

مقدمة في
الاستشعار عن بعد ومعالجة الصور رقمياً

د. علي بن إبراهيم العمران

الطبعة الأولى
1433 هـ - 2012 م

مقدمة في
الاستشعار عن بعد ومعالجة الصور رقمياً

د. علي بن إبراهيم العمران

الطبعة الأولى

1433 هـ - 2012 م

جميع الحقوق محفوظة

التنفيذ الفني والإخراج



دار وجوه للنشر والتوزيع
Wajoooh Publishing & Distribution House
www.wjoooh.com

المملكة العربية السعودية - الرياض

ت: 014562410 فاكس: 014561675

لا يجوز إعادة طباعة أي جزء من هذا الكتاب أو تخزينه بواسطة أي نظام يستخدم لاسترجاع المواد الإلكترونية أو إعادة إنتاج هذا الكتاب أو أي جزء منه بأي وسيلة من الوسائل الإلكترونية أو الآلية أو التصويرية أو التسجيلية أو غيرها من الوسائل المتاحة من دون الحصول على إذن خطي مسبق من المؤلف

No part of this publication may be reproduced, stored in retrieval system, or transmitted, in any form or by any means, electronic, manual, mechanical, photocopying, recording, or otherwise without prior written permission of the publisher.

ح/ علي بن إبراهيم العمران 1433 هـ
فهرسة مكتبة الملك فهد الوطنية أثناء النشر
العمران، علي بن إبراهيم
مقدمة في الاستشعار عن بعد ومعالجة الصور رقمياً. / علي بن إبراهيم العمران - الرياض، 1433 هـ
272 ص؛ 29.7×21 سم
ردمك: 9-0225-01-603-978
1 - الاستشعار عن بعد 2 - الأقمار الصناعية 3 - التصوير الرقمي
أ. العنوان
ديوي 621.3678 1433 / 5240
رقم الإيداع: 1433 / 5240
ردمك: 9-0225-01-603-978

إهداء

إلى والديّ العزيزين حفظهما الله
ومتعهما بالصحة والعافية
وإلى زوجتي وأبنائي وبناتي الأعزاء

تمهيد

Preface

الحمد لله الذي علّم بالقلم، علّم الإنسان ما لم يعلم، والصلاة والسلام على من أوصى أن نكون: إما معلمين، أو متعلمين، وعلى آله وصحابه الذين حذوا حذو نبيهم؛ فكانوا خير أمة أخرجت للناس هدىً وخلفاً وعلماً. أحمد الله - أولاً - على أن وفقني، وأعاني على إنجاز هذا العمل على الرغم من انشغالاتي العملية، والاجتماعية الكثيرة، وعدم توافر الوقت الكافي لإنجاز ذلك؛ ولقد جاء هذا الكتاب نتيجة جهد ليس بالقليل، جمع بين المعرفة النظرية (بحكم التخصص)، والخبرة العملية من خلال الممارسة العملية لسنوات طويلة في هذا المجال، وخضع للكثير من المراجعات والتدقيق.

نبعت فكرة إعداد هذا الكتاب بدافع من الإحساس بالمسؤولية تجاه الوطن بصفة خاصة، وعالمنا العربي بصفة عامة، لتقديم مساهمة متواضعة مع غيري من المهتمين بهذا المجال لإثراء المكتبة العربية بهذا العلم الذي أصبح في يومنا الحاضر من العلوم المهمة، وأصبحت تقنياته تدخل في كثير من التطبيقات المختلفة.

لقد تحققت من قلة المراجع العربية المتخصصة التي تعنى بهذا العلم أو الفن مقارنة بغيرها من المراجع الأجنبية؛ وبحكم قربي واتصالاتي المباشرة بالكثير من المهتمين بهذا المجال من دارسين وباحثين بالجامعات، وفنيين يعملون في القطاع الإنتاجي ممن ليس لديهم إلمام، وتمكن من اللغة الإنجليزية، وجدتهم يعانون من صعوبة للحصول على مفردات هذا العلم وتفصيلاته نظراً لعدم توفر المراجع العربية المتخصصة الكافية. إن معاناة هؤلاء الباحثين والفنيين كانت دافعاً قوياً، وحافزاً رئيساً لي كي أمضي قدماً لتأليف هذا الكتاب.

لم يُقصد لهذا الكتاب أن يكون شاملاً لعلوم، وتقنيات، وتطبيقات الاستشعار عن بعد؛ لأن تناول جميع جوانب هذا العلم ليس ممكناً من خلال مؤلّف واحد؛ وإنما يحتاج إلى سلسلة من المؤلفات، فتجد مؤلّفاً يركز على جوانب معينة، بينما يركز مؤلّفاً آخر على جوانب أخرى من هذا التخصص؛ والقارئ عليه أن يتنقل بين تلك المؤلفات للحصول على ما يريد.

ومن هذا المنطلق، وبحكم ما توافر لدي من وقت حاولت في هذا الكتاب أن أركز على أساسيات ومبادئ الاستشعار عن بعد ومعالجة الصور رقمياً كعلم، وبعض التطبيقات التي رأيتهاهم قطاعاً واسعاً من الدارسين والعاملين في هذا المجال؛ ولعل القارئ الكريم أن يجد ما لم يتوافر في هذا الكتاب في مراجع عربية أخرى.

إن لي أملاً - إن شاء الله - أن يساهم كُتَّاب آخرون في إكمال ما لم يتم تناوله في هذا الكتاب من جوانب أخرى من هذا التخصص بهدف إثراء المكتبة العربية؛ فهذا الكتاب لم يكن إلا مجرد مساهمة متواضعة ولبنة من اللبنة المكونة لهذا البناء الكبير المتمثل في نقل العلوم والتقنية إلى اللغة العربية للتخفيف من معاناة المتلقي العربي الذي يجد صعوبة للرجوع إلى المراجع الأجنبية؛ وعلاوة على ذلك فإن الرجوع إلى المراجع الأجنبية سيظل مطلباً أساسياً لمن أراد التعمق في هذا المجال.

ما جاء في هذا الكتاب مُستقى من بعض المراجع المعتبرة التي تتمتع بسهولة في الطرح، والتي أنصح القاري بالرجوع إليها لمزيد من التعمق والتفحص، ومن بعض الأبحاث العلمية التي تناولت بعض المواضيع المتخصصة.

حاولت الاستعانة (وبتصرف) ببعض وسائل الإيضاح (من أشكال، وشرائح، وغيرها) من بعض المراجع التي اعتمدت عليها لإنجاز هذا الكتاب، والتي رأيتها معبرة ومبسطة، وتساهم في زيادة فهم القارئ؛ وحفظاً للحقوق فقد استشهدت بتلك المراجع عند كل وسيلة إيضاح استعنت بها وأدرجت أسماءها في نهاية هذا الكتاب إعتراً بحق مؤلفيها ومالكيتها، وتقديراً لهم معززاً بوافر الثناء والشكر.

سيلاحظ القارئ الكريم كثرة ورود المصطلحات الفنية المتعلقة بالاستشعار عن بعد باللغة الإنجليزية إلى جانب الترجمة العربية لهذه المصطلحات، وعلة ذلك عدم توافر تعريب معتمد وموحد لكثير من هذه المصطلحات، إضافة إلى رغبة المؤلف في تمكين القارئ من التعرف على هذه المصطلحات الأجنبية عند الرجوع إلى الكتب، والمقالات، والأوراق العلمية باللغة الإنجليزية المهتمة في هذا المجال. وعلى الرغم من الصعوبات الكبيرة التي واجهتها في محاولة الترجمة الصحيحة لبعض المصطلحات العلمية في هذا التخصص، إلا أنني حاولت - قدر المستطاع - البحث عن أفضل المعاني العربية لترجمتها وإيصال الفكرة إلى القارئ.

ونظراً لأن هذا العمل يمثل الإصدار الأول لهذا الكتاب، فإني أدعو القارئ الكريم عند وجود أي ملاحظات أو أخطاء التواصل معي عبر البريد الإلكتروني الخاص بي.

وفي الختام أقدم شكري الجزيل لمن ساهم معي في إنجاز هذا العمل، سائلاً المولى العزيز التوفيق والسداد. وآخر دعوانا أن الحمد لله رب العالمين.

المؤلف

د. علي بن إبراهيم العمران

alomranaliibrahim@gmail.com

محتويات الكتاب

رقم الصفحة	الموضوع
15	الفصل الأول: مبادئ وأساسيات في الإستشعار عن بعد Principles and Fundamentals of Remote Sensing
15	مقدمة
16	الأقسام الرئيسة في الطيف الكهرو مغناطيسي
18	الأشعة المرئية
19	الأشعة تحت الحمراء
20	قياس الأشعة الحرارية
20	أشعة الميكرويف
21	قياس طاقة الميكرويف
21	التصوير الرقمي
24	خصائص الصورة الرقمية
24	السطوع ودرجة اللون
25	نسبة التباين
26	دقة الوضوح لنظام الاستشعار عن بعد
26	دقة الوضوح المكانية
27	تحديد دقة الوضوح المكانية بالاعتماد على الخصائص الهندسية لنظام التصوير
31	تحديد دقة الوضوح المكانية بالاعتماد على الخصائص الطيفية للمعالم
32	تحديد دقة الوضوح المكانية بالاعتماد على قدرة جهاز التصوير على التفريق بين الأهداف
35	دقة الوضوح الطيفية

37	دقة الوضوح الزمنية
38	دقة الوضوح الإشعاعية
38	نسبة الإشارة إلى الضوضاء
41	مدارات الأقمار
43	مراحل الاستشعار عن بعد بالطاقة الكهرومغناطيسية
45	خيارات اقتناء صور الاستشعار عن بعد
46	المسح الميكانيكي البصري
46	نظام السطح المستوي
47	نظام الأسطوانة الدوارة
48	الترقيم بواسطة كاميرا (الفيديو)
48	الترقيم بواسطة أجهزة الشحنات المتقارنة
49	أهمية معالجة وتحليل بيانات الاستشعار عن بعد رقمياً
50	معالجة الصور رقمياً
51	الفصل الثاني: المعالجة الأولية للصور Image Pre-Processing
51	التصحيح الإشعاعي
52	تصحيح ميلان زاوية ارتفاع الشمس
54	التصحيح الجوي
54	التشتيت
57	الامتصاص
59	الانكسار
59	معادلات انتقال الطاقة والتصحيح الجوي
65	التصحيح لتأثير طبوغرافية الأرض، وظاهرة عدم تماثل الانعكاس للأجسام

77	نموذج الارتفاعات الرقمية
79	استخلاص ميول التضاريس، واتجاهها من بيانات الارتفاعات الرقمية
81	إزالة الضوضاء من الصورة
84	تحويل الصورة من قيم سطوع إلى قيم إشعاع وانعكاس
86	التصحيح الهندسي
87	الدوال المتعددة الحدود
93	التحويل الإسقاطي
94	التصحيح المبني على التثليث
95	التصحيح العمودي
97	نماذج الدوال الأساسية
99	الفصل الثالث: تحسين الصور Image Enhancement
99	معالجة التباين
99	تقنيع الصور
100	التشريح الإشعاعي
101	تحسين التباين
103	شد التباين الخطي
105	شد التباين غير الخطي
107	مطابقة الـ (هستوغرام)
108	التحسين المكاني
109	الترشيح في النطاق المكاني
109	المرشح المنخفض النفاذية
111	المرشح العالي النفاذية

112	الطيّ
114	تحسين الحواف
120	الترشيح في النطاق الترددي
125	الفصل الرابع: تحويل ومعالجة الصور متعددة المصادر Multi-Image Transformation and Manipulation
125	تجميع الصور
126	تجزئة الصورة
126	النسبة الطيفية
130	التحويل الأمامي، والعكسي من الفراغ القياسي للألوان الأساسية إلى فراغ الكثافة واللون والتشبع
133	المركبات الأساسية
136	دمج بيانات الصور
137	إجراءات النطاق الطيفي
137	دمج بيانات الصور بالتحويل الأمامي، والعكسي من الفراغ القياسي للألوان الأساسية إلى فراغ الكثافة واللون والتشبع
138	دمج بيانات الصور باستخدام المركبات الأساسية
138	إجراءات النطاق المكاني
139	الإجراءات الجبرية
139	تحديد التغيرات
141	طرح الصور
145	نسبة الصور
146	أدلة الحياة النباتية

157	الفصل الخامس: تصنيف الصور Image Classification
157	مقدمة
158	التصنيف بالاعتماد على النمط الطيفي
158	التصنيف بالاعتماد على عنصر الصورة الكامل
161	التصنيف المراقب
176	التصنيف غير المراقب
179	التصنيف باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية
183	التصنيف على أساس عنصر الصورة المختلط
183	تحليل الخليط الطيفي
186	التصنيف المشوش
188	التصنيف بالاعتماد على النمط المكاني
188	التصنيف بالاعتماد على نسيج الصورة
190	التصنيف بالاعتماد على سياق معلومات الصورة
191	التصنيف بالاستعانة ببيانات إضافية
193	التنعيم بعد التصنيف
195	دقة التصنيف
195	تقييم الدقة
195	أسباب تقييم الدقة
196	نبذة تاريخية عن تطور تقييم الدقة
196	طرق تقييم الدقة
196	خطوات تقييم الدقة

203	الفصل السادس: الاستشعار عن بعد كثيف الأطياف Hyper-Spectral Sensing
203	الاستشعار عن بعد كثيف الأطياف
207	الفصل السابع: الإستشعار عن بعد الإيجابي بموجات الميكروويف Active Microwave Sensing
207	مقدمة
208	تاريخ نشأة الرادار
209	أنواع أنظمة الرادار
210	أنواع أنظمة الرادار من حيث الاستخدام
212	أنواع أنظمة الرادار من حيث التقنية المستخدمة فيها
214	تردد إعادة بث النبضات
214	العوامل التي تؤثر على فعالية استخدام الرادار
215	نظام رادار الرؤية الجانبية
216	مفهوم عمل نظام رادار الرؤية الجانبية
220	درجة الوضوح المكانية لصور نظام رادار الرؤية الجانبية
224	رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية
228	الخصائص الهندسية لصور نظام رادار الرؤية الجانبية
234	تفسير صور الرادار
235	الطول الموجي وحجم الهدف
237	شكل الهدف
238	الاستقطاب
240	زاوية سقوط أشعة الرادار، وميول التضاريس
242	خشونة السطح

244	المحتوى المائي لسطح الأرض
244	قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية
247	التقنيات المستخدمة في قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية
247	تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية التفاضلي
252	قياس التداخل باستخدام العواكس الدائمة
255	العوائق التي تحد من استخدام تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية
257	الفصل الثامن: الاستشعار عن بعد الإيجابي بال (لايدار) LIDAR Sensing
257	الاستشعار عن بعد الإيجابي بال (لايدار)
261	المراجع
261	المراجع
271	مصادر بعض وسائل الإيضاح الواردة في الكتاب
271	مصادر بعض وسائل الإيضاح الواردة في الكتاب

الفصل الأول |

مبادئ وأساسيات في الاستشعار عن بعد

Principles and Fundamentals of Remote Sensing

1-1 مقدمة:

يُعرّف الاستشعار عن بعد بأنه: علم وفن الحصول على المعلومات عن جسم، أو معلّم من خلال تحليل بيانات تم التقاطها عن طريق جهاز ليس على اتصال بهذا الجسم، أو المعلم. وعينا الإنسان - على سبيل المثال - تمثل أو تعمل كجهاز استشعار عن بعد حيث تلتقط بيانات من الأجسام التي أمامها؛ وهذه البيانات عبارة عن طاقة كهرومغناطيسية تمثل كمية الضوء المنعكس من تلك الأجسام. ويمكن أن يعرف الاستشعار عن بعد بصورة أوسع بأنه: عبارة عن عملية قراءة عدة أنواع من البيانات بواسطة عدة أنواع من المستشعرات (Sensors). ومن أنواع هذه البيانات التغيرات في الموجات الصوتية المنعكسة التي تُستشعر بواسطة جهاز قياس الموجات الصوتية، والتغيرات في الطاقة الكهرومغناطيسية (كالضوء والحرارة) التي تستشعر بواسطة أنواع مختلفة من الأفلام، أو المستشعرات الإلكترونية. ويمكن كذلك تعريف الاستشعار عن بعد بأنه يشمل الطرق التي يتم بها توظيف الطاقة الكهرومغناطيسية، كالضوء، والحرارة، وموجات الراديو كوسائل لاكتشاف وقياس خواص الهدف المطلوب تصويره.

تمر عملية الاستشعار عن بعد بواسطة الطاقة الكهرومغناطيسية بثلاث مراحل رئيسة متتالية هي:

(1) مرحلة جمع أو اكتساب البيانات (Data Acquisition).

(2) مرحلة معالجة البيانات (Data Processing).

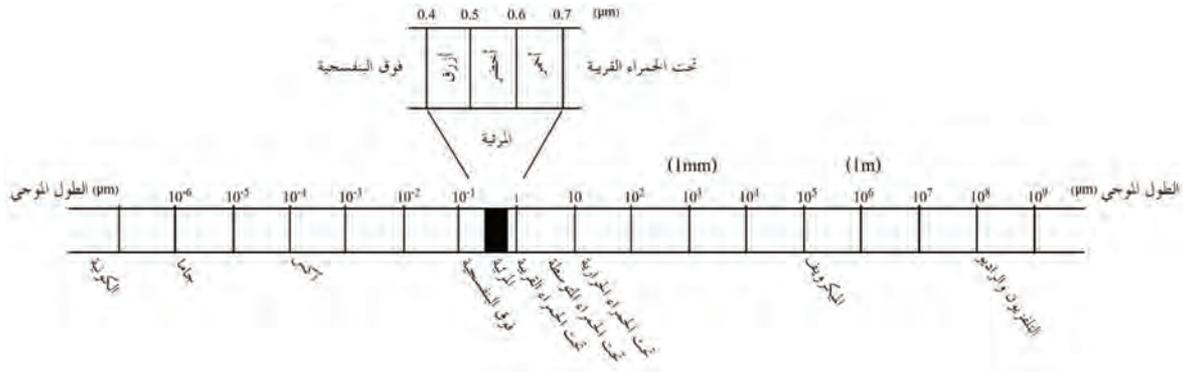
(3) مرحلة تفسير البيانات (Data Interpretation).

والبيانات عبارة عن صور تُسجّل التفاعل (Interaction) بين الأجسام والطاقة الكهرومغناطيسية الساقطة عليها؛ ويحدد التفاعل بين الأجسام والطاقة الكهرومغناطيسية عنصرتين هما: الخواص الطبيعية للمادة، والطول الموجي للطاقة الكهرومغناطيسية المستشعرة.

وسنكتفي في هذا الكتاب بالمرحلة الأولى والثانية، أما المرحلة الثالثة، فهي خارجة عن مجال الكتاب، وربما يتم تناولها مستقبلاً عن طريق المؤلف أو أي مؤلف آخر.

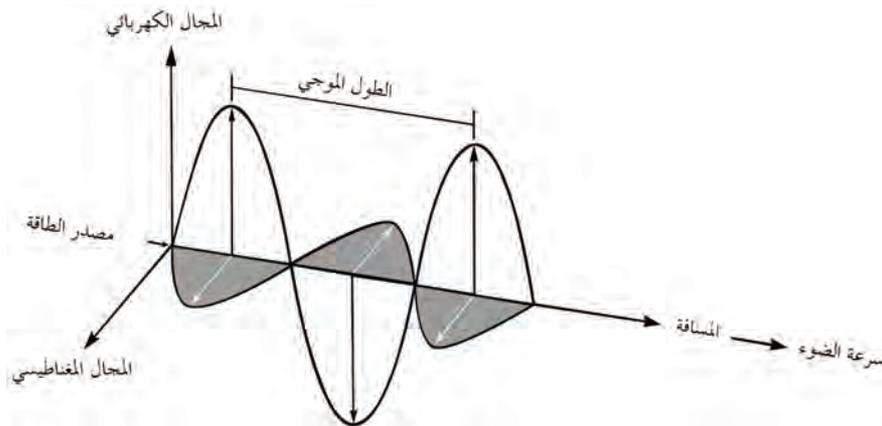
1-2 الأقسام الرئيسية في الطيف الكهرو مغناطيسي:

يُقسَّم الطيف الكهرو مغناطيسي إلى عدة أقسام رئيسة حسب الطول الموجي للأشعة؛ فهو يتدرج من الأشعة ذات الطول الموجي الصغير كأشعة "جاما" (γ) إلى الأشعة ذات الطول الموجي الأكبر كموجات الراديو والتلفزيون. وعلى الرغم من هذا التقسيم؛ فإنه لا يوجد في الواقع حدود دقيقة لهذه الأقسام حيث تختلف هذه التقسيمات من مصدر إلى آخر؛ وهذه الاختلافات ناتجة عن اختلافات مجالات الاستخدام لهذه الأشعة. الشكل (1-1) يوضح إحدى هذه التقسيمات.



