

## معايير للتحقق من الدقة الهندسية للتصحيح الهندسي للصور الفضائية

الدكتور عمر الخليل\*

(تاريخ الإيداع 10 / 12 / 2015. قَبِلَ للنشر في 16 / 3 / 2016)

### □ ملخص □

يعتبر التصحيح الهندسي للصور الفضائية مسألةً أساسيةً في صناعة الخرائط الرقمية وتحديثها، في دمج البيانات متعددة المصادر وفي الإدارة والتحليل في العديد من تطبيقات الجيوماتيك. هذا وتعتبر كثيرات الحدود ثنائية البعد، أكثر التوابع الرياضية انتشاراً في إجراء هذا التصحيح. لقد بينت أبحاث سابقة أنّ تطبيق كثيرات الحدود ثنائية البعد مشروط باستوائية الأرض وبالتوزع الموحد لنقاط الضبط ولكنها لم تناقش بشكل واضح معايير الحكم على نجاح أو فشل تطبيقها. سنحاول في هذه الدراسة إعطاء بعض من هذه المعايير وسنحاول تطوير بعض القواعد الكارتوغرافية التشابهية القديمة بحيث تناسب الطبيعة الرقمية للصور الفضائية. ناقشنا في هذا البحث الأساس الرياضي للحكم على الدقة الهندسية للتصحيح الهندسي للصور الفضائية القائم على استخدام نقاط الضبط. وقمنا أيضاً باختبار تأثير طبوغرافية المشهد المصور على هذه الدقة. الاختبار تم بالاستعانة بصور فضائية مقتطعة من المتصفح المجاني Google Earth لمناطق من مدينة اللاذقية في سوريا. كما تم اقتطاع نقاط الضبط من المتصفح نفسه وتحويلها إلى نظام الإحداثيات الستيريوغرافي السوري. أثبتت النتائج أن كثيرات الحدود ثنائية البعد من الدرجة الثانية مناسبة جداً للمشاهد المستوية قليلة الاتساع والتي تكون نقاط الضبط فيها موزعة بشكل موحد على كامل المشهد.

**الكلمات المفتاحية :** التصحيح الهندسي، نقاط الضبط، كثيرات الحدود، الخطأ المتوسط التريبع.

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

## Standards to evaluate the precision of geometric correction of satellite images.

Dr. Omar AL Khalil\*

(Received 10 / 12 / 2015. Accepted 16 / 3 / 2016)

### □ ABSTRACT □

The geometric correction of remote sensing images becomes a key issue in production and updating digital maps, multisource data integration, management and analysis for many geomatic applications. 2D polynomial functions are the most prevalent to achieve this correction.

Previous researches have shown that the application of 2D polynomials is conditioned by the planarity of the terrain and the uniform distribution of ground control points, but did not explicitly discuss the criteria for evaluating the success or failure of their application. In this study, we will try to give some of these criteria and to develop some old analog cartographic rules to suit the nature of the digital satellite images.

In this research, we discussed mathematical foundation for evaluating the precision of control points- based geometric correction of satellite images. We have also tested the effect of the topography of the imaged scene on this accuracy. The test has been carried out by the use of satellite images extracted from Google Earth. These images cover some areas in the city of Latakia in Syria. Also, control points have been extracted from Google Earth and transformed into the Syrian stereographic coordinates system.

Results demonstrated that the second degree 2D polynomial is very suitable for plan small scenes with uniform distribution of the control points over the entire scene.

**Key words:** Geometric correction, Control points, Polynomials, Root Mean Square.

---

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

## مقدمة

تعتبر الصور الفضائية Satellite images مصدراً مهماً للحصول على المعلومات الجغرافية Geographic Information ثنائية الأبعاد اللازمة لأغراض صناعة الخرائط Mapping والمخططات المساحية من مقاييس متنوعة (Toutin, T.2003). ولكن قبل استخدام هذه الصور في إنتاج الخرائط، يجب المرور بمرحلة التصحيح الهندسي Geometric correction لها. تهدف هذه العملية بشكل رئيسي إلى تحويل نظام إحداثيات الصورة (سطر وعمود) إلى نظام إحداثيات حقيقي (إحداثيات خريطة). وهنا، تستخدم معادلات كثير الحدود من الدرجتين الثانية والثالثة Polynomial لتحقيق ذلك. والسؤال الذي يطرح نفسه هو: "ما هو كثير الحدود المناسب بشكل كبير لتصحيح مرئية ما؟" والجواب يركز على العديد من الاعتبارات والعوامل التي تمت دراستها في كل من (F. Eltohamy and E. H. Hamza., 2009) و (L, Hung Liew., et al. 2012). ولعل أهم هذه العوامل هي: عدد نقاط الضبط Control points المتوفرة ونمط توزيعها في المرئية وكذلك نوعية التشوهات الهندسية الموجودة في الصورة. تمر عملية التصحيح الهندسي للصور بالخطوات التالية:

