

Evaluate the Impact of the Use of Control Data Types on the Accuracy of Aerial Triangulation of the Images Taken by Unmanned Aerial Vehicle (Drones)

Dr .Omar AL KHALIL *

(Received 11 / 4 / 2022. Accepted 22 / 5 / 2022)

□ ABSTRACT □

Some drones carry digital cameras equipped with the ability to record the location of each image captured in the GNSS system, which permit to obtain input data for aerial triangulation.

In this paper, we discuss the effect of the types of reference data used in the aerial triangulation of drone images on the spatial accuracy of this triangulation. Here, we discuss the accuracy of aerial triangulation of the images taken by a GNSS RTK-based drone without post processing, and by a GNSS PPK-based drone which applies corrections to camera positions and orientations.

The results demonstrated that the use of set points with RTK-equipped drones significantly improves the absolute accuracy of aerial triangulation and the graphical scales of cartographic products based on images of these drones (the absolute accuracy on control points improved from 95.03 cm to 42.09 cm in our example). On the other hand, we found that the use of ground control points with PPK-equipped drones does not significantly affect the absolute accuracy of triangulation and the graphical scales of cartographic products based on images of these drones. The absolute accuracy on the control points changed from 6.35 cm to 6.25 cm in our example, which is an imperceptible change.

Keywords: Unmanned aerial vehicle, Aerial triangulation, global navigation satellite system, real-time kinematic processing, control points.

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

تقييم تأثير نوع بيانات الضبط على دقة نتائج التثليث الجوي للصور الملتقطة باستخدام الطائرات دون طيار (الدرونات)

د. عمر الخليل*

(تاريخ الإيداع 11 / 4 / 2022. قُبِلَ للنشر في 22 / 5 / 2022)

□ ملخص □

تحمل بعض الطائرات دون طيار (الدرونات) آلات التصوير الرقمية مجهزة بإمكانية تسجيل موقع كل صورة ملتقطة ضمن نظام GNSS وهو الأمر الذي يمكننا من الحصول على بيانات تستخدم في التثليث الجوي للصور. نحاول في هذا البحث مناقشة تأثير أنواع البيانات المرجعية المستخدمة في التثليث الجوي لصور الدرونات على الدقة المكانية لهذا التثليث، حيث ناقشنا دقة التثليث الجوي لصور الدرونات القائمة على أرصاد GNSS باستخدام المعالجة الحركية بالوقت الحقيقي RTK دون معالجة لاحقة لهذه الأرصاد، و للدرونات القائمة على أرصاد GNSS باستخدام المعالجة الحركية مع معالجة لاحقة للأرصاد (PPK) بهدف تطبيق التصحيحات على مواقع وتوجيهات آلة التصوير. بينت النتائج أن استخدام نقاط الضبط مع الدرونات المزودة بتقنية RTK يحسن الدقة المطلقة للتثليث الجوي وللمقاييس الرسومية للمنتجات الكارتوغرافية القائمة على صور هذه الدرونات بشكل كبير (تحسنت الدقة المطلقة على نقاط الضبط من 95.03 cm إلى 42.09 cm في مثالنا). من ناحية أخرى، وجدنا أن استخدام نقاط الضبط الأرضية مع الدرون المزود بتقنية PPK، لا يؤثر كثيراً على الدقة المطلقة للتثليث وللمقاييس الرسومية للمنتجات الكارتوغرافية القائمة على صور هذه الدرونات حيث تغيرت الدقة المطلقة على نقاط الضبط من 6.35 cm إلى 6.25 cm في مثالنا وهو تغير غير محسوس.

الكلمات المفتاحية: طائرة دون طيار، تثليث جوي، نظام الملاحة العالمي بالأقمار الصناعية، المعالجة الحركية بالوقت الحقيقي، نقاط ضبط.

* أستاذ . قسم الهندسة الطبوغرافية . كلية الهندسة المدنية . جامعة تشرين . اللاذقية . سورية.
بريد الكتروني: omarmohammedalkhalil@tishreen.edu.sy

مقدمة:

في الوقت الحاضر، تجذب الطائرات دون طيار (UAV) (أو الدرونات) اهتمام العاملين في العديد من مجالات الدراسة المختلفة مثل علم الآثار [1] والزراعة [2] والتعدين [3]. هذا، ويشير المصطلح UAV إلى طائرة دون طيار يتم التحكم بها عن بعد، وتُبرمج مسبقاً لتسلك مسارات محددة. ولكن هذا لا يعني بالضرورة أنّ هذه الطائرات تطير لوحدها وبشكل ذاتي، ففي الكثير من الحالات، يكون الطاقم الأرضي (العامل، طيار الإسناد، الخ..) الخاص بالدرون أكبر من ذلك الخاص بالطائرات التقليدية.

لقد كان الاستخدام الأكبر للدرونات هو للأغراض العسكرية كالمراقبة والهجوم والحفاظ على حدود الدولة من أي تهديد. ولكن استعمالها في الأعمال المدنية شهد تزايداً كبيراً حيث صارت تُستخدم في المهام الصعبة والخطرة بالنسبة للطائرة التقليدية. وإذا تمت مقارنة الدرونات مع الطائرات العادية فسنجد أنّ الفرق الأساسي هو عدم وجود الطيار بشكل فيزيائي على المنصة، وبالتالي المُتحكّم في الطائرة غير معرض لخطر حقيقي [4].

وبفضل التقدم التكنولوجي، أصبحت الدرونات أداة متعددة الأغراض لتجميع البيانات، ومنها البيانات التي تستخدم للحصول على أنواع مختلفة من المنتجات مثل النماذج ثلاثية الأبعاد للمشاهد المصورة والصور المصححة عمودياً (الأورثوفوتو) وذلك للحصول على مخططات وخرائط من مقاييس كبيرة [5]. في الواقع، تقدم هذه الدرونات صوراً ذات دقة تمييز أرضية عالية (من فئة المليمترات) والتي يمكن معالجتها باستخدام العديد من البرامج المتوفرة في السوق [6] للحصول على المنتجات المطلوبة. وقبل ظهور الدرونات، كان إنشاء النموذج ثلاثي الأبعاد والخريطة ثنائية الأبعاد لمنطقة الدراسة يتم بتطبيق الطرائق المساحية الأرضية التقليدية وهي طرائق توجب اتباع العديد من الإجراءات المعقدة وتستغرق فترة طويلة من الزمن قبل التمكن من الحصول على النتائج. ولهذا السبب تعد الدرونات أكثر ملاءمةً للحصول على الخرائط ثنائية وثلاثية الأبعاد مقارنة بطرائق المسح الأرضي.

