدرجة الأولى	$RMS_T = \pm 4.07m$	$\frac{1}{16280}$	$\frac{1}{25000}$
كثير حدود من الدرجة الثانية	$RMS_T = \pm 2.16m$	$\frac{1}{8640}$	$\frac{1}{10000}$
كثير حدود من الدرجة الثالثة	$RMS_T = \pm 1.86m$	$\frac{1}{7440}$	$\frac{1}{7500}$
تحويل إسقاطي	$RMS_T = \pm 3.28m$	$\frac{1}{13120}$	$\frac{1}{25000}$
شد مرن	$RMS_T = \pm 2.28m$	$\frac{1}{9120}$	$\frac{1}{10000}$

الاستنتاجات والتوصيات

- 1- انطلاقاً من الدراسة السابقة، نجد أن تطبيق طريقة تجريبية ما في إنجاز التصحيح الهندسي للمرئيات الفضائية لتحضيرها لإنتاج الخرائط أو تحديثها، يجب أن يستند إلى منهجية علمية واضحة تقوم على مناقشة دقة هذه الطرق (من ناحيتي الخطأ المتوسط التربيع الكلي والأخطاء المتوسطة التربيع على نقاط الضبط). إن هذه المنهجية مهمة وذلك لأن تصحيح المرئية ليس الهدف الأهم أو الغاية، بل المهم هو أن هذه المرئية المصححة ستستخدم في إنتاج أو تحديث الخرائط الرقمية والتي يتبع مقياسها، وبالتالي كمية التفاصيل الممكن توثيقها فيها، لدقة هذا التصحيح.
- 2- أظهرت النتائج أن كثيرات الحدود من الدرجتين الثانية والثالثة تشكل حلاً جيداً لمسألة التصحيح الهندسي للصور الفضائية التي تغطي المشاهد الأرضية محدودة الاتساع والتي تتوزع فيها نقاط الضبط بشكل موحد مع عدد كاف منها. في حين أن التحويل الإسقاطي يكون فعالاً في حالة المشاهد المستوية والشد المرن يكون أكثر الطرق فعاليةً في حال توفر عدد كبير من نقاط الضبط التي تغطي كامل المشهد المصور.
- 3- عند تطبيق كثير حدود من الدرجة الثالثة لتصحيح المرئية الفضائية تم الحصول على أقل خطأ متوسط التربيع كلي. ويمكن الحصول على أكبر مقياس رسم للخريطة التي يمكن صناعتها من هذه المرئية المصححة ومقداره $S=1/7500$.

نوصي في نهاية البحث بمايلي :

1. تطبيق منهجية تقوم على مقارنة دقة التصحيح للمرئيات الفضائية قبل اعتماد طريقة التصحيح.
2. إذا رغبتنا بتطبيق طريقة تجريبية محددة، فيجب تأمين شروط نجاحها من ناحية طبيعة المشهد المصور وعدد نقاط الضبط وتوزعها.
3. في حال كانت طبيعة المنطقة المراد تحديث خريطتها ذات تضاريس مختلفة فإننا نوصي بتطبيق طرائق تجريبية ثلاثية الأبعاد وذلك لحل مسألة الإزاحة الناتجة عن الارتفاعات.
4. يجب تحديد نقاط التحكم الأرضية على الصورة الفضائية بحيث تكون موزعة توزيع هندسي منتظم قدر الإمكان وسهلة الوصول.

المراجع

- [1] BABOO، S.، RENUKA DEVI، M. 2011. Geometric Correction in Resent High Resolution Satellite Imagery: A Case Study in Coimbatore، Tamil Nadu، IJCA. 2011.
- [2] LI، R. 1998. Potential of high-resolution satellite imagery for national mapping products. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 1998، 64(2):1165-1169.
- [3] LI، R.، ZHOU، G.، YANG، S.، TUELL، G.، SCHMIDT، N. J.، FLOWER، C. 2000. A study of the potential attainable geometric accuracy of IKONOS satellite images، IAPRS، 2000، 33(B4)،587-595.
- [4] FRASER، C.S.، HANELY، H.B، 2003. Bias compensation in rational functions for Ikonos satellite imagery. photogrammetric Eng. & Remote Sensing، 2003، PP. 53-57.
- [5] HOSSEINI، M.، AMINI، J. 2010. Comparison Between 2-D and 3-D Transformations for Geometric Correction of IKONOS images. Department of Geomatics Engineering، Faculty of Engineering، Univesity of Tehran. 2010.
- [6] AMINI، J.، HASHEMI، A.2005. Geometric Correction in Ikonos Images – Case Study: Tehran، Iran، Remote Sensing and Photogrammetry، Iran. 2005.

[7] FRASER, C.S., HANELY, H.B., YAMAKAWA, T. 2001. sub-Metre Geopositioning with Ikonos Geo imagery , ISPRS Joint Workshop on High Resolution Mapping from Space, Hanover, Germany, 2001.

[8] DAVIES C. H., X. WANG, P. 2001. Accuracy of IKONOS 1-m Panchromatic Image Products. Proceeding of the 2001 ASPRS Annual Conference, St. Louis, MI, USA, April 23-27, 2001.

[9]. الخليل، عمر. 2016. معايير للتحقق من الدقة الهندسية للتصحيح الهندسي للصور الفضائية. مجلة

جامعة تشرين للعلوم الهندسية، 2016، (ISSN : 2079-3081) المجلد (38).