1. اقتطاع الصور.
  2. تحديد نقاط ضبط أرضية معلومة الإحداثيات على الصورة وفي نظام الإحداثيات المرجعي.
  3. اعتماد نموذج رياضي للتصحيح وحساب المعاملات المجهولة لهذا النموذج.
  4. تقييم نتائج حساب المعاملات.
  5. إرجاع الصور.
- عادةً ما تأخذ النماذج الرياضية المعتمدة للتصحيح شكل توابع كثيرة الحدود ثنائية أو ثلاثية البعد وذلك تبعاً لأنواع التشوهات الموجودة في الصورة. وبحسب (Billingsley, F.C., 1983) و (Wong, F., et al., 1975)، تتيح كثيرات الحدود من الدرجة الأولى 1st order (6 معاملات) بتصحيح الانسحابات وفق محورين، الدوران والمقياس وفق محورين وكذلك الميل Obliquity. أما كثيرات الحدود من الدرجة الثانية 2nd order (12 معامل) فهي تسمح بتصحيح القيم السابقة إضافةً إلى الانفتال Torsion والتحدب Convexity وفق محورين. وفيما يخص كثيرات الحدود من الدرجة الثالثة 3rd order (20 وسيط) فهي تسمح بتصحيح نفس التشوهات التي تصححها كثيرات الحدود من الدرجة الثانية إضافةً لتشوهات أخرى ليس لها بالضرورة معنىً فيزيائي خاص بنظام اقتطاع الصورة. لقد بينت دراسات سابقة أنّ كثيرات الحدود من الدرجة الثانية الموافقة للتوزع الموحد لنقاط الضبط هو أفضل الخيارات في حال وجود تشوهات محلية في الصورة (الخليل، عمر، 2015) ولكن الناحية النظرية تؤكد أنّ كثيرات الحدود هذه لا تعبر عن مصادر التشوه المرتبطة بتشكيل الصورة من الناحية الهندسية Image formation ولا تصحح الانزياحات الناتجة عن الارتفاعات Relief displacement ولذلك فإنّ استخدامها يقتصر على الصور التي تغطي مناطق مستوية قليلة الاتساع والحاوية على القليل من التشوهات مثل الميول الصغيرة للمحور البصري للمستشعر. كما وجدنا من خلال تجربتنا العملية أنّ كثيرات الحدود هذه تصحح التشوهات المحلية عند مواقع نقاط الضبط الأرضية Ground control points وبالتالي فهي حساسة جداً للأخطاء التي تحملها هذه النقاط. ومنه، لا يتوجب استخدام هذا النوع من كثيرات الحدود عندما تكون الدقة العالية مطلوبةً عند دمج البيانات متعددة المصادر Multi-source أو متعددة الصيغ Multi-format. إن النقاش السابق يقودنا إلى أنه لا يمكن اعتماد كثيرات الحدود

من الدرجة الثانية دون أخذ نوع الصورة وحجمها ونوعية الأرض التي تغطيها بعين الاعتبار. هذا وإن إهمال هذه الاعتبارات سيكون له تأثيرات وتعقيدات تتعلق بعمليات المعالجة اللاحقة والمنتجات الرقمية المتولدة عنها. من الصحيح نظرياً أن زيادة درجة كثير الحدود ستساعد في زيادة درجة الأخطاء التي يتم التخلص منها. ولكن، لأي حد تحسّن زيادة درجة كثير الحدود من نوعية التصحيح الهندسي للصورة؟ وهل نستطيع اختيار وتطبيق كثير حدود من درجة عالية جداً من أجل القيام بهذا التصحيح؟ وبمعنى آخر، هل تكفي قيمة الخطأ متوسط التربيع للتصحيح كمعيار لنجاح التصحيح؟ والسؤال المهم الآخر هو: هل يكفي المعيار الكارتوغرافي التشابهي Analog، والذي يربط مقياس الخارطة التي يمكن استنتاجها من الصورة المصححة مع الخطأ المتوسط التربيع للتصحيح، للحكم على نوعية التصحيح الهندسي للصور الرقمية؟ سنحاول في هذا البحث الإجابة على هذه الأسئلة مستخدمين صوراً مقطوعة من المتصفح المجاني Google Earth حيث سنفترض تحقق توفر مايلزم من نقاط الضبط مع توزيع منتظم على كامل الصورة وبحيث يكون المشهد المصور شبه مستو.

### أهمية البحث وأهدافه

تعتبر الصور الفضائية ذات دقة التمييز المرتفعة High resolution مصدراً أساسياً للمعطيات المكانية ثنائية البعد 2D spatial data والوصفية في الكثير من التطبيقات أهمها صناعة وتحديث الخرائط المكانية والموضوعية. وبما أن التصحيح الهندسي القائم على استخدام كثيرات الحدود هو الأكثر انتشاراً في تصحيح هذه الصور هندسياً ولتحويلها إلى أساس لرقمنة السمات المكانية أو الوصفية الموجودة في المشهد المصور، فإن هذا البحث يهدف إلى:

1. استعراض وتطبيق المعايير الرقمية الحديثة المقترحة في العديد من الأبحاث للحكم على نوعية التصحيح الهندسي للصور. إن هذه الأسس تأخذ الطبيعة الرقمية لهذه الصور بعين الاعتبار بخلاف القواعد الكارتوغرافية القديمة التشابهيّة.
2. مناقشة موضوع الدقة الهندسية لتصحيح الصور الفضائية مع توضيح مساهمة نقاط الضبط في هذه الدقة.
3. توضيح معيار قبول درجة معينة للنموذج الرياضي كثير الحدود للتصحيح.

