تقييم دقة بناء النماذج الرقمية كأساس لإنتاج الخرائط الطبوغرافية في تقنية المسح التصويري باستخدام الطائرات المسيرة – دراسة إحصائية تحليلية في ظروف سورية

الدكتور المهندس أحمد عبده العمر–أستاذ مساعد– قسم الهندسة الطبوغرافية– كلية الهندسة المدنية–جامعة حمص

ملخص

تُستخدم في سوريا مختلف الأساليب والتقنيات المتنوعة، سواء منها الأرضية أو الجوية أو الفضائية، لاستحواذ البيانات المكانية و ذلك بهدف إنتاج الخرائط الطبوغرافية، لا سيما الكبيرة منها (المقياس 1/1000 أو أكبر).

لاقى تطبيق تقنية المسح التصويري باستخدام الطائرات دون طيار (الطائرات المسيرة– الدرونات) في إنجاز العديد من مشاريع الرفع الطبوغرافي في السنوات الأخيرة نجاحاً كبيراً، و أثبت تفوقاً ملفتاً على الأساليب التقليدية في معايير الأداء من زمن و كلف و ملاءة فنية.

يعرض البحث دراسة تحليلية إحصائية تهدف إلى تقييم دقة المخرجات الرقمية المكانية لتقنية المسح التصويري باستخدام الطائرات المسيرة (Drone Photogrammetry)، كغمائم النقاط (Point clouds) والنماذج الرقمية للارتفاعات (DTMs) و خرائط الصور المصححة عمودياً (Orthomosaic)، و التحقق من مدى توافقها مع معايير الدقة المعمول بها عالمياً و ملاءمتها للاستجابة اللاحقة لشروط وضع الخرائط الطبوغرافية في سورية، و ذلك باستخدام عينة رصينة من الأعمال التي قام الباحث بتنفيذها لأحد أحياء مدينة الرستن في محافظة حمص.

من خلال دراسة العينة، و بتحليل فروق إحداثيات نقاط التحكم (Ground Control Points) إحصائياً، أعطى البحث دقة أفقية تعادل 0.04 من قيمة مسافة الاعتيان الأرضية و دقة ارتفاعية تعادل 0.03 من مسافة الاعتيان.

من خلال تحليل فروق إحداثيات نقاط التحقق(Check Points) إحصائياً أعطى البحث دقة أفقية تعادل 0.54 من قيمة مسافة الاعتيان الأرضية و دقة ارتفاعية تعادل 1.1 من مسافة الاعتيان.

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 لإنجاز المخططات الطبوغرافية بمقاييس كبيرة في سورية.

دلل البحث على فعالية و جدوى و موثوقية توطين التقنية و لزوم العمل على تطوير معايير وطنية للعمل بها تلائم شروط و متطلبات العمل المساحي في سورية.

كلمات مفتاحية: طائرات دون طيّار، تثليث جوي، النماذج الرقمية، الدقة المكانية، مسافة الاعتيان الأرضية.

Accuracy Assessment of Digital Model Construction as a Basis for Topographic Mapping in Drone Photogrammetry- An Analytical Study in Syrian Conditions

Dr. Eng. Ahmad AlOumar - Associate Professor - Department of Topographic Engineering - Faculty of Civil Engineering - Al-Baath University.

Abstract

In Syria, a variety of methods and techniques—terrestrial, aerial, and satellite—are employed for spatial data acquisition to produce topographic maps across multiple scales, with particular emphasis on larger scales (1:1000 or greater).

The recent adoption of drone photogrammetry for topographic and other mapping purposes has been highly successful, demonstrating significant superiority over traditional methods in performance metrics such as time, cost, and technical adequacy.

This research presents an analytical statistical study aiming to evaluate the accuracy of digital spatial outputs of Drone Photogrammetry, such as Point Clouds, Digital Terrain Models (DTMs), and Orthomosaic, and verifying their compliance with internationally recognized accuracy standards and their suitability for subsequent topographic mapping requirements in Syria, using a robust sample of projects executed by the researcher for a neighborhood of AlRastan city in Homs governorate.

Studying the sample and statistically analyzing the coordinate differences of Ground Control Points (GCPs), the research yielded a horizontal accuracy equivalent to 0.04 of the Ground Sampling Distance (GSD) and a vertical accuracy equivalent to 0.03 of the GSD.

Through statistical analysis of the coordinate differences of Check Points (CPs), the research provided a horizontal accuracy equivalent to 0.54 of the GSD and a vertical accuracy equivalent to 1.1 of the GSD.

The results highlighted an exceptional compliance with the standards adopted in many relevant international literatures, thus supporting the validity and superiority of the digital outputs of this technology as a basis for producing large-scale topographic maps in Syria.

The research demonstrated the effectiveness, feasibility, and reliability of embracing the technology and the necessity of developing national standards for its use that suit the conditions and requirements of surveying work in Syria.

Keywords: Drones/UAVs, Phototriangulation, Digital Models, Spatial Accuracy, Ground Sampling Distance (GSD).

1. مقدمة:

منذ بداية العقد الأول من القرن الواحد والعشرين، يشهد استخدام الطائرات دون طيار (UAV –الطائرات المسيرة–الدرونات) منخفضة التكلفة، طيعة الأداء في استحواذ البيانات المكانية، نمواً متسارعاً. تمثل الطائرات المسيرة منصة رشيقة يجري تشغيلها والتحكم بها عن بعد ويمكنها حمل طيف من المستشعرات يتراوح بين الكاميرات الرقمية المدمجة والكاميرات الطيفية والحرارية والماسحات الليزرية ومستشعرات اللايدر وغيرها، ويعتمد استخدام أي من هذه المستشعرات على الغاية المرجوة من وراء استحواذ البيانات [1, 2, 4, 5].

تحقق تقنية المسح التصويري باستخدام هذه المركبات الصغيرة مكاسب أساسية منها: خفض الكلفة الأولية للاستثمار، انخفاض تكلفة التشغيل والاستخدام، والتقليص الحاد في الزمن اللازم لاستحواذ و معالجة البيانات[6-7]، ويمكنها الإسهام بإنتاج طيف واسع من المخرجات الرقمية المتطورة كالخرائط الشعاعية و مخططات الصور المصححة عمودياً، والخرائط الموضوعية، والنماذج ثلاثية الأبعاد للمعالم، والنماذج الرقمية للأسطح والتضاريس وغيرها.

يعد إنجاز أعمال المسح و إنتاج الخرائط الطبوغرافية، كبيرة المقياس منها على وجه الخصوص، أحد أكثر تطبيقات هذه التقنية أهمية للمجتمعات الهندسية و التنموية. لإنتاج المخططات الطبوغرافية بالمقاييس المطلوبة في هذه التقنية، يتم استيراد مخططات الصور المصححة عمودياً إلى أي من بيئة الرسم بمعونة الحاسب (Auto CAD) أو نظم المعلومات الجغرافية (GIS) كخلفية لتعقب المعالم المستوية و تمثيلها بالطريقة والرموز المعتمدة، و يتم استخدام نماذج الارتفاعات الرقمية (DTM) لاستقراء مناسيب مصفوفة عريضة من نقاط الأرض الطبيعية المميزة والمنتقاة بما يؤمن تمثيلاً صادقاً لتضاريس المكان[8, 9] .

تعتمد جودة المنتجات الرقمية للمنطقة المدروسة على عدة عوامل أهمها التخطيط السليم لمهام استحواذ الصور، بما يلبي المعايير الموسومة في المنتج المطلوب، و الإدارة الناجحة لأعمال التصوير و التأسيس المتين و الموثوق لشبكة النقاط الأرضية المرجعية بما يؤمن مقدرات أمثلية لعناصر توجيه و إرجاع النماذج الرقمية من خلال تنفيذ عملية التثليث

الضوئي (Phototriangulation) بالتعديل الحزمي (Bundle Adjustment) في بيئة رؤية حاسوبية (Computer Vision) مختارة لمعالجة الصور المستحوذة [5, 10, 11, 12].

مع تزايد الاهتمام المهني و البحثي باستخدام تقنية المسح باستخدام الطائرات المسيرة، و ثبوت جدوى اعتمادها في سورية كأداة لجمع البيانات بغرض إنتاج النماذج المكانية لمختلف الأغراض الهندسية [1, 9]، تبرز الحاجة ملحة إلى دراسة مدى استجابة مخرجات هذه التقنية لمتطلبات الدقة المطلوبة في المعايير العالمية و إمكانية تلبيتها لاشتراطات الدقة المعمول بها وطنياً وفق منهجية علمية تحليلية موثوقة.

2. أهمية و أهداف البحث:

تتمثل أهمية البحث في الربط بين المعايير الأساسية في التخطيط لمهام التصوير و المفاهيم و الإجراءات المرتبطة بأعمال استحواذ و معالجة الصور الرقمية، و بين متطلبات الدقة المكانية للمخرجات و النماذج الرقمية المكانية، و التحقق بمنهجية إحصائية تحليلية من مدى تلبية مخرجات العمل في سورية لمعايير الدقة المعمول بها عالمياً تمهيداً لدراسة و بيان انسجامها مع متطلبات الدقة المعمول بها وطنياً لأعمال الرفع الطبوغرافي بمقاييس كبيرة.

يهدف البحث إلى:

- عرض و مناقشة العلاقة بين مسافة الاعتيان الأرضية (Ground Sampling Distance-GSD) و بين سوية الدقة المرجوة في المخرجات الرقمية المطلوبة (الغمائم النقطية ثلاثية الأبعاد –خرائط الصورة المصححة عمودياً–النماذج الرقمية للارتفاعات) و علاقة ذلك كله بمحددات مهام الطيران.
- مناقشة آلية تحليل و تقييم دقة بناء المخرجات الرقمية من خلال إيجاد مقدرات المؤشرات الإحصائية التي تصف دقة التثليث الضوئي و تعديل الحزم باستخدام طريقة التربيعات الصغرى، و مدى استجابة سوية دقة النماذج الرقمية للمعايير العالمية المعروفة لمثل هذه الأنواع من المخرجات، و اقتراح المنهجيات و المعايير الموافقة و المناسبة للاعتماد وطنياً.

- تهيئة الأرضية البحثية و التقنية لتقييم دقة الخرائط الطبوغرافية المستنبطة من المخرجات الرقمية لبرامج الرؤية الحاسوبية المتوفرة، و التحقق من مدى تلبيتها للشروط المعمول بها في سورية لأعمال الرفع الطبوغرافي بمقياس أساسي 1/1000، وذلك وفق منهجية عملية إحصائية موثوقة.

3. طرائق البحث، مواده و منهجيته:

3.1 الإطار النظري:

3.1.1 النقاط المرجعية الأرضية، الإرجاع و التحقق المكاني:

يقصد بالنقاط المرجعية الأرضية (Ground Reference Points) نقاط التحكم أو الضبط (Control Points) و نقاط التحقق (Check Points).

نقاط التحكم و التحقق نقاط مختارة و موزعة على أرجاء الموقع المستهدف بشكل مدروس.

