استخدام لقطات فيديو فائق الدقة لطائرة دون طيار في النمذجة ثلاثية الأبعاد للمباني

د.م. وسيم توفيق موسى*

الملخص

مع التطور التقني الحاصل في علوم المساحة التصويرية وأنظمة الاستشعار، ازدهر استخدام الطائرات دون طيار (UAVs) كمنصة للحصول على البيانات اليومية في العديد من التطبيقات مثل النمذجة ثلاثية الأبعاد. وذلك يعود لقدرة هذه المنصات على توفير بيانات صور وفيديو منخفضة التكلفة وسريعة ومحددة للمواقع المستهدفة. كما تسمح بتوليد غمامات نقطية ثلاثية الأبعاد ذات جودة ودقة متجانسة تقريباً، والتي بدورها توفر نظام بيانات مكاني متكامل عن موقع الدراسة.

تصف هذه المقالة منهجية للنمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على صور مقتطعة من تسجيلات فيديو فائق الدقة (UHD) من طائرة دون طيار بهدف استكشاف إمكانيات آلات تصوير الفيديو منخفضة التكاليف في حل مسألة النمذجة. تمّ اختبار المنهجية المقترحة باستخدام أحدث برامج المساحة التصويرية على حالة دراسية حقيقية مع توفر معلومات تحكم أرضية. كما أجري عرض وتقييم للنتائج لإثبات فعالية الطريقة المقدمة، إذ تمّ إنتاج نموذج ثلاثي الأبعاد بسوية دقة من مرتبة السنتيمتر.

الكلمات المفتاحية: النمذجة ثلاثية الأبعاد، طائرة دون طيار، لقطات فيديو، فائق الدقة، غمامة نقطية، تحكم أرضي.

* أستاذ مساعد – قسم الهندسة الطبوغرافية – كلية الهندسة المدنية – جامعة حمص – حمص – سورية.

Using UAV Ultra–High–Definition Video Footage in 3D Modeling of Buildings

Dr.Eng. Wassim Moussa*

Abstract

With the technical development in photogrammetry sciences and sensing systems, the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) has flourished as a platform for daily data acquisition in many applications such as three-dimensional (3D) modeling. This is due to the ability of these platforms to provide low-cost, fast, and location-aware photo and video data for targeted sites. They also allow the generation of 3D point clouds of almost homogeneous quality and accuracy, which in turn provides an integrated spatial data system for the study site.

This paper describes a methodology for 3D modeling based on images extracted from UAV ultra-high-definition (UHD) video records to explore the potentials of low-cost video cameras in solving the modeling problem. The proposed methodology has been tested using the latest photogrammetric software on a real case study with the availability of ground control information. The results were also presented and evaluated to prove the effectiveness of the presented method, as a 3D model was produced with centimeter-level accuracy.

Key Words: 3D Modelling, UAV, Video Footage, UHD, Point Cloud, Ground Control.

* Associate Professor, Department of Topographical Engineering, Faculty of Civil Engineering, Homs University, Homs, Syria.

1 مقدمة

نتيجةً للتطورات الأخيرة في علوم المساحة التصويرية والرؤية الحاسوبية وخاصة عمليات التحليل الآلي للصور الرقمية، أصبحت النمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على الصور أحد أهم طرق استحواذ وإعادة إنشاء نقاط السطوح الهندسية [1]. وتتلخص الفكرة الرئيسة لهذه الطريقة في استخلاص قياسات موثوقة ونماذج هندسية ثلاثية الأبعاد عن طريق الصور الرقمية. إذ إنّها تستخدم القياسات ثنائية الأبعاد (2D) من الصّور، مفردة أو متعددة، لاستعادة معلومات سطح العنصر ثلاثي الأبعاد من خلال نموذج رياضي.

في بيئة الرؤية الحاسوبية، تمّ تقديم الطرق الآلية لإعادة الإنشاء ثلاثي الأبعاد القائمة على خوارزمية البنية انطلاقاً من الحركة (SFM). إذ تشير هذه الخوارزمية إلى حساب متزامن لتوجيه الكاميرات والغمامات النقطية ثلاثية الأبعاد المتفرقة بالاعتماد على نقاط ربط بين الصور. مع إمكانية أن تشارك الكاميرات المعايرة أو غير المعايرة في عملية إعادة الإنشاء. وذلك لأنّ الحل الحسابي لنموذج الكاميرا يمكن أن ينجز في عملية (SFM) باستخدام قياسات العنصر الفعلية. تتطلّب هذه الطرق عادة فترات زمنية قصيرة جداً بين الصّور المتتالية لضمان الإضاءة المستمرة والمقياس بين الصور المتتالية. ولكن مع بلوغ مستوى الأتمتة تطوراً كبيراً بالتزامن مع القدرة على توجيه أعداد ضخمة من الصور، استخدمت هذه الطرق لأغراض التسجيل والنمذجة ثلاثية الأبعاد الدقيقة [2].

من حيث المبدأ، يكفي ما لا يقل عن صورتين لإعادة إنشاء مشهد وبالتالي الحصول على المعلومات ثلاثية الأبعاد. ولكن تتطلب عملية الحصول على إحداثيات دقيقة للنقاط المقاسة في الصور توافر تصميم مناسب للشبكة الفوتوغرامترية. وهذا يتطلب تحقيق مجموعة من القواعد (مثل آلية استحواذ

الصور، خطوط الأساس وما إلى ذلك) بحيث يتم تأمين التغطية الكاملة للهدف وبشكل وافٍ القياسات الفائضة لإعادة إنشاء سطح بدقة وموثوقية عاليين [3]. ولذا تستخدم اللقطات المقتطعة من تسجيلات الفيديو كمدخل أساسي في عملية النمذجة كونها لا تستهلك وقتاً طويلاً ويسهل إنجازها من قبل غير المختصين [4]. وتعرف هذه التقنية باسم الفيديوغرامتري (Videogrammetry)، كتقنية فرعية عن المساحة التصويرية.

تعدّ المساحة التصويرية باستخدام الطائرة دون طيار(UAV Photogrammetry) من أهم المصادر الرئيسية لتوفير المعلومات الجيومكانية ثلاثية الأبعاد. إذ تسمح بتزويد الطبوغرافيين بحلول غير معقدة، ومنخفضة التكاليف وسهلة الاستخدام مقارنة بالمنصات التقليدية [5,6]. كما تسمح منصات (UAVs) بمرونة هائلة للمستخدمين من حيث توافر المستشعرات، الوقت وتخطيط الطيران. فضلاً عن أنّ توافر هذه المنصات مع برمجيات المعالجة بأسعار معقولة يجعل من الممكن إعادة إنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد مرجعة جغرافياً للمواقع بزمن وتكلفة أقل بكثير مقارنةً باستخدام الطرائق التقليدية [7,8].

