

المعالجة المسبقة لصور لاندسات المستخدمة لرسم خريطة NDVI في غابات شمال اللاذقية

- د. محمود علي¹
د. علي ثابت²
د. يونس ادريس³
علا مرهج⁴

تاريخ الإيداع 14 / 6 / 2018. قبل للنشر في 23 / 9 / 2018

□ ملخص □

هدف البحث إلى توضيح خطوات المعالجة المسبقة اللازمة للصور الفضائية قبل البدء بتحليل واستخراج البيانات منها، وذلك باستخدام برنامج ENVI. حيث طُبّق التصحيح الشعاعي والتصحيح الطبوغرافي على صورة لاندسات أُخذت في العام 2017، ومن ثم قمنا بحساب مؤشر الاختلاف النباتي القياسي NDVI لهذه الصورة قبل وبعد تطبيق المعالجة المسبقة.

أظهرت النتائج وجود فرق في القيم الطيفية للصورة قبل وبعد التصحيح الإشعاعي خاصة في مجال الطيف تحت الأحمر القريب، حيث سجلت قيم الانعكاس في الصورة الأصلية بين (40-150)، في حين تراوحت هذه القيم بين (300-3500) في الصورة المصححة. كما بدا الفرق واضحاً في قيم الانعكاس ضمن القناتين الحمراء وتحت الحمراء القريبة، بعد إجراء التصحيح الطبوغرافي، خصوصاً في النقاط الموجودة في ظل التضاريس. كما لوحظ وجود اختلافات في قيم مؤشر الاختلاف النباتي القياسي NDVI للصورة 2017 قبل وبعد تطبيق المعالجة المسبقة على الصورة الفضائية، خاصة في النقاط ذات التغطية النباتية الجيدة والجيد جداً والتي تتميز بقيم مرتفعة للمؤشر النباتي NDVI.

خلصت الدراسة إلى أهمية اتباع وتطبيق أقل عدد مطلوب من خطوات المعالجة المسبقة للصور، وذلك لتجنب الحصول على معلومات غير حقيقية عن الظاهرة المدروسة وبالتالي الوصول إلى استنتاجات غير صحيحة.

الكلمات المفتاحية: NDVI، المعالجة المسبقة، لاندسات، الاستشعار عن بعد، اللاذقية، سوريا.

1. أستاذ- قسم الحراج والبيئة- كلية الزراعة- جامعة تشرين- سورية.
2. أستاذ مساعد- قسم الموارد الطبيعية المتجددة- كلية الزراعة- جامعة حلب- سورية.
3. مدير بحوث- الهيئة العامة للاستشعار عن بعد- دمشق- سورية.
4. طالبة دراسات عليا (دكتوراه)- قسم الحراج والبيئة- كلية الزراعة- جامعة تشرين- سورية.

Preprocessing of Landsat Imageries Used to Mapping NDVI in North Lattakia Forests

Dr. Mahmoud Ali¹
Dr. Ali Thabeet²
Dr. Yunis Idress³
Ola Merhej⁴

(Received 14 / 6 / 2018. Accepted 23 / 9 / 2018)

□ ABSTRACT □

The aim of the research was to clarify the pre-processing steps required for satellite images before starting to analyze and extract data from them using the ENVI program. Radiometric and topographic correction applied to the Landsat image 2017, and then we calculated the NDVI index for this image before and after applying pre-processing.

The results showed a difference in the spectral values of the image before and after the radiometric correction, especially in near infrared band. The reflection values were recorded in the original image between (40-50) and (300-3500) in the corrected image. The difference in the reflection values after the topographical correction was also visible on the near- infrared and infrared bands, especially in the points where shadows of the terrain.

Differences in the values of NDVI for 2017 were observed before and after the application of pre-processing on the image, especially in points of good and very good vegetation coverage with high values of the index.

The study concluded that it is important to follow the minimum number of steps required for preprocessing steps in order to avoid unnecessary steps and recommend well tested, readily available, and adequately documented data approaches and data products.

Key Words: NDVI, Preprocessing, Landsat, Remote Sensing, Latakia, Syria.

1.Professor- Forestry & Ecology Department- Agriculture Faculty- Tishreen University- Syria.

2.Assistant Professor - Natural resources Department- Agriculture Faculty- Aleppo University- Syria.

3.Research Manager- General Organization of Remote Sensing- Damascus- Syria.

4.PhD. Student- Forestry & Ecology Department- Agriculture Faculty- Tishreen University- Syria.

مقدمة

تُستخدم بيانات القمر الصناعي لاندسات بشكل متزايد للغاية في تطبيقات رصد الأرض ومراقبتها، لا سيما في العقد الأخير (Turner *et al.*, 2015). وتعزى هذه الزيادة الأخيرة في جزء منها إلى تغطية لاندسات العالمية؛ وإتاحتها مجاناً منذ عام 2009، حيث شهدت هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية USGS زيادة سنوية بمقدار 50 ضعفاً في تنزيلات الصور (Miller *et al.*, 2011; Vogelmann *et al.*, 2016). يُنصح بتطبيق معالجة مسبقة على هذه البيانات، من حيث المستشعرات والتأثيرات الشمسية والجوية والطوبوغرافية قبل إجراء التحليلات البيئية (Young *et al.*, 2017). إذ تُعد المعالجة المسبقة للصورة واحدة من أهم الخطوات في تحليل بيانات الاستشعار عن بعد (Cohen & Goward, 2004). ذلك لأن أغلب الأخطاء الموجودة في صور لاندسات تنتج عن تشوهات المستشعر، والتأثيرات الشمسية، والغلاف الجوي، والتأثيرات الطبوغرافية، فالمعالجة المسبقة تهدف إلى تقليل هذه التأثيرات إلى الحد المطلوب من أجل تطبيق معين (Sundaresan *et al.*, 2007). مع ذلك، فإن خطوات المعالجة المسبقة تستغرق وقتاً طويلاً، ولا تُعالج البكسلات المتأثرة بشكل كامل، ولديها القدرة على إدخال مصادر أخرى للخطأ، حيث تقلل القيم الأصلية للبيانات مما يزيد من إمكانية إدخال الخطأ (Kennedy *et al.* 2009). تُصحح الأخطاء الناتجة عن تشوهات المستشعر من خلال عمليات إعادة تحديد الموقع الجغرافي (georeferencing)، ومن خلال عمليات التصحيح الشاقولي (orthorectifying)؛ حيث تُشكل هذه العمليات مكونات التصحيح الهندسي اللازم لضمان تحديد موضع الصورة بدقة.

أما بالنسبة للتصحيح الإشعاعي فإنه يساهم في توضيح تأثير المستشعرات والطاقة الشمسية والغلاف الجوي، وهذا ما يفسر أهمية التصحيح الإشعاعي في الدراسات التي تعتمد صور مأخوذة في فترات مختلفة ومن مستشعرات متعددة (Flood, 2014). كما وجد أيضاً أنه بعد التصحيح الإشعاعي، كانت منتجات تصنيف الغطاء الأرضي وخرائط مؤشر الاختلاف النباتي القياسي (NDVI) لمنتجات لاندسات 5، 7 متشابهة للغاية، وهذا يعني أنه يمكن استخدام البيانات من المستشعرين لقياس ومراقبة ظواهر المناظر الطبيعية بعد التصحيح الإشعاعي بدقة أكبر بنسبة 10% مما هي دون إجراء هذه التصحيح (Vogelmann, 2001 *et al.*).

غير أن التصحيح الإشعاعي لا يفسر تأثير الإضاءة من المنحدر والمعرض والارتفاع، التي يمكن أن تسبب اختلافات في قيم الانعكاس لملامح مماثلة مع مواقع التضاريس المختلفة (Riaño *et al.*, 2003)، لذا فالتصحيح الطبوغرافي هو العملية المستخدمة لحساب هذه التأثير. على الرغم من أن هذا التصحيح غير مطلوب دائماً، إلا أنه قد يكون مهماً بشكل خاص للتطبيقات في الأنظمة الجبلية أو التضاريس الوعرة (Colby, 1991; Riaño *et al.*, 2003; Shepherd & Dymond, 2003).