### طرائق البحث ومواده

#### ➤ الأساس الرياضي للتصحيح الهندسي للصور الرقمية

يمكن تعريف التصحيح الهندسي لصورة، على أنه العملية التي تهدف إلى المرور من نظام إحداثيات البكسل Pixel coordinate system المرتبط بالصورة إلى نظام إحداثيات مرجعي Reference coordinate system. ويتم هذه العملية بتطبيق معادلات تحويل تأخذ شكل كثيرات حدود من درجات متعددة تربط نظام إحداثيات البكسل مع نظام الإحداثيات المرجعي. نوضح في المعادلة (1) الشكل العام لهذه المعادلات :

$$u = \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i a_k x^{i-j} . y^j$$

$$v = \sum_{i=0}^t \sum_{j=0}^i b_k x^{i-j} . y^j$$
(1)

حيث  $u, v$  هي الإحداثيات المقاسة في الصورة 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 (2) :

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

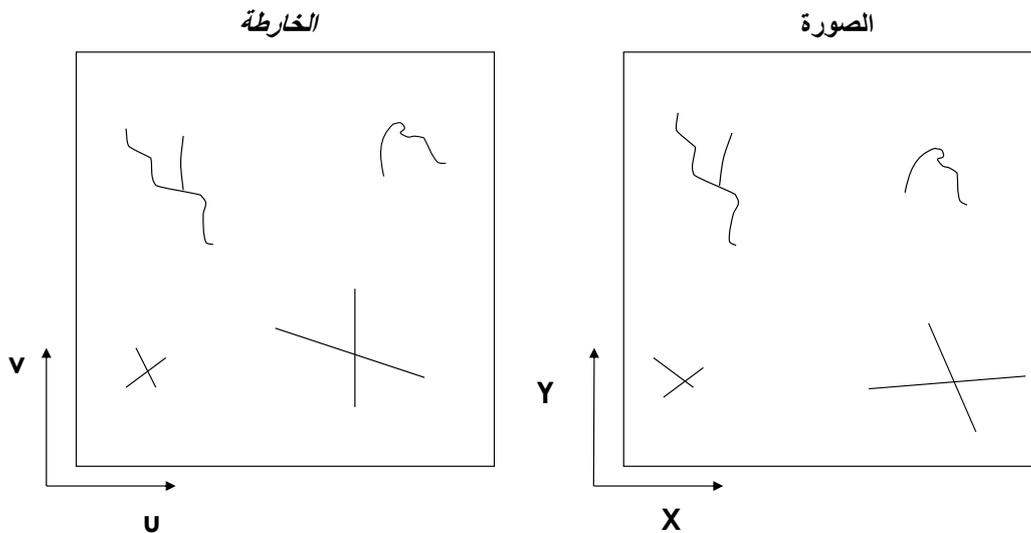
وأخيراً، تعطى العلاقة بين درجة كثير الحدود ( $t$ ) والعدد الأصغري لنقاط الضبط الواجب توفرها ( $N$ ) في الصورة من خلال المعادلة (3):

$$N = \frac{(t+1).(t+2)}{2} \quad (3)$$

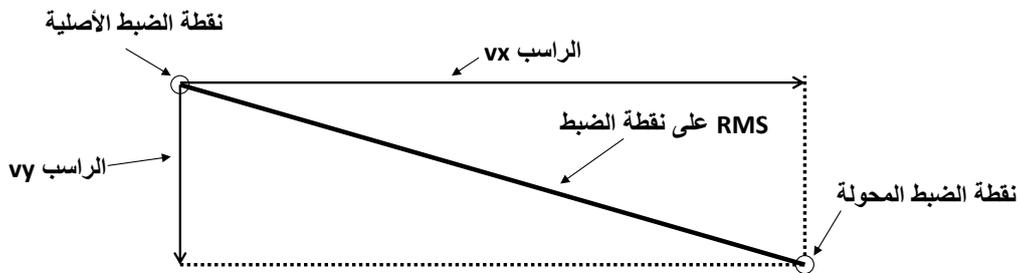
في الخطوة الأولى من التصحيح الهندسي للصورة، يتم حساب وسطاء كثير الحدود باستخدام نقاط الضبط وهي نقاط مميزة (مثل تقاطعات طرق) معلومة الإحداثيات في الصورة وفي نظام الإحداثيات المرجعي أو الخارطة (الشكل (1)). ومن ثم، يتم إعادة حساب مواقع نقاط الضبط هذه اعتماداً على وسطاء التحويل المحسوبة وذلك كي تتمكن من الحكم على نوعية كل نقطة ضبط بمفردها وعلى النوعية الكلية للتصحيح. في الواقع، يتم تقييم دقة نقطة الضبط اعتماداً على قيمة الخطأ المتوسط التربيع (Root Mean Square (RMS) error على هذه النقطة وهو يحسب من خلال المعادلة التالية :

$$RMS_i = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2} \quad (4)$$

حيث :  $v_{xi}, v_{yi}$  هي الرواسب الخاصة بنقطة الضبط  $i$  في الاتجاهين  $x$  و  $y$  على الترتيب (الشكل (2)).



الشكل (1). نقاط الضبط في الصورة والخارطة.



الشكل (2). الخطأ المتوسط التربيع على نقطة الضبط.

أما خطأ المتوسط التربيع الكلي والناتج عن جميع نقاط الضبط (والتي عددها  $n$  نقطة) فيعطى بالمعادلة التالية:

$$RMS = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} \quad (5)$$

حيث :

$$R_x = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{xi}^2}, \quad R_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{yi}^2} \quad (6)$$

وتعطى مساهمة كل نقطة  $i$  من نقاط الضبط في قيمة الخطأ المتوسط التربيع الكلي في المعادلة التالية :

$$E_i = \frac{RMS_i}{RMS_T} \quad (7)$$

#### ➤ حدود السماحية للخطأ متوسط التربيع الكلي

مما لا شك فيه، أن القيمة المسموحة (حدود السماحية Tolerance) للخطأ متوسط التربيع تتبع بشكل أساسي للتطبيق الذي ستستخدم فيه الصورة المصححة. وبحسب القاعدة الكارثوغرافية التشابهية القديمة المستخدمة في تقييم المقدار المقبول للخطأ المتوسط التربيع الكلي لتصحيح الصورة، فإن القيمة المسموحة لهذا الخطأ تتبع لمقياس الخارطة التي يمكن صناعتها من الصورة المصححة (المعادلة (8)) :

$$RMS_T \leq \frac{(0.2 \rightarrow 0.3) \cdot S}{1000} \quad (8)$$

حيث تعطى قيمة  $RMS_T$  بالمتر في هذه العلاقة وقيمة  $S$  هي مخرج المقياس الخاص بالخارطة التي يمكن استنتاجها من الصورة المصححة.

