

Studying the Effect of the Numbers and Distributions Patterns of Control Points on the Geometric Accuracy of the Orthophotos - Application on an Archeological Façade

Dr. Omar al-Khalil*

(Received 12 / 12 / 2022. Accepted 19 / 2 / 2023)

□ ABSTRACT □

Ground Control Points (GCPs) are used for indirect georeferencing in close range photogrammetry systems by phototriangulation (bundle adjustment). This study aims to determine the optimum number and distribution of control points to produce the most accurate orthophoto for a historical façade. In the study, we applied three scenarios for the distribution of control points, namely: border, central, and uniform distribution, starting with four points and then increasing by four points each time. A total of 95 control points and 30 check points were used, and 11 orthophotos were generated in each scenario.

The results showed that the central distribution of control points is the worst among the tested distributions, as the horizontal mean square error values of the orthophoto ranged from 18.5 to 38 mm despite the increase in the number of points from 4 to 35 points. The horizontal mean squared error values ranged between 21 and 11.2 mm in the border distribution and between 34.8 and 6.8 mm in the uniform one. As a result of the tests, it was found that the uniform distribution of the control points, which ensures that there is a point in every 10 m² of the facade, is the best solution to obtain an accurate phototriangulation and accurate orthophoto.

Keywords: Orthophoto, Control points, Check points, Distribution pattern, Mean square error

* Professor- Faculty of Civil Engineering- Tishreen University- Lattakia- Syria.

دراسة تأثير أعداد نقاط الضبط وأنماط توزيعاتها على الدقة الهندسية للصورة المصححة عمودياً (الأورثوفوتو) - تطبيق على واجهة أثرية

د. عمر الخليل*

(تاريخ الإيداع 12 / 12 / 2022. قُبِلَ للنشر في 19 / 2 / 2023)

□ ملخص □

تُستخدم نقاط الضبط الأرضية (GCPs) Ground Control Points في عملية الإرجاع الجغرافي غير المباشر في أنظمة المسح التصويري القريب بتطبيق التثليث الصوري (التعديل بالحزم). تهدف هذه الدراسة إلى تحديد عدد نقاط الضبط ونمط توزيعها الأفضل للحصول على الصورة المصححة عمودياً (الأورثوفوتو) الأدق من صور واجهة منشأ أثري. طبقنا في الدراسة ثلاثة سيناريوهات لتوزيع نقاط الضبط وهي: التوزيع الطرفي، المركزي، والتوزيع الموحد (المتجانس) مع البدء بأربع نقاط ومن ثم الزيادة بمقدار أربع نقاط في كل مرة. تم استخدام 95 نقطة ضبط و30 نقطة اختبار كما تم توليد 11 أورثوفوتو في كل سيناريو.

بيّنت النتائج أن التوزيع المركزي لنقاط الضبط هو الأسوأ من بين التوزيعات المختبرة حيث تراوحت قيم الخطأ متوسط التريبع الأفقي للأورثوفوتو من 18.5 إلى 38 ميليمتر على الرغم من زيادة عدد النقاط من 4 حتى 35 نقطة. كما تراوحت قيم الخطأ متوسط التريبع الأفقي بين 21 و11.2 ميليمتر في التوزيع الطرفي وبين 34.8 و6.8 ميليمتر في التوزيع الموحد. ونتيجة للاختبارات تبين التوزيع الموحد لنقاط الضبط والذي يؤمن وجود نقطة في كل $10-12 \text{ m}^2$ من الواجهة هو الحل الأفضل للحصول على تثليث صوري دقيق وعلى أورثوفوتو دقيق.

الكلمات المفتاحية: الصورة المصححة عمودياً (الأورثوفوتو)، نقاط الضبط، نقاط اختبار، أنماط توزيع، الخطأ المتوسط التريبع.

* استاذ - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

مقدمة:

تعتبر الصورة المصححة عمودياً (الأورثوفوتو Orthophoto) منتجاً فعالاً في التعبير عن المشاهد المصورة وذلك لأنها تجمع بين الدقة الهندسية التي تتمتع بها المخططات التقليدية والغنى البصري الذي تملكه الصورة في آن واحد [1]، وبالتالي يمكن أن تستخدم في أعمال توثيق المنشآت الأثرية. في الواقع، يعتبر الأورثوفوتو منتجاً مفيداً للغاية لتوثيق عناصر التراث الثقافي لأنه من الممكن في هذا المنتج المترى الجمع بين المعلومات الراديومترية مع القياسات الحقيقية مما يسمح بالتمثيل الكامل لهذه العناصر. إضافة إلى ذلك، تدعم هذه الصور الجهات الفاعلة المشاركة في مشاريع ترميم أو إعادة تأهيل العناصر التراثية فهي تلعب دور المخطط الذي يخرط المواد المكونة لهذه العناصر والذي يظهر التدهور أو غيره من مظاهر التلف الهامة لهذه العناصر [2, 3].

الأورثوفوتو هو صورة تم تصحيحها من التشوهات الناتجة عن ميل آلة التصوير والتشوهات الناتجة عن تزيغات العدسة وكذلك الانزياحات الناتجة عن تغير المناسيب في المشهد المصور. أما المدخلات اللازمة لإنتاجها فهي الصور ومعاملات التوجيه الداخلي Interior orientation والخارجي Exterior orientation لآلة التصوير التي التقطت هذه الصور ونموذج رقمي للسطح (Digital Surface Model (DSM) للمشهد المصور. وهناك العديد من العوامل التي تؤثر على دقة الأورثوفوتو، ومن هذه العوامل نذكر العوامل المؤثرة على التخطيط لعملية التصوير، نوعية المستشعر المستخدم، نقاط الضبط (Ground control points (GCPs) المستخدمة وبرنامج المعالجة [4]. تعتبر نقاط الضبط من أكثر العوامل المؤثرة بشكل مباشر على نوعية الأورثوفوتو ويتطلب تحضيرها وقتاً وجهداً كبيرين، وبالتالي فإن تقليل عدد نقاط الضبط مع الحفاظ على الدقة المطلوبة يمكن أن يحسن من وضع مشروعات المسح التصويري من ناحيتي العمل الحقلية والمكتبية [5].

