

دراسة مقارنة لعدة طرائق استقراء رياضية لسطح مستمر اعتماداً على غمامات المسح الليزري ثلاثي الأبعاد*

م. حسام محمود سليمان**

الأستاذ المشرف المشارك

د.م. عمر الخليل****

الأستاذ المشرف

أ.د.م. رياض المصري***

الملخص

تعدُّ تقنية الليزر الجوي (Airborne Laser Scanning ALS) أو ما يسمى (Light Detection and Ranging) (LIDAR) من أكثر الطرائق فاعلية وتمثيلاً لطبوغرافية الأرض، إذ تمثل المنطقة الممسوحة باستخدام هذه التقنية كحزمة كبيرة وكثيفة من النقاط ثلاثية الأبعاد أو ما يعرف بالغمامة الليزرية (Laser Cloud). إلا أن استقراء (Interpolation) خارطة رقمية تمثل سطحاً مستمراً كسطح الأرض الطبيعية (Digital Terrain Model DTM) انطلاقاً من هذه البيانات يرتبط بمجموعة من التحديات.

يركز البحث على دراسة مقارنة بين مجموعة من طرائق استقراء رياضية تطبق على حزمة كبيرة وكثيفة من النقاط لمنطقة ممسوحة بتقنية الليزر الجوي ذات الدقة العالية، بحيث تعبر عن تمثيل سطح الأرض الطبيعية الرقمي فقط. اعتمد لتطبيق ذلك مجموعة متنوعة من المناطق التي مسحت ليزرياً والتي تعبر عن حالات متنوعة من حيث تعقيد التضاريس، مع الأخذ بالحسبان إهمال الأجسام الصناعية وأخذ كثافات متنوعة من الغمامات الليزرية لجعل الدراسة أكثر شمولاً. طبقت بعد ذلك مجموعة من خوارزميات الاستقراء الرياضي للسطوح على المناطق السابقة بهدف تحديد طريقة الاستقراء الأمثل، ومن ثم قورنت نتائج الاستقراء التي أعطتها الطرائق جميعها، وقد أظهرت النتائج تأثير كثافة البيانات المستخدمة في اختيار نوع طريقة الاستقراء الرياضية المثلى وأن تابع الاستقراء باستخدام خوارزمية المجاور الأقرب (Nearest neighbor) لنقاط الليزر الجوي الكثيف يعطي نتائج جيدة جداً مقارنةً ببقية الطرائق.

الكلمات المفتاحية: طرائق استقراء، مقارنة، غمامة ليزرية، سطح الأرض الطبيعية، خوارزمية المجاور الأقرب

* أعد هذا البحث في سياق رسالة الدكتوراه للدكتوراه للمهندس حسام سليمان بإشراف المهندس رياض المصري و الدكتور المهندس عمر الخليل - في الهندسة المدنية - جامعة دمشق.

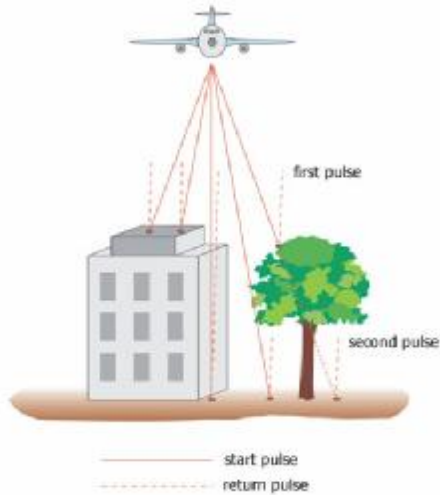
**طالب دكتوراه في كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق _ قسم الطبوغرافيا

***أستاذ مساعد في كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق _ قسم الطبوغرافيا

****مدرس في كلية الهندسة المدنية جامعة دمشق _ قسم الطبوغرافيا

مقدمة:

وهو ما جعلها من أهم مصادر البيانات بالمقاييس المتوسطة والكبيرة، وبفضل تغطيتها لمساحات كبيرة وبكثافة عالية من النقاط تصل 70 ألف نقطة بالثانية، ومن ميزات هذه التقنية أيضاً أنها يمكن أن تخزن أكثر من صدى منعكس عن الأرض، وكذلك عن السمات الطبيعية والصناعية فوق الأرض، مما يتيح إمكانية نفاذ الأشعة الليزرية للوصول إلى سطح الأرض الطبيعية (شكل1)، ولكن استثمار هذه المعطيات يجري بعد تصنيف البيانات الليزرية، وفصل الغمامة إلى مجموعة من النقاط المعبرة عن سطح الأرض الطبيعية ونقاط أخرى تعبر عن السمات الطبيعية أو الصناعية، وذلك من خلال خوارميات رياضية متقدمة يمكن تطبيقها مباشرة وبشكل أوتوماتيكي على الغمامة الأصلية، وهو ما يعدّ حتى وقتنا الراهن محور بحوث ودراسات متقدمة لاتزال قيد الدراسة والتطوير.



شكل (1) تسجيل عدة أصداء باستخدام تقنية

المسح الليزري الجوي

source:

1. منطقة الدراسة:

بناء على ما سبق استخدمت معطيات ليزرية كأساس للمقارنات التي أنجزناها. وهذه البيانات عبارة عن ملفات

يعدّ تشكيل نماذج رقمية ثلاثية الأبعاد (3D Digital models) لسطح الأرض الطبيعية من أهم المنتجات المساحية المطلوبة والأكثر استخداماً في أعمال المساحة التصويرية (Photogrammetry) وفي تقنيات الاستشعار عن بعد، في وقتنا الراهن. فهي تزودنا بمعلومات مكانية ووصفية مهمة من أجل الأعمال الطبوغرافية والمعمارية والتطبيقات المتعلقة بالفضاء المبني كلها. وغالباً ما تشكل هذه النماذج الرقمية ثلاثية الأبعاد من خلال عمليات استقراء لسطوح مستمرة تعبر عن الواقع الحقيقي. هذا وتتوافر كثير من البحوث التي ناقشت أهمية دقة البيانات المستخدمة في استقراء سطح الأرض [8] [9]. وكذلك فإنّ تحديد طريقة الاستقراء الرياضية اللازمة تتأثر أيضاً بطبيعة البيانات المستخدمة [2] [12] [15]. ومن ثمّ فاستقراء سطح الارتفاعات الرقمي مرتبط بطريقة الحصول على البيانات وطريقة تمثيلها الرقمية أي نمذجتها.

