دراسة منهجية مقترحة لتحديث الخرائط الطبوغرافية اعتماداً على الصور الفضائية المقوّمة بنموذج ارتفاعي رقمي

عبدالله محمد وليد كامل و بسام توفيق النيفر

قسم الجيوماتكس، كلية تصاميم البيئة، جامعة الملك عبدالعزيز، جدة، المملكة

العربية السعودية

المستخلص. يهدف البحث إلى إيجاد منهجية علمية ملائمة لتحديث الخرائط الطبوغرافية ذات المقياس 1/200000 والتي يعود تاريخ إنتاجها إلى إصدارات مختلفة. ويكون ذلك بتتبع كافة التغيرات على أرض الواقع وتوقيعها بأسرع وقت وبأقل كلفة ممكنة اعتماداً على الصورة الفضائية الملتقطة من الأقمار الصناعية والتي تعتبر صورة أحادية، بدلاً من اللجوء إلى مزدوجات الصور التي يتطلب الحصول عليها مدة لا بأس بها من الزمن إضافة إلى الأجهزة والملحقات باهظة التكاليف.

للاستفادة من الصورة الفضائية الأحادية فإنه يجب تصحيحها من التشوهات الهندسية بعملية التقويم العمودي، وقد تمت وفق أحدث الطرق الرقمية لمعالجة الصور والتي تعتمد على النماذج التضاريسية الرقمية للمناطق المراد تحديث خرائطها. حيث تم إنتاج هذا النموذج الارتفاعي الرقمي استناداً على خطوط الكنتور ذات التباعد المتساوي ٢٠ مترًا في الخرائط ذات المقياس 1/200000، فكانت دقته الارتفاعية ٦,٥ متر وهي قيمة قريبة من دقة التعيين الارتفاعي للخريطة.

تم تنفيذ التقويم العمودي على صورة فضائية من SPOT4 دقة تتميزها ١٠ أمتار لمنطقة جنوب سورية، وكانت دقة التقويم مساوية ٥٦,٢٨ متراً وهي قيمة قريبة من الدقة التخطيطية للخريطة والتي تبلغ ٦٠ متراً.

وبإجراء المقارنة بين الخريطة التي يعود تاريخها إلى العام ١٩٨٦ والصورة الفضائية الصادرة في العام ٢٠٠٨ والتي خضعت لعملية التقويم العمودي، فقد تم رصد كافة التغيرات على أرض الواقع وتبين ظهور عناصر جديدة غير موجودة من قبل، فبلغت مجمل تلك العناصر المحدثة ٥٠٪ من العناصر الموجودة أصلاً على الخريطة، إضافة للتعديلات الواجب تنفيذها نتيجة للتوسعات المدنية وتغيير مسارات الطرق.

الكلمات المفتاحية: تحديث الخرائط، التقويم العمودي، الربط المرن الآلي، النموذج الارتقاعي الرقمي، الخرائط الفضائية، خطوط الكنتور، الانحراف المعياري.

١. المقدمة

تشكل الخرائط ذات المقياس 1/200000 سلسلة من الخرائط ذات المقياس المتوسط، والتي غالباً ما تغطي كامل مساحة البلدان التي تمثلها. تبرز أهمية تلك الخرائط في الدراسة الأولية للمشاريع الإقليمية والدراسات المائية للأحواض الساكنة واختيار المسارات الأولية للربط الطرقي بين المدن. إلا أن تلك الخرائط وبخاصة في البلدان العربية تعود لإصدارات قديمة ولم تعد تعتبر أمينة المحتوى في تمثيل الواقع الحالي كما تفتقد للتجانس فيما بينها، وبالتالي فهي بحاجة للتحديث وذلك بالبحث عن منهجية علمية يتوخى من خلالها عوامل الزمن والكلفة والدقة في إنجاز عملية التحديث.

من المعروف أن إنتاج تلك الخرائط متوسطة مقياس يعتمد على علم المساحة التصويرية في معالجة الصور الجوية، وعلى الرغم من تطور هذا العلم نتيجة لتطور التقنية الرقمية المتقدمة، إلا أنه يبدو متأخراً عن مجارة التطورات الآنية والمستمرة الطارئة على الأرض. لذلك من الضروري البحث عن وسائل جديدة ذات أداء فعال وسريع لرصد التغيرات والتطورات الحاصلة على سطح الأرض، وهذا ما توفره الصور الفضائية الصادرة عن الأقمار الاصطناعية. وعلى الرغم من اختلاف الصور الجوية والفضائية في المصدر والمقياس والتشوهات إلا أن هذا البحث يقدم دراسةً يختبر فيها إمكانية الاكتفاء بصورة فضائية أحادية عوضاً عن سلسلة من أزواج الصور الجوية التي نحتاجها لتغطية نطاق الخريطة ذات المقياس 1/200000.

تحتاج الصورة الفضائية إلى مجموعة من المراحل اللازمة لمعالجتها، ولعل المرحلة الأهم تكمن في إعادة إسقاط الصورة على الخريطة ذات الإسقاط العمودي، وذلك لتحقيق المطابقة فيما بينهما Overlap مما يتيح إمكانية إجراء المقارنة المرئية لتحديث محتوى الخريطة. تعرف عملية المطابقة تلك بالتقويم العمودي Orthorectification والصورة الناجمة عن هذه العملية يطلق عليها المصطلح OrthoImage الصورة العمودية.

تم العمل في هذا البحث على اقتراح منهجية لتقويم الصورة الفضائية الأحادية ودراسة حدود وشروط استخدامها في تحديث الخرائط، وتقييم الدقة الناجمة عن عملية التحديث كي تكون تلك المنهجية بمثابة مشروع رائد في إمكانية تحديث مستمر لكافة الخرائط ذات المقياس الصغير والمتوسط ضمن دورة زمنية محددة، مما يسمح بتزويد قواعد بيانات نظم المعلومات الجغرافية GIS بالمعطيات المكانية وبشكل آني باعتبارها إحدى الأهداف التي تحققها مهمة تحديث الخرائط.

٢. أهداف البحث

يعتبر تأمين قواعد البيانات المكانية ذات الجودة شرطاً لازماً لضمان جودة استثمارها وتوظيفها ومساهمتها في المساعدة على اتخاذ القرار، حيث تكمن استمرارية الجودة في تحديث قواعد البيانات المكانية التي تعتبر بدورها المحرك الأساس لنظم المعلومات الجغرافية. وتعتبر الصورة الفضائية المقومة أداة مفيدة لتحديث الخرائط الطبوغرافية ذات المقياس الصغير، حيث تتميز بدرجة عالية من التجانس في تاريخ المعطيات المكانية ومصدرها.

إلا أن العديد من البلدان تواجه صعوبات في تحديث قواعد البيانات وبخاصة تلك البلدان التي تواكب عجلة التطور، فعادة ما تلجأ إلى خرائط أساس ذات مقاييس متوسطة منتجة من قبل هيئات خاصة تعتمد على طرق إنتاج مختلفة وغير متجانسة فيما بينها في غياب المواصفات المحددة لإنتاج الخرائط، مما يساهم في الحصول على طبقات غير متناسقة من المعطيات. ولعل الحل يكون في استخدام الصورة الفضائية المقومة كمزود فعال وموثوق لقواعد البيانات المكانية ذات المقاييس المتوسطة.

بناءً على ما سبق فإنه يمكن تحديد أهداف البحث في المحورين التاليين:

- ١- البحث عن منهجية ملائمة وفعالة في تحديث خرائط مقياس الرسم المتوسط وإكسابها الصفة الحقيقية لقواعد البيانات المكانية.
- ٢- دراسة شروط وحدود الدقة المسموحة التي من أجلها يمكن استخدام الصورة المقومة في تحديث الخرائط الطبوغرافية ذات مقياس الرسم المتوسط.

٣. فرضيات البحث

إن العمل على إيجاد مصادر جديدة من قواعد البيانات المكانية من شأنه أن يثري المهام البحثية والتطبيقية، وذلك من خلال تنوع الخيارات حول نوع

المعطيات المطلوبة، وتأمين نماذج مقارنة متفاوتة الدقة لنفس المنطقة من سطح الأرض. كما أن تأمين قاعدة بيانات مكانية من الصور الفضائية المستخدمة لتحديث الخرائط الطبوغرافية يضعنا أمام مجموعة من الفرضيات التالية:

١- إن تحديث الخرائط الطبوغرافية اعتماداً على الصور الفضائية المقومة لن يلغي أساليب التحديث المعروفة التي تعتمد على المسوحات الطبوغرافية أو الصور الجوية.

