Wadi Alshatti University Journal of
Pure and Applied Sciences

مجلة جامعة وادي الشاطئ
للعلوم البحتة والتطبيقية

Volume 4, No. 2, Jule-December 2026 Online ISSN: 3006-0877 المجلد 4، الاصدار 2، يوليو- ديسمبر 2026

RESEARCH ARTICLE ENVIRONMENTAL SCIENCES

Applying Experimental Mathematical Models to Monitor Soil Erosion and Degradation in Al-Jabal Alkhdar, Libya

Murad M. Aburas [1,*], Mohammed S. Yousef [2]

[1] Soil & Water Department, Faculty of agriculture, Omar Al-Mukhtar University, Elbieda, Libya
[2] Environmental Sciences Department, Faculty of Science Al-Marj, Benghazi University, Libya

ARTICLE HISTORY
Received 10 August 2026
Revised 15 October 2026
Accepted 29 October 2026
Online 02 November 2026

KEYWORDS
Water erosion;
Soil degradation;
Experimental models.

ABSTRACT

Soil erosion by rainwater and surface runoff is a major cause of the degradation of slope lands in Al_Jabal Alkhdar, Libya. The current study tested, compared and evaluated some empirical mathematical formulas for estimating water erosion that are easy to apply and usable in data-limited areas. The study used the equation (RUSLE) and the Morgan-Fenny equation (MMF) in measurements and calculations to estimate annual soil erosion by rainfall. Erosion risk maps were also prepared using climate, soil, topography, and vegetation cover data. To assess the validity of the empirical formulas, statistical comparisons were made against the field estimation of erosion, measured under natural rainfall conditions and rainfall simulation experiments. The results for both equations showed that Typical Mediterranean Red soils (TR) were the least susceptible to erosion and the most resistant to water erosion, while Shallow Mediterranean Red soils (LR) were the most susceptible to erosion. Empirical models have agreed that slight to moderate slopes are best suited for agricultural investment without causing increased soil degradation when the main crops are fodder and grain crops, especially barley, even in the presence of fruit trees. The empirical models under comparison did not agree on the estimated annual loss amounts, as the RUSLE model ranged between moderate to severe, while losses ranged from slight to moderate according to the MMF model. Comparing the results of the empirical equations with the results of the field measurements confirmed that the MMF model was the closest to the actual conditions, recording annual losses not exceeding 5 tons per hectare, and achieving good statistical correlation with the field measurements, reaching R=0.69. While the RUSLE model showed an overestimation, recording annual losses of up to 30 tons per hectare on slight to moderate slopes, and achieving a lower degree of correlation with field measurements of R=0.52. The current study encourages the use of highly efficient and low-cost quantitative experimental measurement tools that may contribute to a realistic assessment of the phenomenon of water erosion on the slopes of Al-Jabal Alkhdar. These tools can also contribute to expanding, developing and monitoring the natural resources database, which may contribute in the future to the optimal application of recommendations and requirements for integrated and sustainable management on arid and semi-arid lands in Libya, and reduce the risks of erosion and flooding from deteriorating slopes.

تطبيق بعض النماذج الرياضية التجريبية في رصد انجراف وتدهور التربة بالجبل الأخضر

مراد ميلاد أبوراس[1،*]، محمد صالح يوسف [2]

الكلمات المفتاحية
التعرية المائية
تدهور التربة
المعادلات التجريبية.

الملخص

تعرية التربة بواسطة مياه الامطار والجريان السطحي تعتبر سببا رئيسيا لتدهور أراضي المنحدرات بالجبل الأخضر بليبيا. قامت الدراسة الحالية باختبار ومقارنة وتقييم بعض الصيغ الرياضية التجريبية في تقدير التعرية المائية والتي تتصف بسهولة التطبيق وقابلية الاستخدام بالمناطق محدودة البيانات. استخدمت الدراسة المعادلة العامة المعدلة لفقد التربة RUSLE ومعادلة مورجان مورجان فيني MMF في قياسات وحسابات تقدير الانجراف السنوي من التربة بواسطة الامطار. كما تم اعداد خرائط درجات مخاطر التعرية المعدة من بيانات المناخ والتربة والطبوغرافيا والغطاء النباتي. لتقييم كفاءة الصيغ التجريبية أجريت المقارنات الإحصائية لنتائجها مع النتائج الحقلية لتقدير التعرية والمقاسة تحت ظروف الامطار الطبيعية وتجارب محاكاة الهطول المطري. أظهرت النتائج لكلا المعادلتين ان ترب البحر المتوسط الحمراء النموذجية TR كانت هي الأقل قابلية للانجراف والأكثر مقاومة لعوامل التعرية المائية، بينما كانت ترب البحر المتوسط الحمراء الضحلة الرندزينا LR هي الأكثر قابلية للانجراف. كما اتفقت حسابات الصيغ التجريبية على ان الانحدارات الخفيفة الى المتوسطة هي الأنسب للاستثمار الزراعي دون التسبب بتزايد تدهور التربة عندما تكون المحاصيل الرئيسية هي محاصيل الاعلاف والحبوب وخصوصا الشعير حتى في وجود الأشجار المثمرة. لم تتفق الصيغ التجريبية

*Corresponding author
https://doi.org/10.63318/waujpasv4i2_65
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

تحت المقارنة في كميات الفقد السنوي المقدرة حيث تراوحت حسب النموذج RUSLE ما بين المعتدلة والشديدة، بينما تراوحت الفواقد ما بين الخفيفة والمعتدلة حسب النموذج MMF. مقارنة نتائج المعادلات التجريبية مع النتائج المقاسة حقليا أكدت ان النموذج MMF كان الأقرب للواقع مسجلا فواقد سنوية لم تتجاوز 5 طن للهكتار، ومحققا ارتباطا احصائيا جيدا مع القياسات الحقلية بلغ R=0.69. بينما اظهر النموذج RUSLE مبالغة في التقديرات مسجلا فواقد سنوية تجاوزت 30 طن للهكتار على مستوى المنحدرات الخفيفة الى المتوسطة، ومحققا درجة ارتباط اقل مع القياسات الحقلية بلغت R=0.52. الدراسة الحالية تشجع على استخدام أدوات قياس تجريبية كمية عالية الكفاءة وقليلة الكلفة قد تسهم في التقييم الواقعي لظاهرة التعرية المائية على منحدرات الجبل الأخضر، كما يمكن لتلك الأدوات ان تشارك في توسيع وتطوير قاعدة بيانات الموارد الطبيعية ومتابعتها ومراقبتها بما قد يساهم مستقبلا في التطبيق الأمثل لتوصيات ومتطلبات الإدارة المتكاملة والمستدامة على الاراضي الجافة وشبه الجافة في ليبيا، وبما يقلل من مخاطر الانجرافات والفيضانات القادمة من المنحدرات المتدهورة..

المقدمة

تعرية التربة بواسطة الامطار هي إحدى عوامل تدهور الأراضي الأكثر شيوعا، ويعتبر تدهور التربة بواسطة التعرية المتسارعة accelerated erosion مشكلة خطيرة خصوصا في المناطق الجافة وشبه الجافة. ويمكن تعريف تدهور التربة بانه تغير سلبي في خصائص التربة الفيزيائية والكيميائية يساهم في تناقص جودتها وانتاجيتها [1]. تعاني الأراضي شبه الجافة على طول الساحل الليبي من تزايد مستمر في تدهور التربة الناتج عن التعرية بالأمطار، وهو الأمر الذي يتطلب الرصد والمتابعة المتواصلة والتقييم الدقيق ومحاولة الوصول الى حلول مستدامة تساهم في الحد من الخسائر المستمرة في هذا المورد الهام والمحدود. استخدم المختصون والخبراء طرق متنوعة في الرصد والحصر والتقييم منها طرق حقلية مباشرة وطرق معملية غير مباشرة، كما تم استخدام بعض المعادلات والنماذج الرياضية والفيزيائية وربطها بالتقنيات الرقمية الحديثة [2].

أستخدم البحاث في علوم التربة والمياه والجيومورفولوجيا والهيدرولوجيا المعادلات التجريبية ذات الأساس الاحصائي لسنوات طويلة، وهي صيغ رياضية تعتمد على الملاحظات والتجارب المعملية والحقلية لوصف وتفسير ظاهرة انجراف التربة عن طريق الربط بين خصائص وكميات فيزيائية مختلفة. تم بناء هذه المعادلات من خلال العلاقات الإحصائية المعنوية بين المتغيرات المدروسة (المستقلة والتابعة)، ومنها على سبيل المثال الربط بين كميات فقد التربة بالتعرية مع الهطول المطري والجريان السطحي [3].

استخدمت المعادلة العامة لفقد التربة المعدلة RUSLE (The Revised Universal Soil Loss Equation) كصيغة تجريبية معدلة عن سابقتها USLE [4]مع مرونة أكثر بما يمكنها من التعامل مع الطبيعة الديناميكية لبعض خصائص التربة. كما نجحت هذه المعادلة في الانتشار والتطبيق بمناطق مناخية مختلفة حول العالم، كما تم تطبيقها على ترب البحر المتوسط والأراضي شبه الجافة، وحققت نتائج مقبولة تحت ظروف طبوغرافيا وأنواع تربة واستخدامات أراضي متنوعة [5-7] حيث لوحظ تحسن مستوى الدقة والتقييم بعد إجراء التعديلات الملائمة لظروف تلك المناطق وإدخال التقنيات الرقمية كأداة مساعدة في توفير البيانات واجراء الحسابات [8, 9]. طور [10] معادلة لحساب فقد التربة من أراضي المنحدرات الزراعية والرعوية، النموذج MMF احتفظ ببساطة التركيب التي تتصف بها معادلة USLE مع تحسين الاستجابة والفهم لعوامل وعمليات التعرية، وكذلك الربط ما بين الجوانب الهندسية الزراعية والخصائص الجيومورفولوجية. طبق النموذج بجنوب افريقيا واثيوبيا [11] معطيا نتائج مقبولة وواعدة يمكن البناء عليها وتطويرها، وكذلك الحال في نطاق أراضي البحر المتوسط [12].

