تقييم دقة النماذج الارتفاعية الرقمية SRTM30m وAW3D30m باستخدام الطائرات المسيرة وتحليلها هيدرولوجياً

الملخص

تعتبر نماذج الارتفاع الرقمية التي تتيحها العديد من الأقمار الصناعية حول العالم ضرورة ملحة في معظم المشاريع. تختلف هذه النماذج من حيث دقتها الرأسية و كذلك دقة التحليلات المورفومترية التي تنتج عنها، وتتأثر هذه الدقة بعدد من العوامل مثل الطبيعة الطبوغرافية والغطاء الأرضي و غيرها من العوامل.

يهدف البحث إلى استخدام النماذج الارتفاعية عالية الدقة، الناتجة عن المسح التصويري باستخدام الطائرة دون طيار (المسيرة) لتقييم الدقة الرأسية لنموذجي ارتفاع رقميين عالميين هما SRTM30m و AW3D30m بدقة مكانية 30 متر، كما يهدف إلى تقييم هذين النموذجين الارتفاعيين إضافة إلى النموذج الارتفاعي الناتج باستخدام الطائرات المسيرة هيدرولوجياً من خلال مقارنة مواقع وكثافة المسيلات المائية المستنتجة منهما مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية.

بينت نتائج المقارنة أن الارتفاعات المستنتجة من نموذج AW3D 30m لها أصغر خطأ متوسط تربيعي (2.14 م) علماً أن نموذجSRTM 30m أعطى أقل خطأ متوسط تربيعي (3.03م) في منطقة الارتفاعات العظمى، كما بينت الدراسة أن اكبر قيم للأخطاء في الارتفاعات كانت موجودة في مناطق الميول التي تزيد عن 20%. كانت قيمة معامل التوافق المكاني للمسيلات المائية المشتقة من نموذج الارتفاعات الرقمي الناتج عن مسح الطائرة المسيرة بالمقارنة مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية هي الأعلى إذ بلغ معامل التوافق المكاني 0.20 تليها المسيلات المستنتجة من نموذج SRTM30m حيث بلغت قيمة معامل التوافق المكاني 0.16، و كانت المسيلات المستنتجة من مسح الدرون هي الأفضل من حيث كثافة المسيلات بأقل خطأ نسبي 2% تلها المسيلات المستنتجة من النموذج SRTM30m بخطأ نسبي 4%.

كلمات مفتاحية: نموذج الارتفاع الرقمي SRTM 30m ، نموذج الارتفاع الرقمي AW3D 30m ، الدقة الرأسية، المسيلات المائية، الطائرات المسيرة.

Drone-Based Accuracy Assessment and Hydrological Analysis of SRTM30m and AW3D30m Digital Elevation Models.

Abstract

Digital Elevation Models (DEMs) provided by various satellites worldwide are essential for most projects. These models vary in terms of vertical accuracy and the precision of the morphometric analyses they produce, with their accuracy influenced by factors such as topographic features, land cover, and other elements.

This research aims to utilize high-resolution DEMs, generated through photogrammetric surveys using unmanned aerial vehicles (UAVs), to evaluate the vertical accuracy of two global DEMs: SRTM30m and AW3D30m. Additionally, it seeks to assess the hydrological accuracy of these models, along with the UAV-derived DEM, by comparing the locations and density of streams derived from them against those digitized from a topographic map.

The comparison results indicated that the elevations derived from the AW3D30m model had the lowest Root Mean Square Error (RMSE) of 2.14 meters, while the SRTM30m model showed a lower RMSE of 3.03 meters in areas of maximum elevation. It is also found that the highest elevation errors were in areas with slopes exceeding 20%. The spatial concordance coefficient of the streams derived from the UAV-based DEM, when compared to the digitized streams from the topographic map, was the highest, with a coefficient of 0.20. This was followed by streams from the SRTM30m model, with a spatial concordance coefficient of 0.16. Moreover, the streams extracted from the drone survey demonstrated the highest density accuracy, with a relative error of 2%, followed by those from the SRTM30m model, which had a relative error of 4%.

Keywords: Digital Elevation Model (DEM), SRTM 30m, AW3D 30m, Vertical accuracy, Streams, Drones.

1 مقدمة:

أصبحت نماذج الارتفاع الرقمية التي تتعدد بمصادرها ودقاتها وطريقة قياسها أداة شائعة الاستخدام في مختلف أنواع الدراسات البيئية والهيدرولوجية وحتى تحديد مناطق التنمية، وأصبحت تعتبر بديلا

عن المسح الطبوغرافي خاصة في مناطق الدراسة ذات المساحات الكبيرة أو التي يصعب الوصول إليها كما أنها متاحة مجاناً مما يخفف من تكاليف العمل الطبوغرافي والوقت اللازم لإنجازه[1] .
لابد من تقييم دقة هذه النماذج الرقمية في كل بلد وتحديد النماذج الأنسب لاشتقاق المعالم المورفومترية التي تعبر عن شكل الأرض وخاصة تلك المرتبطة بالأحواض و المسيلات المائية، كالارتفاعات والميول والاتجاهات و اطوال المسيلات المائية و خصائصها الشكلية، وأيها الأنسب للتحليلات الهيدرولوجية التي تتضمن تحديد المسيلات المائية والأحواض الصبابة[2] .
في سورية تم إجراء العديد من الدراسات لتقييم دقة نماذج الارتفاعات الرقمية، مثل (Abdo,2015) [3] لتقييم دقة النموذج الارتفاعي ASTER 30m في استنتاج الخصائص المورفومترية لحوض المنطار في طرطوس بالمقارنة مع الطريقة التقليدية، حيث بين البحث مرونة وسرعة العمل باستخدام نماذج الارتفاعات الرقمية بالإضافة إلى دقة نتائج التحليل المروفومتري للشبكة النهرية. و كذلك (Alashkar,2018)[4] لتقييم دقة أربع نماذج ارتفاعية رقمية هي SRTM30m، وAW3D30m، و ASTERGDEM30m ، ونموذج HydroSHED90m في منطقتين مختلفتين في سورية هما حوض صدد ذو الطبيعة السهلية في معظم مساحته وحوض الأبرش ذو الطبوغرافية المتنوعة بين السهول والتلال والجبال، وذلك من خلال المقارنة مع الخرائط الطبوغرافية بمقياس50000/1، من حيث تمثيل الارتفاعات والميول، ومواقع المسيلات المائية، وخواص الأحواض الصبابة، حيث بينت نتائج البحث أن النموذجين AW3D30m وSRTM 30m هما الأكثر دقة في تمثيل الارتفاعات والمسيلات المائية والأحواض الصبابة في منطقتي الدراسة مقارنةً مع باقي النماذج المدروسة.

