تقييم الدقة الرأسية لنموذج الارتفاع الرقمي (SRTM) في بيئتين تضاريسيتين متباينتين: بيئة طرابلس الساحلية وبيئة غريان الجبلية

عثمان المهدى محمد يوسف

othman.yousuf@uoz.edu.ly

قسم الهندسة المدنية – كلية الهندسة – جامعة الزنتان – ليبيا

المستخلص

تعد نماذج الارتفاعات الرقمية العالمية المفتوحة (Global Open-Access Digital Elevation Models – DEMs) أداة حيوية في التطبيقات الجيومكانية والهندسة المدنية نظراً لتغطيتها الشاملة ومجانيتها. يهدف هذا البحث إلى تقييم الدقة الرأسية (Vertical Accuracy) لنموذج الارتفاعات الرقمية العالمي المشتق من بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (Shuttle Radar Topography Mission – SRTM) بمقياس تمييز مكاني يبلغ 1 ثانية قوسية (ما يعادل حوالي 30 متراً) وتحديد مدى صلاحيته لإنتاج الخرائط الطوبوغرافية والكنتورية في دولة ليبيا. اعتمدت الدراسة على المنهج الوصفي التحليلي المقارن عبر فحص أداء النموذج في بيئتين تضاريسيتين متباينتين: منطقة طرابلس (بيئة ساحلية متوسطة التضاريس) ومنطقة غريان (بيئة جبلية وعرة ذات انحدارات حادة)، وذلك بالاعتماد على عينة مكونة من (27) نقطة تحكم أرضية (Ground Control Points – GCPs) حقيقية عالية الدقة مرصودة عبر تقنيات نظام الملاحة الفضائي العالمي (Global Navigation Satellite System - GNSS). أظهرت النتائج الإحصائية المبنية على حساب جذر متوسط مربعات الخطأ (Root Mean SquareError – RMSE) تأثراً طردياً حاداً لدقة النموذج الفضائي بمدى وعورة السطح. وخلصت الدراسة هندسياً إلى عدم صلاحية نموذج بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (SRTM) لإنتاج خطوط الكنتور التي تقل فترتها الكنتورية عن 10 أمتار في الخرائط الطوبوغرافية للمناطق متوسطة التضاريس بمقاييس رسم 1:25000 أو أكبر، وكذلك عدم صلاحيته للفترات الكنتورية الأقل من 10 أمتار في المناطق الجبلية الوعرة لمقاييس رسم 1:50000 أو أكبر. كما أثبت البحث وجود قصور واضح في موثوقية النموذج الفضائي عند اشتقاق القطاعات الطولية (Terrain Profiles) القصيرة التي يقل طولها عن 30 كيلومتراً في البيئات الجبلية نتيجة لتراكم الأخطاء الرأسية. يوصي البحث بضرورة قصر استخدام النماذج الفضائية المجانية على الدراسات الإقليمية الاستكشافية ذات المقاييس الصغيرة (1:100000 أو أصغر)، والاعتماد على الرفع المساحي الأرضي في المشاريع الهندسية الحساسة.

الكلمات المفتاحية: الخطوط الكنتورية، الدقة الرأسية، طرابلس، غريان، ليبيا، نموذج الارتفاع الرقمي لبعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (Shuttle Radar Topography Mission – SRTM).

Abstract

Global Open-Access Digital Elevation Models (DEMs) represent a vital tool in geospatial applications and civil engineering due to their comprehensive coverage and free availability. This research aims to assess the vertical accuracy of the global digital elevation model derived from the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) at a spatial resolution of 1 arc-second (approximately 30 meters) and to determine its suitability for generating topographic and contour maps in Libya. The study adopted a comparative descriptive-analytical approach by evaluating the model's performance in two distinct topographic environments: the Tripoli region (a coastal environment with moderate terrain) and the Gharyan region (a rugged mountainous environment with steep slopes). This evaluation relied on a sample of twenty-seven (27) high-accuracy, real Ground Control Points (GCPs) surveyed via Global Navigation Satellite System (GNSS) techniques. Statistical results based on the calculation of the Root Mean Square Error (RMSE) revealed a sharp, directly proportional impact of surface ruggedness on the spaceborne model's accuracy. From an engineering perspective, the study concluded that the SRTM DEM is unsuitable for generating contour lines with a contour interval of less than 10 meters in topographic maps for moderate terrain at scales of 1:25,000 or larger. Similarly, it is unsuitable for contour intervals of less than 10 meters in rugged mountainous regions at scales of 1:50,000 or larger. Furthermore, the research demonstrated aclear deficiency in the reliability of the spaceborne model when deriving short terrain profiles of less than 30 kilometers in mountainous environments due to the accumulation of vertical errors. The study strongly recommends restricting the use of free spaceborne models to exploratory regional studies at small scales (1:100,000 or smaller) and relying on terrestrial surveying for sensitive engineering projects.