شكل رقم/1/ – نموذج لصورة رقمية للموقع تظهر فيها نقطة مرجعية

لإرجاع و ضبط النماذج مكانياً، يجري تعيين و تثبيت و طلاء النقاط المرجعية في الموقع قبل البدء بتنفيذ مهام الطيران و التقاط الصور، و بما يضمن ظهورها بوضوح في الصور الملتقطة. يتم قياس شبكة نقاط التحكم و التحقق بدقة عالية باتباع الأساليب الأرضية التقليدية (كاستخدام محطات الرصد المتكاملة Total Stations وأجهزة التسوية Levels) أو باستخدام أجهزة التموضع الشامل GPS، و يتم حساب و تعديل الإحداثيات الثلاثية للنقاط باستخدام طريقة

التربيعات الصغرى، لتشكل الإحداثيات مدخلات لعملية معالجة الصورة في مرحلة ما بعد تنفيذ التثليث الضوئي.

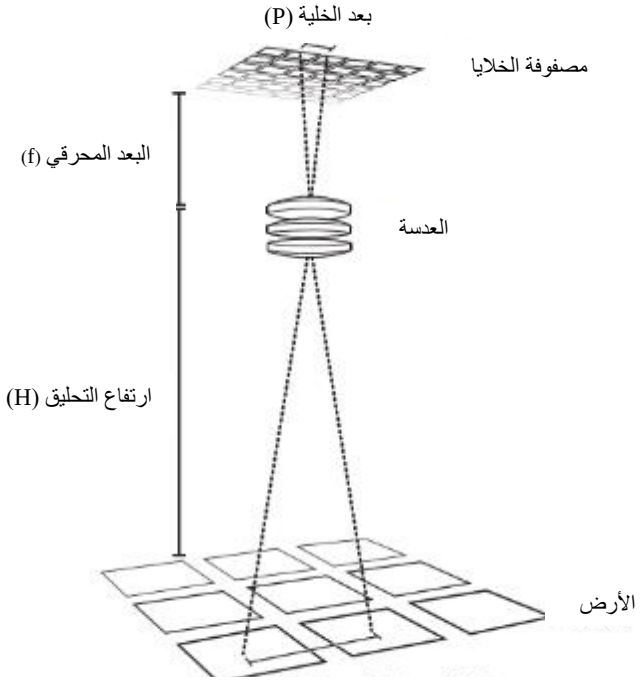
3.1.2 تخطيط مهام الطيران، مسافة الاعتيان الأرضي و جودة المنتج:

يعتبر التخطيط المسبق لمهام الطيران (Mission Planning) خطوة مؤسسة لإنجاح أعمال التصوير و تحديد جودة المخرجات الرقمية. تشرك عملية التخطيط جملة من المعاملات كالبعد المحرقي لعدسة آلة التصوير(f) و أبعاد المستشعر الرقمي و عدد الخلايا (Pixels) في كل من بعدي المستشعر (الطول و العرض) و بالتالي دقة تمييز المستشعر (Resolution) و بعد الخلية الواحدة (p) في المستشعر، و كذلك كل من علو الطيران (H) و مسافة الاعتيان الأرضية (GSD)، إضافة إلى نسب التداخل الأمامية و الجانبية (Forward &Lateral Overlaps).

يساعد التداخل الأمامي والجانبي للصور برامج المعالجة اللاحقة في تحديد النقاط المشتركة، أو ما يعرف بنقاط الربط (Tie Points)، بينها. لا يوجد معيار تداخل معتمد عالميًا، فهذه النسب تختلف باختلاف طبيعة الموقع المستهدف و نسبة احتوائه على المعالم المميزة. توصي العديد من المصادر باعتماد نسبة تداخل أمامي قدرها (80%) و جانبي قدرها (70%)، و يذهب بعضها إلى تبني نسبة قدرها (80%) لكل من التداخل الأمامي و الجانبي.[4, 5, 12, 13]

تمثل مسافة الاعتيان الأرضية طول المسافة على الأرض المقابلة لطول خلية واحد في الصورة. كلما كانت قيمة GSD أقل، كانت الصورة أكثر تفصيلاً و أكثر جودة. على العكس من ذلك، فكلما كانت قيمة مسافة الاعتيان الأرضية أكبر كلما قلت تفاصيل الصورة و ساءت جودتها. [4, 5, 13]

يمكن التعبير عن مسافة الاعتيان الأرضية من خلال العلاقة التحليلية:



شكل رقم /2/- مسافة الاعتيان الأرضية (GSD)

$$GSD = \frac{H \times P}{f} \quad (1)$$

أو:

$$GSD = \frac{H \times S}{I \times f} \quad (2)$$

حيث s: عرض المستشعر مقدراً بالميليمتر؛ I: عرض الصورة مقدراً بعدد الخلايا (Pixels).

تسمح العلاقتان (1 و2) بتعيين قيمة مسافة الاعتيان الأرضية بالاستناد إلى مواصفات آلة التصوير و دقة تمييز المستشعر الرقمي و كذلك علو الطيران، كما تمكن من تحديد علو الطيران (H) الموافق لقيمة مسافة اعتيان معطاة و ذلك بالعلاقة البسيطة:

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

3.1.3 التثليث الضوئي، تعديل الحزم و دقة النماذج الرقمية:

يعرف التثليث الضوئي بأنه عملية تهدف إلى تحديد الإحداثيات ثلاثية الأبعاد للنقاط على سطح الأرض من خلال معالجة مجموعة من الصور المتداخلة التي تم التقاطها للمكان من زوايا ومواقع مختلفة. يعتمد المبدأ الأساسي للتثليث الضوئي على إعادة تشكيل الحزم الضوئية المولدة للصور من خلال تأمين تقاطع خطوط الرؤية (Sightlines) التي تمتد من مواقع الكاميرا إلى مواقع تمثيل النقاط المعنية على الصور المتداخلة، بحيث تلتقي هذه الخطوط في مواقع تلك النقاط على الطبيعة. يتم تحقيق ذلك هندسياً عن طريق إعادة تجسيد مواقع الكاميرات و توجيه الصور عند التقاطها، مما يؤدي إلى تشكيل مثلثات فراغية بين مواقع الكاميرا والنقاط الأرضية.

يربط التثليث الضوئي مصفوفات الإسقاط لآلة التصوير (Camera Projection Matrices) و الإحداثيات ثنائية البعد للصورة بالإحداثيات الثلاثية للنقاط في الواقع من خلال العلاقة الأساسية التالية (من أجل صورتين متداخلتين):[18, 19, 20, 21]

$$P_1 X = \lambda_1 x_1$$

$$P_2 X = \lambda_2 x_2$$

حيث:

- P_1 ، P_2 مصفوفات الإسقاط لآلة التصوير.
- $X= (X, Y, Z ,1)^T$ الإحداثيات الثلاثية للنقطة في الفضاء.
- $x_1 = (x_1 , y_1 , 1)^T$ و $x_2 = (x_2 , y_2 , 1)^T$ هي الإحداثيات ثنائية البعد للنقطة على الصورتين.
- λ_1 و λ_2 معاملات مقياس تتعلق بالعمق (المسافة بين النقطة وآلة التصوير أو مستوى الإسقاط).

يلعب التثليث الضوئي (phototriangulation) دوراً حاسماً في بناء النماذج الرقمية للمكان، فهو يسمح بتعيين الاحداثيات المكانية (X,Y,Z) لمواقع آلة التصوير و كذلك لكل

من نقاط الربط (Tie Points)، الأمر الذي يؤدي إلى توليد غمامة النقاط (Point Cloud) كأول صيغة من صيغ النماذج الرقمية للموقع المدروس.

يعرف تعديل الحزم (Bundle Adjustment) على أنه عملية حساب و تعديل القيم المثلى لمعاملات التثليث الضوئي من خلال جعل الفرق بين الاحداثيات المقاسة من الصور للنقاط و بين القيم النهائية المقدرة لإحداثيات مواقع تلك النقاط في جملة إحداثيات الجسم أصغرياً، باعتماد مبدأ التربيعات الصغرى. يتمثل المبدأ الأساسي لتعديل الحزم بالصيغة التحليلية:

$$argmin_{XP} \sum_{i,j} \left\| x_{ij} - \pi(P_i, X_j) \right\|^2$$

حيث:

- X_j : هي الإحداثيات ثلاثية البعد للنقطة j في الطبيعة.
- P_i : هي مصفوفة معاملات آلة التصوير i.
- x_{ij} : الإحداثيات ثنائية البعد (x , y) المقاسة على الصورة رقم i للنقطة رقم j.
- $\pi(P_i, X_j)$: تابع الإسقاط الذي يسمح بتمثيل النقطة ثلاثية الإحداثيات X_j على مستوي الصورة باستخدام معاملات آلة التصوير P_i. يسهم التثليث الضوئي في تحديد دقة النماذج الرقمية، إذ يتوقف مدى مصداقية و تماسك تمثيل النماذج الرقمية للخصائص و المعالم الجغرافية للمكان المدروس على سوية دقة تحديد مواقع واتجاهات آلة التصوير أثناء التقاط الصور.[[24, 23, 22]

يلعب تعديل الحزم دوراً مركزياً في تحسين دقة و تماسك عملية التثليث الضوئي، و رفع سوية دقة تعيين المواقع ثلاثية الأبعاد لنقاط الموقع، و بالتالي توفير خرائط طبوغرافية و غيرها من النماذج المكانية الرقمية بسوية دقة عالية.

3.1.4 نقاط التحكم و التحقق و دورها في تحديد و تحليل دقة بناء النماذج الرقمية:

تلعب نقاط التحكم (GCPs) ونقاط التحقق (CPs) الأرضية دوراً محورياً في بناء النماذج الرقمية و تقييم الدقة المكانية لهذه النماذج.

تستخدم نقاط التحكم الأرضية كمرجع لتوجيه وضبط النموذج الرقمي من خلال محاذاة المواقع ثلاثية الأبعاد للنقاط في الصور مع المواقع و الإحداثيات المقابلة على الأرض. تتوقف دقة توجيه و محاذاة النماذج الرقمية الناتجة عن معالجة الصور على عدد من

العوامل كشروط التقاط الصور و جودة تمثيل المعالم عليها و تباين تضاريس المكان، غير أن دقة تحديد و قياس و تعيين نقاط التحكم الأرضية تبقى المؤثر الأبرز في تحديد سوية دقة توجيه و محاذاة النموذج.

