مجلة جامعة الملك عبدالعزيز: الآداب والعلوم الإنسانية، م (33)، ع (5)، ص ص: 1 – 24، (2025م)
DOI: 10.4197/Art.33-5.1

رقمنة الأثار والتراث العمراني ومحاكاته ودراسته باستخدام الاستشعار عن بعد: قلعة عسفان الأثرية نموذجًا[1]

زيني طلال حامد الحازمي[١] فيصل محمد جمل الليل[٢]
مروان غازي شعيب[٣] عبدالله حسن محمد الأسمري[٤]

[١، ٢، ٣، ٤] كلية الآداب والعلوم الإنسانية، جامعة الملك عبدالعزيز، جدة، المملكة العربية السعودية

المستخلص. يعد علم الآثار والتاريخ من أقوى العلوم وأهمها في دراسة واكتشاف الأثار والتراث العمراني القديم وصيانته وحمايته من الاندثار أو الدمار أو الاعتداء أو سوء الاستخدام، واستنباطه للحضارات القديمة، ومعرفة ما كانت عليه قديمًا، ومن ثم توثيقه ودراسته لها عن كثب. ونظرًا لعدم توفر قواعد بيانات تاريخية رقمية تجسيمية ثلاثية الأبعاد وذات طابع رسمي موثق للمحتويات الأثرية والتراث العمراني في المملكة العربية السعودية للحفاظ على الأثار والتراث العمراني القديم، ومع تزايد الحاجة للتعامل مع الأثار والتراث العمراني القديم بشكل رقمي، استخدمت الدراسة تقنيات وبرمجيات حديثة للمساحة التصويرية الرقمية، ونظم المعلومات التاريخية، والاستشعار عن بعد للوصول لأفضل طرق الحماية، والحفظ، والأرشفة، والإتاحة. تهدف الدراسة لإنشاء نموذج تاريخي رقمي (DHM) لقلعة عسفان الأثرية من خلال التصوير الجوي القريب باستخدام الدرون وبرمجيات المساحة التصويرية الرقمية؛ تقييم وقياس مشروع النموذج التاريخي الرقمي لقلعة عسفان الأثرية؛ حفظ وتوثيق مخرجات النموذج التاريخي الرقمي وإتاحته. كان من أهم النتائج أن حصلت الدراسة على نموذج تاريخي رقمي بدقة جيدة في وقت قياسي لم يتجاوز الساعة والنصف من العمل الفعلي؛ تم استخراج عدد من المنتجات كان من ضمنها نموذج تاريخي رقمي (DHM)، ونموذج تضاريس رقمي (DTM)، وصورة مقومة (Orthomosaic)؛ اعتمدت دقة وصحة النموذج الرقمي على مقدار التداخل بين الصور، ومواضع التصوير، وكذلك نوع كاميرا التصوير، ويمكن الوصول لدقة عالية في حال استخدام نقاط الضبط الأرضي (GPCs)؛ وأخيرًا تم اقتراح عدد من التوصيات المتعلقة بتشجيع الباحثين والمتخصصين في مجال التاريخ والأثار للتعمق في معرفة ودراسة علوم ومهارات وتقنيات وبرمجيات رقمنة المحتويات الأثرية والتراث العمراني القديم؛ حماية وحفظ المحتويات الأثرية والتراث العمراني القديم بشكل رقمي وتحت إشراف جهات حكومية ذات اختصاص؛ إجراء دراسات مماثلة لهذه لدراسة.

الكلمات المفتاحية: النموذج التاريخي الرقمي (DHM)، الرقمنة، المساحة التصويرية الرقمية، التجسيمية، الدرون، قلعة عسفان.

([1]) مُوِّل هذا البحث من قِبل مشاريع الصندوق المؤسسي بموجب منحة رقم (IFPAS-035-125-2020). ولذلك، يتقدم الباحثون بجزيل الشكر والامتنان للدعم الفني والمالي المقدم من وزارة التعليم وجامعة الملك عبد العزيز، جدة، المملكة العربية السعودية.

أولًا: الإطار العام للدراسة

المقدمة

تعد محتويات الأثار والتراث العمراني القديم ذات أهمية ثقافية وحضارية وتاريخية في جميع الدول المعاصرة، وذلك كونها تحمل قيمة علمية ودلالة مهمة على وجود الحضارات والثقافات السابقة، ومعرفة ما كانت عليه هذه الحضارات قديمًا، وما تملكه من قيمة مادية كونها تمثل المحتوى الأصل للآثار والتراث العمراني القديم. وتزداد أهمية هذه المحتويات وقيمتها التاريخية أو الأثرية بتقدم الزمن سواء تأثرت بالظروف الطبيعية أو الزمنية أم لا وسواء كانت في هيئتها الكاملة أم أنها فقدت جزء من كيانها.

ومع تقدم وتطور العلوم الحديثة مثل علم المساحة التصويرية الرقمية، وتطور التقنيات والبرمجيات الحديثة، أصبح من السهولة بمكان استنساخ ورقمنة المحتويات الأثرية والتراث العمراني القديم، ومن ثم حفظه وأرشفته ومشاركته بعدة أشكال أو امتدادات مختلفة. ومن ضمنها النماذج التاريخية الرقمية DHMs التي توفر ميزات متعددة يمكن الاستفادة منها سواء بحفظها، أو أرشفتها، أو معالجتها، أو تحليلها. كل ذلك كونها تمثل نسخة طبق الأصل في هيئة رقمية تجسيمية ذات قياسات وأبعاد دقيقة وصحيحة. ومن ثم يمكن الاستفادة منها في مجال الدراسات والأبحاث العلمية، والمجال التعليمي، والمتاحف والمكتبات الرقمية، وخرائط الواقع الافتراضي والواقع المعزز. ويمكن استعراض هذه النماذج والحصول عليها ومعاينتها بشكل رقمي، وكذلك يمكن طباعتها في شكل تجسيمي مطابق للأصل بدقة، وصحة.

ومن هنا سعت الدراسة إلى رقمنة وإنشاء نموذج تاريخي رقمي DHM لقلعة عسفان الأثرية من خلال التصوير الجوي القريب وباستخدام تقنيات الطائرات بدون طيار (الدرون)، وبرمجيات المساحة التصويرية الرقمية، وتم ذلك في مرحلتين، الأولى: جمع بيانات الصور، والثانية: المعالجة الرقمية واستخراج النموذج التاريخي الرقمي. وقد سعت الدراسة بدورها إلى تقييم وقياس مشروع النموذج التاريخي الرقمي لقلعة عسفان الأثرية، والحصول على مستويات جيده عن طريق التقييم والقياس بعدة طرق مختلفة. وعملت الدراسة أيضًا على حفظ وتوثيق مخرجات النموذج التاريخي الرقمي وإتاحته، وذلك بعد أن تم إظهار أهم المنتجات لنموذج التاريخي الرقمي، وفيما يمكن استخدامها أو التطبيق عليها.

– مشكلة الدراسة

تعد محتويات الأثار والتراث العمراني القديم بجميع اشكالها المختلفة وحضاراتها الزمنية المتباينة ذات أهمية بالغة، حيث تحيط بها الكثير من الإشكاليات والمخاطر التي تهددها بالتلف أو الاندثار أو الفقد في ظل وجود مسببات وعوامل طبيعية، أو بشرية، وقد تتفاقم هذه الإشكاليات والمخاطر وتزيد مع مرور الزمن وتسارعه. إذ يمكن صياغة مشكلة الدراسة في كل من الآتي:

- أهمية وقيمة الأثار والتراث العمراني القديم، كونه متمثل بنسخة فريدة تمثل الأصل، وتزيد أهميتها بزيادة عمرها، وذلك ما قد يجعلها معرضة للاندثار أو التلف.

- قلة المنتجات الرقمية التجسيمية للمحتويات التاريخية الأثرية والعمرانية والنماذج التاريخية الرقمية DHMs في الوطن العربي بشكل عام وفي المملكة العربية بشكل خاص، وكذلك الحاجة المتزايدة للتعامل معها بشكل رقمي واقع افتراضي أو معزز أو بشكل تجسيمي مطبوع 3D.

- الصعوبات والعوائق خلال استكشاف ودراسة الأثار والتراث العمراني القديم، مثل بعد منطقة الدراسة، أو تضاريسها الصعبة، أو طبيعتها الوعرة، وصعوبة نقلها وتحريكها، أو التعامل معها.

- مشاكل التعامل مع الأثار والتراث العمراني القديم وترميمها وإصلاحها مما قد يلحق الضرر بها أو تلفها أو تغيير ملامحها الأصلية.

- القصور في تفعيل الأثار والتراث العمراني القديم في شكله التقني المتمثل في الأدوات، والآلات، وأجهزة التحكم، والمكتبات الرقمية للحفظ والتسجل والتوثيق بالبيانات والمعلومات، والصور، والفيديو. هذا إلى جانب البرمجيات والتقنيات الحديثة التي تستخدم في الترميم، والحفظ وتعمل على الاستدامة.

- عدم وجود قواعد بيانات تاريخية رقمية ذات طابع رسمي موثوق للمحتويات الأثرية أو التراثية القديمة بحيث تكون قابلة للتغذية أو الاستخدام من ذوي الاختصاص.

- الافتقار لوجود معرفة ومهارة تقنية وبرمجية مناسبة لدى المتخصصين في مجال التاريخ الأثار في المملكة العربية السعودية بحسب إطلاع الدراسة.

وهذا بدوره يجعل من الضروري البحث عن طرائق حديثة وأمنه بدون المساس بأصل الأثر والتراث العمراني القديم، ومن ثم العمل على رقمنتها، وإعادة إعمارها، وحفظها، وأرشفتها، وإتاحتها أو مشاركتها وفق ضوابط محددة.

– أهداف الدراسة

تهدف الدراسة إلى كل من الآتي:

١– إنشاء نموذج تاريخي رقمي لقلعة عسفان الأثرية من خلال التصوير الجوي القريب باستخدام (الدرون) وبرمجيات المساحة التصويرية الرقمية.

٢– تقييم وقياس مشروع النموذج التاريخي الرقمي لقلعة عسفان الأثرية.

٣– حفظ وتوثيق مخرجات النموذج التاريخي الرقمي وإتاحته.

