

## نموذج مقترح لفصل السمات المكائية عن الأرض الطبيعية باستخدام

### بيانات الليزر الجوي في المناطق الحضرية\*

م. حسام محمود سليمان\*\*

الأستاذ المشرف المشارك

د.م. عمر الخليل\*\*\*\*

الأستاذ المشرف

أ.د.م. رياض المصري\*\*\*

### الملخص

تعدُّ تقنية الليزر الجوي (Light Detection and Ranging LIDAR) من المصادر المهمة للحصول على البيانات المكائية ثلاثية الأبعاد، إلا أن هذه البيانات تُخزَّن بشكل غمامة عشوائية كثيفة من النقاط المنعكسة عن الأجسام التي يصطدم بها شعاع الليزر، ولا يمكن الفصل ضمنها بين النقاط المنعكسة عن الأبنية السكنية، أو سطح الأرض الطبيعية، أو أية أجسام أخرى فوق سطح الأرض. يُقدِّم النموذج المقترح طريقة جديدة في عمليات التصنيف الآلي لنقاط الغمامة، تسمح بتقسيم منطقة الدراسة إلى عدة أجزاء متجاورة، ويُحسب السطح الوسطي الأقرب لمعظم نقاط الغمامة لكل جزء باستخدام معادلة كثير حدود (Polynomial)، وتحسب المعاملات الرياضية لهذا النموذج وفق تعديل المربعات الصغرى باعتماد برنامج حاسوبي كُتب لهذه الغاية. شملت الدراسة عدة أمثلة لمناطق مختلفة توافرت لها غمامات مسح ليزري جوي، وقد أظهرت النتائج النهائية لتطبيق الخوارزمية المقترحة على هذه الأمثلة نجاحاً كبيراً في المناطق الحضرية (Urban regions) التي تتصف بميول الأراضي ضمنها بالبسيطة، وكانت هذه النتائج مقبولة نسبياً مقارنةً بالنتائج المحسوبة من قبل عدد آخر من الباحثين.

الكلمات المفتاحية: الليزر الجوي، تعديل المربعات الصغرى، كثيرات الحدود، فلترة الأجسام في المناطق حضرية

\* أعد البحث في سياق رسالة الدكتوراه للمهندس حسام سليمان بإشراف الدكتور المهندس رياض المصري والدكتور المهندس عمر الخليل

\*\*طالب دكتوراه في كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق - قسم الطبوغرافيا

\*\*\*أستاذ مساعد في كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق - قسم الطبوغرافيا

\*\*\*\*مدرس في كلية الهندسة المدنية جامعة تشرين - قسم الطبوغرافيا

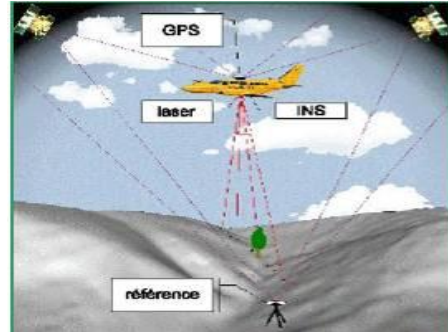
## 1. المقدمة:

ثلاثية الأبعاد وسريعة للمناطق الممسوحة تُشكل ما يعرف (Digital Stereo Model DSM)، وهو نموذج رقمي لسطح الأرض الطبيعية مع السمات المكانية كلها (الأشجار، والأبنية، والطرق، والأنهار..).

تحتوي بيانات الليدار المسجلة غمامة هائلة وعمياء من النقاط ثلاثية الأبعاد التي لا يمكن التمييز بينها هل تنتمي إلى سطح الأرض الطبيعية أو إلى أجسام طبيعية أو صناعية مرتفعة عن سطح الأرض، لذلك عمل العديد من الباحثين خلال السنوات العشر الماضية للإفادة من بيانات هذه المنظومة، بتطبيق خوارزميات رياضية معقدة مؤتمتة أو نصف مؤتمتة تعمل على فصل السمات الطبيعية ومن أهمها سطح الأرض الطبيعية (Digital DTM Terrain Model) عن بقية السمات الأخرى من التفاصيل الطبيعية والصناعية (أشجار، وأبنية، وسيارات، .. إلخ)

طرح العديد من البحوث في هذا المجال، كالبحت المقدم من قبل (Vosselman) المشار إليه بالبحث [4] الذي يعدُّ مبدأ الفصل بين الأجسام والأرض هو التغير المفاجئ في قيم الميل بين كل نقطة وجوارها فالسمات التي تشكل ميولاً عاليةً مع جوارها تعدُّ نقاطاً لا تنتمي إلى سطح الأرض الطبيعية، وتُطبق المنهجية المقترحة من خلال نافذة فلتر تمرر على كامل النقاط الأصلية تعمل على حساب الميل الأعظمي للنقطة مع جوارها من النقاط ضمن نصف قطر بحث (Radius) قيمته متغيرة من منطقة إلى أخرى بحسب التعقيد الهندسي للمنطقة المدروسة. فيما عمل عددٌ من الباحثين [5] و [6] على استقراء سطح أولي مستمر من النقاط الأقل ارتفاعاً، إمّا

تعدُّ تقنية الليدار (And Light Detection LIDAR Ranging) أو ما يعرف بالمسح الليزري الجوي المحمول، من المصادر المهمة في تعيين الإحداثيات ثلاثية الأبعاد  $x, y, z$  لغمامة هائلة من النقاط وبدقة شاقولية عالية ( لا تتجاوز  $\pm 15\text{cm}$ ) في حساب البعد الثالث (المنسوب) [1]، وذلك بقياس المسافات بين جهاز الليزر المحمول والسمات المكانية (Features)، التي ينعكس عنها الشعاع على سطح الأرض [2]. عموماً، ترتبط الدقة المكانية في تحديد الإحداثيات النهائية بدقة الأجهزة المكوّنة لمنظومة الاستشعار المتكاملة لهذه التقنية، التي هي جهاز إرسال شعاع الليزر وجهاز تحديد الموقع العالمي (Global GPS (Positioning System) ومنظومة التوجيه العطالي Inertial Navigation System (INS) التي تُسجّل قيم دورانات حركة الطائرة في أثناء عملية المسح الليزري الجوي في كل لحظة (شكل 1). تدرج تقنية الليدار ضمن تقنيات الاستشعار عن بعد المستخدمة بسبب تسجيلها الصدى المنعكس عن السمات الموجودة على سطح الأرض والتميز بين عدة أصداء منعكسة عن السطح المقيس إذ يستطيع الصدى المقيس إختراق بعض الأجسام كالغطاء النباتي وتسجيل مناسب سطح الأرض الطبيعية [3]. ومن ثمَّ أصبح بالإمكان تغطية مساحات شاسعة من الأراضي لإنتاج نماذج رقمية



الشكل (1) تقنية المسح الليزري المحمول

Source: ([www.l2g.fr](http://www.l2g.fr))

ومجاوراتها من النقاط، وتكرّر الخطوات السابقة عدة مرات للوصول إلى النتائج المرجوة.