حالياً، معظم (UAVs) من الفئة الاستهلاكية هي مجهزة بكاميرا قادرة على التقاط مقاطع فيديو عالية الدقة (2K) (2048x1080 pixels). إذ تتيح دقة الصورة فيها إمكانية إنشاء نماذج ثلاثية الأبعاد ذات جودة محدودة أكثر ملاءمة للواقع الافتراضي أو السياحة الافتراضية. ولكن لا تزال غير كافية لتطبيقات التوثيق ثلاثي الأبعاد [9]. لذا تحاول هذه المقالة أن تحلل جدوى استخدام صور مقتطعة من تسجيلات فيديو فائق الدقة (4K) (4096x2160 pixels) لكاميرا طائرة دون طيار في النمذجة ثلاثية الأبعاد للمباني. كما سيتم عرض خطوات المعالجة الفوتوغرامترية لبيانات (UAV) وتقييم دقة النموذج الناتج بالاعتماد على نقاط تحكم أرضية (GCPs).

1.1 النمذجة القائمة على الفيديو (الفيديوغرامتري)

يقصد بالنمذجة القائمة على الصور بعملية التقدير المتزامن لعناصر توجيه الكاميرات والغمامات النقطية ثلاثية الأبعاد المتفرقة من مجموعة من النقاط المترافقة للصور المتداخلة والذي يتم عادة استناداً إلى خوارزميات (SfM). باستخدام صور (UAV)، تشير معظم الأبحاث إلى أن نسبة تداخل عرضي وطولي مقداره (80%) هو كافٍ من أجل النمذجة ثلاثية الأبعاد [6,7,10]. إذ إنّ هذا التداخل العالي يفرض خطوط أساس قصيرة بين الصور وهو المطلوب لأجل عملية إعادة الإنشاء المكثفة للصور [10]. وهذا سمح بإجراء النمذجة بالاعتماد على لقطات مقتطعة من تسجيلات فيديو (الفيديوغرامتري) [11]. إذ تلتقط هذه اللقطات عند خطوط أساس قصيرة جداً بحيث يتم تتبع السمات عبر الصور بشكل

آلي [12]. وعادة ما يتم اقتطاع هذه اللقطات عند فاصل زمني ثابت أو باستخدام طرق ترشيح متقدمة للصور. ويتم معالجة هذه اللقطات المتعددة (كصور رقمية) بهدف استعادة المعلومات ثلاثية الأبعاد للمشهد المدروس. كما أنها توفر كل المعلومات الهندسية والراديومترية اللازمة للنمذجة الصورية ثلاثية الأبعاد كما هو الحال في المساحة التصويرية [13].

على الرغم من عدم تفضيل الصور ذات الدقة المحدودة والملتقطة عند خطوط أساس قصيرة جداً في أعمال النمذجة، كونها تؤمن نسبة قاعدة إلى عمق صغيرة، يزداد حالياً استخدام لقطات الفيديو فائق الدقة (UHD) على نحو واسع. وذلك كونها تحقق عدة خصائص والتي تشمل الدقة العالية، وسهولة الالتقاط والتسجيل، وتوفير معلومات غنية وجهد أقل في التخطيط [12]. إذ أظهر استخدام لقطات فيديو بدقة (2K) نتائج مقاربة للنمذجة ثلاثية الأبعاد القائمة على صور كاميرا انعكاسية، وخاصة عند اختيار اللقطات بناءً على هندسية المشهد المدروس [13]. وحديثاً في [12]، تم استخدام لقطات فيديو من طائرة دون طيار بدقة (6K,8K) في إعادة إنشاء نماذج عالية الدقة للمباني. إذ ازدادت كثافة النقاط الناتجة ودقة إعادة الإنشاء بنسبة تصل إلى (90%) مقارنةً بمقاطع الفيديو عالية الدقة (HD) المأخوذة من نفس الطائرة دون طيار.

استخدمت سابقاً تقنية الفيديوغرامتري من أجل التطبيقات الصناعية مثل التقاط الحركة، وتحليل اختبارات الانهيار وراسم الخرائط المتنقل وغير ذلك [13]. وحالياً يشهد استخدام تسجيلات الفيديو لأغراض إعادة الإنشاء ثلاثي الأبعاد للمعالم انتعاشاً بعد التجارب الأولية التي أجريت مبكراً [14,15]. وذلك بفعل الزيادة الحاصلة في الجودة الراديومترية والهندسية للقطات الفيديو وتطبيق طرق تحديد الموضع ورسم الخرائط المتزامن (SLAM) البصرية في معالجة تسجيلات الفيديو [13]. إذ تصمم الطرق الأخيرة على العمل في الزمن الحقيقي على مقاطع الفيديو. أي أنها تتوقع خطوط أساس قصيرة جداً وتوفر عناصر توجيه الكاميرات والنقاط المتفرقة ثلاثية الأبعاد بمجرد معالجة لقطات الفيديو. بالمقابل، تتطلب خوارزميات توجيه الصور التقليدية و(SfM) شبكة صور مناسبة مع خطوط أساس جيدة. وهذا بدوره يسمح بإنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد أكثر دقة ولكن أكثر تكلفة. لذا يجب اختيار بعض اللقطات الرئيسية من تسجيلات الفيديو بعناية قبل تنفيذ عملية إعادة الإنشاء ثلاثي الأبعاد [13].

يوجد العديد من الابحاث التي درست جدوى استخدام لقطات فيديو من طائرة دون طيار في تطبيقات النمذجة ثلاثية الأبعاد. في [16]، تم تقديم منهجية لإعادة إنشاء التضاريس الحضرية من مقاطع فيديو عالية الدقة (1280X720 pixels HD) شبه شاقولية لطائرة دون طيار صغيرة لأغراض الواقع

الافتراضي. كما تم تقديم منهجية لتوثيق المباني الأثرية استناداً إلى لقطات فيديو كاملة الدقة (Full HD 1920X1080 pixels) لطائرة دون طيار وبيانات مسح ليزري أرضي في [17]. وقدم في [18] حل لتعديل لقطات فيديو (Full HD) من طائرة دون طيار منخفضة التكلفة عن طريق إضافة بيانات التنسيق الوصفية (EXIF) (ملف الصورة القابل للتبادل) إلى الصور. ثم تم دمجها مع نظام (SFM) مفتوح المصدر لإعادة إنشاء نموذج متماسك ثلاثي الأبعاد.

2 أهمية البحث وأهدافه

تكمن أهمية هذا البحث في أنه يقترح منهجية لاستخدام تسجيلات الفيديو فائق الدقة من طائرة دون طيار كمصدر منخفض التكلفة لبيانات النمذجة ثلاثية الأبعاد. كما يحاول تسليط الضوء على قدرات آلات تصوير الفيديو المحمولة على منصات الطائرات دون طيار في تطبيقات نمذجة المباني. فضلاً عن توفير بيانات ذات دقة مكانية فائقة بتكلفة منخفضة مقارنةً بتقنيات المسح التقليدية. وبشكل عام يمكن تلخيص أهداف البحث في النقاط التالية:

- اقتراح طريقة لاستحواذ تسجيلات الفيديو من طائرة دون طيار ومن ثم اقتطاع اللقطات المناسبة منها بنسبة تداخل عالية لأجل إنشاء النموذج ثلاثي الأبعاد.
- توضيح مراحل معالجة الصور الملتقطة من تسجيلات فيديو الطائرات دون طيار وذلك من خلال تطبيق عملي يوضح إمكانيات ومخرجات هذه الأنظمة الآلية.
- جذب انتباه غير المختصين في مجال المساحة التصويرية إلى إمكانية الاستفادة من لقطات الفيديو للطائرات دون طيار، بشكل عام وبشكل خاص طائرات الهواة، وذلك كمدخلات للنمذجة ثلاثية الأبعاد.
- تقييم دقة نتائج النمذجة وذلك عبر مقارنتها بقياسات تحكم أرضية.

