

Surface Analysis Using Cloud Computing: An Applied Study on the Google Earth Engine Platform

Dr. Nadiah Awad Al-Safri

Geographic Information Systems Program | Department of Physical Sciences | College of Science | University of Jeddah | Saudi Arabia

Received:

11/05/2025

Revised:

24/05/2025

Accepted:

22/06/2025

Published:

15/09/2025

* Corresponding author:

naalsafri@uj.edu.sa

Citation: Al-Safri, N. A. (2025). Surface Analysis Using Cloud Computing: An Applied Study on the Google Earth Engine Platform. *Journal of engineering sciences and information technology*, 9(3), 24 – 49.

<https://doi.org/10.26389/AJSRP.C130525>

2025 © AISRP • Arab
Institute for Sciences &
Research Publishing
(AISRP), United States, all
rights reserved.

• Open Access



This article is an open
access article distributed
under the terms and
conditions of the Creative
Commons Attribution (CC
BY-NC) [license](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

Abstract: Objectives: This study aims to retrieve a digital elevation model (DEM) and perform surface analyses using Google Earth Engine (GEE) as a free and open-source cloud-based platform. It seeks to highlight the efficiency and capability of GEE in processing and analyzing large-scale spatial data without relying on advanced local computing resources or licensed software. The study also aims to enrich the Arabic scientific literature with research focused on GEE applications.

Methods: A descriptive-analytical approach was applied to Saudi Arabia through surface analyses including hillshade, slope, slope classification (Young, 1997), area and percentage of each class, aspect, and contour lines at 200 m and 500 m intervals, using the open-source SRTM30 DEM via GEE.

Results: Seven maps were produced to represent the surface analyses of the study area, namely: elevation, hillshade, slope, slope classification according to Young (1997), aspect, and contour lines at 200 m and 500 m intervals. These layers underwent basic processing, including tile merging into a unified raster, color gradient adjustment, and final map layout using ArcGIS Pro. A table was also prepared showing the area of each slope class.

Conclusions: The findings confirm that GEE offers a practical alternative to traditional software for performing surface analyses across large geographic extents due to its cloud-based capabilities and access to open data. The post-processing steps were simple and can also be performed efficiently using open-source GIS software such as QGIS, supporting the use of flexible and cost-free tools in spatial research, especially in academic environments with limited resources.

Keywords: Cloud Computing, Google Earth Engine-GEE, Digital Elevation Model-DEMs, Hillshade, Slope, Aspect, Contour.

تحليلات السطح باستخدام الحوسبة السحابية: دراسة تطبيقية على منصة Google Earth Engine

الدكتورة / نادية بنت عوض السفري

برنامج نظم المعلومات الجغرافية | قسم العلوم الفيزيائية | كلية العلوم | جامعة جدة | المملكة العربية السعودية

المستخلص: الأهداف: تهدف هذه الدراسة إلى استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي وإجراء تحليلات السطح باستخدام منصة GEE للاستفادة منها كمنصة سحابية مجانية ومفتوحة المصدر، بالإضافة إلى إبراز فعالية وكفاءة منصة GEE على معالجة وتحليل البيانات المكانية الكبيرة دون الحاجة إلى أجهزة حاسوبية محلية متقدمة أو برمجيات مرخصة، كما تسعى الدراسة إلى إثراء المكتبة العربية بدراسة تناقش أحد جوانب استخدام منصة GEE.

المنهجية: اعتمدت الدراسة المنهج الوصفي التحليلي، بالتطبيق على المملكة العربية السعودية، من خلال إجراء تحليلات سطح شملت الظلال، والانحدار، وتصنيف الانحدار وفقاً لـ (Young, 1997)، وحساب المساحة والنسبة لكل فئة، والاتجاه، واستخراج خطوط الكنتور بفواصلين ارتفاعيين (200م و500م)، باستخدام نموذج الارتفاع الرقمي المفتوح المصدر (SRTM30) عبر منصة GEE.

النتائج: تم إنتاج سبع خرائط تمثل تحليلات السطح لمنطقة الدراسة وهي: الارتفاع، الظلال، الانحدار، تصنيف الانحدار وفقاً لـ (Young, 1997)، الاتجاه، وخطوط الكنتور بفواصل 200م و500م. وقد خضعت هذه الطبقات لمعالجات بسيطة شملت المعالجة دمج اللوحات في مصفوفة موحدة، وتنسيق التدرج اللوني، والإخراج النهائي للخرائط باستخدام ArcGIS Pro. كما تم إعداد جدول لمساحات فئات الانحدار.

الخلاصة: تؤكد نتائج الدراسة أن منصة GEE تعد بديلاً فعالاً للبرمجيات التقليدية في تنفيذ تحليلات السطح على مساحات جغرافية واسعة، بفضل قدرتها العالية على المعالجة السحابية وتوفيرها لبيانات مفتوحة المصدر. كما أظهرت التجربة أن المعالجات اللاحقة تعد معالجات بسيطة، يمكن تنفيذها بكفاءة باستخدام برمجيات نظم معلومات جغرافية مفتوحة المصدر مثل QGIS، مما يُعزز من إمكانية الاعتماد على أدوات مجانية ومرنة في البحوث الجغرافية، خاصة في البيئات الأكاديمية ذات الموارد المحدودة. الكلمات المفتاحية: الحوسبة السحابية، منصة قوقل إيرث انجن، نموذج الارتفاع الرقمي، الظلال، الانحدار، الاتجاه، الكنتور.

1- مقدمة:

تُعد Google Earth Engine (GEE) منصة سحابية لتحليل البيانات العلمية، حيث توفر مجموعات من البيانات الجاهزة والمستضافة على السحابة، إلى جانب مجموعة كبيرة من الخوادم. ومن مميزات منصة GEE بشكل خاص قدرتها على تنفيذ الحسابات الكبيرة بسرعة عالية، من خلال توزيعها على عدد كبير من الخوادم. حيث تتيح واجهة برمجة التطبيقات (application programming interface) في Earth Engine استخدام البيانات المستضافة سحابيًا والقيام بالعمليات الحسابية بكفاءة عالية.

وتعد واجهة برمجة التطبيقات (API) وسيلة للتواصل مع خوادم GEE، حيث تتيح للمستخدم تحديد العمليات الحسابية التي يرغب في تنفيذها، ثم استلام النتائج. وقد صُممت هذه الواجهة بطريقة تُعفي المستخدم من كيفية توزيع العمليات الحسابية على مجموعة من الأجهزة أو تجميع نتائجها. فالمستخدم ببساطة يحدد ما يريد القيام به، مما يُبسط الكود إلى حد كبير من خلال إخفاء تفاصيل التنفيذ، ويجعل منصة GEE سهلة الاستخدام حتى للمستخدمين الذين ليست لديهم خبرة في البرمجة.

وتتمثل إحدى مزايا واجهة Earth Engine API في أنها محايدة من حيث اللغة البرمجية، حيث توفر Google مكتبات رسمية تتيح استخدام الواجهة من خلال لغتي JavaScript وPython. وتبقى الواجهة البرمجية متسقة إلى حد كبير بغض النظر عن اللغة المستخدمة، ويمكن الاختلاف الرئيسي في بناء الجملة المستخدمة لاستدعاء الدوال. وبمجرد تعلم بناء الجملة الخاص بلغة معينة، يمكن تكييف الكود بسهولة لأن جميع اللغات تستخدم نفس الدوال البرمجية (Gandhi, 2024: 4).

كما توفر منصة GEE فهرس بيانات ضخمة جاهز للتحليل بسرعة متعددة البيتابايت، متمركز مع خدمة حوسبة عالية الأداء ومتوازنة بطبيعتها. ويتم الوصول إليها والتحكم بها من خلال واجهة برمجة تطبيقات (API) متاحة عبر الإنترنت، وبيئة تطوير تفاعلية (IDE) عبر الويب تتيح إجراء النماذج الأولية بسرعة وعرض النتائج بصريًا.

يحتوي فهرس البيانات على مستودع كبير من مجموعات البيانات الجغرافية المكانية المتاحة للعامة، بما في ذلك مشاهدات من مجموعة متنوعة من أنظمة التصوير الفضائي والجوي ضمن الأطوال الموجية الضوئية وغير الضوئية، بالإضافة إلى متغيرات بيئية، وتنبؤات ومسوحات سابقة للطقس والمناخ، وبيانات الغطاء الأرضي، والتضاريس، والبيانات الاجتماعية، والاقتصادية. وقد تم معالجة كل هذه البيانات مسبقًا لتكون جاهزة للاستخدام مع الحفاظ على المعلومات، مما يتيح الوصول إليها بكفاءة ويزيل العديد من العوائق المرتبطة بإدارة البيانات. ويُعد فهرس البيانات العامة في منصة GEE مجموعة منسقة متعددة البيتابايت من مجموعات البيانات الجغرافية المكانية واسعة الاستخدام. ويتكوّن الجزء الأكبر من الفهرس من صور الاستشعار عن بُعد الخاصة برصد الأرض، بما في ذلك الأرشفة الكامل لبرنامج Landsat، وكذلك الأرشفات الكاملة لبيانات القمرين Sentinel-1 و Sentinel-2. كما يشمل الفهرس أيضًا تنبؤات مناخية، وبيانات الغطاء الأرضي، والعديد من مجموعات البيانات البيئية والجيوفيزيائية والاجتماعية-الاقتصادية الأخرى.

ويتم تحديث الفهرس بشكل مستمر، بمعدل ما يقارب 6000 مشهد يوميًا من البعثات الفضائية النشطة، مع فترة زمنية نموذجية تبلغ حوالي 24 ساعة من وقت التقاط المشهد إلى توفره على المنصة. ويمكن للمستخدمين طلب إضافة مجموعات بيانات جديدة إلى الفهرس العام، أو رفع بياناتهم الخاصة باستخدام واجهة REST، سواء من خلال أدوات قائمة على المتصفح أو سطر الأوامر، ومشاركتها مع مستخدمين أو مجموعات أخرى حسب الرغبة (Gorelick et al, 2017: 18-19).

ومن خلال هذه الإمكانيات القوية لمنصة GEE سواء من حيث الإمكانيات التحليلية أو توفير البيانات الضخمة تسعى هذه الدراسة لتحليل السطح من خلال الوصول إلى نماذج الارتفاع الرقمية (DEMs) والقدرة الحاسوبية اللازمة لمعالجتها على مستوى المملكة العربية السعودية. ليتم اشتقاق معلومات السطح مثل الظلال، والانحدار، الاتجاه، والكتنور باستخدام وظائف مدمجة في GEE ومجموعات بيانات مثل SRTM.

مشكلة الدراسة:

في ظل التطور المتسارع في مجال نظم المعلومات الجغرافية وتعدد مصادر البيانات المكانية المفتوحة، تبرز الحاجة إلى أدوات تحليلية فعالة ومجانية تُسهّل عمليات التحليل الجغرافي، خاصة عند التعامل مع مساحات جغرافية واسعة تتطلب عادةً موارد حاسوبية كبيرة أو برمجيات مرخصة باهظة الثمن. وتعد منصة GEE من أبرز المنصات السحابية التي توفر بيئة قوية لمعالجة وتحليل البيانات المكانية، بما في ذلك نماذج الارتفاعات الرقمية، دون الحاجة إلى تحميل البيانات أو استخدام أجهزة حاسوب ذات قدرات عالية.

ورغم الاستخدام العالمي المتزايد لمنصة GEE في التطبيقات الجغرافية والبيئية، إلا أن حضور هذه المنصة في الأدبيات العربية لا يزال محدودًا. فقد أشارت دراسة الرحيلي (2024) إلى أنه خلال الفترة من 2015 إلى 2024 نُشرت 790 ورقة علمية عن استخدام منصة GEE، منها فقط ثلاث أوراق باللغة العربية. ومن هنا تبرز الحاجة إلى إجراء دراسات تطبيقية باللغة العربية تستعرض إمكانيات منصة GEE، خاصة في إجراء تحليلات السطح على نطاقات مكانية واسعة كما هو الحال في المملكة العربية السعودية، وذلك بما يساهم في إثراء المحتوى العربي ويخدم الباحثين في البيئات ذات الموارد المحدودة.

أهداف الدراسة:

- 1- استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي وإجراء تحليلات السطح باستخدام منصة GEE للاستفادة منها كمنصة مجانية ومفتوحة المصدر.
- 2- إبراز فعالية وكفاءة منصة GEE على معالجة وتحليل البيانات المكانية الكبيرة دون استخدام أجهزة حاسوبية محلية متقدمة أو برمجيات مرخصة.
- 3- إثراء المكتبة العربية بدراسة تناقش أحد جوانب منصة GEE.

2- الإطار النظري:

1. مصطلحات الدراسة:

الحوسبة السحابية (Cloud Computing): هي نموذج يُمكن من الوصول الشامل والمريح والمطلوب عند الطلب عبر الشبكة إلى مجموعة مشتركة من موارد الحوسبة القابلة للتهيئة (مثل الشبكات، والخوادم، والتخزين، والتطبيقات، والخدمات)، والتي يمكن توفيرها وإطلاقها بسرعة مع أدنى جهد إداري أو تفاعل مع مزود الخدمة (Mell & Grance, 2011).

الظلال (Hillshade): تُستخدم للحصول على تمثيل افتراضي لإضاءة سطح ما، وذلك من خلال حساب قيم الإضاءة لكل خلية في صورة خلوية (Raster). يتم ذلك عن طريق تحديد موضع لمصدر ضوء افتراضي، ثم حساب قيم الإضاءة لكل خلية بناءً على موقعها وعلاقتها بالخلايا المجاورة لها. تُسهّم هذه الأداة بشكل كبير في تعزيز تصور السطح لأغراض التحليل أو العرض الرسومي، خاصةً عند استخدامها مع الشفافية، حيث تُبرز تفاصيل التضاريس وتُضفي مظهرًا أكثر واقعية على الخريطة.

وبشكل افتراضي، يُعبّر عن الظل والضوء بتدرجات اللون الرمادي المرتبطة بأعداد صحيحة تتراوح من 0 إلى 255، حيث تزداد القيم من الأسود (0) إلى الأبيض (255) (How Hillshade works, Esri, n.d.-a).

الانحدار (Slope): مقدار التغير في الارتفاع (أي التغير في المنسوب) مقسومًا على المسافة الأفقية في اتجاه معين، وغالبًا ما يكون هذا الاتجاه هو الذي يعطي أكبر نسبة تغير، أي المسار الأكثر انحدارًا ارتفاعًا أو انخفاضًا عن السطح (de Smith et al, 2024-a).