ولكن مع ظهور المستشعرات الرقمية، صارت العلاقة السابقة بحاجة إلى تطوير بحيث تناسب الطبيعة الرقمية لصور هذه المستشعرات. ففي هذا النوع من الصور، يرتبط مقياس الخارطة Map Scale (وبالتالي القيمة المسموحة للخطأ متوسط التربيع الكلي) بأبعاد البكسل على الأرض أو بدقة التمييز الأرضية للصورة Ground Resolution (GR). لقد بينت التجارب أن أصغر عنصر يمكن التعرف إليه يجب أن تكون أبعاده 0.25 mm على الأقل حسب مقياس الخارطة. ومن أجل أن يكون العنصر قابل للتحديد في صورة رقمية مع شروط تباين متوسطة، فيجب أن يصور بقيمة تساوي على الأقل 1/5 دقة تمييز هذه الصورة. و من هنا، يمكن تقدير قيمة دقة التمييز الأرضية اللازمة حسب العلاقة التالية (بشير Map Scale في العلاقة التالية إلى مخرج المقياس):

$$GR = \frac{1}{5} \times 0.25 \text{ mm} \times \text{Map Scale} \times 10^{-3} \quad (9)$$

$$= 5 \times 10^{-5} \times \text{Map Scale}$$

من العلاقتين (8) و (9) يمكننا أن نعطي صيغة جديدة لحساب حد التساهل للخطأ المتوسط التربيع الكلي لتصحيح الصورة وهذا ما تعبر عنه المعادلة (10) ::

$$RMS_T \leq \frac{(0.2 \rightarrow 0.3) \cdot 5}{0.25} GR(\text{in meters}) \Rightarrow \quad (10)$$

$$RMS_T \leq (4 \rightarrow 6) \cdot GR(\text{in meters})$$

#### ➤ حدود السماحية لنقاط الضبط

يمكن البدء بتحديد مساهمة كل نقطة ضبط في الخطأ المتوسط التربيع الكلي. مع ملاحظة أن في حال عدم معرفة النموذج الهندسي للمستشعر Sensor geometric model (معاملات توجيهه الداخلي ومنها معاملات تزيغات

العدسة) فإن مساهمة النقاط الأقرب إلى مركز الصورة أقل من تلك الخاصة بالنقاط البعيدة عن المركز نظراً لزيادة الانتقالات الناتجة عن تزيغات العدسة. تحسب مساهمة نقطة الضبط بنسبة الخطأ المتوسط التربيع عليها  $RMS_i$  إلى الخطأ المتوسط التربيع الكلي  $RMS_T$  :

$$C = \frac{RMS_i}{RMS_T} \quad (11)$$

فيما يخص نقطة ضبط معينة وآلية قبولها أو رفضها بنتيجة الحساب، فلدينا أسلوبان للحكم. في الأسلوب الأول، نعتبر أن الرواسب على نقاط الضبط تتبع للتوزيع الطبيعي وبالتالي فإنه من وجهة نظر إحصائية يجب أن يقع ما مقداره 68% من قيم الأخطاء المتوسطة التربيع على نقاط الضبط بين القيمتين  $-RMS_T$  و  $+RMS_T$ . أما في الأسلوب الآخر فالقيود على قبول نقطة ضبط أشد حيث يتوجب أن يقع ما مقداره 90% من قيم الأخطاء المتوسطة التربيع على نقاط الضبط بين القيمتين  $-RMS_T$  و  $+RMS_T$ . وهنا نشير إلى أن القيم العددية للأخطاء متوسطة التربيع على نقاط الضبط لا تكفي وحدها للحكم على قبول هذه النقاط، بل يجب التحقق من عدم انحياز هذه الأخطاء لاتجاه جغرافي ما. أي يتوجب على الرواسب على نقاط الضبط أن تتوزع بشكل عشوائي (سالبة أو موجبة) وألا تكون منحازة إلى اتجاه ما. يتم تفحص الانحياز Bias من خلال رسم الأخطاء و الاطلاع على نمط توزعها في الصورة. وقد أثبتت التجربة العملية أنه إذا كانت هذه الأخطاء كلها سالبة داخل الصورة وموجبة على طول الأطراف، فقد يتوجب علينا الانتقال إلى تطبيق كثير حدود من درجة أعلى.

#### ➤ البرنامج ERDAS IMAGINE

تم استخدام البرنامج ERDAS IMAGINE في التصحيح الهندسي للصور الفضائية المستخدمة في هذا البحث. ولقد وقع الاختيار على هذا البرنامج لأنه يعطي تفاصيل الحساب الخاصة بنوعية التصحيح على خلاف باقي البرنامج (مثل البرنامج ArcGIS أو Raster Design) والتي تكفي بإعطاء بعض المؤشرات الإحصائية فقط.