على الرغم من أن الدراسات التي تعمل عالمياً على المقارنة بين نماذج الارتفاعات الرقمية (DEMs) بالاستفادة من مخرجات المسح باستخدام الطائرات المسيرة قد التطوير، إلا أن هذا المجال البحثي يشهد نمواً متسارعاً في مجال التطبيقات الهيدرولوجية على وجه الخصوص، فهناك العديد من الأبحاث العلمية التي تناولت هذا الموضوع من جوانب متنوعة.[5] ، [6] ، [7].
لا توجد، حتى تاريخه، في سورية دراسات لتقييم دقة نماذج الارتفاع الرقمية العالمية بالاستعانة بمخرجات المسح باستخدام الطائرات المسيرة.

تم في هذا البحث الاستفادة من المسح الطبوغرافي باستخدام الطائرات المسيرة لمنطقة حسياء الصناعية بمساحة قدرها 2700 هكتار و بإجمالي عدد صور بلغ 47231 صورة رقمية و دقة مكانية تصل إلى 4.6 سم من أجل تقييم نموذجين رقميين أثبتا كفاءتهما في العديد من الدراسات في سورية وهما SRTM 30m و Aw3D30m ، و ذلك من خلال مقارنتهما مع النموذج الرقمي الناتج عن المسح الدقيق للطائرة المسيرة، كما تم تقييم دقة هذين النموذجين بالإضافة إلى النموذج الناتج من المسح باستخدام الطائرات المسيرة في التحليلات الهيدرولوجية من خلال مقارنتها مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية بمقياس 1:50000.

2 هدف البحث:

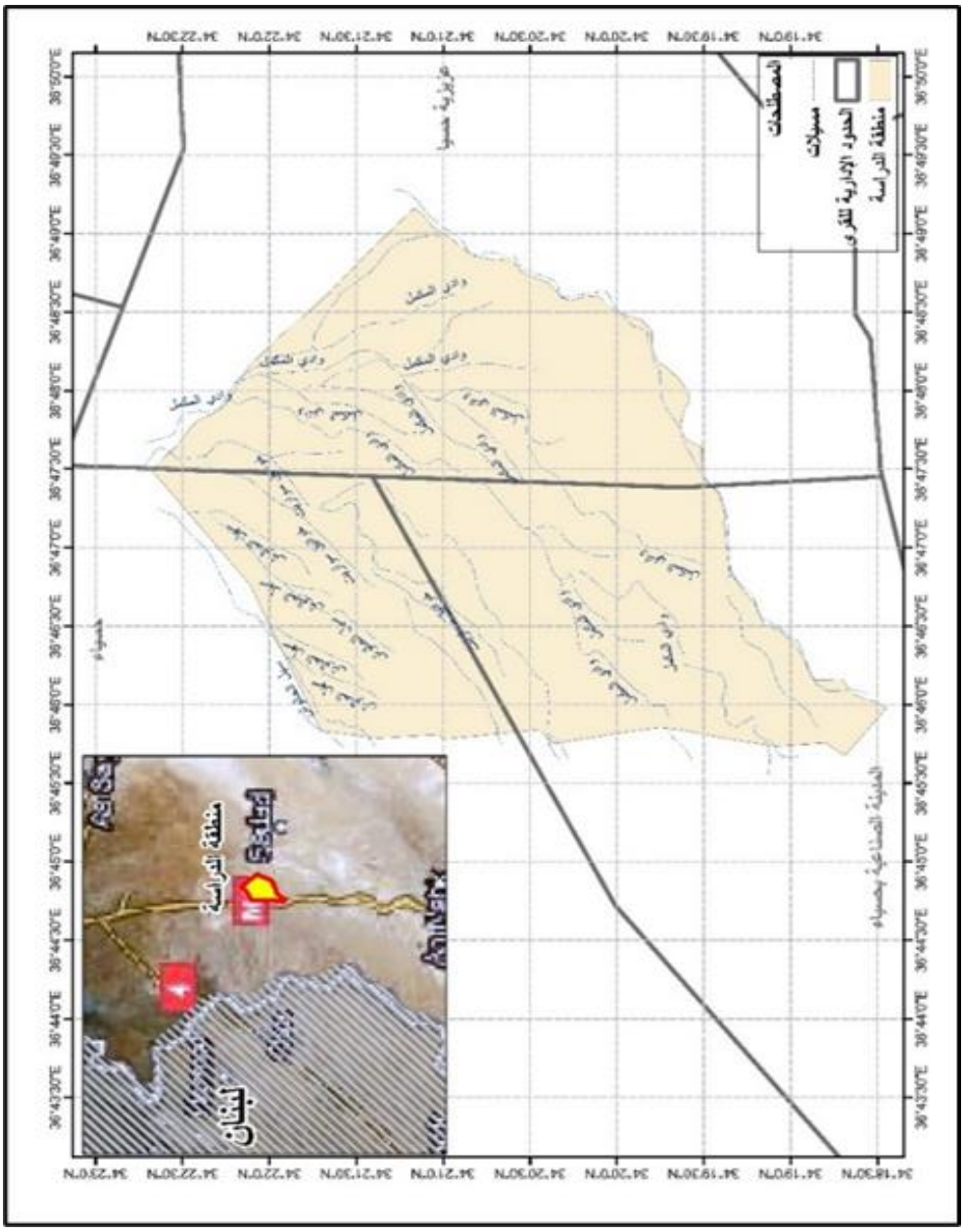
يهدف البحث إلى تقييم الدقة الرأسية لنموذجي ارتفاع رقميين شائعي الاستخدام واثبتا كفاءتهما في سورية، وهما SRTM30m و AW3D30m بالمقارنة مع نموذج ارتفاعات رقمي مبني بالمسح التصويري باستخدام الطائرات المسيرة في منطقة حسياء الصناعية، وكذلك تقييم فاعليتها في التحليلات الهيدرولوجية من حيث مواقع المسيلات وكثافتها لثلاثة نماذج ارتفاع رقمية هي SRTM30m و AW3D30m و النموذج الناتج عن مسح الطائرة المسيرة بالمقارنة مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية.