ويُستخدم تحليل الانحدار لتحديد مدى حدة الانحدار في كل خلية من خلايا السطح الشبكي (Raster). فكلما كانت قيمة الانحدار منخفضة، كان السطح أكثر استواءً، وكلما كانت قيمة الانحدار مرتفعة، كان السطح أكثر انحدارًا أو وعورة. ويُحسب الانحدار بطبقة خلوية بوحدين مختلفتين؛ الدرجات - يكون من (0) درجة سطح مستو تمامًا إلى (90) درجة انحدار عمودي تمامًا - أو النسبة المئوية للارتفاع (Percent Rise) (How Slope works, Esri, n.d.-b).

الاتجاه (Aspect): يشير إلى اتجاه الانحدار الأقصى لسطح الأرض عند نقطة معينة. ومثلما هو الحال مع الانحدار (Slope)، يتم حساب الاتجاه من تقديرات المشتقات الجزئية (partial derivatives) لسطح الارتفاع (de Smith et al, 2024-a).

ويُستخدم تحليل الاتجاه لتحديد الاتجاه الذي يواجهه الانحدار (أي الاتجاه الذي ينحدر نحوه السطح). تمثل قيم كل خلية في الصورة الناتجة (Raster) الاتجاه البوصلي الذي يواجهه السطح في تلك النقطة. يُقاس الاتجاه بدرجات في اتجاه عقارب الساعة، بدءًا من 0 درجة (تشير إلى الشمال الحقيقي) وحتى 360 درجة (أي تعود إلى الشمال مرة أخرى)، مكونة دائرة كاملة. أما المناطق المسطحة التي لا يوجد بها اتجاه للانحدار (أي لا يوجد فيها ميل واضح)، فيُعطى لها قيمة 1- (How Aspect works, Esri, n.d.-c).

الكنطور (Contour): تُعد خطوط الكنتور خطوطاً ذات قيمة متساوية على سطح ما، وبالتالي فهي مجموعات متساوية المستوى (Level Sets)، ويمكن اشتقاق الكنتور (للتضاريس أو غيرها من الأسطح) من البيانات الخلوية مثل نماذج الارتفاع الرقمية (DEM) (de Smith et al, 2024-b). وتُظهر توزيعات خطوط الكنتور كيف تتغير القيم على سطح ما، فعندما يكون التغير في القيمة طفيفًا، تكون الخطوط متباعدة، أما عندما ترتفع أو تنخفض القيم بسرعة، تكون الخطوط متقاربة (How Contouring works, Esri, n.d.-d).

2. الدراسات السابقة:

توجد العديد من الدراسات التي اعتمدت على البيانات المفتوحة المصدر ومكانيات منصة GEE لإجراء العديد من التحليلات وإنتاج الخرائط ومن أهم هذه الدراسات:

- دراسة باداريان وآخرون (Padarian et al, 2015) التي ناقشت جدوى استخدام منصة GEE لرسم خرائط التربة الرقمية من خلال تقديم مثالين لرسم خرائط التربة في الولايات المتحدة. ومزايا وقيود هذه المنصة في مرحلة تطويرها وقت الدراسة، والتحسينات المحتملة نحو منصة رسم خرائط تربة قائمة على السحابة تعمل بكامل طاقتها.

- دراسة سافانيلي وآخرون (Safanelli et al, 2020) التي اقترحت خوارزمية لتحليل التضاريس تعتمد على منصة GEE لحساب خصائص التضاريس مثل الانحدار والاتجاه والانحناء باستخدام نافذة كروية 3×3 ، دون الحاجة لبيانات ارتفاع مسقط، بل تعتمد على المسافات الحقيقية بين النقاط على سطح الأرض. تم تطوير الأداة باستخدام JavaScript ويمكن تحميلها كحزمة مخصصة، وتتميز بإمكانية عرض خرائط تضاريس بمقاييس ديناميكية تناسب مختلف الامتدادات الجغرافية. أظهرت الأداة دقة عالية عند مقارنتها بأدوات GEE الأخرى ونظام SAGA، حيث وصلت معاملات الارتباط إلى 0.98 في بعض الحالات. تُعد هذه الأداة مفيدة لتحليل تضاريس قابل للتخصيص وقابل للتوسع من النطاق المحلي إلى العالمي، مستفيدة من قوة الحوسبة السحابية في منصة GEE.
- دراسة جكسوكوي وآخرون (Gxokwe et al, 2022) التي هدفت إلى تقييم فعالية منصة (GEE) في تصنيف الأراضي الرطبة الصغيرة والموسمية في المناطق شبه القاحلة، باستخدام بيانات Sentinel-2 للفترة بين 2016 و 2020م. وتم تحليل التمايز الطيفي بين أنواع الغطاء الأرضي، واختبار أربع خوارزميات تعلم آلي وهي: الغابة العشوائية (RF)، آلة الدعم الناقل (SVM)، وشجرة التصنيف والانحدار (CART)، وخوارزمية نايف بايز (NB) لرسم خرائط دقيقة لهذه الأراضي. وأظهرت النتائج أن جميع الخوارزميات كانت فعالة باستثناء خوارزمية نايف بايز (NB)؛ التي قدمت دقة أقل. وأكدت الدراسة على أهمية استخدام منصة GEE وبيانات Sentinel-2 والخوارزميات المتقدمة لتحسين تصنيف الأراضي الرطبة الصغيرة والمتناثرة في البيئات الجافة.
- دراسة غانداروم وآخرون (Gandharum et al, 2022) التي تناولت مشكلة التوسع الحضري العشوائي في الساحل الشمالي من إقليم جاوة الغربية في إندونيسيا، وتأثيره على الأراضي الزراعية بين عامي 2003 و 2020م. واستخدم الباحثون صور أقمار صناعية (لاندسات) ومنصة (GEE) وتحليل الكثافة (IA)؛ لرصد وتحليل التغيرات في استخدام الأراضي. وتوصلت الدراسة إلى أن الأراضي الزراعية فقدت مساحات كبيرة، وكانت الخسارة في الفترة 2013–2020م أكبر بـ 2.3 مرة من الفترة 2003–2013م. وبالمقابل، زادت المناطق المبنية بشكل ملحوظ، خاصة في مناطق بيكاسي وكراوانغ وسيريبون. وكانت الأراضي الزراعية هي الهدف الرئيسي لتوسع العمران. وتراوح دقة التصنيف للصور بين 87% و 88%. كما وفرت الدراسة أدوات ونتائج مهمة يمكن أن تساعد صناع القرار والمخططين في وضع سياسات حضرية وإقليمية أكثر استدامة في إندونيسيا والمناطق المشابهة.
- دراسة أبيجيث وآخرون (Abijith et al, 2022) التي أجرت تحليل تغيرات استخدام الأراضي والغطاء الأرضي وتوقعات استخدام الأراضي والغطاء الأرضي للمنطقة بين عامي 2009–2019م و 2019–2030م باستخدام أدوات منصة GEE و TerrSet ونظم المعلومات الجغرافية (GIS). وتم إنشاء صورة لاستخدام الأراضي والغطاء الأرضي من صور Landsat وتصنيفها في GEE باستخدام Random Forest (RF). ثم تم تأطير خرائط استخدام الأراضي والغطاء الأرضي باستخدام نموذج CA-Markov للتنبؤ بتغير استخدام الأراضي والغطاء الأرضي في المستقبل.
- دراسة هيماتي وآخرون (Hemati et al., 2023) التي هدفت إلى إعداد خريطة وطنية دقيقة للأراضي الرطبة في إيران بدقة 10 أمتار، باستخدام بيانات الأقمار الصناعية Sentinel-1 و Sentinel-2 ومنصة GEE. اعتمدت على نهج معالجة الصور القائمة على الكائنات، باستخدام تجزئة SNIC ومصنف الغابة العشوائية، وتم تطبيقها على أربع مناطق بيئية مختلفة في البلاد، كما تم جمع البيانات المرجعية من مصادر ميدانية ومكتبية، وأُستخدم 70% منها للتدريب و 30% للتقييم. وقد حققت الخريطة دقة كلية بلغت 96.39%، وتراوح دقة المنتج لفئات الأراضي الرطبة بين 65% و 99%. وقدّرت الدراسة أن مساحة 22,384 كم² من إيران مغطاة بالأراضي الرطبة، وأكثرها شيوعاً الأراضي ذات الغطاء النباتي الطافي والشجري. وتُعد هذه الخريطة أداة مهمة في ظل أزمة المياه التي تمر بها البلاد، حيث توفر معلومات دقيقة عن حدود الأراضي الرطبة وتوزيعها، وتُفيد الجهات الحكومية والتجارية في إدارة الموارد المائية.
- دراسة تشين وآخرون (Chen et al, 2023) التي هدفت إلى تحليل تصنيف استخدام الأراضي والتغيرات المكانية والزمانية في أرخبيل تشوشان بالصين باستخدام بيانات الاستشعار عن بُعد وتقنيات التحليل المتقدم من خلال منصة GEE. وأظهرت النتائج أن التصنيف كان دقيقاً بنسبة تتجاوز 94%، مع زيادة في مساحة الأراضي المبنية والغابات، وتناقص في الأراضي الزراعية/المراعي. وتوسع في الجزيرة باتجاه الساحل؛ مما أدى إلى التعدي على المناطق البحرية والمسطحات الطينية، وقدمت الدراسة بيانات وتقنيات مهمة لدعم إدارة الأراضي بشكل علمي ومستدام. دراسة بيسواس وآخرون (Biswas et al, 2023) التي هدفت إلى مراقبة التغيرات في استخدام الأراضي وتغطية الأراضي في منطقة تشاتاجرام باستخدام بيانات Landsat من 2003 إلى 2023 م، من خلال منصة GEE. كما تم تصنيف الأراضي إلى خمس فئات واستخدام أربع خوارزميات تعلم آلي. وقد أظهرت النتائج أن نموذج CART هو الأكثر دقة وكفاءة. وتبين أن المناطق المبنية غير المنظمة توسعت بينما انخفضت الأراضي الزراعية. ومع ذلك، كانت هناك زيادة ملحوظة في النباتات الكثيفة خلال العشرين عاماً؛ مما يشير إلى التحسن البيئي.

• دراسة مرتضى وآخرون (Murtaza et al, 2023) التي تناولت تأثير التغيرات في استخدامات الأراضي وتغطيتها (LULC) على درجة حرارة سطح الأرض (LST) في مدينة سريناجر بكشمير، خلال الفترة من 1992 إلى 2020م، باستخدام صور أقمار صناعية عبر منصة GEE. وأظهرت نتائج الدراسة زيادة كبيرة في المناطق العمرانية (من 12% إلى 40%)، وتراجع في المسطحات المائية، والأراضي المزروعة، والغابات. هذا التوسع الحضري أدى إلى ارتفاع كبير في درجات حرارة السطح، حيث زادت الحرارة القصوى بمقدار 11°C والدنيا بـ 5°C؛ مما يدل على تفاقم ظاهرة الجزر الحرارية الحضرية. كما أظهرت الدراسة وجود علاقة بين درجات الحرارة وتدهور المؤشرات البيئية مثل NDVI وNDWI. وأكدت نتائج الدراسة على أهمية اعتماد استراتيجيات تخطيط حضري مستدام لحماية البيئة في المدينة.

• دراسة جعفرزاده وآخرون (Jafarzadeh et al, 2024) التي هدفت إلى تحسين دقة خرائط الأراضي الرطبة في جزيرة نيوفاوندلاند بكندا باستخدام بيانات مراقبة الأرض متعددة المصادر، مثل الصور البصرية والرادارية وبيانات الليدار (GEDI) بالاعتماد على منصة GEE ونموذج الغابة العشوائية لإنشاء خريطة لارتفاع مظلة النباتات (VCH) بدقة 10 أمتار، واستخدامها لتحسين تصنيف الأراضي الرطبة. وأظهرت النتائج أن دمج متغير VCH ساهم بشكل كبير في رفع دقة التصنيف، حيث بلغت الدقة الكلية 93.45%، ومعامل كابتا 0.92، بينما بلغت درجة F1 0.88. وتُبرز الدراسة أهمية استخدام البيانات متعددة المصادر والمستشعرات في تحسين رسم خرائط الأراضي الرطبة.

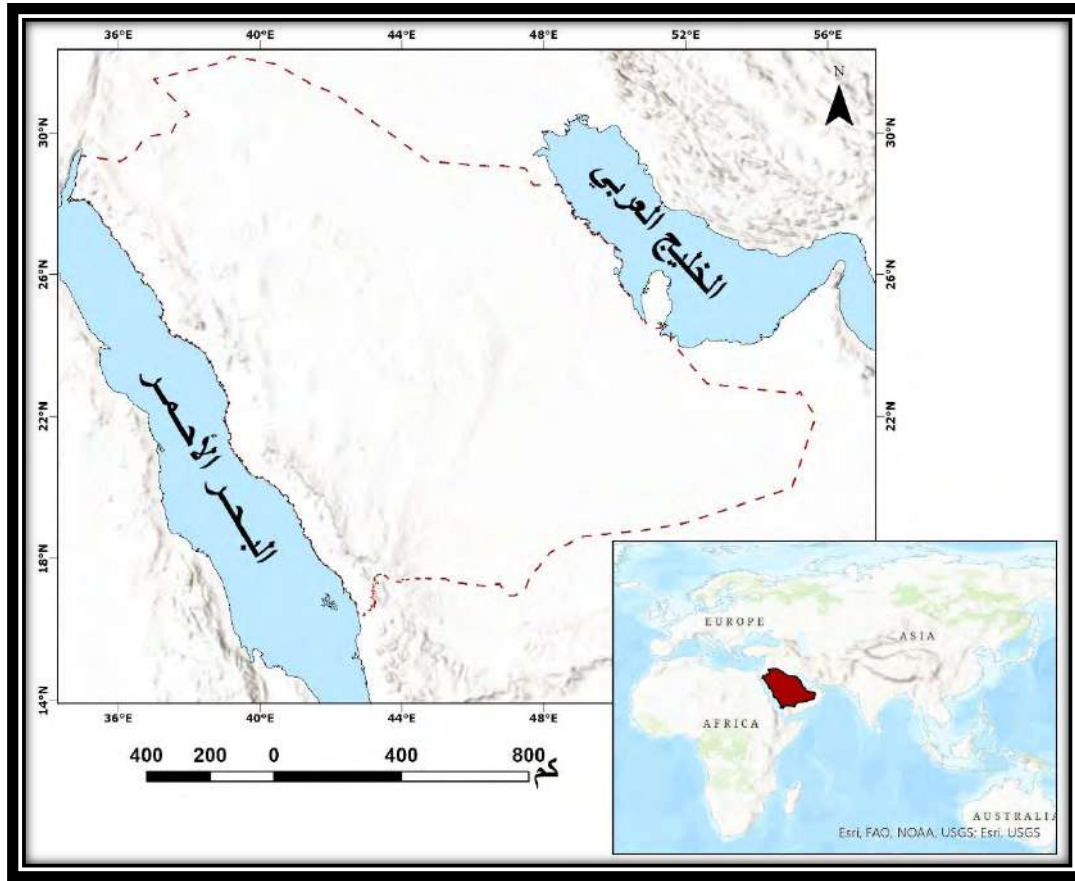
• دراسة عبد الجواد (2024) التي استعرضت إمكانيات استخدام الذكاء الاصطناعي ضمن بيئة GEE في استنباط المناطق المهددة بخطر الجريان السيلبي في حوض وادي وتير بشبه جزيرة سيناء. واعتمدت الدراسة على خوارزمية تتبع الفيضانات (Flood Mapping Algorithm - FMA) وتحليل البيانات المكانية المتاحة عبر خوادم Google، بهدف إنتاج خريطة تحدد درجات الخطر السيلبي. وقد توصلت الدراسة إلى أن توظيف الذكاء الاصطناعي في رسم خرائط مخاطر السيول ممكن وفعال، خاصة عند توفر بيانات مكانية دقيقة.