## 2. منهجية فصل الأجسام عن الأرض الطبيعية:

وُضِعَ مفهوم تشكيل سطح وسطي بين نقاط موزعة عشوائياً باعتبار أن النقاط جميعها متساوية الوزن ومن ثم أُعْطِيَتِ النقاطُ أوزاناً بحسب بعدها عن السطح الوسطي الناتج [9]، اختيرت النقاط الممثلة للأرض الطبيعية على أنها النقاط الأقل وزناً. طُوِّرت هذه الخوارزمية لاستخدامها متتاليةً (Iterative) أي البحث عن السطح الوسطي بين مجموعة من النقاط ثلاثية الأبعاد، بحيث نحصل على سطح وسطي متغيّر البارامترات، وتتغير معادلة السطح المحسوب وفق درجة معادلته، فمن أجل تابع درجة أولى تعطي المعادلة العامة بالشكل :

$$z = b_0 + b_1x + b_2y$$

تمثل  $b_0$   $b_1$   $b_2$  بارامترات تعبر عن انزياحات المستوي فراغياً بالاتجاهين الأفقي والشاقولي، وكذلك ميل المستوي في الفراغ، ومن أجل درجة ثانية تصبح المعادلة العامة للسطح الوسطي بالشكل:

$$z = b_0 + b_1x^2 + b_2y^2 + b_3xy + b_4x + b_5y$$

ولأنه لا يمكن التنبؤ بمعادلة عامة تعبر عن شكل الأرض الطبيعية في أي منطقة فقد استُخدم التابع الرياضي الممثل للسطح الوسطي وفق تابع من الدرجة الأولى والثانية فقط، مع تقسيم منطقة العمل إلى مجموعة من الأجزاء، بحيث تكون مساحة التقسيمة أكبر من مساحة أكبر تجمع سكني لضمان احتواء كل جزء نقاطاً تنتمي إلى سطح الأرض، ويكون تغيّر ميول الأرض الطبيعية مقبولاً، ولتكون معادلة التابع الرياضي المشكّل للأرض بسيطة (درجة أولى أو ثانية) ضمن هذا الجزء، ومن ثمّ فإن نتائج تطبيق الخوارزمية ستكون أفضل على حالات التجمعات الحضرية التي تُصنّف انحدارات الأرض ضمنها بالمقبولة.

يجب قبل البدء بتطبيق خوارزمية الفلترة الإشارة إلى

(SPLINE)، وتنفيذ هذا الاستقراء بشكل تكراري مع الأخذ بالحسبان في كل مرحلة إضافة النقاط التي تبعد عن السطح الأولي مسافة أقل من عتبة محددة مسبقاً، وتكون أيضاً قيم فروق الزوايا بينها وبين نقاط الجوار أصغر من عتبة محددة من قبل المستخدم للوصول إلى تشكيل السطح النهائي المُمثّل للأرض الطبيعية.

اقترح البحث [7] طريقة رياضية مختلفة تعمل على إزالة نقاط العناصر الأعلى من سطح الأرض الطبيعية باستخدام نافذة فلترة تطبق على الغمامة الرئيسة مباشرة وفق مفهوم الضم والفتح (Dilation & Erosion).

تطبق هاتان العمليتان الرياضيتان على الصور الرمادية اللون (Gray scale images) بحيث يتم خلال عملية الضم (Erosion) تقليص المحيط للبيكسلات بإعطائها قيم البيكسلات المحيطة، في حين يجري في عملية الفتح (Dilation) التمدد في محيط البيكسلات المحددة على حساب قيم البيكسلات المحيطة ومن ثمّ حذف قيم البيكسلات الأعلى من جوارها بشكل متتابع.

كما أجرت مجموعة أخرى من الباحثين [8] طريقة مختلفة في تصنيف بيانات ممسوحة بالليزر الجوي المحمول في مدينة طوكيو في اليابان التي تعدّ مدينة معقدة عمرانياً ولكنها تضم مناطق مستوية غالباً، وقدموا نتائج ممتازة في فصل الأرض الطبيعية عن بقية الأجسام إذ كانت المنطقة المدروسة تضم أبنية كبيرة وعالية ولكن ضمن انحدارات بسيطة للأرض الطبيعية، و كان المبدأ الرئيس المعتمد في الخوارزمية هو اختيار النقاط الأقل ارتفاعاً ضمن تقسيمات صغيرة (Small Patches) أبعادها تتجاوز مساحة الأبنية، ومن ثمّ اختيار النقاط القريبة المجاورة لهذه النقاط الصغرى على أنها تنتمي إلى سطح الأرض الطبيعية أيضاً، وذلك باعتماد شرطين رئيسيين وهما نصف قطر البحث (Buffer) ومعايير إحصائية لفروقات الارتفاعات المحسوبة بين كل نقطة

ومن ثم يُعاد حساب السطح الوسطي للنقاط المتبقية مع حساب قيم الرواسب جميعها بين النقاط المتبقية والسطح الوسطي الجديد، تُعاد العملية بشكل تكراري (شكل 2). يعتمد مفهوم طريقة المربعات الصغرى أن تكون مجموع مربعات الأخطاء الرسوبية (residuals) المقيسة أصغر ما يمكن  $[VV]=\min$ ، إذ تمثل الرسوبيات الفرق بين المناسيب المقيسة والمناسيب المعدلة لنقاط الغمامة الليزرية، يُعبر عن النموذج الرياضي لمعادلات الأرصاد بالعلاقة الخطية الآتية:

$$V + B \cdot \Delta = F$$

إذ تشير V إلى قيم الرواسب على الأرصاد المقيسة بينما المصفوفة B هي مصفوفة الأمثال، و  $\Delta$  تمثل قيم المجاهيل العددية، وكذلك تعبر F عن مصفوفة الثوابت في حين اعتمدت قيمة مصفوفة الوزن W كمصفوفة واحدية لأن النقاط متساوية الدقة وغير مرتبطة، وتكتب:

$$F = \begin{bmatrix} z1 \\ z2 \\ \dots \\ \dots \\ zn \end{bmatrix}, W = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \Delta = \begin{bmatrix} b0 \\ b1 \\ \dots \\ \dots \\ bn \end{bmatrix}$$