تُصنف طرائق التصحيح الطبوغرافي إلى قسمين Lambertian، و non-lambertian وذلك استناداً إلى خصائص السطح العاكس، حيث تفترض الطريقة الأولى (lambertian) أن السطح العاكس يقوم بعكس الإشعاع الساقط بشكل متساوي في جميع الاتجاهات مهماً تأثير الغلاف الجوي. أما الطريقة الثانية فإنها لا تعتمد حقيقة على أساس فيزيائي بل تحاول نمذجة الإشعاع المنتشر وفقاً لخصائص الانعكاس المتعلقة بطبيعة التغطية الأرضية (Twele & Erasmi, 1982; Teillet *et al.*, 2005). يوجد عدة طرائق شائعة الاستخدام في التصحيح الطبوغرافي، وقد تم نشر العديد من الدراسات التي تقارن هذه الطرائق مع نتائج متباينة حسب موقع الدراسة، استخدمت فيها أساليب مختلفة، إلا أن أساليب Minnaert Correction (Minnaert, 1941) و C-correction (Teillet *et al.*, 1982) أظهرت أداءً

جيداً باستمرار لإزالة التأثيرات الطبوغرافية داخل صور لاندسات (Richter *et al.*, 2009; Hantson & Chuvieco, 2011).

اعتمد في هذه الدراسة مؤشر الاختلاف النباتي القياسي NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) كمؤشر نباتي طيفي معزول، بهدف معرفة دور عمليات التصحيح المسبقة لصور لاندسات في تحسين المعلومات الناتجة عن هذه الصور والمستخدم في تحليل الظواهر البيئية المختلفة. يُعد هذا المؤشر واحد من أقدم المؤشرات وأكثرها استخداماً لتقدير حالة الغطاء النباتي بالاعتماد على أعلى مناطق امتصاص وانعكاس الطيف الكهرومغناطيسي من قبل الكلوروفيل (Rouse *et al.*, 1973). حيث أُستخدم هذا المؤشر (NDVI) في مجالات عدة منها دراسة تأثير التغيرات المناخية في توزع غابات الأرز اللبناني في الجبال الساحلية السورية (قبيلي وآخرون، 2015)، استُخدم أيضاً في مراقبة الجفاف في المنطقة الشرقية من سوريا (جلب وآخرون، 2014). كما استخدمت صور لاندسات في دراسة محمية النبي متى (طرطوس) ووضع خطة إدارة لها (ديوب وآخرون، 2014).

أهمية البحث وأهدافه:

إن إعداد وتحضير صور لاندسات، يشار إليها أحياناً باسم المعالجة المسبقة، هو خطوة أساسية للتحليل الدقيق عن الظواهر الطبيعية، كتغير الغطاء النباتي واكتشاف التغير وغيرها (Bodart *et al.*, 2011). تشمل المعالجة المسبقة إزالة آثار التشوهات الناجمة عن أخطاء المستشعرات، والظروف الجوية المختلفة، وتصحيح الظلال المتحركة في المناطق الجبلية وغيرها. تم اقتراح طرق مختلفة لإنتاج أفضل النتائج في كل خطوة من خطوات المعالجة (Shimizu *et al.*, 2018).

يهدف البحث إلى توضيح خطوات المعالجة المسبقة لصور لاندسات من أجل التطبيقات البيئية عبر المستويات المختلفة من المعالجة المسبقة، والتسلسل الذي ينبغي تطبيق خطوات هذه المعالجة، كما نقدم شجرة القرارات التي تساعد في تحديد مستوى المعالجة المسبقة اللازمة حسب الغاية من الدراسة وتطبيقها على دراستنا هذه كمثال على تنفيذها في التحليلات البيئية من خلال مؤشر الاختلاف النباتي القياسي (NDVI). ونشدد على أن هذه الورقة لا تحتوي على الطريقة الوحيدة المناسبة لجميع الظروف، ولا يقصد بها أن تكون مقدمة لمجال الاستشعار عن بعد، بل تقدم وصفاً لأكثر خطوات المعالجة المسبقة شيوعاً المطبقة على منتجات لاندسات وأهميتها.

طرائق البحث و مواد

1- منطقة الدراسة

تقع منطقة الدراسة في النصف الشمالي من محافظة اللاذقية، بين خطي طول (36° 15' W, 35° 47' 49.2" W, 35° 57' 0.6" N, 35° 35' 42.7" S) وخطي عرض (57.44" E) ويوضحها الشكل (1).

تتميز المنطقة بالغطاء الغابوي الذي يغطي أكثر من 80% من مساحتها، أما الأجزاء الباقية فهي عبارة عن مناطق عمرانية تتركز في الجزء الغربي للمنطقة وهي مدينة اللاذقية والشريط الساحلي الذي يضم معظم القرى الموجودة في المنطقة، أما الأراضي الزراعية فهي تتركز غالباً حول القرى.



شكل 1. يوضح منطقة الدراسة في الجزء الشمالي من محافظة اللاذقية.

2- الصور المستخدمة

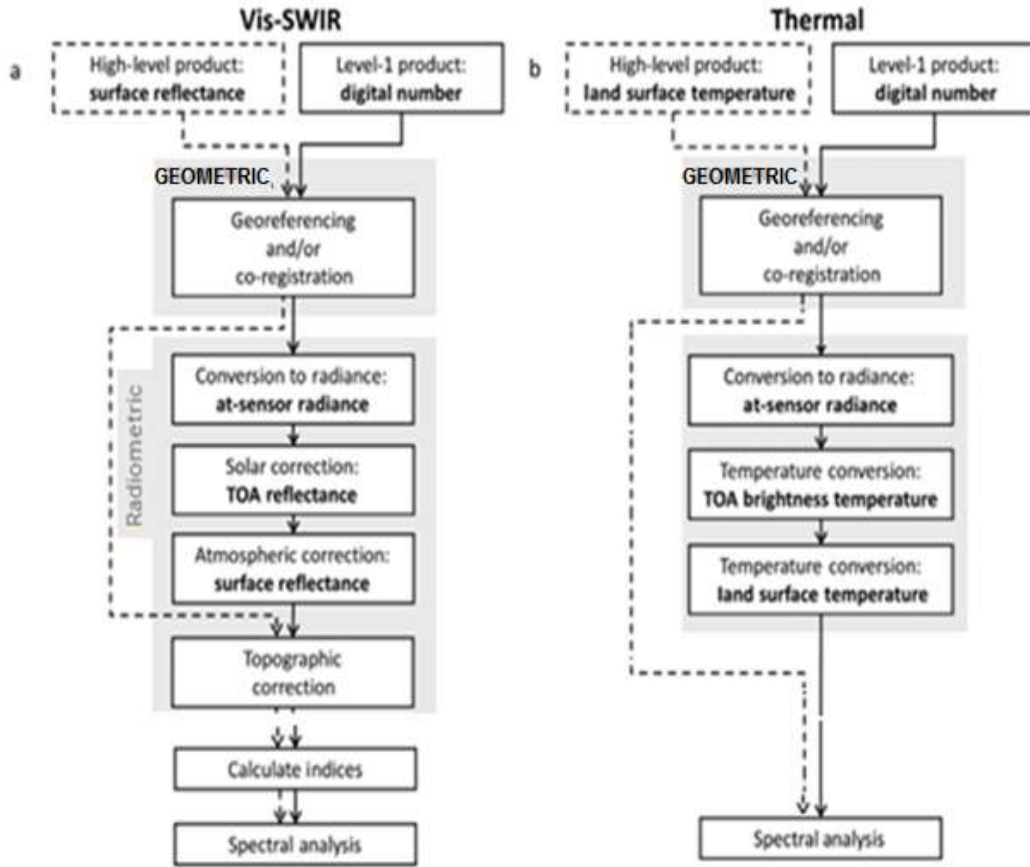
استُخدمت صورة لاندسات للعام 2017 من المستشعر (OLI)، وذلك من موقع ناسا على الانترنت (USGS)، ويوضح الجدول (1) مواصفات الصورة. تجدر الإشارة أن صور لاندسات متاحة بشكل مجاني منذ العام 1972 وحتى تاريخه بمعدل صورة كل 16 يوم، وهذا ما يعطيها قيمة عالية في أبحاث مراقبة الأرض والظواهر الطبيعية خلال سلاسل زمنية طويلة نسبياً.