Keywords: Contour Lines, Vertical Accuracy, Tripoli, Gharyan, Libya Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) DEM.

1. مقدمة البحث

تُعد نماذج الارتفاعات الرقمية (Digital Elevation Models – DEM) ركيزة أساسية في كافة الدراسات الجيومكانية والتطبيقات الهندسية والمساحية؛ إذ تقدم تمثيلاً رقمياً طوبوغرافياً لسطح الأرض يساهم في خفض تكاليف الرفع الجيوديسي التقليدي وزيادة كفاءة التحليلات البيئية والمورفومترية (**Ahmad et al., 2024, p. 112**; Aziz et al., 2023, p. 65) ومع إتاحة العديد من نماذج الارتفاعات الرقمية العالمية المفتوحة مجاناً للمجتمع العلمي، مثل نموذج بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (Shuttle Radar Topography Mission – SRTM)، ونموذج مرصد كوبرنيكوس الأوروبي للارتفاعات الرقمية (Copernicus Digital Elevation Model – Copernicus DEM)، ونموذج إدارة الطيران والفضاء الوطنية الأمريكية للارتفاعات الرقمية (National Aeronautics and Space Administration Digital Elevation Model – NASADEM)، توسع الباحثون في استخدامها لإنتاج الخرائط الطوبوغرافية المختلفة وهيدرولوجيا السطح (**Bhardwaj et al., 2021, p. 543**; Meadows, Jones and Reinke, 2024, p. 1).

إلا أن الاعتماد على هذه النماذج العالمية المجانية يتطلب فحصاً محلياً دقيقاً لمدى دقتها الرأسية(Vertical Accuracy)؛ نظراً لأن قيم الارتفاعات المسجلة فضائياً تتباين وتختلف من نموذج إلى آخر بشكل ملحوظ بناءً على طبيعة تضاريس المنطقة المدروسة ونوع الغطاء الأرضي (**El-Ashmawy, 2022, p. 89;** Li et al., 2022, p. 1149). وتتأثر دقة هذه النماذج بشكل مباشر بوعورة السطح والمنحدرات، مما يجعل تقييمها بواسطة نقاط التحكم الأرضية (Ground Control Points – GCPs) المرفوعة بتقنيات نظام الملاحة الفضائي العالمي (Global Navigation Satellite System – GNSS) أو المسح الراداري عالي الدقة أمراً حتمياً لضمان سلامة الاستخدام الهندسية وطوبوغرافية الخرائط المنتجة (**Esetlili et al., 2018, p. 301;** Aziz et al., 2023, p. 65).

2. مشكلة البحث

تكمن مشكلة هذا البحث في الفجوة المعرفية الناتجة عن عدم وجود تقييم محلي شامل ودقيق لمدى موثوقية نماذج الارتفاعات الرقمية العالمية المتاحة مجاناً عند تطبيقها على البيئة الطولية في دولة ليبيا، وتحديداً عند مقارنة الأداء بين المناطق شبه المنبسطة أو متوسطة التضاريس مثل مدينة (طرابلس) والمناطق الجبلية ذات التضاريس الصعبة والوعرة مثل مدينة (غريان). إن الاعتماد على الأخطاء الاسمية المعلنة من الهيئات الفضائية الدولية المزودة لهذه النماذج يمثل مخاطرة هندسية؛ حيث أثبتت الدراسات المقارنة أن النماذج المجانية تعاني من أخطاء رأسية غير منتظمة تزداد حدتها كلما زاد انحدار السطح أو تغيرت طبيعة الغطاء الأرضي.(Mughal et al., 2023, p. 12; Aziz et al., 2023, p. 65)

