

دراسة جدوى المسح التصويري باستخدام الطائرات المسيّرة في تكثيف نقاط الأساس

الجيوإيزي

الطالب غانم سلطانه اشراف د.أحمد العمر

ملخص

إن تكثيف نقاط الأساس الجيوإيزي يعتبر العمل الأكثر صعوبة والأكثر كلفة من الناحية المادية والزمنية في أي عمل مساحي ويتطلب خبرات عالية وأجهزة دقيقة جداً فكان لا بد من التفكير في طرق بديلة تحقق الدقة المطلوبة أولاً ثم تراعي الناحية المادية والزمنية من جهة أخرى.

اكتسبت الطائرات بدون طيار (UAVs) Unmanned Aerial Vehicles اهتماماً كبيراً في الأعمال المساحية وأصبحت أداة متعددة الأغراض لتجميع البيانات، ومنها البيانات التي تستخدم للحصول على أنواع مختلفة من النماذج الرقمية المستخدمة في العمل المساحي مثل النموذج الرقمي للارتفاعات (DEM) Digital Elevation Model والنموذج الرقمي للسطح (DSM) Digital Surface Model وخطوط الكونتور والصور المصححة عمودياً Orthophoto وغيرها. هنالك العديد من العوامل التي تؤثر على دقة منتجات الطائرات دون طيار، وقد ركزت الأبحاث الحالية على توزيع وعدد نقاط الضبط الأرضية (GCPs) Ground Control Points مع إغفال تأثير موثوقيتها في عملية المعالجة.

تقدم هذه الدراسة إطاراً لتحليل دور نقاط الضبط الأرضية (GCPs) بناءً على عددها وعلى التباين في الموثوقية. صُمم تسعة تكوينات مختلفة لعدد نقاط الضبط الأرضية (GCPs) وأدخل ضمن كل تكوين ضوضاء مختلفة لمحاكاة التباين في الموثوقية وتم اعتماد التوزيع الطرفي والمركزي معاً في دراستنا.

من خلال دراسة العينة، وتحليل فروق احداثيات نقاط التحقق (CP) Check Points، أشارت النتائج إلى أن موثوقية نقاط الضبط الأرضية (GCPs) تؤثر على الحد الأعلى لدقة النماذج الرقمية وتؤثر بشكل كبير على عدد (GCPs) وتوزيعها. كما بلغت الدقة الأفقية للـ Orthophoto /0.9 cm/ أما الدقة الشاقولية للـ DEM بلغت حوالي /2.7 cm/. أظهرت النتائج استجابة فائقة للمعايير المنصوص عليها في الكثير من الأدبيات العالمية ذات الصلة، الأمر الذي يدعم صلاحية وأفضلية المخرجات الرقمية لهذه التقنية كأساس لتكثيف نقاط الأساس الجيوإيزي في سورية.

الكلمات المفتاحية: الأساس الجيوإيزي، اقتطاع البنية من الحركة، الطائرات المسيّرة، التثليث الجوي، النموذج الرقمي للارتفاعات، الأورثوفوتو، الدقة المكانية، مسافة الاعتيان الأرضية.

Feasibility Study of Photogrammetric Survey Using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Densification Geodetic Control Points

Abstract

The densification of geodetic base points is considered the most difficult and costly task in any surveying project, both financially and time-wise. It requires extensive expertise and highly accurate equipment. Therefore, it was necessary to consider alternative methods that would first achieve the required accuracy and then, on the other hand, take into account financial and time-related factors.

Unmanned aerial vehicles (UAVs) have gained significant attention in surveying work and have become a multi-purpose tool for data collection. This data is used to obtain various types of digital models used in surveying work, such as digital elevation models (DEMs), digital surface models (DSMs), contour lines, orthophotos, and others.

There are many factors that affect the accuracy of UAV data. Current research has focused on the distribution and number of ground control points (GCPs), neglecting the impact of their reliability on the processing process.

This study presents a framework for analyzing the role of GCPs based on their number and the variation in reliability. Nine different configurations of ground control points (GCPs) were designed, and different noise was introduced within each configuration to simulate variations in reliability. Both peripheral and central distributions were adopted in our study.

Through a sample study and analyzing the differences in check points (CP) coordinates, the results indicated that the reliability of GCPs affects the upper limit of the accuracy of the digital models and significantly impacts the number and distribution of GCPs. The horizontal accuracy of the Orthophoto model was 0.9 cm, while the vertical accuracy of the DEM was approximately 2.7 cm.

The results demonstrated superior compliance with the standards set forth in much of the relevant international literature, supporting the validity and superiority of the digital outputs of this technique as a basis for geodetic baseline densification in Syria..

Keywords: Geodetic Basis, Structure from Motion (SfM), Drones/UAVs, Aerial Triangulation, Digital Elevation Model, Orthophoto, Spatial Accuracy, Ground Sampling Distance (GSD).

1. مقدمة

لا شك أن العملية الأكثر صعوبة والأكثر كلفة في أي عمل مساحي هو تكثيف نقاط الأساس الجيوديزي وذلك لما تحتاج هذه العملية من وقت وأجهزة وعمالة تحمل خبرة عالية. ونظراً لأهمية هذه النقاط الجيوديزية في المشاريع الهندسية، فقد وجب علينا التفكير في تكثيف هذه النقاط مع مراعاة الدقة المكانية ومراعاة الناحية المادية والزمنية. بالرغم من كون طريقة المسح الطبوغرافي الأرضي هي أدق الطرق، إلا أنها تحتاج إلى كوادر خبيرة ومختصة بالعمل المساحي، مرتفعة الكلفة، تحتاج جهد كبير وتستهلك وقتاً طويلاً.

مع التطور السريع لتكنولوجيا التصوير وتقنيات المعالجة الفوتوغرامترية، اكتسبت الطائرات بدون طيار Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) اهتماماً كبيراً في تطبيقات مختلفة نظراً لقدرتها المذهلة على التحمل، وقدرتها الاستثنائية على المناورة، ومرونتها، واستقرارها [1]. باعتبارها تقنية فعّالة للتصوير والنمذجة المكانية، تم استخدام الطائرات دون طيار بالاعتماد على تقنية اقتطاع البنية من الحركة Structure from Motion (SfM) على نطاق واسع في العديد من المجالات الرئيسية [5].

بالنسبة للعمل المساحي فإنه يمكن الحصول من خلال معالجة صور هذه الطائرات على عدة منتجات مثل النموذج الرقمي للارتفاعات Digital Elevation Model (DEM) والنموذج الرقمي للسطح Digital Surface Model (DSM) وخطوط الكونتور والصور المصححة عمودياً Orthophoto وغيرها.

تتأثر الدقة النهائية للمسح باستخدام الطائرات دون طيار بالعديد من المتغيرات المتنوعة وأهمها تخطيط الرحلة وجودة التصوير واستراتيجية الإرجاع الجغرافي Georeferencing وعدد نقاط الضبط الأرضية Ground Control Point (GCPs) وتوزيعها ودقتها وتضاريس المنطقة بالإضافة إلى دقة المستشعر وارتفاع الطيران ونسبة التداخل بين الصور [2].

تشمل المزايا المهمة لتقنية الطائرات دون طيار مقارنة بالطرائق التقليدية انخفاض التكلفة والوقت والجهد ورسم الخرائط بشكل أسرع وعدم تطلبها خبرات كبيرة وأجهزة متطورة وسهولة عملها في المناطق الصعبة الوصول وذات تضاريس معقدة. تكمن الوظيفة الأساسية للتصوير الجوي للطائرات بدون طيار في تحقيق نمذجة تضاريسية عالية الدقة، والتي تتأثر بعدة عوامل [3] بما في ذلك تحديد المواقع الجغرافية، وتحديد مسافة الاعتيان الأرضية Ground Sampling Distance (GSD) [4]، وتعقيد التضاريس (تباين الارتفاع، والانحدار والانحناء، وتنوع التضاريس، إلخ). ومن بين هذه العوامل، يمكن لأساليب تحديد المواقع الجغرافية، كعناصر أساسية قابلة للتحكم، أن تعزز فعالية النمذجة بشكل كبير من خلال التخطيط السليم [5][6]. يمكن تحقيق الإسناد الجغرافي بشكل أساسي من خلال أساليب الإسناد الجغرافي المباشرة وغير المباشرة [7]، إلى جانب تقنيات مثل المعالجة الحركية في الوقت الفعلي والمعالجة اللاحقة [8][9].

إن استخدام نقاط الضبط الأرضية (GCPs) في أساليب الإسناد الجغرافي غير المباشر عادةً ما يوفر دقة عالية في الإرجاع الجغرافي. ومع ذلك، يشير الباحثون إلى أن تحسن الدقة لا يرتبط ارتباطاً طردياً بعدد نقاط التحكم الأرضية [10]. يمكن لعدد كافٍ من نقاط الضبط الأرضية (GCPs) أن يُحسّن الدقة بشكل كبير، إلا أن الإفراط في استخدامها يؤدي إلى التكرار. يتطلب وضع نقاط الضبط الأرضية (GCPs) جهداً وموارد كبيرة [11]. لا تضمن زيادة نقاط التحكم الأرضية بالضرورة تحسين الكفاءة، خاصةً عند مراعاة التكاليف الاقتصادية لمسح نقاط الضبط الأرضية (GCPs). تركز الأبحاث الحالية بشكل أساسي على تحسين الدقة الشاملة باستخدام نقاط الضبط الأرضية (GCPs)، وغالباً ما تُهمل كيفية تأثير نقاط الضبط الأرضية (GCPs) على دقة النموذج وكيفية نشوء الأخطاء وانتشارها [12].

لدراسة العلاقة بين نقاط الضبط الأرضية (GCPs) ودقة النمذجة، أُجريت أبحاث مكثفة حول عدد نقاط الضبط الأرضية (GCPs) وتوزيعها المكاني وموثوقيتها [5][13][14]. وفيما يتعلق بتأثير عدد نقاط الضبط الأرضية (GCPs) وتوزيعاتها المكانية على دقة النمذجة، تُشير بعض الدراسات إلى أن توزيع الحواف يُمكن أن يُحقق دقة نمذجة أفضل [15][16]، بينما تُؤكد دراسات أخرى على أهمية توزيع الحواف والمركز المُوزع [17][18]. علاوة على ذلك، تتحدى بعض الدراسات القاعدة المقبولة على نطاق واسع والتي مفادها أن زيادة عدد نقاط الضبط الأرضية يمكن أن يحسن دقة النمذجة، حيث تشير بعض الدراسات إلى أن تقليل عدد نقاط الضبط الأرضية قد لا يؤدي بالضرورة إلى تقليل الدقة بشكل كبير، ويمكن تعويض خسائر الدقة من خلال طرق أخرى مثل التصوير المائل [19][20]. تم استكشاف العلاقات بين موثوقية نقاط الضبط الأرضية ودقة رسم الخرائط التصويرية ثلاثية الأبعاد للطائرات بدون طيار باستخدام مقاييس عامة مثل خطأ الجذر التربيعي المتوسط (Root Mean Square Error (RMSE) ومتوسط الخطأ (Mean Error (ME والانحراف المعياري Standard Deviation (STD) ووجدوا أن طرق القياس المختلفة والبيئات الجغرافية ومستويات موثوقية نقاط الضبط الأرضية يمكن أن تؤثر بشكل كبير على دقة رسم الخرائط التصويرية ثلاثية الأبعاد [18][21]. من الواضح أن هناك نقاشات مستمرة حول العلاقات بين نقاط التحكم الأرضية ودقة النمذجة. من ناحية أخرى، غالباً ما تقتصر التجارب في

بيئات جغرافية مختلفة على سيناريوهات محددة، وتتطلب مزيداً من التجارب والتحليلات للتعلم في آليات تأثير نقاط التحكم الأرضية.

وبسبب تزايد الاهتمام المهني باستخدام تقنية المسح التصويري باستخدام الطائرات دون طيار، تبرز الحاجة إلى دراسة مدى استجابة النماذج الرقمية المستخرجة من هذه التقنية لمتطلبات الدقة وفق المعايير العالمية وإمكانية استخدامها في تكثيف نقاط الأساس الجيوديزي،

أهمية البحث وأهدافه:

تأتي أهمية البحث من أنه يحاول وضع منهجية مفصلة لتقييم دقة المنتجات المشتقة من صور الطائرات دون طيار باستخدام معايير دقة مختلفة وذلك لمعرفة مدى إمكانية استخدام هذه المنتجات في تكثيف نقاط الأساس الجيوديزي حيث تتميز الـ UAVs عن الطرق الجيوديزية التقليدية بأنها منخفضة الكلفة وتوفر الوقت والجهد.

أما أهداف البحث فهي:

1. عرض سير العمل لعملية معالجة صور الطائرات دون طيار.
2. اقتراح منهجية عملية لتقييم دقة المنتجات المشتقة من معالجة صور الطائرات دون طيار.
3. مناقشة تأثير عدد نقاط الضبط وتباين دقتها على دقة المنتجات المشتقة من معالجة صور الطائرات دون طيار للتحقق من فعالية هذه المنتجات في عملية تكثيف نقاط الأساس الجيوديزي.

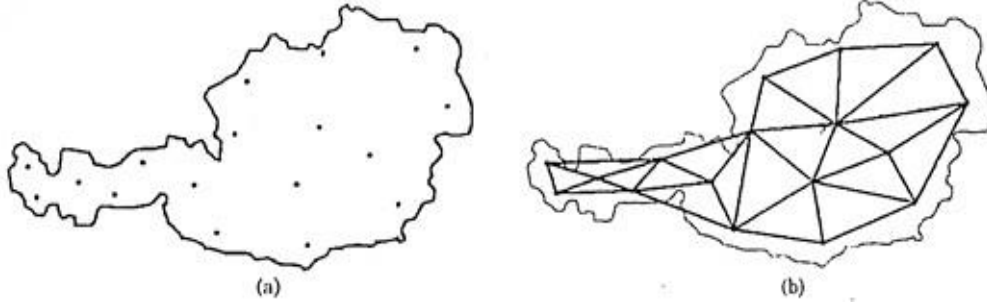
3. المبادئ النظرية للبحث

في الأقسام التالية، ناقشنا بعض المبادئ النظرية في الشبكات الجيوديزية وتخطيط مهام الطائرات بدون طيار وتقييم منتجاتها.

