

تقييم لتأثير المعاملات الداخلة في توليد الأورثوفوتو الرقمي على دقته الأفقية

د. عمر الخليل*

د. وائل ديوب**

ميّار خير بك***

(تاريخ الإيداع 2 / 8 / 2021. قُبِلَ للنشر في 3 / 10 / 2021)

□ ملخص □

سعيًا في هذا البحث بدراسة تأثير دقة النموذج الرقمي للأرض المستقرًا بالطرائق القطعية والعشوائية وكذلك تأثير معاملات التوجيه الداخلي والخارجي على النوعية الهندسية للأورثوفوتو. كما نسعى إلى اختبار النماذج الرقمية للارتفاعات والأورثوفوتو الناتجين عن تطبيق تقنية المسح التصويري المؤتمت بطريقة الحصول على البنية من الحركة Structure from Motion (SfM) لمعرفة فيما إذا كانت تمكننا من الحصول على دقة وموثوقية أعلى من الطرائق التقليدية. لقد عرضنا في هذا البحث مفهوم الإرجاع العامودي للصور مع منهجية لتقييم تأثير دقة المدخلات على الدقة النهائية للأورثوفوتو بدءاً من جودة الصور، دقة التثليث الجوي وصولاً إلى دقة النموذج الرقمي للارتفاعات. وأخيراً، ناقشنا تطبيق عملي لاختيار طريقة الاستقراء الأفضل للنموذج الرقمي للارتفاعات انطلاقاً من نقاط ارتفاعية مقتطعة من مخططات طبوغرافية ومن ثم تقييم الأورثوفوتو الناتج عن استخدام هذا النموذج وتقنية SfM. لقد أثبتت التجربة العملية أنه من الممكن باستخدام هذه التقنية تحسين الدقة الشاقولية للنموذج الرقمي للارتفاعات بنسبة قد تصل إلى الضعف مقارنةً بالطرائق التقليدية (تحسّنت الدقة الشاقولية من 0.0603 m إلى 0.0355 m).

الكلمات المفتاحية: نموذج رقمي للارتفاعات، أورثوفوتو، اقتطاع البنية من الحركة SfM، استقراء، دقة أفقية، تثليث جوي.

* أستاذ - قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية. Omaralkhalil@gmail.com

**أستاذ - قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية. Waeldayoub@hotmail.com

***طالب دراسات عليا - ماجستير - قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.

maiarkheirbek13@gmail.com

Evaluation of the Effect of the Parameters Involved in Generating of Digital Orthophoto on its Horizontal Accuracy

Dr. Omar AL KHALIL*
Dr. Wael DAYOUB**
Maiar KHEIRBEK***

(Received 2 / 8 / 2021. Accepted 3 / 10 / 2021)

□ ABSTRACT □

In this research, we seek to study the effect of the accuracy of the digital elevation model (DEM) interpolated by deterministic and stochastic methods, as well as the effect of the inner and outer orientation parameters on the geometric quality of the orthophoto.

We also aim to test DEM and orthophoto resulting from the application of Structure from Motion (SfM) photogrammetry to see if it enables us to obtain higher accuracy and reliability than traditional methods.

Finally, we discussed a practical application for selecting the best interpolation method for the digital elevation model from elevation points extracted from topographic map and then evaluating the resulting orthophoto using this model and the SfM technique. Practical experience has shown that using this technique it is possible to improve the vertical accuracy of the digital elevation model by up to twice as compared to conventional methods (vertical accuracy improved from 0.0603 m to 0.0355 m).

Keywords: Digital Elevation Model, Orthophoto, Structure from Motion (SfM), Interpolation, horizontal accuracy, Aerial triangulation.

*Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Omaralkhalil@gmail.com

Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Waeldayoub@hotmail.com

Postgraduate Student, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. maiarkheirbek13@gmail.com

مقدمة:

الصورة المرجعة عامودياً (الأورثوفوتو Orthophoto) هي صورة تم تصحيحها من التشوهات الناتجة عن ميل آلة التصوير والتشوهات الناتجة عن تزيغات العدسة وكذلك الانزياحات الناتجة عن الارتفاعات في المشهد المصور، وبالتالي يمكن استخدامها كخارطة [1]. وبفضل هذه الخاصية، يمكن للصورة المرجعة عامودياً أن تزودنا بمعلومات كمية (أي مترية) وكيفية (أي وصفية) وبالتالي فهي ذات قيمة عالية في مختلف أنواع الدراسات الهندسية المطلوب إنجازها في الوسط المصور [2].

المدخلات اللازمة لإنتاج الأورثوفوتو هي صورة جوية شاقولية أو شبه شاقولية Near vertical ومعاملات التوجيهين الداخلي Interior orientation والخارجي Exterior orientation لآلة التصوير التي التقطت هذه الصورة (موقع وتوجيه الآلة) ونموذج رقمي للارتفاعات Digital Elevation Model (DEM) للمنطقة. وتتبع دقة الأورثوفوتو لدقة هذه العناصر، فللحصول على أورثوفوتو دقيق، يجب أن يكون ارتفاع الطيران منخفضاً، وآلة التصوير معايرة وذات دقة تمييز عالية مع توفر عدد كبير من نقاط الضبط. ولكن العامل الأهم هو توفر نموذج رقمي مفصل ودقيق للارتفاعات [3]. فيما يخص النموذج الرقمي للارتفاعات، فهناك عدة تقنيات تستخدم لإنتاجه بتطبيق تقنية الاستقراء Interpolation. من هذه التقنيات ما يستخدم خطوط الكونتور Contour lines، ومنها ما يستخدم نقاطاً جيوديزية وسمات أخرى ذات منسوب معلوم مثل خطوط الشبكات الهيدرولوجية والطرق والسكك الحديدية. وفي بعض الأحيان، يتم دمج عدة أنماط من هذه المصادر للحصول على هذا النموذج. ومع ظهور تقنية المسح الليزري الجوي أو الليدار LIDAR، صار من الممكن قياس عدد هائل من النقاط وهو ما يساعد على توليد نماذج رقمية لأرض تفصيلية جداً ودقيقة [4]. كما اقترحت أبحاث أخرى حلاً بديلاً، مؤتمتاً وقليل الكلفة وذلك لإنتاج النموذج الرقمي للأرض باعتماد تقنية النمذجة المؤتمتة القائمة على الصور Image-based modelling، والتي لا تقل كثافة النقاط المولدة باستخدامها عن كثافة المساحات الليزرية [5].

يمكن تصنيف الاستقراء إلى استقراء محلي Local interpolation واستقراء عام Global interpolation والفرق الأول بين هذين النوعين هو أن الاستقراء المحلي يستخدم عينات من النقاط المعلومة من أجل تقدير قيمة غير معلومة في حين أن الاستقراء العام يستخدم كل النقاط المعلومة من أجل تقدير قيمة غير معلومة. وهناك فرق آخر بين طرق الاستقراء التي نسميها الطرق القطعية والتي تولد سطحاً يمر بمجموعة من النقاط وطرق الاستقراء العشوائية والتي تنتجاً بقيم مختلفة عن القيم المعلومة (النقاط المستخدمة) [6].

سنقوم في هذا البحث بدراسة تأثير دقة النموذج الرقمي للأرض المستقراً بطرائق قطعية وعشوائية وكذلك تأثير معاملات التوجيهين الداخلي والخارجي على الجودة الهندسية للأورثوفوتو. كما سنقوم باختبار النماذج الرقمية للارتفاعات الناتج عن تطبيق التقنيات القائمة على المسح التصويري المؤتمت بطريقة الحصول على البنية من الحركة Structure from Motion (SfM) وعلى الأورثوفوتو لمعرفة فيما إذا كانت تمكننا من الحصول على دقة وموثوقية أعلى من الطرائق التقليدية.

