

مقال بحثي

Modeling Volume, Basal Area and Tree Density in the Kalala Forest in Northern Iran Using Sentinel-2 Satellite Data and Random Forest Algorithm

نمذجة الحجم، المساحة القاعدية والكثافة الشجرية في غابة كلاله في شمالي إيران باستخدام بيانات القمر الاصطناعي Sentinel-2 وخوارزمية Random forest

SJSI

تاريخ التقديم: 17 أيلول 2023

تاريخ القبول: 2 تشرين الثاني 2023

الجهات: الهيئة العامة لإدارة وتطوير الغاب- حماه- سورية

التواصل: hso414516@gmail.com

المؤلفون: حسان علي

ABSTRACT

Gathering accurate data on forest resources is one of the most important steps in sustainable planning for these forests. Remote sensing techniques have been widely used in forest management by predicting various forest parameters such as volume, tree density and basal area. This research was conducted in Kalala Forest in northern Iran, and field data were collected by cluster sampling method. 105 samples were inventoried with an area of 400 square meters per sample. At the level of each sample, diameter at breast height and tree height were measured. The volume, tree density, and basal area per hectare of the studied samples were calculated. The values of vegetation indices at the studied sample sites were extracted through the Sentinel-2 satellite image. The relationship between the studied parameters and vegetation indices was modeled through the use of the Random Forest algorithm. This research aims to investigate the ability of the Sentinel-2 satellite to estimate volume, basal area and tree density in the study area using the Random Forest algorithm. Volume modeling results showed that the coefficient of determination (R^2) was equal to 0.88, and the percentage root mean square error (%RMSE) was equal to 21.01%. While the results of basal area modeling showed that the coefficient of determination was 0.88, and the percentage of root mean square error was 20.14%. The results of tree density modeling showed that the coefficient of determination was 0.89, and the percentage of root mean square error was 19.22%. The results also showed that the use of the Sentinel-2 satellite and the Random Forest algorithm in modeling gave positive and acceptable results.

Keywords: Volume, Basal Area, Tree Density, Random Forest Algorithm, Sentinel-2 Satellite.

الملخص

يعد جمع البيانات الدقيقة عن موارد الغابات من أهم الخطوات الأساسية في التخطيط المستدام لهذه الغابات. لقد استخدمت تقنيات الاستشعار عن بعد على نطاق واسع في إدارة الغابات من خلال التنبؤ بالبارامترات الغابوية المختلفة مثل الحجم، الكثافة الشجرية

والمساحة القاعدية. أجري هذا البحث في غابة كلاله في شمالي إيران، وتم جمع البيانات الحقلية عن طريق طريقة أخذ العينات العشوائية. تم جرد 105 عينة بمساحة 400 متر مربع للعينة الواحدة. على مستوى كل عينة، تم قياس القطر على ارتفاع الصدر وارتفاع الأشجار. تم حساب الحجم، الكثافة الشجرية والمساحة القاعدية في الهكتار في العينات المدروسة. استخرجت قيم المؤشرات النباتية في مواقع العينات المدروسة من خلال صورة القمر الاصطناعي Sentinel-2. تم نمذجة العلاقة بين البارامترات المدروسة والمؤشرات النباتية من خلال استخدام خوارزمية راندوم فورست (Random forest). يهدف هذا البحث إلى التحقيق في قدرة القمر الاصطناعي Sentinel-2 في تقدير الحجم، المساحة القاعدية والكثافة الشجرية في منطقة الدراسة باستخدام خوارزمية راندوم فورست. أظهرت نتائج نمذجة الحجم أن معامل التحديد (R^2) مساوي 0.88، والنسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي (RMSE%) مساوي 21.01%. في حين أظهرت نتائج نمذجة المساحة القاعدية أن معامل التحديد مساوي 0.88، والنسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي مساوي 20.14%. ونتائج نمذجة الكثافة الشجرية بينت أن معامل التحديد مساوي 0.89، والنسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي مساوي 19.22%. أظهرت النتائج أيضاً أن استخدام القمر الاصطناعي Sentinel-2 وخوارزمية راندوم فورست في النمذجة قد أعطت نتائج إيجابية ومقبولة.

الكلمات المفتاحية: الحجم، المساحة القاعدية، الكثافة الشجرية، راندوم فورست، القمر الاصطناعي Sentinel-2

المقدمة:

والسهولة في معالجة البيانات بالبرامج الحاسوبية، والقدرة للدمج مع البيانات الميدانية^[5]. يتمتع القمر الاصطناعي Sentinel-2 بالعديد من المزايا مقارنة بأجهزة الاستشعار الأخرى وبدقة مكانية أفضل (تصل إلى 10 أمتار) وبدقة جيدة ومقبولة في تقدير متغيرات الغابات^[6]. وفي الآونة الأخيرة، تم اقتراح أشكال مختلفة من تقنيات النمذجة البارامترية أو غير البارامترية لنمذجة خصائص الغابات الفيزيائية الحيوية. حيث تشكل طرق النمذجة مثل راندوم فورست (Random forest)، تقنيات سريعة ودقيقة للتنبؤ ببارامترات الغابة المختلفة^[7]. تعتبر خوارزمية راندوم فورست شائعة لـ التصنيف، التنبؤ، دراسة أهمية المتغيرات، اختيار المتغيرات والكشف عن البيانات الشاذة. أيضاً هذه الخوارزمية، لديها العديد من المزايا مقارنة بمعظم تقنيات النمذجة الأخرى مثل القدرة على نمذجة العلاقات غير الخطية عالية الأبعاد والتعامل مع التنبؤات الفئوية والمستمرة، والقياس غير متحيز لمعدل الخطأ^[8]. تم إجراء العديد من الدراسات حول استخدام بيانات الأقمار الاصطناعية في تقدير البارامترات الفيزيائية للغابة مثل الحجم، المساحة القاعدية والكثافة الشجرية في مناطق مختلفة وكانت النتائج إيجابية^[9-13]. يعد تقدير المخزون الخشبي، الكثافة الشجرية

