

# مجلة جامعة حمص

سلسلة العلوم الهندسية المدنية والمعمارية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 47 . العدد 13

1447 هـ - 2025 م

الأستاذ الدكتور طارق حسام الدين رئيس جامعة حمص

المدير المسؤول عن المجلة

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الإنسانية	أ. د. وليد حمادة
رئيس تحرير مجلة جامعة حمص للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية	د.نعيمة عجيب

عضو هيئة التحرير	د. محمد فراس رمضان
عضو هيئة التحرير	د. مضر سعود
عضو هيئة التحرير	د. ممدوح عبارة
عضو هيئة التحرير	د. موفق تلاوي
عضو هيئة التحرير	د. طلال رزوق
عضو هيئة التحرير	د. أحمد الجاعور
عضو هيئة التحرير	د. الياس خلف
عضو هيئة التحرير	د. روعة الفقس
عضو هيئة التحرير	د. محمد الجاسم
عضو هيئة التحرير	د. خليل الحسن
عضو هيئة التحرير	د. هيثم حسن
عضو هيئة التحرير	د. أحمد حاج موسى

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها

الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة حمص

سورية . حمص . جامعة حمص . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : ++ 963 31 2138071

. موقع الإنترنت : [www.homs-univ.edu.sy](http://www.homs-univ.edu.sy)

. البريد الإلكتروني : [journal.homs-univ.edu.sy](http://journal.homs-univ.edu.sy)

**ISSN: 1022-467X**

## شروط النشر في مجلة جامعة حمص

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
  - طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
  - إذا كان الباحث طالب دراسات عليا:  
يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقة على النشر في المجلة.
  - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:  
يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.
  - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :  
يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.
  - إذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :  
يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.
  - يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):  
عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي ( كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1- مقدمة
  - 2- هدف البحث
  - 3- مواد وطرق البحث
  - 4- النتائج ومناقشتها .
  - 5- الاستنتاجات والتوصيات .
  - 6- المراجع.

- يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات ( الآداب - الاقتصاد - التربية - الحقوق - السياحة - التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):
- عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي ( كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1. مقدمة.
- 2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
- 3. أهداف البحث و أسئلته.
- 4. فرضيات البحث و حدوده.
- 5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
- 6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
- 7. منهج البحث و إجراءاته.
- 8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
- 9. نتائج البحث.
- 10. مقترحات البحث إن وجدت.
- 11. قائمة المصادر والمراجع.
- 7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:
  - أ- قياس الورق 25×17.5 B5.
  - ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 - يمين 2.5- يسار 2.5 سم
  - ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8
  - ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20
- كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي - العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.
- ج. يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.
- 8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.
- 9- تقديم أي بحث للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.

10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة  
11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام ورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة - الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة - سنة النشر - وتتبعها معترضة ( - ) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة - دار النشر وتتبعها فاصلة - الطبعة ( ثانية . ثالثة ) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة .  
وفيما يلي مثال على ذلك:

-MAVRODEANUS, R1986- Flame Spectroscopy. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

— بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة — المجلد والعدد ( كتابة مختزلة ) وبعدها فاصلة — أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة.  
مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases Clinical Psychiatry News , Vol. 4. 20 – 60

ج . إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: ( المراجع In Arabic )

## رسوم النشر في مجلة جامعة حمص

1. دفع رسم نشر (50000) ل.س أربعون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.
2. دفع رسم نشر (200000) ل.س مئة ألف ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .
3. دفع رسم نشر (200) مننًا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .
4. دفع مبلغ (15000) ل.س ستة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.

## المحتوى

الصفحة	اسم الباحث	اسم البحث
44-11	د.ريم بوبو	تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق
62-45	د.م. نبراس احمد حمدان	دور الكلس وظروف التشغيل في ضبط pH وتحسين أداء نزع النتريجة في المفاعل الكلسي-الكبريتي ذاتي التغذية
110-63	غانم سلطانه د.أحمد العمر	دراسة جدوى المسح التصويري باستخدام الطائرات المسييرة في تكتيف نقاط الأساس الجيوديزي



## تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

د. ريم بوبو<sup>1</sup>

### ملخص

يتسبب حفر الأنفاق بحدوث تشوهات ناتجة عن تخريب الحالة الإجهادية السائدة في الوسط قبل البدء بأعمال الحفر. عند حفر الأنفاق ضمن وسط ضعيف المقاومة وفي حال عدم تنفيذ تدعيم سريع وكاف لمحيط حفريات النفق يمكن أن تتطور هذه التشوهات لتتحول إلى انهيارات خطيرة تبدأ في محيط النفق وقد تمتد لأعماق كبيرة. يتضمن هذا البحث تحليل لأهم العوامل التي يمكن أن تكون ذات تأثير مباشر على عمق انتشار هذه الانهيارات وذلك في دراسة لحالات أنفاق منفذة بالطريقة النمساوية الحديثة ضمن وسط صخري ضعيف المقاومة. الغاية من البحث هي دراسة إمكانية التنبؤ بعمق الانهيارات المحتملة في محيط حفريات النفق بناءً على العوامل المقترحة بالإضافة لتحليل الأهمية النسبية لهذه العوامل. اعتمدت الدراسة على تحليل عدد هام من الحالات المرجعية تضمنت بيانات أكثر من 40 مقطع لأنفاق متوضعة تحت سماكات تغطية متنوعة وبخصائص صخور مختلفة من مقطع لآخر، الأمر الذي اقتضى تنفيذها وتدعيمها بطرق مختلفة. اتبع البحث منهجية قائمة على طريقة تحليل الانحدار Regression Analysis بالاعتماد على طرق الذكاء الصناعي. بينت الدراسة أن العامل الأساسي والمسيطر على عمق الانهيارات الصخرية هو خصائص الصخر المتمثلة بقيمة GSI. كما تبين أن طريقة حفر وتدعيم النفق أكثر أهمية من سماكة التغطية أعلى النفق في الحالة المدروسة لأنفاق عميقة خاضعة لظاهرة الضغط الجبلي. أكدت مقارنة القياسات الحقلية مع نتائج التحليل صلاحية المنهجية المقترحة للتنبؤ بأعماق الانهيارات ودراسة العديد من العوامل التي يصعب أخذها بعين الاعتبار بطرق التحليل التقليدية. **كلمات مفتاحية:** انهيار صخري، أنفاق، الطريقة النمساوية الحديثة، GSI، تحليل الانحدار، ذكاء صناعي.

1. أستاذ مساعد - قسم الجيوتكنيك - كلية الهندسة المدنية - جامعة حمص.

## **Analysis of parameters affecting rock collapse depth around tunnels excavations.**

### **Abstract**

Tunneling causes deformations resulting from stress conditions changes. In case of tunneling in a weak and low resistance zone, and when using insufficient or late support, these deformations can cause dangerous collapses that may extend to great depths around the tunnel. This research includes an analysis of the most important factors that can have a direct impact on the depth of these collapses in case of NATM tunnels constructed in a weak rock environment. The goal of this research is to study the possibility of predicting of the potential collapse's depth based on the suggested factors in addition to analyzing the relative importance of these factors. The study based on analyzing reference cases that included data from more than 40 tunnel sections located under various cover thicknesses and with different rock conditions. The research relied on Regression Analysis method based on artificial intelligence. The study showed that the most important factor is the rock characteristics, mainly GSI value. It also turned out that the excavation and support method is more important than the cover thickness above the tunnel. Comparing field measurements with the analysis results confirmed the validity of the proposed methodology to predict the collapse depth and to study many factors that are difficult to be considered by traditional methods.

**Keywords:** Rock collapse, rock tunnels, NATM, GSI, regression analysis, artificial intelligence.

## مقدمة

إن حفر الأوساط الصخرية الضعيفة لتنفيذ الأنفاق ينطوي على خطورة انهيار الكتل الصخرية أعلى حفرة النفق، الأمر الذي قد يكون أكثر خطورة من تنفيذ الحفر في الأوساط الترابية. يعتقد الكثيرون أن الأوساط الصخرية تتمتع بمقاومة كافية قد تسمح بحفرها دون تدعيم أو بتدعيم خفيف، هذا الاعتبار الذي يمكن أن يتسبب بمخاطر كارثية في حال كانت الصخور مشققة بكثافة أو متطبقة ذات طبقات رقيقة ضعيفة. تشكل التشققات والفواصل بكل أشكالها نقاط ضعف في الأوساط الصخرية وبخاصة تلك التي تمتد على شكل سطوح تطبق تقسم الصخر إلى طبقات رقيقة يمكن أن تتكسر وتتهار بسهولة عند حفرها. تبدأ الانهيارات في محيط حفرة النفق ويمكن أن تمتد لأعماق قد تصل لبضعة أمتار ضمن الكتلة الصخرية المحيطة بالنفق.

بالإضافة لتأثير خصائص فواصل الصخر، فإن انهيار الأوساط الصخرية المتطبقة يتعلق بالعديد من العوامل الأخرى كقيم الإجهادات الثانوية في محيط حفرة النفق، الخصائص الجيوتكنيكية للصخر، عمق وأبعاد الحفرة، كذلك طريقة الحفر والتدعيم المعتمدة.

فيما يتعلق بدراسة انهيار الصخور في محيط الأنفاق ومع تطور تقنيات تنفيذ الأنفاق ركزت بعض الدراسات على آليات وأسباب الانهيار [2], [1] اخذين بعين الاعتبار طريقة تنفيذ النفق بشكل أساسي [4], [3].

درس [5] *Martin et al.* العديد من الحالات لانهار الصخور في محيط الأنفاق آخذاً بعين الاعتبار معيار الانهيار لـ *Hoek-Brown* [6] من أجل تحديد اتساع المنطقة المعرضة للانهار أعلى النفق. حيث أكد على أهمية تأثير الإجهادات وخصائص الصخر في محيط حفرة النفق، بشكل خاص قيمة مقاومة الضغط المحوري للصخر السليم وخصائص فواصل الصخر كعوامل مساهمة في حدوث الانهيارات.

درس [7] *Li et al.* انهيار الصخور في محيط نفق *Shimenya* في الصين الذي امتد 4m أعلى النفق حيث بينت الدراسة أن أهم أسباب انهيار الصخور في محيط حفرة النفق المدروس هو توزع واتجاه الطبقات في الصخور المتطبقة، كما أن وجود جريان للمياه الجوفية أثر على استقرار محيط النفق بالإضافة لعدم كفاية التدعيم المستخدم.

وجد [8] Wang *et al.* أن أهم العوامل المؤدية إلى انهيار الصخور في محيط حفريات الأنفاق هي: المياه الجوفية، تدعيم واجهة الحفر، خصائص الصخر وبشكل خاص المقاومة على الضغط بالإضافة لسماكة التغطية أعلى النفق.

درس [9] Qiao *et al.* انهيار الكتل الصخرية أعلى نفق Chen Jiashan في الصين حيث تبين أن العوامل المسببة للانهيار كانت: الطبيعة الجيولوجية للصخر المحيط بالنفق، تطور الإجهادات الثانوية في محيط حفريات النفق، تأثير المياه الجوفية، طريقة تنفيذ النفق (حفر بمقطع كامل)، عدم كفاية والتأخر بتنفيذ التدعيم لمحيط الحفريات.

اعتمدت أغلب الدراسات السابقة [11], [10] التي تناولت انهيار الصخور في محيط حفريات الأنفاق على الطرق التحليلية التقليدية [12] أو على طرق النمذجة الرقمية [13] التي تتطلب استخدام العديد من الفرضيات لتبسيط الحالة المدروسة. حيث اعتمدت هذه الدراسات على فرضية الأوساط المستمرة وهو ما لا ينطبق على الأوساط الصخرية التي لا تخلو من الفواصل والتشققات بمختلف أنواعها.

نتيجةً للقيود الكثيرة ولتعقيد المسألة لم تحظ محاولات التنبؤ بانهيار الصخور في محيط الأنفاق باستخدام طرق التحليل التقليدية [16], [15], [14] بقدر كبير من النجاح.

إن إدراج كل العوامل التي يمكن أن تتسبب بانهيار الصخور في محيط حفريات الأنفاق بما فيها خصائص الصخور والفواصل والعوامل التكنولوجية المتعلقة بطريقة الحفر والتدعيم يتطلب اعتماد نموذج متطور يأخذ بعين الاعتبار تعقيد المسألة المطروحة للدراسة.

تشكل طرق الذكاء الصناعي بتنوعها الكبير خياراً مثالياً يمكن من دراسة قضايا يصعب أو يستحيل برمجتها عبر الوسائل الخوارزمية الكلاسيكية [25]. تعتمد معظم هذه الطرق في معالجتها للمسائل المدروسة على مبدأ تعلم الآلة Machine Learning الذي يشمل التقنيات التي تسمح بالتعلم والتنبؤ انطلاقاً من التدريب دون استخدام علاقات رياضية محددة بشكل مسبق [26].

وظفت طرق الذكاء الصناعي في العديد من الأبحاث المتعلقة بدراسة حفريات الأنفاق حيث وظفت Nguyen *et al.* [17] طريقة تحليل الانحدار الخطي المتعدد Multiple Linear Regression Analysis (MLRA) لدراسة حفر الأنفاق بالتفجير حيث وظفت هذه الطريقة

للتنبؤ بمساحة الجزء المحفور في واجهة الحفر في كل خطوة تفجير وأعطت نتائج مرضية مطابقة للقياسات الحقلية في الحالة المدروسة.

قام [18] Farhadian and Katibeh بدراسة التنبؤ بتسرب المياه إلى واجهة نفق دائري المقطع باستخدام طريقة تحليل الانحدار حيث وظفت الخصائص الجيولوجية والهيدرولوجية للوسط المحيط بالنفق للتنبؤ بنجاح بكمية المياه المتسربة لواجهة الحفر.

وظف [19] Jakubowski *et al.* خصائص الوسط الصخري بالإضافة لبعض عوامل تشغيل الآلة الدرعية المدعمة بضغط التربة في موديل يعتمد على تحليل الانحدار متعدد البارامترات وذلك لتقييم أداء الحفر وسرعة تقدم الآلة الدرعية بناءً على العلاقة الخطية أو اللاخطية بين العوامل المقترحة في الدراسة.

دمج [20] Singh *et al.* النمذجة الرقمية مع طريقة تحليل الانحدار من أجل التنبؤ بهبوطات سطح الأرض أعلى حفرة نفق بالاعتماد على عوامل متعلقة بخصائص التربة والنفق المنفذ. حيث تم اقتراح علاقة تربط بين الهبوط والعوامل المقترحة بناءً على طريقة تحليل الانحدار التي أعطت نتائج مقارنة جداً لتقييم الهبوطات المقاسة حقلياً.

درس [21] Shi *et al.* إمكانية توظيف طريقة شعاع الدعم الآلي Support Vector Machine وتحليل الانحدار اللاخطي باستخدام السلاسل الزمنية Time Series Regression للتنبؤ بالهبوط أعلى قمة نفق منفذ في وسط صخري ووجد أن هذه الطرق تقدم إمكانية تعلم عالية ويمكن توظيفها للتنبؤ بالتشوهات في قمة نفق منفذ في وسط صخري حيث يصعب دراسة العلاقة اللاخطية بين العوامل المختلفة بالطرق التقليدية.

وظف [22] Xue *et al.* إحدى تقنيات الذكاء الصناعي وهي التحليل الهرمي والمنطق الضبابي للتنبؤ بانهييار صخور في محيط نفق Zhengwan اعتماداً على ثمانية عوامل، ووجد أن ظروف المياه الجوفية وخصائص كتلة الصخور هي أكثرها تأثيراً مسبباً انهيار الصخور في الحالة المدروسة.

إن غالبية الأبحاث التي تناولت موضوع دراسة الأنفاق باستخدام طرق تحليل الانحدار ركزت على صلاحية تطبيق هذه الطرق وإمكانية توظيفها في مجال دراسة الأنفاق. بالرغم من الامكانيات

الكبيرة لطرق تحليل الانحدار في معالجة عدد كبير من العوامل إلا أنها لم توظف بشكل فعلي للتعلم بدراسة آليات الانهيار في محيط الأنفاق كما يقترح هذا البحث.

### أهمية وأهداف البحث

يتناول هذا البحث موضوع الانهيارات الصخرية التي يمكن أن تنتج عن حفر الأنفاق في الأوساط الصخرية المتطبقة، حيث يمكن أن تؤدي أعمال الحفر لتكسر الطبقات الرقيقة التي تعلو النفق مسببة انهيارات قد تمتد لعدة أمتار في الكتلة الصخرية المحيطة بالنفق. قد تحدث هذه الانهيارات بالرغم من تدعيم حفريات النفق وذلك في حال اعتماد طريقة حفر أو تدعيم غير ملائمة.

تتجلى أهمية البحث في تحليل العوامل المؤثرة على حدوث هذه الانهيارات وعمق انتشارها في محيط الأنفاق المنفذة بالطرق التقليدية، الأمر الذي يمكن أن يساعد على اقتراح حلول مساعدة لتجنبها والحد من أضرارها.