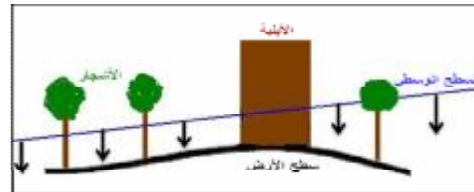
$$B = \begin{bmatrix} dz1/b0 & dz1/b1 & dz1/b2 & \dots \\ dz2/b0 & dz2/b1 & dz2/b2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ dzn/b0 & dzn/b1 & dzn/b3 & \dots \end{bmatrix}$$

$$\Delta = (B^t \cdot W \cdot B)^{-1} \cdot (B^t \cdot W \cdot F)$$

تأخذ الخوارزمية المبرمجة تحريك السطح الوسطي المحسوب بشكل تكراري ضمن فضاء ثلاثي الأبعاد للنقاط المُشكَّلة للغمامة ضمن كل تقسيمة بشكل إجباري باتجاه الأسفل بسبب الحذف المستمر للنقاط ذات المنسوب

ضرورة إزالة النقاط ذات الارتفاعات الشاذة ضمن الغمامة التي تنتج عن أخطاء القياس الليزري وتكون عادةً ذات إرتفاعات متغيرة بشكل كبير ارتفاعاً أو انخفاضاً عن مجاوراتها. تجري إزالة هذه النقاط من خلال حساب أولي للسطح الوسطي المار بين النقاط وحساب قيم الرواسب للارتفاعات، ومن ثم فرز القيم المحسوبة وفق ترتيب تصاعدي أو تنازلي وحذف النقاط الشاذة.

تعتمد الخوارزمية المتبعة في البحث استخدام السطح الوسطي المتقارب باستمرار باتجاه الأسفل (أي نحو نقاط الأرض) (شكل 2)، في إزالة السمات غير المتجانسة جيومترياً التي تمثل في حالتنا الأجسام الطبيعية والصناعية المرتفعة عن سطح الأرض، حتى الوصول إلى سطح وسطي مُغلّف لسطح الأرض الطبيعية فقط. أُعدت برمجيات لمعالجة التتابع الرياضية من خلال نماذج تعمل على معالجة معطيات الغمامة الليزرية بعد تخزين الإحداثيات ثلاثية الأبعاد للنقاط كلها ضمن مصفوفة، وحُسيّت باستخدام المربعات الصغرى (Least Squares) بطريقة معادلات الأرصاد وتعيين مصفوفة البارامترات المُعرّقة للسطح الوسطي بشكل تكراري (Iterative). إذ يُحسب السطح الوسطي أول مرة وفق هذه الطريقة بحيث يكون أقرب ما يمكن إلى النقاط المُدخلة جميعها وتخزن قيم الرواسب بين الارتفاعات الحقيقية للنقاط وارتفاعاتها المسقطة على السطح المحسوب، تُحذف بعدها النقاط جميعها التي تمتلك رواسب أكبر من قيمة العتبة المفروضة (المعمدة) وتراوح بين (0.5-1m) تتعلق بمعرفة بسيطة بميل المنطقة المدروسة،



الشكل (2): فصل الأرض الطبيعية عن بقية

الإحصائية لمناسيب النقاط المتبقية ضمن كل جزء، بحيث يُستقرّ سطح الأرض الطبيعية من النقاط المتبقية جميعها بعد انتهاء الفترة، وتعدّ النقاط المتبقية الأعلى من هذا السطح جميعها نقاطاً أعلى من سطح الأرض الطبيعية.

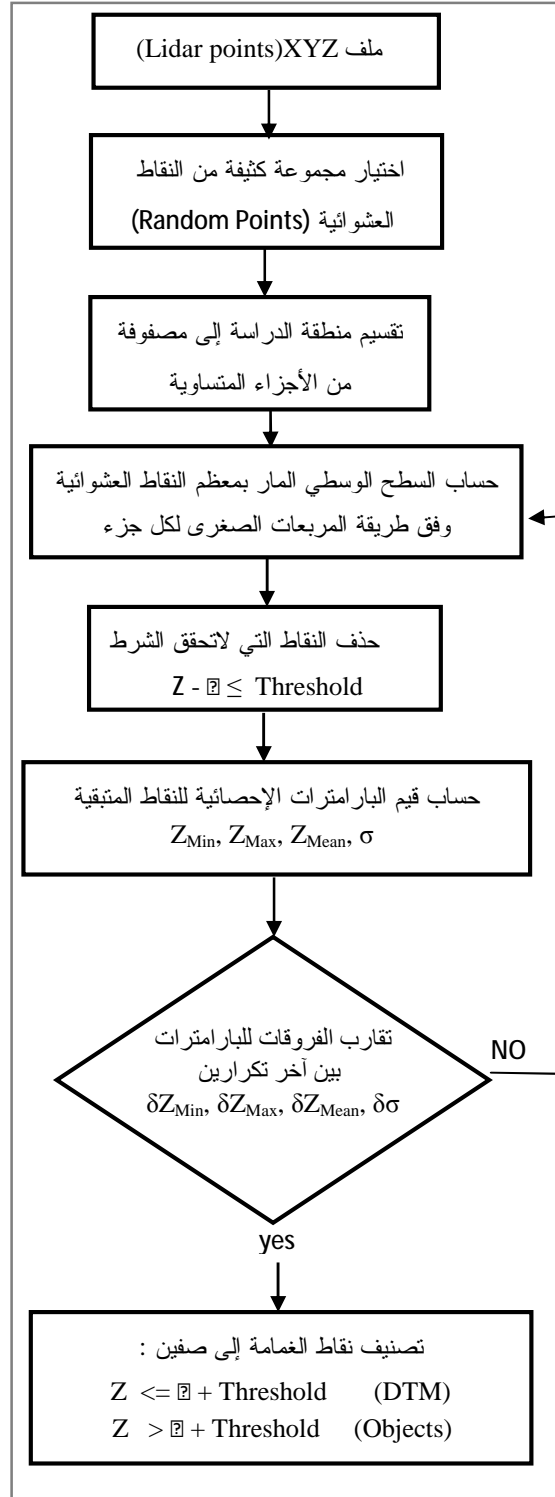
الأعلى من السطح الوسطي المحسوب، وتكرّر العملية على النقاط المتبقية ويحسب السطح الوسطي من جديد مع حذف النقاط ذات المنسوب الأعلى من السطح المحسوب الجديد، ويتوقف تكرار الخطوات السابقة ضمن كل تقسيمة عندما تتساوى أو تتقارب بشكل كبير الفروق بين القيم الإحصائية المحسوبة لمناسيب النقاط المتبقية بين آخر تكرارين، التي تمثل عادةً بالقيم الصغرى والعظمى والمتوسط الحسابي والانحراف المعياري، يجري بعد ذلك تكرار الخطوات السابقة ضمن التقسيمة المجاورة التي بعدها بالتسلسل حتى انتهاء التقسيمات، ومن ثمّ يُستقرّ السطح الناتج من النقاط المتبقية كلّها والنقاط التي ترتفع عن السطح الوسطي الأخير المحسوب بمقدار حد التساهل (Threshold)، ليُشكّل سطح الأرض الطبيعية النهائي، وتُشكل النقاط المتبقية الأعلى من هذا السطح كلّها السمات الطبيعية كالأشجار والسمات الصناعية كلّها كالأبنية والسيارات وغيرها.