ومع تحقيق أهداف الدراسة سيكون من الممكن تطبيق وتعميم هذه الطريقة على المواقع الأثرية والتراثية، ومن ثم المحافظة على الأثار والتراث العمراني بالمملكة العربية السعودية. وذلك بإنشاء نماذج رقمية تاريخية مشابهه يتم حفظها وتصنيفها في المكتبات الرقمية المتخصصة، والمتاحف، والأقسام العلمية بالجامعات، وغيرها ...، سواء حفظت بشكلها الرقمي أو بهيئتها المجسمة المطبوعة (ثلاثية الأبعاد). وبذلك يتم تحقيق

قيمة وأهمية تراثية ثقافية، واقتصادية، واجتماعية، وعمرانية في المملكة العربية السعودية، وكل ذلك في ظل دراسة وصيانة وحماية الأثار والعمران وتداركه قبل اندثاره أو فقدانه.

– أهمية الدراسة

تنبع الاهمية العلمية للدراسة في كل من الآتي:

- تقديم الدراسة أفضل الطرق وأسهلها لحفظ الأثار والتراث العمراني القديم وتسهيل التعامل معها.
- تظهر الدراسة بعض أدوات وبرمجيات الرقمنة وإعادة الإعمار وعلومها المتنوعة، ومنتجاتها المختلفة.
- تقدم الدراسة الطرق الحديثة والمحسنة لحفظ الأثار والتراث العمراني القديم وصياغة أفضل حلول الأثار والتراث العمراني القديم.
- تقدم الدراسة إطار إستراتيجي جديد يهدف لحماية وحفظ الأثار والتراث العمراني القديم.
- تساعد الدراسة في تحقيق رؤية المملكة ٢٠٣٠م بدعمها الجهات ذات الاختصاص والعلاقة مثل قطاع التعليم، والسياحة والأثار.
- تساعد الدراسة في الحصول على تنمية مستدامة وقابلة لتطوير المحتويات التاريخية الرقمية التجسيمية للأثار والتراث العمراني القديم في المملكة العربية السعودية.
- تساعد الدراسة في شق طريق الرقمنة وإعادة إعمار الأثار والتراث العمراني القديم في المملكة العربية السعودية.
- تظهر الدراسة أهمية الأثار والتراث العمراني القديم في المساعدة على دراسة وتسهل التعرف على الماضي والتجول فيه في شكله الرقمي والافتراضي.

ومع معرفة أهمية الدراسة العلمية سيكون من الممكن دراسة وتحقيق التنمية المستدامة والعناية بالمجتمع والنهوض به في هذا الموضوع، وتفعيل دور الأقسام العلمية في نقل المعرفة اللازمة ومعرفة التطورات الحديثة من تقنيات وبرمجيات للحفاظ على تاريخ وأثار التراث العمراني السعودي القديم من خلال التعليم، وتساعد الدراسة الجهات ذات الاختصاص والعلاقة بتحقيق رؤية المملكة ٢٠٣٠م مثل: وزارة السياحة؛ وزارة التعليم؛ وزارة الثقافة؛ وزارة الشؤون البلدية والقروية؛ وزارة الموارد البشرية والتنمية الاجتماعية؛ وزارة الاقتصاد والتخطيط؛ صندوق الاستثمارات العامة؛ مدينة الملك عبدالعزيز للعلوم والتقنية وغيرها.

منهجية الدراسة

اتبعت الدراسة المنهج التاريخي التوثيقي، والمنهج التطبيقي الحقلي والمكتبي. وذلك بدراسة قلعة أثرية قديمة، تم إعمارها رقميًا وتحويلها لنموذج تاريخي رقمي مجسم، وتم قياسه وتقييمه خلال مرحلة رقمنته وتجسيمه، وذلك ليتم تحديد مدى جودته، ومن ثم اخراجه حفظه ومشاركته بالطريقة المناسبة. وتم كل ذلك بجمع

البيانات الحقلية بواسطة أجهزة التصوير الجوي القريب، وتحديدًا باستخدام طائرة بدون طيار ذات إمكانيات وقدرات متوسطة، ثم معالجة تلك البيانات مكتبيًا بواسطة برمجيات متخصصة، وجهاز حاسب آلي (محطة عمل) بقدرات جيدة، وذلك لإنشاء نموذج تاريخي رقمي بمستوى دقة وصحة جيده.

- حدود الدراسة

تم تطبيق الدراسة على قلعة عسفان الأثرية، والتي تمثل حصن أثري قديم شبه مندثر (شكل ١)، وهو عبارة عن بناء تراثي بأربعة أضلاع متساوية وبسماكة متر واحد لكل جدار، وبطوال ١٧م من الخارج و١٥م من الداخل، ويحوي بابا واحدًا من جهة الشمال بعرض حوالي ١م وارتفاع ٢م، ويخترق كل جدرا منها ٣ نوافذ طولية متقوسة من أعلاها ما عدا الجدار الشمالي والذي يحتوي على الباب فيوجد به نافذتان فقط بنفس قياسات النوافذ الأخرى، ويوجد بها عدد ١٢ قسم (غرفة) مقسمة بحدود تشبه جدران الغرف، ولكنها بارتفاعات مختلفة وبعرض حوالي نصف متر، وهي منخفضة الارتفاع من نصف متر الى متر واحد ففي جهة الجدار الشرقي نجد عددها ٥ غرف والجدار الغربي عددها ٥ غرف أيضًا وجميعها بارتفاع نصف متر فقط، أما الجدار الجنوبي فيحوي غرفتين فقط ولكن بارتفاع ١م، وهي أعلى من بقية الغرف. وبذلك نجد الساحة في الوسط واسعة حيث تبلغ أطوالها ١٢م من الجنوب إلى الشمال في ٩ أمتار من الشرق الى الغرب. ويوجد في الركن الجنوبي الشرقي من الساحة الداخلية فتحت بيضاوية يبلغ طول قطرها من الشمال إلى الجنوب ١.٥م، ومن الشرق إلى الغرب ٢م، وهي على شكل وهيئة سجن مصغر. وهي مكشوفة بالكامل ولا يوجد أي أثر يدل على أنها كانت مسقوفة.

شكل ١: صورة جوية تظهر قلعة عسفان الأثرية من الجهة الشمالية

ترتقي هذه القلعة الأثرية على قمة تل يرتفع حوالي ١٥م، وقد استخدم في بنائها الحجر البازلتي المأخوذ من المناطق الجبلية المجاورة للقلعة، ويرجع ذكر القلعة وفق بعض المصادر إلى القرن السادس الهجري، وذلك في أثناء سيطرة الدولة الأيوبية على المنطقة. حيث ذكرها الرحالة ابن جبير الذي قدم إلى الحج في عام ٥٧٨هـ على أنها حصن عتيق البنيان ذو أبراجٍ مشيدة أثر فيه القدم وأوهته قلة العمارة ولزوم الخراب. وقد تم ترميم هذه القلعة من الدول التي تلتها. وكانت توفر الحماية لطرق القوافل القريبة التي تمر بالمنطقة، وقوافل الحجاج التي تتجه من جدة إلى المدينة المنورة، وتعتبر هذه القلعة من أشهر المعالم الأثرية بمنطقة

مكة المكرمة، وتغطي في مجمل مساحة حدودها حوالي ٤٠٦٣م٢، ويغطي البنيان منها حوالي ٢٥٠م٢. وقد لعبت هذه القلعة أدوار اشرافية وتنظيمية وإدارية، ويوجد بيها غرف وأقبية تستخدم لأغراض متعددة، مثل: تخزين الغذاء، والماء، والأغراض الأخرى، بالإضافة إلى استخدامها كمستودع لأسلحة، والذخيرة، واستخدمت أيضًا لأسر أو سجن المخالفين والخارجين عن النظام. وتشهد القلعة في الوقت الراهن اقبال كبير من السياح ومحبي الأثار والتصوير الفوتوغرافي.

– مصطلحات الدراسة

تضمنت موضوع الدراسة عدد من المصطلحات المختلفة، لذلك حددت الدراسة معناها وميزتها علي المصطلحات الأخرى المتشابهة، وهي كالآتي:

النموذج التاريخي الرقمي Digital Historical Model (DHM):

هو عبارة عن تمثيل إحصائي (رقمي) للسطح المتصل (غير المتقطع) لمحتوى تاريخي (أثار، تراث عمراني، ... إلخ)، ويتم تمثيله من خلال إنشاء عدد كبير من النقاط ذات الإحداثيات الفراغية ثلاثية الأبعاد بالنسبة لنطاق إحداثيات معرف أو افتراضي.

الرقمنة (الإنشاء) Digitization (Creation):

هي عبارة عن تمثيل إحصائي (رقمي) لسطح متصل أو غير متصل لمحتوى موجود في الطبيعة، ويتم تمثيله من خلال إنشاء عدد كبير من النقاط ذات الإحداثيات الفراغية ثلاثية الأبعاد بالنسبة لنطاق إحداثيات معرف أو افتراضي.

المساحة التصويرية الرقمية Photogrammetry:

هي عملية تكامل علمية، وفنية، وتقنية، وبرمجية لإنشاء، وقياس، وتقييم البيانات، والمعلومات الكمية، والوصفية، والشكلية باستخدام بيانات التصور المختلفة.

التجسيمية Stereoscopic:

هي هيئة تصوير ثلاثي الأبعاد أو تصوير مجسم. وهي طريقة لتصوير وتسجيل وصف مجسم للأجسام. وهذه الطريقة تقلد عمل العينين. فالعينان تكونان صورتين للجسم المرئي من زاويتين مختلفتين قليلا بسبب فرق المسافة بين العينين، ومن ثم ترسل العينان الصورتين إلى المخ، حيث يتم دمج الصورتين فيظهر الجسم أمامنا مجسمًا، أي أننا نستطيع تقدير عمق الجسم أو المحتوى في الصورة، وكذلك تقدير القريب والبعيد.

الدرون (طائرة بدون طيار) (Drone (Unmanned Aerial Vehicle-UAV:

هي عبارة عن أداة (طائرة بلا طيار) تساعد في حمل كاميرات التصوير أو المستشعرات، لالتقاط البيانات المتعددة من زوايا ومسافات وارتفاعات مختلفة. ويتم التحكم بها وبكمرات التصوير الملحقة عليها عن بعد بواسطة وحدة تحكم خاصة. ولها عدة فئات واستخدامات، ولها خصائص مختلفة ومتعددة بحسب نوعها وفئتها.

- هيكلة الدراسة

تم تقسيم هذه الدراسة إلى ثلاث أقسم، يتناول القسم الأول منها الإطار العام للدراسة، بينما يتطرق القسم الثاني إلى إنشاء النموذج التاريخي الرقمي وتقييمه وقياسه وحفظة، وختمت الدراسة بالقسم الثالث لمناقشة النتائج والتوصيات.