هنالك العديد من الدراسات التي ناقشت تأثير نقاط الضبط على الدقة الأفقية أو الشاقولية لمنتجات المسح التصويري والتي خلصت إلى أن تقييم جودة نقاط الضبط هي مهمة معقدة وذلك بسبب وجود عدة عوامل يجب أخذها بعين الاعتبار. فعلى مدى السنوات السابقة تم القيام بدراسات لتحليل تأثير عدد نقاط الضبط وتشكيلاتها المكانية على الدقة [6]. ومعظم هذه الدراسات تعتبر أنه كلما زاد عدد نقاط الضبط فإن الدقة تزداد وهذا ما نجده في [7] و [8]. في كل الأحوال، لا يعتبر عدد نقاط الضبط هو المؤثر الوحيد على دقة منتجات المسح التصويري ولكن التوزيع المكاني لهذه النقاط يلعب دوراً هاماً أيضاً ويجب أخذه بعين الاعتبار عند تقييم الدقة. وهنا نجد العديد من الدراسات التي ناقشت تأثير نمط توزيع نقاط الضبط إلى جانب عددها على دقة الأورثوفوتو. إن معظم الدراسات السابقة ركزت على دقة منتجات المسح التصويري باستخدام الطائرات دون طيار (Drones) (مثل الدراسة [9] والدراسة [10]) ولكن من النادر وجود دراسات ناقشت هذا التأثير على دقة منتجات المسح التصويري القريب (Close range photogrammetry)، وهو الأمر الذي دفعنا للقيام بهذا البحث.

تهدف هذه الدراسة إلى تحديد العدد المناسب ونمط التوزيع الأفضل لنقاط الضبط الأرضية للحصول على الأورثوفوتو الأدق من صور واجهة أثرية. وهنا، طبقنا في هذه الدراسة عدة سيناريوهات لأنماط توزيع نقاط الضبط وعددها. تم التطبيق العملي لهذا البحث على الواجهة الجنوبية للمتحف الوطني في مدينة اللاذقية.

أهمية البحث وأهدافه:

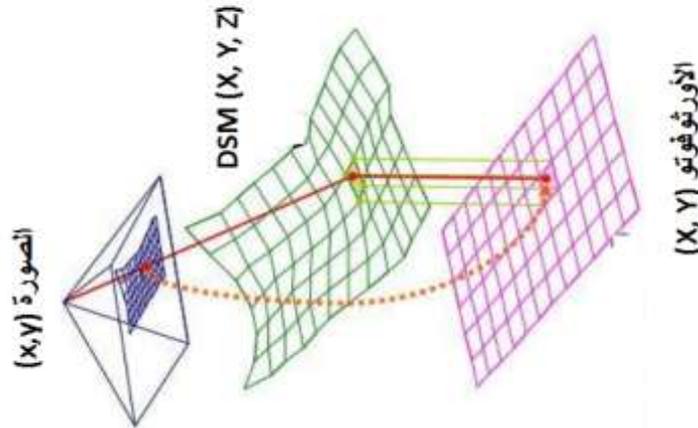
تتركز أهمية هذا البحث في أنه يسعى إلى تحديد العدد والتوزيع الأفضل لنقاط الضبط بحيث نحصل على الأورثوفوتو في المسح التصويري القريب للواجهات الأثرية مع الحفاظ على الدقة المطلوبة. وبشكل عام، يمكن تلخيص أهداف البحث فيما يأتي:

- 1- دراسة تأثير نمط توزع نقاط الضبط على دقة الأورثوفوتو مع تثبيت آلة التصوير المستخدمة وكثافة النموذج الرقمي للسطح ودقة تمييزه.
- 2- تحديد التركيب الأفضل من ناحية توزع وعدد نقاط الضبط للحصول على الأورثوفوتو الأدق من صور العنصر.

طرائق البحث ومواده:

أولاً: مفهوم التصحيح العمودي للصور القريبة

يعدّ الأورثوفوتو واحداً من وثائق التوثيق الخاصة بالمنشآت الأثرية، وهو صورة على المقياس مصححة من الإزاحات الناتجة عن اختلاف مناسيب العنصر المصور وعن ميل الصورة. ومن وجهة نظر هندسية، يعادل الأورثوفوتو المخطط المعماري التقليدي ويمكن إنجاز كل القياسات عليها، فهو تجمع بين الدقة الهندسية التي يتمتع بها المخطط التقليدي والغنى البصري الذي تملكه الصورة في آن واحد [11]. ويفضل هذه الخاصية، يمكن للأورثوفوتو أن يزودنا بمعلومات كمية (أي مترية) وكيفية (أي وصفية) من ثم؛ فهو ذو قيمة عالية في مختلف أعمال توثيق وترميم المنشأ الأثري. نحتاج لإنتاج الأورثوفوتو إلى نموذج رقمي للسطح DSM وإلى صور ذات معاملات توجيه خارجي معلومة (يتم تحديدها بعملية التثليث الصوري Photo-triangulation) وهنا يتم تطبيق تقنية تعرف باسم التقويم التفاضلي Differential rectification لإنجاز الأورثوفوتو عند مقياس مشترك واحد ولتحويل الإسقاط من مركزي إلى عامودي. إن المعطيات الأساسية للتصحيح التفاضلي القريب هي نموذج رقمي للسطح وصورة رقمية ذات عناصر توجيه خارجي وداخلي معروفة. يبين الشكل (1) شرط التسامت من أجل نقطة من نقاط العنصر الأرضي والواقعة على النموذج الرقمي للسطح. و الإحداثيات XY للنقطة تعتمد على السطر و العمود داخل النموذج الرقمي للسطح و أما الإحداثيات Z لهذه النقطة فهي مخزنة في مصفوفة العناصر الأرضية للنموذج الرقمي للسطح عند موقع النقطة. و بمعرفة الإحداثيات XYZ للنقطة و معاملات التوجيه الخارجي للصورة نستطيع حساب الإحداثيات الفوتوغرافية وذلك بتطبيق معادلات التسامت. وتعرف هذه الإحداثيات موقع نقطة العنصر الأرضي في الصورة. يتم بعد ذلك تحويل الإحداثيات الفوتوغرافية إلى إحداثيات سطرية و عامودية في الصورة الرقمية باستخدام معاملات التوجيه الداخلي. ولكن النتيجة تكون عادةً أرقاماً غير صحيحة Integer لذلك نقوم بعملية الاعتيان Resampling داخل الصورة للحصول على العدد الرقمي المرافق لنقطة العنصر الأرضي. ويكرر تطبيق معادلات التسامت من أجل كل النقاط في مصفوفة النموذج الرقمي للسطح والنتائج النهائي هو الأورثوفوتو [12].



