

تحليل فعالية نظم المسح التصويري التجارية منخفضة الكلفة في النمذجة ثلاثية الأبعاد للمنشآت الأثرية

د. عمر الخليل *

د. أحمد علي **

(تاريخ الإيداع 10 / 1 / 2021. قُبِلَ للنشر في 29 / 4 / 2021)

□ ملخص □

خلال السنوات القليلة الماضية، حصلت تطورات في مجال النمذجة ثلاثية الأبعاد للمنشآت الأثرية باستخدام المساحة التصويرية. إحدى هذه التطورات هو انتشار النمذجة باستخدام برامج المسح التصويري القائمة على طريقة "الحصول على البنية من الحركة" Structure from Motion (SfM) التجارية منخفضة التكاليف مثل البرنامج Agisoft Metashape وذلك في العديد من التطبيقات. يوفر هذا النوع من البرامج لعالم النمذجة ثلاثية الأبعاد للتراث الثقافي أداة فعالة من أجل التوثيق والاطهار.

يعرض هذا البحث منهجية لتقييم فعالية مجموعة من نظم المسح التصويري SfM التجارية وذلك عند تطبيقها في النمذجة ثلاثية الأبعاد للمنشآت الأثرية. المنشأ الذي طبقت عليه هذه النظم هو الواجهة الرئيسية لبرج صافيتا وهو منشأ أثري يرجع للقرون الوسطى ويقع في الشمال الغربي من سوريا. تتكوّن هذه النظم من آلة التصوير الرقمية Nikon Coolpix P100 10 MP ومن البرامج SfM التجارية منخفضة الكلفة Agisoft Metashap، و Zephyr Aerial و Pix4D Mapper. تمت مقارنة غمادات النقاط المقطعة لهذه الواجهة باستخدام هذه النظم مع غمامة نقاط كثيفة تم الحصول عليها باستخدام مسح ليزري، وبرهنت هذه المقارنة أن المساحة التصويرية SfM منخفضة التكاليف تؤمن النمذجة الدقيقة للمنشآت الأثرية.

الكلمات المفتاحية: مساحة تصويرية منخفضة التكاليف، الحصول على البنية من الحركة، النمذجة ثلاثية الأبعاد، غمادات النقاط، مسح ليزري.

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

بريد الكتروني: omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy

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

بريد الكتروني: ahmadsalmanali@tishreen.edu.sy

Analyzing the Effectiveness of Commercial Low-Cost Photogrammetry Systems in the 3D Modeling of Historical Monuments

Dr .Omar AL KHALIL*
Dr. Ahmad ALI**

(Received 10 / 1 / 2021. Accepted 29 / 4 / 2021)

□ ABSTRACT □

During the past few years, new developments have occurred in the field of 3D photogrammetric modeling of historical monuments. One of these developments is the expansion of 3D photogrammetric modeling cost-effective licensed software, such as Agisoft Metashape, into the practical and affordable world. This type of SfM (Structure from Motion) software offers the world of 3D modelling of cultural heritage a powerful tool for documentation and visualization.

This paper presents a methodology for evaluating the effectiveness of a range of commercial SfM photogrammetry systems when applied in the 3D modeling of historical monuments. The monument to which these systems were applied is the principal façade of Safita Tower, a medieval structure in Safita, north-western Syria.. The applied photogrammetric systems consist of the Nikon Coolpix P100 10 MP digital camera, the commercial software Agisoft Metashape, 3DF Zephyr Aerial and Pix4D Mapper. The resulted 3D point clouds were compared with an available dense point cloud acquired by a laser scanner. This comparison proved that the low-cost SfM photogrammetry is an accurate methodology to 3D modeling historical monuments.

Keywords: Low-cost photogrammetry, Structure from Motion (SfM), 3D modelling, point clouds, laser scanning.

* Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy

** Associate Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Latakia, Syria. Email: ahmadsalmanali@tishreen.edu.sy

مقدمة:

تتمتع المنشآت الأثرية بأهمية خاصة وذلك لأنها تمثل ذاكرة وتاريخ البلاد التي تتواجد فيها، ولهذا يجب حماية هذه المواقع لمنع تخريبها أو تدميرها [1]. ومن هنا تأتي أهمية التقنيات الحديثة المستخدمة في نمذجة هذه المنشآت وذلك لأنها تساهم في توثيقها والحفاظ عليها وحمايتها. في هذه الحالة، يتوجب على طرائق النمذجة أن تأخذ التعقيد الهندسي للعناصر الأثرية بعين الاعتبار والتي تملك أشكالاً وعناصر معمارية متنوعة. نعدّ من بين هذه الطرائق المسح الليزري ثلاثي الأبعاد 3D laser scanning والمسح التصويري القائم على مفهوم الحصول على "البنية انطلاقاً من الحركة" (SfM) Structure from Motion وهما التقنيتان الرئيسيتان المستخدمتان حالياً في تسجيل هندسية المنشآت الأثرية على شكل غمامات من النقاط ثلاثية الأبعاد 3D point clouds [3].

تتطلب تقنية الـ SfM النقاط الصور من مواقع مختلفة بالنسبة للعنصر المدروس ومن ثم يتم انطلاقاً من هذه الصور اقتطاع سمات مميزة تظهر على هذه الصور ومن ثم ربطها مع بعضها باستخدام خوارزميات الربط الصور Image matching وتحديد العلاقة المكانية بين المواقع الأصلية لآلات التصوير ضمن نظام إحداثيات افتراضي بلا مقياس. يتم لاحقاً استخدام نقاط الضبط وتطبيق التعديل بطريقة الحزم Bundle adjustment من أجل اقتطاع الإحداثيات الحقيقية التي تعبر عن العنصر [4]، [5].

تعتبر الـ SfM أداة مهمة في النمذجة وذلك بفضل الطبيعة الآلية لتدفق العمل في الجيل الحديث من برامجها، فقد ساهمت إمكانيات هذه البرامج المؤتمنة وسهولة استخدامها في تخفيض مستوى المعرفة اللازمة عند استخدامها للحصول نتائج مساحية دقيقة. معظم هذه البرامج تقوم على خوارزمية Scale-Invariant Feature Transform (SIFT) (أو خوارزمية تحويل سمة صور غير المرتبط بمقياس) وهي تشهد في هذه الأيام انتشاراً كبيراً وسريعاً وذلك لكلفتها المادية المنخفضة وسهولة العمل عليها وقدرتها على التوليد الآلي لغمامات نقاط ملونة ثلاثية الأبعاد والتي يمكن أن تستخدم لبناء النموذج ثلاثي الأبعاد [6]. يتوفر من هذا الجيل من البرامج برامج مجانية (مثل البرنامج 3DF Zepyr Lite) ومفتوحة المصدر (مثل البرنامج Open-source Visual Sfm) وكذلك برامج تجارية (مثل البرنامج Pix4D Mapper). ومن الصحيح القول أن البرامج التجارية أفضل من المجانية واستخدامها أسهل من البرامج مفتوحة المصدر في عملية النمذجة، وبالتالي فهي تشكل مع الحواسيب الشخصية القياسية وآلات التصوير الرقمية نظاماً للنمذجة يمكن استخدامه في التوثيق الدقيق للمنشآت الأثرية.

من ناحية أخرى، يعتبر المسح الليزري ثلاثي الأبعاد حلاً واعداً في العديد من تطبيقات النمذجة، فالماسحات الليزرية تسمح بالاقتطاع السريع والدقيق لعدد كبير من غمامات النقاط ثلاثية الأبعاد والتي يمكن ان تتراقق مع صور ملونة ذات دقة تمييز Resolution عالية [7]، ولذلك فهو يستخدم حالياً بشكل واسع في النمذجة ثلاثية الأبعاد للمنشآت الأثرية. إذا ما تمت مقارنة المسح الليزري والمسح التصويري بالـ SfM نجد ان لكل طريقة نقاط ضعف ونقاط قوة والتوجه حالياً إلى إيجاد شكل من أشكال التكامل بين هاتين التقنيتين من أجل التوثيق التفصيلي للمنشآت الأثرية [8]، [9]. ويبقى اختيار إحدى هاتين التقنيتين مرهوناً بالطبيعة الهندسية للعنصر المدروس وكذلك بالميزانية المتوفرة، ومن هنا تأتي قوة حل المسح التصويري بالـ SfM لأنه منخفض التكاليف مقارنةً بالمسح الليزري كما تمكننا برامجه الحديثة من الحصول على غمامات نقاط كثيفة تماماً مثل الماسح الليزري. ولكن لا بد من الإشارة إلى عدم معرفتنا الدقيقة بالخوارزميات الرياضية المعتمدة فيها، وذلك إذا ما تمت مقارنتها بالبرامج مفتوحة المصدر [10]، وهذا ما يوجب القيام بعملية تقييم لفعالية هذه البرامج بطريقة علمية واضحة تقوم على مبدأ المقارنة النسبية والمطلقة مع تقنية موثوقة ودقيقة مثل المسح

الليزري، وهو هدف بحثنا هذا.