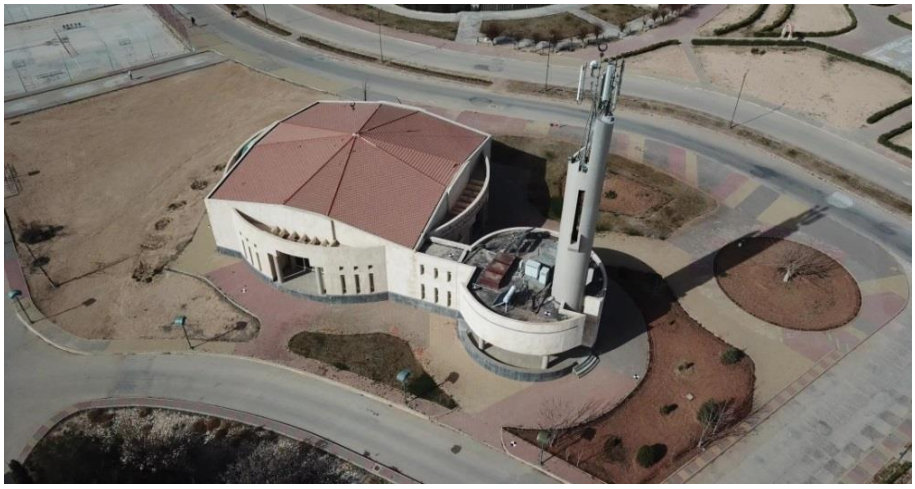
3 مواد وطرائق البحث

3.1 استحواذ البيانات

3.1.1 العنصر المدروس

تم اختيار حالة دراسية ضمن حرم جامعة القلمون الخاصة في مدينة دير عطية وهي مبنى مسجد الجامعة (الشكل 1). يتميز المبنى بتصميمه الحديث ضمن بيئة جامعية متكاملة تشمل مرافق سكنية

وتعليمية. إذ تم إنشاؤه دون قبة تقليدية وبمأذنة واحدة بتصميم هندسي محدد وتتراوح أبعاده تقريباً (50*32) متراً مربعاً وارتفاع المأذنة بحوالي (25) متر.



الشكل(1). لقطة جوية لمسجد جامعة القلمون الخاصة وحرمه.

3.1.2 الأجهزة المستخدمة:

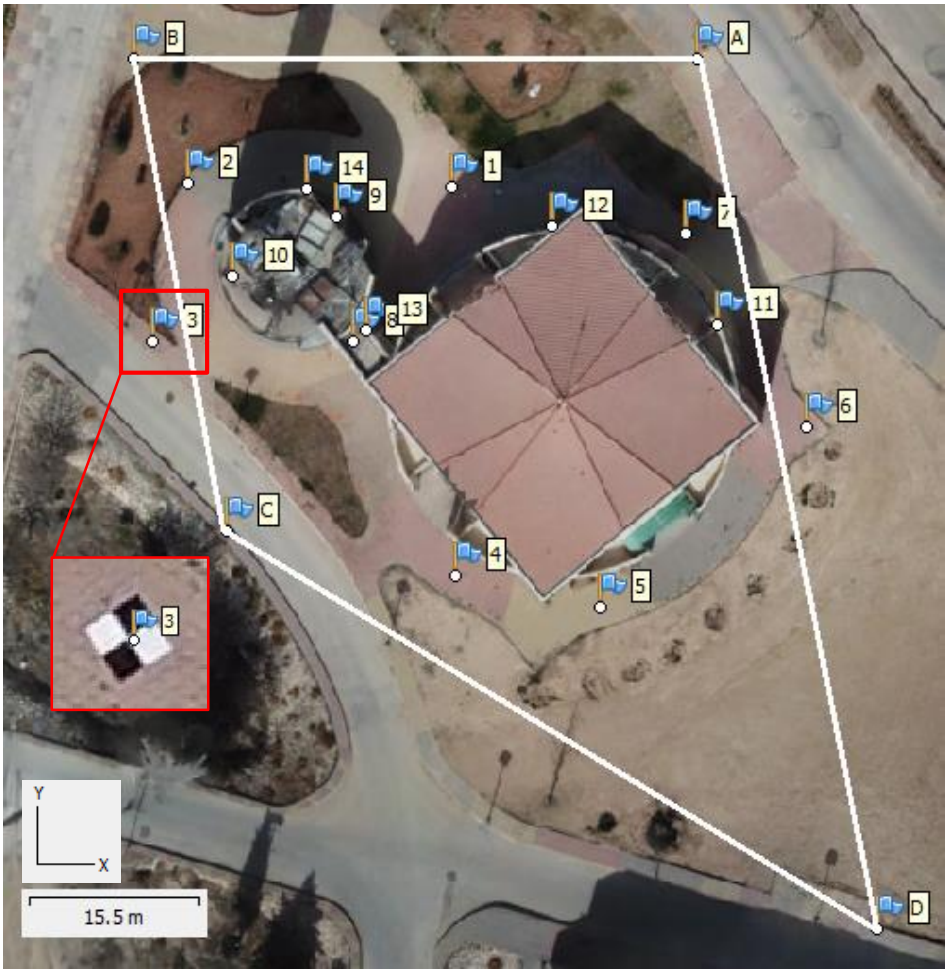
لإنشاء معطيات الضبط الخارجي، أجريت القياسات المساحية التقليدية باستخدام جهاز المحطة المتكاملة (Nikon FX)، (الشكل 2)، عند دقة قياس للزوايا قدرها ($5''$) ودقة قياس للمسافات قدرها ($\pm 2mm \pm 2PPM$). كما تم استخدام طائرة دون طيار من فئة الهواة والاستخدام التجاري الخفيف رباعية المراوح (Quadcopter) من نوع (Mavic Pro) لالتقاط تسجيلات الفيديو (الشكل 2). وهي مزودة بكاميرا رقمية بدقة تمييز (12MP)، بعد محرقي (4.98mm)، ودقة تسجيل فيديو (4K) بمعدل التقاط قدره (24 Frame/sec) وبأبعاد للفيديو (4096*2160pix).



الشكل (2). جهاز المحطة المتكاملة (Nikon FX) (يمين) والطائرة دون طيار (Mavic Pro) (يسار).