ثانيًا: إنشاء النموذج التاريخي الرقمي وتقييمه وقياسه وحفظه

عملت الدراسة على رسم خطة وأسلوب النمذجة الرقمية التاريخية للمحتويات الأثرية أو العمرانية، وذلك في ثلاث خطوات كالآتي: إنشاء نموذج تاريخي رقمي لقلعة عسفان الأثرية معتمدة في ذلك أسلوب النمذجة الرقمية باستخدام التصوير الجوي القريبة، ومعتمدة في ذلك على تقنيات الطائرات بدون طيار ذات مواصفات متوسطة القدرات (شبه احترافية)؛ قدمت تقريرًا لتقييم وقياس النموذج المنشأ على أسس علمية دقيقة وواضحة، وبالإمكان تطبيقها واتباعها بسهولة بدون أي تعقيدات تذكر؛ عملت على توضيح أساليب الحفظ، والتوثيق المتبعة مع النماذج التاريخية الرقمية المنشأة، وذلك بغرض المحافظة عليها وإتاحتها أو مشاركتها أيضًا.

١. إنشاء النموذج التاريخي الرقمي

قامت الدراسة بإنشاء النموذج التاريخي الرقمي (DHM) لقلعة عسفان الأثرية بواسطة التصوير الجوي القريب من خلال استخدام طائرة بدون طيار، وفي ظل وجود برمجيات المساحة التصويرية الرقمية. حيث تم العمل على الإنشاء بجمع بيانات الصور، ومن ثم انتهى بالمعالجة الرقمية واستخراج النموذج التاريخي الرقمي المطلوب.

أ. جمع البيانات ورسم خطة الطيران والتصوير

عملت الدراسة على جمع بيانات الصور على مرحلتين أحدهما مكتبية والأخرى حقلية.

المرحلة الأول: وهي مرحلة مكتبية تم فيها تحديد موقع التصوير، ورسم خطة طيران متعددة الارتفاعات (مرتفع، ومتوسط، ومنخفض)، ومن ثم تحديد المسار، والزمان، والوقت، والارتفاع، وهيئة التصوير (عمودي، محيطي)، ومقدار تداخل الصور الأمامي والجانبي والذي بدوره يشكل فارق كبير في نتيجة استخراج أو

إنشاء النموذج المجسم، وتم أيضًا تهيئة وتجهيز أدوات التصوير طائرة بدون طيار (الدرون) MAVIC_2_PRO (جدول ١).

جدول 1: خصائص الصور وبيانات الطائرة بدون طيار (درون) Mavic 2 Pro، ومعلومات النظام، ونظام الإحداثيات

النوع	خصائص ومعلومات الكاميرا			خصائص ومعلومات الصورة		
	طراز الكاميرا	البعد البؤري	دقة الكاميرا	الأبعاد	الدقة	التمثيل اللوني
Mavic 2 Pro	L1D-20c	٣٥ مم	٢٠ ميقا بكسل	3648 * 5472	٧٢ نقطة/بوصة	sRGB
معلومات النظام	خصائص الجهاز			برنامج التشغيل		
	CPU: Intel(R) Core (TM) i7-7820HK CPU @ 2.90GHz RAM: 32GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 1080 (Driver: 31.0.15.1694)			Windows 10 Pro, 64-bit		
نظام الإحداثيات	نظام إحداثيات الصور			نظام إحداثيات الإخراج		
	WGS 84 (EGM 96 Geoid)			WGS 84 / UTM zone 37N (EGM 96 Geoid)		

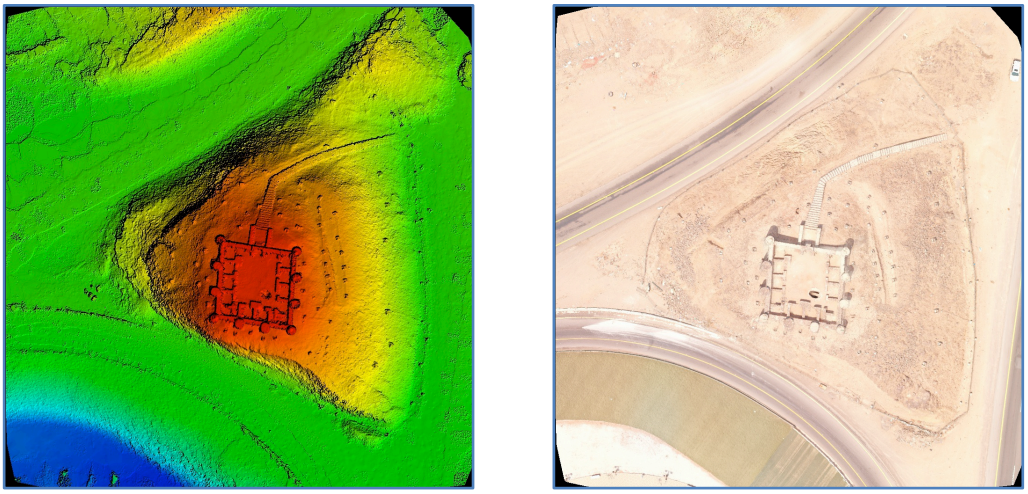
المرحلة الثانية: وهي مرحلة حقلية كان فيها اتباع خطة الطيران المرسومة مسبقًا في المرحلة الأولى، وباستخدام برنامج PIX4capture. حيث تم الوقوف على الموقع المحدد للقلعة الأثرية (قلعة عسفان الأثرية)، وبدأ العمل الحقلي بالتصوير العمودي ثم تبعة التصوير المحيطي. حيث تم تغطية التصوير العمودي خلال حوالي ١٥ دقيقة بتصوير عمودي بزاوية تتراوح ما بين ٩٠ درجة و٧٠ درجة، وبتداخل أمامي ٨٠٪ وتداخل جانبي ٧٠٪ فيما بين الصور الملتقطة، وبارتفاعين مختلفين الأول بارتفاع ٦٠ م، والثاني بارتفاع ٣٠م من نقطة الإقلاع. وتم تغطية التصوير المحيطي خلال حوالي ١٨ دقيقة بتصوير أفقي مائل بزاوية تتراوح ما بين ٧ درجات و٢٠ درجة، وبارتفاعات متعددة ومختلفة ٢٠م والثاني بارتفاع ٣٠م من نقطة الإقلاع (جدول ٢).

جدول ٢: فئات التصوير وخصائص بيانات الصور من خلال بيانات المشروع الحقلي وباستخدام برنامج PIX4capture

دقة حقلية (سم/بكسل)	مدة الطيران (دقيقة)	تداخل جانبي	تداخل أمامي	المسار (متر)	التغطية (متر)	الارتفاع (متر)	قيمة الارتفاع	عدد الصور	زاوية التصوير (درجة)	هيئة ونوع التصوير
١.٥٠	٥.١٢	٧٠٪	٨٠٪	٦٦٦	٧٥ × ٧٧	٦٠	مرتفع	٥٦	٧٠	تصوير عمودي شبكي تجسيمي
٠.٧٥	٩.٦	٧٠٪	٨٠٪	١٠٦٦	٧٥ × ٧٧	٣٠	متوسط	١٩٩	٧٠	
١.٠٨	٣.٢٥	–	–	٢١٥	٨٠ × ٨٠	٣٠	متوسط	٣٦	١٠	تصوير محيطي (دائري)
٠.٩٥	٣.٣٤	–	–	٢١٥	٨٠ × ٨٠	٢٠	منخفض	٣٦	١٠	
٠.٧٨	٣.١٢	–	–	١٣٤	٥٣ × ٥٤	٢٥	منخفض	٣٦	١٠	
٠.٨٧	٣.١	–	–	١٣٤	٥٣ × ٥٤	٣٠	متوسط	٣٦	١٠	
٠.٧٩	٢.٥٧	–	–	١١٧	٤٩ × ٤٧	٢٨	متوسط	٣٦	١٠	
٠.٧٩	٢.٤٠	–	–	١١٨٨	٤٩ × ٤٧	٢٨	متوسط	٥١	٧	
٠.٧٩	٢.١٢	–	–	١١٣	٤٩ × ٤٧	٢٨	متوسط	٢٣	٢٠	
–	٣٤.٦٧	–	–	٢٧٧٨	–	–	–	٥٠٩	–	المجموع

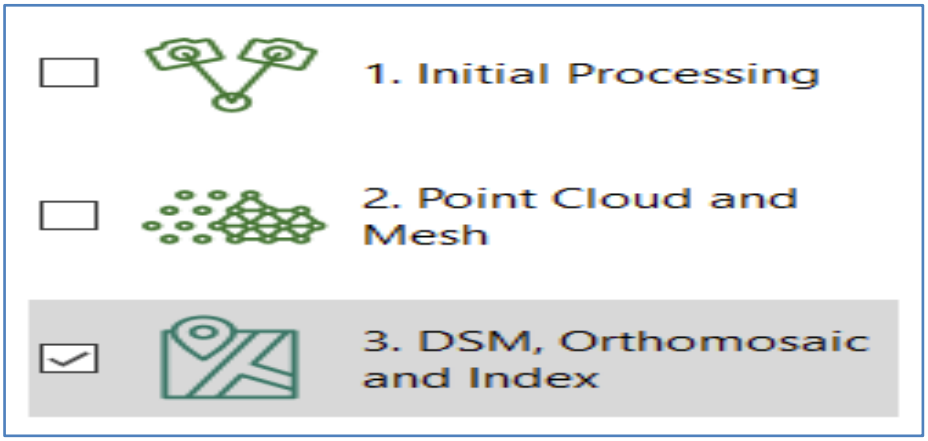
ب. معالجة البيانات وإنشاء النموذج

عملت الدراسة على التعامل مع بيانات الصور بفحصها جيدًا والتأكد من سلامتها، ومن ثم فرزها بحسب كل من هيئة التصوير والارتفاع، وذلك لتسهيل عملية المعالجة فكما هو معلوم أن زيادة نسبة التداخل تقلل من الأخطاء في تطابق الصور والنقاط المشتركة، وتزيد من صحة ودقة بيانات النموذج المجسم أثناء عملية المعالجة. وقد تم إنشاء المشروع باستخدام برنامج PIX4Dmapper، وبرنامج PIX4Ddiscovery، واستغرقت عملية المعالجة الأولية حوالي ٤٩ دقيقة لعدد ٥٠٩ من الصور المتداخلة والمتباينة في الارتفاع أثناء وقت التصوير. وتم من خلالها تغطية مساحة ١١١٠م^{٢}، وبمتوسط مسافة لأخذ العينات الأرضية (GSD) ٠.٦٥سم، وتم معالجة بيانات الصور كاملة بنسبة ١٠٠٪، وتم الحصول على متوسط ٦٧٢٥٨ نقطة أساسية لكل صورة، وتم الوصول إلى ٣.١٪ فرق نسبي بين المعلمات الأولية والمحسّنة للكاميرا الداخلية وهي قيمة تعد جيدة، وحيث من المفترض أن لا تزيد هذه النسبة عن ٥٪، وتم الحصول أيضًا على متوسط ١٦٠٩٨.٤ لمقدار التطابق لكل صورة معايرة، وكذلك تم ضبط الإسناد الجغرافي (Datum: WGS_1984, Coordinate System: WGS_84/UTM_Zone_37N (EGM_96_Geoid، ولم تستخدم الدراسة في هذا المشروع طريقة التصحيح باستخدام نقاط الضبط الأرضي (GCP)، وتنصح الدراسة في حال استخدام نقاط الضبط الأرضي (GCPs)، فإنه من المفترض تكون قيمة الخطأ أقل من 2×GSD، ومع ذلك كانت النتائج مرضية ومقبولة بشكل جيد (شكل ٢).