٢- الصورة الفضائية المقومة ليست أداة تحديث للخرائط الطبوغرافية فحسب، بل أداة يمكن من خلالها الحكم على مدى صحة وصلاحية الخرائط المنتجة سابقاً بوسائل مختلفة.

٣- إن الزمن الذي يستغرقه تحديث أو إنتاج خريطة طبوغرافية اعتماداً على صورة فضائية مقومة تعتبر أقصر بكثير من الوقت اللازم لإنجاز خريطة من خلال الصور الجوية أو القياسات الحقلية.

٤- يعتبر تحديث خريطة طبوغرافية اعتماداً على الصور الفضائية المقومة ذات جدوى اقتصادية، حيث تكون كلفتها أقل من التكلفة اللازمة لإنجاز الخرائط ذات نفس المقياس وبالوسائل العادية والمألوفة.

٥- لا توازي دقة التحديث اعتماداً على الصور الفضائية دقة وسائل التحديث الأخرى اعتماداً على المسوحات الميدانية أو الصور الجوية، ولكن يكفي أن تتجانس دقتها مع دقة الخريطة المطلوب تحديثها إضافة لمزايا السرعة والكلفة والاستمرارية في التحديث.

٤. الدراسة المرجعية

تعتبر الخرائط الطبوغرافية تمثيلاً أميناً لأرض الواقع وغنياً بالمعلومات، إلا أنها تبقى منقوصة المحتوى إذا ما قورنت مع ما يتوافق معها بالمقياس من صور

فضائية أو جوية اللاتي تمثلن لقطة حقيقية لسطح الأرض. أضف إلى أن خرائط المقياس المتوسط 1/200000 وبخاصة في منطقتنا العربية تعاني من مجموعة السلبات التالية:

◀ محتوى هذه الخرائط قديم، حيث يعود إنتاج بعض تلك الخرائط إلى خمسينيات القرن الماضي في فترات عرفت بتأسيس الدول وما صاحب ذلك من محاولة لحصر المناطق الجغرافية للبلدان.

◀ الإصدارات الجديدة هي إصدارات محدثة طباعياً فقط أما المحتوى فلم يتغير.

◀ تم إنتاجها أو تجميعها من مصادر ووسائل مختلفة، وبالتالي فهي غير متجانسة فيما بينها.

تغطي صورة فضائية واحدة في العموم بضعة آلاف من الكيلومترات المربعة وبالتالي تكون ملائمة لتحديث الخرائط ذات مقياس الرسم المتوسط والصغير. وتمتلك الصورة الفضائية مزايا عديدة بكونها "مرنة ودقيقة وآنية"؛ كما أنها رخيصة الثمن إذا ما قورنت بمصادر أخرى من البيانات باستخدام الأدوات والوسائل اللازمة لتحصيلها. إضافة إلى إمكانية الحصول على سلسلة دورية من الصور الفضائية الرقمية لنفس المنطقة وفي شروط رصد مماثلة نوعاً ما. يطلق على الخريطة التي يتم إنتاجها أو تحديثها بالاعتماد على الصور الفضائية بالخريطة الفضائية SPATIOMAP^[1]. والصور الفضائية المستخدمة في العالم والتي تتميز بدقة تمييز عالية (الجدول ١) تعتبر من الصور الملائمة للتطبيقات التي تعمل على تحديث وإنتاج الخرائط الطبوغرافية.

الجدول ١. يبين مصادر الصور الفضائية ذات دقة التمييز العالية.

الصورة	المصدر	القمر الاصطناعي	الارتفاع (Km)	دقة التمييز (m)
KVR-1000	روسيا	COSMOS	190-270	1,2,3
IKONOS	أمريكا	IKONOS-2	681	0.6
SPOT	فرنسا	SPOT-5	832	2.5,5
SPOT	فرنسا	SPOT-4	822	10

المرجع [١].

١-٥ العلاقة بين الدقة الهندسية للخريطة ودقة تمييز الصورة الفضائية

تعتبر دقة التمييز الأرضية Ground Resolution إحدى الخصائص المميزة للصورة الفضائية، حيث تمثل دقة التمييز أبعاد أصغر خلية Pixel ملتقطة عن سطح الأرض. بدورها تتعلق الدقة الهندسية للخريطة المنتجة فضائياً بعدة عوامل من أهمها المعالجة الرقمية للصورة الفضائية، إضافة لدقة تمييز الصورة الفضائية.

من المعلوم أن دقة الترسيم (الخطأ التخطيطي Graphical error) [١] لأية خريطة تتعلق بالقدرة التمييزية للعين (يمكن تمييزها بالعين المجردة) والتي هي من مرتبة ٠,٣ ملمتر، وهذا ما يوافق من أجل المقياس المتوسط (1/200000) دقة حقيقية على أرض الواقع قدرها ٦٠ متراً. أي أن أبعاد أصغر عنصر أو خلية تمثلها الخريطة لا تقل عن ٦٠ متراً. ومن هنا نجد أن مفهوم الدقة الهندسية للخريطة هو نفسه أبعاد الخلية الواحدة من الصورة الفضائية الذي يحدد مرتبة دقة تمييزها، بمعنى أن دقة تمييز الصورة الفضائية تحدد مقياس الخريطة التي يجب إنتاجها أو تحديثها وفق ما هو موضح في الجدول ٢.

وبالعودة إلى الجدول ١ نجد بأن قدرة تمييز مساوية ١٠ أمتار والتي تعود للصورة الفضائية SPOT-4، هي أصغر من الدقة الهندسية للخريطة والمساوية ٦٠

متراً، وبالتالي فإن تلك الصور كفيلة مع تمثيل كاف للتفاصيل الأرضية بإنتاج وتحديث الخرائط المساحية ذات المقاييس الصغيرة ($1/1000000$ - $1/250000$) وحتى المقاييس المتوسطة ($1/200000$ - $1/50000$).

ويستنتج أن الأقمار الصناعية ذات دقة التمييز العالية (SPOT (10m تكون قابلة مبدئياً للاستعمال من أجل تطبيقات الخرائط ذات المقياس المتوسط وتصلح كذلك لتحديث الخرائط ذات المقياس $1/200000$ ، إلا أنه يجب نتحقق من حدود الدقة المطلقة والناجمة عن المنهجية المقترحة في تقويم الصورة الفضائية.

الجدول ٢. مقياس الخريطة الواجب تحديثها تبعاً لدقة تمييز الصورة.

دقة تمييز الصورة الفضائية (متر)	مقياس الخريطة المساحية
20	$1/100000$
10	$1/50000$
5	$1/25000$
1	$1/5000$

المؤلف.

٢-٥ الشكل الهندسي للصور الفضائية والتشوهات الهندسية

لكل صورة فضائية شكل هندسي خاص بها مرتبط بنمط التصوير، حيث تكون تلك الصور غير قابلة للتراكب بشكل تام على الخريطة أو على أية صورة ناتجة عن مصدر مختلف.

الأقمار SPOT4 مزودة بأداتين HRV (دقة تمييز مرئية عالية) فاعلة ومؤثرة بنوعين من الأطياف: نوع متعدد الأطياف بدقة تمييز ٢٠ متراً، ونوع وحيد اللون Panchromatic بدقة تمييز ١٠ أمتار. يتراوح عرض حقل الرؤية بين ٦٠-٨٠ كم تبعاً لزاوية الرؤية، حيث تغطي الأداتين HRV حقل رؤية كاملة بعرض ١١٧ كم ويكون البعد المحرقي للتصوير مساوياً ١,٠٨٢ متر^[٣].

فالقمر الاصطناعي التصويري SPOT يحقق نمط الحصول على الصورة سطرًا تلو الآخر، وذلك بفضل تنقل القمر خلال زمن التصوير (تسع ثواني لمشهد واحد من SPOT) فنتشكل الصورة في منظور مستو يعرف بالمنظور الأسطواني. بالإضافة إلى ذلك فإن مدة التقاط سطر واحد من الصورة تكون شبه فورية "لحظية" بفضل المرآة المتأرجحة للأداة HRV، التي تسمح برصد جانبي حتى ± 27 درجة من ناحية لأخرى بالنسبة لمستوي المسار. وهذا بدوره يولد صورة في المنظور المخروطي على مستوى الخط الواحد كما لو أن لاقط التصوير ثابت (خاصة التصوير الجوي من طائرة) حسب شكل ١. نطلق على الشكل الهندسي الناتج المنظور الأسطواني- المخروطي ^[٤]Cylindro-Conique، حيث يشبه ذلك الشكل كنظام إسقاط بخيم العرب ذات القمم المدببة.