قمنا في هذا البحث باقتراح منهجية لتقييم فعالية مجموعة من أشهر برامج المسح التصويري التجارية بطريقة الـ SfM عبر تطبيقها على نمذجة الواجهة الرئيسية (الغربية) لبرج صافيتا الأثري ومن ثم مقارنة نتائج هذه البرامج مع بعضها (مقارنة نسبية) ومع نتائج مسح ليزري متوفر لنفس الواجهة (مقارنة مطلقة).

أهمية البحث وأهدافه:

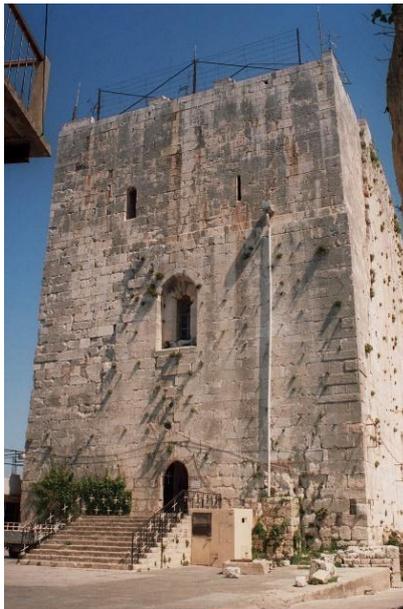
تتلخص أهمية البحث في أنه يقدم منهجية لتقييم فعالية مجموعة من أشهر برامج المسح التصويري بطريقة الـ SfM من ناحية الدقة الهندسية والقدرة على تمثيل العناصر المنمذجة. وبشكل عام، يمكن أن نلخص أهداف البحث فيما يلي:

1. عرض مبسط لتسلسل العمل في برامج الـ SfM التي تم اختبارها في هذا البحث.
2. التأكيد على مرونة ودقة الحل التصويري بالـ SfM لمسألة نمذجة المنشآت الأثرية.
3. اقتراح منهجية علمية لعملية المقارنة من ناحية الدقة الهندسية لحساب بلوكات الصور، ومن ناحية القدرة التعبيرية عن العنصر المدروس من خلال كثافة غمامات النقاط الناتجة عن المعالجة بالبرامج المختلفة التي تم اختبارها وذلك عبر مقارنة نتائج النمذجة المنفذة باستخدام هذا البرنامج مع نتائج المسح الليزري المتوفر للعنصر المدروس.
4. لفت انتباه العاملين في مجال التوثيق ثلاثي الأبعاد للمنشآت الأثرية الوطنية إلى فعالية البرامج الـ SfM ودقة منتجات مع انخفاض كلفتها المادية والمعرفية (مستوى التأهيل المطلوب) مقارنة بتقنية المسح الليزري.

طرائق البحث ومواده:

1- العنصر المدروس

يقع برج صافيتا في مدينة صافيتا الواقعة في الزاوية الجنوبية الشرقية لمحافظة طرطوس والتي تترجع على قمم جبلية ثلاث يتوسط أحداها البرج الشهير يرتفع عن سطح البحر 419 m وهو البرج الوحيد المتبقي في القلعة. يبلغ ارتفاع البرج 28 m أما عرضه فهو 18 m وطوله 31 m. الجزء المدروس في بحثنا هو الواجهة الرئيسية للبرج الموضحة في الشكل (1).



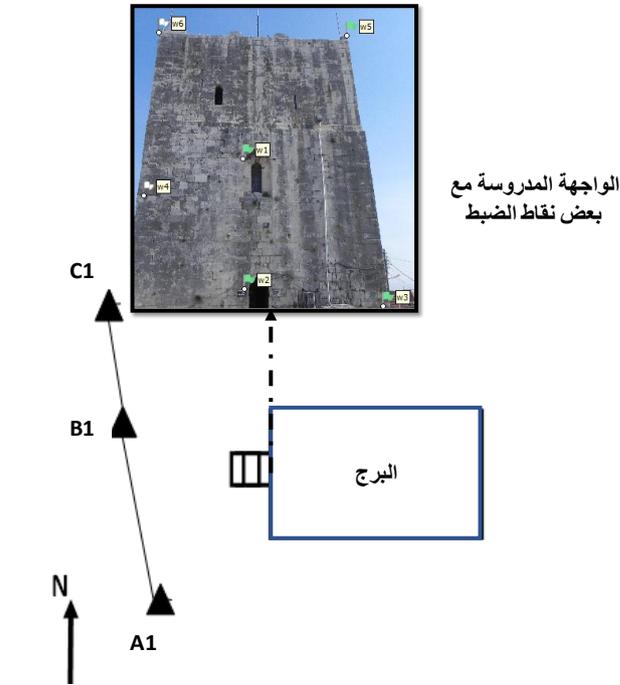
الشكل (1). الواجهة الرئيسية لبرج صافيتا.

2- معطيات الضبط المساحي

تمت عملية النمذجة ضمن نظام إحداثيات محلي، حيث تم تقسيم أعمال الضبط المساحي إلى نوعين أساسيين هما:

1. نقاط الاستناد الأرضية والتي تأخذ شكل مرصد مضلع قصير يمتد حول الواجهة (الشكل (2)). تم خلال رصد زوايا والمسافات وفروق الارتفاع في هذا المضلع استخدام جهاز Total Station South مع لاقط وذلك من أجل تركيز العاكس بشكل شاقولي فوق النقطة المرصودة بشكل دقيق، ويوضح الجدول (1) إحداثيات مرصد المضلع. بلغ خطأ الإغلاق الزاوي على هذا المضلع 60 ثانية غرادية كما بلغ خطأ الإغلاق الطولي 0.020 m، وبالتالي فإننا نتوقع أن تكون دقة نقاط الضبط على الواجهة وكذلك دقة توجيه الصور بحدود $2.5 * 2 = 5$ cm وذلك إذا افترضنا أن القياسات مستقلة وأن الأخطاء عليها تتبع للتوزيع الطبيعي Normal distribution. أما فيما يخص تحديد مناسب مرصد المضلع، فقد قررنا هنا أن نستخدم شبكة تسوية محلية ثم قمنا بإنشاء مضلع تسوية مغلق. ونشير هنا إلى أن الخطأ متوسط التربيع على حساب المناسب قد بلغ 4 mm.

2. نقاط ضبط طبيعية Natural control points تتوضع على جسم الواجهة والتي يمكن رؤية كل منها من مرصدين أرضيين على الأقل. لقد تم اعتماد نقاط طبيعية لعدم إمكانية تثبيت نقاط ضبط صناعية على جسم الواجهة بسبب ارتفاعها الكبير وبسبب عدم توفر آلية تسهل هذا العمل. تم قياس إحداثيات 17 نقطة ضبط موزعة بشكل منتظم على الواجهة. تم التعامل مع هذه النقاط كما يتم التعامل مع نقاط الرفع التفصيلي أي أننا حسبنا إحداثياتها بالطريقة المباشرة (زاوية ومسافة وفرق ارتفاع). وبما أنه يمكن رؤية أغلب هذه النقاط من مرصدي مضلع على الأقل، فقد تم اعتماد القيم المتوسطة لهذه الإحداثيات. إن الهدف من تحديد هذه النقاط وتحديد إحداثياتها هو إنجاز التوجيه الخارجي للصور وتقييم الدقة الهندسية لمنتجات المسح التصويري.



