Diyala Journal
for Human Research
Website:
djhr.uodiyala.edu.iq

مجلة ديالى
للبحوث الإنسانية

p ISSN: 2663-7405
e ISSN: 2789-6838

مجلة ديالى للبحوث الإنسانية
العدد (108) المجلد (2) حزيران 2026

بناء أنموذج لقياس وتقييم مستوى التعقيد في التصميم الكارتوغرافي ودقة الإدراك البصري لخرائط السحب في المنطقة الشمالية من العراق

م.د. عبد الرحمن عبد الكريم يحيى
قسم الجغرافية، كلية التربية للبنات، جامعة تكريت، صلاح الدين، العراق

Abstract

This study aims to develop a cartographic–cognitive model that integrates cartographic design complexity in cloud maps with the accuracy of their visual interpretation within a Geographic Information System (GIS) environment through the development of a Cartographic Complexity Index (CCI). The proposed index transforms visual design elements into standardized quantitative variables, thereby reducing reliance on subjective visual interpretation in map evaluation. The model does not assume the elimination of perceptual bias, as visual perception is inherently influenced by individual differences in experience and perceptual discrimination abilities. Instead, it represents perceptual variability within a measurable quantitative framework that can be statistically analyzed, allowing variations in human perception to be incorporated into a testable modeling structure. This approach enhances the reproducibility of results while minimizing variability arising from subjective interpretation.

The results demonstrate the feasibility of constructing an integrated spatial model for measuring cartographic complexity by combining indicators of feature density, symbol diversity, color complexity, layer number, and spatial overlap into a single composite index. The optical thickness and cloud-top temperature maps exhibited comparable cartographic complexity values (0.61 and 0.60, respectively); however, these similar complexity scores did not correspond to equivalent perceptual performance. The findings further indicate that different sources of cartographic complexity impose distinct cognitive demands. In the optical thickness map, high feature density and extensive color gradation were associated with increased cognitive complexity, whereas in the cloud-top temperature map, the diversity of color schemes intensified visual interference and resulted in a relative reduction in the clarity of spatial boundaries

Email:
abdulrahman.yahya@tu.edu.iq

Published: 1- 6 -2026

**Keywords:Map) مؤشر
ndexComplexity I)، التصميم
الكارتوغرافي، الخرائط السحب.**

هذه مقالة وصول مفتوح بموجب ترخيص
CC BY 4.0
(http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

الملخص

يهدف هذا البحث إلى بناء نموذج كارتوغرافي إدراكي يربط بين تعقيد التصميم في الخرائط المناخية – السحب ودقة تفسيرها ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية (GIS)، من خلال تطوير مؤشر كمي للتعقيد الكارتوغرافي (Cartographic Complexity Index). يعتمد المؤشر على تحويل عناصر التصميم البصري إلى متغيرات كمية معيارية، بما يقلل من الاعتماد على التفسير البصري الذاتي في تقييم الخرائط. ولا يفترض النموذج إلغاء التحيز الإدراكي، إذ إن الإدراك البصري يتأثر بالفروق الفردية في الخبرة والقدرات التمييزية، وإنما يعمل على تمثيله ضمن إطار كمي قابل للقياس والتحليل الإحصائي، بما يعيد تمثيل التباين الإدراكي ضمن بنية نمذجية قابلة للاختبار ويعزز قابلية إعادة إنتاج النتائج ويقلل من التباين الناتج عن التفسير الذاتي.

أظهرت النتائج إمكانية بناء نموذج مكاني متكامل لقياس التعقيد الكارتوغرافي عبر دمج مؤشرات كثافة العناصر، تنوع الرموز، التعقيد اللوني، عدد الطبقات، والتداخل المكاني ضمن مؤشر موحد. كما سجلت خريطتا السمك البصري للسحب ودرجة حرارة السحب قيماً متقاربة للتعقيد (0.61 و0.60)، دون أن يعكس ذلك تماثلاً في الأداء الإدراكي. بينت النتائج ايضاً أن اختلاف مصادر التعقيد يؤثر في الحمل الإدراكي؛ إذ ارتبطت كثافة العناصر والتدرجات اللونية في خريطة السمك البصري بارتفاع التعقيد الإدراكي، بينما أدى تنوع الأنظمة اللونية في خريطة درجة حرارة السحب إلى زيادة التداخل البصري وضعف نسبي في وضوح الحدود المكانية.

المقدمة

تعد الخرائط المناخية – السحب من أهم الوسائل العلمية المستخدمة في تمثيل وتحليل الظواهر الجوية والمناخية، إذ تمكن الباحثين وصناع القرار من فهم التباينين المكاني والزماني لعناصر المناخ مثل درجة الحرارة، والتساقط، والغطاء السحابي، والإشعاع الشمسي. وتكتسب هذه الخرائط أهمية متزايدة في ظل التحديات البيئية المعاصرة، لما لها من دور محوري في دعم دراسات التغير المناخي، والتخطيط البيئي، وإدارة الموارد الطبيعية، فضلاً عن مساهمتها في التنبؤ بالمخاطر المناخية وتقليل آثارها. كما تعد أداة أساسية ضمن تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد، حيث تعتمد على دمج وتحليل كميات كبيرة من البيانات متعددة المصادر.

ومع التطور التقني في أساليب إنتاج الخرائط، لم يعد التحدي مقتصراً على توفير البيانات المناخية فحسب، بل أصبح يرتبط بكيفية عرض هذه البيانات بصرياً بطريقة تضمن وضوحها وسهولة تفسيرها. وفي هذا الإطار، يبرز التصميم الكارتوغرافي كعامل حاسم في نقل المعلومات، إذ يؤثر بشكل مباشر في كفاءة الإدراك البصري للمستخدم. ويعد تعقيد التصميم الكارتوغرافي (Cartographic Complexity)

من أبرز الإشكاليات التي تواجه هذا المجال، حيث يتضمن عناصر متعددة مثل كثافة المعلومات، وتنوع الرموز، وتداخل الألوان، وتعدد الطبقات.

ورغم أن زيادة التفاصيل قد تعزز من شمولية الخريطة، إلا أن الإفراط في التعقيد (Complexity) قد يؤدي إلى إرباك المستخدم وتقليل قدرته على تفسير المعلومات بدقة، خاصة في الخرائط المناخية التي تتسم بتداخل عناصرها وديناميكيتها العالية ضمن إطار علم المناخ. ومن هنا، تبرز الحاجة إلى دراسة العلاقة بين تعقيد التصميم الكارتوغرافي (Cartographic Complexity) ودقة تفسير البيانات، من خلال اعتماد مقاربات تحليلية ونماذج كمية تقيس هذه العلاقة بشكل علمي.

ويهدف هذه البحث إلى تحليل ونمذجة هذه العلاقة باستخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية، من خلال تقييم مستويات مختلفة من تعقيد التصميم الكارتوغرافي (Cartographic Complexity)، وقياس مدى تأثيرها على دقة تفسير المستخدمين للخرائط المناخية، وصولاً إلى تحديد المستوى الأمثل من التعقيد الذي يحقق أفضل فهم ممكن للمعلومات.

مشكلة البحث:

تتمثل مشكلة البحث في التساؤل الآتي (ما مدى تأثير تعقيد التصميم الكارتوغرافي (Cartographic Complexity) في دقة تفسير الخرائط السحب؟، وما إذا كانت دقة تفسير المستخدمين تختلف باختلاف مستويات هذا التعقيد، فضلاً عن التساؤل حول المستوى الأمثل للتعقيد الذي يحقق التوازن بين وضوح الخريطة وغناها بالمعلومات، وذلك بما يسهم في تحسين فعالية الخرائط السحب في عرض البيانات وتفسيرها).

فرضية البحث:

تفترض الدراسة وجود علاقة ذات دلالة إحصائية بين تعقيد التصميم الكارتوغرافي ودقة تفسير الخرائط السحب، بحيث تتباين دقة التفسير تبعاً لمستويات التعقيد، مع وجود علاقة عكسية بينهما. كما تفترض إمكانية قياس التعقيد باستخدام مؤشر التعقيد الكارتوغرافي (Cartographic Complexity Index)، وبناء نموذج إحصائي يوضح هذه العلاقة، وصولاً إلى تحديد المستوى الأمثل للتعقيد الذي يحقق التوازن بين وضوح الخريطة وغناها بالمعلومات، في إطار استخدام تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS).

أهداف البحث:

1- تحليل العلاقة بين تعقيد التصميم الكارتوغرافي ودقة تفسير الخرائط المناخية – السحب.

2- قياس مستوى تعقيد التصميم الكارتوغرافي باستخدام مؤشر التعقيد الكارتوغرافي (Cartographic Complexity Index).

3- تقييم تأثير اختلاف مستويات التعقيد في دقة تفسير المستخدمين للبيانات المناخية.

4- اختبار الفروق في دقة التفسير تبعاً لمستويات التعقيد الكارتوغرافي المختلفة.

5- بناء نموذج إحصائي يوضح طبيعة العلاقة بين تعقيد التصميم ودقة التفسير.

6- تحديد المستوى الأمثل من تعقيد التصميم الكارتوغرافي الذي يحقق التوازن بين وضوح الخريطة وغناها بالمعلومات.

7- توظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية (GIS) في تحليل وإنتاج الخرائط السحب محل الدراسة.