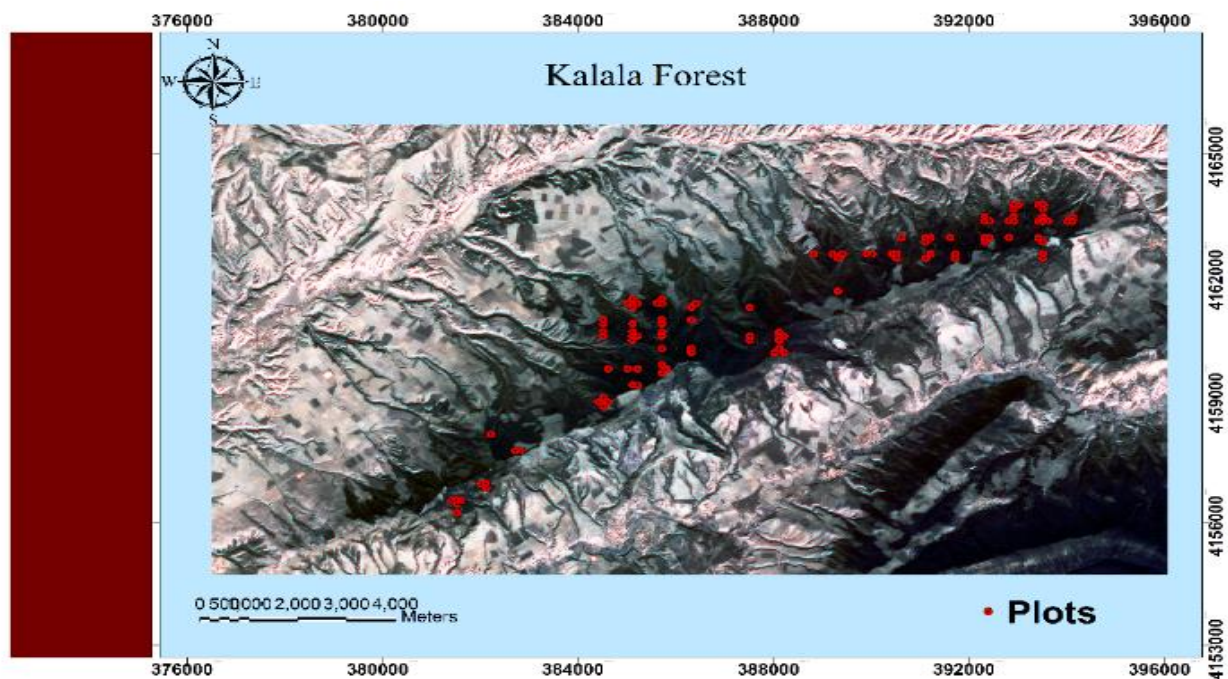
تعد الغابات مهمة جداً لحياة الإنسان فهي تشكل حوالي 31% من مساحة سطح الأرض وتلعب دوراً مهماً في التغير المناخي العالمي، ومكافحة تلوث الهواء، والحفاظ على التربة وتوفر الخدمات البيئية الأساسية. هناك حاجة مستمرة إلى معلومات عالية الجودة عن موارد الغابات، لذلك تعتبر البيانات المحدثة عن موارد وبارامترات الغابات ومراقبة العمليات المكانية الجارية في الغابات ذات أهمية كبيرة للإدارة الناجحة والمستدامة لهذه الغابات^[1-2]. تعد القياسات الحراجية التقليدية عن طريق أخذ العينات الميدانية لجمع بيانات عن الحجم وكثافة الأشجار والمساحة القاعدية وغيرها مكلفة وتستغرق وقتاً طويلاً وعمالة كثيرة، فضلاً عن صعوبة تنفيذها خاصة في المناطق الجبلية الوعرة والغابات الكثيفة ولهذه الأسباب، حاول العديد من الباحثين والمخططين في إدارة وتنظيم الغابات لاستخدام طرق أخرى أقل كثافة في العمالة وأرخص في التكلفة^[3]. في السنوات الأخيرة، تطورت تقنيات الاستشعار عن بعد وقدمت بيانات بديلة عالية الدقة ومنخفضة التكلفة في فترة زمنية قصيرة مقارنة مع القياسات الحراجية التقليدية^[4]. تتميز طرق الاستشعار عن بعد بالعديد من المزايا مثل المراقبة المتكررة، التغطية الواسعة،

مواد البحث وطرقه:

منطقة الدراسة:

تم إجراء هذا البحث في غابه كلاله في شمالي إيران وفي نطاق $30^{\circ} 46' 30''$ إلى $36^{\circ} 35' 55''$ شرق خط الطول و 37° إلى $38^{\circ} 19' 37''$ شمال خط العرض. تبلغ مساحة هذه المنطقة 9000 هكتار. الأنواع الرئيسية الموجودة في المنطقة هي الصنوبر البروتي (*Pinus brutia* Ten.)، الصنوبر الثمري (*Pinus pinea* L.)، والسرو (*Cupressus Mill.*) *sempervirens*). تقع هذه المنطقة على ارتفاع بين 400-1000 متر فوق مستوى سطح البحر. متوسط درجة الحرارة الشهرية 16.9 درجة مئوية، ومتوسط هطول الأمطار السنوي 536.7 ملم، ومتوسط الرطوبة النسبية السنوية 77.7% [14] الشكل (1).