تشير قيمة الخطأ المتوسط التربيع (RMSE) لنقاط التحكم الأرضية الحاصلة بنتيجة عملية التثليث الضوئي إلى مدى تطابق نقاط النموذج الرقمي مع مواقع نقاط التحكم الأرضية، و هي تصف دقة انسجام الاحداثيات المستقاة لنقاط التحكم من النموذج الرقمي مع الإحداثيات المقابلة على الأرض، و تسمح بالتالي بتقييم مدى انسجام تلك النقاط و دقة تعيينها على الأرض و كذلك تماسك (Consistency) النموذج الرقمي و دقة محاذاته لنقاط التحكم الأرضية. كلما كانت القيمة المطلقة للخطأ المتوسط التربيع أصغر كلما دل ذلك على سوية أعلى في دقة محاذاة النموذج الرقمي للنقاط المرجعية في أرض الواقع و بالتالي جودة المنتج التصويري، و على العكس من ذلك، إذا كانت قيمة الخطأ المتوسط التربيع مرتفعة دل ذلك على وجود عيوب في تعداد أو توزيع أو تحديد نقاط التحكم الأرضية أو حتى في عملية استحواذ و معالجة الصور الرقمية.[21, 23, 25]

تستخدم نقاط التحقق للتقييم المستقل للنماذج الرقمية، و يعتبر الخطأ المتوسط التربيع (RMSE) لهذه النقاط مقياساً جوهرياً للجودة الشاملة للنماذج و دقتها النهائية، كونها نقاط مستقلة لم يجر استخدام إحداثياتها في توجيه و محاذاة النموذج. كلما كانت قيمة الخطأ المتوسط التربيع لهذه النقاط أصغر كلما كانت دقة النموذج في تمثيل الإحداثيات الفعلية لنقاطه أكبر و كلما أمكن الاعتماد عليه أكثر في التمثيل المكاني خارج نطاق نقاط التحكم الأرضية.

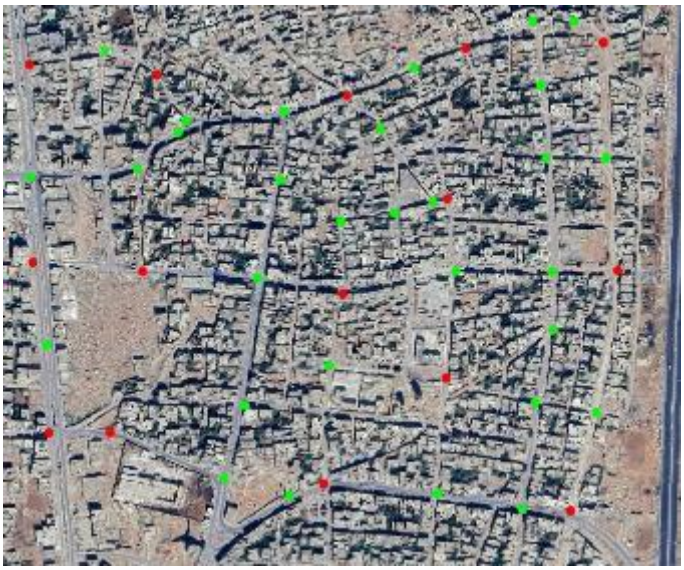
تتطلب التطبيقات عالية الدقة، كمشاريع الرفع الطبوغرافي و مشاريع التخطيط العمراني، قيوداً تربط بين قيم الخطأ المتوسط التربيعي المستوية و الرأسية لنقاط التحكم و بين قيمة مسافة الاعتيان الأرضية. طبقاً لتلك المحددات فإن الخطأ المتوسط التربيع لنقاط التحقق في المستوي يجب ألا يزيد عن ضعفي قيمة مسافة الاعتيان الأرضية، في حين أن الخطأ المتوسط التربيع الرأسي لتلك النقاط يجب أن لا يتجاوز ثلاثة أضعاف مسافة الاعتيان الأرضية [20, 25, 27]:

$$RMSE_{XY} = [1-2] \times GSD \qquad RMSE_Z = [1-3] \times GSD$$

من المفترض أن تتبع فروق إحداثيات نقاط التحقق التوزيع الطبيعي (Gaussian/Normal Distribution)، الأمر الذي يعني خلو القياسات من الأخطاء النظامية (Systematic Errors) و الأغلاط (Blunder Errors) و يعزز من الثقة في دقة النماذج الرقمية. إذا تبين من خلال التحليل الإحصائي وجود نقاط تحكم شاذة عن التوزيع الطبيعي، ناتجة عن عيوب في تموضع أو دقة تعيين النقاط التحكم أو التقدير غير الأمثل لمعاملات إرجاع الصور خلال التثليث الضوئي أو حتى الطبيعة المعقدة لتضاريس الموقع، تطلب الأمر استقصاء و تصويب مصادر الأخطاء غير العشوائية وإلا تعين استبعاد النقاط الشاذة و إعادة معالجة النموذج لتحسين تماسكه و دقته[18, 19, 20, 25].

3.2 منطقة الدراسة و مواد البحث:

تمثلت مواد البحث بعينة رصينة هي الصور الرقمية الناتجة عن أعمال المسح التصويري لرقعة مساحتها /31/ هكتاراً.



شكل رقم/3/ – موقع منطقة الدراسة في مدينة الرستن

تقع منطقة الدراسة في مدينة الرستن بمحافظة حمص بين خطي طول (36°43'45"E و 36°44'19"E)، و خطي عرض (34°55'23"N و 34°55'46"N) (شكل رقم /3/). كان الهدف من إجراء المسح التصويري وضع خرائط مساحية بمقياس أساسي $\frac{1}{1000}$ لأغراض التنظيم العمراني و الإفراز العقاري.

3.3 منهجية البحث:

3.3.1 الأعمال الأرضية و استحواذ الصور:

للتحضير لأعمال التصوير تم، بشكل مدروس، اختيار و تثبيت و طلاء شبكة مؤلفة من /45/ نقطة مرجعية أرضية تراعي، من حيث التباعد و التجانس في التوزيع و التموضع، التوصيات العالمية (مواصفات ASPRS مثالاً)، مشكلة شبكة مضلعات(Traverses) جرى رصدها باستخدام محطات رصد متكاملة (Total Stations) و أجهزة تسوية رقمية (Digital Levels) و بما يتوافق مع متطلبات دفاتر الشروط الفنية المعمول بها لدى وزارة الأشغال العامة و الإسكان في سورية.

بعد التحقق من خلو الأرصاد من الأغلاط و الأخطاء النظامية، تمت معالجة عناصر الشبكتين المستوية و الارتفاعية باعتماد مبدأ التربيعات الصغرى (Least Squares Adjustment) و باستخدام برنامج (StarNet). تم حساب و تعديل الإحداثيات المستوية لنقاط الشبكة المرجعية في الاسقاط الستيريوغرافي السوري القاطع، مركزه النقطة $(39.15^{\circ}E\ ;\ 34.2^{\circ}N)$، على الإهليلج (Clarke 1880 Ellipsoid)، في حين تم حساب و تعديل الارتفاعات الأرثومتريّة(Orthometric Heights) منسوبة إلى مستوي سطح البحر. [27]

استخدمت في أعمال التصوير طائرة مسيرة من نوع Phantom 4 Pro. مزودة بكاميرا مدمجة FC6310 بعدها المحرقي $f = 8.8\ mm$. (شكل رقم /4/)

شكل رقم /4/–Phantom 4 Pro.

تم إجراء التصوير بعلو طيران قدره /60/ متراً وبدقة تمييز فعلية 17.7MP وأبعاد بكسل قدرها $2.61\mu \times 2.61\mu$. باستخدام العلاقة رقم /1/ نجد:

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

لتغطية كامل منطقة العمل، و باعتماد نسب تداخل 80% أمامية و 70% جانبية، تم التقاط /2462/ صورة رقمية. شكلت الصور الملتقطة مادة أولية للمعالجة باستخدام إحدى

برمجيات الرؤية الحاسوبية و التحقق من مدى استجابة دقة بناء المخرجات للمعايير المعتمدة عالمياً.

3.3.2 معالجة الصور و مخرجاتها:

لمعالجة الصور تم استخدام إحدى برمجيات الرؤية الحاسوبية المعروفة عالمياً – Agisoft Metashape. أدخلت جميع الصور و تم توجيهها جميعاً بنجاح و بسوية دقة عالية (High Accuracy). بفضل نسب التداخل الكبيرة، تمكنت البرمجية من تميز /1325263/ نقطة ربط (Tie Point)، استخدمت في تنفيذ التثليث الضوئي و شكلت غمامة نقاط مبعثرة (Sparse Point Cloud)، كأول صيغة من صيغ النماذج الرقمية. بعد الحصول على غمامة النقاط المبعثرة، تم استيراد النقاط الأرضية المرجعية مع إحداثياتها لاستخدامها في عملية الضبط و الإرجاع المكاني(Georeferencing) و كذلك في عملية التحقق، حيث تم اختيار /15/ نقطة منها، موزعة بشكل مدروس لتغطي بتجانس منطقة العمل، كنقاط تحكم و تم استخدام النقاط المتبقية (عددها /30/ نقطة) كنقاط تحقق مستقل. تم تمييز نقاط التحكم باللون الأحمر و نقاط التحقق باللون الأخضر (أنظر شكل /3/).

جدول رقم /2/– فروق إحداثيات نقاط التحكم

No.	P	ΔX *cm*	ΔY *cm*	ΔZ *cm*
1	G2	0.101	0.043	0.027
2	K2	-0.011	-0.021	0.082
3	A5	0.043	0.006	-0.086
4	E5	0.039	-0.016	0.117
5	A7	0.050	0.055	-0.064
6	C7	-0.042	-0.045	-0.064
7	A8	0.094	0.032	0.001
8	E1	-0.051	0.053	0.056
9	J2	-0.001	0.003	0.031
10	C4	0.075	-0.054	0.015
11	B8	-0.132	-0.051	0.001
12	E4	-0.156	-0.132	-0.032
13	C5	-0.005	0.011	-0.005
14	G1	-0.075	0.010	-0.065
15	B6	0.041	0.172	0.001

يبين الجدول رقم /2/ أسماء نقاط التحكم الأرضية و الفروق بين الإحداثيات المقاسة و المعدلة (كبيانات مرجعية) لتلك النقاط و بين إحداثياتها الناتجة بعد القيام بعملية الإرجاع المكاني.

3.3.3 التحليل الإحصائي و تقييم دقة التثليث الضوئي:

3.3.3.1 الإطار الإحصائي النظري:

في المساحة التصويرية، تتبع الفروقات (الرواسب) بين الإحداثيات المرجعة والمقاسة لنقاط التحكم و التحقق الأرضية تتبع توزيعاً طبيعياً (Gaussian distribution) حول القيمة الصفرية. يعود ذلك إلى أن هذه الرواسب غالباً ما تنشأ من أخطاء قياس عشوائية، تكون موزعة طبيعياً حول القيمة الصفرية استناداً إلى نظرية النهاية المركزية، الأمر الذي يبرر حساب و اعتماد الخطأ المتوسط التربيع (جذر التباين) لهذه الرواسب كمعيار إحصائي للحكم على الدقة المكانية للنماذج الرقمية. [29 , 28]

بالرغم من قبول فرضية أن رواسب النقاط المرجعية الأرضية تتبع توزيعاً طبيعياً، إلا أنه لابد من اختبار البيانات الفعلية للتحقق من هذا الافتراض في كل حالة بذاتها.[31 ,29]

للتحقق من فرضية التوزيع الطبيعي (Normality hypothesis) و التثبت إحصائياً من خضوع بيانات محددة للتوزيع الطبيعي، يمكن استخدام اختبارات إحصائية مثل اختبار Shapiro-Wilk أو Anderson-Darling أو الفحص البصري من خلال مخططات Q-Q و غيرها. [30]

يُعتبر اختبار **شابيرو–ويلك** من أكثر الاختبارات موثوقية للتحقق من خضوع بيانات مدروسة للتوزيع الطبيعي، خاصة عندما يكون حجم العينة صغيرًا، و يستخدم الاختبار معايير Test Statistics (إحصائية الاختبار) و P-Value (القيمة الاحتمالية) في التحقق من الفرضية الصفرية (Null Hypothesis).