3.1.3 نقاط التحكم الأرضية (GCPs)

بهدف الحصول على معطيات الضبط الخارجي والتحضير للتصوير، تم تأسيس شبكة محلية تبدأ بزرع مضلع مساحي مغلق وحساب إحداثيات ومناسيب ذراه ومن ثم استخدام المضلع كأساس لاختيار وتثبيت شبكة مؤلفة من (15) نقطة مرجعية أرضية (على واجهات المبنى وسطحه وفي محيطه)، إذ تم زرع النقاط بحيث تراعي ما أمكن التوصيات المرعية من حيث التباعد والتجانس في التوزيع والتموضع، (الشكل 3). وتم اختيار وتصميم أهداف أو درايا رقعة الشطرنج (Black and White Target–45cmx45cm)، مع الأخذ بعين الاعتبار ناحيتي الشكل والأبعاد للدريئة بحيث تكون واضحة على الصور وبالتالي يمكن التعرف عليها وقياسها بدقة [19]. تتبع عملياً أبعاد الدريئة لدقة تمييز آلة التصوير المستخدمة (مسافة الاعتيان الأرضية GSD)، وبحسب الأدبيات العالمية ينبغي أن لا تقل أبعاد الهدف المقاس على الصور عن (5–10) مرات من قيمة (GSD) (مثلا Pix4D Documentation).



الشكل (3). شبكة مراصد المضلع المغلق ونقاط الضبط (ممثلة على صورة الموزاييك المصححة عامودياً).

3.1.4 تسجيلات فيديو الطائرة دون طيار

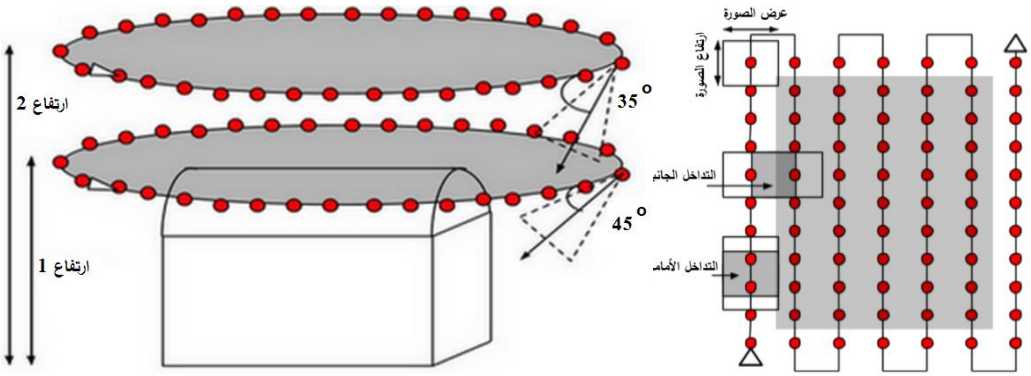
بهدف تغطية المبنى المستهدف وإنجاح عملية النمذجة ثلاثية الأبعاد، تم وضع خطة استحواذ لتسجيلات الفيديو مؤلفة من أربع جولات طيران باستخدام الطائرة دون طيار (جدول 1).

الجدول (1). بيانات جولات الطيران مع عدد اللقطات المقتطعة من تسجيلات الفيديو.

مدة الجولة (s)	ارتفاع الطيران الوسطي (m)	سرعة الطيران (km/h)	زاوية ميل الكاميرا (°)	عدد اللقطات
1:01	53	36	–	98
2:20	10	36	45	68
1:34	20	36	35	225
1:06	50	36	30	158

تمثل الجولة الأولى حالة تصوير عامة (الحالة الناظمية) بهدف إكمال تغطية السقوف وسهولة تحديد وقياس (GCPs) على الصور (الشكل 4 يمين). إذ تسمح باقتطاع صور بتداخل أمامي لا يقل عن 75% (بالنسبة لاتجاه الطيران) وتداخل جانبي لا يقل عن 60% (بين مسارات الطيران) [6,7,20]. كما تمّ التصوير فيها بنمط شبكي منتظم بحيث يتم تثبيت الكاميرا قدر الإمكان على ارتفاع ثابت فوق المنطقة المستهدفة لضمان الحصول على (GSD) المطلوبة (حوالي 2cm/pix).

أما الجولات الثلاث الباقية فتهدف لإنجاز عملية إعادة الإنشاء ثلاثي الأبعاد للمبنى بحيث يتم التصوير بمسار على شكل خاتم يحيط بالمبنى في كل جولة طيران. ويتم الطيران على ارتفاعات متزايدة بحيث يتم تجنب ما أمكن التغير الكبير في الدقة المكانية [20]. كما تم تقليل زاوية الكاميرا (5– 10 درجات بحسب حجم المبنى ومسافة التصوير) في كل مرة لضمان التغطية والتداخل اللازمين لعمليات توجيه الصور وإعادة الإنشاء الهندسي (الشكل 4 يسار) [20].



الشكل (4). خطة التصوير باستخدام الطائرة دون طيار [20].

3.2 البرامج المستخدمة

تمّ في هذا البحث استخدام البرامج التالية:

- **البرنامج (Free Video to JPG Converter)**: هو برنامج مجاني لتحويل تسجيل فيديو إلى صور بتنسيق (JPG). إذ يسمح باستخراج لقطات من تسجيلات الفيديو إلى صور بنقرة زر واحدة عن طريق التحكم بمعدل وزمن الالتقاط. بناء على التجربة، تمّ في هذا البحث التقاط لقطة واحدة كل ثانية واحدة (الشكل 5) بهدف تأمين تداخل أمامي وجانبي لا يقل عن 80%، وذلك بما يتوافق مع متطلبات النمذجة ثلاثية الأبعاد. فضلاً عن إجراء تقاطع وفلترة للصور المقتطعة من الجولات الثلاث واستبعاد للصور الفائضة.
- **البرنامج (Agisoft Metashape)**: هو من أشهر برامج المساحة التصويرية التجارية. إذ تمّ استخدامه بشكل أساسي من أجل توجيه الصور واستخلاص النقاط منها بشكل أولي على شكل غمامة نقطية منفصلة ثم تكثيفها وتحويلها إلى نموذج سطوحي. والذي يتم إسقاط الصور عليه للحصول على النموذج الصوري الحقيقي. يستخدم هذا البرنامج أحدث تقنيات إعادة الإنشاء الآلية ثلاثية الأبعاد من الصور المتعددة ويعمل في حالتي الشروط المضبوطة (كما هي الحال في هذا البحث إذ تتوفر معطيات تحكم) وغير المضبوطة [21].