الشكل (1). علاقة التسامت بين نقطة من النموذج الرقمي للسطح مع مسقطها في الصورة.

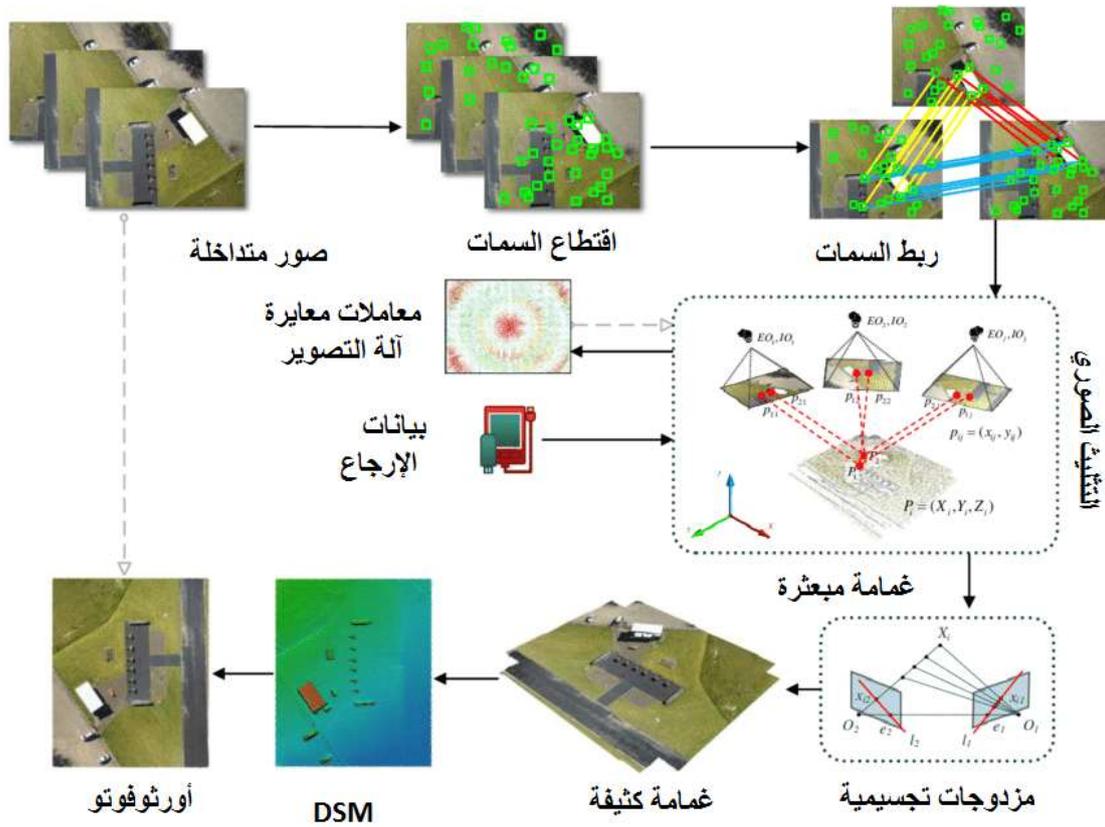
التقنية المستخدمة في هذا البحث هي المساحة التصويرية القائمة على اقتطاع البنية من الحركة Structure from

Motion (SfM) photogrammetry والتي يتم توليد الأورثوفوتو فيها وفق التسلسل التالي (الشكل (2)):

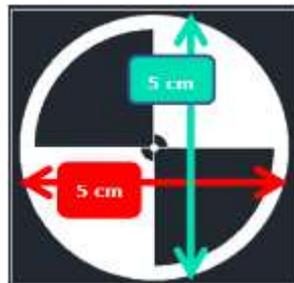
- 1- إدخال الصور المتداخلة بنسبة لا تقل عن 60%.
- 2- اقتطاع السمات (والتي هي نقاط على الأغلب).
- 3- ربط السمات Feature matching الناتجة عن الخطوة السابقة.
- 4- تطبيق التثليث الصوري أو التعديل بالحزم Bundle adjustment وبناء غمامة النقاط المبعثرة Sparse cloud. وهنا يتم استخدام نقاط الضبط لإنجاز عملية الإرجاع Georeferencing.
- 5- توليد النماذج التجسيمية المتعددة.
- 6- توليد غمامة النقاط الكثيفة Dense cloud.
- 7- توليد النموذج الرقمي للسطح Digital Surface Model (DSM).
- 8- توليد الأورثوفوتو.

ثانياً: البيانات المتوافرة

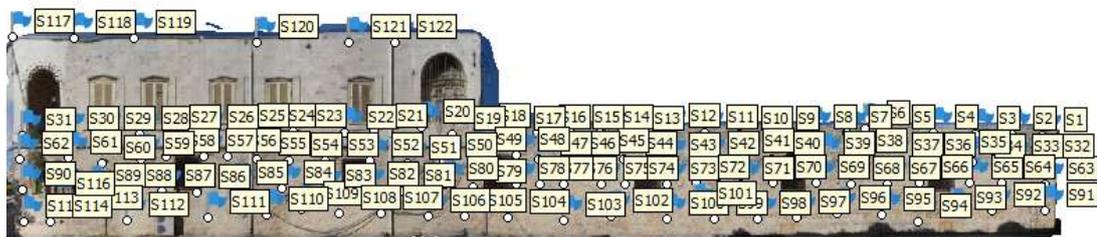
عنصر الدراسة هو الواجهة الجنوبية للمتحف الوطني في مدينة اللاذقية. تم تحضير نقاط ضبط صناعية أبعادها (5x5 cm) (الشكل (3)) حيث بلغ عددها 125 نقطة موزعة على كامل الجدار (الشكل (4)). تم قياس إحداثيات هذه النقاط باستخدام جهاز المحطة المتكاملة Lieca TS09 (الشكل (5)) [13]، وهو من الأجهزة الحديثة والدقيقة والتي تتميز بإمكانية إجراء التمرکز والقياس عن طريق شعاع ليزري، مع إمكانية حساب الإحداثيات بشكل آلي بعد إدخال البيانات المناسبة (مسافات، اتجاهات). ويوضح الجدول (1) دقة قياس المسافات والزوايا بهذا الجهاز.



الشكل (2). تسلسل العمل SfM لتوليد الأورثوفوتو.
(المصدر: [15])



الشكل (3). شكل وأبعاد نقاط الضبط الصناعية.