تُظهر المنهجية المقترحة (شكل 3)، تسلسل الخطوات المطبقة على الغمامات الليزرية النقطيّة بدءاً من استيراد النقاط الأصلية بإحداثياتها ثلاثية الأبعاد واختيار طبقة عشوائية من النقاط (random points) لتسريع عمليات معالجة الغمامة النقطية، ومن ثمّ تقسيم منطقة الدراسة إلى أجزاء صغيرة أبعاد كل جزء أكبر من مساحة أكبر مبنى أو مجموعة متلاصقة من المباني، وهذه تُحدد عادةً من معرفة مسبقة لطبيعة المنطقة. ومن ثمّ تُطبق خوارزمية حساب السطح الوسطي لكل مجموعة نقاط ضمن كل جزء على حدة وبالتتابع وفق ما شرح أعلاه، ويجري الاحتفاظ بالنقاط المتبقية للأجزاء جميعها بعد تقارب القيم

$Z_{Min}$ : المنسوب الأصغري
$Z_{Max}$ : المنسوب الأعظمي
$Z_{Mean}$ : متوسط المناسيب
$Z$ : المنسوب المقيس للنقطة (المنسوب الأصلي)
$\bar{z}$ : المنسوب المحسوب (المعدل) على السطح الوسطي
$\sigma$ : الانحراف المعياري للمناسيب
إحداثيات النقاط المشكلة للغمامة: $x, y, z$
قيمة حد التساهل المسموحة: Threshold
الفروقات بين القيم الإحصائية السابقة لمناسيب النقاط: $\delta$ بين آخر تكرارين متتاليين.
DTM: سطح الأرض الطبيعية فقط
Objects: أجسام (سمات مكانية) فوق سطح الأرض

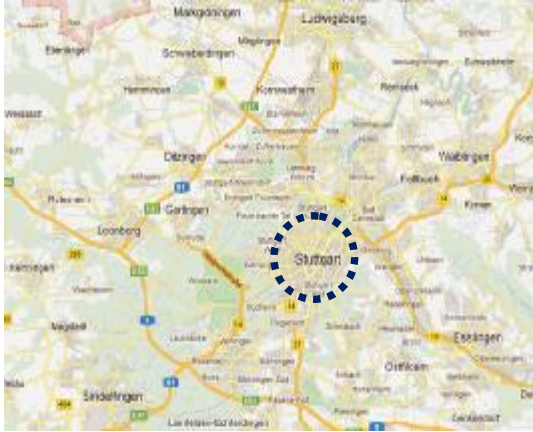
### 3. المعطيات المتوافرة والمستخدمدة في البحث:

استُخدمت معطيات ليزرية كأساس للمقارنات التي أجريت، وهذه البيانات عبارة عن ملفات لعدة غمامات نقطية (Airborne Laser Clouds) متوافرة على موقع المنظمة العالمية للمساحة التصويرية والاستشعار عن بعد (ISPRS International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) بهدف تمكين الباحثين في مجال الفصل الأوتوماتيكي للسمات (Features) الطبيعية (كسطح الأرض الطبيعية أو الأشجار) أو السمات الصناعية (الأبنية، والجسور، والطرق) من اختبار خوارزمياتهم على هذه البيانات ومقارنتها بالنتائج الحقيقية. كما نجد أيضاً نتائج بحوث ودراسات مجموعة من ثمانية باحثين اعتمدوا هذه المعطيات ضمن التقرير النهائي [10]، وقد توافرت مجموعة من غمامات الليزر الجوي لمناطق متنوعة في ألمانيا في مدينة شتوتغارد (شكل 4). هذه المسوحات مُصنّفة باستخدام معطيات يدوية وصور جوية إلى قسمين:



الشكل (3): منهجية البحث المعتمدة في تصنيف بيانات الليزر الجوي الأصلية

الشديدة الانحدار وبمجموعة قليلة من الأبنية الصغيرة المبعثرة، أي أنها ليست منطقة تجمع حضري كبقية المناطق، في حين تتصف المنطقة الرابعة (Sample12) بأنها ذات نسيج عمراني كثيف من الأبنية الطويلة المتباعدة عن بعضها بعضاً مع طبيعة طبوغرافية بانحدارات مقبولة.



الشكل (4) منطقة الدراسة وتشير الدائرة إلى مناطق الدراسة  
source : maps.google.com

#### 4. تقييم النتائج وتحليلها:

خُصِّصَ تطبيق برمجي بهدف نمذجة واستثمار مجموعة التوابع الرياضية المشروحة سابقاً بلغة البرمجة المخصصة (Visual Basic For VBA Application) بيئة البرمجة المضمنة التي تدعمها تطبيقات نظام المعلومات أولى أو ثانية (first & second order)، ومن ثم معالجة السمات والفلتره بحسب شروط العتبة المحددة من مستثمر التطبيق، وتخزين النتائج على شكل شرائح خلوية (Raster) وشعاعية (shapefile)، ويُظهر (شكل 5) مقطعاً شاقولياً في الغمامة بعد انتهاء الفلتره، كما تُحفظ المعاملات الإحصائية لقيم ارتفاعات الشريحة الناتجة بعد كل تكرار وهي (القيم الصغرى والعظمى والمتوسط الحسابي والانحراف المعياري)، وتُقارَن الفروقات الناجمة عنها لتحديد عدد مرات تكرار البحث

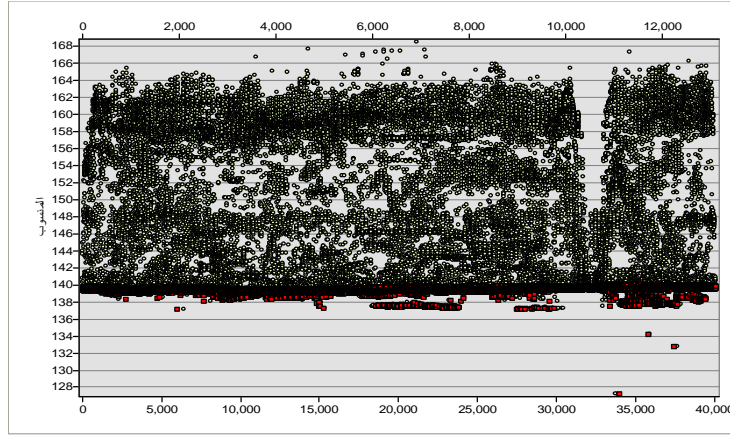
أرض طبيعية وأجسام صناعية لا تنتمي إلى سطح الأرض الطبيعية. اختيرت أربع مجموعات من الأمثلة من هذه المعطيات السابقة بحيث تضم كل مجموعة صفات جيومترية صناعية (أبنية، أجساماً ..) وطبيعية (انحدارات سطح الأرض، وأشجاراً طبيعية ..) مختلفة عن الأخرى من حيث الحجم والارتفاعات والكثافة والتقارب، وتمثل النقاط المنعكسة والمسجلة للصدى الأخير، وتضم ملفاً نصياً مُسجلاً فيه الإحداثيات ثلاثية الأبعاد لكل نقطة، ويراوح التباعد الوسطي للنقاط المشكّلة للغمامة بين (1-1.5) متراً، وهي متجانسة من حيث تباعدات النقاط عن بعضها على كامل كل منطقة من الأمثلة المدروسة ما عدا المنطقة الثانية التي تتصف كثافة النقاط المنتشرة على أسطح المباني بأنها قليلة جداً مقارنةً بالنقاط المنتشرة على سطح الأرض الطبيعية.