جدول 1. خصائص الصورة المستخدمة في الدراسة.

19/10/2017	تاريخ أخذ الصورة
30	الدقة المكانية للبكسل (m)
157.4046071	ميل الشمس
0.9960128	المسافة بين الأرض والشمس (astronomical unit)
0.16	تغطية السحب %

3- المعالجة المسبقة للصورة الفضائية

يمكن تصنيف معظم خطوات المعالجة المسبقة للصور الفضائية إلى ثلاث مجموعات هي: الهندسية Geometric، والإشعاعية Radiometric، والطبوغرافية Topographic. تقوم بعض الخطوات بتحويل الصور من وحدة إلى أخرى. يوضح الشكل (2) هذه الخطوات على افتراض أن البحث يبدأ إما بمنتجات المستوى الأول (Level- 1) أو منتجات المستوى العالي لانعكاس السطح (high- level surface reflectance CDR). يمكن تنفيذ خطوات المعالجة المسبقة المقدمة في سير العمل باستخدام مجموعة من حزم البرامج التي تتطور وتحسن باستمرار. وقد اخترنا في دراستنا هذه برنامج ENVI الذي يوفر واجهة مستخدم رسومية، كما تم البدء بمنتجات المستوى الأول من البيانات حيث أنها مجانية ومتاحة للتحميل مباشرة من الانترنت، والقنوات الطيفية المستهدفة في دراستنا هي القنوات المرئية.

شكل 2. تسلسل العمل لخطوات المعالجة المسبقة المحتملة.¹

3-1- التصحيح الهندسي Geometric Correction

استُخدمت في هذه الدراسة صورة لاندسات (مستوى أول) مرجعة هندسياً إلى نظام إسقاط ميركاتور العالمي UTM (WGS 1984)، ولأن وجود صورة واحدة في الدراسة اكتفينا بدقة الإرجاع الأساسية.

3-2- التصحيح الإشعاعي Radiometric Correction

التصحيح الإشعاعي هو الخطوة الأولى لتقليل الاختلافات الناشئة عن الغلاف الجوي وعن تغيير ظروف الإضاءة والأخطاء والاختلافات في الخصائص الهندسية للمستشعرات المستخدمة في النقاط الصور الفضائية (Chander *et al.*, 2009)، وتتم عملية التصحيح الإشعاعي بالخطوات التالية:

3-2-1- التحويل إلى إشعاع Conversion to Radians

تعد هذه الخطوة المعالجة المسبقة الأولى يتم فيها تحويل القيم الرقمية DNS إلى إشعاع Radiance باستخدام معاملات المعايرة (calibration coefficients) المرتبطة بكل قناة طيفية بالنسبة لمستشعر معين، وهذه العوامل مخزنة في ملف البيانات الوصفية (metadata) المقترن بكل صورة (Markham & Helder, 2012). يتم تحقيق

¹ يتم تقديم الخطوات في التسلسل الموصى به، ولكن ليست كل الخطوات ضرورية لكل التحليلات. يشير نوع الخط العريض إلى مستوى المعالجة المسبقة. يبين المخططان البيانيان (أ) خطوات المعالجة المسبقة العامة لبيانات الأشعة تحت الحمراء المرئية والقصيرة الموجية (vis-SWIR) من منتجات بيانات عالية المستوى (خط متقطع، على سبيل المثال، بيانات الانعكاس السطحي CDR ومنتجات لاندسات من المستوى 1 (خط غير متقطع) ويبين المخطط (ب) خطوات المعالجة المسبقة العامة للبيانات الحرارية.

هذا التصحيح من خلال تحويل القيم الرقمية (DN) إلى إشعاع طيفي عند المستشعر (Lsat λ) لكل نطاق (λ) كما في المعادلة (1) ووفقاً لدليل (Landsat Handbook) (USGS, 2018):

$$Lsat_{\lambda} = g_{\lambda} \cdot DN_{\lambda} + o_{\lambda} \dots\dots\dots (1)$$

حيث g_{λ} و o_{λ} هي عوامل الكسب والإزاحة المحددة لكل قناة λ . يوفر ملف البيانات الوصفية المتاحة عوامل الكسب² والإزاحة³ لكل قناة طيفية x .

طبّق هذا التحويل باستخدام برنامج ENVI، حيث نختار من شريط قوائم البرنامج Basic tools ثم الأداة Band Math. يفتح مربع حوار لكتابة المعادلات المطلوبة، وفي الخطوة الأولى نقوم بحساب الإشعاع حسب المعادلة (1). بعد الضغط على زر موافق سننتقل إلى مربع حوار آخر لتحديد متغيرات المعادلة وهي الإزاحة والكسب التي نستخرجها من ملف البيانات الوصفية المقترن بالصورة، مع الانتباه إلى مراعاة رقم القناة الطيفية قيد العمل. نحدد اسم ملف الإخراج ومكان الحفظ، ثم موافق، (الشكل 3).

3-2-2- Conversion to Reflectance التحويل إلى انعكاس

تُعد هذه الخطوة مسؤولة عن إزالة التأثيرات الشمسية والغلاف الجوي على قيم البكسل، أي أن التصحيح الشمسي يعمل على تحويل الإشعاع عند المستشعر إلى انعكاس أعلى الغلاف الجوي (Top- Of- Atmosphere (TOA)) من خلال دمج الإشعاع الشمسي الخارجي (قوة الشمس) والمسافة بين الأرض والشمس وزاوية الارتفاع الشمسي. تختلف هذه المواقع مع التاريخ والوقت وخط العرض حتى يتم حساب آثارها عند العمل عبر صور متعددة، حتى داخل مشهد واحد، وعلى غرار التحويل إلى الإشعاع، يمكن استرداد قيم التصحيح الشمسي لبيانات لاندسات من ملفات البيانات الوصفية المرتبطة بكل صورة أو، في بعض الحالات، في جداول البحث.

غالباً ما يتم تجميع خطوة التصحيح الشمسي مع التحويل إلى الإشعاع في الدراسات المرجعية، كما يمكن حساب الانعكاس بدءاً من قيم DN في مختلف البرامج. يوفر لاندسات 8 معاملات للتحويل مباشرة إلى منتج انعكاس TOA بدءاً من DN، ولكن هذا لا ينبغي اعتباره انعكاس TOA حقيقي لأن العملية لا توفر تصحيحاً لزاوية الارتفاع الشمسي (USGS, 2014).