3 أهمية البحث:

أصبحت النماذج الرقمية المتاحة مجاناً بدقة 30م من مصادر متعددة أداة هامة لدى الباحثين في مختلف المجالات الهندسية، غير أن هذه النماذج تختلف عن بعضها بحسب القمر الصنعي والمستشعرات المستخدمة والخوارزميات التي تم الاستناد عليها لتحليل البيانات واستنتاج نماذج الارتفاع الرقمية منها، لذا كان لابد من تقييم هذه النماذج في مناطق مختلفة لتحديد النماذج الأفضل بحسب الغاية من استخدامها سواء كان لاستنتاج الارتفاعات عن سطح البحر أو إجراء التحليلات الهيدرولوجية، وقد يكون هناك نموذج أفضل من الآخر لمنطقة معينة وتختلف الأفضلية باختلاف ظروف المنطقة الطبوغرافية والغطاء الأرضي بشكل أساسي.

4 منطقة الدراسة:

حيث أن المدينة الصناعية بحسياء لها أهميتها الاقتصادية، خصوصاً بعد عودة النشاط والتنمية إليها، ونظرا لتوفر مسوحات باستخدام الطائرات المسيرة بدقة حقيقية 4.6 سم لهذه المنطقة، فقد برزت أهمية تحديد تضاريس الأرض بدقة، وكذلك تقييم الوضع الهيدرولوجي والأحواض الصبابة لما له من دور في تحديد مناطق الجريان السطحي وقابلية الفيضان، لذلك كان من المهم تحديد



الشكل /1/: منطقة الدراسة

النماذج الرقمية الأنسب للاستخدام في هذه المنطقة من حيث دقتها الرأسية ودقة تحليلاتها الهيدرولوجية.

تقع منطقة الدراسة وسط الجمهورية العربية السورية. تبلغ مساحة المنطقة 27 كم2 و تتراوح ارتفاعاتها بين 840 م شمالاً و 1010 م عن سطح البحر. تضاريس المنطقة سهلية في معظمها حيث تبدأ شمالا بسهل الحالوش وتتعقد التضاريس باتجاه الجنوب و الجنوب الشرقي حيث تظهر مجموعة من الضهور أهمها ضهر شميس الحيات وضهر وادي المكمل ويحدها غرباً الطريق الدولي الواصل بين حمص و دمشق ويحدها من الشمال الغربي الطريق الواصل بين مدينة صدد ومدينة حسياء.

5 منهجية البحث و مواده:

5.1 البيانات المستخدمة في البحث:

تم استخدام ثلاثة نماذج ارتفاع رقمية للمقارنة هي:

5.1.1 نموذج الارتفاع الرقمي AW3D30m

نموذج AW3D هو اختصار ل ALOS World 3D 30 m mesh ،أتيح في العام 2016 من قبل وكالة استكشاف الفضاء اليابانية JAXA ، بدقة 30 متر للخلية الواحدة ،تم بناؤه من خلال المطابقة البصرية التصويرية التي تم الحصول عليها من الطيف الأحادي للمستشعر المحمول على القمر ALOS، وحددت دقته الشاقولية ب 2.08 متر كما تجدر الإشارة إلى أنها متوفرة بنظام الإسقاط الجغرافي العالمي WGS1984.[8]

5.1.2 نموذج الارتفاع الرقمي SRTM30m

نموذج SRTM هو اختصار لـــ Shuttle Radar Topography Mission ، أتيح هذا النموذج عام 2000 من قبل وكالة ناســـا الأمريكية، بدقة 30m للخلية الواحدة، يعتمد نظام الرادار، قدرت دقته الرأســـية المطلقة بأقل من 16m، وأبرز عيوبه صـــعوبة تمثيل ارتفاعات المناطق الوعرة شـــديدة الانحدار نظراً لتراكم أخطاء الظلال و التراكب و التقارب التي تســـبب فجوات في هذا النموذج. و هو متوفر بنظام الإسقاط الجغرافي العالمي WGS1984. [9]

5.1.3 نموذج الارتفاع الرقمي من المسح التصويري باستخدام الطائرات المسيرة:

يشكل نموذج الارتفاعات الرقمي إحدى مخرجات عملية معالجة الصور المستحوذة للمنطقة المدروسة باستخدام طائرة دون طيار .Phantom 4 Pro مزودة بآلة تصوير رقمية مدمجة دقة تمييزها 20 MP. بلغ عدد الصور الملتقطة لمنطقة الدراسة 47231 صورة رقمية تمت معالجتها باعتماد إحدى برمجيات الرؤية الحاسوبية Agisoft Metashape. بلغت دقته 4.6 سم، وهو يعتمد سطح البحر مرجعاً للارتفاعات و الإهليلج السوري Clarke 1880.

5.1.4 الخارطة الطبوغرافية 1:50000

استخدمت في هذا البحث المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية ذات المقياس 1:50000 كبيانات مرجعية لمقارنة المسيلات المستنتجة من النماذج الارتفاعية الرقمية. أنجزت الخارطة الطبوغرافية 1:50000 من خلال العمل الحقلي والتصوير الجوي و مصدرها المؤسسة العامة للمساحة العسكرية. تتبع الخارطة المستخدمة نظام تربيع ميركاتور المعترض.

5.2 البرامج والأدوات المستخدمة في البحث:

استخدمت في هذا البحث البرامج والأدوات التالية:

1. برنامج Arc GIS10.8 (Geographic Information System).
2. الأداة HECgeoHMS 10.8 هو عبارة عن ملحق ل Arc GIS10.8 يتضمن مجموعة من الأدوات التي تساعد في إجراء التحليلات الهيدرولوجية [10].
3. أداة Map Downloader Google Earth Pro: تستخدم لتنزيل صور Google Earth .

5.3 مؤشرات التحليل الإحصائي:

تم استخدام المؤشرات الإحصائية التالية:

- القيمة العظمى Maximum value.
- القيمة الدنيا Minimum value.
- المتوسط الحسابي Mean value.
- الخطأ المتوسط التربيعي Root Mean Square Error (RMSE) وهو طريقة معتمدة من قبل USGS لتقييم دقة النماذج الارتفاعية.
- الانحراف المتوسط Mean Bias Deviation MBD.