يظل التساؤل مستمرا حول مستوى دقة نتائج النماذج الرياضية التجريبية عند مقارنتها مع القياسات المباشرة بالحقل او التقديرات المعملية، حيث يتأثر عمل النموذج بمحدودية البيانات الأساسية بالدول الأقل نموا، كما تتأثر دقة نتائجه بتنوع المناطق المناخية التي يستخدم فيها. مع ذلك، تبقى الصيغ التجريبية مفيدة وصالحة للعمل الى حد كبير عندما يكون الهدف من الدراسات هي المقارنة النسبية بين أنواع الترب أو الانحدارات او الاستخدامات لأراضي مختلفة، كما انها بلا شك أداة نافعة مفيدة في المناطق التي لا تتوفر لها قاعدة بيانات ومعلومات كافية [13]. في إقليم الجبل الأخضر حيث تلعب التعرية بالأمطار دورا رئيسيا في تدهور التربة وانتاجيتها ضمن بيئات هشة، سيكون من الضروري تنويع وتطوير الأدوات والتقنيات التي تتطلب الحد الأدنى من البيانات والتي تتصف بسهولة التطبيق وانخفاض التكاليف بما يساعد في استمرار ونجاح عمليات الرصد والحصر والتقييم والمتابعة. تنطلق الفرضية الرئيسة للدراسة من أن الفجوة بين غياب النماذج الرياضية المحلية وعدم استغلال تقنيات الرصد الرقمي الحديثة، أدت إلى غياب قاعدة بيانات موثوقة ومستمرة لتتبع ظاهرة انجراف التربة. تهدف هذه الدراسة الى تقييم واختيار النماذج الرياضية الأكثر ملائمة للظروف البيئية لمنطقة الدراسة، بما يضمن تقديرا أكثر دقة واستدامة لظاهرة تدهور الأراضي الرعوية والزراعية في الجبل الأخضر.

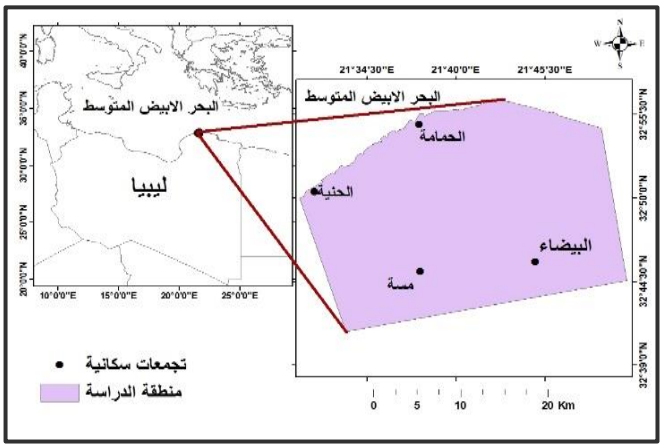
الطرق ومواد البحث

منطقة الدراسة Study area: تم تطبيق واستخدام النماذج التجريبية على أراضي وترب منطقة الوسيطة بالجبل الأخضر شمال شرق ليبيا. تقع الأراضي تحت الدراسة ما بين خطي طول 30´ 21° و45´ 21° ودائرتي عرض 45´ 32° و00´ 33، الشكل (1). تتصف المنطقة بتضاريس متنوعة ودرجات انحدار مختلفة، ويصل اقصى ارتفاع الى 400 متر فوق مستوى سطح البحر تتناقص تدريجيا بالاتجاه شمالا حتى يصل الى ارتفاع 20 متر فقط.

يسود بالمنطقة مناخ البحر المتوسط شبه الجاف (Mediterranean semi-arid) مع هطول مطري يتجاوز 400 مم سنويا للفترة من أكتوبر الى ابريل في اغلب الأحيان. ينتشر على متحدراتها الغطاء النباتي الطبيعي المميز للمنطقة من أشجار وشجيرات دائمة الخضرة، مع توسع كبير ومستمر في مساحات الأراضي الزراعية على حساب الغطاء الطبيعي من زراعات مروية وبعلية ونشاط رعوي مكثف.

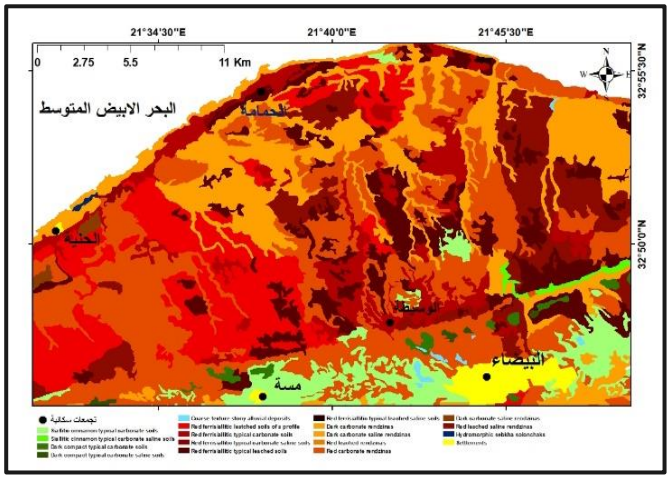
الشكل (2) يظهر خريطة التربة 1: 50 000 الصادرة عن الدراسة الروسية Selkhoz Prom Export [14] حيث العديد من الأنواع السائدة والموجودة بمنطقة الوسيطة بنسب مختلفة مثل: الترب الحديدية السليكاتية الحمراء(Red Ferrisiallitic Soils (Rhodoxeralfs والمعروفة بترب البحر

المتوسط الحمراء او التيرا روزا (الجيرية والنموذجية).



الشكل 1: منطقة الدراسة بالوسيطة شمال مدينة البيضاء (بواسطة الباحث باستخدام ArcGIS (2026).

وكذلك ترب الرندزينا الجيرية الضحلة (الحمراء والقاتمة) Rendzinas (Lithic Rendolls)، حسب التصنيفات الروسي والامريكي على التوالي، كما تحتوي المنطقة وبنسب اقل على الترب الجبلية القرفية (Xerocherepts) Siallitic Cinnamon [14, 15].



الشكل 2: خريطة التربة لمنطقة الوسيطة، (بواسطة الباحث باستخدام ArcMap 10.8، اعتمادا على بيانات خريطة الدراسة الروسية Selkhoz Prom Export [14]

منهجية الدراسة ومصادر البيانات

طبقت الدراسة المنهج الهجين المتكامل Integrated Hybrid Approach وهو منهج وصفي تحليلي منظم للبيانات، ويستفيد من التطبيقات الكمية للنمذجة الرياضية والتقنيات الجيو معلوماتية Geo-Informatic، مما يضمن دقة أعلى في معالجة البيانات المكانية والإحصائية. حيث اعتمدت المنهجية على عدة مراحل أساسية وهي: مرحلة جمع واعداد البيانات سواء كانت رقمية او مناخية او مكانية – مرحلة التطبيق والمعايرة الرياضية، حيث طبقت بعض النماذج الرياضية التجريبية لحساب معدلات التعرية – مرحلة التحقق والمعايرة الميدانية (validation)، من خلال المقارنات الميدانية والملاحظات المباشرة والاختبارات الإحصائية للحكم على مصداقية النموذج ومدى ملائمته للجبل الأخضر.

تم استخدام خرائط التربة الصادرة عن الشركة الروسية Selkhoz Prom Export [14]، وتحويلها الى خرائط رقمية واقتطاع النطاق الجغرافي لنوع التربة السائد بموقع الدراسة باستخدام برنامج ArcMap 10.8. كما تم الحصول على بيانات الاستشعار عن بعد من المرئيات الفضائية للقمرين الصناعيين Landsat 8 OLI وLandsat 9 OLI-2 بدقة مكانية 30 * 30 مترا، والتي تم تحميلها من منصة هيئة المسح الجيولوجي الامريكية [16]. وقد عولجت هذه البيانات باستخدام برنامج ArcMap 10.8 لاستخلاص المؤشرات الطيفية والمتغيرات البيئية لمنطقة الدراسة.

استخدمت الدراسة بيانات هطول مطري حقيقية مسجلة لمنطقة الجبل الأخضر بواسطة الباحث الرئيسي في الدراسة الحالية باستخدام جهاز المطر المسجل (rain gauge recorder) وذلك للفترة 1994-1997. كما استخدمت بيانات هطول بالمطر الصناعي تحت الظروف المعملية تخص نفس الباحث [2]، كما استخدمت الدراسة بيانات هطول مطري لمنطقة الجبل الأخضر للفترة 2020-2023 [17].