يُعتبر التثليث الجوي [7] Aerial triangulation عملية أساسية لإرفاق نظام إحداثيات مكاني مع البيانات التي نحصل عليها من صور الدرون. ولإنجاز هذه العملية، يجب استخدام نقاط ضبط أرضية نحدد بطرائق المسح الأرضي التقليدي أو باستخدام نظام الملاحة العالمي (GPS) Global Navigation System أو نظام الملاحة باستخدام الأقمار الصناعية (GNSS) Global Navigation Satellite Systems والتي يمكن التعرف عليها بصرياً في الصور المستخدمة. من ناحية أخرى، هنالك بعض آلات التصوير الرقمية التي تحملها الدرونات وتكون مجهزة بإمكانية تسجيل موقع كل صورة ملتقطة ضمن نظام GNSS وهو الأمر الذي يمكننا من الحصول على بيانات تستخدم في التثليث الجوي للصور.

نحاول في هذا البحث مناقشة تأثير أنواع البيانات المرجعية المستخدمة في التثليث الجوي لصور الدرونات على الدقة المكانية لهذا التثليث والتي تؤثر بدورها على دقة المنتجات الممكن الحصول عليها من هذه الصور. استندت المناقشة على الأنواع التالية من البيانات المرجعية:

1- أرساد GNSS باستخدام المعالجة الحركية بالوقت الحقيقي (RTK) Real-Time Kinematic دون معالجة لاحقة لهذه الأرساد والتي تحدد مواقع وتوجيهات آلة التصوير (معاملات التوجيه الخارجي Exterior orientation) والتي تقيسها المستقبلات المرفقة مع آلة تصوير الدرون وتسجلها في ملف توصيف الصور والمعروف بـ EXIF (صور معلّمة Tagged photos).

2- أرساد GNSS باستخدام المعالجة الحركية مع معالجة لاحقة للأرساد Post Processed Kinematic

(PPK) بهدف تطبيق التصحيحات على مواقع وتوجيهات آلة التصوير.

3- نقاط ضبط أرضية محددة باستخدام GNSS في مناطق الدراسة.

نشير أخيراً إلى هذه المناقشة التي قدمها البحث تستند إلى بيانات مجانية متوفرة على شبكة الأنترنت وذلك لعدم قدرتنا على اقتطاع بيانات محلية حالياً.

أهمية البحث وأهدافه:

تتلخص أهمية البحث في أنه يقدم منهجية لتقييم تأثير نوع البيانات المرجعية المستخدمة في حساب التثليث الجوي لصور الدرون على الدقة المكانية لهذا التثليث والتي تؤثر بدورها على دقة المنتجات الممكن الحصول عليها من هذه الصور. وبشكل عام، يهدف هذا البحث الى مناقشة الفرضيات التالية:

1- إن استخدام الدرونات المزودة بتقنية المعالجة الحركية بالوقت الحقيقي RTK في حساب التثليث الجوي للصور الملتقطة لا يلغي الحاجة إلى نقاط ضبط أرضية للحصول على دقة مرتفعة للتثليث الجوي.

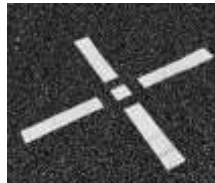
2- أ إن استخدام الدرونات المزودة بتقنية المعالجة الحركية مع المعالجة اللاحقة PPK يلغي الحاجة إلى نقاط ضبط أرضية ويحولها إلى نقاط اختبار Checkpoints.

طرائق البحث ومواده:

1- البيانات المرجعية المستخدمة في المسح التصويري باستخدام الدرونات

• نقاط الضبط

نقاط الضبط الأرضية GCPs هي نقاط معرفة فيزيائياً على سطح الأرض ذات إحداثيات معلومة وبحيث تكون مرئية على الصور. وعادةً ما تكون هذه النقاط صناعيةً عند استخدام الدرون ولها نمط رقعة شطرنج أو هدف محدد المركز (الشكل 1). ويعتبر نمط رقعة الشطرنج مناسباً لأنه يملك تبايناً جيداً داخل الصور ويمكن تمييزه بسهولة داخلها إضافةً إلى سهولة قياس مركزه الذي يمثل نقطة الضبط.



الشكل (1). نماذج نقاط الضبط الأرضية المستخدمة في المسح التصويري بالدرون.

(المصدر: موقع شركة Wingtra: <https://wingtra.com/ppk-drones-vs-rtk-drones>)

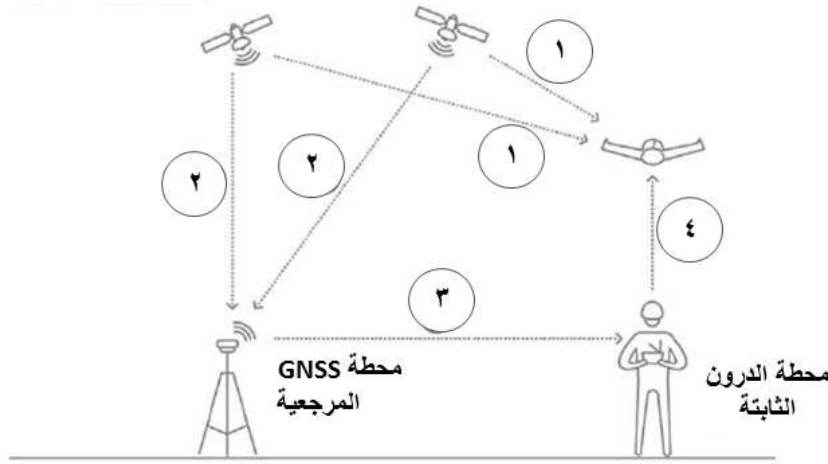
تستخدم نقاط الضبط لرفع الدقة المطلقة Absolute accuracy للتثليث الجوي والتي تعكس مدى دقة السمات بالنسبة لموقعها الأرضي. هذا، ويعتمد عدد النقاط اللازمة ودقة تحديد إحداثياتها على حجم العنصر المدروس وعلى الدقة النهائية المطلوبة. ولا بد أن نشير إلى أن تحديد نقاط الضبط لأي مشروع مسح تصويري هي عملية مكلفة وأن كلفتها تتراوح بين 10% إلى 50% من الكلفة الكلية للمشروع حتى مع استخدام تقنية الـ [7]GNSS.