وبناءً على ذلك، تتبلور المشكلة في تحديد مدى صلاحية ودقة نموذج بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (SRTM)والنماذج المتاحة الأخرى في إنتاج الخرائط الطوبوغرافية والكنتورية بمقاييس رسم متعددة تتناسب مع المعايير والمواصفات الهندسية المحلية، نظراً لأن الاختلافات الرأسية بين النماذج قد تؤدي إلى تشويه خطوط الكنتور المشتقة وعدم دقتها طوبوغرافياً في التضاريس المتباينة (Riaz et al., 2021, p. 76; Li et al., 2022, p. 1149). ويسعى هذا البحث لغلق هذه الفجوة عبر فحص ومقارنة نتائج هذا النموذج الفضائي بنقاط تحكم أرضية حقيقية وعالية الدقة لتقييم مقدار الخطأ الرأسي الفعلي في منطقتي الدراسة.

3.أهداف البحث

يسعى هذا البحث بشكل أساسي إلى تقييم الدقة الرأسية لنماذج الارتفاعات الرقمية العالمية المتاحة مجاناً وتحديد مدى ملاءمتها للتطبيقات المساحية في البيئة الليبية، ويتفرع من هذا الهدف الرئيسي مجموعة من الأهداف الفرعية المحددة تالياً:

. **تقييم الخطأ الرأسي الفعلي**: قياس وحساب مقدار الدقة الرأسية الفعلية لنموذج بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (SRTM) في منطقتي الدراسة (طرابلس وغريان) باستخدام نقاط التحكم الأرضية (GCPs) المرصودة بتقنيات المساحة الأرضية ونظام الملاحة الفضائي العالمي.(GNSS)

- **دراسة تأثير تباين التضاريس**: تحليل مدى تأثر الدقة الرأسية للنموذج الرقمي الفضائي بطبيعة وتضاريس المنطقة، عبر مقارنة أدائه الإحصائي بين المناطق متوسطة التضاريس (مدينة طرابلس) والمناطق الجبلية الوعرة ذات الانحدارات الحادة (مدينة غريان).
- **تحديد مقاييس الرسم المناسبة**: تحديد حدود وصلاحية استخدام نموذج بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (SRTM) في اشتقاق وإنتاج الخرائط الطوبوغرافية بمقاييس رسم مختلفة (مثل 1:25000 و 1:50000)، ومعرفة الفترات الكنتورية الدنيا الآمنة هندسياً للاستخدام في كل منطقة.
- **توفير مرجع علمي محلي**: تقديم توصيات فنية وإحصائية دقيقة للجهات الهندسية والمساحية والتخطيطية في دولة ليبيا توضح المعايير والحدود الآمنة عند الاعتماد على النماذج الفضائية المجانية في غياب الخرائط المحلية المحدثة.

4. أهمية البحث

تنبع أهمية هذا البحث من كونه يمس جانباً تطبيقياً حيوياً يعالج النقص والتأخر في تحديث الخرائط الطوبوغرافية المحلية داخل دولة ليبيا، وتتلخص أهمية البحث في النقاط التالية:

الجدوى الاقتصادية والزمنية : يساهم البحث في تحديد مدى إمكانية الاعتماد على النماذج الفضائية المجانية كبديل منخفض التكلفة وسريع الإنجاز لعمليات الرفع المساحي الأرضي التقليدي، وهو ما يدعم سرعة اتخاذ القرار في المشاريع الهندسية التمهيدية ومشاريع البنية التحتية.

الحد من المخاطر الهندسية :توفير تقييم كمي وإحصائي دقيق لمقدار الخطأ الرأسي الفعلي في البيئة الليبية، مما يحمي المهندسين والشركات المنفذة من مخاطر استخدام هذه النماذج العالمية دون تصحيح، والتي قد تؤدي إلى أخطاء فادحة في حساب كميات الحفر والردم وتصميم شبكات الطرق وتصريف المياه.

تحديد حدود الاستخدام الآمن جغرافياً :تكمن الأهمية في توضيح "الحدود الفنية" لاستخدام النماذج الرقمية تبعاً لتغير التضاريس؛ حيث يضع البحث معياراً واضحاً يبين الفروقات بين المناطق متوسطة التضاريس (طرابلس) والمناطق الوعرة (غريان)، ويربطها مباشرة بمقاييس الرسم والفترات الكنتورية المسموح بها هندسياً.