مناهج البحث:

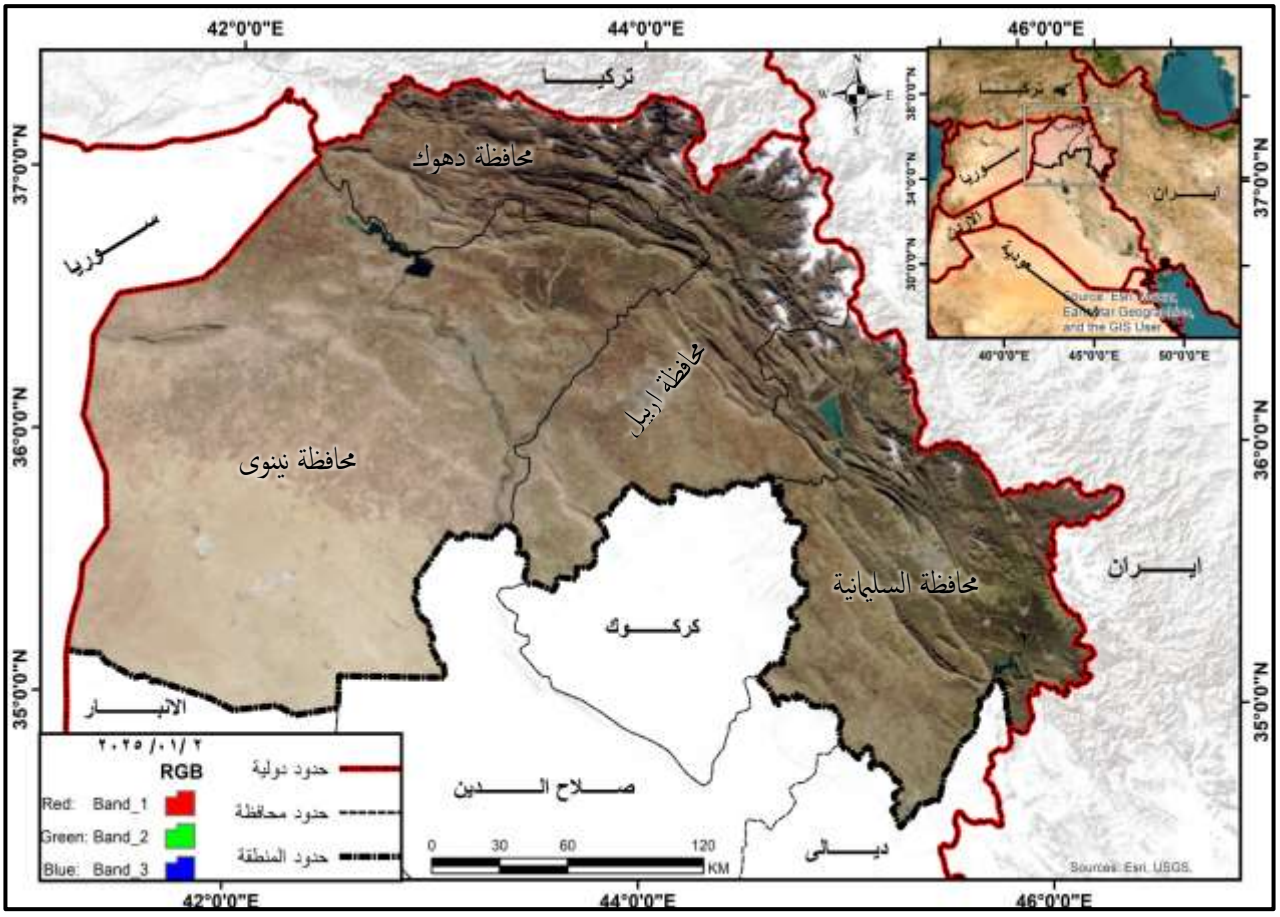
اعتمد البحث مجموعة من المناهج المتكاملة لتحليل العلاقة بين تعقيد التصميم الكارتوغرافي ودقة تفسير الخرائط المناخية، إذ اعتمد المنهج الوصفي التحليلي لدراسة مفاهيم التصميم ومستويات التعقيد، والمنهج الكمي لقياس مؤشرات التعقيد ودقة الإدراك وفق معايير رقمية، فضلاً عن المنهج التقاني بتوظيف تقنيات نظم المعلومات الجغرافية لإعداد خرائط بمستويات مختلفة من التعقيد وتحليل أثر عناصر التصميم، كما اعتمد المنهج التجريبي من خلال عرض نماذج خرائطية متباينة التعقيد على عينة من المستخدمين لقياس دقة الإدراك البصري واختبار العلاقة بين متغيرات الدراسة.

مواد وطرق العمل:

1- حدود منطقة الدراسة:

تقع منطقة الدراسة في الجزء الشمالي من العراق، وتشمل محافظات دهوك، السليمانية، أربيل، ونينوى. تمتد هذه المنطقة بين دائرتي عرض (37° 20َ 0ً – 34° 40َ 0ً) شمالاً، وخطي طول (41° 0َ 0ً – 46° 24َ 0ً) شرقاً، يحدها من الشمال الحدود التركية، ومن الشرق الحدود الإيرانية، ومن الغرب الحدود السورية، بينما تحدها من الجنوب محافظات ديالى وكركوك وصلاح الدين والأنبار، كما في الخريطة (1). تم اختيار المنطقة الشمالية من العراق لتميزها بتنوعها المناخي والتضاريسي، مما يؤدي إلى تباين توزيع أنماط السحب وخصائصها، ويوفر بيئة مناسبة لتطبيق وتقييم أنموذج قياس تعقيد التصميم الكارتوغرافي ودقة الإدراك البصري للخرائط

خريطة (1) موقع منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على خريطة العراق الادارية ، بمقياس 1:1000000 لسنة 2010، ومخرجات برنامج ArcGIS.

2- **مفهوم مؤشر التعقيد(Map Complexity Index)**: هو مؤشر كمي يهدف إلى قياس التعقيد البصري في الخرائط من خلال تحويل عناصر التصميم الكارتوغرافي إلى متغيرات رقمية قابلة للقياس والتحليل، بما يسمح بتقدير مستوى العبء الإدراكي الناتج عن كثافة وتنوع المكونات البصرية. يعتمد المؤشر على مجموعة عناصر أساسية تشمل كثافة العناصر الجغرافية داخل مساحة الخريطة، وتنوع الرموز المستخدمة في التمثيل، وعدد الطبقات الخرائطية، والتعقيد اللوني الناتج عن تعدد الألوان وتباينها، إضافة إلى درجة التداخل المكاني بين العناصر المختلفة. ويتم توحيد هذه المتغيرات إحصائياً باستخدام أساليب مثل(Min-Max normalization أو Z-score) لضمان إمكانية المقارنة بينها رغم اختلاف وحداتها.

بعد ذلك تدمج القيم المعيارية ضمن نموذج رياضي تجميعي يعتمد على أوزان نسبية لكل عنصر، بحيث ينتج عن ذلك قيمة واحدة تمثل مؤشر تعقيد الخريطة، وغالباً ما يصاغ على شكل مجموع مرجح. ويمكن تحديد الأوزان إما بشكل متساو أو باستخدام أساليب أكثر دقة مثل تحليل التسلسل

الهرمي (AHP) أو نماذج الانحدار الإحصائي بهدف تعزيز موضوعية التقدير ورفع دقة تمثيل تأثير كل عنصر على التعقيد الكلي[1].

وفي مرحلة التفسير، تصنف قيم المؤشر إلى مستويات مختلفة من التعقيد (منخفض، متوسط، مرتفع، مرتفع جداً)، حيث يعكس المستوى المنخفض خرائط واضحة وسهلة الإدراك، بينما يشير المستوى المتوسط إلى توازن بين كثافة المعلومات ووضوحها، في حين يدل المستوى المرتفع على زيادة العبء البصري واحتمال تراجع دقة التفسير، أما المستوى المرتفع جداً فيرتبط غالباً بحدوث تشويش بصري واضح وانخفاض في كفاءة الإدراك المكاني.

3- **تحديد مكونات التعقيد الخرائطي:** يعد تحديد عناصر تعقيد الخريطة خطوة أساسية في تحليل الخرائط المناخية، لأنه يوضح كيفية تمثيل البيانات المناخية بصرياً بشكل قد يكون بسيطاً أو معقداً حسب التصميم. ويمكن تفسير هذا التعقيد من خلال مجموعة من العوامل المرتبطة ببعضها، والتي أكدت الدراسات السابقة أهميتها في مدى سهولة فهم الخريطة من قبل المستخدم، مثل دراسات[2].

3-1 كثافة العناصر (Feature Density): وتشير إلى عدد الظواهر المناخية الممثلة داخل وحدة المساحة في الخريطة، مثل محطات الرصد المناخي أو خلايا الشبكات أو نقاط الأمطار أو مراكز العواصف. وتزداد هذه الكثافة في الخرائط المناخية عالية الدقة، خاصة عند استخدام بيانات شبكية (Gridded data) أو بيانات الاستشعار عن بعد. ويؤدي ارتفاع كثافة العناصر إلى زيادة المعلومات المكانية، لكنه في الوقت نفسه يرفع العبء الإدراكي على المستخدم، مما قد يقلل من سهولة تفسير الأنماط المناخية، خصوصاً في الخرائط التي تعرض تدرجات حرارية أو توزيع الأمطار على نطاق واسع[3].

3-2 تنوع الرموز (Symbol Diversity): ويقصد به عدد وأنواع الرموز المستخدمة لتمثيل المتغيرات المناخية المختلفة داخل الخريطة، مثل الأسهم التي تمثل اتجاه الرياح، والتدرجات اللونية لدرجات الحرارة، والرموز النقطية للأمطار، أو الأيقونات الخاصة بالسحب والعواصف. إن تعدد هذه الرموز يعكس ثراءً معلوماتياً مهماً، لكنه يرفع مستوى التعقيد البصري، لأن المستخدم يحتاج إلى تفسير عدة نظم رمزية في آن واحد. وقد أكد (Bertin)[4] في نظريته حول (سيميولوجيا الرسوم) أن زيادة تنوع الرموز بدون تنظيم بصري واضح يؤدي إلى ارتفاع صعوبة الإدراك البصري، وهو ما يتطلب تصميم مفتاح خريطة دقيق وواضح لتقليل الالتباس.