• المعالجة الحركية في الوقت الحقيقي RTK

لا تعتبر تقنية RTK الجديدة فقد تم استخدامها في المساحة الأرضية للعديد من السنوات لتحسين دقة بيانات الـ GNSS [8]. إن الهدف من تزويد الدرونات بهذه التقنية هو تصحيح مواقع بيانات التخریط التي تقتطعها هذه الدرونات. يحمل الدرون من النوع RTK على متنها مستقبل GNSS من النوع RTK والذي يجمع البيانات من التتابع الصناعية ومن محطة ثابتة أرضية لتصحيح موقع الصورة في الوقت الحقيقي. وهنا تقوم المحطة الأرضية بتصحيح إشارة الأقمار الصناعية للوصول إلى دقة من فئة السنتيمتر لمواقع الصور. ولتحقيق ذلك يجب توافر اتصالات مستمرة بين محطة GNSS المرجعية والدرون عبر المحطة الثابتة. ولاستخدام RTK يتوجب توافر أربع خطوط قواعد ثابتة لتصحيح بيانات الموقع التي تزودنا بها الأقمار الصناعية (الشكل 2):

- 1- خط قاعدة بين الأقمار الصناعية والدرون.
- 2- خط قاعدة بين الأقمار الصناعية والمحطة GNSS الأرضية.
- 3- خط قاعدة بين المحطة GNSS المرجعية ومحطة الدرون الأرضية الثابتة.
- 4- خط قاعدة بين المحطة الأرضية الثابتة والدرون.

RTK



الشكل (2). مبدأ عمل الدرون المزودة بتقنية RTK.

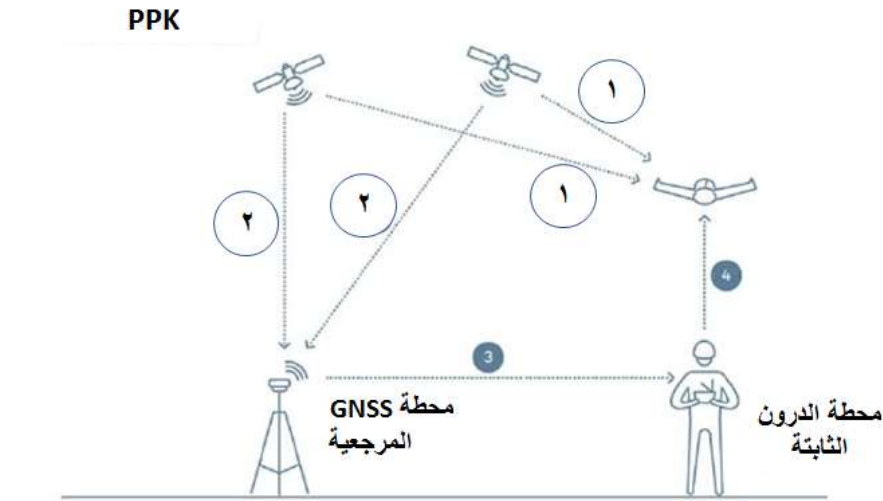
(المصدر: <https://wingtra.com/ppk-drones-vs-rtk-drones>)

إن الحصول على بيانات مصححة خلال الطيران ينفي الحاجة النظرية إلى وجود نقاط ضبط أرضية [9]. ولكن وجود العوائق يؤدي إلى منع أو انقطاع الإشارات وقد يمتد التحليق خارج حدود قوة الإشارة وهذا يخفض من دقة تحديد مواقع صور الدرون باستخدام الـ RTK.

• المعالجة الحركية مع معالجة لاحقة PPK

صحيح أن المسوحات PPK تشبه المسوحات RTK، ولكن تصحيح المواقع لا يتم في الوقت الفعلي. وعادة ما يتضمن PPK وضع محطة أساسية ثابتة فوق نقطة ضبط معروفة للسماح بتحديد الموقع الجغرافي. ثم يتم جمع بيانات GNSS في وقت واحد من قبل المحطة الأساسية والدرون ملحقة. ويتم تنزيل هذه البيانات من المحطة الأساسية والدرون ثم تتم معالجتها باستخدام برنامج لتصحيح إشارة الأقمار الصناعية ورفع دقة تحديد مواقع الصور.

عند استخدام الدرونات المزودة بتقنية PPK، فإنه لا يلزم لتصحيح بيانات مواقع صور الملتقطة من قبل الدرون توافر اتصالات بين المحطة الأساسية GNSS مع المحطة الأساسية للدرون، أو توافر المحطة الأساسية للدرون، والمطلوب فقط توافر القياس عن بعد بين المحطة الأساسية للدرون و الدرون نفسه، أما حل PPK فيستغرق وقتاً أطول في الإعداد ولكنه يعتمد على البيانات الاحتياطية للإشارة لضمان دقة تحديد مواقع الصور.



الشكل (3). مبدأ عمل الدرون المزودة بتقنية PPK.

(المصدر: <https://wingtra.com/ppk-drones-vs-rtk-drones>)

2- البيانات المتوفرة

يتوفر لدينا نوعان من البيانات:

• بيانات ملتقطة بدرون مزودة بـ RTK

البيانات المتوفرة هنا هي عبارة عن صور لمطار موجود في الولايات المتحدة الأمريكية يبلغ عددها 112 صورة، كما يتوفر لدينا 9 نقاط ضبط محددة باستخدام نظام GPS. تم الحصول على هذه البيانات عليها باستخدام الدرون UAV Mapper ذي الأجنحة الثابتة (الشكل 3) (تم الحصول على هذه البيانات مجاناً من الموقع: https://dronemapper.com/sample_data). يستطيع هذا الدرون حمل آلات تصوير عديدة بما في ذلك: آلات تصوير Sony بدون مرايا، Sequoia، RedEdge، FlirVue، Mapir، و SlantRange. أما وزن الدرون الإجمالي فهو أقل من 1.9 kg، ويمكنه البقاء في الهواء لمدة 40 دقيقة تقريباً بعملية شحن واحدة، وهو يصور كيلومتراً مربعاً أثناء الطيران على ارتفاع 100 m. يسمح تصميم أجنحة هذا الدرون بالطيران بشكل أفضل في الرياح القوية مقارنة بالطائرات التقليدية. يملك هذا الدرون مستقبل من النوع GNSS RTK كما يتوفر معه برنامج للتخطيط للتصوير هو البرنامج Mission Planner.



الشكل (3).الدرون ذي الأجنحة الثابتة UAV Mapper.