النماذج الرياضية التجريبية المطبقة بالدراسة:

طبقت الدراسة الحالية صيغ رياضية ذات أساس احصائي تعتمد على دراسة بيانات تجريبية من الحقل باستخدام مقاييس مثل الارتباط والانحدار لاختبار العلاقة بين المتغيرات والعوامل والمؤثرات في ظاهرة تعرية وتدهور الأراضي.

المعادلة RUSLE: تم استخدام المعادلة العامة لفقد التربة المعدلة والمعروفة بالرمز RUSLE والمطورة عن النموذج القديم وهي المعادلة USLE [4] تم اجراء بعض التعديلات عليها لمعالجة نقاط الضعف السابقة ومحاولة تحسين دقة المحاكاة لعمليات التعرية تحت ظروف الامطار الطبيعية. هذه المعادلة تحسب معدلات فقد التربة السنوية او الموسمية كما تساعد على التخطيط لعمليات ومعاملات حفظ التربة وادارتها بشكل مستدام تحت سيناريوهات مختلفة [18]. استفادت هذه المعادلة من تقنيات الاستشعار عن بعد وتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية في انتاج خرائط التنبؤ بمخاطر التعرية وتوزيعها المكاني Soil erosion risk maps. حققت المعادلة نتائج مقبولة وساهمت في تحسين توصيات إدارة الأراضي المتدهورة تحت ظروف البحر المتوسط [7].

تعتمد المعادلة (1) على عدد 6 عوامل تمثل تأثير الامطار والتربة والطبوغرافيا واستخدام الأرض على شدة التعرية:

$$A = R \times K \times LS \times C \times P \qquad (1)$$

حيث تمثل R عامل جارفية (إعرائية) الهطول بوحدة الطاقة لكل وحدة مساحة (جول/متر^2 او ميجا جول للهكتار)، والعامل K تمثل قابلية التربة للانجراف (الانجرافية) بوحدة الوزن لكل وحدة طاقة (طن لكل ميجا جول) وقد يشار لها بدون وحدات عند استخدام الشكل البياني المقترح لتقدير هذا العامل [4]، وحيث ان باقي العوامل وهي LS عامل الطبوغرافيا وC عامل إدارة الغطاء النباتي وP عامل إجراءات حفظ التربة هي عوامل بدون وحدات، فان الناتج النهائي وهو A يمثل فقد التربة السنوي بسبب التعرية المائية بالطن للهكتار.

تم حساب العامل R بالمعادلة (2) باستخدام بيانات الامطار وأقصى شدة الهطول I_{30} وحسابات الطاقة الحركية للهطول E، حيث:

$$R = EI30 \div 100 \qquad (2)$$

بوحدات (MJ mm ha^{-1} year^{-1}) بالاستفادة من بيانات جهاز قياس المطر المسجل Rain gauge recorder [18]، وحسب الطريقة الموضحة في المصادر

المتخصصة [13].

لتطبيق هذه المعادلة في الدراسة الحالية تم استخدام قيمة محددة للعامل R السنوية على كامل منطقة الوسيطة باعتبارها منطقة مناخية واحدة وتمثلها محطة رصد مناخي واحدة. تم اعتماد الرقم R = 119 ميجا جول للهكتار، وهي قيمة مقاسة ومحسوبة باستخدام محطة قياس مطري ميدانية لقياس عمق وشدة الهطول I_{30} بالملم للساعة باستخدام مقياس المطر المسجل [19]، وحساب الطاقة الحركية للهطول EI_{30} بالطرق المعتمدة لدى إدارة صيانة التربة بوزارة الزراعة الأمريكية [4]. للتأكيد قورنت هذه القيمة للعامل R بالقيمة المحسوبة بمعادلة Fournier المعدلة [20]، والمستخدمة من طرف العديد من الباحثين [17]، والتي بلغت 88 ميجا جول للهكتار. كما تم مقارنتها بقيم العامل R السنوية المحسوبة بالأردن تحت ظروف مناخ البحر المتوسط الجاف وشبه الجاف [21] والتي تراوحت ما بين 77.5 و324 ميجا جول للهكتار في مناطق مختلفة جنوب غرب الأردن، وهي كذلك ضمن مدى القيم في نطاق الأراضي شبه الجافة بالأردن والذي تراوح ما بين 40 و160 ميجا جول للهكتار [22].

اما العامل K فتم الحصول عليه في المعادلة (3) من خلال معلومات التربة مثل القوام والبناء والرشح والمحتوى من المادة العضوية وباستخدام الصيغة التجريبية المقترحة [6].

$$1 - K = \frac{[2.1 \times 10^{-4}\,(12 - OM)M^{n1.14} + 3.25(S-2) + 2.5\,(P-3)]}{7.95} \times 100 \quad (3)$$

حيث كانت K ممثلة بالوحدات التالية: $t\ ha\ h\ ha^{-1}\ MJ^{-1}mm^{-1}$

بينما تمثل M ناتج: (حجم حبيبات التربة 0.002 مم – 0.1 مم) * (% للسلت + % للرمل)، OM تمثل نسبة المادة، S رتبة بناء التربة، P درجة نفاذية الماء داخل قطاع التربة. كلما زادت قيمة العامل K واقتربت من الواحد الصحيح دل على قابلية اعلى للانجراف والفقد. تم اعداد خريطة لدرجات قابلية التربة للتعرية اعتمدت على خريطة أنواع التربة كخريطة أساس وعلى القيمة المحسوبة للعامل K لمنطقة الدراسة.

عامل الطبوغرافيا LS يجمع تأثير شدة الانحدار S بالدرجات وطول الانحدار L بالمتر او القدم. يمثل طول الانحدار المسافة الأفقية ما بين بداية حدوث الجريان الى نقطة الترسيب، ومع ان التعرية تزداد بزيادة طول الانحدار لارتباطها بالتدفق السطحي الا ان تأثير شدة الانحدار يظل اهم نسبيا [18].

تم حساب عامل الطبوغرافيا من المعادلة (4) على مستوى الحقل او المنحدر كالتالي:

$$LS = (\lambda / 22.1)^m \times (65.41 \times sin^2\theta) + (4.56 \times \sin\theta) + 0.065) \quad (4)$$

تتناسب التعرية مع طول الميل المرفوع للقوة m، وتتراوح قيمة m ما بين 0.2 إلى 0.5، وتكون قيمة m = 0.2 عندما تكون الميول أقل من 1 %، و0.3 للميول من 1 – 3 %، وتساوي 0.4 للميول من 3.1 – 4.9 %، وتكون قيمة m = 0.5 لكل ميل يساوي 5 % أو أكثر، يعطي الشكل البياني اللوغاريتمي تعديلا لفقد التربة من المنحدر تحت الدراسة قياسا الى منحدر الشريحة القياسية الأصلي (محطة الأبحاث التابعة لإدارة حفظ التربة التابعة لوزارة الزراعة الامريكية) التي استنبطت منها عوامل المعادلة، وهي شريحة بطول 72 قدم وانحدار 9% والتي لها قيمة LS = 1، [17].

اما على مستوى احواض الاودية فقد طورت المعادلة RUSLE للعمل ضمن بيئة برامج وتطبيقات نظم المعلومات الجغرافية، حيث تم حساب العامل LS في المعادلات (5،6) من بيانات نموذج الارتفاع الرقمي DEM بدقة مكانية 30*30م، وذلك لكل وحدة مساحة داخل منطقة الدراسة، حيث يمكن لأدوات التحليل المكاني لبرنامج Arc GIS انشاء طبقات الانحدار المختلفة وانتاج خريطة عامل الطبوغرافيا LS اعتمادا على معادلة شبكة تراكم التدفق السطحي [24, 23]:

$$L = \left(FlowAccumulation \times \frac{CellSize}{22.1}\right)^{0.4} (SinSlope \times 0.0896)^{1.3} \quad (5)$$

$$LS\,(r) = (m+1) \times \left[\frac{A1}{a^\circ}\right]^m \times \left[Sin\,b\,\frac{r}{b^\circ}\right]^n \quad (6)$$

تم اعداد خرائط درجات خطورة التعرية المعدلة بناء على شدة وطول الانحدار وذلك لكل وحدة مساحة من منطقة الدراسة، تم تعديل خرائط الانجرافية المؤسسة على خريطة أنواع التربة وذلك بتعديل كميات وخطورة الفقد لكل نوع تربة حسب خصائص الانحدار داخل ذلك النوع مما يتيح اعداد خريطة أكثر دقة وأكثر تفصيل.

العامل C يمثل تأثير الغطاء النباتي واستخدام الأرض حيث يلعب دورا في تخفيف أثر صدمة قطرات المطر وقدرته على تفكيك التربة ونقلها بالجريان السطحي. تتأثر قيمة التعرية والجريان مباشرة بقيمة هذه العامل وتتراوح ما بين الواحد الصحيح للترب العارية من الغطاء والمفككة الى حوالي 0.001 تحت غطاء الغابات. جهز Roose [25] جدولا بالقيم المختلفة للعامل تحت الاغطية النباتية والاستخدامات المختلفة وذلك تحت ظروف غرب افريقيا ودولة تونس الجدول (1)، تمت الاستفادة منها في هذا البحث.

