

# استخدام النمذجة ونظام المعلومات الجغرافي GIS في دراسة سطح المياه الجوفية

د. م. حسن بيلاني

كلية الهندسة المدنية - جامعة حلب - حلب - سورية

بريد إلكتروني: [h.bilani@scs-net.org](mailto:h.bilani@scs-net.org)

## المخلص

تعتبر المياه الجوفية المصدر الرئيسي للمياه في المناطق ذات الأمطار القليلة. ويتجلى ذلك خاصة في الوطن العربي الذي يتصف بمحدودية وندرة الموارد المائية بسبب وقوعه ضمن الحزام الجاف. لذلك من الضروري ترشيد استعمال المياه في هذه المناطق من خلال تخطيط سليم يعتمد على استعمال نماذج رياضية بحيث تعين صاحب القرار على اتخاذ خطوات صحيحة في التخطيط والاستثمار الأمثل للمشاريع المائية. ويتطلب التخطيط السليم حالياً وضع خرائط دقيقة لطبيعة توضع البساط المائي الجوفي وتطوره مع الزمن بالإضافة لوضع تنبؤات عن وضعه المستقبلي. تهدف هذه الورقة إلى دراسة استخدام كل التقانات الحديثة ومن بينها البرمجيات الحاسوبية لتمثيل البساط المائي بنموذج رياضي يسهل التعامل معه، أي الحصول على خارطة رقمية ثلاثية الأبعاد تمثل السطح مما يتيح إمكانية استخدام البرمجيات الحاسوبية الأخرى ومن أهمها نظام المعلومات الجغرافي GIS الذي يسمح بإجراء تحليلات مكانية للبساط المائي ترتبط بالأعماق والميول والطبيعة الجيولوجية للمنطقة. في هذا البحث تم تسليط الضوء على الطرق الرياضية في نمذجة السطوح والمقارنة فيما بينها من حيث الدقة لعينة مدروسة، حيث تبين أفضلية استخدام طريقة Kriging في تمثيل سطح البساط المائي. إن تبني استخدام طريقة Kriging لتمثيل سطح البساط المائي يعني تحضير قاعدة معلومات مناسبة تتلاءم مع التحليلات المنفذة بنظام المعلومات الجغرافي GIS.

## كلمات دالة:

نمذجة، بساط مائي، مياه جوفية، GIS

## 1- المقدمة

تعتبر خطوط التدرج عنصراً معلوماتياً هاماً يضيف إلى الخارطة بعداً إضافياً قابلاً للقياس. كما أنها تعتبر من أسهل طرق إسقاط المعلومات استقراءً على الخرائط. تعرف خطوط التدرج بأنها خطوط اعتبارية ضمن الخارطة تمر من نقاط لها مواصفات كمية ثابتة. بعبارة أخرى خط التدرج هو المحل الهندسي لقيمة محددة لظاهرة مستمرة في الفضاء الثنائي ( $u = \text{const.}$ ) والتي يمكن تعريفها تحليلياً بالشكل:

$$\frac{\partial u(x,y)}{\partial y} dy + \frac{\partial u(x,y)}{\partial x} dx = 0$$

حيث الظاهرة  $u$  يمكن أن تمثل أي ظاهرة مستمرة ووحيدة التمثيل في الفضاء الثنائي مثل الضغط الجوي والانحراف المغناطيسي والهطول المطري والتضاريس ومنسوب المياه الجوفية. ويعتبر المثالان الأخيران -موضوع هذه الورقة- الأكثر شيوعاً واستخداماً، إذ بواسطة خطوط التسوية (خطوط التدرج المعبرة عن الارتفاع عن سطح البحر) يمكن تمثيل مواصفات سطح الأرض الطبيعية ذات العلاقة بالحركة الهيدرولوجية من وديان ومنحدرات وسهول وتلال وغير ذلك. كما يمكن بواسطة خطوط الأعماق تمثيل سطح البساط المائي. ودقة هذا التمثيل تعتمد على دقة اشتقاق هذه الخطوط، وبالتالي تعتبر عاملاً هاماً مؤثراً على دقة التخطيط لمعظم مشاريع الهندسية المائية.

إن الأسلوب التقليدي في اشتقاق هذه الخطوط يعتمد مبدأ الميل المنتظم بين النقاط المتجاورة من مجموعة نقاط مقاسة تغطي المنطقة بكثافة محددة وتدعى بالعينة. وباعتماد مبدأ الميل المنتظم يمكن إمرار منحنيات التدرج بين نقاط العينة بالتوسط الداخلي.

ولكن مع ظهور وانتشار استخدام الخرائط الرقمية في الربع الأخير من القرن الماضي تم إطلاق مفهوم النماذج الرقمية وازداد استخدامها كمنتجات رقمية متممة للخرائط الرقمية. وتتيح هذه النماذج أتمتة معظم المسائل الهندسية المعتمدة على تمثيل السطوح ومنها مسألة رسم خطوط الأعماق للبساط المائي.

وقد تميزت طرق الرسم الآلي لخطوط التدرج اعتماداً على نماذج رقمية عن الطرق التقليدية بالدقة والسرعة والوفر في الجهد والكلفة. بيد أن بناء نماذج رقمية اعتماداً على عينة مقاسة لمنطقة ما يمكن أن يتم بطرق رياضية عديدة تؤدي في الحالة العامة إلى نماذج مختلفة من حيث الدقة. وعموماً لا أفضلية لطريقة على أخرى بالمطلق لأن ذلك يتعلق بطبيعة السطح، إلا أن المعايير الواضحة لهذه العلاقة غير موجودة في المراجع العلمية المختصة.

إن العلاقة بين دراسة التضاريس وسطح البساط المائي ونظام المعلومات الجغرافي موجودة من خلال استخدام النمذجة والتحليل والتصنيف في الأمثلة الآتية:

- إجراء تحليلات للنموذج التضاريسي الرقمي DEM لتحديد الميول الأعظمية - اتجاهات الجريان - وشبكة المسيلات والأحواض الساكنة.
- دراسة التغيرات في استخدام الأراضي: تحول الأراضي الزراعية إلى مناطق سكنية يعني التحول إلى سطوح كتيمية وشبكات طرق مما يؤثر على وضع البساط المائي من خلال تحول نمط النفوذ إلى جريان سطحي في تلك المناطق.
- دراسة معدلات رشح الماء للمياه الجوفية وعلاقتها بتصنيف التربة والتصنيف الجيومورفولوجي لسطح الأرض.

في هذه الورقة سيتم البحث في مدى ملائمة الطرق الرياضية لطبيعة السطح من أجل إنشاء نماذج رقمية مثلى تؤدي إلى أدق تمثيل ممكن لسطح الأرض الطبيعية بواسطة خطوط التسوية اعتماداً على معيار لوصف وعورة تضاريس المنطقة سيتم اقتراحه في سياق البحث، وأيضاً لسطح البساط المائي بواسطة خطوط الأعماق.

## 2- أهمية البحث

تأتي أهمية هذا البحث من أهمية دراسة المشاريع ذات العلاقة بالمياه الجوفية اعتماداً على نماذج رقمية تماشياً مع التطور في مجال استخدام المعلوماتية، ومع تطبيقات أنظمة المعلومات الجغرافية التي تعتمد على أساس جغرافي وتضاريسي رقمي.

## 3- هدف البحث

وضع أسس ومعايير لاختيار الطريقة الرياضية الأنسب لإنشاء النماذج الرقمية للتضاريس ولللبساط المائي للحصول على نتائج واقعية في تحليلات نظام المعلومات الجغرافي GIS.

## 4- حدود البحث

إنشاء النموذج الرقمي للتضاريس ولللبساط المائي من النمط الشبكي المنتظم واختبار ملائمة إحدى الطرق الرياضية الآتية نظراً لاعتبارها الأكثر استخداماً:

- طريقة التوسط المركب إحصائياً Kriging.
- المتوسطة الموزونة باعتبار قوى المسافة Inverse distance to power.
- طريقة التثليث Triangulation.
- طريقة الانحناء الأصغر Minimum curvature.

## 5- فروض البحث

- وجود علاقة بين كثافة نقاط المسح الطبوغرافي ووعورة التضاريس، انطلاقاً من اعتبار أن المساح المحترف يقوم بتكثيف نقاط المسح في المناطق الوعرة لتحقيق تمثيل صحيح للتضاريس، أي أن العينة تكون دوماً معبرة (Representative) وفق المصطلحات الإحصائية.
- إن طريقة التثليث تناسب المناطق الوعرة بشكل خاص نظراً لأن معدل تغير الميل كبير، وهذا قد لا يلاحظ في الطرق الرياضية الأخرى التي تدخل نقاط بعيدة في عملية التوسط.
- وجود علاقة بين وعورة التضاريس وقوة المسافة في حساب الوزن لدى اتباع طريقة المتوسطة الموزونة بسبب اعتبار التأثير الأكبر للنقاط القريبة.
- يمكن أن يؤدي إدخال معيار وعورة التضاريس في اختيار النموذج الإحصائي المستخدم في طريقة Kriging إلى نتائج أفضل نظراً لمرونة هذه الطريقة.

