مجلة جامعة دمشق للآداب والعلوم الإنسانية

اسم المقال: أسس تحديد درجة حرارة السطح باستخدام الصور الحرارية من Landsat-7
اسم الكاتب: د. هالة قابيل
رابط ثابت: https://political-encyclopedia.org/index.php/library/2810
تاريخ الاسترداد: 2026/11/02 12:00 +03

الموسوعة السياسيّة هي مبادرة أكاديمية غير هادفة للربح، تساعد الباحثين والطلاب على الوصول واستخدام وبناء مجموعات أوسع من المحتوى العلمي العربي في مجال علم السياسة واستخدامها في الأرشيف الرقمي الموثوق به لإغناء المحتوى العربي على الإنترنت.
لمزيد من المعلومات حول الموسوعة السياسيّة - Encyclopedia Political، يرجى التواصل على info@political-encyclopedia.org

استخدامكم لأرشيف مكتبة الموسوعة السياسيّة - Encyclopedia Political يعني موافقتك على شروط وأحكام الاستخدام المتاحة على الموقع https://political-encyclopedia.org/terms-of-use

تم الحصول على هذا المقال من موقع مجلة جامعة دمشق للآداب والعلوم الإنسانية ورفده في مكتبة الموسوعة السياسيّة مستوفياً شروط حقوق الملكية الفكريّة ومتطلبات رخصة المشاع الإبداعي التي ينضوي المقال تحتها.

أسس تحديد درجة حرارة السطح باستخدام الصور الحرارية من Landsat-7

د. هالة قابيل*

الملخص

تُعد درجة حرارة السطح من المتغيرات المهمة التي تقاسُ باستخدام معطيات الاستشعار عن بعد الفضائية، إذ تقدم الصور الحرارية إمكانية كبيرة في توفير معلومات عن التغيرات المكانية والزمانية لدرجة حرارة السطح. وقد طُوِّرَ العديد من المنهجيات لحساب درجة حرارة السطح من الفضاء. ومع ذلك، ما يزال تقدير درجة حرارة السطح من المهمات المعقدة منذ بداية عملية استخراجها. هَدَفَ هذا البحث إلى وضع الخطوات الأساسية لحساب درجة حرارة السطح من البيانات الحرارية للقمر Landsat-7. وعُرِضَت خلفية نظرية مختصرة عن الموضوع لتوضيح المفاهيم بين درجة حرارة السطح والمشعر الحراري، وأُتُبِعَ ذلك بالإطار المنهجي المستخدم لاستخراج درجة الحرارة السطحية من البيانات الفضائية، مع مثال تطبيقي على مدينة القاهرة.

الكلمات المفتاحية: درجة حرارة السطح، Landsat-7، معايرة راديومترية، تصحيح جوي، القدرة الإصدارية.

* جامعة دمشق، كلية الآداب والعلوم الإنسانية، قسم الجغرافية.

The Basic Steps of Land Surface Temperature Determination Using Thermal Images of Landsat-7

Dr. Hala kabeel[**]

Abstract

Land Surface Temperature (LST) is one of the most important variables measured by satellite remote sensing data, where the thermal images present a great potential for providing information on spatial and temporal changes in LST. Many methodologies have been developed for calculation the LST from the space. However, estimating LST is still a complex task since the beginning of its retrieval. This research aims to establish the basic steps for calculating the LST from the thermal data of Landsat-7. A brief theoretical background of the subject is reviewed to explain the concepts entre the LST and the thermal sensor, followed by the methodological framework used to derive the LST from the satellite data with an applied illustration on Cairo city.

Keywords: Land Surface Temperature (LST), Landsat-7, Radiometric calibration, Atmospheric correction, Emissivity.

[**] Damascus University, Faculty of Arts and Humanities, Department of Geography.

مقدمة:

تُعدُّ درجة حرارة السطح من العناصر المهمة في فيزياء سطح الأرض من خلال علاقتها بعمليات الطاقة وتبادلات الماء مع الغلاف الجوي، فهي تُمثّل دورًا أساسيًا في تطبيقات واسعة في الدراسات المائية والبيئية والتغير المناخي والغطاء النباتي. ونظرًا إلى أهمية هذا العنصر فقد زاد الاهتمام في تطوير طرائق عدّة لقياس درجة حرارة السطح باستخدام صور الاستشعار عن بعد، إذ تقدّم الصور الحرارية عبر الأقمار الصناعية تقديرات كميّة لدرجة حرارة السطح من خلال تسجيلها للطاقة الحرارية الصادرة عن سطح الأرض ضمن النوافذ الجوية من الطيف الكهرومغناطيسي. ويُسَجَّلُ 80% من هذه الطاقة في المجال الطيفي (10,50-12,50 ميكرومتر) الذي تعمل فيه أغلب المشعرات الحرارية (Czajkowski, et al: 2005).

استُخدِمَت صور حرارية بدقات مكانية مختلفة لحساب درجة الحرارة السطحية كصور الأقمار NOAA, TERRA, ERS, ENVISAT, Landsat، إذ تتنوع طرائق حسابها وفقًا لخصائص الصور الطيفية والمعامِلات الخاصة لكل قمر، فضلًا عن العوامل المرتبطة بالغلاف الجوي وبالسطح. وخلال العقود الماضية، أجريَ عدد من التحسينات على طرائق حساب درجة الحرارة، كي تتلاءم مع تنوع خصائص المشعرات المستخدمة، ومع اختلاف حساب القدرة الإصدارية للسطح. وتقسم هذه الطرائق إلى عدة أنواع على افتراض أن معلومات القدرة الإصدارية متوافرة مسبقًا (Li et al: 2013): *وطريقة أحادية المجال* (single-channel method)، *طريقة تعدد المجالات* (multi-channel method)، *وطريقة تعدد الزوايا* (multi-angle method). أمَّا في حال عدم توافر بيانات عن القدرة الإصدارية، فإن طرائق حساب درجة الحرارة يمكن أن تُصنّف إلى: طريقة الحساب العكسي (stepwise retrieval method)، وطريقة الحساب المشترك لقيم القدرة الإصدارية ودرجة الحرارة؛ مع كون معلومات الغلاف الجوي معروفة (simultaneous retrieval of emissivity and LST with known atmospheric information)، وطريقة الحساب المشترك دون معلومات معروفة عن الغلاف الجوي (simultaneous retrieval with unknown atmospheric information).