### النتائج والمناقشة

- سنعطي في هذا الجزء تطبيقاً عملياً للمعايير التي تم عرضها سابقاً. حيث سنقوم :
1. اقتطاع صورتين فضائيتين من المتصفح المجاني Google Earth تغطي أولهما منطقة محدودة الاتساع ومستوية نسبياً، أما الثانية فتغطي منطقة ذات طبيعة طبوغرافية متنوعة (وجود اختلاف في المناسيب). الهدف من استخدام الصورة الثانية هو توضيح تأثير عدم الاستوائية للمنطقة المصورة على موثوقية نتائج التصحيح الهندسي.
  2. تحديد دقة التمييز الأرضية للصور.
  3. تحديد مجموعة من نقاط الضبط في المناطق المصورة بحيث تكون كافة من حيث العدد (العدد يصلح لتطبيق كثيرات حدود من درجات عالية نسبياً) وموزعة على شكل موحد في كامل المشهد.
  4. حساب معاملات التصحيح الهندسي لكلا الصورتين ومناقشتها وفق المعايير السابقة.

#### ➤ اقتطاع الصور من المتصفح Google Earth

صارت الصور الفضائية التي يوفرها هذا المتصفح تشكّل مصدراً أساسياً للمعطيات المكانية ثنائية البعد 2D spatial data والوصفية في الكثير من التطبيقات. هذا وتجب الإشارة إلى توفر برمجيات كثيرة تسمح بالاستيراد المباشر لصور من هذا المتصفح وهي مصححة هندسياً ومنها البرنامج Shape2earth والبرنامج ArcGIS والذي

يتعامل مع الصيغة Kml الخاصة بهذا المتصفح. ولكننا نجهل في هذه الحالات ما هو كثير الحدود المستخدم وما هي دقة التصحيح الهندسي المطبق ولذلك فإن تطبيق التصحيح الهندسي بالاستعانة بنقاط ضبط محددة يبقى أفضل وذلك لأنه يعطينا مؤشرات على دقة التصحيح مع حرية تغيير درجة كثير الحدود المطبق.

### الصورة الأولى

تمثل الصورة الأولى منطقة محدودة الاتساع (أبعادها التقريبية 4.5 km x 2 km) وشبه مستوية وهي منطقة مروج دمسرخو في محافظة اللاذقية. وفيما يتعلق بنقاط الضبط، فقد تم قياس 22 نقطة ضبط تم توزيعها بمساعدة البرنامج Google Earth وتم حفظ إحداثياتها الجغرافية ضمن النظام WGS84. ثم قمنا بتحويل هذه الإحداثيات إلى إحداثيات متعامدة ضمن نظام الارتسام الستيريوجرافي السوري. يوضح الشكل (3) الصورة الفضائية المقطعة مع توزيع نقاط الضبط عليها بشكل موحد Uniform distribution. إن هذه المواصفات تعتبر مواصفات الحالة النموذجية لتطبيق كثيرات الحدود ثنائية البعد في عملية التصحيح الهندسي للصور الفضائية. تم بعد ذلك حساب دقة التمييز الأرضية للصورة (المسافة التي يغطيها طول البكسل على الأرض) فوجدنا أنها تساوي ما مقداره 0.91 m. في الواقع، حجم الصورة هو (4800 x 2031) بكسل (وهي أفضل دقة أعطانا إياها Google Earth) و طول المنطقة التي تغطيها الصورة تبلغ 4363.64 m، وبالتالي يمكن حساب دقة التمييز الأرضية كمايلي:

$$GR = \frac{4363.64}{4800} = 0.91 \text{ m}$$



الشكل (3). الصورة الفضائية الأولى مع توزيع نقاط الضبط.

كما نعطي في الجدول (1) إحداثيات نقاط الضبط بعد تحويلها إلى النظام الستيريوجرافي السوري:

الجدول (1). إحداثيات نقاط ضبط الصورة الأولى بعد تحويلها إلى النظام الستيريوجرافي السوري.

رقم النقطة	X (m)	Y (m)
1	-305503.32	155712.90
2	-306605.36	151966.41
3	-307382.57	155811.59
4	-305275.79	155327.12
5	-306139.46	155301.20

6	-307411.74	155395.24
7	-305218.22	154810.70
8	-306186.52	154845.97
9	-307448.68	154927.95
10	-305210.30	154129.08
11	-306376.08	154141.36
12	-307607.09	154469.39
13	-306967.20	154314.87
14	-305561.98	154023.66
15	-304889.97	155053.25
16	-306715.73	155352.35
17	-305661.36	154871.21
18	-306733.45	154938.08
19	-304865.95	154505.58
20	-307874.69	155830.68
21	-307968.43	154474.19
22	-307987.49	155081.25

### الصورة الثانية

تمثل الصورة الثانية منطقة محدودة الاتساع (أبعادها التقريبية 2.5 km x 1.5 km) ولكنها ذات طبيعة عمرانية متنوعة أي أنها مختلفة المناسيب وتظهر فيها الانزياحات الناتجة عن الارتفاع بشكل واضح. تقع هذه المنطقة في مدينة اللاذقية بين مدخل الجامعة، والمركز الثقافي شمالاً وبجانبها شارع عبد القادر الحسيني جنوباً. وفيما يتعلق بنقاط الضبط، فقد قمنا بقياس 22 نقطة ضبط (كما في حالة الصورة الأولى) تم توضيحها بمساعدة البرنامج Google Earth وتم حفظ إحداثياتها الجغرافية ضمن النظام WGS84. ثم قمنا بتحويل هذه الإحداثيات إلى إحداثيات متعامدة ضمن نظام الارتسام الستيريوغرافي السوري. يوضح الشكل (4) الصورة الفضائية المقطعة مع توزيع نقاط الضبط عليها بشكل موحد. الهدف من هذا المثال هو توضيح تأثير اختلاف المناسيب (عدم استوائية الأرض) على نتائج التصحيح الهندسي. فيما يخص دقة التمييز الأرضية لهذه الصورة، فقد تم حسابها بنفس طريقة الصورة الأولى فوجدنا أنها تساوي ما مقداره 0.46 m.