تهدف هذه الدراسة إلى التوصل لآلية للتنبؤ بعمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات النفق اعتماداً على عوامل متمثلة بسماكة التغطية أعلى النفق وحالة الإجهادات السائدة في محيط حفريات النفق، بالإضافة لعوامل متعلقة بخصائص الفواصل المنتشرة في الوسط الصخري وطريقة حفر وتدعيم النفق. كما أن هذا البحث سوف يساهم في تسليط الضوء على العوامل المسيطرة والتي يمكن أن تلعب الدور الرئيسي في نشوء وتطور مناطق الانهيارات.

### 1. انهيار الصخور في محيط حفريات الأنفاق

إن انهيار حفريات الأنفاق المنفذة في الصخور هو أمر مرتبط بقيم الإجهادات السائدة في محيط الحفريات وبخصائص الوسط الصخري المحفور. فعند مستو منخفض للإجهادات في محيط الحفريات يكون الانهيار محكوماً باستمرارية وتوزع الفواصل الطبيعية في الصخر، أما عندما تزداد الإجهادات في محيط النفق تسيطر على عملية الانهيار الفواصل الجديدة الناجمة عن تزايد الإجهادات والتي تنتشر في محيط حفريات النفق.

غالباً ما يشار لهذا النوع من الفواصل والتصدعات الناتجة عن تزايد الإجهادات في محيط حفريات الأنفاق بحالة انهيار مفاجئ Brittle Failure. عند تنفيذ الأنفاق على أعماق متوسطة تتوضع

مناطق الانهيار هذه بالقرب من محيط حفرة النفق، بينما في حال سماكات التغطية الكبيرة تمتد الانهيارات في كامل محيط الحفر لأعماق كبيرة. عادةً ما يعبر عن مقاومة القص للصخور بمعيار كولومب الذي يعتمد استخدام ثابتين هما التماسك وزاوية الاحتكاك الداخلي، بينما اقترح Hoek and Brown [6] معيار انهيار تجريبي أصبح مستخدماً بشكل واسع في ميكانيك الصخور بسبب مقدرته على تمثيل العلاقة اللاخطية بين الإجهادات الرئيسية الأعظمية والأصغرية، يعطى بالمعادلة التالية:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^{0.5} \quad (1)$$

حيث أن:

$\sigma_1, \sigma_3$ : قيم الإجهاد الرئيسي الأعظمي والأصغري لحظة الانهيار.

$\sigma_c$ : هي المقاومة على الضغط المحوري للصخر السليم.

$s$ : ثابت يعبر عن درجة تشقق الصخر قيمته أقل من واحد للصخر المشقق ويساوي 1 للصخر السليم، يحسب من العلاقة:

$$s = e^{\left( \frac{GSI-100}{9} \right)} \quad (2)$$

$m_b$ : ثابت يعبر عن نوع الصخر المتشقق ويحسب من العلاقة:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left( \frac{GSI-100}{28} \right)} \quad (3)$$

$m_i$ : ثابت يأخذ قيمته بحسب نوعية الصخر السليم.

GSI: دليل المقاومة الجيولوجية اقترح من قبل Hoek بهدف تقييم خصائص الصخور في مختلف الظروف الجيولوجية. يعتمد تحديد قيمة GSI على الملاحظات الحقلية لكل من خصائص الكتل الصخرية وخصائص الفواصل المنتشرة على سطح الصخر عموماً.

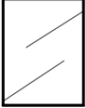





عند حساب قيمة الدليل GSI تقسم الصخور كما يبين الجدول 1 إلى مجموعات تتدرج من صخور سليمة قليلة التشققات إلى صخور محطمة مقسمة إلى عدد كبير جداً من الكتل. بينما تتراوح

## تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

---

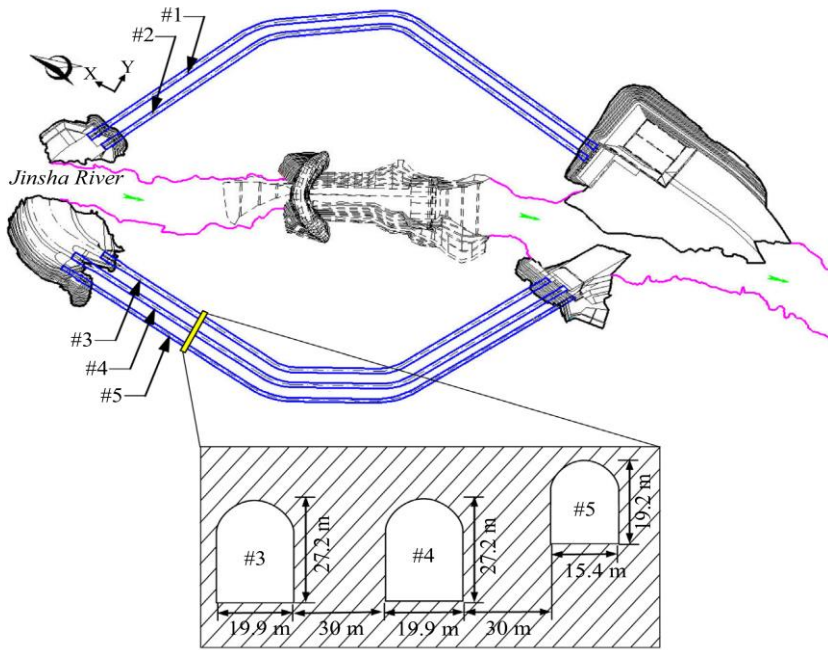
خصائص الفواصل من خشنة جداً، متقاطعة وغير خاضعة للتجوية إلى فواصل انسيابية حاوية على مواد مالئة ناعمة.

جدول 1: تقييم GSI بناءً على خصائص الكتل الصخرية وخصائص فواصل الصخر [6].

STRUCTURE	SURFACE CONDITIONS	DECREASING SURFACE QUALITY →					
		90	80	70	60	50	
 <b>Intact or Massive</b> صخور سليمة أو بتشققات قليلة متباعدة	تشققات خفنة جداً، طرية، غير خاضعة للتجوية					N/A	N/A
 <b>Blocky</b> صخور مقسمة إلى بلوكات، مع وجود ثلاث مجموعات من التشققات	فواصل خشنة، مجوأة بشكل طفيف، سطوح مفيعة						
 <b>Very Blocky</b> صخور مكونة من قطع صغيرة، أربع مجموعات تشققات أو أكثر.	فواصل ناعمة، مجوأة بشكل معتدل						
 <b>Blocky/Disturbed/Seamy</b> صخور متصدعة، مجموعات شقوق عديدة متقاطعة، وجود سطوح تطبق أو استحالة	سطوح انسيابية، مجوأة بشكل كبير وجود مواد مالئة وفتات صخري						
 <b>Disintegrated</b> صخور ضعيفة، متصدعة بشكل كبير إلى حطام دائري وزاوي القطع.	سطوح انسيابية، مجوأة بشكل كبير، مواد مالئة ناعمة						
 <b>Laminated/Sheared</b> صخور مفتتة تشققات متقاربة جداً مع وجود سطوح استحالة أو قص.		N/A	N/A				10

2. معطيات الدراسة

يتناول هذا البحث تحليل معطيات مأخوذة من الدراسات المرجعية لمجموعة أنفاق محطة Wudongde للطاقة الكهرومائية المنفذة في الصين [24], [23]. يتضمن البحث معطيات ثلاثة أنفاق تحويل متجاورة ومتوازية ذات الأرقام (3, 4, 5) المبينة في الشكل 1. الأنفاق الثلاثة متوضعة ضمن وسط صخري مكون من طبقات صخور استحالية واندفاعية رقيقة هشة تتكون بشكل عام من طبقات من الدولوميت الرخامي الرمادي مع طبقات من صخر كلسي ودولوميت. يبلغ سمك الطبقة الواحدة من الطبقات الرقيقة 10-50mm، وسمك الطبقات الرقيقة للغاية أقل من 10mm. تبلغ أطوال هذه الأنفاق الثلاثة 1472m، 1614m، 1700m على التوالي، تبلغ سماكة التغطية أعلى الأنفاق 3, 4 القيمة 830m وأعلى النفق 5 تبلغ 842m، المقطع العرضي للأنفاق قوسي أبعاده موضحة في الشكل 1.



الشكل 1: المسار والمقطع العرضي للأنفاق 3, 4, 5 لمحطة تحويل Wudongde [23].

انهارت الأنفاق الثلاثة بشكل متكرر أثناء عمليات التنفيذ، لذلك تم إجراء مراقبة حقلية دقيقة وموسعة حيث تم تسجيل أعماق الانهيارات في نقاط مراقبة بالإضافة لتحديد قيم العديد من العوامل التي يمكن أن تلعب دوراً في حدوث هذه الانهيارات. سيتم توظيف قيم القياسات الحقلية التي سجلت في نقاط المراقبة الموزعة على امتداد الأنفاق الثلاثة ليتم تحليلها ودراسة العلاقة فيما بينها باستخدام طريقة تحليل الانحدار.

### 3. التنبؤ بعمق الانهيار عن طريق توظيف تحليل الانحدار المتعدد

#### 3.1 تحليل الانحدار المتعدد: Multiple regression analysis

تعد طرق تحليل الانحدار المتعدد من أهم وأقوى أساليب التحليل الإحصائي الذي يربط مجموعة من المتغيرات بطريقة تمكن من التنبؤ بقيمة تابع  $y$  مرتبط بأكثر من متغير  $x_i$  (ولهذا يسمى متعدد كونه يعتمد على العديد من المتغيرات على خلاف تحليل الانحدار البسيط الذي يربط تابع  $y$  مع متغير واحد فقط  $x$ ). يتم في تحليل الانحدار استخدام البيانات المتوفرة لبناء نموذج تنبؤي قادر على توصيف الظاهرة المدروسة بناءً على مجموعة من النماذج المقترحة كأمثلة يبني عليها التنبؤ.

تعتمد عمليات التنبؤ باستخدام تحليل الانحدار على توظيف قيم أولية  $x_i$  للمتغيرات يقترحها الموديل المدروس بناءً على أمثلة معطاة، حيث يتم الوصول إلى تابع التنبؤ  $y$  بعد إضافة قيمة الخطأ  $\varepsilon_i$  المسمى خطأ التنبؤ في معادلة الانحدار التي تعطى بالصيغة التالية:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \beta_2 x_{i2} + \dots + \varepsilon_i \quad (4)$$

حيث أن  $\beta_i$  هي معاملات الانحدار التي تعبر عن مساهمة كل متغير  $x_i$  في التنبؤ بقيمة  $y$ . يعبر خطأ التنبؤ  $\varepsilon_i$  (أو ما يسمى بالقيمة المتبقية (Residual value) عن الفرق بين القيم المقاسة  $y_i$  والقيم المتوقعة  $\bar{y}_i$  للتابع المدروس في معادلة الانحدار. كلما كانت قيمة خطأ التنبؤ أقل كانت دالة التنبؤ أفضل وأدق، حيث يحسب خطأ التنبؤ من العلاقة التالية:

$$\varepsilon_i = y_i - \bar{y}_i \quad (5)$$

إن المعادلة 4 هي واحدة من جملة معادلات يبلغ عددها  $n$  تكون نظام المعادلات التالي:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= \beta_0 + \beta_1 x_{11} + \beta_2 x_{12} + \dots + \varepsilon_1 \\
 y_2 &= \beta_0 + \beta_1 x_{21} + \beta_2 x_{22} + \dots + \varepsilon_2 \\
 y_3 &= \beta_0 + \beta_1 x_{31} + \beta_2 x_{32} + \dots + \varepsilon_3 \\
 y_n &= \beta_0 + \beta_1 x_{n1} + \beta_2 x_{n2} + \dots + \varepsilon_n
 \end{aligned} \tag{6}$$

حيث يمكن تمثيل هذه المعادلات وكتابتها بشكل مصفوفات كما يلي:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \tag{7}$$

إن دقة التنبؤ وتقليل الأخطاء المتوقعة إلى أدنى حد هو هدف أساسي في عملية التنبؤ بطريقة تحليل الانحدار حيث تعتبر الدقة مؤشر لكفاءة أداء النموذج المقترح. من أجل الحكم على مدى الدقة وجودة التنبؤ في النموذج المقترح وفيما يخص تحليل الانحدار فإن هناك ثلاث مؤشرات مهمة للجودة وهي:

- معامل التحديد  $R^2$ : وهو مقياس إحصائي يمثل نسبة التباين لمتغير تابع يتم تفسيره بواسطة المتغيرات المستقلة في نموذج الانحدار، تقع قيمته بين 0 و 1.
- الخطأ المعياري للانحدار (MSE) Mean Square Error ويمثل متوسط مربعات الأخطاء ويحسب من العلاقة:

$$MSE = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_i)^2}{n} \tag{8}$$

- جذر متوسط مربعات الأخطاء (RMSE) Root Mean Square Error ويعطى بالعلاقة التالية:

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \bar{y}_i)^2}{n}} \tag{9}$$

إذ أنه كلما انخفضت قيمة RMSE كلما كان النموذج أكثر دقة، وكانت جودة التنبؤ أعلى.

### 3.2 النموذج المقترح

تم توظيف طريقة تحليل الانحدار المتعدد للتنبؤ بعمق الانهيار أعلى حفرة النفق، والمقصود بعمق الانهيار في هذا البحث هو: مقدار امتداد الانهيار بدءاً من محيط حفرة النفق باتجاه الأعلى ضمن الكتلة الصخرية المحيطة بالنفق.

تم في المرحلة الأولى بناء قاعدة البيانات حيث اقترحت ستة عوامل سجلت قيمها بالإضافة لقيم أعماق الانهيارات المسجلة في مقاطع القياس المدروسة.

العوامل التي وظفت في هذه الدراسة كعوامل مؤثرة في حدوث انهيار الوسط الصخري في محيط مجموعة الأنفاق المدروسة هي التالية:

- سماكة التغطية أعلى النفق وتتراوح بين 60m كحد أدنى وحتى 560m كحد أقصى على كامل امتداد كل من الأنفاق الثلاثة الذي يزيد عن 1.4km.
- الحالة الإجهادية في محيط حفرة النفق متمثلة بنسبة الإجهادات الرئيسية الأصغر إلى الأعظمية  $\sigma_3/\sigma_1$ .
- دليل المقاومة الجيولوجية GSI: الذي تم تحديده بناءً على خصائص الكتل الصخرية والفواصل التي تحتويها والمأخوذة من التحريات الجيوهندسية. تراوحت قيم هذا العامل بحسب الدراسة الحقلية بين 12-56 مما يؤكد وبحسب تصنيف [6] Hoek أن الوسط الصخري يصنف من ضعيف جداً إلى متوسط المقاومة.
- عامل يأخذ بعين الاعتبار اتجاه الفواصل بالنسبة لمحور النفق متمثلاً بقيمتي الزاوية Dip والزاوية بين محور النفق واتجاه Strike للفواصل. حيث قسمت قيم هذا العامل إلى 6 حالات بحسب قيم الزاويتين المذكورتين كما يبين الجدول 2:

جدول 2: القيم العددية الممثلة لمعامل اتجاه الفواصل [24].

القيمة المقابلة	مجال قيم الزاوية بين محور النفق واتجاه Strike	مجال قيم الزاوية Dip (°)
1	0-20	35-50
2	20-40	35-50
3	0-20	50-65
4	20-40	50-65

تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

65-80	0-20	5
65-80	20-40	6

- طريقة حفر النفق: تم توظيف ثلاث طرق لحفر مجموعة الأنفاق المدروسة وهي 1. حفر بمقطع مجزأ 2. حفر بنصف مقطع 3. حفر بمقطع كامل. لإدخال هذا العامل في تحليل الانحدار تم التعبير عن هذه الطرق الثلاث بالقيم العددية 1, 2, 3 على التوالي، حيث أظهرت التحريات الحقلية أن عمق الانهيار كان أصغرياً عند حفر النفق بمقطع مجزأ، وأعظماً عند الحفر بمقطع كامل.
- مقاومة التدعيم: صنفت مقاومة التدعيم المستخدم في أربع مستويات للمقاومة: ضعيف، متوسط، قوي وقوي جداً، تم التعبير عن هذه المستويات بأربع قيم عددية هي على التوالي 0, 1, 2, 3 كما يبين الجدول 3:

جدول 3: القيم العددية الممثلة لعامل مقاومة التدعيم [24].

مستوى مقاومة التدعيم	نظام التدعيم	القيمة المقابلة
ضعيف	تنفيذ طبقة من البيتون المقذوف المقوى بالألياف الفولاذية لتدعيم الصخور المحيطة مباشرةً بعد الحفر.	0
متوسط	تنفيذ طبقة من البيتون المقذوف المقوى بالألياف الفولاذية لتدعيم الصخور المحيطة مباشرةً بعد الحفر بالإضافة لتنفيذ شدادات موضعية عند الحاجة.	1
قوي	تنفيذ طبقة من البيتون المقذوف المقوى بالألياف الفولاذية لتدعيم الصخور المحيطة مباشرةً بعد	2

	الحفر بالإضافة لتنفيذ شدادات موزعة بانتظام وشدادات موضعية عند الحاجة.	
قوي جداً	تنفيذ طبقة من البيتون المقذوف المقوى بالألياف الفولاذية لتدعيم الصخور المحيطة مباشرة بعد الحفر بالإضافة لتنفيذ شدادات موزعة بانتظام وشدادات موضعية عند الحاجة، بالإضافة لتقوية التدعيم بتنفيذ أقواس فولاذية.	3

تضمنت قاعدة البيانات معطيات 49 مقطع قياس متوزعة على الأنفاق الثلاثة [24] حيث حددت قيم كل من العوامل الستة المذكورة أعلاه بالإضافة لقيم عمق الانهيار المقاسة لكل حالة من الحالات المدروسة.