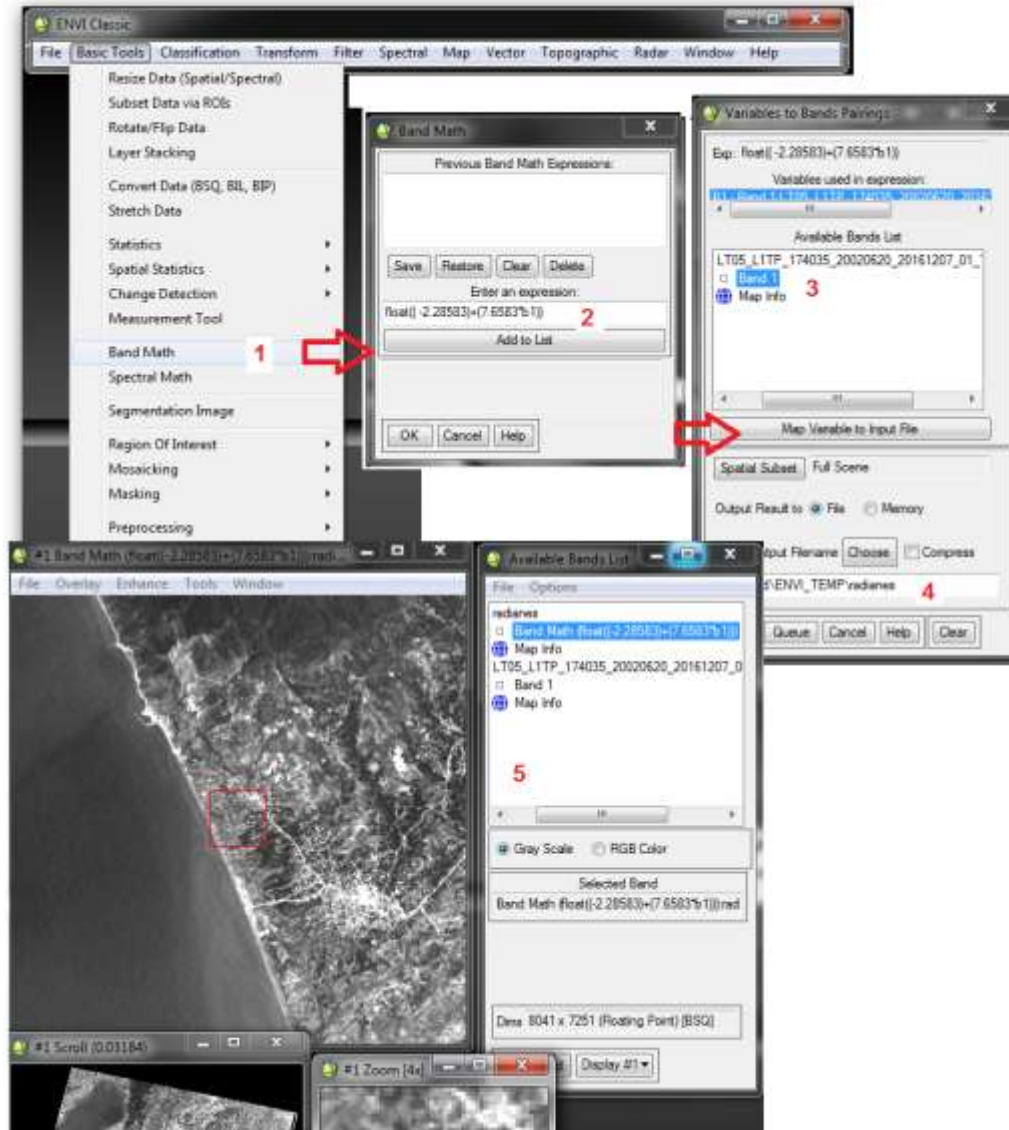
بعد حساب الإشعاع عند المستشعر، يتم تحويله إلى انعكاس أعلى الغلاف الجوي ($\rho_{TOA_{\lambda}}$) وفقاً للمعادلة (2):

$$\rho_{TOA_{\lambda}} = \frac{\pi \cdot Lsat_{\lambda} \cdot d^2}{ESUN_{\lambda} \cdot \cos \sigma_s} \dots\dots\dots (2)$$

حيث $ESUN_{\lambda}$ هو متوسط الإشعاع الشمسي الخارجي. استمدت زاوية السمات الشمسي (σ_s) من زاوية ارتفاع الشمس الواردة في ملف البيانات الوصفية وتم حساب المسافة بين الأرض والشمس (d) باستخدام اليوم الجولياني (JD) على النحو الموضح في المعادلة (3).

$$d = 1 - 0.01672 * \cos(0.01745(0.9856(JD - 4))) \dots\dots\dots (3)$$

RADIANCE_MULT_BAND_x²
RADIANCE_ADD_BAND_x³



شكل 3. خطوات حساب الإشعاع باستخدام برنامج ENVI.

لتطبيق ذلك يتم استخدام الأداة Band Math من خلال قائمة Basic tools في برنامج ENVI بالتسلسل التالي:

- أ- حساب المسافة بين الأرض والشمس
تختلف المسافة بين الأرض والشمس باختلاف وقت التقاط الصورة، ولحسابها نطبق العلاقة (3) باتباع خطوات مماثلة لما سبق باستخدام الأداة Band Math أيضاً ومراعاة تحديد المتغيرات بشكل صحيح.
- ب- حساب الانعكاس

بتطبيق المعادلة (2) نحصل على قيم الانعكاس، علماً أن قيم ESUN موجودة في جداول خاصة ومناحة على موقع ناسا (USGS) وهي تختلف من مستشعر لآخر، ويوضح الجدول (2) قيمها لمختلف مستشعرات لاندسات، حيث أنها غير مطلوبة لحساب الانعكاس في المستشعر الأحدث (OLI) (USGS, 2014).

جدول 2. قيم الإشعاع الشمسي الخارجي لمستشعرات لاندسات ($W/m^2/\mu m$) (المصدر USGS website).

Band #	Landsat 7 ETM+	Landsat 5 TM	Landsat 4 TM	Landsat 1-5 MSS
1	1970	1958	1958	1848
2	1842	1827	1826	1588
3	1547	1551	1554	1235
4	1044	1036	1033	856.6
5	225.7	214.9	214.7	
7	82.06	80.65	80.70	
8	1369			

- يمكن تطبيق التصحيح الراديومتري باستخدام:

Basic Tools > Preprocessing > Calibration Utilities > Landsat Calibration

لكن يجب استخدام نسخة حديثة من البرنامج كي تحتوي مستشعرات لاندسات الأحدث مثل ETM+, OLI.

- من الشائع استخدام تطبيقات عديدة في تنفيذ المعادلات على الصور الفضائية مثل: تطبيق Erdas Imagine الأداة (Model Maker)، وتطبيق ArcGis الأداة (Map Algebra).

- بعد حساب الانعكاسية للقنوات المراد العمل عليها يتم دمج هذه القنوات في صورة واحدة باستخدام الأمر Layer Stacking في قائمة Basic tools. حيث نستورد كل قناة طيفية (تم تحويلها إلى الانعكاسية) من خلال الأمر Import file ونختار اسم الملف ومكان الحفظ المراد.

- عند وجود سحب في الصورة يجب التصحيح من السحب، ويعتمد مبدأ التصحيح على اقتطاع البكسلات التي تغطيها السحب وظلال السحب، أي أن بياناتها تفقد وتمسح من التحليل، علاوة على ذلك، يمكن لهذه التصحيحات إدخال أخطاء إضافية (Schroeder *et al.*, 2006). لذلك من الأفضل انتقاء صور خالية من الغيوم وهو متاح نسبياً لأن الدقة الزمانية للصور 16 يوم مما يفتح المجال لاختيار صور خالية من الغيوم. تم انتقاء صورة في موسم الخريف والتأكد من خلو منطقة الدراسة من السحب بصرياً ومن خلال ملف البيانات الوصفية المرفق بكل صورة.

3-3- التصحيح الطبوغرافي Topographic Correction

بالرغم من أن خطوة المعالجة المسبقة هذه قد تكون أكثر أهمية من تصحيح الغلاف الجوي لبعض التطبيقات في المناطق المعقدة طبوغرافياً (Vanonckelen *et al.*, 2013)، إلا أنها ليست مطلوبة لكل بحث، ويتم تحديد ضرورة إجرائها حسب هدف ومنطقة الدراسة. تبين مثلاً، أنها ضرورية في دراسات تصنيف الغطاء الأرضي واستخدامات الأراضي وكذلك في رسم خرائط المؤشرات النباتية في المناطق الجبلية (Füreder, 2010).

تم تطبيق طريقة التصحيح الطبوغرافية الأكثر شيوعاً وهي طريقة التصحيح Minnaert في دراستنا (Minnaert, 1941)، حيث تعتمد الطريقة على نمذجة صفات الإضاءة عبر متوسطات نموذج الارتفاع الرقمي DEM. ولتحقيق ذلك تطلب حساب: زاوية سقوط الشمس، والزاوية بين الموقع الحالي للشمس والسطح المحلي المدروس (Gao *et al.*, 2015)، (شكل 4).

ت حسب الإضاءة من العلاقة (4)، وتتراوح القيم بين -1، +1، حيث أن القيم السالبة تشير إلى ظلال المنحدرات التي لا تستقبل الأشعة مباشرة (Ekstrand, 1996).