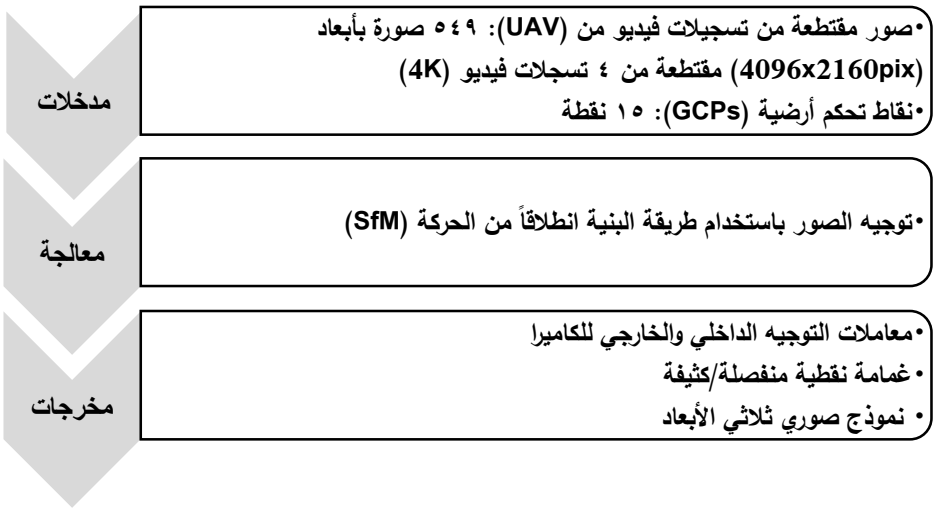
- **البرنامج (SPSS):** هو برنامج إحصائي قوي يستخدم على نطاق واسع في الأوساط الأكاديمية والبحثية. يُمكن من إدارة البيانات، وإجراء التحليلات الإحصائية المتقدمة وعرض البيانات بصرياً. ويوفر واجهات سهلة الاستخدام لإدخال البيانات ومعالجتها وتفسيرها بفضل خوارزميات التعلم الآلي المدمجة وآليات تحليل النصوص، كما يدعم احتياجات تحليلية متنوعة [22].



الشكل(5). أمثلة عن لقطات مقتطعة (4096x2160pix) من أربع تسجيلات فيديو للطائرة دون طيار معتمدة في النمذجة.

3.3 منهجية النمذجة

يمكن تلخيص خطوات المعالجة الفوتوغرامترية للصور في برنامج (Agisoft Metashape) من خلال المخطط التدفقي الموضح في الشكل 6.



الشكل(6). المخطط التدفقي للمعالجة الفوتوغرامترية للصور في برنامج (Agisoft Metshape).

4 النتائج والمناقشة

4.1 بناء النموذج من تسجيلات الفيديو

تمّ تطبيق مراحل المعالجة الفوتوغرامترية الموضحة في المخطط التدفقي (الشكل 6) على اللقطات (الصور) المقتطعة من تسجيلات فيديو الطائرة دون طيار. إذا تم استخدام (15) نقطة تحكم أرضي موزعة بتجانس في منطقة العمل (10 نقاط ضبط control Points و 5 نقاط تحقق check Points) (الجدول 2). تمّ توجيه (549) صورة بدقة (خطأ إعادة الإسقاط) نسبية في فضاء الصورة من مرتبة واحد بكسل، وعند دقة تمييز أرضية وسطية قدرها (1.9cm/pix) وبخطأ إرجاع جغرافي قدره (1.38cm). ثمّ طبقت عملية مواءمة مكثفة للصور من أجل إنشاء النموذج الشبكي الصوري. إذ يمكن بصرياً ملاحظة سوية تفاصيل النموذج، ناتج من توليد (27150181) نقطة عند جودة عالية للمواءمة المكثفة للصور وباستخدام (5429868) وجهاً/مثلثاً للنمذجة ثلاثية الأبعاد. وهذا بدوره يؤكد إمكانية استخدام تسجيلات فيديو الطائرات دون طيار من فئة الهواة في أعمال النمذجة الصورية ثلاثية الأبعاد للمباني (الشكل 7 و 8).

الجدول (2). أسماء نقاط التحكم الأرضية (GCPs) ونقاط التحقق (CPs) والفروق بين إحداثياتها المرجعية والمعدلة بعد عملية الإرجاع الجغرافي والخطأ التربيعي المتوسط للفروق.

	P.	dX (cm)	dY (cm)	dZ (cm)	$RMSE_X$ (cm)	$RMSE_Y$ (cm)	$RMSE_Z$ (cm)	$RMSE_{XY}$ (cm)
GCPs	A	−0.89	−0.18	−0.29	0.64	0.43	1.15	0.77
	2	−0.77	0.40	2.18				
	3	0.16	0.33	−1.55				
	5	1.16	−0.14	0.25				
	6	−0.77	−0.39	0.60				
	8	0.04	−0.46	0.88				
	9	0.04	−0.24	0.37				
	10	−0.15	−0.42	0.03				
	11	0.43	0.98	−2.11				
	13	0.76	0.12	−0.36				
CPs	1	−1.97	1.00	−1.31	1.46	0.88	1.65	1.71
	4	−1.93	0.09	2.15				
	7	−0.97	−0.05	1.02				
	12	−1.34	0.95	−1.76				
	14	−0.61	1.38	−1.77				

4.2 تقييم دقة بناء النموذج

تم مناقشة الدقة المكانية للنموذج بالاعتماد على نقاط التحكم الأرضية (GCPs) ونقاط التحقق (CPs) وإجراء قياسات لمسافات على المبنى والنموذج. تستخدم عادة نقاط التحكم الأرضية لإتمام عملية الإرجاع الجغرافي للنموذج. إذ تشير قيمة الخطأ التربيعي المتوسط (RMSE) لنقاط التحكم الأرضية الحاصلة بنتيجة عملية التثليث الجوي إلى دقة عملية الإرجاع، أي مدى تطابق نقاط النموذج

مع مواقع نقاط التحكم الأرضية. تشير القيم الصغيرة (من مرتبة سنتمتر واحد) للأخطاء التربيعية المتوسطة المستوية والرأسية (RMSExy, RMSEz) في الجدول (1) إلى سوية أعلى في دقة الإرجاع الجغرافي.

أما نقاط التحقق فتستخدم لتقييم دقة التثليث الجوي، إذ يعتبر (RMSE) لهذه النقاط معياراً للدقة النهائية للنموذج. في [23,24]، تم تحديد قيم (RMSExy, RMSEz) وفق قاعدة قائمة على الخبرة أو ما يدعى بالتعميم التجريبي (Empirical Generalization) كما يلي:

$$RMSE_{XY} \approx [1-2] \times GSD \;\; ; \;\; RMSE_Z \approx [1-3] \times GSD \qquad (1)$$



الشكل(7). نتائج المعالجة الفوتوغرامترية لبيانات مبنى مسجد جامعة القلمون: الغمامة النقطية الكثيفة (أعلى) والنموذج الصوري ثلاثي الأبعاد (أسفل).







الشكل(8). نتائج المعالجة الفوتوغرامترية لبيانات مبنى مسجد جامعة القلمون: لقطات من زوايا مختلفة للنموذج الصوري ثلاثي الأبعاد.