نفذت هذه الدراسة باستخدام تطبيق Regression Learner الموجودة في بيئة MATLAB R2017a وذلك كأحد الخيارات المتعددة لطرق تحليل الانحدار المتاحة ضمن البرنامج.

#### 4. النتائج والمناقشة

تم في هذا البحث الدمج بين الإحصاء الكلاسيكي متمثلاً بنموذج تحليل الانحدار مع التقنيات الذكية أو تعلم الآلة المتاح في بيئة ماتلاب للتنبؤ بقيمة عمق الانهيار Z في محيط الأنفاق المدروسة. إن الغاية الأساسية من توظيف الطرق الذكية هي الوصول للتنبؤ بقيمة عمق الانهيار بناءً على معطيات تدريب للبرنامج ودون تحديد علاقة تربط المتغيرات المقترحة بعمق الانهيار ليتم استخدامها في تحليل الانحدار. بمعنى آخر إن المعادلة التي تربط المتغيرات مع تابع الانحدار تبني على معطيات التدريب وتبقى مخفية ضمن بنية الموديل المستخدم التي تنجز تحليل الانحدار بشكل آلي.

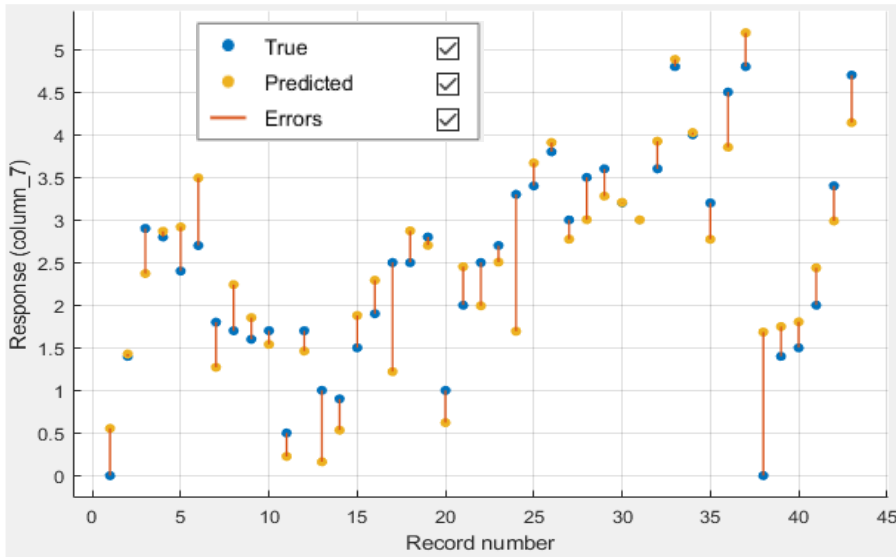
## تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

تم توزيع معطيات 43 مقطع قياس لتدريب البرنامج وذلك بإدخال قيم العوامل الستة المذكورة أعلاه لكل مقطع مدروس كما تم تزويد البرنامج بقيم عمق الانهيار المقاسة حقلياً في كل من المقاطع المدروسة. تم توزيع نسبة 5% من معطيات التدريب للتحقق من مدى صحة التدريب وفق عملية cross validation. يوفر البرنامج إمكانية المقارنة بين عدد كبير من نماذج الانحدار Linear regression, svm, trees من أجل اختيار النموذج الأكثر ملائمة لمعطيات التدريب المدروسة. تكون قيمة RMSE هي العامل الأساسي الذي يعتمد عليه في المقارنة بين النماذج، كما يعطي البرنامج قيم مؤشرات الجودة الأخرى الخاصة بكل نموذج MSE, R<sup>2</sup>, MAE. في نهاية مرحلة التدريب تم اعتماد نموذج الانحدار الخطي الذي أعطى أقل قيمة لـ RMSE والتي بلغت 0.56 كما يبين الجدول 4 قيم باقي مؤشرات الجودة:

جدول 4: قيم مؤشرات الجودة في نهاية مرحلة التدريب.

قيم مؤشرات الجودة- مرحلة التدريب			
عدد المقاطع المدروسة	RMSE	MSE	R <sup>2</sup>
43	0.56	0.31	0.79

يبين الشكل 2 نتائج التنبؤ في نهاية مرحلة التدريب موضعاً قيم الفروقات Errors كما يعطيها البرنامج بين القيم المقاسة حقلياً والقيم التي تم التنبؤ بها في هذه المرحلة.

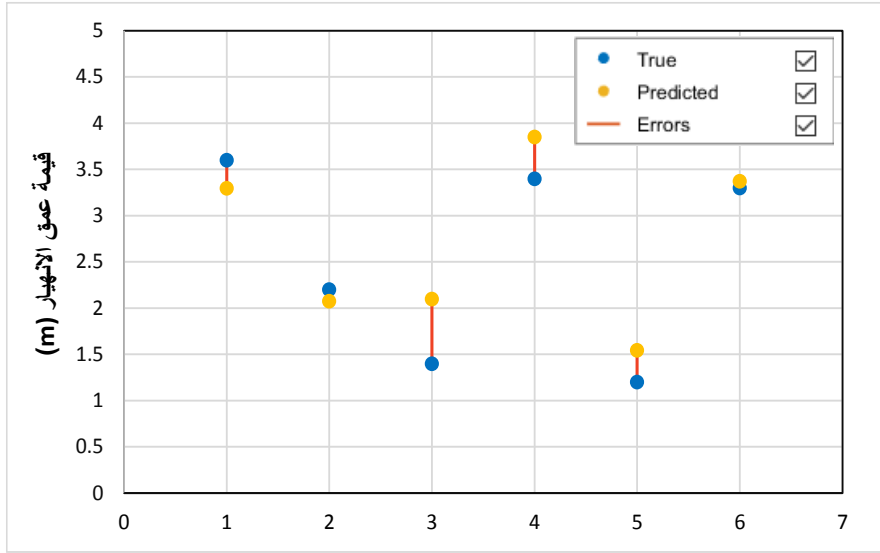


شكل 2: نتائج مرحلة التدريب - قيم عمق الانهيار المقاسة والمحسوبة في نهاية مرحلة التدريب في 43 مقطع قياس.

بعد إتمام مرحلة التدريب تم في المرحلة التالية (validation) توظيف البرنامج للتنبؤ بقيم عمق الانهيار في ستة مقاطع جديدة موزعة في الأنفاق الثلاثة المدروسة.

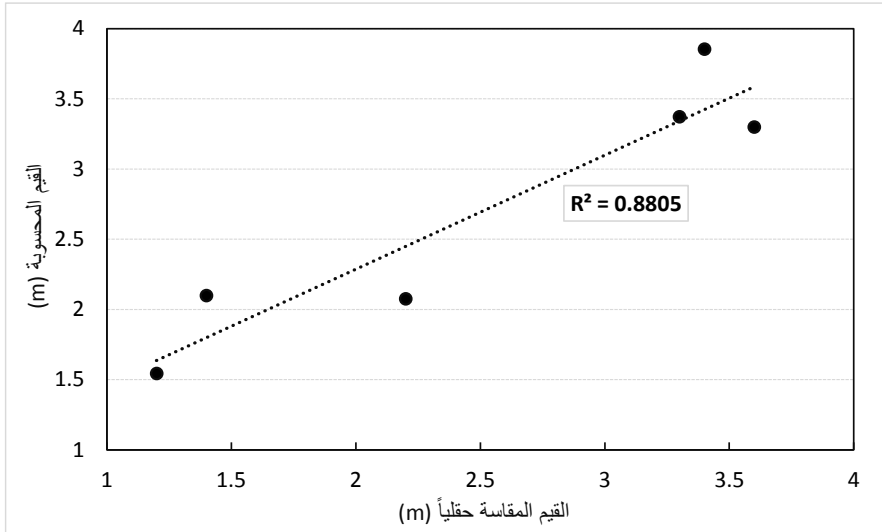
تم اعتماد العوامل الستة التي سجلت قيمها بناءً على التحريات الحقلية وسيقوم البرنامج بالتنبؤ بقيم عمق الانهيار بناءً على هذه المعطيات وعلى التدريب الذي تم إنجازه في المرحلة الأولى.

يبين الشكل 3 نتائج التنبؤ في نهاية مرحلة validation في كل من المقاطع الستة المدروسة حيث نلاحظ أن القيم المحسوبة عن طريق البرنامج مقارنة جداً للقيم المقاسة حقلياً، وأن قيم الفروقات قد تناقصت مقارنةً بنتائج مرحلة التدريب المبينة سابقاً.



الشكل 3: نتائج مرحلة التنبؤ - قيم عمق الانهيار المقاسة والمحسوبة في نهاية مرحلة validation في 6 مقاطع قياس.

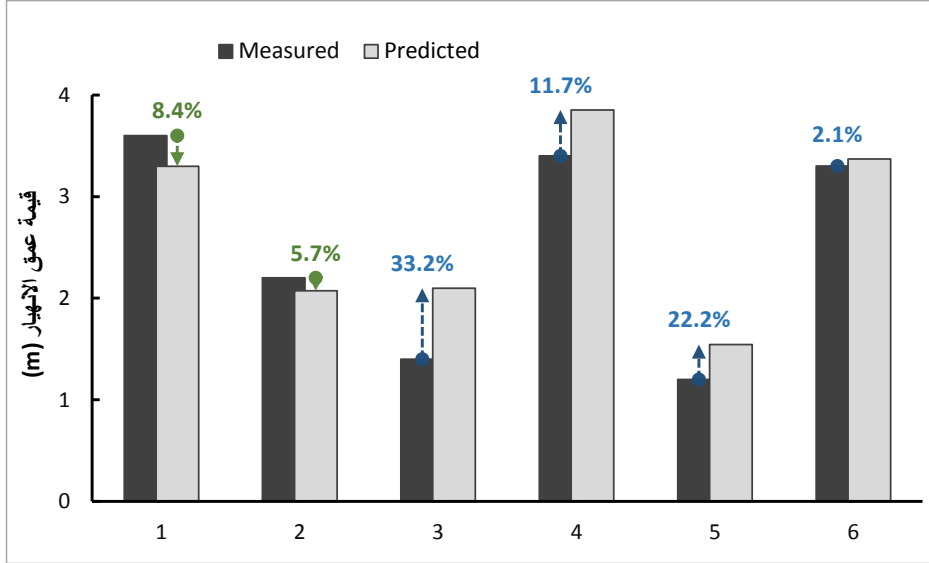
تمت مقارنة نتائج التنبؤ مع القيم المقاسة حقلياً في المقاطع الستة المدروسة كما يبين الشكل 4 فوجد أن قيمة دليل الجودة  $R^2$  في نهاية هذه المرحلة تساوي 0.88.



الشكل 4: نتائج مرحلة التنبؤ - مقارنة القيم المقاسة /المحسوبة لعمق الانهيار في نهاية مرحلة التنبؤ في المقاطع الستة.

من أجل تقييم دقة النتائج والمقارنة بشكل أوضح في كل مقطع من المقاطع الستة المدروسة، نستعرض في الشكل 5 الفروقات بين القيم المقاسة والقيم التي تتبأ بها موديل الانحدار في كل مقطع قياس، حيث نجد أن نسبة الخطأ بين القيم المحسوبة/المقاسة لا تزيد عن 33% كحد أقصى في المقطع الثالث، بينما تكون القيم في باقي المقاطع أكثر تقارباً.

## تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق



الشكل 5: نتائج مرحلة التنبؤ - الفروقات بين قيم عمق الانهيار المقاسة والمحسوبة في نهاية مرحلة التنبؤ في المقاطع الستة.

يبين الجدول 5 قيم مؤشرات الجودة في نهاية مرحلة التنبؤ النهائية والتي توضح الأداء الجيد للتنبؤ مقارنةً مع نتائج مرحلة التدريب المبينة في الجدول 4:

جدول 5: قيم مؤشرات الجودة في نهاية مرحلة التنبؤ.

قيم مؤشرات الجودة - مرحلة التنبؤ			
عدد المقاطع المدروسة	RMSE	MSE	R <sup>2</sup>
6	0.39	0.15	0.88

بناءً على النتائج السابقة نجد أن المنهجية المقترحة قادرة على إعطاء قيم عمق الانهيار الصخري المتوقع حدوثه في محيط حفريات النفق معتمداً على توظيف ستة عوامل تأخذ بعين الاعتبار: سماكة التغطية أعلى النفق، قيم الإجهادات الرئيسية المؤثرة في محيط النفق، خصائص الوسط الصخري

(بشكل أساسي خصائص واتجاه الفواصل)، طريقة حفر النفق ونوع التدعيم المستخدم. لا بد أن نذكر أن الشرط الأساسي والذي يعتبر إحدى صعوبات المنهجية المقترحة هو ضرورة إجراء مراقبة وقياسات حقلية دقيقة وشاملة (لحالات انهيار سابقة ولخصائص الوسط الصخري كذلك لطريقة الحفر والتدعيم) من أجل بناء قاعدة بيانات يتم توظيفها في تدريب البرنامج ليكون قادراً على القيام بالتنبؤ.

كما ذكر أعلاه، بنيت قاعدة البيانات في هذا البحث على قيم ستة عوامل ولأن طريقة البحث اعتمدت على دمج الذكاء الصناعي مع طريقة تحليل الانحدار فلا يعطي البرنامج أية علاقة رياضية (تربط قيمة عمق الانهيار مع العوامل الستة) كما هو الحال في طرق تحليل الانحدار التقليدية المبنية على معادلة محددة. لذلك ولتحديد دور كل من العوامل المقترحة في هذا البحث تم إجراء دراسة بارامترية لتحديد أهمية هذه العوامل.

## 5. تحليل متغيرات الدراسة Sensitivity Analysis

قبل البدء بالدراسة البارامترية تم الرجوع لقاعدة البيانات وحساب القيم الوسطية لكل عامل من العوامل الستة التي اعتمدت في الدراسة آخذين بعين الاعتبار أن بعض العوامل (كطريقة الحفر والتدعيم ومعامل اتجاه الفواصل) تم تمثيلها بقيم عددية ستؤخذ أيضاً كحالة اعتبارية وسطية. تم افتراض حالة نفق باعتبار القيم الوسطية التي تم حسابها حيث درست العوامل التالية:

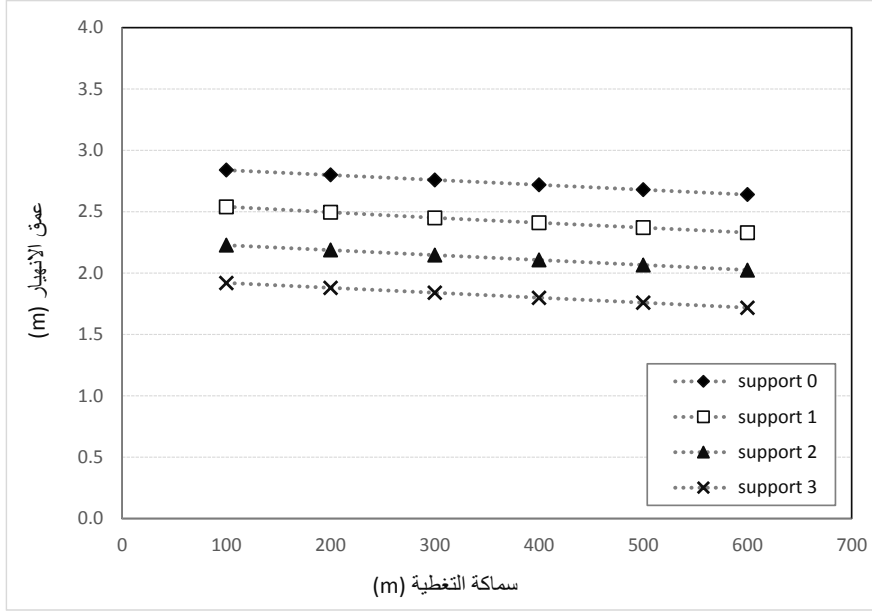
### 5.1 تأثير سماكة التغطية أعلى النفق ونوع التدعيم المستخدم

تم دراسة تغير سماكة التغطية أعلى النفق بين قيمة أصغر 100m وقيمة أعظم 600m، حيث تم تثبيت باقي العوامل على قيمها الوسطية. تم اعتبار حفر النفق بنصف مقطع وإعطاء عامل اتجاه الفواصل القيمة 3 بينما تم أخذ حالات التدعيم الأربعة المذكورة في الجدول 3 لدراسة تأثير هذا العامل بنفس الوقت.