شكل ٢: في اليمين صورة مقومة Orthomosaic**، وفي اليسار نموذج التضاريس الرقمي** DTM **قبل عملية التحسين على السطح**

عملت الدراسة على التأكد من جميع البيانات وتحديدًا بيانات الصور، ومن ثم ضبط المرجعية أو الإسناد الجغرافي المناسب، وبدأت عملية الإنشاء والمعالجة الأولية بخطوات متسلسلة، وهي في غالبها تكون موحدة في جميع برمجيات النمذجة الرقمية أو برمجيات المساحة التصويرية الرقمية (Photogrammetry)، ولذلك لن نفصل فيها كثيرًا. ونستطيع تقسيم مرحلة المعالجة (Processing)، وإنشاء النموذج المجسم إلى ثلاثة أقسام رئيسية، وهي: المعالجة الأولية (Initial Processing)؛ سحابة النقاط والشبكة (Point cloud and Mesh)؛ نموذج الاسطح الرقمي، والصورة المقومة إلخ.. (DSM, Orthomosaic, etc) (شكل ٣).

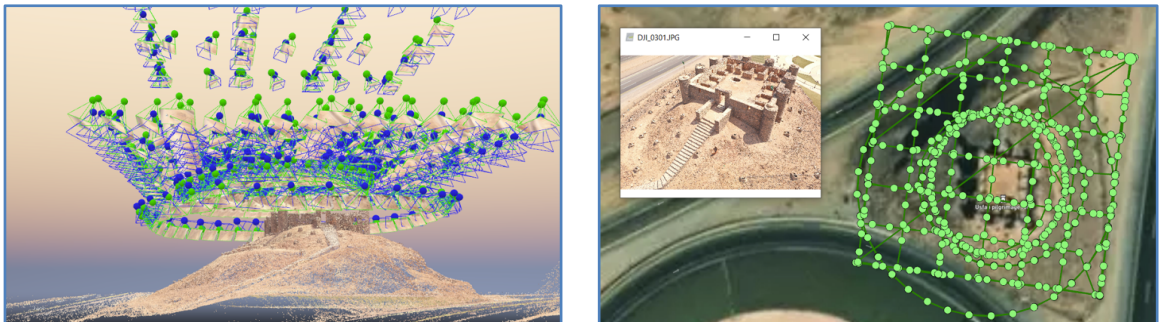


شكل ٣: مراحل المعالجة وإنشاء النموذج المجسم: المعالجة الأولية، وسحابة النقاط والشبكة، ونموذج الأسطح الرقمي، والصورة المقومة

– المعالجة الأولية

في هذه المرحلة تتم عملية المعايرة الداخلية والخارجية للكاميرا، وذلك بالاعتماد على معلومات الكاميرا الداخلية مثل الطول البؤري، والتشوهات، وغيرها ....، وكذلك معلومات الكاميرا الخارجية مثل الموضع، والاتجاه، وإحداثيات الصورة لنقاط الربط التلقائي (شكل ٤). وفي نفس هذه المرحلة يتم التعامل مع الصور غير المشوهة، وهي الصور التي تكون بدون تشوهات في العدسة. وخلال هذه المرحلة يمكن الحصول على

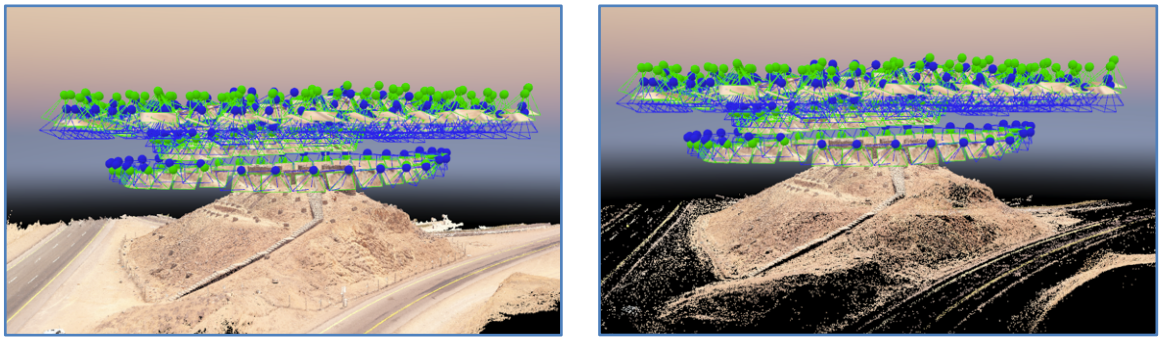
تقرير للجودة مفصل Quality Report في كل ما يخص معلومات البيانات وجودة المشروع في كل من نموذج الكاميرا، والتداخل، والمرجعية الجغرافية، والمطابقة، ... وغيرها. وهو تقرير ضروري جدًا لتحقق من نجاح المعالجة الأولية، وقد اعتمدت عليه الدراسة في تقييم وقياس المشروع كما سيتضح لاحقًا.



شكل ٤: مرحلة المعالجة الأولية من زوايا مختلفة تظهر فيها كثافة شبكة النقاط ومواضع التقاط الصور العمودية والمحيطية

- سحابة النقاط والشبكة

في هذه المرحلة يتم استخراج سحابة نقاط كثيفة ثلاثية الأبعاد Densified Point Cloud، وكل نقطة في هذه السحابة تمثل معلومات لثلاثة أبعاد، فيتم تخزين معلومات موضع كل نقطة X, Y, Z، ويتم أيضًا تخزين معلومات اللون لكل نقطة من سحابة النقاط الكثيفة. وكذلك يتم في هذه المرحلة استخراج شبكة المثلثات ثلاثية 3D Textured Mesh الأبعاد على شكل نسيج متصل (شكل ٥).



شكل ٥: في اليمين سحابة النقاط Point Cloud، وفي اليسار الشبكة Mesh، ويتضح فيهما مواضع التصوير المختلفة

- نموذج الأسطح الرقمي والصورة المقومة

بعد التأكد من صحة العمل والبيانات للمشروع وإنشاء كل من سحابة النقاط والشبكة نقوم بالتصدير النهائي للمنتجات، وذلك بعدة خيارات أو امتدادات متاحة، مثل (obj, و ply, و fbx, و dxf, و pdf, و slpk)، ويتم العمل على كل من نموذج الأسطح الرقمي، والصورة المصححة وغيرها... واستخراج المنتجات الهامة بصيغ مختلفة للتناسب مع الاستخدامات المتنوعة لاحقاً، وهي متمثلة في كل من: شبكة نموذج الأسطح الرقمي Grid DSM. وهي تمثل نموذج سطح رقمي 2.5D للمنطقة المنشأة ويتم تصديرها على هيئة سحابة

نقطية (مجموعة من النقاط)؛ نموذج الأسطح الرقمي النقطي Raster DSM. وهو يمثل نموذج سطح رقمي 2.5D للمنطقة المنشأة ويتم تصديره على هيئة ملف نقطي GeoTIFF. وبواسطته نستطيع الحصول على خطوط الكنتور للمنطقة المرادة؛ نموذج التضاريس الرقمي النقطي Raster DTM. وهو يمثل نموذج تضاريس رقمي 2.5D للمنطقة المنشأة ويتم تصديره على هيئة ملف نقطي GeoTIFF. وعن طريقة أيضًا يمكننا الحصول على خطوط الكنتور للمنطقة المرادة؛ الصور المقومة Orthomosaic. وهي تمثل صورة أو خريطة ملونة ثنائية الأبعاد وبمقياس موحد للمنطقة المراد إنشاؤها. وهذه الصور المقومة قابلة للفتح والاستعراض على كل من قوقل ماب، وقوقل إرث؛ خريطة الانعكاس Reflectance Map. وهي خريطة ثنائية الأبعاد تعطينا وصف لانعكاس المنطقة المرادة؛ خريطة الفهرس Index Map. وهي خريطة ثنائية الأبعاد تستخدم لتحليل حالة الغطاء النباتي ودرجة حرارة ورطوبة التضاريس وما إلى ذلك من المنطقة المراد دراستها. وحصلت الدراسة على نموذج تاريخي رقمي DHM من خلال هذا المشروع (شكل ٦).