- إن خطوة الشبكة في النموذج الرقمي الناتج تتبع لوعورة المنطقة ضمن حدود معينة، يصبح بعدها من غير المجدي تكثيف الشبكة.
- إن خوارزمية طريقة Inverse distance to power تعطي سطحاً لا يمكن وصفه بالمرن، وبالتالي لا يناسب تمثيل سطح بساط مائي وربما كانت طريقة Kriging أو Minimum curvature هي الأفضل.

## 6- مصطلحات البحث

- المنطقة السهلة: وهي المنطقة التي يمكن تعميم سطحها بمستوى أفقي أو مائل دون وجود فروق ارتفاعات نسبية بين النقاط المتجاورة فيها بالاتجاه المتعامد مع الميل.
- المنطقة الوعرة: وهي المنطقة التي يمكن تعميم سطحها بمستوى أفقي أو مائل مع وجود فروق ارتفاعات نسبية ومتجانسة بين النقاط المتجاورة فيها بالاتجاه المتعامد مع الميل.
- المنطقة الشديدة الوعرة: وهي المنطقة ذات فروق الارتفاعات الكبيرة بين نقاطها مثل المناطق الجبلية.

## 7- توصيف وعورة التضاريس

### 7-1 تمهيد

يمكن تعريف وعورة التضاريس بأنها معدل تغير ميل الناظم على السطح عند الانتقال من نقطة إلى أخرى. يميز عادة في المسح الارتفاعي بين المناطق السهلة والمناطق الوعرة، ويلحظ ذلك في دفاتر الشروط الخاصة بالمسح. فمثلاً وزارة الإسكان والمرافق السورية تصنف وعورة المنطقة في نوعين: الدرجة الأولى والدرجة الثانية، وذلك حسب قيمة الميل الوسطي للمنطقة، دون أن توضح حتى كيفية حساب الميل الوسطي [1]. ولكن الميل الوسطي لا يمكن أن يعبر عن درجة وعورة التضاريس. فهناك مناطق منبسطة (بدون ميل) ولكنها وعرة. كما أن هناك مناطق شديدة الميل ولكنها غير وعرة كالمنحدرات.

### 7-2 المعيار المقترح (معيار الكثافة)

إن معيار الكثافة يمكن استقراؤه من واقع المسح. فعلياً المسح الارتفاعي السليم يلحظ كافة النقاط المميزة في التضاريس وهي نقاط تغير الميل، أي نقاط تغير ميل الناظم. وبالتالي حسب تعريف الوعرة المذكور أعلاه ستكون كثافة نقاط المسح أكبر في المناطق الوعرة وإن كانت ذات ميل وسطي ضعيف. كما ستكون الكثافة قليلة في المناطق السهلة وإن كانت ذات ميل شديد. بالإضافة إلى ذلك، صعوبة الرؤية في المناطق الوعرة لمسافات طويلة تفرض تكثيف النقاط.

من هنا نلاحظ أن معيار كثافة نقاط المسح يمكن أن يصف درجة وعورة المنطقة وصفاً صحيحاً. لذلك سنقترح الآن معياراً كميّاً لتحديد درجة وعورة المنطقة المسوحة. ولكن

المعيار الكمي يجب أن يصف نماذج محددة من التضاريس. فإذا اعتبرنا أن أصناف الوعورة هي ثلاثة: السهلة (غير الوعرة) - الوعرة - شديدة الوعورة، فيجب الحصول على ثلاثة مؤشرات من معيار الكثافة المقترح لتعبر بدورها عن الأصناف المذكورة من التضاريس. وللوصول إلى ذلك يمكن الانطلاق من الاعتبارات العملية الآتية:

▪ في المنطق السهلة أو القليلة الوعورة لا يحتاج المساح لقياس نقاط إضافية، بل يكفي بتحقيق شرط تباعد النقاط في المخطط وهو  $2.5 \text{ cm}$  [1] أي أن النقطة الواحدة تغطي مساحة

$$S_1 = \pi \frac{D^2}{4} \text{ حيث}$$

$$D = \frac{2.5 \text{ cm}}{100} M$$

M مقياس المخطط.

وبالتالي كثافة النقاط الممسوحة في المنطقة ستكون

$$K_1 = \frac{1}{S_1}$$

▪ نعتبر الآن أن كثافة المسح الفعلية في منطقة أخرى هي

$$K_2 = \frac{n}{S_2}$$

حيث n عدد النقاط الممسوحة في المنطقة

$S_2$  مساحة المنطقة بالمتر المربع

▪ نحسب النسبة  $c = \frac{K_2}{K_1}$  ونلاحظ مايلي:

- كلما اقتربت c من الواحد دل ذلك على اقتراب عدد النقاط من الحد الأدنى، أي أن المنطقة سهلة.

- إذا كانت  $c < 1$  دل ذلك على أن العينة ضعيفة التمثيل، أي أن البيانات لا تسمح بتمثيل صحيح للتضاريس.

- بزيادة c عن الواحد، تبدأ وعورة التضاريس. فلو كانت  $c = 2$  فهذا يعني أن المساح قد اضطر لمسح ضعف الحد الأدنى من النقاط بسبب الوعورة.

- بالإضافة لمعيار الكثافة المذكور أعلاه، سنفترض أن تباين تشتت ارتفاعات النقاط الممسوحة حول قيمة وسطية لها يمكن أن يحمل مؤشراً على سرعة تبدل الميل في المنطقة وبالتالي على وعورتها. فإذا اعتبرنا عينة مؤلفة من n نقطة معلومة الارتفاع، يمكننا أولاً حساب الارتفاع الوسطي من العلاقة:

$$\bar{h} = \frac{\sum h_i}{n}$$

ومن ثم يحسب الانحراف المعياري

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (h_i - \bar{h})^2}{n - 1}}$$

- لوضع معيار رقمي يدل على درجة الوعورة قمنا بمسح ثلاث مناطق معروفة (سهلة - وعرة - شديدة الوعورة) حيث ربطنا درجة وعورة كل منها بكثافة نقاط المسح فيها وبالانحراف المعياري للارتفاعات. الجدول (1) يبين نتائج هذه الدراسة.

الجدول (1) - تصنيف وعورة التضاريس حسب معيار كثافة نقاط المسح

رقم المنطقة	التصنيف	المساحة (هكتار)	عدد النقاط	الكثافة (نقطة/هكتار)	c	الانحراف المعياري للارتفاع الوسطي	الميل الوسطي %	الانحراف المعياري للميل الوسطي
1	سهلة	12.9	242	18.5	0.9	2.14	1.6	1.5
2	وعرة	12.9	318	24.5	1.22	1.71	0.8	0.6
3	شديدة الوعورة	11.8	457	38	1.9	18.97	15.5	11.2

نلاحظ من الجدول أعلاه:

- أن هناك علاقة فعلاً بين كثافة نقاط المسح ووعورة المنطقة، فإذا اعتبرنا أن هناك مجالاً في قيم c يحدد المنطقة السهلة وهو بحدود  $\pm 10\%$  فهذا يعني:
  - ◀ عندما تكون قيمة c في المجال 0.9 – 1.1 فإن المنطقة يمكن تصنيفها بالسهلة.
  - ◀ عندما تكون قيمة c دون المقدار 0.9 فهذا يعني أن العينة غير ممثلة و لا يمكن اعتماد نقاط المسح لإنشاء نموذج تضاريسي رقمي.
  - ◀ إذا اعتبرنا أن كثافة نقاط المسح في المناطق شديدة الوعورة (الجبلية) تبدأ من ضعف الحد الأدنى (المناطق السهلية)، وباعتبار الحد المذكور أعلاه، فإن المناطق شديدة الوعورة تبدأ من قيمة للمؤشر c قدرها 1.9.
  - ◀ بالنتيجة ستكون المناطق الوعرة هي التي تنحصر فيها قيمة c في المجال المتبقي وهو 1.9 – 1.1.
  - ◀ بالنسبة لمؤشر الارتفاع الوسطي والانحراف المعياري له فإنه لا يصلح كمعيار لتوصيف التضاريس.
  - ◀ مؤشر الميل الوسطي والانحراف المعياري له لا يصلح للتعبير عن طبيعة وعورة التضاريس.

## 8- تشكيل النموذج الرقمي [2]

إن أهم عملية لتشكيل النموذج الرقمي هي اختيار نقاط العينة التي سيبنى على أساسها النموذج، ويجب العناية بطرق أخذ هذه العينات بغية الحصول على نوعية جيدة من المعطيات، فبالنسبة لسطح التضاريس يجب أن تتضمن المعطيات معلومات عن التفاصيل التي تؤثر في شكل التضاريس كمصارف المياه، وقيم الجبال والتلال والانكسارات الموجودة على الطبيعة، فكلها تحدد طريقة أخذ العينات، إلا أنه قد تكون هنالك معايير أخرى تقودنا إلى اختيار طريقة معينة لأخذ العينات كالكلفة أو توفر الأجهزة المناسبة للقياس كما في حالة حفر آبار لدراسة سطح المياه الجوفية.

