

تقييم لتأثير كثافة النموذج الرقمي للأرض على دقة الإرجاع العامودي للصور الجوية

د. عمر الخليل*

د. وائل ديوب**

(تاريخ الإيداع 24 / 1 / 2017. قُبل للنشر في 26 / 4 / 2017)

□ ملخص □

تستخدم منتجات المسح التصويري الرقمية في العديد من التطبيقات الهندسية. ومن أكثر هذه المنتجات استخداماً نذكر الصور الجوية المصححة عامودياً نظراً لسهولة التعامل معها مقارنةً بالخارطة التقليدية. هذا، ويعتبر النموذج الرقمي للأرض من أهم المدخلات اللازمة لتوليد هذا النوع من الصور حيث تلعب كثافته ومستوى التفاصيل فيه دوراً هاماً في تحديد الدقة النهائية لهذه الصور. عادةً ما يتم الحصول على النموذج الرقمي للأرض من خلال رقمنة خطوط الكونتور أو باستخدام نقاط تسوية موزعة داخل المشهد. ومع ظهور تقنية المسح الليزري الجوي، صار من الممكن الحصول على نماذج رقمية للأرض عالية الدقة وشديدة التفصيل ولكنها عالية الكلفة. نعرض في هذا البحث إمكانية استخدام تقنية جديدة في إنتاج هذا النموذج وهي النظم التي تحاكي الماسحات الليزرية. هذه النظم تستخدم الصور وهي قليلة الكلفة وذات دقة مقبولة. كما نناقش تأثير كثافة نقاط النموذج على النوعية البصرية والهندسية للصورة المرجعة النهائية. التحقق من الدقة سيتم باستخدام مجموعة من نقاط التحقق التي تم الحصول عليها من عملية تثليث جوي للصور الجوية المستخدمة.

الكلمات المفتاحية: صورة مرجعة عامودياً، نموذج رقمي للأرض، تثليث جوي، مسح ليزري، غمامة النقاط.

* أستاذ مساعد - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

**أستاذ مساعد - قسم الهندسة الطبوغرافية - كلية الهندسة المدنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Evaluation of the impact of digital terrain model's density on the accuracy of aerial photos orthorectification

Dr. Omar Al Khalil*
Dr. Wael Dayoub**

(Received 24 / 1 / 2017. Accepted 26 / 4 / 2017)

□ ABSTRACT □

Digital photogrammetric products are used in many engineering applications, and the orthorectified aerial photographs are widely used due to the ease of handling compared to conventional maps. The Digital Terrain Model (DTM) is one of the most important inputs needed to generate the orthophotos, where the intensity and the level of detail of this DTM play an important role in determining the final accuracy of these orthophotos.

DTM is usually prepared by digitization of contour lines or by using leveling points distributed within the imaged scene. With appearance of aerial laser scanning technique, it became possible to obtain a high-resolution and highly detailed DTM, but with high cost. In this paper, we illustrate the possibility of using new system in the production of DTM. This system simulates the laser scanners. These systems are image-based, low-cost, and guarantee an acceptable precision. We discuss also the effect of the density of DTMs on the visual and the geometric quality of the final orthophoto. Verification of accuracy will be achieved by the of check points that have been obtained from aerial triangulation process of the used aerial images.

Key words: Orthophoto, Digital Terrain Model (DTM), Aerial triangulation, Laser scanning, points cloud.

* Associate Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

** Associate Professor, Department of Topography, Faculty of Civil Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تعتبر صناعة وتحديث الخرائط التي تمثل سمات السواء Planimetric features عملية مكلفة مادياً كما أنها تحتاج إلى وقت طويل لإنجازها. ومن ناحية أخرى، هنالك العديد من الأشخاص الذي يحتاجون إلى هذه الخرائط والذين لم يعتادوا التعامل مع الخرائط الشعاعية Vector maps لأغراض الإظهار والتحليل، وبالتالي فهم يفضلون التعامل مع خارطة على شكل صورة. تقدم الصور المرجعة عامودياً (أو الأورثوفوتو) Orthophotos حلاً ممتازاً لمشكلة الكلفة المادية ولمشكلة التعامل مع الخرائط الشعاعية من قبل مستخدمين ليس لديهم الخبرة في هذا المجال. في الواقع، لقد أثبتت التجارب أن، الصورة المرجعة عامودياً هي منتج فعال في التعبير عن المشاهد المصورة وذلك لأنه يجمع بين الدقة الهندسية التي تتمتع بها الخريطة التقليدية والغنى البصري الذي تملكه الصورة في آن واحد [1]. وبفضل هذه الخاصية، يمكن للصورة المرجعة عامودياً أن تزودنا بمعلومات كمية (أي مترية) وكيفية (أي وصفية) وبالتالي فهو ذو قيمة عالية في مختلف أنواع الدراسات الهندسية المطلوب إنجازها في الوسط المصور.

الصورة المرجعة عامودياً هي صورة تم تصحيحها من التشوهات الناتجة عن ميل آلة التصوير والتشوهات الناتجة عن تزيغات العدسة وكذلك الانزياحات الناتجة عن الارتفاعات في المشهد المصور، وبالتالي يمكن استخدامها كخارطة. أما المدخلات اللازمة لإنتاج الأوتوفوتو فهي صورة جوية شاقولية أو شبه شاقولية Near vertical ومعاملات التوجيه الداخلي Interior orientation والخارجي Exterior orientation لآلة التصوير التي التقطت هذه الصورة (موقع وتوجيه الآلة) ونموذج رقمي للأرض (DTM) Digital Terrain Model للمنطقة.

لقد قام بعض الباحثين، مثل [2]، بمناقشة موضوع اختبار دقة الصورة المرجعة عامودياً والفكرة تقوم هنا على استخدام مجموعة من نقاط التحقق Checkpoints المقاسة حقيقياً حيث يتم مقارنة إحداثياتها الحقلية مع تلك المقاسة على الصورة المرجعة عامودياً. في الواقع، تتبع دقة الصورة المرجعة عامودياً لدقة العناصر الداخلة في عملية إنتاجها. فللحصول على صورة مرجعة عامودياً دقيقة، يجب أن يكون ارتفاع الطيران منخفضاً، وآلة التصوير معايرة وذات دقة تمييز عالية مع توفر عدد كبير من نقاط الضبط. ولكن العامل الأهم هو توفر نموذج رقمي مفصل ودقيق للارتفاعات [3].

فيما يخص النموذج الرقمي للأرض، فهناك عدة تقنيات تستخدم لإنتاجه بتطبيق تقنية الاستكمال Interpolation. من هذه التقنيات ما يستخدم خطوط الكونتور Contour lines، ومنها ما يستخدم نقاطاً جيوديزية وسمات أخرى ذات منسوب معلوم مثل خطوط الشبكات الهيدرولوجية والطرق والسكك الحديدية. وفي بعض الأحيان، يتم دمج عدة أنماط من هذه المصادر للحصول على هذا النموذج. ومع ظهور تقنية المسح الليزري الجوي أو الليدار LIDAR، صار من الممكن قياس عدد هائل من النقاط وهو ما يساعد على توليد نماذج رقمية لأرض تفصيلية جداً ودقيقة. سنقوم في هذا البحث بتطبيق حل بديل، مؤتمت وقليل الكلفة وذلك لإنتاج النموذج الرقمي للأرض باعتماد تقنية النمذجة المؤتمتة القائمة على الصور Image based modelling، والتي لا تقل كثافة النقاط المولدة باستخدامها عن كثافة المساحات الليزرية [4]. المشهد المدروس مغطى بمزدوج من الصور الجوية بقياس كل منهما 1/2500. هذا النموذج سيستخدم لاحقاً في إنتاج الصورة المرجعة عامودياً للمشاهد. سنناقش هنا تأثير كثافة نقاط غمامات النقاط المولدة والتي سنبنى النموذج الرقمي للأرض منها على الدقة الهندسية وعلى القدرة التعبيرية للصورة المرجعة عامودياً الناتجة. الاختبارات ستتم بمساعدة مجموعة من نقاط الاختبار المقطعة من المزدوج الموجه باستخدام

برنامج مسح تصويري احترافي هو الـ ERDAS IMAGEINE 2014 أما المعالجة فستتم باستخدام البرنامج Agisoft Photoscan.