يبين الشكل 6 أن عمق الانهيار أعلى النفق يتناقص بازدياد سماكة التغطية أعلى النفق وذلك بغض النظر عن طريقة التدعيم المستخدمة. يمكن تفسير هذه النتيجة بأن تنفيذ الأنفاق على أعماق كبيرة يسمح بنشوء ظاهرة الضغط الجبلي في محيط النفق والتي تزيد من مقاومة الوسط

## تحليل العوامل المؤثرة على عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات الأنفاق

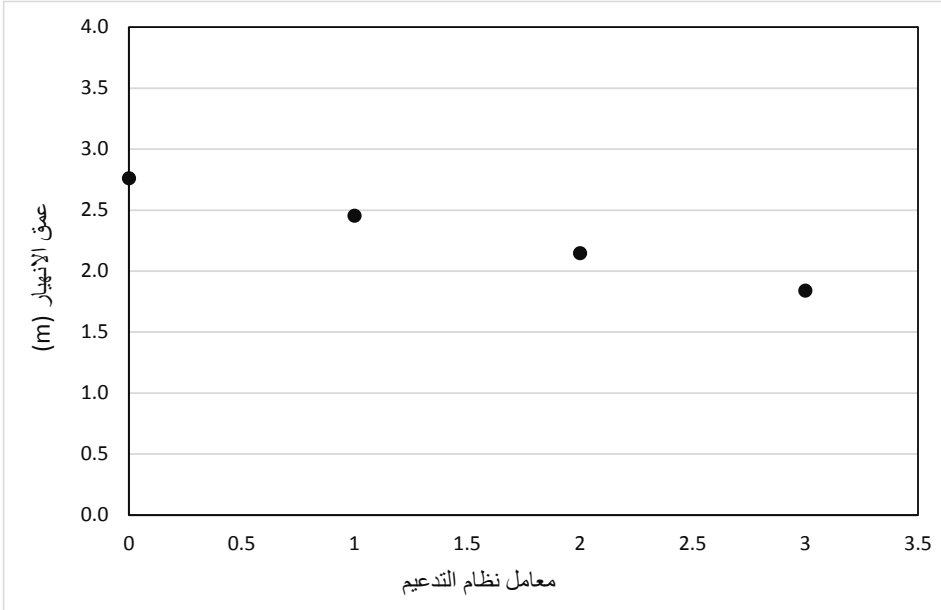
المحفور وتقلل من الانهيارات المحتملة. بينما عند تنفيذ الأنفاق على أعماق قليلة قد لا تتشأ هذه الظاهرة وبالتالي سيكون تأثير الحمولات الناتجة عن الوزن الذاتي لطبقة التغطية أعلى النفق أكبر في هذه الحالة.



الشكل 6: تأثير تغيير سماكة التغطية أعلى النفق على قيم عمق الانهيار باعتبار استخدام أنواع التدعيم الأربعة.

يبين كذلك الشكل 6 الدور الهام لنظام التدعيم المستخدم، حيث نجد أن استخدام نظام تدعيم أكثر مقاومة يقلل من عمق الانهيار الأمر الذي يتوافق مع الملاحظة الحقلية ويؤكد صحة عمل نظام التنبؤ المقترح. يمكن القول أن نوع التدعيم المستخدم يلعب دوراً أكثر أهمية من سماكة التغطية أعلى النفق فعلى سبيل المثال: عند استخدام نظام تدعيم من النوع 2 (جدول 3) وتغيير سماكة التغطية أعلى النفق من 100m إلى 600m فإن ذلك ترافق مع انخفاض في عمق الانهيار مقداره 20cm. بينما نلاحظ في الشكل 7 أنه إذا اعتبرنا تنفيذ النفق تحت سماكة تغطية وسطية 300m

نلاحظ انخفاض عمق الانهيار بمقدار 90cm تقريباً عند الانتقال من حالة تدعيم ضعيف جداً (ممثلاً بالقيمة 0) إلى حالة تدعيم قوي جداً (تدعيم رقم 3).

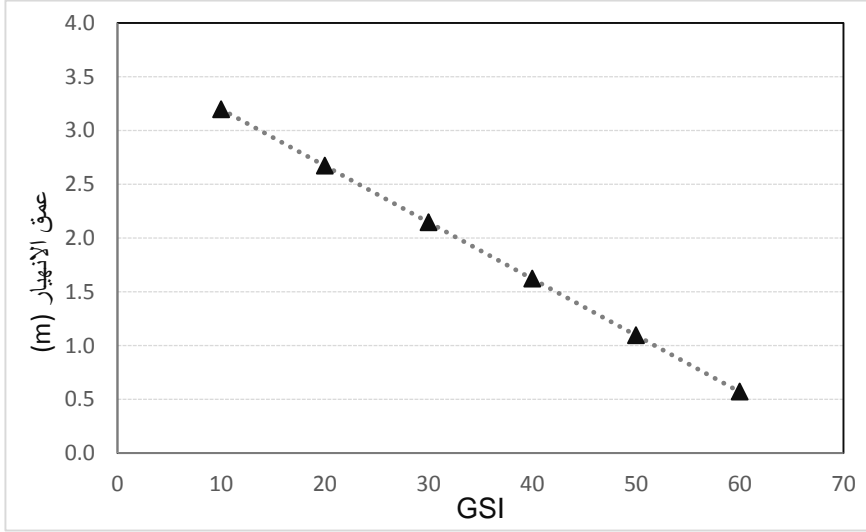


الشكل 7: تأثير نوع نظام التدعيم المستخدم على قيم عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفرية النفق.

## 5.2 تأثير دليل المقاومة الجيولوجية GSI

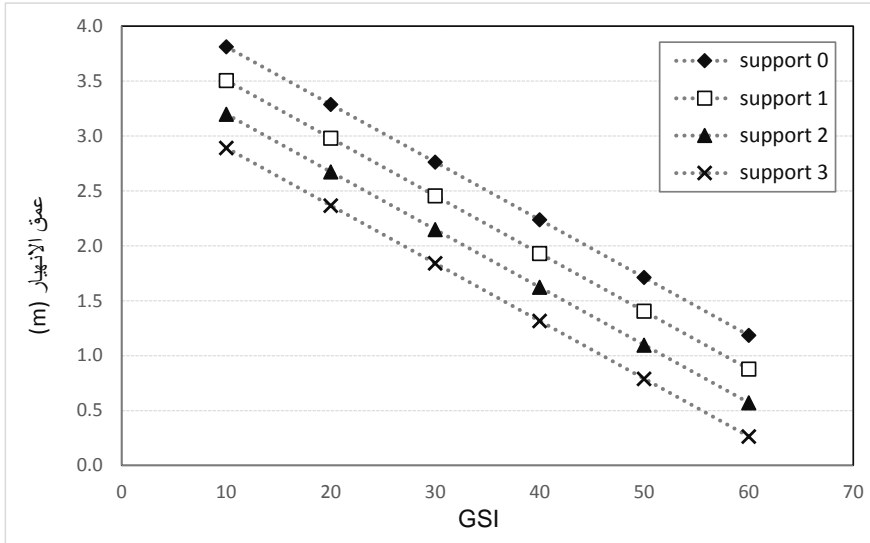
باعتبار تنفيذ النفق تحت سماكة تغطية وسطية 300m حفر بنصف مقطع مع تدعيم من النوع 2 وإعطاء عامل اتجاه الفواصل القيمة 3. يبين الشكل 8 أن ازدياد قيمة دليل المقاومة الجيولوجية يترافق مع تناقص قيمة عمق الانهيار في محيط النفق. فعند حفر النفق في وسط ضعيف جداً قيمة GSI له تساوي 10 تكون قيمة عمق الانهيار المتوقعة 3.2m وتتناقص هذه القيمة حتى تصبح 0.57m عند تنفيذ النفق في وسط صخري متوسط المقاومة تبلغ قيمة GSI له 60.

إن تغيير قيمة GSI بين حده الأدنى والأعلى (زيادة مقاومة الوسط الصخري) ترافق مع انخفاض قيمة عمق الانهيار بمقدار 2.6m وهي نتيجة تبين الأهمية العظمى لهذا العامل وتأثيره على تطور الانهيارات الصخرية في محيط النفق.



الشكل 8: تأثير قيمة GSI على قيم عمق الانهيارات الصخرية في محيط حفريات النفق مدعم بالنظام رقم 2.

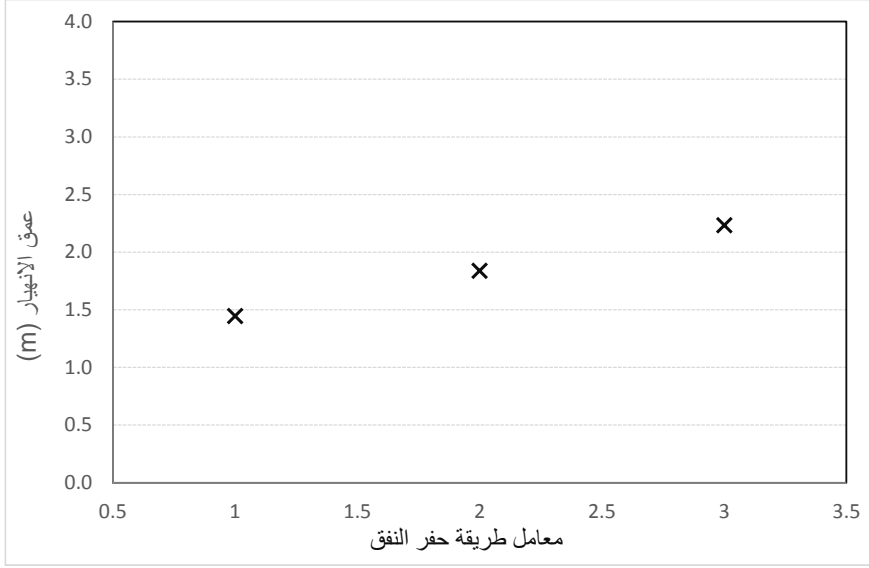
تم تكرار الحسابات من أجل كل نوع من أنواع التدعيم الأربعة المستخدمة في الموقع حيث اكدت الحسابات نفس النتيجة كما يبين الشكل 9. كذلك يؤكد الشكل انخفاض قيم عمق الانهيار عند استخدام نظام تدعيم أقوى (بشكل مشابه للنتيجة التي تم التوصل إليها عند دراسة تأثير سماكة التغطية أعلى النفق).



الشكل 9: تأثير تغير قيم GSI على قيم عمق الانهيارات عند استخدام أنواع تدعيم مختلفة.

### 5.3 تأثير طريقة حفر النفق

بينت دراسة تأثير هذا العامل أن الحفر بمقطع كامل (الممثل بالرقم 3) ترافق مع قيم أكبر لعمق الانهيار بالمقارنة مع حالة الحفر بنصف مقطع (حالة رقم 2) أو بمقطع مجزأ (حالة رقم 1) كما يبين الشكل 10. نلاحظ أن الحفر بمقطع مجزأ ترافق مع عمق انهيار قيمته 1.45m، وبلغ عمق الانهيار 1.84m عند الحفر بنصف مقطع، بينما ازدادت القيمة إلى 2.23m عند الحفر بمقطع كامل.



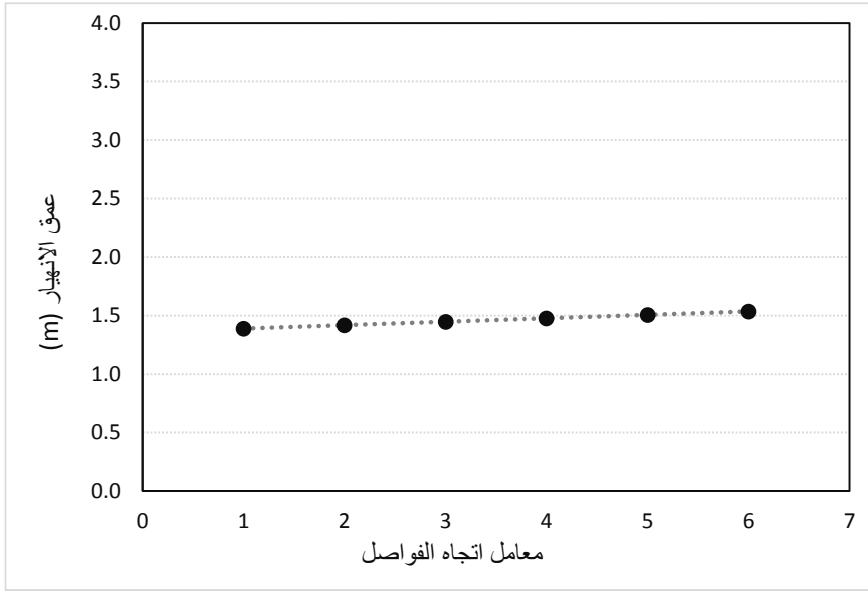
الشكل 10: تأثير طريقة حفر النفق على قيم عمق الانهيار الصخري في محيط النفق.

إن نتائج التنبؤ هذه تتوافق مع نتائج القياسات الحقلية التي أكدت أن الحفر بمقطع كامل قد يتسبب بنشوء انهيارات تمتد لأعماق أكبر في الوسط الصخري نتيجة تفريغ كتلة كبيرة من الصخور دفعة واحدة.

بالاعتماد على النتائج السابقة نجد أن الحل الأساسي لحماية محيط النفق عند الحفر بمقطع كامل يكون باستخدام نظام تدعيم قوي يقلل من قيمة عمق الانهيار المحتمل حدوثه.

#### 5.4 تأثير اتجاه الفواصل

تضمن العامل الذي سمي "اتجاه الفواصل" قيمتين هما: قيمة زاوية ميل الفواصل Dip وقيمة الزاوية بين محور النفق واتجاه Strike للفواصل كما بين الجدول 2. لإجراء الدراسة البارامترية تم تغيير قيمة هذا العامل من 1 إلى 6 وذلك باعتبار حالة نفق منفذ على عمق 300m حفر بمقطع كامل ومدعم بنظام تدعيم 3 ضمن وسط صخري تبلغ قيمة GSI له 30. بينت النتائج أن هذا العامل ليس له أي تأثير يذكر على قيمة عمق الانهيار كما يوضح الشكل 11:



الشكل 11: تأثير العامل "اتجاه الفواصل" على قيم عمق الانهيار في محيط النفق.

إن التفسير الأساسي لهذه النتيجة يمكن أن يعود إلى أن هذا العامل يتضمن قيم زاويتين مختلفتين وأن تمثيله بقيمة عددية تتراوح من 1 إلى 6 لم يعبر عن دوره الحقيقي عند توظيفه في طريقة تحليل الانحدار. كان من الأجدر توظيف قيمة الزاوية Dip في كل حالة من الحالات المدروسة لكن عدم توفر القيم الحقلية التفصيلية لهذه الزاوية أو للزاوية بين محور النفق واتجاه Strike كان عائقاً أمام التعمق في دراسة هذا العامل بالشكل المطلوب.

#### 6. الاستنتاجات والتوصيات

بينت الدراسة امكانية توظيف إحدى تقنيات التحليل الاحصائي وهي طريقة تحليل الانحدار مدمجاً مع الذكاء الصناعي للنتبؤ بعمق الانهيارات الصخرية في محيط مجموعة من الأنفاق المنفذة بالطريقة التقليدية NATM. اعتمدت الخوارزمية المقترحة على توظيف جزء من معطيات الدراسة للقيام بمرحلة من التعلم الآلي تؤهل الموديل المستخدم للقيام بتحليل الانحدار للنتبؤ بعمق الانهيار في محيط النفق.

بيّن التحليل الذي أجري لعدد من المقاطع المرجعية لأنفاق منفذة في أوساط صخرية ومعرضة للانهيّارات مقدرة النظام المقترح على التنبؤ بقيم أعماق الانهيّارات في محيط حفرية النفق. كما بينت الدراسة البارامترية التي أجريت للعوامل المقترحة في الدراسة أن انهيار الصخور في محيط النفق هو عملية معقدة مرتبطة بالعديد من العوامل المتعلقة ببعضها البعض، فطريقة الحفر والتدعيم مرتبطة بخصائص الوسط الصخري ومدى مقاومته.

بينت الدراسة في الحالة المرجعية المأخوذة أن تنفيذ النفق على أعماق كبيرة يمكن أن يقلل من أعماق الانهيّارات المحتملة في محيط النفق. كما تبين أن الحفر بمقطع مجزأ ترافق مع قيم أقل للانهيّارات بالمقارنة مع حالتي الحفر بنصف مقطع أو الحفر بمقطع كامل. إن العامل GSI المعبر عن دليل المقاومة الجيولوجية للوسط الصخري كان من أهم العوامل وأكثرها تأثيراً حيث تناقصت قيم أعماق الانهيّارات عند ازدياد قيم GSI.

كما بينت الدراسة البارامترية لجميع العوامل السابقة أن التدعيم المستخدم له دور هام في تقليل قيم عمق الانهيّار بغض النظر عن طريقة الحفر أو خصائص الوسط الصخري المحفور. في حين تبين أن العامل المقترح للتعبير عن اتجاه الفواصل في هذه الدراسة لم يكن ملائماً ليوظف بطريقة تحليل الانحدار وكان لا بد من الحصول على قيم فعلية لزاوية ميل أو اتجاه الفواصل لتوظف في هذا البحث.