الشكل (4). الصورة الفضائية الثانية مع توزيع نقاط الضبط.

كما نعطي في الجدول (2) إحداثيات نقاط الضبط بعد تحويلها إلى النظام الستيريوجرافي السوري :

الجدول (2). إحداثيات نقاط ضبط الصورة الثانية بعد تحويلها إلى النظام الستيريوجرافي السوري.

رقم النقطة	X (m)	Y (m)
1	-305146.98	152066.87
2	-304661.17	151966.41
3	-304156.60	152057.52
4	-303824.11	151661.20
5	-304130.27	151652.59
6	-305392.55	151736.42
7	-303793.73	151415.28
8	-304144.25	151422.34
9	-304438.19	151462.69
10	-305461.76	151522.21
11	-303756.79	151017.71
12	-304183.96	150995.55
13	-304537.25	151048.67
14	-305496.26	151207.52

15	-304843.54	151572.15
16	-304388.33	152004.49
17	-305034.25	151140.24
18	-303388.35	151063.43
19	-303535.45	151780.82
20	-303656.28	152127.52
21	-303524.56	151585.21
22	-303475.15	151395.42

### ➤ التصحيح الهندسي للصورة الأولى

تم استخدام كل نقاط الضبط المتاحة (باستثناء نقطة واحدة لم تكن واضحة على الصورة) في المشهد في حساب التصحيح الهندسي للصورة الأولى (بمساعدة البرنامج ERDAS IMAGINE مع تطبيق كثير حدود من الدرجة الثانية) فحصلنا خطأ متوسط تربيع كلي مساو لـ 2.39 m. كما حصلنا على الرواسب على نقاط الضبط ( المحولة نتيجة تطبيق التصحيح الهندسي) و الخطأ المتوسط التربيع على كل نقطة مع مقدار مساهمتها في الخطأ الكلي وهذا موضح في الجدول (3) :

الجدول (3). معايير نوعية نقاط الضبط المحولة نتيجة تطبيق التصحيح الهندسي على الصورة الاولى .

رقم النقطة	Vx (m)	Vy (m)	RMSi (m)	مساهمة النقطة
1	1.17	-0.19	1.18	0.50
2	-1.53	0.30	1.56	0.65
3	-2.78	-3.38	4.38	1.83
4	2.62	0.66	2.70	1.13
5	0.30	-0.74	0.80	0.33
6	-0.94	1.81	2.04	0.85
7	2.13	0.16	2.13	0.89
8	-0.35	-0.31	0.47	0.20
9	0.56	-0.09	0.57	0.24
10	2.26	-0.40	2.30	0.96
11	-1.15	-0.75	1.37	0.57
12	1.14	1.10	1.59	0.66
13	1.66	3.56	3.93	1.64
14	-2.08	1.14	2.37	0.99
15	-0.59	1.09	1.24	0.52

16	0.18	-1.67	1.68	0.70
17	-0.76	-1.22	1.44	0.60
18	-3.47	-0.19	3.48	1.46
19	2.48	2.05	3.22	1.35
20	-2.91	-2.71	3.97	1.66
21	2.05	-0.21	2.06	0.86

### تحليل نوعية التصحيح الهندسي للصورة الأولى

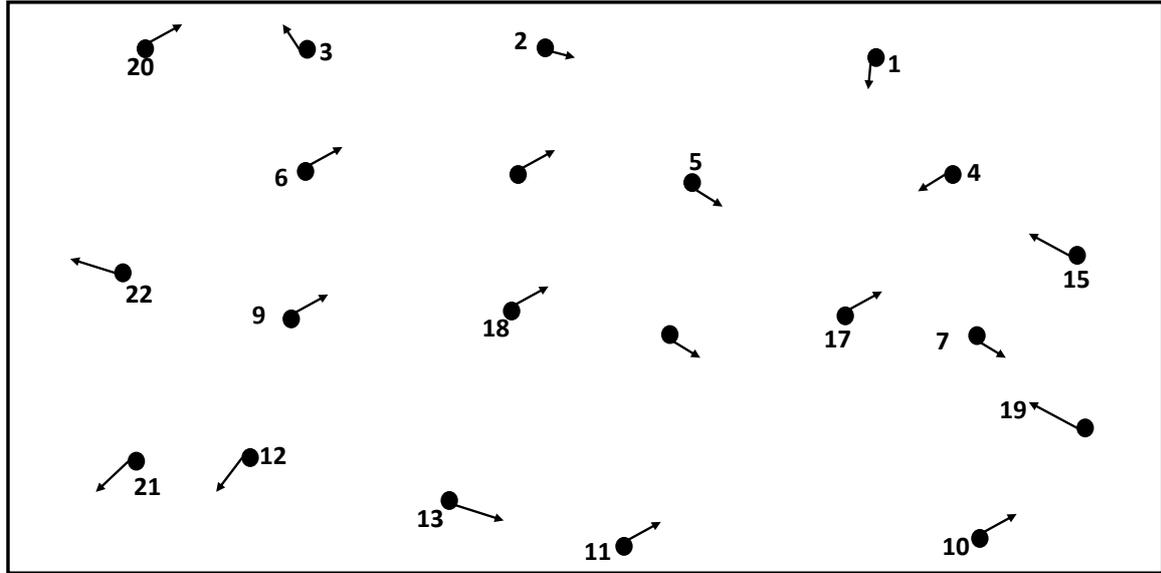
✓ فيما يخص الخطأ متوسط التربيع الكلي، فإنه مقبول بحسب المعادلة (10) (الحد المسموح يتراوح بين 3.6 و 5.4 m).