الجدول 1: قيم عامل الغطاء النباتي (C) المصدر[25] :

غرب افريقيا	نوع الغطاء النباتي	قيمة عامل الغطاء النباتي C
1	التربة العارية	1
2	غابة، غابة كثيفة، محصول جيد التغطية	0.001
3	السافانا، المراعي في حالة جيدة	0.01
4	السافانا، المراعي المحترقة أو الرعي الجائر	0.1
5	الذرة، الدخن، الذرة الرفيعة (كدالة على الغلة)	0.4 -0.90
تونس	نوع الغطاء النباتي	قيمة عامل الغطاء النباتي C
1	التربة العارية البور	1
2	أشجار الفاكهة	0.9
3	القمح الشتوي	0.7
4	الحبوب بالتناوب	0.4
5	المحاصيل العلفية	0.2
6	الحبوب بالتناوب + المحاصيل العلفية	0.1
7	المراعي المحسنة أو المعدلة	0.01

تم تحسين قيم العامل C المحسوبة لمنطقة الدراسة باستخدام التقنيات الرقمية الحديثة وصور الاقمار الصناعية بدرجة دقة مناسبة، حيث تم

استخدام أدوات برنامج Arc GIS في اعداد خريطة الغطاء النباتي واستخدام الأراضي وإعادة تقييم درجات الحماية التي يوفرها الغطاء النباتي. بعد ذلك تم تعديل خرائط مخاطر التعرية لكل نوع تربة ولكل حالة انحدار حسب الاختلافات في الغطاء النباتي للأراضي تحت الدراسة.

ملاحظة: في جميع الحسابات الأولية تم افتراض عدم تطبيق أي ممارسات حافظة للتربة، وبالتالي تم تعيين P = 1، وتم لاحقا تعديل النتائج عند أدخال عامل الغطاء النباتي C وفقا للسيناريوهات الزراعية المختلفة.

المعادلة MMF: تم استخدام المعادلة التجريبية MMF لتقدير تعرية التربة بواسطة الأمطار water erosion، صمم هذا النموذج بواسطة [10] لتقدير التعرية ضمن مساحات محددة من الحقول والمنحدرات الزراعية. لاحقا، قام مصممو النموذج بتطويره للاستخدام على مستوى احواض الأدوية[3] . النموذج يحسب مجموع (summation) مياه الجريان السطحي total runoff (SR) لوحدة المساحة (i) والتي تشمل ماء الجريان السطحي على تلك المساحة ومساحة المنحدر الذي يعلوها، كما يحسب سعة النقل transport capacity (TC) وكميات المواد المنقولة. حساب سعة النقل transport والفصل detachment لكل وحدة مساحة (i) ومنها يحسب المعدل السنوي للتربة المنقولة سواء لوحدة المساحة او للمساحة الكلية للحوض. يوضح الشكل (3) تقدير وحساب كل من كمية فصل وتفكيك التربة بواسطة قطرات المطر F والمحسوبة بالمعادلة (7)، والجريان السطحي H المحسوب بالمعادلة (8)، كذلك مع سعة النقل TC المحسوبة بالمعادلة (9) [11].

الحسابات الخاصة بالنموذج:

$$F = 10^{-3} \times K \times KE \qquad (7)$$

حيث F: معدل فصل التربة بقطرات المطر كجم / متر^2، وK: مؤشر قابلية التربة للفصل جم / جول، وKE: الطاقة الحركية للمطر المؤثر جول / متر^2

$$H = 10^{-3} \times (0.5\,COH)\, SR^{1.5} \sin(S)\,(1 - GC) \qquad (8)$$

حيث H: معدل فصل التربة بالجريان السطحي كجم/ متر^2، وCOH تماسك سطح التربة وتقاس بوحدة الكيلو باسكال، SR: كمية الجريان السطحي بملم، S: الانحدار بالدرجات، و GC: نسبة الغطاء النباتي (0-1).

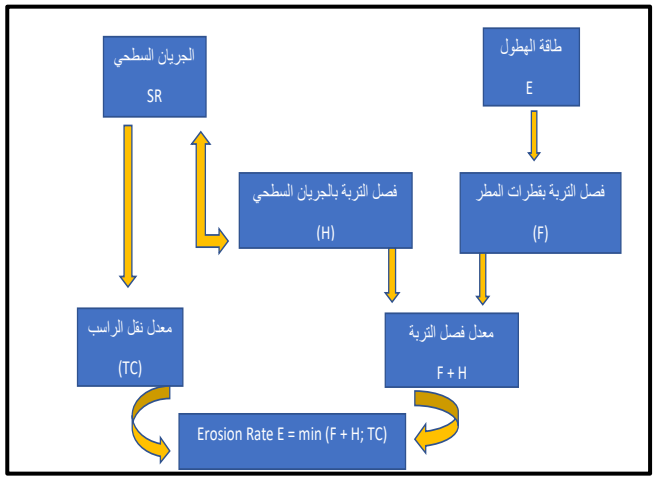
$$TC = 10^{-3} \times Cf \times SR^2 \times sin(s)^{-3} \qquad (9)$$

حيث TC هي سعة نقل التربة بالجريان السطحي كجم / متر^2 ، Cf عامل الغطاء النباتي القابل للتعديل حسب إجراءات الحماية الإضافية مثل الحراثة المخفضة وترك بقايا المحصول، SR كمية الجريان السطحي بالملم، S الانحدار بالدرجات.

4- الخطوة الأخيرة هي جمع قيم كل من كمية فصل التربة بالأمطار F (كجم/متر^2) مع كمية فصل التربة بالجريان السطحي H (كجم/متر^2)، ومقارنتها مع سعة نقل التربة بالجريان السطحي بالكجم / متر^2، كما هو موضح بالمعادلة (10).

للحصول على المعدل السنوي للتعرية بوحدة كجم /متر^2 او بوحدة الطن /هكتار (ضرب السابق في 10) سيتم اختيار القيمة الأقل [2, 3, 11]:

$$E = [\min(F + H), TC] \qquad (10)$$



الشكل 3: طريقة عمل النموذج الرياضي التجريبي MMF، المصدر: [11]

تم استخدام هذا النموذج وتقييمه في بعض دول افريقيا كجنوب افريقيا واثيوبيا حيث حقق نتائج مرضية عند مقارنته بالقياسات الحقلية. تم في هذه الدراسة محاولة تطبيقه ومقارنته مع النموذج التقليدي USLE او نسخته المعدلة RUSLE والذي سبق تطبيقه في ليبيا خلال العقود الماضية [19, 2] كما حقق بعض النجاحات تحت ظروف البحر المتوسط حيث تم تجربته في العديد من دول جنوب أوروبا كإسبانيا وإيطاليا والبرتغال[12] .

المقارنات الإحصائية المستخدمة في الدراسة:

تمت مقارنة المعادلتين التجريبيتين RUSLE وMMF من حيث الأفضلية والواقعية في تقدير التعرية المائية للتربة من خلال مقارنة نتائجهم باستخدام اختبارات الارتباط والانحدار مع نتائج حقلية ومعملية سابقة [19, 2]. تم استخدام الملاحظات الحقلية وتجارب شرائح قياس التعرية والاختبارات المعملية لثباتية تجمعات التربة في تقييم صلاحية هذه النماذج التجريبية في تقدير فقد التربة بالتعرية المائية لظروف منطقة الدراسة.

النتائج

النموذج RUSLE: تم حساب العامل K كمؤشر لقابلية التربة للتعرية المائية حسب أنواع الترب المختلفة بمنطقة الوسيطة وكان كما هو مبين بالجدول (2)، كما تم في نفس الجدول عرض كميات فقد التربة المحسوبة من المعادلة الأساسية A = R * K. والتي لم تأخذ في الحسبان الخصائص الطبوغرافية (العامل LS) وحالة الغطاء النباتي او نوع استخدام الأراضي (العامل C). قيم عامل قابلية التربة للتعرية K في الجدول (2) تراوحت ما بين 0.05 و 0.25 (طن لكل ميجا جول) وهي قيم في العموم تتراوح ما بين الخفيفة والمتوسطة الخفيفة.

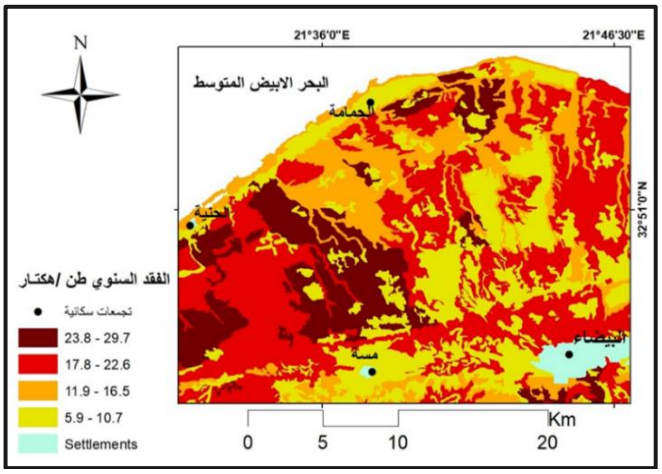
الجدول 2: قيم عامل قابلية التربة للتعرية K-RUSLE وكميات فقد التربة A لأنواع الترب المختلفة بمنطقة الوسيطة

نوع التربة	عامل قابلية التربة للتعرية K طن لكل ميجا جول	فقد التربة السنوي بالطن للهكتار (A)
Red Ferrsiallitic Typical Carbonate Soil (Calcic Rhodoxeralfs GR) ترب البحر المتوسط الحمراء الجيرية	0.10 – 0.14	11.9 – 16.5
Red Ferrsiallitic Typical leached	0.05 – 0.09	5.9 – 10.7