تتصف المنطقة الأولى (Sample31) بأنها تمثل منطقة ذات طبيعة طبوغرافية بسيطة الانحدار ضمنها أبنية ضخمة (تجارية، وصناعية..)، في حين تتصف المنطقة الثانية (Sample54) بأنها ذات نسيج عمراني كثيف من الأبنية السكنية الصغيرة المتقاربة من بعضها بشكل كبير مع طبيعة طبوغرافية قليلة الانحدار، وتتصف المنطقة الثالثة (Sample11) بطبوغرافية معقدة من حيث التضاريس الطبيعية والجروف الصخرية ذات الميول الجغرافي (ArcGIS 9.3)، يتضمن التطبيق البرمجي استيراد معطيات المسح الليزري وقراءتها بصيغتها الأصلية كملفات نصية ومن ثم تخزينها وتمثيلها بالصيغة الخلوية (Raster) بطريقة المجاور الأقرب (Natural Neighbor) بحيث يعتمد حجم البيكسل بقيمة تقريبية للتباعد الوسطي بين النقاط أي نحو متر واحد.

ويُتيح التطبيق بعد ذلك اختيار درجة التابع الرياضي المُعرف للسطح الوسطي بين نقاط يجري اختيارها عشوائياً على كامل مساحة منطقة الدراسة وفق تابع درجة

بطريق الخطأ بسبب التباين في تغيّر المناسيب للارتفاعات على سطح الأرض، لذلك جرى العمل على نشر المعادلة وفق تقسيم المنطقة إلى عدة مناطق متتابعة وتطبيق المعادلات السابقة على كل منطقة على حدة بالتالي وبشكل مؤتمت بالكامل. نُشرت الخوارزمية السابقة على المناطق المدروسة الأربع، وحُسب السطح الوسطي فراغياً بشكل تكراري بين نقاط الغمامة بتطبيق مبدأ حساب المربعات الصغرى وفق التسلسل المشروح سابقاً، وتُظهر الجداول اللاحقة النتائج التي حققت.

عن السطح الوسطي. تُتيح الخوارزمية المستخدمة تقسيم المنطقة إلى قطاعات متساوية وفق أبعاد يحددها مستثمر التطبيق؛ وعادةً ما تُحدد مساحة كل قطاع بحيث تكون أكبر من أكبر مبنى أو من عدة مباني مجتمعة بحيث نضمن أن تضم المنطقة نقاطاً منتشرة على سطح الأرض، ويجري فصل الأجسام عن الأرض الطبيعية بشكل تكراري في كل قطاع على حدة، يعود السبب في عدم تطبيق المعادلة على كامل مساحة المنطقة دون تجزئة لأن ذلك سيؤدي إلى حذف كثير من النقاط المنتمية إلى سطح الأرض الطبيعية



الشكل (5) فصل الأرض الطبيعية عن بقية السمات، النقاط باللون الأصفر تمثل نقاط الغمامة الأساسية والنقاط باللون الأحمر تمثل النقاط المتبقية النهائية بعد

الجدول (1): القيم الإحصائية لمناسيب النقاط ضمن الغمامة المدروسة بعد كل تكرار وفق تابع الدرجة الأولى

First Order	No of points	Elevation of Lidar points (m)				
		Z <sub>Min</sub>	Z <sub>Max</sub>	Z <sub>mean</sub>	σ	
Random Points	5000	308.57	343.43	315.55	7.14	
Iteration	1	3236	308.57	321.46	312.05	1.89
	2	2277	308.57	315.13	311.36	1.01
	3	1798	308.57	313.37	311.12	0.85
	4	1589	308.57	313.35	311.04	0.83
	5	1509	308.57	313.35	311.04	0.83

اعتمدت مربعات لتقسيم المناطق فكانت أبعاد المربعات للمنطقة الأولى نحو 100m\*100m لأنّ الأبنية حجوماً كبيرة في المنطقة الأولى، وبحساب المؤشرات الإحصائية للنقاط المتبقية بعد كل عملية فلترتة وقيم الارتفاعات الصغرى والعظمى لها والمتوسط الحسابي والانحراف المعياري لها، نجد أن هذه القيم تقاربت تقارباً كبيراً في التكرار الثالث وتساوت في التكرارين الرابع والخامس، ومن ثمّ يمكننا التوقف عند التكرار الرابع واعتماد السطح الوسطي المحسوب في هذه المرحلة لاستنتاج النقاط النهائية المشكّلة لسطح الأرض الطبيعية، وهي 1589 نقطة، والنقاط المتبقية فوق سطح الأرض الطبيعية أي الأشجار والأبنية (جدول 1).



مستوي)، واعتمدت أبعاد مربعات التقسيم للمثالين الأول والرابع أي المنطقتين (Sample31, Sample12) نحو 100\*100m بسبب مساحات الأبنية الكبيرة، أما بالنسبة إلى المثالين الثاني والثالث (Sample11, Sample54) فإن أبعاد مربعات التقسيم نحو 50\*50m لأن حجم الأبنية والأشجار صغير وتطبيق الخوارزمية ضمن هذا الحجم من التقسيم يضمن وجود نقاط تنتمي إلى سطح الأرض الطبيعية.