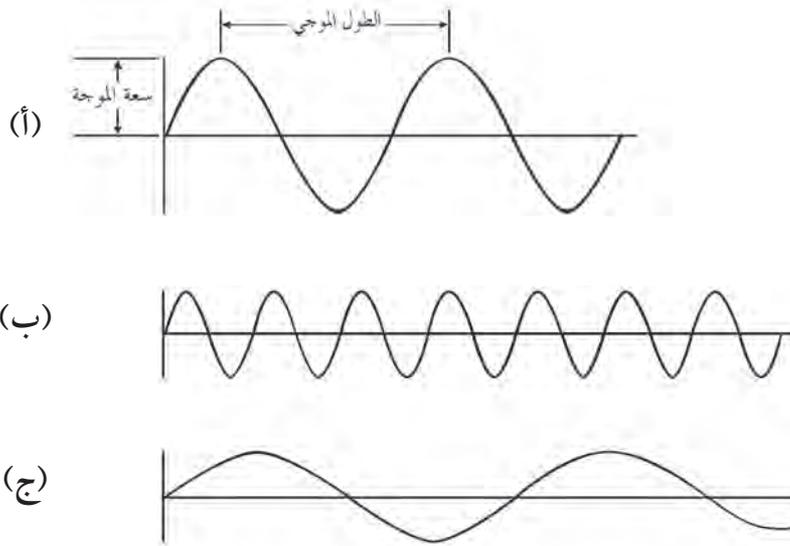
شكل (1-1) مخطط بياني للطيف الكهرو مغناطيسي. المصدر: [1]

كلما قصر الطول الموجي للأشعة زادت طاقتها، ومدى المسافة التي تقطعها. وتتصرف هذه الأشعة (الطاقة) بنفس السلوك، وتشع وفقاً للنظرية الأساسية للموجات. تصف هذه النظرية الطاقة الكهرو مغناطيسية بأنها تسير وفق نمط موجي جيبي (Harmonic Sinusoidal) متناغم بسرعة الضوء؛ وهذه الموجة لها مركبتان: كهربائية و مغناطيسية (شكل (1-2)).



شكل (1-2) المركبة الكهربائية، والمركبة المغناطيسية للموجة الكهرو مغناطيسية متعامدتان بعضهما مع بعض، ومع خط انتشار الموجه. المصدر: [3].

تُوصَف الطاقة الكهرومغناطيسية من خلال ثلاث خصائص هي: "الطول الموجي" (Wavelength)، وهو المسافة من قمة إلى القمة التي تليها، و"التردد" (Frequency)، وهو عدد القمم الموجية التي تمر خلال نقطة معينة في فترة زمنية محددة، وتقاس بوحدة "هيرتز" (Hertz)، و"السعة" (Amplitude)، وهي ارتفاع قمة الموجة التي تستخدم لقياس طاقة الموجة (وتدعى عادة بالإشعاع الطيفي Spectral Irradiance)، ويعبر عنها بالوات لكل متر مربع لكل ميكرومتر ($\text{Watt}/\mu\text{m}^2$). الشكل (1-3) يوضح العلاقة بين هذه الخصائص الثلاث حيث يمثل الجزء (ب) من الشكل طاقة كهرومغناطيسية ذات تردد عالٍ، وطول موجي قصير، بينما يمثل الجزء (ج) طاقة كهرومغناطيسية ذات تردد منخفض، وطول موجي طويل.



شكل (1-3) الخصائص الثلاث للموجات الكهرومغناطيسية، وهي سعة الوجه، والطول الموجي، والتردد. (أ) التعاريف المستخدمة لوصف الموجة الكهرومغناطيسية. (ب) موجة كهرومغناطيسية ذات طول موجي قصير، وعالية التردد. (ج) موجة كهرومغناطيسية ذات طول موجي طويل، ومنخفضة التردد. المصدر [3]

المعادلة الفيزيائية العامة للموجات تكتب على النحو التالي:

$$c = \lambda \nu$$

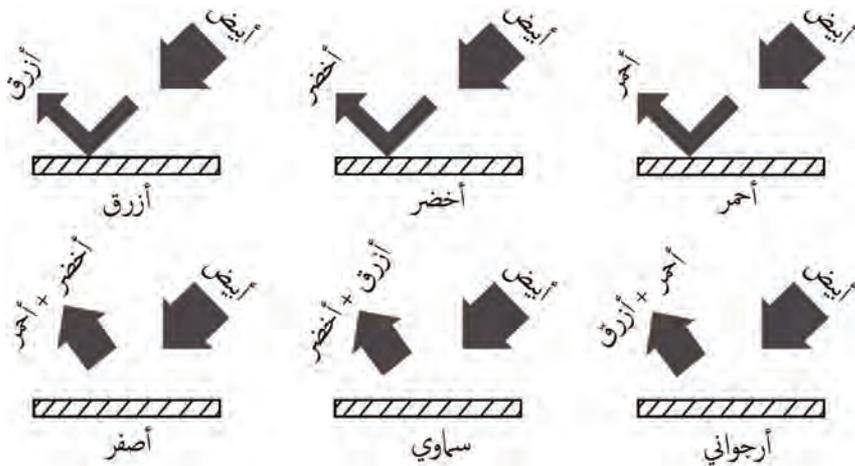
حيث c سرعة الضوء (3×10^8 م/ث)؛ و λ الطول الموجي، و ν التردد، ولهما علاقة عكسية، ويمكن استخدام أي منهما لوصف الموجة.

من أهم أقسام (قطاعات) الطيف الكهرومغناطيسي المستخدمة في الاستشعار عن بعد الأشعة المرئية (Visible)، والأشعة تحت الحمراء (Infrared)، وموجات الميكروويف (Microwave) التي من أهمها في مجال الاستشعار عن بعد موجات الرادار (Radar). وسيتم تناول هذه الأقسام بشيء من التفصيل فيما يتقدم، إضافة إلى تقديم نبذة مختصرة عن نوع آخر من الطاقة يتم استخدامه بشكل كبير في مجال الاستشعار

عن بعد، وخصوصاً في قياس ارتفاعات تضاريس سطح الأرض وهو الـ "لايدار" (LIDAR).

1-2-1 الأشعة المرئية:

على الرغم من أن الأشعة المرئية تشكل جزءاً صغيراً جداً من الطيف الكهرومغناطيسي إلا أن لها أهمية كبيرة في الاستشعار عن بعد. وتُقسم الأشعة المرئية، وهي الأكثر استخداماً في مجال الاستشعار عن بعد إلى ثلاثة أقسام (نطاقات) هي: الأزرق (Blue) بطول موجي $(0.4\mu\text{m}-0.5\mu\text{m})$ ، والأخضر (Green) بطول موجي $(0.5\mu\text{m}-0.6\mu\text{m})$ ، والأحمر (Red) بطول موجي $(0.6\mu\text{m}-0.7\mu\text{m})$. تسمى هذه النطاقات (أو الألوان) بالألوان الأساسية المضافة (Additive Primary Colors)؛ وسميت بالأساسية لأنه لا يمكن تكوين أحدهما بخلط اللونين الباقين؛ ولأنه كذلك يمكن تكوين أي لون موجود في الطبيعة بخلط هذه الألوان الثلاثة بنسب مختلفة؛ وإذا خلطت هذه الألوان الثلاثة بنسب متساوية أنتجت اللون الأبيض. ولون أي جسم على سطح الأرض عبارة عن اللون الذي يعكسه هذا الجسم بعد سقوط الأشعة عليه، فمثلاً، الجسم الأزرق لونه أزرق نظراً لأنه يمتص جميع الأشعة، ويعكس الأشعة الزرقاء؛ وأما الأجسام التي تعكس ألواناً غير الألوان الرئيسية الثلاثة (وتسمى الألوان المتوسطة) (Intermediate Colors)، فإنها تنتج من انعكاس لونين أو أكثر من الألوان الأساسية، فمثلاً، الجسم الأصفر (Yellow) لونه أصفر لأنه يمتص جميع الأشعة، ويعكس الأحمر والأخضر (الأصفر)، وكذلك الحال في الجسم الأرجواني (Magenta) الذي يعكس الأحمر والأزرق، والجسم السماوي (Cyan) الذي يعكس الأزرق والأخضر.



شكل (1-4) العلاقة بين الألوان الأساسية المضافة (الأزرق، الأخضر، الأحمر)، والألوان الأساسية المختزلة (السماوي، والأرجواني والأصفر). على سبيل المثال، اللون الأزرق يمتص الأخضر والأحمر من اللون الأبيض الساقط، ويطلق الأزرق، واللون الأصفر يمتص الأزرق من اللون الأبيض الساقط، ويطلق الأخضر والأحمر (الأصفر). المصدر: [3].

في الجانب المعاكس للألوان الأساسية المضافة هناك ما يسمى بالألوان الأساسية المختزلة

(Subtractive Primary Colors) التي هي أيضاً عبارة عن تمثيل للألوان؛ ولكن في مجالات الصبغ والطباعة بدلاً من العرض (Display)، وهي: الأصفر، والأرجواني، والسماعي التي أشرنا إليها آنفاً، وكل واحد من هذه الألوان الثلاثة يمتص أحد الألوان الأساسية المضافة (الأزرق، أو الأخضر، أو الأحمر) ويعكس الباقي؛ فمثلاً اللون الأصفر يمتص الضوء الأزرق، ويعكس الأخضر والأحمر، والسماعي يمتص الأحمر، ويعكس الأزرق والأخضر، والأرجواني يمتص الأخضر، ويعكس الأحمر والأزرق. الشكل (1-4) يوضح هذه العملية.

الشريحة (1) توضح مفهوم خلط الألوان الأساسية المضافة، وخلط الألوان الأساسية المختزلة.

1-2-2 الأشعة تحت الحمراء:

كل الأجسام على سطح الأرض تمارس خاصية الانعكاس (Reflection)، والانبعاث (Emission) للأشعة. فكل جسم يعكس في جميع الأطوال الموجية، ويبعث - كذلك - في جميع الأطوال الموجية. ولكن الأشعة المنعكسة ذات الأطوال الموجية القصيرة (كالأشعة المرئية والأشعة تحت الحمراء القريبة) تسود على الأشعة المنبعثة ذات الأطوال الموجية القصيرة، أما الأشعة المنبعثة ذات الأطوال الموجية الطويلة (كالأشعة تحت الحمراء الحرارية) فإنها تسود على الأشعة المنعكسة ذات الأطوال الموجية الطويلة. وكل الأجسام عند درجة حرارة صفر مطلقة ينبعث منها أشعة حرارية، وكثافة هذه الأشعة والطول الموجي السائد لها (Peak Wavelength) يختلف باختلاف درجة حرارة الجسم. لذلك (وبإستثناء مصادر الحرارة الخارجية مثل: مصادر الحرارة من صنع الإنسان، وحرارة الغابات وغيرها) فإن مصدر الأشعة تحت الحمراء الحرارية المنبعثة هو الأشعة الشمسية المباشرة الساقطة ذات الأطوال الموجية القصيرة (بطول موجي سائد $0.5\mu\text{m}$ في الطيف المرئي) التي تُستقبل وتمتص من سطح الأرض، ثم تنبعث طاقة حرارية. وكمية الطاقة المنبعثة من المعالم على سطح الأرض والتوزيع الطيفي لها يعتمد على الخصائص الحرارية لهذه المعالم. ويستخدم التباين (Contrast) بين قيم السطوع (Brightness Values) الحرارية المسجلة بدرجات رمادية (Gray Tones) مختلفة في الصورة - أساساً للتعرف على المعالم فيها.

تم اكتشاف الأشعة تحت الحمراء في القرن التاسع عشر الميلادي بواسطة العالم الفلكي البريطاني "ويليام هيرشل" (William Herschel) (1738 - 1822) عندما كان يبحث في العلاقة بين مصادر الحرارة، والأشعة المرئية. بعد ذلك وفي عام 1847م أوضح عالمان فرنسيان هما "فيزو" و"فوكولت" (Fizeau and Foucault) أن للأشعة تحت الحمراء خصائص بصرية مشابهة للأشعة المرئية من حيث الانعكاس، والانكسار، وأنماط التداخل (Interference). فالموجات القصيرة من الأشعة تحت الحمراء (القريبة من الأشعة المرئية، والتي تقع بين $0.7\mu\text{m}$ و $3.0\mu\text{m}$) تتصرف بنمط مشابه للأشعة المرئية؛ ولذلك تسمى بالأشعة تحت الحمراء القريبة والمتوسطة (Near and Midium Infrared). ولهذا، فإنه يستخدم معها نفس الأنواع من المرشحات، والعدسات، والكاميرات التي تستخدم مع الأشعة المرئية في أنظمة التصوير البصري مع إضافة بعض التعديلات الثانوية. أما الموجات الطويلة من الأشعة تحت الحمراء

(القريبة من موجات الميكروويف) التي يتراوح طولها الموجي بين $3\mu\text{m}$ و $14\mu\text{m}$ والتي تسمى تحت الحمراء المنبعثة، أو تحت الحمراء الحرارية (Emissive /Thermal Infrared)، وأحياناً بتحت الحمراء البعيدة (Far Infrared)، فهي تختلف عن الأشعة المرئية، وتحت الحمراء القريبة والمتوسطة في سلوكها وفي وسائل استشعارها، فهذه الأشعة لا تتأثر بالتشتيت الجوي كما هي الحال في الأشعة المرئية وتحت الحمراء القريبة والمتوسطة؛ ولكنها تتأثر كثيراً بالامتصاص الجوي، وبالتالي فإن استخدامها في الاستشعار عن بعد مقيد في نوافذ جوية محدودة. كما أن أنظمة التصوير المستخدمة معها تختلف تماماً عن الكاميرات والأفلام المستخدمة مع الأشعة المرئية وتحت الحمراء القريبة والمتوسطة؛ وكذلك نوع المعلومات الملتقطة بأشعتها تختلف عن تلك الملتقطة باستخدام الأشعة المرئية وتحت الحمراء القريبة، حيث إن الاستشعار عن بعد بتحت الحمراء الحرارية يعتمد على قياس التغيرات في الطاقة المنبعثة، ومن ثم توفير معلومات عن درجة حرارة السطح والخصائص الحرارية للأجسام (كالتربة، والصخور، والنباتات، والمنشآت الاصطناعية، الخ)، والتي بدورها تقود إلى تحديد نوع هذه الأجسام. الفقرة التالية تتناول الوسائل المستخدمة في قياس الأشعة تحت الحمراء البعيدة (الحرارية).

1-2-2-1 قياس الأشعة الحرارية:

تقاس الأشعة الحرارية (Thermal Radiometry) عن طريق مستشعر للأشعة الحرارية يسمى "راديو ميتر" (Radiometer)، أو "ماسح حراري" (Thermal Scanner)؛ ويعتمد هذا المستشعر في عمله (بشكل أساسي) على أن لاقط المستشعر يستقبل الإشارة، وهي عبارة عن الإشعاع (Radiance) المنبعث من سطح الأرض، ويقارنها بإشعاع مصدر مرجعي (Reference Source Radiance) معروف القيمة، ومن ثم يمكن له أن يقدر قيمة الإشعاع القادم من سطح الأرض. وقدرة التمييز المكانية (Spatial Resolution) للـ (راديو ميتر) تكون في العادة ضعيفة نسبياً مقارنة بقدرة التمييز المكانية لكاميرات التصوير بالأشعة المرئية حيث تتراوح بين 60م و 100 كلم أو أكثر، ويعود السبب في ذلك إلى عدم التقاط الطاقة الكافية من الهدف واللازمة لقياس كمية الإشعاع بشكل صحيح ودقيق.

1-2-3 أشعة الميكروويف:

من أكبر الأشعة المستخدمة في الاستشعار عن بعد طولاً موجياً أشعة الميكروويف (Microwave) التي يتراوح طولها الموجي بين 1 ملم و 1م؛ ويشمل هذا القطاع من الأشعة موجات الرادار (Radar) ذات الاستخدام الكبير والمتزايد في مجالات الاستشعار عن بعد. فهناك الكثير من أقمار الاستشعار عن بعد بموجات الرادار قد تم إطلاقها، وهناك أقمار أخرى سيتم إطلاقها قريباً، ويعود ذلك إلى المميزات التي تتمتع بها هذه الموجات في اختراق الكثير من العوائق الجوية التي كانت تعوق التصوير بالأشعة المرئية، كالغيوم، والظلام، والهباء (Aerosol). ولأهمية هذا الموضوع، فقد خصص جزء من هذه الكتاب لتناول خصائص موجات الرادار وآلية الاستشعار بها عن بعد.

1-3-2-1 قياس طاقة الميكروويف:

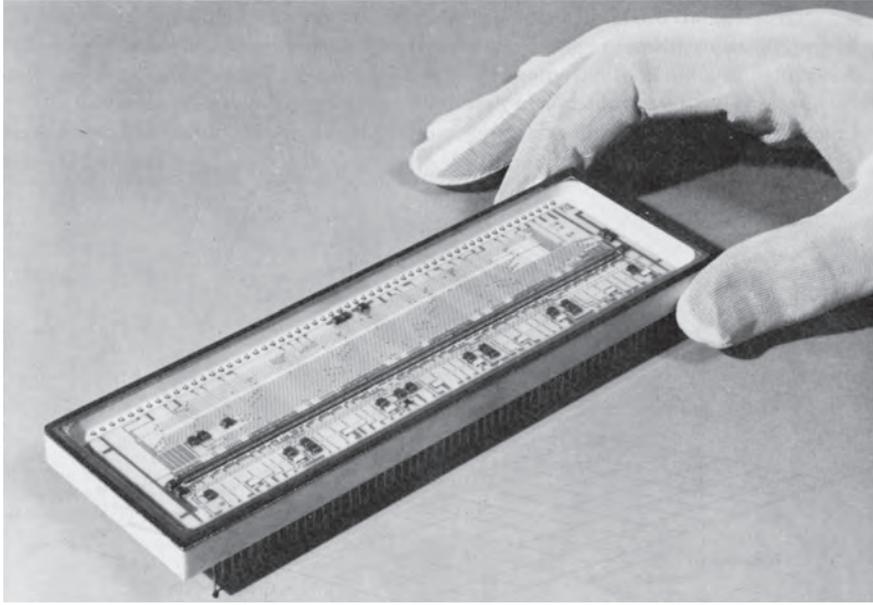
توفر انبعاثات أشعة الميكروويف من سطح الأرض (Emitted Microwave Radiation) معلومات تفيد كثيراً في التطبيقات المتعلقة بالغطاء النباتي، ورطوبة التربة، والمواد المكونة للسطوح. وعلى الرغم من أن أطوالها الموجية أكبر بكثير من الأطوال الموجية للأشعة تحت الحمراء، فإن أشعة الميكروويف المنبعثة من سطح الأرض تحمل معلومات حرارية ذات نمط مشابه للأشعة تحت الحمراء الحرارية. وأجهزة قياس (راديومترات) أشعة الميكروويف حساسة لالتقاط الأشعة بأطوال موجية تتراوح بين 0.1 ملم و3 سم، وتعتبر سلبية (Passive Sensors)؛ لأنها تستقبل أشعة الميكروويف المنبعثة طبيعياً من سطح الأرض؛ وقوة هذه الأشعة وطولها الموجي يعتمد - بشكل كبير - على درجة حرارة السطح وخاصة الانبعاث (Emissivity) له. وفيما يتعلق بطريقة قياس إشعاعات الميكروويف المنبعثة من سطح الأرض (كما هي الحال في (راديومترات) تحت الحمراء الحرارية)، فإن (راديومترات) الميكروويف تقيس الإشعاع (Radiance) المنبعث من الهدف على سطح الأرض عن طريق مقارنة الإشارة التي يستقبلها الـ(راديوميتر) من الهدف بإشارة مرجعية.