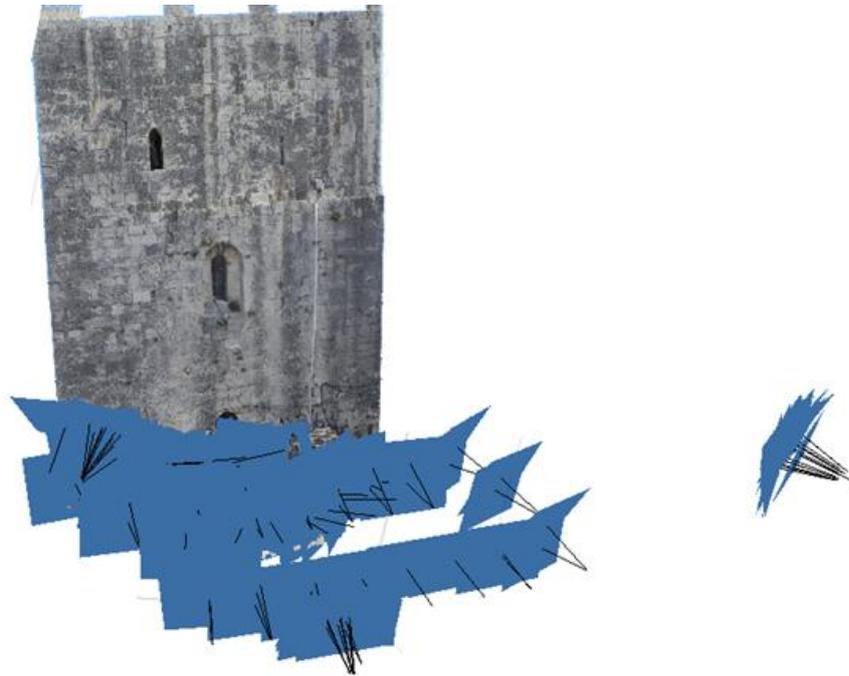
3-آلة التصوير المستخدمة والتقاط الصور

إن آلة التصوير التي استخدمناها هي آلة التصوير المعاييرة Nikon Coolpix P100 والتي تتميز بدقة تمييز تساوي 10.3 megapixel ومقاس صورة مساو لـ 6.12 x 4.6 mm. أما البعد المحرقي المعتمد خلال التصوير فهو 28.3 mm. يميز الجزء البصري لهذه الآلة بقيم منخفضة للتزيغات نصف القطرية ولتزيغات عد الاشتراك في المركز. تمت معايرة آلة التصوير باستخدام البرنامج الكندي PhotoModeler 6.0 فحصلنا على النتائج الموضحة في الجدول (1).

جدول (1). نتائج معايرة آلة التصوير لمرتين منفصلتين.

المعايرة	المعامل	آلة التصوير
23.848517 mm	البعد المحرقي	Nikon Coolpix P100
3.150097 mm	Xp	
2.29927 mm	Yp	
8.29E-04	K1	
4.93E-05	K2	
3.48E-04	P1	
0.222 pixels	الخطأ متوسط التربيع على قياس النقاط	

نظراً لموقع البرج والارتفاع الكبير للواجهة وعدم توفر رافعة فقد تم اعتماد طريقة الخواتم في التقاط صور الواجهة مع الاستفادة من توفر بعض الأبنية المرتفعة حول البرج. تم التقاط 105 صور لتغطية الواجهة مع الحرص على تداخل بين الصور لا يقل عن 60% وظهور كل نقطة من نقاط الواجهة على صورتين على الأقل.

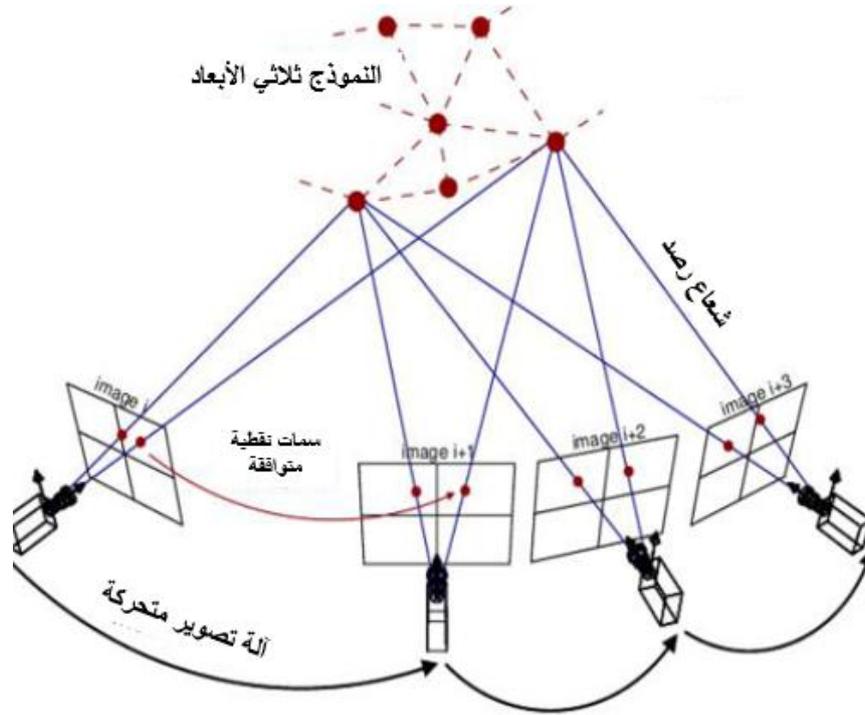


الشكل (3). مواقع التقاط الصور للواجهة المدروسة.

4- برامج الـ SfM المختبرة

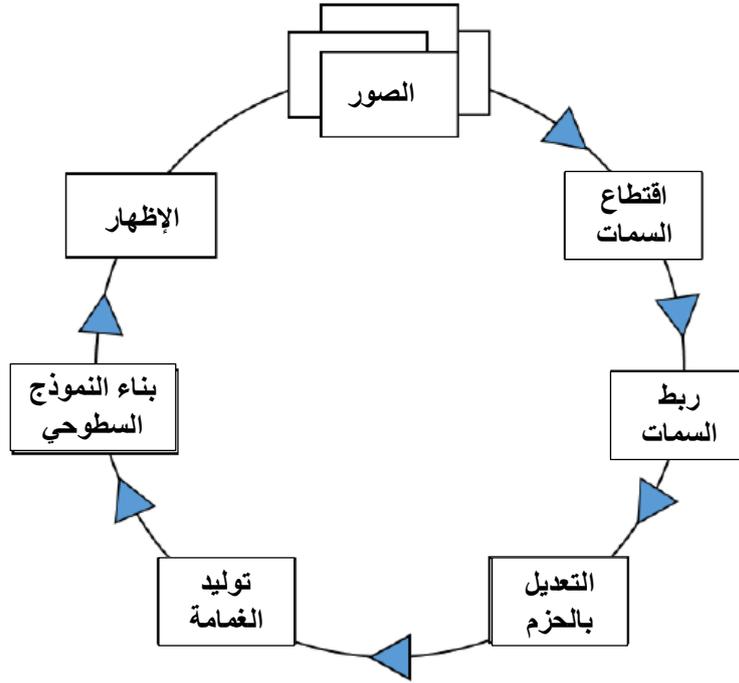
تم في هذا البحث اختبار فعالية مجموعة من أشهر برامج الـ SfM التجارية وأكثرها استخداماً في توثيق المنشآت الأثرية وهي تضم: البرنامج Pix4D Mapper، البرنامج 3DF Zephyr Aerial والبرنامج Agisoft Metashape. تختلف برامج الـ SfM هذه عن بعضها البعض، فبعضها يملك خيارات أكثر أو أقل من البعض الآخر من ناحية أشكال وصيغ المخرجات وخيارات المعالجة وسهولة أو صعوبة واجهات البرنامج المتاحة للمستخدم. من ناحية أخرى تختلف هذه البرامج من ناحية مرونة استيراد نقاط الضبط وقياسها على الصور، توفر إمكانيات الرسم على الغمامات الناتجة لتوليد النماذج ثلاثية الأبعاد بالصيغة المتجهية Vector إضافةً إلى أدوات تحرير الغمامة ومحتويات تقارير المعالجة. ولكن بالرغم من وجود هذه الاختلافات، تتبع جميع هذه البرامج تدفقاً مشتركاً للعمل يمكن تعميمه على كل برامج الـ SfM [11] هو التالي (الشكل (5)):