لتقييم دقة نتائج الخوارزمية المطبقة سابقاً، استُخدمت المؤشرات نفسها المعتمدة من قبل الباحثين العاملين على المعطيات نفسها في تقريرهم المشار إليه بالبحث رقم [8]، أولاً تُنشأ مصفوفة قيم الأخطاء تُستخدم بعد انتهاء عمليات تصنيف نقاط الغمامة الليزرية الأصلية لتقييم الأخطاء الناتجة عن فصل السمات إلى صنفين هما نقاط الأرض الطبيعية (Bare Earth) ونقاط الأجسام المرتفعة فوق سطح الأرض (Objects)، وتجري مقارنة كل نقطة مصنفة باستخدام الخوارزمية المطبقة بالنقطة المصنفة مسبقاً بشكل يدوي من حيث التصنيف. تحتوي مصفوفة الأخطاء على نموذجين أساسيين لتقييم أخطاء التصنيف وهما: مؤشر (Type I error) يمثل نسبة نقاط الأرض الطبيعية المصنفة بشكل خطأ بأنها أجسام فوق سطح الأرض، ومؤشر (Type II error) الذي يمثل نسبة نقاط الأجسام فوق سطح الأرض المصنفة بشكل خطأ بأنها نقاط أرض طبيعية، ومؤشر (Total error) الذي يعبر عن قيمة الخطأ الكلي لنسبة التصنيف الخطأ في نقاط الغمامة الكلية.

حُصبت مصفوفة تقييم الأخطاء للمناطق الأربع السابقة

أعيد تطبيق الخوارزمية السابقة على الغمامة النقطية نفسها، ولكن من أجل تابع رياضي من الدرجة الثانية وحُصبت المؤشرات الإحصائية لمناسيب النقاط المتبقية، (جدول 2) يظهر النتائج النهائية للنقاط المتبقية بعد كل عملية فلترة، ولدى مناقشة النتائج نجد أن أربع مرات تكرار كافية لفصل الغمامة السابقة إلى صنفين رئيسيين هما نقاط الأرض الطبيعية البالغ عددها 1929 نقطة ونقاط الأجسام فوق سطح الأرض الطبيعية، نلاحظ

الجدول (2): القيم الإحصائية لمناسيب النقاط ضمن الغمامة المدروسة بعد كل تكرار وفق تابع الدرجة الثانية

econd Order	No of points	Elevation of Lidar Points (m)				
		Z <sub>Min</sub>	Z <sub>Max</sub>	Z <sub>mean</sub>	$\sigma$	
Random Points	5000	308.57	343.95	316.03	7.44	
Iteration	1	3135	308.57	323.52	312.15	1.93
	2	2323	308.57	317.42	311.50	1.01
	3	2038	308.57	314.80	311.33	0.80
	4	1929	308.57	313.81	311.27	0.72
	5	1889	308.57	313.81	311.27	0.72

أن عدد النقاط النهائية المحسوبة من أجل تصنيف نقاط الغمامة التي تنتمي إلى سطح الأرض الطبيعية باستخدام معادلة السطح الوسطي من الدرجة الثانية كانت أكبر منها في تابع الدرجة الأولى، وقيمة الخطأ المحسوب في تصنيف النقاط التابعة للأرض الطبيعية بتابع الدرجة الثانية أقل منها من أجل تابع الدرجة الأولى، مما يدل على استثمار أفضل للخوارزمية، ويمكن تفسير ذلك بأن طبيعة المنطقة ليست منبسطة وإنما تمتلك بعض التغيرات في ميول تضاريسها، وبالطريقة نفسها أظهرت النتائج أن التابع الوسطي الرياضي من الدرجة الثانية أكثر ملاءمة لبقية المناطق من استخدام تابع درجة أولى (معادلة

d تمثل عدد نقاط الأجسام المُعرّفة بشكل صحيح للأجسام فوق سطح الأرض الطبيعية.

وفق خوارزمية البحث المطبقة، وسُجّلت النتائج ضمن الجداول اللاحقة وفق التسلسل (جدول 6، 5، 4، 3)، كما تُظهر الأشكال أيضاً بتسلسل (شكل 9، 8، 7، 6) النقاط العشوائية النهائية بعد انتهاء عملية الفلترة المتتالية؛ وذلك لكل مثال من الأمثلة المدروسة.

تمثل الرموز الواردة في الجداول ما يأتي:

(Filtered) يعبر عن النقاط المصنفة النهائية بعد

انتهاء عملية الفلترة وفق الخوارزمية (LSQ).

a عدد نقاط الأرض الطبيعية التي عُرِّفت بشكل صحيح بأنها نقاط أرض طبيعية.

b عدد نقاط الأرض الطبيعية التي عُرِّفت بشكل خاطئ على أنها نقاط أرض طبيعية، وهي تحدد مقدار الخطأ (Type I error).

c تمثل عدد نقاط الأجسام فوق سطح الأرض التي عُرِّفت بشكل خطأ بأنها أجسام وهي تحدد مقدار الخطأ (Type II error).

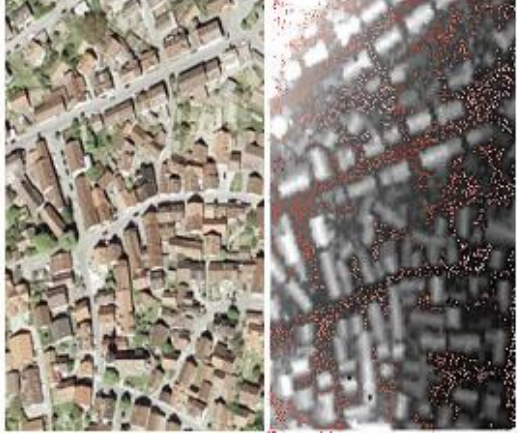
### الجدول (3)

مصفوفة تقييم الأخطاء للمثال الأول (Sample31)

LSQ_Method n = 27122			
Order 2		Filtered	
		Bare Earth	Object
Reference Sample 31	Bare Earth	a = 13723	b = 479
	Object	c = 12577	d = 343
Type1 Error = a / (a+b)			3.37 %
Type2 Error = c / (c+d)			2.65 %
Total Error = (b+c) / (a+b+c+d)			3.03 %




الشكل (6) منطقة الدراسة للمثال الأول نقاط الغمامة المتبقية بعد الفلترة باللون الأحمر (Sample31)



**(4) الجدول**  
مصفوفة تقييم الأخطاء للمثال الثاني (Sample54)

LSQ_Method n = 8596			
Order 2		Filtered	
		Bare Earth	Object
Reference Sample 54	Bare Earth	a = 3924	b = 54
	Object	c = 294	d = 4324
Type1 Error = a / (a+b)			1.35 %
Type2 Error = c / (c+d)			6.36 %
Total Error = (b+c) / (a+b+c+d)			4.04 %

الشكل (7) منطقة الدراسة للمثال الثاني نقاط الغمامة المتبقية بعد الفلترة باللون الأحمر (Sample54)



**(5) الجدول**  
مصفوفة تقييم الأخطاء للمثال الثالث (Sample11)

LSQ_Method n = 27122			
Order 2		Filtered	
		Bare Earth	Object
Reference Sample 11	Bare Earth	a = 14600	b = 7179
	Object	c = 14923	d = 1215
Type1 Error = a / (a+b)			32.9 %
Type2 Error = c / (c+d)			7.52 %
Total Error = (b+c) / (a+b+c+d)			22.1 %