ويتعلق مدلول التقدير الحراري بالصور الفضائية بمفهومين مختلفين، كما وضّح ذلك الباحثان Voogt et Oke (2003). المفهوم الأول، يدعى **بدرجة حرارة الإشعاع** (Radiation Temperature) عندما يُحوَّلُ الإشعاع المنبعث من سطح الأرض الذي سجلته المشعرات الحرارية عبر تطبيق قانون Planck إلى قيم حرارية. أمَّا المفهوم الثاني، فيدعى **درجة حرارة السطح** (Land Surface Temperature) عندما تُصَحَّحُ قيم حرارة الإشعاع من تأثير نفاذية الغلاف الجوي والقدرة الإصدارية لسطح الأرض. ومع تعقيد عملية حساب درجة الحرارة عبر

الصور الفضائية، إلا أنّها تُمكّن من الحصول على معلومات مكانية مستمرة على الأرض عن توزع درجة الحرارة فوق مساحات واسعة، وبدقات مكانية متنوعة. من هنا جاءت فكرة هذا البحث الذي من شأنه وضع منهجية حساب درجة حرارة السطح باستخدام الصور الفضائية من Landsat-7.

مشكلة البحث:

ما يزال استخدام الصور الحرارية من الموضوعات النادرة في الدراسات المحلية. فضلًا عن أنّ أغلب البحوث التي تناولت موضوع حساب درجة حرارة السطح باستخدام الصور الفضائية لم تتطرق إلى توضيح مفهوم درجة الحرارة المحسوبة هل كانت حرارة الإشعاع أم حرارة السطح، لأنه من المهم التمييز بين هذين المفهومين نظرًا إلى اختلاف مدلول قيمتهما من جهة، وكيفية حسابهما من جهة أخرى. كما أنّ عملية حساب درجة الحرارة السطحية تحتاج إلى إجراء مستويات مختلفة من المعالجة الرقمية للصورة الفضائية، وما يتطلب ذلك من توفير عددٍ كبيرٍ من المعاملات الخاصة.

أهمية البحث:

تبرز أهمية هذا البحث من خلال تحديد الخطوات المنهجية لحساب درجة حرارة السطح من المعطيات الفضائية التي يغيب توضيحها في الدراسات المختصة بالموضوع، ليكون دليلًا مرجعيًا لمثل هذا النوع من الدراسات. كما أن صور Landsat-7 تُقدم دقة مكانية أعلى في المجال الحراري بالمقارنة بالأقمار الأخرى، وهي من البيانات الفضائية المتاحة للمستخدمين مجانًا.

هدف البحث:

يتمحور هدف البحث حول توضيح مضمون المعلومة التي تقدمها الصور الحرارية بشكل عام من خلال تسليط الضوء على المفاهيم الأساسية التي تربط حرارة السطح بالمشعرات الحرارية، ووضع أسس منهجية لحساب درجة حرارة السطح باستخدام صور Landsat-7.

منهج البحث وأدواته:

استند البحث إلى المنهج الوصفي التحليلي في شرح المفاهيم النظرية لدرجة الحرارة المستخرجة من الصور الحرارية، فضلًا عن استخدام الطرائق الاستشعارية في تحديد الخطوات المنهجية المتبعة لحساب درجة حرارة السطح. كما اعتمد البحث على خصائص صور القمر الصناعي Landsat-7 ذات الدقة المكانية (30م و60م) في المجالات الطيفية الانعكاسية والحرارية على التوالي في كيفية إنجاز هذه الخطوات.

منهجية حساب درجة حرارة السطح (Land Surface Temperature) باستخدام صور Landsat-7:

مع قِدم المهمة الفضائية التي أُرسل من أجلها القمر الصناعي Landsat-7، إلّا أنّ الصور التي يقدمها تمتلك خصائص مكانية وطيفية مميزة، إذ يمتلك مجاله الحراري أعلى دقة مكانية، وهي (60م) بين الصور الحرارية التي تم الحصول عليها من التصوير الفضائي. يبين الجدول (1) أهم خصائص القمر Landsat-7.

تُحْسَبُ درجة حرارة السطح (LST) باستخدام المجال الحراري لصور Landsat-7 وفق عدة مراحل:

1) المعايرة الراديومترية للصور الحرارية (Radiometric Calibration)

تُعدُّ هذه المرحلة من الخطوات المهمة في المعالجة الأولية للصور الحرارية، وهي عبارة عن تحويل القيم العددية في المجال الحراري إلى قيم إشعاعية. وتبرز أهمية إجراء هذه العملية عند استخدام المعطيات الفضائية في التطبيقات الكمية التي تتطلب قياس القيم الإشعاعية الحقيقية. وتكون هذه المرحلة ضرورية أيضًا عند التعامل مع صور من مشعرات حرارية مختلفة من أجل الحصول على قيمة راديومترية موحّدة. تجري هذه العملية وفق خطوتين:

1.1) الخطوة الأولى: تحويل الأعداد الرقمية DN(Digital Numbres) إلى قيم للإشعاع الطيفي (Spectral Radiance) المقيس عند المشعر عبر استخدام معاملات المعايرة الخاصة بالمجالات الحرارية المستخدمة والمبيّنة في الجدول (2) وفق المعادلة **(1)** (Landsat handbook):

$$L_\lambda = \alpha\,(DN) + \beta$$

إذ:

$L\lambda$: الإشعاع الطيفي الحقيقي المقيس عبر المشعر بالواحدة الإشعاعية(W/(m².sr.µm

α و β: معامِلات معايرة المشعر الخاصة بالمجال الحراري

كما يمكن أيضًا حساب قيم الإشعاع الطيفي بطريقة أخرى باستخدام القيم المسجلة في ملفات المجالات الحرارية من خلال المعادلة **(2)** (Chander and Markham,2003):

$$L_\lambda = \left(\frac{L_{MAX\,\lambda} - L_{MIN\,\lambda}}{QCAL_{MAX} - QCAL_{MIN}}\right) \times (QCAL - QCAL_{MIN}) + L_{MIN\,\lambda}$$

إذ:

Lλ: الإشعاع الطيفي المقيس عبر المشعر بالواحدة الإشعاعية W/(m².sr.µm).

L_{MAX}: القيمة العليا للإشعاع الطيفي.

L_{MIN}: القيمة الدنيا للإشعاع الطيفي.
$QCAL_{MAX}$: العدد الرقمي الأكبر (عمومًا يكون 255).
$QCAL_{MIN}$: العدد الرقمي الأصغر (عمومًا يكون 1).
QCAL: العدد الرقمي المعاير.