أهمية البحث وأهدافه:

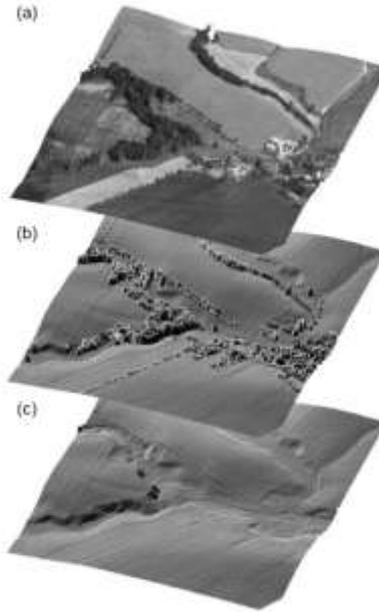
تتركز أهمية هذا البحث في أنه يسعى إلى دراسة تأثير طرائق استقراء النموذج الرقمي للارتفاعات Digital Elevation Model (DEM) على الدقة الهندسية والقدرة التعبيرية للأورثوفوتو. كما تتركز أهميته في اختياره لتقنية المسح التصويري SfM قليلة الكلفة في التوجيه الآلي لمزدوجات الصور الجوية وتوليد نماذج رقمية للارتفاعات وأورثوفوتو منها وذلك كبديل عن الطرائق التقليدية. وبشكل عام، يمكن تلخيص أهداف البحث فيما يلي:

- 1- تقييم دقة الطرائق المختلفة (القطعية والعشوائية) المستخدمة في توليد النموذج الرقمي للارتفاعات وذلك عند تطبيقها على بيانات نقطية تم الحصول عليها من مصدر تقليدي هو نقاط ارتفاعية مقتطعة من مخططات طبوغرافية.
- 2- دراسة تأثير مواصفات الصور وآلة التصوير المستخدمة وكذلك تأثير دقة التثليث الجوي للصور الجوية ونوعية النموذج الرقمي للارتفاعات على دقة الأورثوفوتو.
- 3- تقييم كفاءة تقنية الـ SfM لمعرفة فيما إذا كانت تشكل بديلاً فعالاً للتقنيات التقليدية المستخدمة في إنتاج الـ DEM والأورثوفوتو.

طرائق البحث ومواده:

1- النموذج الرقمي للارتفاعات

من الصحيح أن التقنيتين الأكثر شيوعاً لإنتاج الأرصاد الأرضية اللازمة لتوليد هذه النماذج الرقمية هما المسح الأرضي والمساحة التصويرية التقليدية، إلا أنهما مكلفتان من ناحية الجهد والوقت وخاصةً من أجل المساحات الشاسعة والمناطق الجبلية ومناطق الغابات، وذلك مقارنةً مع تقنية الليزر الجوي المحمول وتقنية المسح التصويري SfM [7]. لقد أصبح استخدام هاتين التقنيتين من أهم مصادر الحصول على نماذج رقمية ثلاثية الأبعاد للمناطق المسوحة على شكل نموذج رقمي للسطح Digital Surface Model (DSM) يمثل سطح الأرض الطبيعية مع كافة السمات المكانية (الأشجار، الأبنية، الطرق، الأنهار، الخ). يمكن استخدام الـ DSM في الدراسات التي تخص السمات المكانية الظاهرة على سطح الأرض، كما في الدراسات المهمة بتحليلات الرؤية ثلاثية الأبعاد ومجال الاتصالات. وهناك اختلاف كبير بين هذا السطح والنموذج الرقمي للأرض Digital Terrain Model (DTM) أو نموذج الارتفاعات الرقمي المنتظم للأرض DEM الذي يعبر عن هذه الارتفاعات بالصيغة النقطية Raster. يعرف هذا النموذج الرقمي ببساطة بأنه عبارة عن تمثيل إحصائي للسطح المستمر للأرض الطبيعية، من خلال عدد كبير من النقاط المقاسة، والمعروفة بإحداثياتها الثلاثية XYZ ضمن نظام إحداثي ما (الشكل (1)). ومن أهم التطبيقات الهندسية للمساحية للنموذج الرقمي للارتفاعات هو توليد أورثوفوتو.



الشكل 1. الحصول على النموذج الرقمي للارتفاعات DEM من النموذج الرقمي للسطح DSM
(a) صورة جوية للمشاهد، (b) نموذج DSM، (c) نموذج DEM

2- طرائق استقراء الـ DEM

يتنبأ الاستقراء Interpolation بقيم الخلايا النقطية Raster انطلاقاً من عدد محدود من عينات المعطيات النقطية، ويمكن استخدامه للتنبؤ بالقيم غير المعلومة من أجل أية معطيات نقطية جغرافية: المنسوب، الهطول المطري، التراكيز الكيميائية، مستوى الضجيج، الخ. هذا، ويمكن تصنيف الاستقراء إلى استقراء محلي Local interpolation واستقراء عام Global interpolation [4]، والفرق الأول بين هذين النوعين هو ان الاستقراء المحلي يستخدم عينات من النقاط المعلومة من أجل تقدير قيمة غير معلومة في حين أن الاستقراء العام يستخدم كل النقاط المعلومة من أجل تقدير قيمة غير معلومة. يمكن تقسيم طرائق استقراء النموذج الرقمي للارتفاعات انطلاقاً من مجموعة من النقاط إلى مجموعتين [5]، [6] هما:

1. الطرائق القطعية والتي تستند على المواصفات الرياضية أو الهندسية بشكل عام.
 2. الطرائق العشوائية (إحصائية أو إحصائية مكانية) والتي تتطلب استخدام نماذج احتمالية.
- فيما يخص مجموعة الطرائق القطعية فنجد فيها ما يأتي: الاستقراء بالتثليث مع التنعيم Triangulation with smoothing، الاستقراء بطريقة التوزين العكسي للمسافة Inverse Distance Weighted (IDW)، الاستقراء بطريقة الجار الطبيعي Natural neighbor، الاستقراء المتعامد Bilinear interpolation والاستقراء Spline. كما نجد الخوارزمية Kriging في الطرائق العشوائية. ونشير إلى توفر معظم هذه الطرائق في عدد كبير من برمجيات نظم المعلومات الجغرافية Geographic Information System (GIS).

3- طرائق تقييم دقة النموذج الرقمي للارتفاعات

الطريقة الأولى، تسمى بطريقة Jackknife وهي تقوم على اقتطاع 5% من النقاط الخام الداخلة في حساب النموذج الرقمي للارتفاعات مع استخدام باقي النقاط من أجل الاستقراء. وتستخدم هذه الطريقة عند توفر عدد كبير من نقاط

المناسب المستخدمة في بناء النموذج الرقمي للارتفاعات. يتم لاحقاً استخدام النموذج الرقمي المستقرأ من أجل التنبؤ بمناسيب النقاط الخام المقطعة. وهنا ستسمح لنا الفروق المحسوبة بين القيم المستقرأة للارتفاعات والقيم الخام من الحصول على مؤشر دقة يسمح بتقييم نوعية النموذج الرقمي الناتج [7].