الشكل (8) منطقة الدراسة للمثال الثالث نقاط الغمامة المتبقية بعد الفلترة باللون الأحمر (Sample11)



الشكل (9) منطقة الدراسة للمثال الرابع نقاط الغمامة المتبقية بعد الفلترة باللون الأحمر (Sample12)

### الجدول (6)

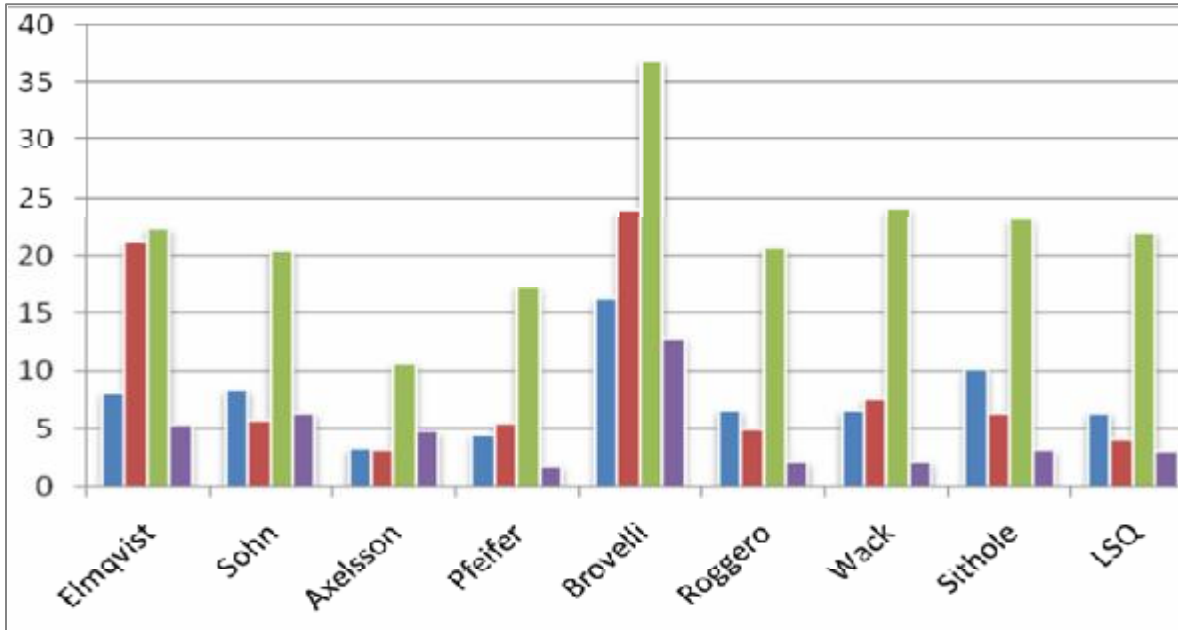
مصفوفة تقييم الأخطاء للمثال الرابع (Sample12)

LSQ_Method n = 51324			
Order 2		Filtered	
		Bare Earth	Object
Reference Sample 12	Bare Earth	a = 25002	b = 1245
	Object	c = 2063	d = 23014
Type1 Error = a / (a+b)			4.74 %
Type2 Error = c / (c+d)			8.22 %
Total Error = (b+c) / (a+b+c+d)			6.44 %

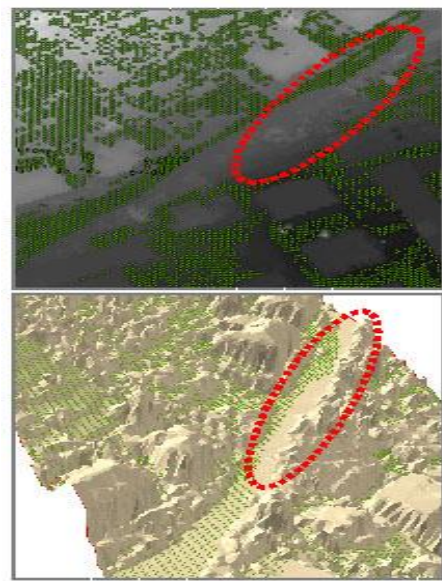
يطبق على كامل الصورة المستقرة لكامل الغمامة، مع اختيار البيكسلات ذات الميل الأقل كنقاط أرض طبيعية والباقي كأجسام أعلى منها، وهو ما قد يشكل سطح أرض طبيعية غير معبر بشكل حقيقي؛ وذلك عند تطبيق الخوارزمية على مناطق سطح الأرض الطبيعية ضمنها تتغير بشكل مفاجئ، كما في المثالين السابقين.

في حين أن نتائج الباحث [Axelsson] كانت أفضل بقليل من نتائج الخوارزمية (LSQ) إذ تعتمد طريقته مفهوم تثليث ديلوني المتتالي المشكل من النقاط ذات الارتفاع الأصغر، وهو ما قد يُشكل سطح أرض طبيعية دون تحديد درجة تابع رياضي محدد، فالسطح المستقر بهذه الطريقة يعبر عن مجموعة من المتلثات المتجاورة المستمرة، وتتالي عملية التثليث يعزز من صحة استقراء سطح الأرض الطبيعية.

قُورنت بعد ذلك نسبة الخطأ الكلي في تطبيق الخوارزمية على كل مثال مع نسبة الخطأ الكلي المحسوب من قبل مجموعة من الباحثين العاملين على المعطيات نفسها وفق خوارزميات رياضية مختلفة، ويُظهر المنحنى البياني (شكل 10) أن النموذج المقترح للتصنيف يُحقق نتائج ممتازة نسبياً، على سبيل المثال أظهرت الخوارزمية تقارباً مع النتائج التي توصل إليها كل من [Pfeifer, Briese] اللذين اعتمداً بناء سطح تقريبي أولي مُشكل من مجموعة من النقاط المبعثرة المنتمية للسطح وعدّ هذا السطح منسوب مقارنة للنقاط كلها، تُعطى النقاط العليا منه وزناً صغيراً فيما يُعتمد الوزن الأكبر للنقاط الأخفض من السطح، ويُعاد استقراء سطح الأرض الطبيعية من النقاط مع استخدام الأوزان المحسوبة في عملية الاستقراء، وهو ما يجعلها مشابهة من حيث المبدأ لخوارزمية LSQ. وكانت نتائج التصنيف أفضل من [Roggero] الذي اعتمد مفهوم نافذة فلتر محلي



مع ما يقابلها LSQ الشكل (10) مقارنة الخطأ المحسوب بتصنيف الخوارزمية من الأخطاء المحسوبة من بقية الباحثين على الأمثلة نفسها



الشكل (11) منطقة الدراسة للمثال Sample11 والنقاط المعبرة

عن الأرض الطبيعية باللون الأخضر

القصور نفسه، وهو ما توضحه نسبة الخطأ الكلي المحسوبة لتقييم نجاح خوارزمياتهم المطبقة.