الجدول (1) : الخصائص المكانية والطيفية للقمر Landsat-7 ETM+

المجال الطيفي	مدى المجال الطيفي (ميكرومتر)	الدقة المكانية (م)
B(1) الأزرق	0.52-0.45	30
G(2) الأخضر	0.60-0.52	30
R(3) الأحمر	0.69- 0.63	30
NIR(4) تحت الأحمر القريب	0.90-0.76	30
MIR(5) تحت الأحمر المتوسط	1.75-1.55	30
TIR(6) الحراري	**12.6-10.4**	**60**
MIR (7) تحت الأحمر المتوسط	2.32-2.08	30
PAN(8) البنكروماتي	0.90-0.52	15

المصدر : www.landsathandbook.gsfc.nasa.gov

الجدول (2) : معاملات المعايرة الخاصة بالمجال الحراري في القمر Landsat-7 ETM+

$LMAX_{\lambda}$:	12.65 (H), 17.04 (L)
$b = LMIN_{\lambda}$:	3.20 (H), 0.0 (L)
$a = (LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda})/QCALMAX$:	0.0370588 (H), 0.0668235 (L)
K1 (درجة كلفن) :	666.09
K2 : (W/(m².sr.µm))	1282.71

المصدر : www.landsathandbook.gsfc.nasa.gov

2.1) الخطوة الثانية: تحويل قيم الإشعاع الطيفي إلى قيم حرارية تعادل درجة حرارة الإشعاع (°C) عند مستوى المشعر بالاعتماد على الثوابت الحرارية لعملية المعايرة حسب المعادلة **(3)** (Chander and Markham,2003):

$$T_{SAT} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{\lambda}}+1\right)} - 273.15$$

إذْ:

T_{SAT}: درجة حرارة الإشعاع استنادًا إلى الجسم الأسود الداخلي في المشعر(درجة مئوية)

K2: ثوابت المعايرة الحرارية (درجة الكلفن)

K1: ثوابت المعايرة الحرارية بالواحدة الإشعاعية W/(m².sr.µm)

Lλ: الإشعاع الطيفي المقيس عبر المشعر بالواحدة الإشعاعية W/(m².sr.µm)

وأشار الباحثون Chander *and al.*, (2009) إلى أنّ درجة حرارة الإشعاع التي حُسِبَت لا تمثل الدرجة الفعلية لحرارة السطح؛ لأنّها تَعدُّ من جهة أن سطح الأرض كجسم أسود، ومن ثمَّ تكون قيمة القدرة الإصدارية له (ε) تعادل 1، ومن جهة أخرى تتضمن هذه الحرارة تأثير الغلاف الجوي. ولكي نحصل على درجة حرارة السطح الفعلية يجب إزالة التأثيرات الجوية على الإشعاع الأرضي، وأيضًا الأخذ بالحسبان القدرة الإصدارية لمظاهر السطح؛ وهذا ما جرى التطرق إليه في المراحل الآتية.

2) تصحيح القيم الإشعاعية (Radiance Correction):

وهي عملية تحويل القيم الإشعاعية من المرحلة الأولى إلى قيم إشعاعية مصححة من تأثيري الغلاف الجوي والقدرة الإصدارية للسطح وفق خطوتين:

1.2) الخطوة الأولى: التصحيح الجوي: (Atmospheric Correction)

تعدُّ إزالة تأثير الغلاف الجوي في المجال الحراري خطوة جوهرية لاستخدام الصور الفضائية في الدراسات الحرارية. ومع أن هذا الجزء من المجال الحراري (10,40-12,50 µm) يقع ضمن النوافذ الجوية التي يقل فيها دور الغلاف الجوي إلّا أنّ تأثيره ليس مهملًا؛ ممَّا يجعل الإشعاع الذي سُجِّلَ بواسطة المشعر (L_{SAT}) لا ينطبق تمامًا على الإشعاع المنبعث من سطح الأرض ($L_{SURFACE}$). توجد العديد من التداخلات التي يتعرض لها الإشعاع خلال مساره من الأرض وصولًا إلى المشعر عبر الممر الجوي كما يوضّحها الشكل (1). فالإشعاع الذي يبثّه الغلاف الجوي من جهة، باتجاه المشعر يسمى السطوع الجوي الصاعد (upwelling radiance of the atmosphere)، وأيضًا الإشعاع الذي ينفذ عبر الغلاف الجوي من جهة أخرى باتجاه الأرض يسمى السطوع الجوي النازل أو الإشعاع السماوي (downwelling radiance of the atmosphere or sky radiance)؛ يشكل معلومة إضافية يمكن أن تزيد في قيمة الإشعاع المسجل عند مستوى المشعر (Radiance at sensor).

كما يمكن أن يمتص الغلاف الجوي جزءًا من الإشعاع المنبعث من الأرض بسبب مكوناته الغازية المختلفة والذي يؤدي إلى نقصان في قيمة الإشعاع المسجل. وإنّ عملية الامتصاص الجوي هي الظاهرة المهيمنة من تأثير الغلاف الجوي في الأشعة تحت الحمراء

الحرارية؛ وهي ترتبط بدرجة نفاذية الغلاف الجوي (atmospheric transmission)[1]، ومن ثمَّ ينتج عنها انخفاض في قيمة حرارة الإشعاع المحسوبة لأنّ السطوع الجوي لا يعوّضها بشكل كامل (Bonn and Rochon, 1992). لذلك يجب تصحيح الإشعاع الطيفي المسجل في المشعر من تأثير الغلاف الجوي؛ لأنَّه ينعكس بدوره على حساب درجة حرارة السطح وفق العلاقة **(4)** (Barsi *et al.*, 2003):

$$L_{SAT} = \tau L_{SURFACE} + L_{UP} \rightarrow L_{SURFACE} = \frac{L_{SAT} - L_{UP}}{\tau}$$

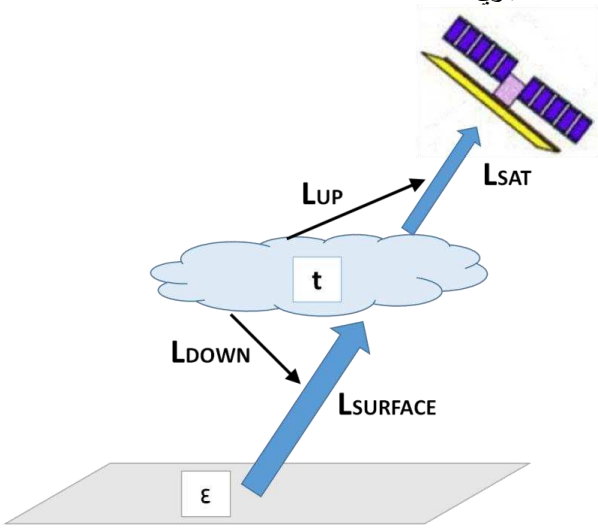
إذْ:

L_{SAT}: الإشعاع الطيفي المسجل في المشعر

L_{SURFAC}: الإشعاع المنبعث من سطح الأرض مصحّح من التأثير الجوي

L_{UP}: السطوع الجوي الصاعد.