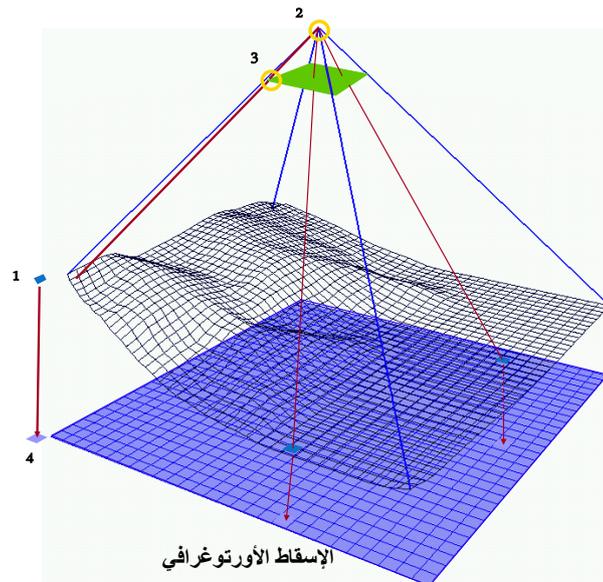
الطريقة الثانية هي طريقة التحقق المتقاطع Cross validation وهي طريقة مشابهة لـ jackknife وتختلف عنها في أنه يتم استخدام كل النقاط الخام في توليد النموذج الرقمي للارتفاعات ومن ثم يتم استخدام قيم البكسل المستقرأة مع قيم ارتفاعات النقاط الخام الأولية. تعطينا هذه الطريقة معلومات حول المواصفات العامة للسطح الأرضي وتسمح على وجه الخصوص بالحصول على فكرة عن الاختلافات الرئيسية بين السطح الخام والسطح المستقرأ [7].

4- مفهوم التصحيح التفاضلي

يتم توليد الأورثوفوتو بطريقة رقمية وذلك من خلال عملية تسمى التقويم التفاضلي Differential rectification. وهنا يتم تقويم كل عنصر تفاضلي عند مقياس مشترك بدلاً من تقويم كامل الصورة عند مقياس متوسط (لأن التقويم عند مقياس متوسط لا يسمح بالتخلص من الانزياحات الناتجة عن الارتفاعات الأرضية).

المعطيات الأساسية لهذا التقويم هي نموذج رقمي للأرض وصورة جوية أو فضائية رقمية معاملات توجيهها الداخلي والخارجي معروفة (الشكل (2)). وبعد ذلك سيسمح تطبيق معادلات التسامت Collinearity equations بتوليد الأورثوفوتو. إن الدور الأساسي للنموذج الرقمي للارتفاعات هو إزالة تأثيرات الانزياحات من الصورة الأصلية عبر إعادة الإسقاط. وبشكل عام، يتم بناء الأورثوفوتو عبر الخطوات التالية:

1. يؤخذ كل بيكسل من النموذج الرقمي للارتفاعات (DEM).
2. باستخدام معاملات التوجيه الخارجي يتم البحث عن الموقع المكافئ للبكسل السابق على الصورة.
3. يتم احتساب قيمة اللمعان Brightness في البكسل السابق اعتماداً على البيكسلات المحيطة به.
4. يتم استخدام قيمة اللمعان هذه مع معاملات المنسوب والتوجيهين الداخلي والخارجي لحساب الموقع المكافئ على الصورة المصححة.



الشكل (2). آلية توليد الأورثوفوتو.

5- البيانات المتوفرة

يتوفر لدينا صور جوية للمنطقة التي تم اختيارها (جامعة تشرين) بمقياس 1/10000. تم التقاط هذه الصور بألة تصوير جوية مترية من النوع RC30 ببعده محراقي 152 mm ومقاس (212 mm × 212 mm) عن ارتفاع طيران 1584.96 قدم عن سطح البحر في العام 2003. كما يتوفر ملف معايرة آلة التصوير المستخدمة الحاوي على المواصفات الداخلية للآلة وإحداثيات علامات عمق حجارة التصوير. منطقة الدراسة مغطاة بشكل كامل بأربع صور جوية. وتبلغ قيمة مسافة الاعتيان الأرضية (Ground Sampling Distance) GSD 0.25. من ناحية أخرى، يتوفر لمنطقة الدراسة ست مخططات طبوغرافية مقياسها 1/1000 وهي على شكل صور ممسوحة ضوئياً. تحوي هذه المخططات نقاط مناسيب معلومة تقع على سطح الأرض الطبيعية، كما تحوي شبكة تربيعات إحداثيات رؤوسها معلومة في النظام الستيريوغرافي السوري. الهدف من استخدام هذه المخططات هو الحصول على النموذج الرقمي للارتفاعات وذلك انطلاقاً من نقاط المناسيب المتوفرة فيها.

النتائج والمناقشة:

1- إرجاع المخططات الطبوغرافية واقتطاع النقاط الارتفاعية

قبل البدء باقتطاع نقاط المناسيب من المخططات الطبوغرافية السابقة كان لابد من إرجاعها Georeferencing إلى جملة الإحداثيات الستيريوغرافية السورية. لإنجاز هذه العملية، تم استخدام إحداثيات رؤوس مربعات شبكة التربيعات كنقاط ضبط، كما تم استخدام البرنامج ArcMap 10.5 في عملية الإرجاع فحصلنا على النتائج التالية المبينة في الجدول (1).

جدول (1). نتائج إرجاع المخططات الطبوغرافية.

رقم المخطط	عدد نقاط الضبط المستخدمة	درجة التحويل كثير الحدود المطبق	RMS total (m)
1	34	2	0.213
2	35	2	0.203
3	34	1	0.237
4	36	1	0.204
5	36	1	0.242
6	37	1	0.211

وبالرجوع إلى مواصفات الدقة المكانية الموضوعية من قبل بعض الهيئات العالمية مثل مواصفات دقة الخرائط العالمية NMA8 [8]، يمكن استنتاج مقياس المخطط انطلاقاً من دقة الإرجاع وفق العلاقة التالية:

$$Scale Number \geq \frac{RMS total}{(0.2 \rightarrow 0.3)mm} \quad (1)$$

نطبق العلاقة (1) على معطيات الجدول السابق فنجد ما يأتي:

جدول (2). مقاييس المخططات وعلاقتها مع دقة الإرجاع.

رقم المخطط	RMS total (m)	مقياس المخطط المحسوب المطبق	المقياس النظامي
1	0.213	1/852	1/1000
2	0.203	1/812	1/1000
3	0.237	1/948	1/1000
4	0.204	1/816	1/1000
5	0.242	1/968	1/1000
6	0.211	1/844	1/1000

نستنتج من الجدول (2) أن الدقة الأفقية لاقتناعاً لنقاط المناسيب ستقارب الدقة الأصلية للمخططات الطبوغرافية الممسوحة ضوئياً.

إن الهدف من اقتطاع النقاط الارتقاعية هو الحصول على المدخلات اللازمة لتوليد النموذج الرقمي للارتفاع باستخدام مختلف الطرائق القطعية والعشوائية المتاحة في برمجيات نظم المعلومات الجغرافية. وهنا، تم تعريف ملف شكل من النوع النقطي في بيئة البرنامج ArcMap وتمت عملية الرقمنة على المخططات المرجعة في الخطوة السابقة حيث تمت رقمنة نقاط المناسيب المتوفرة وإدخال مناسيبها يدوياً إلى جدول المواصفات. وفي نهاية عملية الرقمنة حصلنا على ملف شكل يحوي النقاط الارتقاعية المتوفرة في منطقة الدراسة والتي بلغ عددها الكلي 770 نقطة موضحة في الشكل (3).



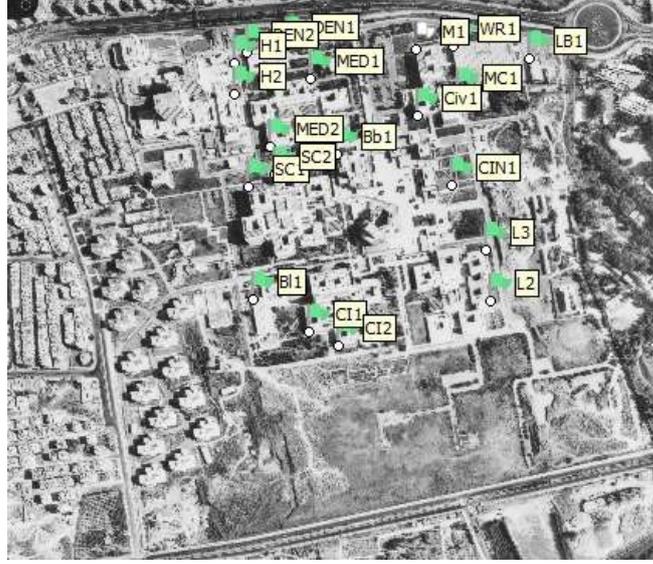
الشكل (3). نقاط المناسيب الناتجة عن رقمنة المخططات الطبوغرافية المرجعة لمنطقة الدراسة.