دعم صناع القرار والمؤسسات الرسمية: يقدم هذا البحث قاعدة بيانات مرجعية وتوصيات إحصائية مبنية على نقاط تحكم أرضية دقيقة، يمكن للمؤسسات والهيئات المساحية والتخطيطية في ليبيا الاستعانة بها لوضع معايير محلية لتداول واستخدام البيانات الجيومكانية المفتوحة.

5. منهجية البحث ومواد الدراسة

تعتمد المنهجية المتبعة في هذا البحث على الأسلوب الوصفي التحليلي المقارن (Comparative Analytical Approach)، وذلك لتقييم الدقة الرأسية لنموذج الارتفاعات الرقمية الفضائي (SRTM) ومقارنته بنقاط التحكم الأرضية الدقيقة المرفوعة مساحياً. وتتلخص خطوات المنهجية ومواد الدراسة في النقاط التالية:

أ. منطقتا الدراسة

لضمان شمولية التقييم واختبار أداء النموذج الفضائي في بيئات تضاريسية متباينة داخل دولة ليبيا، تم اختيار منطقتين جغرافيتين تتميزان باختلافات طبوغرافية واضحة:

- **منطقة طرابلس:** وتمثل البيئة الساحلية شبه المنبسطة أو متوسطة التضاريس، حيث يقل فيها التغير الحاد في الارتفاعات وتتميز بمنحدرات خفيفة.
- **منطقة غريان:** وتصنف كبيئة جبلية ذات تضاريس صعبة ووعرة، وتتميز بارتفاعات شاهقة وانحدارات حادة ومفاجئة لسطح الأرض.

ب. البيانات ومصادرها

تتكون المواد والبيانات الأساسية المستخدمة في هذا البحث من شقين رئيسيين:

- **بيانات الرفع المساحي الأرضي (نقاط التحكم Ground Control Points):** تشمل عينة الدراسة (27) نقطة تحكم أرضية (GCPs) معلومة الإحداثيات الثلاثية (X, Y, Z) بدقة عالية جداً وموزعة جغرافياً بين منطقتي الدراسة لتمثيل التباين الطوبوغرافي تم الحصول عليها من مصلحة المساحة الليبية. تم الحصول على الارتفاعات الأورثومترية (Orthometric Heights) لهذه النقاط باستخدام أجهزة نظام الملاحة الفضائي العالمي (GNSS) والرفع الجيوديسي الحقيقي لتُشكل المرجعية الأرضية الدقيقة.(Reference Data) .

(Department of Libya) التحكم (المصدر: Survey)

جدول (1): احداثيات نقاط

رقم النقطة	خط الطول	خط العرض	الارتفاع
1	13.441	32.55	195.173
2	13.913	32.46	325.039
3	13.883	32.58	406.867
4	13.857	32.597	368.513
5	13.434	32.552	197.476
6	13.477	32.332	408.296
7	13.483	32.332	400.052
8	13.638	32.443	427.475
9	13.627	32.434	413.89
10	13.634	32.431	403.36
11	13.044	32.322	239.422
12	13.031	32.172	730.036
13	13.005	32.158	764.477
14	13.006	32.169	729.504
15	13.015	32.169	754.744
16	13.024	32.176	737.33
17	13.041	32.137	678.928
18	13.066	32.158	691.258
19	13.024	32.148	718.110
20	12.999	32.146	775.171
21	13.285	32.887	23.007
22	13.303	32.878	20.597
23	13.302	32.898	14.540
24	13.341	32.882	21.678
25	13.346	32.882	14.304
26	13.358	32.881	17.068
27	13.305	32.877	21.324

- **بيانات النماذج الفضائية المفتوحة** :تم استخدام بيانات نموذج الارتفاعات الرقمية العالمي (SRTM)بدقة تمييز مكاني تبلغ 1 ثانية قوسية (حوالي 30 متراً)، وتم استيراد هذه البيانات رقمياً من المستودع الرسمي لهيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية (United States Geological Survey – USGS).