أهمية البحث وأهدافه

تتركز أهمية هذا البحث في أنه يسعى إلى دراسة تأثير كثافة النموذج الرقمي للأرض على الدقة الهندسية والقدرة التعبيرية للصورة المرجعة عامودياً. كما تتركز أهميته في الإشارة إلى توفر برمجيات حديثة قليلة الكلفة تستخدم حالياً في التوجيه الآلي لمزدوجات الصور الجوية وتوليد نماذج رقمية للأرض منها وذلك بتطبيق تقنية الربط الكثيف للصور الرقمية Digital image matching. وبشكل عام، يمكن تلخيص أهداف البحث فيما يلي:

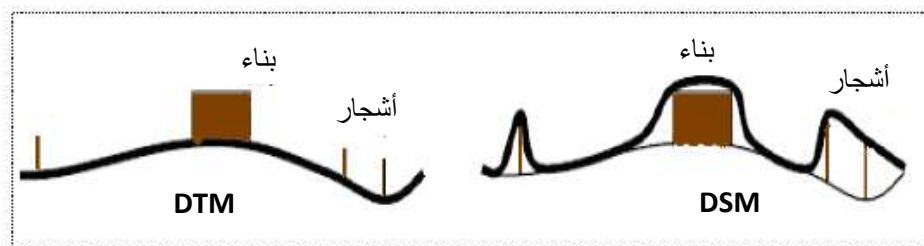
1. يسعى البحث لتقديم حل بديل عن استخدام خطوط الكونتور أو غمامات النقاط المقطعة باستخدام المسح الليزري (الليدار LIDAR) في توليد النماذج الرقمية للأرض واستخدامها كمدخل في توليد الصورة المرجعة عامودياً.
2. يعرض البحث منهجية توليد الصورة المرجعة عامودياً باستخدام نظم تحاكي المساحات الليزرية من ناحية قدرتها على توليد غمامات كثيف جداً من النقاط انطلاقاً من الصور. وتتميز هذه النظم بكلفتها المادية المنخفضة وهي لا تحتاج لخبرة خاصة في التعامل معها. هذه النظم لا تحتاج إلى معرفة أية معلومات حول آلة التصوير المستخدمة في النقاط الصور وذلك لأنها تتمتع بقدرة القيام بالمعايرة الذاتية Self-calibration كما أنها مؤتمتة بشكل كامل.
3. يعرض البحث لتأثير تغير كثافة نقاط النموذج الرقمي للأرض على النوعية الهندسية والبصرية للصورة المرجعة عامودياً الناتجة. في الواقع، تمكننا النظم التي تحاكي المساحات الليزرية من التحكم بكثافة النقاط المقطعة آلياً من الصور وفق عدة مستويات تناسب أهداف المستخدم.

طرائق البحث ومواده

أولاً : مفهوم النموذج الرقمي للأرض

يعرّف النموذج الرقمي للأرض (DTM (Digital Terrain Model بأنه" عبارة عن تمثيل للسطح المستمر للأرض الطبيعية، باستخدام عدد كبير من النقاط المعبرة، والمعروفة بإحداثياتها الثلاثية XYZ ضمن نظام إحداثي ما [5]. أو بتعريف آخر: هو تابع مستمر يربط بين الإحداثيات المستوية للموقع مع ارتفاع سطح الأرض $Z=f(x,y)$ [6]. يتم حساب هذا السطح انطلاقاً من مجموعة من النقاط المقاسة والتي يطبق عليها لاحقاً عملية الاستكمال. والاستكمال تعريفاً هو وسيلة لتوليد المعلومات عند نقاط غير معروفة انطلاقاً من عدد من النقاط المعروفة وذلك بهدف التمثيل المكاني والكارتوغرافي للظاهرة المكانية المدروسة وتحليل هذه الظاهرة في حيز ثنائي الأبعاد [7]، وهناك أسلوبان رياضيان أساسيان لتنفيذ الاستكمال هما الاستكمال العام Global والمحلي Local. الأسلوب الأول يستخدم كل الأرصاد المعلومة لتقدير قيمة نقطة مجهولة، في حين يستخدم الثاني عينة معلومة من النقاط لتقدير قيمة النقاط غير المعروفة. هناك تصنيف آخر يمكن اعتماده من خلال تصنيف هذه الطرائق إلى استكمال دقيق ينشئ سطح رياضي يمر بكافة النقاط المعلومة كنتليث ديلوناي Delaunay triangulation على سبيل المثال، واستكمال غير دقيق ينشئ سطحاً رياضياً يمر بنقاط يتوقع لها قيم والتي تختلف عن القيم المعروفة (نقاط التحكم) كطريقة الاستكمال باستخدام تابع مقلوب المسافة الموزونة Inverse Distance Weighted (IDW) [8].

ومع ظهور تقنيات المسح الليزري ومحاكيات الماسحات الليزرية من برمجيات تقوم على مبدأ الربط الكثيف للنقاط على الصور Dense image matching، صار من الممكن الحصول على ما يسمى بالنموذج الرقمي للسطح (DSM) وهو المدخل الذي يتم اقتطاع النموذج الرقمي للأرض منه. و DSM هو بالتعريف نموذج رقمي يمثل سطح الأرض الطبيعية مع كافة السمات المكانية (الأشجار، الأبنية، الطرق، الأنهار، الأرض الطبيعية). وباستخدام تقنية المسح الليزري أو محاكياته، يجري اشتقاق السطح الأصلي DSM من غمامة هائلة وعمياء من النقاط ثلاثية الأبعاد المسجلة التي لا يمكن التمييز بين طبيعة نقاطها، إذا كانت منتمة لسطح الأرض الطبيعية أو لأجسام طبيعية أو صناعية مرتفعة عن سطح الأرض. و بمعالجة هذه الغمامة من خلال تطبيق خوارزميات رياضية معقدة مؤتمتة بالكامل أو نصف مؤتمتة على النموذج DSM يمكن فصل السمات الطبيعية كسطح الأرض ضمن هذا النموذج الرقمي عن بقية السمات الأخرى (أشجار، أبنية، سيارات، ... الخ) للوصول أخيراً إلى سطح الأرض الطبيعية الرقمي أو النموذج الرقمي للأرض (الشكل 1). لا بد من الإشارة هنا إلى توفر أدوات فعالة تستخدم في اقتطاع هذا النموذج من النموذج الرقمي للسطح في العديد من البرمجيات التي تحاكي الماسحات الليزرية ومنها البرنامج المستخدم في بحثنا هذا. وبعد الوصول إلى النموذج الرقمي للأرض، يمكننا اللجوء إلى الكثير من التطبيقات من بينها توليد الصورة المرجعة عامودياً من الصور الجوية أو الفضائية وأيضاً عمليات النمذجة الرقمية وأعمال هندسية أخرى.