- الخطأ النسبي MBD%.

وذلك باستخدام المعادلات التالية:[11]

$$M = N^{-1}\sum_{i=1}^{N} Y_i \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)^2}{N}} \quad (2)$$

$$MBD = \frac{\sum_{i=1}^{N}(y_i - x_i)}{N} \quad (3)$$

$$RMSE\% = 100 \times \frac{RMSE}{\overline{x_i}} \quad (4)$$

$$MBD\% = 100 \times \frac{MBD}{\overline{x_i}} \quad (5)$$

Yi: القيم المستقرأة من النماذج الارتفاعية.

Xi: القيم المستقرأة من النموذج المرجعي.

N: عدد النقاط المستخدمة في المقارنة.

$\overline{x_i}$: الفرق الأعظمي بين القيم المقاسة $\overline{x_i} = (xi)\max - (xi)min$

- معامل التوافق المكاني Kappa Index of Agreement (KIA)

يستخدم معامل التوافق Kappa لاختبار مدى التوافق أو عدم التوافق بين شريحتين نقطيتين (Raster)، وتقع قيمه في المجال [0 –1] والقيمة الأعلى تدل على توافق أكبر [12]، وتم استخدامه في هذا البحث لحساب مدى التوافق بين المسيلات المائية المستنتجة من النماذج الارتفاعية المختلفة والمسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية (المرجعية).

يستنتج معامل Kappa من مصفوفة الارتباك:

$$\begin{bmatrix} a_{01} & a_{00} \\ a_{11} & a_{10} \end{bmatrix}$$

حيث:

a_{00}: عدد النقاط المتوافقة التي لا تمثل مسيلات مائية في كلا النموذجين المقارنين.

a_{11}: عدد النقاط المتوافقة التي تمثل مسيلات مائية في كلا النموذجين اللذين تتم مقارنتهما

a_{01}:عدد النقاط غير المتوافقة التي تمثل مسيلات في النموذج المرجعي و لا تمثل مسيلاً مائيا في النموذج المقارن.

a_{10}: عدد النقاط غير المتوافقة التي لا تمثل مسيلا ت في النموذج المرجعي و تمثل مسيلات في النموذج المقارن.

يحسب معامل كابا بتطبيق المعادلة:

$$KIA = \frac{(OA - AC)}{(1 - AC)} \quad (6)$$

حيث:

OA: مدى التوافق (Observed Agreement).

AC: التوافق بالصدفة (Agreement by Chance).

$OA = \frac{\sum a_{11} + \sum a_{00}}{\sum a}$ حيث: (7)

$\sum a$: عدد النقاط التي تغطي منطقة الدراسة.

$$AC = \frac{((a_{00} + a_{10}) \times (a_{00} + a_{01})) + ((a_{01} + a_{11}) \times (a_{10} + a_{11}))}{a \times a} \quad (8)$$

كما يمكن حساب كل من الدقة (Accuracy) والموثوقية (Reliability) من مصفوفة الارتباك، حيث تعطيان بالمعادلتين التاليتين:

$$Accuracy = \frac{a_{10}}{a_{10} + a_{11}} \quad (9)$$

$$Reliability = \frac{a_{01}}{a_{01} + a_{11}} \quad (10)$$

تم استخدام الطرق الإحصائية أعلاه من اجل مقارنة المواصفات التالية:

- الدقة الرأسية.
- التوافق المكاني للمسيلات المائية.
- كثافة المسيلات المائية.

5.4 منهجية البحث:

5.4.1 توحيد نظم الإرجاع للنماذج المدروسة:

قبل إجراء المقارنة بين نماذج الارتفاعات الرقمية، تم تحويل نظم إحداثياتها إلى نظام إسقاط مركاتور المستعرض العالمي WGS_1984_UTM_Zone_37N المناسب لمنطقة الدراسة، و ذلك باستخدام وظائف نظم المعلومات الجغرافية GIS.

5.4.2 رقمنة المسيلات المائية من الخارطة الطبوغرافية:

تمت رقمنة المسيلات المائية من الخارطة الطبوغرافية مقياس 1:50000 وبعد ذلك تم تدقيقها واستكمالها من صور غوغل ايرث عالية الدقة. حيث تم تنزيل صور غوغل ايرث باستخدام الأداة Google Earth Pro Map Downloader.

5.4.3 بناء نموذج ارتفاع رقمي انطلاقا من المسح التصويري باستخدام الطائرة المسيرة:

تم بناء نموذج ارتفاع رقمي انطلاقاً من استخدام خطوط التسوية (Contour Lines) للأرض الطبيعية، المستنتجة من المسح التصويري باستخدام الطائرة المسيرة بتباعد قدره 1 متر ومن ثم تم رفع حجم الخلية إلى 30 متر من خلال معالجتها ضمن ArcMap GIS 8.1 للحصول على نموذج ارتفاع رقمي DEM قابل للمقارنة مع نماذج الارتفاع الرقمية الأخرى وبنفس حجم الخلية بنظام إسقاط WGS_1984_UTM_Zone_37N.

توليد شبكة المسيلات المائية:

تم استخدام الأداة HECgeoHMS 10.8 للتحليلات الهيدرولوجية لثلاثة نماذج ارتفاع رقمية هي SRTM30m و AW3D 30m و النموذج الرقمي المستنتج من مسح الطائرة المسيرة ، حيث تم استنتاج الأحواض الصبابة والمسيلات المائية وفقاً للخطوات التالية: ملء الفجوات(Fill Sinks) ، تحديد اتجاهات الجريانات (Flow Direction) ، تعيين التدفق التراكمي(Flow Accumulation)، تحديد المسيلات المائية (Stream Definition) عند عتبة 140 خلية على الأقل لتحديد مسيل مائي، تقطيع المسيلات (Stream Segmentation)، استنتاج شبكة الأحواض الصبابة (Catchment Grid Delineation)، رسم المضلعات التي تحدد الأحواض الصبابة (Catchment Polygon Processing)، توليد خطوط المسيلات المائية (Drainage Line Processing)، توليد الأحواض الصبابة (Adjoint Catchment Processing).