τ : نفاذية الغلاف الجوي.



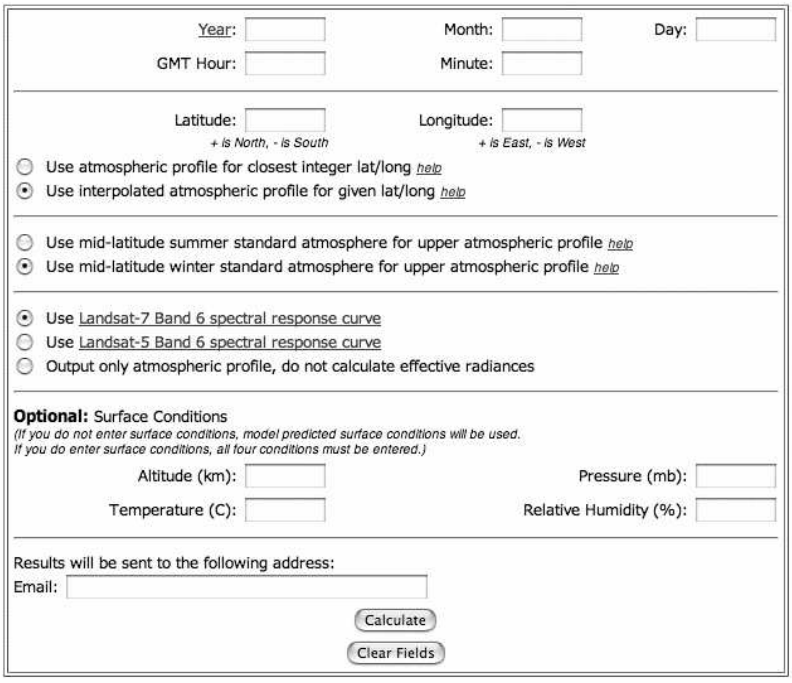
الشكل (1): تأثير الغلاف الجوي على الإشعاع المنبعث من الأرض باتجاه المشعر[2]

[1]- تعبر درجة نفاذية الغلاف الجوي عن العلاقة بين الأشعة النافذة عبر وسط ما إلى الأشعة الساقطة.

2- من تصميم الباحث

تنقسم الطرائق المستخدمة عمومًا في عملية التصحيح الجوي إلى مجموعتين: الطرائق المباشرة التي تعتمد على القياسات المسجلة عبر أجهزة القياس لكي تُستخدم لاحقًا في موديلات (نماذج) مناخية، والطرائق غير المباشرة التي تعتمد على بيانات الصور الفضائية التي تحوي عدة مجالات حرارية؛ لكي تستخدم كمدخلات ضمن الموديلات المناخية

بالنسبة إلى صور القمر Landsat–7 الذي يضم مجالًا حراريًا واحدًا، أُجرِّيَ التصحيح الجوي بإدخال معاملات جوية خاصة (تتعلق بنفاذية الغلاف الجوي والسطوع الجوي الصاعد، والسطوع الجوي النازل) في معادلة تصحيح الإشعاع الطيفي المسجل في المشعر باستخدام قيم الإشعاع التي تم الحصول عليها في المرحلة الأولى. يمكن تقدير قيم هذه المعاملات عبر نماذج التحويل الإشعاعي، مثل (MODTRAN) بالاعتماد على ظروف أخذ المعطيات الفضائية. لذلك طوّر مركز البحوث الفضائي الأمريكية (NASA) أداة آلية للتصحيح الجوي تدعى: حاسب معامل التصحيح الجوي «Atmospheric Correction Parameter Calculator» من أجل تسهيل حساب المعاملات الجوية لصور Landsat التي تحوي مجالًا حراريًا واحدًا. يوضّح الشكل (2) هذه الأداة وما تتطلبه من مدخلات، إذ تُدْخَل معلومات عن وقت الصورة وتاريخها وتحديد الإحداثيات الجغرافية للموقع المدروس لكي تُولَّد بيانات عن المعاملات الجوية إمَّا لأقرب نقطة لهذا الموقع أو للنقاط الأربع المحيطة به. كما يُطلب اختيار نوعية الملفات الجوية المعيارية التي سيُعتَمَد عليها أهي مسجلة في فصل الصيف أو في فصل الشتاء بما يخص بيانات درجات الحرارة، والضغط الجوي، والرطوبة النسبية في العروض الجغرافية المتوسطة، فضلًا عن تحديد نوع القمر المستخدم من أقمار Landsat. ويمكن إدخال بشكل اختياري معلومات متوافرة عن ارتفاع السطح، ودرجة الحرارة، والضغط الجوي، والرطوبة النسبية.



الشكل (2): أداة التصحيح الجوي لصور Landsat لحساب المعاملات الجوية

المصدر: www.atmcorr.gsfc.nasa.gov

2.2) الخطوة الثانية: حساب القدرة الإصدارية للسطح (Calculation of Land surface Emissivity)

إنّ تأثير القدرة الإصدارية[3] في المجال الحراري عادة ما يتركز في خفض نسبة الإشعاع المنبعث من الأرض الذي تحدده العلاقة **(5)** (Schmugge *et al.*, 2002):

$$L_{SURFACE} = \varepsilon L_{OBJECT} + (1 - \varepsilon)\, L_{DOWN}$$

[3]- يتعلق مفهوم القدرة الإصدارية بنسبة تدفق الأشعة المنبعثة في واحدة المساحة من سطح ما (جسم رمادي) إلى تدفق الأشعة المنبعثة في واحدة المساحة من الجسم الأسود (Black Body) بدرجة الحرارة نفسها تتفاوت قيمها من 0 إلى 1 للجسم الأسود (Bonn and Rochon, 1992).

إذْ:

L_{SURFAC}: الإشعاع المنبعث من سطح الأرض.

ε: القدرة الإصدارية.