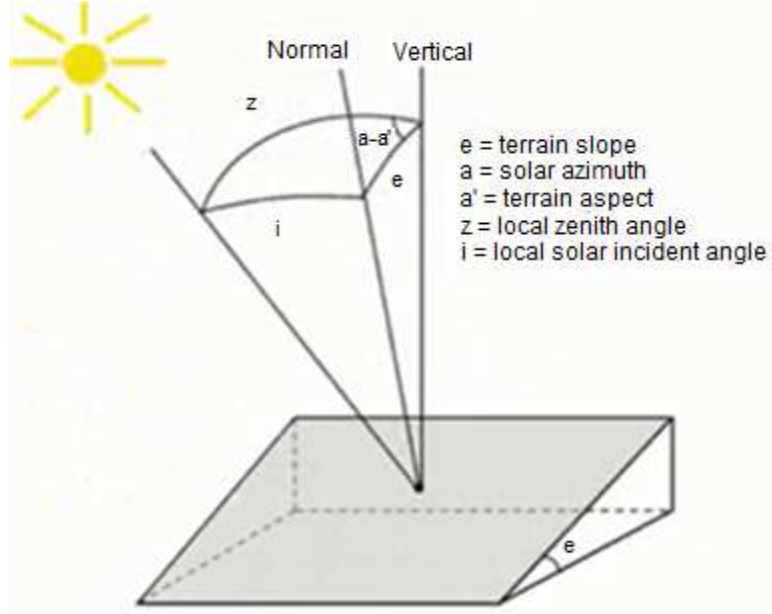
$$Illumination = \cos i * \cos z + \sin e * \sin z * \cos (a-a') \dots \dots \dots (4)$$

حيث: i: زاوية سقوط الشمس. e: زاوية الميل للسطح. z: زاوية ذروة الشمس. a: زاوية سمت الشمس. a': زاوية المعرض للسطح.

أما تصحيح Minnaert فيُحسب من العلاقة (5):

$$L_H = L_T * \left(\frac{\cos z}{\cos i} \right)^k \dots \dots \dots (5)$$

يحسب ثابت المعادلة k من الانحدار الخطي بين قيم الانعكاس في الصورة المدخلة LH والزوايا (i , e) وتتراوح قيمة الثابت بين الصفر والواحد، حيث تعني القيمة واحد أن السطح هو سطح Lambertian أي أنه سطح يعكس الإشعاع الوارد بشكل متساوي في جميع الاتجاهات.



شكل 4. الزوايا الضرورية لحساب زاوية سقوط الشمس (Teillet *et al.*, 1982).

استخدام النموذج الرقمي DEM Aster (30m resolution) بمساعدة برنامج ENVI كالتالي:

3-3-1- حساب البارامترات

من شريط قوائم البرنامج: Topographic> Topographic Modeling

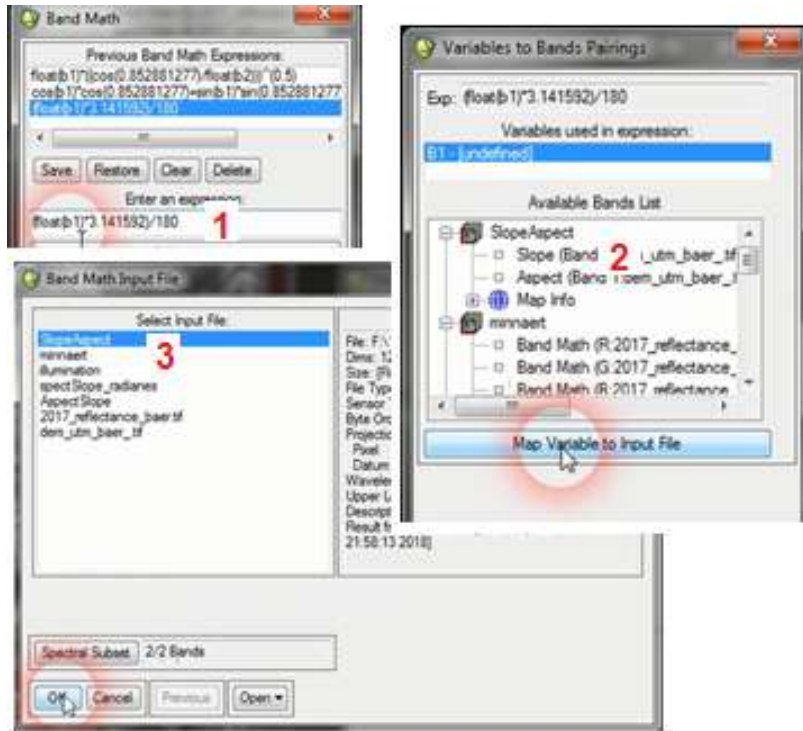
يفتح مربع حوار لتحديد ملف DEM المراد التصحيح باستخدامه، ويليه مربع حوار نحدد فيه البارامترين (ASPECT, SLOPE) الذين سنستخدمهما في حساب المعادلات المذكورة، ونحدد مكان حفظ ملف الإخراج ثم موافق.

الخطوة التالية هي تحويل قيم البارامترات المحسوبة في الخطوة السابقة من درجة (degree) إلى راديان (radianes)، باتباع الخطوات الآتية:

من القائمة الرئيسية للبرنامج Basic tools نختار الأمر Band Math ثم نكتب المعادلة (6) للتحويل:

$$radianes = \frac{degrees * \pi}{180} \dots \dots \dots (6)$$

وبعد الضغط على موافق يظهر مربع آخر لتحديد متغيرات المعادلة (الانحدار والمعرض)، (شكل 5)، ثم نحدد اسم ملف الإخراج ومكان الحفظ.



شكل 5. خطوات تحويل قيم البارامترات إلى راديان بواسطة أداة Band Math.

3-3-2- حساب الإضاءة illumination

تحتسب الإضاءة حسب المعادلة (4)، وذلك باستخدام أداة Band Math وبنفس الخطوات السابقة، مع الأخذ بعين الاعتبار تحديد متغيرات المعادلة بالشكل الصحيح.

3-3-3- حساب تصحيح Minnaert

بتطبيق المعادلة (5) من خلال الأداة Band Math من القائمة Basic Tools أيضاً، مع مراعاة تحديد متغيرات المعادلة بشكل صحيح وأخذ قيم الانعكاس في كل قناة طيفية الناتج من التصحيح الإشعاعي في الخطوة السابقة.

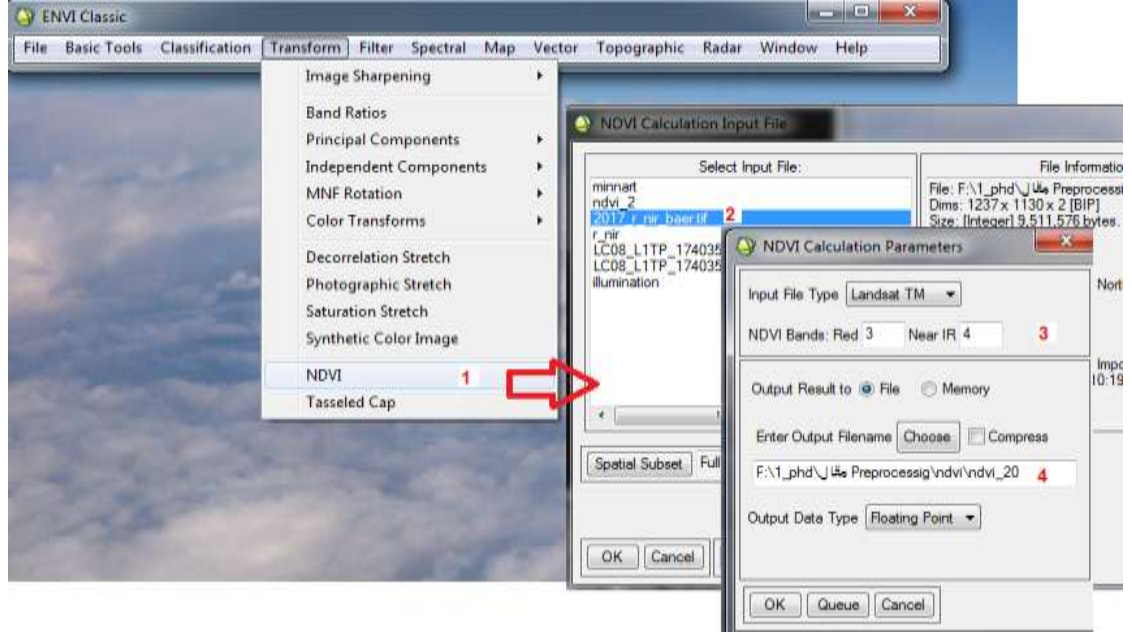
4- حساب NDVI

يعبر مؤشر الاختلاف النباتي القياسي NDVI عن النسبة بين فرق الانعكاس في القناتين الطيفيتين الحمراء RED وتحت الحمراء القريبة NIR نسبة إلى مجموعهما (Tucker, 1979)، ويحسب من العلاقة (7):

$$NDVI = \frac{R_{NIR} - R_{RED}}{R_{NIR} + R_{RED}} \dots\dots\dots (7)$$

حيث أن: R_{RED} قيمة الانعكاس في القناة تحت الحمراء القريبة والقناة الحمراء على الترتيب.