توجد عدة طرق لإنشاء بنية للمعطيات في النماذج الارتقاعية العددية، أهمها طريقتان: البنية الشبكية المنتظمة وبنية شبكة التثليث غير المنتظمة.

## 8-1 البنية الشبكية المنتظمة (Rectangular grid)

إن البنية الشبكية المنتظمة هي بنية متريسية حيث العلاقات الطوبولوجية للنقاط هي علاقات ضمنية، فهي مؤلفة من مجموعة من المربعات تشكل شبكة، وطول ضلع هذه المربعات محدد ويتم قياس ارتفاعات رؤوس هذه المربعات بإحدى طرق المسح المعروفة. ونلاحظ أن معطيات النموذج الارتقاعي العددي في هذه الطريقة تعكس إحدى البنى التخزينية في الحاسوب، أي أنه يمكن تخزين ارتفاعات نقاط الشبكة كمصفوفة، نسميها مصفوفة الارتفاعات (elevation matrix) حيث أرقام أسطرها وأرقام أعمدتها معرفة بالمواقع المستوية لرؤوس المربعات وحيث يبعد كل رأس عن آخر مسافة ثابتة، لذلك فإن تداول مصفوفة الارتفاعات ونمذجة خوارزمياتها سهل، إلا أنه لا يمكن بشكل عام إلباس النموذج الارتقاعي العددي ذي البنية الشبكية المنتظمة بشكل جيد مع سطح التضاريس المعقد في غالب الأحيان، دون زيادة في كثافة نقاط الشبكة للوصول إلى الدقة المطلوبة. من هنا يتبين لنا أن طول ضلع المربع من الشبكة يتعلق بوعورة التضاريس، فيمكن اعتماد أضلاع كبيرة في المناطق ذات الميول البسيطة، لكن المناطق الوعرة تتطلب تأسيس مربعات ذات أطوال أضلاع صغيرة بغية الوصول إلى بنية مقبولة. فعلى سبيل المثال إذا أردنا استخدام النماذج الارتقاعية العددية ذات البنية الشبكية لتمثيل التضاريس باستخدام طريقة منحنيات التسوية، فسيقوم الحاسوب بعملية توسط داخلي بين كل نقطتين متتاليتين من الشبكة لتحديد مواقع منحنيات التسوية، ثم سيقوم بعملية وصل آلية بين كل النقاط التي تقع على ارتفاع ثابت، وكذلك الأمر إذا أردنا إيجاد ارتفاع نقطة من المنطقة اعتباراً من معطيات النموذج الارتقاعي العددي. لكن نقاط تغير الميول في المنطقة سوف لا تكون بالضرورة وفق أضلاع الشبكة، أضف أن النقاط الأكثر ارتفاعاً أو انخفاضاً في المنطقة لن تكون بالضرورة نقاطاً من الشبكة وبالتالي لن تكون معطيات النموذج الارتقاعي العددي ذي البنية الشبكية معطيات دقيقة و سيؤدي ذلك إلى تمثيل غير دقيق للتضاريس.

## 8-2 بنية شبكة التثليث غير المنتظمة أو البنية TIN (Triangulated irregular network)

تتألف بنية شبكة التثليث غير منتظمة من عناصر موشورية متلاصقة، حيث قواعد هذه الموشير مثلثات مستوية وأطرافها (ارتفاعات الموشير) تمثل الارتفاعات في العينة المأخوذة وعند اللجوء إلى هذه البنية تكون معطيات النماذج الارتقاعية العددية هي المواقع المستوية  $(x, y)$  و الارتفاعية  $(z)$  لنقاط العينة.

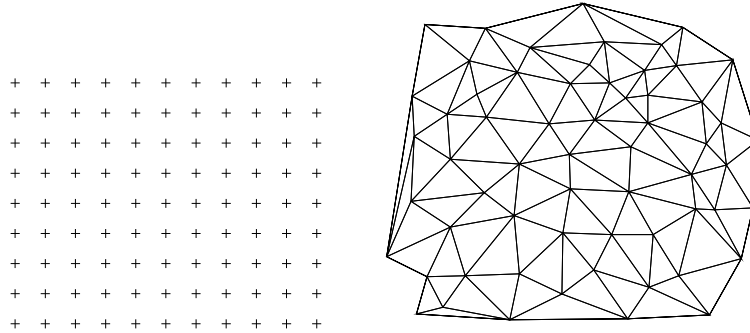
و يتضمّن النموذج النقاط المرتفعة والمنخفضة ونقاط تغير الميول والانكسارات في التضاريس، مما يعطي للنموذج الارتقاعي العددي شكلاً غير منتظم ونقاطاً غير متساوية البعد عن بعضها إلا أن العينة هنا ممثلة. ولا بد في هذه البنية من اعتماد علاقات طوبولوجية تربط بين نقاط النموذج، أي لا بدّ من تحديد الخطوط التي تصل بين مختلف النقاط والتي سيتم بموجبها تشكيل المثلثات. و المهم حين اعتماد هذه البنية في النماذج الارتقاعية العددية هو

الاختيار الصحيح والجيد لهذه الطوبولوجية، وخاصة إذا أردنا تمثيل التضاريس بطريقة منحنيات التسوية اعتماداً على النماذج الارتقاعية العددية واستناداً إلى بنية شبكة تثليث غير منتظمة (TIN).

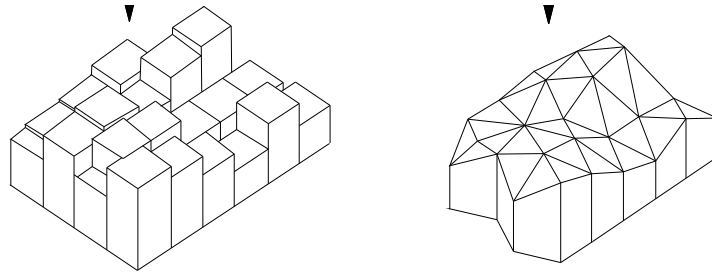
وأهم المعايير المستخدمة لتحديد طوبولوجية النقاط، أي الوصل بين النقاط لتشكيل البنية TIN هو اعتماد الوصل بين أقرب النقاط بحيث تتشكل مثلثات متساوية الأضلاع قدر الإمكان. و لرسم منحنيات التسوية بشكل آلي استناداً إلى النموذج الارتقاعي العددي ذي البنية TIN يجب اعتماد فرضيتين:

- إن كل ضلع من أضلاع شبكة مثلثات TIN له ميل ثابت.
  - إن سطح كل مثلث هو سطح مستوي.
- و يمكن من بيانات البنية (TIN) استنتاج العديد من المعلومات التي لا بد منها للتحليل المكاني نذكر منها:
- أطوال أضلاع المثلثات، المساحة الأفقية لكل مثلث، المساحة المائلة لكل مثلث، ميل و اتجاه الناظم على سطح كل مثلث، الفرق بين أكبر و أصغر قيمة للارتفاع بين ذروات كل مثلث الخ ...
- إن معطيات البنية (TIN) (بما فيها المعطيات الطوبولوجية) تسمح بإجراء الكثير من التطبيقات، أهمها:

- رسم منحنيات التسوية وحساب الارتفاعات.
  - استنتاج بنية شبكة منتظمة، اعتماداً على البنية (TIN).
  - حساب و تحليل الميول واتجاهاتها في مختلف نقاط السطح.
  - حساب الحجم.
  - تحليل الرؤية المتبادلة و تحديد المناطق المخفية و المرئية في منطقة و عمليات التظليل.
  - تحديد و حساب المقاطع.
  - تحليل شبكات الصرف في المنطقة.
  - التحليل المورفولوجي لمختلف السطوح.
  - نمذجة الفيضانات و تحديد مناطق تأثيرها.
  - تحديد السطوح المعرضة للشمس.
- الشكل (1) يبين تمثيلاً هندسياً للبنية الشبكية و بنية (TIN).







الشكل (1) - البنية الشبكية و بنية (TIN)

من المهم أن نلاحظ مما ورد أعلاه، أنه لا يمكن أن نقرر بشكل حاسم أي بنية للمعطيات هي الأفضل لتفي بمختلف أهداف النمذجة العددية للتضاريس، لكن الميزة الرئيسية التي يجب أن يتمتع بها أي نظام متبع للحصول على نماذج ارتفاعية عددية، أو أية بنية معتمدة في هذا الصدد هي أن تتوفر فيها إمكانية تعديل و تحسين هذه النماذج و إمكانية الانتقال من بنية إلى أخرى.