1.3 مفهوم الشبكات الجيوديزية

إن تنفيذ الأعمال المساحية في أي مكان كان ولأي هدف كان، يتطلب دوماً وجود مجموعة من النقاط معلومة الإحداثيات والثابتة والدائمة من سطح الأرض بحيث تعتبر نقاطاً مرجعية تستند إليها هذه الأعمال. لهذا فإن الجهات الحكومية المختصة والمؤسسات المساحية في أي دولة في العالم تسعى دوماً إلى تغطية كامل مساحة أراضيها بشبكة من النقاط والمراسد المساحية والجيوديزية وتثبيتها في الأرض وحساب قيم إحداثياتها في جملة الإحداثيات المعتمدة في هذا الدولة، وذلك بغية جعلها كنقاط أساس جيوديزية ثابتة ودائمة تربط بها كافة الأعمال المساحية المنفذة في أي بقعة من أراضي الدولة المعنية وعلى كامل امتدادها.

بهذا الشكل يمكننا أن نعرف شبكات النقاط المساحية أو الجيوديزية على أنها مجموعة النقاط من سطح الأرض التي حددت مواقعها في أماكن ثابتة ومعروفة ويحكم العلاقة بين بعضها البعض أساس رياضي واضح واشتراطات مساحية محددة وحسبت إحداثياتها في جملة إحداثيات محددة [30].



الشكل (1): شبكة جيوديزية.

☒ المبادئ العامة لإنشاء الشبكات المساحية:

يتطلب إنشاء شبكات الإحداثيات بكافة أنواعها الأخذ بعين الاعتبار أموراً أساسية عدة منها[30]:

1. اختيار الشكل الهندسي العام لها.
 2. كيفية توزيع نقاطها على المساحة الممتدة عليها.
 3. تحديد متانة هذا الشكل.
 4. معرفة قيم الدقة النسبية لتعيين مواقع نقاطها فيما بينها.
- كما أنه عند اختيار مواقع نقاط المثلثات هناك عدة نقاط من الواجب مراعاتها[30]:
1. كل نقطة تري النقاط التي حولها بوضوح.
 2. أن تتراوح الزوايا بين أضلاع المثلثات (التي تكونها هذه النقاط) بين /30-120/ درجة بقدر الإمكان وتفضل المثلثات المتساوية الأضلاع تقريباً.
 3. اختيار مواقع النقاط في مواقع مرتفعة ومشرفة على مناطق واسعة لسهولة رؤية الهدف من مسافات بعيدة.
 4. أن تكون مواقع النقاط في أماكن ثابتة غير معرضة للضياع أو للعبث بها.
 5. أن تكون أطوال أضلاع المثلثات متناسبة لا أن تكون أضلاع طويلة جداً وأخرى قصيرة جداً.
 6. أن تكون العقبات المراد إزالتها (تعيق خط النظر بين النقاط) أقل ما يمكن تقادياً لارتفاع كلفة المشروع.

☒ درجات المثلثات:

يلجأ عادة إلى تأسيس الشبكة على مراحل فتنشأ شبكة من المثلثات ذات التباعد الكبير بين نقاطها تعتبر هيكلاً أساسياً تستند عليها شبكة ثانية ذات أطوال أضلاع أقل، وتكون بدورها هيكلاً لشبكة ثالثة وهكذا. ويصطلح على تسمية الشبكة الأساسية بشبكة الدرجة الأولى والتي تليها بشبكة الدرجة الثانية وهكذا. وتقل دقة القياسات اللازمة للوصول إلى دقة محددة لمواقع النقاط من الدرجة الأولى إلى الثانية فالثالثة؛ بسبب تناقص أطوال الأضلاع، وبذلك يتم الوصول إلى نتيجة اقتصادية ضمن الدقة والتجانس المطلوبين.

ولكل دولة من دول العالم شبكة جيوديزية متكاملة تغطي أراضي الدولة بأكملها والتي تتكون من عدة نقاط جيوديزية ترتبط ببعضها البعض بسلسلة من المثلثات أو المضلعات، تنقسم هذه الشبكة عادة إلى أربع درجات تختلف فيما بينها بطول

الأضلاع ودقة قياس الزوايا والأضلاع [30]. الجدول (1) يبين مواصفات درجات شبكة المثلثات في الجمهورية العربية السورية.

الدرجة	التباعد بين النقاط (km)	عدد النقاط	الخطأ في قياس الزوايا (cc)	عدد السلاسل
الأولى (الرئيسية)	40 – 60	208	3 – 5	16
الثانية	20 – 30	345	10	8
الثالثة	5 – 15	–	20	4
الرابعة	0.5 – 2	–	30 – 40	3 – 4

الجدول (1): مواصفات درجات شبكة المثلثات في الجمهورية العربية السورية.

2.3 تخطيط مهام الطائرات بدون طيار

يتطلب التنفيذ الناجح لأي مشروع مسح تصويري تخطيطاً دقيقاً قبل تنفيذ أي نشاط في المشروع. تتمثل الخطوة الأولى في التصميم في تحديد مقياس الصور أو دقة تمييزها والدقة المطلوبة. وبمجرد معرفة هذين المدخلين، ننفذ العمليات التالية [31]:

- التخطيط للتصوير الجوي (وضع خارطة الطيران)
- تخطيط عملية الضبط الأرضي.
- اختيار البرامج والأدوات اللازمة للحصول على المنتجات النهائية.

بالنسبة لخطة الطيران، يحتاج المخطط إلى معرفة المعلومات التالية، والتي يتم حساب بعضها:

- البعد المحرقي لعدسة الكاميرا.
- ارتفاع الطيران فوق السطح المرجعي المحدد أو مقياس الصورة.
- حجم مصفوفة جهاز اقتران الشحنة (Charge Coupled Device (CCD).
- أبعاد الـ CCD.
- حجم وشكل المنطقة المراد تصويرها.
- مقدار التداخل الطولي والعرضي للصور.
- سرعة الطائرة.

1.2.3 تصميم خطة الطيران

☒ التداخل الطولي والعرضي للصور الجوية

من المفيد قبل مناقشة المظاهر المختلفة التي تؤخذ بعين الاعتبار عند التخطيط لمهمة تصوير جوي أن نعرف التداخل الطولي والتداخل العرضي للصور الجوية.

التداخل الطولي هو تداخل الصور المتعاقبة على طول شريط الطيران.

التداخل العرضي هو تداخل أشرطة الطيران المتجاورة.

ويحسب التداخل الطولي PE والتداخل العرضي PS كنسبة مئوية وفق العلاقات التالية [31]:

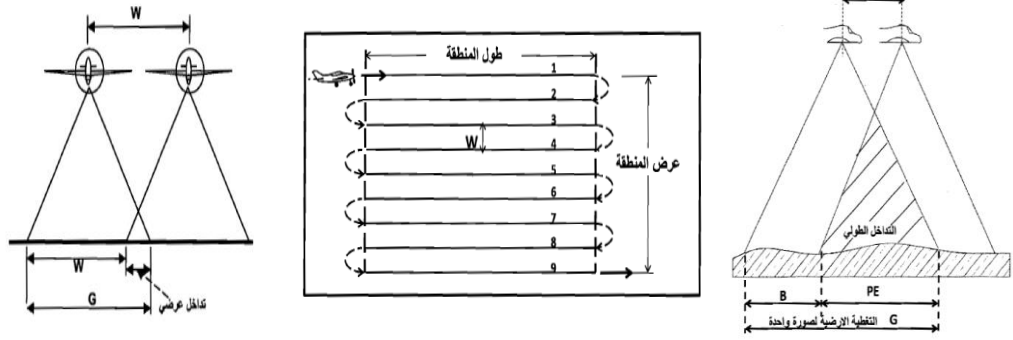
$$PE = \frac{G - B}{G} * 100 \quad PS = \frac{G - W}{G} * 100$$

حيث أن:

G: هي طول ضلع المربع الأرضي الذي تغطيه صورة شاقولية.

W: هي البعد بين خطوط الطيران المتجاورة.

B: هي القاعدة الهوائية وتمثل المسافة بين محطتي التقاط لصورتين متتاليتين.



الشكل (2): التداخل الطولي والعرضي للصور الجوية.

☒ ارتفاع الطيران

نحتاج إلى تحديد الارتفاع الذي يجب أن يتم عنده الطيران في المشروع. وللقيام بذلك نعود إلى الهندسة الداخلية للكاميرا والمقياس. لنفرض أن الصور سيتم الحصول عليها بكاميرا ذات بعد محراقي للعدسة مساو ل f وحجم CCD مساو ل b . ونحن نعلم بشكل مسبق ما ستكون عليه دقة الصورة الأرضية GSD . ومنه سيتم حساب ارتفاع الطيران على الشكل التالي [31]:

$$Scale = \frac{f}{H} = \frac{ab}{AB} \quad : \quad H = \frac{f * GSD}{ab}$$

☒ عدد خطوط الطيران

لمعرفة عدد خطوط الطيران اللازمة لتغطية منطقة المشروع والتي لها طول مساو ل $Lenght$ وعرض مساو ل $Width$ سنحتاج إلى المرور بالحسابات التالية [31]:

1. معرفة التغطية على الأرض لصورة واحدة (على طول عرض مصفوفة CCD الخاصة بالكاميرا).

2. حساب تباعد خطوط الطيران على النحو التالي:

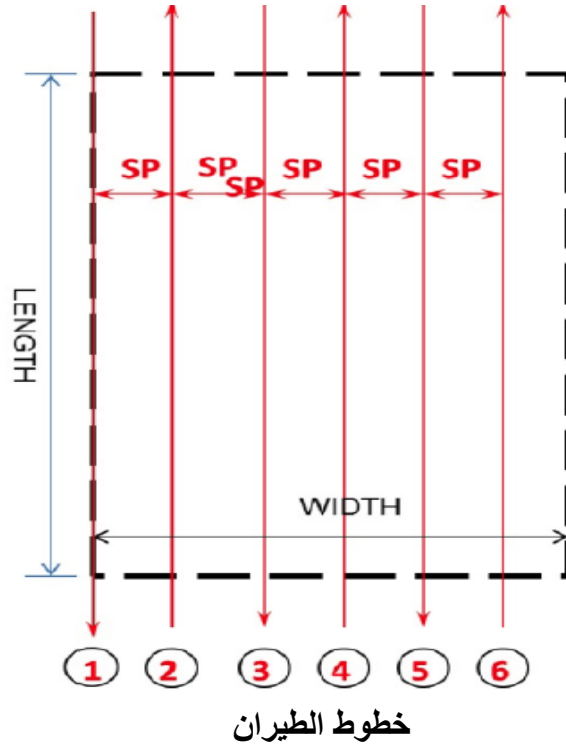
$$SP = Image\ coverage(W) * (100 - amount\ of\ side\ lap)/100$$

3. حساب عدد خطوط الطيران:

$$NFL = \left(\frac{Widht}{SP} \right) + 1$$

4. تقريب عدد خطوط الطيران إلى أقرب عدد صحيح.

5. نلاحظ في الشكل المجاور أن اتجاه الرحلة لكل خط طيران يتناوب بين الشمال إلى الجنوب ومن الجنوب إلى الشمال من خط طيران إلى الخط المجاور. إن التحليق فوق المشروع بهذه الطريقة يزيد من كفاءة وقود الطائرات بحيث يمكن للطائرة البقاء في الهواء لفترة أطول.



الشكل (3): عدد خطوط الطيران والتباعد بينها.

✘ عدد الصور

بمجرد تحديد عدد خطوط الطيران، نحتاج إلى معرفة عدد الصور التي ستغطي منطقة المشروع. وللقيام بذلك سنحتاج إلى المرور بالحسابات التالية [31]:

1. حساب التغطية على الأرض لصورة واحدة (على طول ارتفاع مصفوفة CCD الخاصة بالكاميرا).
2. حساب المسافة بين صورتين متتاليتين أو ما نسميه "القاعدة الهوائية أو الجوية" B، على النحو التالي:

$$B = \text{Image coverage}(H) * (100 - \text{amount of end lap})/100$$

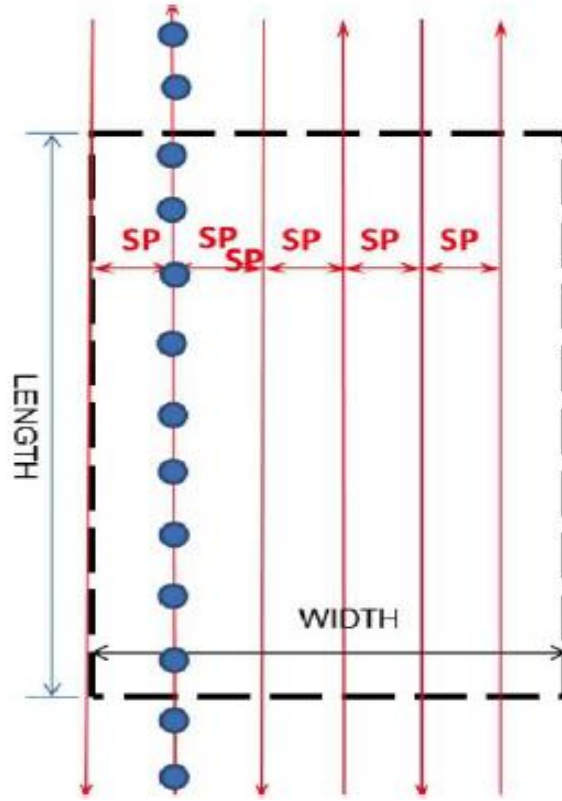
3. حساب عدد الصور في خط طيران:

$$NIM = \left(\frac{\text{Lenght}}{B} \right) + 1$$

4. تقريب عدد الصور إلى أقرب عدد صحيح.
5. نضيف صورتين في بداية خط الرحلة قبل الدخول إلى منطقة المشروع وصورتين عند الخروج من منطقة المشروع لضمان تغطية تجسيمية مستمرة وبالتالي سنضيف ما قدره 4 صور إضافية لكل خط طيران فيكون عدد الصور في كل خط طيران هو:

$$\left(\frac{\text{Lenght}}{B} \right) + 1 + 4$$

6. حساب العدد الإجمالي للصور في المشروع وفق العلاقة: $NFL * NIM$.