تم التقاط الصور بآلة التصوير Sony Nex 5T مع دقة تمييز 16ميغابكسلوعدسة من النوع Sony 16mm على ارتفاع 100 m. تبلغ قيمة مسافة الاعتيان الأرضية (أبعاد البكسل على الأرض) 2.82 cm/pixel، كما تم تحديد مواقع الصور باستخدام تقنية RTK دون تصحيح لاحق لهذه المواقع Post-processing. نبين في الشكل (4) مواقع نقاط الضبط كما نبين في الجدول (1) الإحداثيات GNSS لهذه النقاط.



الشكل (4).مواقع نقاط الضبط.

جدول (1).إحداثيات نقاط الضبط المقاسة بالـ GNSS.

النقطة	زاوية العرض (درجات)	زاوية الطول (درجات)	الارتفاع(متر)
1	29.88974	-98.8181	448.4909
2	29.89073	-98.819	453.3450
3	29.89072	-98.8183	452.2638
4	29.89075	-98.8197	455.3277
5	29.88813	-98.8182	444.8210

451.9958	-98.8199	29.88834	6
454.4809	-98.8198	29.88932	7
450.5264	-98.8188	29.88914	8
452.0453	-98.8196	29.88865	9

كما يتوفر لدينا مواقع الصور مقاسةً باستخدام تقنية RTK وجزء منها موضَّح في الجدول (2).

جدول (2).مواقع الصور المقاسة بتقنية RTK.

الارتفاع(متر)	زاوية الطول(درجات)	زاوية العرض(درجات)	الصورة
543.8981	-98.8199	29.88842	1
542.647	-98.8199	29.8886	2
542.2941	-98.8199	29.88879	3
542.2174	-98.8199	29.88896	4
542.1084	-98.8198	29.88914	5
542.2905	-98.8198	29.88931	6
542.5651	-98.8198	29.88949	7
542.9242	-98.8198	29.88966	8
543.0952	-98.8198	29.88983	9

• بيانات ملتقطة بدرون مزودة ب PPK

البيانات المتوفرة هنا هي عبارة عن صور لمنطقة موجودة في إسبانيا يبلغ عددها 193 صورة، كما يتوفر لدينا 11 نقاط ضبط مع نقطة القاعدة Base وهي جميعاً محددة باستخدام نظام GNSS. تم الحصول على هذه البيانات باستخدام الدرون DJI Mavic 2 Pro PPK الذي يمكنه البقاء في الهواء لمدة 30 دقيقة بعملية شحن واحدة، وهو يصور 30 هكتاراً خلال هذه المدة. يملك هذا الدرون مستقبل من النوع PPK GNSS. (تم الحصول على هذه البيانات مجاناً من الموقع: <https://topodrone.org/downloads>).

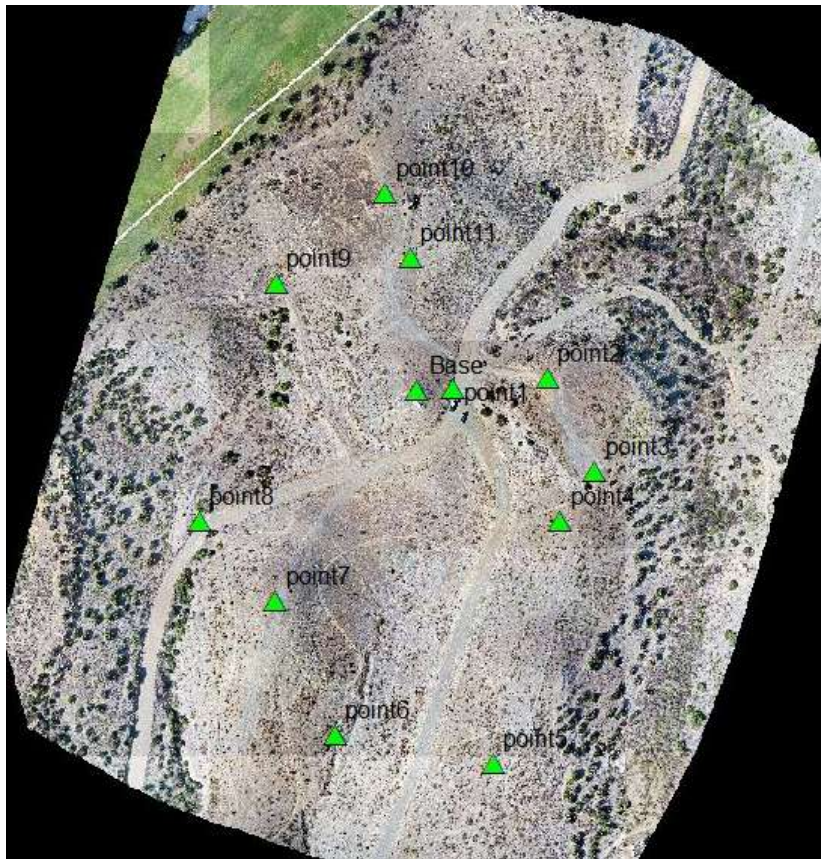


الشكل (5).الدرون ذي المحركات الدوارة TOPODRONE DJI Mavic 2 Pro PPK

تم التقاط الصور على ارتفاع 110 m بألة التصوير Test_Pro بدقة تمييز تساوي 20 ميغابكسل. تبلغ قيمة مسافة الاعتیان الأرضية (أبعاد البكسل على الأرض) 1.92 cm/pixel، كما تم تحديد مواقع الصور باستخدام تقنية PPK. نبين في الشكل (6) مواقع نقاط الضبط كما نبين في الجدول (3) الإحداثيات GNSS لهذه النقاط.

جدول (3). إحداثيات نقاط الضبط المقاسة بالـ GNSS.

النقطة	زاوية العرض (درجات)	زاوية الطول (درجات)	الارتفاع (متر)
Point 1	36.52373	-4.66311	148.1334
Point 2	36.52377	-4.66265	153.4818
Point 3	36.52341	-4.66241	153.7720
Point 4	36.52321	-4.66258	149.4810
Point 5	36.52224	-4.66288	138.1332
Point 6	36.52234	-4.66366	123.8944
Point 7	36.52287	-4.66396	140.5192
Point 8	36.52318	-4.66434	132.7403
Point 9	36.52413	-4.66399	144.5694
Point 10	36.52449	-4.66346	157.8481
Point 11	36.52424	-4.66333	153.1833



الشكل (6). مواقع نقاط الضبط.