نستنتج مما سبق تنوع وتعدد استخدامات منصة GEE، والبيانات المفتوحة المصدر في الأبحاث الجغرافية والبيئية، حيث تم توظيفها في مجالات مختلفة مثل رسم خرائط التربة، وتحليل التضاريس، وتصنيف الأراضي الرطبة، ومراقبة التغيرات في استخدام الأراضي، وتحليل التوسع الحضري، وتقييم التغيرات البيئية والمناخية. وقد اعتمدت الدراسات على صور الأقمار الصناعية متعددة المصادر مثل Landsat و Sentinel، وخوارزميات تعلم الآلة وأدوات النمذجة، وأظهرت معظم النتائج دقة عالية في التصنيف والتحليل، مما يبرز قوة منصة GEE في توفير حوسبة سحابية فعالة لمعالجة وتحليل البيانات المكانية على نطاقات زمنية وجغرافية واسعة. وتُظهر هذه الدراسات أيضًا إمكانيات المنصة في دعم التخطيط المستدام، وإدارة الموارد الطبيعية، وتقديم حلول عملية للتحديات البيئية في مختلف المناطق حول العالم، وقد اهتمت الدراسة الحالية بمناقشة إمكانيات منصة GEE مستخدمة نموذج الارتفاع الرقمي لإجراء بعض تحليلات السطح على منطقة كبيرة مثل المملكة العربية السعودية.

تتفق الدراسة الحالية مع الدراسات السابقة باعتمادها على منصة GEE والبيانات المفتوحة لإجراء تحليلات مكانية دون الحاجة إلى أدوات مدفوعة أو تحميل بيانات محليًا. في حين تختلف عن الدراسات السابقة كونها تركز على تحليل السطح في منطقة واسعة مثل المملكة العربية السعودية، بينما ركزت الدراسات الأخرى على موضوعات مثل التوسع العمراني، تصنيف الأراضي الرطبة، واستخدامات الأراضي. وتتميز الدراسة الحالية بأنها دراسة عربية تركز على تحليلات السطح باستخدام GEE على نطاق وطني، مما يثري المكتبة العربية ويوفر أداة عملية لتحليل التضاريس دون تحميل نماذج ارتفاع رقمي (DEM) أو استخدام برمجيات مكلفة.

بيانات الدراسة:

تم تطبيق الدراسة على المملكة العربية السعودية التي تمتد بين دائرتي عرض $16^{\circ}22'46''$ و $32^{\circ}14'$ شمالاً، وخطي طول $34^{\circ}29'30''$ و $55^{\circ}40'$ شرقاً (هيئة المساحة الجيولوجية السعودية، 2012) شكل (1)، باستخدام بيانات The Shuttle Radar Topography Mission-SRTM التي تم جمعها في إطار جهد دولي لإنتاج نماذج ارتفاع رقمي على نطاق شبه عالمي. ويُقدّم الإصدار الثالث من بيانات (SRTM Plus) عبر منصة GEE، من خلال NASA JPL بدقة ثانية قوسية واحدة (حوالي 30 مترًا). هذه البيانات خضعت لعملية شاملة لملء الفراغات باستخدام بيانات مفتوحة المصدر مثل ASTER GDEM2، GMTED2010، وNED، ما يضمن دقة عالية مقارنة بالإصدارات السابقة من SRTM (Google Earth Engine, n.d.).



شكل (1): منطقة الدراسة.

المصدر: إعداد الباحثة اعتماداً على Shapfile من الهيئة العامة للمساحة والمعلومات الجيومكانية.

3- منهجية الدراسة:

اتبعت هذه الدراسة المنهج الوصفي التحليلي، حيث تهتم بوصف وتحليل فعالية منصة GEE في معالجة وتحليل بيانات السطح على نطاقات مكانية واسعة، مع التركيز على إمكانياتها التقنية، وسهولة استخدامها، من حيث استدعاء البيانات، وأدوات التحليل السطحي، ومن ثم تحليل ناتج هذه الأدوات وتقييم كفاءتها. وتمثلت الخطوات المنهجية للدراسة فيما يلي:

أولاً: تحديد منطقة الدراسة تم إعداد ملف Shapfile للمملكة العربية السعودية باستخدام برنامج Arc GIS Pro، تم فتح حساب على منصة GEE، ورفع ملف منطقة الدراسة على المنصة. وقد تم اختيار المملكة العربية السعودية كنموذج تطبيقي لإجراء تحليلات السطح، لما تتميز به من تنوع طبوغرافي وإتساع جغرافي، وهو ما يبرز الحاجة إلى منصات سحابية لمعالجة وتحليل البيانات بكفاءة.

ثانياً: استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEM) تم تجهيز الكود الخاص باستدعاء نموذج الارتفاع الرقمي DEMSTRM30 ضمن فهرس البيانات العامة في منصة GEE، والذي يغطي سطح الأرض بدقة مكانية جيدة (30 متراً)، ويمثل مصدراً مفتوحاً مناسباً للتحليلات المكانية.

ثالثاً: تنفيذ تحليلات السطح على منصة GEE تم تطبيق مجموعة من تحليلات السطح باستخدام الدوال المدمجة في واجهة برمجة التطبيقات (API) لمنصة GEE بلغة JavaScript، وذلك بالاستعانة بالكود التي تم تجهيزها بالاعتماد على ("Mohamed, & Mohamed, 2023")

"2024، كما يظهر في الأشكال (2-12)، وشملت التحليلات ما يلي:

1. حساب قيم الارتفاع.
2. اشتقاق خريطة الظلال (Hillshade) لتوضيح شكل السطح.
3. استخراج الانحدار (Slope) وتحديد درجته.
4. تصنيف الانحدار وفقاً ل (Young, 1997)، وحساب المساحة والنسبة المئوية لكل فئة.
5. تحديد اتجاه الانحدار (Aspect).
6. إنشاء خطوط كنتور على مستويين (كل 200 متر، وكل 500 متر).

```

var roi = ee.FeatureCollection("projects/naalsafri22/assets/Mask_ksa");
var srtm = ee.Image("USGS/SRTMGL1_003");
var srtm_clip = srtm.clip(roi);
var visualization = { min: 0, max: 3000, palette: ['blue', 'cyan', 'yellow', 'orange', 'red'] };
Map.centerObject(roi, 5);
Map.addLayer(srtm_clip, visualization, 'SRTM DEM');
var hillshade = ee.Terrain.hillshade(srtm);
var hillshade_clip = hillshade.clip(roi);
var hillshadeVis = { min: 50, max: 255, palette: ['black', 'white'] };
Map.addLayer(hillshade_clip, hillshadeVis, 'Hillshade Modified');
Export.image.toDrive({image: hillshade_clip, description: 'Hillshade_SaudiArabia_SRTM_30m', scale: 30, region: roi, fileFormat: 'GeoTIFF', folder: 'Your_Google_Drive_Folder_Name', maxPixels: 1e13 });
Export.image.toDrive({image: srtm_clip, description: 'DEM_SaudiArabia_SRTM_30m', scale: 30, region: roi.geometry(), fileFormat: 'GeoTIFF', folder: 'Your_Google_Drive_Folder_Name', maxPixels: 1e13 });

```

شكل (2): كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) لإجراء تحليل الظلال على منصة GEE.
المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على (Mohamed, 2023)

```

var roi = ee.FeatureCollection("projects/naalsafri22/assets/Mask_ksa");
var srtm = ee.Image("USGS/SRTMGL1_003");
var srtm_clip = srtm.clip(roi);
var visualization = { min: 0, max: 3000, palette: ['blue', 'cyan', 'yellow', 'orange', 'red'] };
Map.centerObject(roi, 5);
Map.addLayer(srtm_clip, visualization, 'SRTM DEM');
var slope = ee.Terrain.slope(srtm);
var slope_clip = slope.clip(roi);
var slopeVis = {min: 0, max: 60, palette: ['white', 'yellow', 'yellow', 'red', 'orange', 'red'] };
Map.addLayer(slope_clip, slopeVis, 'Slope Modified');
Export.image.toDrive({image: slope_clip, description: 'Slope_SaudiArabia_SRTM_30m', scale: 30, region: roi.geometry(), fileFormat: 'GeoTIFF', folder: 'Your_Google_Drive_Folder_Name', maxPixels: 1e13 });

```

شكل (3): كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) لإجراء تحليل الانحدار على منصة GEE.
المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على (Mohamed, 2023)

```

var roi = ee.FeatureCollection("projects/naalsafri22/assets/Mask_ksa");

var srtm = ee.Image("USGS/SRTMGL1_003");

var srtm_clip = srtm.clip(roi);

var slope = ee.Terrain.slope(srtm).clip(roi);

var slope_class = slope.expression(

  "(b('slope') >= 0 && b('slope') < 2) ? 1" +

  ":(b('slope') >= 2 && b('slope') < 5) ? 2" +

  ":(b('slope') >= 5 && b('slope') < 10) ? 3" +

  ":(b('slope') >= 10 && b('slope') < 15) ? 4" +

  ":(b('slope') >= 15 && b('slope') < 30) ? 5" +

  ":(b('slope') >= 30) ? 6" +

  ": 0").rename("slope_class").clip(roi);

var pixelArea = ee.Image.pixelArea().divide(1e6); // km²

var areaImage = pixelArea.addBands(slope_class);

var areas = areaImage.reduceRegion({reducer: ee.Reducer.sum(), group: {groupField: 1, groupName: 'slope_class'}, geometry:
roi.geometry(), scale: 30, maxPixels: 1e13});

var areaList = ee.List(areas.get('groups'));

var areaValues = areaList.map(function(item) {return ee.Dictionary(item).get('sum')});

areaValues = ee.List(areaValues).map(function(val) {return ee.Number(val)});

var totalArea = ee.Number(areaValues.reduce(ee.Reducer.sum()));

var resultList = areaList.map(function(item){

  var dict = ee.Dictionary(item);

  var slopeClass = ee.Number(dict.get('slope_class'));

  var area = ee.Number(dict.get('sum'));

  var percentage = area.divide(totalArea).multiply(100);

  var label = ee.Algorithms.If(slopeClass.eq(1), 'منبسط جداً',

    ee.Algorithms.If(slopeClass.eq(2), 'منبسط',

      ee.Algorithms.If(slopeClass.eq(3), 'مائل متوسط',

        ee.Algorithms.If(slopeClass.eq(4), 'مائل',

          ee.Algorithms.If(slopeClass.eq(5), 'شديد',

            ee.Algorithms.If(slopeClass.eq(6), 'شديد جداً',

              'غير معروف'))))));return ee.Feature(null, { 'slope_class': slopeClass,'slope_label': label,'area_km2': area, 'percentage': percentage}}));

var resultFC = ee.FeatureCollection(resultList);

Export.table.toDrive({collection: resultFC, description: 'Slope_Young_Classes_Area', fileFormat: 'CSV', folder: 'GEE_Exports'});

Export.image.toDrive({ image: slope_class, description: 'Slope_Classified_Young',folder: 'GEE_Exports',

  fileNamePrefix: 'Slope_Class_Young', region: roi.geometry(), scale: 30, maxPixels: 1e13,fileFormat: 'GeoTIFF'});

Map.centerObject(roi, 5);

Map.addLayer(srtm_clip, {min: 0, max: 3000, palette: ['blue', 'cyan', 'yellow', 'orange', 'red']}, 'SRTM DEM');

Map.addLayer(slope, {min: 0, max: 60, palette: ['white', 'yellow', 'orange', 'red']}, 'Slope (%)');

Map.addLayer(slope_class, {min: 1, max: 6, palette: ['green', 'lime', 'yellow', 'orange', 'red', 'brown']}, 'Slope Class (Young)');

```

شكل (4): كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) لإجراء تصنيف الانحدار لـ (Young, 1997) على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.

```
var roi = ee.FeatureCollection("projects/naalsafri22/assets/Mask_ksa");
var srtm = ee.Image("USGS/SRTMGL1_003");
var srtm_clip = srtm.clip(roi);
var visualization = { min: 0, max: 3000, palette: ['blue', 'cyan', 'yellow', 'orange', 'red'] };
Map.centerObject(roi, 5);
Map.addLayer(srtm_clip, visualization, 'SRTM DEM');
var aspect = ee.Terrain.aspect(srtm);
var aspect_clip = aspect.clip(roi);
var aspectVis = {min: 0, max: 360, palette: ['green', 'blue', 'yellow', 'red'] };
Map.addLayer(aspect_clip, aspectVis, 'Aspect');
Export.image.toDrive({image: aspect_clip, description: 'Aspect_SaudiArabia_SRTM_30m', scale: 30, region: roi.geometry(), fileFormat: 'GeoTIFF', folder: 'Your_Google_Drive_Folder_Name', maxPixels: 1e13 });
```

شكل (5): كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) لإجراء تحليل الاتجاه على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على (Mohamed, 2023)