هناك صعوبة في التعامل مع بيانات الميكروويف، ويعود ذلك إلى عدة عوامل منها: أن يكون مجال الرؤية اللحظي (Instantaneous Field of View-IFOV) للـ (راديوميتر) أكبر من حجم الهدف، بمعنى: أن الـ(راديوميتر) يسجل متوسط الإشعاع القادم من مجموعة من الأهداف في مجال الرؤية اللحظي، والعامل الآخر هو أن الغلاف الجوي يضيف إشعاعاً إضافياً إلى الإشعاع القادم من الهدف في مجال الرؤية اللحظي، وكمية الإضافة تعتمد على درجة الحرارة والرطوبة في الجو، والعامل الثالث هو أن سطح الأرض يضيف أشعة ميكروويف شمسية منعكسة منه إلى أشعة الميكروويف المنبعثة في مجال الرؤية اللحظي للمستشعر.

في الجانب المقابل هناك مستشعرات ميكروويف إيجابية (Active Sensors) كأجهزة التصوير بموجات الرادار التي ثبتت الطاقة باتجاه الأرض، وتستقبل إنعكاسات (صدى) تلك الطاقة. وستناول هذا الموضوع بالتفصيل في الفصل السابع من هذا الكتاب.

1-3-3 التصوير الرقمي:

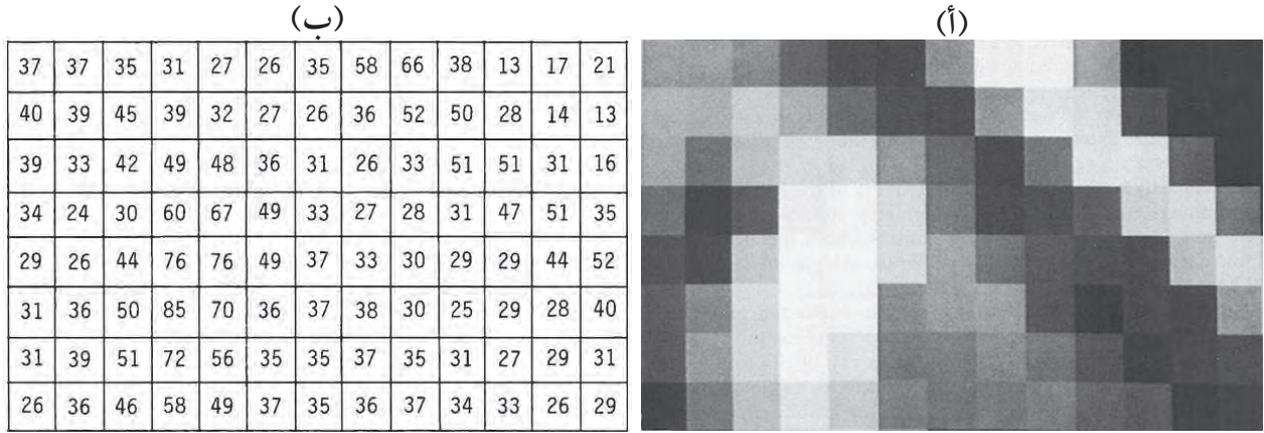
بدلاً من الفلم المستخدم في عملية التصوير الفوتوغرافي، تتم عملية التصوير الرقمي باستخدام مصفوفة (Array) مكونة من لاقطات (Detectors) إلكترونية دقيقة، وحساسة لقطاعات من الطيف الكهرومغناطيسي تسمى أجهزة الشحنات المتقارنة (Charged Coupled Device-CCD) (شكل (1-5)).



شكل (1-5) مصفوفة خطية لجهاز شحنات متقارنة (CCD)، مكوّن من صف من اللاقطات (Detectors).
المصدر: [2].

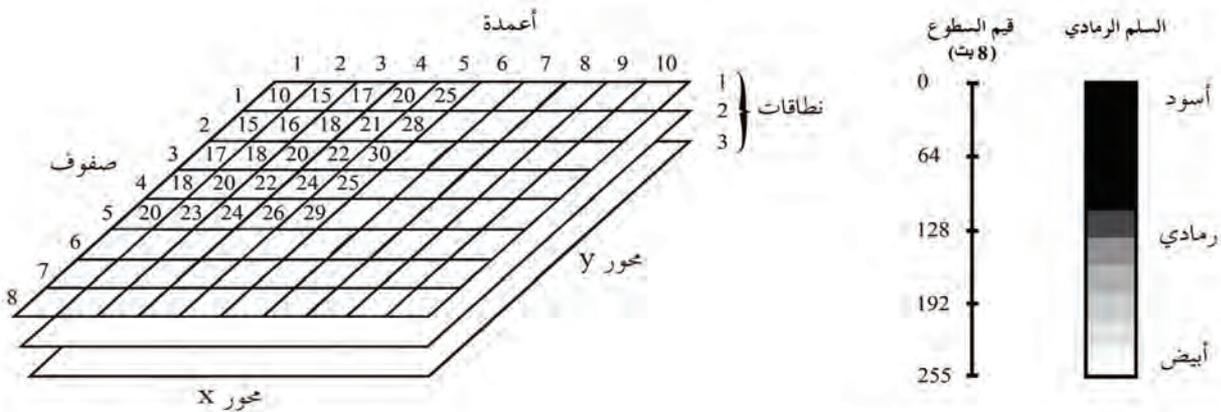
والتصوير الرقمي له ميزة القدرة على التقاط بيانات لقطاعات من الطيف الكهرومغناطيسي لا يغطيها التصوير الفوتوغرافي، كقطاع الأشعة تحت الحمراء الحرارية مثلاً. والصورة الملتقطة عن طريق التصوير الرقمي في نطاق (Band) معين، أو عدد من النطاقات من الطيف الكهرومغناطيسي عبارة عن مصفوفة ثنائية، أو متعددة الأبعاد مكونة من وحدات مربعة صغيرة تسمى عناصر صورة (Pixels). كل عنصر من هذه المصفوفة عبارة عن صورة ملتقطة بواسطة أحد اللاقطات الإلكترونية للمنطقة المقابلة لها على سطح الأرض، ولهذه الخلية كثافة لون تُمثّل قيمة سطوع المنطقة المقابلة لها على الأرض في هذا النطاق. ويمكن تحليل ذلك بأنه عندما تنعكس فوتونات الطاقة الكهرومغناطيسية من الأجسام الموجودة على سطح الأرض، وتصطدم باللاقط الإلكتروني في جهاز التصوير، فإن هذا اللاقط ينتج إشارة كهربائية تختلف قوتها باختلاف عدد الفوتونات التي اصطدمت به، وبعد ذلك يتم تكبير هذه الإشارة، وتسجيلها رقمياً على شريط مغناطيسي، أو أي وسيط آخر ليتم عرضها مرة أخرى على شكل صورة رقمية مُمثّلة بكثافة لون رقمية لكل عنصر صورة.

وللحصول على صورة لنطاق معين من الطيف الكهرومغناطيسي (الأخضر، مثلاً) في عملية التصوير الرقمي، فإنه بدلاً من المرشح الأخضر (Green Filter) المستخدم في الكاميرات الفوتوغرافية العادية، والذي يسمح بمرور اللون الأخضر فقط؛ فإنه يتم استخدام أجهزة الشحنات المتقارنة (CCD) الحساسة للون الأخضر لإنتاج صورة رقمية تمثل نطاق الأخضر؛ وكل عنصر صورة (Pixel) في هذه الصورة يحمل رقماً (Digital Number-DN) يمثل قيمة السطوع (Brightness Value-BV) للمنطقة من الأرض المقابلة لذلك الجزء من الصورة (شكل (1-6)).



شكل (1-6) تكوين الصورة الرقمية. (أ) صورة توضح العناصر (Pixels) المكونة للصورة الرقمية. (ب) قيم السطوع (BV) التي تمثل درجة إشعاع كل عنصر. المصدر: [2].

وفي حالة التصوير الملون (متعدد النطاقات)، فإنه يتم استخدام عدد من أجهزة الشحنات المتقارنة مساوٍ لعدد نطاقات الطيف الكهرومغناطيسي المطلوب الحصول على صور لها (صورة للأزرق، وصورة للأخضر، وصورة للأحمر، وصورة للأشعة الحمراء القريبة، الخ) (شكل (1-7))، ثم يتم تكوين صورة رقمية ملونة من ثلاثة النطاقات المطلوبة بعد تخصيص لون العرض الأساسي المناسب (الأحمر، أو الأخضر، أو الأزرق) لكل نطاق من هذه النطاقات الثلاثة المختارة، وعرضها آنياً على شكل صورة مركبة من ثلاثة ألوان.



مثال:
عنصر الصورة عند الصف 2 والعمود 3 وفي النطاق 1
له قيمة سطوع (BV2.3.1) = 18

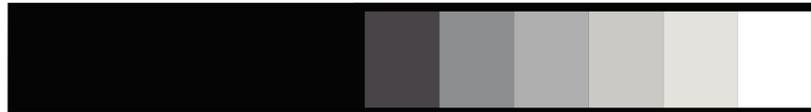
شكل (1-7) صورة استشعار عن بعد رقمية مكونة من عدد من النطاقات، وكل نطاق عبارة عن صورة ثنائية الأبعاد مكونة من عدد من عناصر الصورة موقعها يحدد برقم الصف والعمود؛ وقيمة السطوع لكل عنصر تمثل بقيمة تتراوح بين 0 و 255 (8 بت)، تتدرج من الأسود إلى الأبيض. المصدر: [4].

وتسمى عملية التصوير الرقمي في عدد من النطاقات بنظام المسح (الفرز) المتعدد الأطياف (Multi-Spectral Scanning)، وهي العملية المستخدمة حالياً في التصوير متعدد الأطياف بواسطة الأقمار الاصطناعية. وحيث إن الصورة متعددة الأطياف مسجلة رقمياً؛ فإنه من السهل التعامل معها وتصحيحها إشعاعياً وهندسياً، وتحسينها، ومن ثم إمكانية إنتاج صور أخرى تتوافر بها خصائص غير متوافرة في الصورة الأصلية. وهذه الميزة لاتتوافر، أو قد تكون بشكل محدود في التصوير الفوتوغرافي الملون، نظراً لأنه بمجرد معالجة الصورة الفوتوغرافية؛ فإنه لايمكن تغيير محتوياتها الإشعاعية.

4-1 خصائص الصورة الرقمية:

1-4-1 السطوع ودرجة اللون:

معظم أجهزة الاستشعار عن بعد تلتقط الإشعاعات الكهرومغناطيسية التي تعكسها، أو تبعثها الأجسام عند أطوال موجية معينة. والتغيرات في كثافة الإشعاع الكهرومغناطيسي الصادر من المعالم على سطح الأرض يتم عرضه في الصور على شكل تغيرات في قيم السطوع (Brightness Values). هذه التغيرات في قيم السطوع يمكن معايرتها على سلم يسمى السلم الرمادي (Gray Scale) (شكل (1-8))؛ هذا السلم مقسم الى عدد من الدرجات من اللون الرمادي (Gray Levels) المحصورة بين الأبيض والأسود، وكل درجة مميزة من هذا السلم تسمى لوناً (Tone).



شكل (1-8) السلم الرمادي (Gray Scale)

يحتوي السلم الرمادي في الشائع من نظم التصوير في الاستشعار عن بعد على 256 درجة (0-255)، تمثل جميع قيم (درجات) السطوع الممكنة في الصورة. وتزداد عدد الدرجات في السلم الرمادي، وتنقص لعدة عوامل منها: قدرة اللاقطات الإلكترونية لنظام التصوير على متن القمر الصناعي على التمييز بين درجات الكثافة المختلفة، وطريقة تسجيل هذه الدرجات أثناء التصوير، وقدرة أجهزة الكمبيوتر في عرض ومعالجة الصور. عندما يُذكر بأن عدد درجات اللون المسجلة بها الصورة 256 درجة، فإن هذا يعني أن عنصر الصورة (Pixel) تم تسجيله على (بايت) واحد (One byte) المدى الديناميكي (Dynamic Range) له 8 بت (8bits)، ويأتي الرقم 256 من العملية الحسابية (2^8) ، ومثال على ذلك صور القمر الفرنسي "سبوت" (SPOT). في الأقمار الجديدة عالية الوضوح (مثل:

ايكونوس، كويكبيرد، جيواي، وورلدفيو) (Ikonos, Quickbird, GeoEye, WorldView) تُسجل الصور على مدى ديناميكي قدره 11 بت ($2^{11} = 2048$ درجة لون). توفر هذه الإمكانية قدره على تسجيل الفروقات في الانعكاسات من المعالم على سطح الأرض بشكل أكبر. وعلى الرغم من ذلك، فإنه - في كثير من الأحيان - قبل معالجة هذه الصور (بأستخدام معظم برامج المعالجة) يتم تحويل المدى الديناميكي لها الى 8 بت.

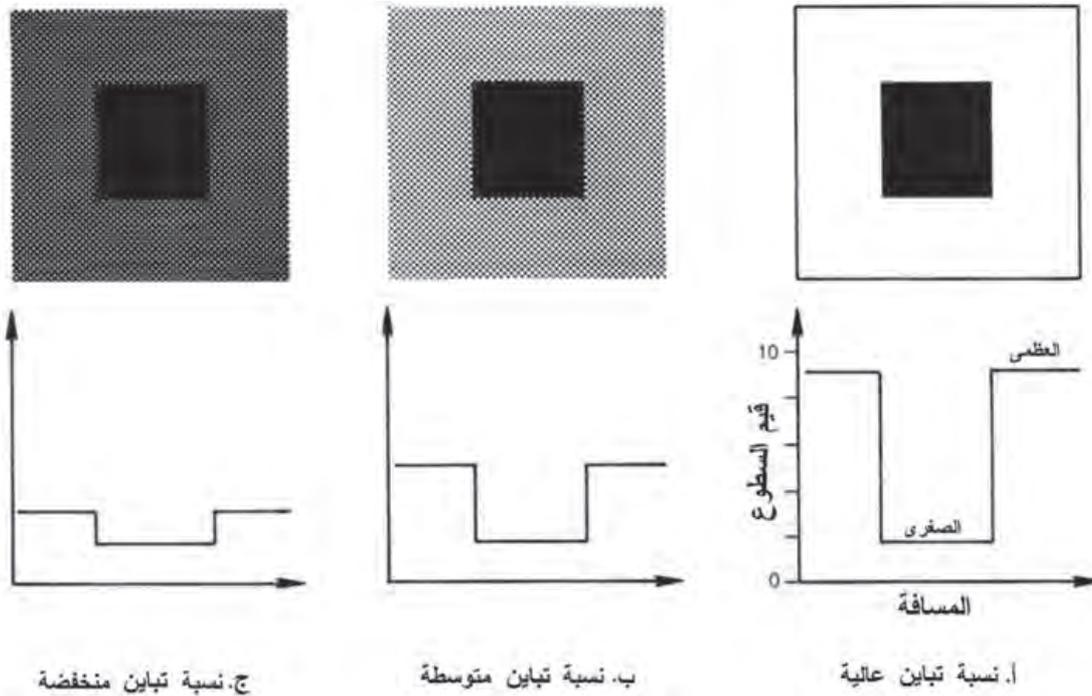
1-4-2 نسبة التباين:

نسبة التباين (Contrast Ratio) هي النسبة بين أسطح جزء وأظلم جزء في الصورة. الشكل (1-9) يعرض ثلاث صور ذات تباينات مختلفة، وهي صورة ذات تباين عالٍ (High Contrast)، وصورة ذات تباين متوسط (Medium Contrast)، وصورة ذات تباين منخفض (Low Contrast)، ويعرض كذلك المنظر الجانبي لقيم السطوع. وباستخدام سلم لون رمادي مقسم من 0 إلى 10، تكون نسب تباين هذه الصور على النحو التالي:

$$\text{نسبة التباين للصورة ذات التباين العالي: } 4.5 = 2 \div 9$$

$$\text{نسبة التباين للصورة ذات التباين المتوسط: } 2.5 = 2 \div 5$$

$$\text{نسبة التباين للصورة ذات التباين المنخفض: } 1.5 = 2 \div 3$$



شكل (1-9) صور ذات نسب تباين مختلفة، مع المنظر الجانبي لقيم السطوع المصاحبة لها. المصدر: [5]

بالإضافة إلى استخدام نسبة التباين لوصف المظهر العام للصورة، فإنها تستخدم أيضاً لوصف النسبة بين قيمة السطوع لمعلم معين وقيمة السطوع للمعلم أو الخلفية المجاورة له؛ ونتيجة لذلك فهي تعتبر عاملاً مهماً في تحديد القدرة على التمييز بين المعالم.

الصور ذات نسبة التباين المنخفض هي التي تحتوي على مناطق متجانسة المادة ذات قيم سطوع متقاربة، كالمناطق الجبلية أو الصحراوية. ونسبة التباين المنخفض لتلك الصور تحصل نتيجة للأسباب التالية:

- 1) المعالم على سطح الأرض وما يجاورها لها خصائص مادية متقاربة بحيث تعكس، أو تشع بدرجة متقاربة في نطاق معين من الطيف الكهرومغناطيسي.
- 2) الغلاف الجوي يسبب تشتتاً (Scattering) في الطاقة الكهرومغناطيسية في نطاق معين من الطيف الكهرومغناطيسي، مما يسبب ضبابية في الصورة تقلل الفروقات بين المعالم على سطح الأرض.
- 3) جهاز الاستشعار عن بعد ذو حساسية ضعيفة وغير كاف لالتقاط وتسجيل التفاوت في قيم السطوع (التباين).

3-4-1 دقة الوضوح لنظام الاستشعار عن بعد:

من أهم الخصائص التي يوصف بها جهاز الاستشعار عن بعد الذي يعمل في النطاقات المرئية وتحت الحمراء من الطيف الكهرومغناطيسي:

- دقة الوضوح المكانية (Spatial Resolution).
 - دقة الوضوح الطيفية (Spectral Resolution).
 - دقة الوضوح الزمنية (Temporal Resolution).
 - دقة الوضوح الإشعاعية (Radiometric Resolution).
- وستتناول فيما يلي بشيء من التفصيل هذه الخصائص.

1-3-4-1 دقة الوضوح المكانية:

هناك علاقة بين حجم (Size) المعلم الذي يراد إظهاره في الصورة، ودقة الوضوح المكانية لنظام الاستشعار عن بعد المستخدم في التصوير. وفي هذا السياق يمكن وصف دقة الوضوح المكانية بأنها: القدرة على التفريق بين معلمين متجاورين في الصورة، أو أصغر مسافة خطية، أو زاوية بين معلمين متجاورين يمكن رؤيتها في الصورة. فإذا كانت المسافة بين معلمين متجاورين أصغر من دقة الوضوح المكانية للصورة؛ فإن هذين المعلمين سيظهران كجسم واحد في الصورة. ومن هنا يمكن تعريف دقة

الوضوح المكانية هندسياً بأنها: مقدار المساحة، أو المنطقة من الأرض المناظرة لمجال الرؤية اللحظي (IFOV) لنظام (جهاز) التصوير؛ فعلى سبيل المثال، دقة الوضوح المكانية لصور نظام التصوير المتعدد الأطياف (Multi-Spectral Scanner-MSS) للأقمار الأمريكية (لاندسات 1, 2, 3) (Landsat 1, 2, 3) هي 79×79 م.