الشكل (4). نقاط الضبط المقاسة على الواجهة.



الشكل (5). جهاز المحطة المتكاملة Lieca TS09.

الجدول (1). دقة قياس المسافات والزوايا باستخدام الجهاز Lieca TS-09

قياس الزوايا	
الدقة	1" (0.3 mgon) / 2" (0.6 mgon)
	3" (1 mgon) / 5" (1.5 mgon)
قياس المسافات	
الدقة	Precise: 1.5 mm + 2.0 ppm
	Precise Fast: 2.0 mm + 2.0 ppm
	Tracking: 3.0 mm + 2.0 ppm

وهنا تم التعامل مع هذه النقاط كنقاط رفع تفصيلي تم تحديد إحداثياتها انطلاقاً من نقاط شبكة مساحية تحيط بالمتحف مجهزة مسبقاً [13].

تم التقاط 94 صورة للواجهة استخدام آلة التصوير Nikon Coolpix P100 ذات دقة التمييز 10.3 megapixel ومقاس صورة 6.12 mm x 4.6 mm. حاولنا أن نلتقط الصور بطريقة تضمن أنه من وقفة تصوير واحدة يجب تغطية كامل ارتفاع العنصر. ففي حالة الارتفاعات القليلة حرصنا على التقاط الصورة من ارتفاع يساوي نصف ارتفاع العنصر، أما في حالة الارتفاعات الكبيرة فقد التقطنا أكثر من صورة من نفس الوقفة. يوضح الشكل (6) مواقع التقاط هذه الصور.



الشكل (6). مواقع التقاط صور الواجهة.

1- الحلول البرمجية المستخدمة في البحث

البرامج التي تم استخدامها في هذا البحث هي:

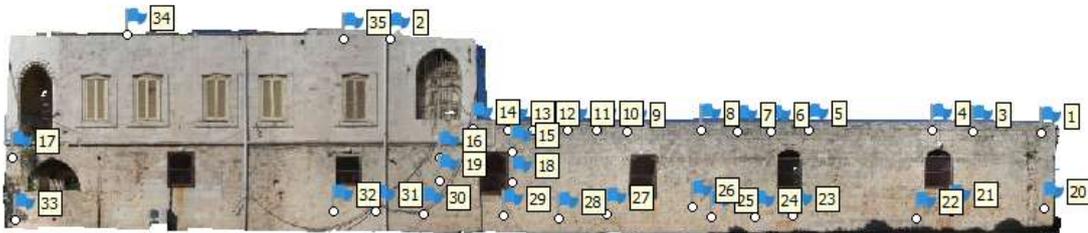
- 1- البرنامج Agisoft PhotoScan: وهو برنامج روسي للنمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على مبدأ الـ SfM وهو يستخدم أحدث تقنيات البناء ثلاثي الأبعاد من الصور المتعددة Multi-view المطورة في مجال الرؤية بمساعدة الحاسب. كما يمكن من توجيه الصور الملتقطة من أية مواقع مع مراعاة تحقيقها لشرط وقوع أية نقطة من نقاط العنصر على صورتين على الأقل [16]. تم استخدام البرنامج في حساب التثليث الصوري وتوليد الأورثوفوتو.
- 2- البرنامج ArcGIS 10.8 والذي تم استخدامه لقياس إحداثيات نقاط الاختبار على الأورثوفوتو للواجهة (عددها 33 صورة) والتي نتجت عن تطبيق السيناريوهات الثلاث بهدف مقارنتها مع إحداثياتها المقاسة بالمحطة الشاملة. كما تم استخدام هذا البرنامج في إخراج الأورثوفوتو.

النتائج والمناقشة:

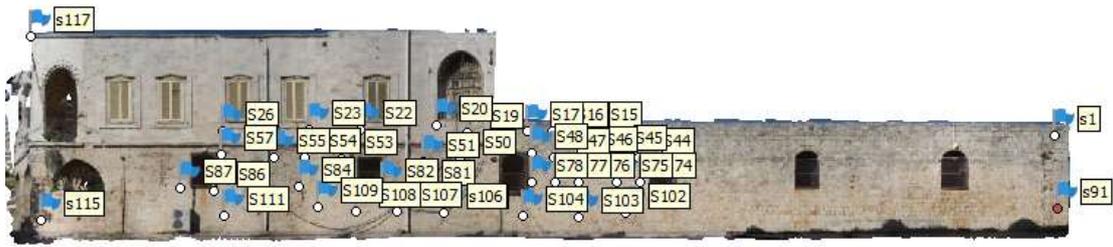
أولاً: السيناريوهات المعتمدة لعدد وأنماط توزيع نقاط الضبط

تم قياس ما مجموعه 125 نقطة ثلاثية الأبعاد على العنصر المدروس تتكون من 95 نقطة ضبط أرضية و 30 نقطة تحقق مشتركة. تم اختبار ثلاثة سيناريوهات في توزيع نقاط الضبط في منطقة الدراسة:

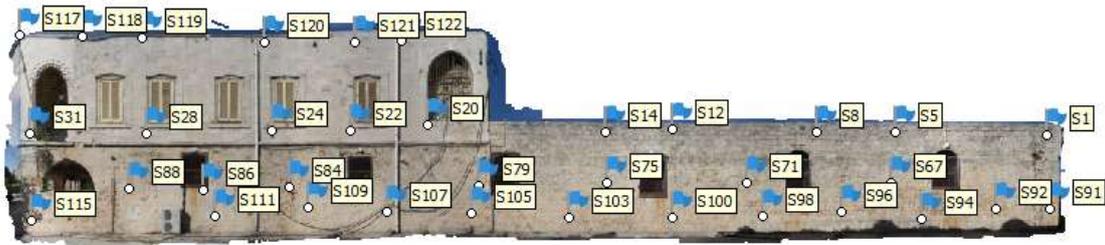
- بالنسبة للسيناريو الأول يتوافر لدينا 30 قطة ضبط موزعة بشكل متجانس على أطراف العنصر المدروس مع تثبيت خمس نقاط في المركز (الشكل (7)). وهنا، تم البدء في الحسابات من أربع نقاط على الأطراف ومن ثم التدرج في الحسابات بزيادة 4 نقاط ضبط في كل مرة، وبهذه الطريقة تم الحصول على 11 أورثوفوتو نتيجة لتطبيق هذا السيناريو.
- بالنسبة للسيناريو الثاني يتوافر لدينا 30 قطة ضبط موزعة بشكل متجانس في مركز العنصر المدروس مع تثبيت خمس نقاط في الأطراف (الشكل (8)). وهنا، تم البدء بالحسابات من أربع نقاط في المركز ومن ثم التدرج في الحسابات بزيادة 4 نقاط ضبط في كل مرة ولكن من المركز باتجاه الأطراف فحصلنا على 11 أورثوفوتو نتيجة لتطبيق هذا السيناريو.
- بالنسبة للسيناريو الثالث يتوافر لدينا 35 قطة ضبط موزعة بشكل متجانس على كامل العنصر المدروس (الشكل (9)). وهنا، تم البدء بالحسابات من أربع نقاط ومن ثم التدرج في الحسابات بزيادة 4 نقاط ضبط في كل مرة فحصلنا على 11 أورثوفوتو نتيجة لتطبيق هذا السيناريو.