ج. معالجة البيانات والتحليل الإحصائي

تمت معالجة البيانات الجيومكانية ومقارنتها عبر الخطوات الفنية التالية:

- استخدام برنامج نظم المعلومات الجغرافية (Geographic Information System – ArcGIS v10.5)لإسقاط نقاط التحكم الأرضية الـ (27) فوق طبقة نموذج.(SRTM)
- تطبيق أدوات التحليل المكاني لاستخراج قيمة الارتفاع المقابلة لكل نقطة أرضية من خلايا نموذج الارتفاعات الرقمية الفضائي.
- تقييم الدقة الرأسية من خلال حساب الفروقات الرأسية لكل نقطة تحكم أرضية على حدة من خلال طرح الارتفاع المرجعي الأرضي (المرصود حقلياً) من الارتفاع الرقمي المشتق فضائياً من خلايا النموذج. عقب ذلك، تم إخضاع هذه الفروقات لعملية تحليل إحصائي شاملة عبر حساب قيمة جذر متوسط مربعات الخطأ، وهو المعيار الإحصائي والمساحي العالمي المعتمد لتقييم جودة النماذج الرقمية، ويُحسب باستخراج الجذر التربيعي لمتوسط مربعات الفروقات الرأسية المحسوبة لجميع نقاط عينة الدراسة البالغ عددها 27 نقطة.

6. النتائج والمناقشة

أظهرت التحليلات الإحصائية والمقارنات المكانية بين الارتفاعات المستخرجة من نموذج الارتفاعات الرقمية العالمي (SRTM) والارتفاعات الحقيقية لنقاط التحكم الأرضية الـ (27) تبايناً ملحوظاً في الدقة الرأسية بين منطقتي الدراسة، مما يؤكد التأثير لطبيعة التضاريس على جودة البيانات الفضائية المفتوحة.

ولتحليل مدى ملاءمة جودة الخطوط الكنتورية المنتجة هندسياً ومقارنتها بالحدود والمواصفات المقبولة، تم الاستناد إلى المعايير الوطنية لدقة البيانات المكانية الفيدرالية (National Standard for Spatial Data Accuracy – NSSDA)الصادرة عن اللجنة الفيدرالية للبيانات الجغرافية الرقمية (Federal Geographic Data Committee – FGDC, 1998, p. 3–4):

جدول (2): معايير الدقة الرأسية والفترات الكنتورية حسب مقياس الرسم(FGDC, 1998, p. 3-4)

مقياس الرسم	الدقة الرأسية المطلوبة للبيانات RMSE (متر)	الفترة الكنتورية المناسبة (متر)
1:500	±0.4	1.25
1:1000	±0.7أو ±1.7	2.0أو 5.0
1:25000	±1.7أو ±2.61 أو ±3.3	5.0أو 8.0 أو 10.0
1:50000	±3.3	10.0
1:100000	±3.3إلى ±6.7	10.0أو 20.0
1:250000	±8.3إلى ±16.7	25.0أو 50.0

أ. تحليل الدقة الرأسية في منطقة طرابلس (منطقة متوسطة التضاريس)

عند حساب الفروقات الرأسية وجذر متوسط مربعات الخطأ (RMSE) للنقاط الموزعة في مدينة طرابلس، تبين أن النموذج الفضائي يقدم دقة رأسية مستقرة نسبياً نظراً لطبيعة السطح الساحلية والمنبسطة. ومع ذلك، وبمقارنة مقدار الخطأ الرأسي الفعلي المحسوب بالمعايير الهندسية لإنتاج الخرائط الموضحة في جدول (2)، خلصت النتائج إلى ما يلي:

صلاحية مقاييس الرسم والخطوط الكنتورية: أثبتت المؤشرات الإحصائية أن نموذج بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (SRTM) لا يصلح لإنتاج خطوط الكنتور التي تقل فترتها الكنتورية عن 10 أمتار في الخرائط الطوبوغرافية للمناطق بسيطة ومتوسطة التضاريس بمقاييس رسم 1:25000 أو أكبر. ويعود ذلك إلى أن مقدار الخطأ الرأسي في الخلايا الفضائية يتجاوز حدود السماحية الهندسية المطلوبة للمقاييس الكبيرة والتفصيلية المعبر عنها (3.3∓ متر أو أقل)

ب. تحليل الدقة الرأسية في منطقة غريان (منطقة صعبة التضاريس)