يوضح الشكل (6) خطوات حساب المؤشر باستخدام الأداة NDVI من قائمة Transform في شريط قوائم برنامج ENVI، ومن خلال مربع الحوار الذي يظهر نقوم بإدخال ملف الصورة التي تحوي القناتين الطيفيتين RED, NIR. ثم نحدد أرقام القنوات الطيفية بشكل صحيح ومكان حفظ صورة المؤشر الناتجة، ثم موافق.



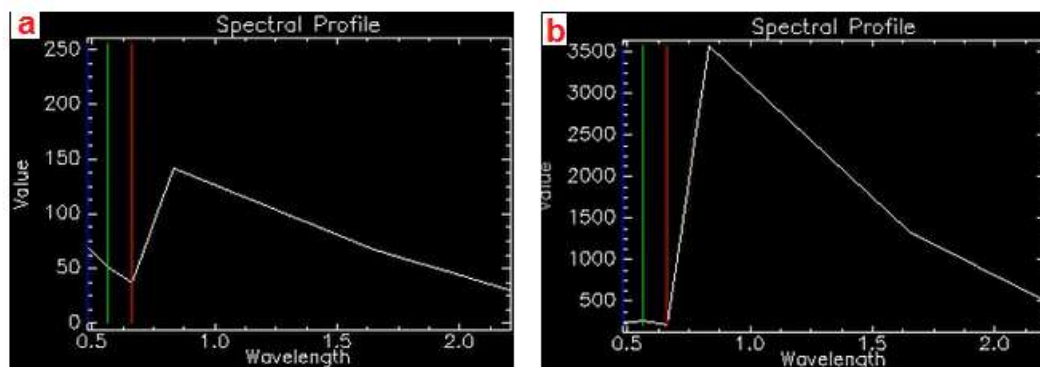
شكل 6. خطوات حساب مؤشر NDVI باستخدام برنامج ENVI.

وللوقوف على أهمية إجراء التصحيح المسبق على الصور، نقوم بحساب المؤشر مرتين من الصور الفضائية لاندسات للعام 2017. في المرة الأولى ابتداءً بالقيم الأصلية للقنوات الطيفية (DN)، أي قبل المعالجة المسبقة، وفي المرة الثانية انطلاقاً من قيم القنوات الطيفية بعد المعالجة المسبقة (التصحيح الإشعاعي والطبوغرافي)، ثم يتم مقارنة النتائج.

النتائج والمناقشة

1- التصحيح الإشعاعي

تم إجراء التصحيح الإشعاعي على الصورة المأخوذة في خريف 2017 باستخدام برنامج ENVI، وذلك بتطبيق المعادلات اللازمة على كل قناة طيفية على حدى، ما عدا القناتين الحراريتين (6، 7). يوضح الشكل (7) تغير قيم الاستجابة الطيفية (الانعكاس) المأخوذة لنفس النقطة (المنحني باللون الأبيض) في الصورة الأصلية (a)، والصورة المصححة إشعاعياً (b). حيث نلاحظ أن قيم الانعكاس في المجال المرئي من الطيف الكهرومغناطيسي، والموضح بالخطوط الزرقاء والخضراء والحمراء، بقيت أقل من 100 في الصورتين. بالمقابل، ظهر الفرق واضحاً في قيم الانعكاس ضمن مجال الطيف تحت الأحمر القريب (ذو أطوال الموجات بين 0.65 - 0.8). حيث سجلت قيم الانعكاس في الصورة الأصلية بين (40 - 150)، في حين تراوحت هذه القيم بين (300 - 3500) في الصورة المصححة. إن هذا التحسن الإيجابي الواضح في قيم الانعكاس للقناة تحت الحمراء القريبة، والذي طرأ على الصورة الفضائية قبل وبعد التصحيح، حيث تراوحت الزيادة لهذه القيم بين 750 % وحتى 2333 % (وهو ما يعادل من 7.5 وحتى أكثر من 23 ضعف)، يمكن أن يساعد الفنيين والحراجيين على سهولة التفسير المرئي للصور الفضائية وبالتالي يساهم بشكل جيد جداً في تمييز الأنواع النباتية المكونة للغطاء النباتي من جهة وفي تمييز هذا الغطاء النباتي عن غيره من استعمالات الأراضي. إذ أنه من المعروف في حالة الغطاء النباتي، يزداد الانعكاس ضمن القناة تحت الحمراء القريبة، وبالتالي تمييز الغطاء النباتي بدقة عالية (Bakr et al., 2010).



شكل 7. الفرق في الاستجابة الطيفية قبل إجراء التصحيح الإشعاعي (a) وبعد إجرائه (b).

2- التصحيح الطبوغرافي

انطلاقاً من الصورة الناتجة عن الخطوة السابقة تم إجراء التصحيح الطبوغرافي أيضاً باستخدام برنامج ENVI، وذلك بتطبيق الخطوات الموضحة سابقاً. يوضح الجدول (3) قيم الانعكاس الطيفي في القناتين 4، 5 (الحمراء وتحت الحمراء القريبة، على الترتيب) في عدة نقاط موزعة ضمن كل من الصورتين المصححة وغير المصححة طبوغرافياً. حيث نلاحظ ارتفاع قيم الانعكاس إجمالاً في الصورة المصححة طبوغرافياً وخصوصاً في مجال الطيف تحت الأحمر القريب (NIR) كون النقاط مأخوذة في منطقة مغطاة بالنباتات التي يرتفع امتصاصها للطيف في هذا المجال. ساهم التصحيح الطبوغرافي لصورة لاندسات 2017 في التخفيف من تأثير العوامل الطبوغرافية لمنطقة الدراسة (والتي هي عبارة عن منطقة جبلية تتباين فيها الانحدارات والمعارض). حيث ساهم هذا التصحيح في حصر الانعكاس بالغطاء النباتي وخاصة في القناتين الحمراء وتحت الحمراء، مما زاد من قيم هذا الانعكاس بنسبة تتراوح بين 102.9 % وحتى 176 % للقناة الحمراء وبنسبة تتراوح بين 100.8 % وحتى 202 % للقناة تحت الحمراء القريبة. فمثلاً تظهر النقطة 3 أعلى فرق في قيم الانعكاس في المجالين يقارب الضعف تقريباً، يعود ذلك إلى وجود هذه النقطة في مكان ظلالت التضاريس على الصورة والذي يتم تصحيحه بناء على متغير الإضاءة ضمن التصحيح الطبوغرافي، حيث تظهر أماكن التصحيح على الصورة بشكل خطوط شريطية في أماكن ظلالت الجبال والمرتفعات (Gao et al., 2015).

جدول 3. الفرق في القيمة الطيفية في نقطة من الصورة (للقناتين 4 و 5) قبل إجراء التصحيح الطبوغرافي (a) وبعده (b).