شكل ١. ظاهرة الانزياح نتيجة لعامل التضاريس وميل محور التصوير.

إن حزمة أشعة التصوير المنحرفة عن المحور الشاقولي للاقط التصويري والمتجهة نحو سطح الأرض ستجسد على مستوى الصورة مساقط كافة النقاط المرصودة من سطح الأرض وبسبب اختلاف النمط التضاريسي لسطح الأرض، فالنقاط التي ليس لها نفس الارتفاع تكون مصورة بمقاييس مختلفة، ويترجم هذا الاختلاف على الصورة بانحراف الظاهرة التضاريسية عن موقعها الحقيقي وفق انتقال خطي يعرف بظاهرة الانزياح أو الإزاحة التضاريسية Relief Displacement.

تسبب تلك الإزاحة تغيراً في المسافات والانحناءات الأفقية للخطوط المستقيمة والاتجاهات بين نقطتين وما يعرف بالتشوهات الهندسية Geometric deformation. بالإضافة إلى ذلك فإن التضاريس هي مصدر لتشوهات عديدة كاختلاف المقياس وظهور المناطق المقنعة تحت تأثير التضاريس المرتفعة. وبالتالي لإنتاج خرائط وفق مفهومها الصحيح (اسقاط عمودي) فيترتب علينا معرفة قيم الإزاحة التضاريسية في الصورة والتي تحسب من العلاقة (١) التالية:

$$\Delta r = \frac{\Delta Z}{Z} \cdot r \quad (1)$$

حيث:

Δr : الإزاحة التضاريسية (الانزياح).

ΔZ : ارتفاع الظاهرة التضاريسية فوق مستوى المقارنة.

Z : ارتفاع القمر الاصطناعي فوق مستوى المقارنة.

r : المسافة على الصورة بين النقطة المركزية والموقع المزاح للظاهرة التضاريسية.

تخضع الصورة الفضائية SPOT لمعالجة أولية من المستوى الأول (جدول ٣) وهي عبارة عن تصحيح لأخطاء نظامية تتعلق بظروف التصوير للقمر

الاصطناعي كتأرجح مرآة التصوير ونظام تنقله على المسار الفلكي إضافة لزوايا الحيدان والدوران. أما مستويا المعالجة المتبقيان فهما خاصان بالمستثمر ويتعلقان بالتموضع الجغرافي للصورة من خلال الربط ما بين نظامي الإحداثيات (الصورة- الخريطة)، وكذلك التصحيح أو التخفيف قدر الإمكان من التشوهات الهندسية الناجمة عن كلاً من ميل حزمة أشعة التصوير والنمط التضاريسي وارتفاعات نقاط سطح الأرض، حيث يجب العمل على تحديد نموذج التشوهات الذي سيساهم في تطبيق عملية تقويم الصورة، وهذا ما يتطلب الحصول على نموذج شبكي منظم بارتفاعات سطح الأرض للمنطقة المطلوب تحديث الخريطة الطبوغرافية التي تمثلها، والمعروف بالنموذج الارتفاعي الرقمي (DEM) Digital Elevation Model^[٥].

جدول ٣. المستويات الثلاثة للمعالجة التي تحتاجها الصورة Spot.

نوع المستوى	وصف المعالجة
المستوى الأول	معايرة وضبط اللواقط وتصحيح الصورة من التشوهات النظامية المعتبرة من خلال النظام العام: دوران الأرض، العامل البانورامي، عامل المسار، زاوية الرؤية. (لا يحتوي تصحيحات هندسية)
المستوى الثاني	تعريف الشكل الهندسي للنقطة التصويرية والتموضع الجغرافي الأفضل من خلال استخدام المعطيات الداخلية والخارجية للتصوير. (لا يأخذ بالاعتبار التشوهات الناجمة عن التضاريس)
المستوى الثالث	التصحيحات من هذا المستوى تأخذ بعين الاعتبار التشوهات الناجمة عن التضاريس إضافة للتصحيحات الحاصلة في المستوى الثاني.

المراجع^[٣]

انتشر مؤخراً ما يعرف بالسوق الالكترونية للنماذج التضاريسية الرقمية، بحيث أضحت تلك النماذج سلعاً تجارية تتفاوت أسعارها تبعاً للمساحة التي تغطيها والخطوة المعتبرة للنموذج (قدرة التمييز Resolution). وسواء توفرت تلك

النماذج التضاريسية أو لم تتوفر، فإن معظم البلدان الرائدة في بناء قواعد البيانات المكانية الخاصة بها، تفضل أن تعمل على إنتاج النماذج التضاريسية الرقمية بدرجة عالية من الموثوقية Reliability وتلبي حاجة المستثمر في مجالات متنوعة ومختلفة المقاييس.

نستنتج مما سبق أن منظومة الإسقاط للصور الفضائية تختلف عن الشكل الهندسي لمسقط الخرائط الطبوغرافية. وللاستفادة من الصورة الفضائية المنفردة كمصدر للمعطيات المكانية، يجب إخضاعها للمعالجة الهندسية والتي تعرف بطريقة التقويم العمودي OrthoRectification^[٥].

تسمح عملية التقويم العمودي بتحويل مسقط الصورة المائلة (ملتقطة من نقطة تصوير القمر الصناعي) إلى مسقط صورة موازية للمنطقة المصورة، حيث تتم إعادة تمثيل التفاصيل المصورة على صورة منفردة بغية الحصول على إسقاط عمودي. فالصورة المقومة عبارة عن منتج قابل للتموضع على خارطة (معرفة إحدائياً)، ويمكن دمجها بأسلوب سهل وسريع في نظام المعلومات الجغرافية وإجراء مجموعة من القياسات عليها تتعلق بأبعاد البنى التحتية وخصائصها واستقراء المعلومات الأرضية بأنواعها المختلفة كاستكشاف التغيرات الآنية المهمة على سطح الأرض، من ظهور لمنشآت جديدة وتجمعات سكنية سيئة التوزيع، واختفاء بعض المظاهر الطبيعية.

٦. المنهجية المقترحة لتحديث الخرائط الطبوغرافية

إن العمل على تحديث خرائط المقياس 1/200000 اعتماداً على صورة فضائية أحادية، يتطلب إخضاعها لمجموعة من العمليات التي تضمن التقليل من التشوهات الهندسية الناجمة عن التباين التضاريسي. وهذا يتطلب توفر نموذج ارتفاعي رقمي يمثل تضاريس المنطقة التي نحن بصدد تحديث خريطتها، أو

العمل على إنتاجها بالمعطيات المتوفرة عن سطح الأرض. ولا يجب الاكتفاء بإنتاج هذا النموذج بل لا بد من دراسة وتحليل النتائج النهائية المحددة لدقة النموذج الارتفاعي الرقمي وتقييمها وفق الحدود المسموح بها، فالدقة لا تشير فقط إلى مدى صحة مطابقة النموذج للواقع الذي يمثلها، ولكنها تساعد في تصنيف مجال استخدام النموذج الارتفاعي الرقمي كقاعدة أساسية للمعطيات الرقمية.

ومن هنا نجد بأن المنهجية المقترحة لتحديث الخريطة تتضمن كذلك منهجية ملحقه بها لإنتاج النموذج الارتفاعي الرقمي، فاشتقاق القيمة الارتفاعية سيتم اعتماداً على خطوط الكنتور المجسدة على الخريطة من خلال مراحل متعددة وفق المنهجية المتبعة في إنتاجها، إضافة للتعديلات والتصحيحات التي تدخل في بعض هذه المراحل، كتزويد النموذج بمعلومات عن خطوط المسيلات الكبيرة وكذلك عن القمم والوديان العميقة وخطوط الانقطاع^[٦]. حيث تأتي تلك التصحيحات بغية تحسين الدقة الارتفاعية لنموذج ارتفاعي يحاكي الواقع بأفضل شكل ممكن، والتي ستعكس على دقة تقويم الصورة الفضائية، وكذلك نجاح عملية التحديث طبقاً للدقة الناتجة والمعطيات التي ستقدمها الصورة.