L_{OBJECT}: الإشعاع المنبعث من الأجسام حسب درجة حرارتها.

L_{DOWN} : الإشعاع السماوي.

وتختلف الأجسام في قدرتها الإصدارية وفقًا لعدة عوامل، أهمها بنية السطح وخشونته ومحتواه المائي، وتحَدَّدُ قيمتها إمَّا مباشرة عبر أجهزة قياس خاصة، أو بشكل غير مباشر باستخدام المعطيات الحرارية وفق عدة طرائق حسابية، نذكر منها

Thermal Infrared Spectral Indices (T1SI), *alpha residuals*, *Temperature Separation (TES), spectral ratio, ou classification-based .Emissivity* Srivastava *et al.*, 2009 ; Stathopoulou *et al.*, 2006 ; Li *et al.*, 2012) *emissivity*

وإن عملية التصحيح غير المباشرة للقدرة الإصدارية يمكن أن يساعد لاحقًا على الحصول على تمثيل واقعي لدرجة حرارة السطح. لكن أغلب الطرائق المستخدمة تُطَبَّق على صور تحوي عدة مجالات حرارية، في حين لا يمكن تطبيقها على صور Landsat−7 لأنَّها تحوي مجالًا حراريًا واحدًا. لذلك اقترح الباحثون (Sobrino *et al.*, 2004) طريقة بديلة لحساب القدرة الإصدارية على الصور بمساعدة قرينة الغطاء النباتي NDVI التي يمكن حسابها بسهولة. وقد وضّح الباحثون (Srivastava *et al.*, (2009 أهمية هذه الطريقة من خلال العلاقة التي تربط بين NDVI والقدرة الاصدارية عبر المعادلة (6):

$$\varepsilon = 1.0094 + 0.0047 * \ln(\text{NDVI})$$

تتمثّل الطريقة البديلة لحساب القدرة الإصدارية بالخطوات الآتية يوضّحها الشكل (3):

- حساب قيم الانعكاس في المجالين الأحمر وتحت الأحمر القريب بعد تحويل القيم العددية إلى قيم إشعاعية أولًا، ثم تطبيق المعادلة (7) باستخدام معاملات المعايرة الخاصة بهذين المجالين ثانيًا:

$$\rho_{SAT} = \frac{\pi * L_{\lambda} * d^2}{E_{SUN} * \sin EL}$$

إذ:

ρ_{SAT}: قيم الانعكاس المعاير في المشعر

$L\lambda$: الإشعاع الطيفي المقيس عبر المشعر بالواحدة الإشعاعية (W/(m².sr.µm.

d: المسافة الفلكية بين الأرض والشمس في يوم أخذ الصورة الفضائية.

E_{SUN}[4]: متوسط قيمة الإشعاع الشمسي في المجال الطيفي المحدد .
sinEL: جيب زاوية ارتفاع الشمس في يوم أخذ الصورة الفضائية (أو ما يعادل تجب الزاوية الشمسية الأفقية).

إذْ يُفضّل الاعتماد على قيم الانعكاس (Reflectance) في المجالين الأحمر وتحت الأحمر القريب في حساب القرينة النباتية، وليس على قيمة الإشعاع (Radiance)؛ لأنَّ ذلك سيعطي تمثيلًا أكثر واقعية للغطاء النباتي؛ كما أشار الباحثون Chander *et al.* (2009) إجراء تصحيح جوي لقيم الانعكاس المحسوب في المشعر في حال توفر المعاملات الجوية الخاصة بالمجالين الأحمر وتحت الأحمر القريب (كما في حال المجال الحراري سابقًا) حتى نحصل على الانعكاس عند سطح الأرض في كلا المجالين عبر المعادلة **(8)**:

$$\rho_{SURFACE} = \frac{\rho_{SAT} - \rho_{ATM}}{\tau}$$

إذْ:
$\rho_{SURFACE}$: الانعكاس عند سطح الأرض.
ρ_{SAT}: الانعكاس الذي حُسِبَ في المشعر.
ρ_{ATM}: انعكاس الغلاف الجوي.
τ: نفاذية الغلاف الجوي.

- تطبيق قرينة NDVI وفق المعادلة (9) لقيم الانعكاس في المجالين الأحمر(R=Band3)، وتحت الأحمر (NIR=Band4):

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho R}{\rho NIR + \rho R}$$

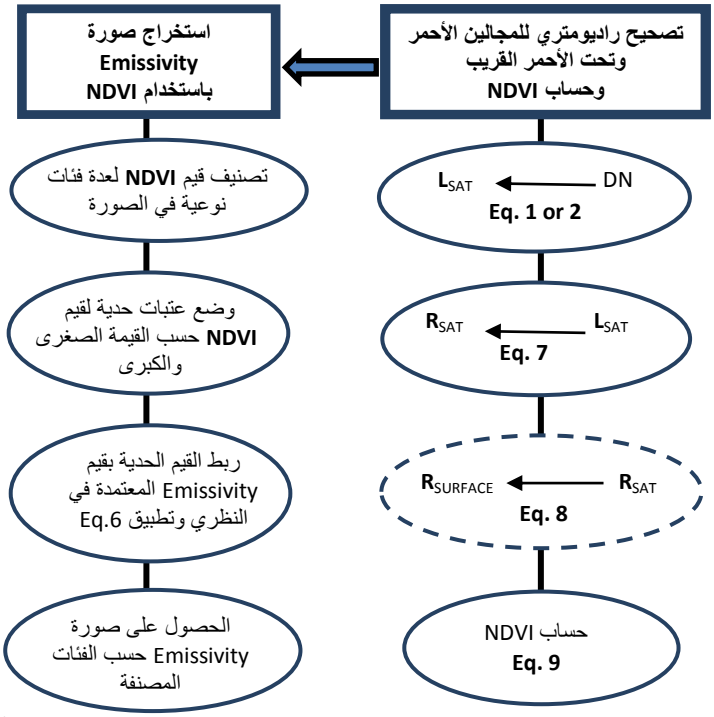
- وضع عتبات حدية لقيم NDVI بشكل يتناسب مع وجود الغطاء النباتي في الصورة ثم ربطها بما يقابلها من قيمٍ للقدرة الإصدارية الجدول (3)، كما وردت في البحوث المختصة بالموضوع (Liu & Zhang: 2011; Yonghong Hu & Gensuo Jia: 2010; Srivastava *et al:* 2009; Sobrino *et al:* 2005). ويتعلق اختيار حدود هذه العتبات بقيم NDVI الصغرى والكبرى الخاصة بالصورة، لذلك يجب أخذ هذه القيم بالحسبان حتى تُوضَع قيم حدية مناسبة لكل صورة. ومن ثمَّ نحصل على صور نهائية لقيم القدرة الاصدارية.