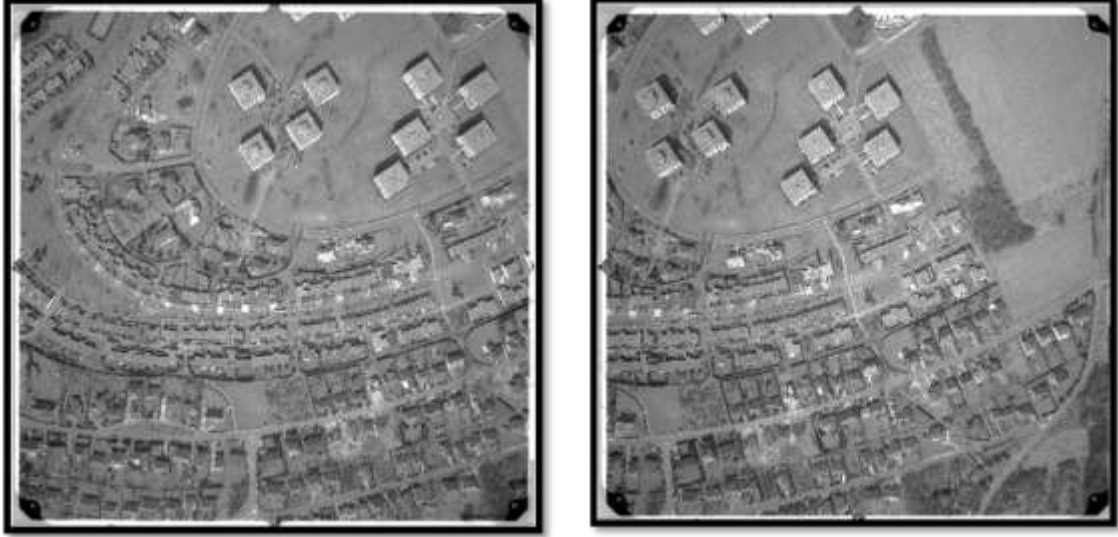
الشكل (1). الفرق بين النموذج الرقمي للسطح والنموذج الرقمي للأرض.

لقد أثبتت الأبحاث أن لكثافة غمامة نقاط المسح الليزري تأثيراً مباشراً على الدقة النهائية للنموذج الرقمي المستقر للأرض. ففي الدراسة التحليلية الإحصائية الموجودة في [9]، تمت مناقشة تأثير كثافة النقاط الأصلية لغمامة ليزرية على دقة النموذج الرقمي النهائي للأرض المستقر بطريقة مقلوب المسافة الموزونة IDW، وذلك بعد إزالة كافة نقاط الأجسام المرتفعة غير المنتمة إلى سطح الأرض. لقد أثبتت هذه الدراسة ازدياد الدقة المكانية الشاقولية في سطح الأرض المستقر مع ازدياد الكثافة النقطية. في بحثنا هذا، سنقوم بمحاولة لتوطين نتائج هذه الدراسات وذلك عبر تطبيقها على النماذج الرقمية للأرض المسقونة من غمامات نقاط متفاوتة الكثافة تم توليدها باستخدام تقنية الربط الكثيف للنقاط (وليس باستخدام مسح ليزري) على مزدوج من الصور الجوية. هذا الأسلوب قد يمثل بديلاً للمسح الليزري المكلف وهو يحتاج فقط إلى صور ملتقطة بترتيب معين للمشاهد [4]. تم بعد ذلك دراسة تأثير هذه النماذج مختلفة الكثافة على نوعية الصورة المرجعة عامودياً النهائية للمشاهد المصور. كما تم التحقق من نوعية هذا الصورة المرجعة عامودياً باستخدام مجموعة من نقاط الاختبار الناتجة عن تثليث جوي Aerial-triangulation.

ثانياً : بيانات المشهد المصور

المشهد المصور هو جزء من مدينة METZ الفرنسية وهو مغطى بصورتين جويتين (الشكل 2) متداخلتين مقياس كل منهما 1:2500. هاتان الصورتان بالأبيض والأسود وقد تم التقاطهما بآلة التصوير الجوية RC20 ثم تم

مسحهما ضوئياً Scanning بدقة تمييز تساوي 400 ميكرون. كما يتوفر بعض نقاط الضبط (الشكل 3) والتي تم قياس إحداثياتها بدقة تتراوح بين (0.2-0.3m) (الجدول 1) وكذلك تقرير معايرة آلة التصوير Camera calibration rapport المستخدمة في النقاط الصور. لقد تم تحميل هذه المعطيات مع مواصفاتها مجاناً من موقع المعهد العالي للعلوم التطبيقية في مدينة ستراسبورغ الفرنسية <http://photogeo.u-strasbg.fr>.



الشكل (2). مزدوج الصور الجوية المتداخلة التي تغطي المشهد المدروس.



الشكل (3). توزع نقاط الضبط في المشهد المصور.

الجدول (1). إحداثيات نقاط الضبط.

النقطة	X (m)	Y (m)	Z (m)
7028	2962.997	5855.893	208.166
7030	2964.432	5974.559	218.672
7034	2718.904	5865.405	219.134
7050	2866.093	6147.285	232.723
7051	2729.591	6091.399	231.806
7054	2600.409	6257.797	233.446
7059	2851.749	6309.248	240.395

ثالثاً : البرنامج ERDAS IMAGINE 2014

يُعتبر هذا البرنامج واحداً من برامج المساحة التصويرية الاحترافية التي تسمح بالقيام بعمليات التثليث الجوي والإرجاع العامودي للصور الرقمية الملتقطة بأنواع مختلفة من آلات التصوير، سواء كانت آلات التصوير الجوي أو مستشعرات التوابع الصناعية. يستخدم هذا البرنامج طريقة التعديل باستخدام الحزم Bundle Adjustment للقيام بعملية التثليث الجوي والتي توفر إمكانية الحصول على الإحداثيات الأرضية لأي نقطة ربط Tie point موجودة في منطقة التداخل بين صورتين متتاليتين، وبناءً على دقة تحديد نقاط الربط يمكن استخدامها لتوليد نقاط ضبط أرضية من الصور دون الحاجة لعمليات المسح التقليدي. سنستخدم هذه الميزة في الحصول على نقاط الاختبار اللازمة للتحقق من الصورة المرجعة عامودياً المولدة من غمامات نقاط مختلفة الكثافة.

رابعاً : البرنامج Agisoft Photoscan

وهو واحد من النظم التي تحاكي الماسحات الليزرية والتي تمكنا من التحكم بكثافة النقاط المقطعة بشكل آلي من الصور الموجهة توجيهاً خارجياً وذلك باقتراح عدة مستويات من الكثافة على المستخدم، كما تتوفر فيه أدوات لتصنيف هذه النقاط إلى سمات متعددة منها الأرض، الأبنية والأشجار. باستخدام هذه الخاصية، يمكن لنا توليد نماذج رقمية للأرض مختلفة الكثافة وبالتالي دراسة تأثير اختلاف كثافة على نوعية الصورة المرجعة عامودياً وهو هدف هذا البحث.

النتائج والمناقشة

تمت عملية المعالجة وفق الخطوات التالية :

1. تم أولاً توجيه صور المزوج الجوي باستخدام نقاط الضبط وبمساعدة البرنامج Agisoft Photoscan وتوليد غمامات كثيفة من النقاط انطلاقاً من الصور الموجهة وذلك ضمن مستويات كثافة متعدد (قليلة، متوسطة وعالية).
2. من كل غمامة، تم توليد نموذج رقمي للارتفاعات وتصنيفه بحيث حصلنا على ثلاثة نماذج مختلفة الكثافة.
3. تم لاحقاً توليد صورة مرجعة عامودياً من كل نموذج (حصلنا على ثلاث صور مرجعة عامودياً) بمساعدة البرنامج Agisoft.