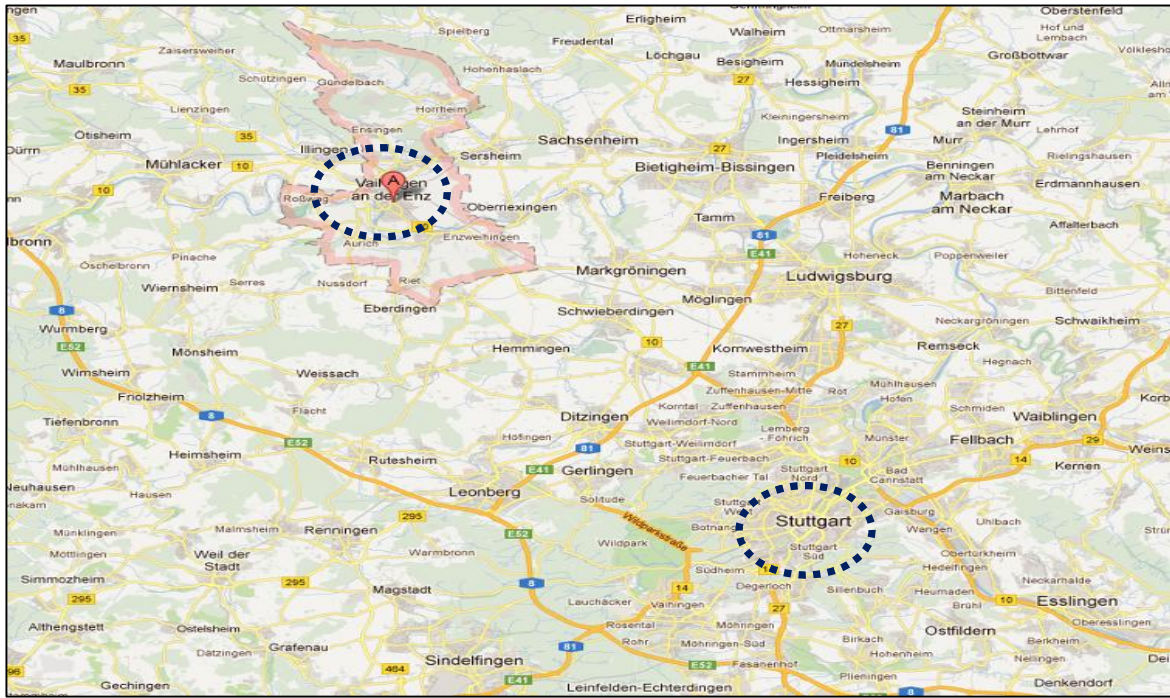
استخدمت ضمن هذا البحث معطيات ممسوحة بتقنية **LIDAR** (Light Detection And Ranging) وهي تقنية مشابهة للمسح التصويري من حيث الحصول على المعلومة ثلاثية الأبعاد، التي تعدّ أداة فعالة من أجل الوصول إلى نمذجة حقيقية لسطح الأرض الطبيعية [7]، كما تعدّ هذه التقنية من أكثر طرائق المسح الجوي في العصر الحديث فعالية مقارنة بالطرائق التقليدية التي تجري فيها أعمال المسح الطبوغرافي باستخدام الأجهزة المساحية الأرضية، كما تؤمّن دقة مكانية أفقية وشاقولية عالية تصل إلى عدة سنتمترات [www.airborne1.com]. لأنها تعتمد استخدام تقنية

نظام تحديد الموقع العالمي

(Global Positioning System GPS)

مصنفة باستخدام معطيات يدوية وصور جوية إلى قسمين: أرض طبيعية وأجسام صناعية لا تنتمي إلى سطح الأرض الطبيعية. اختيرت مجموعتان من هذه الأمثلة السابقة، تضم كل مجموعة نقاط معلومة الإحداثيات والتصنيف لهذه النقاط (أرض طبيعية أم لا)، وكل مجموعة ممسوحة بكثافات وسطية متفاوتة تراوح بين المتر وعدة أمتار أي بتباعدات وسطية مختلفة للنقاط ضمن كل غمامة. وتمثل المجموعة الأولى للمسح منطقة عمرانية ضمن مناطق سكنية ذات انحدارات خفيفة ومناطق مختلطة من الأشجار والأبنية، في حين تنتشر نقاط المجموعة الثانية على منطقة ذات مبان قليلة وبعض الأشجار، في حين تتصف طبيعة الأرض فيها بأنها مناطق جبلية وشديدة الانحدارات.

لعدة غمامات نقاطية متوافرة على موقع المنظمة العالمية للمساحة التصويرية والاستشعار عن بعد (ISPRS International Society for Photogrammetry and Remote Sensing) 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 النتائج التي توصل إليها بعض الباحثين الذين اعتمدوا هذه المعطيات وذلك على شكل تقارير. وقد أجري مسح لهذه المناطق باستخدام منظومة الليزر الجوي إذ نجد ما عدده 15 مثلاً لمعطيات ممسوحة بتقنية الليزر الجوي لمناطق متنوعة في ألمانيا في مدينة شتوتغارد (شكل 2). هذه المسوحات