يمكن اعتبار منهجية تحديث الخريطة ذات المقياس 1/200000 (شكل ٢)، أنها خطة عمل دورية لتحديث كافة الخرائط الطبوغرافية ذات المقياس المتوسط والصغير، وتتلخص تلك المنهجية في المراحل التالية:

١. الحصول على صور فضائية بدقة تمييز ١٠ أمتار بصيغتها الرقمية.
٢. تحويل الخريطة من صيغتها الورقية إلى صيغة رقمية ليتم تحديثها باستمرار.
٣. إنتاج النموذج الارتفاعي الرقمي للمنطقة المطلوب تحديثها ودراسة دقته.

٤. التوضع الجغرافي للصورة الفضائية (التصحيح الهندسي من النوع الأول).

٥. التقويم العمودي للصورة اعتماداً على النموذج الارتقاعي الرقمي المنتج.

٦. توضع الصورة المقومة كخلفية بجملة إحداثيات ونظام إسقاط الخريطة.

٧. إجراء تصحيحات راديومترية لزيادة التمايز بين العناصر على الصورة.

٨. التعرف على التغييرات وتتبعها في الخريطة وإضافة العناصر الجديدة.

المؤلف.

شكل ٢. مراحل المنهجية المقترحة لتحديث الخريطة ذات المقياس 1/200000.

٧. التطبيق العملي

١-٧ مواد العمل ومنطقة الدراسة

الصورة الفضائية المتوفرة هي لمنطقة جنوب سورية وتضم مدن السويداء ودرعا، يعود تاريخ تلك الصورة الفضائية للعام ٢٠٠٨م وهي من نتاج القمر الاصطناعي الفرنسي SPOT4 حيث تبلغ دقة تمييزها ١٠ أمتار. الصورة الفضائية عبارة عن ملف نقطي مكون من ٦٠٠٩ سطر و ٨٢٣٠ عمود وباعتبار دقة التمييز فإنها تغطي منطقة أبعادها بحدود (٨٢×٦٠) كم، وهي صورة وحيدة اللون panchromatic بتدرج لوني من ٠ إلى ٢٥٥.

أما الخريطة الطبوغرافية المتوفرة والمطلوب تحديثها فهي خريطة السويداء ذات المقياس 1/200000 والتي يعود إصدارها للعام ١٩٨٦م. كما تم الاعتماد في هذا البحث على برنامج ER Mapper 6.4 من شركة ERDAS، وهو برنامج يستخدم لمعالجة وتنظيم وإدارة الصور الرقمية الشبكية من مصادر متنوعة.

٢-٧ بناء النموذج الارتفاعي الرقمي

إن المنهجية المقترحة في هذا البحث لتحديث الخرائط متوسطة المقياس، تعتمد على صورة فضائية أحادية مقومة بنموذج ارتفاعي رقمي. ولقد تم اعتماد أسلوب بناء هذا النموذج انطلاقاً من منحنيات التسوية الارتفائية المجسدة على الخرائط، وذلك من خلال إجراء مسح رقمي للخريطة ومعالجتها من حيث ربطها بجملية الإحداثيات وتصحيحها من التشوهات التي تعاني منها المادة الورقية للخريطة، إضافة لتلك التشوهات الناجمة عن عملية المسح الرقمي. تحول الصورة بعد ذلك من الصيغة النقطية إلى الصيغة الاتجاهية من خلال عزل مؤشر الارتفاعات في الخريطة وهي خطوط الكنتور ذات التباعد المتساوي ٢٠ متراً، والتي انطلاقاً منها تم بناء النموذج التضاريسي الرقمي من النمط TIN وإجراء التصحيحات اللازمة على هيكله، كتعزيز النموذج بخطوط تغير الميل المفاجئة والانهدامات وخطوط

المسيلات ثلاثية الأبعاد. أخيراً يتم استخلاص شبكة منتظمة من النقاط الارتفاعية المعروفة بالنموذج الارتفاعي الرقمي DEM (شكل ٣)، وإجراء الاختبارات اللازمة لتحديد الخطوة المثالية للنموذج الارتفاعي الرقمي وتقييم دقته الارتفاعية.

شكل ٣. الهيكل المنتظم للنموذج الارتفاعي الرقمي وأنماط تمثيله الرقمي.

يمكن تفصيل مرحلة إنتاج النموذج الارتفاعي الرقمي ودراسة دقته في الخطوات التالية:

- ١- اختيار الخطوة المثالية للنموذج الارتفاعي الرقمي.
- ٢- حساب مجالات الثقة للمتوسط الحسابي.
- ٣- حساب مجالات الثقة للتباين والانحراف المعياري (الدقة الارتفاعية).
- ٤- حساب الدقة الكلية للنموذج الارتفاعي الرقمي.

١-٢-٧ اختيار الخطوة المثالية للنموذج الارتفاعي الرقمي

إن الخطوة المثالية للنموذج الارتفاعي الرقمي ما هي إلا قدرة تمييز النموذج، أي المسافة فيما بين النقاط الارتفاعية على الهيكل الشبكي المنتظم والتي من أجلها يمكن الحصول على أفضل دقة ارتفاعية للنموذج الارتفاعي.

لاختيار الخطوة المثالية للنموذج الارتفاعي الرقمي تم فرض خطوات مختلفة تتراوح من ١٠٠٠ متر إلى ١٠٠ متر لنفس النموذج الارتفاعي الرقمي الممثل لمنطقة الدراسة. وقد تم اعتماد مجموعة من النقاط الارتفاعية الموجودة على الخريطة كعينة عشوائية (نموذج مقارنة) مع استبعاد كل النقاط التي استخدمت في

بناء وتحسين النموذج التضاريسي الرقمي، مما يفترض أن يؤدي عملياً إلى عينة "معبرة" حسب مفاهيم الإحصاء^[٢]. وقد بلغ حجم العينة الكلي في الخريطة تبعاً لعدد النقاط المتوفرة فيها ٩٩ نقطة، حيث ستستخدم لحساب الفروقات الارتفاعية فيما بينها وبين النقاط المقابلة لها من النماذج ذات الخطوات المختلفة بهدف تقييم الخطوة المثالية وتقدير الدقة الارتفاعية للنموذج الارتفاعي الرقمي.

أ- حساب الأخطاء وبناء المخطط التكراري

تمثل الفروقات بين الارتفاعات المعلومة لنقاط العينة والارتفاعات المقابلة لها في النموذج الارتفاعي الرقمي ما يعرف بالأخطاء الارتفاعية، على اعتبار أن قيم ارتفاعات نقاط العينة صحيحة. أما ارتفاع أية نقطة من النموذج التضاريسي الرقمي TIN فنحصل عليه بمعرفة إحداثيات تلك النقطة وتحديد المثلث الذي تقع فيه واستنتاج قيمتها الارتفاعية من معادلة السطح المعرفة بالنقاط الثلاثة المشكلة للمثلث الارتفاعي. وانطلاقاً من هذه الفروقات يمكن حساب الخطأ المتوسط التريبي كمؤشر للدقة ومنه نحصل على الانحراف المعياري وقيمه موضحة في جدول ٤.

جدول ٤. قيم الانحراف المعياري للنماذج الرقمية ذات الخطوات المختلفة.

الخطوة (متر)	1000	900	800	700	600	500	400	300	200	100
الانحراف المعياري (متر)	3.9	3.5	3.2	3	2.9	2.8	2.6	2.6	2.6	2.6

المؤلف.

نلاحظ من هذا الجدول تناقص الخطأ المتوسط التريبي (زيادة الدقة) بتناقص الخطوة بالنسبة لكافة النماذج، وهذا التناقص يمكن اعتباره قابلاً للإهمال بدءاً من القيمة ٤٠٠ متر حيث نلاحظ ثبات الدقة مع تناقص الخطوة (شكل ٣). بمعنى أن عملية تكثيف النموذج باتجاه الخطوة الأصغر من خلال عمليات

التوسط الحسابي لن تغير من الدقة النهائية للنموذج الارتفاعي الرقمي، فيكون النموذج ذي الخطوة الاقتصادية ٤٠٠ متر (أقل عدداً وحجماً) هو النموذج الارتفاعي الأفضل دقة. وهذا لا يعني بالضرورة أن النماذج ذي الخطوة الأصغر غير دقيقة ولكنها تمثل ملفات رقمية أكبر حجماً وأقل مرونة في المعالجة الرقمية.