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

إذا كانت **القيمة الاحتمالية (P-Value)** بنتيجة الاختبار أكبر من($P \geq 0.05$) دل ذلك على عدم وجود مبرر لرفض الفرضية الصفرية، وبالتالي يمكن اعتبار البيانات تتبع التوزيع الطبيعي. إذا كانت القيمة أقل من أو تساوي 0.05 ($P \leq 0.05$) هذا يعني أننا نرفض الفرضية الصفرية، وبالتالي لا يمكن اعتبار البيانات تتبع التوزيع الطبيعي.

يستخدم اختبار **T-Test** للتحقق من فرضية أن المتوسطة الحسابية للعينة تساوي الصفر. تمثل قيمة T-Test (يرمز لها أيضاً بالرمز W) المدى، المتمثل بعدد أضعاف الخطأ المتوسط التربيع للعينة، الذي تبتعد فيه متوسطة العينة عن المتوسطة المفترضة (القيمة صفر). كلما كانت القيمة المطلقة للمعيار الإحصائي T أكبر كلما ابتعدت المتوسطة الحسابية للعينة عن الصفر، و كلما كانت هذه القيمة أقل كلما دل ذلك على اقتراب متوسطة العينة من القيمة صفر.

تدخل القيمة الإحصائية **T** في تعيين قيمة احتمالية **P-Value** و تستخدم القيمة الاحتمالية في تقرير ما إذا كانت الفرضية الصفرية مقبولة أو مرفوضة. كلما كانت القيمة الإحصائية T أكبر كلما كانت القيمة الاحتمالية **P-Value** أصغر ما يعني دليلاً أقوى على رفض الفرضية الصفرية. إذا كانت القيمة الإحصائية T كبيرة بما يكفي لإعطاء قيمة احتمالية تساوي أو أقل من مستوي الدلالة (Significance level) المختار (0.05 مثلاً) أدى ذلك إلى رفض الفرضية الصفرية.

يفيد مخطط Q-Q Test في الفحص البصري لمدى انسجام عناصر العينة مع التوزيع الطبيعي و تشخيص الشاذ منها.

تحسب كل من متوسطة العينة $\overline{\Delta X}$ و الخطأ المتوسط التربيع RMSE على الترتيب بالعلاقتين:

$$\overline{\Delta X} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta x_i}{n} \quad ; \quad RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} {\Delta x_i}^2}{n}} \qquad (5)$$

حيث:

Δx_i: عنصر العينة ذو الترتيب (i).

n: عدد عناصر العينة.

يفيد تحليل رواسب الإحداثيات و تقدير الخطأ المتوسط التربيع لنقاط التحكم في اختبار متانة الإرجاع المكاني للنماذج الرقمية و دقة التثليث الضوئي و ملاءمة القيم المرجعة لإحداثيات نقاط التحكم مع إحداثياتها الواقعية (المقاسة و المعدلة في الواقع). [16]

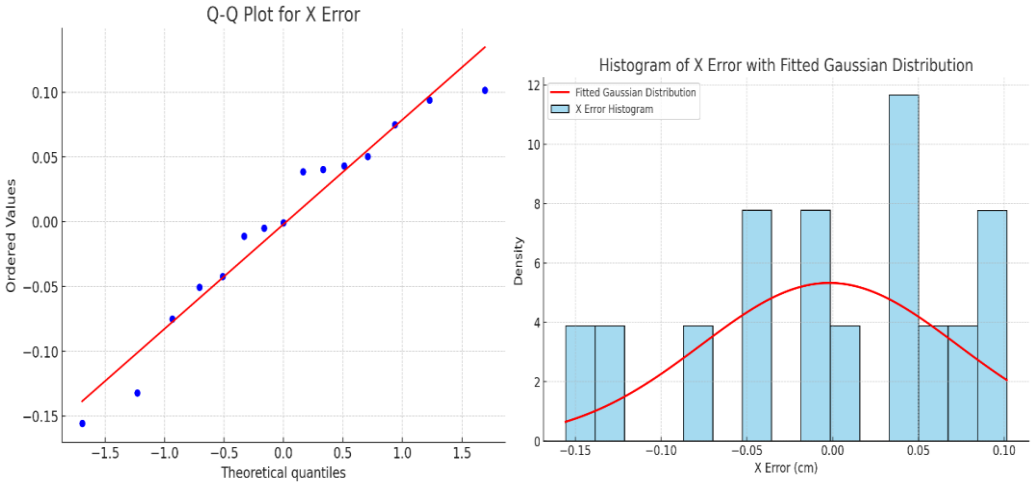
3.3.3.2 اختبار رواسب الإحداثيات X لنقاط التحكم على التوزيع الطبيعي بسوية دلالة (0.05):

أعطى اختبار شابيرو– ويلك النتائج التالية:

W=0.943

P-Value=0.425

نرى أن قيمة إحصائية الاختبار W أقرب إلى القيمة (1) و أن قيمة الاحتمال P-Value أكبر من 0.05 الأمر الذي يعني قبول فرضية أن الرواسب في X تتبع التوزيع الطبيعي. يبين الشكل /5/–a منحني التوزيع التكراري، و يبين الشكل /5/–b مخطط توزيع Q-Q



لرواسب الاحداثي X.

شكل /5/–a_منحني التوزيع التكراري للرواسب Δx_i شكل /5/–b_مخطط توزيع Q-Q للرواسب Δx_i

باستخدام العلاقتين (5) نجد:

$\bar{X}$=-0.002 cm

$RMSE_X = 0.075$ cm

للتحقق من فرضية أن متوسطة رواسب X تساوي إحصائياً الصفر قمنا بتطبيق اختبار T-Test، حيث وجدنا:

T-statistic= -0.098
P-value=0.923

نلاحظ بوضوح أن القيمة الإحصائية T صغيرة إلى درجة كبيرة أدت إلى الحصول على قيمة احتمالية P-value أكبر كثيراً من القيمة 0.05، الأمر الذي يعني قبول فرضية أن متوسطة العينة تساوي إحصائياً القيمة صفر، و بالتالي نكون قد تحققنا من أن رواسب X تتبع التوزيع الطبيعي حول القيمة (0).
من خلال فحص منحني توزيع Q-Q و بتطبيق اختبار النطاق بين الربعين(IQR) ، تبين عدم وجود دلالة كبيرة للقيم الشاذة عن منحى التوزيع الطبيعي في عينة رواسب X.

3.3.3.3 اختبار رواسب الإحداثيات Y لنقاط التحكم على التوزيع الطبيعي بسوية دلالة (0.05):

أعطى اختبار شابيرو– ويلك النتائج التالية:

W= 0.939

P-Value= 0.371

نرى أن قيمة إحصائية الاختبار W كبيرة (قريبة من القيمة 1) و أن قيمة الاحتمال P-Value أكبر من 0.05 ما يعني قبول فرضية أن الرواسب في Y تتبع التوزيع الطبيعي.

يبين الشكل /6/–a منحني التوزيع التكراري، و يبين الشكل /6/–b مخطط توزيع Q-Q لرواسب الاحداثي Y.

باستخدام العلاقتين (5) نجد:

$\overline{Y}$= 0.004 cm

$RMSE_Y = 0.065$ cm

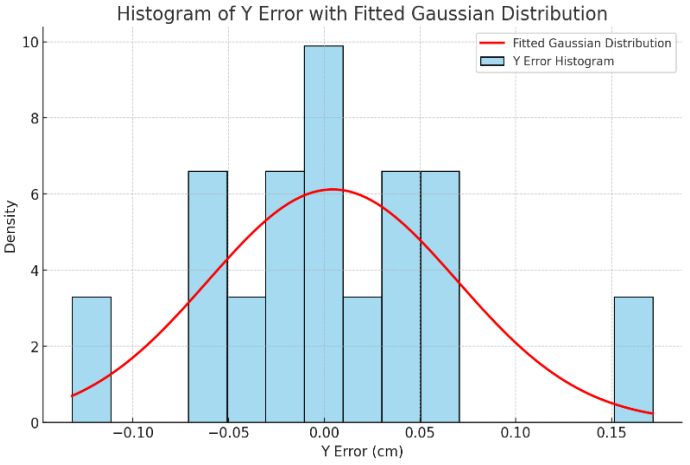
للتحقق من فرضية أن متوسطة رواسب Y تساوي إحصائياً الصفر قمنا بتطبيق اختبار T-Test، حيث وجدنا:

T-statistic=0.250

P-value=0.806

نلاحظ أن القيمة الإحصائية T صغيرة إلى درجة أدت إلى الحصول على قيمة احتمالية P-value أكبر كثيراً من القيمة 0.05، الأمر الذي يعني قبول فرضية أن متوسطة العينة تساوي إحصائياً القيمة صفر، و بالتالي نكون قد تحققنا من أن رواسب Y تتبع التوزيع الطبيعي حول القيمة (0).

شكل /6/–a_ منحني التوزيع التكراري للرواسب Δy_i شكل /6/–b_مخطط توزيع Q-Q للرواسب Δy_i



من خلال الاختبار و فحص منحني توزيع Q-Q **<u>تبين وجود قيمة</u>** شاذة وحيدة هي القيمة 0.1715 cm (تعود للنقطة الأرضية B_6).

3.3.3.4 اختبار رواسب الإحداثيات Z لنقاط التحكم على التوزيع الطبيعي بسوية دلالة (0.05):

أعطى اختبار شابيرو– ويلك النتائج التالية:

W= 0.958

P-Value= 0.664

نرى أن قيمة إحصائية الاختبار W قريبة من القيمة (1) و أن قيمة الاحتمال P-Value أكبر كثيراً من 0.05 الأمر الذي يسمح بقبول فرضية أن الرواسب في Z تتبع التوزيع الطبيعي. يبين الشكل /7/-a منحني التوزيع التكراري، و يبين الشكل /7/-b مخطط توزيع Q-Q لرواسب الاحداثي Z.