توزيع الصور على خطوط الطيران

الشكل (4): عدد الصور في خط الطيران الواحد.

⊠ الزمن بين صورتين متتاليتين

عندما تلتقط الكاميرا صورة نحتاج إلى أن تتحرك الطائرة مسافة مساوية لطول القاعدة الجوية قبل أن تلتقط الصورة التالية.

إذا افترضنا أن سرعة الطائرة هي (V) بالتالي يمكن حساب الزمن (T) بين كل صورتين متتاليتين من المعادلة التالية [31]:

$$T = \frac{B}{V}$$

3.3 المساحة التصويرية باستخدام اقتطاع البنية من الحركة SFM:

وهي تقنية سهلة الاستخدام منخفضة التكلفة تستخدم للحصول على بيانات عالية الدقة من مختلف المقاييس ولتحديد المواقع ثلاثية الأبعاد للنقاط في المشهد المصور. وفيما يلي نعرض تسلسل العمل في معظم خوارزميات اقتطاع البنية من الحركة والذي يطبق في كل البرمجيات التي تستخدم هذه الخوارزميات [5]:

- تصوير العنصر بحيث تظهر كل نقطة منه في صورتين على الأقل.
- توجيه الصور ومعايرة آلة التصوير بشكل آلي.

- استشعار السمات على الصور بشكل آلي.
- ربط السمات المتشابهة على الصور بشكل آلي.
- تحديد أولي لمواقع آلة التصوير في نظام إحداثيات حيز الصورة بشكل آلي
- بناء غمامة كثيفة من النقاط بشكل آلي وذلك بتطبيق طريقة ربط الصورة.
- توليد النموذج الشبكي للعنصر بشكل آلي.
- إعادة إسقاط الصور على سطوح النموذج الشبكي وتوليد النموذج الصوري بشكل آلي.
- وضع النموذج في جملة إحداثيات حيز العنصر بمساعدة نقاط ضبط بشكل نصف آلي.
- تصدير النموذج بصيغ متعددة لاستخدامه في تطبيقات لاحقة.

4.3 مسافة الإعتيان الأرضية (GSD) والتثليث الجوي (Aerial Triangulation(AT) وتقييم دقته:

من المفاهيم الأساسية التي يجب معرفتها عند التعامل مع تقنية المساحة التصويرية باستخدام الطائرات دون طيار هي مسافة الإعتيان الأرضية التي يمكن استخدامها للتعبير عن مقياس الصورة، تحديد ارتفاع الطيران المناسب، التعبير عن مقياس الـ Orthophoto وكذلك تحديد قيمة التغطية الأرضية للصورة. وتمثل المسافة بين مركزي بكسلين متتاليين يتم قياسهما على الأرض وعادة ما تعطى قيمة GSD بالسنتيمتر/البكسل [24].

التثليث الجوي (AT) هو مصطلح يشير إلى عملية تحديد الإحداثيات الأرضية X,Y,Z للنقاط الفردية بناءً على قياسات مأخوذة من سلسلة من الصور الجوية المتداخلة. يعتبر التثليث الجوي عملية أساسية لإرفاق نظام إحداثيات مكاني مع البيانات التي نحصل عليها من صور الطائرات دون طيار. لإنجاز هذه العملية، يجب استخدام نقاط نقاط ضبط أرضية نحددها بطرائق المسح الأرضي التقليدي أو باستخدام نظام الملاحة العالمي (GPS) Global Navigation System أو أنظمة 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 تكون مجهزة بإمكانية تسجيل موقع كل صورة ملتقطة ضمن نظام GNSS وهو الأمر الذي يمكننا من الحصول على بيانات تستخدم في التثليث الجوي للصور. يزودنا التثليث الجوي بمعاملات التوجيه الخارجي لجميع الصور الفوتوغرافية والإحداثيات ثلاثية الأبعاد لجميع نقاط العنصر المقاسة التي تستخدم لتوليد النماذج ثلاثية الأبعاد عالية الدقة [24].

لتقييم الدقة المطلقة للتثليث الجوي المنجز بطريقة التعديل بالحزم للصور الملتقطة باستخدام طائرة دون طيار، فإن المعايير العالمية الخاصة بالبيانات المكانية [12] تقترح استخدام مفهوم GSD حيث يمكن لنا توقع دقة أفقية تتراوح من 1*GSD إلى 2*GSD ودقة شاقولية تتراوح من 1*GSD إلى 3*GSD من أجل منتجات المسح التصويري باستخدام تقنية UAV-photogrammetry المحسوبة بشكل صحيح.

5.3 النماذج الرقمية للإرتفاعات DEM وتقييم دقتها:

يمكن نمذجة سطح الأرض بثلاثة أبعاد باستخدام النماذج الرقمية للإرتفاعات DEMs والنماذج الرقمية للسطح DSMs. يمثل الـ DEM الأرض الجرداء بغض النظر عن الموجودات فوق سطح الأرض (المباني، الجسور، الغطاء النباتي.... الخ) أما الـ DSM يمثل ما فوق سطح الأرض [25].

لتقييم دقة هذه المنتجات اقترحت معايير ASPRS استخدام عدد محدد من نقاط الاختبار يتبع لمساحة المنطقة المدروسة وللتغطية النباتية في هذه المنطقة [33]، وهي نقاط معلومة الإحداثيات لا تدخل بالحساب أثناء عملية التثليث الجوي، وتبنى هذه المعايير على افتراض أن الأخطاء تتبع التوزيع الطبيعي ولا تحوي قيم شاذة. حيث يوجد عدة طرق لمعرفة هذه القيم والتخلص منها ومن هذه الطرق طريقة الربيعات التي تقوم على حساب الربيعين الأول Q1 والثالث Q3 لعينة القياسات [32].

فإذا كان من الممكن توزيع الأخطاء توزيعاً طبيعياً ولا توجد قيم شاذة في مجموعة البيانات يمكن حساب الدقة الشاقولية المطلقة للـ DEM من العلاقة التالية [23]:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta z_i^2}{n}}$$

$$\Delta z_i = Z_{reference(i)} - Z_{DEM(i)}$$

$Z_{reference(i)}$: هو الارتفاع المرجعي لنقطة الاختبار i .

$Z_{DEM(i)}$: هو ارتفاع نقطة الاختبار i المقطع من نموذج الأرض الرقمي DEM.

6.3 الصورة المصححة عمودياً Orthophoto وتقييم دقتها:

يعبر الـ Orthophoto عن صور السمات في موقعها الحقيقي من خلال عملية تسمى التقويم التفاضلي والتي تطبق على الصور الجوية وتتخلص من الإزاحات الناتجة عن الميلان وعن التضاريس الأرضية، وعيب الـ Orthophoto هو أنه لا يستطيع نمذجة مواقع السمات المرتفعة مثل المباني والجسور لأن الـ DTM المستخدم يحتوي على ارتفاعات الأرضية فقط وبالتالي قد تظهر جميع الارتفاعات الأعلى من سطح الأرض بشكل غير صحيح على الـ Orthophoto. أما الـ Orthophoto الحقيقي يستخدم النموذج الرقمي للسطح DSM لنمذجة السمات المرتفعة بشكل صحيح مثل المنشآت التي صنعها الإنسان [28].

يتم اختبار الدقة الأفقية للـ Orthophoto بقياس مجموعة من نقاط الاختبار عليه والتي يتم الحصول على إحداثياتها من مصدر أعلى دقة (قياسات أرضية مثلاً) ومن ثم دراسة فروق الإحداثيات وتحليلها إحصائياً. ويفرض أن الأخطاء تتبع توزيعاً طبيعياً وأنها مستقلة في الاتجاهين X و Y فإننا نستطيع استخدام المعامل 2.4477 لحساب الدقة الأفقية المطلقة ضمن مجال ثقة 95% [22]:

يفرض تحقق الشروط السابقة يمكن حساب الدقة الأفقية بتطبيق العلاقة التالية:

$$\text{Accuracy} = \frac{2.4477 \sqrt{\text{RMSE}_x^2 + \text{RMSE}_y^2}}{2}$$

$$\text{RMSE}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{\text{Ortho}(i)} - X_{\text{check}(i)})^2}{n}}$$

$$\text{RMSE}_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{\text{Ortho}(i)} - Y_{\text{check}(i)})^2}{n}}$$

حيث:

$X_{\text{Ortho}(i)}, Y_{\text{Ortho}(i)}$: هي احداثيات نقطة الاختبار i المقاسة على الأورثوفوتو.

$X_{\text{check}(i)}, Y_{\text{check}(i)}$: هي احداثيات نقطة الاختبار i من المصدر ذي الدقة الأعلى.

7.3 أدوات البحث:

تم في هذا البحث استخدام الأدوات التالية:

1. البرنامج Agisoft Metashape: وهو برنامج روسي للنمذجة ثلاثية الأبعاد يستخدم أحدث تقنيات البناء ثلاثي الأبعاد من الصور المتعددة Multi-view المطورة في مجال الرؤية بمعونة الحاسب. كما يمكن من توجيه الصور الملتقطة من أية مواقع مع مراعاة تحقيقها لشرط وقوع أية نقطة من نقاط العنصر على صورتين على الأقل [25].
2. البرنامج ArcGIS: عبارة عن منصة جغرافية مكانية شاملة للمحترفين والمؤسسات. وهي إحدى التقنيات الرائدة في مجال نظم المعلومات الجغرافية (GIS). ويقوم ArcGIS، الذي تم إنشاؤه بواسطة Esri، بدمج البيانات وربطها من خلال سياق الجغرافيا. فهو يوفر إمكانات رائدة عالمياً لإنشاء جميع أنواع البيانات وإدارتها وتحليلها ورسم خرائطها ومشاركتها [26]، وسيتم استخدامه لاقتطاع الإحداثيات المستقرّة لنقاط الاختبار المستخدمة في تقييم دقة الـ DEM والـ Orthophoto.

3. البرنامج NCSS: وهو برنامج إحصائي يستخدم لتحليل البيانات وإنشاء الرسوم البيانية. ويتضمّن العديد من الميزات والأدوات المتخصصة مثل التحليل الإحصائي الوصفي والاستنتاجي والتجريبي وتصميم الدراسات الإحصائية وتحليل الانحدار والعديد من التحليلات الأخرى. كما يدعم البرنامج العديد من التنسيقات المختلفة للبيانات والرسوم البيانية ويعمل على مختلف أنظمة التشغيل، ويستخدم على نطاق واسع في الأبحاث العلمية والدراسات الإحصائية والتحليلات البيانية الأخرى [27].

8.3 منطقة الدراسة وبيانات البحث:

تمثلت بيانات البحث بمجموعة من الصور الرقمية الناتجة عن أعمال المسح التصويري لمنطقة مساحتها /50/ هكتارًا. تقع منطقة الدراسة في مدينة الرستن بمحافظة حمص في سوريا بين خطي طول ($36^{\circ}43'45''E$ و $36^{\circ}44'19''E$) وخطي عرض ($34^{\circ}55'23''N$ و $34^{\circ}55'46''N$).

من أجل التحضير لأعمال التصوير، تم اختيار وتثبيت وطلاء شبكة مؤلفة من /45/ نقطة مرجعية أرضية تراعي من حيث التباعد والتجانس في التوزيع والتموضع التوصيات العالمية مشكلة شبكة مزلعات جرى رصدها باستخدام محطات رصد متكاملة (Total Station) وأجهزة تسوية رقمية (Digital levels) بما يتوافق مع متطلبات دقاتر الشروط الفنية المعمول بها في الجمهورية العربية السورية.

بعد التحقق من خلو الأرصاد من الأغلاط و الأخطاء النظامية، تمت معالجة عناصر الشبكتين المستوية و الارتفاعية باعتماد مبدأ التربيغات الصغرى (Least Squares Adjustment) وباستخدام برنامج (Star Net) ثم تم حساب وتعديل الإحداثيات المستوية لنقاط الشبكة المرجعية في الإسقاط الستيريوغرافي السوري القاطع، مركزه النقطة ($34.2^{\circ}N$, $39.15^{\circ}E$) على الإهليلج (Clarke 1880 Ellipsoid) في حين تم حساب وتعديل الارتفاعات منسوبة إلى مستوى سطح البحر.



الشكل (5): منطقة الدراسة وتموضع النقاط الأرضية.

استخدمت في أعمال التصوير طائرة دون طيار من نوع Phantom 4 Pro مزودة بكاميرا مدمجة FC6310 بعدها المحرقي $f = 8.8 \text{ mm}$. وتم إجراء التصوير بارتفاع طيران قدره $60/$ متر وبدقة تمييز فعلية 17.7MP وأبعاد بكسل قدرها $2.61\mu * 2.61\mu$.

يمكن إيجاد مسافة الاعتيان الأرضية باستخدام العلاقة التالية:

$$GSD = \frac{H * P}{f} = \frac{6000 * 2.61 * 10^{-4}}{8.8 * 10^{-1}} = 1.78 \text{ cm}$$

لتغطية كامل منطقة العمل، تم التقاط $2462/$ صورة رقمية بنسب تداخل 80% أمامية و 70% جانبية. شكلت الصور الملتقطة مادة أولية للمعالجة باستخدام إحدى برمجيات الرؤية بمعونة الحاسب والتحقق من مدى استجابة دقة المخرجات للمعايير العالمية.