كما يتوفر لدينا مواقع الصور مقاسة باستخدام تقنية PPK وجزء منها موضحة في الجدول (4).

جدول (4). عينة من مواقع الصور المقاسة بتقنية PPK.

الصورة	زاوية العرض (درجات)	زاوية الطول (درجات)	الارتفاع (متر)
1	36.52355	-4.66325	221.2655
2	36.52384	-4.66463	220.8321
3	36.52396	-4.66459	220.7458

220.7014	-4.66454	36.52407	4
220.6502	-4.6645	36.52419	5
220.6283	-4.66446	36.5243	6
222.1202	-4.66475	36.5227	7
221.9582	-4.66462	36.52266	8
221.8747	-4.66433	36.52259	9

3- البرنامج المستخدم

يتوفر العديد من البرمجيات التي تقوم بالنمذجة ثلاثية الأبعاد بتطبيق طريقة الـ SfM. ومن هذه البرمجيات ما هو مفتوح المصدر Open source (مجاني) مثل البرنامج VisualSfM والبرنامج PMVS2 ومنها ما خدمة على الأنترنت Web service مثل Autodesk Photofly و 123D Catch ومنها ما تجاري مثل البرنامج AgisoftMetashape والبرنامج PhotoModler Scanner. مقارنةً بباقي البرامج، قد يكون البرنامج الروسي AgisoftMetashape (وهو البرنامج المستخدم في هذا البحث) هو من أفضل النظم التي تمثل تقنية اقتطاع البنية من الحركة Structure from Motion (SfM) فهو يملك واجهة تخاطبية سهلة الاستخدام كما يمكن المستخدم من الحكم على نوعية منتجه وربطه مع أي نظام إحداثيات إضافةً إلى إمكانية معالجة الصور الجوية والأرضية على حد سواء وكذلك تصدير النموذج الثلاثي الأبعاد بصيغ عديدة [10].

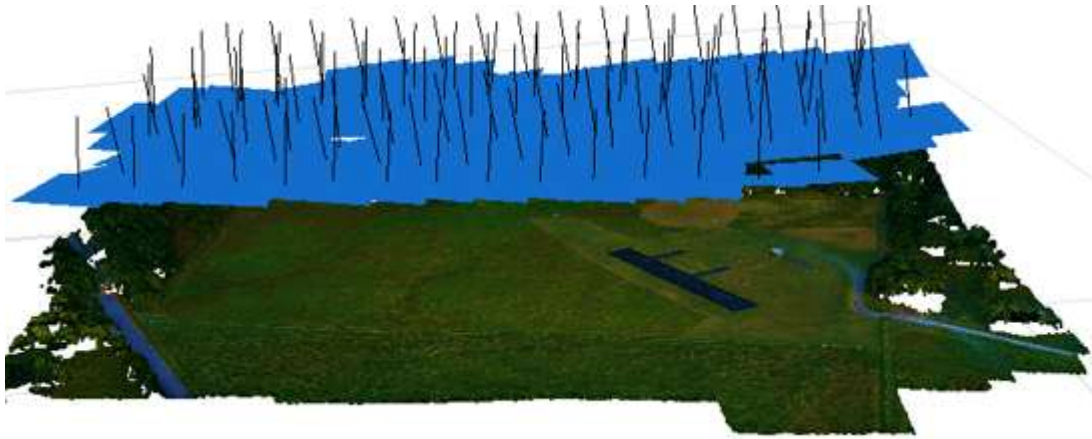
النتائج والمناقشة:

للوصول إلى النتائج المرجوة من هذا البحث، تم تقسيم العمل إلى المراحل الآتية:

- 1) حساب التثليث الجوي لبلوك صور المثال الأول (مواقع الصور المقاسة بالـ RTK) وذلك وفق ما يلي:
 - a. استخدام إحداثيات مواقع الصور دون أية نقطة ضبط واستخدام نقاط الضبط كنقاط اختبار لتقييم دقة التثليث.
 - b. استخدام إحداثيات مواقع الصور مع إدخال إحداثيات نقاط الضبط في عملية الحساب لاختبار فرضية زيادة دقة التثليث الجوي.
- 2) حساب التثليث الجوي لبلوك صور المثال الثاني (مواقع الصور المقاسة بالـ PPK) وذلك وفق مايلي:
 - a. استخدام إحداثيات مواقع الصور دون أية نقطة ضبط واستخدام نقاط الضبط كنقاط اختبار لتقييم دقة التثليث.
 - b. استخدام إحداثيات مواقع الصور مع إدخال إحداثيات نقاط الضبط في عملية الحساب لاختبار فرضية عدم الحاجة لنقاط الضبط لزيادة دقة التثليث الجوي.

1- التثليث الجوي لصور الدرون المزود تقنية RTK

تم أولاً حساب التثليث الجوي لبلوك صور المثال الأول باستخدام إحداثيات مواقع الصور دون أية نقطة ضبط باستخدام البرنامج Agisoft Metashpe. يوضح الشكل (7) مواقع الصور الناتجة عن عملية الحساب كما يوضح الجدول (5) قيم الأخطاء متوسطة التربيع في الاتجاهات X, Y, Z وكذلك قيمة الخطأ المتوسط التربيع الكلي على هذه المواقع (لا بد من الإشارة إلى أن إحداثيات مواقع الصور ونقاط الضبط قد تم تحويلها من النظام الجغرافي WGS84 إلى النظام المتعامد UTM Zone 14 باستخدام البرنامج Agisoft Metashpe).



الشكل (7). مواقع الصور الناتجة عن التثليث الجوي لبلوك المثال الأول.

جدول (5). الأخطاء متوسطة التربيع على مواقع الصور المقاسة بتقنية RTK.

σ_x (cm)	σ_y (cm)	σ_z (cm)	σ_{xyz} (cm)
5.60	15.10	30.11	34.15

لم نكتف بهذا التقييم لنتائج التثليث والذي يمثل دقة نسبية Relative accuracy بل قمنا بقياس نقاط الضبط على كل الصور الممكنة وإعادة حساب إحداثياتها من قبل البرنامج على أنها نقاط اختبار وذلك لتقييم الدقة المطلقة Absolute accuracy لنتائج التثليث الجوي السابق والنتائج موضحة في الجدول (6).

جدول (6). الأخطاء متوسطة التربيع على مواقع نقاط الضبط بعد اعتبارها نقاط اختبار.