### 8-3 الطرق الرياضية في اشتقاق النموذج الارتفاعي العددي ذي البنية الشبكية المنتظمة من عينة عشوائية [3]

عندما يتوفر في المنطقة عدد من النقاط المعينة بإحداثياتها  $\{(x_i, y_i); i=1,2,\dots,n\}$  موزعة بشكل عشوائي، يمكننا أن نشق اعتباراً منها نموذجاً ارتفاعياً عددياً ذا بنية شبكية، هي أسهل تداولاً كما بيئنا سابقاً. ولكن عند تشكيل أي نموذج تضاريسي رقمي يجب التأكد من دقته اعتماداً على نقاط تحكم معلومة المنسوب و قد تمّ تطوير عدة طرق لاشتقاق ارتفاعات نقاط تشكل ذروات المربعات في بنية شبكية، وأهمها:

#### 8-3-1 طريقة kriging

هذه الطريقة هي الأكثر استخداماً وخاصة في مجال الهيدرولوجيا.

#### 8-3-2 طريقة الانحناء الأصغري Minimum Curvature

تستخدم هذه الطريقة بشكل واسع في علوم الأرض باعتبارها تولد السطح الأقل خشونة والأكثر تعميماً، إلا أنها لا تصلح في حالة عدم استمرارية السطوح (وجود إنقطاع)

#### 8-3-3 طريقة مقلوب المسافة Inverse distance to power

تتلخص هذه الطريقة بحساب الارتفاع  $z$  لكل نقطة من نقاط الشبكة (ذروة مربع)، كمتوسطة موزونة لأقرب  $n$  نقطة من نقاط العينة ذات الارتفاعات  $z_1, z_2, \dots, z_n$

باعتبار أن وزن الارتفاع  $z_i$  الذي يدخل في حساب  $z$  متناسباً عكساً مع مقلوب المسافة الفاصلة بين النقطة ذات الارتفاع  $z_i$  (نقطة من العينة) و النقطة التي يراد حساب ارتفاعها  $z$  من الشبكة.

ف لدينا العلاقة التالية التي تعطي الارتفاع  $z$  لنقطة من الشبكة:

$$z = \frac{\sum_{i=1}^n p_i z_i}{\sum_{i=1}^n p_i}$$

$$p_i = \frac{1}{l_i^s} \text{ حيث:}$$

$n$  هو عدد النقاط المستخدمة لحساب  $z$  أما  $s$  فنسميه عامل تخفيض تأثير النقاط البعيدة عن  $z$ .

و يمكن اعتماد قيمة كبيرة لـ  $s$  (3 أو 4) مما يخفف من وزن النقاط البعيدة، و يقلل تأثيرها في حساب  $z$ ، و غالباً ما تعتبر  $s = 2$ .

أما عدد النقاط  $n$  في العينة العشوائية ذات الارتفاعات  $(z_1, z_2, \dots, z_n)$  و التي ستدخل في حساب  $z$  فيختلف حسب طبيعة التضاريس، فإذا كانت التضاريس شديدة الوعورة فلا يجب اعتماد عدد كبير من نقاط العينة العشوائية لحساب  $z$ .

#### 8-3-4 طريقة الانحناء الأصغر (Minimum Curvature)

تستخدم في هذه الطريقة مجموعة من نقاط العينة التي تحصر منطقة أو بقعة يتم إلباسها بسطح تقاضي مرن (spline)، وتحدّد معادلته استناداً إلى هذه النقاط، ومن ثم تستخدم هذه المعادلة لحساب ارتفاعات نقاط الشبكة بتعويض إحداثيات  $(x, y)$  كل نقطة في معادلة السطح.

#### 8-3-5 طريقة التثليث (Triangulation)

يتم في هذه الطريقة تشكيل النموذج الارتفاعي العددي وفق بنية (TIN) أولاً باستخدام نقاط العينة العشوائية، ثم تحسب إحداثيات نقاط الشبكة (شبكة المربعات)، حيث يحسب ارتفاع كل نقطة من الشبكة اعتماداً على معادلة المستوي المار من رؤوس المثلث الذي تقع ضمنه النقطة، و هذه طريقة تصلح للانتقال من بنية شبكة تثليث غير منتظمة إلى بنية شبكية منتظمة. هناك بعض طرق المسح تعطي ارتفاعات نقاط موزعة بشكل منتظم وفق شبكة مربعات أو مستطيلات وخاصة في بعض الطرق الآلية والمؤتمتة والفتوغرامترية. إلا أن الحالة العامة هي توفر مجموعة محدودة من النقاط موزعة بشكل غير منتظم كونها نتيجة لأعمال مسح النقاط المميزة من سطح الأرض، أي أنها تعتبر عينة ممثلة (representative) منتقاة وغير عشوائية. وبالتالي يمكن استخدام هذه العينة لحساب ارتفاعات النقاط الأخرى بطرق الاستيفاء الداخلي المعروفة. لذلك لا يمكن الوصول إلى نموذج تضاريسي رقمي صحيح ما لم تكن العينة ممثلة. في هذه النقطة نلاحظ أن مفهوم العينة الممثلة لن يكون دقيقاً بالنسبة لسطح

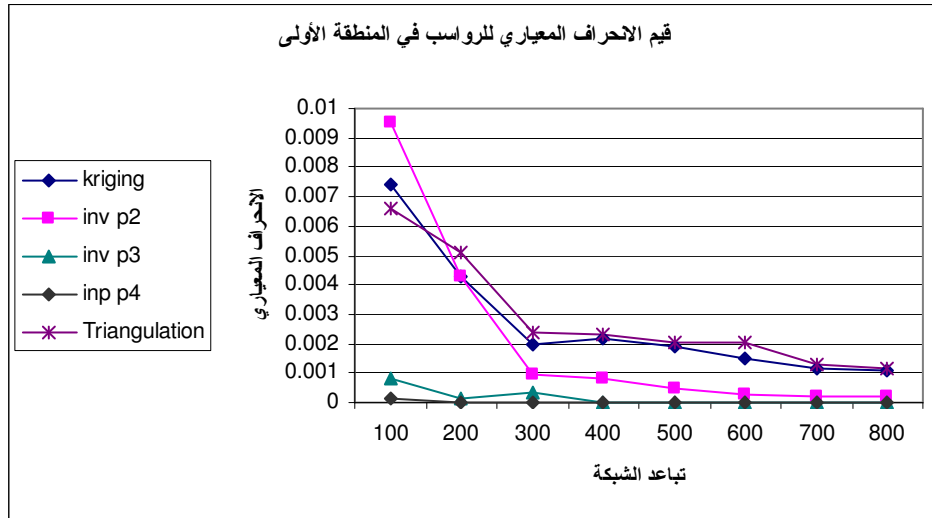
البساط المائي لأن سبور المراقبة ليست في النقاط المميزة للسطح بسبب عدم إمكانية رؤية السطح المائي كما في التضاريس.