دقة الوضوح المكانية، وقوة التوضيح (Resolving Power) مفهومان بينهما علاقة وثيقة، ويعتمدان على بعضهما البعض، فمصطلح قوة التوضيح يشار إليه عند الحديث عن نظام التصوير، بينما مصطلح دقة الوضوح المكانية يشار به عند الحديث عن الصورة المنتجة بواسطة نظام التصوير. وعدسة وفلم الكاميرا - على سبيل المثال - اللذان لكل منهما خصائص قوة توضيح معينة يحددان دقة الوضوح المكانية للصورة؛ فكلما تحسنت قوة التوضيح لجهاز التصوير، تحسنت دقة الوضوح المكانية للصورة. ولكن يتعين الإشارة هنا إلى أن دقة الوضوح المكانية لا تعني بالضرورة القدرة على التوضيح ما لم يكن هناك تباين (Contrast) في الانعكاس الطيفي بين المعلم والخلفية المحيطة به. وعلى العكس من ذلك يمكن أن تتجاوز قدرة التقاط (Detectability) نظام التصوير على دقة الوضوح المكانية المحددة له؛ فعلى سبيل المثال، يمكن تصوير معلم حجمه أصغر من دقة الوضوح المكانية لنظام التصوير؛ وسيتم التطرق إلى ذلك فيما يتقدم.

ويمكن قياس دقة الوضوح المكانية بطرق مختلفة. من ذلك الأربعة المعايير التي استخدمها (Townshend, 1980) لتعريف دقة الوضوح المكانية، وهي:

- (1) الخصائص الهندسية لنظام التصوير.
- (2) القدرة على قياس الخصائص الطيفية لأهداف صغيرة.
- (3) القدرة على التفريق بين هدفين متجاورين.
- (4) القدرة على قياس تكرار الأهداف المتتابعة (Periodicity of Repetitive Targets).

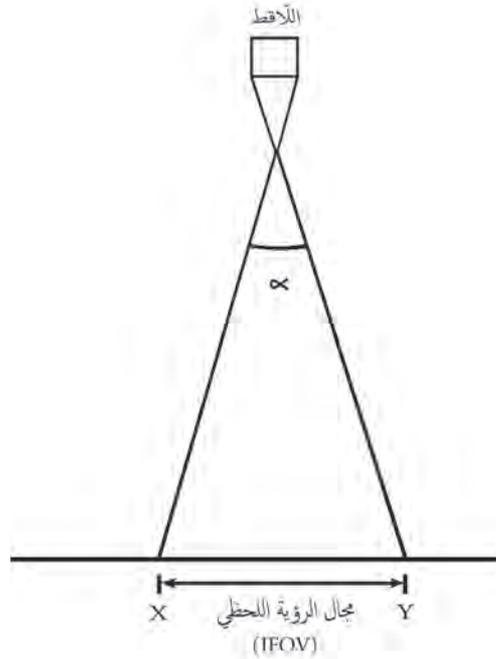
ولغرض الاختصار، سنتناول بالتفصيل المعيارين الأول والثاني.

1-1-3-4-1 تحديد دقة الوضوح المكانية بالاعتماد على الخصائص الهندسية لنظام التصوير:

من أكثر المقاييس شيوعاً تحت هذا المعيار مجال التصوير اللحظي (IFOV) للمستشعر، والذي يُعرّف بأنه: أصغر جسم (معلم) يمكن تسجيله في الصورة بواسطة جهاز التصوير عند ارتفاع معين وعند لحظة معينة، أو بمعنى آخر إذا استطعنا تمييز انفصال هدفين في الصورة بصرياً. ويمكن قياس مجال التصوير اللحظي من خلال مفهومين: المفهوم الأول هو أن مجال التصوير اللحظي هو قوس الزاوية (α) على الأرض، أو المسافة الأفقية X-Y (شكل (1-10))، ويمكن حساب دقة الوضوح المكانية، التي تسمى بـ "مسافة العينة الأرضية" (Ground Sample Distance-GSD) بهذه الطريقة من خلال المعادلة التالية (Fiete, 1999):

$$GSD = P \frac{h}{fl}$$

حيث P مقياس اللاقط (Detector Size) في جهاز الشحنات المتقارنة (CCD)، ويقاس بالميكرون، و h ارتفاع القمر، و fl البعد البؤري لجهاز التصوير. وتعتمد القيمة الحقيقية (وليس الاسمية) لمجال الرؤية اللحظي على عدة عوامل، منها: التغيرات في ارتفاع القمر؛ فعلى سبيل المثال، الارتفاع الاسمي لأقمار (لاندسات 1، 2، 3) هو 913 كلم، بينما الارتفاع الحقيقي يتغير من 880 كلم إلى 940 كلم؛ لذلك وعلى الرغم من أن دقة الوضوح المكانية المعلنة أو الاسمية لصور (MSS) هي 79 م - فإن دقة الوضوح المكانية الحقيقية تتراوح بين 76 م و 81 م.

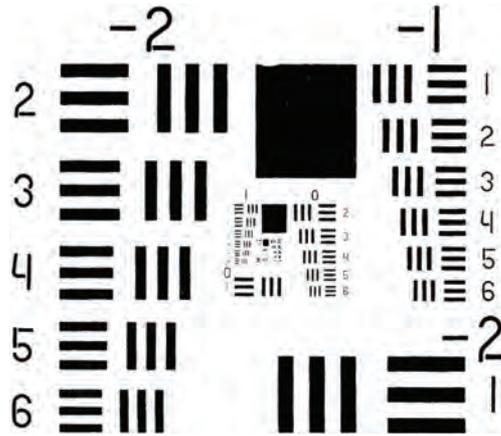


شكل (1-10) مجال الرؤية اللحظي الزاوي (Angular IFOV) ممثلاً بزاوية α ومسقطه على الأرض بمسافة أفقية X-Y. المصدر: [6]

هذا المفهوم ليس موضوعياً تماماً؛ لأن قدرة تمييز الأجسام في الصورة تخضع لعوامل أخرى غير أبعاد الجسم. من هذه المعايير: شكل الجسم، وتباينه مع الخلفية الموجود فيها؛ فمثلاً، في الصور التي يقال إن درجة وضوحها المكانية 1 م يمكن تمييز معالم بأبعاد أقل من ذلك كظهور خطوط مواقف السيارات البيضاء التي يتراوح عرضها من 6 إلى 9 بوصات بشكل واضح. فهل يعني ذلك أن درجة الوضوح لهذه الصور هي 6 إلى 9 بوصات؟ في هذا الكلام نوع من الصحة نظراً لأن قوة التمييز الأرضية للصورة تأخذ في الاعتبار كلتا الظاهرتين (أبعاد الجسم، وتباينه مع الخلفية)؛ ولهذا السبب يستخدم مفهوم آخر لتحديد قدرة التمييز الأرضية يسمى بـ "عدد أزواج الخطوط لكل مليمتر" (Line Pairs Per Millimeter-LPM).

عدد أزواج الخطوط لكل مليمتر:

هي عبارة عن وسيلة معيارية لتحديد خصائص الأهداف المستخدمة لقياس درجة الوضوح المكانية للصورة؛ وتستخدم لتقدير مسافة العينة الأرضية (GSD) باستخدام هدف وضوح معياري (Standard Resolution Target) موضوع على الأرض ويُصوَّر بجهاز الاستشعار عن بعد تحت ظروف تشغيل محددة. وهناك العديد من أنواع تلك الأهداف، إلا أن أشهرها وأكثرها استخداماً هو هدف الوضوح الذي تم تصميمه من قبل القوات الجوية الأمريكية، ويتكون هذا الهدف من خطوط سوداء متوازية على خلفية بيضاء، وعرض المسافات البيضاء بين هذه الخطوط يساوي عرض الخطوط نفسها، وطول هذه الخطوط السوداء يساوي خمسة أضعاف عرضها، يعني ذلك: أن كل ثلاثة خطوط سوداء يفصل بينها فراغان أبيضان تكوّن مربعاً (شكل (1-11)).



شكل (1-11) هدف الوضوح المعياري (Standard Resolution Target) الصادر عن القوات الجوية الأمريكية والمستخدم في الدراسات المختلفة لتحديد درجة الوضوح للصور. المصدر: [3].

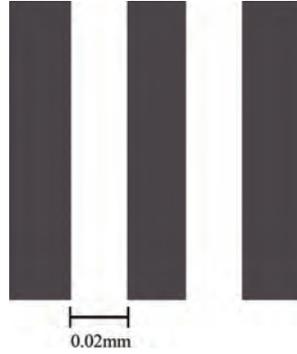
بعد تصوير هدف الوضوح (Resolution Target) يتم فحص الصورة من قبل مفسر الصورة ليحدد أصغر مجموعة من الخطوط التي يمكن رؤيتها منفصلة (أي ليس هناك تداخل بين الخطوط). يقيس المفسر بعد ذلك عرض زوج من الخطوط (Line Pair) (الخط الأسود والخط الأبيض المجاور له) على الصورة ثم يحسب عدد أزواج الخطوط في المليمتر الواحد. فعلى سبيل المثال، وكما هو واضح من الشكل (1-12)، يساوي عرض زوج الخطوط 0.04 ملم، وبالتالي فإنه يمكن حساب عدد أزواج الخطوط في المليمتر الواحد على النحو التالي:

$$LPM(R) = 1/0.04 = 25 LPM$$

؛ ولذلك فإنه يمكن إعادة صياغة معادلة مسافة العينة الأرضية لتشمل عامل عدد أزواج الخطوط في المليمتر الواحد على النحو التالي:

$$GSD = \frac{h}{fI * R}$$

حيث R قوة تمييز جهاز التصوير بوحدة (عدد الخطوط / ملم) المحسوب من المعادلة السابقة. هناك من يسمي مسافة العينة الأرضية (GSD) في حالة المعادلة أعلاه بـ "مسافة التمييز الأرضية" (Ground Resolved Distance-GRD).



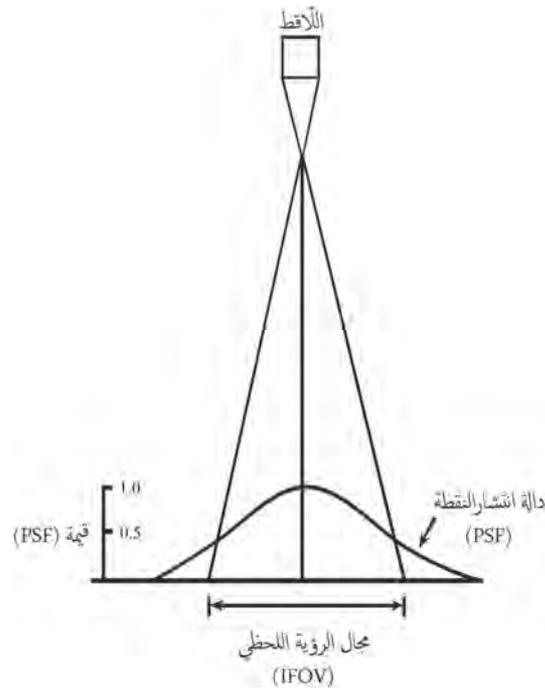
شكل (12-1) استخدام هدف الوضوح المعياري الموضح في الشكل (11-1) لقياس عدد أزواج الخطوط في المليمتر (LPM). المصدر: [3].

وعلى الرغم من أن طريقة مجال التصوير اللحظي هي الأكثر شيوعاً، إلا أنها ليست - بالضرورة دائماً - هي الأفضل؛ ويعود السبب في ذلك إلى أن الانعكاس القادم من نقطة مضيئة على الأرض لا ينتج نقطة مضيئة على الصورة، بل تكون عبارة عن منطقة دائرية مركزها مضيء وحوها ضوء مشتت نتيجة للخصائص البصرية لجهاز التصوير؛ لذلك يمكن أن تظهر الأهداف ذات الانعكاس العالي أكبر من حجمها الحقيقي، ويمكن أن تغطي (تُحجب) أهدافاً أخرى أقل منها إضاءةً وأكبر منها حجماً.

الشكل (13-1) يعرض قطاعاً عرضياً لكثافة ضوء ذات خاصية توزيع "جاوس" (Gaussian Distribution) لهدف (معلم) معين. دالة هذا المنحنى تسمى دالة انتشار النقطة (Point Spread Function-PSF). من خلال ذلك يمكن الاعتماد على طريقة دالة انتشار النقطة (PSF) بديلاً لطريقة مجال التصوير اللحظي لقياس دقة الوضوح المكانية؛ فعلى سبيل المثال، بُنيت دقة الوضوح المكانية لصور نظام الاستشعار (Thematic Mapper-TM) للأقمار (لاندسات 4، 5) والمقدّرة بـ 30م على تعريف دالة انتشار النقطة، وليس على مجال التصوير اللحظي؛ لذلك تكون دقة الوضوح المكانية لصور نظام الاستشعار (MSS) بناءً على هذا التعريف 90م وليس 79م. لتفسير ذلك، فإن وجود معلم ساطع أو مظلم داخل منطقة مجال الرؤية اللحظية للمستشعر سيزود أو ينقص من قيمة دالة الانتشار النقطية، وبالتالي تجعل قيمة إشعاع هذا المعلم أعلى أو أقل من المعالم المحيطة به، وهذا ما يفسر ظهور معالم ذات

تباين كبير (High Contrast) كالأنهار والطرق واضحة في الصور على الرغم من أن عرضها أقل من درجة وضوح (تمييز) الصورة.

ويمكن التقليل جزئياً من تأثير الغشاوة أو عدم الوضوح الناتجة من ظاهرة دالة انتشار النقطة باستخدام دالة أو مرشح "لابلاس" (Laplace Function) (Mather, 1999)، ويجب التنويه هنا إلى أن ظاهرة دالة انتشار النقطة ليست العامل الوحيد الذي يسبب الضبابية في الصورة، فهناك عوامل أخرى تسببها، ومنها: التشتيت الجوي للإشعاع (Atmospheric Scattering) الذي سنتناوله بالتفصيل في الفقرة (2-1-2).



شكل (1-13) مجال الرؤية اللحظي (IFOV) بناء على سعة دالة انتشار النقطة (PSF). المصدر: [6].

1-4-3-2-1 تحديد دقة الوضوح المكانية بالاعتماد على الخصائص الطيفية للمعالم:

كما ذكر آنفاً، فإن تعريف دقة الوضوح المكانية بالاعتماد على مجال التصوير اللحظي ليس صحيحاً دائماً، نظراً لأن هذا التعريف يتناول الجانب الهندسي لعملية التصوير، ولا يأخذ في الاعتبار الخصائص الطيفية للمعالم بالحسبان؛ ولذلك عند أخذ كمية الإشعاع (Radiance) الصادر من المعلم في الاعتبار، فإن هناك اصطلاحاً آخرًا يطلق على دقة الوضوح المكانية وهو عنصر التمييز الفعال (Effective Resolution Element-ERE). يُعرّف عنصر التمييز الفعال (حسب Simonett, 1983) بأنه حجم المنطقة التي يمكن تحديد قيمة إشعاع لها بصفة شبه مؤكدة تقارب 90٪ من قيمة الإشعاع الحقيقية لهذه المنطقة؛ فعلى سبيل المثال، قدّر كلوفوكورسيس قيمة عنصر التمييز الفعال لصور (MSS) بـ 86م، و 35م لصور (TM).

1-3-4-3-1 تحديد دقة الوضوح المكانية بالاعتماد على قدرة جهاز التصوير على التفريق بين الأهداف:

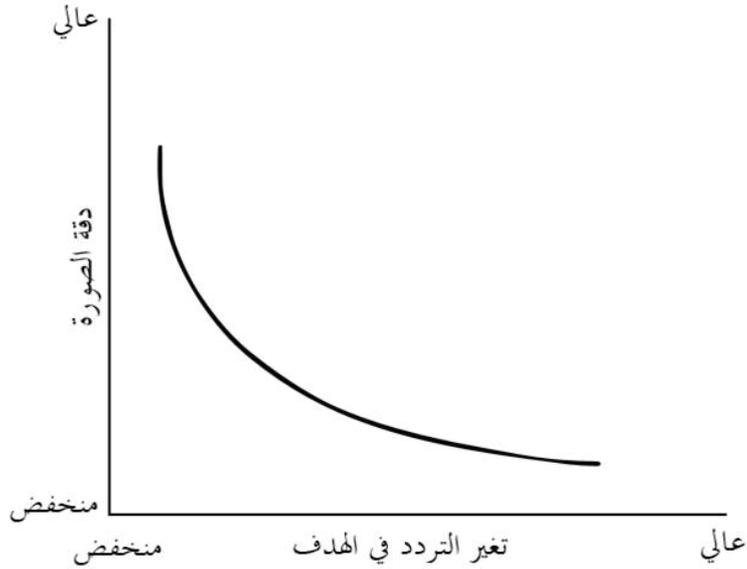
يوجد طريقتان مستخدمتان بهذا الأسلوب، وفيما يلي سنتناولهما بقليل من التفصيل.

مقياس رايلي:

يستند مقياس "رايلي" (Rayleigh) على مبدأ أن دالة انتشار النقطة لنقطة مصدر (Source Point) عبارة عن قرص مضيء حوله مجموعة من الحلقات المظلمة؛ ويعتمد مقياس رايلي على أنه يمكن التفريق بين نقطتي مصدر (هدفين) مضيئتين متساويتين في الصورة إذا كان القرص المضيء لأحدى النقطتين يقع في الحلقة المظلمة الأولى لدالة انتشار النقطة الثانية. وبناء على ذلك، فإن المسافة الدنيا بين نقطتي المصدر التي تُمكن من فصل هاتين النقطتين في الصورة تمثل قياس دقة الوضوح المكانية لجهاز التصوير.

مقياس دالة نقل التعديل:

يختلف مقياس "دالة نقل التعديل" (Modulation Transfer Function-MTF) عن طريقة (رايلي) في أن الأهداف ليست نقاط بل خطوطاً متوازية تفصل بينها مسافات معروفة ذات علاقة بتردداتها المكانية مشابهة في ذلك طريقة "عدد أزواج الخطوط لكل مليمتر" (LPM) المذكورة آنفاً، إلا أنها تختلف عنها في أن المسافات بين الخطوط في هذه الطريقة متغيرة وليست ثابتة؛ بمعنى أنه لقياس دالة نقل التعديل، فإن جهاز التصوير سيصور مصفوفة الهدف بتردد متغير (Varying Spatial Frequency) بدلاً من تردد ثابت كما في الطريقة السابقة. التردد المكاني لهذه الخطوط الذي يجعلها قابلة للتفريق بينها يمثل قياساً لقوة التمييز المكانية لجهاز التصوير (Resolving Power)؛ ويعبر عن التردد المكاني بعدد أزواج الخطوط في المليمتر الواحد على الصورة. كلمة التعديل (Modulation) تدل على التغيرات في عرض الخطوط، وعرض المسافات بينها في هدف الوضوح (Resolution Target). وكلمة (Transfer) تعني قدرة نظام التصوير على تسجيل هذه التغيرات في الصورة. ونظراً لأن هدف الوضوح قد صُمم بحيث يشتمل على ترددات عالية يصعب على جهاز التصوير التقاطها، فإن الدالة (Function) ستعرض القدر من الترددات التي يمكن للصورة تسجيلها (شكل (1-14)).



شكل (1-14) دالة نقل التعديل (Modulation Transfer Function-MTF). المصدر: [3].