يجدر الإشارة إلى أن منطقة الدراسة والبيانات المستخدمة في هذا البحث هي ذاتها في الدراسة [32] علماً أن بحثنا هذا يختلف عن الدراسة المشار إليها بالنقاط التالية:

- دراسة تأثير عدد نقاط الضبط الأرضية وموثوقيتها على دقة الإرجاع الجغرافي.
- دراسة الترابط بين عدد نقاط الضبط الأرضية ودقة الإرجاع الجغرافي.
- تقديم منهجية لتقييم دقة الـ DEM والـ Orthophoto المستخرجة من المسح التصويري باستخدام الـ (UAVs).

4. منهجية البحث:

تقدم هذه الدراسة إطاراً لتحليل دور نقاط الضبط الأرضية (GCPs) بناءً على التباين في الموثوقية. حيث صمم /9/ سيناريوهات لعدد نقاط الضبط و /4/ سيناريوهات لموثوقية نقاط الضبط لينتج لدينا /36/ سيناريو والتي سيتم مناقشتها جميعاً مع العلم أن نقاط التحقق (Check Points) ستختلف باختلاف عدد نقاط الضبط الأرضية (GCPs) بحيث يكون مجموعهما هو عدد النقاط الكلي وقدره /45/ نقطة.

من المعلوم أنه باستخدام /3/ نقاط ضبط ينتج لدينا حل وحيد وبالتالي سيكون الخطأ المتوسط التربيع RMSE الذي نستخدمه لتقييم الدقة مساوياً للصفر ولذلك تم البدء بـ /5/ نقاط ضبط موزعة طرفياً ومركزياً حيث أن هذا التوزيع أعطى دقة أفضل وموثوقية أعلى من التوزيع الطرفي أو التوزيع المركزي المتكثل نسبة لمساحة المنطقة المدروسة وموثوقية نقاط الضبط [29]. ثم بعد ذلك تم إضافة /2/ نقطة تدريجياً ليصبح عندنا /9/ سيناريوهات مختلفة نسبة لعدد نقاط الضبط.

NO. Senario	NO. GCP	NO. CP
1	5	40
2	7	38
3	9	36
4	11	34
5	13	32
6	15	30
7	17	28
8	19	26
9	21	24

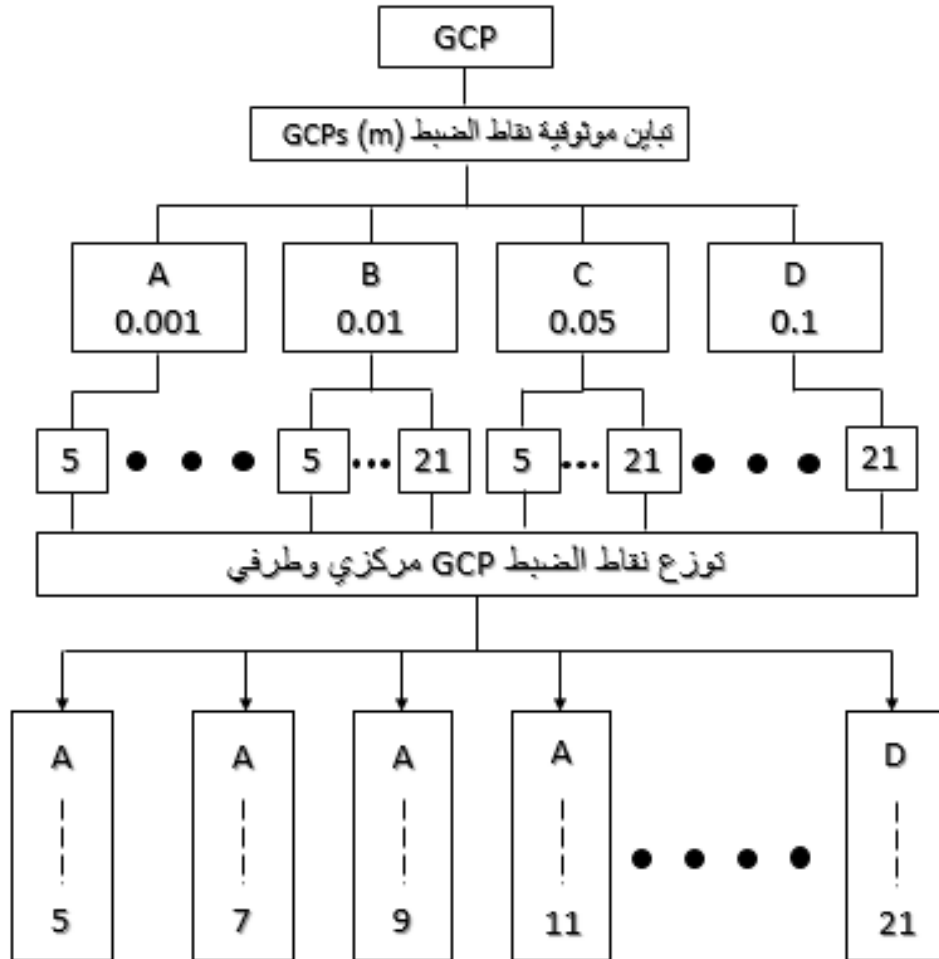
الجدول (2): عدد نقاط الضبط ونقاط التحقق لكل سيناريو.

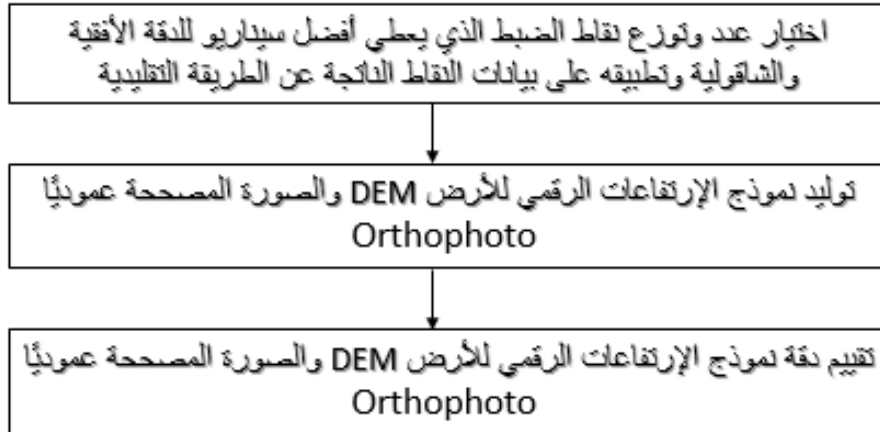
أما السيناريوهات الـ /4/ لتباين موثوقية نقاط الضبط فقد كانت على الشكل التالي:

Senario	RMSE _x "m"	RMSE _y "m"	RMSE _z "m"
A	0.001	0.001	0.001
B	0.01	0.01	0.01
C	0.05	0.05	0.05
D	0.1	0.1	0.1

الجدول (3): موثوقية نقاط الضبط وفق الحالات الأربع.

الشكل التالي يوضح منهجية البحث التي تم العمل عليها:



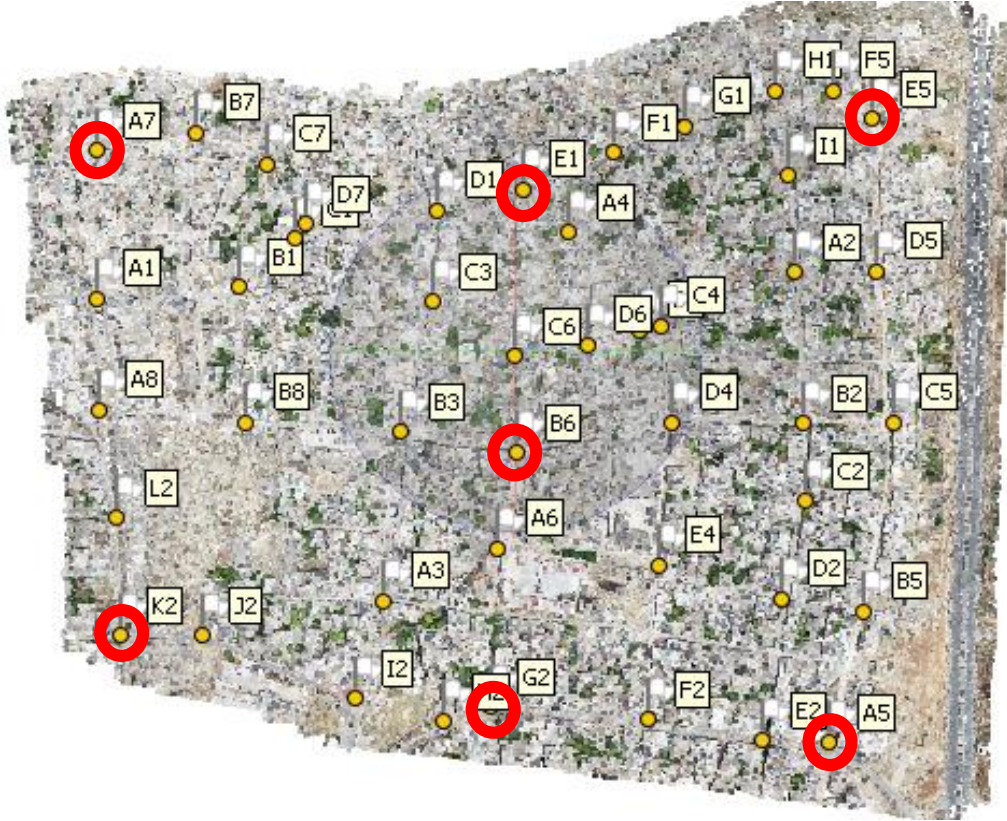


الشكل (6): منهجية البحث والسيناريوهات التي تم العمل عليها وفق تباين موثوقية نقاط الضبط وعددها.

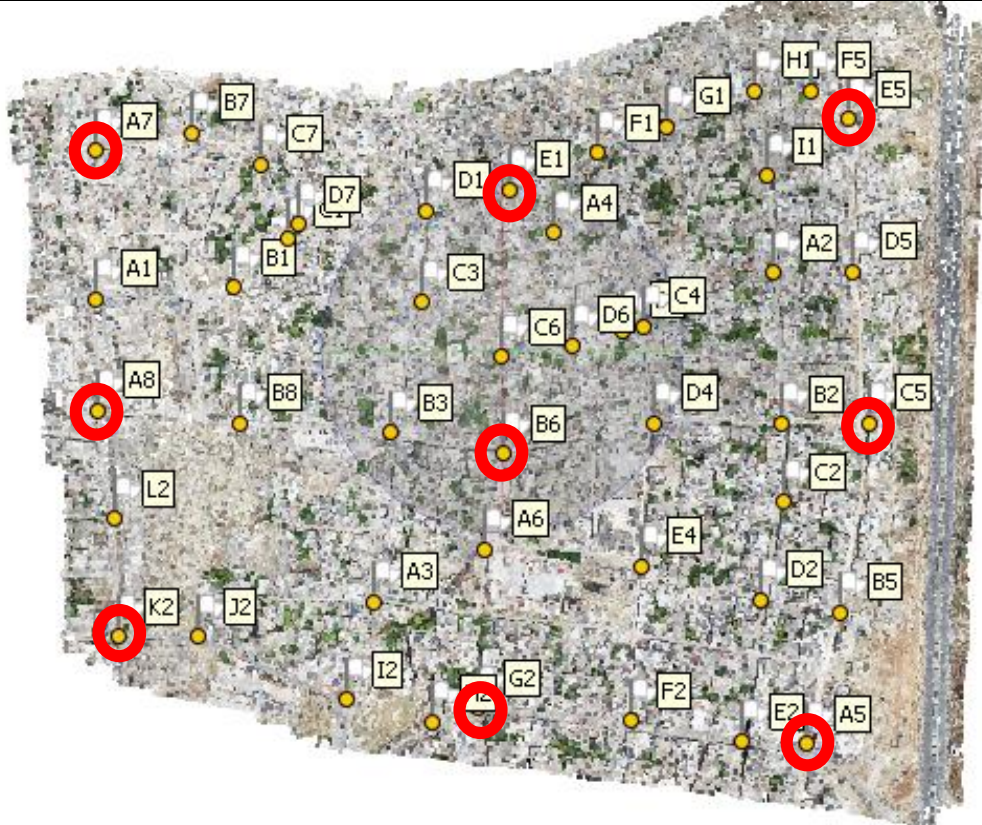
والأشكال التالية توضح السيناريوهات المختلفة لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز عملية التتليث الجوي:



الشكل (7): السيناريو الأول لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التتليث الجوي.



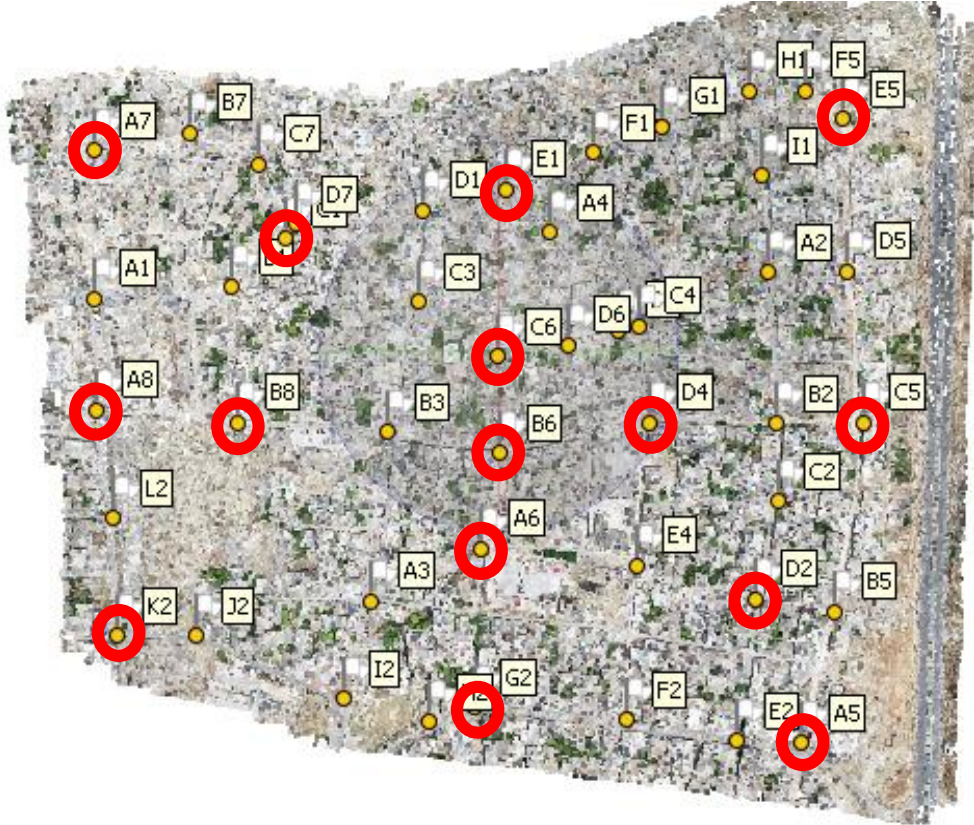
الشكل (8): السيناريو الثاني لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التثليث الجوي.