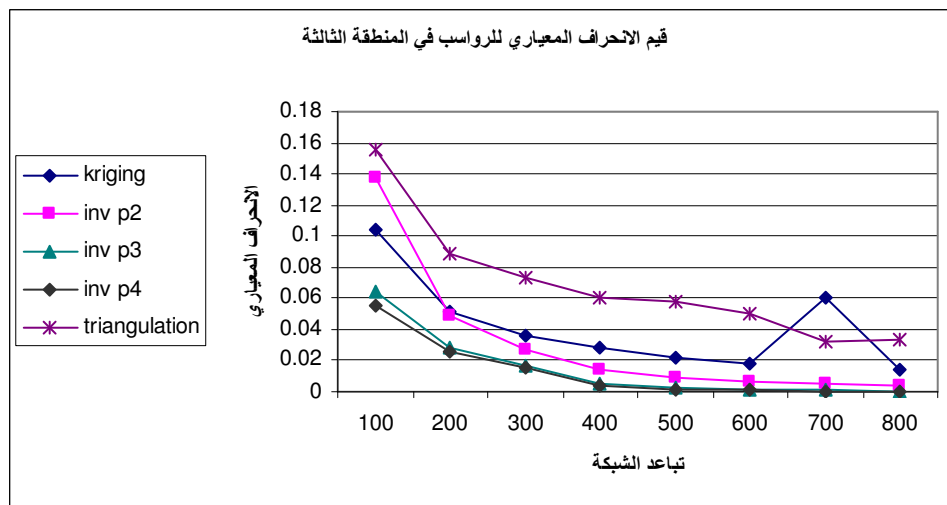
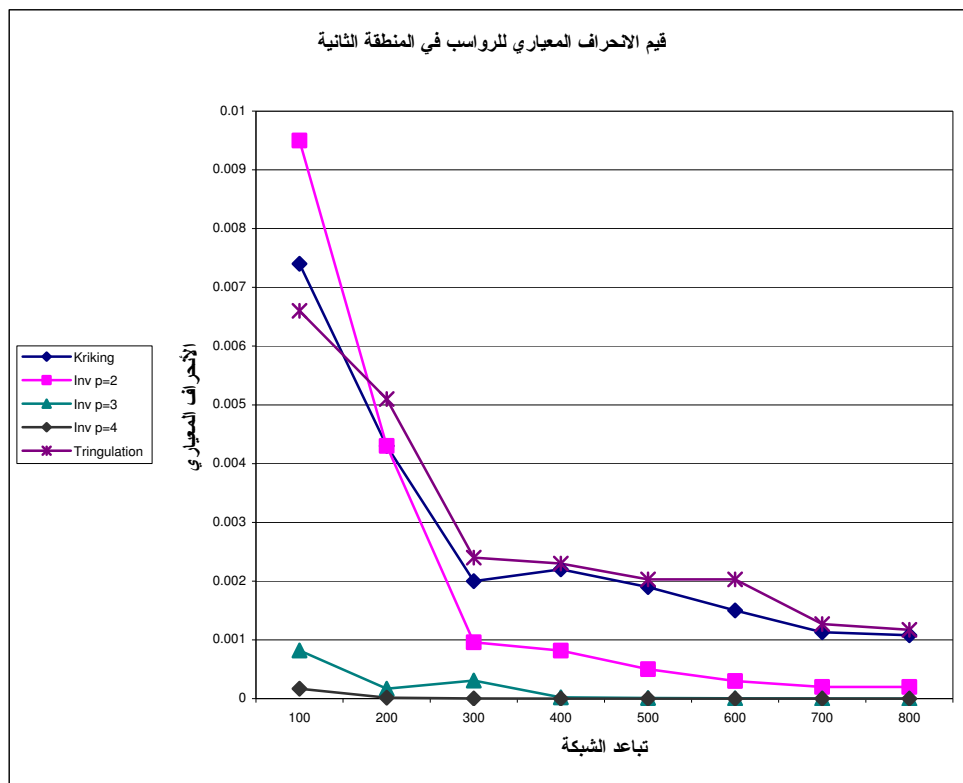
#### 8-4 اختيار النموذج الرقمي

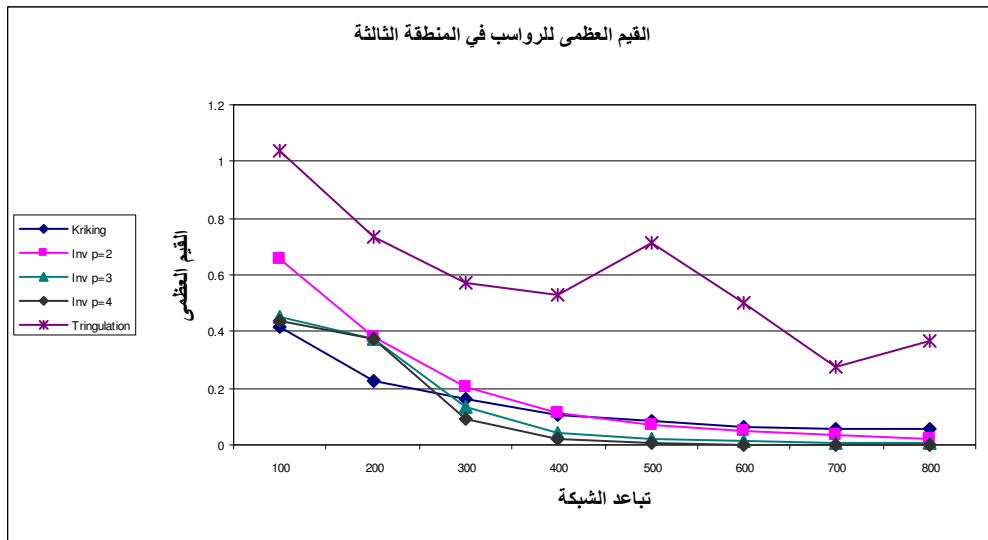
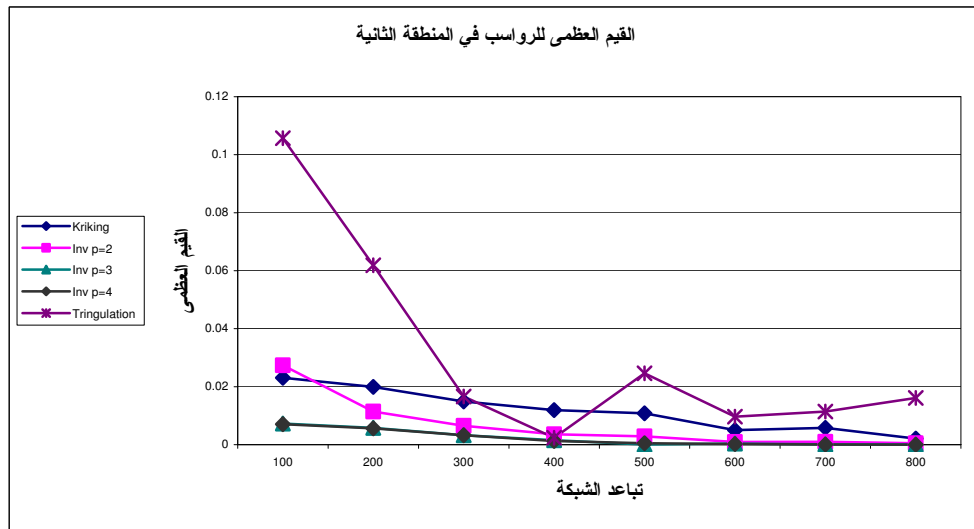
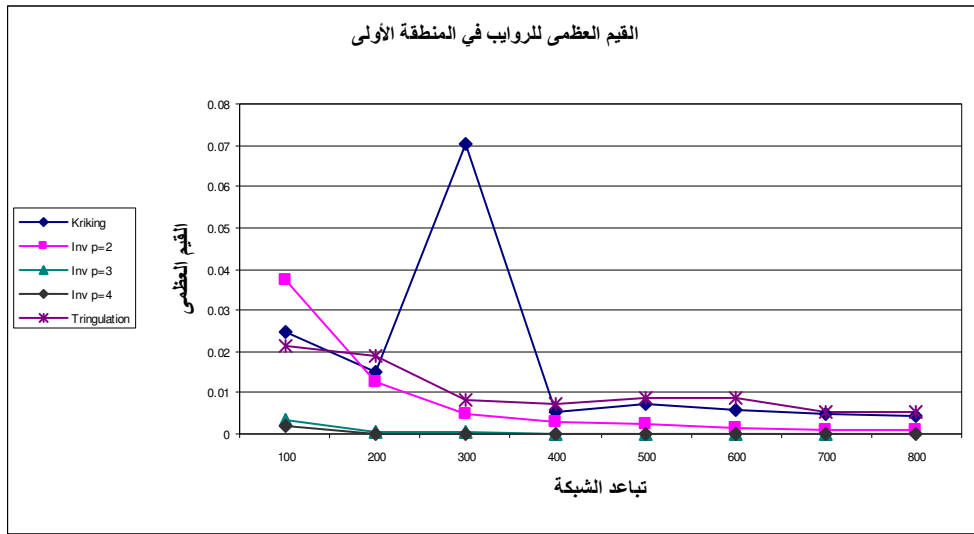
##### 8-4-1 اختيار نموذج تضاريسي رقمي مناسب

تم تشكيل نموذج تضاريسي رقمي لكل من العينات المذكورة في البند (2-7) باتباع الطرق المذكورة في البند (3-8) باستثناء طريقة الانحناء الأصغر التي لا تناسب سطح التضاريس المتعرج. بعد ذلك تم حساب الرواسب في كافة النماذج الناتجة اعتماداً على مطابقة السطح الناتج مع نقاط العينة الأساسية الممسوحة، ومن ثم استنتاج القيم الدنيا والعظمى والانحراف المعياري. الخطوط البيانية (1) تبين نتائج هذه الدراسة.