- 1- تحديد مصدر الصور: تضم هذه المرحلة اختيار الصور التي نريد معالجتها وصيغها إضافةً إلى بعض المعلومات المتعلقة بمواقعها الجغرافية (في حال توفرها). نشير إلى أن هذه المواقع تحدد باستخدام تقنية GPS.
- 2- اقتطاع السمات: بعد اختيار الصور يتم تنفيذ خوارزمية لاقتطاع السمات Feature extraction من كل صورة وينتج عنها مجموعة من واصفات السمات Feature descriptors من أجل كل صورة. في الواقع، يتوفر العديد من خوارزميات الاقتطاع وأشهرها الـ SIFT والـ SURF والـ DAISY [12] ولكننا لا نعرف بالضبط ما هي الخوارزمية المعتمدة في كل من البرامج السابقة نظراً لطبيعتها التجارية.
- 3- ربط السمات Feature matching: وهي مرحلة تهدف إلى حساب نقاط الربط بين الصور وهي مكلفة حسابياً (تستغرق وقتاً طويلاً) نظراً لعدد المقارنات الواجب إنجازها. وهنا تختلف سرعة إنجاز هذه الخطوة من برنامج إلى آخر تبعاً لخوارزميات الربط المعتمدة كما يمكن إنجاز هذه الخطوة دفعةً واحدةً في بعض البرامج أو تقسيمها إلى خطوات جزئية في برامج أخرى.
- 4- التعديل بالحزم Bundle adjustment: في هذه المرحلة من تدفق العمل يتم، انطلاقاً من نائج ربط الصور، توليد غمامة نقاط مبعثرة ثلاثية الأبعاد 3D sparse point cloud تعبر عن البنية ثلاثية الأبعاد للعنصر المصور. الخوارزمية الأكثر استخداماً لإنجاز هذه المرحلة هي خوارزمية Levenberg–Marquardt والتي تستخدم تقنيات الهندسية متعدد الصور (MVG) Multi-View Geometry لتحديد مواقع آلة التصوير واستنتاج البنية ثلاثية الأبعاد للمشهد [11]. نوضح في الشكل (4) مبدء التعديل بالحزم.



الشكل (4). توضيح للتعديل بالحزم (المصدر <http://www.theia-sfm.org/sfm.html>).

- 5- توليد غمامة النقاط الكثيفة: بعد تحديد مواقع آلة التصوير وتوليد غمامة النقاط المبعثرة يتم القيام بتكثيف غمامة النقاط باستخدام نماذج آلة التصوير، نقاط الربط، السمات حول نقاط الربط وخوارزمية تثليث وذلك للحصول على النقاط ثلاثية الأبعاد للمشاهد المصور. هذا وتعد خوارزمية PMVS هي الأشهر في إنجاز هذه المرحلة [13].
- 6- بناء السطح: يتم في هذه المرحلة تطبيق خوارزمية لبناء نموذج سطوح باستخدام النقاط ثلاثية الأبعاد الناتجة عن المرحلة السابقة. يتم في هذه المرحلة إنتاج صورة مصححة عامودياً Orthorectified image للمشاهد وهي إمكانية تتوفر في كل البرامج المختبرة. تتميز هذه الصور بوحدة المقياس كما في المخططات الطبوغرافية وليست كالصورة المرجعة التقليدية التي يتغير فيها المقياس من نقطة لأخرى تبعاً للمناسيب.
- 7- الإظهار: وهي آخر مرحلة، حيث يتم إظهار النتائج مثل غمامات النقاط والصور المصححة عامودياً والنموذج السطوح. تملك البرامج المختبرة كلها مرئيات داخلية Built-in viewer ولا تحتاج إلى مرئيات خارجية لإظهار النتائج مثل Meshlab أو Blender.



الشكل (5). تدفق العام للعمل في برامج الـ SfM.

النتائج والمناقشة:

1- نتائج المعالجة باستخدام البرنامج Agisoft Metashape

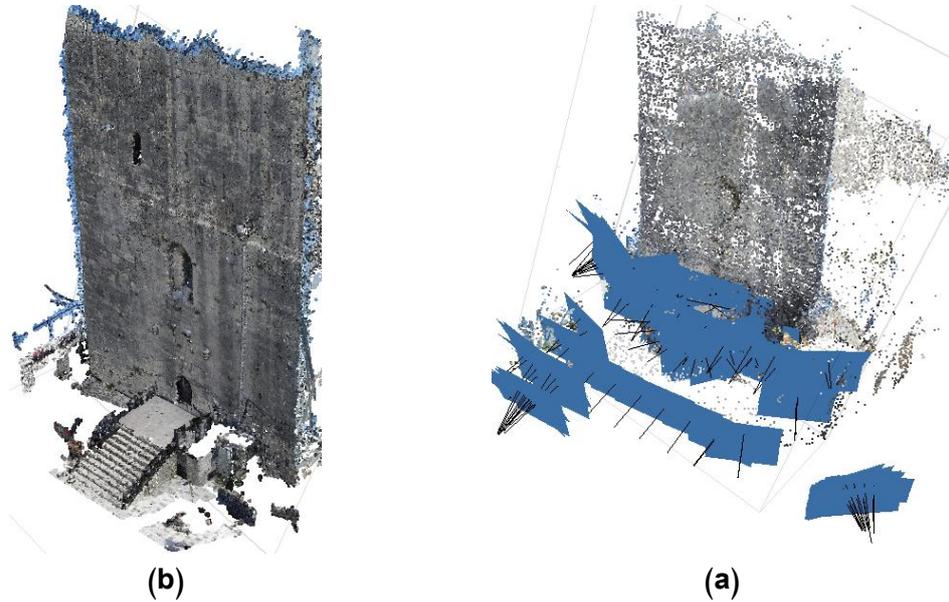
قمنا باستخدام البرنامج Agisoft Metashape المطور من قبل الشركة الروسية Agisoft LLC في معالجة صور الواجهة الغربية لبرج صافيتا. وهذا البرنامج هو برنامج مستقل مخصص للحسابات المسح التصويري انطلاقاً من صور رقمية وهو يولد بيانات ثلاثية الأبعاد يمكن استخدامها في تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية وتوثيق المنشآت الأثرية وفي العديد من التطبيقات الأخرى.

تم استخدام مستوى المعالجة العالي عند توليد غمامة النقاط المبعثرة (نقاط الربط) والكثيفة وهذا يعني أن مستوى الاعتيان الفرعي للصورة المستخدمة في الربط له القيمة 1 وهي تتوافق مع دقة التمييز الكاملة للصور المدخلة [14]. كما تم قياس نقاط الضبط كلها بأعلى دقة قياس ممكنة وذلك على كل الصور المتاحة. يوضح الجدول (2) نتائج هذه المعالجة، كما يوضح الشكل (6) غمامة النقاط المبعثرة مع مواقع آلة التصوير وغمامة النقاط الكثيفة.

جدول (2). نتائج المعالجة باستخدام Agisoft Metashape.

الخطأ متوسط التربيع على مواقع نقاط الضبط (cm)				زمن الحساب الكلي (ساعة)	عدد نقاط الغمامة الكثيفة	عدد نقاط الربط	عدد الصور الموجهة	مستوى المعالجة
σ_{XYZ}	σ_z	σ_y	σ_x					
4.18	2.40	2.61	2.22	12	15000000	89329	105	عالي

علماً بأن عدد الصور ودقة تمييزها هما العاملان الأهم في تحديد زمن المعالجة وأن الحاسب المستخدم يملك المعالج Intel (R) Core (TM) i5 مع كرت شاشة ذاكرته 4 GB.



الشكل (6). نتائج المعالجة باستخدام البرنامج Agisoft Metashape (a). غمامة النقاط المبعثرة ومواقع آلة التصوير، (b). غمامة النقاط الكثيفة.