3-3 عدد الطبقات (Number of Layers): وهو يشير إلى عدد طبقات البيانات الجغرافية المدمجة في الخريطة مثل طبقات الحرارة، الأمطار، الضغط الجوي، الرياح، التضاريس، أو بيانات الأقمار الصناعية مثل MODIS و Sentinel. إن زيادة عدد الطبقات تعني دمج متغيرات مناخية

متعددة في تمثيل واحد، وهو ما يعزز التحليل متعدد المتغيرات، لكنه في المقابل يزيد من احتمالية التداخل البصري وصعوبة الفصل بين الظواهر المختلفة. وقد أشار (O'Sullivan)[5] إلى أن تعدد الطبقات في نظم المعلومات الجغرافية يرفع من القدرة التحليلية، لكنه قد يقلل من وضوح التمثيل إذا لم يتم تنظيم الطبقات بصرياً ومنهجياً.

3-4 التعقيد اللوني (Color Complexity): من العوامل المهمة في الخرائط المناخية، حيث يرتبط بعدد الألوان المستخدمة وتدرجاتها وتباينها في تمثيل الظواهر المناخية. فعلى سبيل المثال، تستخدم التدرجات اللونية لتمثيل درجات الحرارة أو شدة الهطول، بينما تستخدم ألوان مختلفة لتمييز الكتل الهوائية أو مناطق الضغط. إن الاستخدام غير المنظم للألوان قد يؤدي إلى تشويش بصري ويضعف القدرة على التمييز بين القيم، بينما الاستخدام المدروس للألوان يعزز الإدراك المكاني. وقد بين (Brewer)[6] أن اختيار الألوان في الخرائط التيماتيكية يجب أن يعتمد على مبادئ الإدراك البصري لضمان وضوح التباين وتقليل الإجهاد البصري.

3-5 التداخل المكاني (Spatial Overlap): ويعني درجة تراكب العناصر أو الطبقات أو الرموز فوق بعضها داخل الخريطة، وهو أمر شائع في الخرائط المناخية متعددة المتغيرات مثل خرائط العواصف أو الأنظمة الجوية المركبة. إن زيادة التداخل تؤدي إلى صعوبة فصل الظواهر عن بعضها بصرياً، مما يرفع من مستوى التعقيد الإدراكي حتى لو كانت البيانات صحيحة علمياً. وقد أشار (Roth)[7] إلى أن التداخل البصري في الخرائط التفاعلية يزيد من الحمل المعرفي ويؤثر على سرعة ودقة اتخاذ القرار المكاني.

4- معادلات القياسية:

4-1 مؤشر التعقيد الخرائطي (MCI):

تم استخراج مؤشر التعقيد الخرائطي اعتماداً على المعادلة الموضحة أدناه، والتي تستخدم لقياس درجة تعقيد الظواهر المكانية وتمثيلها الخرائطي. وتفسر النتائج المتحصل عليها بالاستناد إلى القيم المعيارية الواردة في الجدول (1)، حيث تصنف إلى مستويات مختلفة من التعقيد تبعاً لشدة التباين المكاني ودرجة تداخل العناصر الجغرافية.

$$MCI = \sum_{i=1}^{n} \mathrm{w}i\ \mathrm{X}i'$$

أو بشكل منفصل:

$$\mathrm{MCI} = \mathrm{w1FD}' + \mathrm{w2SD}' + \mathrm{w3NL}' + \mathrm{w4CC}' + \mathrm{w5SO}'$$

حيث إن:

- MCI : مؤشر التعقيد الخرائطي النهائي.

- Xi′ : القيم المعيارية لكل عنصر (بعد التوحيد).
- wi: الأوزان النسبية لكل عنصر.
- n: العناصر FD, SD, NL, CC, SO.

جدول (1) تصنيف التعقيد الخرائطي

قيمة الناتج (CC)	التصنيف	ماذا تمثل في التعقيد الخرائطي	التفسير الإدراكي
0 – 0.20	منخفض جداً	سيطرة عنصر واحد	خريطة واضحة جداً
0.21 – 0.40	منخفض	تنوع محدود	إدراك سهل
0.41 – 0.60	متوسط	توازن بين العناصر	إدراك مقبول
0.61 – 0.80	عالي	تنوع كبير	يحتاج تركيز
0.81 – 1.00	عالي جداً	توزيع متساوي ومعقد	إرهاق بصري

المصدر: بالاعتماد على مؤشرات النموذج

2-4 مؤشر كثافة العناصر (Feature Density):

يستخرج مؤشر كثافة العناصر وفق المعادلة أدناه لقياس عدد العناصر ضمن وحدة المساحة، حيث تصنف إلى مستويات عدة بحسب درجة التركز المكاني[8].

$$FD = \frac{N}{A}$$

N: عدد العناصر (نقاط/رموز/خلايا).

A: مساحة الخريطة.

3-4 تنوع الرموز (Symbol Diversity):

يستخرج مؤشر تنوع الرموز وفق المعادلة أدناه لقياس تعدد الرموز الخرائطية وتباينها، وتفسر نتائجه بالاعتماد على الجدول (2) حيث تصنف إلى مستويات معيارية تعكس درجة التنوع المكاني[9].

$$SD = Ns$$

SD : تنوع الرموز .

Ns: عدد أنواع الرموز المختلفة في الخريطة.

جدول (2) تفسير معادلة تنوع الرموز

قيمة المؤشر	التصنيف	ماذا تعني	التأثير
0 – 0.2	ضعيف	رموز قليلة جداً	ممل/محدود
0.2 – 0.5	متوسط منخفض	تنوع بسيط	واضح
0.5 – 0.7	متوسط	تنوع جيد	توازن
0.7 – 0.9	عالي	رموز كثيرة	تعقيد
> 0.9	عالي جداً	مبالغة في التنوع	تشويش

MacEachren, A. M ,How Maps Work: Representation, Visualization, and Design. New York: Guilford Press, 1995.

4-4 عدد الطبقات (Number of Layers):

يستخرج مؤشر عدد الطبقات وفق المعادلة أدناه لقياس حجم التراكب المعلوماتي بين الطبقات الخرائطية، وتفسر نتائجه بالاعتماد على الجدول (3) لتصنيفها إلى مستويات تعكس درجة التعقيد المكاني[10].

$$NL' = \frac{k}{k_{max}}$$

NL′ = القيمة المعيارية لعدد الطبقات.

K = عدد الطبقات الفعلي.

k_{max} = أعلى عدد طبقات في جميع الخرائط محل الدراسة.

جدول (3) تفسير معادلة عدد الطبقات

قيمة (NL′)	التصنيف	ماذا تعني	التأثير على التعقيد
0 – 0.2	منخفض جداً	طبقات قليلة جداً	خريطة بسيطة
0.2 – 0.4	منخفض	معلومات محدودة	وضوح عالي
0.4 – 0.6	متوسط	توازن معلوماتي	أفضل حالة
0.6 – 0.8	مرتفع	طبقات متعددة	زيادة التعقيد
0.8 – 1	مرتفع جداً	عدد طبقات كبير	تداخل وتشويش

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W, Geographical Information Systems and Science (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.

5-4 التعقيد اللوني (Color Complexity):

تعرف هذه المعادلة باسم الإنتروبيا (Entropy)، وهي مقياس يستخدم لتقدير درجة التشتت أو العشوائية في توزيع الألوان داخل الخريطة. فإذا كانت الألوان موزعة بشكل متوازن ومنظم، تكون قيمة الإنتروبيا منخفضة، مما يعني أن الخريطة بسيطة وسهلة الفهم. أما إذا كانت الألوان كثيرة ومتداخلة وغير منتظمة، فإن قيمة الإنتروبيا تكون مرتفعة، وهذا يدل على أن الخريطة أكثر تعقيداً وقد تكون أصعب في التفسير[11].

وبذلك تحسب الإنتروبيا وفق المعادلة أدناه لقياس مقدار تنوع وتشتت الفئات (الألوان) في الخريطة، وتستخدم كمؤشر كمي لتقييم مستوى التعقيد الكارتوغرافي، بينما تفسر القيم الناتجة بالاعتماد على الجدول (4)، حيث ترتبط زيادة قيمة الإنتروبيا بزيادة تعقيد التصميم وصعوبة تفسيره.

$$CC = -\sum Pi\ In(Pi)$$

CC= مؤشر التعقيد اللوني.

Pi = نسبة اللون i من إجمالي مساحة الخريطة.

$$pi = \frac{\text{مساحة اللون i}}{\text{المساحة الكلية الحريطة}}$$

ln(pi) = اللوغاريتم الطبيعي لنسبة اللون.

جدول (4) معايير تفسير قيمة Entropy

قيمة CC	مستوى التعقيد	التفسير البصري
0 – 0.5	منخفض	ألوان قليلة وبسيطة
0.5 – 1.5	متوسط	تنوع مقبول
1.5 – 2.5	مرتفع	تنوع عالي
> 2.5	مرتفع جداً	فوضى لونية

Buchel, D., & Reichenbacher, T, The visual complexity of bike maps. Proceedings of the International Cartographic Association, 5, 3. 2023. https://doi.org/10.5194/ica-proc-5-3-2023

4- 6 مؤشر التداخل/الازدحام (Clutter Index):

يحسب مؤشر التداخل/الازدحام (Clutter Index) وفق المعادلة أدناه لقياس درجة الازدحام البصري والتداخل بين العناصر الخرائطية داخل الخريطة، من خلال تقدير كثافة وتقارب وتراكب الرموز في وحدة المساحة[12]. وتفسر القيم الناتجة بالاعتماد على الجدول (5)، حيث تصنف إلى مستويات تعكس درجة الازدحام البصري، إذ تشير القيم المنخفضة إلى وضوح وتنظيم أفضل للعناصر، بينما تدل القيم المرتفعة على زيادة التداخل وصعوبة قراءة الخريطة.