4. تم أيضاً توجيه المزوج باستخدام نقاط الضبط وبمساعدة البرنامج ERDAS IMAGINE 2014 وذلك بتطبيق التعديل بطريقة الحزم وأخذ معاملات التوجيه الداخلي لآلة التصوير الجوية المستخدمة بعين الاعتبار.
5. انطلاقاً من المزوج الناتج عن الخطوة السابقة، قمنا بقياس عدد من نقاط الاختبار. الهدف هنا هو مقارنة إحدائيات هذه النقاط مع مقابلاتها المقاسة على كل صورة مرجعة عامودياً.

أولاً : توجيه الصور واقتطاع النماذج الرقمية للأرض

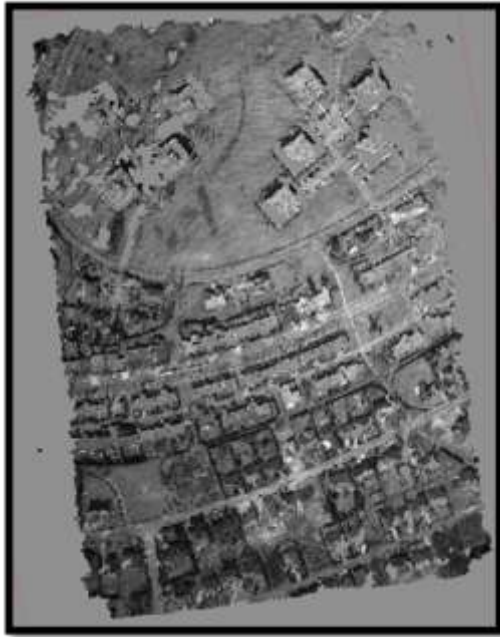
باستخدام كل نقاط الضبط المتوفرة، قمنا بتوجيه المزوج بمساعدة Agisoft Photoscan. هذا البرنامج يمكننا من تطبيق المعايير الذاتية أي حساب معاملات التوجيه الداخلي لآلة التصوير المستخدمة والتي يمكن اعتبارها كمجاهيل إضافية لمعاملات التوجيه الخارجي. في الواقع، لا يتعامل البرنامج مع آلات التصوير الجوية المترية (لا يتعامل مع علامات عمق حجيرة التصوير Fiducial marks ولكنه يستخدم المعايير الذاتية كحل مقبول لهذه المشكلة).

بعد توجيهه، قمنا باقتطاع غمامات النقاط الكثيف وفق المستويات التالية:

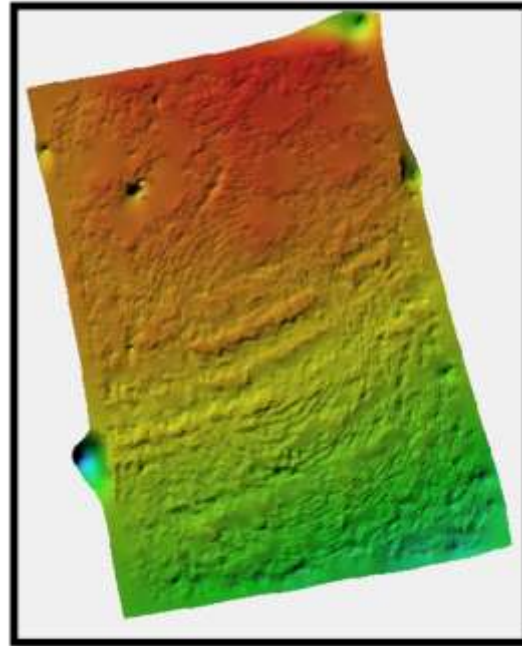
1. المستوى المنخفض Low : وعند هذا المستوى، يعمل البرنامج على صورة حجمها أقل بـ 16 مرة من حجم الصورة الأصلية مما يزيد من سرعة المعالجة ولكنه يؤثر على كثافة الغمامة المولدة. حصلنا عند هذا المستوى على غمامة عدد نقاطها قريب من 112200 نقطة (الشكل 4). تم بعد ذلك القيام بعملية التصنيف Classification لنقاط هذه الغمامة وذلك بهدف الاحتفاظ بالنقاط المنتمية إلى الأرض الطبيعية (الأرض العارية Bare earth) لبناء النموذج الرقمي للأرض منها (الشكل 4).

2. المستوى المتوسط Medium : وعند هذا المستوى، يعمل البرنامج على صورة حجمها أقل بـ 4 مرات حجم الصورة الأصلية مما يقلل من سرعة المعالجة بالنسبة للمستوى السابق ولكنه يزيد من كثافة الغمامة المولدة. حصلنا عند هذا المستوى على غمامة عدد نقاطها قريب من 418000 نقطة (الشكل 5). تم بعد ذلك القيام بعملية التصنيف لنقاط هذه الغمامة وذلك بهدف الاحتفاظ بالنقاط المنتمية إلى الأرض الطبيعية لبناء النموذج الرقمي للأرض منها (الشكل 5).

3. المستوى المتوسط High : وعند هذا المستوى، يعمل البرنامج على الصورة بحجمها الأصلي مما يزيد إلى حد كبير من زمن المعالجة بالنسبة للمستويات السابقة ولكنه يزيد من كثافة الغمامة المولدة. حصلنا عند هذا المستوى على غمامة عدد نقاطها قريب من 1300000 نقطة (الشكل 6). تم بعد ذلك القيام بعملية التصنيف لنقاط هذه الغمامة وذلك بهدف الاحتفاظ بالنقاط المنتمية إلى الأرض الطبيعية لبناء النموذج الرقمي للأرض منها (الشكل 6).

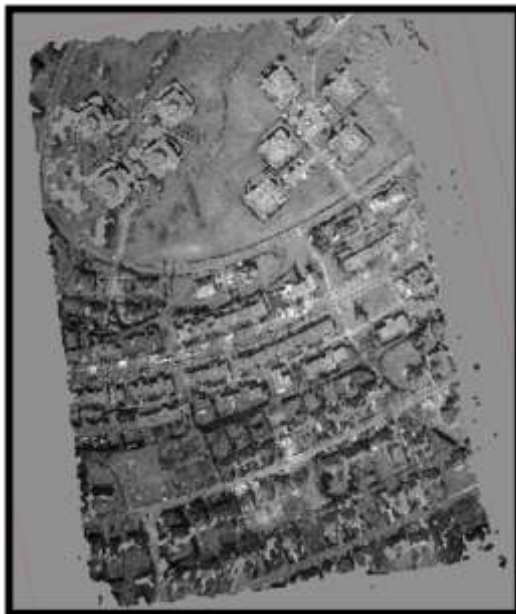


غمامة النقاط الكثيفة

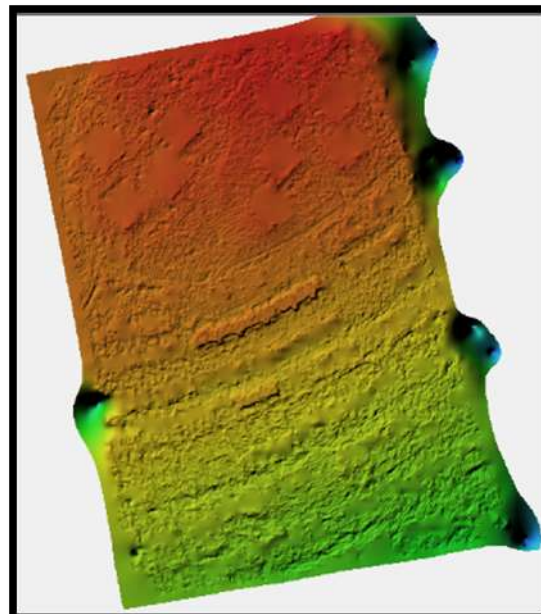


النموذج الرقمي للأرض

الشكل (4). نتائج اقتطاع النقاط وبناء النموذج الرقمي للأرض عند المستوى المنخفض للمعالجة .