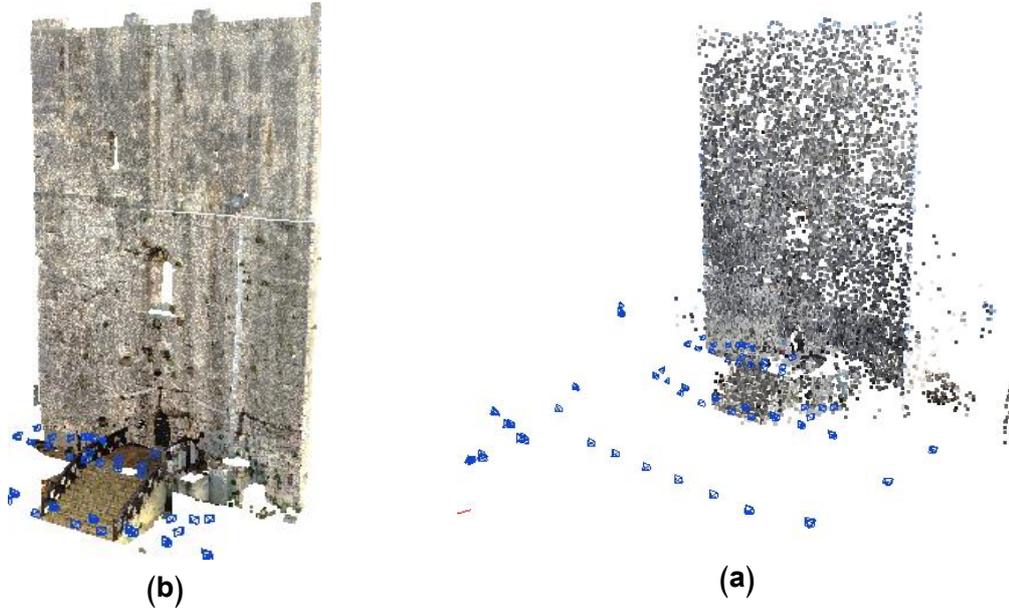
نلاحظ من الجدول أن البرنامج نجح في توجيه كل الصور وأن قيمة الخطأ متوسط التربيع على توقيع نقاط الضبط لم تتجاوز الخطأ المسموح المتوقع وهو 5 cm.

2- نتائج المعالجة باستخدام البرنامج 3DF Zephyr Aerial

أعدنا معالجة الصور باستخدام البرنامج 3DF Zephyr Aerial المطور من قبل الشركة الإيطالية 3Dflow. وهذا البرنامج يعتبر حلاً متكاملاً للمسح التصويري فهو يبدأ من الصور الرقمية وينتهي بتوليد بيانات ثلاثية الأبعاد إضافة إلى توليده للصور المصححة العامودية والصور المصححة العامودية الحقيقية True orthophoto. لهذا البرنامج العديد من التطبيقات التي تتطلب صيغاً مختلفة من البيانات ثلاثية الأبعاد ومنها توثيق المنشآت الأثرية. تم استخدام مستوى المعالجة العالي عند توليد غمامة النقاط المبعثرة (نقاط الربط) وهذا يعني أن خوارزمية اقتطاع السمات ستقتطع 10000 نقطة في كل صورة [15]. ولتوليد غمامة النقاط الكثيفة اخترنا مستوى الاعتيان الفرعي للصورة الموافق لدقة التمييز الكاملة للصور المدخلة كما في حالة المعالجة باستخدام Agisoft Metashape. كما تم قياس نفس العدد من نقاط الضبط المقاسة في المعالجة باستخدام Agisoft Metashape بأعلى دقة قياس ممكنة وذلك على كل الصور المتاحة. يوضح الجدول (3) نتائج هذه المعالجة، كما يوضح الشكل (7) غمامة النقاط المبعثرة مع مواقع آلة التصوير وغمامة النقاط الكثيفة.

جدول (3). نتائج المعالجة باستخدام 3DF Zephyr Aerial.

الخطأ متوسط التربيع على مواقع نقاط الضبط (cm)				زمن الحساب الكلي (ساعة)	عدد نقاط الغمامة الكثيفة	عدد نقاط الربط	عدد الصور الموجهة	مستوى المعالجة
σ_{XYZ}	σ_z	σ_y	σ_x					
3.95	1.93	2.89	1.86	4	5000000	20004	105	عالي



الشكل (7). نتائج المعالجة باستخدام البرنامج 3D Zephyr Aerial. (a). غمامة النقاط المبعثرة ومواقع آلة التصوير، (b). غمامة النقاط الكثيفة.

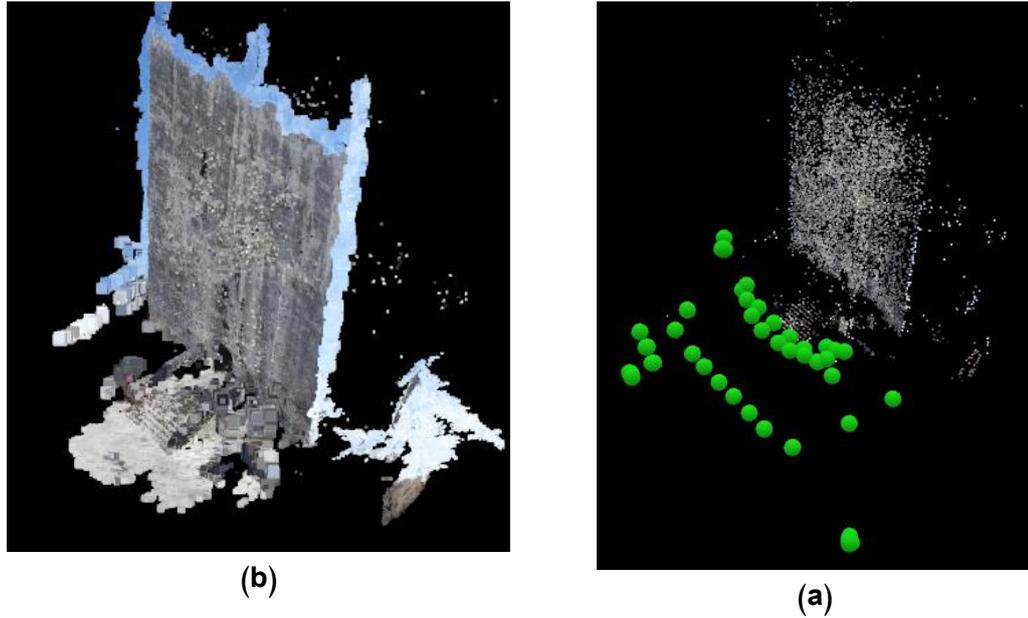
نلاحظ من الجدول أن البرنامج نجح في توجيه كل الصور وأن قيمة الخطأ متوسط التربيع على توقيع نقاط الضبط لم تتجاوز الخطأ المسموح المتوقع وهو 5 cm.

3- نتائج المعالجة باستخدام البرنامج Pix4D Mapper

تم أخيراً معالجة الصور باستخدام البرنامج Pix4D Mapper المطور من قبل شركة سويسرية تحمل نفس الاسم. وهو يسمح بتوليد غمامات نقاط من الصور الرقمية وكذلك نماذج سطوحية وحقيقية ثلاثية الأبعاد، إضافة إلى الصور المصححة عامودياً وموزاييك الصور وفهارس الصور. يحوي البرنامج على أدوات مفيدة للعديد من مجالات التطبيق كالزراعة، المساحة وكذلك التوثيق التفصيلي للمنشآت الأثرية. تم استخدام مستوى المعالجة الكامل عند توليد غمامة النقاط المبعثرة (نقاط الربط) والكثيفة وهذا يعني أن مستوى الاعتيان الفرعي للصورة المستخدمة في الربط له القيمة 1 وهي تتوافق مع دقة التمييز الكاملة للصور المدخلة [16]. كما تم قياس نفس العدد من نقاط الضبط المقاسة في المعالجة باستخدام البرنامجين السابقين بأعلى دقة قياس ممكنة وذلك على كل الصور المتاحة. يوضح الجدول (4) نتائج هذه المعالجة، كما يوضح الشكل (8) غمامة النقاط المبعثرة مع مواقع آلة التصوير وغمامة النقاط الكثيفة.

جدول (4). نتائج المعالجة باستخدام Pix4D Mapper.

الخطأ متوسط التربيع على مواقع نقاط الضبط (cm)				زمن الحساب الكلي (ساعة)	عدد نقاط الغمامة الكثيفة	عدد نقاط الربط	عدد الصور الموجهة	مستوى المعالجة
σ_{xyz}	σ_z	σ_y	σ_x					
4.51	1.51	3.10	2.90	18	3400000	12000	81	كامل



الشكل (8). نتائج المعالجة باستخدام البرنامج Pix4D Mapper (a). غمامة النقاط المبعثرة ومواقع آلة التصوير، (b). غمامة النقاط الكثيفة.

نلاحظ من الجدول أن البرنامج نجح في توجيه كل الصور وأن قيمة الخطأ متوسط التربيع على توقيع نقاط الضبط لم تتجاوز الخطأ المسموح المتوقع وهو 5 cm.