$A_{overlap}$ = مساحة المناطق التي يحدث فيها تداخل بين عنصرين أو أكثر.

A_{total} = المساحة الكلية للخريطة أو منطقة الدراسة.

$$SO = \frac{A_{overlap}}{A_{total}}$$

جدول (5) تفسير قيم مؤشر التداخل المكاني (Spatial Overlap – SO)

قيمة (SO)	مستوى التداخل المكاني	التفسير الكارتوغرافي	التعقيد
0.00 – 0.20	منخفض جداً	تداخل محدود بين العناصر، مع وضوح بصري عالٍ وفصل جيد بين الطبقات	تعقيد منخفض جداً، خريطة سهلة الفهم وسريعة التفسير
0.21 – 0.40	منخفض	تداخل بسيط لا يؤثر بشكل كبير على إدراك العناصر	تعقيد منخفض، مناسب للمستخدمين بمختلف مستوياتهم
0.41 – 0.60	متوسط	تداخل ملحوظ بين بعض العناصر، يتطلب تركيزاً أكبر للفهم	تعقيد متوسط، توازن بين المعلومات والوضوح
0.61 – 0.80	مرتفع	تداخل واضح بين الطبقات، يؤدي إلى صعوبة نسبية في التمييز	تعقيد مرتفع، قد يؤثر سلباً على دقة التفسير
0.81 – 1.00	مرتفع جداً	تداخل شديد وتشويش بصري واضح، يصعب معه فصل العناصر	تعقيد مرتفع جداً، انخفاض كبير في كفاءة الإدراك البصري

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. Geographical Information Systems and Science (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.

7-6 معادلة التوحيد القياسي (Normalization):

تستخدم معادلة التوحيد القياسي (Normalization) لتحويل القيم الأصلية للمؤشرات إلى قيم معيارية موحدة تقع ضمن نطاق محدد (غالباً بين 0 –1)، بهدف إزالة تأثير اختلاف الوحدات وتسهيل

$$X' = \frac{X - X_{min}}{}$$

المقارنة بين المتغيرات المختلفة[13]. وتفسر القيم الناتجة بالاعتماد على الجدول (6)، حيث تشير القيم القريبة من الصفر إلى انخفاض قيمة المؤشر، بينما تعكس القيم القريبة من الواحد ارتفاعه.

X = القيمة الأصلية (مثلاً كثافة عناصر).

X_{min} = أصغر قيمة في البيانات.

X_{max} = أكبر قيمة في البيانات.

X' = القيمة الجديدة بعد التوحيد.

جدول (6) تفسير معادلة التوحيد القياسي (Normalization)

القيمة بعد التوحيد	التصنيف	التفسير
0 – 0.2	منخفض جداً	تأثير ضعيف
0.2 – 0.4	منخفض	تأثير محدود
0.4 – 0.6	متوسط	تأثير متوازن
0.6 – 0.8	عالي	تأثير قوي
0.8 – 1	عالي جداً	تأثير مهيمن

Han, J., Kamber, M., & Pei, J, Data Mining: Concepts and Techniques (3rd ed.). Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2013.

8-6 معادلة الاوزان النسبية (طريقة التحليل الهرمي AHP):

تستخدم معادلة الأوزان النسبية ضمن طريقة التحليل الهرمي (AHP) لاشتقاق الأهمية النسبية لكل معيار من خلال مصفوفة المقارنات الثنائية، وذلك بهدف تحديد الوزن النسبي لكل عامل مؤثر في عملية التحليل المكاني. حيث تشير القيم الأعلى إلى أهمية أكبر للمعيار في التأثير، بينما تعكس القيم الأقل تأثيراً نسبياً ضعيفاً.

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} a_{ij}}$$

a_{ij}: قيمة المقارنة بين العنصر i و j.

w_i: الوزن النهائي للعنصر.

جدول (7) مكونات معادلة التعقيد الخرائطي وتفسير

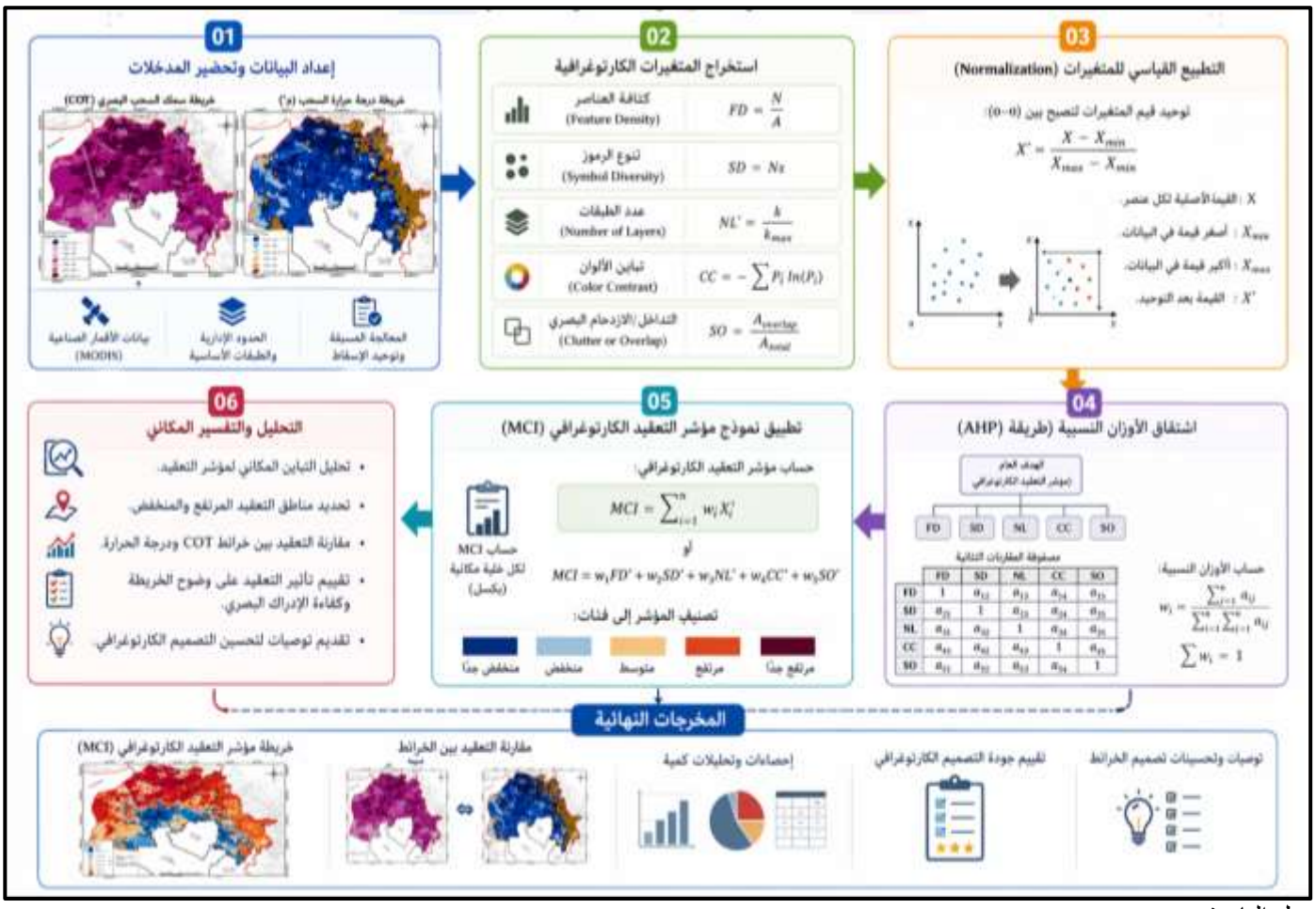
المكون الرياضي	الرمز	التفسير العلمي	الحالة المنخفضة	الحالة المرتفعة	الأثر على مؤشر التعقيد (MCI)
كثافة العناصر	FD	عدد العناصر الجغرافية داخل وحدة المساحة	تمثيل مكاني قليل ومبسط	ازدحام عالي للعناصر	يرفع التعقيد مع زيادة الكثافة
تنوع الرموز	SD	عدد أنواع الرموز المستخدمة في التمثيل الكارتوغرافي	تمثيل رمزي محدود وواضح	تنوع رمزي كبير قد يسبب تشويش	يرفع التعقيد مع زيادة التنوع
عدد الطبقات	NL	عدد طبقات البيانات المكانية المدمجة في الخريطة	خريطة أحادية أو بسيطة الطبقات	تعدد طبقات يؤدي إلى تداخل المعلومات	يزيد التعقيد مع زيادة الطبقات
التعقيد اللوني (الإنتروبي)	CC	درجة تشتت وتنوع الألوان داخل الخريطة	ألوان محدودة ومنظمة	توزيع لوني متنوع وغير منتظم (فوضى بصرية)	يرفع التعقيد بزيادة الإنتروبي
التداخل المكاني	SO	نسبة تداخل العناصر أو الطبقات داخل نفس المجال المكاني	وضوح بصري وفصل بين العناصر	ازدحام وتراكب بصري عالي	يزيد التعقيد بشكل مباشر
التوحيد القياسي	X'	تحويل القيم الأصلية إلى مقياس موحد	قيم غير قابلة للمقارنة	قيم معيارية قابلة للتحليل	شرط أساسي لبناء المؤشر
الأوزان النسبية	w	تحديد أهمية كل عنصر داخل النموذج	تمثيل غير موزون وغير دقيق	توزيع متوازن يعكس الأهمية النسبية	يحدد تأثير كل عنصر في الناتج النهائي

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على المعادلات اعلاه.