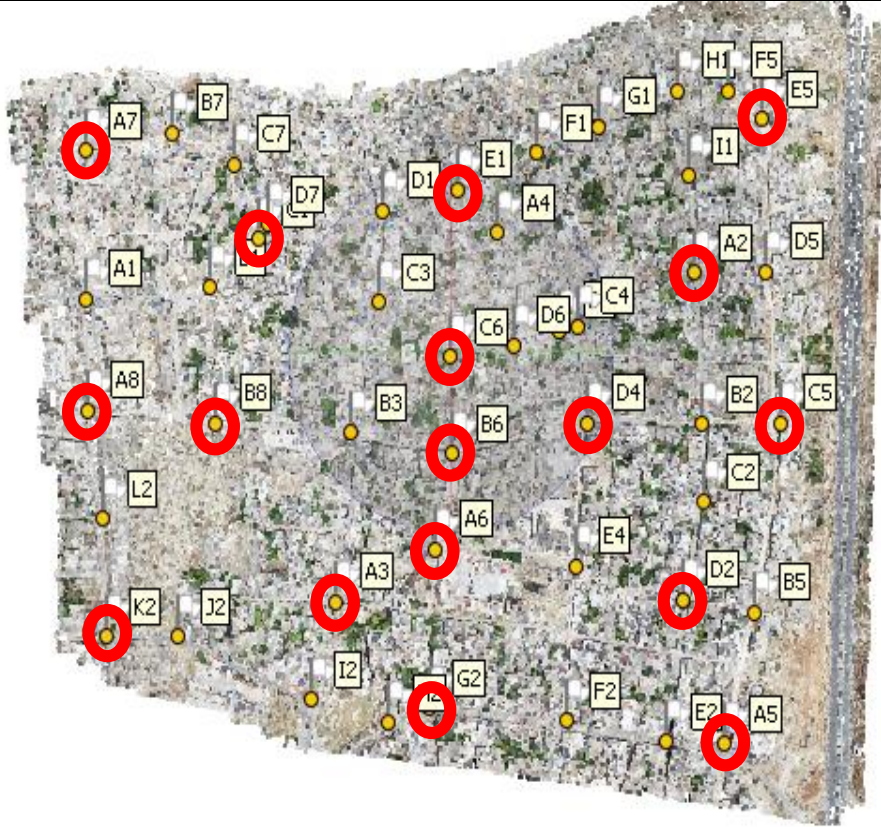
الشكل (9): السيناريو الثالث لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التتاليث الجوي.



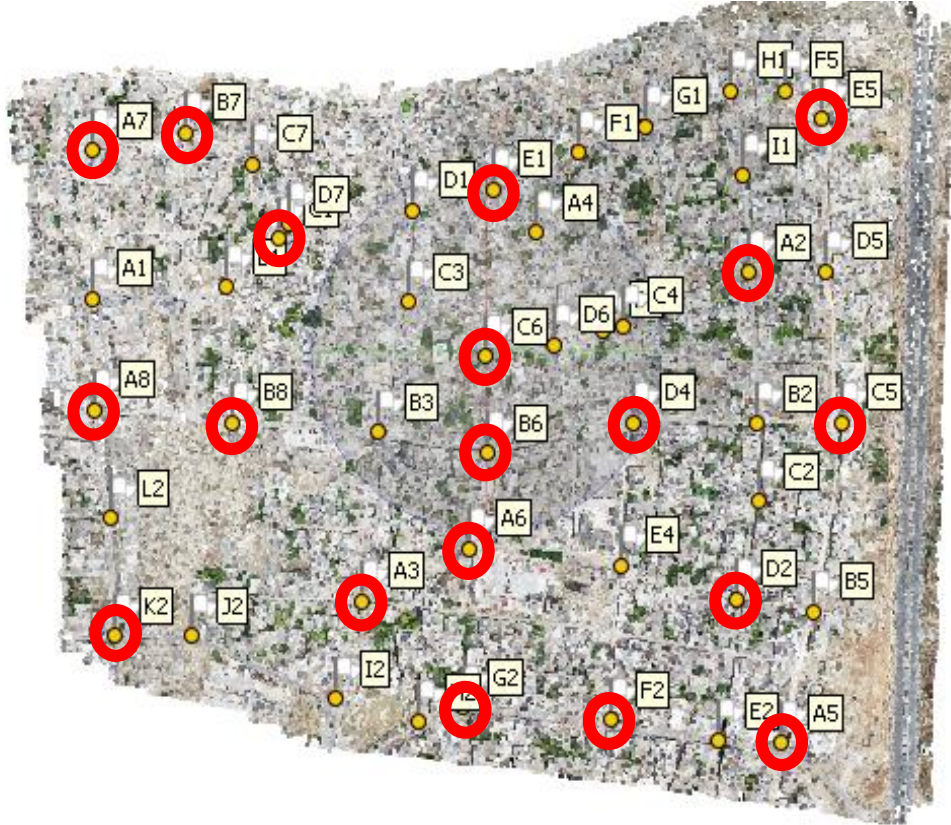
الشكل (10): السيناريو الرابع لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التثبيت الجوي.



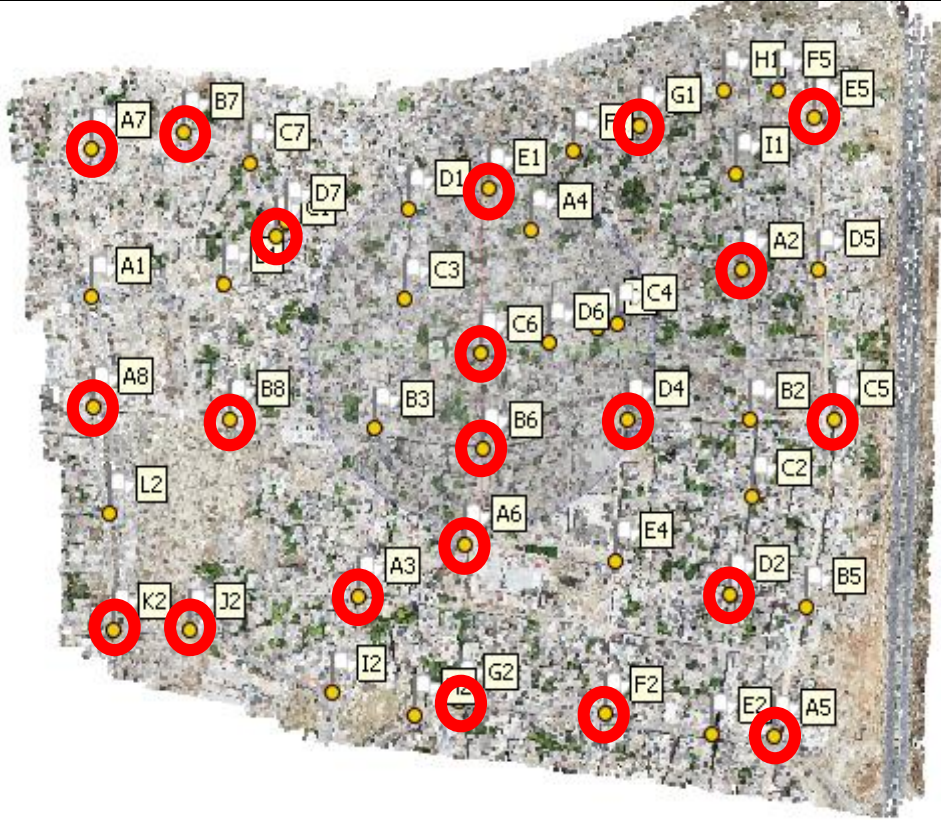
الشكل (12): السيناريو السادس لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التثليث الجوي.



الشكل (13): السيناريو السابع لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التثليث الجوي.



الشكل (14): السيناريو الثامن لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التثليث الجوي.



الشكل (15): السيناريو الثامن لعدد وتوزع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التتليث الجوي.

تم إجراء هذه السيناريوهات جميعها على برنامج Agisoft Metashape والجدول التالي يوضح دقة الإرجاع الجغرافي لكل سيناريو:

		1 mm		1 cm		5 cm		10 cm	
NO.	NO.	RMSxy	RMSz	RMSxy	RMSz	RMSxy	RMSz	RMSxy	RMSz
Senario	GCP	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"
1	5	1.22	4.8	2.4	7	37.3	24.8	141	61.8
2	7	0.9	4.2	1.4	6.3	26.2	21	101	39.4
3	9	0.76	4	1.2	6.4	20.4	20.8	79.7	36.7
4	11	0.76	3.9	1.2	6.4	16.9	21	66	30.7
5	13	0.75	4	1.1	6.6	14.3	21.5	56.2	28.2
6	15	0.74	3.3	1.1	5.7	12.7	21.6	49	29

7	17	0.7	3.3	1	5.6	10.9	21.1	42.7	27.1
8	19	0.7	2.9	1	4.8	10.3	20	39.3	25.9
9	21	0.7	2.5	0.9	3.9	9	17.6	35.2	22.5

الجدول (4): دقة الإرجاع الجغرافي لكل سيناريو قبل التأكد من تبعية البيانات للتوزيع الطبيعي.

ولكن حتى يتم اعتماد هذه القيم يجب التحقق أولاً من أن البيانات المستخدمة تتبع التوزيع الطبيعي وإلا يتم حذف النقاط الشاذة وإعادة حساب RMSE للسيناريو [32].

اختبار شابيرو - ويلك (Shapiro-Wilk test) هو اختبار إحصائي يستخدم لاختبار الفرضية التي تفيد بأن البيانات تتبع توزيعاً طبيعياً. يتم استخدامه بشكل شائع في تحليل البيانات، وخاصة عندما تكون حجم العينة صغير (أقل من 50). يستخدم الاختبار Test Statistics (إحصائية الاختبار) و P-Value (القيمة الاحتمالية) في التحقق من الفرضية الصفرية.

إحصائية الاختبار (Test Statistics) قيمة رقمية تقع بين (0) و (1) يتم حسابها من البيانات وتستخدم في تقييم مدى توافق توزيع البيانات مع التوزيع الطبيعي. كلما اقتربت القيمة من 1، كان توزيع البيانات أقرب إلى التوزيع الطبيعي، وكلما كانت القيمة بعيدة عن 1، دل ذلك على انحراف البيانات عن التوزيع الطبيعي.

إذا كانت القيمة الاحتمالية (P-Value) بنتيجة الاختبار أكبر من ($p > 0.05$) دل ذلك على عدم وجود مبرر لرفض الفرضية الصفرية، وبالتالي يمكن اعتبار البيانات تتبع التوزيع الطبيعي. إذا كانت القيمة ($p \leq 0.05$) هذا يعني رفض الفرضية الصفرية، وبالتالي البيانات لا يمكن اعتبار البيانات تتبع التوزيع الطبيعي [32].

ويتطبيق اختبار شابيرو - ويلك (Shapiro-Wilk test) على البيانات الناتجة عن السيناريوهات الـ 36/ تبين أن السيناريو الذي فيه عدد نقاط الضبط مساوياً لـ 19/ وموثوقية نقاط الضبط /0.01m/ وكذلك السيناريو الذي فيه عدد نقاط الضبط مساوياً لـ 19/ وموثوقية نقاط الضبط /0.1m/ لا تتبع فيهما البيانات للتوزيع الطبيعي .