اعتماداً على نتائج هذا البحث لا بد أن نشير إلى بعض التوصيات الآتية:

- ضرورة اختبار المنهجية المقترحة في معالجة حالات أنفاق أخرى بظروف جيولوجية مختلفة ويتوفر قاعدة بيانات أكثر شمولية ليتم التحقق من النتائج التي تم التوصل إليها.
- التوسع في دراسة دور اتجاه الفواصل في حدوث حالات الانهيّار في محيط الأنفاق.
- دراسة تأثير معامل الزمن (التأخير في تدعيم محيط حفرية النفق) في حدوث الانهيّارات وهو أحد العوامل الهامة التي تدرس عند تنفيذ الأنفاق بالطريقة NATM. نذكر أن دراسة هذا العامل يتطلب مراقبة حقلية متضمنة تسجيلات لقيم هذه الفواصل الزمنية في المقاطع المدروسة ليصار إلى ادخالها في قاعدة البيانات كأحد عوامل الدراسة (الأمر الذي لم يكن متاح في بحثنا هذا).

7. المراجع

- [1] Li L., Li S.C., Zhang Q.S. (2010). Study of mechanism of water inrush induced by hydraulic fracturing in karst tunnels. *Rock and Soil Mechanics*. 31(2), 523-528.
- [2] Wang C.B., ZHU H.H. (2008). Tunnel collapse mechanism and numerical analysis of its influencing factors. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*. 30(3), 450-456.
- [3] Li L., Li S.C., Chen J., Li J., Xu Z., Shi S. (2011). Construction license mechanism and its application based on karst water inrush risk evaluation. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*. 30 (7). 1345-1355.
- [4] Zhu W.S., He M.C. (1995). *Stability of Surrounding rock under complex conditions and dynamic construction mechanics of rock mass*. Beijing: Science Press.
- [5] Martin C. D., Kaiser P. K., McCreath. D. R. (1999). Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*. 36(1), 136-151.
- [6] Hoek E., Brown E.T. (1997). Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock mechanics and mining sciences*. 34 (8), 1165–1187.
- [7] Li L., Wang Q., Li S., Huang H., Shi S., Wang K., Lei T., Chen D. (2014). Cause Analysis of Soft and Hard Rock Tunnel Collapse and Information Management. *Polish Journal of Environmental Studies*. 23(4),1227-1233.
- [8] Wang H. T., Wang L. G., Li S. C., Wang Q., Liu P., Li X. J. (2019). Roof collapse mechanisms for a shallow tunnel in two-layer rock strata incorporating the influence of groundwater. *Engineering Failure Analysis*. 98, 215-227.
- [9] Qiao S., Cai Z., Tan J., Xu P., Zhang Y. (2020). Analysis of collapse mechanism and treatment evaluation of a deeply buried hard rock tunnel. *Applied Sciences*. 10(12), 4294.

- [10] Fraldi M., Guarracino F. (2011). Evaluation of impending collapse in circular tunnels by analytical and numerical approaches. *Tunneling and underground space technology*. 26(4), 507-516.
- [11] Huang F., Zhu H., Xu Q., Cai Y., Zhuang X. (2013), The effect of weak interlayer on the failure pattern of rock mass around tunnel–Scaled model tests and numerical analysis. *Tunneling and underground space technology*. 35, 207-218.
- [12] Wagner H. (1987). Design and support of underground excavations in highly stressed rock. In *Proceedings of the 6<sup>th</sup> ISRM International Congress on Rock Mechanics*, Montreal. Vol. 3. Edited by G. Herget and S. Vongpaisal. A.A. Balkema, Netherlands. 1443–1457.
- [13] Hasanpour R. (2014). Advance numerical simulation of tunneling by using a double shield TBM. *Computers and Geotechnics*. 57, 37-52.
- [14] Castro L.A.M., McCreath D.R., Oliver P. (1996). Rock mass damage initiation around the Sudbury Neutrino Observatory cavern. In *Proceedings of the 2nd. North American Rock Mechanics Symposium*, Montreal. Vol. 2. Edited by M. Aubertin, F. Hassani, and H. Mitri. A.A. (1997). Balkema, Rotterdam. 1589–1595.
- [15] Martin C.D. (1997). Seventeenth Canadian Geotechnical Colloquium: The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength. *Canadian Geotechnical Journal*. 34(5), 698–725.
- [16] Pelli F., Kaiser P.K., Morgenstern N.R. (1991). An interpretation of ground movements recorded during construction of the Donkin–Morien tunnel. *Canadian Geotechnical Journal*. 28(2), 239-254.
- [17] Nguyen T. C., Do A. N., Pham V. V., Alexandr G. (2022). Multiple linear regression analysis model and artificial neural network model to calculate and estimate the blast induced area of the tunnel face. A case study Deo Ca tunnel. *Journal of Mining and Earth Sciences*. 63(3), 43-52.
- [18] Farhadian H., Katibeh H. (2017). New empirical model to evaluate groundwater flow into circular tunnel using multiple regression analysis. *International Journal of Mining Science and Technology*. 27(3), 415-421.

- [19] Jakubowski J., Stypulkowski J. B., Bernardeau F. G. (2017). Multivariate linear regression and CART regression analysis of TBM performance at Abu Hamour phase-I tunnel. Archives of Mining Sciences. 62(4), 825-841.
- [20] Singh D. K., Aromal V., Mandal A. (2020). Prediction of surface settlements in subway tunnels by regression analysis. International Journal of Geotechnical Engineering, DOI: 10.1080/19386362.2018.1477294
- [21] Shi S., Zhao R., Li S., Xie X., Li L., Zhou Z., Liu H. (2019). Intelligent prediction of surrounding rock deformation of shallow buried highway tunnel and its engineering application. Tunnelling and Underground Space Technology. 90, 1-11.
- [22] Xue Y., Li X., Li G., Qiu D., Gong H., Kong F. (2020). An analytical model for assessing soft rock tunnel collapse risk and its engineering application. Geomech. Eng. 23(5), 441-454.
- [23] Niu X. Q., Si B. X., Weng Y. H. (2011). Feasibility Study Report of the Wudongde Hydropower Station on the Jinsha River, First paper: Comprehensive Statement (Pivotal Project). Changjiang Institute of Survey Planning Design and Research, Changjiang Water Resources Commission, China.
- [24] Chen D. F., Feng X. T., Xu D. P., Jiang Q., Yang C. X., Yao P. P. (2016). Use of an improved ANN model to predict collapse depth of thin and extremely thin layered rock strata during tunnelling. Tunnelling and Underground Space Technology. 51, 372-386.

[25] علي بلال، نقلا محمد، الطحان إبراهيم. (2023). منهجية العمل بطريقة التحليل الهرمي APH وتطبيقاتها ضمن مجال الهندسة الجيوتكنيكية. مجلة جامعة البعث، المجلد 45، العدد 3، 11-44.

[26] بوبو ريم. (2018). التنبؤ بهبوطات سطح الأرض الناتجة عن حفر الأنفاق السطحية باستخدام منهجية شعاع الدعم الآلي Support Vector Machin، مجلة جامعة البعث، المجلد 40، العدد 24، 153-176.

## **Limestone and operational conditions for pH control and improved Denitrification in the limestone-sulfur reactor**

Nebras Hamdan  
Homs University  
Nebrashamdan78@gmail.com

### **Abstract:**

This study aims to evaluate the role of limestone in pH regulation and enhancement of nitrate removal performance in a sulfur-limestone autotrophic denitrification reactor. The effects of limestone type, particle size, dosage, hydraulic retention time(HRT), and influent nitrate concentration were investigated. Results showed that CaCO<sub>3</sub> outperformed other limestone types, with an optimal particle size of 0.6mm, providing a balance between efficiency and operational stability. The optimum dosage was determined to be 10g/l, ensuring stable pH within the favorable range for denitrification. When examining HRT at an influent nitrate concentration of 50mg/l, the time 8hr was found to be the most suitable, achieving high removal efficiency while reducing operation time.

Regarding influent nitrate concentration, the reactor maintained good performance up to 75mg/l, with a gradual decline observed at higher loads. Overall, the findings highlight the importance of integrating CaCO<sub>3</sub> properties with operational conditions to ensure stable pH and high nitrate removal efficiency, making the reactor a promising option for treating nitrate-rich wastewater.

**Keywords:** nitrates, Sulfur: limestone ,wastewater, Autotrophic Bacteria.

## دور الكلس وظروف التشغيل في ضبط pH وتحسين أداء نزع النتريجة في المفاعل الكلسي-الكبريتي ذاتي التغذية

م. نبراس احمد حمدان

جامعة حمص

nebrashamdan78@gmail.com

الملخص :

يهدف هذا البحث إلى تقييم دور الكلس في ضبط pH وتحسين أداء إزالة النترات في المفاعل الكلسي-الكبريتي ذاتي التغذية، وذلك من خلال دراسة تأثير كل من : نوع الكلس، حجم الحبيبات، جرعة الإضافة، زمن المكث الهيدروليكي (HRT)، وتركيز النترات الداخل. أظهرت النتائج أن  $\text{CaCO}_3$  كان الأكثر كفاءة مقارنة بالأنواع الأخرى من الكلس، وأن الحجم الأمثل لحبيبات  $\text{CaCO}_3$  هو 0.6 mm، حيث حقق توازناً بين الكفاءة وثبات التشغيل. كما تبين أن جرعة الإضافة المثلى بلغت 10 g/l، والتي ضمنت استقرار pH ضمن المجال المناسب للتفاعل. عند دراسة زمن المكث الهيدروليكي لعينات بتركيز نترات 50mg/l، وجد أن 8hr هو الأنسب لتحقيق كفاءة إزالة مرتفعة مع تقليل زمن التشغيل، أما بالنسبة لتأثير تركيز النترات الداخل، فقد حافظ المفاعل على أداء جيد حتى تركيز 75mg/l، بينما لوحظ انخفاض تدريجي في كفاءة الإزالة عند الأحمال الأعلى. بشكل عام، تبرز هذه النتائج أهمية الدمج بين اختيار نوع وخصائص الكلس وظروف التشغيل لتحقيق استقرار pH وكفاءة إزالة عالية للنترات، مما يجعل المفاعل الكلسي-الكبريتي خياراً واعداً لمعالجة المياه الغنية بالنترات.

كلمات مفتاحية: النترات، الحجر الكلسي الكبريتي، مياه صرف، بكتريا ذاتية التغذية

## دور الكلس وظروف التشغيل في ضبط pH وتحسين أداء نزع النتروج في المفاعل

### الكلسي-الكبريتي ذاتي التغذية

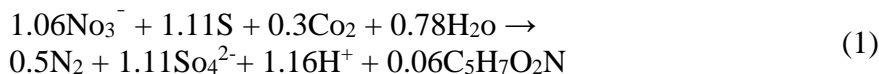
#### 1. المقدمة :

إن تلوث المياه بالنترات في الأوساط السورية هو مشكلة هامة ومن الضروري معالجتها، ومن أحد أسباب التلوث هو التزايد الطارئ في التصريف على أنظمة معالجة المحطة والذي حال دون معالجتها بشكل آمن ومن المعلوم أن وجود المغذيات في المنصرفات ومنها إلى المسيلات المائية يخلق الكثير من المشاكل كظاهرة الانفجار الطحلبي التي تعمل على خلل بالبيئة المائية وبالتالي تموت الكائنات المائية نتيجة حجب أشعة الشمس وهذا يؤدي لنمو كائنات على حساب كائنات أخرى وتفاقم مشكلة التلوث [1].

لذلك يعد نزع النترات من مياه الصرف المعالجة ثانوياً قضية بيئية ملحة، وتعتبر الأنظمة ذاتية التغذية باستخدام الكبريت إحدى الحلول المستدامة لإزالة النترات، لكنها تواجه تحدياً كبيراً يتمثل في انخفاض pH نتيجة تشكل شوارد الهيدروجين أثناء أكسدة الكبريت، مما قد يؤدي إلى تثبيط النشاط البكتيري.

لتجاوز هذه المشكلة يتم إدخال الكلس كمادة قلوية تساهم في معادلة الحموضة، والحفاظ على ظروف pH المثالية لنشاط البكتريا ذاتية التغذية.

ويتم التخفيض للنترات وفق المعادلة البيولوجية التالية[2]:



حيث يتحول النتترات إلى غاز النتروجين وبذلك يتم تخفيض النتترات بيولوجياً، ولكن بالمقابل نجد زيادة في تركيز شوارد  $\text{H}^+$  أي تزداد حموضة الوسط وهذا بدوره يؤدي لإنخفاض pH الوسط تدريجياً، إذا لم يتم تعديل هذا الانخفاض سوف ينخفض أداء البكتريا وتقل كفاءة نزع النتترات. لذلك يتم إضافة مادة الكلس بالإضافة لمادة الكبريت والهدف هو تعديل وسط التفاعل [3]، وحسب الدراسة [3] أن pH الأمثل لنزع النتريجة يتراوح بين (6.5-7.5) والقلوية المناسبة تتراوح بين (200-150) mg/l حيث أن القلوية عندما تكون أقل من 150 mg/l غير كافية لضبط الحموضة وهذا يسبب انخفاض pH وتنشيط للنشاط البكتيري، أما عندما القلوية تكون أكبر من 200 mg/l ترفع pH وتؤدي إلى تكلس السطوح وبالتالي تقليل المساحة الفعالة للبكتريا.

## 2. هدف البحث:

يهدف هذا البحث لدراسة تأثير نوع الكلس على استقرار البيئة الكيميائية والبيولوجية في المفاعلات الكلسية الكبريتية، وتحديد الظروف التشغيلية لأداء المفاعل وهي: زمن المكث HRT , أحمال النتترات المناسب

## 3. المواد وطرائق الدراسة:

أجريت هذه الدراسة باستخدام المفاعل الموضح بالشكل رقم 1 والذي يتألف من أسطوانة زجاجية، القطر الداخلي لها 15 cm وارتفاعها الكلي 70 cm، محاطة بحمام مائي لضبط الحرارة المناسبة  $25^\circ\text{C}$ ، تم ملء المفاعل بطبقة دعم من البحص، أقطارها تتراوح بين (8-10) mm لتأمين توزيع منتظم للمياه الداخلة، ويعلو هذه الطبقة مزيج من الكبريت والكلس بنسبة (1:1) (وزنية) [4] وقد تم اعتماد وزن حبيبات الكبريت ثابتاً خلال التجارب دون دراسة تأثيره بشكل منفصل، بينما ركزت

الدراسة على حبيبات الكلس باعتباره العامل الأكثر تأثيراً في ضبط الـ pH وكفاءة المعالجة ولضمان دراسة الكلس فقط من جوانب مختلفة باعتباره موضوع البحث، هذا وقد تم الحصول على الحجر الكلسي الكبريتي من تجمعات خام الكبريت ومقالع الكلس في تدمر وكان الجريان للماء من الأسفل إلى الأعلى لتأمين عدم انسداد للمفاعل بالغشاء البيولوجي وبسرعة جريان لا تسبب تعليق لحبيبات المفاعل.

بدأ العمل في المفاعل بعد تأمين نمو الغشاء البيولوجي الذي تم زرعه بحوالي 2L من حمأة ثانوية وضعت في الوسط اللاهوائي وغذيت بوسط مغذي مكون من مياه حنفية تحوي التراكيز الواردة بالجدول رقم 1 [5]:

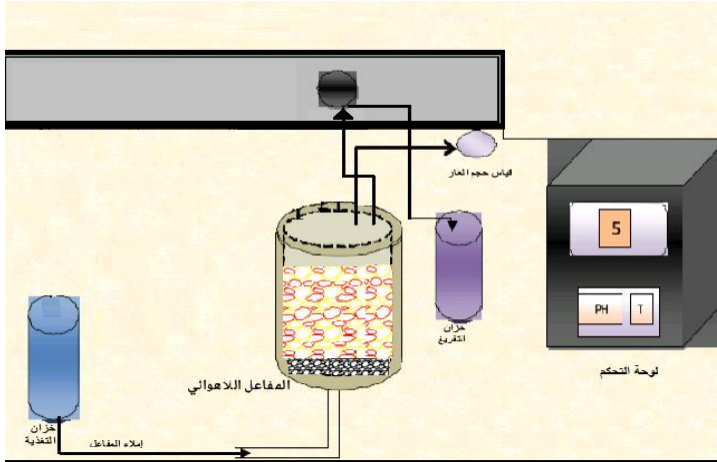
الجدول رقم 1 : يوضح تركيب المياه المستخدمة في الدراسة

اسم المركب	MgCL <sub>2</sub> .6H <sub>2</sub> O	NH <sub>4</sub> C	NaHCO <sub>3</sub>	KNO <sub>3</sub>	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O
التركيز mg/l	0.03	3.92	100	86	4.4	500

وتم الإقلاع بدورة مغلقة بزمان مكث 6 ساعات ودرجة حرارة 25C° وتم أخذ عينات عدة للمياه المصروفة على مدار العمل، وأجري تحليل للنترات الخارجة وعند كفاءة إزالة مستقرة لثلاث قراءات متتالية ناجحة، وصلت البكتريا لمرحلة التأقلم . واستغرق هذا حوالي الشهر، بعدها تم استبعاد مياه الإقلاع، وتم تحضير المياه التركيبية من مياه الحنفية وفق التركيب السابق بدون سولفات الصوديوم Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.5H<sub>2</sub>O وهذا التركيب يحاكي تركيب مياه الصرف الصحي المعالجة ثانوياً [5].