النقطة	σ_x (cm)	σ_y (cm)	σ_z (cm)	σ_{xyz} (cm)
1	50.50	26.88	-33.44	66.27
2	-5.53	89.69	17.94	91.63
3	30.46	87.35	33.17	98.28
4	-41.64	99.80	35.69	113.88
5	56.82	-111.73	32.51	129.49
6	-73.81	-90.23	33.43	121.27
7	-62.33	-9.17	-31.86	70.60
8	-4.93	-27.89	-46.17	54.16
9	-46.38	-65.49	-6.69	80.53
σ_{xyz} (cm) Total	47.12	76.11	31.94	95.04

يمكن حساب قيمة الخطأ المتوسط التربيع الكلي في المستوي XY على نقاط الضبط المستخدمة كنقاط اختبار من خلال العلاقة التالية:

$$\sigma_{XY}Total = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} = 89.5119 \text{ (cm)} \quad (1)$$

نلاحظ أن قيمة هذا الخطأ قد تجاوزت قيمة الخطأ المسموح والذي يوضح أن قيمة هذا الخطأ يجب ألا تتجاوز القيمة: $GSD \rightarrow 4$ حيث GSD هي قيمة مسافة الاعتيان الأرضية [11]. فتطبيق هذه العلاقة يعطي:

$$\sigma_{XY}Total \leq 4 \rightarrow 6 \times 3.07 = 12.82 (cm) \rightarrow 18.42 (cm) \quad (2)$$

وهذا يظهر أن تحديد مواقع الصور باستخدام الدرونات المزودة بتقنية RTK، والتي لا تطبق تصحيحات لاحقة لإشارات الأقمار الصناعية التي تأثرت بوجود العوائق والظروف الجوية، لا تؤمن دقة كافية لإنجاز أعمال تخريط دقيقة. فمقام المقياس الرسومي المتوقع (المسموح) K لحالة مسافة الاعتيان يعطي بالعلاقة [12]:

$$RMS_E \leq 0.25 * K/1000 \quad (3)$$

وبالتطبيق نجد أن K=730، في حين أن القيمة الحقيقية للخطأ متوسط التربيع الكلي $\sigma_{XY}Total$ التي حصلنا عليها ستؤمن قياس رسومي وفق العلاقة السابقة مساو تقريباً لـ 1/3580 وهذا يعتبر ضياعاً في الدقة الهندسية للمنتجات الكارتوغرافية من هذه الصور.

قمنا بعد ذلك باستخدام إحداثيات مواقع الصور مع إدخال إحداثيات نقاط الضبط واعتبارها نقاط ضبط في عملية الحساب وليس كنقاط اختبار فحصلنا على النتائج التالية (الجدول (7)):

جدول (7). الأخطاء متوسطة التربيع على مواقع الصور المقاسة بتقنية RTK بعد ادخال نقاط الضبط في حساب التثليث.

σ_x (cm)	σ_y (cm)	σ_z (cm)	σ_{xyz} (cm)
9.89	15.32	25.18	31.09

بالمقارنة مع النتائج الموجودة في الجدول (5) نجد أن الدقة النسبية تحسنت، ولكن هذا المعيار لا يكفي للحكم على دقة نتائج التثليث بل يجب استخدام مفهوم الدقة المطلقة وذلك من خلال دراسة الأخطاء على نقاط الضبط الداخلة في حساب التثليث. نجد في الجدول (8) قيم هذه الأخطاء:

جدول (6). الأخطاء متوسطة التربيع على مواقع نقاط الضبط بعد إدخالها في حساب التثليث.

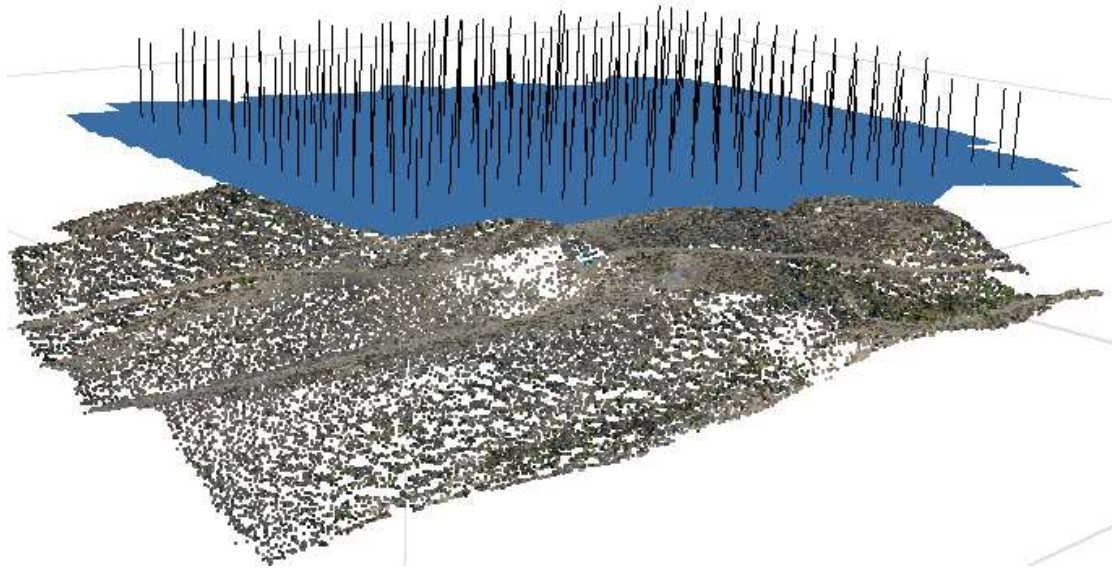
النقطة	σ_x (cm)	σ_y (cm)	σ_z (cm)	σ_{xyz} (cm)
1	-6.25	10.01	-13.55	1.32
2	3.11	-12.24	11.26	0.92
3	-8.25	6.21	9.29	1.92
4	9.27	12.41	10.24	1.95
5	7.21	-12.25	10.20	1.33
6	-9.24	10.32	115.50	1.49
7	10.23	9.16	-11.09	2.48
8	-10.24	-8.92	10.88	2.24
9	12.37	-8.53	11.07	1.93
	8.84	10.19	39.88	42.10
	$\sigma_{xyz}Total$ (cm)			

نلاحظ من الجدول السابق أن النتائج قد تحسنت كثيراً من 95.04 إلى 42.10 بعد إدخال نقاط الضبط في حساب التثليث الجوي لصور الدرون المرفق بتقنية RTK والتي لا تطبق تصحيحات لاحقة لإشارات الأقمار الصناعية التي تأثرت بوجود العوائق والظروف الجوية. فبتطبيق العلاقة (1) نجد أن قيمة الخطأ المتوسط التربيع الكلي في المستوي XY على نقاط الضبط الداخلة في حساب التثليث الجوي تساوي: 13.49 cm وهي قيمة مقبولة حسب العلاقة (2)

وهي تؤمن دقة كافية لإنجاز أعمال تخريط دقيقة. فمقام المقياس الرسومي المتوقع K لحالة مسافة الاعتيان المعطاة سيساوي تقريباً 540 بحسب العلاقة (3).