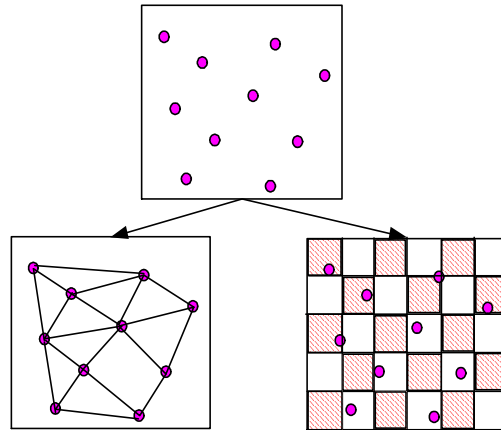
شكل (2) منطقة الدراسة وتشير الدائرتان إلى أماكن الأمثلة المأخوذة source : maps.google.com

3. طرائق الاستقراء الرياضية المتبعة:

تتوافر مجموعة واسعة من التوابع الرياضية التي يمكن استخدامها من أجل استقراء القيمة الحقيقية الخاصة بنقطة؛ وذلك انطلاقاً من مجموعة من النقاط المعلومة المجاورة لهذه النقطة. ونظراً إلى أن النقاط الممثلة بهذه الطريقة غالباً ما تكون عشوائية، فإن السطح الرياضي المستقراً سيكون مستمراً. وعادة ما يعبر عن هذا السطح بواحد من شكلين:

1. الشكل الصوري (Raster) ويستخدم لهذا الغرض مجموعة من التوابع مثل المجاور الطبيعي (Natural Neighbor) أو التابع (SPLINE) أو تابع مقلوب المسافة الموزونة (Inverse Distance Weighted). في هذا الشكل نستخدم مصفوفة منتظمة الأبعاد من الخلايا لتمثيل السطح.

2. الشكل الشعاعي TIN وهي اختصار (Triangulated Irregular Network) أو ما يعرف بتثليث ديلوني التي تمثل السطح بشكل عشوائي غير منتظم (شكل 3).



شكل (3) تمثيل النقاط بشكل خلوي على اليمين وبشكل شعاعي على اليسار

خلية. يمكن استخدام هذا التابع في استقراء سطح مستمر انطلاقاً من بيانات نقطية موزعة بشكل عشوائي مثل معطيات الليزر الجوي. فقد أثبت التجارب أن هذا التابع الرياضي البسيط يعطي نتائج ذات موثوقية عالية مقارنة بتوابع أكثر تعقيداً [4]، وهنا تحسب قيمة النقطة المجهولة وفق تابع خطي موزون اعتماداً على مجموعة من النقاط المعلومة المحيطة [16]، فعلى سبيل المثال إذا كان لدينا مجموعة من النقاط المعلومة القيم $Z(S_i)$ إذ إن: $i=1, 2, 3, \dots, n$ وكذلك النقطة المطلوب استقراء قيمتها S_0 ، فإن القيمة المستقراة للنقطة تعطى بالعلاقة الآتية:

$$Z(S_0) = \sum_{i=1}^n Z(S_i) * (d_{i0})^{-2} / \sum_{i=1}^n (d_{i0})^{-2}$$

إذ d_{i0} هي المسافة بين النقطتين S_i و S_0 . وباعتبار أن الوزن تابع لمقلوب المسافة بين النقطة المستقراة وبقية النقاط المعلومة، فالنقاط القريبة من النقطة المجهولة ستكون أكثر تأثيراً في حين أن النقاط الأبعد ستكون أقل تأثيراً في قيمة النقطة المحسوبة (مع الأخذ بالحسبان أن إعطاء قيم كبيرة للمسافات سيعطي نتائج غير دقيقة).

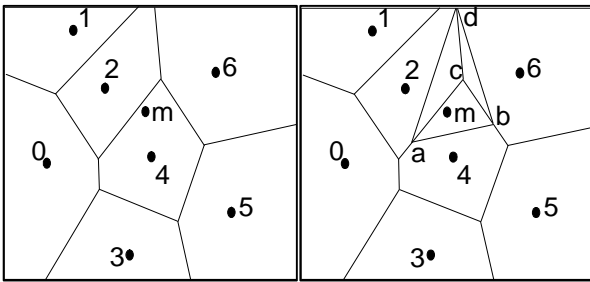
يحدد عدد نقاط التأثير التي ستدخل في استنتاج قيمة الخلية الناتجة ضمن السطح المستقرا؛ وذلك من خلال تحديد العدد الأعظمي للنقاط التي ستستخدم لاستنتاج قيمة هذه الخلية. عادة ما تُختارُ النقاط الأقرب أولاً حتى الوصول إلى العدد المطلوب من العينات اللازم لاستنتاج قيمة الخلية. ويمكن أيضاً تحديد عدد نقاط التأثير من خلال تحديد نصف قطر الاستقراء بوحدة الخريطة وفي هذه الحالة فقط ستعملُ نقاط العينة الواقعة ضمن نصف قطر محدد لاستنتاج قيمة الخلية المحددة (مركز الخلية هو مركز دائرة البحث)، لاحظ (شكل 4).

3.1.1. تابع IDW:

يستنتج تابع IDW قيمة الخلية عن طريق حساب متوسط مجموع قيم نقاط العينات القريبة من مركز كل

وحيث A مساحة الشكل المحسوبة .

إن السطح المتشكل النهائي عبارة عن سطح صوري على كامل المنطقة بحيث تحسب فيه القيمة المستقرأة لكل بيكسل لا تقع ضمنه نقطة وفق المعادلة السابقة، وحيث يمر السطح المستقرأ عبر النقاط المعطاة المعلومة جميعها.