5.4.4 مقارنة الدقة الرأسية:

تمت مقارنة الدقة الراسية لنموذجي الارتفاع الرقميين SRTM 30m و AW3D 30m، باعتبار بيانات نموذج الارتفاع الرقمي الناتج عن مسح الطائرة المسيرة كبيانات مرجعية. تمت مقارنة القيم العظمى والقيم الصغرى ومتوسط الارتفاع وتم حساب الخطأ المطلق وحساب الخطأ المتوسط التربيعي في قيم الارتفاعات المستنتجة من النماذج الارتفاعية الرقمية بالمقارنة مع القيم المرجعية المشتقة من مسح الطائرة المسيرة باستخدام نظم المعلومات الجغرافية وفق الخطوات التالية:

- باستخدام Raster calculator يتم حساب شريحة الفروقات بين النماذج المدروسة والارتفاعات المرجعية والتي تحدد بالمعادلة:

$$sdiff = Square(\text{'obs'} - \text{'pred'}) \quad (11)$$

- استنتاج الشريحة النقطية التي تعبر عن قيم الخطأ المتوسط التربيعي بتطبيق المعادلة التالية من خلال نافذة Raster Calculator:

$$RSME = Square\ Root\ (Focal\ Statistics\ (sdiff, NbrRectangle\ (3,3, CELL)\ "MEAN", "")) \quad (12)$$

حيث:

Obs: القيم المرجعية (ارتفاعات النموذج الرقمي المستنتج من مسح الطائرة المسيرة).

Pred: القيم المقارنة (قيم نماذج الارتفاع الرقمية).

5.4.5 مقارنة التوافق المكاني للمسيلات المائية:

تمت مقارنة التوافق المكاني بين المسيلات المستنتجة من النماذج الارتفاعية AW3D30m و SRTM 30m والنموذج الارتفاعي المستنتج من المسح التصويري باستخدام الدرون مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية بمقياس 1:50000، حيث تم حساب Kappa ضمن بيئة نظم المعلومات الجغرافية من خلال اتباع الخطوات التالية:

- توليد عدد من النقاط العشوائية من خلال وظيفة:

Create Accuracy Assessment Points

- توليد مصفوفة الارتياب(Compute Confusion Matrix).

تُعد مصفوفة الارتياب أداة أساسية لتقييم دقة النماذج الهيدرولوجية. تمثل عناصر المصفوفة حالات التوقع الصحيح والخاطئ للنموذج. تساعد هذه الأداة في تحليل أداء النماذج من خلال تحديد

الأخطاء، سواء كانت إنذارات كاذبة أو حالات فائتة. كما تُستخدم لحساب مؤشرات الدقة (Accuracy) و الموثوقية (Reliability).

5.4.6 مقارنة كثافة المسيلات المائية:

وهي واحدة من أهم الخواص المورفومترية التي تعرف بمعدل طول المسيلات المائية في وحدة المساحة ويمكن الحصول عليها من خلال معادلة هورتون [13]:

$$D_a = \frac{\sum L}{A} \qquad (13)$$

حيث:

D : كثافة أطوال المسيلات المائية km/km^2 ، Σ L: مجموع أطوال المسيلات المائية km ، A: مساحة الحوض km^2.

6 المناقشة و التحليل:

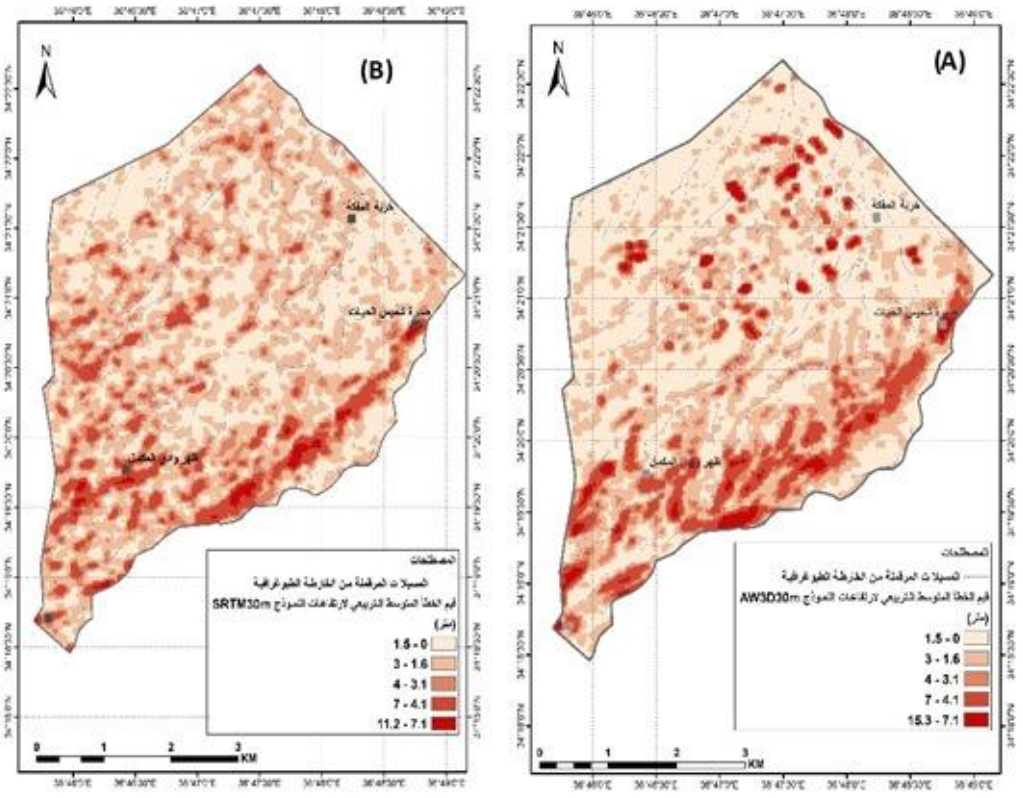
6.1 تقييم الدقة الرأسية:

يبين الجدول رقم /1/ أن الخطأ المطلق في متوسط الارتفاعات كان أقل ما يمكن في نموذج AW3D ومقداره 0.21 م أما في نموذج SRTM فقد بلغ 1.24 متر كذلك تفوق نموذج AW3D في الارتفاعات الدنيا للمنطقة بأقل خطأ مطلق ويعزى ذلك إلى أن نموذجSRTM يعتمد على الرادار، حيث أنه من المعروف أن قراءات الرادار للارتفاعات في المناطق الجرداء تكون أخفض من الارتفاعات الحقيقية بسبب ضعف موجة الرادار المرتدة عن مثل هذه المناطق أما في مناطق الارتفاعات العظمى فيلاحظ أن اقل خطأ مطلق كان لنموذج SRTM بمقدار 3.03 م. بمقارنة الخطأ المتوسط التربيعي للارتفاعات الذي تم حسابه لكل من هذه المناطق من النماذج الارتفاعية المدروسة بالمقارنة مع ارتفاعات المسح بالطائرة المسيرة تبين أن قيم الخطأ المتوسط التربيعي كانت متقاربة بين النموذجين حيث كان أقل خطأ لنموذج AW3D بمقدار 2.14 م يليه نموذج SRTM بمقدار 2.20 م.