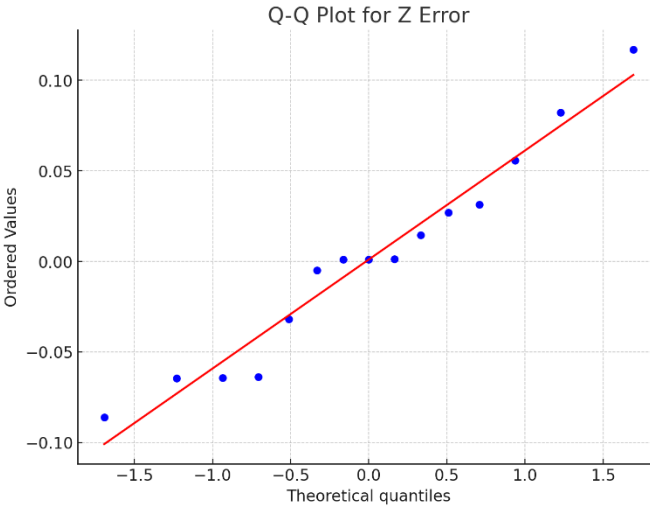
باستخدام العلاقتين (5) نجد:

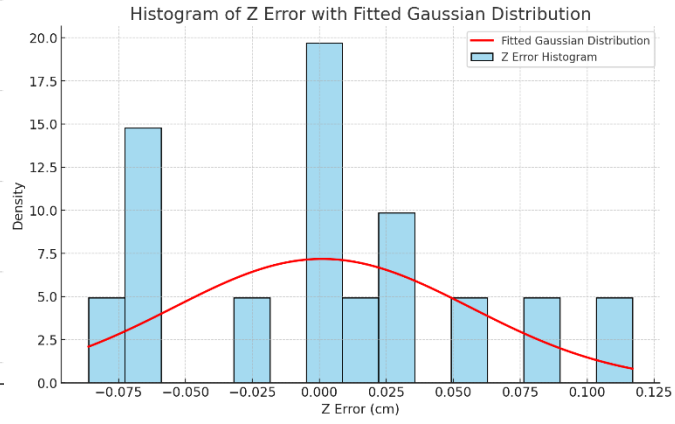
$\bar{Z}$= 0.001 cm

$RMSE_Z = 0.056$ cm

للتحقق من فرضية أن متوسطة رواسب Z تساوي إحصائياً الصفر قمنا بتطبيق اختبار T-Test، حيث وجدنا:

T-statistic= 0.070
P-value= 0.945





شكل /7/-a_ منحني التوزيع التكراري للرواسب Δz_i شكل /7/-b_مخطط توزيع Q-Q للرواسب Δz_i

نلاحظ أن القيمة الإحصائية T صغيرة إلى درجة كبيرة أدت إلى الحصول على قيمة احتمالية P-value أكبر كثيراً من القيمة 0.05، الأمر الذي يعني قبول فرضية أن متوسطة العينة تساوي إحصائياً القيمة صفر، و بالتالي نكون قد تحققنا من أن رواسب Z تتبع التوزيع الطبيعي حول القيمة (0).

من خلال فحص منحني توزيع Q-Q و بتطبيق اختبار النطاق بين الربعين(IQR) ، تبين عدم وجود دلالة كبيرة للقيم الشاذة لم نجد أية قيم شاذة عن منحى التوزيع الطبيعي في عينة رواسب Z.

إن وجود قيم شاذة عن التوزيع الطبيعي في رواسب إحداثيات نقاط التحكم والتحقق قد يكون ناتجاً عن عدة أسباب. من الأسباب المحتملة وجود أخطاء في القياسات (بشرية أو بيئية أو تقنية) أثناء تثبيت و قياسات شبكة النقاط المرجعية الأرضية، أو عدم كفاية في نقاط التحكم او سوء في توزيعها أو أسباب ناجمة عن أعمال التصوير أو عيوب في الصور أو قصور في تعيين و تحديد نقاط التحكم على الصور المتداخلة و غيرها من الأسباب المحتملة.[31 , 29]

عند وجود نقاط شاذة ينصح باستقصاء الأسباب وراء شذوذ تلك القيم و العمل على تلافي تلك المسببات و إعادة عملية الإرجاع و المحاذاة، وذلك قبل اللجوء إلى استبعاد النقاط الشاذة من المشاركة في عملية الضبط و بناء النموذج الرقمي (كحل أخير) تجنباً لحرمان العمل من إحدى درجات حريته أو أكثر. بعد تحري و استقصاء السبب وراء وجود قيمة شاذة وحيدة (هي ترتيب النقطة B_6) في رواسب Y في العينة، تبين أن ذلك يعود إلى قصور في تحديد النقطة على إحدى الصور المتداخلة. تم تصويب موقع النقطة و تلافي الخطأ (النظامي) في ترتيب النقطة و تمت إعادة عملية المحاذاة و الإرجاع المكاني.

يبين الجدول رقم /3/ قيم الرواسب في إحداثيات نقاط التحكم بعد تصحيح موقع النقطة الشاذة.

تم إخضاع رواسب إحداثيات نقاط التحكم الأرضية إلى سلسلة الاختبارات الإحصائية ذاتها التي تم وفقها معالجة و اختبار الفرضيات الصفرية على إحداثيات النقاط قبل تصحيح شذوذ ترتيب النقطة B_6.

3.3.3.5 اختبار رواسب الإحداثيات X لنقاط التحكم على التوزيع الطبيعي بعد تصويب الشذوذ بسوية دلالة (0.05):

أعطى اختبار شابيرو– ويلك النتائج التالية:

W=0.925

P-Value=0.425

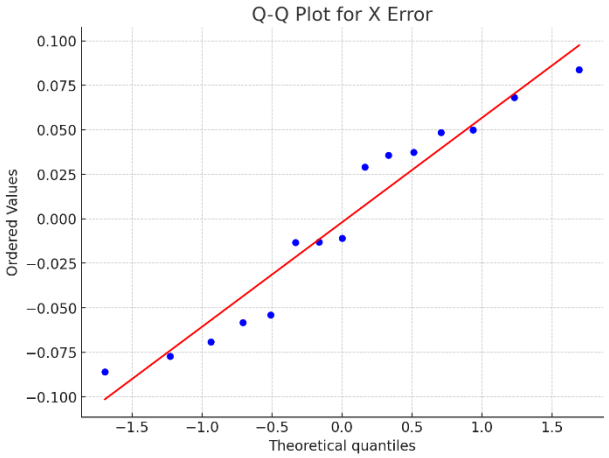
نرى أن قيمة إحصائية الاختبار W أقرب إلى القيمة (1) و أن قيمة الاحتمال P-Value أكبر من 0.05 الأمر الذي يعني قبول فرضية أن الرواسب في X تتبع التوزيع الطبيعي **بسوية دلالة ($\propto$=0.05)**. يبين الشكل /8/–a منحني التوزيع التكراري، و يبين الشكل /8/–b مخطط توزيع Q-Q لرواسب الاحداثي X بعد تصويب شذوذ العينة.

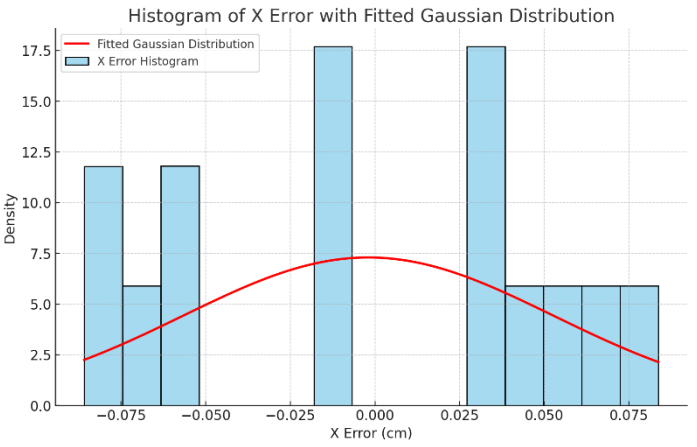
جدول رقم /3/– رواسب إحداثيات نقاط التحكم بعد التصويب

No.	P	ΔX *cm*	ΔY *cm*	ΔZ *cm*
1	G2	0.0484	0.0389	0.0243
2	K2	-0.0133	-0.0222	0.0821
3	A5	0.0291	-0.0136	-0.0867
4	E5	0.0374	-0.0178	0.1168
5	A7	0.0498	0.0589	-0.0650
6	C7	-0.0540	-0.0372	-0.0648
7	A8	0.0837	0.0354	0.0016
8	E1	-0.0582	0.0600	0.0549
9	J2	-0.0110	0.0004	0.0303
10	C4	0.0683	-0.0585	0.0139
11	B8	-0.0859	-0.0509	0.0030
12	E4	-0.0692	0.0116	-0.0313
13	C5	-0.0130	-0.0061	-0.0038
14	G1	-0.0772	0.0130	-0.0647
15	B6	0.0357	0.0531	0.0049

يُظهر مخطط Q-Q للرواسب X (المعروض أعلاه) أن معظم النقاط البيانية تتبع الخط الطبيعي بشكل وثيق، الأمر الذي يدعم الاستنتاج بأن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي.

بتطبيق اختبار النطاق بين الربعين(IQR) ، تبين عدم وجود دلالة ملحوظة للقيم الشاذة في بيانات رواسب X.





شكل /8/–a_منحني التوزيع التكراري للرواسب Δx_i شكل /8/–b_مخطط توزيع Q-Q للرواسب Δx_i

باستخدام العلاقتين (5) نجد:

$\bar{X}$= -0.002 cm

$RMSE_X = 0.055$ cm

للتحقق من فرضية أن متوسطة رواسب X تساوي إحصائياً الصفر قمنا بتطبيق اختبار T-Test، حيث وجدنا:

T-statistic= -0.134

P-value= 0.895

نلاحظ بوضوح أن القيمة الإحصائية T صغيرة إلى درجة أدت إلى الحصول على قيمة احتمالية P-value أكبر كثيراً من القيمة 0.05، الأمر الذي يعني قبول فرضية أن متوسطة العينة تساوي إحصائياً القيمة صفر، و بالتالي نكون قد تحققنا من أن رواسب X بعد تصويب شذوذ العينة تتبع التوزيع الطبيعي حول القيمة (0).

3.3.3.6 اختبار رواسب الإحداثيات Y لنقاط التحكم على التوزيع الطبيعي بعد تصويب الشذوذ بسوية دلالة (0.05):

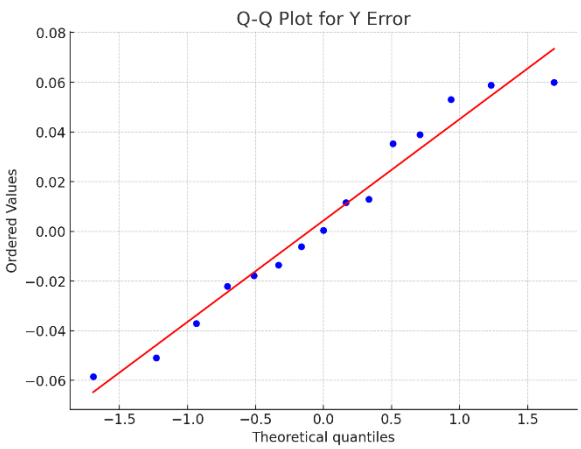
أعطى اختبار شابيرو– ويلك النتائج التالية:

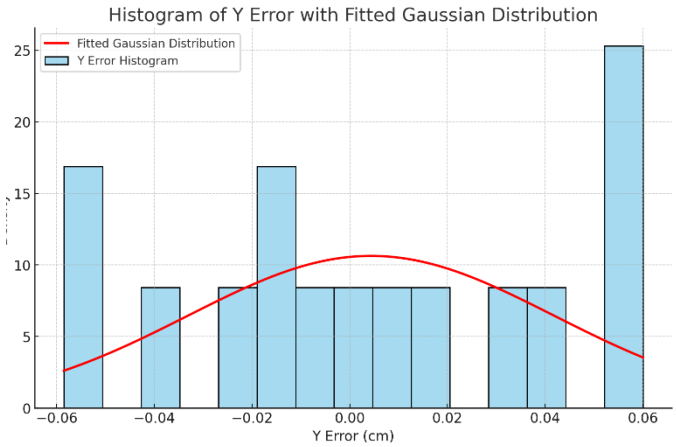
W=0.951

P-Value=0.535

نرى أن قيمة إحصائية الاختبار W أقرب إلى القيمة (1) و أن قيمة الاحتمال P-Value أكبر من 0.05 الأمر الذي يعني قبول فرضية أن الرواسب في Y تتبع التوزيع الطبيعي **بسوية دلالة (∝=0.05).**

يبين الشكل a–/9/ منحني التوزيع التكراري، و يبين الشكل b–/9/ مخطط توزيع Q-Q لرواسب الاحداثي Y بعد تصويب شذوذ العينة.