والمساحة القاعدية وغيرها من بارامترات الغابات أمراً مهماً جداً للمخططين والمشرفين على الغابات من أجل إدارة هذه الغابات بشكل مستدام وعلمي. حيث تقدم هذه البارامترات معلومات مفيدة عن وضع وحالة هذه الغابات. نظراً أنه لم يتم إجراء أي بحث في مجال تقدير بارامترات الغابة في منطقة الدراسة ونظراً لأهمية المخزون الخشبي، الكثافة الشجرية والمساحة القاعدية في تقدير حالة الغابة المدروسة وأهمية تقنيات الاستشعار عن بعد في تقدير هذه البارامترات تبرز أهمية هذا البحث. يهدف هذا البحث إلى توظيف إمكانيات القمر الاصطناعي Sentinel-2 في تقدير الحجم، المساحة القاعدية والكثافة الشجرية في منطقة الدراسة باستخدام خوارزمية راندوم فورست (Random forest).



الشكل 1. منطقة الدراسة في شمالي إيران

مستوى كل عينة، تم قياس القطر على ارتفاع الصدر باستخدام مسطرة كاليببر، وتم قياس ارتفاع الأشجار باستخدام جهاز رقمي لقياس الارتفاع (Vertex Laser). في هذه الدراسة تم حساب الحجم (المخزون الخشبي) للأشجار في العينة الواحدة باستخدام المعادلة التالية (1)

الجرد والقياسات الحقلية:

تم جمع البيانات الحقلية عن طريق طريقة أخذ العينات العنقودية (إجمالي 105 عينة). حيث تتكون كل عينة عنقودية من 5 عينات حقلية دائرية الشكل بمساحة 400 متر مربع. تم تسجيل الإحداثيات الدقيقة لمراكز العينات بواسطة جهاز DGPS (Differential Global Positioning System). على

حيث BA_1 : المساحة القاعدية في العينات المدروسة في الهكتار (متر مربع في الهكتار)، BA : المساحة القاعدية في العينة الواحدة (متر مربع)

تم حساب الكثافة الشجرية في العينات المدروسة باستخدام المعادلة التالية (5)

$$N_1 = \frac{N \times 10000}{400} \quad 5$$

حيث N_1 : الكثافة الشجرية في العينات المدروسة في الهكتار (تعداد الأشجار في الهكتار)، N : الكثافة الشجرية في العينة الواحدة (تعداد الأشجار في العينة الواحدة).

بيانات الاستشعار عن بعد:

استخدمت في هذه الدراسة صورة القمر الاصطناعي Sentinel-2، تتمتع الباندات 2 (الأزرق)، و3 (الأخضر)، و4 (الأحمر)، و8 (الأشعة تحت الحمراء) بدقة تبلغ 10 أمتار، بينما تتمتع الباندات 5 و6 و7 و8a و11 و12 بدقة تبلغ 20 مترًا. تم إجراء التصحيحات الهندسية والإشعاعية (الراديو مترية) اللازمة باستخدام برنامج ArcGIS.10.4.

المؤشرات الطيفية النباتية المستخرجة من صورة Sentinel-2:

المؤشرات النباتية المستخدمة في هذا البحث في تقدير ونمذجة الكثافة الشجرية، المساحة القاعدية والحجم والمستخرجة من صورة Sentinel-2 درجت في الجدول (1) باستخدام برامج ArcGIS.10.4 وSNAP 6.0.

$$V = \frac{\pi}{4} \times DBH^2 \times H \times F \quad 1$$

حيث V : الحجم (المخزون الخشبي) للأشجار الفردية في العينة الواحدة (متر مكعب)، DBH : القطر على ارتفاع الصدر (سانتيمتر) و H : الارتفاع (متر) و F : معامل الشكل (تم حسابه لأنواع الموجودة بشكل دقيق بواسطة Ali وآخرون [15] $F(Pinus brutia)=0.49$, $F(Pinus pinea)=0.51$, $F(Cupressus sp)=0.55$)

لحساب الحجم في الهكتار (10000 متر مربع) من خلال المعادلة التالية (2)

$$V_1 = \frac{V \times 10000}{400} \quad 2$$

حيث V_1 : الحجم (المخزون الخشبي) في العينات المدروسة في الهكتار (متر مكعب في الهكتار)، V : الحجم (المخزون الخشبي) في العينة الواحدة (متر مكعب)

تم حساب المساحة القاعدية للأشجار في العينات المدروسة باستخدام المعادلة التالية (3)

$$BA = \frac{\pi}{4} \times DBH^2 \quad 3$$

حيث BA : المساحة القاعدية للأشجار الفردية في العينة الواحدة (متر مربع)، DBH : القطر على ارتفاع الصدر (سانتيمتر) لحساب المساحة القاعدية في الهكتار من خلال المعادلة التالية (4)

$$BA_1 = \frac{BA \times 10000}{400} \quad 4$$

الجدول 1. المؤشرات النباتية المستخرجة من صورة Sentinel-2

المؤشرات	المعادلة
NDVI ¹	$(NIR - R)/(NIR + R)$
SAVI ²	$NIR - RED(1 + 0.5)/(NIR + RED + 0.5)$
RVI ³	NIR/R
MSAVI ⁴	$(0.5) \times (2(NIR + 1) - \sqrt{2 \times (NIR + 1) \times 0.5 - 8(NIR - RED)})$
GNDVI ⁵	$(IR_factor \times near_IR - green_factor \times green)/(IR_factor \times near_IR + green_factor \times green)$

¹ Normalized Difference Vegetation Index

² Soil Adjusted Vegetation Index

³ Ratio Vegetation Index

⁴ Modified Soil Adjusted Vegetation Index

⁵ Green Normalized Difference Vegetation Index

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad 1$$

$$RMSE\% = \left(\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} / \bar{Y} \right) \times 100 \quad 2$$

y_i : مقدار الكتلة الحيوية الحقيقية، \hat{y}_i : مقدار الكتلة الحيوية المقدرة
n: تعداد العينات.