قيمة الانعكاس بعد التصحيح		قيمة الانعكاس قبل التصحيح		إحداثيات النقطة	التسلسل
NIR	RED	NIR	RED		
1484.980103	342.965210	1347	301	35° 47' 8.70" N 35° 55' 35.08" E	1
1932.183350	903.096680	1917	896	" N14.9' 635° 4 " E4.06' 635° 5	2
1414.255005	220.286713	700	125	" N06.33' 5135° 0 " E975.535° 55'	3
2156.493652	685.191345	2030	645	" N54.30' 5035° 0 " E40.16' 6° 63	4

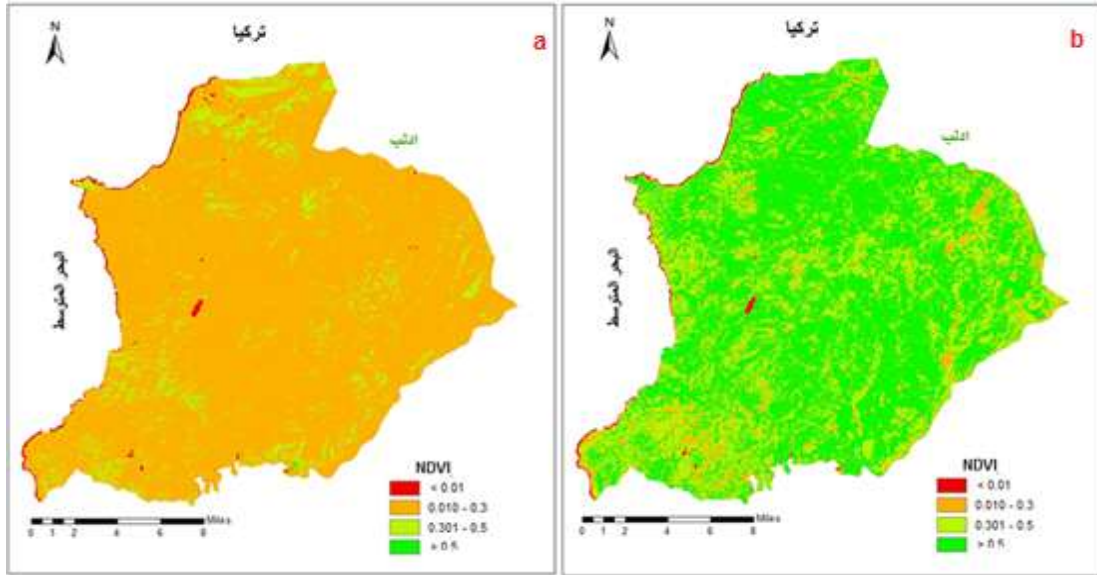
1763.636597	927.580322	1715	902	" N42.47' 835 ⁰ 4 " E26.18' 4 ⁰ 63	5
-------------	------------	------	-----	---	---

3- المؤشر NDVI

تمت المقارنة بين قيم مؤشر الاختلاف النباتي القياسي NDVI قبل وبعد المعالجة المسبقة للصورة باستخدام صورة لاندسات 2017 الأصلية (DN) والصورة المصححة إشعاعياً وطبوغرافياً، كل على حدى، حيث تم حساب مؤشر الاختلاف النباتي القياسي لمنطقة الدراسة وإخراج الخارطتين المقابلتين.

يوضح الشكل (8) خرائط مؤشر NDVI بعد إجراء تصنيف قيم NDVI إلى غطاء نباتي ضعيف (> 0.01)، متوسط ($0.3 - 0.01$)، جيد ($0.5 - 0.301$)، وجيداً جداً (< 0.5).

كانت الفروقات غير واضحة في نقاط التغطية النباتية المنخفضة، بينما سجلت فروقات جلية في النقاط ذات الغطاء الأرضي الجيد والجيد جداً. إذ أن الخريطة تعكس تغطية نباتية ضعيفة في معظم منطقة الدراسة في الصورة غير المصححة، بينما كانت المنطقة ذات غطاء نباتي جيد وجيد جداً في الصورة المصححة. يعود ذلك إلى تصحيح قيم الانعكاس الذي أعطى فروقات كبيرة خصوصاً في مجال الطيف تحت الأحمر القريب الذي يعبر عن الغطاء النباتي.



شكل 8. NDVI ناتجة عن القيم الرقمية DN في الصورة الأصلية (a) والناتجة عن القيم الطيفية المصححة (b).

تم اقتطاع جزء صغير من ملف قيم مؤشر الاختلاف النباتي القياسي المشتق من الصور قبل وبعد المعالجة، كمثال عن التغييرات التي حصلت في قيم هذا المؤشر قبل وبعد التصحيح (الجدول 4). حيث يتضمن هذا الجدول قيم NDVI لبعض بكسلات الصورة المعرفة برقم الصف والعمود المتواجدة به.

جدول 4. قيم NDVI في عدة نقاط من الصورة قبل إجراء المعالجة المسبقة (a) وبعد إجرائها (b).

قيمة مؤشر NDVI		موقع البكسل في الصورة	
NDVI- b	NDVI- a	Column- Y	Row- X
0.645248175	0.264262229	3969870	223560
0.670070708	0.269372314	3969870	223590

0.683820844	0.284208357	3969870	223620
0.648988903	0.263649076	3969870	223650
0.635706544	0.267267585	3969870	223680
0.702848911	0.295335203	3969870	223710
0.659298778	0.26737082	3969870	223740
0.547406077	0.197385192	3969870	223770
0.550733149	0.160200104	3969870	223800
0.606355727	0.19836925	3969870	223830
0.651995897	0.214451939	3969870	223860

نلاحظ الفرق في قيم NDVI والذي يميل للارتفاع الواضح بعد إجراء المعالجة المسبقة للصور وذلك في جميع النقاط. حيث بلغ المتوسط الحسابي لقيم مؤشر الاختلاف النباتي القياسي المشتق من الصورة قبل التصحيح (0.217) وانحراف معياري قدره (0.066)، بينما كانت قيمة هذا المؤشر المشتق من الصورة بعد المعالجة والتصحيح (0.535) مع انحراف معياري (0.162).

يعود هذا الارتفاع في قيم المؤشر النباتي NDVI بالدرجة الأولى إلى الزيادة الواضحة لقيم الانعكاس ضمن القناة تحت الحمراء القريبة بعد التصحيح الإشعاعي من جهة وإلى الزيادة الواضحة لقيم الانعكاس ضمن القناة الحمراء والقناة تحت الحمراء القريبة بعد التصحيح الطبوغرافي من جهة أخرى، إذ أن هاتين القناتين تدخلان في حساب هذا المؤشر النباتي NDVI. ساهم التصحيح الإشعاعي في التخفيف من آثار الغلاف الجوي (كالامتصاص والتشتت وغيرها) والتأثيرات الشمسية ومن تشوهات المستشعر، والذي يساهم بدوره في التقليل من الخطأ الموجود في الصورة الفضائية (Sundaresan *et al.*, 2007; Hansen *et al.*, 2008). كما ساهم التصحيح الطبوغرافي في التخفيف من آثار العوامل الطبوغرافية داخل صورة لاندسات (Hantson & Chuvieco, 2011).

الاستنتاجات والتوصيات

تُعد بيانات Landsat مورداً غنياً للتحليل البيئي، لكن الدراسات المرجعية على غناها وتعددتها قد تسبب بعض الارتباك في الاستفادة من هذه البيانات بشكل مناسب. حاولنا هنا تقديم شجرة قرار يمكن استخدامها كمرشد مبسط للمعالجة المسبقة لصور لاندسات لتحديد ما هو ضروري من خطوات المعالجة وتسلسل هذه الخطوات، وذلك بهدف تحقيق المستوى المناسب من المعالجة المسبقة للصورة لتطبيقات بيئية شائعة.

الاستنتاجات

- سُجلت فروق واضحة في قيم الاستجابة الطيفية في مجال الطيف الكهرومغناطيسي وخصوصاً المجال تحت الأحمر القريب (NIR) قبل وبعد التصحيح الإشعاعي.
- كان الفرق واضحاً في القيم الطيفية في القناتين الحمراء وتحت الحمراء القريبة بعد إجراء التصحيح الطبوغرافي على الصورة، وخاصة في ظل المرتفعات، وسجلت الفروق الأعلى في مجال الطيف تحت الأحمر القريب.
- لوحظ وجود اختلاف في قيم مؤشر الاختلاف النباتي القياسي NDVI قبل وبعد التصحيح، حيث سجلت فروقات واضحة في قيم المؤشر خصوصاً في النقاط ذات الغطاء الأرضي النباتي الجيد والجيد جداً.

التوصيات

- ضرورة إجراء المعالجة المسبقة للصور لما لها من تأثير كبير على القيم المسجلة في الصورة، وبالتالي على نتائج التحليل والدراسة المراد القيام بها وصولاً إلى نتائج صحيحة.
- تحديد إجراءات المعالجة المسبقة الضرورية للصور قيد الدراسة، وعدم القيام بأي تصحيحات غير ضرورية تجنباً لإدخال أخطاء على الصورة.