شكل a–/9/_ منحني التوزيع التكراري للرواسب Δy_i شكل b–/9/_مخطط توزيع Q-Q للرواسب Δy_i

يُظهر مخطط Q-Q للرواسب في Y أن معظم النقاط البيانية تتبع الخط الطبيعي بشكل وثيق، الأمر الذي يدعم الاستنتاج بأن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي.

بتطبيق اختبار النطاق بين الربعين(IQR) ، تبين عدم وجود دلالة ملحوظة للقيم الشاذة في بيانات رواسب X.

باستخدام العلاقتين (5) نجد:

$\bar{Y}$= 0.004 cm

$RMSE_Y = 0.038$ cm

للتحقق من فرضية أن متوسطة رواسب Y تساوي إحصائياً الصفر قمنا بتطبيق اختبار T-Test، حيث وجدنا:

T-statistic= 0.434

P-value= 0.671

نلاحظ بوضوح أن القيمة الإحصائية T صغيرة بشكل أدى إلى الحصول على قيمة احتمالية P-value أكبر كثيراً من القيمة 0.05، الأمر الذي يعني قبول فرضية أن متوسطة العينة تساوي إحصائياً القيمة صفر، و بالتالي نكون قد تحققنا من أن الرواسب في Y بعد تصويب شذوذ العينة تتبع التوزيع الطبيعي حول القيمة (0).

3.3.3.7 اختبار رواسب الإحداثيات Z لنقاط التحكم على التوزيع الطبيعي بعد تصويب الشذوذ بسوية دلالة (0.05):

أعطى اختبار شابيرو– ويلك النتائج التالية:

W=0.957

P-Value=0.642

نرى أن قيمة إحصائية الاختبار W أقرب إلى القيمة (1) و أن قيمة الاحتمال P-Value أكبر من 0.05 الأمر الذي يعني قبول فرضية أن الرواسب في Z تتبع التوزيع الطبيعي **بسوية دلالة (**$\propto$=0.05**)**. يبين الشكل a–/10/ منحني التوزيع التكراري، و يبين الشكل b–/10/ مخطط توزيع Q-Q لرواسب الاحداثي Z بعد تصويب شذوذ العينة.

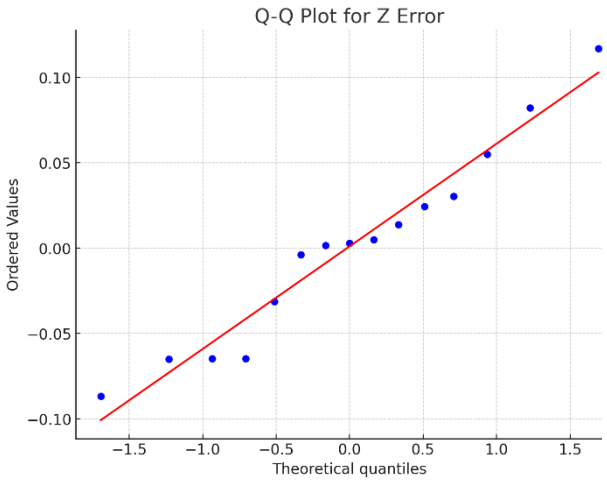
يُظهر مخطط Q-Q للرواسب Z أن معظم النقاط البيانية تتبع الخط الطبيعي بشكل وثيق، الأمر الذي يدعم الاستنتاج بأن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي.

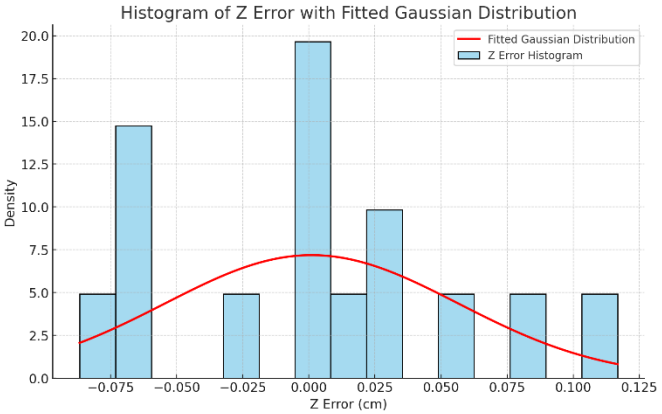
بتطبيق اختبار النطاق بين الربعين(IQR) ، تبين عدم وجود دلالة ملحوظة للقيم الشاذة في بيانات رواسب Z.

باستخدام العلاقتين (5) نجد:

$\bar{Z}$= 0.001cm

$RMSE_Z = 0.056$ cm





شكل /10/–a_ منحني التوزيع التكراري للرواسب Δz_iشكل /10/–b_مخطط توزيع Q-Q للرواسب Δz_i

للتحقق من فرضية أن متوسطة رواسب Z تساوي إحصائياً الصفر قمنا بتطبيق اختبار T-Test، حيث وجدنا:

T-statistic= 0.070

P-value= 0.945

نلاحظ بوضوح أن القيمة الإحصائية T صغيرة إلى درجة أدت إلى الحصول على قيمة احتمالية P-value أكبر كثيراً من القيمة 0.05، الأمر الذي يعني قبول فرضية أن متوسطة العينة تساوي إحصائياً القيمة صفر، و بالتالي نكون قد تحققنا من أن رواسب Z بعد تصويب شذوذ العينة تتبع التوزيع الطبيعي حول القيمة (0).

3.3.3.8 اختبار الترابط بين الرواسب في كل من X و Y بسوية دلالة (0.05) و التعليق على النتائج:

بإجراء تحليل الانحدار **(Regression analysis) على الرواسب في الإحداثيات X و Y تبين ما يلي:**

R-squared= 0.041.

P-value for X error= 0.472.

Coefficient for X error=0.1381.

الأمر الذي يشير إلى وجود علاقة ترابط ضعيفة وغير ذات دلالة إحصائية بين رواسب الإحداثيات X و Y. استناداً إلى ذلك، يمكن إعطاء الخطأ المتوسط التربيع المكاني $RMSE_{XY}$ بالعلاقة:

$$RMSE_{XY} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2}$$

حيث نجد:

$RMSE_{XY} = \sqrt{0.055^2 + 0.038^2}$=0.067 cm

من كل ما سبق نجد:

$$\frac{RMSE_{XY}}{GSD} = \frac{0.067}{1.78} = 0.04 \quad ; \quad \frac{RMSE_Z}{GSD} = \frac{0.056}{1.78} = 0.03$$

يشير تدني النسب المبينة أعلاه بين كل من الأخطاء المتوسطة التربيع المكانية و الارتفاعية و بين مسافة الاعتيان الأرضية إلى:

- كفاية و جودة توزيع نقاط التحكم الأرضية و دقة تحديدها و رصدها.
- دقة و انسجام نقاط التحكم الأرضية في الإحداثيات الثلاثية، و مدى ملاءمة تلك الإحداثيات للإحداثيات الناتجة عن التثليث الضوئي لتلك النقاط.
- تماسك النموذج الرقمي الناتج (الغمامة النقطية) و دقة عملية التثليث الضوئي بتعديل الحزم.
- دقة إرجاع و محاذاة النموذج الرقمي الناتج مع نقاط التحكم الأرضية المستخدمة.

3.3.4 تقييم دقة النماذج الرقمية:

لإجراء تقييم مستقل لدقة النماذج الرقمية (الغمامة النقطية الكثيفة، النموذج الرقمي للارتفاعات، مخطط الصور المعدلة عمودياً) و الحكم على مدى الدقة المكانية و الرأسية لهذه النماذج، تم إخضاع رواسب نقاط التحقق (عددها 30 نقطة) للتحليل الإحصائي المناسب، كون تلك النقاط لم تشرك في عملية التثليث الضوئي و الإرجاع المكاني. يشار هنا إلى أن جميع النقاط المرجعية (نقاط التحكم و نقاط التحقق) نقاط أرضية و ذلك توخياً لتحقق يتسم بالمصداقية خصوصاً فيما يتعلق بالدقة الرأسية. يبين الجدول رقم /4/ أسماء و رواسب إحداثيات نقاط التحقق المستخدمة.

جدول رقم /4/– أرقام و أسماء و فروق إحداثيات نقاط التحقق

No.	P	ΔX *cm*	ΔY *cm*	ΔZ *cm*
1	**H1**	-0.6638	0.7721	-1.5549
2	**C2**	1.2878	-0.4213	-3.0559
3	**D5**	-0.3858	1.1671	1.5194
4	**A6**	-0.7997	0.2358	-2.6425
5	**D1**	0.0889	-0.4676	-1.7399
6	**A2**	-1.1496	0.2931	-0.6806
7	**I2**	-0.7828	-0.9007	3.0783
8	**B3**	-0.1175	-0.1474	-1.5758
9	**B4**	0.1511	1.1905	0.8702
10	**F1**	-0.0777	0.1015	-1.9303
11	**A1**	0.8721	0.3813	2.3075
12	**B1**	-0.5900	-0.5662	1.4151
13	**C1**	-0.2490	0.3063	0.7446
14	**I1**	-1.5867	1.1394	-2.3913
15	**B2**	0.3802	0.2374	-0.9636

No.	P	ΔX *cm*	ΔY *cm*	ΔZ *cm*
16	**D2**	-0.2125	0.0008	-0.8829
17	**E2**	-0.0411	0.3178	0.5677
18	**F2**	0.4193	-0.6209	2.7197
19	**H2**	-0.3432	-0.2246	1.3040
20	**L2**	-1.1651	-0.1481	0.0966
21	**A3**	0.2444	0.4240	-2.1843
22	**C3**	-1.1057	-0.4595	2.4215
23	**A4**	-0.8230	0.0684	-2.9731
24	**D4**	0.7936	0.3601	0.1177
25	**B5**	0.1679	-0.5636	-2.4528
26	**F5**	1.6372	-0.1949	-0.2673
27	**C6**	-0.9745	1.2287	2.7996
28	**D6**	-0.0293	0.5987	3.0516
29	**B7**	-0.9176	-0.3268	-2.8811
30	**D7**	0.5427	-0.0369	0.0418