دور الكلس وظروف التشغيل في ضبط pH وتحسين أداء نزع النترة في المفاعل الكلسي-الكبريتي ذاتي التغذية

تمت الدراسة مبدئياً بتركيز بدائي للنترات  $50\text{mg/l}$  وضبطت قيمة pH للمياه الداخلة لجميع العينات على (6.5) والقلوية الداخلة  $120\text{ mg/l as CaCO}_3$  وزمن المكث يؤخذ 12 ساعة باعتبارها زمن كافي وفائض لضمان اكتمال التفاعل الحيوي [6],[7].



الشكل رقم 1 : مفاعل الحجر الكلسي الكبريتي

#### 4. النتائج والمناقشة:

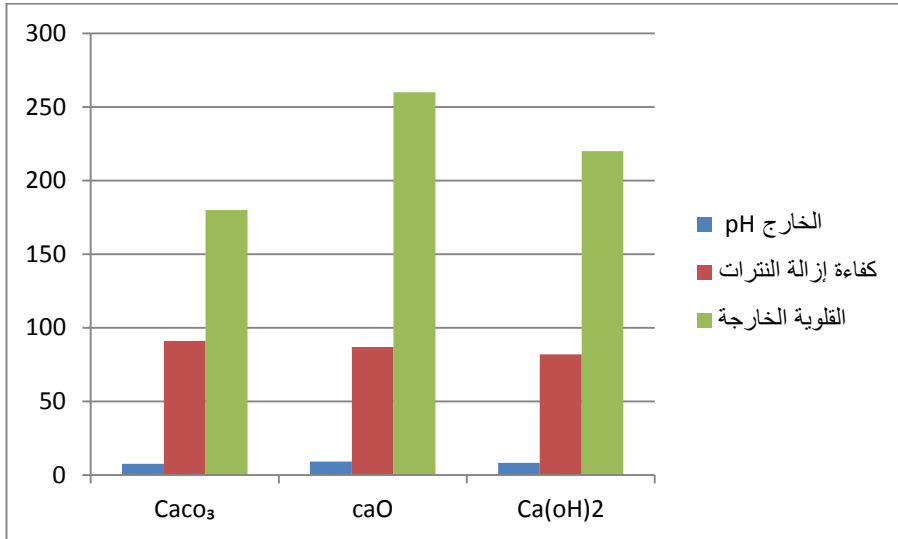
##### 4.1 تأثير أنواع الكلس على أداء المفاعل:

يلعب الكلس المستخدم دوراً حاسماً في استقرار النظام الحيوي للمفاعل فكانت المقارنات التالية بين  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{Ca(OH)}_2$ :

الجدول رقم 2: تأثير الكلس على أداء المفاعل

نوع الكلس	pH الخارج	نترات خارج mg/l	كفاءة الإزالة %	قلوية خارجية
$\text{CaCO}_3$	7.4	4.5	91	180
$\text{CaO}$	9.1	6.5	87	260
$\text{Ca(OH)}_2$	8.3	9	82	220

لغايات المقارنة العادلة تم استخدام كمية كلس ثابتة بالنسبة لحجم المفاعل 10 g/l لكل نوع من الكلس حسب المرجع [5] وسوف يتم تحديد الجرعة المثالية لاحقاً.



الشكل 2: التمثيل البياني لتأثير الكلس على أداء المفاعل

مما سبق نجد أن:

$\text{CaCO}_3$  : كان pH معتدل وكانت القلوية ضمن المجال الأمثل وهذه البيئة المثلى للبكتريا ذاتية التغذية.

$\text{CaO}$ : تم رفع pH بسرعة جداً وتولدت حرارة وهذا يؤثر على الاستقرار الميكروبي و يثبطه كما أن القلوية الخارجة ارتفعت بشكل كبير جداً وهذا يثبط البكتريا.

$\text{Ca(OH)}_2$ : رفع pH بسرعة وزيادة سريعة بالقلوية أيضاً يثبط البكتريا.

نستنتج أن:

نجد أن نوع الكلس الأفضل هو  $\text{CaCO}_3$  في المفاعل الكلسي الكبريتي لذلك سيتم دراسة تأثير  $\text{CaCO}_3$  على أداء المفاعل.

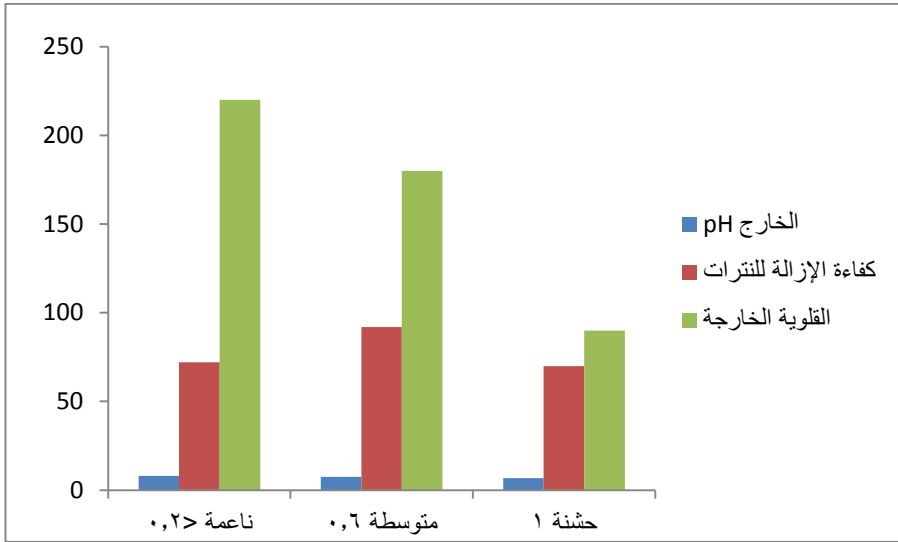
4.2 تأثير حجم الحبيبات من  $\text{CaCO}_3$  على أداء المفاعل:

تم دراسة تأثير حجم الحبيبات (ناعمة- متوسطة- خشنة) من  $\text{CaCO}_3$  على أداء المفاعل بكمية 10g/l.

حجم الحبيبات mm	pH الخارج	نترات خارج mg/l	كفاءة الإزالة %	القلوية الخارجة
ناعمة > 0.2	8.1	14	72	220

متوسطة 0.6	7.5	4	92	180
خشنة 1	6.8	15	70	90

الجدول 3: تأثير حجم الحبيبات من  $CaCO_3$  على أداء المفاعل



الشكل 3: التمثيل البياني لتأثير حجم الحبيبات من  $CaCO_3$  على أداء المفاعل

مما سبق نجد إن الحبيبات المتوسطة (0.6mm) هي الأفضل لأن pH و القلوية ضمن المجال المطلوب فكانت البيئة الحيوية أكثر استقراراً وأعطت أكثر معدل إزالة للنترات.

الحبيبات الناعمة: رفعت pH بسرعة بسبب سرعة الذوبان ولأن سطح التفاعل هنا كبير، ولكن هذا يسبب خطر ترسبات كلسية وتراكم في  $Ca^{++}$  وقلوية عالية جداً

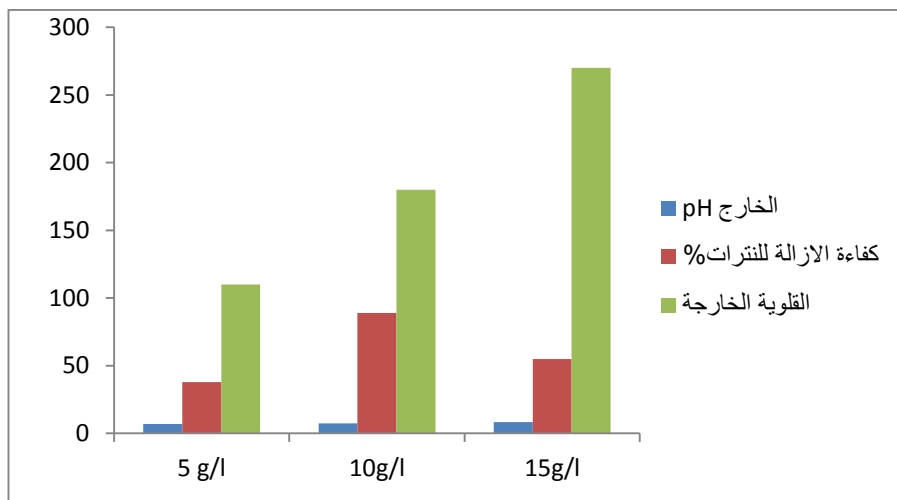
الحبيبات الخشنة: لم ترفع pH كثيراً وكان التفاعل بطيئاً وأقل ذوبان كما أن القلوية منخفضة وغير مناسبة لزراع بكتريا نزع النتروجين.

### 4.3 تأثير نسبة الإضافة على أداء المفاعل:

المقصود بنسبة الإضافة هو وزن الكلس المضاف متنسوبا لحجم المفاعل، وباعتبار أن حجم حبيبات الكلس الأفضل هي 0.6 mm سوف يتم اعتماد هذه الأبعاد في هذه المرحلة بنسب مضافة (5-10-15)g/l .

الجدول 4: تأثير نسبة الإضافة على أداء المفاعل

نسبة الإضافة g/l	pH الخارج	النترات الخارج mg/l	كفاءة الإزالة %	القلوية الخارجة
5	6.5	31	38	110
10	7.5	5.5	89	180
15	8.3	22.5	55	270



الشكل 4: التمثيل البياني لتأثير نسبة الإضافة على أداء المفاعل

الكمية المثلى للإضافة 10g/l لأنها أعطت توازن جيد ومقبول حيث  $pH = 7.5$  ولم يحدث فائض قاعدي ولا تراكم في الكالسيوم بالإضافة لأنها نسبة ممتازة.

أما النسبة 5mg/l فشلت في ضبط pH حيث بقي 6.5 وكان أداء النزع ضعيفاً حيث نسبة الإزالة 38%.

أما النسبة 15mg/l أعطت قلوية فائضة وارتفاع عالي في pH بسبب ترسب الكلس

#### 4.4 الظروف التشغيلية المناسبة للمفاعل بالمواصفات التالية:

الكلس:  $Caco_3$ ، أبعاد الحبيبات: 0.6 mm، نسبة الإضافة: 10g/l.

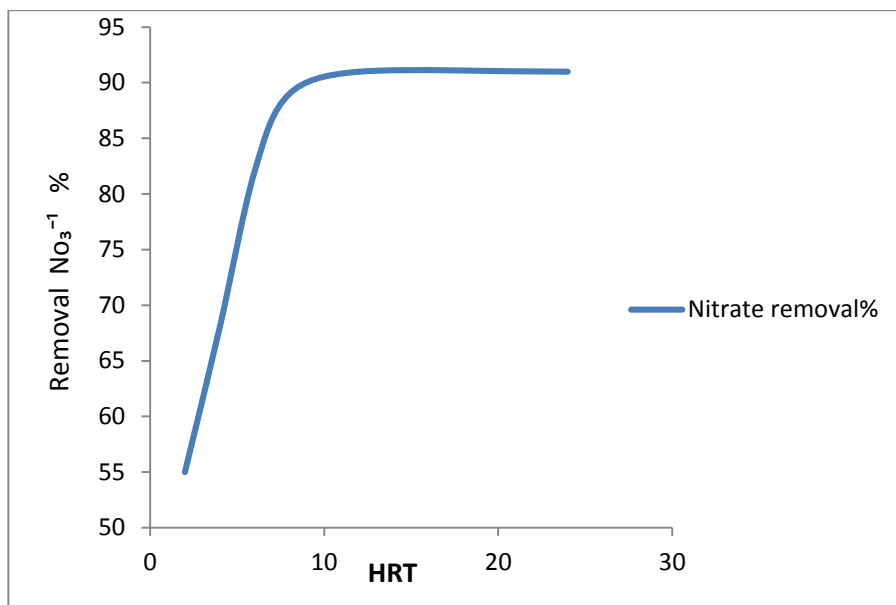
##### 4.4.1 تأثير زمن المكث الهيدروليكي HRT على أداء المفاعل

سيتم الاختبار على عينة تركيز النترات الداخل  $50 \text{ mg/l} = \text{No}_3 - \text{N}$

جدول 5: تأثير زمن المكث HRT على أداء المفاعل

HRT hr	pH الخارج	النترات الخارج mg/l	نسبة الإزالة %	القلوية الخارجة mg/l
2	7.3	22.5	55	104
4	7.3	16	68	100
6	7.2	9	82	95
8	7.2	5.5	89	95
12	7.1	4.5	91	92
24	7.1	4.5	91	92

دور الكلس وظروف التشغيل في ضبط pH وتحسين أداء نزع النتريجة في المفاعل الكلسي-الكبريتي ذاتي التغذية



الشكل رقم 5 : يظهر كفاءة الإزالة للنترات لأزمنة مكث مختلفة

على الرغم من أن HRT عندما تراوح بين (12-24) ساعة أعطى كفاءة إزالة أعلى للنترات، إلا أن زيادة زمن المكث عن 8 ساعات لم تحقق تحسناً كبيراً مقارنة بالزيادة الكبيرة في الوقت لذلك الزمن 8 ساعات هو الافضل لتركيز نترات داخل 50mg/l.

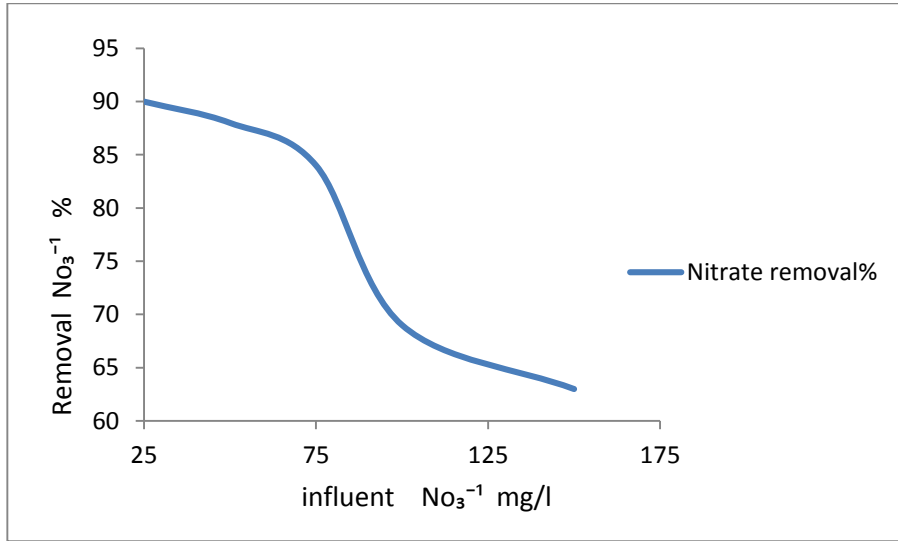
نلاحظ ان زيادة الزمن يزيد الكفاءة ولكن هناك زمن مكث أفضل ينصح به لكل تركيز داخل.

#### 4.4.2 تأثير تركيز النترات الداخل على أداء المفاعل:

وسيتم تطبيق أحمال النترات  $\text{No}_3\text{-N}$  التالية: (150-100-75-50-25) mg/l

جدول 6: تأثير تركيز النترات على أداء المفاعل

النترات الداخلة mg/l	النترات الخارجة mg/l	نسبة الإزالة %	القلوية الخارجة
25	5	90	95
50	6	88	95
75	8	84	91
100	15.5	69	87
150	18.5	63	82



الشكل رقم 6 : يظهر كفاءة الإزالة للنترات لتدفقات داخلة تركيز النترات فيها

mg/l(150-100-75-50-25)

مع زيادة تركيز النترات الداخل تقل نسبة الإزالة بشكل واضح وعند تراكيز بين (25-75)mg/l يحافظ المفاعل على إزالة جيدة بينما عندما التراكيز بين (100-150) mg/l تنخفض الكفاءة السبب زيادة الحمل تتجاوز قدرة المفاعل على المعالجة.

#### 4.4.3 تأثير نسبة الكلس إلى الكبريت على أداء المفاعل:

باعتبار نسبة الكبريت : الكلس من البارامترات المهمة تم تجريب نسبة أخرى 2:1 (وزنية) لزيادة سعة التعديل القاعدي وتم مقارنتها مع النسبة السابقة 1:1 (وزنية) عند تركيز نترات داخل HRT=8hr، 50mg/l، حجم الحبيبات 0.6 mg/l

فكانت النتائج التالية:

كلس:كبريت	pH الخارج	القلوية الخارجة mg/l	النترات الخارج mg/l	كفاءة الإزالة%
1:1	7.2	95	5.5	89
1:2	7.4	105	4	92

من الجدول أعلاه أظهرت النتائج أن النسبة (1:1) حققت التوازن الأمثل بين ضبط pH والقلوية وكفاءة الإزالة، إذ بلغ pH الخارج 7.2 مع قلوية 95 mg/l وكفاءة إزالة 89% عند تركيز نترات داخل 50 mg/l و HRT= 8hr وبالمقابل رفعت النسبة (2:1) pH الخارج إلى 7.4 وزادت القلوية إلى 105mg/l مع كفاءة إزالة 92% إلا أن زيادة الكلس تحمل خطر بدء الترسيب الكلسي على المدى الطويل بناء عليه تعتبر النسبة 1:1 هي الأنسب كنسبة تشغيلية مستدامة.