يبين الشكل (2) التوزع المكاني لقيم الخطأ المتوسط التربيعي في قيم ارتفاعات كلا النموذجين الرقميين AW3D30m وSRTM30m بالمقارنة مع قيم الارتفاع المرجعية المشتقة من مسح الطائرة المسيرة.

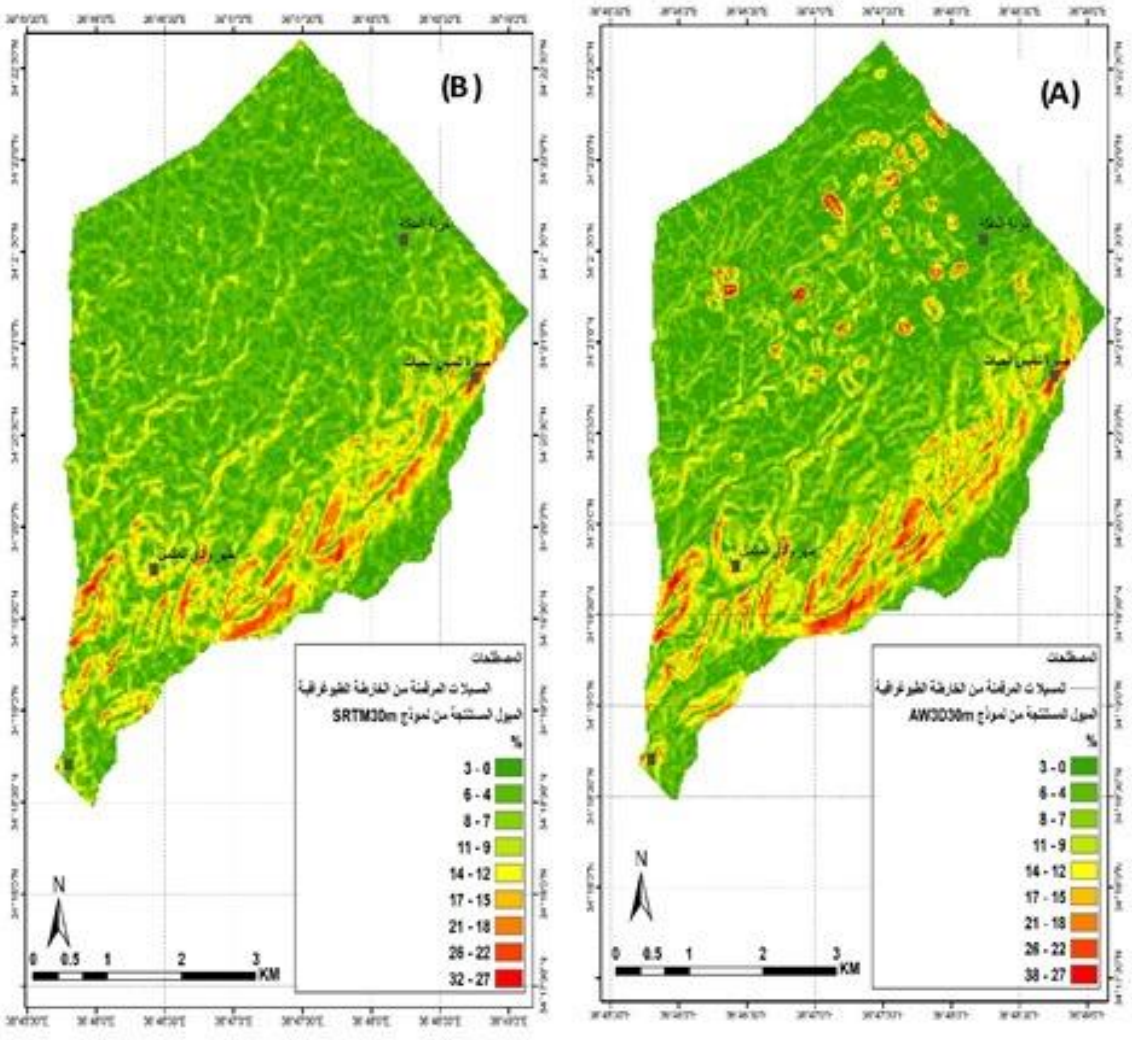
جدول /1/ قيم الخطأ المطلق و الخطأ المتوسط التربيعي للارتفاعات المحسوبة من النماذج الارتفاعية SRTM و AW3D بالمقارنة مع نموذج الدرون الارتفاعي.

النموذج الارتفاعي (DEM)	متوسط الارتفاع (m)		القيم الدنيا للارتفاعات (m)		القيم العظمى للارتفاعات (m)		RMSE) (m)
	الارتفاع	الخطأ المطلق	الارتفاع	الخطأ المطلق	القيمة العظمى	الخطأ المطلق	
Drone DEM	910.07	-	831.77	-	1012.97	-	-
AW3D30	910.23	0.21	831.00	0.77	1023.00	10.03	2.14
SRTM30m	908.77	1.24	825.00	6.77	1016.00	3.03	2.20



الشكل /2/: خريطة التوزع المكاني للخطأ المتوسط التربيعي في قيم الارتفاعات المستنتجة من النماذج الارتفاعية الرقمية بالمقارنة مع ارتفاعات مسح الطائرات المسيرة. A: النموذج AW3D30m، B: النموذج SRTM30m.