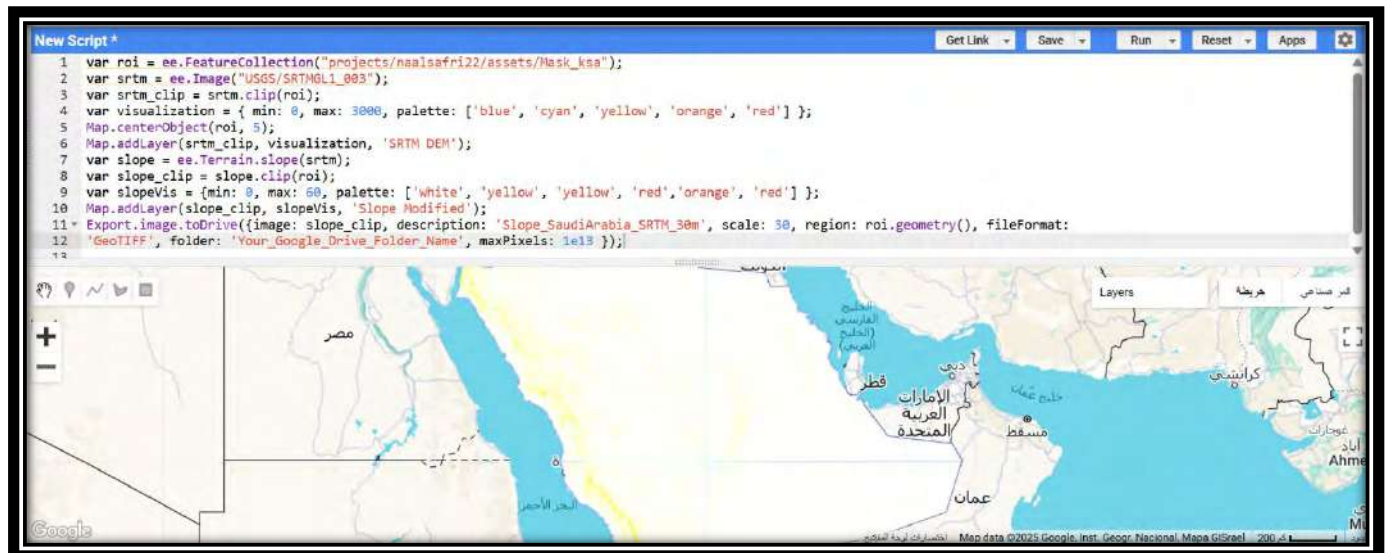
```
var roi = ee.FeatureCollection("projects/naalsafri22/assets/Mask_ksa");
var srtm = ee.Image("USGS/SRTMGL1_003");
var lines = ee.List.sequence(0, 4000, 500);
var contourlines = lines.map(function(line) {
var mycontour = srtm
.convolve(ee.Kernel.gaussian(5, 3))
.subtract(ee.Image.constant(line))
.zeroCrossing().multiply(ee.Image.constant(line)).toFloat();
return mycontour.mask(mycontour);});
contourlines = ee.ImageCollection(contourlines).mosaic().clip(roi); var srtm_clip = srtm.clip(roi);
Map.addLayer(srtm_clip, {min: 0, max: 5000, palette:['blue', 'cyan', 'yellow', 'orange', 'red']}, 'Dem');
Map.addLayer(contourlines, {min: 0, max: 5000, palette:['00ff00', 'ff0000']}, 'contours');
Map.centerObject(roi, 5);
Export.image.toDrive({image: contourlines, description: 'Contour_SaudiArabia_SRTM_30m', scale: 30, region: roi.geometry(), fileFormat: 'GeoTIFF', folder: 'Your_Google_Drive_Folder_Name', maxPixels: 1e13 });
```

شكل (6): كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) لإجراء تحليل استخراج الكنتور على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على (Mohamed, 2024)



شكل (7): إدراج وتشغيل كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) وإجراء تحليل الظلال على منصة GEE.
المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



شكل (8): إدراج وتشغيل كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) وإجراء تحليل الانحدار بالدرجات على منصة GEE.
المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



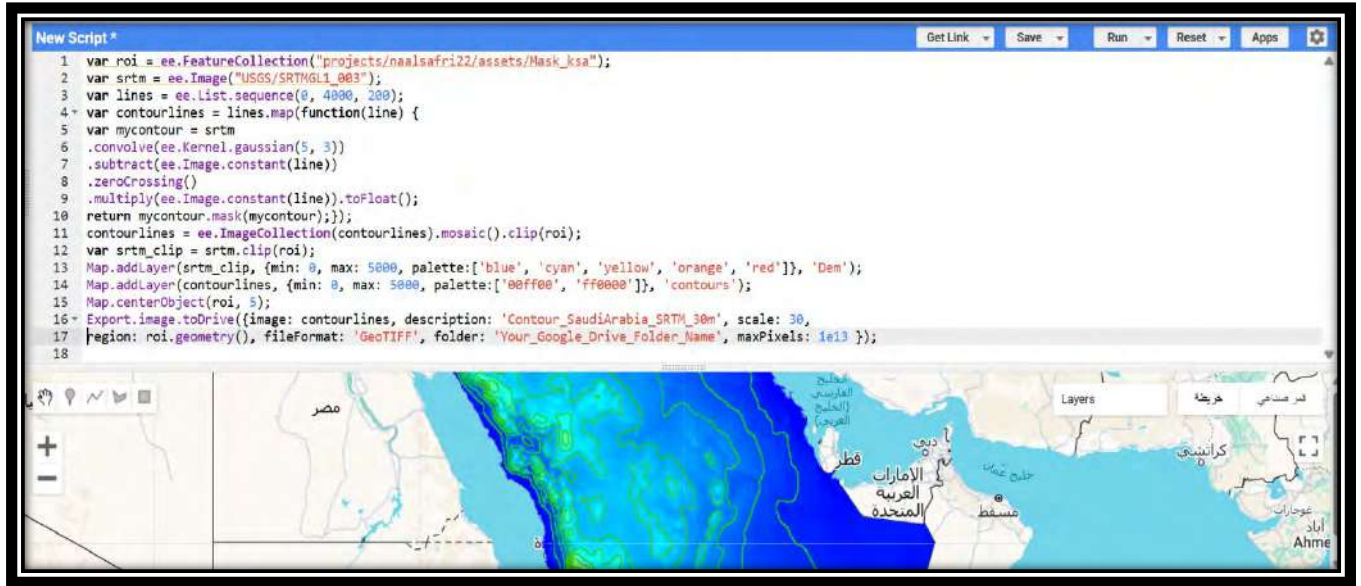
شكل (9): إدراج وتشغيل كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) وإجراء تصنيف الانحدار لـ (Young,1997) على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



شكل (10): إدراج وتشغيل كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) وإجراء تحليل الاتجاه على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



شكل (11): إدراج وتشغيل كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) وإجراء تحليل استخراج الكنتور بفواصل كنتوري (200م) على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



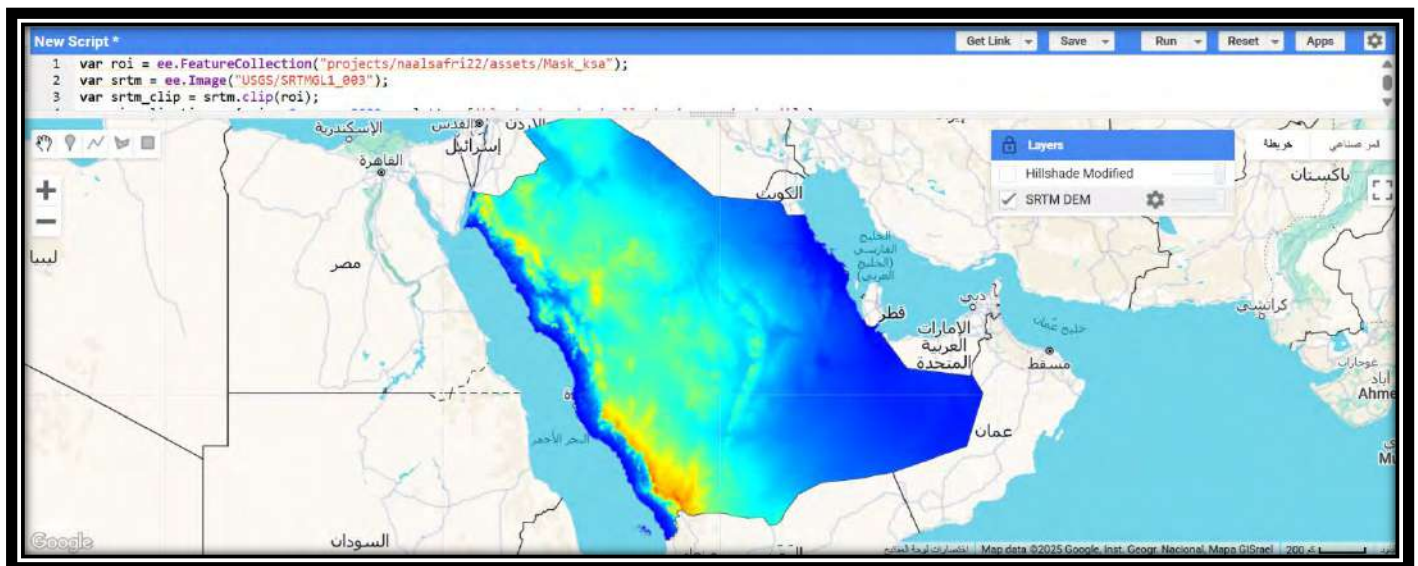
شكل (12): إدراج وتشغيل كود استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) وإجراء تحليل استخراج الكنتور بفواصل كنتوري (500م) على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.

رابعاً: معالجة النتائج وتنسيق المخرجات تم تصدير نواتج تحليلات السطح بصيغة GeoTIFF من منصة GEE الأشكال (13-19)، ومن

ثم معالجتها باستخدام برنامج ArcGIS Pro بهدف:

- دمج اللوحات الناتجة في طبقة موحدة تغطي كامل منطقة الدراسة.
- توحيد أنظمة الألوان وتنسيق الخرائط بصرياً.
- الإخراج النهائي للخرائط بإضافة العناصر الأساسية لكل خريطة (عنوان، مقياس رسم، مفتاح الخريطة، مصدر البيانات).



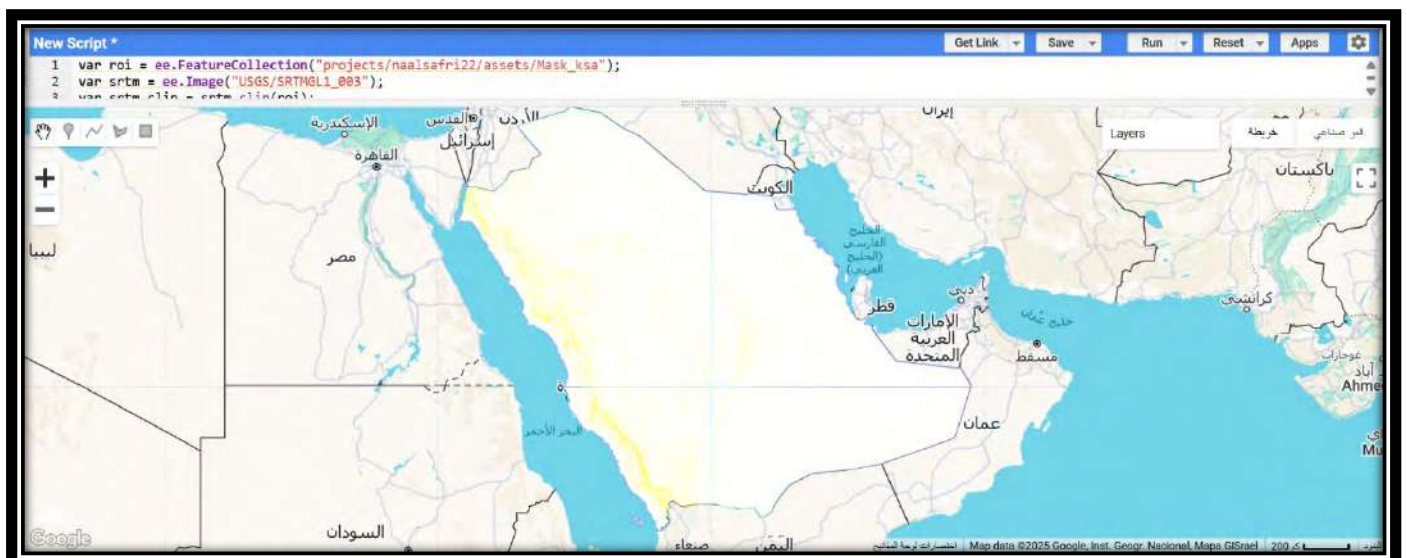
شكل (13): نموذج الارتفاع الرقمي (DEMSTRM30) على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



شكل (14): نتيجة تحليل الظلال على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



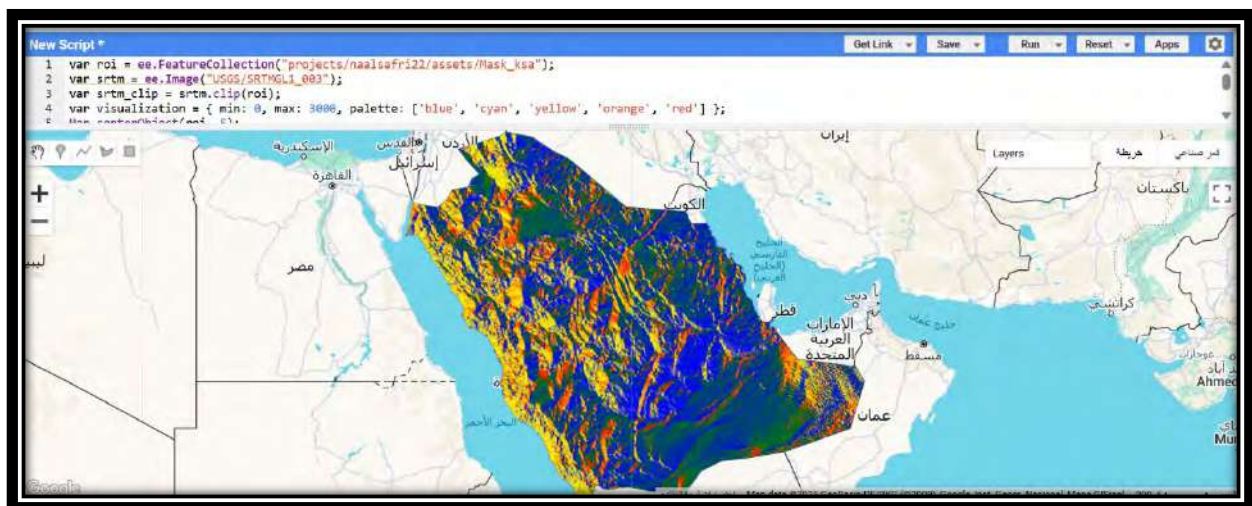
شكل (15): نتيجة تحليل الانحدار على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



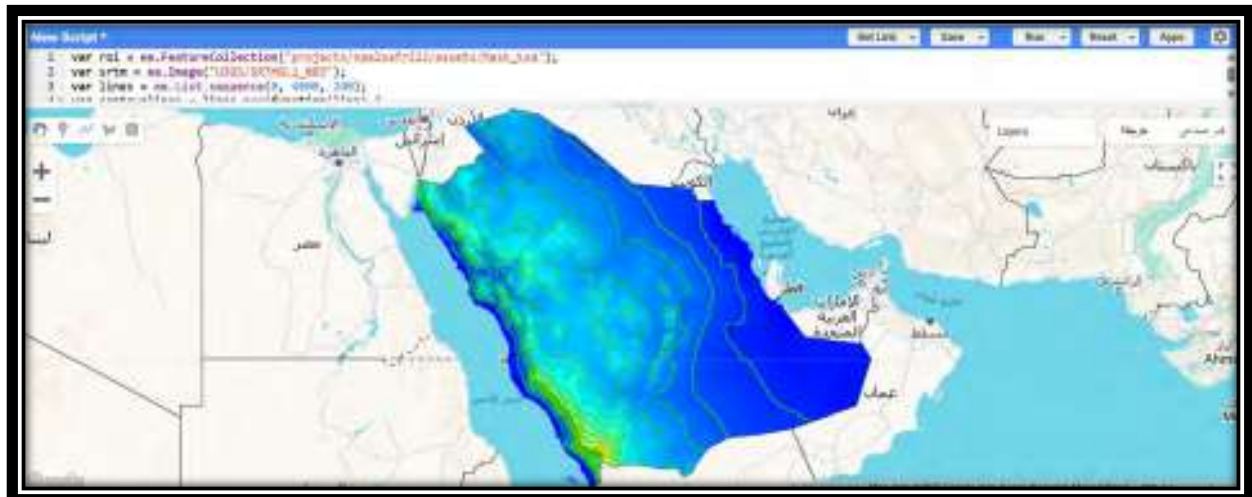
شكل (16): نتيجة تحليل تصنيف الانحدار وفقاً لـ (Young, 1997) على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.