[4]- Esun: Mean solar exo-atmospheric irradiance

الجدول (3) : تقدير قيم القدرة الاصدارية باستخدام قرينة NDVI

تصنيف الغطاء النباتي وفق قيم NDVI	العتبات الحدية لقيم NDVI	قيم القدرة الاصدارية (ε)
عدم وجود غطاء نباتي	NDVI < 0.2	0.92 - 0.97
غطاء نباتي جزئي	0.5 ≤NDVI≤ 0.2	$\varepsilon = 1.0094 + 0.0047 * \log(NDVI)$
غطاء نباتي كلي	NDVI > 0.5	0.96 - 0.99

المصدر: من تصميم الباحث اعتمادًا على ما ورد في البحوث المختصة بالموضوع[5]



الشكل (3): خطوات الطريقة البديلة لحساب القدرة الإصدارية باستخدام NDVI [6]

5- Liu & Zhang: 2011; Yonghong Hu & Gensuo Jia: 2010.

6- من تصميم الباحث

3) حساب درجة حرارة السطح (Calculation of Land Surface Temperature)

بعد الحصول على قيم الإشعاع، نقوم بتصحيحه من العوامل الجوية وتأثير القدرة الإصدارية بشكل مباشر (بعد توافر بياناتهما) وفق المعادلة **(10)** (Zhang *et al.*, 2009):

$$L_{GROUND} = \frac{L_{DOWN}(L_{SAT} - L_{UP} - \tau)(1-\epsilon)}{\tau\varepsilon}$$

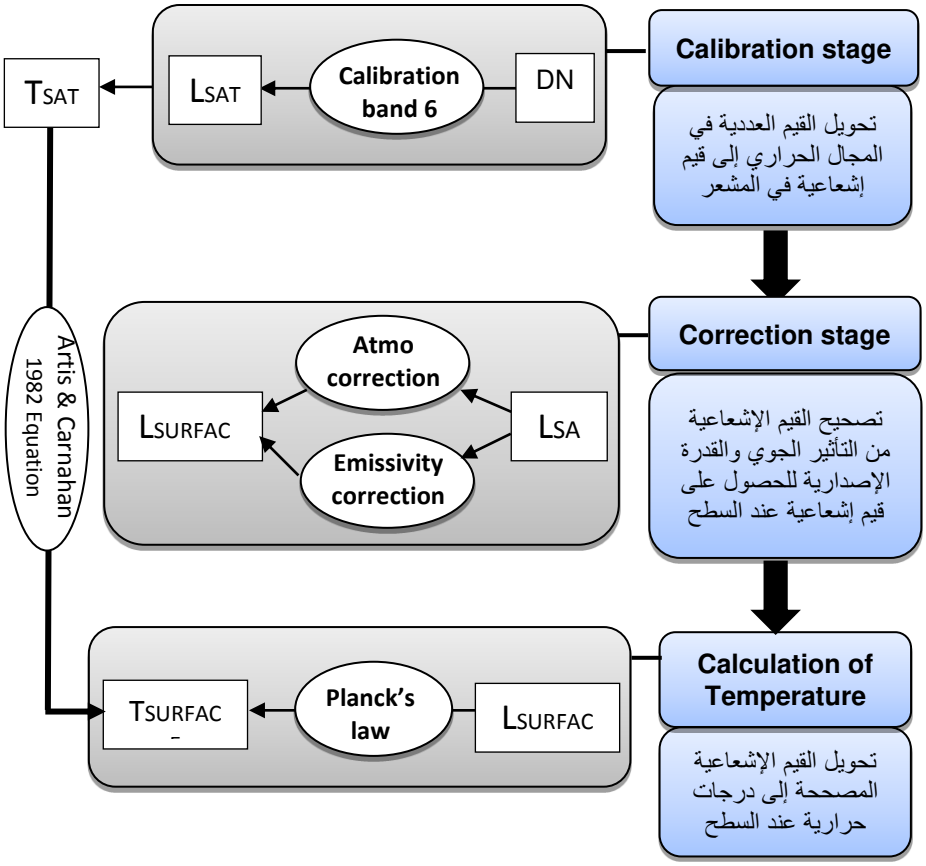
ثم نطبق قانون حساب درجة حرارة السطح **(11)** بالدرجة المئوية) بالاعتماد على الإشعاع المنبعث من سطح الأرض:

$$T_{SURFACE} = \frac{K2}{\ln\left(\frac{K1}{L_{GROUND}}+1\right)} - 273.15$$

ويمكن أيضًا الحصول على درجة حرارة السطح عبر تصحيح درجة حرارة الإشعاع مباشرة من تأثير القدرة الإصدارية فقط وفق المعادلة **(12)**(Artis et Carnahan 1982) :

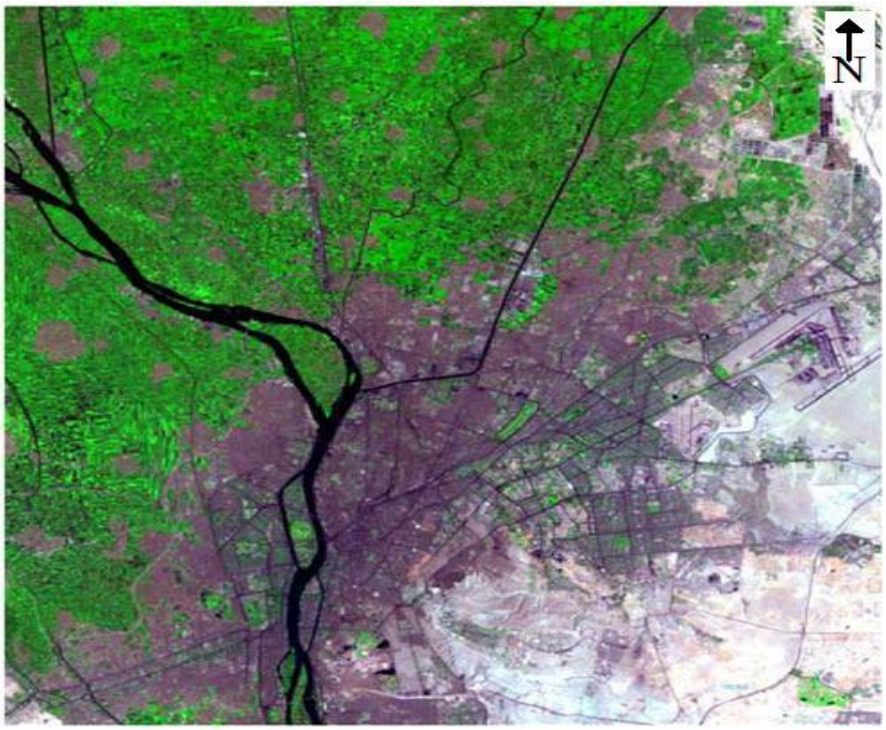
$$T_{SURFACE} = \frac{T_{SAT}}{1 + (\lambda * T_{SAT} / \rho)\log\varepsilon}$$