Soil		
(Typic Rhodoxeralfs TR)		
ترب البحر المتوسط الحمراء النموذجية		
Red Ferrsiallitic Leached soils of a truncated profile	0.20 – 0.25	23.8 – 29.7
(Lithic Rhodoxeralfs LR)		
ترب البحر المتوسط الحمراء الضحلة		
Red Carbonate Rendzinas	0.15 – 0.19	17.8 – 22.6
(Lithic Rhodic Rendolls RR)		
الترب الجيرية الضحلة الحمراء		
Dark Carbonate Rendzinas	0.10 – 0.14	11.9 – 16.5
(Lithic Sombric Rendolls SR)		
الترب الجيرية الضحلة القاتمة		
Siallitic Cinnamon Typical carbonate Soil	0.10 – 0.14	11.9 – 16.5
(Xerocherepts XR)		
الترب الجبلية القرفية السيليكاتية		

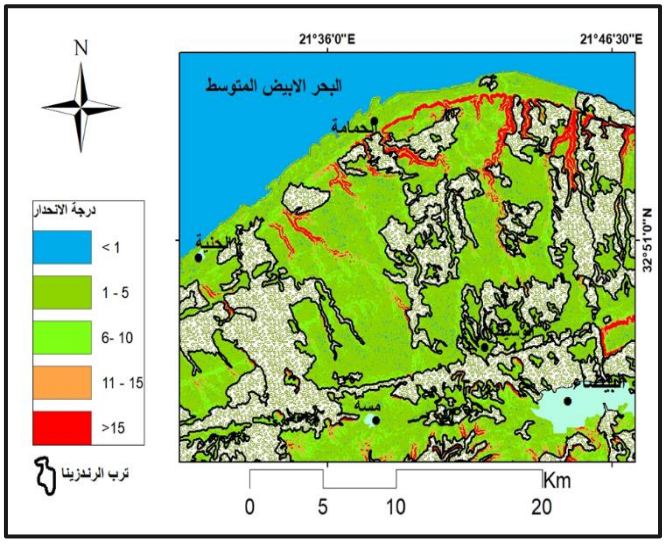
الرموز بين القوسين بالجدول هي من اقتراح المؤلفين لاختصار مسميات التربة وتسهيل المقارنة فقط. المصدر الدراسة الميدانية والمعملية (2025)

الخريطة بالشكل (4) توضح درجات مخاطر التعرية للترب المختلفة بمنطقة الوسيطة والتي تظهر ان نوعي التربة Red Ferrsiallitic Leached soils of a truncated profile (LR) و Red Carbonate Rendzinas (RR) هما الأكثر قابلية للانجراف وهو ما يتفق مع النتائج التي سجلتها [19, 14] خاصة للنوع الأول الذي يلاحظ فقده لمعظم الأفق السطحي، بينما كانت ترب البحر المتوسط الحمراء النموذجية (TR) هي الأقل قابلية للانجراف. بناء على ذلك يمكن الاستفادة من مثل هذه الخرائط المبدئية في تسليط الضوء على مناطق المخاطر المحتملة للتعرية.



الشكل 4: درجات مخاطر التعرية المختلفة لترب منطقة الوسيطة، اعداد الباحث، باستخدام ArcMap 10.8(2026)

تم تطوير الحسابات وتحسين دقة تقدير مخاطر التعرية باتباع خطوات المعادلة RUSLE وذلك بإدخال عامل الطبوغرافيا (LS) والذي يصف شدة الانحدار S بالدرجات وطول الانحدار L بالأمتار، حيث لكل منحدر خصائصه الطبوغرافية المميزة له من انحدار وطول وشكل واتجاه تؤثر في مجملها على قدرة الامطار والجريان السطحي على احداث التعرية الشكل (5). حيث يتم تحديد الاراضي الأكثر خطورة في انجراف التربة ضمن النوع الواحد من التربة وهو ما يتيح التعامل بأسلوب إدارة يتناسب مع كل منطقة انحدار بما يحقق حفظ واستدامة موارد التربة والمياه. سيساهم تحسين وتطوير خريطة تحديد مخاطر التعرية في تحديد أفضل السبل والسيناريوهات التي يمكنها الحد من تلك الخطورة وتقليل فرص تدهور الأراضي الزراعية الخصبة والمنتجة بمنطقة الوسيطة.



الشكل 5: درجات الانحدار لمنطقة الدراسة، الخريطة الأساس لحساب العامل LS، إعداد الباحث باستخدام ArcMap 10.8(2026)

يلاحظ الفارق في كميات فقد التربة المقدرة والمتوقعة باختلاف درجات الانحدار، فمثلا ترب الرندزينا الجيرية الحمراء الضحلة RCR كان الفقد التقديري السنوي لها يتراوح ما بين 22.6 و17.8 طن للهكتار عند اهمال تأثير الانحدار والغطاء النباتي بالجدول (2)، يظهر الجدول (3) تقديرات مختلفة للفقد بهذه الترب باختلاف درجات الانحدار بعد حساب عامل الطبوغرافيا LS لترب الرندزينا الجيرية الحمراء الضحلة. تظهر الحسابات ارتفاع حاد جدا في كميات فقد التربة المقدرة بعد دخول عامل الطبوغرافيا في حسابات المعادلة RUSLE، والسبب هو دخول دور شدة وطول الانحدار في التقدير وهي خصائص تساهم في زيادة قدرة الامطار والجريان السطحي على فصل ونقل التربة، مع ملاحظة ان هذه الخطوة من الحسابات افترضت عدم وجود غطاء نباتي يحمي سطح التربة من تأثيرات الانجراف المائي.

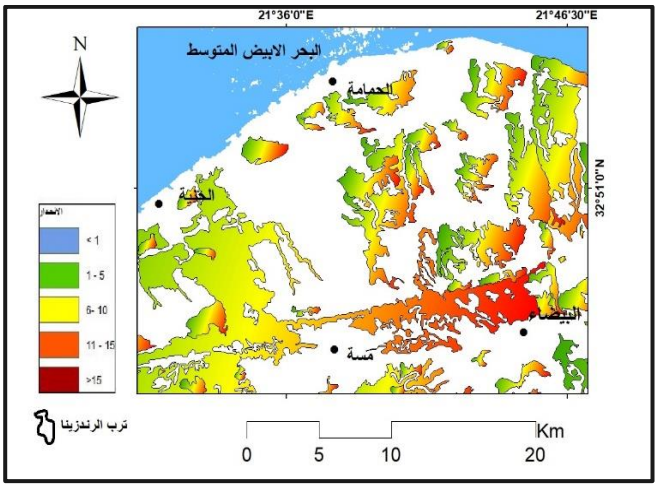
الجدول 3: كميات فقد التربة المحسوبة لترب الرندزينا الجيرية الحمراء الضحلة (RR) تحت حالات انحدار مختلفة

الفقد السنوي المقدر من التربة بالطن للهكتار	العامل LS	شدة الانحدار بالدرجات	طول الانحدار بالمتر L
40.5 – 20.2	2 – 1	اقل من 5	100 – 200 متر
101 – 60.5	5 – 3	5 الى 10	100 – 200 متر
208 – 161	10 – 8	أكبر من 10	100 – 200 متر

المصدر: الدراسة الميدانية (2025)

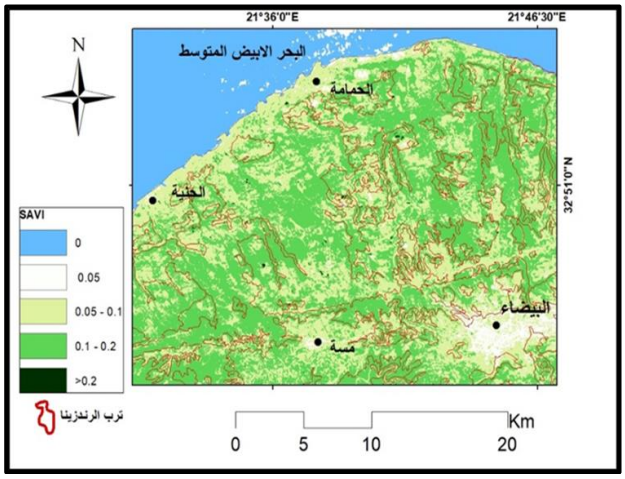
يمكن لهذه المعادلة حساب التعرية المائية بدقة أكبر لكل حالات الانحدار وانشاء خريطة لدرجات مخاطر التعرية ضمن نوع التربة الواحد. يظهر الشكل (6) اقسام الانحدار المختلفة لترب الرندزينا الجيرية الحمراء الضحلة، ومنها يتضح ان الانحدارات المتوسطة 6-10 درجات هي السائدة مما يشير لإمكانيه كبيرة لاستثمار هذه الأراضي بشرط تطبيق نظم إدارة التربة المحافظة،

ومحاولة المحافظة على وجود غطاء نباتي مستمر على المنحدرات من بقايا المحصول (بعد الحصاد) للحد من فصل التربة بالأمطار ونقلها بالجريان السطحي خصوصا في فصل الخريف التالي.