يوضح الشكل (3) قيم الميول، وبالمقارنة البصرية مع الشكل (2) يتبين أن هناك علاقة طردية بين قيم الخطأ المتوسط التربيعي وقيم الميول حيث تتركز أكبر أخطاء الارتفاعات في مناطق الميول التي تزيد عن 20% والمتركزة جنوب غرب منطقة الدراسة.

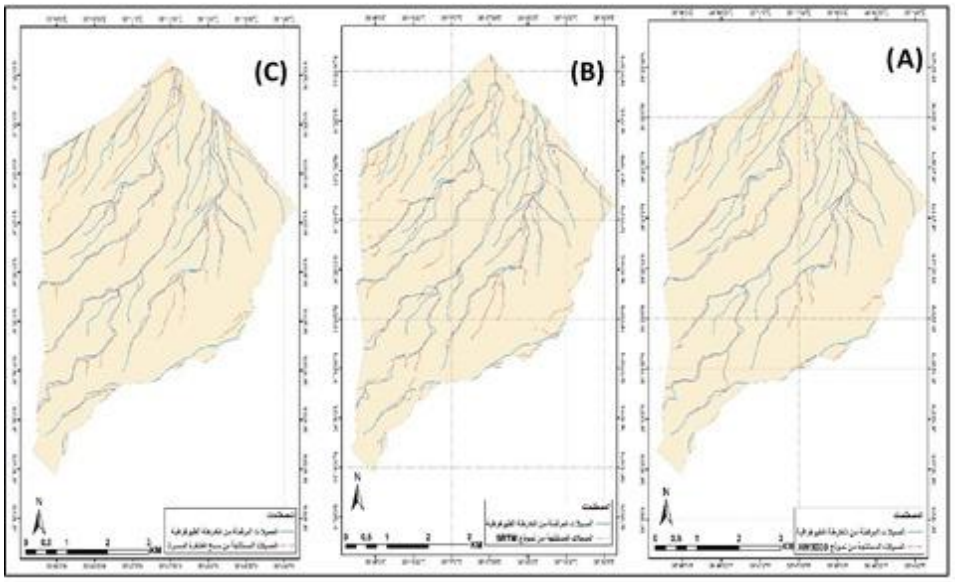


الشكل /3/: خريطة الميل المستنتجة من النماذج الارتفاعية الرقمية. A: النموذج AW3D30m، B: النموذج SRTM30m.

6.2 مقارنة خصائص شبكة المسيلات المائية:

6.2.1 مقارنة التوافق المكاني:

تبين المقارنة البصـــرية الأولية بين المســـيلات المســـتنتجة من النماذج الارتفاعية المدروســـة والمسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية، أن المسيلات المستنتجة من مسح الطائرة المسيرة هي الأكثر توافقاً وتبين الأشـكال (4-A, 4-B, 4-C) شـبكات المسـيلات المائية المسـتنتجة من النماذج الارتفاعية الرقمية بالمقارنة مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية.



الشكل /4/: خريطة التوافق المكاني بين المسيلات المرجعية المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية و كل من: A: المسيلات المستنتجة من النموذج AW3D30m، B: المسيلات المستنتجة من النموذج SRTM30m ، C: المسيلات المستنتجة من نموذج الطائرة المسيرة.

بتطبيق المعادلات (6 ، 7 ، 8، 9، 10) تم حســـاب معامل التوافق المكاني kappa، حيث توضـح الجداول (2,3,4,5) قيم معامل التوافق المكاني Kappa بين المسـيلات المسـتنتجة من النماذج الارتفاعية الثلاثة والمسـيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية وتبين أن التوافق المكاني عموما ضعيف و لم يتجاوز 0.2 في المسيلات المستنتجة من المسح باستخدام الطائرات المسيرة (الدرون) والتي كانت الأكثر توافقاً تليها المســـيلات المســـتنتجة من النموذج SRTM .ويعزى

التوافق المكاني الضـــعيف إلى أن تحديد المســـيلات المائية من خلال نماذج الارتفاع الرقمية يحتمل الكثير من الأخطاء وبخاصة في المناطق السهلية كمنطقة الدراسة حيث لا يتجاوز عرض المسيل المائي 30 متر أي ما يعادل خلية واحدة من خلايا نموذج الارتفاع الرقمي.

جدول /2/ مصفوفة الارتباك الخاصة بالمسيلات المستنتجة من نموذج AW3D30m بالمقارنة مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية في منطقة حسياء.

المسيلات المستنتجة من النموذج AW3D30m		المسيلات المرجعية		
		لا مسيلات	مسيلات	الموثوقية
لا مسيلات		944	56	94%
مسيلات		784	216	26%
الدقة		55%	79%	KIA=0.16

جدول /3/ مصفوفة الارتباك الخاصة بالمسيلات المستنتجة من نموذج SRTM 30m بالمقارنة مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية في منطقة حسياء.

المسيلات المستنتجة من النموذج SRTM 30m		المسيلات المرجعية		
		لا مسيلات	مسيلات	الموثوقية
لا مسيلات		921	79	92%
مسيلات		747	253	25%
الدقة		55%	76%	KIA=0.17

جدول /4/ مصفوفة الارتباك الخاصة بالمسيلات المستنتجة من مسح الدرون بالمقارنة مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية في منطقة حسياء.

		المسيلات المرجعية		
		لا مسيلات	مسيلات	الموثوقية
المسيلات المستنتجة من مسح الطائرة المسيرة	لا مسيلات	943	57	94%
	مسيلات	740	260	26%
	الدقة	56%	82%	KIA=0.20

جدول /5/ ملخص قيم معامل التوافق المكاني للمسيلات المائية المستنتجة من النماذج الارتفاعية المدروسة.

النموذج الارتفاعي المدروس	معامل التوافق المكاني (KIA)
SRTM 30m	0.17
AW3D30m	0.16
Drone DEM	0.20

6.2.2 مقارنة كثافة شبكة المسيلات المائية:

يبين الجدول رقم (6) أن المسيلات المستنتجة من النماذج الارتفاعية الثلاثة كانت أقل كثافة من المسيلات المرقمنة ويمكن أن يعزى ذلك إلى التطور العمراني والتنمية في المنطقة والتي تجاوزت حرم العديد من المسيلات في المنطقة وكذلك طبيعة المنطقة السهلية التي تجعل من الصعب تمييز المسيلات المائية من النماذج الارتفاعية، بينما تزداد دقة المسيلات المحددة بالعمل الحقلي في الخارطة الطبوغرافية في المناطق السهلية التي يمكن الوصول إليها بسهولة. وتراوح الخطأ النسبي لشبكة المسيلات المستنتجة من 2% في نماذج مسح الطائرات المسيرة إلى 22% في

النموذج AW3D حيث كانت المسيلات المستنتجة من نموذج مسح الطائرة المسيرة هي الأكثر دقة وهو أمر منطقي كونها ذات دقة مكانية عالية جدا بالنسبة للنموذجين الرقميين المدروسين.