2- تحضير نقاط ضبط الصور الجوية

تم استخدام المحطة المتكاملة *Leica TS09* في قياس إحداثيات مجموعة من نقاط الضبط (الشكل (4)). ويمكن لهذه المحطة أن تعمل بدون عاكس باستخدام تقنية الليزر. نوضح في الجدول (4) إحداثيات عينة من نقاط الضبط.

جدول (3). إحداثيات بعض نقاط الضبط.

اسم النقطة	X (m)	Y (m)	Z (m)
Bb1	-303298.26	151829.6	57.24
Cl1	-303376.29	151472.42	40.85
Cl2	-303320.68	151441.65	36.73
CIN1	-303073.14	151759.01	39.23



الشكل (4). توزع نقاط الضبط في منطقة الدراسة.

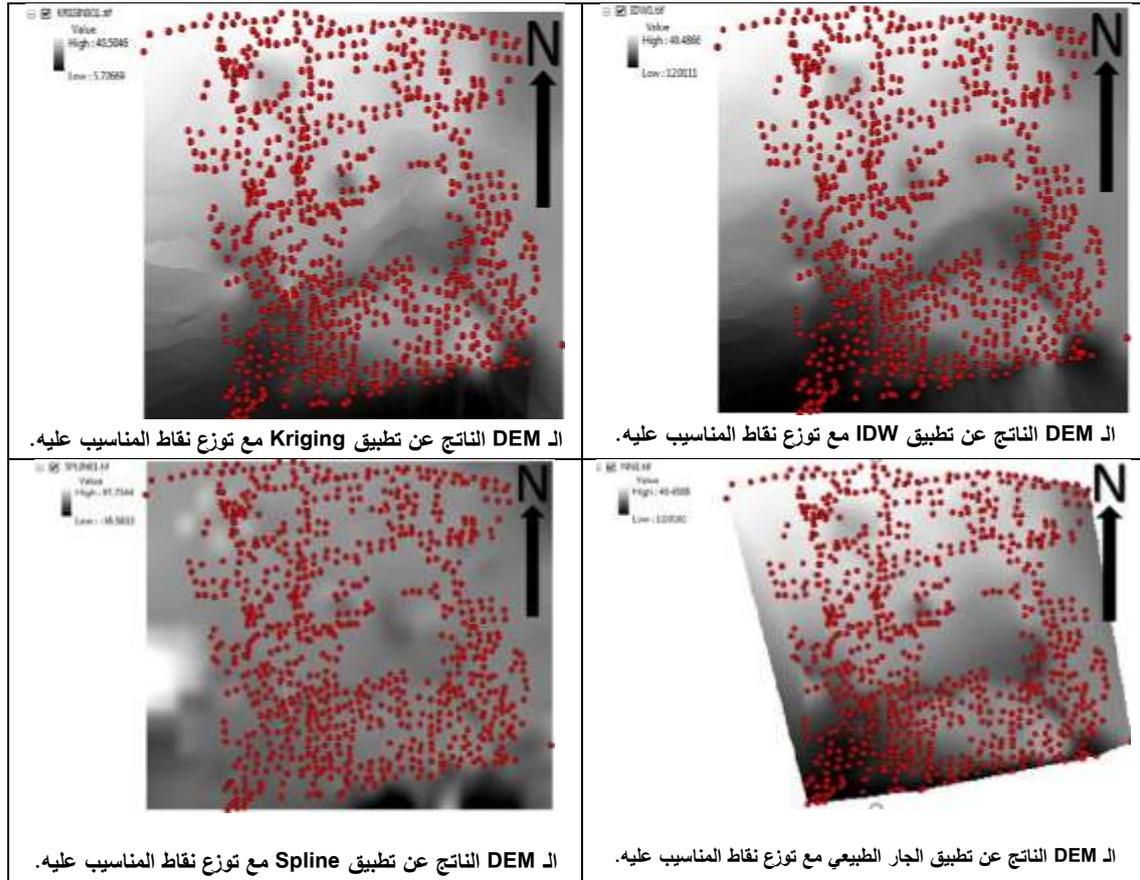
3- المنهجية المتبعة للمعالجة

يمر التدفق العام للمعالجة في هذه الحالة البحثية بالخطوات التالية:

1. توليد النماذج الرقمية للارتفاعات بمختلف الطرائق القطعية والعشوائية المتاحة في البرنامج ArcGIS.
1. تطبيق طريقة التحقق المتقاطع Cross validation في تقييم دقة النماذج والمفاضلة بينها لتحديد النموذج الرقمي الأفضل.
2. اعتماد النموذج الرقمي الأفضل كمدخل لعملية توليد الصورة المصححة عامودياً لمنطقة الدراسة وذلك ضمن البرنامج Agisoft Metashape وتقييم دقة هذه الصورة آخذين بعين الاعتبار كل العوامل المؤثرة في هذه الدقة.
3. توليد النموذج الرقمي للسطح DSM باستخدام تقنية SfM وتصنيف هذا النموذج لاقتطاع النموذج الرقمي للارتفاعات (نقاط الأرض فقط).
4. تقييم دقة النموذج الرقمي للارتفاعات SfM بتطبيق طريقة الاختبار Jackknife.
5. توليد الصورة المصححة عامودياً لمنطقة الدراسة باستخدام النموذج الرقمي للارتفاعات SfM وذلك ضمن البرنامج Agisoft Metashape وتقييم دقة هذه الصورة آخذين بعين الاعتبار كل العوامل المؤثرة في هذه الدقة.
6. مقارنة الصور المرجعة عامودياً الناتجة عن الخطوتين الثانية والخامسة.

أولاً: توليد النماذج الرقمية للارتفاعات

لتوليد النماذج الرقمية للارتفاعات تم استخدام توسع Spatial Analyst الملحق بالبرنامج ArcGIS. تتوفر في هذا البرنامج عدة طرائق محلية لاستقراء النموذج الرقمي للارتفاعات منها: طريقة IDW، طريقة Kriging، طريقة الجار الطبيعي Natural neighbor وطريقة Spline، وهذه الطرائق هي التي تناولناها في بحثنا. وبالنسبة لحجم خلية النموذج الرقمي للارتفاعات الناتج فقد حسبها البرنامج بحيث تتوافق مع كثافة النقاط المدخلة (ضمان وجود نقطة منسوب على الأقل ضمن كل خلية). هذه القيمة تساوي تقريباً 4.5 m. يوضح الشكل (5) نتائج طرائق الاستقراء المدروسة.



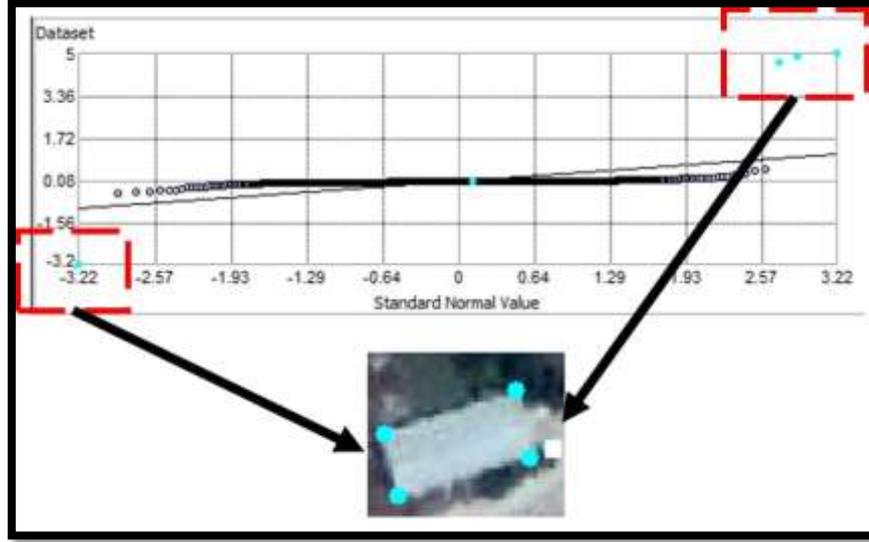
الشكل (5). النماذج الرقمية للارتفاعات الناتجة عن الطرائق المدروسة في البحث.