الشكل 6: درجات الانحدار المختلفة لأراضي ترب الرندزينا (RR) بمنطقة الوسيطة، إعداد الباحث باستخدام ArcMap 10.8(2026)

أهمية وضرورة دور الغطاء النباتي وإدارة التربة على أراضي المنحدرات يمكن رصده وتقييمه بدقة كبيره من خلال عوامل الإدارة C وP في النموذج التجريبي RUSLE، كما يمكن ومن خلال المعلومات التفصيلية التي تقدمها هذه المعادلات التجريبية تحديد الاستراتيجية الأنسب حسب ظروف المناخ والتربة والطبوغرافيا والغطاء النباتي السائدة بالمنطقة.



الشكل7: مؤشر الغطاء النباتي المعدل للتربة SAVI لمنطقة الوسيطة، إعداد الباحث باستخدام ArcMap 10.8(2026)

كذلك مقارنة العديد من أساليب وتقنيات الإدارة المتكاملة والمستدامة مثل أنظمة الحراثة المحافظة وتقنيات الري وحفظ المياه وانشاءات حفظ التربة الملائمة للأراضي الجافة وشبه الجافة من خلال التعديلات والتحسينات التي تضيفها هذه العوامل التجريبية على خريطة تقييم مخاطر التعرية. كما يمكن الاستفادة من مؤشرات الغطاء النباتي مثل مؤشر الغطاء النباتي المعدل للتربة SAVI والذي تتراوح قيمته ما بين 0 و1 الشكل (7) في تعديل وتطوير خرائط مخاطر التعرية حسب فصول السنة او عند المقارنة بين السنوات باعتبار ان الغطاء النباتي أكثر تغيرا وديناميكية من خصائص التربة والطبوغرافيا.

يمكن تحسين دقة الحسابات بشكل أفضل عند ادخال عامل الغطاء النباتي واستخدام الأرض C والذي سيقوم بدوره في الحد من شدة التعرية المحسوبة في الجدول (3)، وفي وجود تأثير الغطاء النباتي الواقي للتربة سوف نحصل على قيم فقد للتربة أكثر واقعية. الجدول (4) يوضح التعديل في قيم فقد التربة تحت ثلاث حالات مختلفة من الغطاء النباتي، أشجار مثمرة، محصول حبوب ومحاصيل علفية. يبين الجدول (4) ان المحاصيل التي لها قدرة على تغطية مساحة أكبر من التربة مثل محاصيل الحبوب والاعلاف سيكون لها عامل غطاء نباتي C ذو قيمة منخفضة تقترب من الصفر، بينما تقترب قيمة العامل C من الواحد الصحيح كلما كانت التغطية النباتية للسطح اقل.

الجدول 4: قيم فقد التربة من أراضي الرندزينا الجيرية الضحلة الحمراء Rendolls المعدلة بوجود عامل الغطاء النباتي C

درجة الانحدار	قيمة عامل الغطاء النباتي C	الفقد السنوي المقدر من التربة بالطن للهكتار	
أقل من 5	أشجار فاكهة C = 0.9	36.5 – 18.2	فقد مرتفع
"	محاصيل حبوب C = 0.4 – 0.7	22.3 – 11.1	معتدل - مرتفع
"	محاصيل اعلاف C= 0.2	8.1 – 4.0	خفيف - متوسط
10 – 5	أشجار فاكهة C = 0.9	91.0 – 54.5	مرتفع جدا
"	محاصيل حبوب C = 0.4 – 0.7	55.5 – 33.2	فقد مرتفع
"	محاصيل اعلاف C= 0.2	20.2 – 12.1	معتدل - مرتفع
أكبر من 10	أشجار فاكهة C = 0.9	187 – 144	فقد حاد جدا
"	محاصيل حبوب C = 0.4 – 0.7	145 – 64	مرتفع جدا - حاد
"	محاصيل اعلاف C= 0.2	41.6 – 32.2	فقد مرتفع

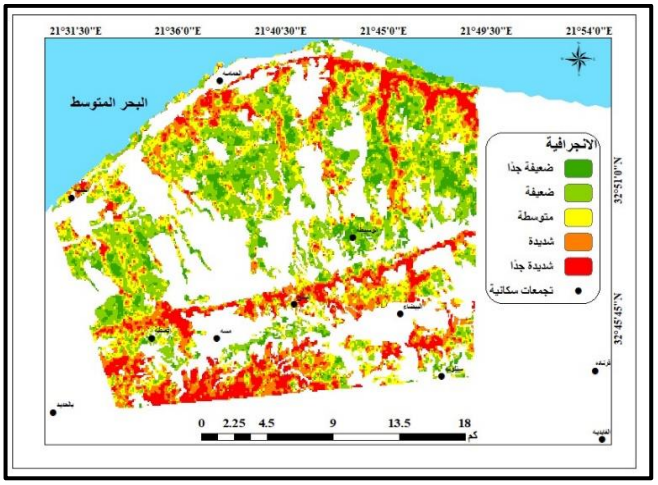
بواسطة المؤلف (2025)، الحسابات في هذا الجدول استخدمت بيانات من [25]

تظهر خريطة تقييم مخاطر التعرية (درجات قابلية التربة للانجراف) بالشكل (8) المستويات المختلفة من انجرافية التربة وذلك لنوع ترب الرندزينا الجيرية الحمراء الضحلة عند اخذ باقي العوامل (الطبوغرافيا والغطاء النباتي) في الاعتبار، حيث يمكن الاستفادة من هذه الخريطة وكذلك من خلال النتائج التقديرية بالجدول (4) باتخاذ القرارات المتعلقة بإدارة التربة بنمط مستدام.

2: النموذج MMF: تم اجراء القياسات والحسابات للعوامل المختلفة المكونة للنموذج التجريبي كما هو بالجدول (5). حيث يظهر الجدول تباينا نسبيا في فواقد التربة السنوية بالتعرية المائية، أظهرت المعادلة MMF ان انجرافيه الترب تحت الدراسة كانت حسب التسلسل التنازلي التالي: GR < RR < XR < LR < TR < SR. مع ذلك فان قيم الفقد في مجملها تراوحت ما بين الخفيفة الى المعتدلة.

من خلال نتائج المعادلتين التي تم استخدامها في هذه الدراسة نجد انها اتفقت في نوعي التربة الأعلى والاقل انجرافيه، حيث أظهرت النتائج في النموذجين ان ترب البحر المتوسط الحمراء الضحلة Lithic Rhodoxeralfs (LR) كانت هي الأعلى قابلية للانجراف. بينما كانت ترب البحر المتوسط الحمراء النموذجية Typic Rhodoxeralfs (TR) هي الأقل قابلية للانجراف. لكن ورغم الاتفاق بين المعادلتين في التقييم الوصفي في تحديد أي الترب أكثر او اقل انجرافا، إلا انها لم تتفق في التقييم الكمي لأرقام الفواقد السنوية والتي اختلفت للمعادلتين بشكل كبير وواضح. حيث سجل النموذج MMF على مستوى الانحدارات الخفيفة الى المتوسطة فواقد سنوية لم تتجاوز 5 طن/هكتار، بينما سجل

النموذج RUSLE على مستوى انحدارات مقاربة فواقد سنوية تجاوزت 30 طن /هكتار. هذا التباين يرجع بالأساس الى بعض الاختلاف في عناصر وهيكلية هذه المعادلات التجريبية لذلك سيكون من المفيد مقارنة نتائجها مع البيانات الحقلية لفقد التربة والمسجلة تحت ظروف الامطار الطبيعية كنوع من التصحيح وقياس واقعيتها (validation).



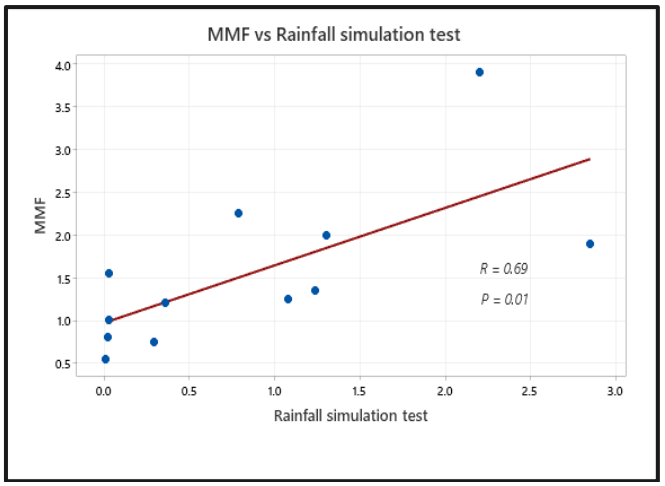
الشكل 8: درجات مخاطر التعرية المائية على أراضي ترب الرندزينا بمنطقة الوسيطة، إعداد الباحث باستخدام ArcGIS (2026)

تمت المقارنة مع بيانات سابقة [19] لترب البحر المتوسط الحمراء وترب الرندزينا بالحمامة والحنية وشحات من خلال دراسة ومراقبة استمرت لموسمين مطريين والتي وصلت فواقدها في حدها الأقصى الى 4.14 طن/هكتار سنويا. وبالتالي ومن خلال هذه المقارنة يمكن الاستنتاج بأن النموذج MMF كان الأقرب للواقع في تقدير انجراف التربة بمياه الامطار تحت ظروف الجبل الأخضر. كما تمت المقارنة الإحصائية باستخدام اختبار الارتباط بين نتائج المعادلات التجريبية مع نتائج التجارب الحقلية تحت ظروف محاكاة الهطول المطري [2]. أظهرت نتائج اختبار الارتباط بالشكل (7) وجود علاقة إحصائية معنوية ما بين نتائج المعادلة MMF والنتائج الحقلية (R = 0.69)، والتي كانت اقوى من العلاقة الإحصائية ما بين نتائج المعادلة RUSLE والنتائج الحقلية (R = 0.52).