النتائج:

- الإحصائيات الوصفية للبيانات:

أظهرت نتائج الإحصاء الوصفي في 105 عينة أن متوسط الحجم في الهكتار 97.56 متر مكعب في الهكتار، والانحراف المعياري للمساحة القاعدية في الهكتار 9.27 متر مربع في الهكتار والحد الأقل والحد الأكثر للكثافة الشجرية في الهكتار 100 و1750 بالترتيب الجدول (2)

خوارزمية راندوم فورست (Random forest):

تعد خوارزمية راندوم فورست (Random Forest) واحدة من أكثر خوارزميات التعلم الآلي استخدامًا لكل من "التصنيف" (Classification) و "الانحدار" (Regression). تعد هذه الخوارزمية إحدى التقنيات الشائعة في تقدير المتغيرات وتصنيفها ودراسة أهمية المتغيرات واختيار المتغيرات المستقلة وتحديد القيم المتطرفة [16]. أهم البارامترات لهذه الخوارزمية هي عدد الأشجار (Ntree) وعدد المتغيرات لكل عقدة (Mtry) [17]. في هذا البحث، تم استخراج قيم المؤشرات النباتية أعلاه في مواقع العينات المدروسة (105 عينة) ثم تم اختيار 79 عينة للنمذجة (75%) و26 عينة للتحقق من صحة النمذجة (25%). تم نمذجة العلاقة بين البارامترات المدروسة في الهكتار وبيانات القمر الاصطناعي Sentinel-2 (المؤشرات النباتية) باستخدام خوارزمية راندوم فورست عن طريق برنامج R studio.

المؤشرات الإحصائية من أجل اختبار جودة النمذجة:

المؤشرات الإحصائية المستخدمة في اختبار دقة النمذجة هي معامل التحديد (R^2) المعادلة (1)، والنسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ

الجدول 2. الإحصائيات الوصفية في الهكتار للبارامترات المدروسة في العينات المدروسة

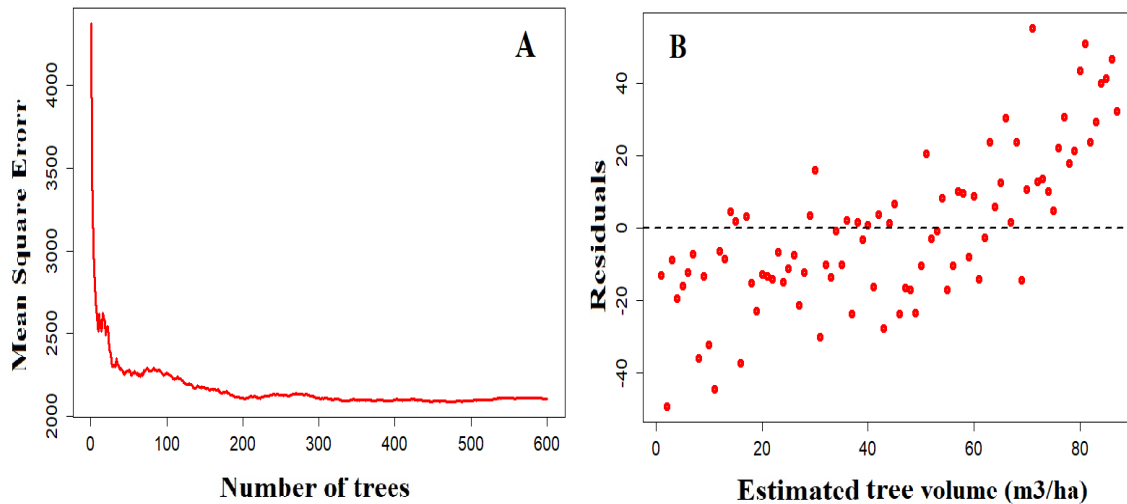
الإحصاء الوصفي	الحجم (متر مكعب في الهكتار)	المساحة القاعدية (متر مربع في الهكتار)	الكثافة الشجرية في الهكتار
المتوسط	97.56	19.28	949.53
الانحراف المعياري	49.72	9.27	458.09
الحد الأعلى	207.83	46.91	1750
الحد الأدنى	7.27	1.62	100

التربيعي (RMSE%) المعادلة (2)

الغرض، تم اعتبار 600 شجرة على أنها العدد الأمثل للأشجار لتقدير الحجم في الهكتار. كما أظهر الشكل (2,B) الحجم المتبقي (الفرق بين الحجم الحقيقي والحجم المقدر) في مقابل الحجم المقدر عن طريق النمذجة، وبين أن هذه القيم موزعة بشكل موحد فوق وتحت خط الصفر.

نمذجة وتقدير الحجم في الهكتار باستخدام خوارزمية راندوم فورست وبيانات القمر الاصطناعي Sentinel-2:

أظهرت نتائج تفسير متوسط مربعات الخطأ في مقابل عدد الأشجار أنه بزيادة عدد الأشجار إلى 600 شجرة، ينخفض متوسط مربعات الخطأ. بعد ذلك، مع زيادة عدد الأشجار بشكل أكبر، لا يوجد تغيير في متوسط قيم الخطأ الشكل (2,A). لهذا



الشكل 2. نمذجة وتقدير الحجم في الهكتار باستخدام خوارزمية راندوم فورست

في تقدير الحجم. حيث أظهرت نتائج النمذجة أن معامل التحديد (R^2) مساوي 0,88، والنسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي (RMSE%) مساوي 21.01% (الجدول (3)).