5- مقارنة نسبية لنتائج المعالجة بمختلف البرامج

من خلال الجداول 2، 3 و 4 نستطيع استنتاج مايلي:

1. حققت خوارزميات الحساب لمعاملات المعايرة لصور البلوك (معايرة ذاتية Autocalibration) مستوى الدقة المطلوب ولم تتجاوز قيمة الخطأ المسموح.
2. لم تنجح بعض البرامج في توجيه كل الصور (حالة البرنامج Pix4D Mapper) مما يؤكد اختلاف الخوارزميات المطبقة في عملية اقتطاع السمات.
3. باستخدام نفس مستويات المعالجة، استطاعت بعض البرامج اقتطاع عدد أكبر من نقاط الربط (حالة البرنامج Agisoft Metashape) وهذا ما أدى إلى زيادة دقة توقيع نقاط الضبط.
4. فيما يخص عدد نقاط الغمامة الكثيفة نلاحظ وجود تقارب بين نتائج البرنامجين Pix4D Mapper و 3DF Zephyr Aerial مما قد يؤكد أن الخوارزميات المطبقة في هذه البرنامجين هي نفسها.
5. استطاعت كل برامج الـ SfM المختبرة توليد غمامات نقاط كثيفة تعبر عن هندسية العنصر الموجود بشكل كاف وذلك على الرغم من وجود اختلاف في عدد نقاط هذه الغمامات من برنامج إلى آخر.
6. بالرغم من استخدام نفس الحاسب في كل المعالجات السابقة (حاسب يملك المعالج Intel (R) Core (TM) i5 مع كرت شاشة ذاكرته 4 GB) إلا أننا نلاحظ وجود اختلاف كبير في زمن المعالجة وهذا يعتمد في رأينا على ذكاء الخوارزميات المطبقة في إدارة عملية اقتطاع وتخزين وتنظيف غمامات النقاط في كل برامج.

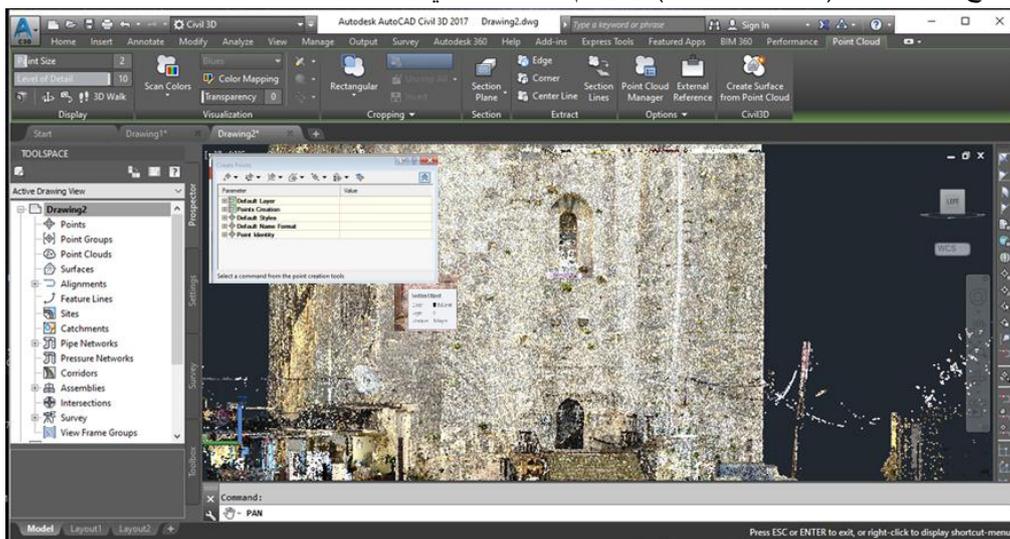
من ناحية أخرى، لاحظنا من خلال العمل على البرامج أن بعضها يملك واجهات سهلة نسبياً (حالة البرنامج Agisoft Metaashape) وبعضها الآخر يملك إمكانيات وأدوات أكثر للتعامل مع نقاط الضبط ومع التعديل بالحزم ومع غمامات النقاط من ناحية التحرير والتصدير (حالة البرنامج 3DF Zephyr Aerial).

4- معالجة غمامة الليزر المتوفرة

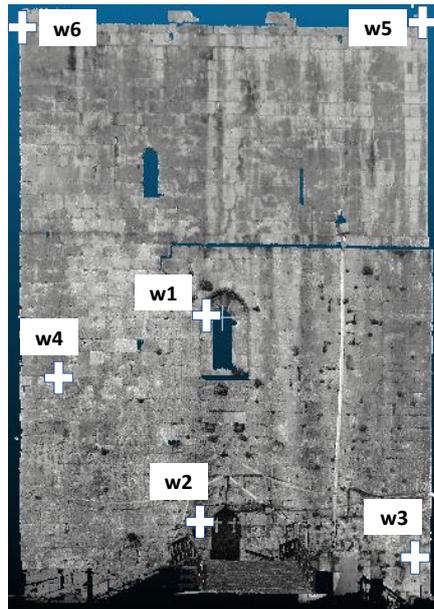
للحكم على الدقة الهندسية لغمامات النقاط السابقة وعلى قدرتها التعبيرية عن هندسية العنصر، قمنا بمقارنتها مع غمامة مسح ليزري متوفرة للعنصر المدروس [17]. قامت الشركة اللبنانية 3DExperts بهذا المسح في العام 2019 باستخدام الماسح الليزري Focus3D المنتج من قبل FARO. يملك هذا الماسح حقل رؤية $360^{\circ} \times 305^{\circ}$ وسرعة مسح عالية (976k pts/sec) ويتم فيه قياس المسافات بتطبيق انزياح الطور [18]. أما البرنامج الذي استخدم في معالجة نقاط الغمامة فهو البرنامج SCENE version 8.0.

كان لا بد من القيام بمعالجة مسبقة لغمامة المسح الليزرية قبل القيام بعملية المقارنة وذلك لأنها لا توجد في نفس المرجع المكاني الخاص بغمامات الـ SfM كما أن صيغتها غير متوافقة مع البرنامج CloudCompare. وهذا البرنامج مستخدم بشكل واسع من قبل الباحثين في مجال المسح التصويري حيث تتوفر فيه العديد من الأدوات للمعالجة اللاحقة للغمامات والتي تتراوح من تحرير وإظهار هذه الغمامات إلى العديد من الخوارزميات المعقدة مثل المرشحات، توليد السطوح، تسجيل النماذج، حساب المسافات والإحصائيات، التقسيم وتقدير السمات الهندسية وغيرها. تاريخياً، بدء تطوير هذا البرنامج في العام 2004 ضمن كادر أطروحة دكتوراه ممولة من قبل EDF R&D في المدرسة الوطنية العليا للاتصالات في باريس l'Ecole Nationale Supérieure des Télécommunications (التي عرفت لاحقاً باسم Telecom ParisTech). بعد ذلك، صار هذا البرنامج مشروعاً مستقلاً مفتوح المصدر لغايات أكاديمية بحثية وليست تجارية. يملك هذا البرنامج واجهة تخاطبية بسيطة مع نظام إظهار لوني ديناميكي مما يسهل إظهار البيانات ثلاثية الأبعاد. كما يمكن أتمتة العديد من أدوات المعالجة اللاحقة باستخدام إما سطر الأوامر أو باستخدام منصة لغة برمجة مثل Matlab.

بالنسبة لمشكلة توحيد المرجع المكاني فقد تم حلها من خلال استقراء إحداثيات ست نقاط ضبط على غمامة الليزر داخل البرنامج Civil 3D (الأشكال 9 و 10) ومن ثم استخدامها في إعادة توجيه غمامات الـ SfM.



الشكل (9). استقراء إحداثيات نقاط الضبط على غمامة المسح الليزري للواجهة.



الشكل (10). مواقع نقاط الضبط على غمامة المسح الليزري للواجهة.

يوضح الجدول (5) قيم الدقة على إعادة توجيه الغمامات المتولدة باستخدام برامج الـ SfM المختبرة.

جدول (5). نتائج إعادة توجيه الغمامات في جملة إحداثيات غمامة الليزر.

الخطأ متوسط التربيع على مواقع نقاط الضبط (cm)				البرنامج
σ_{xyz}	σ_z	σ_y	σ_x	
5.04	2.60	2.90	3.20	Agisoft Metashape
5.3	-3.9	0.4	-3.50	3DF Zephyr Aerial
4.6	2.01	2.89	3.00	Pix4D Mapper

نلاحظ أن الدقة الكلية لإعادة توجيه الغمامات باستخدام كل البرامج المختبرة تساوي ما يقارب الـ 5 cm. إن هذه القيمة المرتفعة نسبياً يمكن تبريرها بصعوبة استقراء نقاط الضبط من غمامة الليزر.