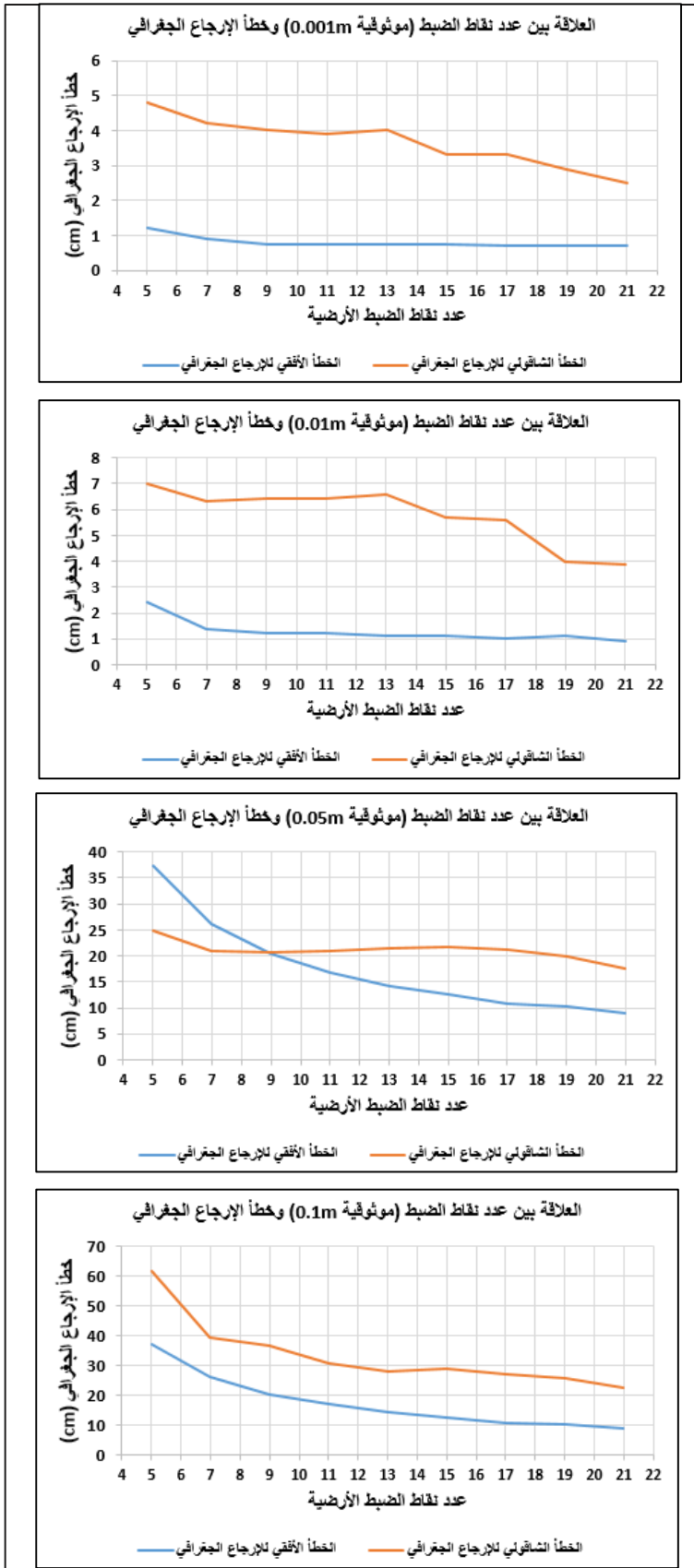
يتم معالجة البيانات التي لا تتبع التوزيع الطبيعي وفق طريقة مخطط الصندوق (Plot Box) حيث تم حذف النقاط الشاذة حتى أصبحت البيانات تتبع التوزيع الطبيعي.

		1 mm		1 cm		5 cm		10 cm	
NO.	NO.	RMSxy	RMSz	RMSxy	RMSz	RMSxy	RMSz	RMSxy	RMSz
Senario	GCP	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"	"cm"
1	5	1.22	4.8	2.4	7	37.3	24.8	141	61.8

2	7	0.9	4.2	1.4	6.3	26.2	21	101	39.4
3	9	0.76	4	1.2	6.4	20.4	20.8	79.7	36.7
4	11	0.76	3.9	1.2	6.4	16.9	21	66	30.7
5	13	0.75	4	1.1	6.6	14.3	21.5	56.2	28.2
6	15	0.74	3.3	1.1	5.7	12.7	21.6	49	29
7	17	0.7	3.3	1	5.6	10.9	21.1	42.7	27.1
8	19	0.7	2.9	1.1	4	10.3	20	39.5	25.8
9	21	0.7	2.5	0.9	3.9	9	17.6	35.2	22.5

الجدول (5): دقة الإرجاع الجغرافي لكل سيناريو بعد التأكد من تبعية البيانات للتوزيع الطبيعي وحذف النقاط الشاذة.

الشكل (16): العلاقة بين عدد نقاط الضبط الأرضية وخطأ الإرجاع الجغرافي في الحالات الأربع لموثوقية نقاط الضبط الأرضية.



الشكل (16): العلاقة بين عدد نقاط الضبط الأرضية وخطأ الإرجاع الجغرافي في الحالات الأربع لموثوقية نقاط الضبط الأرضية.

1.4 دراسة الارتباط Correlations بين عدد نقاط الضبط ودقتها ودقة الإرجاع الجغرافي.

من أجل دراسة الارتباط بين عدد نقاط الضبط ودقة الإرجاع الجغرافي تم استخدام معامل ارتباط بيرسون (Pearson correlation coefficient) وهو مقياس إحصائي يُستخدم لقياس قوة واتجاه العلاقة بين متغيرين.

يعبر عن قوة العلاقة بين المتغيرين من خلال قيم معامل الارتباط التي تتراوح بين -1 و $+1$. القيمة 0 تعني أنه لا يوجد أي ارتباط بين المتغيرين، بينما القيمة $+1$ تعني ارتباطاً إيجابياً تاماً (إذا زاد أحد المتغيرين، زاد الآخر)، والقيمة -1 تعني ارتباطاً سلبياً تاماً (إذا زاد أحد المتغيرين، انخفض الآخر).

أما بالنسبة لاتجاه العلاقة بين المتغيرين يتم التعبير عنها من خلال إشارة قيمة معامل الارتباط فإذا كانت القيمة موجبة، فهناك ارتباط إيجابي (طردي)، وإذا كانت سلبية، فهناك ارتباط سلبي (عكسي).

قوة واتجاه الارتباط بين عدد نقاط الضبط الأرضية والخطأ الأفقي للإرجاع الجغرافي				
RMSE	0.001 m	0.01 m	0.05 m	0.1 m
R	-0.7665	-0.7757	-0.9131	-0.9215

الجدول (6): درجة الارتباط بين عدد نقاط الضبط الأرضية والخطأ الأفقي للإرجاع الجغرافي وفق الحالات الأربع لتباين موثوقية نقاط الضبط الأرضية.

قوة واتجاه الارتباط بين عدد نقاط الضبط الأرضية والخطأ الشاقولي للإرجاع الجغرافي				
RMSE	0.001 m	0.01 m	0.05 m	0.1 m
R	-0.9672	-0.8845	-0.7514	-0.8426

الجدول (7): درجة الارتباط بين عدد نقاط الضبط الأرضية والخطأ الشاقولي للإرجاع الجغرافي وفق الحالات الأربع لتباين موثوقية نقاط الضبط الأرضية.

من الجدول (6) نجد أن:

- وجود ارتباط عكسي بين خطأ الإرجاع الجغرافي وعدد نقاط الضبط أي أن زيادة عدد نقاط الضبط يقلل الخطأ ويعطي نتائج أفضل بالنسبة للدقة الأفقية للإرجاع الجغرافي.
- نلاحظ أن قوة الارتباط بين الخطأ الأفقي للإرجاع الجغرافي وعدد نقاط الضبط تكون منخفضة في حالة الموثوقية العالية لنقاط الضبط وعالية في حالة الموثوقية المنخفضة لنقاط الضبط وهذا يعني أن موثوقية نقاط الضبط تؤثر على عدد نقاط الضبط.

من الجدول (7) نجد أن:

- وجود ارتباط عكسي بين خطأ الإرجاع الجغرافي وعدد نقاط الضبط أي أن زيادة عدد نقاط الضبط يقلل الخطأ ويعطي نتائج أفضل بالنسبة للدقة الشاقولية للإرجاع الجغرافي.
- نلاحظ أن قوة الارتباط بين الخطأ الشاقولي للإرجاع الجغرافي وعدد نقاط الضبط كبيرة في كل من حالتها الموثوقية العالية والمنخفضة لنقاط الضبط وهذا يعني أن موثوقية نقاط الضبط لا تقلل الحاجة إلى عدد نقاط الضبط في الأعمال التي تولي أهمية للدقة الارتفاعية.

وبهذا نكون قد استعرضنا طبيعة العلاقة بين عدد نقاط الضبط وموثوقيتها وبين دقة الإرجاع الجغرافي لتقديم دراسة شاملة ومفصلة في مدى جدوى استخدام هذه التقنية في تكثيف نقاط الأساس الجيوديزي.

2.4 مسافة الإعتيان الأرضية GSD والخطأ المتوسط التربيع RMSE:

لتقييم الدقة المطلقة للتثليث الجوي المنجز بطريقة التعديل بطريقة الحزم للصور الملتقطة باستخدام طائرة دون طيار، فإن المعايير العالمية الخاصة بالبيانات المكانية (National Standard for Spatial Data Accuracy) [12] تقترح استخدام مفهوم GSD حيث يمكن لنا توقع دقة أفقية تتراوح من 1 * GSD إلى 2 * GSD ودقة شاقولية تتراوح من 1 * GSD إلى 3 * GSD من أجل منتجات المسح التصويري باستخدام تقنية UAV-photogrammetry المحسوبة بشكل صحيح.

يتم حساب مسافة الإعتيان الأرضية وفق العلاقة التالية:

$$GSD = \frac{H * P}{f}$$

حيث أن:

H: ارتفاع الطيران.

f: البعد المحرقي لآلة التصوير.

P: أبعاد البكسل.

$$GSD = \frac{6000 \times 2.61 \times 10^{-4}}{8.8 \times 10^{-1}} = 1.78 \text{ cm}$$

		1 mm		1 cm		5 cm		10 cm	
NO. Senario	NO. GCP	$\frac{RMS_{xy}}{GSD}$	$\frac{RMS_z}{GSD}$	$\frac{RMS_{xy}}{GSD}$	$\frac{RMS_z}{GSD}$	$\frac{RMS_{xy}}{GSD}$	$\frac{RMS_z}{GSD}$	$\frac{RMS_{xy}}{GSD}$	$\frac{RMS_z}{GSD}$
1	5	0.69	2.697	1.35	3.93	20.96	13.93	79.21	34.72
2	7	0.51	2.36	0.79	3.54	14.72	11.80	56.74	22.13
3	9	0.43	2.247	0.67	3.60	11.46	11.69	44.78	20.62
4	11	0.43	2.191	0.67	3.60	9.49	11.80	37.08	17.25
5	13	0.42	2.247	0.62	3.71	8.03	12.08	31.57	15.84
6	15	0.42	1.854	0.62	3.20	7.13	12.13	27.53	16.29
7	17	0.39	1.854	0.56	3.15	6.12	11.85	23.99	15.22
8	19	0.39	1.629	0.62	2.25	5.79	11.24	22.19	14.49
9	21	0.39	1.404	0.51	2.19	5.06	9.89	19.78	12.64

الجدول (8): النسبة بين GSD و الـ RMSE لنقاط التحقق (CPs) لكل سيناريو.

بدراسة النسب بين كل من الأخطاء المتوسطة التربيع الأفقية والشاقولية لنقاط التحقق وبين مسافة الإعتيان الأرضية كما هو موضح في الجدول (8) يمكن القول:

- تشير النسب الصغيرة إلى دقة وانسجام النقاط الأرضية المرجعية (نقاط ضبط وتحقق) ومدى ملائمة الإحداثيات الناتجة عن العمل الحقلية للإحداثيات الناتجة عن التثليث الجوي لتلك النقاط كما تشير هذه النسب الصغيرة إلى تماسك النموذج الرقمي ودقة التثليث الجوي بتعديل الحزم حيث قدمت سوية دقة أفقية وارتفاعية عالية للنماذج الرقمية الناتجة الأمر الذي يدعم ملائمتها لتكون أساساً متيناً لتكثيف نقاط الأساس الجيوديزي.
- تشير النسب الكبيرة إلى انخفاض دقة التثليث الجوي وعدم ملائمة السيناريو المستخدم لمتطلبات العمل المساحي.
- قدّم السيناريو رقم /9/ لعدد نقاط الضبط وتوزعها أفضل النسب والتي تشير إلى سوية دقة أفقية وارتفاعية عالية للارجاع الجغرافي.

3.4 تقييم دقة الارجاع الجغرافي Georeferencing والنموذج الرقمي للارتفاعات (DEM) والصورة المصححة

عمودياً (Orthophoto) اعتماداً على السيناريو الأفضل دقة:

اعتماداً على الفقرة (1.4) والفقرة (2.4)، تبين لنا أن السيناريو رقم 9/ والذي تم فيه استخدام 21/ نقطة ضبط و 24/ نقطة تحقق أعطى أفضل النتائج في الحالات الأربع لموثوقية نقاط الضبط (0.001m, 0.01m, 0.05m, 0.1m) واستناداً لهذا فإنه سيتم العمل على نفس المنطقة وفق بيانات الدقة الحقيقية لنقاط الضبط الناتجة عن المسح الأرضي حيث تتراوح الدقة المستوية والارتفاعية لهذه النقاط بين (0.1 ~ 1 cm) مع اعتماد السيناريو رقم 9/ في عدد نقاط الضبط والتحقق وشكل توزيعها وذلك من أجل مناقشة دقة الارجاع الجغرافي واستخراج النماذج الرقمية لمنطقة الدراسة (DEM, Orthophoto) ومناقشة دقتها.

الجدول التالي يوضح احداثيات النقاط الأرضية وموثوقيتها الناتجة عن المسح الأرضي.