5- مخطط مراحل وخطوات البحث:

بعد عرض مفهوم التعقيد الكارتوغرافي ومكوناته والمعادلات القياسية المعتمدة في قياسه، يوضح الشكل (1) مخطط مراحل وخطوات البحث المعتمدة في تطبيق مؤشر تعقيد التصميم الكارتوغرافي، مبيناً تسلسل الإجراءات المنهجية ابتداءً من إعداد البيانات وتحضير المدخلات، مروراً باستخراج متغيرات التعقيد وتطبيق النماذج والمعادلات القياسية، وانتهاءً بعمليات التحليل المكاني وتفسير النتائج واستخلاص المخرجات النهائية المتعلقة بتقييم التعقيد البصري وتحسين التصميم الكارتوغرافي.

شكل (1) مخطط مراحل وخطوات البحث



المصدر: من عمل الباحث.

6- التحليل الكارتوغرافي لخرائط السحب ودلالاتها المناخية:

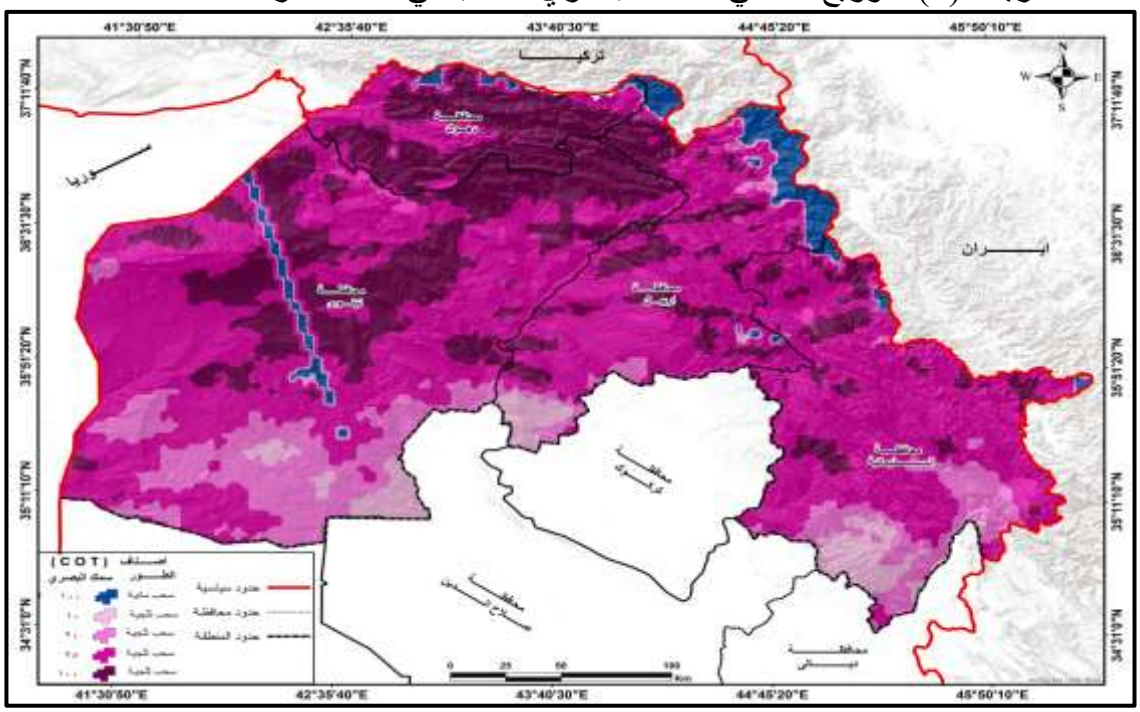
تعد خرائط الغيوم من أهم الخرائط المناخية لارتباطها المباشر بتفاعلات الغلاف الجوي وعناصره الرئيسة، مثل درجة الحرارة والرطوبة وحركة الكتل الهوائية، فضلاً عن دورها في تفسير أنماط الهطول والتوازن الإشعاعي وحالات عدم الاستقرار الجوي، مما يجعلها أداة تحليلية أساسية في الدراسات المناخية والبيئية.

وتتجلى أهميتها من خلال تمثيل مجموعة من المؤشرات، كخرائط السمك البصري للغيوم، وأطوار السحب، ودرجة حرارة قممها، والتي تسهم مجتمعة في فهم خصائص السحب وديناميكية الغلاف الجوي وتأثيراته في البيئة والإنسان.

غير أن فاعلية هذه الخرائط لا تقتصر على محتواها العلمي، بل تعتمد بدرجة كبيرة على كفاءة تصميمها الكارتوغرافي، إذ ينبغي أن تحقق توازناً بين الدقة العلمية والوضوح البصري، من خلال اعتماد تدرجات لونية ملائمة، ورموز واضحة، وتنظيم منهجي لعناصر الخريطة كالعنوان ومفتاح الخريطة ومقياس الرسم. وأي قصور في هذه الجوانب من شأنه أن يضعف قدرتها على إيصال المعلومة، مما يجعل جودة الإخراج الكارتوغرافي شرطاً أساسياً لنجاح خرائط الغيوم كأداة علمية فاعلة في التحليل والتفسير.

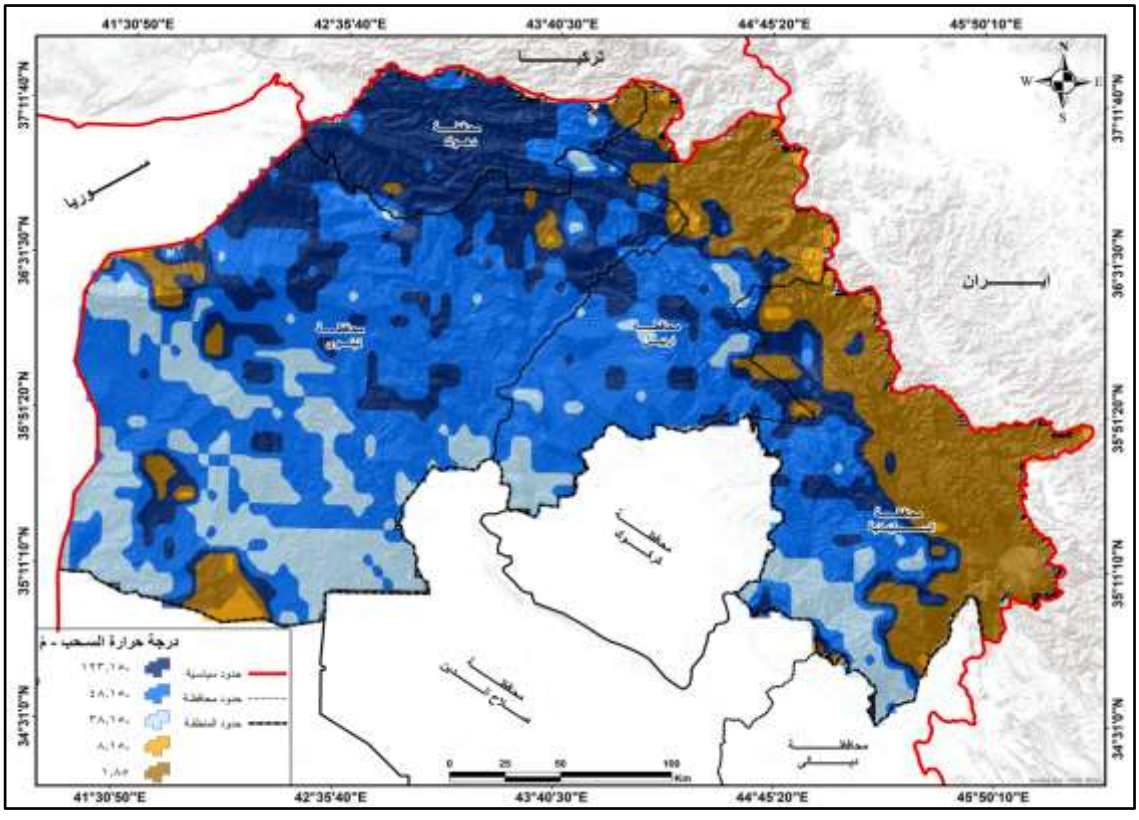
تمثلت خرائط الدراسة في خريطتين أساسيتين، لكل منهما دور مناخي وكارتوغرافي في تفسير خصائص السحب وإيصال المعلومة للقارئ، **الخريطة الأولى (2)** تمثل السمك البصري للغيوم في منطقة الدراسة، إذ تضمنت خمسة أصناف تجمع بين أطوار السحب (مائية وجليدية) ودرجات السمك البصري لها. وقد تم اعتماد مقياس يتراوح بين (0–100) للتعبير عن قدرة السحب على نفاذية الإشعاع الشمسي، حيث تشير القيم المنخفضة إلى سحب رقيقة تسمح بمرور الإشعاع، في حين تعكس القيم المرتفعة سحباً كثيفة تحدّ من نفاذه. وتكمن أهمية هذه الخريطة مناخياً في توضيح دور السحب في التأثير على التوازن الإشعاعي ودرجة حرارة السطح، أما كارتوغرافياً فتبرز أهميتها في قدرتها على تمثيل التدرج القيمي للظاهرة باستخدام تدرجات لونية واضحة تمكّن القارئ من التمييز بين مستويات الكثافة بسهولة، مما يعزز من فهم العلاقة بين نوع السحب وتأثيرها المناخي. **الخريطة الثانية (3)** تمثل درجة حرارة قمم السحب، حيث صنّفت إلى خمسة أصناف حرارية وفق تدرجات لونية تعكس الاختلاف في درجات الحرارة. وتشير القيم المنخفضة (الأبرد) إلى سحب مرتفعة ومرتبطة غالباً بحالات عدم الاستقرار الجوي والنشاط الحملاني، في حين تدل القيم الأعلى على سحب منخفضة وأكثر استقراراً. وتبرز أهمية هذه الخريطة مناخياً في تحديد شدة الظواهر الجوية واحتمالية حدوث الهطول أو العواصف، بينما تتمثل أهميتها كارتوغرافياً في اعتمادها على تدرج لوني حراري منطقي يساعد القارئ على الربط البصري بين اللون والقيمة، مما يسهم في تسهيل تفسير البيانات وفهمها بدقة.