6- مقارنة نتائج البرامج مع المسح الليزري

لمقارنة الغمامات الكثيفة الناتجة عن المعالجة باستخدام برامج الـ SfM المختبرة مع غمامة النقاط الكثيفة الناتجة عن المسح الليزري (عدد نقاطها هو 30 مليون نقطة تقريباً) قمنا باستخدام خوارزمية M3C2 الموجودة في البرنامج CloudCompare والتي تسمح بحساب المسافات بإشاراتها بين غمامتين بشكل مباشر وهذه الخوارزمية تولد غمامة جديدة تحوي الفروقات بين الغمامتين الأصليتين [19]. تعتبر هذه الخوارزمية مناسبة بشكل خاص لمقارنة الغمامات الناتجة عن المسح التصويري SfM مع غمامات المسح الليزري [20].

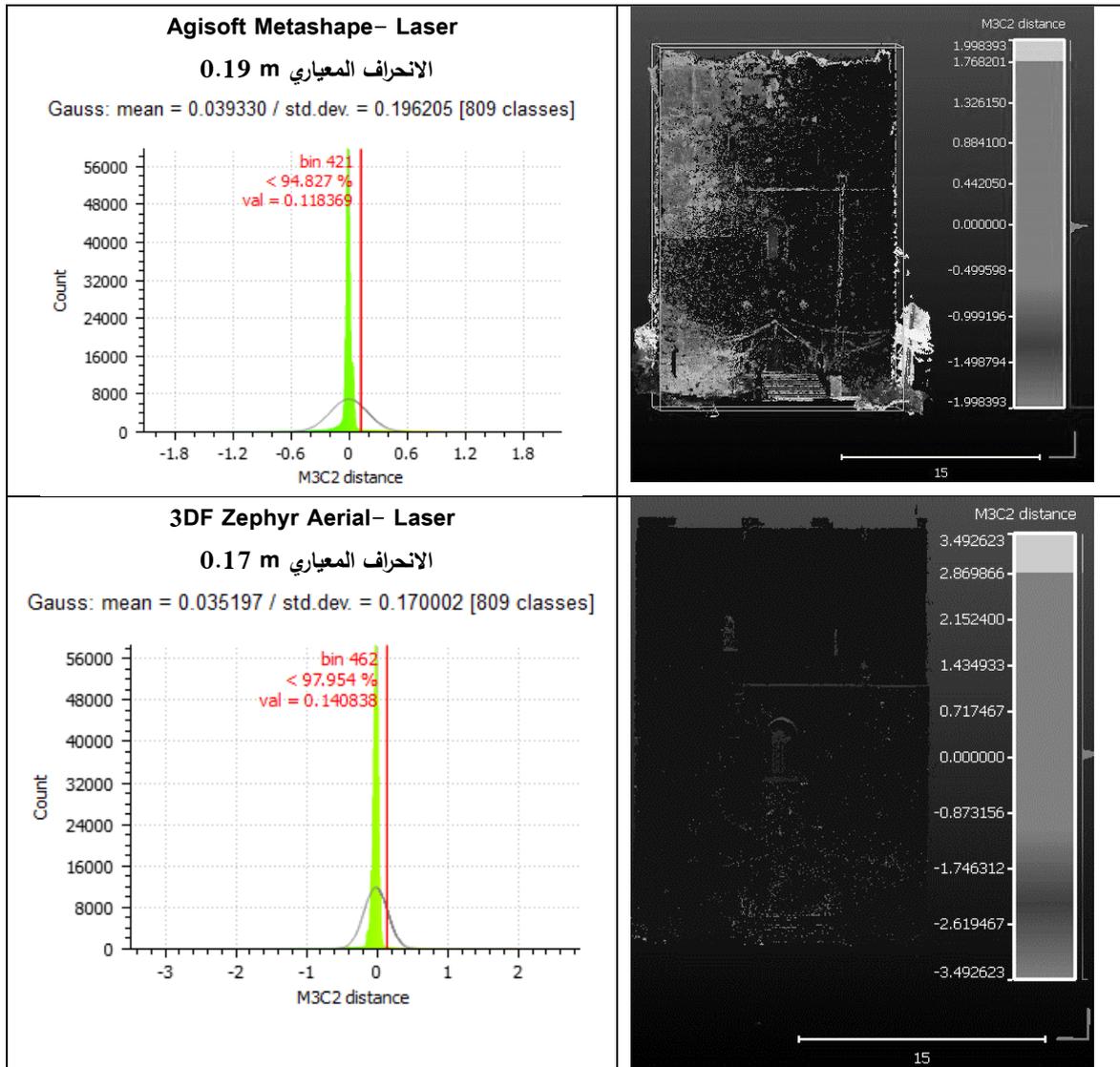
قمنا باعتبار أن غمامة النقاط الليزرية هي المرجعية في كل المقارنات وذلك بسبب كثافتها العالية (الشكل 11) وحصلنا على النتائج التالية:

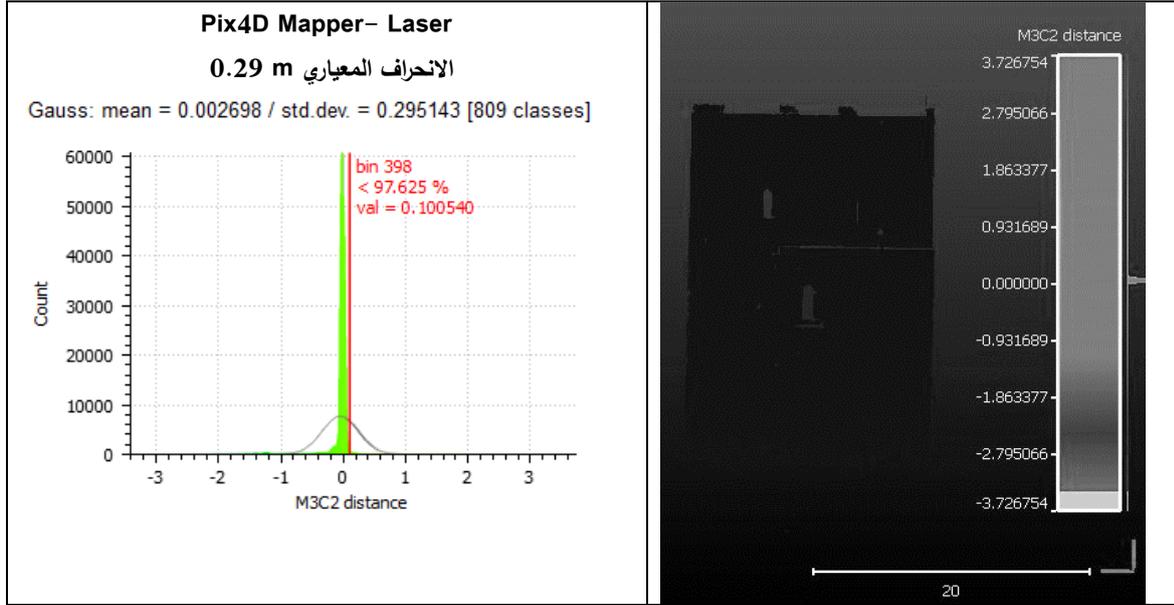
1. بالنسبة لغمامة النقاط الكثيفة التي أنتجها البرنامج Agisoft Metashape وجدنا أن المتوسط المطلق للمسافات الفاصلة بين نقاطها ونقاط المسح الليزري قد بلغت 3.0 cm وأن 94.83% من الفروقات المحسوبة أقل من 12 cm. كما لاحظنا أن الفروقات الأكبر تخص الأجزاء العالية من الواجهة لصعوبة تصويرها وكذلك هنالك فروقات كبيرة عند منطقة الدرج المؤدي إلى المدخل الرئيسي للواجهة بسبب ظهورها على عدد قليل من الصور.
 2. فيما يخص غمامة النقاط الكثيفة التي أنتجها البرنامج 3DF Zephyr Aerial وجدنا أن المتوسط المطلق للمسافات الفاصلة بين نقاطها ونقاط المسح الليزري قد بلغت 3.5 cm وأن 97.95% من الفروقات المحسوبة أقل من 14 cm. وكما في الحالة السابقة، وجدنا أن الفروقات الأكبر تخص الأجزاء العالية من الواجهة وكذلك منطقة الدرج المؤدي إلى المدخل الرئيسي للواجهة.
 3. في حالة غمامة النقاط الكثيفة التي أنتجها البرنامج Pix4D Mapper وجدنا أن المتوسط المطلق للمسافات الفاصلة بين نقاطها ونقاط المسح الليزري قد بلغت 0.2 cm وأن 97.62% من الفروقات المحسوبة أقل من 10 cm. وكما في الحالة السابقة، وجدنا أن الفروقات الأكبر تخص الأجزاء العالية من الواجهة وكذلك منطقة الدرج المؤدي إلى المدخل الرئيسي للواجهة.
- من ناحية أخرى يمكن تحليل النتائج باستخدام مفهوم الانحراف المعياري للفروقات Standard deviation. نجد أن الانحرافات المعيارية في حالتي البرنامجين 3DF Zephyr Aerial و Agisoft Metashape متقاربة (الشكل (11)) بينما نلاحظ أن الانحراف المعياري في حالة البرنامج Pix4D Mapper تساوي تقريباً ضعف الانحرافات السابقة (الشكل (11)).
- نستطيع أن نختم أن النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام الخوارزميات المبرمجة في البرنامجين 3DF Zephyr Aerial و Agisoft Metashape أقرب إلى الحالة المرجعية الموافقة للمسح الليزري وهذه نتيجة تؤكد النتيجة السابقة التي توصلنا إليها عند مقارنة نتائج البرامج مع بعضها مقارنةً نسبية.