يجب تحديد عدد البارامترات أو المتغيرات في كل عقدة، حيث أوضحت النتائج أن عدد المتغيرات الأمثل مساوي 5 والتي لها أدنى نسبة مئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي (RMSE %)

الجدول 3. نتائج تحديد عدد الأمثل للأشجار (Ntree) وعدد المتغيرات في كل عقدة (Mtry) لتقدير الحجم، المساحة القاعدية والكثافة

الشجرية في الهكتار باستخدام خوارزمية راندوم فورست

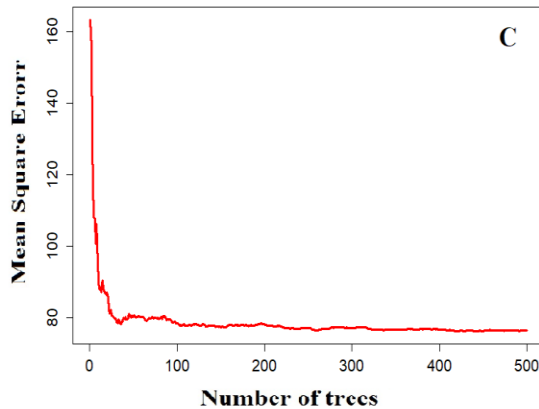
البارامترات المدروسة	العدد الأمثل للأشجار (Ntree)	عدد المتغيرات في كل عقدة (Mtry)	معامل التحديد (R^2)	النسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي (RMSE %)
الحجم (المخزون الخشبي في الهكتار)	600	3	0.88	17.
	600	4	0.88	21.06
	600	5	0.88	21.01
المساحة القاعدية في الهكتار	500	3	0.88	20.95
	500	4	0.88	20.65
	500	5	0.88	20.14
الكثافة الشجرية في الهكتار	500	3	0.89	19.47
	500	4	0.89	19.35
	500	5	0.89	19.22

أكبر، لا يوجد تغيير في متوسط قيم الخطأ الشكل (C,3). لهذا الغرض، تم اعتبار 500 شجرة على أنها العدد الأمثل للأشجار لتقدير المساحة القاعدية في الهكتار. كما أظهر الشكل (D,3) المساحة القاعدية المتبقية (الفرق بين المساحة القاعدية الحقيقية والمساحة القاعدية المقدرة) في مقابل المساحة القاعدية المقدرة

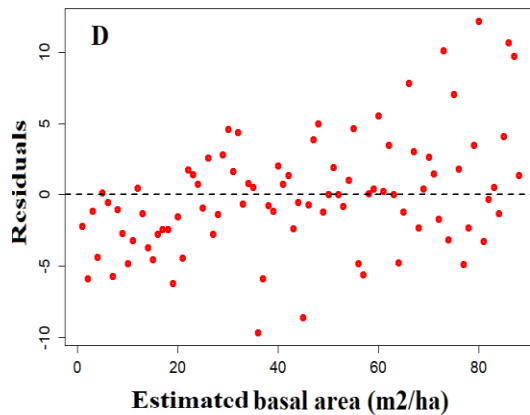
نمذجة وتقدير المساحة القاعدية في الهكتار باستخدام خوارزمية راندوم فورست وبيانات القمر الاصطناعي Sentinel-2:

أظهرت نتائج تفسير متوسط مربعات الخطأ في مقابل عدد الأشجار أنه بزيادة عدد الأشجار إلى 500 شجرة، ينخفض متوسط مربعات الخطأ. بعد ذلك، مع زيادة عدد الأشجار بشكل

التحديد (R^2) مساوي 0.88، والنسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي (RMSE%) مساوي 20.14% (الجدول (3)).



عن طريق النمذجة، وبين أن هذه القيم موزعة بشكل موحد فوق وتحت خط الصفر. أظهرت نتائج النمذجة أن معامل

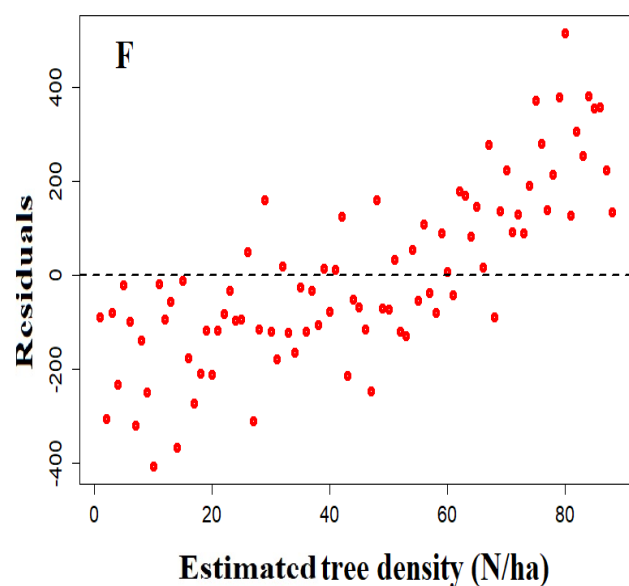
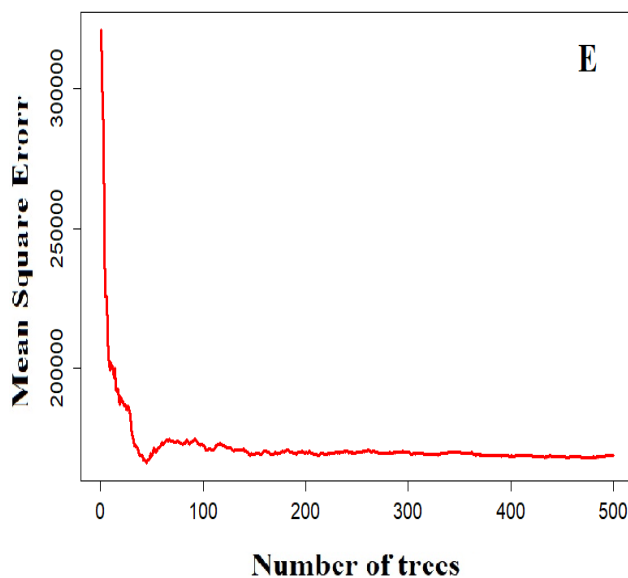