الشكل (7). توزيع نقاط الضبط في السيناريو الأول.



الشكل (8). توزيع نقاط الضبط في السيناريو الثاني.



الشكل (9). توزيع نقاط الضبط في السيناريو الثالث.

ثانياً: تقييم دقة التثليث الصوري لبلوك الصور

تتطلب عملية الحصول على الأورثوفوتو المرور بمرحلة تحديد معاملات التوجيه الخارجي للصور وهذا ما يتم إنجازه بعملية التثليث الصوري. لذلك، لا بد من تقييم دقة هذا التثليث للتحقق من ارتباط دقته بالدقة الأفقية للأورثوفوتو. يقوم هذا التقييم على مفهوم الخطأ متوسط التربيع الكلي على الموقع الفراغي لنقاط الاختبار. وهنا، قمنا بقياس إحداثيات هذه النقاط على الصور الموجهة ومن ثم حساب الفروق بين إحداثياتها المقاسة باستخدام جهاز المحطة الشاملة وإحداثياتها المقاسة على الصور الموجهة. انطلاقاً من الفروقات السابقة يمكن حساب الأخطاء متوسطة التربيع التالية:

- الخطأ متوسط التربيع على الاتجاه X:

$$RMSE_X = \frac{\sum_{i=1}^n (X_o - X_{TotalStation})}{n} \quad (1)$$

- الخطأ متوسط التربيع على الاتجاه Y:

$$RMSE_Y = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_{TotalStation})}{n} \quad (2)$$

- الخطأ متوسط التربيع على الاتجاه Z:

$$RMSE_Z = \frac{\sum_{i=1}^n (Z_o - Z)}{n} \quad (3)$$

- الخطأ متوسط التربيع على الموقع الفراغي XYZ:

$$RMSE_{XYZ} = \sqrt{\frac{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2 + RMSE_Z^2}{n}} \quad (4)$$

حيث:

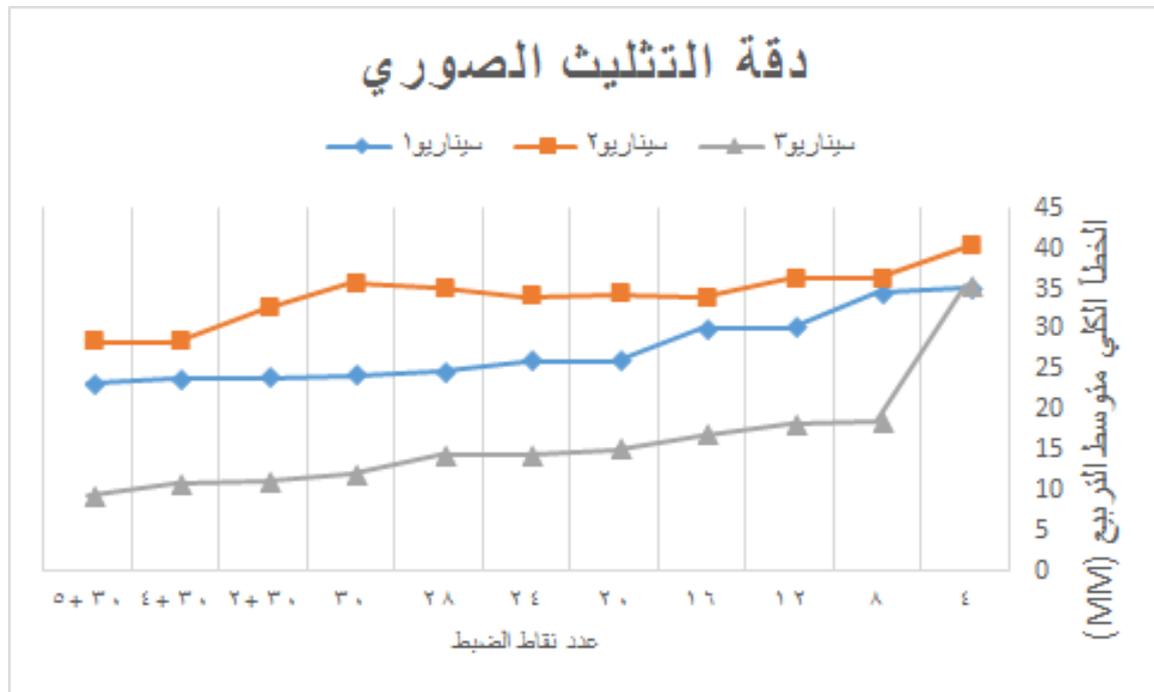
n: هو عدد نقاط الاختبار.

هي الإحداثيات المقاسة لنقطة الاختبار على الأورثوفوتو. $X_0.Y_0$.

هي الإحداثيات المقاسة لنقطة الاختبار باستخدام المحطة الشاملة. $X_{TotalStation}.Y_{TotalStation}.Z_{TotalStation}$. نجد في الجدول (2) والشكل (10) قيم الخطأ المتوسط التربيع على مواقع الفراغية لنقاط الاختبار المحسوب من كل السيناريوهات.

الجدول (2). نتائج تأثير عدد وتوزع نقاط الضبط على الدقة الأفقية للأورثوفوتو.