البيانات (1) - نتائج دراسة الطرق الرياضية لاختيار النموذج الأمثل لسطح التضاريس

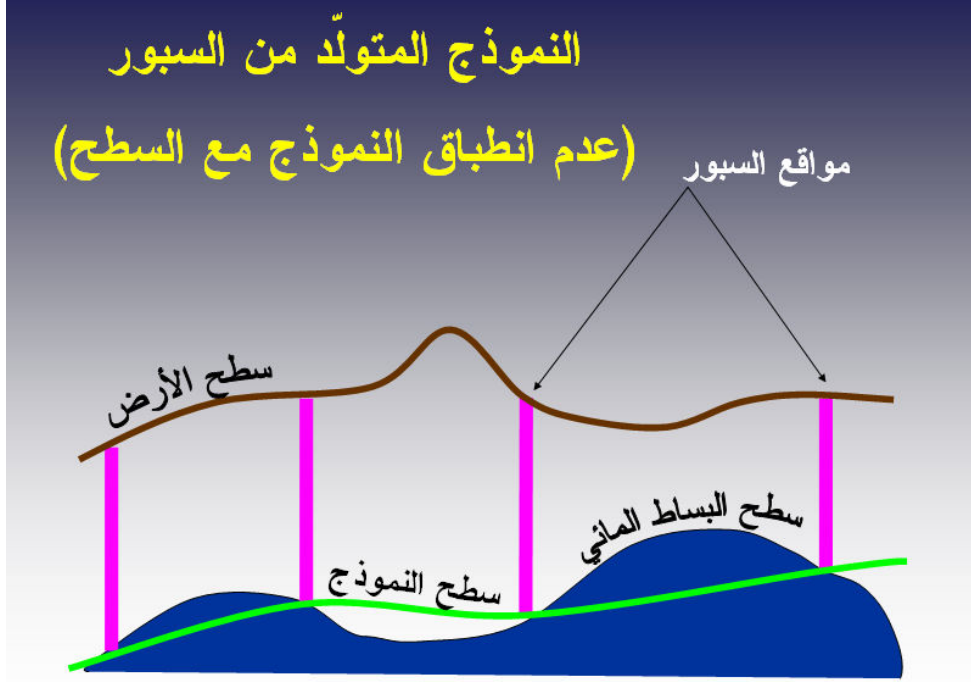






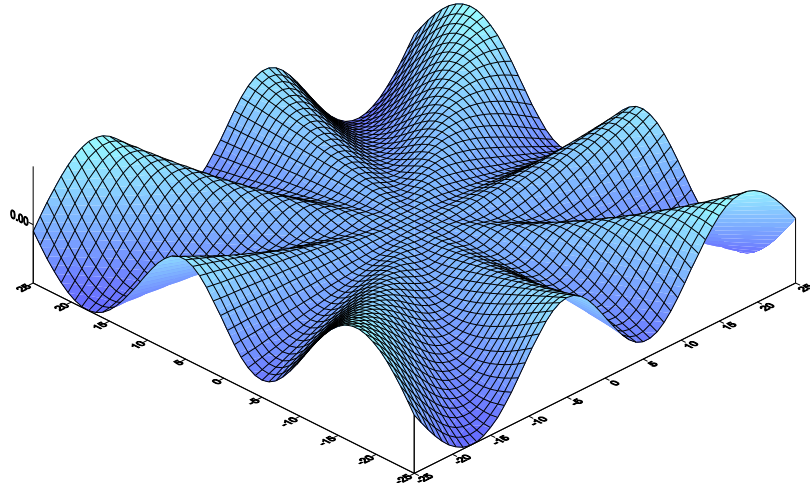
8-4-2 اختيار نموذج رقمي مناسب لتمثيل سطح البساط المائي

إن سطح التضاريس المرئي يمكن من مسح النقاط المميزة لتعبر بالنتيجة عن السطح. إلا أن سطح البساط المائي غير مرئي، وبالتالي لا يمكن وصف عينة السبور بأنها ممثلة (Representative) لنفس الاعتبارات الواردة في الفقرة (1-8). لذلك يفضل أن تؤخذ عينة السبور بمسح شبكي منتظم. الشكل (2) يبين عدم دقة النموذج بسبب عدم انطباق مواقع السبور مع النقاط المميزة من سطح البساط المائي.



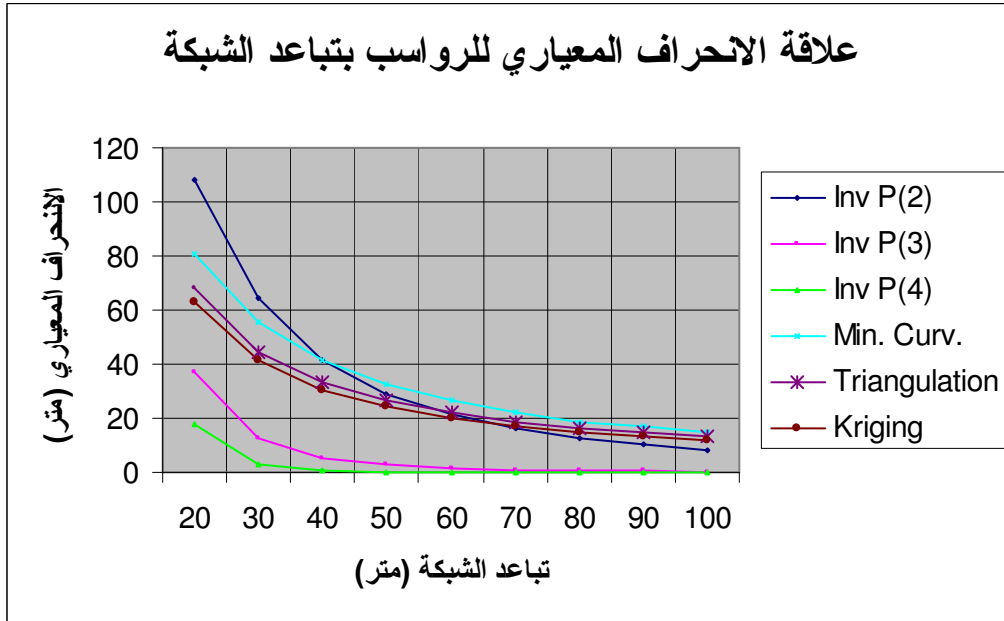
الشكل (2) - تأثير مواقع السبور على دقة النموذج

إلا أن السؤال القائم هو: ما هي الطريقة الرياضية الأمثل لنمذجة سطح غير مرئي؟ ففي هذه الحالة لا يمكن الحكم على الدقة. لذلك تم اللجوء إلى نموذج رياضي افتراضي شديد التباین ممثلاً لسطح بساط مائي (الشكل 3). من هذا النموذج تم توليد ملف بيانات بنموذج شبكي منتظم يعبر عن نقاط العينة (١٢٠ سبراً)، وعلى أساس هذه العينة تم توليد نماذج باستخدام مختلف الطرق الرياضية، ومن ثم تمت مطابقة هذه النماذج مع عناصر الملف المذكور أعلاه لتقييم الدقة. إن هذا الأسلوب يعني معرفة شكل السطح مسبقاً وبالتالي دراسة حالة مثالية. إلا أن تكثيف السبور وأخذها بشكل منتظم من شأنه أن يقترب من الحالة المثالية كما ذكر في الفقرة (1-8).



الشكل (3) - نموذج رياضي مفترض  $Z = (X^2 + Y^2) * \text{SIN}(8 * \text{ATAN}(X/Y))$

بنفس الخطوات المتبعة في البند السابق ومع إضافة طريقة الانحناء الأصغر في الدراسة، تمت دراسة نموذج البساط المائي. الخطوط البيانية (2) تبين نتائج هذه الدراسة. البيانات (2) - نتائج دراسة الطرق الرياضية لاختيار النموذج الأمثل لسطح البساط المائي



## 9- استخدام النماذج الرقمية في أنظمة المعلومات الجغرافية GIS [4]

نظام المياه الجوفية هو التغيرات في منسوبها وحرارتها وتركيبها الكيميائي وتدفقها وغير ذلك. والعوامل المؤثرة على هذا النظام إما طبيعية تتعلق بالتغذية من الهطولات والجريانات السطحية، وإما صناعية تتعلق بالنشاط الإنساني من الضخ والري والصرف ورفع منسوب الماء في الأحواض المائية. وفي كلتا الحالتين تعتبر التضاريس عنصراً هاماً في مدى تأثير تلك العوامل على نظام المياه الجوفية. واستخدمت النماذج الارتقاعية العددية منذ الستينات في

عدد من علوم الأرض، وأصبحت النماذج التضاريسية الرقمية إحدى المكونات الأساسية لأنظمة المعلومات الجغرافية.

يعرّف نظام المعلومات الجغرافي GIS بأنه تحليل المعطيات المرتبطة مكانياً في منطقة من سطح الأرض للمساعدة على اتخاذ القرارات المثلى وإيجاد الحلول الاقتصادية التي تحقق أفضل الشروط للمشاريع المزمع إنشاؤها في المنطقة.  
لنعتبر جدول البيانات الآتي:

اسم القرية	إحداثياتها (موقعها المكاني)	منسوب المياه الجوفية	مساحة الأراضي المروية (هكتار)	عدد الآبار في القرية	عدد نفوس القرية
A	$X_A, Y_A$	422	1220	1	$n_A$
B	$X_B, Y_B$	436	1100	5	$n_B$
C	$X_C, Y_C$	412	1445	2	$n_C$
D	$X_D, Y_D$	415	990	-	$n_D$
E	$X_E, Y_E$	423	1000	-	$n_E$
F	$X_F, Y_F$	440	1030	3	$n_F$
G	$X_G, Y_G$	411	1620	4	$n_G$
.	.	.	.	.	.