ولقياس دقة الوضوح المكانية بهذه الطريقة، فإنه يتعين قياس التباين بين هذه الأهداف وخلفياتها. ووسيلة القياس الشائعة المستخدمة في هذا المجال هي التعديل (Modulation) التي تُعرّف كالتالي:

$$M = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}}$$

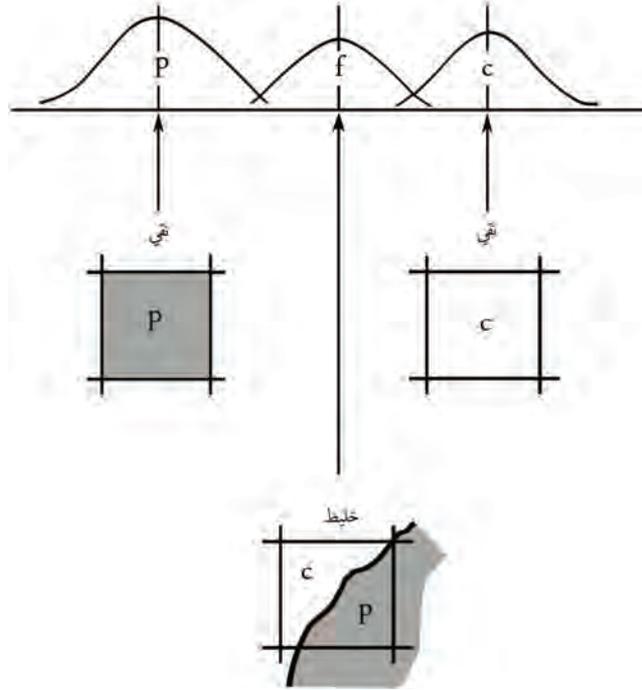
حيث E_{min} ، و E_{max} قيم الإشعاع العظمى، والدنيا المسجلة في منطقة الصورة. بناء على هذه المعادلة، فإن قيمة (M) لصورة متجانسة (Homogeneous) - على سبيل المثال - ستكون صفراً. وبالعودة إلى فكرة الخطوط المتوازية، فإن نسبة قيمة التعديل المقيسة من الصورة للخطوط (M_1) إلى قيمة التعديل للأهداف الحقيقية (M_0) تسمى "معامل نقل التعديل" (Modulation Transfer Factor). والخط البياني لمعامل نقل التعديل مقابل التردد المكاني يمثل دالة نقل التعديل (MTF). وقيمة التردد المكاني المقابل لنصف القيمة العظمى لدالة نقل التعديل يسمى مجال الرؤية اللحظي الفاعل (Effective IFOV - EIFOV)، وتُقدَّر قيمته لصور (MSS) بـ 66م، وبـ 30م لصور (TM)، وقد تم حسابها من التردد المكاني المقابل لقيمة 0.35 من قيم دالة نقل التعديل العظمى؛ بينما دقة الوضوح المكانية المحسوبة بطريقة مجال التصوير اللحظي لهذين النوعين من الصور هي 79م و 45م على التوالي.

وعلى الرغم من أن دالة نقل التعديلات من أفضل طرق قياس درجة الوضوح، إلا أن استخدامها بشكل روتيني قليل نظراً لتعقيدها.

ويجب التنبيه هنا بعدم الخلط بين مقياس عنصر الصورة (Pixel Size) على لأرض (مسافة العينة

الأرضية (GSD))، ومجال الرؤية اللحظي (IFOV)، وعنصر التمييز الفعال (ERE)، ومجال الرؤية اللحظي الفاعل (EIFOV). فمثلاً مقاس عنصر صورة (MSS) هو 79×56 م، بينما قيمة مجال الرؤية اللحظي هي 79 م، أو 76.2 م، أو 73.4 م نتيجة للتذبذب في ارتفاع القمر، في حين قيمة عنصر التمييز الفعال هي 87 م. يضاف إلى ذلك أنه يمكن تغيير مقاس عنصر الصورة من قبل المستخدم عن طريق الاستيفاء (Interpolation) بين عناصر الصورة باستخدام طرق التقسيم المختلفة (Resampling Methods)، وبالتالي فإن المساحة من الأرض الممثلة بعنصر صورة (Pixel) لن تكون (بالضرورة) مطابقة لدقة الوضوح المكانية التي تكلمنا عنها آنفاً.

خليط عنصر الصورة:



شكل (1-15) مثال يوضح المشكلة التي يسببها عنصر الصورة المختلط، والمتمثلة في تمثيل هذا العنصر لغطاء أرضي ليس له وجود أصلاً في المكان. المصدر: [3].

من العقبات التي تواجه تحديد درجة وضوح الصور هو عندما لا تشكل المنطقة على الأرض المقابلة للاقط المستشعر (عنصر الصورة) غطاءً أرضياً واحداً متجانساً (Single Homogenous Category)؛ ولذلك فإن المبدأ القائم عليه تقسيم الصورة إلى عناصر صورة منفصلة (Discrete Pixels) يؤدي إلى تسجيل قيمة متوسطة لقيم السطوح لمجموع الأهداف الموجودة في المساحة من الأرض المقابلة لعنصر الصورة المفرد. فلو كانت المساحة من الأرض المقابلة لعنصر صورة مفرد تشتمل على غطاء أرضي واحد

منتظم؛ فإن عملية توسيط قيم السطوع ستم على قيمة سطوع واحدة، وبالتالي سيكون ناتج التوسيط هي قيمة السطوع نفسها. أما في حالة وجود أكثر من غطاء أرضي في عنصر الصورة الواحد، فإن توسيط قيم السطوع لن يمثل ماهو موجود على الطبيعة (شكل (1-15)).

وكتيجة لذلك، فإن الانعكاس الطيفي لخليط عنصر الصورة (Mixed Pixel) لن يطابق الانعكاس الطيفي النقي للأهداف داخل عنصر الصورة، وبالتالي سيمثل غطاء أرضياً غير موجود في هذه المنطقة، ومن ثم سيؤثر - لاحقاً - على دقة خارطة الغطاء الأرضي الناتجة من عملية تصنيف الصورة.

1-4-3-2 دقة الوضوح الطيفية:

دقة الوضوح الطيفية (Spectral Resolution) هي ثاني أهم خاصية (بعد دقة الوضوح المكانية) لجهاز تصوير الاستشعار عن بعد الكهرو بصري (Electro Optical-EO). ودقة الوضوح الطيفية، أو ما يسمى بعرض النطاق (Bandwidth)، هي فترة أو قطاع الطول الموجي من الطيف الكهرومغناطيسي التي لدى لاقتات جهاز التصوير القدرة على استشعاره. ويُطلق على هذا القطاع من الطول الموجي الذي يستشعره اللاقط مُسمى "نطاق" (Band) أو "قناة" (Channel).

الشكل (1-16) يوضح دقة الوضوح الطيفية (عرض النطاق) البالغة ميكرون واحد ($0.1\mu\text{m}$) للاقط إلكتروني. المحور الرأسي في الشكل يمثل قوة الموجة التي تسجل بواسطة اللاقط، والمحور الأفقي يمثل الطول الموجي لها؛ فكلما زاد الطول الموجي، فإن استجابة (Response) اللاقط للموجات تزداد حتى تصل لأعلى قيمة لها، ثم تبدأ في الانخفاض. ومن الشكل (1-16)، يمكن تعريف دقة الوضوح الطيفية، أو عرض النطاق، بأنه قطاع الطول الموجي المسجل بواسطة اللاقط عند نسبة 50٪ من أعلى قيمة لاستجابة اللاقط، وتقع في هذه الحالة بين $0.5\mu\text{m}$ و $0.6\mu\text{m}$ ، بعرض نطاق قدره $0.1\mu\text{m}$ ، وهو نطاق "الأزرق" من الطيف الكهرومغناطيسي.

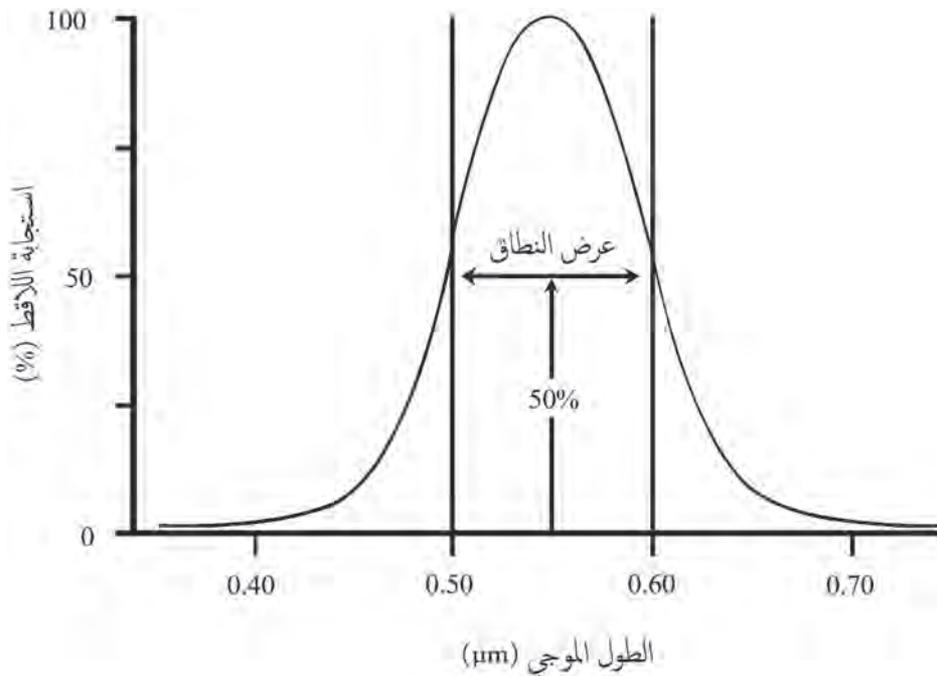
معظم الصور الرقمية المتقطعة بواسطة المستشعرات الكهرو بصرية لمعظم أقمار الاستشعار عن بعد (سبوت، لاندسات، أيكونوس، إلخ) هي متعددة النطاقات الطيفية، ودقة الوضوح الطيفية لهذه المستشعرات تمثل عرض هذه النطاقات. واستناداً إلى ذلك، يتعين الأخذ بعين الاعتبار التالي:

(1) إن موقع النطاقات الطيفية في الطيف الكهرومغناطيسي (Electromagnetic Spectrum)، وعرضها، وعددها تحدد قدرة المستشعر على التفريق بين المعالم على سطح الأرض (نباتات، تربة، صخور، إلخ). فعلى سبيل المثال، يوفر نظام الاستشعار (TM) لأقمار (لاندسات 4، 5) الأمريكية ذو النطاقات السبعة قدرة تمييز بين المعالم أكبر من نظام (MSS) ذي النطاقات الأربع لتلك الأقمار.

(2) إن استخدام الصور المتعددة النطاقات يؤدي إلى قدرة أكبر في التمييز بين المعالم من استخدام

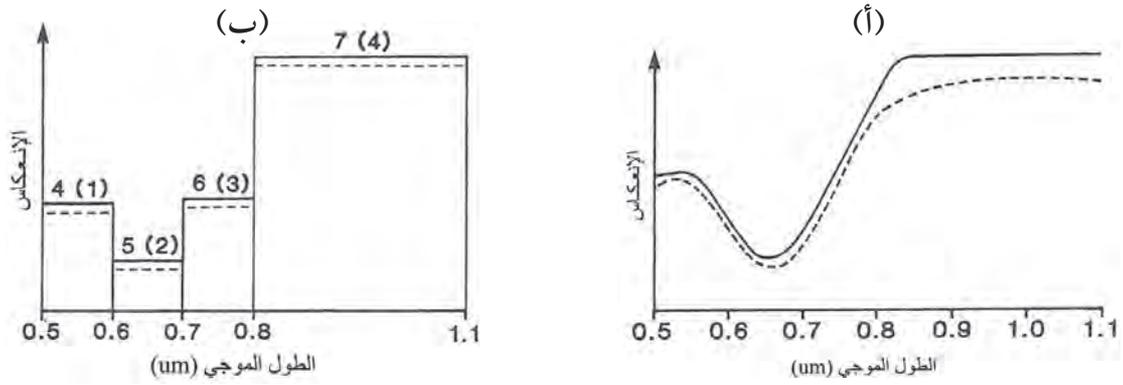
الصور أحادية النطاق نظراً لأن كل معلم يعكس بدرجات مختلفة تختلف باختلاف الطول الموجي للأشعة الكهرومغناطيسية الساقطة من الشمس. الشكل (4-12) يوضح منحنيات الانعكاس (Spectral Reflectance Curves) لثلاثة أنواع من المعالم.

توفر أنظمة الاستشعار عن بعد القدرة على التصوير بعرض نطاقات ضيقة (Narrow Bandwidths) قدرة أكبر من الأنظمة التي تصور بعرض نطاقات واسعة (Wide Bandwidths) في التفريق بين المعالم، وخصوصاً المتشابه منها، كالألوان المختلفة من التربة القاحلة، حيث إن الأخيرة لا تستطيع التقاط الفروقات البسيطة في الانعكاس.



شكل (1-16) مثال يوضح دقة الوضوح الطيفية (عرض النطاق) للاقط. عرض النطاق لهذا اللاقط في هذا المثال هو (0.1 μm) المصدر: [5].

يعرض الشكل (1-17 أ) منحنى الانعكاس لنبات سليم، وآخر غير سليم (مصاب بأمراض)، ويلاحظ في الشكل أن معظم الاختلافات بينهما تقع في منطقة الأشعة تحت الحمراء القريبة (الطول الموجي $> 0.8 \mu m$)؛ أما في الشكل (1-17 ب) الذي يوضح قيم الانعكاس لهذين المعلمين كما يسجلها جهاز الاستشعار عن بعد (MSS) رقمياً - فنجد أن الفروقات في الانعكاس بين النباتين قليلة (خصوصاً في نطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة)؛ مما يؤدي إلى التقليل من إمكانية التفريق بين هذين النباتين.



شكل (1-17) (أ) منحني الانعكاس الطيفي لنبات خالٍ من الأمراض (الخط المتصل)، ونبات معتل (الخط المنقط). شكل (ب) منحني الانعكاس الطيفي لنفس النباتين الموضحين في الجزء (أ) عند تسجيله بواسطة مستشعر (MSS) ذي الأربعة النطاقات. نطاقات هذا المستشعر على أقمار (لاندسات 1 إلى 3) تحمل الأرقام (4 إلى 7)، بينما تحمل هذه النطاقات الأرقام (1 إلى 4) على أقمار (لاندسات 4، 5). المصدر: [6].

كما سبق، ومن خلال المثال السابق يتبين أن زيادة قدرة المستشعر على التفريق بين المعالم المتقاربة في الانعكاس يتطلب: أن تكون قدرة تمييزه الطيفية مقارنة إلى حد كبير لمنحني الانعكاس لتلك المعالم. إلا أنه ولسوء الحظ ليس بالأمر اليسير زيادة دقة الوضوح الطيفية؛ لأن هناك ثمناً يجب أن ندفعه وهو أن زيادة دقة الوضوح الطيفية تؤدي إلى التقليل من نقاوة الإشارة (الانعكاس) المسجلة بالمستشعر، والتي تسمى بنسبة الضوضاء إلى الإشارة (Signal-to-Noise Ratio-SNR) (يمكن الرجوع إلى فقرة (1-4-4) لمزيد من التفاصيل).

1-3-3-4-3 دقة الوضوح الزمنية:

يمكن تعريف دقة الوضوح الزمنية (Temporal Resolution) لنظام الاستشعار عن بعد بأنها: عدد المرات التي يمكن لأي مستشعر الحصول على صور لمنطقة معينة في فترة محددة. بمعنى آخر: هي المدة الزمنية التي يمكن لنظام استشعار عن بعد إعادة تصوير نفس المنطقة.

تفيد قدرة أنظمة الاستشعار عن بعد على تكرار تصوير نفس المنطقة في فترات زمنية مختلفة في تحديد التغيرات (Change Detection) التي تطرأ على سطح الأرض سواء للمعالم الحضرية أم الطبيعية. فعلى سبيل المثال، يوفر تصوير المناطق الزراعية في فترات محددة متوافقة مع التغيرات الفصلية لهذه المناطق القدرة على دراسة حركة النمو أو الإصابة بالأمراض، كما يوفر تصوير المناطق الحضرية في فترات متفرقة القدرة على تحديد التغيرات العمرانية التي حدثت خلال تلك الفترات.

1-4-3-4 دقة الوضوح الإشعاعية:

دقة الوضوح الإشعاعية (قدرة التمييز الإشعاعية) (Radiometric Resolution) تحدد حساسية اللاقط (في نظام التصوير) في التفريق بين قوة الإشارات الصادرة عن المعالم المختلفة على سطح الأرض عند تسجيله للتدفق الإشعاعي (Radiant flux) المنبعث منها. فعلى سبيل المثال، يسجل نظام المسح المتعدد الأطياف (MSS) في الأقمار (لاندسات 1، 2، 3) التدفق الإشعاعي المنعكس من الأجسام على سطح الأرض في مدى ديناميكي (Dynamic Range) قدره 6 بت (مُسجَّل في 64 درجة من السلم الرمادي)؛ ثم يمدّها إلى 7 بت (في 128 درجة من السلم الرمادي). أما نظام التصوير (TM) في الأقمار (لاندسات 4، 5)، فيسجل التدفق الإشعاعي المنعكس في 8 بت (في 256 درجة من السلم الرمادي). ما سبق ذكره يعني أن دقة الوضوح الإشعاعية في نظام التصوير (TM) أكبر من دقة الوضوح الإشعاعية في نظام التصوير متعدد الأطياف (MSS).

الأجيال الجديدة من الأقمار العالية الوضوح (ايكونوس، كويكبيرد، جيوآي، وورلدفيو) أصبحت قادرة على تسجيل التدفق الإشعاعي في مدى ديناميكي أكبر بكثير من الأقمار السابقة، حيث يصل تسجيل المدى الديناميكي لصورها إلى 11 بت (أي أنها مُسجّلة في 2048 درجة من السلم الرمادي).

من العوامل التي تساعد على زيادة دقة الوضوح الإشعاعية زيادة مجال الرؤية اللحظي (IFOV)، حيث يؤدي ذلك إلى زيادة وقت المكوث على الهدف (Dwell Time)، وبالتالي اكتساب طاقة مركزة على الهدف بشكل أكبر (أي إشارة أقوى)، ومن ثم القدرة على التمييز بين الفروقات الصغيرة في الطاقة (أي التفريق بين المعالم).

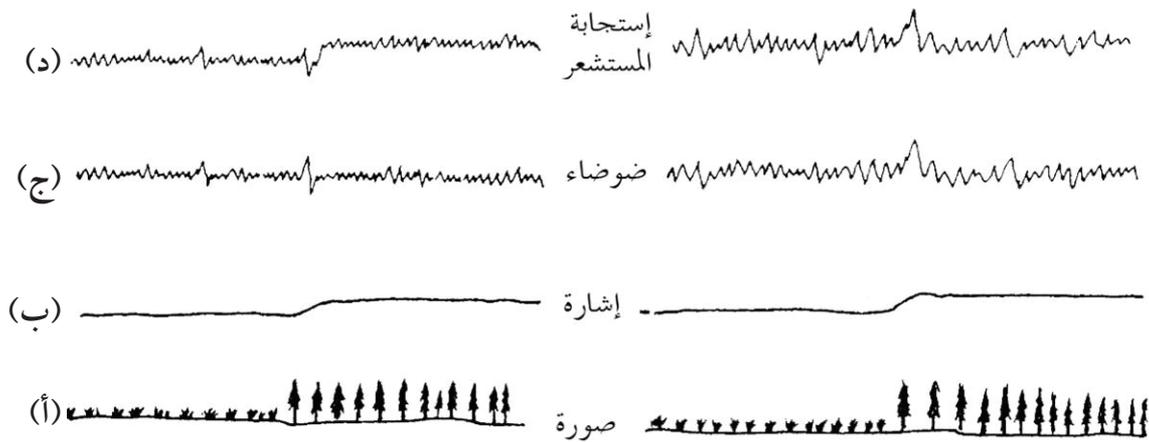
وألية التصوير لها دور كذلك في زيادة قدرة التمييز الإشعاعية، فالمستشعرات التي تعمل بنظام دفع المكبسة (Push-Broom) كما في أقمار سبوت توفر مدة نظر إلى الهدف أطول من التي يوفرها نظام التصوير الذي يعمل بالمسح الكهروميكانيكي المتأرجح (Whisk-Broom) كما في أقمار (لاندسات)، وبالتالي تحسين قدرة التمييز أو دقة الوضوح الإشعاعية.

ويجب التنويه هنا أيضاً إلى أن الزيادة في دقة الوضوح الإشعاعية تؤدي إلى زيادة في قيمة "نسبة الإشارة إلى الضوضاء".