الشكل 3. نمذجة وتقدير المساحة القاعدية في الهكتار باستخدام خوارزمية راندوم فورست

لتقدير الكثافة الشجرية في الهكتار. كما أظهر الشكل (4,F) الكثافة الشجرية المتبقية (الفرق بين الكثافة الشجرية الحقيقية و الكثافة الشجرية المقدرة) في مقابل الكثافة الشجرية المقدرة عن طريق النمذجة، وبين أن هذه القيم موزعة بشكل موحد فوق وتحت خط الصفر. أظهرت نتائج النمذجة أن معامل التحديد (R^2) مساوي 0.89، والنسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي (RMSE%) مساوي 19.22% (الجدول (3)).

نمذجة وتقدير الكثافة الشجرية في الهكتار باستخدام خوارزمية راندوم فورست وبيانات القمر الاصطناعي Sentinel-2:

أظهرت نتائج تفسير متوسط مربعات الخطأ في مقابل عدد الأشجار أنه بزيادة عدد الأشجار إلى 500 شجرة، ينخفض متوسط مربعات الخطأ. بعد ذلك، مع زيادة عدد الأشجار بشكل أكبر، لا يوجد تغيير في متوسط قيم الخطأ الشكل (4,E). لهذا الغرض، تم اعتبار 500 شجرة على أنها العدد الأمثل للأشجار

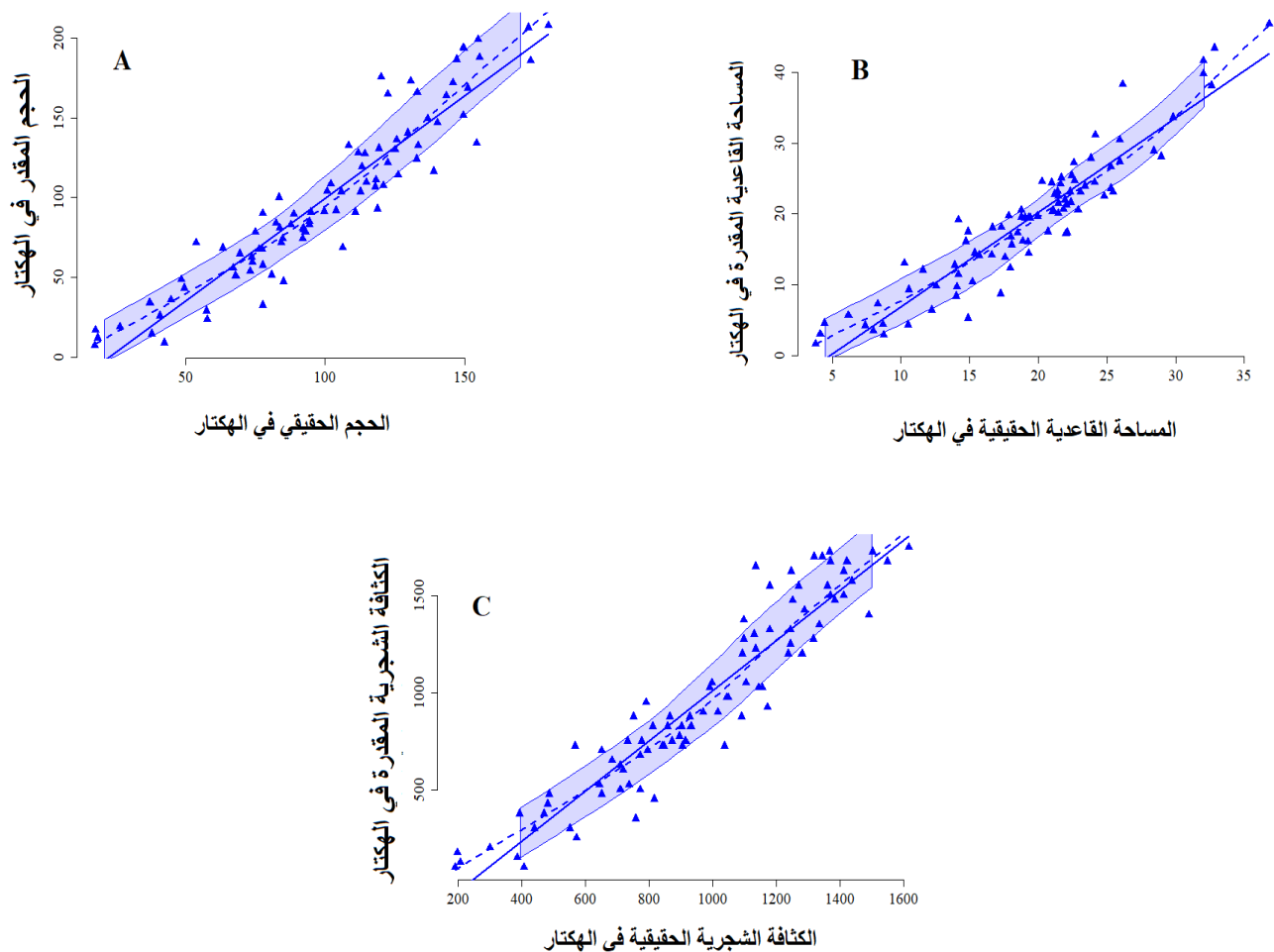


الشكل 4. نمذجة وتقدير الكثافة الشجرية في الهكتار باستخدام خوارزمية راندوم فورست

المناقشة:

التربيعي الناتجة عن استخدام خوارزمية راندوم فورست في تقدير الحجم (RMSE%= 21.01) كانت أفضل مقارنة بدراسات Mohammadi وآخرون [2] و Hu وآخرون [19] حيث النسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي 30.13% على التوالي. وبالمقارنة مع دراسة Chrysafis وآخرون [20] كانت نتائج هذا البحث أقل كفاءة حيث أن معامل التحديد مساوي 0.91 في حين أن معامل التحديد لهذا البحث مساوي 0.88. كما أظهرت النتائج أن الفرق بين قيم الحجم في الهكتار المقدر باستخدام خوارزمية راندوم فورست والقيم الحقيقية في الهكتار عند مستوى احتمالية 95% ليست كبيرة الشكل (5,A).