الجدول 5: الحسابات والعوامل المختلفة للنموذج MMF

نوع التربة العامل K	العامل F كجم/متر^2	العامل H كجم/متر^2 انحدار 3 ° - 6 °	E = F+H كجم/متر^2	متوسط الفقد السنوي طن/ه
ترب البحر	0.05	م اعلاف H = 0.02	اعلاف:	
المتوسط		م اعلاف H = 0.04	0.09 – 0.07	0.80
الحمراء		م شعير H = 0.04	شعير:	
الجيرية (GR)		م شعير H = 0.09	0.14 – 0.09	1.15
K = 0.12		حمضيات H=0.10	فاكهة:	
		حمضيات H= 0.20	0.25 – 0.15	2,00
ترب البحر	0.03	م اعلاف H = 0.02	أعلاف:	
المتوسط		م اعلاف H = 0.03	0.06 – 0.05	0.55
الحمراء		م شعير H = 0.03	شعير:	
النموذجية		م شعير H = 0.06	0.09 – 0.06	0.75
(TR)		حمضيات H= 0.07	حمضيات:	
K = 0.07		حمضيات H= 0.14	0.17 – 0.10	1.35
ترب البحر	0.09	م اعلاف H = 0.04	أعلاف:	
المتوسط		م اعلاف H = 0.09	0.18 – 0.13	1.55
الحمراء		م شعير H = 0.09	شعير:	
الضحلة		م شعير H = 0.18	0.27 – 0.18	2.25
(LR)		حمضيات H= 0.20	حمضيات:	
K = 0.22		حمضيات H= 0.40	0.49 – 0.29	3.90
الرندزينا	0.07	م اعلاف H = 0.02	أعلاف:	
الجيرية		م اعلاف H = 0.04	0.11 – 0.09	1.00
الضحلة		م شعير H = 0.04	شعير:	
الحمراء		م شعير H = 0.07	0.14 – 0.11	1.25
(RR)		حمضيات H= 0.08	حمضيات:	
K = 0.17		حمضيات H= 0.17	0.24 – 0.15	1.95
الرندزينا	0.05	م اعلاف H = 0.02	أعلاف:	
الجيرية		م اعلاف H = 0.04	0.09 – 0.07	0.80
الضحلة		م شعير H = 0.04	شعير:	
القاتمة (SR)		م شعير H = 0.09	0.14 – 0.09	1.15
K = 0.12		حمضيات H= 0.10	حمضيات:	
		حمضيات H= 0.19	0.24 – 0.15	1.95
الجبلية	0.05	م اعلاف H = 0.03	أعلاف:	
القرفية		م اعلاف H = 0.06	0.11 – 0.08	0.95
السيليكاتية		م شعير H = 0.06	شعير:	
(XR)		م شعير H = 0.13	0.18 – 0.11	1.45
K		حمضيات H= 0.15	حمضيات:	
		حمضيات H= 0.29	0.34 – 0.20	2.45

المصدر: الدراسة الميدانية والمعملية (2025).ا K عامل قابلية التربة للانجراف ، F معدل فصل التربة بالمطر كجم/متر^2 ، H معدل فصل التربة بالجريان السطحي كجم/متر^2 ، E المعدل السنوي لفقد التربة بالكجم/متر^2 ، م محصول. ارقام العامل H مكررة للانحدارين 3 درجات و 6 درجات.



الشكل 7: علاقة الارتباط الاحصائي بين نتائج النموذج التجريبي MMF ونتائج تجارب الهطول المطري

المناقشة

تراوحت قيم عامل قابلية التربة للتعرية K في الدراسة الحالية بالجدول (2) ما بين الخفيفة والمتوسطة الخفيفة، وهذا يتفق نسبيا مع دراسات أخرى تحت ظروف مناخية متقاربة حيث وجد [21] في دراستهم للترب الحمراء بالأردن ان قيم العامل K كانت متوسطة وتتراوح ما بين 0.19 و0.35. بينما لم يسجل [22] لترب البحر المتوسط الحمراء بالمناطق شبه الجافة بالأردن قيما للعامل K

اعلى من 0.1. قيم فقد التربة (A) المحسوبة بالنموذج RUSLE التي يوضحها الجدول (2) بالطن للهكتار تعتبر اقصى كميات الفقد التي يمكن توقعها في الترب العارية من الغطاء، والتي لا تطبق فيها أي إجراءات لحفظ التربة، وهي في مجملها قيم مرتفعة نسبيا أكثر من الحد المقبول والتي في حال استمرار حدوثها سوف تتسبب في انجراف شديد جدا وتدهور واضح للترب على المنحدرات. كانت ترب البحر المتوسط الحمراء النموذجية TR هي الأقل قابلية للانجراف، والذي يرجع غالبا لطبيعة مكوناتها وصفاتها الأساسية مثل القوام والبناء ونوع معادن الطين السائدة ومحتواها من المادة العضوية وكربونات الكالسيوم واكاسيد الحديد والالمنيوم والتي تؤثر في مجملها في ثبات واستقرار تجمعات التربة [26].

تزداد مخاطر التعرية كلما زاد طول وشدة الانحدار وهي خصائص تساهم في زيادة قدرة الامطار والجريان السطحي على فصل ونقل التربة، مع ذلك، فان السبب في الارتفاع الحاد في قيم فقد ترب الرندزينا، الجدول (3) عند ادخال عامل خصائص الانحدار في الحسابات هو افتراض عدم وجود غطاء نباتي يحمي سطح التربة من تأثيرات الانجراف المائي. عليه، فأنه لتحسين دقة القياس والحسابات يجب إضافة بقية العوامل التجريبية مثل الغطاء النباتي (C) في التقييم لجعل الأرقام أقرب للواقع. تعديل أثر عامل خصائص الانحدار يتطلب استخدام معظم إجراءات حفظ التربة الحيوية (الزراعية) والتي لها فرص نجاح عالية عند اختيار المحاصيل المناسبة لتغطية سطح التربة وتثبيتها واتباع طرق الحراثة والزراعة الكنتورية، مع إمكانية الاستعانة بالتقنيات الميكانيكية والهندسية مثل الحواجز الكنتورية والمصاطب والسدود التعويقية [27].

حسب تقديرات الدراسة الحالية باستخدام نموذج RUSLE فأن محاصيل الاعلاف ومحاصيل الحبوب مثل الشعير قد تساهم بدرجة كبيرة ومؤثرة في تخفيض فواقد التربة بالتعرية المائية بالمنحدرات الزراعية بالوسيطة. في دراسة لاحد احواض الاودية بالأردن وجد ان قيم العامل C كانت متباينة وذات مدى واسع على مستوى حوض الوادي، القيم تراوحت ما بين 0.0 الى 0.9 حيث سجلت مناطق الغطاء النباتي الدائم ما بين 0.05 و0.10 وهي قيم فعالة تساهم في الحد من فقد التربة على أراضي المنحدرات بدرجة معنوية، كما سجلت أراضي الزراعة المختلطة ما بين المحاصيل البعلية والزراعات المروية في تلك الدراسة قيما معتدلة تراوحت ما بين 0.15 و0.20، اما أراضي المراعي فسجلت قيما اعلى نسبيا لكنها تظل مقبولة ما بين 0.35 و 0.50، [21].

الجدول 6: النسب المختلفة لدرجات مخاطر التعرية على ترب الرندزينا الجيرية الحمراء الضحلة بمنطقة الوسيطة

الانجرافية	المساحة كم^2	النسبة %
ضعيفة جدًا	33.22	**9.73**
ضعيفة	106.68	**31.25**
متوسطة	86.05	**25.21**
شديدة	63.34	**18.55**
شديدة جدًا	52.09	**15.26**
المجموع	341.38	**100**

المصدر: الدراسة الميدانية والمعملية (2025)

وعليه وحسب التقييم الحالي فأنه لتجنب مخاطر الانجراف العالية لترب الرندزينا الجيرية الحمراء الضحلة بمناطق الدراسة يفضل الاستثمار زراعيا على الأراضي ذات الانحدار الأقل من 5 درجات، وحتى في هذه الأراضي يجب ان يعتمد استخدام الأراضي على الحراثة الكنتورية بمحاصيل الحبوب والاعلاف. مع ذلك، وكون الانحدارات السائدة على أراضي الرندزينا هي الانحدارات المتوسطة، وكذلك ولأن أكثر من 50% من ترب الرندزينا عرضة لمخاطر تعرية متوسطة الى شديدة جدا الجدول (6)، فان ذلك يتطلب كما سبق الإشارة ضرورة الاستعانة باستخدام وسائل مساندة لحفظ التربة من التعرية كالزراعة الكنتورية والمصاطب والسدود التعويقية، مع وجوب ترك جزء من بقايا المحاصيل السابقة لحماية التربة خلال بداية موسم الهطول التالي بفصل الخريف [13]. من ناحية أخرى، حقق النموذج التجريبي MMF نتائج أقرب للواقع في تقديرات قيم فقد التربة السنوية الناتج عن التعرية المطرية عند المقارنة مع النموذج التجريبي RUSLE. ربما يرجع نجاح هذا النموذج لأفضلية الفهم والاستجابة لعوامل وعمليات التعرية المائية [3]، حيث هناك إمكانية لقياس وتقدير التعرية المائية تحت عمليتين منفصلتين ضمن الحسابات تمثل الأولى فصل التربة بقطرات المطر والثانية بالجريان السطحي [11]، كما اهتم النموذج ضمن مدخلاته بقياسات وكميات الجريان السطحي (SR) ولم يعتمد فقط على بيانات الامطار والتربة في تقدير الجريان السطحي وهو ما قد يحقق درجة اعلى من الدقة والواقعية.