ثانياً: تقييم النماذج الرقمية للارتفاعات

لتقييم دقة النماذج الرقمية للارتفاعات الناتجة عن طرائق الاستقراء قمنا بتطبيق طريقة التحقق المتقاطع، حيث:

1. تم حساب الفروق بين المناسيب المرجعية والمناسيب المستقراة بكل طريقة استقراء.
2. تم عزل النقاط الشاذة والتي تملك فروقات كبيرة في المناسيب.
3. بعد ذلك تم حساب المؤشرات الإحصائية اللازمة.
4. أخيراً تمت مقارنة المؤشرات الإحصائية الأهم والتي تخص كل طريقة استقراء وذلك لاختيار النموذج الرقمي الأفضل للارتفاعات.

لتوضيح النقطتين الأولى والثانية، نعطي المثال التالي عن تقييم دقة النموذج الرقمي للارتفاعات الناتج عن طريقة IDW. لتحديد النقاط الشاذة قمنا باستخدام الأداة Normal QQPlot المتوفرة في التوسع Geostatistical Analyst الملحوق بالبرنامج ArcGIS، والتي تفترض أن العينة تتبع للتوزيع الطبيعي وتظهر بشكل رسومي مدى انحراف القياسات عن هذا التوزيع. إن مقياس الشذوذ هنا هو ابتعاد القياسات عن أفضل مستقيم يمر فيها. نظهر في الشكل التالي نتائج تطبيق هذه الأداة على الفروقات بين المناسيب الأصلية والمناسيب المستقراة بطريقة IDW. نلاحظ وجود مجموعة من القياسات الشاذة والتي يجب التخلص منها قبل متابعة المعالجة. للتأكد من شذوذ هذه القياسات، قمنا بتوضيح النقاط على صورة مرجعة لمنطقة الدراسة فوجدنا أنها تتوضع على زوايا بناء وليس على الأرض (الشكل (6)).

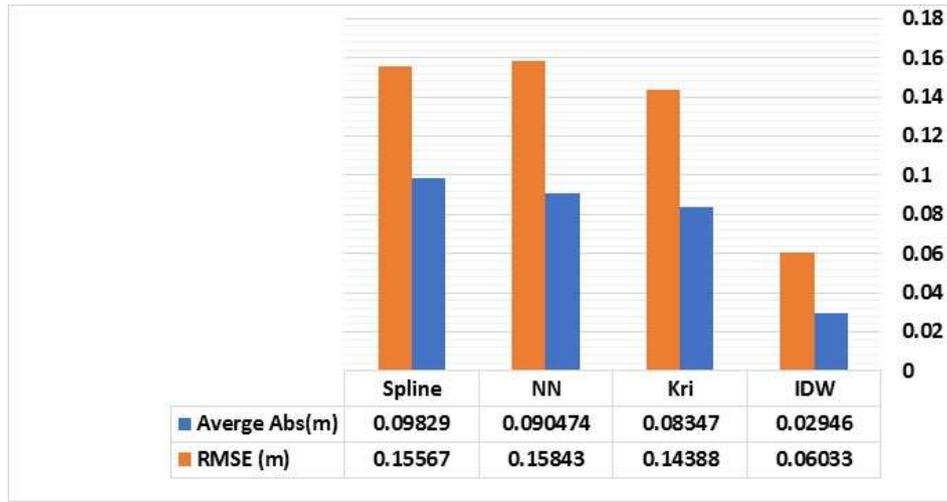


الشكل (6). إظهار مواقع القيم الشاذة للفروقات.

نوضح في الجدول (4) المؤشرات الإحصائية الخاصة بكل طرائق الاستقراء المدروسة في هذا البحث. أما الشكل (7)، فيعطي تمثيلاً بيانياً يقارن بين أهم هذه النتائج وهما متوسط القيمة المطلقة للفروقات والخطأ متوسط التربيع الخاصين بكل طريقة استقراء. وبالرجوع إلى الجدول (4) والشكل (7)، وباستخدام قيمة RMSE وقيمة متوسط القيمة المطلقة للفروقات، نجد أن الطرائق Kriging و Natural Neighbor و Spline تعطي نتائج متشابهة نسبياً. وباستخدام قيمة RMSE وقيمة متوسط القيمة المطلقة للفروقات، نجد أن طريقة IDW هي الأدق في استقراء النموذج الرقمي للارتفاعات مقارنةً بباقي الطرائق.

جدول (4). المؤشرات الإحصائية الخاصة باختبار الـ DEM الناتج عن كل طرائق الاستقراء.

الخطأ متوسط التربيع (m)	الانحراف المعياري (m)	الفرق الأعظمي (m)	الفرق الأصغري (m)	المتوسط الحسابي (m)	متوسط القيمة المطلقة للفروقات (m)	n	الطريقة
0.060	0.060	0.441	-0.442	0.000	0.029	764	IDW
0.144	0.144	0.757	-0.890	-0.001	0.083	763	Kri
0.158	0.159	0.929	-0.871	0.002	0.090	753	NN
0.156	0.156	0.623	-0.874	0.006	0.098	760	Spline

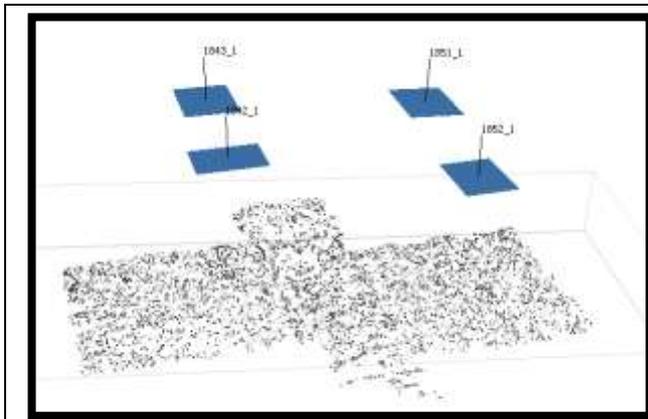


الشكل (7). تعبير بياني عن الخطأ المتوسط المطلق (أزرق) وعن الخطأ متوسط التربيع RMSE (بالبرتقالي) لنتائج التحليل بالتحقق المتقاطع.

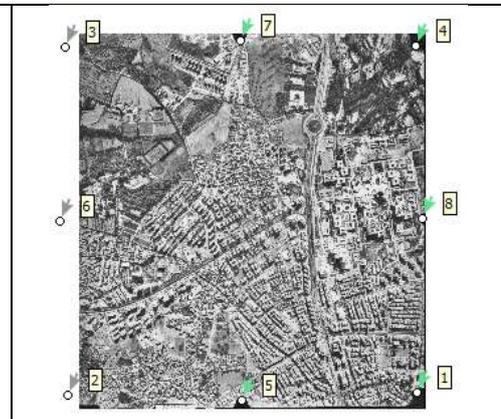
ثالثاً: التثليث الجوي للصور الجوية التي تغطي منطقة الدراسة

تم استخدام البرنامج Agisoft Metashape (يستخدم مبدأ الـ SfM) من أجل إنجاز التثليث الجوي للصور التي تغطي منطقة الدراسة. وهنا تم القيام بالخطوات التالية:

1. التوجيه الداخلي للصور بالاستعانة بملف معايرة آلة التصوير وقياس علامات عمق حجيرة التصوير Fudicial Marks على كل الصور.
2. إنجاز التوجيه النسبي Relative Orientation للصور وذلك بطريقة آلية حيث قام البرنامج بتوليد 7343 نقطة ربط لإنجاز هذا التوجيه. ينتج عن هذه المرحلة تحديد مواقع آلات التصوير في جملة إحداثيات افتراضية ثلاثية الأبعاد.