يعد تقدير المخزون الخشبي، والكثافة الشجرية والمساحة القاعدية أمرًا ضروريًا للإدارة المستدامة للغابات. حيث تقدم هذه البارامترات معلومات مهمة عن حالة هذه الغابات. تعد القياسات الحراجية التقليدية لهذه البارامترات عن طريق أخذ العينات الميدانية باهظة الثمن وتستغرق وقتًا طويلاً. لذلك كان لابد من البحث عن طرق بديلة وأكثر فاعلية من الطرق التقليدية ومن هذه الطرق استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد. Sentinel-2 هو جيل جديد من الأقمار الصناعية متعددة الأطياف تم إطلاقه في 23 حزيران 2015 من قبل وكالة الفضاء الأوروبية، ويمكنه مراقبة الغابات والمساعدة في تقدير بارامترات الغابة المختلفة [18]. في هذه الدراسة، نتائج النسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ



الشكل 5. قيم الحجم، المساحة القاعدية والكثافة الشجرية الحقيقية في الهكتار في مقابل القيم المقدر باستخدام البيانات البصرية وخوارزمية راندوم فورست

المتقدمة مثل راندوم فورست، حيث يمكن أن توفر معلومات قيمة حول التغييرات في موارد الغابات والتي تساعد المشرفين على هذه الغابات لوضع خطط الإدارة المناسبة.

الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرت هذه الدراسة أن استخدام خوارزمية راندوم فورست مع Sentinel-2 في تقدير المخزون الخشبي، والكثافة الشجرية والمساحة القاعدية قد أعطى نتائج إيجابية ومقبولة. كما يوصى باستخدام صور لأقمار صناعية أخرى ذات دقة مكانية أعلى وصور طائرات الدرون وصور الرادار والليدار لتقدير هذه البارامترات. كما ينصح بتجريب خوارزميات التعلم العميق الحديثة (Deep learning).

المراجع:

1. Ali H, Mohammadi J, and Shataee Jouibary S. Allometric Models and Biomass Conversion and Expansion Factors to Predict Total Tree-level Aboveground Biomass for Three Conifers Species in Iran. *Forest Science*, 2023, p.fxad013.
2. Mohammadi J, Shataee S, and Babanezhad M. Estimation of forest stand volume, tree density and biodiversity using Landsat ETM+ Data, comparison of linear and regression tree analyses. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 7, pp.299-304.
3. Wulder M.A, White J.C, Nelson R.F, Næsset E, Ørka H.O, Coops N.C, Hilker T, Bater C.W, and Gobakken T. Lidar sampling for large-area forest characterization: A review. *Remote sensing of environment*, 2012, 121, pp.196-209.
4. Zhu X, and Liu D. Improving Forest aboveground biomass estimation using seasonal Landsat NDVI time-series. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 102, 222-231.
5. Immitzer M, Vuolo F, and Atzberger C. First experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in central Europe. *Remote Sensing*, 2016, 8(3), 166.
6. Filho M.G, Kuplich T.M, De Quadros F. Estimating natural grassland biomass by vegetation indices using Sentinel 2 remote sensing data. *International Journal of Remote Sensing*, 2019, 8, 2861-2876.
7. Mohammadi J, Shataee S, Namiranian M, and Næsset E. Modeling biophysical properties of broad-leaved stands in the hyrcanian forests of Iran using fused airborne laser scanner data and ultraCam-D

نتائج النسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي الناتجة عن استخدام خوارزمية راندوم فورست في تقدير المساحة القاعدية (RMSE%= 20.14) كانت أفضل مقارنة بدراسة Bulut وآخرون [21] حيث النسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي 25.44%. وبالمقارنة مع دراسات Mohammadi وآخرون [7] وBhattarai وآخرون [22] كانت نتائج هذا البحث أقل كفاءة حيث النسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي 17.18% و15% على التوالي. كما أظهرت النتائج أن الفرق بين قيم المساحة القاعدية في الهكتار المقدرة باستخدام خوارزمية راندوم فورست والقيم الحقيقية في الهكتار عند مستوى احتمالية 95% ليست كبيرة الشكل (5,B). في هذه الدراسة، نتائج النسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي الناتجة عن استخدام خوارزمية راندوم فورست في تقدير الكثافة الشجرية = RMSE% (19.22) كانت أفضل مقارنة بدراسات Mohammadi وآخرون [2] وBulut وآخرون [21] حيث النسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي 27.9% و38.99% على التوالي. وبالمقارنة مع دراسة Wang وآخرون [23] كانت نتائج هذا البحث أقل كفاءة حيث أن النسبة المئوية لجذر متوسط الخطأ التربيعي 12.60%. كما أظهرت النتائج أن الفرق بين قيم الكثافة الشجرية في الهكتار المقدرة باستخدام خوارزمية راندوم فورست والقيم الحقيقية في الهكتار عند مستوى احتمالية 95% ليست كبيرة الشكل (5,C). اختلاف نتائج هذا البحث مع الأبحاث الأخرى يمكن أن تعود إلى اختلاف دقة وقدرة التمييز المكانية للمستشعر Sentinel-2 مقارنة بأجهزة الاستشعار الأخرى، نوع المنطقة المدروسة (إبريات الأوراق، عريصات الأوراق ومزيج منهما)، تأثير حواف وحجم العينات المدروسة [24-25]. المؤشرات النباتية الطيفية المستخدمة في هذه الدراسة هي (NDVI، GNDVI، MSAVI2، RVI، SAVI)، لكن NDVI وGNDVI لعبا الدور الأفضل في تقدير بارامترات الغابة والكتلة الحيوية للغابة، وهذه النتائج تتفق مع نتائج الدراسة التي أجراها Ghosh وآخرون [26]. يتم تحديث المعلومات الخاصة بالغابات بشكل دوري من خلال تكنولوجيا الاستشعار عن بعد عبر الأقمار الصناعية والخوارزميات غير البارامترية