ب- التحقق من شكل توزع الأخطاء

يمكن أن ندعم حكمنا الأولي على أن الدقة المثالية للنموذج الارتفاعي الرقمي تعود للنموذج ذي الخطوة ٤٠٠ متر، وذلك بدراسة توزيع التكرار النسبي للفروقات الارتفاعية التي نحصل من خلالها على أشكال منحنيات انتشار الأخطاء تبعاً للخطوات المختلفة للنموذج الارتفاعي الرقمي.

شكل ٣. التمثيل البياني لقيم الخطأ المتوسط التريبع تبعاً للخطوات المختلفة.

من المعروف إحصائياً أن التوزيع المثالي للأخطاء يأخذ شكل منحنى التوزيع الطبيعي العشوائي، المعروف بتوزيع Gauss والتي تعطى معادلته (٢) بالشكل:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

حيث:

σ : الانحراف المعياري لمجموعة الأخطاء

m : المتوسط الرياضية لمجموعة الأخطاء

كلما كان منحنى التوزيع الطبيعي متناظراً بالنسبة للمحور الصفري وأكثر تحديباً، كلما كانت الدقة الممثلة لهذه العينة الأفضل بالمقارنة مع منحنيات أقل تناسلاً وتحديباً^[٢].

جدول ٥. قيم التردد النسبي تبعاً للخطوات المقترحة ومجالات الأخطاء.

مجالات الأخطاء	400		500		600		700	
	q	q/n	q	q/n	q	q/n	q	q/n
[-8,-4]	2	0.034	5	0.085	4	0.068	3	0.051
[-4,-2]	6	0.102	3	0.051	4	0.068	7	0.119
[-2,0]	13	0.220	12	0.203	13	0.220	12	0.203
[0,2]	20	0.339	22	0.373	20	0.339	18	0.305
[2,4]	12	0.203	12	0.203	12	0.203	13	0.220
[4,6]	6	0.102	5	0.085	5	0.085	5	0.085

المؤلف.

حيث:

q: عدد مرات وقوع الخطأ ضمن المجال الواحد،

q/n: التردد النسبي لوقوع الخطأ،

n: حجم العينة وتبلغ ٩٩ نقطة.

للحصول على منحنيات توزع الأخطاء بشكل جدولاً لتوزع قيم الأخطاء ضمن مجالات محددة كما في جدول ٥. ويتمثل مخطط التردد النسبي نلاحظ من

شكل ٢، بأن مخطط التردد النسبي يوحى بالتوزيع الطبيعي بالنسبة لكافة النماذج ذات الخطوات المختلفة. إلا أن منحنى توزيع الأخطاء للنموذج ذي الخطوة ٤٠٠ متر هو الأفضل لكونه الأكثر تحديباً وتناظراً بالمقارنة مع باقي المنحنيات.

شكل ٢. منحنيات التوزيع للترددات النسبية للأخطاء تبعاً للخطوات المختلفة للنماذج الارتفاعية الرقمية.

٢-٢-٧ حساب مجالات الثقة لقيمة المتوسط الرياضي

بعد أن تم التحقق من أن منحنى التوزيع للأخطاء يتبع التوزيع الطبيعي العشوائي، يمكننا بمجال ثقة $\alpha = 5\%$ و ب $(n-1)$ درجة حرية أن نحدد المجال الذي تتواجد فيه القيم المجهولة. أي أنه يتوجب علينا تحديد مجال الخطأ الذي يترتب عليه اعتماد المقدّر كقيمة مجهولة وباحتمال كبير.

فمن المعلوم أن قيمة المتوسط الحسابي يجب أن تكون مساوية للصفر نظرياً وذلك في حال غياب الأخطاء النظامية، إلا أن تلك القيمة تحدد إحصائياً من خلال مقدار تلك القيمة ووفقاً لمجالات الثقة التالية (٣):

$$p\{c_1 \leq M_{(x)} \leq c_2\} = 1 - \alpha \quad \therefore \begin{pmatrix} c_1 = \bar{x} - t_q \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \\ c_2 = \bar{x} + t_q \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \end{pmatrix} \quad (3)$$

حيث : $M_{(x)}$ المقدّر الإحصائي لقيمة المتوسط الحسابي،

σ : قيمة الانحراف المعياري،

t_q : القيمة الحرجة لمعامل التوزيع Student

نحصل من جداول Student باحتمال 95% و ب 98 درجة حرية على القيمة الحرجة $t_q = 1.96$ ، وبالتالي نحصل على مجال ثقة المتوسط الرياضي:

$$\boxed{-0.61 m < M(x) < 0.54 m}$$

٣-٢-٧ حساب مجالات الثقة لقيمة التباين والانحراف المعياري

كما يمكن أن نحصل على مجال الثقة للتباين بمجال ثقة $\alpha = 5\%$ وبـ

$(n-1)$ درجة حرية وفق الاحتمال الموضح التالي (٤):

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \bar{\sigma}^2 \frac{n-1}{\chi_1^2} & p_1 &= p\{D(x) < c_1\} = 1 - \alpha/2 \\ c_2 &= \bar{\sigma}^2 \frac{n-1}{\chi_2^2} & p_2 &= p\{D(x) < c_2\} = \alpha/2 \end{aligned} \right\} p\{c_1 < D(x) < c_2\} = 1 - \alpha = p_1 - p_2 \quad (4)$$

حيث: تعتبر χ_1^2, χ_2^2 النقاط الحرجة لتوزيع k2 مربع، وتؤخذ قيمها من الجدول الإحصائي الخاص بهذا التوزيع. وبالتالي نجد أن $\chi_2^2 = 72.506$ و $\chi_1^2 = 127.3$ ، ويكون مجال الثقة للتباين كما يلي:

$$\boxed{5.20 m \leq D(x) \leq 9.14 m}$$

وبالتالي فإن مجال الثقة للانحراف المعياري يكتب على الشكل التالي (٥):

$$\bar{\sigma} \sqrt{\frac{n-1}{\chi_1^2}} \leq \sigma \leq \bar{\sigma} \sqrt{\frac{n-1}{\chi_2^2}} \quad (5)$$

$$\boxed{2.28 \text{ m} \leq \sigma \leq 3.02 \text{ m}}$$

٢-٤ حساب الدقة الكلية للنموذج الارتفاعي الرقمي

إن الدقة الارتفاعية التي حصلنا عليها من خلال الدراسة السابقة تعطي تقديراً لقيم الأخطاء الناتجة عن اشتقاق النموذج الارتفاعي الرقمي من خطوط الكنتور في الخريطة ذات المقياس 1/200000. وبدورها تحمل خطوط الكنتور كبيانات ارتفاعية دقة ارتفاعية تختلف من خريطة لأخرى تبعاً لمصدرها والمقياس المستخدم، إلا أنها تساوي بشكل عام ثلث التباعد المتساوي لخطوط الكنتور، وتعتبر قيمة مستقلة عن الدقة الأولية للنموذج الارتفاعي. أي أن خريطة ذات تباعد متساو لخطوط الكنتور مقداره ٢٠ مترًا تكون الدقة الارتفاعية الأولية مساوية تقريباً ($\sigma_0 \approx 6m$).

وبحسب نظرية استقلال الأخطاء وبتطبيق قانون انتشار الأخطاء متوسطة التربيع فإنه يمكن الحصول على الدقة الكلية للنموذج الرقمي ذي الخطوة ٤٠٠ متر بتطبيق العلاقة التالية (٦) إضافة:

$$\bar{\sigma}_{tot} = \sqrt{\sigma_0^2 + \sigma^2} \quad (6)$$

ويمكن التعبير عن مجال ثقة الانحراف المعياري الكلي وفق العلاقة التالية:

$$\boxed{6.42m \leq \sigma_{tot} \leq 6.72m} \quad \sqrt{6^2 + 2.28^2} \leq \sigma_{tot} \leq \sqrt{6^2 + 3.02^2} \Rightarrow$$

ومن الملاحظ أن حدود مجالات الثقة التي نتجت ضيقة وقريبة جداً من قيم الدقة الارتفاعية للخريطة الأصل المستخدمة في إنتاج النموذج التضاريسي الرقمي. وهذا بدوره يشير إلى نجاح مهمة إنتاج النموذج الارتفاعي انطلاقاً من

خطوط الكنتور، ويمكن اعتباره مبدئياً نموذجاً قابلاً للاستخدام في تقويم الصورة الفضائية.