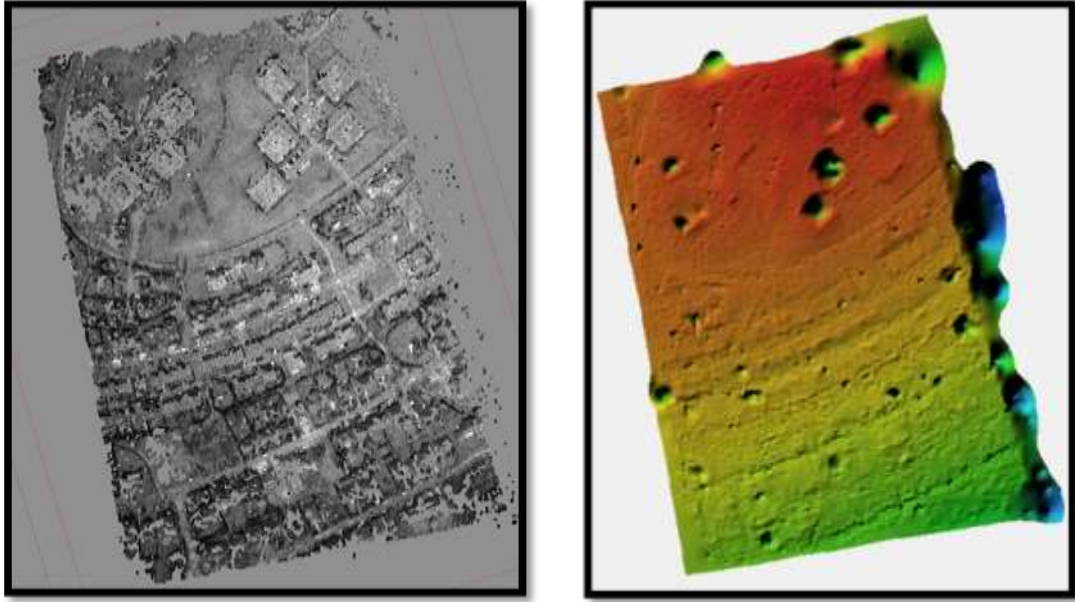


غمامة النقاط الكثيفة



النموذج الرقمي للأرض

الشكل (5). نتائج اقتطاع النقاط وبناء النموذج الرقمي للأرض عند المستوى المتوسط للمعالجة .

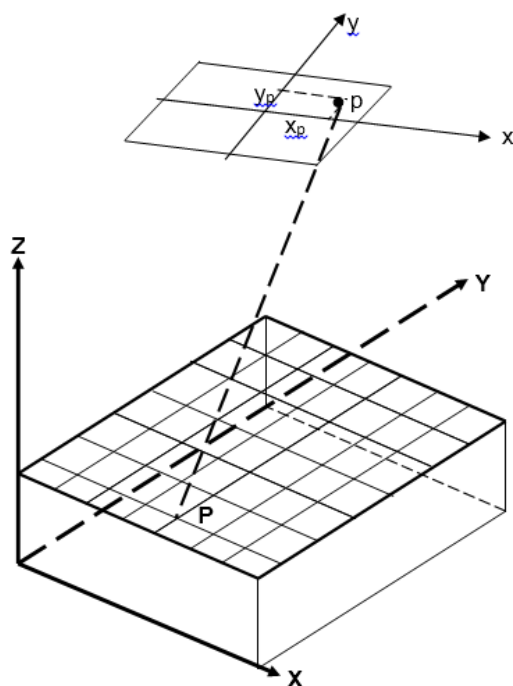


الشكل (6). نتائج اقتطاع النقاط وبناء النموذج الرقمي للأرض عند المستوى المرتفع للمعالجة .
 غمامة النقاط الكثيفة النموذج الرقمي للأرض

ثانياً : توليد الصورة المرجعة عامودياً

تشبه عملية توليد الصورة المرجعة عامودياً عملية التصحيح القياسية باستثناء أنها تنفذ بشكل مستقل من أجل عدد ضخم من العناصر والتي هي عبارة عن سطوح بالغة الصغر أو عناصر تفاضلية (خلايا النموذج الرقمي للأرض) وبهذه الطريقة وبدلاً من تصحيح الصورة عند مقياس متوسط (و الذي هو غير صحيح من أجل الإزاحات الناتجة عن ارتفاعات الأرض) فسيتم تصحيح كل عنصر تفاضلي عند مقياس مشترك.

إن المعطيات الأساسية للتصحيح التفاضلي هي نموذج رقمي للأرض و صورة جوية رقمية ذات عناصر توجيه خارجي معروفة. ومن الضروري أيضاً الحصول على إحداثيات الصورة الرقمية (سطر، عامود) لعلامات عمق حجيرة التصوير بحيث يمكن تطبيق تحويل هندسي لربط الإحداثيات الفوتوغرافية مع إحداثيات الصورة الرقمية. و بعد ذلك سيسمح تطبيق معادلات التسامت *Collinearity equations* بتوليد الصورة المرجعة عامودياً. يبين الشكل (7) شرط التسامت من أجل نقطة P من نقاط العنصر الأرضي و الواقعة على النموذج الرقمي للأرض. و الإحداثيات XY للنقطة P تعتمد على السطر و العامود داخل النموذج الرقمي للأرض و أما الإحداثية Z لهذه النقطة فهي مخزنة في مصفوفة العناصر الأرضية للنموذج الرقمي للأرض عند موقع النقطة P . و بمعرفة الإحداثيات XYZ للنقطة P و معاملات التوجيه الخارجي للصورة نستطيع حساب الإحداثيات الفوتوغرافية (x_p, y_p) لمسقط P و ذلك بتطبيق معادلات التسامت. و تعرف هذه الإحداثيات موقع نقطة العنصر الأرضي P في الصورة. و بما أن الإحداثيات الفوتوغرافية مرتبطة بنظام الإحداثيات المعرف بعلامات عمق حجيرة التصوير فيجب تطبيق تحويل هندسي يسمح بتحويل هذه الإحداثيات إلى إحداثيات سطرية و عامودية في الصورة الرقمية. و لكن النتيجة تكون عادةً أرقاماً غير صحيحة *Integer* لذلك نقوم بعملية أخذ عينات *Resampling* داخل الصورة الممسوحة ضوئياً للحصول على العدد الرقمي المرافق لنقطة العنصر الأرضي P . و يكرر تطبيق معادلات التسامت من أجل كل النقاط في مصفوفة النموذج الرقمي للأرض والناتج النهائي هي الصورة المرجعة عامودياً.



الشكل (7). علاقة التسامت بين نقطة من النموذج الرقمي للأرض مع مسقطها في الصورة.