Point	X "m"	Y "m"	Z "m"	RMSE _x "m"	RMSE _y "m"	RMSE _z "m"
A1	-221149	83319.22	385.864	0.003	0.005	0.003
A2	-220485	83344.59	425.207	0.003	0.005	0.004
A3	-220873	83025.98	417.228	0.008	0.009	0.003
A4	-220698	83382.93	419.463	0.008	0.009	0.003
A5	-220453	82890.52	431.983	0.01	0.008	0.003
A6	-220765	83077.76	425.844	0.006	0.007	0.001
A7	-221150	83465.03	381.124	0.01	0.008	0.003
A8	-221146	83210.34	389.178	0.003	0.004	0.003
B1	-221011	83330.69	391	0.006	0.007	0.003
B2	-220477	83198.6	429.641	0.005	0.006	0.004
B3	-220857	83189.91	413.96	0.007	0.009	0.003
B4	-220631	83288.23	424.88	0.008	0.008	0.003
B5	-220420	83016.8	430.263	0.007	0.008	0.003
B6	-220747	83169.5	424.815	0.006	0.01	0.002
B7	-221054	83482.4	385.541	0.012	0.008	0.003

B8	-221005	83198.52	399.003	0.006	0.007	0.004
C1	-220959	83377.47	398.48	0.007	0.008	0.004
C2	-220476	83123.12	430.708	0.006	0.008	0.004
C3	-220827	83316.38	413.451	0.007	0.009	0.003
C4	-220612	83292.17	425.538	0.007	0.008	0.003
C5	-220393	83199.6	426.749	0.007	0.007	0.004
C6	-220749	83263.02	420.041	0.008	0.01	0.002
C7	-220986	83451.6	390.992	0.01	0.009	0.003
D1	-220822	83404.32	412.408	0.008	0.008	0.003
D2	-220499	83028.91	430.796	0.007	0.008	0.003
D4	-220601	83198.77	429.398	0.005	0.006	0.002
D5	-220407	83344.84	424.297	0.008	0.008	0.004
D6	-220680	83273.96	424.127	0.009	0.008	0.003
D7	-220948	83392.34	398.065	0.008	0.01	0.004
E1	-220741	83424.85	418.42	0.008	0.009	0.004
E2	-220515	82893.2	432.353	0.008	0.007	0.002
E4	-220614	83061.19	431.071	0.003	0.005	0.001
E5	-220411	83493.16	418.939	0.01	0.009	0.004
F1	-220655	83460.17	421.016	0.008	0.009	0.004
F2	-220624	82912.77	430.845	0.005	0.007	0.002
F5	-220449	83520.8	419.269	0.009	0.008	0.004
G1	-220588	83486.14	418.475	0.008	0.008	0.004
G2	-220771	82924.88	427.057	0.006	0.008	0.003
H1	-220502	83520.02	418.196	0.007	0.007	0.004

H2	-220816	82910.1	425.01	0.008	0.008	0.003
I1	-220492	83437.85	422.55	0.003	0.005	0.004
I2	-220900	82931.78	420.237	0.008	0.008	0.003
J2	-221046	82991.29	403.18	0.008	0.008	0.004
K2	-221125	82990.49	395.781	0.007	0.008	0.003
L2	-221128	83104.62	392.472	0.004	0.005	0.003

الجدول (9): إحدائيات وموثوقية النقاط الأرضية الناتجة عن المسح الأرضي.

☒ تقييم دقة الارجاع الجغرافي:

لتقييم دقة الارجاع الجغرافي، تم معالجة الصور مرة أخرى في برنامج Agisoft Metashape واستخلاص قيم الفروقات فيما بين احدائيات النقاط الناتجة عن المسح الأرضي واحدائيات النقاط الناتجة عن النموذج الرقمي ليتم بعدها التحقق من التوزع الطبيعي لهذه البيانات ومن ثم تحليلها واستخلاص النتائج.

NO.	Point	ΔX "m"	ΔY "m"	ΔZ "m"
1	A2	-0.390	0.095	0.232
2	A3	0.455	0.505	-0.087
3	A5	0.068	0.072	-0.595
4	A6	0.119	0.382	-0.058
5	A7	0.235	0.284	-0.354
6	A8	0.085	0.553	0.151
7	B6	0.446	0.535	-0.008
8	B7	0.537	-0.492	-0.446
9	B8	-0.034	-0.020	-0.068
10	C1	-0.336	0.168	-0.078
11	C5	-0.099	-0.477	0.232
12	C6	-0.571	0.528	0.111
13	D2	-0.298	-0.239	-0.225
14	D4	0.439	-0.160	-0.087
15	E1	-0.963	0.676	0.496

16	E5	0.651	0.598	1.229
17	F2	0.088	-0.141	0.062
18	G1	-0.300	1.232	-0.361
19	G2	0.128	-0.008	0.158
20	J2	0.023	-0.029	0.671
21	K2	-0.596	-0.449	0.673

الجدول(10): الفرق بين احداثيات المسح الأرضي واحداثيات النموذج الرقمي لنقاط الضبط.

NO.	Point	ΔX "m"	ΔY "m"	ΔZ "m"
1	A1	0.136	-0.085	2.251
2	A4	-0.551	0.568	-3.855
3	B1	-0.640	-0.452	0.112
4	B2	0.508	-0.286	-0.660
5	B3	-0.217	-0.171	-1.270
6	B4	0.063	0.340	0.297
7	B5	-0.062	-0.992	-1.398
8	C2	0.744	-0.917	-2.485
9	C3	-0.990	-0.555	0.975
10	C4	0.612	-0.385	-0.797
11	C7	-0.554	-0.731	-1.159
12	D1	-0.484	-0.538	-2.347
13	D5	0.507	0.551	4.599
14	D6	-0.028	0.624	1.727
15	D7	0.374	-0.224	-0.817
16	E2	-0.514	0.155	-1.097
17	E4	-0.382	0.279	-1.507
18	F1	-0.605	0.908	-1.510
19	F5	0.774	1.737	8.240
20	H1	0.492	1.332	3.618
21	H2	0.690	0.407	1.837
22	I1	-0.682	0.978	1.051

23	I2	0.230	-0.306	3.930
24	L2	0.341	-0.502	1.856

الجدول(11): الفرق بين احداثيات المسح الأرضي واحداثيات النموذج الرقمي لنقاط التحقق.

Shapiro-Wilk test	ΔX	ΔY	ΔZ
SW-Stat	0.958980168	0.954261972	0.926998082
P-Value	0.523682232	0.436432671	0.135166294
Normal?	Yes	Yes	Yes

الجدول(12): التحقق من التوزيع الطبيعي لفروقات نقاط الضبط وفق المحاور XYZ.

Shapiro-Wilk test	ΔX	ΔY	ΔZ
SW-Stat	0.924533	0.954814424	0.914877865
P-Value	0.083358	0.366991095	0.051800341
Normal?	Yes	Yes	Yes

الجدول(13): التحقق من التوزيع الطبيعي لفروقات نقاط التحقق وفق المحاور XYZ.

تم التحقق من تبعية البيانات للتوزيع وبناءً على هذا سنقوم بتقييم دقة الارجاع الجغرافي اعتماداً على معيار الخطأ المتوسط التربيع ومقارنته مع الـ GSD:

تحليل فروق احداثيات نقاط الضبط GCPs						
NO. GCPs	NO. CPs	RMSExy "cm"	RMSEz "cm"	GSD "cm"	$\frac{RMSExy}{GSD}$	$\frac{RMSEz}{GSD}$
21	24	0.6	0.4	1.78	0.34	0.22

الجدول(14): النسبة بين دقة الارجاع الجغرافي لنقاط الضبط GCPs والـ GSD.

تحليل فروق احداثيات نقاط التحقق CPs						
NO. GCPs	NO. CPs	RMSExy "cm"	RMSEz "cm"	GSD "cm"	$\frac{RMSExy}{GSD}$	$\frac{RMSEz}{GSD}$
21	24	0.9	2.7	1.78	0.5	1.52

الجدول (15): النسبة بين دقة الارجاع الجغرافي لنقاط التحقق CPs والـ GSD.

تشير النسب إلى دقة وانسجام النقاط الأرضية المرجعية (نقاط ضبط وتحقق) ومدى ملائمة الإحداثيات الناتجة عن المسح الأرضي للإحداثيات الناتجة عن التثليث الجوي لتلك النقاط كما تشير هذه النسب إلى تماسك النموذج الرقمي ودقة التثليث

الجوي بتعديل الحزم حيث قدمت سوية دقة أفقية وارتفاعية عالية للنماذج الرقمية الناتجة الأمر الذي يدعم ملائمتها لتكون أساساً متيناً لتكثيف نقاط الأساس الجيوديزي.

☒ تقييم دقة نموذج الإرتفاعات الرقمي DEM:

توصي معايير ASPRS استخدام /20/ نقطة تحقق شاقولية على الأقل لمنطقة مساحتها 500 km^2 أو أقل من أجل تقييم دقة نموذج الإرتفاعات الرقمي DEM [33]. تبعاً لذلك، تم اقتطاع بيانات الإرتفاع لـ /24/ نقطة من النموذج الرقمي للإرتفاعات ومقارنتها مع ارتفاعات هذه النقاط الناتجة من العمل الحقلي بالطريقة لتقليدية.

Point	المنسوب المرجعي (m)	المنسوب المقتطع من النموذج (m)	الفرق (m)
A1	385.864	385.890	-0.0267
A4	419.463	419.490	-0.0268
B1	391.000	391.034	-0.0341
B2	429.641	429.652	-0.0112
B3	413.960	413.977	-0.0171
B4	424.880	424.898	-0.0180
B5	430.263	430.281	-0.0175
C2	430.708	430.718	-0.0105
C3	413.451	413.483	-0.0323
C4	425.538	425.565	-0.0271
C7	390.992	391.013	-0.0208
D1	412.408	412.442	-0.0341
D5	424.297	424.338	-0.0408
D6	424.127	424.157	-0.0303
D7	398.065	398.083	-0.0176
E2	432.353	432.373	-0.0203
E4	431.071	431.095	-0.0245
F1	421.016	421.041	-0.0246
F5	419.269	419.307	-0.0381
H1	418.196	418.228	-0.0318
H2	425.010	425.038	-0.0277
I1	422.550	422.573	-0.0233
I2	420.237	420.282	-0.0447
L2	392.472	392.510	-0.0390

الجدول (16): المناسيب المرجعية والمقتطعة من الـ DEM لنقاط التحقق المستخدمة في تقييم الـ DEM.

ويعد التأكد من أن هذه البيانات تتبع التوزيع الطبيعي وفق اختبار شايبرو - ويلك تم العمل على إيجاد دقة النموذج الرقمي للإرتفاعات من معيار الخطأ المتوسط التربيع الذي يتم حسابه وفق العلاقة:

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \Delta Z_i^2}{n}}$$

$$\Delta Z_i = Z_{reference(i)} - Z_{DEM(i)}$$

$$RMSE_z = \sqrt{\frac{0.018932828}{24}} = 2.8 \text{ cm}$$

☒ تقييم الصورة المصححة عمودياً Orthophoto:

لتقييم الصورة المصححة عمودياً Orthophoto تم استخراج الـ Orthophoto من البرنامج ثم تم تصديره إلى برنامج ArcGIS حيث قمنا بقياس نقاط التحقق بشكل يدوي على الـ Orthophoto. نتائج القياس موضحة في الجدول التالي.

	X Refrence "m"	Y Refrence "m"	X Ortho "m"	Y Ortho "m"	ΔX "m"	ΔY "m"
A1	-221149.2654	83319.2183	-221149.262	83319.226	-0.0034	-0.0077
A4	-220697.8714	83382.9254	-220697.858	83382.935	-0.0134	-0.0096
B1	-221011.0415	83330.6914	-221011.035	83330.691	-0.0065	0.0004
B2	-220477.2055	83198.5989	-220477.19	83198.589	-0.0155	0.0099
B3	-220856.6842	83189.9128	-220856.68	83189.913	-0.0042	-0.0002
B4	-220630.5739	83288.23	-220630.547	83288.213	-0.0269	0.017
B5	-220420.3545	83016.8009	-220420.344	83016.792	-0.0105	0.0089
C2	-220475.6079	83123.1231	-220475.597	83123.124	-0.0109	-0.0009
C3	-220826.5439	83316.382	-220826.554	83316.377	0.0101	0.005
C4	-220611.9576	83292.1732	-220611.968	83292.163	0.0104	0.0102
C7	-220986.3485	83451.5996	-220986.354	83451.602	0.0055	-0.0024

D1	-220821.7732	83404.3151	-220821.777	83404.316	0.0038	-0.0009
D5	-220407.4748	83344.8389	-220407.469	83344.822	-0.0058	0.0169
D6	-220680.2482	83273.9547	-220680.246	83273.958	-0.0022	-0.0033
D7	-220948.478	83392.3432	-220948.482	83392.357	0.004	-0.0138
E2	-220515.4131	82893.1971	-220515.42	82893.201	0.0069	-0.0039
E4	-220613.5349	83061.1932	-220613.546	83061.201	0.0111	-0.0078
F1	-220655.4426	83460.1662	-220655.445	83460.18	0.0024	-0.0138
F5	-220448.6031	83520.7949	-220448.56	83520.804	-0.0431	-0.0091
H1	-220501.9056	83520.0205	-220501.895	83520.03	-0.0106	-0.0095
H2	-220815.5373	82910.0968	-220815.522	82910.09	-0.0153	0.0068
I1	-220491.8232	83437.8525	-220491.817	83437.874	-0.0062	-0.0215
I2	-220899.6195	82931.7766	-220899.616	82931.772	-0.0035	0.0046
L2	-221128.1327	83104.6244	-221128.148	83104.612	0.0153	0.0124

الجدول (17): إحداثيات النقاط المرجعية والمقاسة من الـ Orthophoto المستخدمة في تقييم دقة الـ Orthophoto.

تم التأكد من أن الفروقات $(\Delta X, \Delta Y)$ تتبع التوزيع الطبيعي وأن البيانات على المحورين X و Y مستقلة وغير مرتبطة.

Shapiro-Wilk test	ΔX	ΔY
SW-Stat	0.931634	0.977164
P-Value	0.118625	0.852652
Normal?	Yes	Yes

الجدول (18): اختبار شابيرو - ويلك للتأكد من التوزيع الطبيعي للفروقات على المحورين X و Y.

Correlation between x&y	-0.01508
-------------------------	----------

الجدول (19): قوة وجهة الترابط بين الفروقات على المحورين X و Y.