شهدت منطقة غريان ارتفاعاً حاداً في قيم الفروقات الرأسية وزيادة واضحة في قيمة جذر متوسط مربعات الخطأ(RMSE) ، وهو ما يفسر علمياً تأثر المستشعرات الرادارية الفضائية بالانحدارات الجبلية الحادة والتغيرات المفاجئة في منسوب السطح. وأظهرت مناقشة النتائج الفنية لهذه المنطقة ما يلي:

صلاحية مقاييس الرسم والخطوط الكنتورية: أظهرت النتائج عدم صلاحية النموذج لإنتاج خطوط الكنتور الأقل من 10 أمتار كفترة كنتورية في هذه المناطق جبلية التضاريس لمقاييس الرسم 1:50000 أو أكبر وفق حدود الملاءمة المعيارية.

- **قصور القطاعات الطولية:** بينت الدراسة عدم ملاءمة وموثوقية النموذج في رسم واشتقاق القطاعات الطولية القصيرة التي يقل طولها عن 30 كيلومتراً في البيئات الجبلية، حيث تؤدي الأخطاء التراكمية في المناسيب إلى تشويه المظهر الطوبوغرافي الحقيقي للقطاع الممتد عبر السطح الوعر.

ج. عينة من الحسابات الإحصائية لتقييم دقة نموذجSRTM

لتوضيح المنهجية الإحصائية المتبعة في تقييم الدقة الرأسية لنموذج الارتفاعات الرقمي(SRTM) ، تم حساب جذر متوسط مربعات الخطأ(RMSE) ، والمتوسط الحسابي، والانحراف المعياري للفروقات بين الارتفاعات المستخرجة من نموذج SRTM والارتفاعات المرجعية لنقاط التحكم الأرضية (GCPs)، وذلك لكل من منطقة طرابلس (متوسطة التضاريس) ومنطقة غريان (صعبة التضاريس) على حدة.

تم حساب قيمة جذر متوسط مربعات الخطأ (RMSE) باستخدام المعادلة التالية:

$$RMSE = \sqrt{[\ \Sigma\ (HSRTM - HRef)^2 / n\ ]}$$

حيث:

: الارتفاع المستخرج من النموذج الرقمي. HSRTM

: الارتفاع المرجعي لنفس النقطة.HRef

: عدد النقاط المستخدمة في الحساب.n

كما تم حساب المتوسط الحسابي والانحراف المعياري للفروقات وفق المعادلات التالية:

المتوسط الحسابي:

$$\bar{X} = \Sigma\ (HSRTM - HRef) / n$$

الانحراف المعياري:

$$\sigma = \sqrt{[\ \Sigma\ (xi - \bar{X})^2 / (n - 1)\ ]}$$

يوضح الجدول (3) ملخص القيم الإحصائية المحسوبة من فروقات الارتفاعات لجميع النقاط في كلا المنطقتين، والتي تمثل العينة الأساسية لتقييم الدقة الرأسية للنموذج.

جدول (3): ملخص الحسابات الإحصائية لفروقات الارتفاعات لنموذجSRTM

منطقة التضاريس	عدد النقاط (n)	المتوسط الحسابي (م)	الانحراف المعياري (م)	المدى (م)
طرابلس (متوسطة)	11	10.560	±4.015	10.624
غريان (صعبة)	16	16.035	±9.488	35.224

مثال عددي توضيحي (منطقة طرابلس):

لتوضيح كيفية حساب قيمة الانحراف المعياري يدوياً، تم اختيار عينة مكونة من خمس نقاط من منطقة طرابلس، حيث تم استخراج الارتفاعات من نموذج SRTM ومقارنتها بالارتفاعات المرجعية كما هو موضح في جدول (4)

جدول (4): عينة من فروقات الارتفاعات (طرابلس)

النقطة	الارتفاع المرجعي (م)	الارتفاع من SRTM (م)	الفرق (م)	مربع الفرق (م²)
1	195.173	200.500	+5.327	28.378
5	197.476	202.100	+4.624	21.381
10	403.360	398.200	−5.160	26.626
21	23.007	24.500	+1.493	2.229
22	20.597	22.800	+2.203	4.853

وبتطبيق معادلة الانحراف المعياري على هذه العينة:

$$RMSE = \sqrt{[(28.378 + 21.381 + 26.626 + 2.229 + 4.853) / 5]}$$

$$RMSE = \pm 4.086\,m$$

هذه القيمة قريبة جداً من قيمة RMSE الكلية لمنطقة طرابلس (±4.015 متر)، مما يؤكد اتساق النتائج الإحصائية المستخلصة من مجموعة النقاط الكاملة ويعزز موثوقية التقييم.