جدول /6/ قيم الخطأ النسبي في كثافة المسيلات المائية المستنتجة من النماذج الارتفاعية المدروسة بالمقارنة مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية.

	مساحة منطقة الدراسة ($كم^2$)	مجموع أطوال المسيلات(كم)	كثافة شبكة المسيلات(كم/$كم^2$)	الخطأ النسبي%
المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية	23.36	73.71	3.15	
المسيلات المستنتجة من AW3D30m		57.67	2.47	−22
المسيلات المستنتجة من SRTM30m		71.05	3.04	−4
المسيلات المستنتجة من مسح الطائرة المسيرة		71.94	3.08	−2

7 النتائج والتوصيات:

بينت نتائج الدراسة والتحليل الإحصائي للنماذج الارتفاع الرقمية المدروسة ما يلي:

1- اعتماد النموذج AW3D 30m كأفضل نموذج يمثل ارتفاعات الأرض في المناطق السهلية وذات الميول الخفيفة و الغطاء النباتي الخفيف.

2- اعتماد النموذج SRTM30mهي الأكثر توافقاً مع ارتفاعات مسح الطائرة المسيرة في المناطق الجبلية شديدة الميول.

3- تزداد قيمة أخطاء ارتفاعات النماذج الرقمية في المناطق شديدة الميول ويوصى في مثل هذه الحالات بتحسين نماذج الارتفاع الرقمية من خلال دمج بياناتها الارتفاعية مع بيانات ارتفاعات مقاسة للمنطقة سواء كانت رفع طبوغرافي أو خرائط طبوغرافية مرقمنة ومن ثم إعادة بناء نموذج ارتفاعي جديد معدل بقيم مقاسة على الأرض.

4- المسيلات المائية المستنتجة من نماذج الارتفاع الرقمية عموما تكون ذات توافق مكاني ضعيف ، ولذلك يوصى دائما بإعادة تدقيق مواقع المسيلات المائية المستنتجة من النماذج الارتفاعية الرقمية باختلاف أنواعها و خاصة في المناطق السهلية التي لا تنطوي على تباين كاف في الارتفاعات و بالتالي يصبح تمييز مسارات المسيلات المائية مهمة صعبة من خلال نماذج الارتفاع ذات الدقة المكانية 30 متر، ويتم تدقيقها إما مع المسيلات المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية أو الصور الفضائية العالية الدقة المتوفرة على منصات عديدة مثل غوغل ايرث وغيرها .

5- إن كثافة المسيلات المستنتجة من مسح الطائرة المسيرة ومن نموذج SRTM30m كانت ذات دقة جيدة بينما كانت الأخطاء كبيرة في نموذج AW3D30m حيث كانت كثافة المسيلات المستنتجة منه هي الأقل . ولابد من الإشارة إلى أن اختيار عتبة استنتاج المسيلات المائية في أداة HecgeoHMS تلعب الدور الأساسي في كثافة شبكة المسيلات المستنتجة، وإن تغيير هذه العتبة يمكن ان يغير النتائج بشكل كلي ، لذلك يوصى بتجربة أكثر من عتبة لاستنتاج المسيلات من نماذج الارتفاع الرقمية واختيار العتبة التي تعطي مسيلات بكثافة أقرب إلى المسيلات المرجعية المرقمنة من الخارطة الطبوغرافية او من الصور الفضائية عالية الدقة حتى تكون الأخطاء بالحد الأدنى.

8 المراجع:

1. Kennedy, M., 2006. Introducing geographic information systems with ArcGIS. John Wiley & Sons.
2. Jothimani M, Dawit Z, Mulualem W (2020) Flood Susceptibility model-ing of Megech River Catchment, Lake Tana Basin, North WesternEthiopia, using morphometric analysis. Earth Syst Environ. https://doi.org/10.1007/s41748-020-00173-7
3. حازم عبدو، و جولييت سلوم، 2015. فعالية استخدام نموذج الارتفاع الرقمي في التحليل المورفومتري للشبكة النهرية في حوض المنطار Tishreen University Journal-Arts and Humanities Sciences Series, 37(4).
4. الأشقر .هيام، 2018 . تقييم النماذج الارتفاعية الرقمية بمقاييس مختلفة، مع الخرائط الطبوغرافية، في مجال الدراسات المائية في سورية. رسالة ماجستير. جامعة دمشق.قسم الطبوغرافيا.
5. Brandimarte et al. "Testing UAV-derived topography for hydraulic modelling in a tropical environment" , Natural Hazards, 2020.
6. "Drone-Based Imagery in Hydrological Science", ArcGIS Story Maps, 2023
7. Allotey et al., "UAV-borne, LiDAR-based elevation modelling: a method for improving urban flood assessments", Natural Hazards, 2022
8. Tadono, T., Takaku, J., Tsutsui, K., Oda, F. and Nagai, H., 2015, July. Status of "ALOS World 3D (AW3D)" global DSM generation. In 2015 IEEE international geoscience and remote sensing symposium (IGARSS) (pp. 3822-3825). IEEE.
9. Mission, S.R.T., SRTM. sf). Spatial Information. https://srtm. csi. cgiar. org/srtmdata.
10. CEIWR-HEC; HEC-HMS. Hydrological Modeling System: Application Guide; US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center: Davis, CA, USA, 2017; pp. 3.1–3.19.
11. Willmott Cort J. "Some Comments on the Evaluation of Model Performance", Bulletin of the American Meteorological Society, 1982.
12. Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. Remote Sensing of Environment, 37(1), 35–46.

13. Horton, R. E., (1945)"Erosional development of streams and their drainage basins:Hydrological approach to quantitative morphology", Geological Society of America Bulletin. 5