30+5	30+4	30+2	30	28	24	20	16	12	8	4	GCPs
23.2	23.8	24.0	24.3	24.7	26.0	26.0	30.0	30.2	34.5	35.1	RMSE _{XYZ} (mm) السيناريو الأول (طرفي)
28.4	28.4	32.5	35.6	35.1	34.0	34.3	33.9	36.2	36.2	40.3	RMSE _{XYZ} (mm) السيناريو الثاني (مركزي)
9.2	10.7	11.0	11.9	14.3	14.3	15.0	16.9	18.2	18.5	35.3	RMSE _{XYZ} (mm) السيناريو الثالث (موحد)



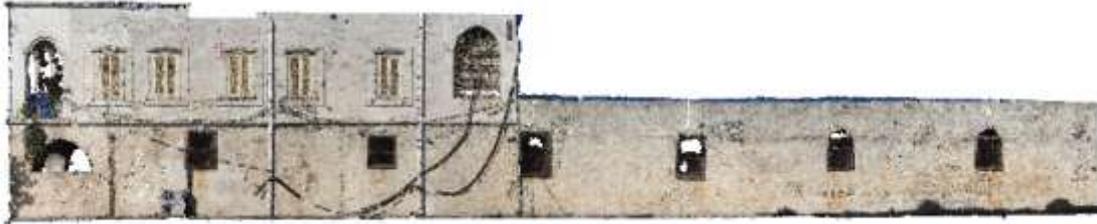
الشكل (10). نتائج تأثير عدد وتوزع نقاط الضبط على الدقة الكلية للتثليث الصوري.

من الجدول (2) والشكل (10) نلاحظ ما يأتي:

1. يوضح الجدول (2) أنه تم الحصول على أسوأ قيم للخطأ متوسط التربيع على التثليث الجوي في منطقة 4 نقاط ضبط لكل السيناريوهات، بينما تم الحصول على أفضل القيم في منطقة 5+30 نقطة ضبط لكل السيناريوهات. هذا وقد تراوحت قيم $RMSE_{XYZ}$ بين 35.1 و 23.2 ميليمتر في التوزيع الطرقي، و بين 40.3 و 28.4 ميليمتر في التوزيع المركزي وبين 35.3 و 9.2 ميليمتر في التوزيع الموحد.
2. استناداً إلى القيم الموجودة في الجدول (2) وإلى الشكل (10) يمكن القول إن عدد نقاط الضبط وتوزيعها لهما تأثير كبير على دقة التثليث الصوري في مشاريع المسح التصويري القريب.
3. وفقاً للجدول (2) نلاحظ أن أفضل دقة للتثليث الصوري قد تم تحقيقها في حالة التوزيع الموحد مع استخدام 35 نقطة ضبط. وإذا علمنا أن مساحة الواجهة المدروسة هي تقريباً 304 m^2 فإن هذا يعني أن وجود نقطة ضبط في كل 12 m^2 من الواجهة يؤمن أفضل دقة للتثليث الصوري.

ثالثاً: توليد غمامة النقاط الكثيفة للواجهة والنموذج الرقمي للسطح

بعد إنهاء مرحلة التثليث الصوري، قمنا بحساب غمامة النقاط الكثيفة (الشكل (11)) والنموذج الرقمي للسطح للواجهة المدروسة. تم في كل السيناريوهات المعتمدة اعتماد نفس مستوى المعالجة Processing level لتوليد الغمامة والنموذج الرقمي للسطح للواجهة المدروسة وذلك تجنباً لمصدر جديد من الأخطاء. بلغ عدد نقاط الغمامة الكثيفة ما يزيد عن 50 مليون نقطة في حين بلغت دقة تمييز النموذج الرقمي للسطح 2.8 mm في كل السيناريوهات.



الشكل (11). غمامة النقاط الكثيفة ثلاثية الأبعاد للواجهة المدروسة.

ثالثاً: تقييم دقة الأورثوفوتو

تم قبل هذه الخطوة حساب الأورثوفوتو والموافق لكل حالة من حالات توزيع نقاط الضبط وعددها في السيناريوهات المعتمدة حيث أنتج كل سيناريو 11 أورثوفوتو. ولتقييم الدقة الأفقية للأورثوفوتو تمت الاستعانة بنقاط الاختبار والتي لم تستخدم في حسابه. يقوم هذا التقييم على مفهوم الخطأ متوسط التربيع على الموقع الأفقي لنقاط الاختبار [14]. ولحساب هذا الخطأ، قمنا بقياس إحداثيات نقاط الاختبار بالاستعانة بالأورثوفوتو ومن ثم حساب الفروقات بين إحداثياتها المقاسة باستخدام جهاز المحطة الشاملة وإحداثياتها المقاسة على الأورثوفوتو. انطلاقاً من الفروقات السابقة يمكن حساب الأخطاء متوسطة التربيع التالية:

- الخطأ متوسط التربيع على الاتجاه X:

$$RMSE_X = \frac{\sum_{i=1}^n (X_o - X_{TotalStation})}{n} \quad (5)$$

- الخطأ متوسط التربيع على الاتجاه Y:

$$RMSE_Y = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_o - Y_{TotalStation})}{n} \quad (6)$$

• الخطأ متوسط التربيع على الموقع الأفقي XY:

$$RMSE_{XY} = \sqrt{\frac{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2}{n}} \quad (7)$$

حيث:

n: هو عدد نقاط الاختبار.

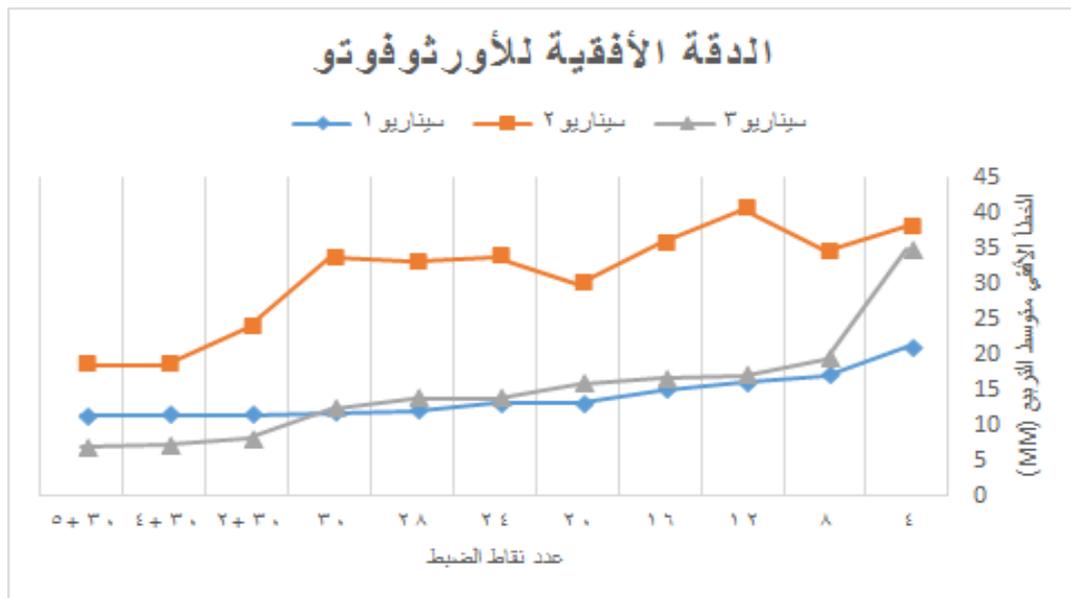
X_0, Y_0 : هي الإحداثيات المقاسة لنقطة الاختبار على الأورثوفوتو.