شكل ٦: المنتج التاريخي الرقمي DHM (مجسم ثلاثي الأبعاد) لقلعة عسفان الأثرية باستخدام سحابة النقاط والشبكة

٢. تقييم وقياس النموذج

تعد مرحلة التحقق والتقييم والقياس من أهم مراحل إنشاء النماذج الرقمية المجسمة، لأنها تضمن الحصول على الدقة، والصحة المناسبتين في حال حصل النموذج على تقييم وقياس جيد. حيث يستمر العمل بهذه المرحلة بداية من المعالجة الأولية وحتى تصدير المنتجات النهائية. وقد حرصت الدراسة على التأكد من المعلومات وجودتها، ومن ذلك أن تكون المعايرة قد تمت لجميع الصور بشكل سليم، وقد حصلت الدراسة على معايرة جيدة جدًا؛ أن تكون نسبة التداخل عالية، لتظهر في عمومها باللون الأخضر الفاتح، وتدل بذلك على التطابق التام فيما بين الصور، وقد حصلت الدراسة على تطابق عالي؛ أن يكون الفرق النسبي بين المعلمات الأولية والمحسّنة للكاميرا الداخلية أقل من ٥٪، وقد حصلت الدراسة على نسبة ٣.١٪ وهي قيمة جيدة؛ وفي حال تم استخدام نقاط الضبط الأرضي (GCPs) فإنه من المفترض تكون قيمة الخطأ أقل من 2×GSD، مع التنويه بأن الدراسة لم تستخدم نقاط الضبط الأرضي في عملها، ومع ذلك كانت نتائج العمل مرضية ومقبولة بشكل جيد، ولم يكن هنا حاجة لاستخدامها في مثل مشروع الدراسة الحالي. ووفي المقابل حصلت الدراسة على نتائج جيدة ومرضية لتقييم وقياس النموذج الرقمي المنشأ، وذلك بعد أن عملت

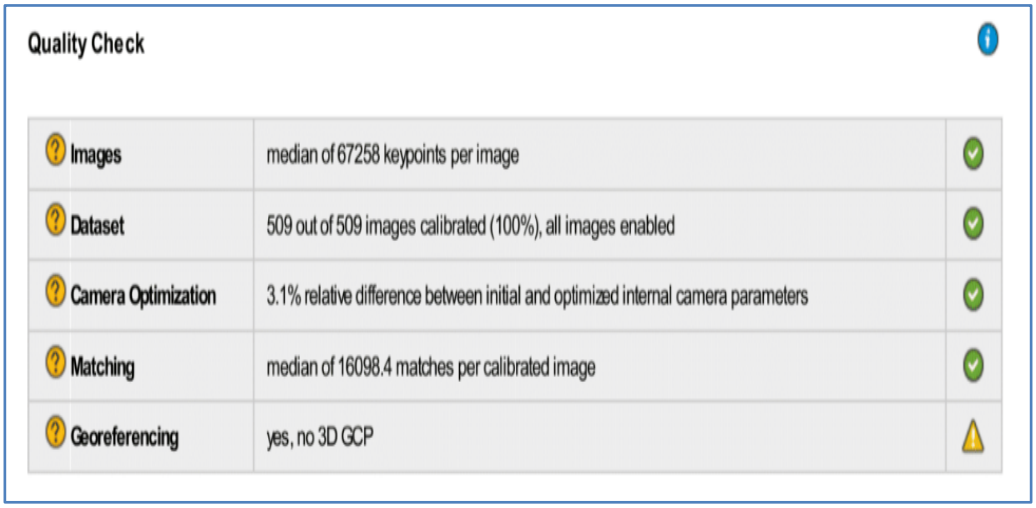
على تقييم وقياس النموذج بأربع طرق، وهي: الفحص البصري للإنشاء؛ مراجعة تقرير الجودة؛ الإسقاط على السحابة المشعة والتعديل؛ نقاط التفتيش.

أ. الفحص البصري للإنشاء

قامت الدراسة في مرحلة الفحص البصري بفحص كل النقاط والتأكد من النموذج المنشأ وأنه لا يوجد به أي عيوب أو انحناءات أو أخطاء قد حدثت خلال إنشاء النموذج، وذلك ليتم تصحيح الخطأ والتأكد من المشروع بشكل جيد. حيث يمكن أن يصحح الخطأ، وذلك بالعمل على تكثيف سحابة النقاط لكي يتم التمكن من رؤية المعالم بوضوح.

ب. مراجعة تقرير الجودة

عملت الدراسة تحليل تقرير الجودة، والتأكد من أن كل شيء كان جيدا فيما يخص إنشاء النموذج. وبالاطلاع على الجدول في تقرير الجودة (شكل ٧)، نجد أن نموذج الدراسة قد حصل على ٦٧٢٥٨ نقطة أساسية لكل صورة وهو رقم جيد، ويجب ألا تقل قيمتها عن ١٠٠٠٠ نقطة في أضيق الحدود، وبذلك حصل النموذج في التقرير على علامة اختيار خضراء اللون كما يتضح في الجدول، وفي النقيض إذا كانت علامة الاختيار حمراء اللون، فهذا يدل على أنه يجب القيام بفحص هذا الجانب من المشروع وإصلاحه. وأما في حال كانت علامة الاختيار صفراء اللون (تعني تنبيه اختياري) كما هو في الصف الأخير من الجدول، وذلك لأن الدراسة لم تستخدم نقاط الضبط الأرضي (GCPs) في عملها الميداني، ومع ذلك فقد حصلت الدراسة على نموذج جيد جدا بدون استخدام نقاط الضبط الأرضي. ومما سبق تؤكد الدراسة عدم ضرورة استخدام نقاط الضبط الأرضي ثلاثية الأبعاد في كل الأحوال إلى عند الحاجة المحددة في بعض المشاريع المتخصصة.

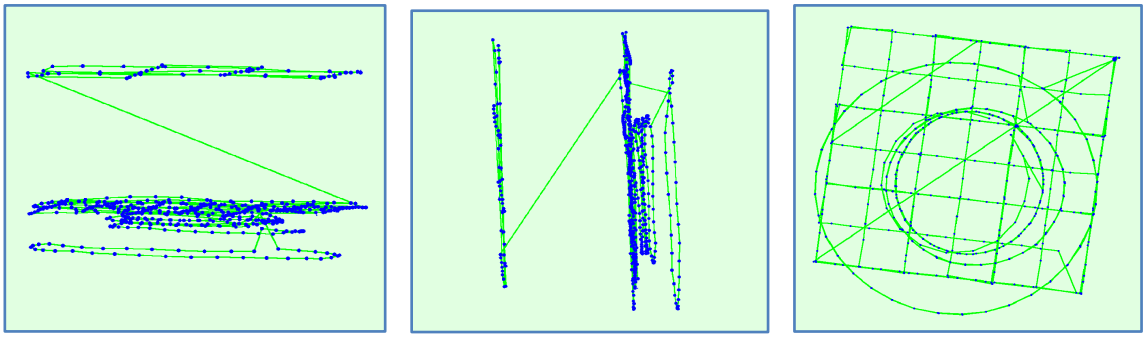

Quality Check

Images	median of 67258 keypoints per image	✓
Dataset	509 out of 509 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	3.1% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 16098.4 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, no 3D GCP	⚠

شكل ٧: إحدى جداول تقرير الجودة لتأكد من صحة النموذج وجودته

وتظهر الدراسة من خلال ملخص المشروع أن متوسط مسافة أخذ العينات الأرضية (GSD) بقيمة ٠.٦٥ سم. وكان متوسط المطابقة بقيمة ١٦٠٩٨.٤ تطابق لكل صورة معايرة. ويقدم تقرير الجودة تفاصيل المعايرة لكل

من مواضع الصورة الأولية (رسم توضيحي ١)، والصور المحسوبة ومواضع نقاط التعادل اليدوية، وموضع الكاميرا المطلق وعدم اليقين في الاتجاه، ومقدار التداخل فيما بين الصور وجميعها كانت نتائجها جيدة.

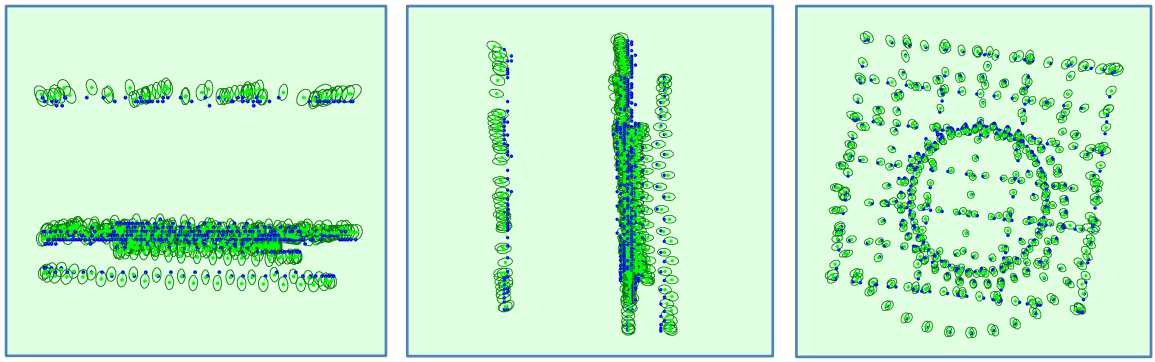


رسم توضيحي ١: الرسم في اليمين لمنظر من الأعلى يبين مواضع الصورة الأولى بالنقطة الزرقاء الكبيرة والرسم من المنظور الأفقي في الوسط واليسار

وأظهرت الدراسة من خلال تقرير الجودة رسومات وأشكال ساعدت في الحصول على نظرة عامة وسريعة على النموذج، وهذا بدوره ساهد في الكشف عن أي مناطق قد تواجه إشكاليات أو أخطأ. حيث يظهر بوضوح كما هو موجود في الشكل أو الرسم البياني (رسم توضيحي ٢). واستخدمت الدراسة أربعة أنواع من القياس والتقييم، وهي كالآتي:

– النوع الأول: مواضع الكاميرا

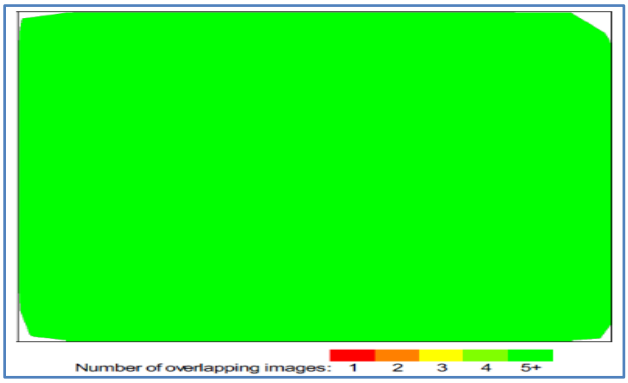
تقييم وتقيس الدراسة من خلال الرسم البياني بناء على كل من النقاط الزرقاء التي تمثل موضع الكاميرا الأصلية من بيانات نظام الاحداثيات العالمي GPS، والنقاط الخضراء التي تمثل موضع الكاميرا المحسنة. كما تظهر الدراسة من الرسم البياني بأن التطابق كان جيد جدًا، وهذا بدورة يوضح تلاءم البيانات مع بعضها البعض بشكل واضح، ويؤكد بأن إنشاء النموذج كان جيد، ولم يظهر في نموذج الدراسة أي من النقاط الحمراء والتي تمثل الكاميرات غير المعايرة بطريقة جيدة. ويجب الانتباه بأنه ليس من الجيد أن يكون الفرق فيما بين كل من النقاط الزرقاء والنقاط الخضراء قليلًا في كل المواضع وفي جميع أنواع الاتجاهات المختلفة، بل أن وجود فرق صغير أو قليل هو علامة غير جيدة.



رسم توضيحي ٢: تتضح الإزاحة بين مواضع الصورة الأولية (النقاط الزرقاء)، والصورة المحسوبة (النقاط الخضراء). وتشير الأشكال البيضاوية الخضراء الداكنة إلى مطلق عدم اليقين في موقف نتيجة تعديل كتلة الحزمة. في العرض العلوي (مستوى XY)، ومنظر أمامي (مستوى XZ)، وعرض جانبي (مستوى YZ).