3.3.4.1 اختبار رواسب الإحداثيات X لنقاط التحقق على التوزيع الطبيعي بسوية دلالة (0.05):

بإجراء اختبار شابيرو– ويلك حصلنا على النتائج التالية:

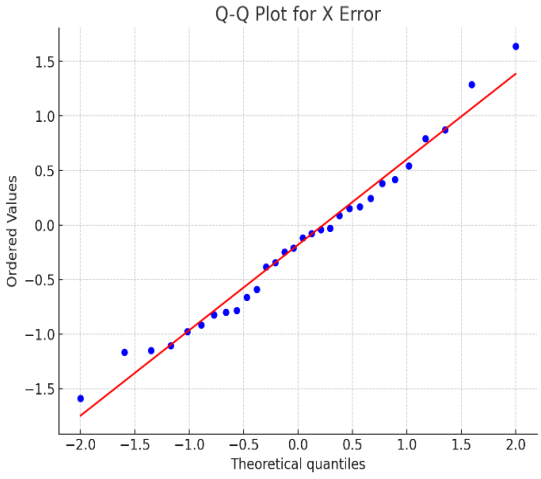
W= 0.980

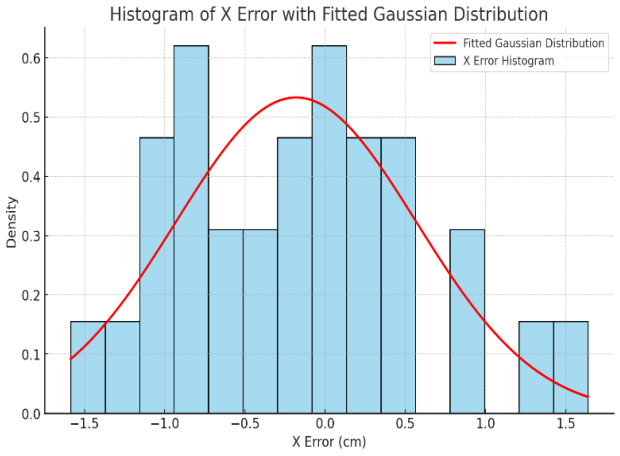
P-Value= 0.815

إن قيمة إحصائية الاختبار W أقرب إلى القيمة (1) و قيمة الاحتمال P-Value أكبر كثيراً من 0.05 الأمر الذي يعني قبول فرضية أن الرواسب في X تتبع التوزيع الطبيعي **بسوية دلالة (∝=0.05)**. يبين الشكل /11/–a منحني التوزيع التكراري، و يبين الشكل /11/– b مخطط توزيع Q-Q لرواسب الاحداثي X.

يُظهر مخطط Q-Q للرواسب X أن معظم النقاط البيانية تتبع الخط الطبيعي بشكل وثيق، الأمر الذي يدعم الاستنتاج بأن البيانات (الرواسب) تتبع التوزيع الطبيعي.

بتطبيق اختبار النطاق بين الربعين(IQR) ، تبين عدم وجود دلالة كبيرة للقيم الشاذة في بيانات رواسب X.





باستخدام العلاقتين (5) نجد:

$\overline{X}$= -0.181 cm

$RMSE_X = 0.770$ cm

شكل /11/–a_ منحني التوزيع التكراري للرواسب Δx_i شكل /11/–b_مخطط توزيع Q-Q للرواسب Δx_i

للتحقق من فرضية أن متوسطة رواسب X تساوي إحصائياً الصفر قمنا بتطبيق اختبار T-Test، حيث وجدنا:

T-statistic= -1.302

P-value= 0.203

نلاحظ أن القيمة الاحتمالية P-value أكبر من القيمة 0.05، الأمر الذي يعني قبول فرضية أن متوسطة العينة تساوي إحصائياً القيمة صفر، و بالتالي نكون قد تحققنا من أن رواسب X تتبع التوزيع الطبيعي حول القيمة (0).

3.3.4.2 اختبار رواسب الإحداثيات Y لنقاط التحقق على التوزيع الطبيعي بسوية دلالة (0.05):

أعطى اختبار شابيرو– ويلك النتائج التالية:

W=0.953

P-Value=0.201

نرى أن قيمة إحصائية الاختبار W أقرب إلى القيمة (1) و أن قيمة الاحتمال P-Value أكبر من 0.05 الأمر الذي يعني قبول فرضية أن الرواسب في Y تتبع التوزيع الطبيعي **بسوية دلالة (∝=0.05)**. يبين الشكل /12/–a منحني التوزيع التكراري، و يبين الشكل /12/–b مخطط توزيع Q-Q لرواسب الاحداثي Y.

يُظهر مخطط Q-Q للرواسب في Y أن معظم النقاط البيانية تتبع الخط الطبيعي بشكل وثيق، الأمر الذي يدعم الاستنتاج بأن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي.

بتطبيق اختبار النطاق بين الربعين(IQR) ، تبين عدم وجود دلالة كبيرة للقيم الشاذة في بيانات رواسب Y.

باستخدام العلاقتين (5) نجد:

$\overline{Y}$= 0.125 cm

$RMSE_Y = 0.580$ cm

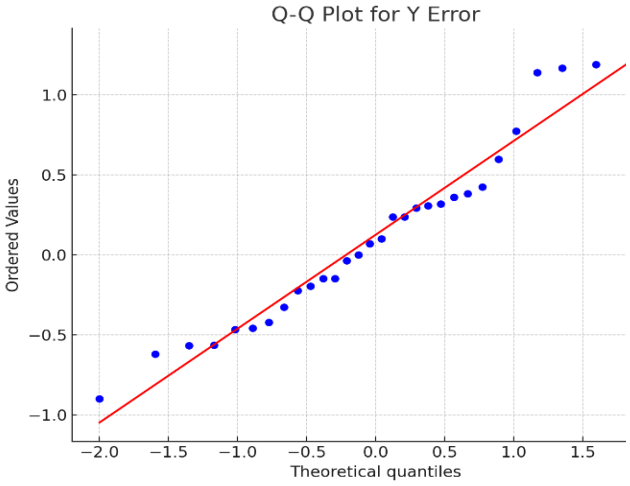
شكل /12/–a_ منحني التوزيع التكراري للرواسب Δy_i شكل /12/–b_مخطط توزيع Q-Q للرواسب Δy_i

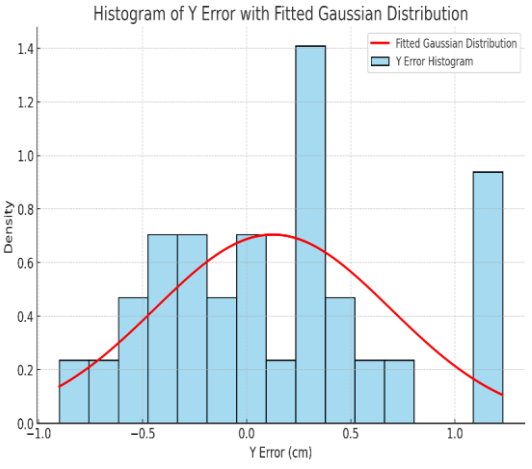
للتحقق من فرضية أن متوسطة رواسب Y تساوي إحصائياً الصفر قمنا بتطبيق اختبار T-Test، حيث وجدنا:

T-statistic= 1.187

P-value= 0.245

إن القيمة الاحتمالية P-value أكبر من القيمة 0.05، الأمر الذي يعني قبول فرضية أن متوسطة العينة تساوي إحصائياً القيمة صفر، و بالتالي فالرواسب في Y تتبع التوزيع الطبيعي حول القيمة (0).





3.3.4.3 اختبار رواسب الإحداثيات Z لنقاط التحكم على التوزيع الطبيعي بسوية دلالة (0.05):

أعطى اختبار شابيرو– ويلك النتائج التالية:

W= 0.936

P-Value= 0.072

إن القيمة الاحتمالية P-Value أكبر من 0.05 الأمر الذي يعني قبول فرضية أن الرواسب في Z تتبع التوزيع الطبيعي **بسوية دلالة (∝=0.05)**. يبين الشكل /13/–a منحني التوزيع التكراري، ويبين الشكل /13/–b مخطط توزيع Q-Q لرواسب الاحداثي Z.

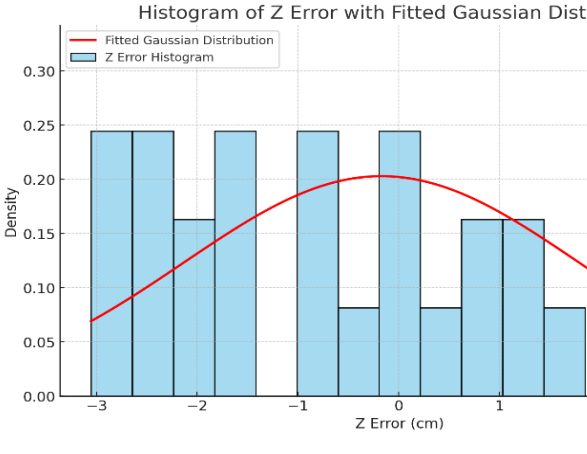
يُظهر مخطط Q-Q للرواسب Z أن معظم النقاط البيانية تتبع الخط الطبيعي بشكل وثيق، الأمر الذي يدعم الاستنتاج بأن البيانات تتبع التوزيع الطبيعي.

بتطبيق اختبار النطاق بين الربعين(IQR) ، تبين عدم وجود دلالة كبيرة للقيم الشاذة في بيانات رواسب Z.

باستخدام العلاقتين (5) نجد:

$\bar{Z}$= -0.171cm

$RMSE_Z = 1.973$ cm



شكل /12/–a_ منحني التوزيع التكراري للرواسب Δz_iشكل /12/–b_مخطط توزيع Q-Q للرواسب Δz_i

للتحقق من فرضية أن متوسطة رواسب Z تساوي إحصائياً الصفر قمنا بتطبيق اختبار T-Test، حيث وجدنا:

T-statistic= -0.468

P-value= 0.643

نلاحظ أن القيمة الاحتمالية P-value أكبر كثيراً من القيمة 0.05، الأمر الذي يعني قبول فرضية أن متوسطة العينة تساوي إحصائياً القيمة صفر، و بالتالي فرواسب Z تتبع التوزيع الطبيعي حول القيمة (0).

3.3.4.4 اختبار الترابط بين الرواسب في كل من X و Y بسوية دلالة (0.05) و التعليق على النتائج:

بإجراء تحليل الانحدار **(Regression analysis) على الرواسب في الإحداثيات X و Y تبين ما يلي:**

R-squared= 0.029.

P-value for X error= 0.370.

Coefficient for X error=-0.1285.