الاستنتاجات والتوصيات:

- بالاستناد إلى الدراسة النظرية والعملية المقدمة مسبقاً، نستنتج مايلي:
1. لا تستخدم برامج الـ SfM التجارية نفس الخوارزميات في اقتطاع السمات وربطها وكذلك في حساب معاملات توجيه بلوكات الصور. إن الخوارزميات المطبقة ليست واضحة تماماً وهذا عائد إلى الطبيعة التجارية للبرامج.
 2. فيما يخص خوارزميات ربط الصور وتوليد الغمامات الكثيفة الموجودة في البرامج المختبرة، وجدنا أننا لا نحصل على نفس المنتجات بالرغم من تثبيت نفس المعاملات في هذه البرامج. إن اعتماد كامل دقة تمييز الصور الأصلية في المعالجة يعطي نتائج مختلفة ولو كانت جيدة عموماً.
 3. تتفاوت البرامج SfM من ناحية سهولة وصعوبة الواجهات المخصصة للمستخدم ومن ناحية عدد وصيغ المنتجات الممكن الحصول عليها. ففي معظم هذه البرامج ليس من السهل على المستخدم غير المختص تحديد القيم الجيدة للعديد من معاملات المعالجة وكذلك ليس من السهل عليه تحليل النتائج.
 4. تتمتع نتائج البرامج بدقة هندسية مقبولة لأعمال التوثيق للمنشآت الأثرية وهي قليلة التكاليف مقارنةً بالمسح الليزري الأرضي. وبناءً على ذلك يمكن أن تشكل بديلاً مقبولاً لهذه التقنية أو أن تتكامل معها على الأقل.
- في النهاية نوصي بتعميق دراسة معاملات المعالجة المعتمدة في البرامج SfM التجارية والوصول إلى تفسير وتوضيح

دقيق لكل منها لمساعدة المستخدم في اختيار ما يناسبه منها في التطبيق الذي يهمله. يمكن انجاز هذه العملية بمقارنة هذه البرامج مع البرامج مفتوحة المصدر Open-source software والتي نعرف بالضبط ما تم برمجته من خوارزميات حسابية تخص اقتطاع السمات وربطها والتعديل بالحزم فيها. من ناحية أخرى، نوصي الجهات الوطنية العاملة في مجال توثيق الآثار باستخدام هذا الجيل من البرامج كبديل للمسح الليزري الأرضي نظراً للفعاليته من ناحية سهولة التعامل، المعالجة المؤتمتة، انخفاض الكلفة، الدقة الهندسية الجيدة والتنوع الكبير للمنتجات التي توفرها هذه البرامج.





الشكل (11). نتائج حساب الفروقات بين غمامات النقاط بطريقة M3C2.

References:

- [1] PEGON, P., PINTO, A.V., GÉRADIN, M. Numerical modelling of stone-block monumental structures, *Comput Struct* 79 ,2001, pp. 2165–2181.
- [2] ELISE JONES, A. World Heritage Sites in Danger and their Preservation. <https://medium.com/@jonesalexandra595>, 2018. (accessed on 11 December 2019).
- [3] LEÓN-ROBLES, C., REINOSO-GORDO, J., GONZÁLEZ-UIÑONES, J. Heritage building information modeling (H-BIM) applied to a stone bridge. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2019, 8(3), 121.
- [4] CHANDLER, J., BUCKLEY, S. Structure from motion (SfM) photogrammetry vs terrestrial laser scanning. *figshare*. Chapter. <https://hdl.handle.net/2134/21673>, 2019. (accessed on 25 December 2019).
- [5] MICHELETTI, N., CHANDLER, J.H., LANE, S.N. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone., 486, 2014, pp.473–486.
- [6] PAVELKA, K., SEDINA, J., HAUSAROVA, E., MARTAN, M. Using multi image photogrammetry for precise documentation of historical building parts. 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2016, www.sgem.org, SGEM, 2016 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-59-9 / ISSN 1314-2704, June 28 - July 6, 2016, Book2 Vol. 2, 1083-1090 pp.
- [7] REMONDINO, F., GUARNIERI, A., VETTORE, A. 3D modelling of close-range objects: photogrammetry or laser scanning? *Electronic Imaging 2005*, International Society for Optics and Photonics, pp. 216–225.
- [8] EL-HAKIM, S.F., BERARDIN, J.-A., GONZO, L., WHITING, E., JEMTRUD, M., VALZANO, V. A Hierarchical 3D Reconstruction Approach for Documenting Complex Heritage Sites. *The XX CIPA International Symposium*. Torino, Italy. 2005.
- [9] BAPTISTA, M. L. V. Documenting a Complex Modern Heritage Building Using Multi Image Close Range Photogrammetry and 3D Laser Scanned Point Clouds. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information*

Sciences, Volume XL-5/W2, 2013, XXIV International CIPA Symposium, 2 – 6 September 2013, Strasbourg, France.

[10] AL KHALIL, O., GRUSSENMEYER, P. 2D & 3D reconstruction workflows from archive images, case study of damaged monuments in Bosra al-sham city (Syria). The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-2/W15, 2019. 27th CIPA International Symposium “Documenting the past for a better future”, 1–5 September 2019, Ávila, Spain.

[11] ROSSI, A.J., RHODY, H., SALVAGGIO, C., WALVOORD, D.J. Abstracted workflow framework with a structure from motion application. In *Image Processing Workshop (WNYIPW), 2012 Western New York* (pp. 9-12). IEEE.

[12] MURILLO, A.C., GUERRERO, J.J., SAGUES, C. Surf features for efficient robot localization with omnidirectional images. In *Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2007*, pp. 3901-3907. IEEE.

[13] FURUKAWA, Y., PONCE, J. Patch-based Multi-view Stereo Software (PMVS-Version 2). *PMVS2, University of Washington, Department of Computer Science and Engineering. 2012, Web. Downloaded from on May, 14.*

[14] AGISOFT METASHPE. Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition. 2020.

[15] 3DFLOW. 3DF Zephyr Free, 202. <http://3dflow.net>. (accessed 30 /10/ 2020).

[16] PIXD4 MAPPER. Pix4D Mapper 2.1, 2020. <http://www.pix4d.com> (accessed 30 /10/ 2020).

[17] Al Khalil O. Structure from Motion (SfM) Photogrammetry as Alternative to Laser Scanning for 3D Modelling of Historical Monuments. 2020, *Open Science Journal* 5(2).

[18] Vosselman, G., Maas, H. G. Airborne and Terrestrial Laser Scanning. Whittles Publishing, Boca Raton, FL, USA, 2010, pp. 109-118.

[19] GAGLILOLO, S., AUSONIO, E., FEDERICI, B., FERRANDO, I., PASSONI, D., SGUERSO, D. 3D culture heritage documentation: a comparison between different photogrammetric software and their products. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, Vol. XLII-2, pp. 347-354.

[20] JAMES, M.R.; ROBSON, S.; SMITH, M.W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: Precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surf. Process. Landf.* 2017, 42, 1769–1788.