1-4-4-4 نسبة الإشارة إلى الضوضاء:

تصمم أجهزة الاستشعار عن بعد على أساس أن يكون مستوى الضوضاء صغيراً نسبة إلى مستوى الإشارة (وهي الانعكاس الطيفي الحقيقي الصادر عن الهدف). وتقاس هذه النسبة بما يسمى "نسبة الإشارة إلى الضوضاء" (Signal-to-Noise-Ratio-SNR) (شكل (1-18))؛ فالإشارة تمثل المعلومة عن الهدف، بينما الضوضاء تمثل المعلومات غير الصحيحة (غير المطلوبة) التي تضاف إلى الإشارة، وهي في طبيعتها إما أن تكون عشوائية (Random)، أو نمطية (Systematic) ناتجة من عدم المثالية في الأداء للمكونات

الميكانيكية أو الإلكترونية لجهاز الاستشعار، أو ناتجة من عوامل خارجية أخرى تشارك في تكوينها، ومنها: تأثير الغلاف الجوي، ومعالجة الصور، إلخ. وحسب (Barker and Gunther, 1983) فإنه يمكن تعريف نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) بأنها: نسبة قيمة الإشعاع الملتقط بوحدة (Radiance) (المحسوبة من متوسط قيم 100 عينة على الأقل للإشعاع) إلى جذر متوسط مربع (RMS) قيم الضوضاء المكافئة لها بوحدة (Radiance)، الذي يعرف: بأنه جذر متوسط مربع انحرافات (Deviations) قيم تلك العينات من القيمة المتوسطة.



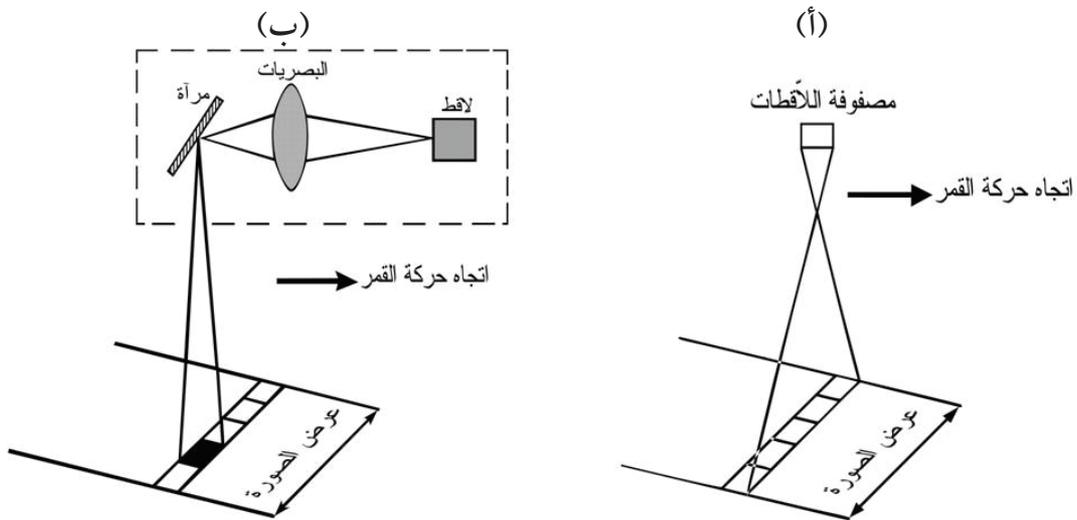
شكل (1-18) "نسبة الإشارة إلى الضوضاء" (SNR). (أ) صورة إفتراضية لنوعين من الغطاءات الأرضية. (ب) الإشارة الكهربائية لانعكاس هذين الغطاءين، ويلاحظ الفرق البسيط في درجة السطوع بينهما. (ج) الضوضاء التي تضاف إلى إشارة انعكاس الغطاءين، والتي تنتج من تأثيرات الغلاف الجوي، أو خطأ في المستشعر، أو أية عوامل أخرى. (د) الإشارة التي يسجلها المستشعر، وهي مزيج من الضوضاء والإشارة الحقيقية المنبعثة من الغطاءات الأرضية. عندما تكون قيمة الضوضاء صغيرة نسبة إلى الإشارة الحقيقية (أي أن قيمة S/N عالية، كما في الجزء الأيسر من الرسم)، فإن المستشعر يستطيع أن يفرق بين الغطاءين الأرضيين؛ أما إذا كانت قيمة الضوضاء كبيرة نسبة إلى الإشارة الحقيقية (أي أن قيمة S/N منخفضة، كما في الجزء الأيمن من الرسم)، فإن المستشعر لن يستطيع التفريق بين الغطاءين. المصدر: [3].

من المعلوم أن التصوير بدرجة وضوح عالية يتطلب تصميم نظام تصوير بمجال رؤية لحظي (IFOV) صغير. إلا أنه من المعلوم (أيضاً) بأنه كلما كبر مجال الرؤية اللحظي، كلما زاد وقت المكوث على الهدف، وبالتالي اكتساب طاقة مركزة على الهدف بشكل أكبر (إشارة أو قيمة سطوع أقوى)، ومن ثم تحسين قدرة التمييز الإشعاعية، أو القدرة على التمييز بين الفروقات الصغيرة في الطاقة (التفريق بين المعالم)، وكذلك إنتاج نسبة إشارة إلى ضوضاء عالية؛ لذلك سيكون هناك مساومة بين درجة الوضوح المكانية العالية التي تتطلب مجال رؤية لحظي صغير، ودرجة الوضوح الإشعاعية العالية التي تتطلب مجال رؤية لحظي كبير؛ وهذا يعني أن نظام التصوير ذو مجال الرؤية اللحظي الكبير سيكون لديه نسبة إشارة إلى ضوضاء أعلى من نظام التصوير ذي مجال الرؤية اللحظي الأصغر، إلا أنه سيكون مقابل الحصول على مستوى إشارة عالٍ من خلال زيادة مجال الرؤية اللحظي تضحياً بدرجة الوضوح المكانية العالية.

من الوسائل الأخرى لزيادة قيمة نسبة الإشارة إلى الضوضاء توسيع، أو زيادة عرض نطاق التصوير الذي يعمل عليه لاقط المستشعر؛ لكن سيكون مقابل ذلك تضحية بشيء آخر، وهو درجة الوضوح الطيفية الدقيقة، وهي قدرة المستشعر على التفريق بين المعالم المتقاربة في الانعكاس.

من هذا المنطلق يتعين على مصممي المستشعرات أن يوازنوا بين الحساسية الإشعاعية (دقة الوضوح الإشعاعية)، ومقاس عنصر الصورة (دقة الوضوح المكانية)، والحساسية الطيفية (دقة الوضوح الطيفية)، وارتفاع القمر، وغيرها من العوامل التي تؤثر على مستوى نسبة الإشارة إلى الضوضاء.

من العوامل المهمة الأخرى التي تؤثر على مستوى نسبة الإشارة إلى الضوضاء - آلية التصوير، فالمستشعرات التي تعمل بنظام دفع المكنسة كما في نظام التصوير (HRV) للقمر (سبوت)، والتي تتكون من مصفوفة خطية من اللاقطات تُكوّن الصورة بتقدم المستشعر (القمر) إلى الأمام مصوراً خطوط مسح (Scan Lines) متراكمة، كل خط مسح مكون من عناصر صورة يساوي عددها عدد اللاقطات (شكل (1-19أ)) - توفر مدة نظر إلى الهدف أطول، وبالتالي قدرة تمييز إشعاعية، ونسبة إشارة إلى ضوضاء أعلى من التي يوفرها نظام التصوير الذي يعمل بالمشح الكهروميكانيكي المتأرجح كنظام التصوير (TM) للقمر (لاندسات) الذي ينشئ خط مسح لكل لاقط باستخدام مرآة متأرجحة، وتتوالى خطوط المسح مع حركة القمر إلى الأمام (شكل (1-19ب)).



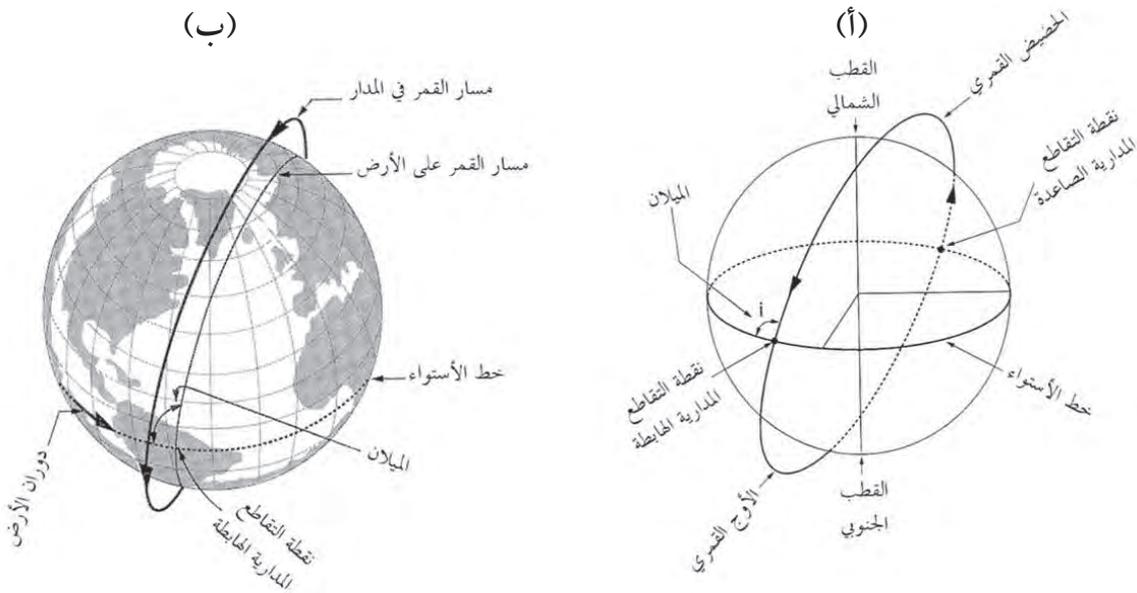
شكل (1-19) رسم توضيحي لأنواع المستشعرات الأكثر شيوعاً. (أ) نظام مسح دفع المكنسة (Push-Broom). (ب) نظام المسح الكهروميكانيكي المتأرجح (Whisk-Broom) ذو المرآة المتأرجحة. المصدر: [6].

تختلف قيم نسبة الإشارة إلى الضوضاء من مستشعر إلى آخر، فقد قدر (Smith and Curran, 1996) قيم نسب الإشارة إلى الضوضاء للمستشعر (AVHRR) لأقمار "نوا" (NOAA)، و (TM) لأقمار (لاندسات)، و (HRV) لأقمار (سبوت) بـ 1:38، و 1:341، و 1:410 على التوالي.

5-1 مدارات الأقمار:

توضع الأقمار الاصطناعية عادة في مداراتها حسب الأهداف المحددة لها، وحسب قدرات وإمكانات المستشعرات التي تحملها. وللتبسيط، فإننا سنصف هنا مدارات الأقمار القياسية بافتراض أن مجال الجاذبية الأرضية كروياً على الرغم من أن الأقمار في الواقع تتبع في حركتها مدارات فيها نوع من الاضطرابات نتيجة لتشوه مجال الجاذبية الأرضية الناتج من الشكل المفلطح للأرض (تسطيح عن الأقطاب وارتفاع عند خط الاستواء)، ونتيجة لجاذبية القمر والشمس اللتين تؤثران على الأرض.

المدار القياسي عبارة عن قطع ناقص (Ellipse) يتم وصفه بعدة خصائص، وهي نقطة الأوج القمري (Apogee)، وهي أبعد نقطة عن الأرض، ونقطة الحضيض القمري (Perigee) وهي أقرب نقطة للأرض، ونقطة التقاطع المدارية الصاعدة (Ascending Node)، ونقطة التقاطع المدارية الهابطة (Descending Node)، وزاوية الميلان (Inclination)، وهي الزاوية التي يشكلها مسار القمر مع خط الاستواء عند نقطة التقاطع المدارية الهابطة (شكل (1-20)).

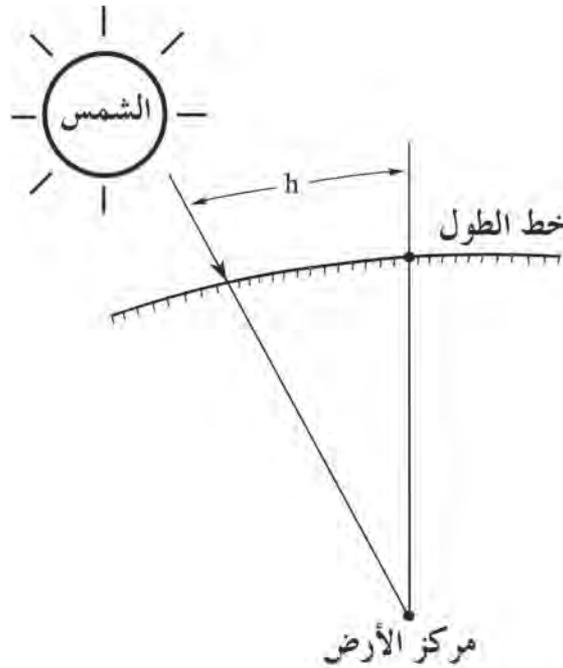


شكل (1-20) مدارات الأقمار. (أ) التعاريف المستخدمة لوصف المدار. (ب) رسم توضيحي يمثل مدار قمر متزامن مع الشمس (Sun-Synchronous). المصدر: [3].

وتعتمد المدة الزمنية التي يستغرقها القمر لإكمال دورة حول الأرض على ارتفاع القمر. فعند ارتفاع 36000 كلم تكون المدة الزمنية التي يستغرقها القمر لإكمال دورة حول الأرض تساوي المدة الزمنية التي تدورها الأرض حول نفسها، وبالتالي فإنه يبقى ثابتاً نسبياً على نفس المكان من سطح الأرض، ويسمى هذا المدار بالمدار الثابت (Geostationary Orbit). وهذا النوع من المدارات يناسب أقمار الاتصالات، وأقمار الأرصاد الجوية، ولكن لا يناسب أقمار مراقبة موارد الأرض (Earth Observation Satellites).

المستخدمة في الاستشعار عن بعد.

وتختلف أهداف أقمار مراقبة موارد الأرض عن الأقمار ذات المدارات الثابتة بأنها تحتاج إلى أن تُصوّر تحت ظروف خاصة؛ وهي أن تكون الإضاءة منتظمة (عدم تغيير في زاوية التصوير)، وفي فترة محددة من اليوم بحيث يُضمن ثبات زاوية ارتفاع الشمس، وبالتالي ضمان أن تمثل قيمة السطوع المسجلة في الصورة خصائص المعالم الأرضية وليس معلومات أخرى ناتجة من تغيرات في زاوية ارتفاع وميلان الشمس. وعلى الرغم من التقيد بهذه الظروف الخاصة فإن ما يجري في الواقع غير ذلك، حيث إن هناك عدة عوامل تجعل قيم السطوع في الصورة لا تمثل خصائص المعالم الأرضية الحقيقية؛ وذلك نتيجة لتغير خط العرض من مكان لآخر، وإختلاف زاويتي ارتفاع الشمس وميلانها عن الشمال (Sun Elevation and Azimuth Angles) اللتين تتأثران بوقت التصوير وموسمه في السنة، والتي ينتج منها إختلاف في درجة إضاءة الشمس للمعالم على سطح الأرض. ولهذا السبب، فإنه يتم تصميم مدارات أقمار مراقبة موارد الأرض بالتزامن مع الشمس (Sun-Synchronance Orbits) بحيث تقلل من أثر أحد أهم مصادر الإختلاف في إضاءة المعالم على سطح الأرض، وهو إختلاف الوقت خلال اليوم الناتج من دوران الأرض حول نفسها داخل أشعة الشمس المباشرة (Direct Solar Beam).

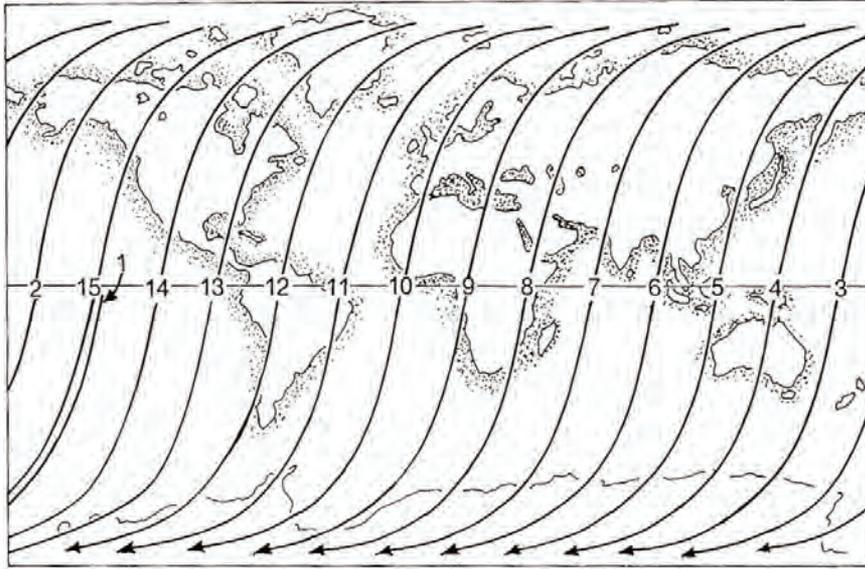


شكل (1-21) زاوية الساعة (Hour Angle) التي تقيس الفرق في خطوط الطول بين نقطة الاهتمام (معروفة خط الطول)، وخط الطول لشعاع الشمس المباشر. المصدر: [3].

ونظراً لأن زاوية الساعة (Hour Angle-h) التي تصف الإختلاف في خط الطول بين نقطة معينة، وشعاع الشمس المباشر (الشكل 1-21)، وهي التوقيت المحلي لأي مكان في العالم، والتي يمكن حسابها على النحو التالي:

$$h = [(GMT - 12.0) * 15] - longitude$$

حيث GMT توقيت جرينتش، و $longitude$ خط الطول عند النقطة المطلوبة - تختلف باختلاف خط الطول، ونحن نريد المحافظة على زاوية ساعة محلية (Local Hour Angle) منتظمة لكل مكان على سطح الأرض بحيث يمر القمر على أية منطقة في العالم عند توقيت محلي تقريبي محدد (10:00 صباحاً، مثلاً) لضمان إزالة عنصر اختلاف الوقت اليومي المؤثر على الإضاءة؛ فإن ذلك يحتم اختيار ارتفاع مدار مناسب، وقيمة اختلاف مركزي (Eccentricity-e) مناسبة للقطع الناقص للمدار، وزاوية ميلان مناسبة للمدار، إلخ. فعلى سبيل المثال، تدور أقمار (لاندسات 1، 2، 3) حول الأرض في مدار متزامن مع الشمس دورة كاملة في زمن قدره 103 دقيقة، بحيث تكمل 14 دورة حول الأرض يومياً. وبعد 252 دورة تكملها حول الأرض في 18 يوم فإن القمر يمر على نفس المكان ويعيد تصويره (الشكل 1-22).