### الاستنتاجات:

- نوع الكلس المستخدم يؤثر بشكل مباشر على قدرة النظام على ضبط pH.
- كربونات الكالسيوم  $\text{CaCO}_3$  هو الخيار الأمثل من حيث الاستقرار والفعالية البيولوجية
- أبعاد الجسيمات ونسب الإضافة يحددان نجاح عملية نزع النتروج، حيث أن الجسيمات بأبعاد 0.6mm ونسبة الإضافة 10g/l هي الأفضل.
- بالنسبة لتركيز نترات داخل 50mg/l تزداد كفاءة الإزالة مع الزمن ووجد أن الزمن الأنسب هو  $\text{HRT}=8\text{hr}$  فبعد هذا الزمن تزداد الكفاءة بشكل ضئيل لا يتناسب مع الزيادة في الزمن لذلك لكل تركيز زمن مكث ينصح به.
- عند تطبيق أحمال داخلية للنترات تتراوح بين 25-150 mg/l أظهر المفاعل قدرة على التعامل مع أحمال حتى 75mg/l دون إظهار في الأداء.
- من خلال التجارب التي أقتصرت على نسبتي (1:1 و 2:1) بين الكلس والكبريت تبين أن النسبة الوزنية (1:1) هي الأنسب للتشغيل، إذ حققت توازناً جيداً بين ضبط pH والقلوية وكفاءة إزالة النترات، بينما أظهرت النسبة (2:1) تحسناً طفيفاً في الكفاءة لكن رافقها بداية لترسب كلسي قد يؤثر على استقرار المفاعل على المدى الطويل لذلك يوصى بالنسبة (1:1) كنسبة تشغيلية عملية ومستدامة ضمن ظروف الدراسة الحالية.

#### التوصيات:

- توصي الدراسة بمراقبة مستمرة لـ pH لضبط عملية نزع النترجة للمحافظة على أداء جيد للمفاعل.
- دراسة تأثير درجة الحرارة وخاصة أقل من 20C° لضمان جدوى التطبيق في طقس بارد.

المراجع:

- 1 Chislock, M. F., Doster, E., Zitomer, R. A., & Wilson, A. E. (2013). Eutrophication: causes, consequences, and controls in aquatic ecosystems. *Science of the Total Environment*, 440, 1–8.
- 2 Koenig A, Liu LH. (2001), Kinetic model of autotrophic denitrification in sulphur packed-bed reactors. *Water Research*. 35(8):1969–1978
- 3 Koenig, A., & Liu, L.H. (2002) Use of limestone for pH control in autotrophic denitrification: continuous-flow experiments in pilot-scale packed bed reactors. *Journal of Biotechnology*, 99(3), 227–239
- 4 Wang, Y et al, (2023). Long-term operation of a Pilot-Scale Sulfur-Based autotrophic denitrification system for deep nitrogen removal. *Water*, 15(3), 428
- 5 Xiao-meì Lv, Ju-sheng Song, Ji Li and Fang-lei Wu. (2017). Tertiary Denitrification by Sulfur/Limestone packed Biofilter. *Environmental Engineering science*. 34(2):103–109
- 6 Guo, X., et al. (2017). Nitrogen removal and microbial community structure in a biofilm reactor under different hydraulic retention times. *Bioresource Technology*, 245(Part A), 1031–1037.
- 7 Cydzik-Kwiatkowska, et al. (2022). Effects of hydraulic retention time and influent nitrate concentration on

دور الكلس وظروف التشغيل في ضبط pH وتحسين أداء نزع النتريجة في المفاعل الكلسي-الكبريتي ذاتي التغذية

---

denitrification performance. *Frontiers in Microbiology*, 13, 884459.

## دراسة جدوى المسح التصويري باستخدام الطائرات المسيّرة في تكثيف نقاط الأساس

### الجيوديزي

الطالب غانم سلطانه اشراف د.أحمد العمر

#### ملخص

إن تكثيف نقاط الأساس الجيوديزي 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 لـ Orthophoto /0.9 cm/ أما الدقة الشاقولية لـ 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 الجيوديزي في سورية.

**الكلمات المفتاحية:** الأساس الجيوديزي، 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 (RMSE) ومتوسط الخطأ (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.

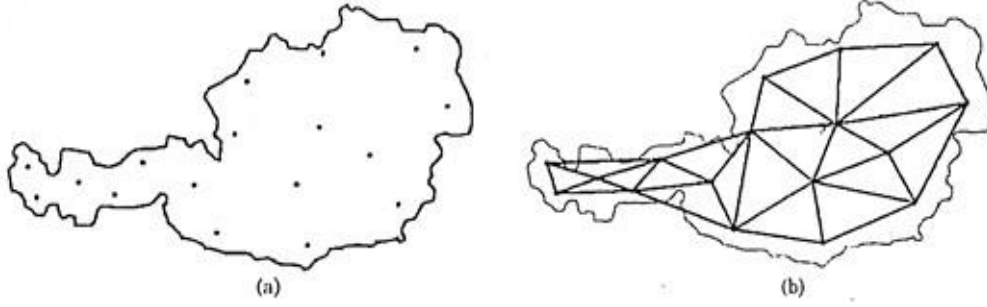
### 3. المبادئ النظرية للبحث

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 متناسقة 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]:

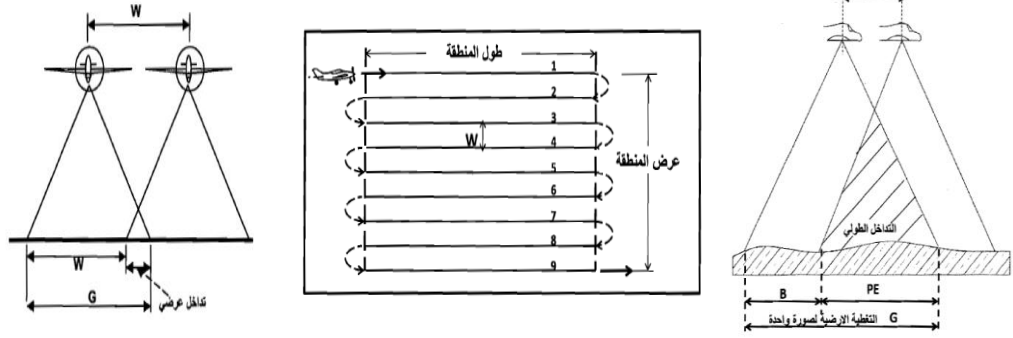
$$PE = \frac{G - B}{G} * 100 \quad PS = \frac{G - W}{G} * 100$$

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:

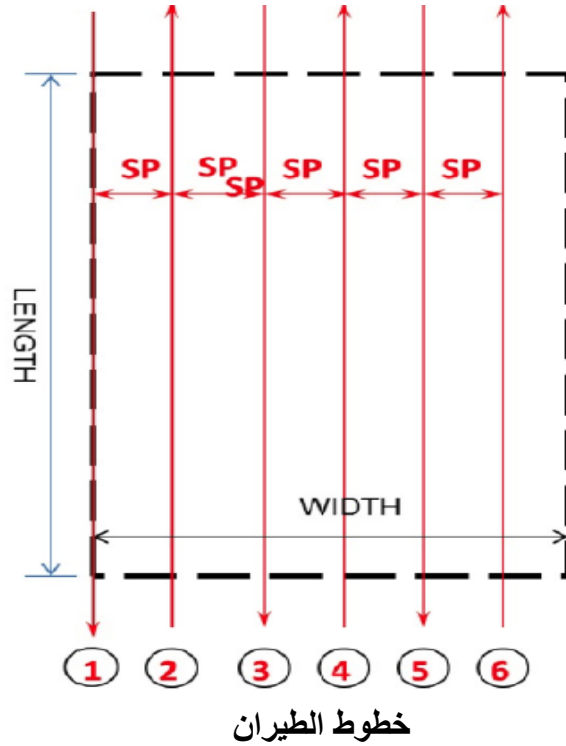
$$SP = Image\ coverage(W) * (100 - amount\ of\ side\ lap)/100$$

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:

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

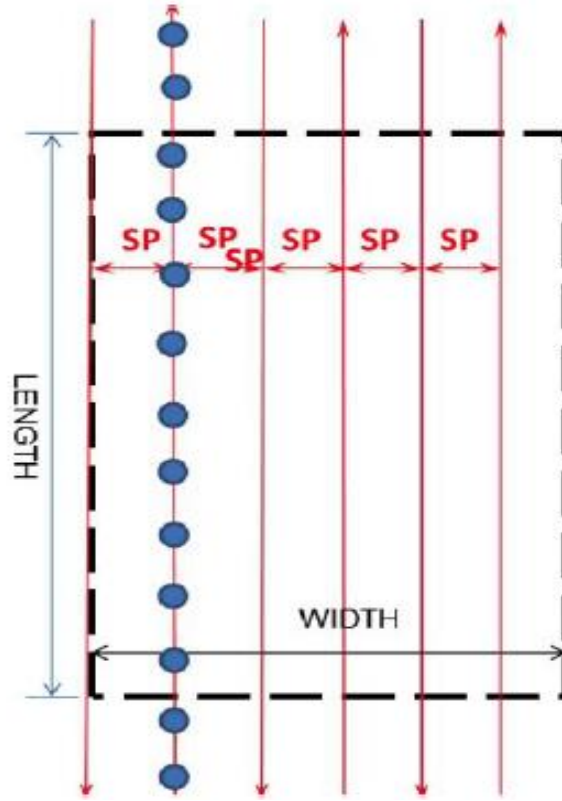
3. حساب عدد الصور في خط طيران:

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

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 عمى 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 عمى 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 الاعتيان 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 المستقرة لنقاط الاختبار المستخدمة في تقييم دقة الـ DEM والـ Orthophoto.

3. البرنامج NCSS: وهو برنامج إحصائي يستخدم لتحليل البيانات وإنشاء الرسوم البيانية. ويتضمن 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  $17.7\text{MP}$  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 (CPs) 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

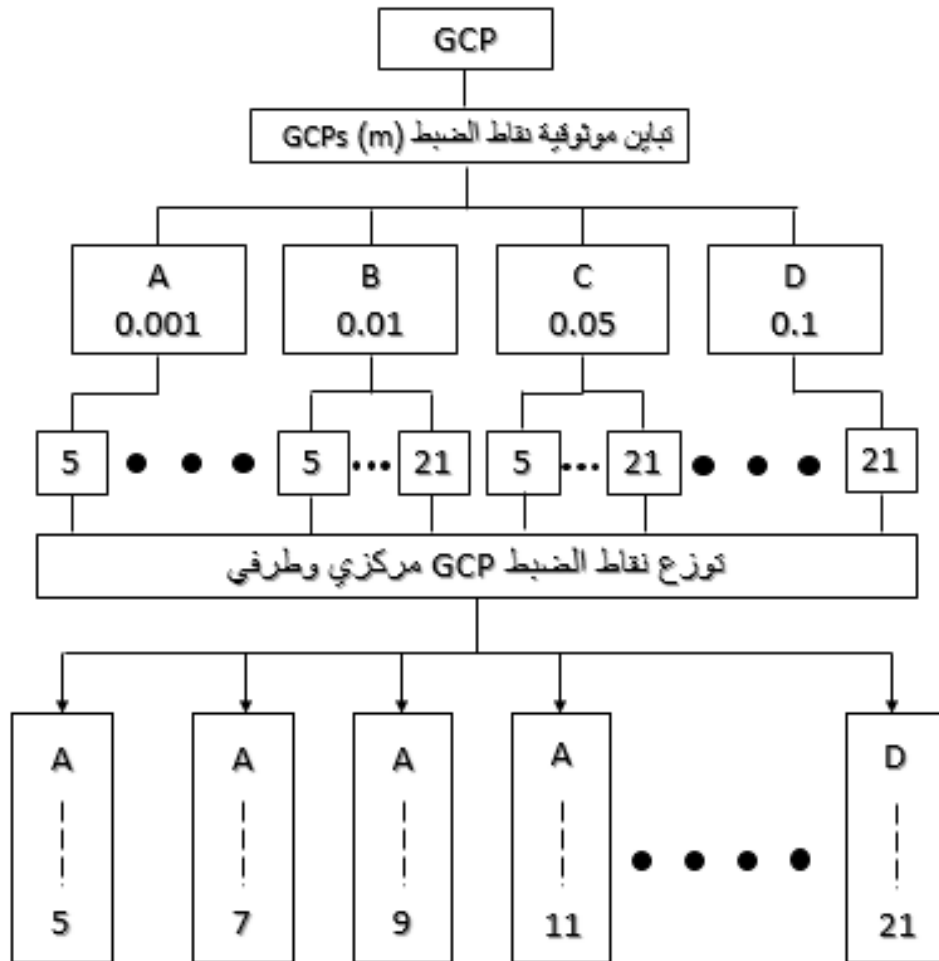
**الجدول (2):** عدد نقاط الضبط ونقاط التحقق لكل سيناريو.

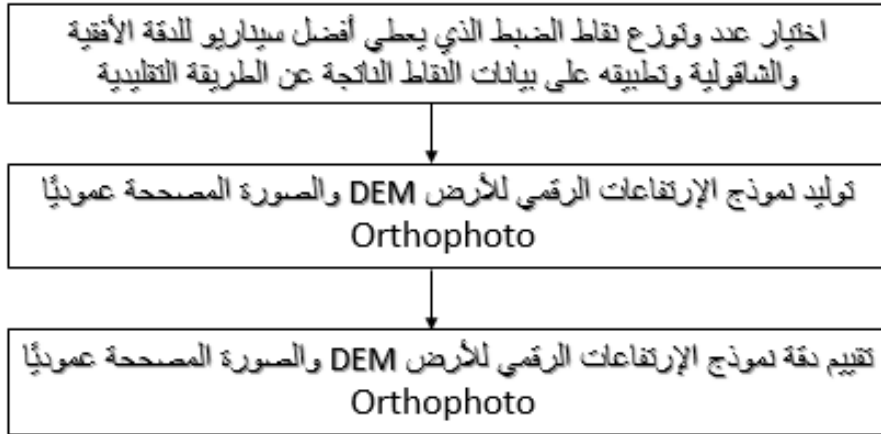
أما السيناريوهات الـ /4/ لتباين موثوقية نقاط الضبط فقد كانت على الشكل التالي:

Senario	RMSE <sub>x</sub> "m"	RMSE <sub>y</sub> "m"	RMSE <sub>z</sub> "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:



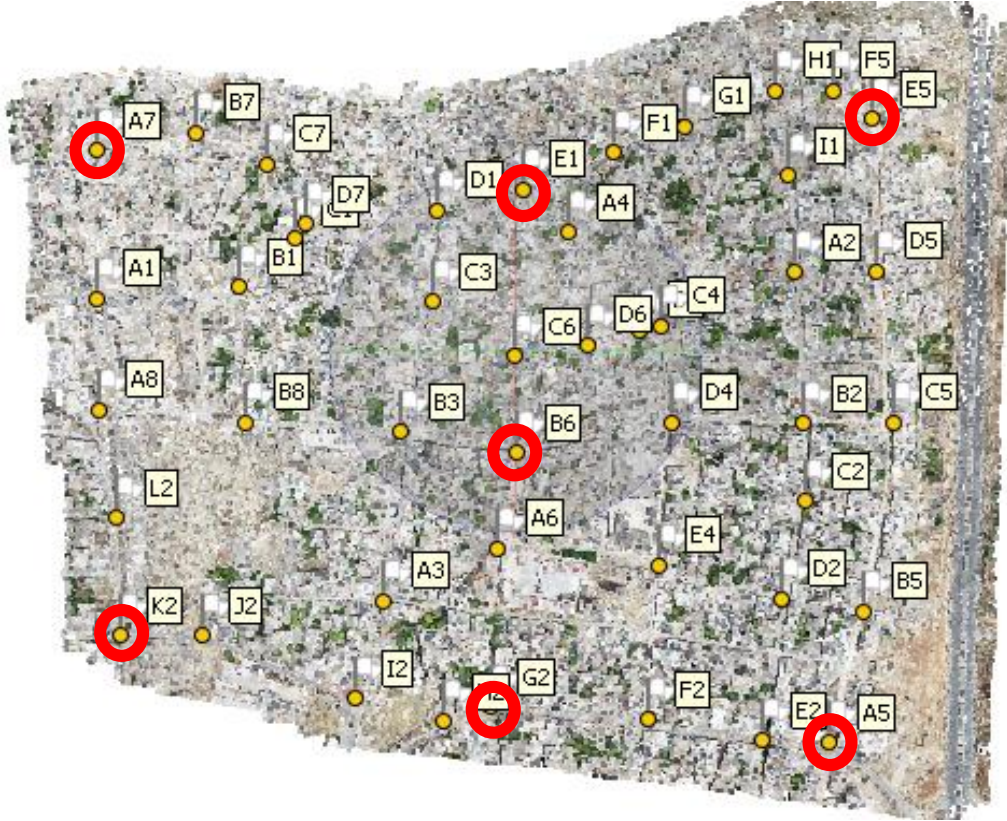


الشكل (6): منهجية البحث والسيناريوهات التي تم العمل عليها وفق تباين موثوقية نقاط الضبط وعددها.