المراجع

المراجع العربية

- 1- جلب، أدهم؛ علي، أحمد؛ مرهج، علا. استخدام مؤشر الاختلاف النباتي القياسي NDVI في تقدير الجفاف في المنطقة الشمالية الشرقية من سورية. مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية، سلسلة العلوم البيولوجية، 2014. المجلد (36)، العدد (4): ص 207-221.
- 2- ديوب، فادي؛ عباس، حكمت؛ إدريس، يونس. مساهمة تقنيات الاستشعار عن بعد وأنظمة المعلومات الجغرافية في خطة تنظيم وإدارة الغابات (محمية النبي متى - طرطوس). رسالة دكتوراه مقدمة في قسم الحراج والبيئة، كلية الزراعة- جامعة تشرين. 2014.
- 3- قبيلي، عماد؛ ثابت، علي؛ إبراهيم، عبير. مراقبة استجابة مجموعات الأرز اللبناني *Cedrus libani* A. Richard الطبيعية في سورية للمتغيرات المناخية باستخدام الصور الفضائية MODIS NDVI. مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية، سلسلة العلوم البيولوجية، 2015. المجلد (37)، العدد (6): ص 83-99.

المراجع الأجنبية

1. BAKR, N.; WEINDORF, D.C.; BAHNASSY, M.H.; MAREI, S.M.; EL-BADAWI, M.M. Monitoring land cover changes in a newly reclaimed area of Egypt using multi-temporal Landsat data. Applied Geography. 2010. Vol. (30): 592-605.
2. BODART, C. H.; EVA, R.; BEUCHLE, R.; RAŠI, D.; SIMONETTI, H.-J.; STIBIG, A.; BRINK, E.; LINDQUIST, F.; ACHARD. Pre- Processing Of A Sample Of Multi- Scene And Multi- Date Landsat Imagery Used To Monitor Forest Cover Changes Over The Tropics. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2011. Vol. (66):555-563.
3. CHANDER, G.; MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO- 1 ALI sensors. Remote Sensing of Environment. 2009. Vol. (113): 893-903.
4. COHEN, W. B.; GOWARD, S. N. Landsat's role in ecological applications of remote sensing. BioScience. 2004. Vol. (54): 535-545.
5. COLBY, J. D. Topographic normalization in rugged terrain. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1991. Vol. (57): 531-537.
6. EKSTRAND, S. Landsat TM-Based Forest Damage Assessment: Correction for Topographic Effects. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1996. Vol. (62) (2): 51-161.
7. FLOOD, N. Continuity of Reflectance Data between Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI, for Both Top-of-Atmosphere and Surface Reflectance: A Study in the Australian Landscape. Remote Sensing. 2014. Vol. (6): 7952-7970.
8. FÜREDER, P. Topographic correction of satellite images for improved LULC classification in alpine areas. Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung. Band. 2010. Vol. (45): 187- 194.

9. GAO, M.; GONG, H.; ZHAO, W.; CHEN, B.; CHEN, Z.; SHI, M. An improved topographic correction model based on Minnaert. *GIScience & Remote Sensing*. 2015. Vol. (53): 1-18.
10. HANSEN, M.; ROY, D.; LINDQUIST, E.; ADUSEI, B.; JUSTICE, C.; ALTSTATT, A. A method for integrating MODIS and Landsat data for systematic monitoring of forest cover and change in the Congo Basin. *Remote Sensing of Environment*. 2008. Vol. (112) (5): 2495–2513.
11. HANTSON, S.; CHUVIECO, E. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2011. Vol. (13): 691–700.
12. KENNEDY, R. E.; TOWNSEND, P. A.; GROSS, J. E.; COHEN, W. B.; BOLSTAD, P.; WANG, Y. Q.; ADAMS, P. Remote sensing change detection tools for natural resource managers: understanding concepts and tradeoffs in the design of landscape monitoring projects. *Remote Sensing of Environment*. 2009. Vol. (113): 1382–1396.
13. MILLER, H., RICHARDSON, L.; SEXTON, N.; KOONTZ, L.; LOOMIS, J.; KOONTZ, S.; HERMANS, C. The users, uses, and value of Landsat and other Moderate-Resolution Satellite Imagery in the United States. Executive report. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, USA. 2011.
14. MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Forty- year calibrated record of earth- reflected radiance from Landsat: a review. *Remote Sensing of Environment*. 2012. Vol. (122):30–40.
15. MINNAERT, M. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysical Journal*. 1941. Vol. (93):403–410.
16. RIAÑO, D.; CHUVIECO, E.; SALAS, J.; AGUADO, I. Assessment of different topographic corrections in Landsat- TM data for mapping vegetation types (2003). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003. Vol. (41): 1056–1061.
17. RICHTER, R.; KELLENBERGER, T.; KAUFMANN, H. Comparison of topographic correction methods. *Remote Sensing*. 2009. Vol. (1): 184–196.
18. ROUSE, J.W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA (1973). SP-351 I: 309-317.
19. SUNDARESAN, A.; VARSHNEY, P. K.; ARORA, M. K. Robustness of change detection algorithms in the presence of registration errors. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*. 2007. Vol. (73): 375–383.
20. SCHROEDER, T. A.; COHEN, W. B.; SONG, C.; CANTY, M. J.; YANG, Z. Radiometric correction of multi-temporal Landsat data for characterization of early successional forest patterns in western Oregon. *Remote Sensing of Environment*. 2006. Vol. (103): 16–26.
21. SHEPHERD, J. D.; DYMOND, J. R. Correcting satellite imagery for the variance of reflectance and illumination with topography. *Inter. Jour. of Remote Sensing*. 2003. Vol. (24): 3503–3514.
22. SHIMIZU, K.; OTA, T.; MIZOUE, N.; YOSHIDA, S. Assessments of Preprocessing Methods for Landsat Time Series Images Of Mountainous Forests In The Tropics. *Journal of Forest Research*. 2018. DOI: 10.1080/13416979.2018.1434034.
23. TUCKER, C.J. Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. *Remote Sensing of the Environment*. 1979. Vol. (8): 127-150.
24. TURNER, W., et al. Free and open- access satellite data are key to biodiversity conservation. *Biological Conservation*. 2015. Vol. (182): 173–176.
25. TEILLET, P.M.; GUINDON, B.; GOODENOUGH, D.G. On the Slope-Aspect Correction of Multispectral Scanner Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*. 1982. Vol. (8) (2): 84-106.
26. TWELE, ANDRÉ; ERASMI, STEFAN. Evaluating topographic correction algorithms for improved land cover discrimination in mountainous areas of Central Sulawesi. Conference: Göttingen GIS & Remote Sensing Days (GGRS), Volume: Göttinger Geographische Abhandlungen. 2005. 113.
27. USGS Geological Survey. 2018. Landsat 7 Data Users Handbook. <https://Landsat.usgs.gov/Landsat-7-data-users-handbook-section-5>.

28. U.S. Geological Survey. 2014. Landsat 8 data Users handbook. USGS Earth Resources Observation and Science, Sioux Falls, South Dakota, USA.
29. U.S. Geological Survey. 2015a. What are the band designations for the Landsat satellites? <https://Landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-Landsat-satellites>.
30. U.S. Geological Survey. 2015b. Landsat processing details. <https://Landsat.usgs.gov/Landsat-Processing-Details>.
31. VANONCKELEN, S.; LHERMITTE, S.; VAN ROMPAEY, A. The effect of atmospheric and topographic correction methods on land cover classification accuracy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013. Vol. (24): 9–21.
32. VOGELMANN, J.E.; HELDER, D.; MORFITT, R.; CHOATE, M. J.; MERCHANT, J. W.; BULLEY, H. Effects of Landsat 5 Thematic Mapper and Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus radiometric and geometric calibrations and corrections on landscape characterization. *Remote Sensing of Environment*. 2001. Vol. (78): 55–70.
33. VOGELMANN, J. E.; GALLANT, A. L.; SHI, H.; ZHU, Z. Perspectives on monitoring gradual change across the continuity of Landsat sensors using time-series data. *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. (185): 258–270.
34. YOUNG, N. E.; ANDERSON, R.; CHIGNELL, S. M.; VORSTER, A. G.; LAWRENCE, R.; EVANGELISTA, P. H. A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*. 2017. Vol. (98) (4): 920–932.