وبهذا أصبح بالإمكان حساب الخطأ المتوسط التربيع للبيانات وفق المحورين X و Y وذلك من أجل تقييم دقة الـ Orthophoto وفق العلاقة التالية:

$$\text{Accuracy} = \frac{2.4477 \sqrt{\text{RMSE}_x^2 + \text{RMSE}_y^2}}{2}$$

$$\text{Accuracy} = \frac{2.4477\sqrt{0.000184112 + 0.000098509}}{2} = 2.1 \text{ cm}$$

النتائج والمناقشة:

استنادًا إلى كل ما قدم، يمكن استخلاص النتائج التالية:

1. يمكن لعدد كافٍ من نقاط الضبط الأرضية (GCPS) أن يُحسّن دقة الإرجاع الجغرافي بشكل كبير، إلا أن الإفراط في استخدامها يؤدي إلى التكرار.
2. تؤثر موثوقية نقاط الضبط الأرضية GCPS بشكل كبير على دقة الإرجاع الجغرافي حيث كلما زادت موثوقية نقاط الضبط أعطت دقة مكانية أفضل.
3. إن زيادة موثوقية نقاط الضبط يقلل الحاجة إلى عدد نقاط الضبط الأرضية وهذا ما يحقق هدفًا من أهداف الدراسة حيث أن تقليل عدد نقاط الضبط الأرضية يساعد في تخفيف الكلفة وزيادة في سرعة العمل وهذا ما يعطي جدوى وفعالية لهذه التقنية المختبرة.
4. من خلال تحليل فروق إحداثيات نقاط التحقق (CPS) إحصائياً (الجدول 8):
 - في حالة موثوقية عالية لنقاط الضبط، تمكن البحث من الوصول إلى دقة أفقية تعادل /0.39/ من قيمة مسافة الإعتيان الأرضية ودقة ارتفاعية تعادل /1.4/ من قيمة مسافة الإعتيان الأرضية باستخدام /21/ نقطة ضبط وهذا ما يشير إلى جودة توزيع وانسجام وتجانس شبكة النقاط الأرضية المرجعية وسوية الدقة (المستوية والإرتفاعية) الرفيعة التي تتمتع بها المخرجات الرقمية والتي تتفوق على المعايير والحدود المنصوص عليها في الكثير من الأدبيات التقنية الموافقة الأمر الذي يدعم صلاحية وأفضلية تلك المخرجات لتكون أساساً لتكثيف نقاط الأساس الجيوديزي لتمثل بديلاً ثورياً لأعمال الرفع والتوقيع الطبوغرافي بالأساليب التقليدية المتبعة.
 - في حالة موثوقية منخفضة لنقاط الضبط، توصل البحث إلى دقة أفقية تعادل /19.78/ من قيمة مسافة الإعتيان الأرضية ودقة ارتفاعية تعادل /12.64/ من قيمة مسافة الإعتيان الأرضية باستخدام /21/ نقطة ضبط وهذا ما يشير إلى عدم جودة المخرجات الرقمية الناتجة عن هذه السوية من دقة نقاط الضبط الأرضية وهذا يؤكد ما قلناه سابقاً عن قوة تأثير موثوقية نقاط الضبط على جودة المنتجات الرقمية باستخدام الطائرات المسيّرة.
5. باستخدام مجموعة من النقاط الأرضية (/21/ نقطة ضبط و /24/ نقطة تحقق) والتي تم الحصول عليها باستخدام المسح الأرضي والتي كانت دقتها المستوية والإرتفاعية (1 cm ~ 0.1) وباعتماد التوزيع الطرفي والمركزي لهذه النقاط كانت النتائج على الشكل التالي:
 - بلغت الدقة الأفقية للتثليث الجوي /0.9 cm/ بينما بلغت الدقة الإرتفاعية /2.7 cm/.

- بلغت الدقة الشاقولية للنموذج الرقمي للإرتفاعات DEM المنتج من صور الطائرات المسيرة 2.8/ cm/ والتي تم تقييمها وفق معايير ASPRS بعد إجراء الإختبارات الإحصائية اللازمة.
 - بلغت الدقة الأفقية لـ Orthophoto المنتج من صور الطائرات المسيرة 2.1 cm/ والتي تم تقييمها وفق معايير ASPRS بعد إجراء الإختبارات الإحصائية اللازمة.
6. أظهرت النتائج السابقة، مع الأخذ بعين الاعتبار نتائج أبحاث سابقة، كفاءة التقنية المختبرة وتليبتها لمعايير الجودة من زمن وكلفة وسوية رفيعة في الدقة المستوية والارتفاعية كما أظهرت النتائج استجابة فائقة للمعايير المنصوص عليها في الكثير من الأدبيات العالمية ذات الصلة، الأمر الذي يدعم صلاحية و أفضلية المخرجات الرقمية لهذه التقنية كأساس لتكثيف نقاط الأساس الجيوديزي في سورية وفق سوية الدقة التي تم الوصول إليها.

التوصيات:

نوصي في نهاية هذا البحث بما يلي:

1. إنجاز بحث متكامل يناقش جميع العوامل المؤثرة على دقة التثليث الجوي باستخدام الطائرات المسيرة (أسلوب الإسناد الجغرافي، التصوير المائل، تضاريس المنطقة وميولها وانحداراتها، عدد نقاط الضبط وتوزيعها وموثوقيتها، تغير ارتفاع الطيران، تغير نسب التداخل الأمامي والجانبى، الأخطاء التقنية، برامج المعالجة، وغيرها).
2. استخدام عدد ثابت لنقاط التحقق بمعزل عن نقاط الضبط بحيث تكون موزعة بشكل مسبق على كامل منطقة الدراسة وذلك من أجل تقييم أفضل للنماذج الرقمية.
3. تحديث دفتر الشروط الفنية الخاص بالأعمال الطبوغرافية في الجمهورية العربية السورية بحيث يشمل جزءاً خاصاً بمعايير تقييم دقة منتجات الطائرات المسيرة.

المراجع:

1. Villi, O., and M. Yakar. 2024. "Sensor Technologies in Unmanned Aerial Vehicles: Types and Applications." *Advanced UAV* 4 (1): 1–18. <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/uav/article/view/1538>.
2. Agüera–Vega, F., F. Carvajal–Ramírez, and P. Martínez– Carricondo. 2017a. "Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry." *Journal of Surveying Engineering* 143 (2): 04016025. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SU.1943-5428.0000206](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SU.1943-5428.0000206).
3. Agüera–Vega, F., F. Carvajal–Ramírez, and P. Martínez– Carricondo. 2017b. "Assessment of Photogrammetric Map Accuracy Based on Variation Ground Control Points Number Using Unmanned Aerial Vehicle." *Measurement* 98:221–227. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.12.00>.
4. Jiménez, S. I., W. Ojeda–Bustamante, M. D. J. Marcial– Pablo, and J. Enciso. 2021. "Digital Terrain Models Generated with Low–Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy." *ISPRS International Journal of Geo–Information* 10 (5): 285. <https://doi.org/10.3390/ijgi10050285>.
5. Cabo, C., E. Sanz–Ablanedo, J. Roca–Pardiñas, and C. Ordóñez. 2021. "Influence of the Number and Spatial Distribution of Ground Control Points in the Accuracy of UAV–SfM DEMs: An Approach Based on Generalized Additive Models." *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing* 59 (12): 10618–10627. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2021.3050693>.
6. James, M. R., S. Robson, S. d’Oleire–Oltmanns, and U. Niethammer. 2017. "Optimizing UAV Topographic Surveys Processed with Structure–From–Motion: Ground Control Quality, Quantity and Bundle Adjustment." *Geomorphology* 280:51–66. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.11.021>.
7. Cirillo, D., F. Cerritelli, S. Agostini, S. Bello, G. Lavecchia, and F. Brozzetti. 2022. "Integrating Post–Processing Kinematic (PPK)–Structure–from–motion (SfM) with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry and Digital Field Mapping for Structural Geological Analysis." *ISPRS International Journal of Geo– Information* 11 (8): 437. <https://doi.org/10.3390/ijgi11080437>.

8. Padró, J.-C., F.-J. Muñoz, J. Planas, and X. Pons. 2019. "Comparison of Four UAV Geo-Referencing Methods for Environmental Monitoring Purposes Focusing on the Combined Use with Airborne and Satellite Remote Sensing Platforms." *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 75:130–140. Mar. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.10.018>.
9. Štroner, M., R. Urban, J. Seidl, T. Reindl, and J. Brouček. 2021. "Photogrammetry Using UAV-Mounted GNSS RTK: Geo-Referencing Strategies without GCPs." *Remote Sensing* 13 (7): 1336. <https://doi.org/10.3390/rs13071336>
10. Jaud, M., S. Bertin, M. Beauverger, E. Augereau, and C. Delacourt. 2020. "RTK GNSS-Assisted Terrestrial SfM Photogrammetry without GCP: Application to Coastal Morphodynamics Monitoring." *Remote Sensing* 12 (11): 1889. <https://doi.org/10.3390/rs12111889>.
11. Sanz-Ablanedo, E., J. H. Chandler, J. R. Rodríguez-Pérez, and C. Ordóñez. 2018. "Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used." *Remote Sensing* 10 (10): 1606. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>.
12. Fernández-Hernandez, J., D. González-Aguilera, P. Rodríguez-González, and J. Mancera-Taboada. 2015. "Image-Based Modelling from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Photogrammetry: An Effective, LowCost Tool for Archaeological Applications." *Archaeometry* 57 (1): 128–145. <https://doi.org/10.1111/arcm.12078>.
13. Ferrer-González, E., F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, and P. Martínez-Carricondo. 2020. "UAV Photogrammetry Accuracy Assessment for Corridor Mapping Based on the Number and Distribution of Ground Control Points." *Remote Sensing* 12 (15): 2447. <https://doi.org/10.3390/rs12152447>.
14. Stott, E., R. D. Williams, and T. B. Hoey. 2020. "Ground Control Point Distribution for Accurate Kilometre-Scale Topographic Map Using an RTK-GNSS Unmanned Aerial Vehicle and SfM Photogrammetry." *Drones* 4 (3): 55. <https://doi.org/10.3390/drones4030055>.
15. Rangel, J. M. G., G. R. Gonçalves, and J. A. Pérez. 2018. "The Impact of Number and Spatial Distribution of GCPs on the Positional Accuracy of Geospatial

- Products Derived from Low-Cost UAVs.” *International Journal of Remote Sensing* 39 (21): 7154–7171. <https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1515508>.
16. Martínez-Carricondo, P., F. Agüera-Vega, F. Carvajal-Ramírez, F. Mesas-Carrascosa, A. García-Ferrer, and F. Pérez-Porras. 2018. “Assessment of UAV-Photogrammetric Mapping Accuracy Based on Variation of Ground Control Points.” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 72:1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.05.015>.
17. Santos Santana, L., G. Araújo E Silva Ferraz, D. Bedin Marin, B. Dienevam Souza Barbosa, L. Mendes Dos Santos, P. Ferreira Ponciano Ferraz, L. Conti, S. Camiciottoli, and G. Rossi. 2021. “Influence of Flight Altitude and Control Points in the Geo-Referencing of Images Obtained by Unmanned Aerial Vehicle.” *European Journal of Remote Sensing* 54 (1): 59–71. <https://doi.org/10.1080/22797254.2020.1845104>.
18. Sanz-Ablanedo, E., J. H. Chandler, J. R. Rodríguez-Pérez, and C. Ordóñez. 2018. “Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM Photogrammetry Survey as a Function of the Number and Location of Ground Control Points Used.” *Remote Sensing* 10 (10): 1606. <https://doi.org/10.3390/rs10101606>.
19. Mancini, F., M. Dubbini, M. Gattelli, F. Stecchi, S. Fabbri, and G. Gabbianelli. 2013. “Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for High Resolution Reconstruction of Topography: The Structure from Motion Approach on Coastal Environments.” *Remote Sensing* 5 (12): 6880–6898. <https://doi.org/10.3390/rs5126880>.
20. Harwin, S., A. Lucieer, and J. Osborn. 2015. “The Impact of the Calibration Method on the Accuracy of Point Clouds Derived Using Unmanned Aerial Vehicle Multi-View Stereopsis.” *Remote Sensing* 7 (9): 11933–11953. Sep. <https://doi.org/10.3390/rs70911933>.
21. Smith, M. W., J. L. Carrivick, and D. J. Quincey. 2015. “Structure from Motion Photogrammetry in Physical Geography.” *Progress in Physical Geography* *Progress in Physical Geography: Earth and Environment* 40 (2): 247–275. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>.

22. Federal Geographic Data Committee [FGDC]. Revision of Geospatial Positioning Accuracy Standards, Part 3. National Standard for Spatial Data Accuracy fgdc-std-007.3- 1998. FGDC standard projects [http://www.Fgdc.Gov/standards/projects/fgdc-standardsprojects/accuracy/part3/nssda-revision-proposal\(26December2013\)](http://www.Fgdc.Gov/standards/projects/fgdc-standardsprojects/accuracy/part3/nssda-revision-proposal(26December2013)).
23. HOHLE, J., HOHLE, M- Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods-. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol 64, No 4, 2009, PP. 398-406.
24. ZOMRAWI, N., HUSSIEN, M., MOHAMED, H- Accuracy evaluation of digital aerial triangulation-. International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT), Vol 2, No 10, 2013, PP. 7-11.
25. Alkhalil. O. (2019). Proposition of a Methodology to Assess Photo-triangulation and Dens Matching Algorithms Accuracy in Image-based 3D Documentation Systems. Latakia University Journal for Research and Scientific Studies – Engineering Sciences Series Vol. (14) No. (5) 2940. [in Arabic].
26. 22February2025. <<https://www.esri.com/en-us/arcgis/geospatial/platform/overview> .
27. NCSS 2021 Statistical Software (2021). NCSS, LLC. Kaysville, Utah, USA, ncss.com/software/ncss.
28. SAI, S., TIAHJADI, M., ROKHMANNNA, A- Geometric accuracy assessments of orthophoto production from UAV aerial Images-. KnE Engineering, 2019, pp. 333-344.
29. Haonan Zhong, Yansong Duan, Pengjie Tao & Zuxun Zhang (17 Jan 2025): Influence of ground control point reliability and distribution on UAV photogrammetric 3D mapping accuracy, Geo-spatial Information Science.
30. Fahsa, E. (1998). The Geodesy(2). Latakia University Publications. [in Arabic].
31. Alkhalil. O. (2012). The Photogrammetry(2). Latakia University Publications. [in Arabic].
32. Aloumar, A.(2025). Accuracy Assessment of Digital Model Construction as a Basis for Topographic Mapping in Drone Photogrammetry- An Analytical Study in

Syrian Conditions. Journal of Homs University – Civil and Architectural Engineering Sciences Series – Volume (47), NO (3), 2025.[in Arabic].

33. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) (1990). Accuracy Standards for Digital Geospatial Data.