شكل (5) طريقة تشكيل مضلعات حول كل نقطة بطريقة المجاور الأقرب

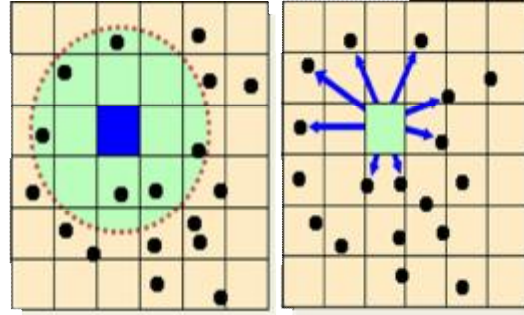
3.3 . تابع SPLINE:

يعمل هذا التابع كسطح مستمر مرن يحقق الشرطين الآتيين:

1. يجب أن يمر السطح المستقرأ بالنقاط المدخلة جميعها.
2. يجب أن يكون انحناء السطح المستقرأ فوق النقطة المدخلة أقل ما يمكن. يتحقق هذا الشرط بجعل مجموع مربعات المشتق الثاني للسطح عند كل نقطة أقل ما يمكن. وهو ما يتيح للسطح إمكانية المرور بمواقع استقرأ أقل من أخفض قيمة معلومة وبمواقع أعلى من أكبر قيمة معلومة بين النقاط المدخلة [16]، عند تطبيق هذا التابع تعطى المعادلة العامة لحساب القيمة المستقرأة عند كل نقطة بالشكل الآتي:

$$S(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + \sum_{i=1}^n I_i * R(S - S_i)$$

إذ:



شكل (4) تمثيل اختيار النقاط بحسب العدد على اليمين وبحسب نصف القطر على اليسار بتابع IDW

3.2 . تابع المجاور الطبيعي:

بحسب التابع قيمة منسوب النقطة المستقرأة بالاعتماد على أقرب مجموعة من النقاط المحيطة بها [14]، إذ يجري الاستقرأ وفق الخوارزميتين (مخطط Voronoi واستقرأ Sibsonian) فمخطط Voronoi ينشئ مضلعاً مغلفاً عن كل نقطة من النقاط الأساسية بحيث يكون أقرب ما يمكن إلى هذه النقطة مقارنةً بغيرها من النقاط المجاورة (شكل 5). فعند إضافة نقطة جديدة مثل m سيتشكل حولها مضلع هو المثلث (a b c) وفق المبدأ السابق. وتحسب قيمة النقطة m وفق استقرأ Sibsonian بعد أن يتقاطع المضلع المحيط بهذه النقطة مع المضلعات القديمة المحيطة بها، وهو ما يحدد لدينا مقدار الوزن المحسوب من كل نقطة مجاورة f؛ وذلك وفق المعادلة:

$$u^h = \sum_j f_j u_j$$

إذ إن:

u^h تمثل القيمة المستقرأة للنقطة m.

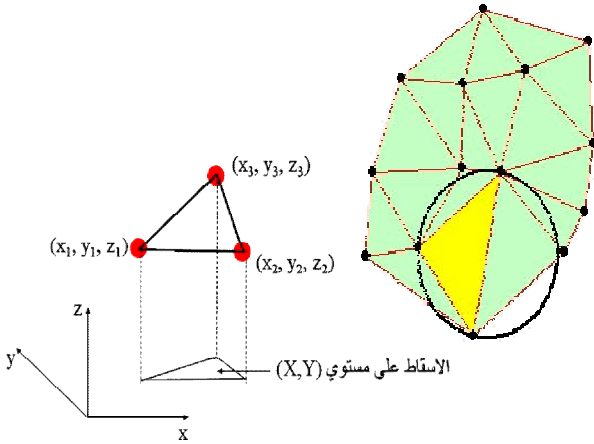
$$(\text{node } 4) \phi_0 = A_{abc} / A_{abd}$$

$$(\text{node } 6) \phi_1 = A_{bdc} / A_{abd}$$

$$(\text{node } 2) \phi_2 = A_{adc} / A_{abd}$$

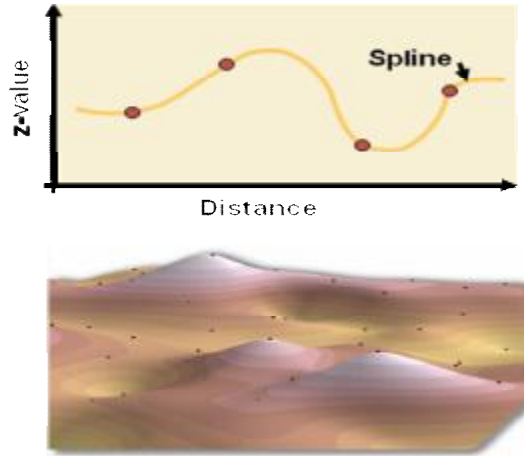
- قيم a تتعلق بطبيعة الظاهرة المدروسة.
 - $R(S-S_i)$ تابع للمسافة بين النقطة المستقرأة والنقاط المعلومة وفق مجموعة ثوابت ومتغيرات.
 $i = 1, 2, \dots, n$ تمثل النقاط المعلومة الإحداثيات.
 I_i تعبر عن أوزان تخص قيم النقاط المعلومة المجاورة. تتبع هذه الأوزان للمسافات التي تفصل النقاط المعلومة عن النقطة المستقرأة. تجب الإشارة إلى أنه في حال كون نقاط الدخل معلومة القيم متقاربة مكانياً وذات ارتفاعات متباينة بشكل كبير ومفاجئ (مناطق الجروف الصخرية، فوالق ...)، فإن تابع SPLINE لا يستقرئ القيم الجديدة بشكل جيد؛ وذلك لأنه يعتمد مفهوم حساب الميل المتغير مع المسافة وفق معادلة رياضية تخفض إلى أقصى ما يمكن من تحذب السطوح. ينتج عن هذا الأمر سطح ناعم يمر بنقاط الدخل كلها كما يظهر (شكل 6)، لذلك تعدد هذه الطريقة مناسبة للسطوح التي تتغير قيم نقاط الدخل فيها بصورة قليلة التغير.