قمنا بتوليد ثلاثة صور مرجعة عامودياً باستخدام النماذج الرقمية السابقة مع الحفاظ على نفس دقة التمييز الهندسية لكل هذه الصور المرجعة عامودياً وذلك كي تكون مقارنتها من ناحية الدقة الهندسية والقدرة التعبيرية الصورية منطقياً. أما بالنسبة لقيمة دقة التمييز الهندسية فقد تم تحديدها بالنسبة (1/7) من دقة تمييز الصورة الأصلية، والتي تبلغ 400 ميكرون (μ). ومع أخذ مقياس الصورة الأصلية بعين الاعتبار (1/2500) تصبح هذه القيمة 0.15 متراً. لقد تم الحصول على قيمة الـ 0.15 متراً (أو 15 سم) من خلال العملية الحسابية التالية :

$$\frac{\frac{1}{7} * 400}{\frac{1}{2500}} = 142857.143 (\mu) = 14.29 \text{ cm} \approx 15 \text{ cm}$$

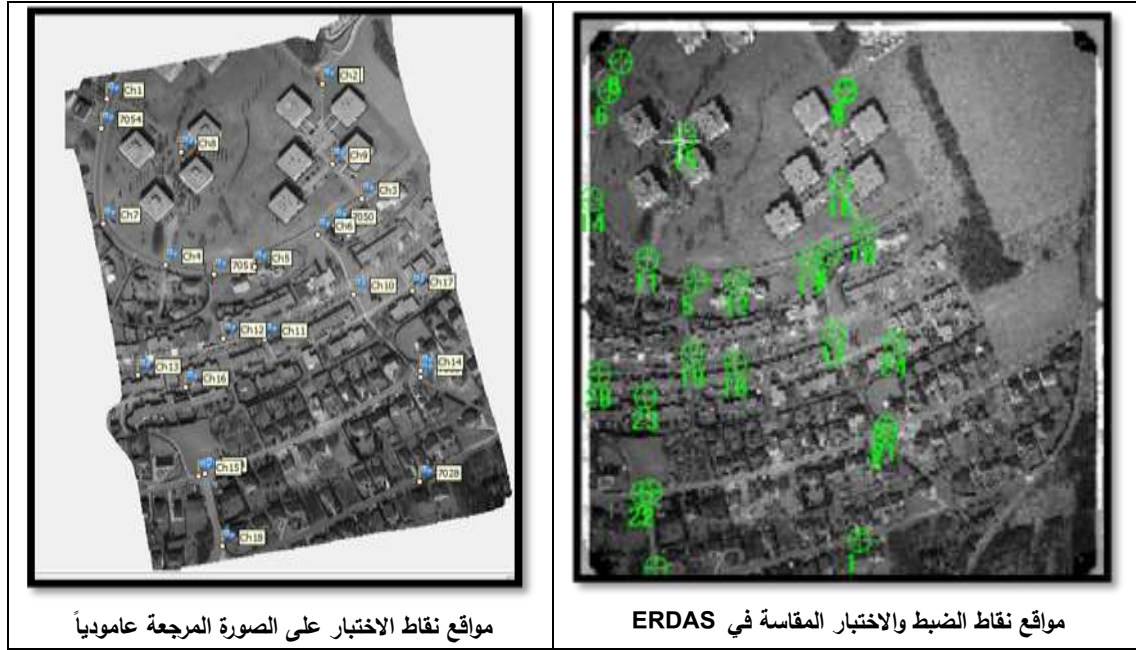
في الواقع، طبقنا توصيات المؤسسة العالمية للمساحة التصويرية والاستشعار عن بعد ASPRS، والتي تشير إلى أنه من الممكن توليد صورة مرجعة عامودياً من صورة جوية ما مقياسه أكبر بـ 6 إلى 7 مرات من مقياس هذه الصورة [10].

ثالثاً : مناقشة القدرة التعبيرية للصور المرجعة عامودياً الناتجة

سنقارن الصور المرجعة عامودياً الناتجة من ناحية القدرة التعبيرية الصورية والدقة الهندسية. بالنسبة للقدرة التعبيرية لأية صورة، فإنها تتأثر بحجم البكسل والذي يعبر عن قدرة الصورة على إظهار التفاصيل. صحيح أننا قمنا باعتماد نفس أبعاد البكسل لكل الصور المرجعة عامودياً المنتجة، ولكن هذا لا يعني أن لها جميعاً نفس القدرة التعبيرية. في الواقع، هنالك عامل آخر يجب أخذه بعين الاعتبار وهو الكثافة الوسطية بالمتري لنقاط النموذج الرقمي للأرض الذي استخدم في توليد الصورة المرجعة عامودياً. في الواقع، تبلغ مساحة منطقة التداخل بين الصورتين الجويتين تبلغ تقريباً 621151 m^2 ، وبالتالي، بلغت كثافة المسح الوسطية بالمتري في حالة المستوى المنخفض

للمعالجة ما يقارب 0.18 نقطة. أما في حالة المعالجة متوسطة المستوى فقد بلغت ما يقارب 0.67 نقطة، وعند المستوى العالي بلغت 2.09 نقطة تقريباً. وبناءً عليه، فإن الصورة المرجعة عامودياً المنتجة من مستوى المعالجة العالي يعتبر الأكثر قدرةً وذلك بفضل العدد الهائل من النقاط التي استخدمت لتوليد النموذج الرقمي للأرض (كثافة وسطية تعادل 2 نقطة في المتر المربع الواحد تقريباً).

وفيما يتعلق بالحكم على الدقة الهندسية للصور المرجعة عامودياً المنتجة، فقد استخدمنا مجموعة من نقاط الاختبار الناتجة عن عملية تثليث جوي للمزدوج التجسيبي المستخدم (الشكل (8)). تمت عملية التثليث هذه باستخدام برنامج احترافي هو البرنامج ERDAS IMAGINE 2014 ثم تم قياس نقاط الاختبار على المزدوج الموجه فحصلنا على الإحداثيات الموضحة في الجدول (2) :



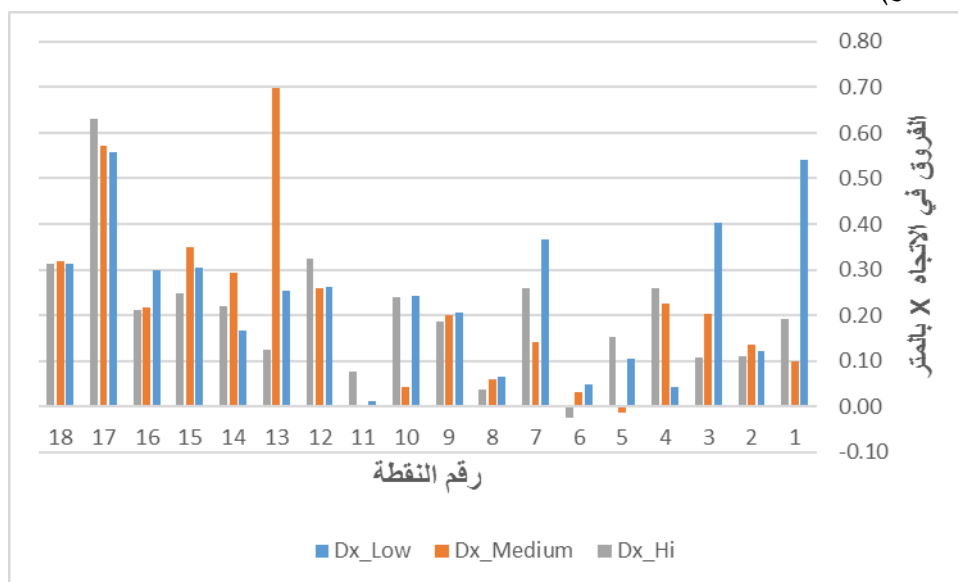
الشكل (8). نقاط الاختبار المستخدمة.

الجدول (2). إحداثيات نقاط الاختبار الناتجة عن التثليث الجوي.