٣-٧-٣-٧ التقويم العمودي للصورة الفضائية

تعتمد عملية التقويم العمودي على النموذج الارتفاعي الرقمي الذي تم إنتاجه وقد أصبح متوفراً بخطوة مثالية ٤٠٠ متر لمنطقة الدراسة. حيث توصلنا إلى تقدير دقته الارتفاعية والتي تبقى ثابتة مع إمكانية تكثيف دقة تمييز هذا النموذج حتى يصل إلى ١٠٠ متر وما دون حتى تتطابق كل خلية من النموذج الارتفاعي مع خلية من الصورة الفضائية. إذاً للحصول على الصورة المقومة علينا اتباع الخطوات التالية:

١- اختيار نقاط التحكم الأرضية GCPs Ground Control Points.

٢- ربط الصورة الفضائية بالنظام الإحداثي المرجعي للخريطة.

٣- تنفيذ التقويم العمودي على الصورة الفضائية.

٤- تطبيق التصحيح الراديومتري على الصورة الفضائية.

٥- دراسة الدقة المستوية لعملية التقويم العمودي للصورة الفضائية.

٦- تحديث الخريطة الطبوغرافية.

٣-٧-١ اختيار نقاط التحكم الأرضية GCPs

يرتكز تصحيح الصورة من التشوهات الهندسية في الدرجة الأولى على تعريف نموذج التشوهات، الذي ينتج من تحديد العلاقة الرياضية بين إحداثيات الصورة الفضائية قبل التصحيح وإحداثيات النظام المرجعي المستخدم (الخريطة الطبوغرافية). وللحصول على نموذج التشوهات الهندسية فلا بد من الاعتماد على نقاط تحكم أرضية موزعة بشكل متجانس على كامل الصورة الفضائية، وذلك

للحصول على نتائج مرضية في التوضع الجغرافي للصورة الفضائية المعروفة بعملية الربط المرن الآلي، والتي هي عبارة عن نوع من تصحيح التشوهات الهندسية ولكن بعدد محدود من النقط. وقد تم اختيار وتحديد ١٥ نقطة تحكم على كل من الخريطة والصورة، باعتبارها نقاط مميزة ودقيقة تمثل نقاط تقاطع المحاور الطولية كالطرق ونقاط حدود المسطحات الأفقية كالبحيرات والمنشآت الصناعية.

٧-٣-٢ ربط الصورة الفضائية بالنظام الإحداثي المرجعي للخريطة

تتلخص تلك المرحلة بالتوضع الجغرافي Georeferencing للصورة الفضائية في نظام إحداثيات الخريطة الطبوغرافية، وذلك وفق مرحلتين متتاليتين من الإجراءات واللتين تنفذهما معظم برامج معالجة الصور الجوية والفضائية، دون أن تأخذ بالاعتبار نمذجة الحزمة المنظورية للتصوير الفضائي ولا حتى الثوابت الأصلية للقمر الاصطناعي التصويري^[٧].

تنفذ المرحلة الأولى من التوضع الجغرافي بتطبيق طريقة التحويل المطابق Helmert الذي يمثل تحويلاً هندسياً يسمح بانتقال ودوران المحاور الإحداثية وتطبيق تغير ثابت في المقياس. يمكن اعتبار هذا التحويل توجيهاً داخلياً Inner Orientation للصورة الفضائية، وتكون معادلاته (٧) على الشكل التالي:

$$\begin{cases} x = a + c\zeta - d\eta \\ y = b + d\zeta + c\eta \end{cases} \quad (7)$$

حيث: a, b, c, d وسطاء التحويل الأربعة للتحويل Helmert.

يتطلب هذا التحويل نقطتين مترافقتين فقط بين الصورة والخريطة باعتباره يضم أربعة وسطاء تحويل مع اعتبار عامل المقياس هو نفسه بالاتجاه y وبالاتجاه x . يؤمن هذا التحويل التوضع الأولي للصورة على الخريطة وبالتالي نلاحظ عدم التطابق التام لبعض العناصر المتماثلة والموجودة على كل من

الخريطة والصورة الفضائية، كتقاطع الطرق الرئيسية أو مراكز أشكال هندسية محددة، كما هو مبين في شكل ٤.

شكل ٤. يوضح عدم تطابق العناصر الخطية (اللون الأخضر) من الخريطة مع عناصر الصورة اليسرى. بينما يظهر التطابق في الصورة اليمينية وذلك بحسب مرتبة كثير الحدود وتوزع نقاط التحكم الأرضية.

لجعل الصورة الفضائية تنطبق أفضل ما يمكن على الخريطة، فعلينا التخفيف من تأثير التشوهات الهندسية من خلال عملية الربط المرن الآلي Rubbersheeting^[٨]، والتي تهدف إلى إعادة النقاط إلى وضعها الصحيح تقريباً (في المستوي ثنائي البعد) وذلك باعتبار السطح الذي تتوضع عليه سطحاً مرناً.

وبما أنه في هذه الحالة تكون التشوهات غير معلومة، فيفضل تنفيذ عملية الربط المرن الآلي بين الصورة المراد تصحيحها والخريطة باستخدام طريقة التحويل المتصل الجزئي غير المطابق Piecewise Affine، الذي يعتبر تصحيحاً هندسياً ثنائي البعد ولكن بمرتبة محدودة من النقاط تعطى معادلته (٨) على الشكل التالي:

$$\left. \begin{aligned} x' &= ax + by + c \\ y' &= dx + ey + f \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

حيث: x', y' : إحداثيات نقطة التحكم على الصورة.

x, y : إحداثيات ذات نقطة التحكم ولكن ضمن نظام مرجعي معروف.

a, b, c, d, e, f : ثوابت كثير الحدود من المرتبة الأولى.

تمثل ثوابت التحويل تلك انتقالاً ودوراناً وتغييراً في المقياس للصورة الفضائية، وبما أن كل نقطة تحكم تعطي معادلتين فتكفي ثلاثة نقط تحكم معلومة لحساب الثوابت الست لمعادلتها Piecewise Affine.

تفيد هذه النقاط في حساب نموذج التشوهات للصورة على شكل معادلة كثيرة الحدود، وهذه الطريقة في المعالجة تتطلب في الغالب توافقاً بين الجودة الهندسية المرغوبة وعدد النقاط التحكم المطلوبة ذات الدقة الجيدة.

من الجدير ذكره أنه عند حساب ثوابت التحويل بشكل أدق فإن ذلك سينعكس بدوره في تحسين عملية الربط الآلي المرن، وهذا يتطلب إجراء قياسات فائضة واللجوء إلى طريقة حدود التربيعات الصغرى Least Square Method ، وذلك بأخذ عدد أكبر من النقاط المطلوبة مساو لـ $(n+1)(n+2)/2$ من أجل تحديد تلك الثوابت حيث n هي مرتبة كثير الحدود. وبما أنه تم اختيار ١٥ نقطة تحكم أرضية فنجد بأن مرتبة معادلة كثير الحدود هي من المرتبة الرابعة، والتي تؤمن أحسن تموضع ممكن للصورة الفضائية وأقل تأثراً بأخطاء تحديد النقاط، وبالتالي تحقيق أفضل تطابق بين العناصر المتماثلة كما هو مبين في شكل ٤.

٣-٣-٧ تطبيق التقويم العمودي على الصورة الفضائية

تتطلب هذه العملية في البداية تعريف مجموعة من نقاط التحكم الأرضية Ground Control Point (GCP) في نظام الإحداثيات الخاص بالخريطة، وكذلك نظام إحداثيات الصورة الفضائية المعروف برقم سطر وعمود كل خلية بدءاً من الزاوية اليسارية العلوية. وبناء على عدد من الوسائط المعرفة في برنامج ErMapper 6.3 والخاصة بالقمر الاصطناعي SPOT4 كالبعد المحرقي للتصوير

وارتفاع التصوير، إضافة لثوابت الإسقاط الخرائطي المعتمد (النظام المرجعي للخريطة)، يتم حساب عناصر التوجيه الداخلي والخارجي للصورة أي موقع القمر الاصطناعي لحظة التصوير بالنسبة للمنطقة المصورة.