عدّ المثلثات كسطوح مستوية مائلة في الفراغ وبحيث يكون لكل ضلع من أضلاع مثلث ما ميل موحد. والطريقة المعتمدة لإنشاء هذا النوع من الشبكات تعرف بتثليث ديلوناي (Delaunay Triangulation). وفي هذه الطريقة ترسم الخطوط بين النقاط الأقرب إلى بعضها بعضاً ودون أي تقاطع للخطوط. ومن ثمّ مجموعة المثلثات الناتجة لديها الخاصية الآتية: من أجل كل مثلث، لا تحوي الدائرة التي تمر برؤوسه الثلاثة أي رأس من مثلث آخر. ينفذ التثليث في المستوي بتطبيق خوارزمية المسح نصف القطري (Radial sweep algorithm) التي تستخدم النقطة الأقرب إلى مركز مجموعة النقاط وتقوم بوصلها مع النقاط الأخرى كلها. تشكل بعد ذلك وصلات بين النقاط المغلفة الخارجية وهو ما يعرف (convex Hull). ثم يقارن كل مثلثين متجاورين يشكلان رباعياً بحيث توصل النقطتين الأقرب وبهذا تتكثف الشبكة المثلثانية لتشكل الشبكة المثلثانية النهائية [16]، (شكل 7).



شكل (7) يبيّن آلية تثليث النقاط باستخدام تثليث ديلوني
 source : www.ian-ko.com

شكل (6) يبيّن علاقة القيم المحسوبة مع المسافة باستخدام تابع spline
 source : www.esri.com



شكل (6) يبيّن علاقة القيم المحسوبة مع المسافة باستخدام تابع spline
 source : www.esri.com

وتتميّز الصيغة TIN بأنها تعبر عن السطح المستنتج بمستويات متفاوتة من الدقة التمييزية المكانية (Spatial



شكل (8) واجهة التطبيق البرمجية المستخدمة

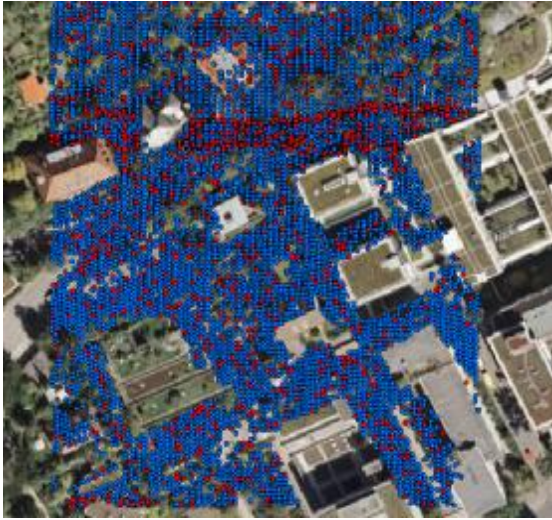
استخدم هذا التطبيق على مجموعات مختلفة من بيانات الليزر الجوي المصنفة يدوياً إلى نقاط تمثل الأرض الطبيعية؛ وذلك بعد فلترة للنقاط التي تمثل أجساماً فوق سطح الأرض. فقد استخدمت أمثلة متنوعة من حيث تعقيد السطح الطبوغرافي. وقد فرزت خلال المعالجة مجموعة عشوائية من نقاط كل غمامة (نحو 10% من هذه النقاط) التي لم يجر إدخالها ضمن الاستقراء. والهدف هنا هو استخدام هذه النقاط لتقييم نتائج الاستقراء كنقاط تحقق معلومة المنسوب (Check points)، وذلك من خلال مقارنة القيم الحقيقية لمناسيب هذه النقاط مع ما يقابلها على كل سطح مستقراً. يوضح (الشكل 9) مراحل تسلسل العمليات السابقة.

(resolution)، فضلاً عن فاعليتها في تخزين البيانات وعدم اعتمادها على طريقة ترتيب البيانات النقطية المدخلة.

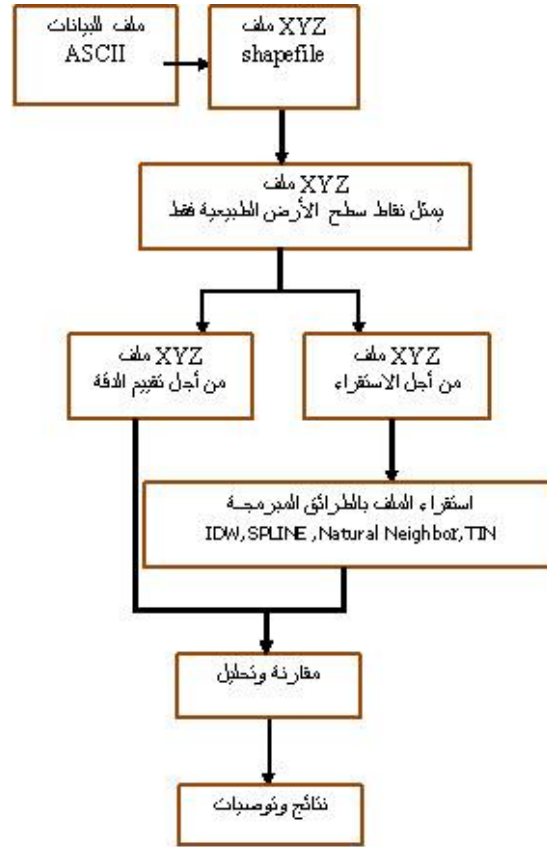
4. المراحل وآليات العمل المتبعة:

برمجت مجموعة التوابع الرياضية المشروحة سابقاً (تابع IDW، تابع SPLINE، تابع TIN، تابع Natural Neighbor) بلغة البرمجة المخصصة VBA (Visual Basic For Application) ضمن بيئة برنامج (ArcGIS 9.3)، ويتيح البرنامج المكتوب استيراد معطيات المسح الليزري بصيغتها الأصلية كملفات نصية وقراءتها وتخزينها وتمثيلها بالصيغة الشعاعية على شكل شريحة رقمية.