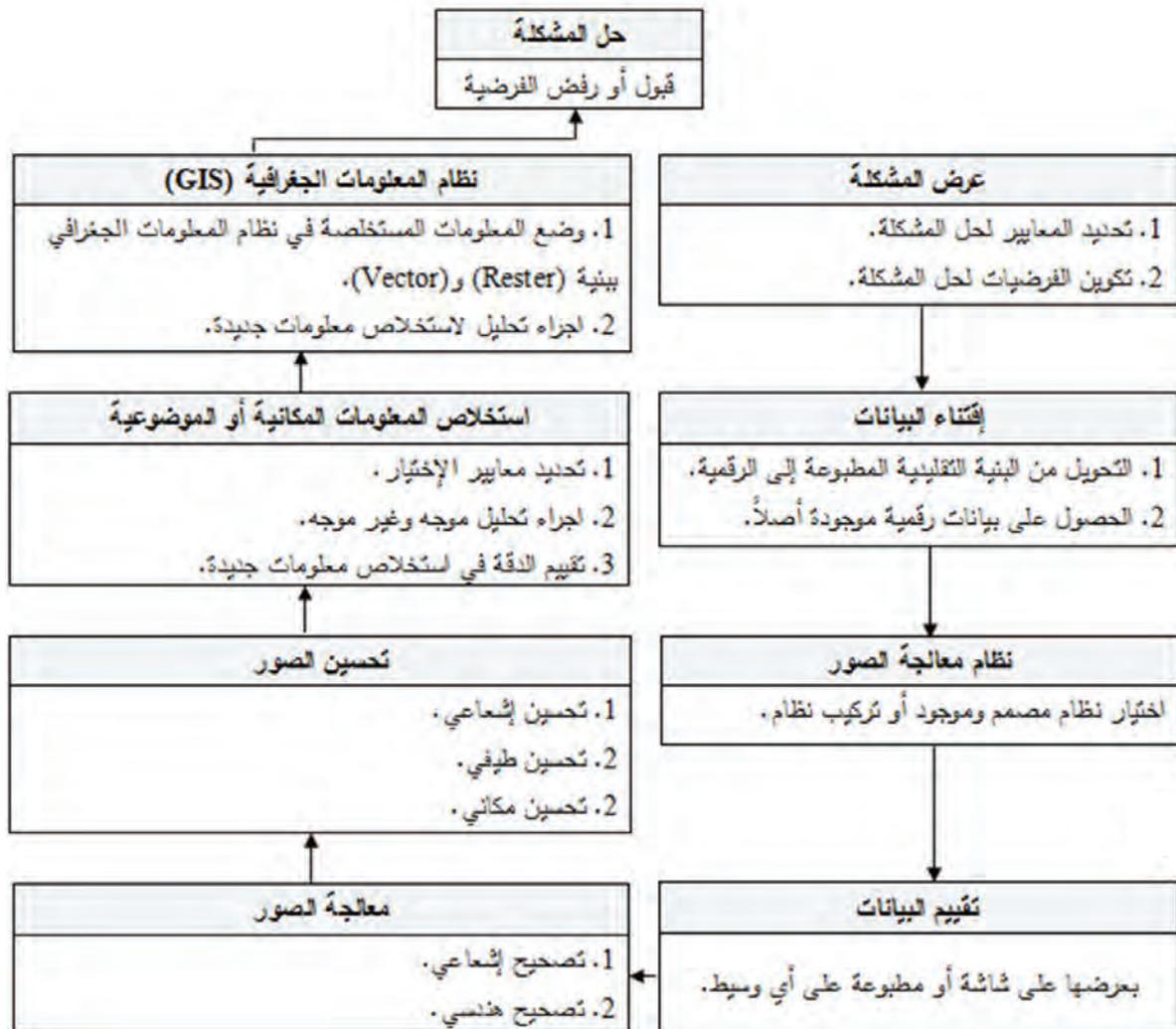


شكل (1-22) مدار أقمار (لاندسات 1، 2، 3). كل خط معلم برقم يمثل مسار القمر حول الأرض من الشمال الشرقي إلى الجنوب الغربي. يكمل القمر خلال 24 ساعة 14 دورة، بحيث تكون الدورة الأولى في اليوم التالي (المسار 15) مجاورة للمسار 1 في اليوم السابق. المصدر: [3].

1-6 مراحل الاستشعار عن بعد بالطاقة الكهرومغناطيسية:

تمر عملية استخلاص المعلومات المفيدة من بيانات الاستشعار عن بعد بعدة مراحل ضمن عملية تسمى عملية الاستشعار عن بعد (Remote Sensing Process) (شكل 1-23)؛ فعلى المحلل أولاً أن يحدد طبيعة المشكلة؛ ثم عليه أن يحدد الأهداف والطرق الضرورية لقبول أو رفض الفرضيات المطروحة لحل هذه المشكلة؛ وعند إجازة طريقة الاستشعار عن بعد المناسبة كحل لهذه المشكلة؛ فإن المحلل يبدأ في تقييم

البدائل المتوافرة لجمع البيانات المطلوبة، إما بتحويل الصورة الجوية أو الفضائية المطبوعة إلى صورة رقمية، أو بالحصول مباشرة على البيانات بصورة رقمية. بعد ذلك، وبافتراض أن التحليل سيتم رقمياً باستخدام الحاسبات، فإنه يجب أن يتم توفير نظام معالجة الصور الرقمية المناسب. يبدأ بعد ذلك في تقييم البيانات الخام إحصائياً (Statically)، واستعراضها بصورة أولية للتأكد من مدى جودتها وملاءمتها للاستخدام، وبعد تقييمها يقوم المحلل بمعالجة الصور إشعاعياً وهندسياً للتخلص من تأثيرات الغلاف الجوي والتشوهات الهندسية الناتجة من نظام التصوير. وبعد معالجة الصور، وحسب الحاجة، يقوم المحلل بعمل عدد من التحسينات على الصورة. يمكن بعد ذلك ربط هذه المعلومات (كمعلومات التربة، ومعلومات التضاريس، إلخ) مع معلومات أخرى في نظام المعلومات الجغرافي (GIS) لزيادة الفائدة منها، وللتمكن من الإجابة عن مشكلات أكثر تعقيداً. في النهاية يسأل المحلل نفسه هل تم حل المشكلة؟ وعلى ضوء الإجابة يتم قبول أو رفض الفرضية.



شكل (1-23) الاعتبارات المأخوذة عند معالجة الصور بواسطة المحلل لاستخلاص معلومات مفيدة من بيانات الاستشعار عن بعد. المصدر: [7].

استناداً إلى ما سبق يمكن حصر العمليات التي تتم على الصور الفضائية في ثلاث مراحل متتالية:

(1) مرحلة اقتناء الصور (Image Acquisition)، وهي جميع التقنيات المستخدمة في الحصول على بيانات الصور.

(2) مرحلة معالجة الصور (Image Processing)، وهي عملية تحويل البيانات الخام الرقمية إلى صور رقمية ذات خصائص مختلفة حسب رغبة المشغل.

(3) مرحلة تحليل الصور (Image Analysis)، وهي عملية استخلاص المعلومات ذات القيمة لقطاع المستخدمين من الصور المُعالجة.

هذا الكتاب يتناول المرحلة الأولى والثانية، أما المرحلة الثالثة، فهي خارجة عن مجاله، وربما يتم تناولها مستقبلاً عن طريق المؤلف أو أي مؤلف آخر.

7-1 خيارات اقتناء صور الاستشعار عن بعد:

لكي تتمكن من معالجة الصور رقمياً يجب أن تكون تلك الصور في بنية رقمية (Digital Format)، وهناك طريقتان تستخدمان لاقتناء الصور في البنية الرقمية وهما:

(1) الحصول على الصورة المُستشعرة عن بعد في هيئة مطبوعة (Analog Format) على ورق أو فلم، كالصورة الجوية العادية، ثم ترقيمها وتحويلها إلى صورة رقمية (Digital Format).

(2) الحصول على الصورة المُستشعرة عن بعد مباشرة في بنية رقمية من مشغلي الأقمار الاصطناعية، كصور أقمار (لاندسات)، و(سبوت) المسجلة على أقراص مضغوطة (CD)، أو أي وسيط آخر، أو من الاتصال المباشر عن طريق الإنترنت.

وستتناول هنا وبشيء من التفصيل الخيارات الممكنة للطريقة الأولى نظراً لسهولة الطريقة الثانية بقراءة الصور الرقمية التي تصل مباشرة من مشغلي الأقمار الاصطناعية عن طريق برامج معالجة صور حديثة قادرة على قراءة هذه الصور بالبنية الخاصة بها أو أي بنية قياسية.

الصور الجوية أو الفضائية في هيئتها المطبوعة عبارة عن صورة للمعالم على سطح الأرض ممثلة بقيم سطوع (Brightness Values-BV) تختلف باختلاف كثافة الإشعاع المنعكس من تلك المعالم. وقياس قيمة السطوع (درجة اللون/ الظل) تتم عن طريق جهاز قياس الكثافة (Densitometer)، حيث يتم قياس كثافة أي موقع (بالاحداثيات السينية والصادية) في الصورة ثنائية الأبعاد، ومن ثم تحويلها إلى قيمة رقمية منفصلة (Discrete Digital Value) تمثل درجة الظل أو قيمة السطوع لهذا الموقع المسمى بعنصر الصورة (Pixel).

وتختلف أبعاد (مقاس) عنصر الصورة باختلاف قدرة جهاز قياس الكثافة المستخدم، أو حسب التطبيق المطلوب.

وحسب مفهوم جهاز قياس الكثافة يمكن تحويل الصور (أحادية الطيف، أو متعددة الأطياف، أو رادارية، إلخ) من هيئتها المطبوعة إلى الهيئة الرقمية بثلاث طرق رئيسة هي:

- 1) المسح الميكانيكي البصري (Optical-Mechanical Scanning).
- 2) الترقيم باستخدام الفيديو (Video Digitization).
- 3) الترقيم باستخدام جهاز الشحنات المتقارنة (Charged Coupled Device-CCD).

1-7-1 المسح الميكانيكي البصري:

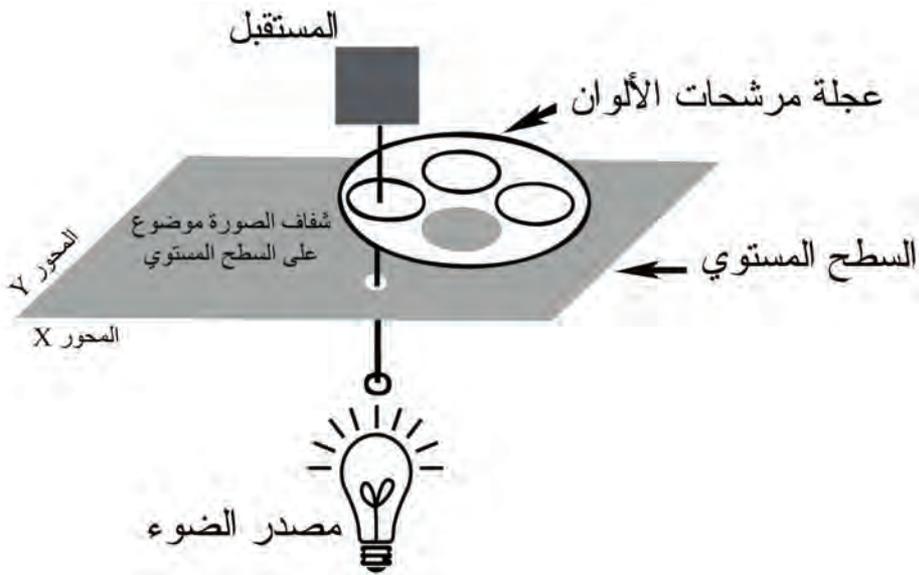
هناك نوعان رئيسان من أجهزة المسح الميكانيكي البصري التي تستخدم في تحويل الصورة المطبوعة إلى الصورة الرقمية. النوع الأول هو نظام السطح المستوي (Flatbed System)، والنوع الثاني هو نظام الأسطوانة الدوّارة (Rotating Drum System).

1-1-7-1 نظام السطح المستوي:

في نظام السطح المستوي يتم وضع الصورة المطبوعة (عادة تكون على شكل فلم) المراد تحويلها إلى صورة رقمية على سطح زجاجي، ثم يتحرك مصدر ضوء خارجي (Single Light Source) ميكانيكياً تحت اللوح الزجاجي عبر الصورة المستوية الموضوعة على السطح الزجاجي في اتجاه أحد بعدي الصورة، ويتابع مسار مصدر الضوء في الاتجاه الآخر من الصورة وفوق السطح الزجاجي مستقبل (Receiver) عبارة عن صمام إلكتروني مضخم للصورة (Photomultiplier Tube) لتسجيل كثافة الضوء الصادر عن مصدر الضوء والمار من خلال الفلم (الشكل 1-24). عند الانتهاء من مسح خط كامل (يمثل بعد الصورة في اتجاه المحور السيني (X-Direction)) يخطو مصدر الضوء خطوة في اتجاه المحور الصادي (البعد الثاني للصورة (Y-Direction)) لبداية مسح خط جديد مجاور وموازي للخط الأول. ينتج من مسح الضوء بواسطة صمام تضخيم الصورة مُخرجات مستمرة (Continuous Outputs) تُحوّل إلى سلسلة من القيم العددية المتقطعة (Discrete Values) تسمى أعداد رقمية أو قيم سطوع (/ Digital Numbers-DNs) (Brightness Values-BVs) تُمثل عناصر الصورة (Pixels). وينتج من عملية التحويل من الهيئة المطبوعة إلى الهيئة الرقمية (A-to-D Conversion) مصفوفة (Matrix) من القيم تسجل عادة على سلم لون رمادي (Gray scale) تتراوح قيمه بين 0 و 255 تمثل دقة وضوح إشعاعية قدرها

8 بت (شكل (1-7))؛ ثم تُخزن هذه البيانات بعد ذلك على قرص صلب أو مضغوط أو شريط مغناطيسي للاستخدام اللاحق.

من الممكن الحصول على صورة رقمية متعددة النطاقات بمسح صورة مطبوعة ملونة (Color Hardcopy) على ثلاث مراحل منفصلة باستخدام مرشحات (Filters) للون الأزرق، واللون الأخضر، واللون الأحمر (شكل (1-24)).

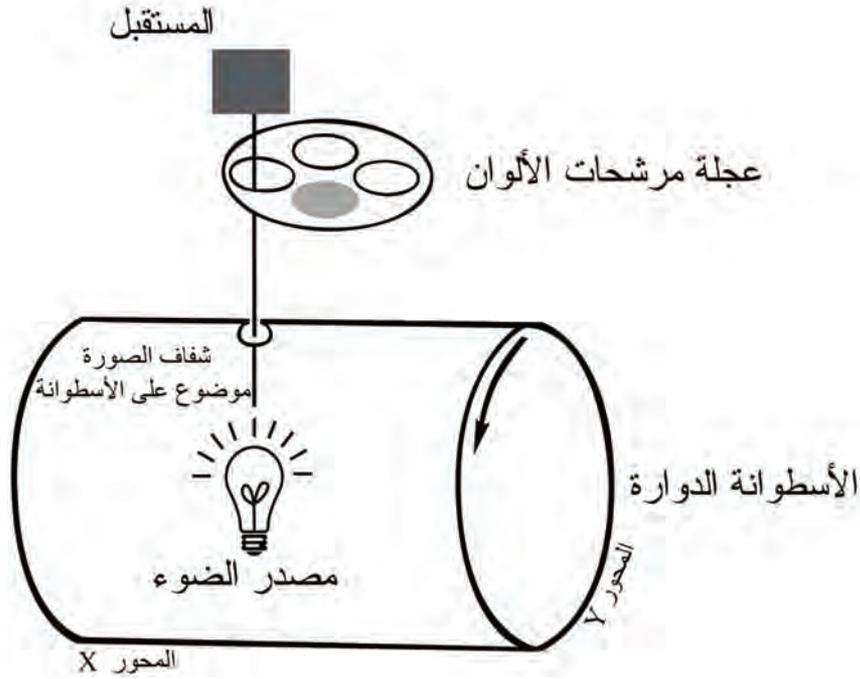


شكل (1-24) المكونات الأساسية لمسح السطح المستوي (Flatbed Scanner). المصدر: [7].

2-1-7-1 نظام الأسطوانة الدوارة:

ماسحات الأسطوانة الدوارة (Rotating Drum Optical-Mechanical Scanners) ترقم الصورة بطريقة تختلف نوعاً ما عن ماسحات السطح المستوي. ففي هذا النوع من الماسحات يتم تركيب الفلم على أسطوانة زجاجية دوّارة بحيث يحتل الفلم جزءاً من محيط تلك الأسطوانة ومصدر الضوء يكون من داخل الأسطوانة (شكل (1-25)).

عند المسح، يمثل محيط الأسطوانة المحور السيني (X-axis)، بحيث إنه يكون قد تم الانتهاء من مسح خط واحد من الصورة بعد إكمال دورة كاملة للأسطوانة. وحركة مصدر الضوء بصورة تدريجية متقطعة عبر محور الاسطوانة يمثل المحور الصادي (Y-axis)؛ فعند الانتهاء من مسح خط كامل من الصورة، أي بعد إكمال دورة كاملة للأسطوانة، ينتقل مصدر الضوء في اتجاه المحور الصادي عبر محور الأسطوانة مسافة صغيرة جداً تساوي البعد الثاني لعنصر الصورة للبدء في مسح خط جديد من الصورة، وتستمر هذه العملية حتى الإنتهاء من مسح كامل الصورة.



شكل (1-25) المكونات الأساسية لماسح الأسطوانة الدوارة (Rotating Drum Scanner). المصدر: [7].

1-7-2 الترقيم بواسطة كاميرا (الفيديو):

تم عملية ترقيم الصورة المطبوعة بواسطة كاميرا (الفيديو) على مرحلتين: المرحلة الأولى تجميد (Freezing) الصورة المرئية (Analog) الملتقطة بواسطة كاميرا (الفيديو)، والمرحلة الثانية ترقيم (Digitizing) الصورة المرئية التي تم تجميدها.

على الرغم من أن عملية ترقيم الصورة المطبوعة بواسطة (الفيديو) تتم بصورة سريعة جداً، إلا أن النتائج لا تكون دائماً مرضية، وخصوصاً عندما يتبع ذلك عمليات معالجة رقمية للصورة الناتجة. فعلى سبيل المثال، هناك تفاوت كبير في الحساسية الإشعاعية (Radiometric Sensitivity) بين الأنواع المختلفة للكاميرات. كما أن عملية الترقيم بواسطة (الفيديو) ينتج منها العديد من المشكلات التي لا يتسع المجال هنا للتطرق إليها، إلا أن من أهمها ما يسمى بـ "إظلام الصورة" (Light Fall Off) باتجاه الأطراف، والذي يؤثر على الخصائص الطيفية للصورة.

1-7-3 الترقيم بواسطة أجهزة الشحنات المتقارنة:

كانت الخيارات المتاحة لترقيم الصور المطبوعة في الماضي محصورة في الطريقتين اللتين تم مناقشتها سابقاً، وهما المسح الميكانيكي البصري، والترقيم بواسطة (الفيديو). وعلى الرغم من أن الترقيم بواسطة (الفيديو) قليل التكاليف، إلا أنه يعاب عليه ضعف دقة الوضوح المكانية والإشعاعية للصورة. من جانب آخر، نجد أن

الترقيم بواسطة المسح الميكانيكي البصري بطيء ومكلف وتحتاج أجهزته إلى صيانة، وعلاوة على ذلك ما زال يقدم دقة وضوح مكانية وإشعاعية مرضية، وخصوصاً المساحات الخاصة بأعمال المسح الجوي. ومنذ وقت ليس بالطويل تم تطوير تقنية جديدة للترقيم باستخدام أجهزة الشحنات المتقارنة (CCD) (شكل (1-5)) التي تم التطرق إليها في الفقرة (1-3).

يتكون هذا الجهاز من مصفوفة من اللاقطات يقدر عددها بالآلاف مثبتة بدقة بواسطة مسامير رصاص (Lead Screws)؛ وبما أن مكان كل لاقط ثابت بالنسبة إلى بقية اللاقطات، وبما أن النظام البصري (Lens System) ثابت أثناء الانتقال بين خطوط المسح (أي الافتراض بوجود نفس مجال الرؤية (Field Of View))، فإن الدقة المكانية في اتجاه محور السينات للصورة المرقمة (الممسوحة) تكون عالية؛ وكذلك فإن المحرك الذي ينقل جهاز الشحنات المتقارنة من خط إلى آخر أثناء المسح قادر على توفير دقة مكانية عالية في اتجاه محور الصادات للصورة المسسوحة تصل إلى جزء من الميكرون.

الصورة التي تنتج من الترميم بهذا النوع من الأجهزة تكون ثنائية الأبعاد، وعدد عناصر الصورة في محور السينات يكون مساوياً لعدد اللاقطات، بينما عدد عناصر الصورة في اتجاه محور الصادات يكون حسب رغبة المشغل بالأستمرار في المسح، وحسب سعة التخزين للحاسب الآلي.