- النوع الثاني: التداخلات

تقيم وتقيس الدراسة مشروعها من خلال قراءة الرسم التوضيحي (رسم توضيحي ٣)، الذي ساعد على تقدير قيمة التداخل. حيث يظهر صورة للمشروع كاملًا ثم يعمل على تمييز كل منطقة يتم رؤيتها أو تغطيتها بخمس صور على الأقل باللون الأخضر الفاتح، وهذا ما حصلت علية الدراسة حيث كانت مغطاة بالكامل بصور تتجاوز الخمسة صور لكامل منطقة الدراسة، وهذا أمر جيد جدًا. وفي حال قل عدد الصور عن خمسة فسيتم تمييزه بلون مختلف كما يتضح في مفتاح الرسم البياني حيث يكون: اللون الأخضر الفاتح (٥)، واللون الأخضر المتجانس (٤)، واللون الأصفر (٣)، واللون البرتقالي (٢)، واللون الأحمر (١). لذلك كان لدى مشروع الدراسة ثقة كبيرة في بيانات الصور، وثقة أيضًا في إنشاء المشروع.

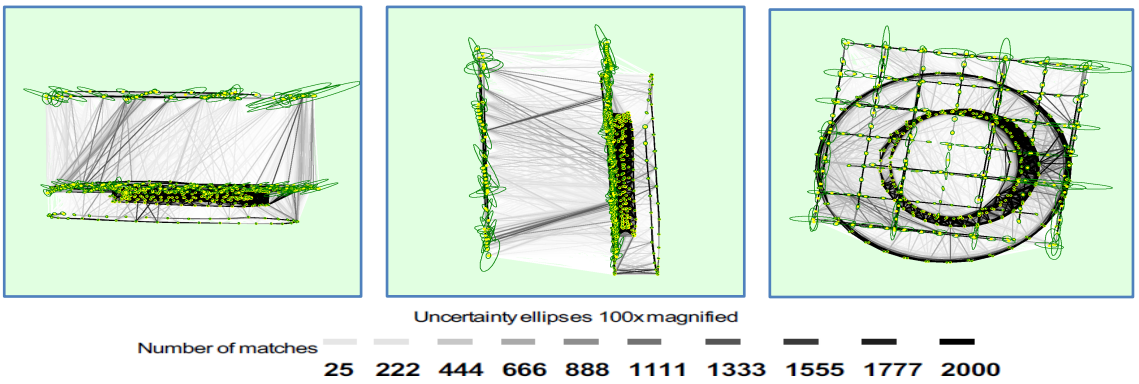


رسم توضيحي ٣: عدد الصور المتداخلة المحسوبة لكل بكسل من orthomosaic

- النوع الثالث: النقطة الرئيسية

تُقيم وتقيس الدراسة النقطة الرئيسية ثنائية الأبعاد وتطابقها. بحيث يرسم خط ما بين كل صورتين تشتركان في نقطة رئيسية، بحيث يظهر رسم بياني مترابط بشكل جيد وكثيف للغاية، بحيث يظهر تدرج اللون الأسود، نظرًا

لوجود الكثير من الحواف، كما يبدو في الدراسة، وهذا جيد جدا (رسم توضيحي ٤). حيث يشير تدرج اللون الأسود إلى عدد نقاط المفاتيح ثنائية الأبعاد المتطابقة بين الصور. أما في حال كان هناك كتل معلمة بالألوان المختلفة فهذا ليس جيد بحيث لا يمكن رؤية أي تطابق كافي بين الصور المختلفة، بل يوجد بعض الكتل المستقلة ويكون توجيهها في الاتجاه غير الصحيح. حيث تشير الروابط الساطعة الملونة إلى روابط ضعيفة وتتطلب نقاط ربط يدوية أو المزيد من الصور. ومن جهة أخرى تشير علامات الحذف ذات اللون الأخضر الداكن إلى عدم اليقين النسبي في موضع الكاميرا لنتيجة ضبط مجموعة الحزمة. وتظهر الدراسة علامات الحذف لعدم اليقين بأنها مكبرة بمقدار ١٠٠ مرة.



رسم توضيحي ٤: مواضع الصور المحسوبة مع الروابط بين الصور المتطابقة. يشير تدرج اللون الأسود إلى عدد نقاط المفاتيح ثنائية الأبعاد المتطابقة بين الصور

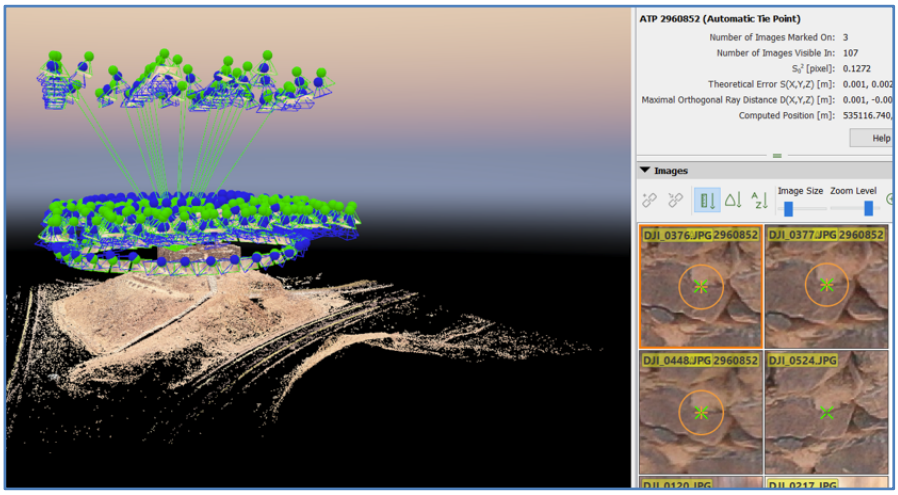
– النوع الرابع: علامات الحذف

تقيم وتقيس الدراسة مخطط الخرائط الجديد بإضافة علامات الحذف غير المؤكدة. حيث يرسم شكلًا بيضاويًّا حول كل كاميرا، ويكون عدم اليقين هو حجم القطع الناقص، وبذلك، فإن القطع الناقص إذا كبر كان أقل يقينا بموضع الكاميرا واتجاهها المعين، والعكس صحيح (رسم توضيحي ٤). ومن الضرورة بمكان الانتباه إلى أن هذه الأشكال البيضاوية تملك عامل تكبير يتم عرضه أسفل الرسم، لذا يمكن أن تكون هذه الأشكال البيضاوية مكبرة جدًا، وبالتالي يكون هنا بعض الأشكال البيضاوية كبيرة الحجم، ولكن إذا كان تضخيمها بعامل كبير فهذا لا يعني أن المشروع ليس جيدا، بل يعني فقط أن عدم اليقين كان أعلى في المناطق التي توجد بها علامات حذف أكبر، وفي هذه الحالة يجب فحص المنطقة والتأكد من إعادة إعمارها في هذه المنطقة بشكل جيد.

ت. الإسقاط على السحابة المشعة والتعديل

قامت الدراسة في مرحلة الإسقاط على التنقل في المشروع ومسحة بشكل شبه شامل، حيث يتم النقر على المنطقة أو النقطة (ثلاثية الأبعاد) المراد ضبطها، ويظهر في حينها على الشريط الجانبي الأيمن جميع الصور التي تعرض هذه النقطة تحديًد بوجود مؤشر تقاطع أخضر اللون يتوافق مع كل بيكسل يعرض موقع هذه النقطة، ووهي أداة أو ميزة في نافذة السحابة المشعة (Ray Cloud)، ويتم تصحيح موقع النقطة

بضبط مؤشر التقاطع الأخضر ليشير دائمًا إلى نفس الموقع في كل صورة تظهر لنا على الشريط الجانبي الأيمن (شكل ٨). إليك مثالًا على شيء لم يَسِرْ على ما يرام، يمكنك أن ترى أن العلامة الخضراء موجودة في ميزات مختلفة في الصور المختلفة. وبذلك يتم إصلاح المشروع إذا وجد خطأ ما في أي موقع. وفي الغالب يكون سبب هذا الخطأ أن معلمات ضبط الكاميرا لم يتم ضبطها بالشكل الصحيح.



شكل ٨: طريقة الإسقاط على قائمة السحابة المشعة وفيها يتم مطابقة نفس موقع البيكسل (نقطة ثلاثية الأبعاد) في الصور الأخرى المتطابقة والملتقطة من زوايا مختلفة المنظور

ث. نقاط التفتيش

عملت الدراسة في نهاية تقييم وقياس النموذج على استخدام طريقة نقاط التفتيش. ونقاط التفتيش تشبه إلى حد كبير نقطة التحكم الأرضية من حيث إنها مواقع في المشروع تحتوي على بيانات تحديد الموقع الجغرافي الدقيقة التي تم التقاطها أثناء الطيران في المشروع. فعند النقر على موقع على الصور تماما مثلما يتم فعله مع نقطة الضبط الأرضية (GCP)، ويكون الفارق الوحيد أن البرنامج لن يستخدم هذه المعلومات لإعادة إنشاء النموذج. وهذا بدورة يفسر أنه عندما نستخدم في المشروع نقاط ضبط أرضية (GCPs)، فإنه سيساعد في إعادة إنشاء النموذج، لأن البرنامج سوف يلائم البيانات مع بيانات (GPS) إلى النقطة التي يوجد فيها (GCP) ثلاثي الأبعاد. وهذا بدوره سوف يساعد في إعادة الإنشاء. ومن ناحية أخرى، عندما تحصل على نقاط تفتيش، سيتجاهل مصمم الخرائط هذه المعلومات وسيقوم بإعادة الإنشاء كمان لو لم يكن لديه هذه المعلومات. والهدف الأساسي من كل ذلك، هو توفير تقدير غير متحيز الدقة، حيث إن مصمم الخرائط لم يحاول ملاءمة النقطة التي تجاهلها فقط حتى لا يكون هناك تحيز. ومن ذلك نجد أنه بغض النظر عن نقاط التحكم الأرضية، فإن نقاط التفتيش تحتوي على بيانات دقيقة لتحديد الموقع الجغرافي، وكذلك لا يتم أخذ معلومات نقطة التفتيش في الاعتبار أثناء معايرة الكاميرا، ومن ثم توفر نقاط التفتيش تقدير دقة غير متحيز.