ويسبق هذا التقييم عادة إجراء عملية كشف للقيم الشاذة في القياسات ومعرفة تبعية الأخطاء (فروق إحداثيات نقاط التحقق) للتوزيع الطبيعي، وذلك يرفع من الموثوقية في دقة النموذج الناتج. لذا ونظراً لصغر حجم العينة (n=5)، تم تطبيق اختبار (Shapiro–Wilk) [25,26] لكونه الأكثر دقة وقوة للعينات الصغيرة لتحديد تبعية الفروق للتوزيع الطبيعي باستخدام البرنامج الإحصائي (SPSS).

يُعد اختبار (Shapiro–Wilk) أحد أهم اختبارات المطابقة الإحصائية وأكثرها استخداماً للتحقق من افتراض التوزيع الطبيعي للبيانات، خاصة عندما يكون حجم العينة صغيراً. إذ يستخدم الاختبار معايير إحصائية الاختبار (W) والقيمة الاحتمالية (P–value) في التحقق من الفرضية الصفرية (Null Hypothesis). والتي تعني أن البيانات تتبع توزيعاً طبيعياً. تأخذ (W) قيمة رقمية تقع بين [0–1] ويتم حسابها من البيانات وتُستخدم في تقييم مدى توافق توزيع البيانات مع التوزيع الطبيعي. إذ تدل القيم القريبة من الواحد إلى توافق البيانات مع التوزيع الطبيعي، بينما تدعم القيم الصغيرة رفض الفرضية الصفرية وبالتالي تشير إلى انحراف البيانات عن التوزيع الطبيعي. بالنسبة إلى القيمة (P–value)، فإذا كانت بنتيجة الاختبار أكبر من (0.05) دل ذلك على عدم وجود مبرر لرفض الفرضية الصفرية، وبالتالي يمكن اعتبار أن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي. أما إذا كانت القيمة أقل من أو تساوي (0.05) فهذا يبرر رفض الفرضية الصفرية، وبالتالي لا يمكن اعتبار أن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي. كما يمكن استخدام مخطط الكميات (Q–Q Plot) كأداة بيانية إحصائية بهدف التقييم البصري لمقارنة توزيع بيانات العينة مع التوزيع الطبيعي و تشخيص الشاذ منها.

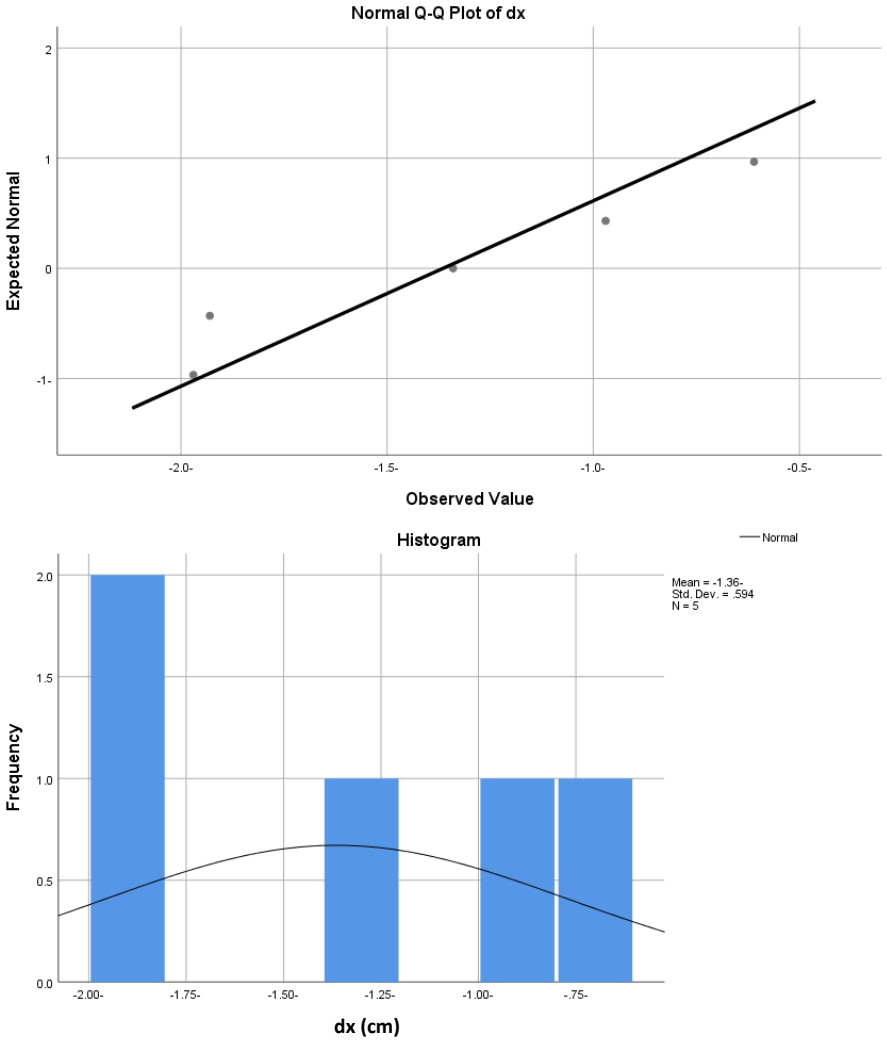
تبين من خلال تطبيق اختبار (Shapiro–Wilk) على كل من فروق إحداثيات نقاط التحقق (dx, dy, dz) قبول الفرضية الصفرية (P–value=Sig > 0.05) وبالتالي جميعها تتبع التوزيع الطبيعي (الأشكال 9 و10 و 11). كما أن التقييم البصري للمخططات (Q–Q) لا يشير إلى وجود دلالة كبيرة للقيم الشاذة في بيانات الفروق والذي بدوره يدعم تتبع البيانات للتوزيع الطبيعي.

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
dx	.230	5	.200*	.913	5	.488

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction



الشكل(9). نتائج اختبار (Shapiro–Wilk) على فروق إحداثيات (X) لنقاط التحقق:

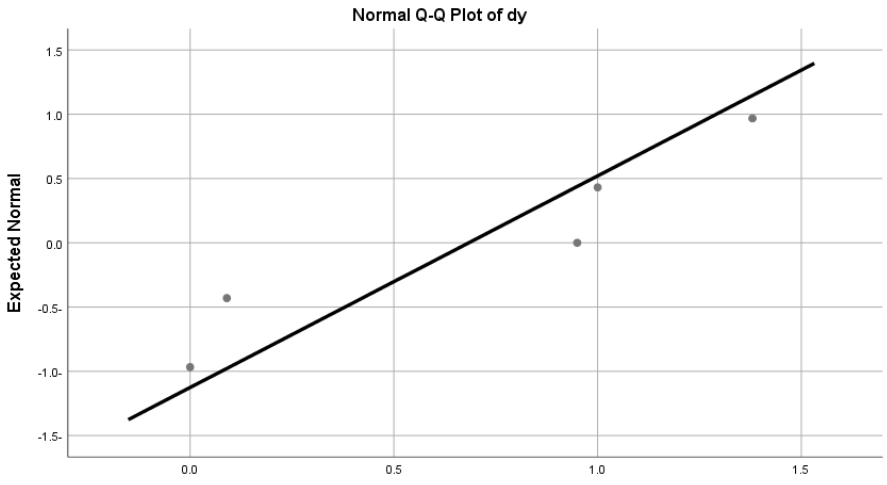
معايير الاختبار (أعلى) ومنحني التوزيع التكراري للفروق (وسط) ومخططات (Q–Q) (أسفل).