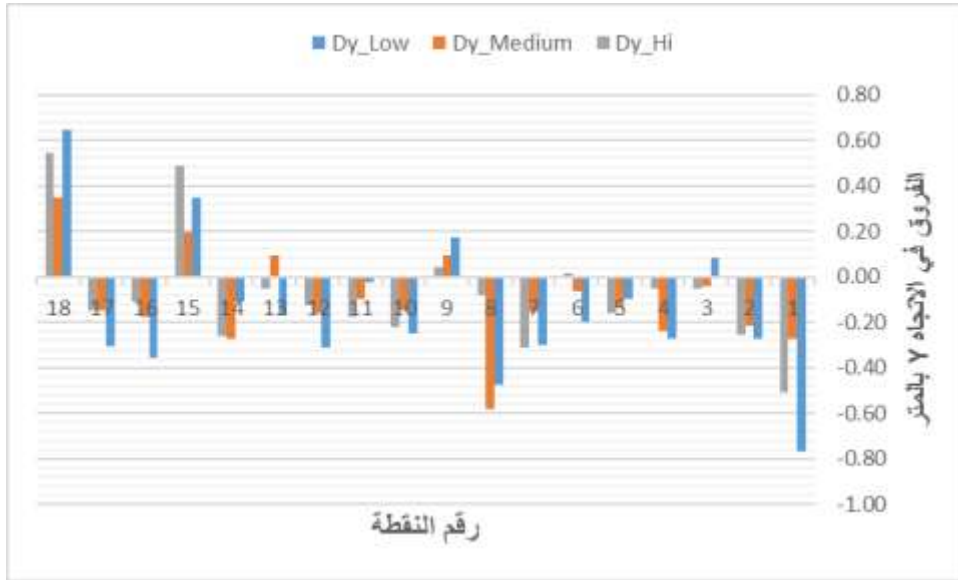
رقم النقطة	X (m)	Y (m)	Z (m)
Ch1	2607.976	6290.121	234.290
Ch2	2852.334	6307.761	240.722
Ch3	2898.162	6177.132	232.745
Ch4	2674.079	6102.152	232.176
Ch5	2775.007	6099.698	232.204
Ch6	2847.242	6136.695	232.442
Ch7	2603.74	6148.484	232.666
Ch8	2691.974	6230.041	235.337
Ch9	2864.153	6217.089	235.067
Ch10	2888.44	6068.72	227.901

227.817	6017.958	2787.129	Ch11
228.057	6017.913	2739.932	Ch12
228.401	5976.607	2643.15	Ch13
218.627	5981.965	2964.556	Ch14
219.802	5862.183	2711.721	Ch15
225.039	5962.844	2696.926	Ch16
224.940	6072.66	2955.61	Ch17
212.769	5783.67	2739.444	Ch18

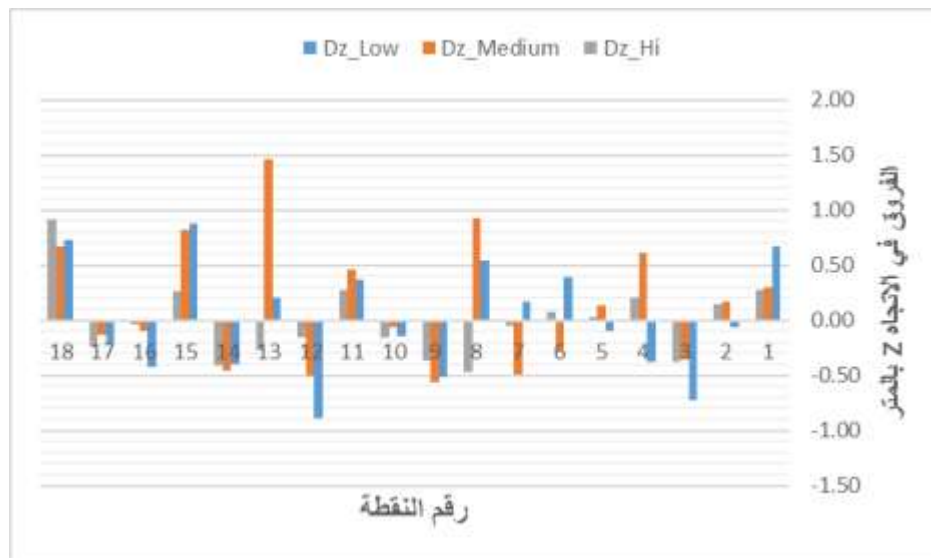
تم قياس نفس النقاط على كل من الصور المرجعة عامودياً الناتجة عن مستويات المعالجة المختلفة، ثم حسبنا الفروق في الإحداثيات معتبرين أن النقاط الناتجة عن التثليث الجوي هي النقاط المرجعية. نبين في المخططات التالية تمثيلاً لهذه الفروق ومقارنةً بينها. نلاحظ أن معظم القيم في الشكل الأول موجبة (توجد قيمتان سالبتان مع العديد من القيم القريبة من الصفر).



الشكل (9). الفروق بين الإحداثيات في الاتجاه X لنقاط الاختبار المستخدمة.

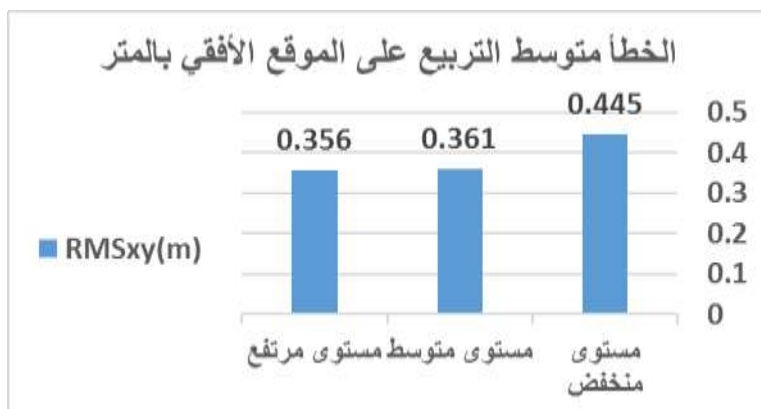


الشكل (10). الفروق بين الإحداثيات في الاتجاه Y لنقاط الاختبار المستخدمة.

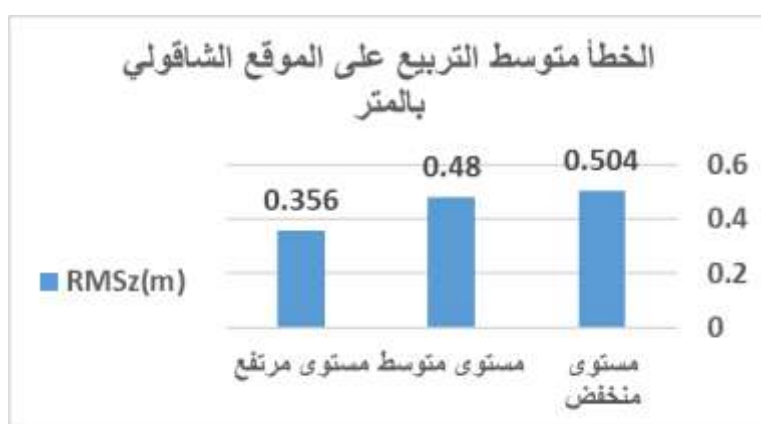


الشكل (11). الفروق بين الإحداثيات في الاتجاه Z لنقاط الاختبار المستخدمة.

قمنا بحساب الأخطاء متوسطة التربيع على المواقع الأفقية وعلى الشاقول في الحالات الثلاث. الأشكال التالية توضح علاقة هذه الأخطاء مع مستوى المعالجة.



الشكل (12). الأخطاء متوسطة التربيع على الموقع الأفقي حسب مستوى المعالجة .



الشكل (13). الأخطاء متوسطة التربيع على الموقع الشاقولي حسب مستوى المعالجة .