خريطة (2) التوزيع المكاني للسمك البصري للسحب في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثين بالاعتماد على مؤشر (COT)، ومخرجات برنامج ArcGIS.

خريطة (3) التوزيع المكاني لدرجة حرارة السحب في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحثين بالاعتماد على مؤشر (CTT)، ومخرجات برنامج ArcGIS.

7- تطبيق مؤشر تعقيد التصميم الكارتوغرافي باستخدام نظم المعلومات الجغرافية (GIS):

يعكس تحليل مؤشرات التعقيد في التصميم الكارتوغرافي لخريطتي السمك البصري للسحب ودرجة حرارة السحب اختلافاً نوعياً في طبيعة البنية البصرية لكل منهما، رغم تقارب القيم النهائية لمؤشر التعقيد. ففي خريطة التوزيع المكاني للسمك البصري للسحب، بلغت قيمة مؤشر التعقيد (0.61)كما في جدول (8) وشكل (2) ، وهي قيمة تشير إلى مستوى تعقيد مرتفع نسبياً، ناتج بالدرجة الأساس عن ارتفاع كثافة العناصر (FD=3) والتعقيد اللوني (CC=3)، إذ تم توظيف تدرجات لونية مكثفة ومتقاربة ضمن نطاق لوني واحد، الأمر الذي يزيد من ثراء المعلومات البصرية لكنه في الوقت نفسه يرفع من الحمل الإدراكي على المستخدم. في المقابل، جاء تنوع الرموز (SD=1.5) بمستوى منخفض إلى متوسط نتيجة الاعتماد على أسلوب تمثيل أحادي (تدرج لوني مستمر)، وهو ما يحد من تعددية المتغيرات البصرية وفق ما تشير إليه مبادئ (Jacques Bertin) في تنظيم الرموز الكارتوغرافية. أما عدد الطبقات (NL=2) فقد كان متوسطاً، مما يدل على توازن نسبي في بنية الخريطة دون إفراط في تعدد الطبقات، في حين أن التداخل المكاني (SO=1) كان منخفضاً، وهو عامل إيجابي يعزز من وضوح القراءة ويقلل من التشويش البصري، وبالتالي يحد جزئياً من أثر التعقيد العالي الناتج عن اللون وكثافة العناصر.

بينما سجلت خريطة التوزيع المكاني لدرجة حرارة السحب قيمة مؤشر تعقيد بلغت (0.60) كما في الجدول (9) وشكل (3)، وهي قريبة جداً من الخريطة الأولى، إلا أن مصدر التعقيد فيها يختلف جوهرياً. فقد انخفضت كثافة العناصر (FD=2) إلى مستوى متوسط، ما يعكس توزيعاً أكثر تبسيطاً للعناصر المكانية، في حين ارتفع تنوع الرموز (SD=3) إلى مستوى عالي نتيجة استخدام أكثر من نظام لوني (الأزرق والبني)، وهو ما يعزز القدرة على التمييز بين الظواهر لكنه في الوقت نفسه قد يخلق تبايناً حاداً يحتاج إلى معالجة تصميمية دقيقة. كما جاء التعقيد اللوني (CC=2) بمستوى متوسط، ما يشير إلى تدرج أقل كثافة مقارنة بالخريطة الأولى، وبالتالي تقليل الحمل البصري المرتبط بالألوان. غير أن العامل الأكثر تأثيراً في هذه الخريطة يتمثل في التداخل المكاني (SO=2.5)، الذي بلغ مستوى متوسطاً إلى مرتفع، نتيجة تقاطع وتجاور الألوان المختلفة، وهو ما قد يؤدي إلى نوع من التداخل الإدراكي (Visual Interference) الذي يضعف من وضوح الحدود بين القيم الممثلة، وهو ما تناولته دراسات (Alan M. MacEachren) في تفسير العلاقة بين التعقيد البصري وإدراك المستخدم.

فإن التقارب العددي بين قيمتي المؤشر في الخريطتين لا يعكس تماثلاً في الأداء الكارتوغرافي، بل يكشف عن نمطين مختلفين من التعقيد؛ إذ تتسم الخريطة الأولى بتعقيد لوني وكثافة معلوماتية مرتفعة

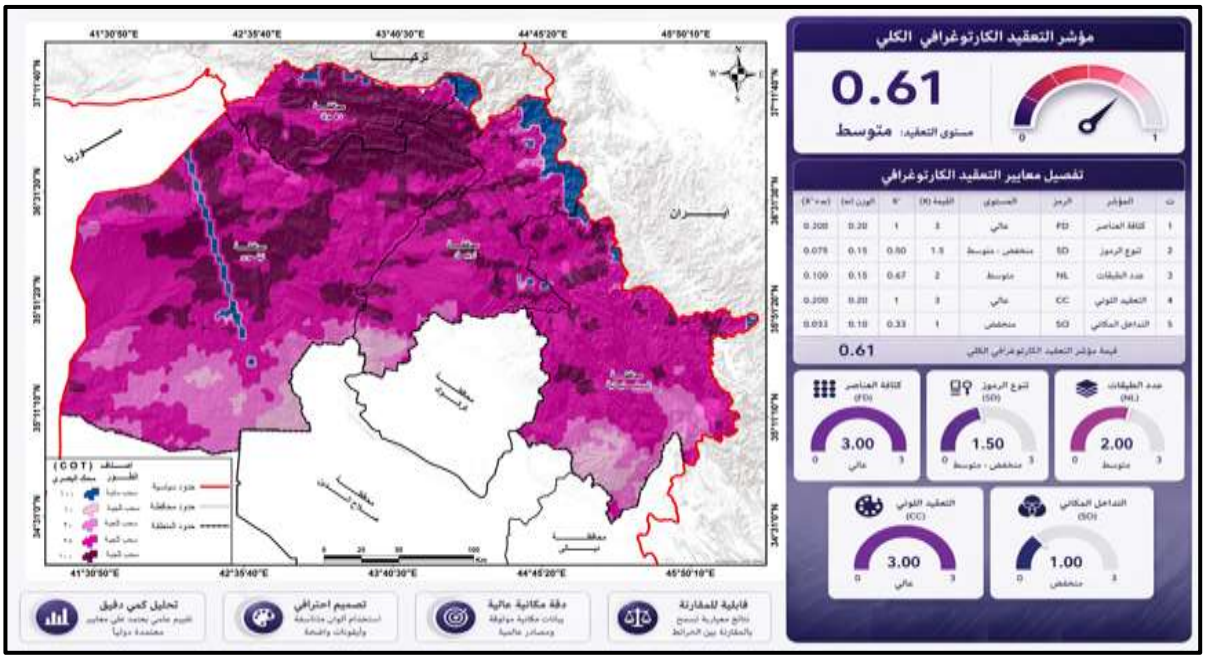
مع وضوح مكاني جيد، بينما تتسم الخريطة الثانية بتنوع رمزي أكبر يقابله ارتفاع في التداخل المكاني. وهذا يؤكد أن مؤشر التعقيد الكارتوغرافي لا ينبغي تفسيره كقيمة مطلقة، بل كأداة تحليلية تستلزم الربط بين مكوناتها لفهم طبيعة التعقيد وتأثيره في كفاءة الاتصال الكارتوغرافي، كما في شكل (3)، وهو ما يمثل أحد المرتكزات الأساسية في علم (Cartography) وتطبيقاته ضمن بيئة (Geographic Information Systems)، ويوضح جدول الادوات المستخدمة ضمن البرنامج (10).

جدول (8) مؤشرات التعقيد في التصميم الكارتوغرافي لخريطة التوزيع المكاني للسمك البصري للسحب ضمن منطقة الدراسة

ت	المؤشر	الرمز	المستوى	القيمة (X)	X′	الوزن (w)	(X′×w)
1	كثافة العناصر	FD	عالي	3	1	0.2	0.2
2	تنوع الرموز	SD	منخفض–متوسط	1.5	0.5	0.15	0.075
3	عدد الطبقات	NL	متوسط	2	0.67	0.15	0.1
4	التعقيد اللوني	CC	عالي	3	1	0.2	0.2
5	التداخل المكاني	SO	منخفض	1	0.33	0.1	0.033
0.61	قيمة مؤشر التعقيد الكارتوكرافي						

المصدر: من عمل الباحثين بالاعتماد على خريطة (2) ومعادلة التعقيد التصميم الكارتوكرافي، ومخرجات برنامج Arc GIS.