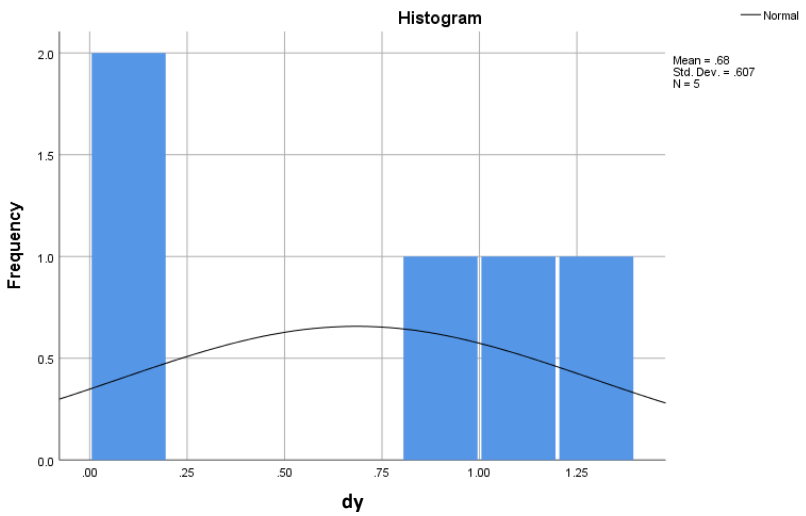
Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
dy	.269	5	.200*	.876	5	.291

*. This is a lower bound of the true significance.

a. Lilliefors Significance Correction



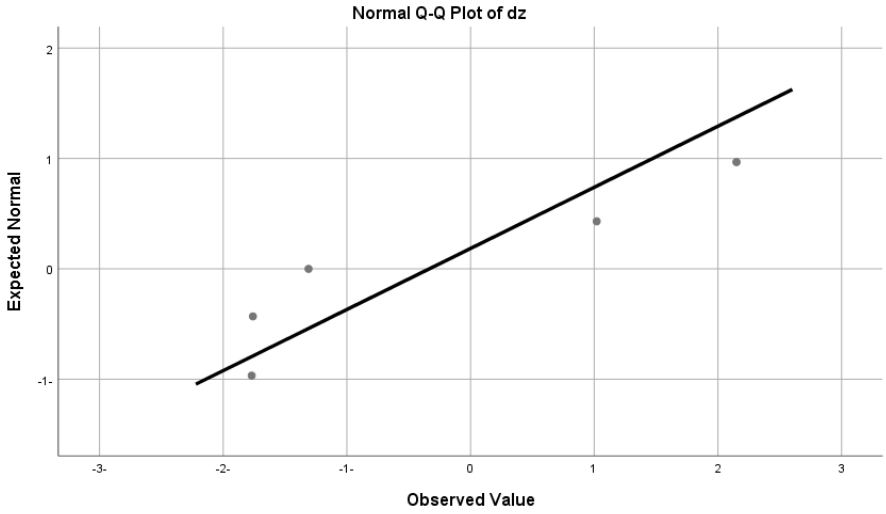


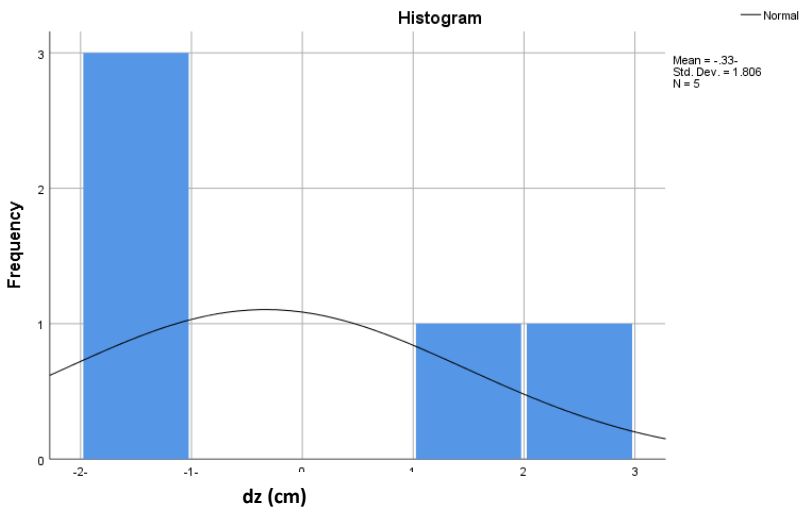
الشكل(10). نتائج اختبار (Shapiro–Wilk) على فروق إحداثيات (Y) لنقاط التحقق: معايير الاختبار (أعلى) ومنحني التوزيع التكراري للفروق (وسط) ومخططات (Q–Q) (أسفل).

Tests of Normality

	Kolmogorov-Smirnov[a]			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
dz	.306	5	.143	.822	5	.122

a. Lilliefors Significance Correction





الشكل(11). نتائج اختبار (Shapiro–Wilk) على فروق إحداثيات (Z) لنقاط التحقق: معايير الاختبار (أعلى) ومنحني التوزيع التكراري للفروق (وسط) ومخططات (Q–Q) (أسفل).

ومن الجدول (2)، تشير قيم (RMSExy, RMSEz) لنقاط التحقق إلى قيم أقل من قيمة (GSD) وبالتالي هي قيم مقبولة وفقاً للمعادلات رقم (1). وهذا يدل على دقة أعلى للتثليث الجوي وجودة النموذج التصويري.

فضلاً عما سبق، تم إجراء عدة قياسات باستخدام شريط قياس من الفايبر جلاس (Fiberglass Measuring Tape 30m, EC Class II) لمسافات أفقية وشاقولية على عناصر في واجهات المبنى (مسافات مرجعية) والنموذج (مسافات مقاسة) وحساب الفروق بينها. إذ تم الحصول على دقة متوسطة للفروق قدرها (6mm) (جدول 3)، والتي تشير لدقة هندسية عالية للنموذج.

الجدول (3). مقارنة بين مسافات مرجعية ومسافات مقابلة مقاسة على النموذج.