بالعودة إلى المخططات السابقة نجد أن دقة تحديد الموقع الأفقي والشاقولي للنقاط على الصورة المرجعة عامودياً مع ازدياد كثافة الغمامة المستخدمة في إنتاج النموذج الرقمي للأرض اللازم لإنتاج هذه الصورة ، وهو الأمر الذي أردنا هذا البحث التحقق منه. مع هذا، تجب الإشارة إلى أنه توجد بعض الفروقات الكبيرة في الإحداثيات الخاصة ببعض النقاط (النقطة 13 مثلاً) وهذا الفرق يمكن تبريره تبعاً لموقع النقاط على الصورة المرجعة عامودياً. في الواقع، معظم هذه النقاط واقع على أطراف منطقة تداخل مزدوج الصور الجوية وهذا يقلل من دقة اقتطاعها. إن نسبة التداخل بين الصور هنا هي تقريباً 60 % وهذه ليست النسبة المثالية لضمان فعالية عمل محاكيات المساحات الليزرية. في الواقع، هذه النسبة يجب أن تبلغ 80 % . ومن ناحية أخرى، من المفروض الحصول على دقة قياس أفقية على الصورة المرجعة عامودياً أكبر من التي حصلنا عليها (نظرياً هي من فئة الـ 15 cm). والسبب في انخفاض الدقة راجع في رأينا إلى الأسباب التالية :

a. عدم معايرة آلة التصوير المستخدمة في التقاط الصور الجوية، وهذا ما له تأثير مباشر على دقة القياس

[11].

b. نقاط الاختبار المعتمدة لم يتم تحديدها بطرائق حقلية دقيقة وإنما قيست على مزدوج تجسيمي. إن هذه النقاط

تحمل بدورها أخطاء تؤثر في عملية المقارنة.

C. عدد نقاط الضبط المتاحة غير كبير وهي غير موزعة بشكل منسجم على كامل منطقة التداخل، مما يؤثر على الدقة النهائية للصورة المرجعة عامودياً.

ومع ذلك يمكن، مع هذا المستوى من الدقة، استخدام الصورة المرجعة عامودياً الناتجة في حالة المستوى المرتفع من المعالجة في إجراء قياسات تتناسب الخرائط الطبوغرافية من المقياس 1/2000 والتي تملك تطبيقات غاية في الأهمية في الكثير من المجالات. وهنا يجب ألا ننسى الكلفة المنخفضة والسرعة في إنتاج هذه الصورة المرجعة عامودياً مقارنةً بالطرائق التقليدية.

الاستنتاجات والتوصيات

الاستنتاجات

- بالاستناد إلى الدراسة النظرية المقدمة حول تأثير كثافة النموذج الرقمي للأرض على دقة الصور المصححة عامودياً والتطبيق العملي للدراسة، نستنتج مايلي :
1. يمكن للنظم التي تحاكي المساحات الليزرية، والقائمة على الصور، أن تشكل حلاً بديلاً للمسح الليزري التقليدي في إنتاج نماذج رقمية تفصيلية للأرض.
 2. ازدياد كثافة النموذج الرقمي للأرض له تأثير مباشر على دقة التوقيع الأفقية والشاقولية للصور المصححة عامودياً ولكن هذا العامل الوحيد الذي يؤثر على الدقة. في الواقع، يجب أخذ معاملات التوجيه الداخلي لآلة التصوير المستخدمة وكذلك عدد وتوزيع ودقة نقاط الضبط بعين الاعتبار عند تحليل الدقة.
 3. لضمان فعالية اقتطاع النموذج الرقمي للأرض بشكل آلي باستخدام محاكيات المساحات الليزرية، يجب زيادة نسبة التداخل التقليدية للصور الجوية المستخدمة في صناعة الخرائط (والتي تبلغ % 60) إلى ما يقارب % 80.
 4. مازالت النظم المستخدمة في التوجيه الآلي للصور واقتطاع غمامات النقاط منها تعاني من مشكلة عدم قدرتها على التعامل مع الصور الجوية التقليدية (الملتقطة بآلات تصوير مترية Metric cameras). فبالرغم من أنها تستخدم المعايير الذاتية في حساب معاملات التوجيه الداخلي لهذا النوع من الآلات، إلا أنها تعتمد خوارزميات حسابية تقريبية [12].
 5. بيّنت الاختبارات أن النظم التي تحاكي المساحات الليزرية واعدة جداً في مجال التصحيح العامودي للصور الجوية وذلك بسبب كلفتها المنخفضة وسهولة استخدامها مقارنة بالنظم الاحترافية.

التوصيات

نوصي باستخدام محاكيات المساحات الليزرية في اقتطاع النماذج الرقمية للأرض واللازمة في إنتاج الصور المصححة عامودياً وذلك نظراً لمرونتها في التحكم بكثافة هذا النموذج بطريقة سهلة وكذلك بسبب كلفتها المنخفضة (المادية والمعرفية). كما نوصي بأخذ العوامل الأخرى التي تتحكم بدقة الصور المصححة عامودياً وهي عوامل معايرة آلة التصوير وعدد وتوزيع نقاط الضبط.

المراجع

[1] ROSSI., TIFFINY, A., 2004. Application Of Digital Photogrammetric Methods In The Of Land Cover Change On The Coastal Dunes Of Warren Dunes State Park, Berrien Country, Master Thesis, The Michigan State University, Michigan, 2004.

[2] SMITH, M.J., SMITH, D.G., TRAGHEIM D.G., HOLT, M., 1996. DEMs And Ortho-Images From Aerial Photographs, Photogrammetric Record, 15 (1997) 945-950.

[3] SIVRI, T., 2004. Investigating The Accuracies Of Digital Orthophoto Maps Produced at Different Regions, Master Thesis, K.T.Ü., The Graduate School of Natural and Applied Sciences, Trabzon, 2004.

[4] الخليل، عمر. 2016. استخدام تسجيلات الفيديو في نمذجة المنشآت الأثرية الضخمة . مجلة جامعة

تشرين للعلوم الهندسية (ISSN : 2079-3081). المجلد (38). 2016.

[5] Miller, C., LAFLAMME, R. 1958. The digital terrain model — theory and applications, Photogrammetric Engineering, 24:433-442. 1958.

[6] PFEIFER, N., BRIESE, C. 2007. Geometrical aspects of airborne laser scanning and terrestrial laser scanning. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36(part 3/W52), 311-319. 2007.

[7] DRAPEAU, L. 2000. Statistiques et Interpolations dans les SIG, Towards the use of Geographic Information Systems as a Decision Support Tool for the Management of Mediterranean Fisheries, Informations et Etudes – COPEMED. 2000.

[8] GACHET, G. 2005. Etude comparative de differentes methodes d'interpolation pour generer des modeles numeriques d'altitude raster a partir de points bruts lidar, lausanne, Laboratoire des Systèmes d'Information Géographiques. 2005.

[9] LIU, X., ZHANG, Z., PETERSON, J., CHANDRA, S. 2007. The effect of LiDAR data density on DEM accuracy. Proceedings of International congress on modelling and simulation (MODSIM07), Christchurch, New Zealand, 1363-1369. 2007.

[10] The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. 1994. ASPRS ACCURACY STANDARDS FOR LARGE-SCALE MAPS. 1994.

[11] الخليل، عمر.، فحصة، إياد. 2015. مقارنة طرائق معايرة آلات التصوير الرقمية في المساحة

التصويرية والرؤية بمعونة الحاسب . مجلة جامعة تشرين للعلوم الهندسية (ISSN : 2079-3081). المجلد (37). 2015.

[12] ZHANG, Z. 2000. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Trans. on PAMI, Vol. 22(11), pp. 1330-1334. 2000.