فإذا ما تم تخزين هذا الجدول في ذاكرة الحاسوب فيوسع أي نظام مناسب أن يجيبنا على مختلف التساؤلات كأن نسأل: ما هو عدد نفوس قرية ما؟ ما هي نسبة عدد نفوس قرية معينة إلى مساحة الأراضي المروية فيها؟ ما هي القرية التي تحوي أكبر عدد من الآبار ونسبتها لعدد نفوس القرية؟ وغيرها من الأسئلة.

أما إذا أردنا تفحص كفاية المياه في هذه القرى بغية تحسينها فلا بد لنا من الإجابة على الأسئلة التالية، على سبيل المثال لا الحصر:

- ما هي أقصر مسافة من قرية ليس فيها بئر وعدد نفوسها يزيد عن قيمة  $e$  إلى قرية فيها بئر واحد على الأقل؟
- ما هو عدد القرى التي تبعد مسافة أقل من  $L$  عن قرية تحوي أكثر من ثلاثة آبار ولا تزيد مساحة الأراضي المروية فيها عن حد معين؟
- في أي قرية يُقترح حفر بئر بحيث يخدم أكبر عدد من القرى التي تحتاج لآبار والتي لا تبعد عنها مسافة أكبر من  $L$ ؟

تتفرد أنظمة المعلومات الجغرافية بإمكانية الإجابة على مثل التساؤلات الواردة أعلاه وذلك بفضل تحديد المواقع المكانية للقرى  $(X, Y)$  ضمن مرجعية واحدة و تخزينها مع معطيات ذات سمات وصفية.

لذلك فإن أنظمة المعلومات الجغرافية تسمح بتحقيق تفاعل حواري بين الإنسان والحاسوب للحصول على معلومات تفيد في اتخاذ قرار اعتماداً على استفسارات مرتبطة بالمكان. أهم أنواع الاستفسارات الممكنة في أنظمة المعلومات الجغرافية هي:

- الاستفسار عن الموقع (Location question): حيث يتم الاستفسار عن المواصفات الخاصة بموقع معين والبيانات المرتبطة به، كأن نسأل مثلاً عن عدد سكان بلدة أو نوع التربة أو منسوب المياه الجوفية في موقع معين. يمكن تلخيص هذا النوع من الاستفسار بعبارة " ماذا يوجد في الموقع التالي... ؟ " ("What is at.. ?").



- الاستفسار الشرطي (Condition question): وهو عكس الاستفسار السابق حيث يطلب إيجاد الموقع أو المواقع التي تتحقق فيها شروط معينة كالأستفسار مثلاً عن المواقع التي يرتفع فيها منسوب المياه الجوفية عن حد معين. ويدعى هذا النوع من الاستفسار بالنقاط (Intersection)، عندما يشمل تحقيق عدة شروط معاً لمعطيات أو بيانات مختلفة كأن يطلب مثلاً إيجاد المواقع التي يقل فيها منسوب المياه الجوفية عن حد معين والتي تكون تربتها من نوع محدد والتي لا تقل كثافة السكان فيه عن مقدار محدد بهدف حفر بئر أو التحريج مثلاً، فمن تطبيقات GIS المفيدة دراسة المخزون المائي وكفايته وتحديد الأماكن التي تحتاج لتحريج باعتبار أن عملية التحريج تساعد في تغذية المياه الجوفية.

ويمكن تلخيص هذا النوع من الاستفسار بعباراة " أين يتحقق ما يلي... ؟ " ("Where is it..?").

- الاستفسار عن المسارات (Routing): حيث يتم الاستفسار عن أفضل أو أقصر أو أسرع مسار بين موقعين أو عدة مواقع، كالأستفسار مثلاً عن أقصر طريق من قرية لا يتوفر فيها بئر إلى بئر مستثمر، ويمكن صياغة هذا الاستفسار على النحو التالي: " ما هو أفضل مسار بين... ؟ " ("What is the best way...?").

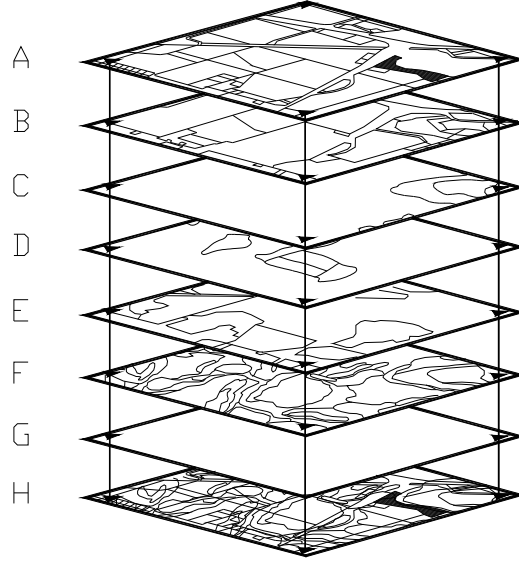
- الاستفسار عن التغيرات (Trend question): حيث يتم الاستفسار عن التغيرات التي تحدث في المواقع مع مرور الزمن، كالأستفسار مثلاً عن المناطق التي لم تكن مأهولة في زمن ما وأصبحت مأهولة أو العكس، فالجواب على هذا الاستفسار يكون بتحديد المواقع التي حدث تغير في حاجتها للمياه.

ويمكن صياغة الاستفسارات من هذا القبيل بالسؤال التالي: " ما الذي تغير منذ... ؟ " ("What has changed since...?").

- الاستفسار عن الأنماط (Patterns question): ويتضمن هذا الاستفسار مقارنة لتوزيع الظواهر مكانياً بغية فهم العلاقة بين هذه الظواهر، كأن يراد الاستفسار عن علاقة انتشار مرض ما بالقرب من بئر معين، فيجري إسقاط توزيع الظاهرة (انتشار المرض) مكانياً على الخرائط ومقارنة هذا التوزيع، بتوزيع الآبار التي تستخدم في المنطقة. إن هذا النوع من الاستفسارات وتطبيق عمليات التحليل المكاني عليها مستخدم بشكل واسع في الدراسات البيئية والاجتماعية والتخطيطية، ويمكن صياغتها بالعباراة: " ما هو نمط توزيع الظاهرة التالية... ؟ " ("What is the pattern...?").

- الاستفسار بالتمذجة (Modeling): يطلب في هذا النوع من الاستفسارات تحديد النتائج الناجمة عن تطبيق نموذج أو عدة نماذج على موقع، كالأستفسار عن المناطق التي سيرتفع منسوب المياه الجوفية فيها إذا ما هبت عاصفة بشدة مطرية معينة بعد وضع نموذج لهذه العاصفة (تمذجة العاصفة)، و الجواب على هذا الاستفسار هو تحديد المواقع المتأثرة بذلك. كتطبيق على هذا النوع من الاستفسارات تحديد المواقع التي ستتأثر أساسات المنشآت فيها بارتفاع منسوب المياه الجوفية بغية إيجاد سبل حمايتها. أو دراسة تأثير استنزاف المياه الجوفية من آبار في منطقة لا يمكن الوصول إليها (مناطق حدودية) على منطقة أخرى يمكن إجراء القياسات فيها كما يحصل في المناطق الشمالية من سورية المتاخمة لتركيا. ويصاغ هذا النوع من الاستفسارات عادة بالعباراة " ماذا لو... ؟ " ("What if...?").

ما يميز نظام معلومات جغرافي عن غيره من الأنظمة المعلوماتية التي تستخدم مفهوم الربط المكاني، ويمكن تمثيل هذا الترابط بالمخطط المبين بالشكل (4).



الشكل (4) - طبقات البيانات في نظام المعلومات الجغرافي

و بما أن مصدر هذه المعطيات المكانية هي علوم مساحية كعلم الجيوديزيا وعلم المساحة وعلم المساحة التصويرية الجوية وعلم الاستشعار عن بعد وعلم الخرائط، فإن للمهندس المساح دوراً كبيراً في عملية تجميع وتقييم وتطوير وإدارة وتحديث هذه المعطيات، هذا وان صحة ودقة المعطيات، بشكل عام، والمعطيات المكانية بشكل خاص هي الأساس للحصول على نتائج جيدة حين استخدام هذه الأنظمة.

إن أنظمة المعلومات الجغرافية تعطي إجابات على أسئلة لم يكن بالإمكان الحصول عليها من قبل، كما تسمح باتخاذ القرارات المناسبة، ولذلك فقد أصبحت أنظمة المعلومات الجغرافية هامة جداً في عمليات التخطيط والدراسات الهندسية والفعاليات الخدمية وعمليات التقييم والنمذجة والمحاكاة والتنبؤ.

## 10- نتائج البحث

إن خلاصة عملية النمذجة الارتقاعية لسطح هي تشكيل ملف DEM ذي البنية الشبكية المنتظمة. وقد تركزت عملية اختبار دقة هذا الملف على دراسة علاقة تباعد شبكته بالرواسب التي تمثل الفروقات بين نقاط عينة السطح المقاسة وسطح النموذج المولد.