2- التلث الجوي لصور الدرون المزود بتقنية PPK

تم أولاً حساب التلث الجوي لبلوك صور المثال الثاني باستخدام إحداثيات مواقع الصور دون أية نقطة ضبط باستخدام البرنامج Agisoft Metashpe. يوضح الشكل (8) مواقع الصور الناتجة عن عملية الحساب كما يوضح الجدول (7) قيم الأخطاء متوسطة التربيع في الاتجاهات X, Y, Z وكذلك قيمة الخطأ المتوسط التربيع الكلي على هذه المواقع (لا بد من الإشارة إلى أن إحداثيات مواقع الصور ونقاط الضبط قد تم تحويلها من النظام الجغرافي WGS84 إلى النظام المتعامد UTM Zone 30N باستخدام البرنامج Agisoft Metashpe).



الشكل (8). مواقع الصور الناتجة عن التلث الجوي لبلوك المثال الثاني.

جدول (7). الأخطاء متوسطة التربيع على مواقع الصور المقاسة بتقنية PPK.

σ_x (cm)	σ_y (cm)	σ_z (cm)	σ_{xyz} (cm)
21.80	13.99	27.97	38.12

لمتابعة تقييم لنتائج التلث قمنا بقياس نقاط الضبط على كل الصور الممكنة وإعادة حساب إحداثياتها من قبل البرنامج على أنها نقاط اختبار وذلك لتقييم الدقة المطلقة (كما في حالة المثال الأول) لنتائج التلث الجوي السابق والنتائج موضحة في الجدول (8).

جدول (8). الأخطاء متوسطة التربيع على مواقع نقاط الضبط بعد اعتبارها نقاط اختبار.

النقطة	σ_x (cm)	σ_y (cm)	σ_z (cm)	σ_{xyz} (cm)
Point1	-1.34	-0.40	-3.21	3.50
Point2	2.57	-6.31	-1.65	7.01
Point3	5.18	-3.95	-0.05	6.51
Point4	4.77	-1.93	0.36	5.16
Point5	4.84	2.11	5.55	7.66
Point6	1.55	4.85	3.32	6.08

6.52	5.00	4.14	-0.57	Point7
8.84	-1.29	8.27	-2.85	Point8
7.14	-1.50	1.64	-6.79	Point9
5.85	0.28	-3.20	-4.89	Point10
3.31	-1.07	-2.99	-0.94	Point11
6.35	3.81	5.95	3.85	$\sigma_{xyz} Total (cm)$

يمكن حساب قيمة الخطأ المتوسط التربيع الكلي في المستوي XY على نقاط الضبط المستخدمة كنقاط اختبار من خلال العلاقة (1):

$$\sigma_{XY} Total = \sqrt{\sigma_X^2 + \sigma_Y^2} = 7.8048 (cm)$$

نلاحظ أن قيمة هذا الخطأ لم تتجاوز قيمة الخطأ المسموح والذي يوضح أن قيمة هذا الخطأ يجب ألا تتجاوز القيمة:

4 GSD → 6 GSD حيث GSD هي قيمة مسافة الاعتيان الأرضية. فتطبيق العلاقة (2) يعطي:

$$\sigma_{XY} Total \leq 4 \rightarrow 6 \times 1.92 = 7.68 (cm) \rightarrow 11.52 (cm)$$

وهذا يظهر أن تحديد مواقع الصور باستخدام الدرونات المزودة بتقنية PPK، والتي تطبق تصحيحات لاحقة لإشارات الأقمار الصناعية التي تأثرت بوجود العوائق والظروف الجوية، تؤمن دقة كافية لإنجاز أعمال تخريط دقيقة. فمقام المقياس الرسومي المتوقع (المسموح) K لحالة مسافة الاعتيان يعطي بالعلاقة (3):

$$RMS_E \leq 0.25 * K/1000$$

وبالتطبيق نجد أن K=460، في حين أن القيمة الحقيقية للخطأ متوسط التربيع الكلي $\sigma_{XY} Total$ التي حصلنا عليها ستؤمن مقياس رسومياً وفق العلاقة السابقة مساو تقريباً لـ 1/285 وهو أفضل من المسموح.

قمنا بعد ذلك باستخدام إحداثيات مواقع الصور مع إدخال إحداثيات نقاط الضبط واعتبارها نقاط ضبط في عملية الحساب وليس كنقاط اختبار فحصلنا على النتائج التالية (الجدول (9)):

جدول (9). الأخطاء متوسطة التربيع على مواقع الصور المقاسة بتقنية PPK بعد ادخال نقاط الضبط في حساب التثليث.

$\sigma_x (cm)$	$\sigma_y (cm)$	$\sigma_z (cm)$	$\sigma_{xyz} (cm)$
19.63	14.24	30.01	38.59

بالمقارنة مع النتائج الموجودة في الجدول (5) نجد أن الدقة النسبية لم تتغير كثيراً وهو أمر متوقع. وبما أن هذا المعيار لا يكفي للحكم على دقة نتائج التثليث فقد قمنا باستخدام مفهوم الدقة المطلقة وذلك من خلال دراسة الأخطاء على نقاط الضبط الداخلة في حساب التثليث. نجد في الجدول (10) قيم هذه الأخطاء:

جدول (10). الأخطاء متوسطة التربيع على مواقع نقاط الضبط بعد إدخالها في حساب التثليث.