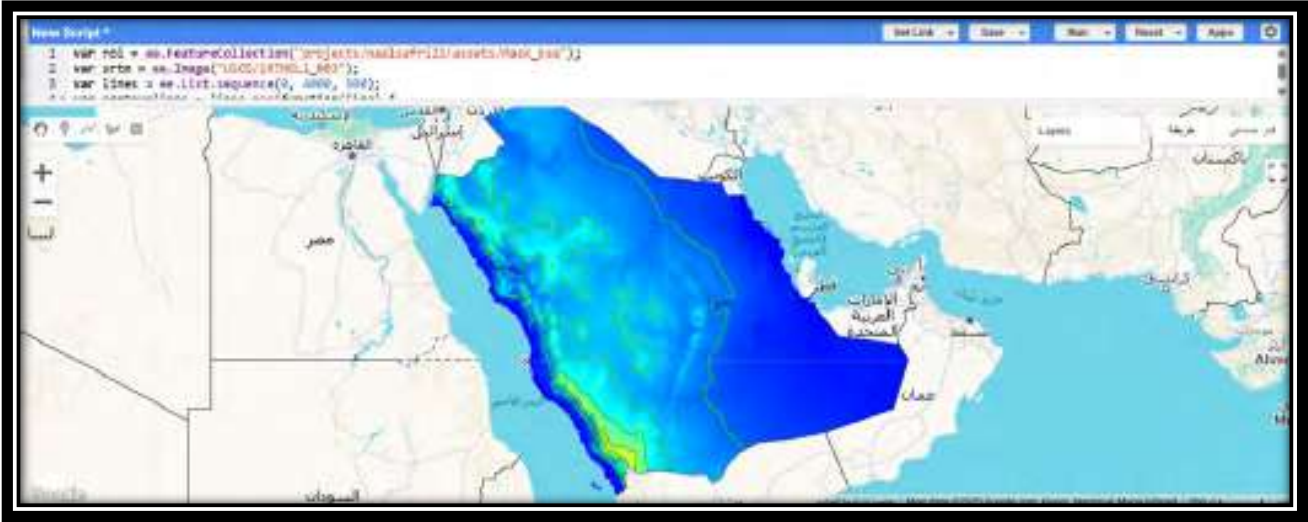


شكل (17): نتيجة تحليل الاتجاه على منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



شكل (18): نتيجة تحليل الكنتور بفواصل كنتوري (200م) على منصة GEE.
المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.



شكل (19): نتيجة تحليل الكنتور بفواصل كنتوري (500م) على منصة GEE.
المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة GEE.

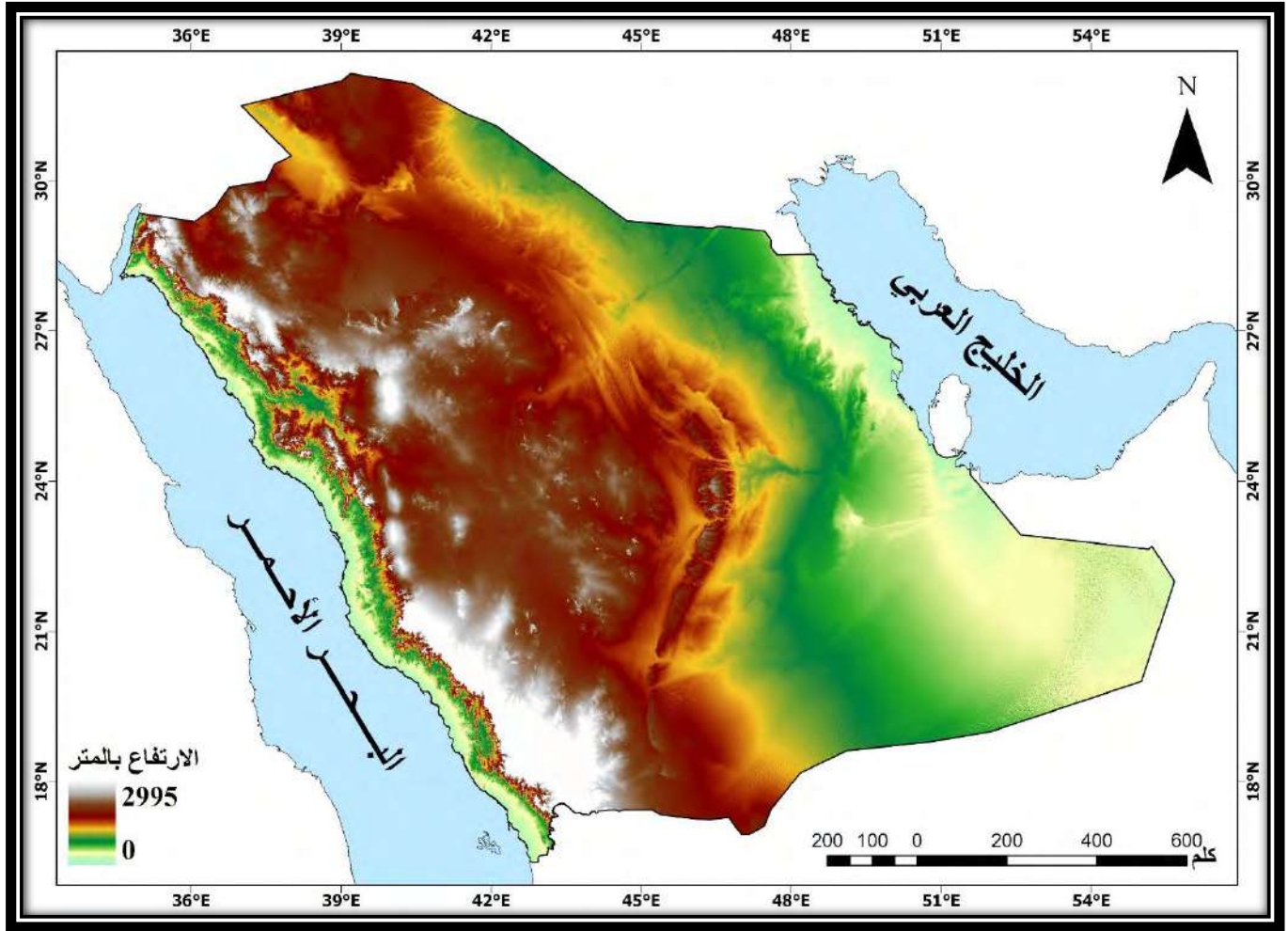
خامساً: التحقق من فعالية المنصة تم تقييم أداء منصة GEE من خلال مقارنة زمن المعالجة وسهولة الاستخدام ومدى جودة النتائج، مع الاعتبارات المرتبطة بالحاجة إلى إمكانيات حاسوبية محلية أو برمجيات مرخصة.

النتائج:

تمكنت منصة GEE من استدعاء نموذج الارتفاع الرقمي SRTM30 الذي يغطي كامل أراضي المملكة العربية السعودية، وتنفيذ مجموعة من تحليلات السطح شملت: تحليل الظلال، والانحدار، وتصنيف الانحدار وفقاً لـ (Young, 1997)، والاتجاه، وخطوط الكنتور، بالإضافة لحساب مساحة فئات الانحدار، وذلك خلال فترة زمنية وجيزة. وتتمثل أبرز مزايا GEE في قدرتها على إجراء هذه التحليلات بسرعة وكفاءة عالية، مقارنة بالبرمجيات التقليدية المثبتة على أجهزة الحاسوب، والتي تتطلب وقتاً أطول وقدرات حسابية مرتفعة، خاصة عند تطبيقها على مناطق شاسعة مثل المملكة العربية السعودية. وتجدر الإشارة إلى أن هذه التحليلات تُجرى على طبقات شبكية (Raster)، كما أن مخرجاتها تكون كذلك على هيئة طبقات شبكية، مما يزيد من متطلبات المعالجة على الأجهزة المحلية. وفيما يلي، يتم استعراض مخرجات تحليلات السطح التي تم تنفيذها عبر منصة GEE.

أولاً: نموذج الارتفاع الرقمي.

قدّمت منصة GEE نموذج ارتفاع رقمي يغطي كامل أراضي المملكة العربية السعودية، وذلك ضمن البيانات المفتوحة المصدر المتاحة على المنصة، الشكل (20).



شكل (20): نموذج الارتفاع الرقمي لسطح المملكة العربية السعودية المستخرج من منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة Arc GIS Pro & GEE

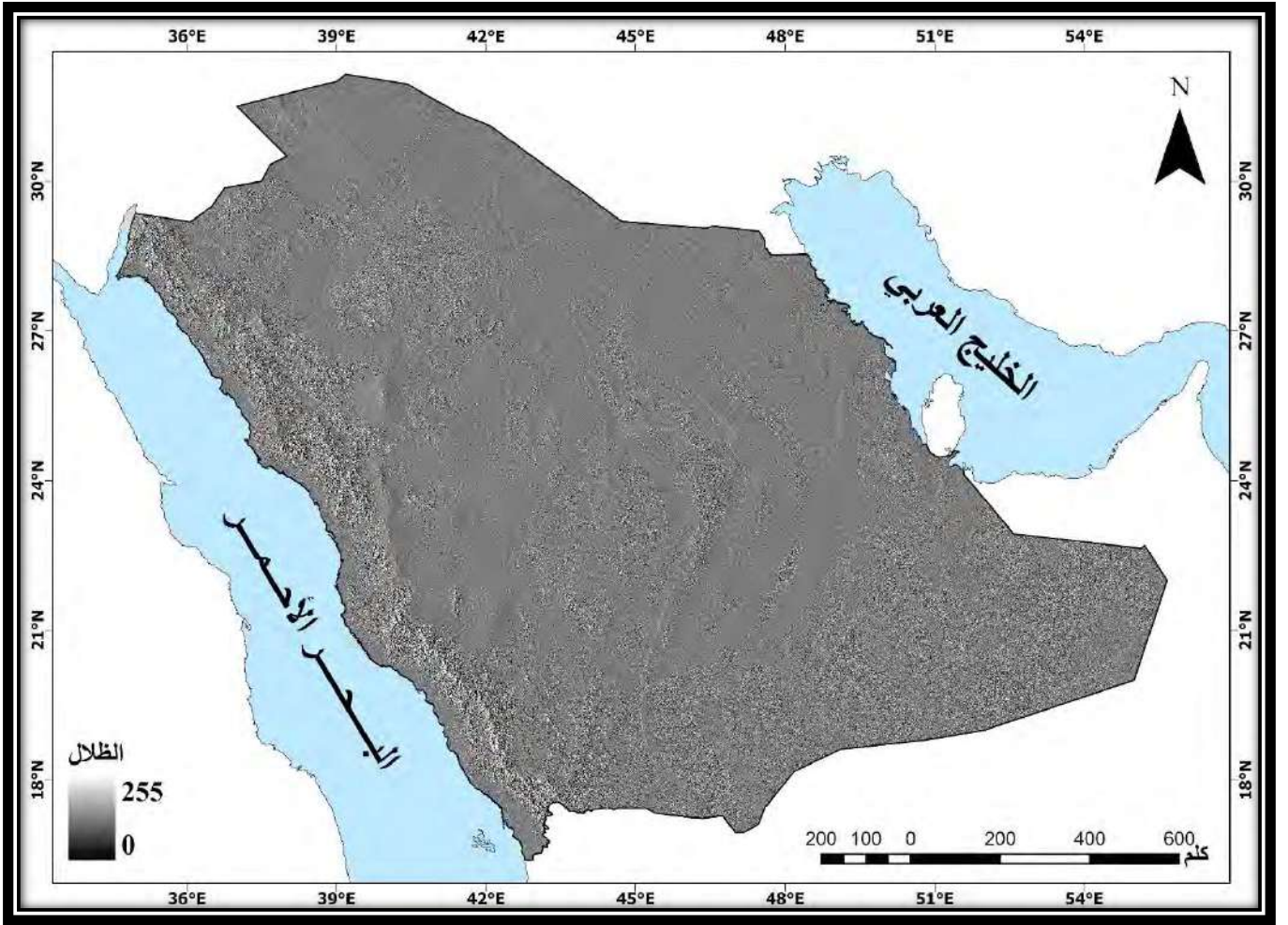
يتضح من الشكل (20) نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM30) للمملكة العربية السعودية، الذي تم الحصول عليه من منصة GEE كأحد مصادر البيانات المفتوحة، بدقة مكانية تبلغ 30 متراً، ويمد ارتفاع يتراوح ما بين (0-2995م).

تم تحميل النموذج الرقمي لكامل منطقة الدراسة من منصة GEE على أربع لوحات، ثم أُجريت عليه معالجة مبدئية شملت دمج هذه اللوحات في مصفوفة موحدة، وتطبيق تدرج لوني لتمثيل قيم الارتفاعات، بالإضافة إلى إخراج الخريطة بشكلها النهائي. تمت هذه المعالجات باستخدام برنامج ArcGIS Pro، وهي تعتبر من المعالجات الأساسية التي يمكن إنجازها أيضاً باستخدام برمجيات نظم معلومات جغرافية مفتوحة المصدر مثل QGIS.

توضح الخريطة النهائية تبايناً واضحاً في الارتفاعات على مستوى المملكة العربية السعودية، بدءاً من المناطق الساحلية المنخفضة وصولاً إلى المناطق الجبلية المرتفعة، مما يعكس التنوع الطبوغرافي الكبير في منطقة الدراسة.

ثانياً: الظلال.

أُجري تحليل الظلال باستخدام منصة GEE على نموذج الارتفاع الرقمي الذي يغطي كامل أراضي المملكة العربية السعودية، وأنتجت خريطة تمثل درجات الظلال، شكل (21).