يتيح البرنامج رسم النقاط واستيراد المعطيات الجيومترية المرتبطة بهذه الشريحة، ويسمح بعد ذلك باختيار التابع الرياضي وإجراء المعالجة ثم تخزين النتائج على شكل شرائح شعاعية وفق تابع استقراء TIN أو خلوية وفق توابع استقراء (IDW, SPLINE, Natural Neighbor) وذلك بحسب طريقة الاستقراء المطبقة، يظهر (شكل 8) واجهة التطبيق المبرمجة المتبعة.



شكل (10) نقاط الغمامة الليزرية التي تغطي الأرض الطبيعية وتظهر نقاط تقييم الدقة باللون الأحمر



شكل (9) آلية توضيح مراحل تسلسل العمل على معطيات البيانات الليزرية

اعتمدت مجموعة موحدة من المعاملات (Parameters) في استقراء السطوح المعبرة عن سطح الأرض الطبيعية وفق ما يأتي:

- عند استخدام تابع مقلوب المسافة الموزونة كان عدد النقاط المعتمدة في استقراء النقاط المجهولة هو 12 نقطة. أما حجم بيكسل السطح المستقرأ فيساوي 1 متر. كما لم تثبت قيمة نصف قطر البحث المعتمد، وكذلك فرضت قيمة الوزن لمقلوب المسافة تساوي 2.

- بالنسبة إلى تابع المجاور الأقرب، تثليث ديلوني وتابع SPLINE فقد اعتمدت أيضاً المتغيرات السابقة نفسها من حيث عدد النقاط وكذلك حجم الخلية الناتجة.

يظهر (شكل 11) مقارنةً للسطح الناتج عن تطبيق تابع الاستقراء باستخدام المجاور الأقرب مع السطح الناتج عن الاستقراء باستخدام تابع SPLINE. نلاحظ وجود تشوهات واضحة في بعض المواقع في سطح SPLINE مشاراً إليها باستخدام دوائر، وهذه التشوهات ناجمة عن التغير المفاجئ من حيث الارتفاعات بين قيم النقاط المتجاورة .

جرى العمل على معطيات بيانات ليزرية ذات كثافات وسطية مختلفة. وهذا يعني أنّ حجم البيكسل سيكون متغيراً ضمن كل سطح مستقرأ. يقوم البرنامج أولاً باستيراد النقاط المصنفة بأنها تمثل الأرض الطبيعية فقط على شكل شريحة جغرافية بصيغة نقاط. ويبلغ عدد نقاط الغمامة الأولى نحو 23966 نقطة. يقوم البرنامج بعد ذلك باقتطاع 10% من عدد النقاط (عددها 2670 نقطة). لن تستخدم هذه النقاط ضمن عمليات الاستقراء ولكنها ستستخدم لاحقاً في تقييم الدقة. تظهر هذه النقاط باللون الأحمر في (شكل 10) في حين تظهر النقاط التي استخدمت في الاستقراء باللون الأزرق.

مجموعات مختلفة الكثافة من أجل كل مثال تراوح بين (واحد متر إلى 6 أمتار). ويظهر (جدول 1) القيم الحقيقية لبعض النقاط التي استخدمت من أجل تقييم دقة استقراء المناسيب بتطبيق التتابع السابقة

(IDW, SPLINE, Natural Neighbor, TIN) -

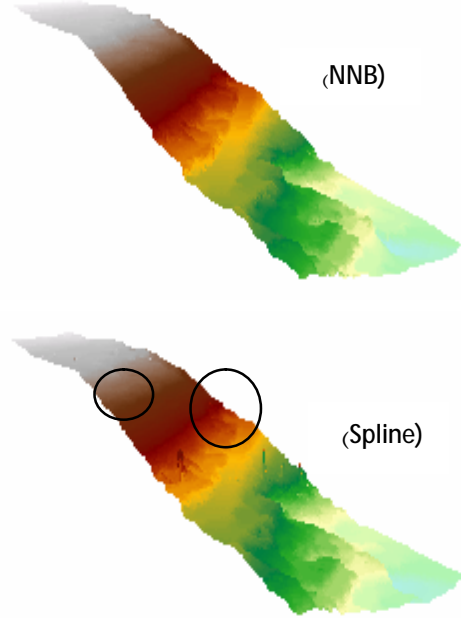
جدول (1) القيم الحقيقية والمستقراة لمناسيب بعض النقاط ضمن الغمامة المدروسة

num	Z real	Z idw	Z nnb	Z spl	Z Tin
1	313.89	312.62	311.72	313.59	313.72
2	332.49	332.55	332.51	331.99	332.53
3	333.02	333.09	333.10	333.42	333.11
4	333.74	333.80	333.78	333.24	333.78
5	322.82	322.52	322.60	322.52	322.63
6	335.49	335.56	335.59	336.18	335.50
7	337.37	340.32	340.72	337.91	341.08
8	344.01	343.31	343.61	344.60	343.99
9	326.36	326.11	326.15	326.06	325.87
10

يبين الجدول السابق القيم الحقيقية لمنسوب كل نقطة وما يقابلها من أجل كل سطح مستقراً بعد إسقاط هذه النقاط على كل سطح وذلك للمنطقة الأولى (منطقة حضرية بسيطة الانحدارات)، و بعد ذلك قسمت النقاط إلى نقاط استقراء ونقاط تقييم الدقة. ويظهر (جدول 2) عدد النقاط وكذلك يحسب الخطأ المتوسط التربيع لقيم الرواسب بين القيم المستقراة من قبل كل تابع وبين القيم الحقيقية وذلك لنقاط تقييم الدقة جميعها، وقد اعتمد الحساب وفق المعادلة الآتية:

$$RMSE = \sqrt{\sum (Z_i - Z_t)^2 / n}$$

إذ: Z_i هي قيمة ارتفاع النقطة على السطح المستقراً مقدر بالمتراً، Z_t هي قيمة ارتفاع النقطة على سطح نموذج الارتفاعات الرقمي الحقيقي مقدر بالمتراً أيضاً إذ n هو عدد النقاط المستخدمة في التقييم. يبين (جدول 3) نتائج تكرار تطبيق النموذج السابق على



شكل (11) مقارنة لسطح المستقراة للارتفاعات الرقمي بين طريقتين (NNB & Spline)

17. تقييم نتائج الاستقراء:

إن تقييم دقة استقراء سطح الارتفاعات الرقمي يجري عادةً وفق طريقتين :

- التقييم المطلق الذي يجري بالاعتماد على معطيات مرجعية مقيسة على سطح الأرض الطبيعية لمنطقة الدراسة نفسها. وتكون هذه المعطيات ذات مناسيب معلومة إذ تُقارن هذه المناسيب بما يقابلها من مناسيب مقيسة على السطح المستقراً.