المسافة المرجعية (m)	المسافة المقاسة (m)	الفرق (m)
0.453	0.450	0.003
0.604	0.607	0.003
1.878	1.872	0.006
2.257	2.250	0.007
3.409	3.400	0.009

5 الاستنتاجات والتوصيات

استناداً إلى كل من الدراسة النظرية والعملية المقدمة حول استخدام صور مقتطعة من تسجيلات فيديو فائق الدقة من طائرة دون طيار في إنتاج نماذج رقمية ثلاثية الأبعاد للمباني، يمكن أن نلخص الاستنتاجات التالية:

1. يمكن اعتبار تسجيلات فيديو الطائرات دون طيار من فئة الهواة حلّاً بديلاً وسريعاً لمسألة النمذجة الصورية ثلاثية الأبعاد للمباني كونها تحقق دقة هندسية مقاربة لاستخدام آلات التصوير التقليدية.
2. إن التخطيط الناجح لعملية استحواذ تسجيلات الفيديو باستخدام الطائرة دون طيار، من الاختيار والتوزيع الأمثل لنقاط التحكم الأرضية وتغيير ارتفاع الطيران وزاوية التصوير بما يسمح بضمان نسب التداخل بين الصور المقتطعة والتغطية اللازمين لعملية النمذجة وتجنب التغير الكبير في الدقة المكانية، كفيل بإنتاج نماذج ثلاثية الأبعاد بسوية دقة عالية.
3. أكدت النتائج كفاءة المنهجية المقدمة وتلبيتها لمعايير الجودة من سوية عالية في الدقة المستوية والرأسية (أقل من قيمة GSD=1.9cm)، والذي يدعم إمكانية استخدامها في أعمال التوثيق الدقيق للمباني.

وانطلاقاً من النتائج وحدود الدراسة والتي تشمل حجم منطقة الدراسة، والظروف الجوية المتاحة ونوعية الطائرة دون طيار، يمكن أن يوصى بما يلي:

1. تطبيق منهجية العمل السابقة وذلك باستخدام تسجيلات فيديو بدقة (6K,8K) بهدف اختبار وبناء نماذج رقمية بسوية دقة أعلى، مع الأخذ بعين الاعتبار نتائج الأبحاث السابقة.
2. إجراء دراسة مقارنة بين النماذج المبنية من لقطات الفيديو وتلك المبنية من صور ثابتة (Still Images) لتحديد الفروق الكمية في الدقة والزمن والتكلفة. مع إمكانية اختبار المنهجية على أنواع مختلفة من المباني وفي ظروف جوية وإضاءة متباينة لتحديد حدود التطبيق بدقة أكبر.
3. دراسة تأثير معدل اقتطاع اللقطات على جودة النموذج، بدلاً من الاعتماد على اقتطاع ثابت، وذلك باستخدام طرق ترشيح متقدمة تعتمد على التغطية والجودة البصرية.

6 المراجع

1. Luhmann, T., (2019). Recent developments in Close-Range Photogrammetry. GIM International, February 2019, pp. 14-19.
2. Moussa, W. (2014). Integration of digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for cultural heritage data recording. Deutsche Geodätische

Kommission, Reihe C, Nr. 725, München 2014, ISBN 978-3-7696-5137-9, 162 S.

3. Wenzel, K., Rothermel, M., Fritsch, D., and Haala, N. (2013). Image Acquisition and Model Selection For Multi-View Stereo. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-5/W1, pp. 251-258.
4. AL Khalil, O., (2016). Using Video Records in 3D Modeling of Large Historical Monuments. Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (38) No. (6).
5. Moussa, W., (2020). Resent Developments in UAV Photogrammetry with Practical Examples. Homs University Journal – Civil Engineering Science Series 42 (10), pp. 35-64.
6. Nex, F., Remondino, F. (2014). UAV for 3D Mapping Applications: a Review. Applied Geomatics, 6 (1), pp.1-15.
7. Colomina, I. & Molina, P., (2014). Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review. ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing, 92, pp.79-97.
8. Alomar, A., (2023). Drone Photogrammetry for urban planning purposes in Syria Comparison Study. Homs University Journal – Civil Engineering Science Series 45 (10), pp. 39-64.
9. Teo, T. (2015). Video-based point cloud generation using multiple action cameras. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 40, p. 55-60.

10. Wenzel, K. Flight Planning for City Acquisition at High Resolution. EuroSDR Workshop. Available online: http://www.eurosdr.net/sites/default/files/images/inline/04_nframes-eurosdr_isprs-southampton2015.pdf (accessed on 15 July 2024).
11. Gruen, A. (1997). Fundamentals of Videogrammetry-a Review. Human movement science, 16(2-3), pp. 155-187.
12. Alsadik, B., & Khalaf, Y. H. (2022). Potential use of drone ultra-high-definition videos for detailed 3d city modeling. ISPRS international journal of geo-information, 11(1), p. 34.
13. Torresani, A., & Remondino, F. (2019). Videogrammetry vs photogrammetry for heritage 3D reconstruction. In Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W15 (Vol. 42, pp. 1157-1162).
14. Sato, T., Kanbara, M., Yokoya, N., & Takemura, H. (2002). Dense 3-d reconstruction of an outdoor scene by hundreds-baseline stereo using a hand-held video camera. International Journal of Computer Vision, 47, pp. 119-129.
15. Pollefeys, M., Nistér, D., Frahm, J. M., Akbarzadeh, A., Mordohai, P., Clipp, B., ... & Towles, H. (2008). Detailed real-time urban 3d reconstruction from video. International Journal of Computer Vision, 78, pp. 143-167.
16. Bulatov, D., Solbrig, P., Gross, H., Wernerus, P., Repasi, E., & Heipke, C. (2011). Context-based urban terrain reconstruction from UAV-videos for geoinformation applications. In International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences:[International Conference On Unmanned Aerial Vehicle In Geomatics (UAV-G)] 38-1 (2011), Nr. C22 (Vol. 38, No. C22, pp. 75-80.

17. Xu, Z., Wu, T. H., Shen, Y., & Wu, L. (2016). Three dimentional reconstruction of large cultural heritage objects based on UAV video and TLS data. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 41, pp. 985-988.
18. Byrne, J., O'Keeffe, E., Lennon, D., & Laefer, D. F. (2017). 3D reconstructions using unstabilized video footage from an unmanned aerial vehicle. Journal of Imaging, 3(2), p. 15.
19. Doumit, Jean A. (2018). From Drones to Geospatial Data. KubGU, Krasnodar. Courtesy of assistant professor Steve Scott.
20. https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557459#label4 (accessed on 15.12.2025)
21. Agisoft, (2026). Agisoft Metashape User Manua User Manual Professional. Edition, Version 2.3., Copyright © 2026 Agisoft LLC.
22. IBM Corp. (2020). IBM SPSS Statistics for Windows (Version 27.0) [Software]. Armonk, NY: IBM Corp.
23. ASPRS, (2024). ASPRS positional accuracy standards for digital geospatial data. (doi: 10.14358/ASPRS.PAS.2024)
24. Luhmann T, Robson S, Kyle S, Boehm J. (2023). Close-range photogrammetry and 3D imaging. Walter de Gruyter GmbH & Co KG.

25. Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). Biometrika, 52(3/4), pp. 591-611.

26. Razali, N. M., & Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of shapiro-wilk, kolmogorov-smirnov, lilliefors and anderson-darling tests. Journal of statistical modeling and analytics, 2(1), 21-33.