هذه النتائج تشير إلى وجود علاقة ترابط ضعيفة وغير ذات دلالة إحصائية بين رواسب الإحداثيات X و Y. استناداً إلى ذلك، يمكن إعطاء الخطأ المتوسط التربيع المكاني $RMSE_{XY}$ بالعلاقة:

$$RMSE_{XY} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2}$$

حيث نجد:

$RMSE_{XY} = \sqrt{0.770^{\,2} + 0.580^{\,2}}$=0.964 cm

من كل ما سبق نجد:

$$\frac{RMSE_{XY}}{GSD} = \frac{0.964}{1.78} = 0.54 \quad ; \quad \frac{RMSE_Z}{GSD} = \frac{1.973}{1.78} = 1.10$$

تشير النسب المبينة أعلاه بين كل من الأخطاء المتوسطة التربيع، المكانية و الارتفاعية، و بين مسافة الاعتيان الأرضية إلى:

- دقة و انسجام النقاط الأرضية المرجعية (نقاط التحكم و التحقق) في الإحداثيات الثلاثية، و مدى ملاءمة تلك الإحداثيات للإحداثيات الناتجة عن التثليث الضوئي لتلك النقاط.
- تماسك النموذج الرقمي الناتج (الغمامة النقطية) و دقة عملية التثليث الضوئي بتعديل الحزم.
- سوية دقة مكانية و ارتفاعية عالية للنماذج الرقمية الناتجة الأمر الذي يدعم ملاءمتها لتكون أساساً متيناً لإنتاج الخرائط الطبوغرافية بمقاييس كبيرة (< 1/1000).

4. النتائج و التوصيات:

استناداً إل كل ما تقدم، يمكن استخلاص النتائج و التوصيات التالية:

1. يمكن لتقنيات استحواذ البيانات المكانية باستخدام الطائرات المسيرة أن تقدم في سورية حلولاً رائدة تتفوق في كل معايير الجودة في ميادين الدراسة و التخطيط التي تتطلب إجراء مسوحات طبوغرافية بمقاييس كبيرة.
2. إن التخطيط الناجح لأعمال المسح التصويري باستخدام الطائرات المسيرة، بما في ذلك الاختيار و التوزيع المدروس للنقاط المرجعية الأرضية، و الذي يتمتع بالكفاية و التجانس و عدم التحيز و مراعاة تفاصيل الموقع المستهدف، إضافة إلى الرصد و الحساب الدقيق لشبكة النقاط هذه و إظهارها بما يكفي من وضوح على الصور الملتقطة، مع الانتقاء السليم لمتحولات عملية التصوير و ضمان نسب تداخل جيدة بين الصور، كفيل بإعادة تشكيل الحزم الضوئية المولدة للصور و إجراء عملية

التثليث الضوئي بالتعديل الحزمي و إنتاج نماذج رقمية بسوية دقة عالية تستجيب بكفاءة متميزة للمعايير العالمية المعروفة في هذا المجال(ASPRS مثالاً).

3. يجب القيام بالتحليل و الحكم إحصائياً على نتائج معالجة الصور باستخدام برمجيات الرؤية الحاسوبية و التأكد من اتباع فروق إحداثيات النقاط الأرضية للتوزيع الطبيعي حول القيمة الصفرية و التحقق من خلو الفروق من النقاط الشاذة، لتعقب مصادر الشذوذ و تلافيها–عند وجودها– و إعادة عملية التثليث الضوئي و المحاذاة، قبل اتخاذ أي قرار باستبعاد القيم الشاذة من المعالجة و ذلك لتجنب حرمان النماذج الناتجة من أي درجة حرية.
4. من خلال القيام بالتخطيط طبقاً لما ذكر أعلاه، و اختيار نسب تداخل مناسبة (80% أمامية و 70% جانبية) و الإجراء الناجح لأعمال الطيران و معالجة الصور المستحوذة و تشخيص العناصر الشاذة و تصويبها، توصل البحث إلى دقة متميزة في تنفيذ التثليث الضوئي بتعديل الحزم و بناء النماذج الرقمية (الغمامة النقطية– النموذج الرقمي للارتفاعات– مخطط الصور المصححة عمودياً) لمنطقة الدراسة.
5. من خلال تحليل فروق إحداثيات نقاط التحكم (GCPs) إحصائياً أعطى البحث دقة أفقية تعادل 0.04 من قيمة مسافة الاعتيان الأرضية و دقة ارتفاعية تعادل 0.03 من مسافة الاعتيان، أي أن:

$$\frac{RMSE_{XY}}{GSD} = \frac{0.067}{1.78} = 0.04 \quad ; \quad \frac{RMSE_Z}{GSD} = \frac{0.056}{1.78} = 0.03$$

و هو ما يشير إلى جودة عالية في التخطيط و التحضير لأعمال الطيران و استحواذ الصور و تماسك النموذج الرقمي الناتج و ملاءمة و محاذاة مواقع نقاط التحكم فيه مع مواقعها على الأرض، الأمر الذي أعطى دقة فائقة في تنفيذ التثليث الضوئي بتعديل الحزم.

6. من خلال تحليل فروق إحداثيات نقاط التحقق (CPs) إحصائياً أعطى البحث دقة أفقية تعادل 0.54 من قيمة مسافة الاعتيان الأرضية و دقة ارتفاعية تعادل 1.1 من مسافة الاعتيان، أي أن:

$$\frac{RMSE_{XY}}{GSD} = \frac{0.964}{1.78} = 0.54 \quad ; \quad \frac{RMSE_Z}{GSD} = \frac{1.973}{1.78} = 1.10$$

و هو ما شكل تقييماً مستقلاً لجودة و دقة النماذج الرقيمة الناتجة، و ما يشير إلى جودة توزيع و انسجام و تجانس الشبكة الأرضية المرجعية و سوية الدقة (المستوية و الارتفاعية) الرفيعة التي تتمتع بها المخرجات الرقمية، و التي تتفوق على المعايير و الحدود المنصوص عليها في الكثير من الأدبيات التقنية الموافقة، الأمر الذي يدعم صلاحية و أفضلية تلك المخرجات لتكون أساساً لإنجاز المخططات الطبوغرافية بمقاييس كبيرة و تمثل بديلاً ثورياً لأعمال الرفع الطبوغرافي بالأساليب التقليدية المتبعة في سورية لإنتاج خرائط بمقاييس كبيرة، و هو ما سيتم في أبحاث قادمة اختباره و العمل فيه على بيان مدى المقاييس التي يمكن الوصول إليها.

7. بين البحث ضرورة العمل على تطوير المعايير و الحدود التي تنسجم مع تجربتنا الوطنية و عدم الاكتفاء أو الاعتماد على المعايير المعمول بها عالمياً في هذا المجال و التي وضعت لتلائم ظروف و شروط العمل لبلدان المنشأ.
8. أكدت النتائج، مع الأخذ بعين الاعتبار نتائج أبحاث سابقة، كفاءة التقنية المختبرة و تلبيتها لمعايير الجودة من زمن و كلفة و ملاءة فنية و سوية رفيعة في الدقة المستوية كما الدقة الارتفاعية.

5. قائمة المراجع المستخدمة:

1- الدكتور المهندس أحمد العمر، المساحة التصويرية باستخدام الطائرات المسيرة لأغراض التخطيط العمراني في سوريا- دراسة مقارنة، بحث علمي منشور في مجلة جامعة أبحاث البعث لعام 2023.

2- الدكتور المهندس وسيم موسى، التطورات الحالية في المساحة التصويرية باستخدام الطائرة بدون طيار مع أمثلة تطبيقية، بحث علمي منشور في مجلة أبحاث جامعة البعث لعام 2020.

3- الدكتور المهندس أحمد العمر، كتاب الاحتمالات و نظرية أخطاء القياسات، منشورات جامعة البعث، 1997.

4- Eisenbeiss, H. (2009). UAV photogrammetry. ETH Zurich.

5- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 92, 79-97.

6- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. Applied Geomatics, 6(1), 1-15.

7- Asner, G. P., & Martin, R. E. (2009). Airborne spectranomics: Mapping canopy chemical and taxonomic diversity in tropical forests. Frontiers in Ecology and the Environment, 7(5), 269-276.

8- Turner, D., Lucieer, A., & Watson, C. (2012). An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution UAV imagery. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 72, 24-35.

9- Jaakkola, A., Hyyppä, J., Kukko, A., Yu, X., Litkey, P., Hyyppä, H., & Ahokas, E. (2010). A low-cost multi-sensoral mobile mapping system and its feasibility for environmental mapping. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 65(6), 514-528.

10- Forlani, G., Pinto, L., Re, C., & Scaioni, M. (2015). Terrestrial photogrammetry in archaeological applications. Applied Geomatics, 7(1), 3-15.

11- Remondino, F., & Fraser, C. (2006). Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing, and Spatial Information Sciences, 36(5), 266-272.

12- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). 'Structure-from-Motion'

photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. Geomorphology, 179, 300-314.

13- Kraus, K. (2007). Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans. Walter de Gruyter.

14- GIM International Articles on Photogrammetric Accuracy and Control Points.

15- Wolf, P. R., & Dewitt, B. A. (2000). Elements of Photogrammetry with Applications in GIS (3rd Edition). McGraw-Hill:

16- Kraus, K. (2007). Photogrammetry: Geometry from Images and Laser Scans (2nd Edition). Walter de Gruyter:

17- McGlone, J. C. (2013). Manual of Photogrammetry (6th Edition).

18- Hartley, R., & Zisserman, A. (2004). Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press.

19- Faugeras, O., & Luong, Q.-T. (2001). The Geometry of Multiple Images: The Laws that Govern the Formation of Multiple Images of a Scene and Some of Their Applications. MIT Press.

20- Triggs, B., McLauchlan, P. F., Hartley, R. I., & Fitzgibbon, A. W. (2000). Bundle Adjustment – A Modern Synthesis. In Vision Algorithms: Theory and Practice (pp. 298-372). Springer.

21- Szeliski, R. (2010). Computer Vision: Algorithms and Applications. Springer.

22- Ma, Y., Soatto, S., Kosecka, J., & Sastry, S. S. (2004). An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models. Springer.

23- ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data.

24- Pix4D Documentation, Ground Sampling Distance (GSD) and Photogrammetric Accuracy.

25- Agisoft Metashape User Manual: Accuracy assessment and GCPs management.

26- Gini, R., Passoni, D., Pinto, L., & Sona, G. (2014). Use of unmanned aerial systems for multispectral survey and digital

surface model generation. Environmental Engineering and Management Journal, 13(10), 2541-2548.

27- تقرير السيد كميل دورافور(M. C. DURAFFOURD) ، مقدم بمناسبة انعقاد الاجتماع العام الرابع لقسم الجيوديزيا للاتحاد العالمي للجيوديزيا و الجيوفيزياء-استكهولم 11-23 آب 1930، المديرية العامة للمساحة، سورية.

28- American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS) (1990). Accuracy Standards for Large-Scale Maps.

29- Mikhail, E. M., Bethel, J. S., & McGlone, J. C. (2001). Introduction to Modern Photogrammetry. John Wiley & Sons.

30- Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. Remote Sensing of Environment, 80(1), 185-201.

31- Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2006). *Adjustment Computations: Spatial Data Analysis*. John Wiley & Sons.