- التقييم النسبي وتستخدم عندما لا تتوفر معطيات مرجعية وهو ما اتبع في طريقة العمل الحالية. فقد طبقت التتابع السابقة على مثالين لمعطيات ليزيرية لمنطقتين مختلفتين في العناصر الطبيعية والصناعية وفي الصفات الطبوغرافية لسطح الأرض الطبيعية، وكذلك بتباعدات وسطية مختلفة بين نقاط الغمامة، إذ تتوفر ثلاث

غمامات الليزر الجوي الخاصة بالمنطقة الثانية، وهذه المنطقة تضم صفات طبيعية مختلفة عن صفات المنطقة الأولى (منطقة جبلية شديدة الانحدار وتغيّرات مفاجئة في الأرض الطبيعية). ونشير إلى أنّ التباعد الوسطي بين

جدول (2) الخطأ المتوسط التربيع المحسوب على قيم مناسب نقاط تقييم الدقة للمثال الأول

العينة	التباعد بين النقاط (الكثافة الوسطية)	عدد النقاط الأصلية	عدد نقاط تقييم الدقة	RMS(m)			
				IDW	SPLINE	NNB	TIN
1	1 - 1.5 m	23966	2670	0.214	0.231	0.230	0.225
2	2 - 3.5 m	6372	706	0.265	0.257	0.244	0.256
3	4 - 6 m	1553	170	0.390	0.347	0.354	0.385

جدول (3) الخطأ المتوسط التربيع المحسوب على قيم مناسب نقاط تقييم الدقة للمثال الثاني

العينة	التباعد بين النقاط (الكثافة الوسطية)	عدد النقاط الأصلية	عدد نقاط تقييم الدقة	RMS(m)			
				IDW	SPLINE	NNB	TIN
4	1 - 1.5 m	19607	2179	0.550	0.558	0.496	0.540
5	2 - 3.5 m	4540	505	0.861	0.983	0.751	0.764
6	4 - 6 m	1143	127	1.593	1.486	1.170	1.181

توابع الاستقراء المستخدمة مع تزايد التباعد الوسطي بين النقاط ضمن هذا المثال.

ويظهر تابع الاستقراء بطريقة المجاور الأقرب وتابع تثليث ديلاوني أفضل النتائج في الواقع، إذ نجد أنّ هذه القيم في المثال الثاني للعينة رقم 5 كانت أقلّ بأكثر من عشرين سنتمترًا من التابعين الآخرين وذلك عندما كانت الكثافة الوسطية نحو المترين. وكذلك في العينة رقم 6 مع ازدياد التباعد إلى عدة أمتار كانت قيمة الخطأ المتوسط التربيع أقلّ بنحو 30cm من تابع SPLINE وبنحو 40cm من تابع IDW.

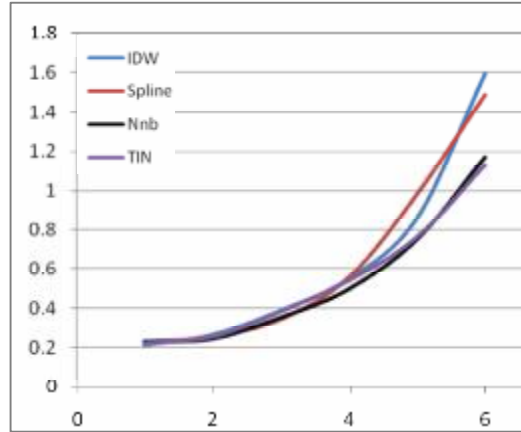
يستنتج أنّ تابع الاستقراء الرياضي وفق مبدأ مقلوب المسافة الموزونة يعطي بدوره دقة جيدة في الاستقراء في المناطق الحضرية قليلة الانحدار، وكذلك عندما يكون التباعد بين النقاط صغيراً في المناطق المعقدة التضاريس كما في المثال الثاني (العينة رقم 4). إذ يلاحظ أنّ الاختلافات عن بقية التوابع التي يعطيها تابع IDW هي عدة سنتمترات. ويزداد الخط البياني للتابع لبتعاداً عن بقية التوابع مع تزايد التباعدات بين النقاط.

5. المقارنات والاستنتاجات:

مُثلت النتائج السابقة باستخدام منحنى بياني (شكل 12) يعبر المحور الأفقي فيه عن ترتيب العينات المستخدمة في الخوارزميات (من 1 إلى 6) كما يظهر المحور العمودي قيم الخطأ المتوسط الربيع لكل عينة بحسب تابع الاستقراء المستخدم. تظهر النتائج أنّ قيم الخطأ متوسط التربيع تزايد مع تزايد التباعدات بين النقاط المشكّلة للغمامة الأصلية؛ وذلك في التوابع الرياضية المستخدمة كلّها، فالمنحنى البياني الخاص بهذا الخطأ هو منحنى تصاعدي. ومن جهة أخرى، نلاحظ أنّ هذه القيم تكون متقاربة في طرائق الاستقراء السابقة جميعها في المثال الأول أي للعينات من (1 إلى 3) الذي يعبر عن منطقة سكنية، طبيعة الانحدارات للأراضي ضمنها بسيطة، ولا تتجاوز الفروق في قيم الخطأ متوسط التربيع بين التوابع عدة سنتمترات على الرغم من تزايد التباعد الوسطي بين النقاط من واحد متر إلى عدة أمتار، فيما يزداد انحناء التابع باتجاه الأعلى أي تزايد الأخطاء في المثال الثاني أي العينات (4 إلى 6) الذي يعبر عن منطقة جبلية شديدة الانحدار، مع الانتباه إلى أنّ التباين بدأ بصورة واضحة في قيم الأخطاء المتوسطة التربيع النهائية بين

يمكن أن نرتكبه بالاستقراء الرياضي بحسب طبيعة المنطقة من جهة، ومن جهة أخرى يمكننا من اختيار طريقة الاستقراء التي يجب اعتمادها للحصول على دقة عالية، لأن النتائج تتغير كما لاحظنا وتتأثر بنوع التابع الرياضي المستخدم في كل خوارزمية بشكل رئيسي وكذلك باختلاف كثافة النقاط المدخلة .