يوضّح الشكل (4) مخطط حساب درجة حرارة السطح من الصور الفضائية وفق المراحل المشروحة سابقًا. ويُظهر الشكلان (5,6) مثالًا توضيحيًا لحساب درجة حرارة السطح باستخدام صور Landsat-7 لمدينة القاهرة.



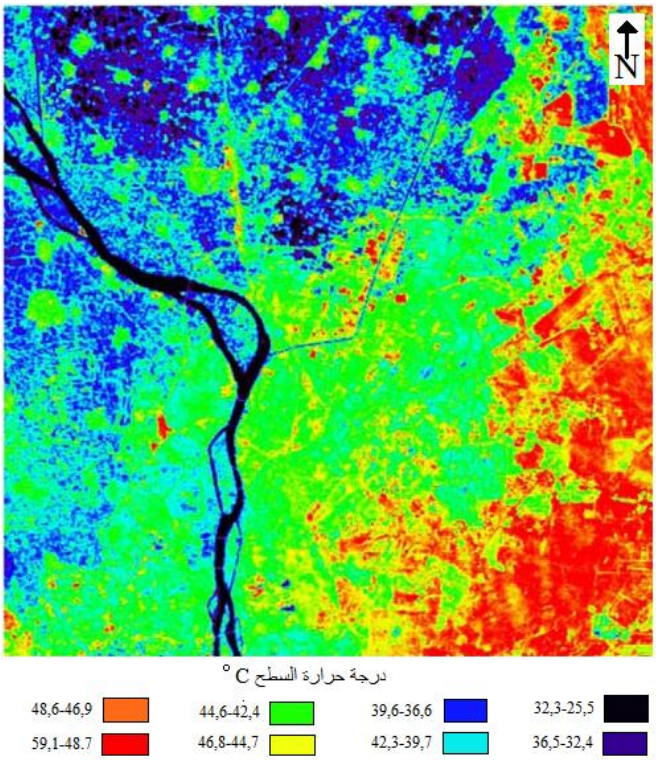
الشكل (4): المراحل المنهجية لحساب درجة حرارة السطح[7]

[7]- من تصميم الباحث



الشكل (5): صورة Landat-7 لمدينة القاهرة بتاريخ 2000/8/23[8]

[8]- حسب ما توافر للباحث (صورة تحوي مجالًا حراريًا)

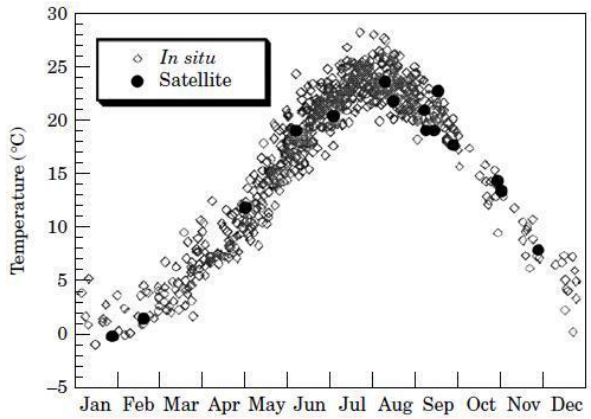


الشكل (6): درجات حرارة السطح المحسوبة على صورة Landsat-7 لمدينة القاهرة

يبيّن الشكل (5) صورة فضائية لمدينة القاهرة التي طُبِّقَت منهجية البحث عليها، إذ تتصف هذه المنطقة بتنوع غطاء الأراضي الموجود فيها الذي يتوزع مكانيًا بشكل يسهل تمييزه على الصورة. وقد استُخدِم التركيب اللوني (أخضر، تحت الأحمر القريب، تحت الأحمر المتوسط) لأنَّه يُظهر انعكاسًا واضحًا للمدينة عن الغطاء النباتي و الأراضي الصحراوية المحيطة بها. ويظهر الشكل (6) التباين الواضح بين درجات الحرارة السطحية المرتفعة (50,8° وسطيًا) لمنطقة الصحراء في الجزء الجنوبي الشرقي ودرجات الحرارة المنخفضة نسبيًا للأراضي الزراعية في منطقة الدلتا في الجزء الشمالي الغربي (36,2° وسطيًا)، وتبدو المدينة بدرجات حرارة متوسطة بينهما (44,6° وسطيًا).

اختبار دقة البيانات الحرارية الفضائية وربطها بالمعطيات الأرضية

تعدُّ دراسة العلاقة بين نتائج البيانات الفضائية والبيانات الأرضية من الموضوعات المهمة لاختبار دقة المعطيات الفضائية ومدى فعالية عمليات المعايرة والتصحيح المستخدمة. وقد أظهرت بعض البحوث (Mustard *et al:* 1999; Weng et Quattrochi: 2006; Barsi *et al:* 2003; Coll *et al:* 2010) وجود علاقة ارتباط واضحة بين درجات الحرارة الأرضية المستخرجة من البيانات الفضائية والبيانات الأرضية الشكل (7).



الشكل (7): علاقة الارتباط بين درجات الحرارة المسجلة في الأقمار الصناعية (Satellite) ودرجات الحرارة الأرضية المقاسة عند السطح (*In situ*) (Mustard *et al:* 1999)

ويشير الباحثون (Yu *et al:* 2014) إلى أنّه مع وجود منهجيات مختلفة لاستخراج درجات الحرارة من المعطيات الفضائية المتنوعة، إلاّ أنّ عملية اختبار دقتها تبقى موضوعًا حساسًا لاختلاف المقياس المكاني بين المشعر والقياسات الأرضية وللاختلافات المكانية والزمانية لدرجة الحرارة بحد ذاتها. ومن الطرائق الأساسية المستخدمة في اختبار دقة درجات الحرارة المستخرجة من البيانات الفضائية (Li *et al:* 2013):

1. الطريقة المعتمدة على درجات الحرارة الأرضية التي تشترط وجود قياسات حرارية أرضية في زمن الصورة لمقارنتها بالقيم الفضائية.
2. الطريقة المعتمدة على قياس الإشعاع الأرضي التي تشترط وجود قيم القدرة الإصدارية والمعاملات الجوية الخاصة بالصورة ومقارنته بالإشعاع عند المشعر.
3. طريقة المقارنة مع ببيانات مرجعية موثوق بها من مشعرات أخرى.