$X_{TotalStation}, Y_{TotalStation}$: هي الإحداثيات المقاسة لنقطة الاختبار باستخدام المحطة الشاملة.

نجد في الجدول (3) والشكل (12) قيم الخطأ المتوسط التربيع على مواقع نقاط الاختبار المحسوب من كل السيناريوهات.

الجدول (3). نتائج تأثير عدد وتوزع نقاط الضبط على الدقة الأفقية للأورثوفوتو.

30+5	30+4	30+2	30	28	24	20	16	12	8	4	GCPs
11.2	11.4	11.4	11.7	12.0	13.0	13.0	15.0	16.0	17.0	21.0	RMSE _{XY} (mm) السيناريو الأول (طرفي)
18.5	18.5	23.8	33.7	33.0	33.8	30.0	35.7	40.6	34.6	38.0	RMSE _{XY} (mm) السيناريو الثاني (مركزي)
6.8	7.1	8.1	12.3	13.8	13.7	15.8	16.5	17.0	19.3	34.8	RMSE _{XY} (mm) السيناريو الثالث (موحد)



الشكل (12). نتائج تأثير عدد وتوزع نقاط الضبط على الدقة الأفقية للأورثوفوتو.

من الجدول (3) والشكل (12) نلاحظ ما يأتي:

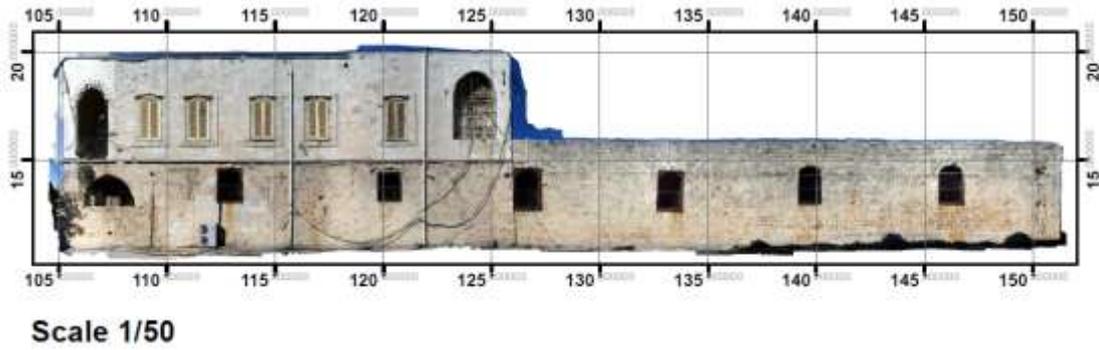
4. يوضح الجدول (3) أنه تم الحصول على أسوأ قيم للخطأ متوسط التربيع الأفقي للأورثوفوتو RMSE تم الحصول عليها في منطقة 4 نقاط ضبط لكل السيناريوهات، بينما تم الحصول على أفضل القيم في منطقة 30+5 نقطة ضبط لكل السيناريوهات. هذا وقد تراوحت قيم $RMSE_{xy}$ بين 21 و 11.2 ميليمتر في التوزيع الطرقي، و بين 38 و 18.5 ميليمتر في التوزيع المركزي وبين 34.8 و 6.8 ميليمتر في التوزيع الموحد.
 5. استناداً إلى القيم الموجودة في الجدول (3) وإلى الشكل (12) يمكن القول إن عدد نقاط الضبط وتوزيعها كان لهما تأثير كبير على الدقة الأفقية للأورثوفوتو الذي يتم الحصول عليه في مشاريع المسح التصويري القريب.
 6. كما يتضح من الشكل (12) أن معدل الخطأ ثابت عند استخدام 28 و 30 نقطة ضبط وأنه قد تم تقليل معدل الخطأ عندما تمت إضافة 2 و 4 و 5 نقطة ضبط مركزية إلى مركز منطقة الدراسة.
 7. لوحظت أسوأ دقة قياس في التوزيع المركزي وانه قد تم تقليل معدل الخطأ، الذي أصبح ثابتاً تقريباً بين 28 و 30 نقطة ضبط، مع إضافة خمس نقاط ضبط في التوزيع الطرقي.
 8. لوحظت أفضل دقة قياس في التوزيع الطرقي وذلك حتى استخدام 30 نقطة وأن زيادة عدد النقاط المضافة أكثر من ذلك لم يحسن الدقة.
 9. فيما يخص التوزيع الموحد فإن دقته تتقارب من دقة التوزيع الطرقي وأن زيادة عدد النقاط عن 32 نقطة المضافة لم يحسن الدقة كثيراً.
 10. وفقاً للجدول (3) نلاحظ أن أفضل دقة وسطية للأورثوفوتو قد تم تحقيقها في حالة التوزيع الموحد مع استخدام 32 نقطة ضبط. وإذا علمنا أن مساحة الواجهة المدروسة هي تقريباً 304 m^2 فإن هذا يعني أن وجود نقطة ضبط في كل 10 m^2 من الواجهة يؤمن أفضل دقة.
- كما نلاحظ الارتباط الوثيق بين دقة التثليث الصوري ودقة الأورثوفوتو وذلك من خلال مقارنة الجدولين (2) و(3)، حيث أن أفضل دقة حققها السيناريو الثالث (التوزيع الموحد لنقاط الضبط) مع تقارب لعدد النقاط اللازمة لتحقيق هذه الدقة.