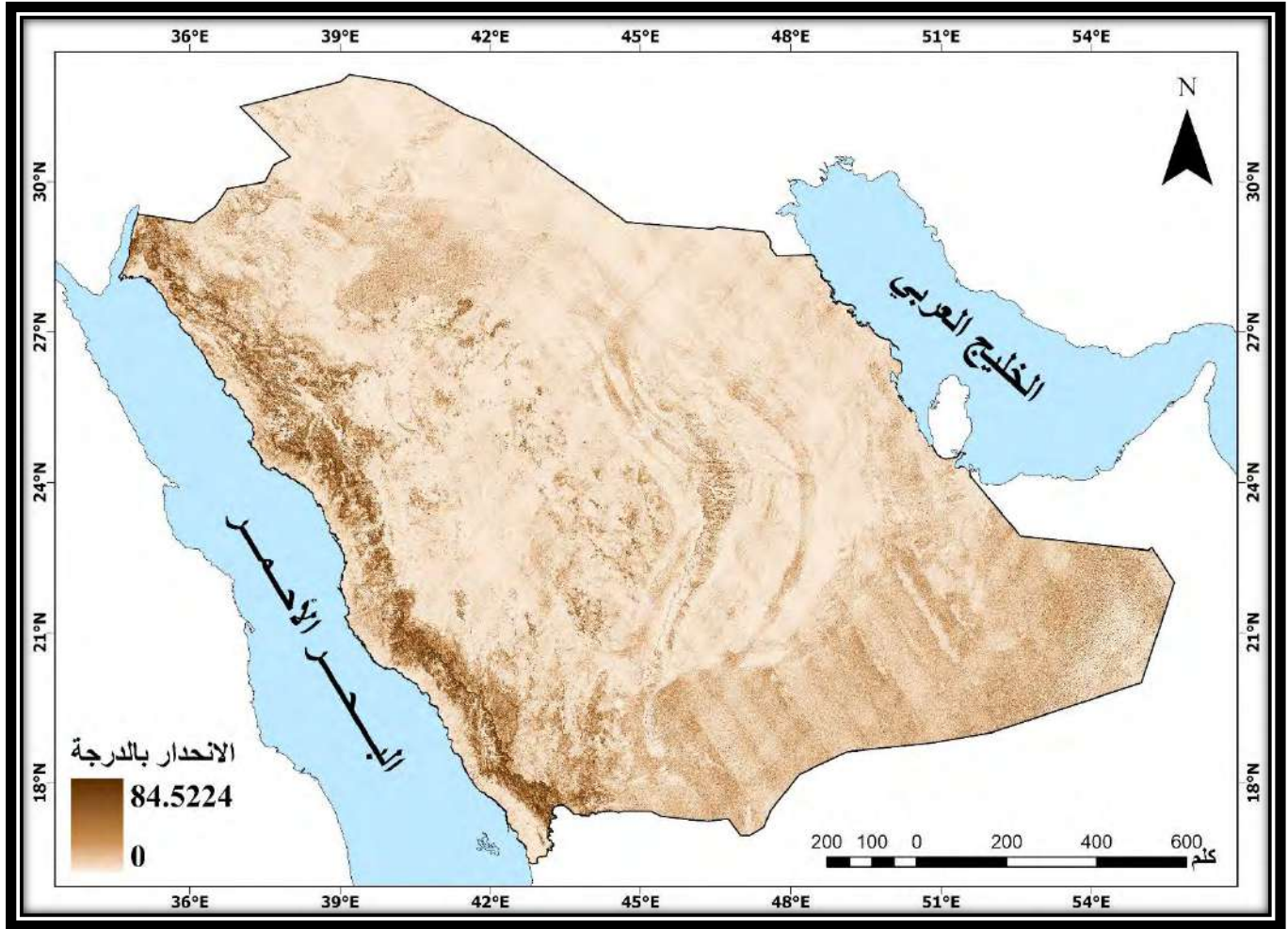
شكل (21): الظلال لسطح المملكة العربية السعودية المستخرج من منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة Arc GIS Pro & GEE

يتضح من الشكل (21) تحليل الظلال للمملكة العربية السعودية، والذي تم استخلاصه من نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM30) باستخدام منصة GEE. تتراوح قيم الظلال الناتجة بين 0 و 255، وهو ما يتفق مع ما أشار إليه مقال اسري (How Hillshade works, Esri, n.d.)، "تستخدم هذه القيم لتمثيل درجات الظل والضوء ضمن تدرج رمادي؛ إذ تشير القيمة 0 (اللون الأسود) إلى المناطق المظلمة، بينما تشير القيمة 255 (اللون الأبيض) إلى المناطق المواجهة لمصدر الضوء". وقد أتاح هذا التحليل تمثيلاً بصرياً واضحاً وسريعاً للتضاريس، بكفاءة عالية. تم تحميل تحليل الظلال من منصة GEE على لوحتين لتغطية كامل منطقة الدراسة، وأُجريت عليه معالجات بسيطة شملت دمج اللوحتين في مصفوفة موحدة وإخراج الخريطة النهائية باستخدام برنامج ArcGIS Pro. وتجدر الإشارة إلى أن هذه المعالجات تُعد من الإجراءات الأساسية التي يمكن تنفيذها كذلك باستخدام برمجيات نظم معلومات جغرافية مفتوحة المصدر مثل QGIS. تُبرز الخريطة النهائية تفاصيل التضاريس بشكل شبه ثلاثي الأبعاد، مما يسهم بشكل كبير في تفسير السمات الطبوغرافية للمنطقة، ويُعد أداة بصرية فعّالة في دعم تحليلات الارتفاع والانحدار والاتجاه.

ثالثاً: الانحدار.

أُجري تحليل الانحدار باستخدام منصة GEE على نموذج الارتفاع الرقمي الذي يغطي كامل أراضي المملكة العربية السعودية، وأنتجت خريطة تمثل درجات الانحدار، كما هو موضح في الشكل (22).



شكل (22): الانحدار لسطح المملكة العربية السعودية المستخرج من منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة Arc GIS Pro & GEE

يتضح من الشكل (22) توزيع قيم الانحدار السطحي في المملكة العربية السعودية بوحدة الدرجات، والذي تم استخلاصه من نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM30) باستخدام منصة GEE. يظهر من الخريطة أن قيم الانحدار تراوحت بين (0 – 84.5224) درجة، وهو مدى يعكس التباين الطبوغرافي الكبير في تضاريس المملكة العربية السعودية. وتُشير هذه القيم إلى أن بعض المناطق تتسم بسطوح مستوية نسبياً، في حين تتميز مناطق أخرى بانحدارات شديدة، مما يدل على وجود تضاريس وعرة، في الجزء الغربي والجنوبي الغربي من المملكة العربية السعودية. تتوافق هذه القيم مع ما أشار إليه مقال اسري (How Slope works, Esri, n.d.-b) " أن طبقة الانحدار تُستخرج على هيئة طبقة شبكية (Raster) لتحديد حدة الميل في كل خلية، إذ تمثل القيمة (0) سطحاً مستوياً تماماً، بينما تمثل القيمة (90) انحداراً عمودياً". كانت أعلى قيمة للانحدار في (84.5224) درجة ما يعكس طبيعة السطح.

تم تحميل تحليل الانحدار من منصة GEE على شكل ست لوحات لتغطية النطاق الجغرافي الكامل لمنطقة الدراسة. ثم أُجريت معالجات مبدئية شملت دمج اللوحات في مصفوفة موحدة، وتعديل التدرج اللوني للطبقة الناتجة؛ بما يعكس بدقة تباين الانحدار في منطقة الدراسة، وإخراج الخريطة النهائية باستخدام برنامج ArcGIS Pro. تجدر الإشارة إلى أن جميع هذه الإجراءات يمكن تنفيذها كذلك باستخدام برمجيات نظم معلومات جغرافية مفتوحة المصدر، مثل QGIS.

توضح الخريطة النهائية التوزيع المكاني لانحدارات السطح بشكل جيد، مما يعزز الفهم العام للطبيعة الجغرافية والتضاريسية للمنطقة المدروسة.

تصنيف الانحدار وفقاً لـ (Young, 1997).

أُجري تحليل تصنيف الانحدار وفقاً لـ (Young, 1997) باستخدام منصة GEE على نموذج الارتفاع الرقمي الذي يغطي كامل أراضي المملكة العربية السعودية، وحساب مساحة الفئات، وأُنْتُجَت جدول وخريطة تمثل فئات الانحدار، كما هو موضح في جدول (1) وشكل (23).

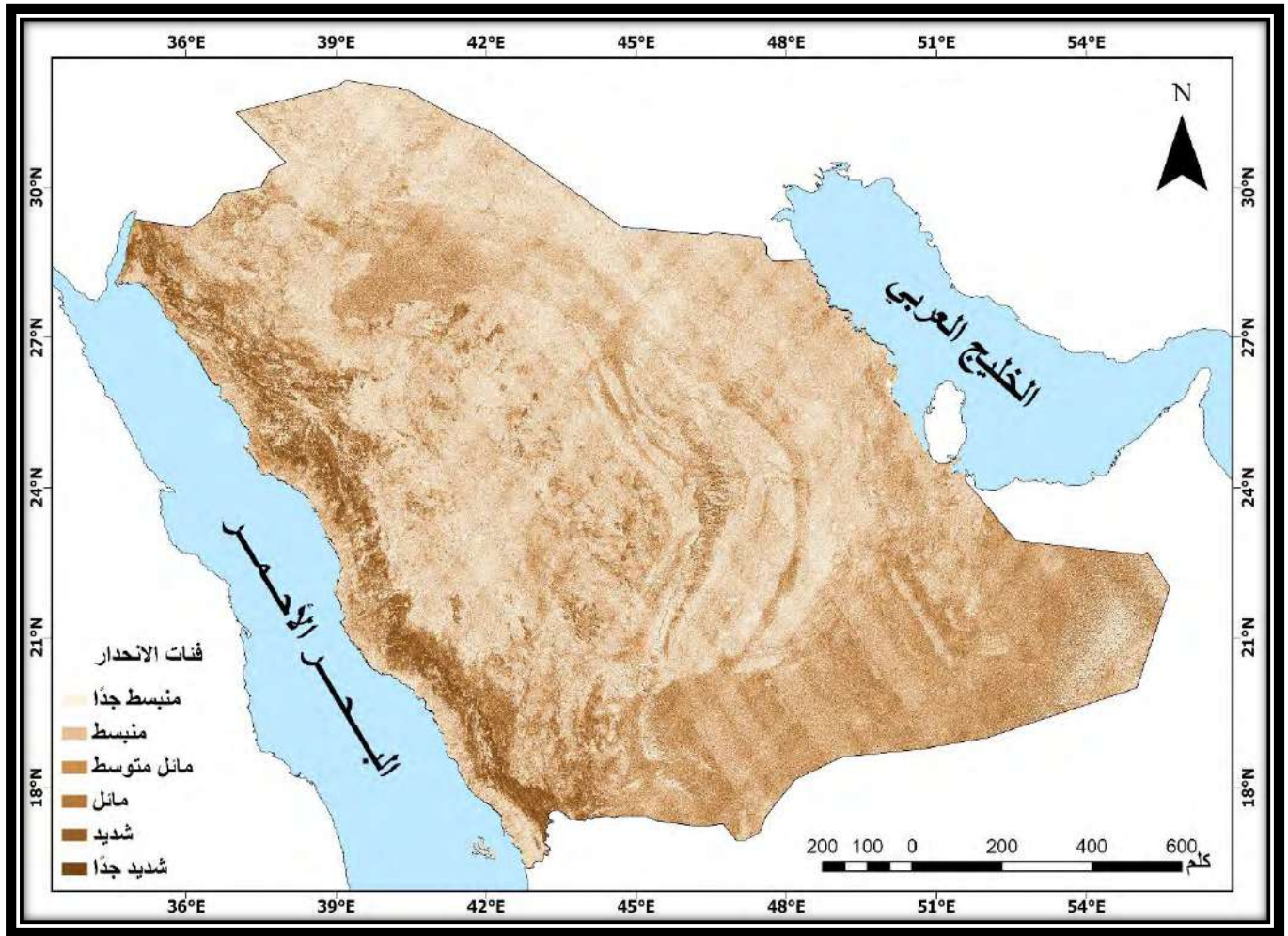
جدول (1) فئات الانحدار حسب تصنيف (Young, 1997) ومساحتها من منصة GEE.

الفئة	وصف الانحدار	المدى %	المساحة بالكيلومتر المربع	النسبة المئوية للفئة
1	منبسط جداً (Very gentle)	0 – 2	473118.5326	25
2	منبسط (Gentle)	2 – 5	841103.9669	44
3	مائل متوسط (Moderate)	5 – 10	371012.1548	19
4	مائل (Moderately steep)	10 – 15	117330.6254	6
5	شديد (Steep)	15 – 30	104168.2547	5
6	شديد جداً (Very steep)	> 30	18088.94388	1
مجموع المساحة: 1,924,822.47828 كيلومتر مربع				

المصدر: إعداد الباحثة اعتماداً على منصة GEE و (Young, 1997).

يتضح من الجدول (1) توزيع الانحدار في المملكة العربية السعودية وفقاً لتصنيف (Young, 1997) والتي تم اشتقاقها وتحليلها من نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM30) باستخدام منصة GEE. فيلاحظ أن أكبر مساحة تغطيها الفئة الثانية "منبسط" التي تمثل الانحدارات التي تتراوح بين 2-5%، حيث مثلت حوالي 44% من إجمالي المساحة المحسوبة، تليها الفئة الأولى "منبسط جداً" بانحدار يتراوح بين 0-2%، وبنسبة 25% من إجمالي المساحة المحسوبة؛ مما يدل على أن معظم أراضي المملكة العربية السعودية ذات انحدارات بسيطة. بينما مثلت الفئات المتوسطة الانحدار 25% من إجمالي مساحة المنطقة، ومثلت المناطق شديدة الانحدار 6% من إجمالي المساحة؛ مما يعكس محدودية الأراضي ذات التضاريس الحادة أو الجبلية ضمن المنطقة.

تم التوصل إلى البيانات في الجدول (1) بناءً على تحليل رقمي دقيق باستخدام أدوات الاستشعار عن بعد، ومعالجة البيانات المكانية المتقدمة المتوفرة عبر منصة GEE، والتي تتيح إمكانية معالجة مناطق واسعة بكفاءة وبدقة مكانية مناسبة دون الحاجة لإمكانات حسابية محلية عالية.