✓ أما فيما يخص الخطأ المتوسط التربيع على كل نقطة ضبط، فقد وجدنا أن مقياس ا لخارطة الممكن استنتاجها من الصورة الأولى هو تقريباً :  $\frac{1}{18000}$ . وبما أن نقاط الضبط تم قياسها على هذه الصورة، فإن دقة القياس تصل حتى  $0.25 * \text{Map scale}$  (ESRI., 20015) (في حالتنا، هذه القيمة تساوي 4.5 m) ومنه فإن الخطأ المتوسط التربيع على كل نقطة ضبط محولة نتيجة تطبيق التصحيح الهندسي، يجب ألا يتجاوز هذه القيمة. من خلال معاينة الجدول (3)، نجد أن كل النقاط مقبولة. من الصحيح أن هنالك نقاطاً تحمل قيمة كبيرة نسبياً، ولكن هذا يمكن تفسيره من خلال موقع النقاط بالنسبة لمركز الصورة حيث أن هذه النقاط تقع في طرف الصورة مما يجعلها عرضةً لتشوهات ناتجة عن الميل وتزيغات عدسة المستشعر. إن هذا النوع من التشوهات غير قابل للتصحيح لأننا لا نعرف مواصفات المستشعر الذي التقط الصورة.

✓ فيما يخص شرط وقوع ما مقداره 68% من قيم الأخطاء المتوسطة التربيع على نقاط الضبط بين القيمتين  $-RMS_T$  و  $+RMS_T$ ، فإننا نجد أن 15 نقطة من أصل 21 تحقق هذا الشرط (النسبة تصل حتى 70%).

✓ فيما يخص التحيز لاتجاه ما، فإننا نجد أن الرواسب من إشارات مختلفة وتوزع بشكل عشوائي ولا تتحيز لاتجاه محدد. يوضح الشكل (5) مواقع نقاط الضبط في الصورة مع اتجاهات الأخطاء متوسطة التربيع عليها ممثلةً بأسهم.

مما سبق، نستنتج أن كثير الحدود من الدرجة الثانية يعتبر مقبولاً جداً لإنجاز التصحيح الهندسي لهذه الصورة (مع الاخذ بعين الاعتبار مواصفات منطقة الصورة وعدد نقاط الضبط وتوزعها).



الشكل (5). التوزع العشوائي لاتجاهات الأخطاء المتوسطة التربيع على نقاط الضبط في الصورة. نلاحظ أنه لا يوجد اتجاه مسيطر للأخطاء متوسطة التربيع.

بعد قبول نتائج التصحيح يمكن حساب الصورة الرقمية المصححة. يوضح الشكل (6) الصورة المصححة بعد تطبيق خوارزمية الاعتيان Resampling بطريقة الجار الأقرب Nearest neighbor.



الشكل (6). الصورة المصححة الناتجة.

### ➤ التصحيح الهندسي للصورة الثانية

كررنا نفس العمل السابق لحساب معاملات التصحيح الهندسي للصورة الفضائية الثانية (مع حذف النقطة 1 لأنها شاذة وتطبيق كثير حدود من الدرجة الثانية) فحصلنا خطأ متوسط تربيع كلي مساو لـ  $4.89 \text{ m}$ . كما حصلنا على الرواسب على نقاط الضبط (المحوّلة نتيجة تطبيق التصحيح الهندسي) و الخطأ المتوسط التربيع على كل نقطة مع مقدار مساهمتها في الخطأ الكلي وهذا موضح في الجدول (4) :

الجدول (4). معايير نوعية نقاط الضبط المحولة نتيجة تطبيق التصحيح الهندسي على الصورة الثانية .

رقم النقطة	Vx (m)	Vy (m)	RMSi (m)	مساهمة النقطة
2	-0.6058	7.015413	7.041521	1.438759
3	2.777543	-0.44833	2.813494	0.574867
4	-2.62182	-1.3507	2.949288	0.602613
5	-2.46768	-0.15583	2.472595	0.505213
6	-0.26112	-0.6551	0.705221	0.144094
7	-0.55613	-1.7881	1.872586	0.382616
8	-4.62027	0.847168	4.697296	0.959775
9	-2.27356	-2.27125	3.213667	0.656633
10	-7.36169	-2.51407	7.779145	1.589474
11	1.853832	-4.6648	5.01967	1.025644
12	-4.15917	-2.40171	4.802803	0.981333
13	-3.06987	1.329226	3.345283	0.683525
14	1.06743	-1.98459	2.253442	0.460435
15	7.391539	-0.8632	7.441771	1.52054
16	3.9705	-2.73658	4.822215	0.985299
17	7.896014	6.968264	10.53108	2.151764
18	0.409602	4.025989	4.046771	0.826857
19	-0.05641	4.124772	4.125157	0.842873
20	-4.05932	-2.52847	4.782388	0.977162
21	3.910402	-0.21618	3.916373	0.800213
22	2.835983	0.268075	2.848625	0.582045