### 10-1 بالنسبة لسطح التضاريس

■ أعطت طريقة Kriging نتائج متقاربة بالنسبة للمنطقتين السهلة والوعرة، بينما في المنطقة شديدة الوعرة كانت الدقة أقل بالإضافة لظهور نوع من الشذوذ في قيم الانحراف المعياري لدى نقصان التباعدات.

■ في طريقة Triangulation فقد ظهر ثبات نسبي في علاقة قيم الانحراف المعياري بتباعد الشبكة بالنسبة لكافة الطرق، بالإضافة إلى أن دقة النموذج المولد بهذه الطريقة لم تتأثر

بشكل شديد بتغيير تباعد الشبكة وهذا متوقع بسبب اعتماد هذه الطريقة على المبدأ الخطي للتوسط.

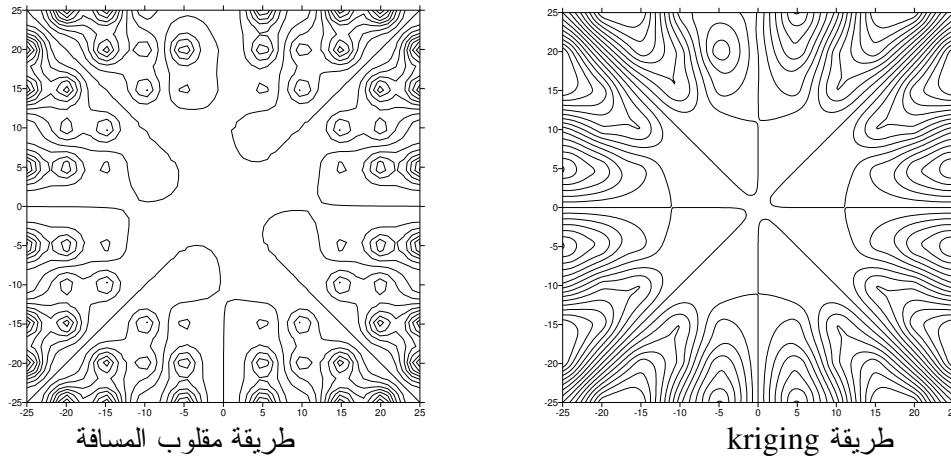
■ في طريقة مقلوب المسافة ظهرت علاقة بين وعورة التضاريس وقوة المسافة في حساب الوزن. ففي حالة الأراضي السهلة والوعرة أعطت القوى 2 و 3 و 4 نتائج متقاربة، بينما في حالة التضاريس شديدة الوعرة فإن زيادة القوة أدت إلى تراجع في الدقة، إلا أنها نسبياً أعطت أفضل النتائج.

■ إن تكثيف الشبكة في كافة الطرق ومن أجل كافة المناطق التضاريسية يؤدي إلى زيادة الدقة ضمن علاقة طردية حتى حد معين في تباعد الشبكة يصبح بعدها من غير المجدي إنقاص التباعد لأن الدقة تثبت ويزيد حجم الملفات المتداولة.

■ يلاحظ بأن الخطوط البيانية تتوازي تقريباً بعد قيمة 1/م لتباعد الشبكة في كافة المناطق، مما يعني كفاية مقارنة نتائج الطرق عند هذه القيمة، ولا داعي لاستمرار البحث والتجربة بعدها.

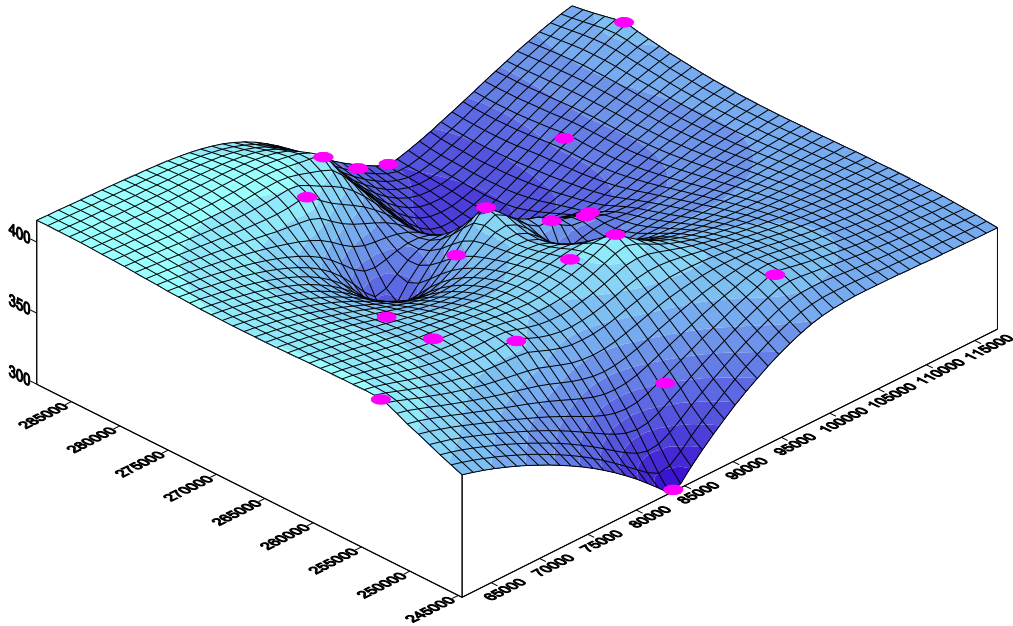
## 10-2 بالنسبة لنموذج سطح البساط المائي

■ يلاحظ بأن نتائج طريقة مقلوب المسافة هي الأفضل، إلا أنها لا تتناسب لتمثيل سطح مرن ومنتصل كسطح البساط المائي، وهذا يظهر بوضوح في الشكل (5). ويلبيها مباشرة طريقة Kriging التي أعطت نتائج جيدة بالإضافة إلى ملاءمتها لتمثيل سطح البساط المائي [5].



الشكل (5) - مقارنة السطوح المتولدة

■ كثافة السبور تؤثر على دقة النموذج الناتج. الشكل (6) يمثل نموذج ثلاثي الأبعاد لسطح البساط المائي لمنطقة في حوض الفرات [6] ذات مساحة قريبة من مساحة النموذج الرياضي المفترض، ويوضح بأن نقاط السبور غير الكافية (٢٢ سبوراً) والتي تم اختيارها على سطح الأرض اعتبرت كنقاط مميزة من سطح البساط المائي، وهذا ما أعطى نموذجاً غير واقعي لسطح بساط مائي.



الشكل (6) - نموذج ثلاثي الأبعاد لسطح البساط المائي في منطقة من حوض الفرات

## 11- التوصيات

- اعتماد المعيار الرقمي المقترح لتصنيف التضاريس من حيث الوعورة.
- عدم استخدام طريقة kriging في المناطق شديدة الوعورة.
- في حال استخدام طريقة مقلوب المسافة يوصى باعتماد القوة الرابعة للمسافة في حساب الوزن للمناطق شديدة الوعورة.
- اعتماد تباعد للشبكة لتمثيل التضاريس يتناسب مع الوعورة على أن لا يقل عن 1m.
- اعتماد طريقة Kriging لتمثيل سطح البساط المائي كونها الطريقة الأمثل.
- كثافة سيور دراسة سطح البساط المائي يجب أن لا تقل عن حد معين تابع للدقة المطلوبة.
- استخدام نظام المعلومات الجغرافي GIS في دراسة وإدارة المياه الجوفية باعتباره يقوم بتحليلات معقدة لقاعدة البيانات المرتبطة بالمياه الجوفية ويساعد في اتخاذ القرارات السليمة في إدارتها. فمن المتوقع أن تصبح المسألة المائية في الوطن العربي من أولويات القرن الحادي والعشرين لما تشكله من أساس لعملية التنمية.

## 12- المراجع

- 1- وزارة الإسكان والمرافق السورية، دفتر الشروط الفنية والخاصة للأعمال الطبوغرافية مقياس 1/1000.
- 2- جزماتي، سامح، ومقدسي، سامي، ٢٠٠٠، "أنظمة المعلومات الجغرافية GIS"، دار الشرق العربي، بيروت.
- 3- Kresik, Neven 1997, *Hydrogeology and Groundwater Modeling*, LEWIS PUBLISHERS, New york.
- 4- Maguire, David, J 1991, *Geographical information systems, principles and applications*, New York.
- 5- Golden, Colorado, 1993-95, *SURFER Version 6, Golden Software, Inc., USA.*
- 6- البكور، محمود، ١٩٩٤، "دراسة هيدرولوجية وهيدروديناميكية للمياه في حوض الفرات"، رسالة ماجستير، كلية الهندسة المدنية، جامعة حلب، سوريا.