شكل (23): تصنيف الانحدار لسطح المملكة العربية السعودية المستخرج وفقاً لـ (Young, 1997) من منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة Arc GIS Pro & GEE

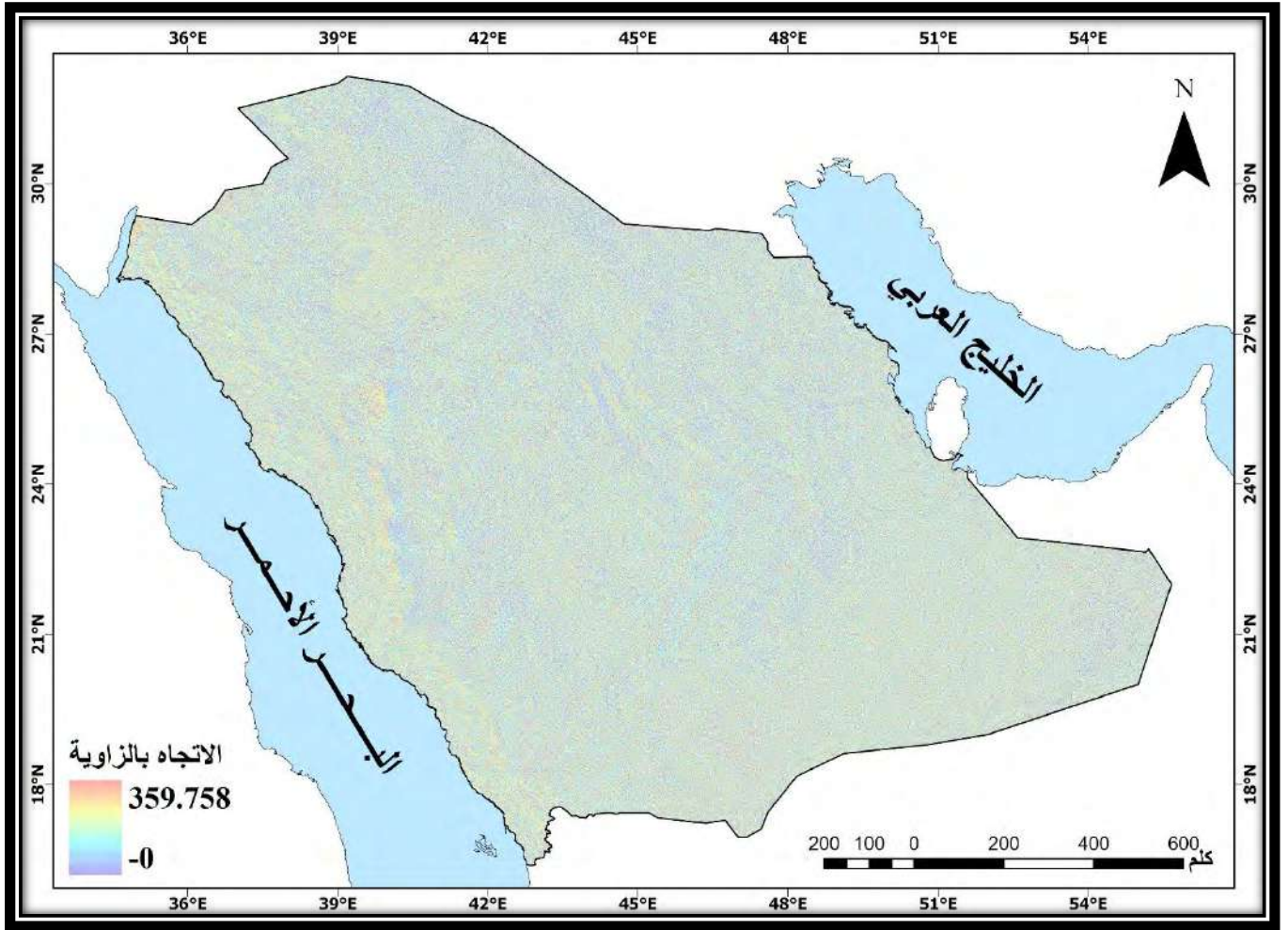
يتضح من الشكل (23) توزيع فئات الانحدار في المملكة العربية السعودية وفق تصنيف (Young, 1997)، والذي تم استخلاصه من نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM30) باستخدام منصة GEE. ونلاحظ تنوعاً واضحاً في فئات الانحدار، بدءاً من المناطق المنبسطة جداً وحتى المناطق شديدة الانحدار. وتُظهر المرتفعات الغربية، قيمًا عالية للانحدار، ما يعكس الطبيعة الجبلية الوعرة لتلك المناطق، خاصة في الجزء الجنوبي الغربي. بينما تتركز الفئات المنبسطة إلى المتوسطة الانحدار في المناطق الداخلية والشرقية من المملكة العربية السعودية، والتي تعكس مناطق تتسم بانخفاض نسبي وتضاريس أكثر استقراراً.

تم تحميل تحليل فئات الانحدار وفقاً لتصنيف (Young, 1997) من منصة GEE على شكل لوحتين لتغطية النطاق الجغرافي الكامل لمنطقة الدراسة. ثم أُجريت معالجات مبدئية شملت دمج اللوحتين في مصفوفة موحدة، وتعديل التدرج اللوني للطبقة الناتجة؛ بما يعكس بدقة فئات الانحدار في منطقة الدراسة، وإخراج الخريطة النهائية باستخدام برنامج ArcGIS Pro. تجدر الإشارة إلى أن جميع هذه الإجراءات يمكن تنفيذها كذلك باستخدام برمجيات نظم معلومات جغرافية مفتوحة المصدر، مثل QGIS.

توضح الخريطة النهائية التوزيع المكاني لفئات انحدار السطح وفقاً لتصنيف (Young, 1997)، وتُعد هذه الخريطة أداة تحليلية لفهم التباين الطبوغرافي على مستوى المملكة العربية السعودية، لما تقدمه من مؤشرات مكانية تساهم في تفسير الأنماط البيئية والمورفولوجية.

رابعاً: اتجاه الانحدار.

أُجري تحليل الاتجاه باستخدام منصة GEE على نموذج الارتفاع الرقمي الذي يغطي كامل أراضي المملكة العربية السعودية، وُنتجت خريطة تمثل زوايا الاتجاه، كما هو موضح في الشكل (24).



شكل (24): الاتجاه لسطح المملكة العربية السعودية المستخرج من منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة Arc GIS Pro & GEE

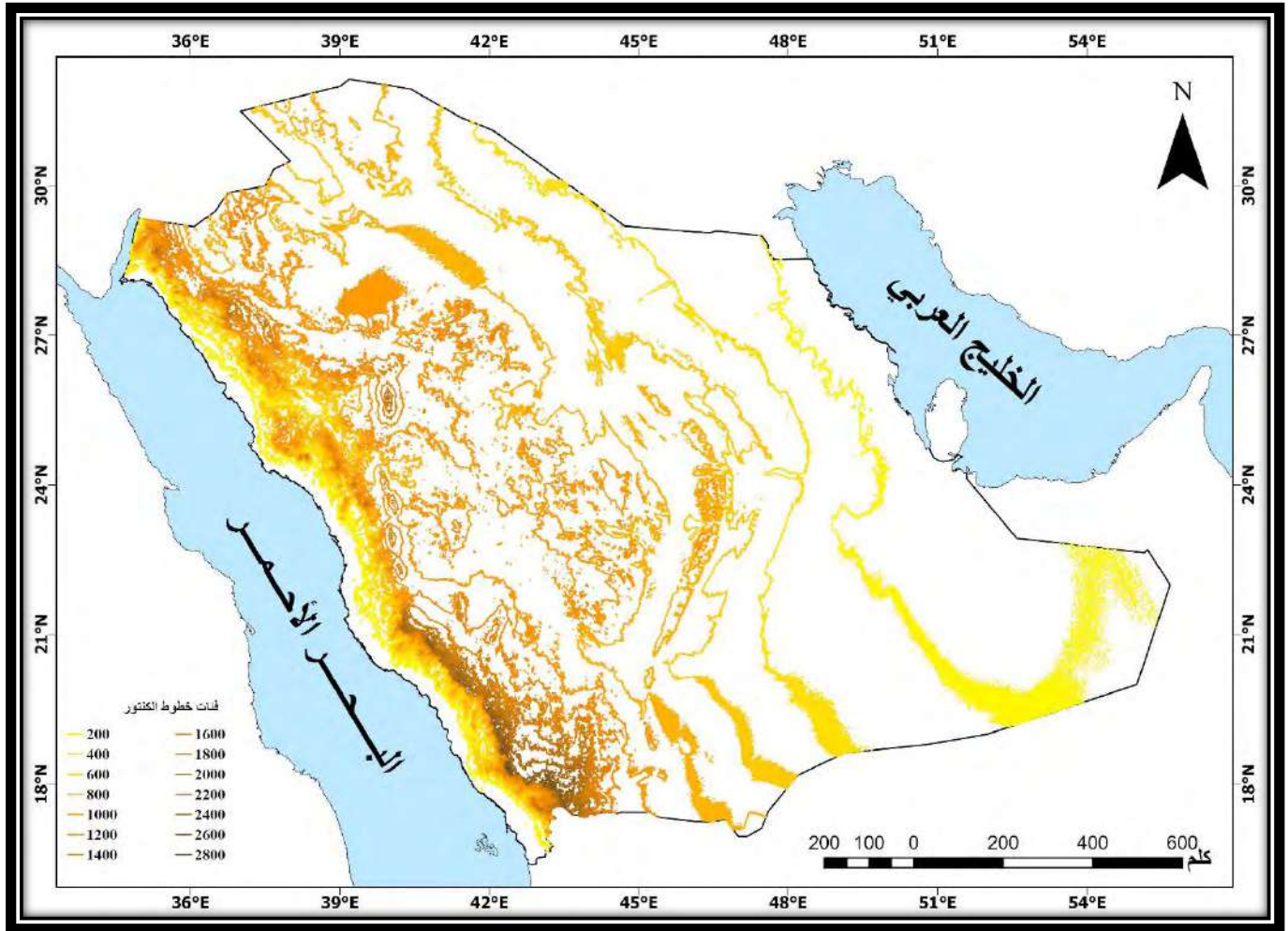
يتضح من الشكل (24) توزيع قيم الاتجاه السطحي في المملكة العربية السعودية بالدرجة، كما تم استخلاصه من نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM30) باستخدام منصة GEE. يتضح من الخريطة أن قيم الاتجاه تتباين ما بين (0-359.758) درجة، ما يعكس النطاق الكامل للاتجاهات الأفقية الممكنة، علماً بأن هذه النتيجة تتوافق مع ما اشارت إليه مقال اسري (How Aspect works, Esri, n.d.-c) "أن قيم الاتجاه تبدأ من 0 درجة (تشير إلى الشمال الحقيقي) وحتى 360 درجة (أي تعود إلى الشمال مرة أخرى)، مكونة دائرة كاملة. أما المناطق المسطحة التي لا يوجد بها اتجاه للانحدار (أي لا يوجد فيها ميل واضح)، فيُعطى لها قيمة 1-". بينما اظهرت الخريطة أن بعض المناطق السطحية التي لا تحتوي على ميل واضح لم يُحدد لها اتجاه انحدار بقيمة (0-) في التحليل المستخرج من منصة GEE، خلافاً لما هو معتاد في بعض الأنظمة الأخرى التي تعبر عن هذه المناطق بقيمة (1-)، علماً بأن هذا الاختلاف يعد اختلافاً بسيطاً في التمثيل ولم يؤثر على مضمون التحليل.

تم تحميل تحليل الاتجاه من منصة GEE على شكل ست لوحات لتغطية النطاق الجغرافي الكامل لمنطقة الدراسة. ثم أُجريت معالجات مبدئية شملت دمج اللوحات في مصفوفة موحدة، وتعديل التدرج اللوني للطبقة الناتجة بما يعكس بدقة تباين الاتجاه في منطقة الدراسة، وإخراج الخريطة النهائية باستخدام برنامج ArcGIS Pro. تجدر الإشارة إلى أن جميع هذه الإجراءات يمكن تنفيذها كذلك باستخدام برمجيات نظم معلومات جغرافية مفتوحة المصدر مثل QGIS.

توضح الخريطة النهائية التباين المكاني في اتجاهات الانحدار بشكل جيد، حيث ساهمت المعالجة اللونية في إبراز أنماط التوزيع الاتجاهي في مختلف أنحاء المملكة العربية السعودية، مما يدعم فهم الخصائص الطبوغرافية والانحدارية لسطح الأرض في منطقة الدراسة.

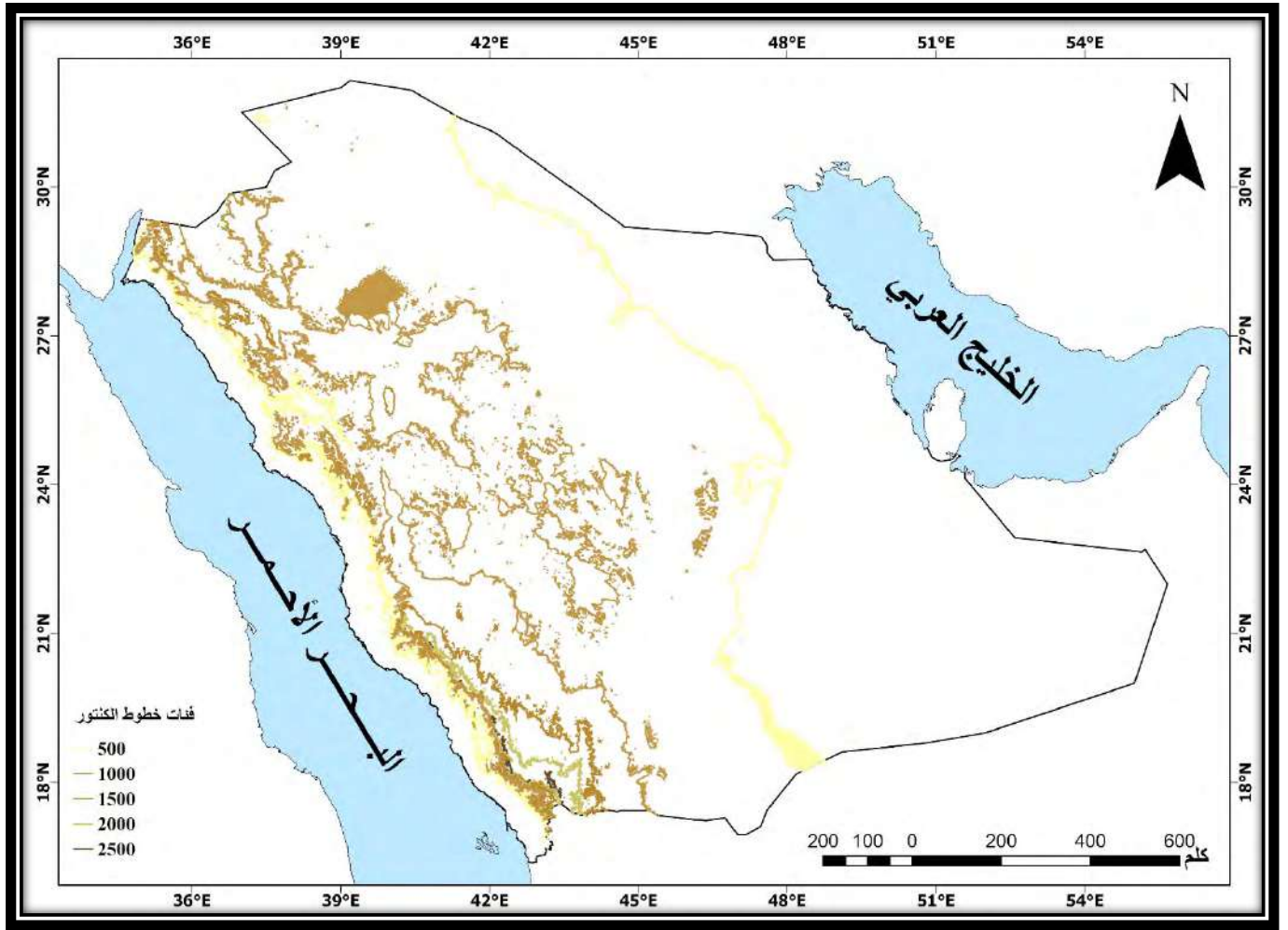
خامساً: الكنتور.