شكل (2) مستوى تعقيد التصميم الخرائطي لخريطة التوزيع المكاني للسمك البصري للسحب في منطقة الدراسة



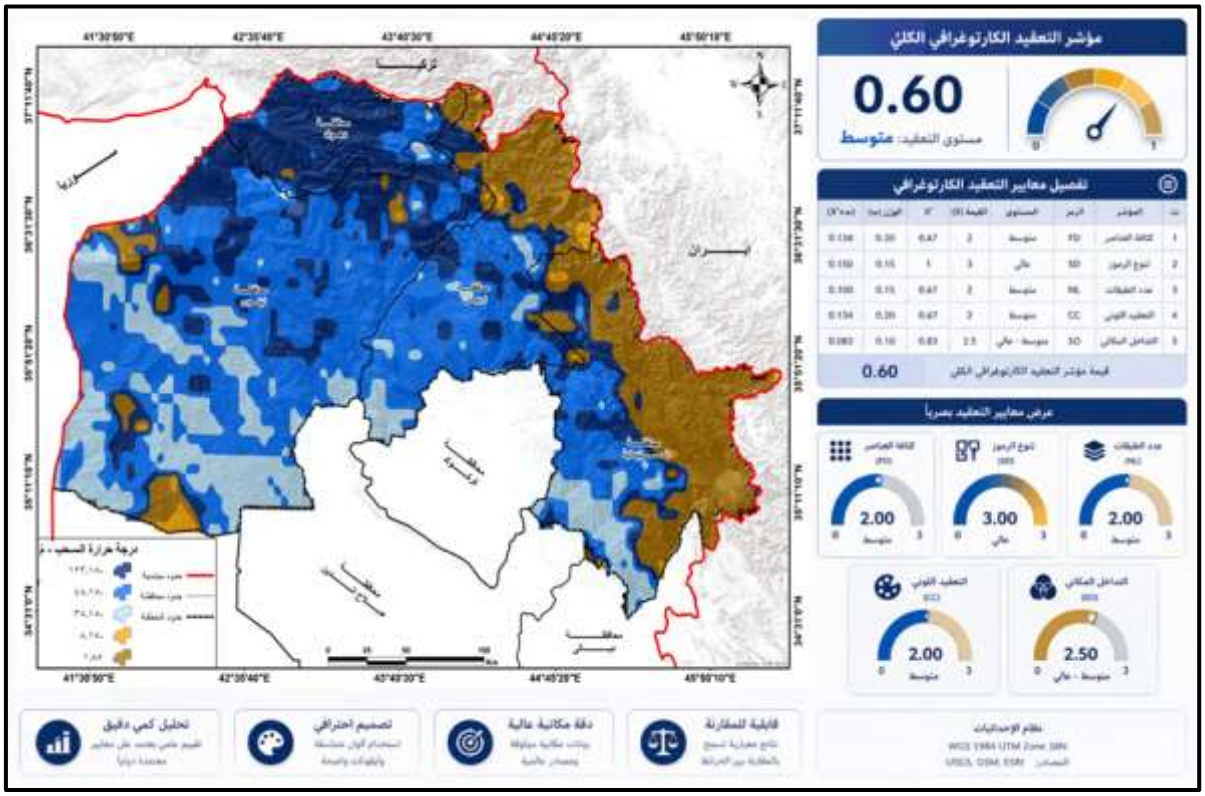
المصدر: من عمل الباحث:

جدول (9) مؤشرات التعقيد في التصميم الكارتوغرافي لخريطة التوزيع المكاني لدرجة حرارة السحب ضمن منطقة الدراسة

ت	المؤشر	الرمز	المستوى	القيمة (X)	X′	الوزن (w)	(X′×w)
1	كثافة العناصر	FD	متوسط	2	0.67	0.2	0.134
2	تنوع الرموز	SD	عالي	3	1	0.15	0.15
3	عدد الطبقات	NL	متوسط	2	0.67	0.15	0.1
4	التعقيد اللوني	CC	متوسط	2	0.67	0.2	0.134
5	التداخل المكاني	SO	متوسط–عالي	2.5	0.83	0.1	0.083
0.6	قيمة مؤشر التعقيد الكارتوكرافي						

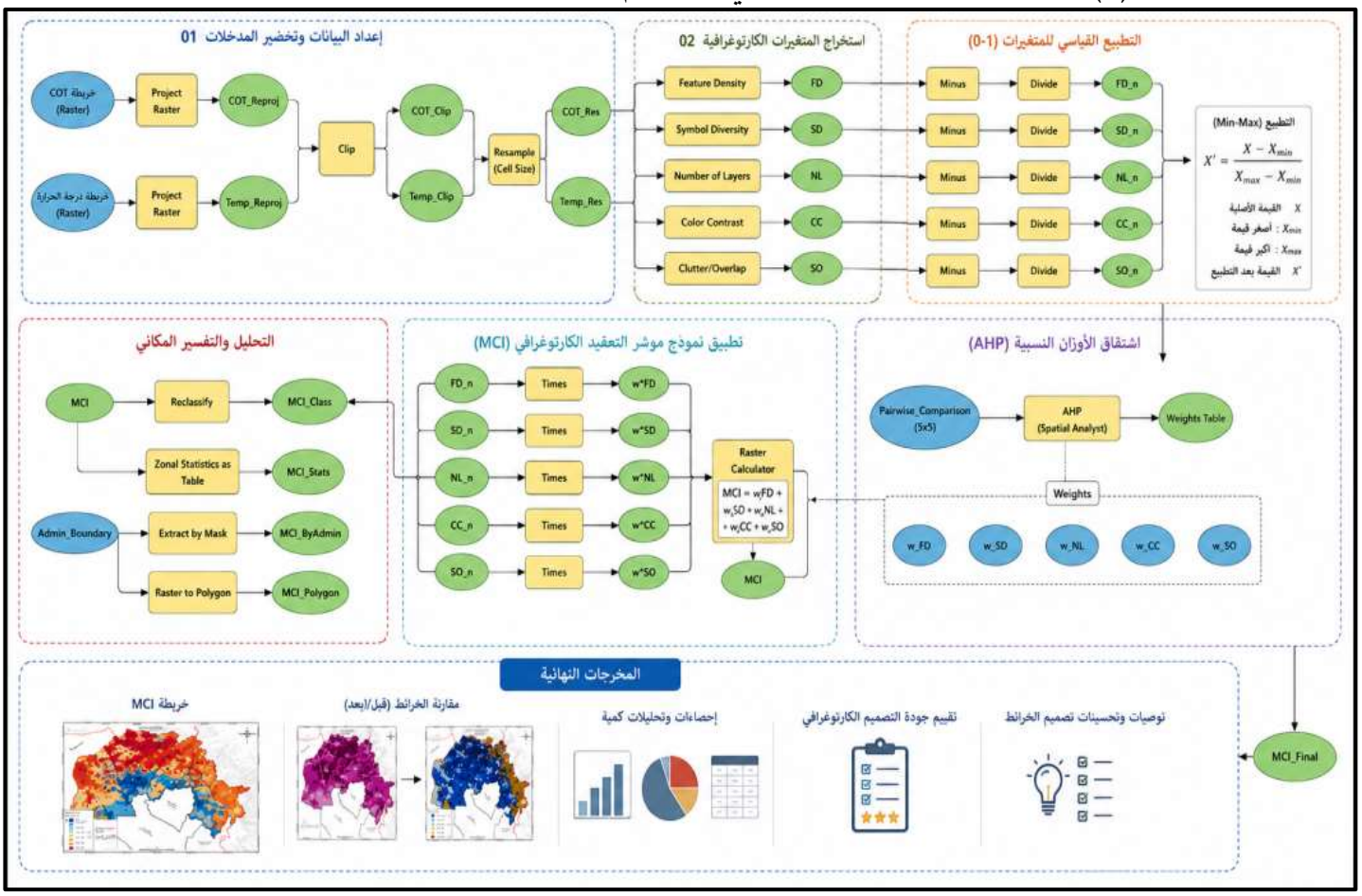
المصدر: من عمل الباحثين بالاعتماد على خريطة (3) ومعادلة التعقيد التصميم الكارتوكرافي، ومخرجات برنامج Arc GIS.

شكل (2) مستوى تعقيد التصميم الخرائطي لخريطة التوزيع المكاني لدرجة حرارة السحب في منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحث.

شكل (3) نمذجة متغيرات التعقيد الخرائطي باستخدام ModelBuilder لخرائط منطقة الدراسة



المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على برنامج ArcGIS.

جدول (10) الأدوات المستخدمة في برنامج ArcMap لاستخراج مؤشرات التعقيد في التصميم الكارتوغرافي

ت	المؤشر	الأداة المستخدمة	فائدة الأداة
1	كثافة العناصر (FD)	Calculate Geometry	حساب مساحة منطقة الدراسة اللازمة لمعادلة الكثافة
		Feature Count	عد العناصر الكارتوغرافية داخل الخريطة
		Create Fishnet	تقسيم الخريطة إلى وحدات مكانية لحساب الكثافة موضعياً
		Spatial Join	ربط العناصر بوحدات التحليل وحساب كثافتها
		Kernel Density	إظهار مناطق التركز والازدحام المكاني للعناصر
		Point / Line Density	حساب كثافة العناصر النقطية والخطية
		Reclassify	تصنيف الكثافة إلى منخفضة ومتوسطة وعالية
2	تنوع الرموز (SD)	Unique Values	تحديد عدد الأنماط والرموز المختلفة
		Symbology	تحليل تنوع الأشكال والألوان الرمزية
		Frequency	حساب تكرار كل رمز
		Summary Statistics	استخراج مؤشرات التنوع الإحصائي

		Field Calculator	تطبيق معادلات التنوع الرمزي
3	عدد الطبقات (NL)	Table of Contents	حصر الطبقات المستخدمة في الخريطة
		ArcCatalog	جرد وتنظيم الطبقات وخصائصها
		ModelBuilder	تحليل ترابط وتعدد الطبقات
		Intersect	فحص التفاعل والتراكب بين الطبقات
4	التعقيد اللوني (CC)	Image Classification Toolbar	تحليل توزيع الألوان بالخريطة
		Iso Cluster	تصنيف الألوان غير الموجه واستخراج الأنماط اللونية
		Color Histogram	قياس تنوع الألوان وتكرارها
		Raster to Polygon	تحويل مناطق الألوان إلى وحدات قابلة للقياس
		Reclassify	تصنيف التعقيد اللوني إلى مستويات
5	التداخل المكاني (SO)	Intersect	استخراج مناطق تداخل العناصر
		Union	دمج الطبقات وقياس التراكب
		Overlay Analysis	تحليل علاقات التداخل المكاني
		Topology Tools	كشف التضارب والتزاحم المكاني
6	المؤشر النهائي (CCI)	Field Calculator	حساب قيم المؤشر المرجح
		Weighted Overlay	دمج المؤشرات بالأوزان المعتمدة
		Raster Calculator	تنفيذ معادلة المؤشر النهائي مكانياً

المصدر: من عمل الباحث بالاعتماد على برنامج ArcGIS.