ويمكن كعمل مستقبلي مرتبط بهذا البحث نشر هذه التوابع الرياضية المبرمجة على مجموعة أوسع من الأمثلة لغمامات أخرى من نقاط الليزر الجوي، وتغطي مناطق ذات طبيعات طبوغرافية مختلفة وخاصة في المناطق التي يكون فيها خطوط تغير مفاجئة لسطح الأرض الطبيعية (break-lines) وهو ما سيعطي أهمية وغنى أكبر للبحث.



شكل (12) مقارنة لقيم الخطأ المتوسط التربيع للرواسب على كل تابع بحسب كل مثال من الأمثلة

فيما يظهر تابع SPLINE تقارباً من بقية التوابع في المنطقة الأولى ويعطي نتائج أفضل نوعاً ما ولكن مع تباعد أكبر عن بقية التوابع في المنطقة الثانية. يمكن تفسير ذلك بأن طبيعة المنطقة الأولى كانت ذات تدرج طبيعي في تضاريسها، في حين التغيرات الطبيعية المفاجئة في المنطقة المدروسة الثانية ذات الطبيعة الجبلية هي التي أسهمت في إعطاء دقة أقل لقيم الارتفاعات المستقراة (وهو ما أشرنا إليه في تعريف هذا التابع).

مما سبق نستنتج أنّ تابع الاستقراء الرياضي وفق الجوار الأقرب، الذي يظهر باللون الأسود في (شكل 12)، يعطي نتائج أفضل بشكل عام وخاصة في المناطق ذات التضاريس الصعبة ويتقارب منه تابع تثلث ديلوني فيما بقية التوابع تتقارب منحنياتها البيانية مع تزايد الكثافة الوسطية للنقاط وضمن المناطق الحضرية أيضاً.

6. الخاتمة والتوصيات:

عُرِضَتْ في هذه المقالة مجموعة من الطرائق الأساسية المستخدمة في استقراء السطوح انطلاقاً من نقاط عشوائية معلومة المنسوب ذات كثافات متفاوتة وتمثل مواقع مكانية مختلفة؛ وذلك ضمن تطبيق برمجي يشمل طرائق الاستقراء الرياضية الأكثر استخداماً وهي (تابع IDW، تابع SPLINE، تابع TIN، تابع Natural Neighbor).

نوقش من خلال المقارنة، إيجابيات وسلبيات كل طريقة وقدم تقييماً لدقة الاستقراء في المواقع مجهولة المنسوب. إن هذا العمل المنجز يمكننا من تقدير قيمة الخطأ الذي

مراجع الدراسة

- [12] P.Hottier,1990. Splines cubiques, support de cours ENSG-IGN du DEA SIG, IGN.
- [13] P. Lohmann, and A. Koch, 1999. Quality assessment of laser-scanner-data, <http://www.ipi.uni>.
- [14] R. Sibson. , 1981. A brief description of natural neighbour interpolation. In V. Barnett, editor, Interpreting Multivariate Data, John Wiley & Sons, Chichester.
- [15] S. Wechsler, 1990. Results of the DEM User Survey, <http://web.syr.edu>.
- [16] S. McClendon , 2010 . the use of different spatial interpolation techniques using ESRI's Spatial Analyst and Geostatistical Analyst extensions, 2010 .Pennsylvania State University. GEOG 586 .
- [17] Y. Ziary & H. Safari, 2007 . To Compare Two Interpolation Methods: IDW, KRIGING for Providing Properties (Area) Surface Interpolation Map Land Price. District 5, Municipality of Tehran area 1. *
- [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] A. Carrara, G. Bitelli and R. Carla, 1997. Comparison of techniques for generating digital terrain models from contour lines, in International Journal of Geographical Information Science 11(5), pp. 451-473.
- [3] Christopher D. Lloyd, 2010. Local Models for Spatial Analysis, second edition, pages 150-168, <http://books.google.com/books> .
- [4] C. D. Lloyd and P. M. Atkinson, 2002. Deriving DSMs from LiDAR data with kriging. International Journal of Remote Sensing.
- [5] F. Rousseaux, 2003. Étude de la représentation du relief sur les application, in Revue internationale de géomatique, n° 4/2003, Édition Lavoisier, Paris, France, laboratoire COGIT, IGN-SR-03-050-S-ART-FR.
- [6] F. Rousseaux, 2006 .Caractérisation d'erreurs sur un modèle numérique de terrain en fonction de zones morphologiques , Paris, France, Bulletin d'information scientifique et technique de l'IGN - n° 75 .
- [7] G. Vosselman, 2000. Slope based filtering of laser altimetry data. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, XXXIII, Amsterdam.
- [8] J. Carter, 1992 . The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using grid DEMs in Cartographica, pp. 22-34.
- [9] K. Chang and B. Tsai, 1991 . The effect of DEM resolution on slope and aspect mapping cartography and Geographic Information Systems, pp. 69-77.
- [10] L. Eklundh and U. Martensson, 1995. Rapid generation of digital elevation models from topo-graphic maps, in International Journal of Geographical Information Systems, pp. 329-340.
- [11] P. Axelsson, 1999. Processing of laser scanner data – algorithm and applications, ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol.54 pp138 - 147.