وتعتمد دقة حساب درجة حرارة السطح اعتمادًا أساسيًا على دقة عملية تصحيح التأثير الجوي، والقدرة الإصدارية، إذ إنَّ الفارق بين درجة حرارة الإشعاع (غير مصححة) وحرارة السطح (مصححة) يراوح من 1–5 كلفن (Srivastava *et al:* 2009). كما أن حساب درجة حرارة السطح من دون تصحيح جوي يترك خطأً في القيم الحرارية بحدود 4–7 درجة مئوية (Weng *et al:* 2008b).

النتائج والمقترحات:

في هذا البحث، شُرِحَت كيفية استخدام صور Landsat-7 في حساب درجة حرارة السطح وفق خطوات منهجية محددة. وقد اعتُمِدَ على البيانات الخاصة بالصور في إجراء عمليات المعالجة الأولية، والاستعانة بطرائق بديلة لإجراء عمليات التصحيح المطلوبة.

كما وُضِعَ مثال توضيحي عن تطبيق منهجية البحث على مدينة القاهرة، إذ اختلف التوزّع المكاني لدرجات حرارة السطح وفقًا لتنوع غطاء الأراضي بين الغطاء النباتي (حرارة منخفضة نسبيًا)، والمناطق العمرانية (حرارة متوسطة)، والمناطق الصحراوية (حرارة مرتفعة).

تتعلق صحة نتائج البحث بعدة عوامل:

1. نوعية الحرارة المستخرجة من الصور، إذْ ترتبط دقة عملية حساب درجة حرارة الإشعاع بتوفر البيانات عن المجال الحراري الخاص بالقمر الصناعي، في حين تستلزم دقة حساب درجة حرارة السطح إجراء عمليات التصحيح (الجوي والقدرة الإصدارية). ومن ثَمَّ يعتمد تفسير النتائج على كيفية حساب درجة الحرارة سواءً عند المشعر (حرارة الإشعاع)، أو عند مستوى السطح (حرارة السطح).

2. الظروف المناخية الخاصة بالمنطقة المدروسة، فكل منطقة لها خصائصها الجغرافية التي تميزها عن غيرها.

3. تأثير غطاء واستعمالات الأراضي، إذ تختلف درجة حرارة السطح حسب طبيعة الغطاء، أو الاستعمال الأرضي.

مقترحات البحث:

– دراسة الاختلافات المكانية لدرجة الحرارة وفق أنواع استعمالات الأراضي يمكن أن تُشكّل موضوعات البحوث مستقبلية.

– تَوفّر قياسات أرضية عن درجة حرارة الجو وربطها بدرجة حرارة السطح المستخرجة من الصور الفضائية، يمكن أن يفسح المجال أمام بحوثٍ مستقبليةٍ تزيد من فعالية استخدام البيانات الاستشعارية في الدراسات المناخية والبيئية.

– وتَوفّر بيانات أخرى من الصور فائقة الطيفية يمكن أن يفيد في مقارنة حساب درجة الحرارة على صور بدقات طيفية مختلفة.

References:

1. Artis D. A. & Carnahan W. H: "Survey of Emissivity Variability in Thermography of Urban Areas", Remote Sensing of Environment, vol(12), n(4), 1982, Pp: 313-329.

2. Barsi J. A; Schott J. R; Palluconi F. D; Helder D. L; Hook S. J; Markham B; Chander G; & O'Donnell E. M: Landsat TM and ETM+ "thermal band calibration", Canadian Journal of Remote Sensing, vol(29), n(2), 2003, Pp: 141-153.

3. Bonn. F; & Rochon G: "Précis de Télédétection: Principes et Méthodes", Québec, Presses de l'université de Québec AUPELF, vol(1), 1992, P: 485.

4. Chander. G; & Markham. B: "Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Post-calibration Dynamic Ranges", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol(41), n(11), 2003, Pp: 2674-2677.

5. 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, vol(113), n(5), 2009, Pp: 893-903.

6. Coll. C; Galve, J. M; Sanchez, J. M; & Caselles, V: "Validation of Landsat-7/ETM+ thermal-band calibration and atmospheric correction with ground-based measurements". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 48, 2010, P: 547–555.

7. Czajkowski. K. P; Goward. S. N; Mulhern. T; Goetz. S. J; Walz. A; Shirey. D; Stadler. S; Prince. S. D; & Dubayah. R. O: "Estimating environmental variables using thermal remote sensing". In Quattrochi and Luvall, editors, Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes, CRC PRESS, 2005, P: 487.

8. Hu. Yonghong; & Jia. Gensuo: "Influence of land use change on urban heat island derived from multi-sensor data", International Journal of Climatology, 30, 2010. P: 1382-1395.

9. Li, Z. L; Wu. H; Wang. N; Qiu. S; Sobrino. J. A; Wan. Z; Tang. B. H; & Yan, G: "Land surface emissivity retrieval from satellite data". International Journal of Remote Sensing, 34, 2012, P: 3084–3127.

10. Li, Z. L; Tang. B. H; Wu. H; Ren. H; Yan. G; Wan. Z; Trigo, I. F; & Sobrino. J. A:" Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives". Remote Sensing of Environment., 131, 2013, P: 14–37.

11. Liu. Lin; Zhang; & Yuanzhi: Urban heat island analysis using the Landsat TM data and Aster data: a case study in Hong Kong, International Journal of Remote Sensing, 3, 2011, P: 1535-1552.

12. Mustard. J. F; Carney. M. A; & Sen. A: The use of satellite data to quantify thermal effluent impacts, Estuarine Coastal and Shelf Science, vol (49), n (4), 1999, Pp: 509-524.

13. Schmugge. T; French. A; Ritchie. J. C; Rango. A; & Pelgrum. H: Temperature and emissivity separation from multispectral thermal infrared observations, Remote Sensing of Environment, vol (79), n (2-3), 2002, Pp: 189-198.