17. Dang A.T.N, Nandy S, Srinet R, Luong N.V, Ghosh S and Kumar A.S. Forest aboveground biomass estimation using machine learning regression algorithm in Yok Don National Park, Vietnam. *Ecological Informatics*, 2019,50, pp.24-32.
18. Majasalmi T, and Rautiainen M. The potential of Sentinel-2 data for estimating biophysical variables in a boreal forest: A simulation study. *Remote Sensing Letters*, 7(5), pp.427-436.
19. Hu Y, Xu X, Wu F, Sun Z, Xia H, Meng Q, Huang W, Zhou H, Gao J, Li W, and Peng D. Estimating forest stock volume in Hunan Province, China, by integrating in situ plot data, Sentinel-2 images, and linear and machine learning regression models. *Remote Sensing*, 2020, 12(1), p.186.
20. Chrysafis I, Mallinis G, Tsakiri M and Patias P. Evaluation of single-date and multi-seasonal spatial and spectral information of Sentinel-2 imagery to assess growing stock volume of a Mediterranean forest. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, 77, pp.1-14.
21. Bulut S, Günlü A and Çakır G. Modelling some stand parameters using Landsat 8 OLI and Sentinel-2 satellite images by machine learning techniques: a case study in Türkiye. *Geocarto International*, 2023,38(1), p.2158238.
22. Bhattarai R, Rahimzadeh-Bajgiran P, Weiskittel A, Homayouni S, Gara T.W, and Hanavan R.P. Estimating species-specific leaf area index and basal area using optical and SAR remote sensing data in Acadian mixed spruce-fir forests, USA. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2022,108, p.102727.
23. Wang S, Zhang X, Hassan M.A, Chen Q, Li C, Tang Z, and Wang Y. QuickBird image-based estimation of tree stand density using local maxima filtering method: A case study in a Beijing forest. *Plos one*, 2018, 13(12), p.e0208256.
24. Mascaró, J., Detto, M., Asner, G.P. and Muller-Landau, H.C., 2011. Evaluating uncertainty in mapping forest carbon with airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 115(12), pp.3770-3774.
25. Næsset E, Bollandsås O.M, Gobakken T, Solberg S, and McRoberts R.E. The effects of field plot size on model-assisted estimation of aboveground biomass change using multitemporal interferometric SAR and airborne laser scanning data. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 168, pp.252-264.
26. Ghosh S.M, Behera M.D. Aboveground Biomass Estimation Using Multi-Sensor Data Synergy and images. *International journal of applied earth observation and geoinformation*, 2017, 61, pp.32-45.
8. Grimm R, Behrens T, Märker M, and Elsenbeer H. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—Digital soil mapping using Random Forests analysis. *Geoderma*, 2008, 146(1-2), pp.102-113.
9. Shataee S, Kalbi S, Fallah A, and Pelz D. Forest attribute imputation using machine-learning methods and ASTER data: comparison of k-NN, SVR and random forest regression algorithms. *International journal of remote sensing*, 2012, 33(19), pp.6254-6280.
10. Esteban J, McRoberts R.E, Fernández-Landa A, Tomé J.L, and Næsset E. Estimating forest volume and biomass and their changes using random forests and remotely sensed data. *Remote Sensing*, 2019,11(16), p.1944.
11. Bolat F, Bulut S, Günlü A, Ercanlı İ and Şenyurt M. Regression kriging to improve basal area and growing stock volume estimation based on remotely sensed data, terrain indices and forest inventory of black pine forests. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2020, 50.
12. Astola H, Seitsonen L, Halme E, Molinier M, and Lönnqvist A. Deep neural networks with transfer learning for forest variable estimation using sentinel-2 imagery in boreal forest. *Remote Sensing*, 2021, 13(12), p.2392.
13. Lahssini K, Teste F, Dayal K.R, Durrieu S, Ienco D, and Monnet J.M. Combining LiDAR metrics and sentinel-2 imagery to estimate basal area and wood volume in complex forest environment via neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2022, 15, pp.4337-4348.
14. Hallaj M.H.S, Rostaghi A.A. Study on growth performance of Turkish pine (Case study: Arabdagh afforestation plan, Golestan province). *Iranian J. for. P. Res.* 2011, 3, 201-212.
15. Ali H, Mohamadi J, and Shataee S. Determination of form factor for three species (*Pinus brutia*, *Pinus pinea* and *Cupressus sempervirens*) in the Arabdagh reforests, Golestan province. *Journal of Wood and Forest Science and Technology*, 2020, 27(1), pp.31-44.
16. Belgiu M, and Drăguț, L. Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, 2016,114, pp.24-31.

Machine Learning Algorithms in a Dense Tropical Forest. Appl. Geogr. 2018, 96, 29–40.

27. التمويل: لا يوجد

28. مساهمات المؤلفين: المؤلف قام بجميع الأعمال

الخاصة بالورقة البحثية.

29. تضارب المصالح: يصرح المؤلف أنه ليس لديه أي

مصالح متضاربة.

30. المواد التكميلية: جميع المعلومات والبيانات واردة في

النص الرئيسي.