الخلاصة

تم اختبار ومقارنة المعادلات التجريبية MMF وRUSLE وتقييم كفاءتها في تقدير انجراف التربة بالتعرية المائية في منطقة الوسيطة بالجبل الأخضر. أظهرت النتائج ان ترب البحر المتوسط الحمراء النموذجية TR هي الأقل انجرافا بينما كانت ترب البحر المتوسط الحمراء الضحلة LR هي الأكثر انجرافا. بينت الدراسة جدوى وإمكانية استثمار المنحدرات الخفيفة الى المتوسطة بشرط توفر نظم الزراعة المحافظة، كما وجدت الدراسة ان أكثر من 50% من ترب الرندزينا تتعرض لمخاطر متوسطة الى شديدة جدا من التعرية المائية وهو ما يتطلب إجراءات حماية اضافية. نجحت المعادلة MMF في تقديم تقييم أكثر واقعية لحالة تدهور التربة وقابليتها للانجراف بمنطقة الدراسة عند اختبارها احصائيا مقارنة بالنموذج RUSLE. اختلافات بنيوية واشتمال النموذج الأول على عوامل وعمليات أكثر ارتباطا بظاهرة التعرية ربما ساهمت في نجاحه النسبي. استخدام الأراضي العشوائي والتغيرات المناخية تمثل تحديات متزايدة تتطلب المزيد من البحث والجهد للوصول الى أدوات وتقنيات سريعة الاستجابة لرصد وتقييم التسارع المستمر في تمدد وتوسع انجراف التربة ومواجهة مخاطر تدهور الأراضي الرعوية والزراعية بالجبل الأخضر.

التوصيات

- تطبيق النماذج التجريبية الجيدة الكفاءة والمنخفضة الكلفة مثل النموذج MMF في دراسة وتقدير قابلية التربة للانجراف على أراضي منحدرات الجبل الأخضر مع ربطها بتطبيقات ونظم المعلومات المكانية.
- تبني نظم وتقنيات الزراعة المحافظة على الأراضي المتوسطة الانحدار مثل الزراعة الكنتورية والمصاطب والسدود التعويقية، كون هذه الأراضي بطبيعتها عالية الحساسية للانجراف والتدهور، إلا أنه يمكن استغلالها زراعيا بنجاح متى ما توفرت شروط الإدارة المستدامة.
- التوسع في استخدام التقنيات الرقمية الذكية لرصد ومتابعة وتقييم انجراف التربة وتدهور وتصحر الأراضي في ليبيا

Author Contributions: Aburas: Conceptualization and methodology, writing—original draft preparation, review and editing, data collection, results analysis and discussion. **Yousef**: Maps preparation, data collection and processing. Both authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: "This research received no external funding."

Data Availability Statement: "No data were used to support this study."

Conflicts of Interest: "The authors declare that they have no conflict of interest."

References

[1] R. Lal. "Soil degradation by erosion." *Land Degradation & Development*, vol. 12, no. 6, pp. 519–539, 2001. https://doi.org/10.1002/ldr.472.

[2] M. Aburas. "Assessment of Soil Erodibility in Relation to Soil Degradation and Land Use in Mediterranean Libya." *PhD dissertation*, Dept. Civil Eng., Univ. of Newcastle Upon Tyne, UK, 2009. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4121.0009.

[3] R. Morgan. "Soil Erosion and Conservation. " *Longman Group Limited*, 1996. https://books.google.com.ly/books

[4] W. Wischmeier and D. Smith. "Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning." *Agricultural Handbook*, no. 537, 1978. https://books.google.com.ly/books

[5] X. Qiao, Z. Li, J. Lin, H. Wang, S. Zheng, and S. Yang. "Assessing current and future soil erosion under changing land use based on InVEST and FLUS models in the Yihe River Basin, North China." *International Soil and Water Conservation Research*, vol. 12, no. 2, pp. 298–312, 2024. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2023.07.001.

[6] G. Wang, G. Gertner, X. Liu, and A. Anderson. "Uncertainty assessment of soil erodibility factor for revised universal soil loss equation." *CATENA*, vol. 46, no. 1, pp. 1–14, 2001. https://doi.org/10.1016/S0341-8162(01)00158-8.

[7] M. Fadl, M. Zekari, and R. Labad. "Integrating RUSLE, AHP, GIS, and cloud-based geospatial analysis for soil erosion assessment under Mediterranean conditions.*" Sci. Rep.*, vol. 15, art. no. 38494, 2025. https://doi.org/10.1038/s41598-025-22503-3.

[8] A. Abu Hammad, H. Lundervam, and T. Berresen. "Adaptation of RUSLE in the Eastern part of the Mediterranean Region.*" Environmental Management*, 34, (6), pp. 829-841. 2005. https://doi.org/10.1007/s00267-003-0296-7

[9] M. Hussein, T. Kariem, and K. Othman. "Predicting soil erodibility in northern Iraq using natural runoff plot data.*" Soil and Tillage Research*, 94, (1), pp. 220-228. 2007 https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.012

[10] R. Morgan, D. Morgan, and H. Finney. "A predictive model for the assessment of erosion risk.*" J. Agricultural Engineering Research* 30:245-253. 1984. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0021863484800256.

[11] T. Dinka. "Application of the Morgan, Morgan Finney Model in Adulala Mariyam Watershed, Ethiopia; GIS-based Erosion Risk Assessment and Testing of Alternative Land Management Options." *M.S. thesis*, Wageningen Univ., Wageningen, The Netherlands, 2007.

[12] D. Zema, J. Nones, and M. Borja. "Improvement of seasonal runoff and soil loss predictions by the MMF (Morgan-Morgan-Finney) model after wildfire and soil treatment in Mediterranean forest ecosystems." *CATENA*, vol. 188, art. no. 104415, 2020. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104415.

[13] N. Hudson, Soil Conservation, BT Batsford Ltd., London, 1995. https://books.google.com.ly/books.

[14] E. Selkhoze Prom. "Soil studies in the eastern zone of Libya." Secretariat of Agriculture, Libya, 1980.

[15] K. Bin-Mahmoud, "The Libyan soils." *The National Council of Scientific Research, Tripoli, Libya.* 1995. https://books.google.com.ly/books

[16] U.S. Geological Survey. "Landsat 8-9 Operational Land Imager (OLI) / Thermal Infrared Sensor (TIRS) Collection 2 Level-1 Data." *Data set*, 2025. https://earthexplorer.usgs.gov/

[17] A. Salim and M. Aburas. "The Role of Topography and Land Use in Water Erosion of The Southern Slopes of Al-Jabal Al-Akhdar." *Journal of Misurata University for Agricultural Sciences*, Vol. 4, no. 2, pp. 167-181, 2023. https://www.researchgate.net/publication/378208471.

[18] K. Renard, G. Foster, G. Weesies, D. McCool, and D. Yoder. "Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the revised universal soil loss equation (RUSLE)." *Agriculture Handbook*, no. 703, USDA-ARS, Washington, 1997. https://books.google.com.ly/books.

[19] M. Aburas. "Effects of deforestation for agricultural uses on soil properties and loss at Al-Hamama and Shahat areas. " *Msc thesis*. Omar AL-Mukhtar University, Libya. 1997. https://www.researchgate.net/profile/Murad-Aburas.

[20] H. Arnoldus. "An approximation of the rainfall factor in the Universal Soil Loss Equation." pp. 127–132, 1980. https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19831974087.

[21] Y. Farhan and S. Nawaiseh. "Spatial assessment of soil erosion risk using RUSLE and GIS techniques." *Environ. Earth Sci*., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. https://doi.org/10.1007/s12665-015-4430-7

[22] S. Arood, et al. "Soil loss estimation using RUSLE equation at Al-Zarqa watershed, case study." *Social and Human Studies*, vol. 51, No. 2, 2024. https://doi.org/10.35516/hum.v51i2.1484

[23] I. Moore and G. Burch. "Physical basis of the length slope factor in the Universal Soil Loss Equation." *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 50, no. 5, pp. 1294–1298, 1986. https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050042x

[24] H. Mitasova, J. Hofierka, M. Zlocha, and R. Iverson. "Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS.*" Int. J. Geogr. Inf. Syst.*, vol. 10, pp. 629–641, 1996.https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/02693799608902101

[25] E. Roose. "Land husbandry. Components and strategy." FAO Soil Bulletin, no. 70, 1996. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-05/010012051.pdf

[26] Y. Le Bissonnais, D. Blavet, G. De Noni, J. Laurent, J. Asseline, and C. Chenu. "Erodibility of Mediterranean vineyard soils: relevant aggregate stability methods and significant soil variables." European Journal of Soil Science, vol. 58, no. 1, pp. 188–195, 2007. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00823.x

[27] F. Troeh, J. Hobbs, and R. Donahue. "Soil and Water Conservation for Productivity and Environmental Protection." *Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., USA*, 1980. https://books.google.com.ly/books