٣. حفظ وتوثيق النموذج

تعتمد مرحلة الحفظ والتوثيق على عدد من المطالب المختلفة مثل: غرض، ونوع، ومجال استخدامها. وبناء على ذلك تم تحديد نوع المنتج الذي يناسب مطلبها. إذا فهي تختلف بحسب مطلبها، وهذا بدوره يؤكد الفروقات في أنواع المنتجات واستخداماتها. وفي المقابل أيضًا يتم تحديد مستوى الدقة والصحة بناء على ما سبق من مطالب. حيث تظهر الدراسة عدد من المنتجات الهامة، وهي كل من: سحابة النقاط المكثفة (The densified point cloud)؛ شبكة 3D محكم (The 3D textured mesh)؛ شبكة اللود (مستوى التفاصيل) The LOD (Level Of Details)؛ الخط المتعدد (A polyline)؛ الصور المقومة (The orthomosaic).

أ. سحابة النقاط المكثفة

تظهر الدراسة سحابة النقاط المكثفة في مجموعة من النقاط ثلاثية الأبعاد (3D)، والتي تستخدم في إعادة إنشاء النموذج. حيث يتم تخزين موضع كل من: X و Y و Z ومعلومات اللون لكل نقطة من سحابة النقطة المكثفة. ويتم حساب سحابة النقطة المكثفة بالاعتماد على نقاط التعادل التلقائية (ATPs). وفي عملية المعالجة الأولية يتم توفير خلفية دقيقة لأهداف القياسات المساحية، مثل: المسافة، والسطح، والحجم.

ب. شبكة ثلاثية الأبعاد محكمة

تظهر الدراسة الشبكة ثلاثية الأبعاد (3D-Mesh) بعد طلائها أو تلبيسها (محكمة) بالصور الواقعية، والتي تمثيل شكل النموذج الذي يتكون من رؤوس، وحواف، ووجوه، ويعلوها أيضًا ملمس الصور التي يتم عرضها عليه. ويعتبد هذا النموذج من أفضل أنواع المخرجات التي تناسب حفظ ومشاركة النموذج وتحميله على المنصات المتخصصة عبر الإنترنت مثل منصة Sketchfab، وهو مناسب للعرض والمشاهدة، ولا يناسب للقياسات. حيث إن الغرض منه أن يبدو بشكل لطيف أكثر من أن يكون دقيقًا.

ت– شبكة LOD

تظهر الدراسة شبكة LOD (مستوى التفاصيل)، والتي تمثل شبكة محكمة ثلاثية الأبعاد (3D-Mesh) تحتوي على مستويات متعددة من التفاصيل، مما يقلل من تعقيدات النموذج حيث يتم تقسيمه إلى الكثير من المستويات بحسب الرغبة أو الحاجة. وشبكة LOD مناسبة للاستخدام على الويب والأنواع المختلفة من الأجهزة (محدودة القدرات)، مثل: أجهزة الحاسوب المكتبية، والأجهزة اللوحية، والهواتف الذكية، وأيضًا عند الحاجة إلى التعامل معها وتحميلها بسرعه. وهو منتج مثالي جدًا للإخراج، والتنقل السلس، وفعال للمشاهدة عبر الإنترنت. ولا يمكن عرض شبكة LOD على برنامج Pix4D. لذلك يمكن تصديره من Pix4D وعرضه على برامج أخرى، مثل: Skyline TerraBuilder، أو SuperMap أو على عارضات الويب ونظم المعلومات الجغرافية، مثل: ArcGIS Online. وهي برمجيات وعارضات تمكن المستخدمين من إتاحة قاعدة بيانات هذه النماذج والتضاريس ذات الصور الواقعية والدقيقة العالية. ويجدر الذكر هنا أن تنسيق الملف DXF

للخطوط المتعددة (polylines) يحتوي على جميع مثلثات الشبكة كقائمة من المضلعات. لذلك يفضل استخدام تنسيق DXF (polylines) لمستخدمي برمجيات الكاد (CAD) ونظم المعلومات الجغرافية (GIS).

ث- الخط المتعدد: A polyline

تظهر الدراسة الخط المتعدد (A polyline)، والذي يمثل خط مستمر ويتكون من خط فرعي (Sub-line) واحد أو أكثر. ويتم إنشاؤه من خلال تحديد رؤوس كل سطر. يعطي برنامج Pix4D القدرة على رسم خطوط متعددة ثلاثية الأبعاد (3D)، حيث يحتوي كل رأس على ثلاث إحداثيات. وتستخدم الخطوط المتعددة في الغالب الأعم لقياس المسافات في النماذج.

ج- الصور المقومة

تظهر الدراسة الصور المقومة (The orthomosaic)، والتي تمثل على هيئة خريطة ثنائية الأبعاد (Map-2D). حيث تحتوي كل نقطة على X و Y، ومعلومات اللون. وتحتوي الصورة المقومة (orthomosaic) على مقياس موحد ويمكن استخدامه لقياسات ثنائية (2D) للمسافة، والسطح. وفيه يتم تصحيح كل من مشكلات الصور المتدخلة، مثل منظور الكاميرا. ويعتمد جيل الأورثوموزايك orthomosaic أو الأورثوفوتوغرافي الحقيقي (true orthophoto) على تقويم النموذج (orthorectification). حيث تعمل هذه الطريقة على إزالة تشوهات المنظور من الصور باستخدام نموذج الأسطح الرقمي (DSM). ويجب توفر عدد كبير من التطابقات بحيث تكون النقاط الرئيسية أكثر من ١٠٠٠ نقطة رئيسية لإنشاء النموذج بشكل جيد. ويمكن لهذه الطريقة أن تتعامل مع جميع أنواع التضاريس، ومجموعات البيانات الكبيرة. وفيها يتم الحفاظ على قياس المسافات، وبالتالي يمكن استخدام الصور المقومة للقياسات بشكل جيد. وكما هو معلوم فإنه يتم إنشاء orthomosaic استنادًا إلى نموذج الأسطح الرقمي الذي أُنْشِئ من سحابة نقطة مكثفة. لذلك، ستنعكس الأخطاء والضوضاء الموجودة في سحابة النقطة المكثفة على الصورة المقومة. وتظهر مثل هذه الأخطاء غالبًا عند حواف المبنى أو على التفاصيل الصغيرة، مثل: الأشجار، وأعمدة الإنارة، والأسوار، ... إلخ.

ثالثًا: مناقشة النتائج والتوصيات

١. النتائج

تشير نتائج دراسة إنشاء ورقمنة وقياس الأثار والتراث العمراني باستخدام الدرون وتقنيات المساحة التصويرية لقلعة عسفان الأثرية، بكل من النتائج الآتية:

- أكدت الدراسة بأن رقمنة الأثار والتراث العمراني باستخدام التقنيات الحديثة تعمل على توفر الكثير من الجهد والمال والوقت مقارنة بطرق الدراسات التقليدية المعروفة، والتي تستنزف الكثير من الوقت والجهد والمال، بالإضافة إلا ما تواجهه من صعوبة وإشكالية الوصول إلى موقع هذه المحتويات.

- أظهرت الدراسة أن الاهتمام برقمنة وإنتاج النماذج التاريخية الرقمية DHMs للمحتويات التاريخية في الوطن العربي بشكل عام وفي المملكة العربية السعودية بشكل خاص محدود جدًا، وفي المقابل يوجد حاجة وطلب متزايد للتعامل مع مخرجات ومنتجات المحتويات التاريخية في شكلها الرقمي، أو الواقع الافتراضي، أو المعزز، أو الرغبة في امتلاكها بهيئتها التجسيمية المطبوعة 3D.

- بينت الدراسة وجود إشكاليات أثناء التعامل مع الأثار والتراث العمراني القديم بالطرق التقليدية، وتحديدًا عند العمل على ترميمها وإصلاحها، وهذا ما قد يلحق الضرر بها أو تلفها أو تغيير ملامحها الأصلية. وكان الحل في أن يتم التعامل معها بشكل رقمي حتى يتم التأكد من عملية الترميم المطلوبة ومناسبتها ثم يلي ذلك التطبيق بشكل فعلي على المحتوى الأصلي.

- تمكنت الدراسة من إنتاج نموذج تاريخي رقمي بدقة جيدة ومستوى عالي في وقت قياسي لم يتجاوز الساعة والنصف من العمل الفعلي. حيث تم جمع البيانات وتصوير قلعة عسفان الأثرية باستخدام (الدرون) خلال حوالي ٣٥ دقيقة، وتم فيها التقاط عدد ٥٠٩ صورة، وتم أيضًا معالجة النموذج التاريخي الرقمي خلال حوالي ٤٩ دقيقة، وهذا يؤكد بدورة سهولة التعامل مع تقنيات وبرمجيات التجسيم، وما تقدمة من منتجات مفيدة في وقت قياسي، وبمستوى صحة ودقة جيدين.

- عملت الدراسة على رقمنة النموذج التاريخي الرقمي في ثلاث خطوات، وهي، الأولى: إنشاء نموذج تاريخي رقمي باستخدام برمجيات النمذجة الرقمية والمعتمدة على الصور القريبة؛ الثانية: مراجعة تقرير التقييم والقياس للنموذج التاريخي الرقمي المنشأ على أسس علمية دقيقة وواضحة؛ الثالثة: إظهار أساليب الحفظ، والتوثيق المتبعة مع النماذج التاريخية الرقمية المنشأة، ومن ثم إتاحتها أو مشاركتها.

- أكدت الدراسة على ضرورة جمع بيانات الصور في مرحلتين. الأولى: مكتبية لرسم خطة الطيران وتحديد كل من الموقع، وخطة الطيران، والمسار، والزمان، والوقت، والارتفاع، وهيئة التصوير، وتداخل الصور، وكذلك تهيئة وتجهيز أدوات التصوير الحقلية. الثانية: حقلية يتم فيها إتباع خطة الطيران المرسومة مسبقًا في المرحلة السابقة. حيث تم الوقوف على الموقع وبدأ التصوير العمودي، ويتبعه التصوير المحيطي.

- اتضح من الدراسة أن دقة، وصحة النموذج الرقمي التاريخي تعتمد بشكل واضح على كل من مقدار وزيادة نسبة التداخل بين الصور، والتبيان في موضع التصوير بين كل مرحلة وأخرى من مراحل التصوير، وكذلك جودة ونوع كاميرا التصوير وخصائصها، كما يمكن الوصول لنسبة عالية من الدقة والصحة عند الحاجة من خلال استخدام طريقة نقاط الضبط الأرضي (GPCs).