الشكل (9). التوجيه النسبي الآلي وتحديد مواقع آلات التصوير.



الشكل (8). التوجيه الداخلي بقياس علامات عمق حجيرة التصوير.

3. قياس نقاط الضبط وإنجاز التوجيه المطلق وذلك لربط الصور بنظام الإحداثيات الأرضي ثلاثي الأبعاد. نبين في الجدول (5) الأخطاء متوسطة التربيع الكلية.

جدول (5). قيم الأخطاء متوسطة التربيع الكلية.

$\sigma_x(m)$	$\sigma_y(m)$	$\sigma_{xy}(m)$	$\sigma_z(m)$	$\sigma_{xyz}(m)$
0.126	0.050	0.136	0.030	0.139

لتقرير فيما إذا كانت قيم الأخطاء متوسطة التربيع على الموقع الأفقي أو على الشاقول مقبولةً يمكننا الرجوع إلى المعايير الدولية التي اقترحتها (EuroSDR (European Spatial Data Research) (أبحاث البيانات المكانية الأوروبية) [9] والتي ربطت حدود التساهل مع قيمة مسافة الاعتيان الأرضية Ground Sampling Distance (GSD). في هذا المعايير نجد الصيغ التالية:

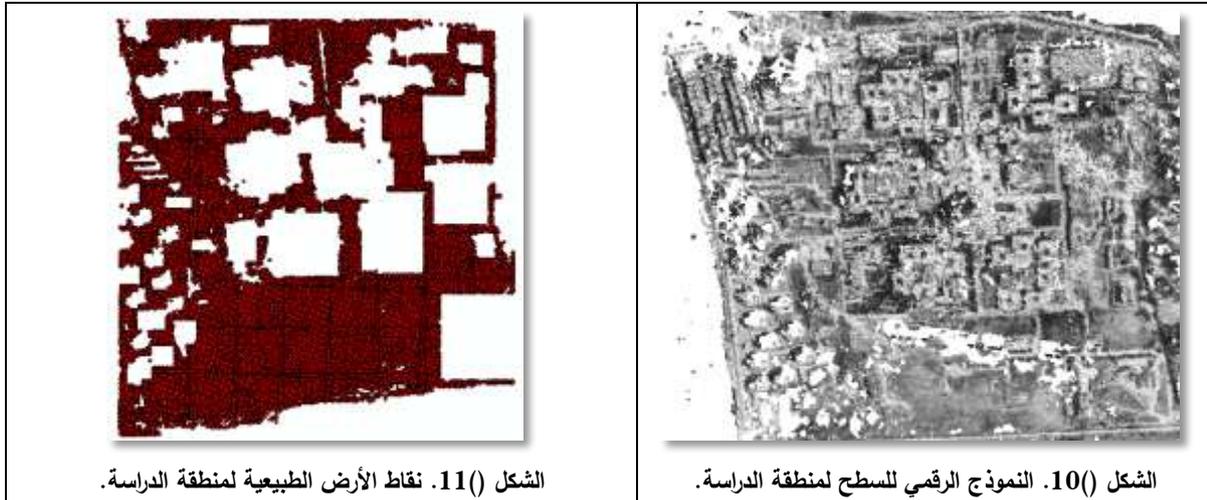
$$\sigma_{xy} = 0.75 \cdot GSD = 0.75 * 0.25 = 0.188 (m)$$

$$\sigma_z = 0.53 \cdot GSD = 0.53 * 0.25 = 0.133 (m)$$

وبمقارنة هذه القيم مع القيم الموجودة في الجدول (5) نجد أن دقة التثليث الجوي المنجز مقبولة.

رابعاً: توليد النموذج الرقمي للارتفاعات من الصور الجوية باستخدام SfM

بعد التثليث الجوي، تم اقتطاع غمامة النقاط الكثيفة ثلاثية الأبعاد تمثل النموذج الرقمي للسطح DSM لمنطقة الدراسة باستخدام برنامج المعالجة Agisoft Metashape. حصلنا على غمامة عدد نقاطها مساو لـ 471043 نقطة (الشكل (10)). تم بعد ذلك القيام بعملية التصنيف Classification لنقاط هذه الغمامة وذلك بهدف الاحتفاظ بالنقاط المنتمية إلى الأرض الطبيعية فقط (الشكل (11)). تمت عملية التصنيف باستخدام الأدوات المتوفرة في برنامج المعالجة Agisoft Metashape، فحصلنا على غمامة عدد نقاطها 280560 نقطة. تم بعد ذلك بناء النموذج الرقمي للارتفاعات DEM بدقة تمييز مكانية تساوي 1.340 m/ pixel انطلاقاً من غمامة الأرض الطبيعية.



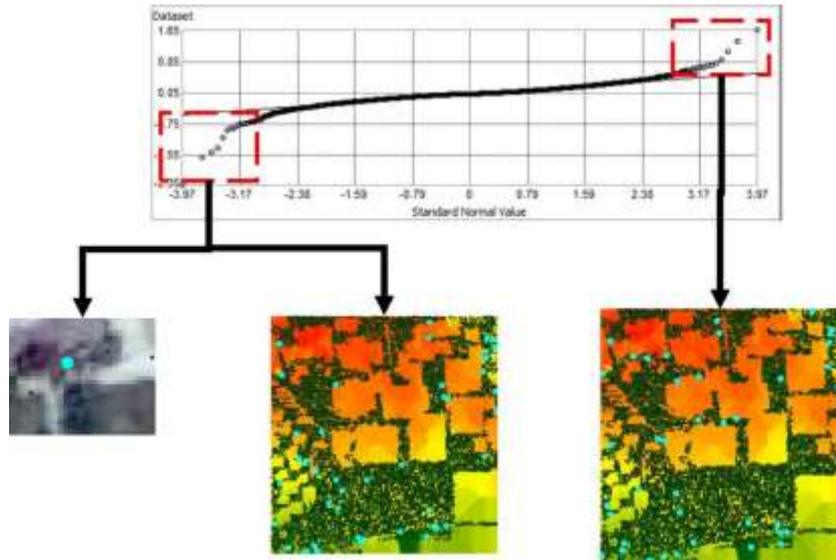
الشكل (11). نقاط الأرض الطبيعية لمنطقة الدراسة.

الشكل (10). النموذج الرقمي للسطح لمنطقة الدراسة.

خامساً: تقييم دقة النموذج الرقمي الناتج عن الصور الجوية

لتقييم دقة النموذج الرقمي للأرض، تم تصدير غمامة النقاط الكثيفة من البرنامج Agisoft Metashape إلى البرنامج ArcGIS مع النموذج الرقمي للارتفاعات. قمنا بعد ذلك بتطبيق طريقة Jackknife وذلك لتقييم الدقة الشاقولية لهذا

النموذج (الشكل (12)). ولتطبيق هذه الطريقة، تم اقتطاع 5 % من نقاط المناسيب الخام وذلك كي تستخدم كنقاط اختبار، حيث بلغ عدد هذه النقاط 14028 نقطة. قبل البدء بعملية تقييم الدقة، كان يجب عزل النقاط الشاذة وحذفها وذلك باستخدام الأداة Normal QQPlot. لاحظنا وجود مجموعة من القياسات الشاذة والتي يجب التخلص منها قبل متابعة المعالجة. وللتأكد من شذوذ هذه القياسات، قمنا بتوضيح النقاط على صورة مرجعة لمنطقة الدراسة فوجدنا انها في أطراف النموذج الرقمي للارتفاعات كما أو على الأشجار وليس على الأرض (الشكل (12)).