النتائج:

1- أظهرت الدراسة إمكانية بناء نموذج مكاني متكامل لقياس التعقيد الكارتوغرافي للخرائط المناخية – السحب اعتماداً على بيئة نظم المعلومات الجغرافية، من خلال دمج مؤشرات كثافة العناصر، وتنوع الرموز، والتعقيد اللوني، وعدد الطبقات، والتداخل المكاني ضمن مؤشر تركيبي موحد.

2- بينت نتائج الدراسة أن خريطتي السمك البصري للسحب ودرجة حرارة السحب سجلتا قيماً متقاربة لمؤشر التعقيد الكارتوغرافي، إذ بلغت (0.61) و(0.60) على التوالي، إلا أن هذا التقارب العددي لا يعكس تماثلاً في طبيعة الأداء الكارتوغرافي لكل خريطة.

3- كشفت الدراسة أن خريطة السمك البصري للسحب اتسمت بتعقيد بصري مرتفع ناتج عن زيادة كثافة العناصر والتعقيد اللوني، نتيجة استخدام تدرجات لونية كثيفة ومتقاربة ضمن نطاق لوني واحد، مما أدى إلى رفع الحمل الإدراكي للمستخدم.

4- أوضحت النتائج أن انخفاض التداخل المكاني في خريطة السمك البصري للسحب أسهم في المحافظة على وضوح القراءة البصرية وتقليل التشويش الخرائطي، بالرغم من ارتفاع كثافة المعلومات المعروضة.

5- أظهرت الدراسة أن خريطة درجة حرارة السحب تميزت بارتفاع تنوع الرموز نتيجة استخدام أنظمة لونية متعددة، الأمر الذي عزز القدرة على التمييز بين الظواهر المناخية، لكنه تسبب في زيادة التداخل البصري بين العناصر المكانية.

6- بينت النتائج أن التداخل المكاني في خريطة درجة حرارة السحب كان من أكثر العوامل تأثيراً في رفع مستوى التعقيد الإدراكي، نتيجة تقاطع وتجاور الألوان المختلفة وما يسببه ذلك من ضعف نسبي في وضوح الحدود بين القيم الممثلة.

7- أوضحت الدراسة أن اختلاف مصادر التعقيد بين الخرائط المناخية يؤدي إلى تباين في كفاءة الاتصال الكارتوغرافي، حتى في حالة تقارب القيم النهائية لمؤشر التعقيد الكارتوغرافي.

8- أكدت النتائج أن التعقيد الكارتوغرافي لا يرتبط فقط بعدد العناصر أو كثافة المعلومات، بل يتأثر أيضاً بطريقة تنظيم المتغيرات البصرية وتفاعلها داخل البنية التصميمية للخريطة.

9- أظهرت الدراسة أن الخرائط ذات التعقيد المتوسط والمتوازن تحقق كفاءة أفضل في الإدراك البصري مقارنة بالخرائط التي تعاني من ازدحام لوني أو تداخل مكاني مرتفع.

10- بينت الدراسة فاعلية مؤشر التعقيد الكارتوغرافي في تفسير العلاقة بين البنية التصميمية للخرائط المناخية ومستوى الإدراك البصري للمستخدم، مما يجعله أداة مناسبة لتقييم جودة التصميم الكارتوغرافي ضمن تطبيقات نظم المعلومات الجغرافية.

التوصيات:

1- التوسع في تطبيق نموذج التعقيد الكارتوغرافي على أنواع أخرى من الخرائط، مثل الخرائط الجيومورفولوجية والهيدرولوجية والسكانية، للتحقق من كفاءة النموذج في بيئات كارتوغرافية متعددة.

2- دمج تقنيات الذكاء الاصطناعي والتعلم الآلي ضمن نماذج نظم المعلومات الجغرافية لتطوير مؤشرات أكثر دقة في قياس التعقيد الكارتوغرافي والتنبؤ بمستويات الإدراك البصري للمستخدمين.

3- إجراء دراسات ميدانية تعتمد على تتبع حركة العين (Eye Tracking) والاستبيانات الإدراكية لقياس استجابة المستخدمين للخرائط المناخية وربطها بدرجات التعقيد الكارتوغرافي الناتجة عن النموذج.

4- تطوير نموذج مكاني ديناميكي يراعي اختلاف المقاييس الخرائطية ومستويات التكبير والتصغير وتأثيرها في الإدراك البصري وكثافة العناصر التصميمية.

5- دراسة تأثير عناصر التصميم الكارتوغرافي بصورة منفصلة، مثل الألوان والرموز والخطوط والتباين البصري، لتحديد أكثر المتغيرات تأثيراً في وضوح الخرائط المناخية.

6- توظيف المرئيات الفضائية الحديثة والبيانات عالية الدقة المكانية والزمانية لتحسين جودة المخرجات الكارتوغرافية وتقليل التشويش البصري في الخرائط.

7- تطبيق الدراسة على مناطق جغرافية أخرى داخل العراق وخارجه للمقارنة بين البيئات الطبيعية المختلفة ومدى انعكاسها على أنماط التعقيد الكارتوغرافي والإدراك البصري.

8- الاستفادة من نتائج الدراسة في وضع معايير تصميم كارتوغرافي رقمية يمكن اعتمادها في المؤسسات الأكاديمية والدوائر التخطيطية لتحسين كفاءة الخرائط المناخية.

الهوامش:

(1)Alan M.MacEachren, Map Complexity: Comparisonand and Measurement, The American Cartographer, Vol.9,No. 1,1982.

(2) MacEachren, A. M. How Maps Work: Representation, Visualization, and Design. University of Chicago Press. 1995. https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/H/bo3627994.html

(3) Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C., & Howard, H. H. Thematic Cartography and Geovisualization. Pearson. 2009. https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/thematic-cartography-and-geovisualization/P200000006439

(4) Bertin, J. Semiology of Graphics. Esri Press. 1983. https://www.esri.com/en-us/esri-press/browse/semiology-of-graphics

(5) O'Sullivan, D., & Unwin, D. Geographic Information Analysis. Wiley. 2010. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470549094

(6) Brewer, C. A. Color Use for Mapping. Cartography and Geographic Information Systems. 1994. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/153851319402300204

(7) Roth, R. E. Interactive Maps and Cognitive Load in Cartography. 2013. https://doi.org/10.1080/13658816.2013.795227

(8)Robinson, A. H., Morrison, J. L., et al. Elements of Cartography (6th ed.). New York: John Wiley & Sons. 1995.

(9)MacEachren, A. M ,How Maps Work: Representation, Visualization, and Design. New York: Guilford Press, 1995.

(10)Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W, Geographical Information Systems and Science (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.

(11)Buchel, D., & Reichenbacher, T, The visual complexity of bike maps. Proceedings of the International Cartographic Association, 5, 3. 2023. https://doi.org/10.5194/ica-proc-5-3-2023

(12)Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. Geographical Information Systems and Science (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2015.

(13)Han, J., Kamber, M., & Pei, J, Data Mining: Concepts and Techniques (3rd ed.). Waltham, MA: Morgan Kaufmann, 2013.

المصادر:

Bertin, J. *Semiology of Graphics*. Esri Press. 1983. https://www.esri.com/en-us/esri-press/browse/semiology-of-graphics

Brewer, C. A. *Color Use for Mapping*. *Cartography and Geographic Information Systems*. 1994. https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/153851319402300204

Buchel, D., & Reichenbacher, T. *The Visual Complexity of Bike Maps*. *Proceedings of the International Cartographic Association*, 5, 3. 2023. https://doi.org/10.5194/ica-proc-5-3-2023

Han, J., Kamber, M., & Pei, J. *Data Mining: Concepts and Techniques* (3rd ed.). Waltham, MA: Morgan Kaufmann. 2013.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. *Geographical Information Systems and Science* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2015.

Longley, P. A., Goodchild, M. F., Maguire, D. J., & Rhind, D. W. *Geographical Information Systems and Science* (4th ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2015.

MacEachren, A. M. *How Maps Work: Representation, Visualization, and Design*. University of Chicago Press. 1995. https://press.uchicago.edu/ucp/books/book/chicago/H/bo3627994.html

O'Sullivan, D., & Unwin, D. *Geographic Information Analysis*. Wiley. 2010. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470549094

Robinson, A. H., Morrison, J. L., et al. *Elements of Cartography* (6th ed.). New York: John Wiley & Sons. 1995.

Roth, R. E. *Interactive Maps and Cognitive Load in Cartography*. 2013. https://doi.org/10.1080/13658816.2013.795227

Slocum, T. A., McMaster, R. B., Kessler, F. C., & Howard, H. H. *Thematic Cartography and Geovisualization*. Pearson. 2009. https://www.pearson.com/en-us/subject-catalog/p/thematic-cartography-and-geovisualization/P200000006439