يعتبر التقويم العمودي للصورة الفضائية تصحيحاً هندسياً يأخذ بالاعتبار التشوهات الناجمة عن التضاريس، ويعتمد على عدد غير محدود من النقاط الارتفاعية التي تتطابق مع كل خلية من خلايا الصورة الفضائية. وبما أن النموذج الارتفاعي الرقمي عبارة عن شبكة منتظمة من النقاط الارتفاعية قابلة للتموضع على الصورة المرجعة إحدائياً، فإنه يتم تعريف النموذج الارتفاعي الرقمي الذي يغطي المنطقة المصورة كصورة مصفوفاتية مؤلفة من مجموعة من الخلايا المتوافقة مع كل خلية من الصورة الفضائية. وبما أن دقة تمييز النموذج تختلف عن دقة تمييز الصورة الفضائية فإنه يتم بعمليات توسط ارتفاعية تكثيف المعلومات الارتفاعية للخلايا الوسطية والمتوافقة مع دقة التمييز الفضائية للصورة. هذا بدوره يسمح بتقدير قيمة الانزياح (التشوه الهندسي) لكل خلية وتنفيذ التصحيحات الهندسية للصور الفضائية، فيكون الناتج صورة مقومة ومتوضعة في جملة الإحداثيات OrthoRectification، قابلة للتراكب على الخريطة الطبوغرافية (شكل ٥).

٣-٧-٤ تطبيق التصحيح الراديومتري على الصورة الفضائية

قد تظهر على الصورة صعوبة في استكشاف تفاصيل المعالم وأبعادها بدقة، بسبب العوامل الطبيعية السائدة لحظة التصوير كاختلاف السطوع الشمسي ضمن الصورة نفسها. ولنتمكن من تمييز التفاصيل الموجودة على الصورة بشكل أفضل تم تطبيق تصحيح راديومتري وهو عبارة عن نوع من المجانسة بين الدرجات اللونية للصورة بشكل يسمح بتحسين التباين العام ويبعد تباين السطوع

الشمسي في الصورة، مما يحسّن من نوعية الصورة ويجعلها قابلة للتفسير على نحو سهل (شكل ٦).

شكل ٥. يبين توضع الصورة المقومة عمودياً على الخريطة مع رقمنة العناصر المميزة على الخريطة المرجعة إحداثياً.

شكل ٦. الاختلافات الواضحة بين الصور قبل وبعد معالجتها وفق التصحيح الراديومتري.

٥-٣-٧ دراسة الدقة المستوية لعملية التقويم العمودي

تهدف عملية التقويم العمودي إلى الحصول على صورة مصححة من التشوهات الهندسية التي تعاني منها الصورة الفضائية، إلا أن هذا لا يعني

بالضرورة أن تتطبق كافة الكائنات الموجودة على الصورة مع مثيلاتها من الخريطة. وبالتالي يمكن أن نعبر إلى حد ما عن جودة عملية التقويم، بمقارنة مرئية بين مرحلة التوضع الجغرافي (تصحيح هندسي أولي) ومرحلة التقويم العمودي للصورة الفضائية.

تمت رقمنة المنطقة المشتركة بين الصورة والخريطة من طرقات بدرجاتها المختلفة وحدود المدن والتجمعات السكنية لمعرفة مدى تطابقها مع العناصر المقابلة لها من الصورة، وللحكم على دقة الصورة المقومة كأداة تسمح بتحديث الخرائط الطبوغرافية. فنجد مثلاً في شكل ٧ مدى تقارب الطريق على الصورة المقومة من مثيله على الخريطة، بينما يبتعد الطريق عن مثيله في الصورة المتموضعة جغرافياً.

شكل ٧. مقارنة مرئية عن مدى انحراف عناصر من الصورة الموقعة جغرافياً (يسار) والمقومة عمودياً (يمين) عن مثيلاتها في الخريطة.

وللحكم على جودة التقويم العمودي علينا إعطاء قيمة للدقة المستوية لهذه الفروقات فيما بين العناصر من الصورة الفضائية ومقارنتها مع دقة الخريطة التي ستمثل مصدر المعطيات الواجب تحديثه.

نفذت الاختبارات على أنواع مختلفة من المناطق التي تنتشر فيها حدود التجمعات السكنية، والمنشآت الصناعية ومسطحات البحيرات وشبكة المواصلات.

حيث تم قياس انزياح مجموعة من العناصر بالاتجاهين X, Y بين الصورة ومثيلاتها من الخريطة، وذلك وفق المرحلة الأولى (التموضع الجغرافي) والمرحلة الثانية (التقويم العمودي) كما هو مبين في جدول ٦.

تم حساب محصل الانزياح وتباين تلك القيمة عن الصفر النظري (تطابق العناصر مع بعضها) تم الحصول على قيم الانحراف المعياري المعبرة عن الدقة المستوية. وقد تبين أن دقة التوضع في جملة الإحداثيات كانت مساوية 198.73 متر، بينما دقة تقويم الصورة عمودياً هي بحدود ٥٦,٢٨ متر، وهي قيمة أدنى من دقة الخريطة والتي تكون مساوية ٠,٣١ ملمتر من مقياس الخريطة أي ٦٠ متراً.

ومما سبق يمكن أن نقبل بجودة عملية التقويم العمودي على الصورة الفضائية واستخدامها في تحديث الخريطة لكون الدقة التي حصلنا عليها أقل من خطأ المقياس للخرائط الخاضعة للتحديث (1/200000). وهذا بدوره يعطي انطباعاً عن أهمية ودقة النموذج الارتفاعي الرقمي الذي تم إنتاجه ليلبي هدف تلك المرحلة من البحث في تقويم الصورة الفضائية الأحادية.

٦-٣-٧ تحديث الخريطة الطبوغرافية

لتنفيذ مهمة تحديث الخريطة يجب تعريف محيط المنطقة التي نرغب في معاينتها، وإنشاء الملف الخاص بالتحديث كقاعدة بيانات مكونة من كافة العناصر المرقمة من الخريطة الطبوغرافية والصورة المقومة التي تغطي كامل تلك المنطقة.

يتم تحديث الخريطة تبعاً للدلائل التي تشير عن كشف التغيرات، من خلال معاينة تلك العناصر المتراكبة على الصور المقومة عمودياً. حيث تنفذ مهمة التحديث وتحصيل المعطيات باستخدام الأدوات الملائمة من خلال ترقيم كافة التفاصيل المستحدثة على الصورة المقومة عمودياً نتيجة للتطورات الطارئة على أرض الواقع، والتي لا نجدها على الخريطة الطبوغرافية. كما يمكن إجراء

التعديلات اللازمة لعناصر موجودة مسبقاً على الخريطة والتي طرأت عليها تغييرات بمرور الزمن، إضافة إلى إزالة العناصر التي لم يعد لها وجود على أرض الواقع.

جدول ٦. يبين الفروقات المقاسة بين عناصر من الصورة مع مثيلاتها من الخريطة وفق مرحلتي التصحيح الهندسي (التوضع في جملة الإحداثيات، والتقويم).

	<i>Image Rubber sheeting</i>			<i>Image Ortho rectification</i>		
	DX(m)	DY(m)	DS(m)	DX(m)	DY(m)	DS(m)
1	24.71	227.39	228.73	12.57	40.84	42.73
2	54.37	202.67	209.84	11.01	33.03	34.82
3	24.71	98.86	101.90	15.72	58.41	60.49
4	88.97	78.33	118.54	10.13	52.48	53.45
5	115.24	223.30	251.29	12.72	50.77	52.34
6	9.74	175.37	175.64	25.01	48.62	54.67
7	9.57	95.73	96.21	25.19	28.46	38.00
8	30.50	61.01	68.21	18.62	31.03	36.19
9	75.58	264.55	275.12	50.37	37.12	62.57
10	3.64	98.33	98.40	39.46	49.01	62.92
11	242.96	142.93	281.89	53.15	31.27	61.67
12	29.46	206.22	208.31	51.21	47.56	69.89
13	125.13	208.56	243.22	58.61	28.97	65.38
14	34.12	51.19	61.52	11.69	18.66	22.02
15	190.30	129.76	230.33	32.51	62.74	70.66

المؤلف.