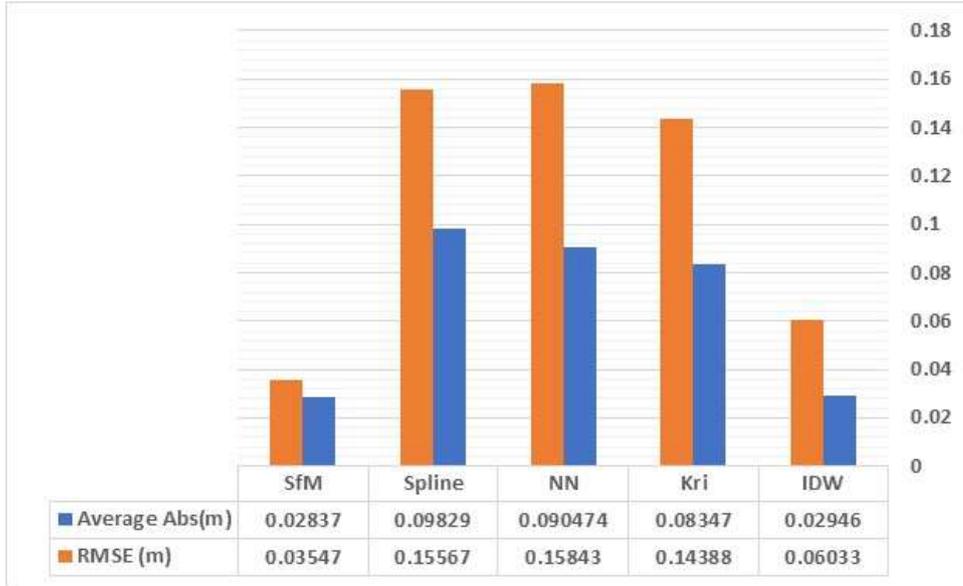


الشكل (12). إظهار مواقع بعض القيم الشاذة للفروقات.

نوضح في الجدول (6) المؤشرات الإحصائية الخاصة بكل طرائق الاستقراء المدروسة في هذا البحث بما فيها تقنية الـ SfM. أما الشكل (13)، فيعطي تمثيلاً بيانياً يقارن بين أهم هذه النتائج وهما متوسط القيمة المطلقة للفروقات والخطأ متوسط التربيع الخاصين بكل طريقة استقراء بما فيها تقنية الـ SfM.

جدول (6). المؤشرات الإحصائية الخاصة باختبار الـ DEM الناتج عن كل طرائق الاستقراء وعن SfM.

الخطأ متوسط التربيع (m)	الانحراف المعياري (m)	الفرق الأعظمي (m)	الفرق الأصغري (m)	المتوسط الحسابي (m)	متوسط القيمة المطلقة للفروقات (m)	n	الطريقة
0.060	0.060	0.441	-0.442	0.000	0.029	764	IDW
0.144	0.144	0.757	-0.890	-0.001	0.083	763	Kri
0.158	0.159	0.929	-0.871	0.002	0.090	753	NN
0.156	0.156	0.623	-0.874	0.006	0.098	760	Spline
0.035	0.035	0.080	-0.060	0.007	0.028	7679	SfM



الشكل (13). تعبير بياني عن الخطأ المتوسط المطلق (أزرق) وعن الخطأ متوسط التربيع RMSE (بالبرتقالي) الخاصة بالنماذج الرقمية المنتجة بالطرق المدروسة وبطريقة SfM.

نلاحظ من خلال الجدول (6) ومن الشكل (13) أن الدقة الشاقولية Vertical accuracy للنموذج الرقمي للارتفاعات المستقرأ بشكل آلي من الصور الجوية بتقنية SfM قد تحسنت مقارنة بدقة أفضل طريقة مدروسة من الطرائق المطبقة على النقاط الارتفاعية المقطعة من المخططات الطبوغرافية (وهي طريقة الـ IDW) وهذا عائد إلى العدد الكبير من النقاط الارتفاعية الداخلة في الحساب إضافة إلى كفاءة خوارزمية تصنيف نقاط الأرض الطبيعية المستخدمة في البرنامج Agisoft Metashape. وبالتالي يمكن أن نختم بأنه يمكن لتقنية SfM ان تستقرأ وذلك بشكل آلي وبدقة عددًا هائلاً من النقاط التي تستخدمها لاحقاً في بناء النموذج الرقمي للارتفاعات بشكل دقيق، في حين تتطلب الطريقة التقليدية (خطوط تسوية أو مساحة تصويرية تقليدية) القيام باقتطاع يدوي طويل ومجهد لهذه النقاط.

سادساً: توليد الأورثوفوتو وتقييم دقته الأفقية

باستخدام البرنامج Agisoft Metashape، قمنا بتوليد صورتين مرجعتين عامودياً لمنطقة الدراسة هما:

1. أورثوفوتو أول باستخدام النموذج الرقمي الناتج عن تطبيق طريقة الـ IDW انطلاقاً من نقاط ارتفاعية مقطعة من مخططات طبوغرافية. تم اختيار هذا النموذج الرقمي للارتفاعات لأنه أفضل الطرق التقليدية بحسب التحليل الإحصائي المنفذ سابقاً.

2. أورثوفوتو ثان باستخدام النموذج الرقمي الناتج عن تطبيق تقنية SfM.

قبل توليد هذه الصور، يجب تحديد قيمة حجم البكسل في هذه الصور. في الواقع، تتبع دقة التمييز الهندسية الخاصة بالأورثوفوتو على كثافة النقاط التي تشكل النموذج الرقمي للارتفاعات وهي عادةً ما تؤخذ مساويةً لربع دقة تمييز النموذج الرقمي للارتفاع المستخدم [10]. وبالتالي، فإن دقة تمييز الأورثوفوتو الأول (حالة النموذج الرقمي الناتج عن تطبيق طريقة الـ IDW) تساوي:

$$\frac{1}{4} * 4.5 m = 1.13 m$$

أما دقة تمييز الأورثوفوتو الثاني (حالة النموذج الرقمي الناتج عن تطبيق SfM) فتساوي:

$$\frac{1}{4} * 1.34 m = 0.335 m$$

لتقييم الدقة الأفقية للصور المرجعة عامودياً، سنستخدم معيار مقياس المخطط أو الخارطة الممكن إنتاجها من هذه الصور. فيما يتعلق بمقياس المخطط (أو الخارطة) الذي يمكن استنتاجه انطلاقاً من مرئية ذات دقة تمييز معروفة (مسافة الاعتيان الأرضية GSD) فإنه من الممكن تطبيق العلاقة وفق العلاقة التالية:

$$\text{Map Scale} = \text{Raster resolution (in meters)} * 2 * 1000 \quad (2)$$

بتطبيق العلاقة على الصورتين المرجعتين عامودياً نجد:

$$\text{Map Scale} = 0.355 * 2 * 1000 = 670 : \text{SfM حالة الأورثوفوتو بال}$$

أي أنه من الممكن إنتاج خارطة مقياسها $\frac{1}{670}$ من هذه الصورة.

$$\text{Map Scale} = 1.34 * 2 * 1000 = 2680 : \text{IDW مستقراً بطريقة DEM مع الأورثوفوتو مع}$$

أي أنه من الممكن إنتاج خارطة مقياسها $\frac{1}{2680}$ من هذه الصورة.