$\sigma_{xyz} (cm)$	$\sigma_z (cm)$	$\sigma_y (cm)$	$\sigma_x (cm)$	النقطة
3.93	-3.70	-0.37	-1.29	Point1
6.99	-1.52	-6.33	2.56	Point2
6.51	0.00	-4.01	5.12	Point3
5.33	0.23	-1.00	5.23	Point4
7.40	5.24	2.13	4.78	Point5

6.04	3.26	4.82	1.63	Point6
6.58	5.00	4.24	-0.60	Point7
8.66	-1.24	8.19	-2.54	Point8
6.27	-2.12	3.13	-5.00	Point9
5.87	0.30	-3.26	-4.87	Point10
3.40	-1.24	-3.00	-1.00	Point11
6.25	3.81	6.02	3.62	σ_{xyz} Total (cm)

نلاحظ من الجدول السابق أن النتائج لم تتغير كثيراً بعد إدخال نقاط الضبط في حساب التثليث الجوي لصور الدرون المرفق بتقنية PPK والتي تطبق تصحيحات لاحقة لإشارات الأقمار الصناعية التي تأثرت بوجود العوائق والظروف الجوية. فبتطبيق العلاقة (1) نجد أن قيمة الخطأ المتوسط التربيع الكلي في المستوي XY على نقاط الضبط الداخلة في حساب التثليث الجوي تساوي: 7.02 cm وهي قيمة مقبولة حسب العلاقة (2) وهي تؤمن دقة كافية لإنجاز أعمال تخريط دقيقة. فمقام المقياس الرسومي المتوقع K لحالة مسافة الاعتیان المعطاة سيساوي تقريباً 281 بحسب العلاقة (3). إن النتائج السابقة تؤكد عدم وجود ضرورة لاستخدام نقاط ضبط في حالة التعامل مع صور الدرون المرفقة بتقنية PPK ويمكن استخدام عدد أدنى منها فقط في عملية التحقق.

الاستنتاجات والتوصيات

بالاستناد إلى الدراسة النظرية والعملية المبيّنة أعلاه، نستنتج ما يلي:

1. تلعب طبيعة البيانات المرجعية دوراً مهماً في تحديد دقة المنتجات الكارثوغرافية القائمة على استخدام صور الدرونات.
 2. عند الاختيار بين طريقة RTK أو PPK، فإننا نحتاج إلى الاختيار بين الإنتاجية ودقة الصور الناتجة، حيث يمكن أن يكون سير عمل طريقة RTK سريعاً جداً للحصول على صور دقيقة ولكنه يعتمد على توافر اتصال في الوقت الفعلي لإنتاج خرائط دقيقة.
 3. إن استخدام نقاط الضبط الأرضية ضروري في حساب التثليث الجوي حال استخدام الدرون المزود بتقنية المعالجة الحركية في الوقت الحقيقي RTK، والتي لا تطبق تصحيحات لاحقة لإشارات الأقمار الصناعية التي تأثرت بوجود العوائق والظروف الجوية، لتحديد مواقع الصور الملتقطة. لقد أثبتت الدراسة العملية أنه يمكن تحسين الدقة المطلقة للتثليث وللمقاييس الرسومية للمنتجات الكارثوغرافية القائمة على صور هذه الدرونات بشكل كبير (تحسنت الدقة المطلقة على نقاط الضبط من 95.03 cm إلى 42.09 cm في مثالنا).
 4. إن استخدام نقاط الضبط الأرضية غير ضروري في حساب التثليث الجوي حال استخدام الدرون المزود بتقنية المعالجة الحركية مع معالجة لاحقة للأرصاء PPK، والتي تطبق تصحيحات لاحقة لإشارات الأقمار الصناعية التي تأثرت بوجود العوائق والظروف الجوية، لتحديد مواقع الصور الملتقطة. لقد أثبتت الدراسة العملية أنه الدقة المطلقة للتثليث وللمقاييس الرسومية للمنتجات الكارثوغرافية القائمة على صور هذه الدرونات لا تتأثر كثيراً عند استخدام هذه النقاط (تغيرت الدقة المطلقة على نقاط الضبط من 6.35cm إلى 6.25 cm في مثالنا وهو تغير غير محسوس).
- في النهاية نوصي باستخدام الدرونات كبديل واقعي قليل التكلفة لطرائق المسح التقليدية في الحصول على منتجات كارثوغرافية ذات مقاييس كبيرة وذلك بعد أخذ طبيعة التقنية المتبعة في تحديد مواقع الصور بعين الاعتبار. ولضمان

الوصول إلى الدقة المطلوبة نوصي باستخدام الدورانات **المزودة** بتقنية PPK دون نقاط ضبط في الأعمال التي تتطلب دقة عالية، أو باستخدام نقاط ضبط أرضية في حال استخدام الدورانات **المزودة** بتقنية RTK.

References:

- [1] VERHOEVEN, G.- *Taking computer vision aloft—archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with photoscan*. Archaeological prospection, vol. 18, 2011, pp. 67-73.
- [2] HONKAVAARA, E.-*Hyper spectral reflectance signatures and point clouds for precision agriculture by light weight UAV imaging system*. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, vol. 7, 2012, pp.353-358.
- [3] TSCHARF, A., RUMPLER, M., FRAUNDORFER, F., MAYER, G., BISCHOF, H. - *On The Use of UAVs In Mining And Archeology-geo-accurate 3D Reconstructions Using Various Platforms and Terrestrial Views*. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2W1, 2015, pp. 15-22.
- [4] EISENBEISS, H.-*The potential of unmanned aerial vehicles for mapping*. Photogrammetric Week'11, 2011, pp. 135-145.
- [5] EISENBEIß, H. *UAV photogrammetry*. ETH Zurich, 2009, 378p.
- [6] NAKANO, K., SUZUKI, H., TAMINO, T., CHIKATSU, H.- *On Fundamental Evaluation Using UAV Imagery and 3d Modeling Software*. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, vol. 41, 2016, pp 93-97.
- [7] WOLF, P.R., DEWITT, B.A.-*Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. 4rd Edition, 2016, 756p.
- [8] SHAHBAZI, M., SOHN, G., THÉAU, J., MENARD, P.- ***Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. Sensors***, vol. 15, 2015, pp.27493-27524.
- [9] HE, F., HABIB, A.- *Target-based and feature-based calibration of low-cost digital cameras with large field-of-view*. Proceedings of the ASPRS Annual Conference, 2015 pp 4-8.
- [10] AGISOFT METASHAPE. -*Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition*. 2018, 180p.
- [11] AL KHALIL, O.-*Proposition of a Methodology to Assess Photo-triangulation and Dens Matching Algorithms Accuracy in Image-based 3D Documentation Systems*. Tishreen University Journal Engineering Sciences Series Vol 41, 2019, No 5, pp 180-194.
- [12] AMERICAN SOCIETY FOR PHOTOGRAMMETRY AND REMOTE SENSING. -*ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. ASPRS: Bethesda, MD, USA, Volume 81, 2014, pp. A1–A26.