د. مناقشة النتائج وربطها بالدراسات السابقة

تتطابق هذه النتائج المحلية المستخرجة من البيئة الليبية مع ما توصلت إليه الدراسات العالمية الحديثة؛ حيث أكد البحث المرجعي لكل من (Aziz et al., 2023, p. 65) و (Li et al., 2022, p. 1149)أن قيم الارتفاع في النماذج الفضائية المفتوحة تعاني من تشويهات (Distortions)نظامية وعشوائية تزداد طردياً مع وعورة السطح. وبالنظر إلى البيانات الإحصائية المرجعية المساندة من دراسات التضاريس المماثلة،وجد التوافق التالي: (هذه القيم مأخوذة من دراسات سابقة، وليست جزءاً من نتائج هذه الدراسة)

- **في البيئة متوسطة التضاريس (جغرافية طرابلس)** :يسجل نموذج الارتفاع الرقمي لبعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية–Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc) (second – SRTMGL v.3انحرافاً معيارياً بمقدار (5.161∓ متر)، بينما يسجل نموذج وكالة ناسا للارتفاعات الرقمية (NASADEM) دقة رأسية بمقدار (5.243∓ متر). وبمقارنة هذه القيم بجدول المعايير (جدول 2)، يتضح تخطيها لحدود السماحية المسموحة للمقاييس الكبيرة التفصيلية.
- **في البيئة المنبسطة تماماً** :ترتفع الدقة الإحصائية لنموذج (SRTM) لتصل إلى (2.584∓ متر)، وهو ما يفسر استقرار سلوك النموذج نسبياً في السهول الساحلية لطرابلس مقارنة بالمناطق الجبلية المرتفعة لغريان.

بناءً عليه، فإن دقة نموذج بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (SRTM) البالغة 30 متراً كتمييز مكاني تعد كافية فقط للدراسات الإقليمية والاستكشافية ذات المقاييس الصغيرة (مثل 1:100000 أو أصغر)، ولكنها تشكل مخاطرة هندسية عند إسقاطها على مخططات تفصيلية أو فترات كنتورية ضيقة دون إجراء عمليات تصحيح أو رفع تكميلي أرضي.

7. الاستنتاجات والتوصيات

أ. الاستنتاجات

- تتباين الدقة الرأسية لنموذج بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (SRTM) بشكل حاد ومباشر تبعاً لدرجة وعورة السطح؛ حيث يقدم النموذج نتائج أكثر استقراراً في المناطق الساحلية متوسطة التضاريس (مدينة طرابلس)، بينما تنخفض دقتها الرأسية بشكل واضح في البيئات الجبلية الوعرة ذات الانحدارات الشديدة (مدينة غريان).

- أثبتت المعايير الهندسية أن نماذج الارتفاعات الرقمية العالمية المجانية لا تصلح للاعتماد عليها في اشتقاق وإنتاج خطوط الكنتور التي تقل فترتها الكنتورية عن 10 أمتار في الخرائط الطوبوغرافية للمناطق بسيطة ومتوسطة التضاريس بمقاييس رسم 1:25000 أو أكبر.
- أظهرت النتائج قصوراً واضحاً في جودة النموذج الفضائي بالمناطق الصعبة والجبلية، مما يجعله غير صالح لإنتاج خطوط الكنتور الأقل من 10 أمتار كفترة كنتورية لمقاييس الرسم 1:50000 أو أكبر.
- تبين من خلال الدراسة الفنية عدم ملاءمة وموثوقية النموذج الفضائي في رسم واشتقاق القطاعات الطولية التي يقل طولها عن 30 كيلومتراً في البيئات الجبلية والوعرة، نتيجة لتراكم الأخطاء الرأسية عبر المسافات القصيرة.

ب. التوصيات

- ضرورة توخي الحذر الشديد من قبل المهندسين والمخططين عند استخدام نماذج الارتفاعات الرقمية العالمية المفتوحة في المشاريع الهندسية الحساسة التي تتطلب دقة رأسية عالية (كشبكات الصرف الصحي، وتصريف مياه الأمطار، وحسابات كميات الحفر والردم الدقيقة).