أُجري تحليل خطوط الكنتور باستخدام منصة GEE على نموذج الارتفاع الرقمي الذي يغطي كامل أراضي المملكة العربية السعودية لإنتاج طبقة بفواصل كنتوري (200 م) و(500 م)، شكل (25) و(26).



شكل (25): الكنتور لسطح المملكة العربية السعودية بفواصل كنتوري (200 م) المستخرج من منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة Arc GIS Pro & GEE



شكل (26): خطوط الكنتور لسطح المملكة العربية السعودية بفواصل كنتوري (500 م) المستخرج من منصة GEE.

المصدر: إعداد الباحثة بالاعتماد على منصة Arc GIS Pro & GEE

يتضح من الشكل (25) تحليل خطوط الكنتور بفواصل كنتوري (200 م)، والشكل (26) تحليل خطوط الكنتور بفواصل (500 م) في المملكة العربية السعودية، كما تم استخلاصهما من نموذج الارتفاع الرقمي (SRTM30) باستخدام منصة GEE. تُمثل الخطوط المتقاربة في خرائط الكنتور مناطق شديدة التضرس وتغيرات كبيرة في قيم الارتفاع، في حين تشير الخطوط المتباعدة إلى مناطق منبسطة أو قليلة التضرس ذات تغير طفيف في الارتفاع.

تم تحميل تحليلي خطوط الكنتور بفاصلي (200 م) و(500 م) من منصة GEE على شكل ست لوحات تغطي كامل منطقة الدراسة بصيغة طبقات شبكية. وقد أُجريت معالجات أولية شملت دمج اللوحات في مصفوفة موحدة، تلاها تحويل الطبقات الشبكية إلى طبقات خطية (Vector) لتمثيل خطوط الكنتور بدقة أكبر. بعد ذلك، تم تنسيق لون الخطوط وسمكها ليتناسب مع عرض تفاصيل الارتفاع في منطقة الدراسة، وإخراج الخريطين النهائيين باستخدام برنامج ArcGIS Pro وتجدر الإشارة إلى أن هذه المعالجات يمكن تنفيذها كذلك باستخدام برمجيات نظم المعلومات الجغرافية مفتوحة المصدر مثل QGIS.

أظهرت الخريطتان أن الفاصل الكنتوري الأدق (200 م) أتاح تمثيلاً أكثر تفصيلاً لسطح الأرض مقارنة بالفاصل (500 م)؛ مما يساهم في تحسين فهم دقيق للتضاريس وخاصة في المناطق الجبلية أو الوعرة⁽¹⁾.

وأخيراً نستنتج مما سبق أن منصة GEE تمثل أداة قوية وفعالة في تنفيذ تحليلات السطح على نطاقات جغرافية واسعة، كما هو الحال في المملكة العربية السعودية. فقد ساهمت المنصة في تسهيل تحميل ومعالجة نموذج الارتفاع الرقمي، وتنفيذ تحليلات متعددة تشمل: الظلال، والانحدار، وتصنيف الانحدار وفقاً لـ (Young, 1997)، والاتجاه، وخطوط الكنتور، بالإضافة إلى حساب مساحة فئات الانحدار، خلال

(1) تم اختيار الفاصل الكنتوري (200 م) و(500 م) لمناسبتها من حيث التفاصيل ومقدار تباعد وتقارب الخطوط وإمكانية عرضها على مقياس الرسم

(1:10.000.000) الذي أتاح عرض خريطة المملكة العربية السعودية في إطار ورق A4.

فترة زمنية قصيرة، وبدون الحاجة إلى موارد حاسوبية عالية محلياً. وأسهمت في إنتاج خرائط جيدة تعكس التباين الطبوغرافي والتضاريسي للمملكة العربية السعودية بوضوح بدءاً من المناطق الساحلية المنخفضة وصولاً إلى المرتفعات الجبلية.

كما أبرزت النتائج أهمية التكامل بين المنصات السحابية والبرمجيات المكتبية مثل ArcGIS Pro. إلا أن المعالجات التي تم تنفيذها باستخدام برنامج ArcGIS Pro مثل دمج الطبقات، وتطبيق التدرجات اللونية، وتحويل الطبقات الشبكية إلى خطية، وإخراج الخرائط النهائية هي إجراءات يمكن تنفيذها بالكامل باستخدام برمجيات نظم معلومات جغرافية مفتوحة المصدر مثل QGIS، دون الحاجة إلى تراخيص مكلفة أو برامج تجارية مغلقة المصدر. ويدعم هذا الاستخدام البرمجيات الحرة كبديل فعال، مما يفتح المجال أمام الباحثين والجهات الأكاديمية والمؤسسات ذات الموارد المحدودة للاستفادة من هذه المعالجات بكفاءة.

تُشير هذه التجربة إلى إمكانية الاعتماد على GEE كمنصة مركزية لمعالجة وتحليل البيانات الطبوغرافية المفتوحة المصدر، خاصة في المشاريع التي تتطلب تحليل مساحات واسعة وخلال فترة زمنية قصيرة والحصول على نتائج مكانية مناسبة، مما يُعزز من فعالية العمل الجغرافي، ويوفر بديلاً عملياً ومتاحاً للبرمجيات التقليدية في العديد من تطبيقات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية.

الخاتمة:

تركز الدراسة على الحاجة المتزايدة إلى أدوات تحليلية فعالة ومجانية في مجال نظم المعلومات الجغرافية، خصوصاً عند التعامل مع مساحات جغرافية واسعة كما في المملكة العربية السعودية. كما سعت الدراسة لإبراز فعالية منصة GEE كحل سحابي يتيح إجراء تحليلات مكانية متقدمة دون الحاجة إلى موارد حاسوبية مكلفة. بالإضافة إلى محاولة تقديم دراسة تسهم في سد الفراغ المعرفي نتيجة النقص الواضح في الأبحاث العربية التي تتناول التطبيقات على منصة GEE، وتدعم استخدام المنصات المفتوحة في الأوساط الأكاديمية والبحثية ذات الموارد المحدودة.

توصلت الدراسة إلى إنتاج سبع خرائط تمثل مختلف تحليلات السطح للمملكة العربية السعودية وهي: الارتفاع، الظلال، الانحدار، تصنيف الانحدار وفقاً لـ (Young, 1997)، الاتجاه، الكنتور بفواصل (200م و500م) باستخدام نموذج الارتفاع الرقمي المفتوح المصدر (STRM30) عبر منصة GEE. وقد خضعت هذه الطبقات المستخلصة من منصة GEE لمعالجات بسيطة شملت دمج اللوحات في مصفوفة موحدة، وتنسيق التدرج اللوني، وإخراج الخرائط النهائية للخرائط باستخدام برنامج ArcGIS Pro. بالإضافة إلى حساب مساحة فئات الانحدار. توصي الدراسة باستخدام منصة GEE كأداة فعالة لإجراء تحليلات السطح على نطاقات جغرافية واسعة بكفاءة عالية وبدون الحاجة إلى موارد حاسوبية متقدمة أو برمجيات مرخصة. كما تؤكد النتائج أهمية التكامل بين المعالجة السحابية والبرمجيات المكتبية، مع إمكانية الاستعانة ببرمجيات مفتوحة المصدر مثل QGIS لإنجاز المهام النهائية بكفاءة. وتدل هذه التجربة على أن GEE يمكن أن تُشكل منصة مركزية لمعالجة وتحليل البيانات الطبوغرافية المفتوحة المصدر، بما يفتح آفاقاً أوسع أمام الباحثين والمؤسسات ذات الموارد المحدودة، ويعزز من اعتماد أدوات حرة ومرنة في مجالات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية.

قائمة المصادر والمراجع

المراجع العربية

- الرحيلي، م. ف. (2024). نظرة عامة على منصة (GEE) Google Earth Engine واستخداماتها في الدراسات البيئية. مجلة الفنون والأدب وعلوم الإنسانيات والاجتماع، 111، 232-249. <https://doi.org/10.33193/JALHSS.111.2024.1204>.
- عبد الجواد، ص. ع. (2024). النمذجة الجيومكانية للذكاء الاصطناعي باستخدام Google Earth Engine لتحليل وتوقع المناطق المهددة بأخطار الجريان السيلبي: دراسة تطبيقية في حوض وادي وتير - جنوب سيناء. مجلة وادي النيل للدراسات والبحوث الإنسانية والاجتماعية والتربوية، 6(10). https://journals.ekb.eg/article_320954.htm.
- الهيئة العامة للمساحة والمعلومات الجيومكانية. (2022). الحدود السياسية والطبيعية للمملكة العربية السعودية [Shapefile]. الهيئة العامة للمساحة والمعلومات الجيومكانية.
- هيئة المساحة الجيولوجية السعودية. (2012). المملكة العربية السعودية: حقائق وأرقام. المملكة العربية السعودية.

References

- Abijith, D., & Saravanan, S. (2022). Assessment of land use and land cover change detection and prediction using remote sensing and CA Markov in the northern coastal districts of Tamil Nadu, India. Environmental Science and Pollution Research, 29, 86055-86067. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20923-0>.

- Biswas, J., Jobaer, M. A., Haque, S. F., Shozib, M. S. I., & Limon, Z. A. (2023). Mapping and monitoring land use land cover dynamics employing Google Earth Engine and machine learning algorithms on Chattogram, Bangladesh. *Heliyon*, 9(11), e21245. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e21245>.
- Chen, C., Yang, X., Jiang, S., & Liu, Z. (2023). Mapping and spatiotemporal dynamics of land-use and land-cover change based on the Google Earth Engine cloud platform from Landsat imagery: A case study of Zhoushan Island, China. *Heliyon*, 9(9), e19654. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19654>.
- de Smith, M. J., Goodchild, M. F., Longley, P. A., et al. (2024-a). Gradient, slope and aspect. In *Geospatial Analysis* (7th ed.). Retrieved from https://www.spatialanalysisonline.com/HTML/index.html?gradient__slope_and_aspect.htm.
- de Smith, M. J., Goodchild, M. F., Longley, P. A., et al. (2024-b). Contouring. In *Geospatial Analysis* (7th ed.). Retrieved from https://www.spatialanalysisonline.com/HTML/index.html?gradient__slope_and_aspect.htm.
- Gandharum, L., Hartono, D. M., Karsidi, A., & Ahmad, M. (2022). Monitoring urban expansion and loss of agriculture on the North Coast of West Java Province, Indonesia, using Google Earth Engine and intensity analysis. *The Scientific World Journal*, 2022, 3123788. <https://doi.org/10.1155/2022/3123788>.
- Esri. (n.d.-a). How Hillshade works. Retrieved May 9, 2025, from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-hillshade-works.htm>.
- Esri. (n.d.-b). How Slope works. Retrieved May 9, 2025, from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-slope-works.htm>.
- Esri. (n.d.-c). How Aspect works. Retrieved May 9, 2025, from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-aspect-works.htm>.
- Esri. (n.d.-d). How Contouring works. Retrieved May 9, 2025, from <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/3d-analyst/how-contouring-works.htm>.
- Gandhi, U. (2024). JavaScript and the Earth Engine API. In J. A. Cardille, M. A. Crowley, D. Saah, & N. E. Clinton (Eds.), *Cloud-Based Remote Sensing with Google Earth Engine: Fundamentals and Applications* (pp. 3–18). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-26588-4_1
- Google Earth Engine. (n.d.). USGS/SRTMGL1_003 - SRTM GL1 Global 1 arc second. Retrieved May 9, 2025, from https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/USGS_SRTMGL1_003#description
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>.
- Gxokwe, S., Dube, T., & Mazvimavi, D. (2022). Leveraging Google Earth Engine platform to characterize and map small seasonal wetlands in the semi-arid environments of South Africa. *Science of the Total Environment*, 803, 150139. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150139>.
- Hemati, M., Hasanlou, M., Mahdianpari, M., & Mohammadimanesh, F. (2023). Iranian wetland inventory map at a spatial resolution of 10 m using Sentinel-1 and Sentinel-2 data on the Google Earth Engine cloud computing platform. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195, 558. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11202-z>.
- Jafarzadeh, H., Mahdianpari, M., Gill, E. W., & Mohammadimanesh, F. (2024). Enhancing wetland mapping: Integrating Sentinel-1/2, GEDI data, and Google Earth Engine. *Sensors*, 24(5), 1651. <https://doi.org/10.3390/s24051651>.
- Mell, P., & Grance, T. (2011). The NIST definition of cloud computing (Special Publication 800-145). National Institute of Standards and Technology. <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/Legacy/SP/nistspecialpublication800-145.pdf>
- Mohamed, I. (2023). Using Google Earth Engine to extract DEM data and calculate slope, aspect, and hillshade [Video]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=Z4EcN_ToQ5Y
- Mohamed, I. (2024). Extract contour line in Google Earth Engine [Video]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=4lWAX6zO04I>

- Murtaza, K. O., Shafai, S., Shahid, P., & Romshoo, S. A. (2023). Understanding the linkages between spatio-temporal urban land system changes and land surface temperature in Srinagar City, India, using image archives from Google Earth Engine. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(49), 107281–107295. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28889-9>.
- Padarian, J., Minasny, B., & McBratney, A. B. (2015). Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping. *Computers & Geosciences*, 83, 80–88. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.07.003>.
- Safanelli, J. L., Poppiel, R. R., Ruiz, L. F. C., Bonfatti, B. R., Mello, F. A. O., Rizzo, R., & Demattê, J. A. M. (2020). Terrain analysis in Google Earth Engine: A method adapted for high-performance global-scale analysis. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(6), 400. <https://doi.org/10.3390/ijgi9060400>.
- Young, A. (1972). Slope classification for soil conservation. *East African Agriculture and Forestry Journal*, 37(1), 50–55. <https://doi.org/10.1080/00128325.1972.11662453>.