إن هذا الاختلاف في المقاييس يترجم كدقة أفقية σ_p للخارطة الناتجة وفق العلاقة التالية:

$$\sigma_p = 0.3 \times \text{map scale number}$$

وبالتالي، تكون الدقة الأفقية في حالة إنتاج الخارطة من الأورثوفوتو بال SfM هي:

$$\sigma_p = 0.3 \times 670 = 0.201 (m)$$

أما في حالة الأورثوفوتو مع DEM مستقراً بطريقة IDW فتكون:

$$\sigma_p = 0.3 \times 2680 = 0.804 (m)$$

بمقارنة النتائج، نجد أن الدقة الأفقية للأورثوفوتو الناتج عن تطبيق الـ SfM أكبر وذلك لأنها مكنتنا من الحصول على مخطط ذي مقياس أكبر مما يؤمن قياسات أدق.

➤ كثافة نقاط النموذج الرقمي للارتفاعات

هنالك عامل أخير يجب أخذه بعين الاعتبار عند تقييم الدقة الأفقية للأورثوفوتو وهو الكثافة الوسطية بالمتر المربع لنقاط النموذج الرقمي للأرض الذي استخدم في توليد هذا الأورثوفوتو [11]. ففي مثالنا، تبلغ المساحة التقريبية لمنطقة التداخل بين الصور الجوية $1037080 m^2$ وبالتالي، بلغت كثافة النقاط الوسطية بالمتر المربع في حالة الطريقة التقليدية (نقاط مناسب) ما يقارب 0.00074 نقطة. أما في حالة المعالجة بالمسح التصويري SfM فقد بلغت ما يقارب 0.27 نقطة. وبناءً عليه، فإن الصورة المرجعة عامودياً المنتجة بالمسح التصويري SfM تعتبر الأكثر قدرة على التعبير وذلك بفضل العدد الهائل من النقاط التي استخدمت لتوليد النموذج الرقمي للأرض، مما يمكن المستخدم من إجراء قياسات أفقية أدق على هذا الأورثوفوتو.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

بالاستناد إلى الدراسة النظرية المقدمة حول تأثير كثافة النموذج الرقمي للأرض على دقة الصور المصححة يمكننا أن نصل إلى الاستنتاجات الآتية وذلك بالاستناد إلى الدراسة النظرية والعملية المقدمة في هذه الرسالة:

1. هنالك العديد من العوامل التي تؤثر على الدقة الأفقية للأورثوفوتو وأهمها هي دقة النموذج الرقمي للارتفاعات المستخدم ومواصفات الصور الجوية ونوعيتها الهندسية وكذلك دقة التثليث الجوي.
2. لقد وجدنا ان طريقة الـ IDW هي أفضل الطرائق المستخدمة التقليدية في توليد النموذج الرقمي للارتفاعات انطلاقاً من نقاط ارتفاعية حيث حصلنا في حالتنا البحثية إلى دقة تساوي 0.0603 m.
3. يعتبر الجيل الجديد من برمجيات المساحة التصويرية SfM بديلاً ممكناً وموثقاً ومنخفض الكلفة لمحطات العمل في المساحة لتصويرية الرقمية التقليدية اليدوية وعالية الكلفة وذلك في إنجاز التثليث الجوي للصور الجوية الملتقطة بآلات تصوير جوية مترية (مزودة بعلامات عمق حجيرة تصوير).
4. تشكل تقنية المساحة التصويرية المؤتمتة القائمة على اقتطاع البنية من الحركة SfM photogrammetry حلاً فعالاً لتوليد النماذج الرقمية للارتفاعات ذات الدقة العالية وذلك لأنها تؤمن الحصول على غمامات كثيفة من النقاط ثلاثية الأبعاد. لقد أثبتت التجربة العملية أنه من الممكن باستخدام هذه التقنية تحسين الدقة الأفقية للنموذج الرقمي للارتفاعات بنسبة قد تصل إلى الضعف مقارنةً بالطرائق التقليدية (تحسنت الدقة الشاقولية من 0.0603 m إلى 0.0355 m).
5. تعتبر طريقة تقييم الدقة الأفقية للأورثوفوتو باستخدام نقاط اختبار عشوائية مقتطعة من مصدر ذي دقة أعلى طريقة موثوقة وفعالة.
6. تعتبر كثافة نقاط النموذج الرقمي للارتفاعات والقدرة التعبيرية للأورثوفوتو الناتج عوامل مهمة عند تقييم الدقة الأفقية للأورثوفوتو.

التوصيات:

يمكننا في نهاية هذا البحث أن نوصي بما يأتي:

1. تعميق دراسة تأثير عدد وتوزع نقاط الضبط الداخلة في حساب التثليث الجوي على الدقة الأفقية للأورثوفوتو.
2. تقييم الأورثوفوتو بالاستناد على محتواه الكارثوغرافي وليس الهندسي فقط. بمعنى آخر، تقييمه من ناحية قدرته التعبيرية.
3. تعميق دراسة تأثير كثافة النموذج الرقمي للارتفاعات على الدقة الأفقية للأورثوفوتو. يمكن التفكير هنا بالاستفادة من إمكانيات التحكم بمستويات كثافة النقاط المقتطعة من الصور الموجهة ضمن برمجيات المساحة التصويرية SfM.
4. إجراء دراسة مقارنة للخوارزميات المستخدمة في المرور من النموذج الرقمي للسطح الناتج عن المسح التصويري SfM إلى النموذج الرقمي للارتفاعات (عملية تصنيف النقاط). الهدف هنا هو تحديد الخوارزمية الأكثر فعالية للحصول على أفضل نموذج رقمي للأرض، الأمر الذي يؤمن الحصول على أورثوفوتو أدق.
5. لضمان فعالية اقتطاع النموذج الرقمي للارتفاعات بشكل آلي باستخدام المساحة التصويرية SfM، فإننا نوصي بزيادة نسبة التداخل التقليدية للصور الجوية المستخدمة في صناعة الخرائط (والتي تبلغ % 60) إلى ما يقارب % 80.

References:

- [1] ROSSI., TIFFINY, A., 2004. Application Of Digital Photogrammetric Methods In The Of Land Cover Change On The Coastal Dunes Of Warren Dunes State Park, Berrien Country, Master Thesis, The Michigan State University, Michigan, 2004.
- [2] Mikhail, E.M., Bethel, J.S., and McGlone, J.C. 2001. Introduction to modern photogrammetry. John Wiley & Sons Inc., New York.
- [3] P. R. Wolf., B. A. Dewitt. 2000. Elements of Photogrammetry: with Applications in GIS, 3rd ed. McGraw-Hill Companies Inc., New York, pp. 217 - 225.
- [4] Drapeau, L. (2000), Statistiques et Interpolations dans les SIG, Towards the use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries, Informations et Etudes – COPEMED.
- [5] Arnaud, M., Emery, X. (2000) Estimation et interpolation spatiale, méthodes déterministes et méthodes géostatistiques, Hermès Science Publications, Paris.
- [6] Vallario.A, Parente.C, Alcaras.E, 2019. Comparison Of Different Interpolation Methods For DEM Production. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering 6(4):1654-1659 · August 2019.
- [7] Behan, A. (2000), On the Matching Accuracy of Rasterised Scanning Laser Altimeter Data. IAPRS, Vol. XXXIII, Amsterdam.
- [8] National Map Accuracy Standards (NMAS). 2021. <https://www.gislounge.com/national-map-accuracy-standards-nma>.
- [9] Kapnias, D., Milenov, P., Kay, S., 2008. Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery, JRC European Commission, Issue 3.0.
- [10] The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 1994. ASPRS ACCURACY STANDARDS FOR LARGE-SCALE MAPS. 1994.
- [11] Alkhalil, o., Dayoub W., 2017. Evaluation of the impact of digital terrain model's density on the accuracy of aerial photos orthorectification. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (39) No. (2) 2017.