يوصى بحصر استخدام نموذج بعثة الرادار الفضائية الطوبوغرافية (SRTM) المجاني في الدراسات الاستكشافية والإقليمية الأولية، وإنتاج الخرائط ذات مقاييس الرسم الصغيرة (مثل 1:100000 أو أصغر)، حيث تكون نسبة السماحية بالخطأ الرأسي أكبر.

- ضرورة الاعتماد على عمليات الرفع المساحي الأرضي التقليدي أو تقنيات نظام الملاحة الفضائي العالمي (GNSS) المتقدمة، أو الاستعانة بنماذج ارتفاعات رقمية محلية عالية الدقة (Local Digital Elevation Model – Local DEM) عند الرغبة في إنتاج خرائط تفصيلية بمقاييس كبيرة أو فترات كنتورية ضيقة.
- دعوة الهيئات والمؤسسات المساحية والتخطيطية الرسمية في دولة ليبيا إلى تبني وتحديث شبكة نقاط التحكم الأرضية، والعمل على بناء نموذج ارتفاع رقمي محلي عالي الدقة يغطي كامل أرجاء الدولة ليكون بديلاً آمناً ورصيناً عن النماذج العالمية المجانية.

المراجع

1. Ahmad, S., Al-Khafaji, A., Khan, M. and Rahman, A. (2024). Comparative analysis of open-source digital elevation models for topographic analysis. Journal of Remote Sensing and GIS, 15(2): 112-125. https://doi.org/10.1007/s12518-023-00541-1

2. Aziz, M. A. C., Pa'suya, M. F., Talib, N., Din, A. H. Md., Hashim, S. and Ramli, M. Z. (2023). Vertical Accuracy Assessment of Improvised Global Digital Elevation Models (MERIT, NASADEM, EarthEnv) Using GNSS and Airborne IFSAR DEM. International Journal of Geoinformatics, 19(11): 65-75. https://doi.org/10.52939/ijg.v19i11.2979

3. Bhardwaj, A., Joshi, P., Singh, S. and Kumar, R. (2021). Evaluation of vertical accuracy of global open-access digital elevation models. Geocarto International, 36(5): 543-558. https://doi.org/10.1080/10106049.2019.1611932

4. El-Ashmawy, N. (2022). Assessment of newly released global digital elevation models using high-accuracy GPS points. Arabian Journal of Geosciences, 15(3): 89-102. https://doi.org/10.1007/s12517-022-09456-w

5. Esetlili, M. T., Bircan, H., Balik Sanli, F. and Ustun, A. (2018). Accuracy assessment of global digital elevation models: A case study in rugged terrains. Measurement, 120: 301-311. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.02.023

Federal Geographic Data Committee [FGDC]. (1998). Geospatial
6. Positioning Accuracy Standards - Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA). Reston, Virginia: Subcommittee for Base Cartographic Data, U.S. Geological Survey (USGS). https://transportation.ky.gov/Highway-Design/Documents/FGDC%20STD%20007.3%201998.pdf

7. Li, H., Zhao, J., Yan, B., Yue, L. and Wang, L. (2022). Global DEMs vary from one to another: an evaluation of newly released Copernicus, NASA and AW3D30 DEM on selected terrains of China using ICESat-2 altimetry data. International Journal of Digital Earth, 15(1): 1149-1168. https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2094002

8. Meadows, M., Jones, S. and Reinke, K. (2024). Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments. International Journal of Digital Earth, 17(1): 2308734. https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734

9. Mughal, A., Ali, T., Shah, S. and Hussain, M. (2023). Topographic influence on the accuracy of open-source digital elevation models. Earth Science Informatics, 16(1): 12-27. https://doi.org/10.1007/s12145-022-00912-x.

10. Riaz, M., Yang, S., Tariq, A. and Mehmood, K. (2021). Validation and vertical accuracy assessment of global digital elevation models over varied

https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3049511 terrains.IEEEAccess,9: 76-89.

11. Survey Department of Libya. (2024). Three-dimensional Ground Control Points (GCPs) dataset for Tripoli and Gharyan regions. Tripoli, Libya.