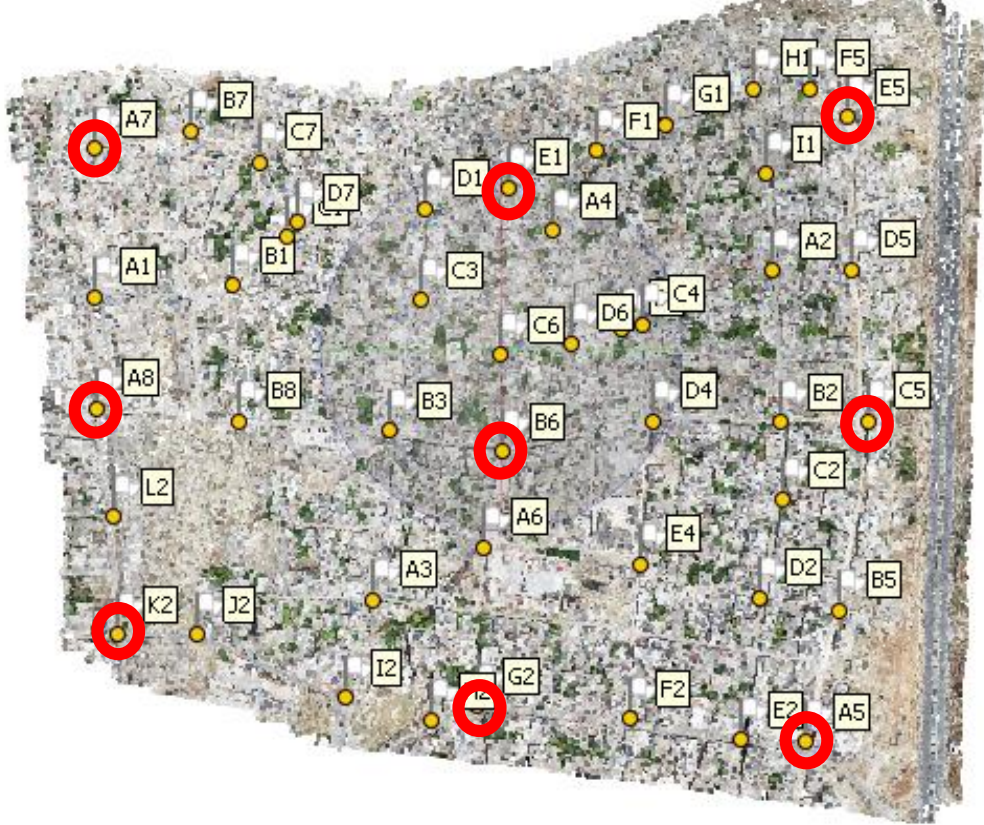
والأشكال التالية توضح السيناريوهات المختلفة لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز عملية التثليث الجوي:



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



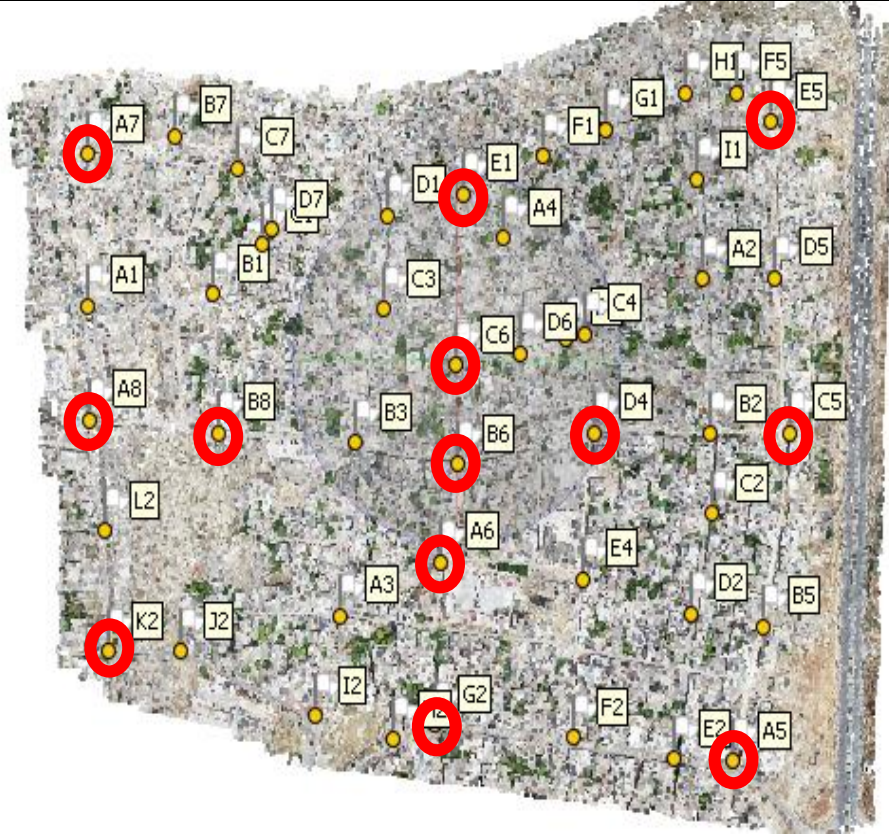
الشكل (8): السيناريو الثاني لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التثليث الجوي.



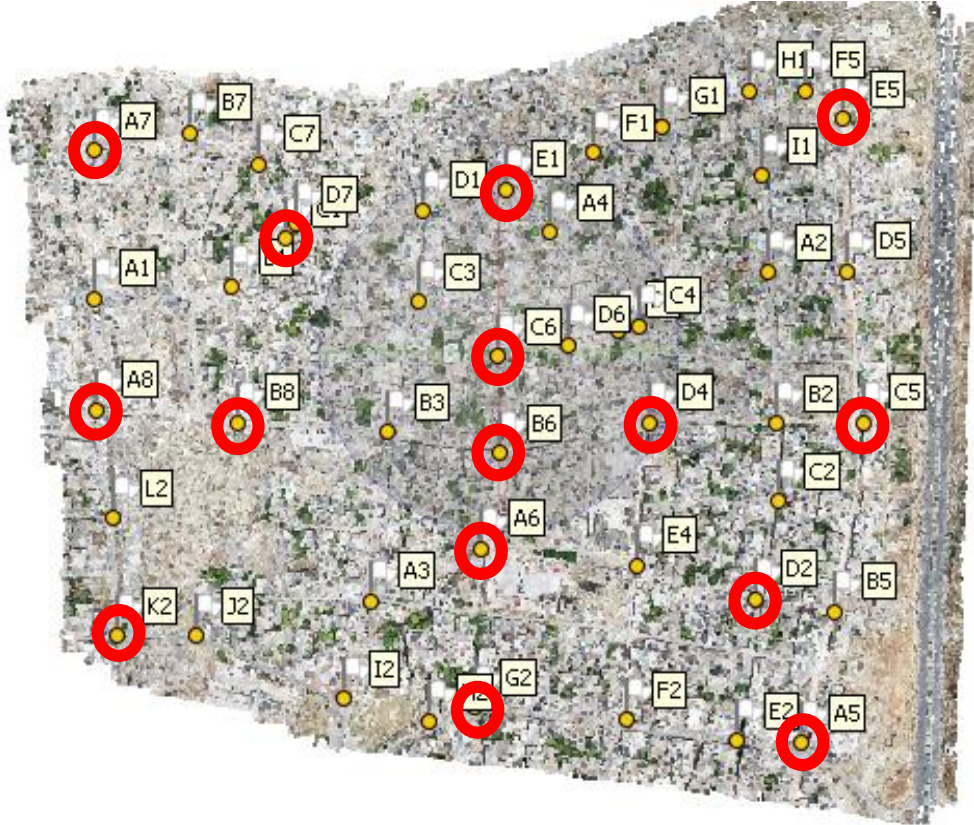
الشكل (9): السيناريو الثالث لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التتاليث الجوي.



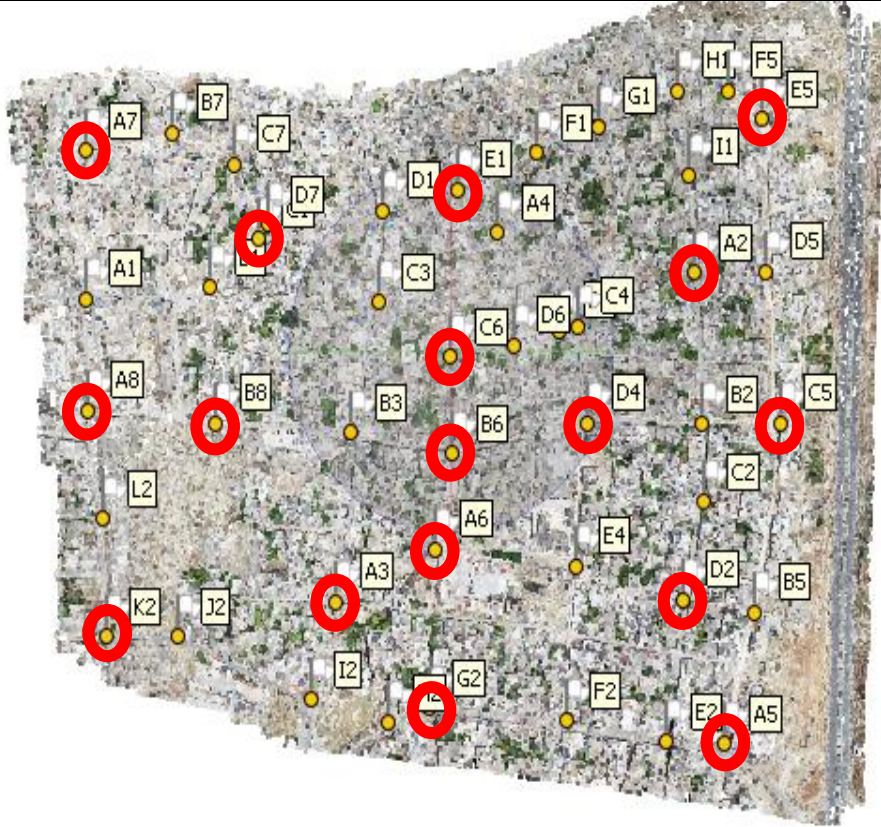
الشكل (10): السيناريو الرابع لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التثبيت الجوي.



الشكل (11): السيناريو الخامس لعدد وتوزع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التلث الجوي.



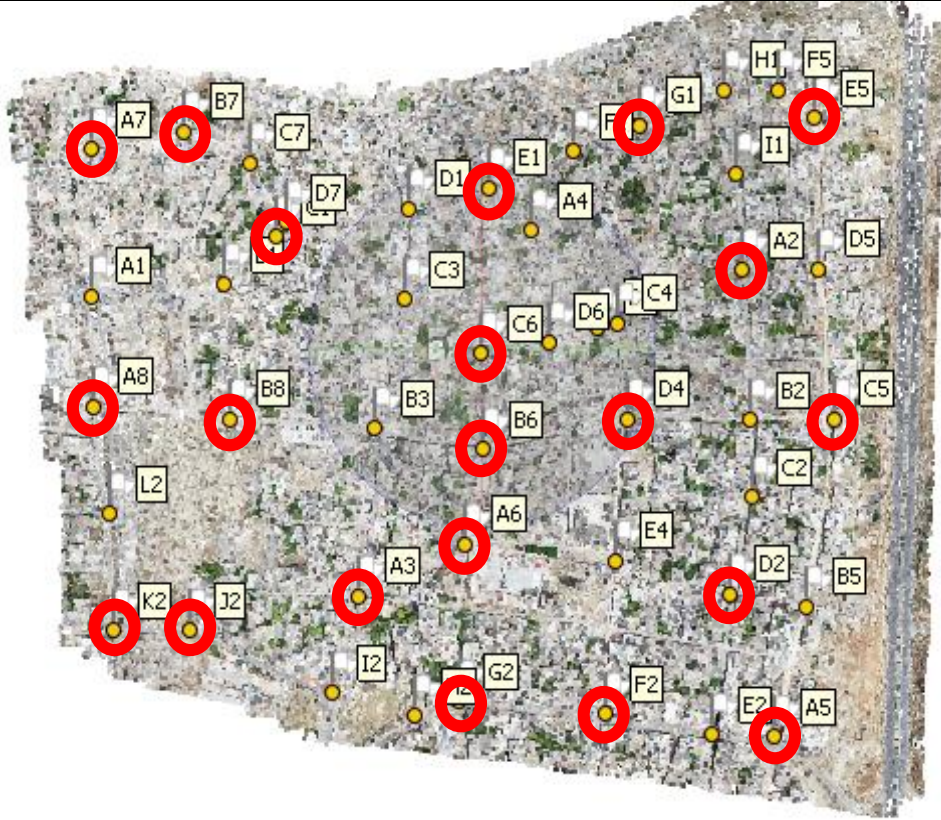
الشكل (12): السيناريو السادس لعدد وتوزيع نقاط الضبط المستخدمة لإنجاز التثليث الجوي.



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 .

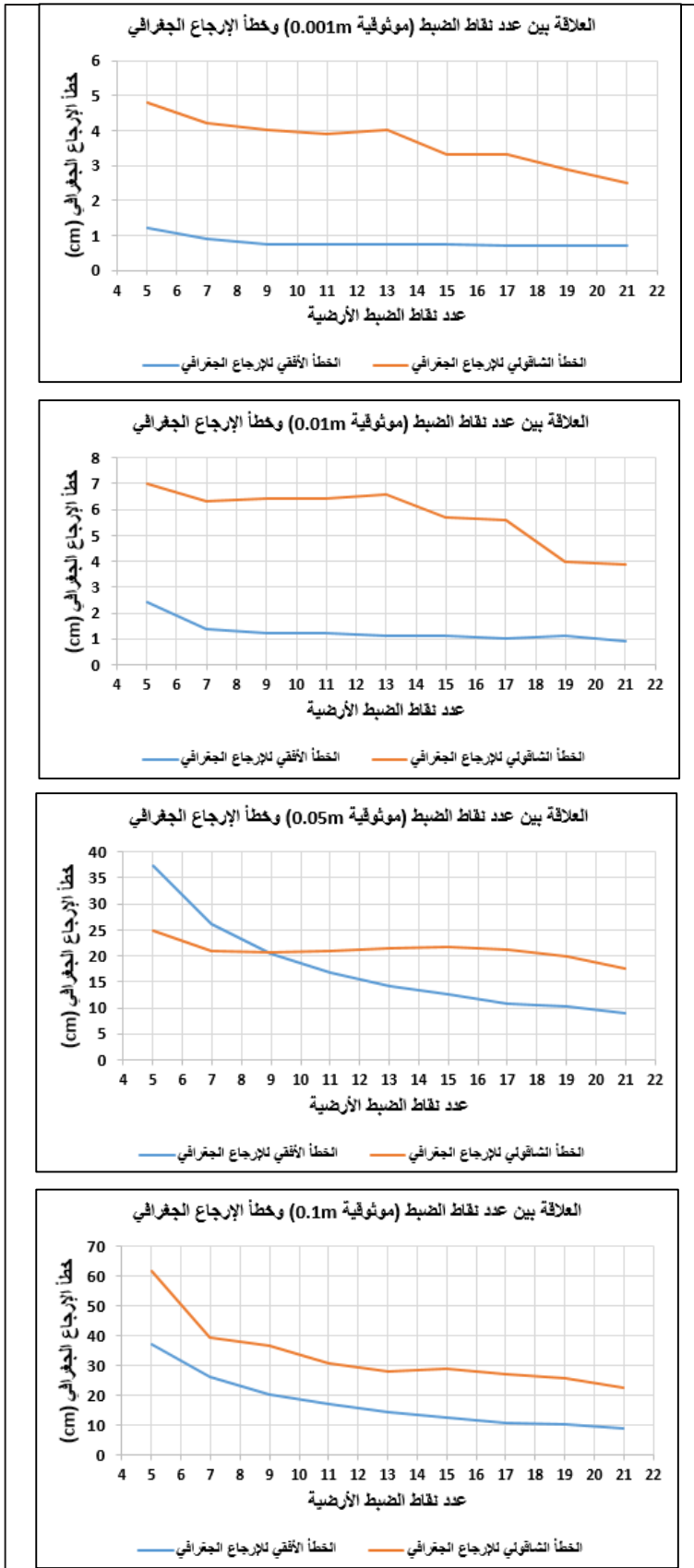
يتم معالجة البيانات التي لا تتبع التوزيع الطبيعي وفق طريقة مخطط الصندوق (Plot Box) حيث تم حذف النقاط الشاذة حتى أصبحت البيانات تتبع التوزيع الطبيعي.

		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.
- قَدَم 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 <sub>x</sub> "m"	RMSE <sub>y</sub> "m"	RMSE <sub>z</sub> "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	$\Delta X$ "m"	$\Delta Y$ "m"	$\Delta Z$ "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	$\Delta X$ "m"	$\Delta Y$ "m"	$\Delta Z$ "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	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
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	$\Delta X$	$\Delta Y$	$\Delta Z$
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  $500 \text{ km}^2$  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 الحقلية 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	$\Delta X$	$\Delta Y$
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 والجانبية، 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](http://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.