نجد من ناحية أخرى أنّ عملية فصل السمات في المناطق السكنية ولاسيما ذات الطابع العمراني المنتظم التي تحتوي

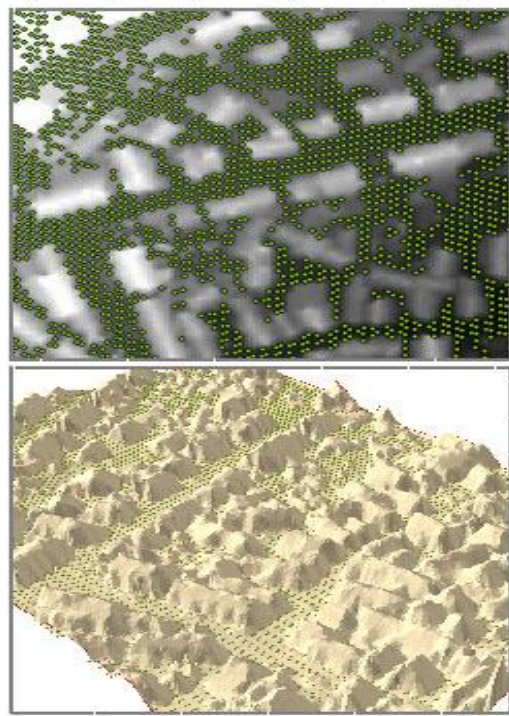
تظهر الخوارزمية بشكل عام نجاحاً كبيراً في تصنيف نقاط الغمامات الليزرية في المناطق الحضرية أي عندما تكون تضاريس المنطقة وطبيعتها مقبولة من حيث الانحدارات، وبالمقابل فإن تطبيقها على مناطق جبلية أو شديدة الانحدار لن يقدم نتائج مميزة وهو ما أنجز على غمامة المثال (sample11)، إذ إنه على الرغم من استخدام تقسيمات للمنطقة لحل مشكلة الميول الشديدة للتضاريس، فإنه في المناطق المتغيرة الارتفاع بشكل مفاجئ يكون فصل السمات عن بعضها غير ناجح بشكل كبير، حيث تحذف العديد من نقاط الغمامة الأصلية بطريق الخطأ بسبب عدم تجانس الميول المشكلة للأرض الطبيعية ضمن كل جزء

(شكل 11)، وبالعودة للمخطط البياني السابق

(شكل 10) نلاحظ أنّ بقية الباحثين بشكل عام لديهم

المقترحة تميّزاً في فصل سطح الأرض الطبيعية عن بقية السمات المكانية في المناطق الحضرية ذات الأراضي المنبسطة، وإن اختلفت حجوم النقط الممثلة للسمات المكانية وكثافتها فوق سطح الأرض .  
يجب أن تُركّز الأعمال المستقبلية في هذا المجال على اختبار نجاح الخوارزمية في فصل الأرض الطبيعية، أو السمات الصناعية في مناطق حضرية أخرى أكثر تعقيداً من حيث صعوبة التضاريس الطبيعية، أو من حيث وجود سمات صناعية متصلة بالأرض الطبيعية كالجسور والأنفاق، أو في مناطق الغابات الكثيفة.

ضمنها أبنية متقاربة مع فراغات للشوارع والأرصفة، التي تتميز تضاريس الأرض الطبيعية ضمنها بتجانس ميولها نوعاً ما، كانت عملية ناجحة بشكل ملحوظ (شكل 12)، يتضح ذلك في المثال (sample54) على الرغم من قلة عدد نقاط الليزر المنعكسة عن سطح المباني في المنطقة الثانية سواء كان السبب الميلان الشديد لسطوح المنازل، أو عدم قدرة التقنية المستخدمة في المسح الليزري على تغطية المنطقة بكثافة عالية من النقاط.



الشكل (12) منطقة الدراسة للمثال Sample54 والنقاط المعبرة عن الأرض الطبيعية باللون الأخضر

##### 5. الخاتمة والأعمال المستقبلية:

عرضت الخوارزمية المقترحة طريقة عمل ناجحة في تصنيف الغمامات الليزرية خصوصاً في المناطق الحضرية ودون أية مُعطيات معروفة مسبقاً لمنطقة الدراسة كالصور الفضائية أو المخططات الطبوغرافية، وبدلاً من البحث عن توابع رياضية معقدة تعمل على كامل المنطقة المدروسة لتصنيف السمات المكونة للغمامة الليزرية، تميّزت الطريقة المتبعة بالعمل على تقسيم منطقة الدراسة إلى أجزاء متتابعة لتبسيط عملية الفلترة باستخدام كثير حدود رياضي بسيط من الدرجة الثانية، وأظهرت النتائج التي قدمتها الخوارزمية

- [8] Masaharu, H. and Ohtsubo, K., 2002. **"Filtering Method of Airborne Laser Scanner Data for Complex Terrain"**. Commission III, Working Group III/3. \* المراجع:
- [9] Kraus, K., Pfeifer, N., 1998. **"Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data"**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 53 (4), 193–203.
- [10] Sithole, G., Vosselman, G., 2003. ISPRS **"Test on extracting DEMs from point clouds: a comparison of existing automatic filters"**. Tech. Rep., available at: <http://www.itc.nl/isprswgiii3/filtertest>.
- [1] American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). 2007. **"ASPRS Guidelines: Vertical Accuracy Reporting for Lidar Data"**. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. Accessed: <http://www.asprs.org>.
- [2] Professional surveyor magazine, **"Airborne Lidar Sensors"**, may 2009.
- [3] Maune, D.F., 2008. **"Aerial mapping and surveying"**. In: Dewberry, S., Rauenzahn, L.(Eds.), Land Development Handbook, third ed. McGraw-Hill Professional, pp. 877–910.
- [4] Vosselman, G., 2000. **"Slope based filtering of laser altimetry data"**. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 33 (Part B3), 935–942.
- [5] Mongus, D., Zalik, B., 2011. **Parameter-free ground filtering of LiDAR data for automatic DTM generation**, available at SciVerseScienceDirect, <http://www.isprs.org>.
- [6] Sohn, G., Dowman, I., 2002. **"Terrain surface reconstruction by the use of tetrahedron model with the MDL criterion"**. IAPRS, Vol. 34, Part 3A, pp. 336-344., available at: <http://www.isprs.org/commission3>.
- [7] Zhang, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M., Yan, J. and Zhang, C., 2003. **"A progressive morphological filter for removing non-ground measurements from airborne LIDAR data"**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 41, 872-882.