#### تحليل نوعية التصحيح الهندسي للصورة الثانية

- فيما يخص الخطأ متوسط التربيع الكلي (والذي قيمته 4089m)، فإنه غير مقبول بحسب المعادلة (10) (الحد المسموح يتراوح بين 1.84 و 2.76 m).
- ✓ أما فيما يخص الخطأ المتوسط التربيع على كل نقطة ضبط، فإننا نستطيع الحكم عليه بنفس مقاربة الصورة الأولى. وهنا وجدنا أن مقياس الخارطة التي يمكن استنتاجها من مرئية فضائية دقة تمييزها الأرضية هي 0.46 m تقريباً :  $\frac{1}{10000}$ . وبما أن نقاط الضبط تم قياسها على هذه الصورة، فإن دقتها تصل حتى 3 m. ومنه فإن الخطأ المتوسط التربيع على كل نقطة ضبط محولة نتيجة تطبيق التصحيح الهندسي، يجب ألا يتجاوز هذه القيمة. من خلال معاينة الجدول (4)، نجد أن العديد من النقاط غير مقبول.
- يمكن في هذه الحالة اللجوء إلى أحد حلين لتحسين دقة التصحيح:

1. حذف النقاط التي يتجاوز الخطأ المتوسط التربيع عليها دقة قياس النقطة على الصورة. وبالفعل قمنا بحذف أربع نقاط ولكننا لم نحصل على خطأ متوسط تربيع أفضل من 3.49 m وهو غير مقبول.
  2. زيادة درجة كثير الحدود. قمنا بزيادة درجة كثير الحدود إلى الدرجة الثالثة ولم نحصل على قيمة أفضل من 3.57 m وهي غير مقبولة أيضاً.
- مما سبق، نستنتج أن كثيرات الحدود من الدرجة الثانية أو الثالثة لا تعتبر حلاً مقبولاً لإنجاز التصحيح الهندسي لهذه الصورة وذلك بسبب طبيعتها الطبوغرافية (منطقة غير مستوية ذات عناصر مرتفعة).

### الاستنتاجات والتوصيات

انطلاقاً من الدراسة السابقة، بشقيها النظري والعملي نستنتج أن كثيرات الحدود من الدرجة الثانية قد تشكل حلاً مقبولاً لمسألة التصحيح الهندسي للصور الفضائية التي تغطي المشاهد الأرضية المستوية والتي تتوزع فيها نقاط الضبط بشكل موحد مع عدد كافٍ منها. كما نجد أن قرار رفع درجة كثير حدود ما يجب أن يستند إلى مبررات تتعلق بنوعية التصحيح من ناحيتي الخطأ المتوسط التربيع الكلي والأخطاء المتوسطة التربيع على نقاط الضبط ونمط انتشارها. واستنتجنا أيضاً الحاجة إلى ربط مقياس الخارطة التي يمكن إنتاجها من صورة فضائية رقمية بحجم البكسل في هذه الصورة خلافاً للطريقة الكارتوغرافية التشابهية القديمة. إن حجم البكسل يشكل أيضاً أساساً لاعتماد معيار للحكم على دقة التصحيح الكلية وعلى نوعية نقاط الضبط المستخدمة فيه.

تم التوصل، في نهاية البحث، إلى التوصيات التالية:

1. تطبيق معايير محددة عند اختيار كثيرات الحدود لتصحيح الصور هندسياً هذه المعايير هي الطبيعة الطبوغرافية للأرض وامتدادها الجغرافي إضافة لعدد نقاط الضبط وتوزعها.
2. إجراء تحليل مفصل للمؤشرات الإحصائية لعملية التصحيح قبل أن نقرر حذف نقطة ضبط ما من الحساب أو قبل رفع درجة كثير الحدود المستخدم.
3. إن الطبيعة الطبوغرافية للمشهد المصور عامل هام جداً في تحديد نجاح أو فشل عملية التصحيح الهندسي. وفي حال كون هذه الطبيعة متعددة المناسيب فإننا نوصي بتطبيق كثيرات حدود من الدرجة الثالثة وذلك لحل مسألة الإزاحة الناتجة عن الارتفاعات.

### المراجع

- [1]. Toutin, T., 2003. *Review Paper: Geometric Processing of Remote Sensing Images: Models, Algorithms and Methods*. Canada Centre for Remote Sensing. 2003.
- [2]. F. Eltohamy and E. H. Hamza, *Effect of ground control points location and distribution on geometric correction accuracy of remote sensing satellite images*. In Proceedings of the 13th International Conference on Aerospace Sciences & Aviation Technology (ASAT – 13), 26 – 28 May 2009.
- [3]. L, Hung Liew., Y.C, Wang., W, Cheah., 2012. *Evaluation of Control Points' Distribution on Distortions and Geometric Transformations for Aerial Images Rectification*. In Procedia Engineering 41 ( 2012 ) 1002 – 1008. 2012.
- [4]. Billingsley, F.C., 1983, *Data Processing and Reprocessing*, in Manual of Remote Sensing, 2nd Edition, Vol. 1, Editor-in-chief R.N. Colwell, (Falls Church, Virginia, USA : Sheridan Press), pp. 719-722.

[5.] Wong, F., Orth, R., and Friedmann, D., 1981. *The Use of Digital Terrain Model in the Rectification of Satellite-Borne Imagery*. Proceedings of the 15th International Symposium on Remote Sensing of Environment, Ann Arbor, Michigan, (ERIM: Ann Arbor, USA), pp. 653-662.

[6.]. ESRI., 2015. ArcGIS Resources. On map scale and raster resolution. <http://blogs.esri.com/esri/arcgis/2010/12/12/on-map-scale-and-raster-resolution/> (2015).

[7] . الخليل، عمر . 2015: تأثير نقاط الضبط على الطريقة المباشرة لتصحيح التشوهات الهندسية في الصور القريبة. مجلة جامعة تشرين للعلوم الهندسية. 2015.