فمثلاً يبين شكل ٨ التوسع الملحوظ لمدينة السويداء حسب تاريخ الصورة الفضائية (٢٠٠٨) عما كانت عليه المدينة بتاريخ الخريطة (١٩٨٦). كما أنه يمكننا تمييز حدود التجمعات السكنية في المدينة وضواحيها وتمييز نسيجها العمراني وحتى الصروح الحكومية والمنشآت الصناعية.

شكل ٨. يبين الخلاف الواضح لحدود مدينة السويداء بين الصورة والخريطة.

كما يمكن العمل على إضافة العناصر الجديدة غير الموقعة على الخريطة، كظهور تجمعات سكنية جديدة وعدد من المنشآت الصناعية الضخمة وبحيرات صناعية وسدود وشبكة طرق من درجات متعددة (شكل ٩).

شكل ٩. يظهر الصورة اليسارية قبل إنشاء طريق فرعي وإجراء التحديث وفق الصورة اليمينية على الخريطة بمتابعة دورية زمنية للصور عن المنطقة.

نجد مما سبق ضرورة وأهمية تحديث الخريطة الطبوغرافية وبخاصة أنه وضمن مساحة بحدود (٨٢×٦٠) كيلومتراً مربعاً فقط والتي تغطيها الصورة الفضائية المقومة، نجد أنه تم تحديث الخريطة ذات المقياس 1/200000 العائدة

لهذه لمنطقة بنسبة تقارب ٥٠٪ من عناصر البنى التحتية، وهذه التحديثات مثلت في الغالب شبكة الطرق وتجمعات سكنية حديثة ومنشآت أو مشاريع قيد التنفيذ.

٨. النتائج والخلاصة

تسمح الصور الفضائية بدراسة كم كبير من التغيرات بكلفة معقولة، وهذا ما يمكنها من إنتاج الخرائط المخصصة لمتابعة الظواهر الأرضية، والذي يكون حتماً من شبه المستحيل تنفيذه باستخدام الوسائل التقليدية. إن استخدام الصورة المقومة عمودياً من أجل تحديث والخرائط يحمل ميزات متعددة من أهمها تأمين قاعدة جديدة لمعطيات الصور الرقمية تسمح بتسريع طرق التحديث الحالية للخرائط بالمحافظة كلياً على دقتها.

إن الوصول لتحديث الخريطة الطبوغرافية وفق المنهجية المقترحة في هذا البحث لم يتحقق إلا بعد أن توفرت العناصر والمنتجات الأساسية اللازمة لتلك الغاية، وهو النموذج الارتفاعي الرقمي حيث تركز الاهتمام بهذا المنتج في تقويم الصورة الفضائية من أجل رصد التغيرات الطارئة على الخارطة وضرورة تحديثها. ومن خلال المنهجية المقترحة لتحديث الخرائط المساحية فقد توصلنا إلى النتائج والتوصيات التالية:

◀ الدقة الارتفاعية الوسطية الناتجة عن النموذج من أجل الخطوة المقترحة ٤٠٠ متر كانت مساوية ٦,٥ متر وهي قريبة من الدقة الارتفاعية للخريطة حيث قيمة التباعد المتساوي فيها لخطوط الكنتور ٢٠ متراً.

◀ يمكن تعميم المنهجية المقترحة لبناء النموذج الارتفاعي الرقمي على خرائط بمقاييس أكبر ومن أجل مصادر مختلفة للصور الفضائية ذات المقاييس المتنوعة وحتى الجوية منها. وقد دلت التجربة أن الدقة الارتفاعية للنموذج كانت قريبة من دقة الخريطة حسب التباعد المتساوي لخطوط الكنتور.

◀ دقة تقويم الصورة الفضائية بالاعتماد على النموذج الارتفاعي الرقمي بلغت ٥٦,٢٨ متر، وهي قيمة قريبة من الدقة الترسيمية للخريطة ٦٠ متراً (مقياس الخريطة 1/200000) مما يجعل التحديث اعتماداً على الصور المقومة منهجية مجدية ومقبولة.

◀ بإجراء المقارنة بين الخريطة والصورة المقومة وجدنا أن عملية التحديث مطلب ضروري، حيث بلغت نسبة العناصر الجديدة المضافة ٥٠٪ من العناصر والكائنات الموجودة أصلاً على الخريطة.

◀ إن حادثة المعطيات الفوتوغرافية مهمة جداً وهذا ما يتطلب وضع برنامج زمني لملاحقة التغيرات الطارئة على سطح الأرض، فالصورة تفقد حداثتها تدريجياً بدءاً من اللحظة التي تلتقط بها. وعادة ما تتطلب دورة التحديث مدة زمنية يمكن أن تتراوح من سنة إلى ثلاث سنوات تبعاً للوسط المكاني الذي يخضع للتغيرات والتطورات المستمرة على أرض الواقع.

المراجع

[١] **DURAND, Dominique**, *Les spatiocartes Méthodes et exemples de réalisation, Groupement pour le Développement de la Télédétection Aérospatiale (GDTA)*, Toulouse, France (1996).

[٢] **جزماتي، سامح، الإحصاء والأخطاء (٢)**، منشورات جامعة حلب، سوريا (١٩٩٣).

[٣] **Kay, S., Spruyt, P. and Alexandrou, A.**, *Geometric Quality Assessment of Orthorectified VHR Space Image Data*, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, p: 484-491, (2003)

[٤] **Leprince, S., Barbot, S., Youb, F. and Avouac, J. P.**, Automatic and precise orthorectification, coregistration, and subpixel correlation of satellite images, Application to ground deformation measurements, *IEEE Trans. Geoscience Remote Sensing*, **45**: 1529-1558 (2007).

[٥] **CHOPIN, Bernard.**, *Utilisation de l'orthophotoplan pour la mise à jour du plan de gestion parcellaire*, Lille Métropole Communauté Urbaine (LMCU), France (1997).

[٦] **Bruce, H.C.**, *The highs and lows of Digital Elevation Model (DEM) error - developing a spatially distributed DEM error model*, University of Greenwich, Chatham Maritime, Kent, ME4 4TB, UK (2001).

[٧] **Kay, S., Spruyt, P., Zielinski, R., Winkler, P., Mihály, S. and Ivan, G.**, *Quality checking of DEM derived from satellite data (SPOT and SRTM)*. Global Developments in

Environmental Earth Observation from Space, (2005).

Gonçalves, J. A. and Marçal, A. R. S., *Automatic ortho-rectification of ASTER images by [٨] matching digital elevation models*, Image Anal. Recog.4633, (2007).

Study of Proposed Methodology for Updating Topographical Maps Using Satellite Image Orthorectified by DEM

A. M. Kamel and B. T. Alnefar

Department of Geomatics, Faculty of Environmental Design, King Abdulaziz University, Jeddah, Saudi Arabia

Abstract. The research aims to find an appropriate scientific methodology to updating the 1:200000 scale. Topographic maps which refer by their history to different issues. The proposed strategy can follow all changes on the ground and implement them as soon as possible and at minimal cost by depending on the unique Satellite images instead of resorting to the couples of the Aerial photographs which require obtaining it in considerable period of time in addition to the equipment and accessories which are so expensive.

To benefit from the unique spatial image so it must be corrected from the geometric distortions by the Orthorectification method as the modern digital way to treat the Satellite image which we did according on the DEM (Digital Elevation Models) for the areas on the earth which their maps need to be updating .

Therefore this DTM was produced on the basis of the 1:200000 scale maps utilizing the 20 m contour lines, so the model's height accuracy was 6.5 m and this value represent the nearest value from the Map height accuracy of 1/200000 .

We Implemented the methodology proposed in this research on the Satellite image 10m resolution SPOT4 for the south region of Syria, and from it we find the Orthorectification accuracy equal 56.28 m, so this value is the nearest value from the graphical accuracy map 1:200000 scale which equal 60m.

By comparing between the map produced in 1986 and the Orthorectified Satellite Image captured in 2008, we could observe all changes on the earth and we found the appearance of new elements being inexistent on the map which the total of this recent elements just 50% of the existent elements on the map, in addition of Updating all details modification as a result of the expansions of cities and the changement of the track roads.

Keywords: Map Updating, Orthorectification, Rubbersheeting, DEM, SpatioMap, Contour lines, Standard Deviation.