رابعاً: إخراج الأورثوفوتو الأدق لواجهة المتحف

بعد تحديد العدد والتوزيع الأفضل لنقاط الضبط واللذين أعطيا أفضل دقة أفقية متوسطة للأورثوفوتو (8.1 mm)، يمكننا حساب مخرج مقياس المخطط (S) الذي يمكن استنتاجه من هذه الصورة بتطبيق العلاقة التالية:

$$RMSE_{XY}(m) \leq \frac{0.2}{1000} * S \quad (6)$$

وبالحساب نجد $S=40.5$ والتي يمكن تقريبها إلى المقياس النموذجي $1/50$ وهو مقياس يناسب أعمال التوثيق المعمارية. يوضح الشكل (13) الأورثوفوتو بعد إخرجه باستخدام البرنامج ArcGIS 10.8. يمكن استخدام هذه الصورة كمخطط يعبر عن الوضع الحالي للواجهة وهذا ما يعتبر مفيداً لأي عامل في مجال الترميم.



الشكل (13). أورتوفوتو واجهة المتحف.

الاستنتاجات والتوصيات:

بالاستناد إلى الدراسة النظرية حول تقييم تأثير عدد وتوزيع نقاط الضبط على الدقة الأفقية للأورتوفوتو للواجهات والتطبيق العملي لهذه الدراسة على واجهة أثرية، نستنتج ما يأتي:

1. إن عدد نقاط الضبط وتوزيعها لهما تأثير كبير على الدقة الكلية للتثليث الصوري وعلى الدقة الأفقية للأورتوفوتو التي يتم الحصول عليها في مشاريع المسح التصويري القريب للواجهات.
 2. فيما يخص دقة التثليث الصوري وجدنا أن التوزيع الموحد لنقاط الضبط يؤمن أفضل دقة.
 3. فيما يخص دقة الأورتوفوتو:
 - a. يعتبر التوزيع المركزي لنقاط الضبط هو الأسوأ من بين التوزيعات المختبرة حيث تراوحت قيم الخطأ متوسط التريبع الأفقي للأورتوفوتو من 18.5 إلى 38 ميليمتر على الرغم من زيادة عدد النقاط من 4 حتى 35 نقطة.
 - b. هنالك تقارب في الدقة بين التوزيعين الطرفي والموحد وذلك بدءاً من استخدام 8 نقاط ضبط وصولاً إلى استخدام 30 نقطة.
 4. يعتبر التوزيع الموحد لنقاط الضبط والذي يؤمن وجود نقطة في كل $10-12 \text{ m}^2$ من الواجهة هو الحل الأفضل للحصول على تثليث جوي دقيق وبالتالي على أورتوفوتو دقيق.
- إن عدد نقاط الضبط ونمط توزيعها لا يعتبران العاملين الوحيديين المؤثرين على دقة التثليث الجوي وعلى دقة الأورتوفوتو، لذلك فإننا نوصي في نهاية هذا البحث بدراسة العوامل الأخرى التي تؤثر على الدقة، ومن هذه العوامل نذكر نسب تداخل الصور، دقة تمييز الصور المستخدمة، برنامج المعالجة المستخدم وكذلك معايرة آلة التصوير.

References:

- [1] WOLF, P.R., DEWITT, B.A-*Elements of Photogrammetry with Applications in GIS-4rd Edition*, 2014, p756.
- [2] KROOKS, A. KAHKONEN, J. LEHTO, L. LATVALA, P. KARJALAINEN, M. HONKAVAARA, E - *Visualisation of 3D Environmental Models Based on Finnish Open Geospatial Data Sets- The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XL-3, 2014, pp. 163-169.
- [3] RIJSDIJK, M-*Full Automatically Generated True Orthophotos, Sensational 3D Pointclouds and Dense Matching Techniques in Topographical Mapping- FIG Congress Engaging the Challenges*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2014.
- [4] GEORGOPOULOS, A- *Data acquisition for the geometric documentation of cultural heritage- Mixed reality and gamification for cultural heritage*. Springer, Cham, 2017, pp. 29-73.

- [5] TOBIASZ, A. et al- *Review of methods for documentation, management, and sustainability of cultural heritage. case study: Museum of King Jan III's Palace at Wilanów- Sustainability*, 2019.
- [6] TONKIN, T.N. MIDGLEY, N.G- *Ground-control networks for image based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry-* Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 8, 2016.
- [7] MIRKO, S. EUFEMIA, T. ALESSANDRO, R. GIUSEPPE, F. UMBERTO, F- *Assessing the Impact of the Number of GCPS on the Accuracy of Photogrammetric Mapping from UAV Imagery-* Balt. Surv. Vol. 10, 2019, pp.43–51.
- [8] CABO, C. SANZ-ABLANEDO, E. ROCA-PARDIÑAS, J. ORDÓÑEZ, C- *Influence of the number and spatial distribution of ground control points in the accuracy of uav-sfm dems: An approach based on generalized additive models-* IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 59, 2021, pp.10618–10627.
- [9] VILLANUEVA, J.K.S. BLANCO, A.C- *Optimization of ground control point (GCP) configuration for unmanned aerial vehicle (UAV) survey using structure from motion (SFM)-* Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol.42, 2019, pp. 167–174.
- [10] ALI, U- *The effect of the distribution and numbers of ground control points on the precision of producing orthophoto maps with an unmanned aerial vehicle-* Journal of Asian Architecture and Building Engineering. Vol. 20, 2021, pp. 806-817.
- [11] LUHMANN, T. ROBSON, S. KYLE, S. BOEHM, J- *Close-range photogrammetry and 3D imaging.* Walter de Gruyter, 2013, p.522 .
- [12] GRUSSENMEYER, P. LANDES, T. DONEUS, M. LERMAT, J. L- *Basics of range-based modelling techniques in Cultural Heritage-* 3D recording, documentation and management of cultural heritage. 2016, 388p.
- [13] DOWAJE, M. AL KHALIL, O. YEHYA, M- *Integration of photogrammetry and computer vision techniques in 3D documentation of architectural heritage-* Master thesis, Faculty of civil engineering, Tishreen University, 2017, 132p.
- [14] AGUERA-VEGA, F. CARVAJAL-RAMIREZ, F. AND MARTINEZ-CARRICONDO, P. - *Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry-* Journal of Surveying Engineering. Vol.143, 2017.
- [15] JAVADNEJAD, F. *Small unmanned aircraft systems (UAS) for engineering inspections and geospatial mapping.* Doctorate Thesis, 2017, 168p.
- [16] AGISOFT. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. 2018.