- حصلت الدراسة على عدد من المنتجات المهمة مثل: نموذج التضاريس الرقمي DTM، والصورة المقومة Orthomosaic، والأخيرة يمكن حفظها ومشاركتها وعرضها على كل من قوقل ماب، وقوقل إرث بكل سهولة.

- أظهرت الدراسة أن عملية معالجة البيانات والحصول على النماذج الرقمية تتم من خلال ثلاث مراحل أساسية، وهي: مرحلة المعالجة؛ مرحلة إنشاء سحابة النقاط والشبكة؛ مرحلة استخراج نماذج الأسطح الرقمية، والصورة المقومة ... إلخ.

- بينت الدراسة أن مرحلة التحقق والتقييم والقياس كانت من أهم مراحل إنشاء النموذج التاريخي الرقمي. حيث ضمنت الدراسة من خلاله الحصول على الدقة، والصحة المناسبتين وذلك بحصول النموذج على تقييم وقياس جيد. كما يمكن الاستمرار بالعمل على مرحلة التحقق والتقييم والقياس من بداية المعالجة الأولية وحتى تصدير المنتجات النهائية.

- كشفت الدراسة عن نتائج جيدة ومرضية لتقييم وقياس النموذج الرقمي المنشأ، وذلك من خلال تقييم وقياس النموذج من بالاعتماد على أربع طرق، وهي: الفحص البصري؛ مراجعة تقرير الجودة؛ الإسقاط على السحابة المشعة والتعديل؛ نقاط التفتيش.

- أظهرت الدراسة أهمية مرحلة الحفظ والتوثيق واعتمادها على عدد من المطالب مثل: الغرض، والنوع، والمجال العام للاستخدام. وبذلك يتم تحديد نوع المنتج المناسب للمطلب المحدد، حيث يوجد فروقات في أنواع المنتجات واستخداماتها. وفي المقابل يتم تحديد مستوى الدقة والصحة بناء على نوع المطلب. حيث بينت الدراسة عدد من المنتجات الهامة، مثل: سحابة النقاط المكثفة؛ الشبكة ثلاثية الأبعاد المحكمة؛ شبكة اللود؛ الخط المتعدد؛ الصور المقومة.

- بينت الدراسة أن شبكة LOD تمثل شبكة محكمة ثلاثية الأبعاد يتم تقسيمها إلى مستويات متعددة من التفاصيل حسب الحاجة، وهذا بدوره يقلل من تعقيدات النموذج الرقمي. لذلك فشبكة LOD تناسب الاستخدام على الويب والأجهزة محدودة القدرات، كالهواتف الذكية، وأيضًا لتحميلها بسرعه. ويمكن عرضه على برنامج Skyline TerraBuilder، أو SuperMap أو على عارضات الويب ونظم المعلومات الجغرافية مثل ArcGIS Online.

٢. التوصيات

بناءً على نتائج الدراسة التي تم التوصل إليها، تقدم الدراسة عدد من التوصيات كالآتي:

- التوسع في دراسة ورقمنة المحتويات الأثرية والتراث العمراني القديم، من قبل الباحثين، والجهات ذات الاختصاص، وذلك لرفع المستوى الأثري والسياحي والثقافي في المملكة العربية السعودية، والحصول على تنمية مستدامة، ومن ثم تحقيق رؤية المملكة ٢٠٣٠.

- يجب العمل على حماية وحفظ المحتويات الأثرية والتراث العمراني القديم بشكل رقمي وتحت إشراف الجهات الحكومية ذات الاختصاص. بحيث تعمل هذه الجهات على توفير البيئة المناسبة لقواعد البيانات وإدارتها وضبط تعاملاتها وخدماتها لرفع واستقبال المحتويات الرقمية التجسيمية من قبل الباحثين والخبراء

والمختصين، وبذلك يتم بناء مكتبة أو متحف رقمي للمحتويات الأثرية والتراث العمراني القديم، ويمكن إتاحة هذه البيانات أو عرضها للمهتمين سواء بمقابل أو بدون مقابل مادي.

- تشجيع الباحثين والمتخصصين في مجال التاريخ والأثار للتعمق في معرفة علوم ومهارات وتقنيات وبرمجيات الرقمنة للمحتويات الأثرية والتراث العمراني القديم.

- يجب إجراء دراسات مقارنة دقيقة لتأكيد الفارق البسيط بين نموذجين رقميين الأول يستخدم نقاط الضبط الأرضي (GPCs)، والأخر لا يستخدمها.

- إجراء دراسات مماثلة لهذه لدراسة على أثار وتراث عمراني قديم، في هيئة وبنية متهالكة أو مندثرة، ومن ثم يمكن دراسة إمكانية إعادة إعماره افتراضيًا للخروج بنتائج جيدة أو مرضية.

- عند الحاجة لإنشاء DHM بدقة عالية يجب الحرص على كل من: إمكانات التصوير ودقتها وخصائصها؛ العمل على خطة طيران دقيقة تضمن نسبة التداخل المناسبة والمعايرة الجيدة؛ العمل على قياس وتقييم النموذج بطريقة جيدة.

- يمس موضوع الدراسة اهتمام عدد من الجهات والمؤسسات الحكومية مثل هيئة التراث والأثار، والتي تعد من أهم الجهات المعنية بالحفاظ على الأثار والتراث والثقافة في المملكة العربية السعودية. لذلك وجب دعمها لمثل هذه الدراسات حيث إنها تقدم وتسرع اكتشاف الحضارات القديمة.

المصادر والمراجع

المراجع العربية

أمينه عبد الجواد عبدالباقى. (نوفمبر، 2020). استخدام النمذجه الرقمية في محاكاة الأثاث التراثي وإعادة تصنيعه بشكل رقمي. صفحة 18.

المراجع الأجنبية

Aldalil, M., & Seedahmed, G. (2019, March). UAV 3D Photogrammetric Mapping & GIS Development Case Study: Khartoum Railway Station. UNIVERSITY of KHARTOUM ENGINEERING JOURNAL (UofKEJ), p. 10. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/340850031_UAV_3D_Photogrammetric_Mapping_GIS_Development_Case_Study_Khartoum_Railway_Station

FIORILLO, F., REMONDINO, F., & BARBA, S. (2013, 1 1). 3d digitization and mapping of heritage monuments and comparison with historical drawings. *Contributo in Atti di convegno*, p. 6.

Jiang, S., Jiang, W., Huang, W., & Yang, L. (2017, March 16). UAV-Based Oblique Photogrammetry for Outdoor Data Acquisition and Offsite Visual Inspection of Transmission Line. *remote sensing*, p. 26. Retrieved from https://doi.org/10.3390/rs9030278

Leon, I., Pérez, J. J., & Senderos, M. (2020, July 28). Advanced Techniques for Fast and Accurate Heritage Digitisation in Multiple Case Studies. *Sustainability*, p. 30. Retrieved from https://doi.org/10.3390/su12156068

Pascual, F. J., Ramón-Constantí, A., Adan, A., Trenado, & Fuentes. (2021, March 31). 3D Sensor-Fusion for the Documentation of Rural Heritage Buildings. *Remote Sens*, p. 16. Retrieved from https://doi.org/10.3390/rs13071337

ŞENOL, H. İ., MEMDUHOGLU, A., & ULUKAVAK, M. (2020, September 30). Multi instrumental documentation and 3D modelling of an archaeological site: a case study in Kizilkoyun Necropolis Area. *Dicle University Journal of Engineering*, p. 10. Retrieved from https://doi.org/10.24012/dumf.801662

Ulvi, A. (2021, Jan 4). Documentation, Three-Dimensional (3D) Modelling and visualization of cultural heritage by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners. *International Journal of Remote Sensing*, p. 6. Retrieved from https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1834164

Wojciechowska, G. (2020, May 21). Case Studies on the Use of UAV's for Documentation of Cultural Heritage. *Sciendo*, pp. 65-73. doi:https://doi.org/10.2478/apcrs-2019-0005

المراجع العربية بالحروف اللاتينية

Amynh ʻAbd al-Jawwād ʻbdālbāqá. (Nūfimbir, 2020). istikhdām alnmdhjh al-raqmīyah fī Muḥākāh al-Athāth al-turāthī wa-iʻādat tṣnyʻh bi-shakl raqmī. ṣafḥah 18.

مجلة جامعة الملك عبدالعزيز: الآداب والعلوم الإنسانية، م (33)، ع (5)، ص ص: 1 – 24، (2025م)
DOI: 10.64064/1658-4295.1056

Digitization Simulation and Remote Sensing Based Analysis of Archaeological Sites and Urban Heritage: A Case Study of *Asfan* Historical Fortress

[1]Zaini Talal Alhazmi **[2]Faisal Mohammed Jamal Al-Lail**
[3]Marwan Ghazi Shoaib **[4]Abdu llah Hassan Alasmari**

[1,2,3,4] Faculty of Arts and Humanities, King Abdulaziz University, Jeddah, KSA

Abstract. Archaeology and history are among the strongest and most important sciences due to their role in studying and discovering ancient archaeological and urban heritage, as well as preserving and protecting it from disappearance, destruction, attack, misuse, and deriving knowledge about ancient civilizations and documenting and studying them closely. Since there are no digital three-dimensional modeling databases with an official documented character for the archaeological and urban heritage contents in the Kingdom of Saudi Arabia, there is a need to deal with ancient heritage digitally. Therefore, the study used modern techniques and software for digital photogrammetry, historical information systems, and remote sensing to reach the best methods of protection, preservation, archiving, and availability. The study aims to create a digital historical model (DHM) of the *Asfan* Castle by using near aerial photography using drones and digital photogrammetry software; evaluating and measuring the project of the DHM of the *Asfan* Castle; preserving and documenting the outputs of the digital historical model and making it available. One of the most important results is that the study obtained a digital historical model with good accuracy in a time that did not exceed an hour and a half of actual work; A number of products were extracted, including the DHM, the digital terrain model (DTM), and the orthomosaic image; The accuracy and validity of the digital model depend on the overlap between the images, the shooting positions, and also the type of camera used, and high accuracy can be achieved by using ground control points (GPCs); The verification, evaluation, and measurement stage were the most important stages in creating the digital model; The results of evaluating and measuring the digital model were good and satisfactory and were measured and evaluated in four ways: visual inspection, quality report review, projection onto the radiating cloud and modification, and inspection points. Finally, a number of recommendations were suggested regarding encouraging researchers and specialists in history and archaeology to delve into the knowledge, skills, and techniques of digitizing ancient archaeological and urban heritage contents; protecting and preserving them digitally under the supervision of specialized governmental entities; and conducting similar studies.

Keywords*:* Digital Historical Model (DHM), digitalization, photogrammetry, stereoscopic, drone, *Asfan* Fortress.