بالإضافة إلى استخدام أجهزة الشحنات المتقارنة في تحويل الصورة المطبوعة إلى صورة رقمية، أصبحت الآن تستخدم في الكاميرات الرقمية في الطائرات والأقمار الاصطناعية. وأصبح بالإمكان أيضاً التصوير في عدة نطاقات (Bands) من الطيف الكهرومغناطيسي باستخدام عدد من أجهزة الشحنات المتقارنة الحساسة للطاقة الكهرومغناطيسية في عدة قطاعات من الطيف الكهرومغناطيسي.

8-1 أهمية معالجة وتحليل بيانات الاستشعار عن بعد رقمياً:

ترجع أهمية معالجة وتحليل بيانات الاستشعار عن بعد رقمياً عن طريق أجهزة الحاسب الآلي، والبرامج المتخصصة إلى سببين: السبب الأول محدودية قدرة العين البشرية على ملاحظة الفروقات في الصورة، فمثلاً عند تفسير الصورة الجوية: الأبيض والأسود (Continuous-Tone Black and White)، فإن عين محلل الصور لا تستطيع التفريق إلا في حدود من 8 إلى 16 درجة من السلم الرمادي، بينما لو كانت الصورة مسجلة على سلم رمادي ذي 256 درجة، فإنه يمكن للمفسر بالطريقة الرقمية أن يستخلص معلومات بشكل أدق مما لو استخدم عينه المجردة. السبب الثاني: ضخامة كمية بيانات الصور والمعلومات المستخلصة منها وتعقيد عمليات التعامل معها في التخزين والاستدعاء والمعالجة والتحليل.

9-1 معالجة الصور رقمياً:

تم عمليات معالجة الصور رقمياً (Digital Image Processing) باستخدام الحاسب الآلي. وقد بدأت هذه التقنية في الستينات من هذا القرن بعدد محدود من الباحثين الذين قاموا بتحليل بعض من الصور الجوية الرقمية المتعددة الأطياف، وبعض من الصور الجوية العادية التي عمل لها ترقيم. إلا أن توافر صور الاستشعار عن بعد الرقمية بصورة واسعة لم يتم إلا بعد إطلاق أول قمر تصوير غير مأهول لمراقبة موارد الأرض في عام 1972م، وهو (لاندسات 1). وفي ذلك الوقت، كانت نظريات معالجة وتحليل البيانات الرقمية، والخبرة في هذا المجال في طور البداية، وكانت كلفة الحاسبات والبرامج المستخدمة مرتفعة. أما في الوقت الراهن، فقد تحسنت الظروف وتطورت الحاسبات والبرامج وقلت كلفتها وأصبحت مصادر الصور الفضائية الرقمية متعددة، سواء من أقمار مراقبة موارد الأرض، أم من أقمار الأحوال الجوية، أم من غيرها من الأقمار الأخرى.

ومصطلح معالجة الصور رقمياً واسع، ويشمل العديد من العمليات الحسابية المعقدة التي توظف على شكل برامج تستخدم من قبل العاملين في هذا المجال. ويمكن تلخيص الفكرة الرئيسة لمعالجة الصور رقمياً ببساطة بأنها عبارة عن إدخال الصورة الى الحاسب الآلي نطاقاً نطاقاً (Band By Band)، وعنصراً عنصراً (Pixel By Pixel)، حتى اكتمال تخزينها على شكل مصفوفة (Matrix)، ثم تطبيق خوارزميات (Algorithms) تمثل أنواع المعالجة المطلوبة على هذه الصورة؛ وتنفذ هذه الخوارزميات من خلال برامج معالجة تجارية أو علمية.

كل عنصر من عناصر الصورة يُمثل بقيمة سطوع (BV) معينة تحاكي المعلم المقابل له على سطح الأرض. وقيم السطوع (كما ذكر سابقاً) تُعرض في مقاسات مختلفة من السلم الرمادي (0-63، أو 0-127، أو 0-255)، يحددها المدى الديناميكي المستخدم في تسجيل البيانات من القمر الصناعي، وفي جهاز الحاسب المستخدم لعرض الصور (شكل (1-7)).

تأخذ معالجة الصور رقمياً أشكالاً كثيرة، منها تحسين التباين (Contrast Enhancement) للصورة، أو تحسين المعالم الخطية (Edge Enhancement) في الصورة، أو دمج نوعين من أنواع الصور (Data Fusion)، أو استخلاص معلومات الأغراض (Thematic Information) عن طريق عملية التصنيف (Classification)، إلخ. وسيتم في الفصول القادمة تناول هذه العمليات وغيرها بشيء من التفصيل.



الفصل الثاني |

المعالجة الأولية للصور الفضائية

Image Pre-Processing

1-2 التصحيح الإشعاعي:

هناك أربعة مصادر من المصادر البيئية المسؤولة عن التأثير على الإشعاعات التي يستقبلها المستشعر عن بعد من سطح الأرض (Environmental Effects)، وهي:

- (1) التأثير الناتج من اختلاف زاوية ارتفاع الشمس خلال فصول السنة.
- (2) التأثير الناتج من الغلاف الجوي (Atmospheric Effects).
- (3) التأثير الناتج من تضاريس أو طبوغرافيا سطح الأرض (Topographic Effects).
- (4) التأثير الناتج من الانعكاس غير المتماثل للأجسام (Anisotropic Effects).

كما هو معروف، تتكون الصور الفضائية من عناصر صورة (Pixels)، وقيمة السطوع (Brightness Value-BV) لعنصر الصورة تمثل كمية الإشعاع القادم من سطح الأرض الذي يلتقطه لاقط المستشعر (Detector). وللقيام ببعض التطبيقات التي تتطلب إزالة تأثير الظل الناتج من التضاريس، أو استخدام صور ملتقطة في فترات مختلفة من السنة (كعمل موزايك بين صور التقطت في فترات مختلفة من السنة، أو تحديد التغيرات (Change Detection) التي طرأت على منطقة معينة خلال فترة معينة، أو تصنيف صور مختلفة أوقات الالتقاط لإعداد خرائط غطاء أرضي)، فإن ذلك يتطلب التصحيح لهذه التأثيرات.

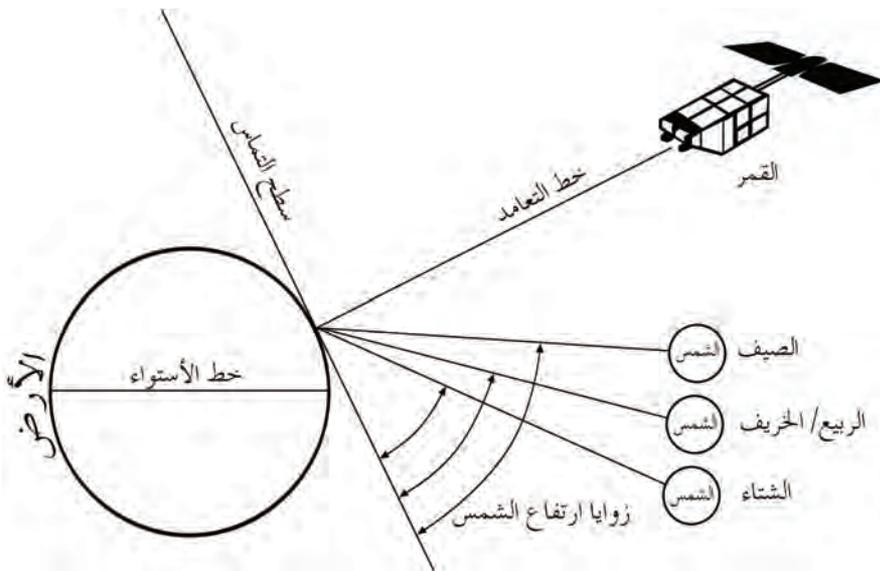
الإشعاع في طريقه من الشمس إلى الأرض ومن الأرض إلى المستشعر يتعرض لاختزال جزء منه نتيجةً لعملية تشتيت (Scattering)، وامتصاص (Absorption) بواسطة جزيئات الغلاف الجوي (Molecules)، والهباء (Aerosols). وكمية الاختزال تعتمد على الطول الموجي لذلك الإشعاع، وحجم جزيئات الغلاف الجوي والهباء، وطول المسار الذي يقطعه ذلك الإشعاع. وطبوغرافية سطح الأرض تلعب (أيضاً) دوراً مهماً بالتحكم في كمية الإشعاع الواصل إلى المستشعر. فزاوية ميول التضاريس تتحكم في كمية الإشعاع المباشر الساقط من الشمس على سطح الأرض (Direct Irradiance)، والإشعاع المنتشر أو ما يسمى بضوء السماء (Diffuse Irradiance / SkyLight) الساقط من المنطقة المضئية حول سطح

الأرض، والإشعاع المنعكس (Reflected Radiance) من سطح الأرض إلى المستشعر على متن القمر، وغيرها من الإشعاعات الأخرى التي سيتم مناقشتها لاحقاً عند الحديث عن تأثير الطوبوغرافيا. ويمكن تلخيص تأثير الطوبوغرافيا في أن معلمين متطابقين من حيث النوع والتركيب على سطح الأرض يقعان في درجتي ميول مختلفتين واتجاهين مختلفين عن الشمس سيعكسان كميتين مختلفتين من الإشعاع، وبالتالي سيظهران في الصورة معلمين مختلفين. التأثير الثالث هو الانعكاس غير المتوازن، ويتلخص تأثيره في أن سطح أي معلم على سطح الأرض (حتى لو كان مستوياً) يعكس بدرجات مختلفة حسب زاوية ارتفاع وميلان الشمس عن سطح الأرض؛ وهذا يعني أنه عندما يتعرض معلمان متطابقان في النوع والتركيب ويقعان على ارض مستوية لإشعاع الشمس من زاويتين مختلفتين فإنهما سيظهران في الصورة بدرجتين مختلفتين من السطوع.

وفيما يلي سيتم التطرق إلى عمليات التصحيح الإشعاعي (Radiometric Correction) التي تُجرى على الصور الفضائية للتخلص أو التخفيف من أثر العوامل البيئية الأربعة المذكورة آنفاً.

1-1-2 تصحيح ميلان زاوية ارتفاع الشمس:

تؤثر زاوية ارتفاع الشمس (Solar Elevation Angle) على كمية الإشعاع المنعكس من الأجسام إلى المستشعر المحمول على القمر الصناعي (شكل 1-2)؛ ويتم التصحيح لهذا التأثير بعملية تسمى عملية معايرة الصورة (Image Normalization Process). وفي هذه العملية، يتم تعديل قيم سطوع عناصر الصورة (BV) بحيث تحسب قيمتها كما لو كانت الشمس في وضع متعامد (At Zenith) مع المنطقة التي يغطيها ذلك العنصر؛ ويتم ذلك بقسمة قيمة سطوع عنصر الصورة على جيب (Sine) زاوية ارتفاع الشمس التي تُرفق عادة مع بيانات الصورة التي يتم الحصول عليها من مشغل القمر.



شكل (1-2) تأثير التغير الفصلي خلال السنة على زاوية ارتفاع الشمس. المصدر: [1].

ويجدر التنويه هنا إلى أن التصحيح لتأثير ميلان الشمس لا يقتصر (كما ذكر آنفاً) على التصحيح الهندسي، وإنما يمتد أيضاً إلى التصحيح لتأثيرات (تشتيت، وامتصاص، وانكسار) مكونات الغلاف الجوي من غازات، وبخار ماء، وهباء على أشعة الشمس الساقطة على سطح الأرض، والمنعكسة منه إلى المستشعر.

إن عملية التصحيح لهذه التأثيرات وغيرها من التأثيرات غير السطحية الأخرى تتم باستخدام نماذج غلاف جوي معقدة تستخدم معادلة انتقال الطاقة (Radiative Transfer Equation) التي سيتم التطرق إليها لاحقاً؛ ولكن تكمن المشكلة هنا في أن بعض الصور القديمة المطلوب إزالة تأثير هذه العوامل منها لا يتوافر لها البيانات الضرورية التي تصف الانعكاسات الحقيقية، والأحوال الجوية المصاحبة لها. وفي هذه الحالة يتم إجراء معايرة تجريبية (Empirical Normalization) بدلاً من ذلك؛ وهناك عدة طرق للمعايرة التجريبية، منها: طريقة "جاوس" (Gaussian Method)، ومطابقة الـ (هستوغرام) (Histogram Matching Method)، والطريقة المحددة (Deterministic Method)، والانحسار الخطي (Linear Regression Method)؛ وتعتبر الطريقة الأخيرة هي الفضلى وتستخدم كثيراً من بين هذه الطرق، فقد تم (بحثياً) إثبات صحة افتراض أن هناك علاقة خطية بين قيم سطوع عناصر الصورة المرجعية (Reference Image) وقيم سطوع عناصر الصورة المطلوب معايرتها عليها، ويُمثّل الانحسار الخطي بين قيم سطوع عناصر الصورة المرجعية وقيم سطوع عناصر الصورة المطلوب معايرتها بمعادلة خطية تُشتق باستخدام نقاط مرجعية تسمى أهداف ضبط إشعاعية (Radiometric Control Targets)، وهي عبارة عن معالم أرضية صناعية (كتقاطع طريق أو أية منشأة صناعية أخرى) أو طبيعية (كالسبخة). والصيغة الرياضية لهذه المعادلة على النحو التالي:

$$(BV_{ref})_i = a + b (BV_{norm})_i$$

حيث BV_{ref} قيمة سطوع عنصر الصورة المرجعية، و BV_{norm} قيمة سطوع عنصر الصورة المعايرة، و a ، و b معاملات المعادلة الخطية، و i رقم نطاق الصورة المستخدمة. وهناك مجموعة شروط لاختيار أهداف الضبط الإشعاعي في صورتين، منها:

- (1) أن يكون للأهداف نفس الارتفاع.
- (2) أن تحتوي الأهداف على أقل محتوى ممكن من النباتات (لأن الانعكاس الطيفي للنباتات معرض للتغير الموسمي).
- (3) أن تقع الأهداف في منطقة منبسطة (لضمان أن الاختلاف في الانعكاس من الصور ناتج فقط عن التغير في زوايا الشمس).

4) أن يكون للأهداف نطاق واسع من قيم السطوع للتمكن من تكوين معادلة انحسار خطي (Regression Model) يُعتمد عليها.

بعد اشتقاق معادلة التحويل يتم إيجاد قيم عناصر الصورة المطلوب معايرتها عن طريق التعويض بقيم عناصر الصورة المرجعية في المعادلة، ونتيجة لذلك تكون الصورة المعايرة الناتجة لها نفس خصائص زاوية ارتفاع الشمس للصورة المرجعية.

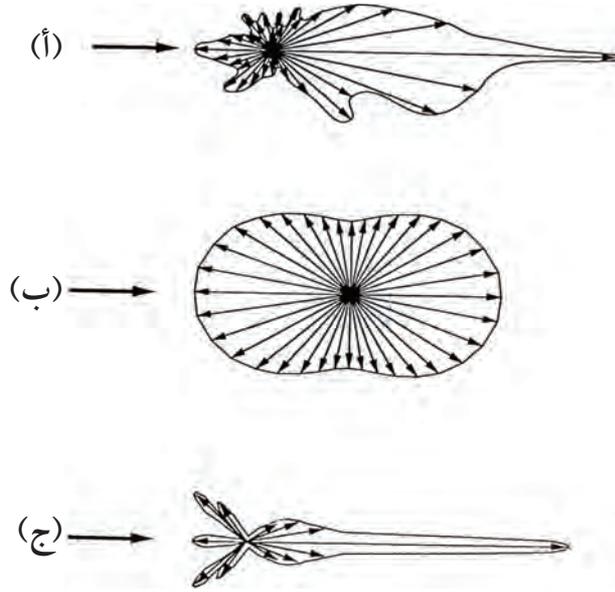
2-1-2 التصحيح الجوي:

جميع الأشعة التي تشارك في عملية الاستشعار عن بعد سواء الأشعة الشمسية الساقطة من الشمس على سطح الأرض، أو المنعكسة أو المنبعثة من سطح الأرض إلى المستشعر تمر بالغلاف الجوي؛ وبسبب تأثير الغلاف الجوي (التشتيت والامتصاص للأشعة) فإن جزءاً فقط من الأشعة يصل إلى المستشعر (على سبيل المثال، 80٪ عند الطول الموجي $0.8\mu\text{m}$ ، و 50٪ عند $0.45\mu\text{m}$). إذا كان المستشعر محمولاً على طائرة فإن تأثير الغلاف الجوي على جودة الصورة يعتبر هامشياً ويمكن إهماله، أما إذا كان المستشعر محمولاً على قمر اصطناعي فإن الأشعة (الطاقة) تمر خلال كامل الغلاف الجوي، وبالتالي فإن تأثير الغلاف الجوي على جودة الصور يكون كبيراً. لذلك، على من يعمل في مجال الاستشعار عن بعد أن يكون على دراية وعلم بتفاعلات الموجات الكهرومغناطيسية مع الغلاف الجوي؛ فعند تصوير المدن مثلاً، يجب التركيز على التأثيرات المرئية (Visual Effects) الناتجة من الغبار، والدخان، والضباب (Haze)، وغيرها من شوائب الغلاف الجوي الأخرى بسبب تأثير تركيزها العالي؛ ولكن وحتى في وجود أجواء صافية، فإن التأثير المرئي للغلاف الجوي يظل (أيضاً) كبيراً نظراً لأن جزيئات الغازات غير المرئية المكوّنة للغلاف الجوي تؤثر أيضاً على مرور الأشعة خلالها.

سيتم فيما يلي، وبشيء من التفصيل، تناول التأثيرات الفيزيائية (التشتيت، والامتصاص، والانكسار) للغلاف الجوي على أشعة الشمس الساقطة والمنعكسة حين مرورها خلاله.

2-1-2-1-2 التشتيت:

التشتيت (Scattering) عبارة عن إعادة توجيه الطاقة الكهرومغناطيسية بواسطة الجسيمات (Particles) العالقة في الجو (مثل الغبار، والدخان، إلخ)، وجزيئات (Molecules) الغازات الكبيرة المكوّنة للغلاف الجوي؛ ومقدار التشتيت يعتمد على مقاس تلك الأجسام أو الجزيئات، وكثافتها، والطول الموجي للأشعة المتفاعلة معها، وعمق الغلاف الجوي الذي تمر خلاله هذه الأشعة. وإعادة توجيه الأشعة بسبب التشتيت يكون إما بحرف تلك الأشعة عن مسارها إلى الأمام (Forward Scattering)، أو إلى الخلف (Backward Scattering) (شكل (2-2)).



شكل (2-2) ظاهرة التشتيت التي تحدثها ثلاثة أنواع من الأجسام الموجودة في الغلاف الجوي. (أ) الغبار أو الدخان العالق في الغلاف الجوي ذو الشكل غير المنتظم يسبب تشتيتاً أمامياً (Forward Scattering) قوياً، وتشتيتاً خلفياً (Backward Scattering) بدرجة أقل. (ب) جزيئات الغازات ذات الشكل المنتظم، والمتناظر (Symmetric) تسبب تشتيتاً أمامياً وخلفياً متماثلاً. (ج) قطرات الماء الكبيرة في السحب تسبب تشتيتاً أمامياً عالياً، وتشتيتات خلفية غير متماثلة بدرجة أقل. المصدر: [3].

من أكثر أشكال التشتيت شيوعاً التشتيت الجزيئي (Molecular Scattering)، أو ما يسمى بـ ”تشتيت رايلي“ (Rayleigh Scattering) الذي اكتشفه العالم الإنجليزي ”لورد رايلي“ (Lord Rayleigh) في أواخر التسعينات من القرن التاسع عشر. يبين هذا العالم أن الغلاف الجوي النظيف والخالي من العوالق، والذي يتكون فقط من جزيئات الغازات، وبخار الماء يسبب تشتيتاً للضوء بحيث يزداد مقدار هذا التشتيت بشكل كبير مع قصر الطول الموجي للأشعة، ويحدث هذا النوع من التشتيت عندما يكون قطر الجزيئات الجوية أصغر بكثير من الطول الموجي للأشعة ($d < \lambda$)؛ فعلى سبيل المثال، تسبب جزيئات غازات النيتروجين والأكسجين التي أقطار ذراتها أصغر من الطول الموجي للأشعة المرئية وتحت الحمراء القريبة هذا النوع من التشتيت.

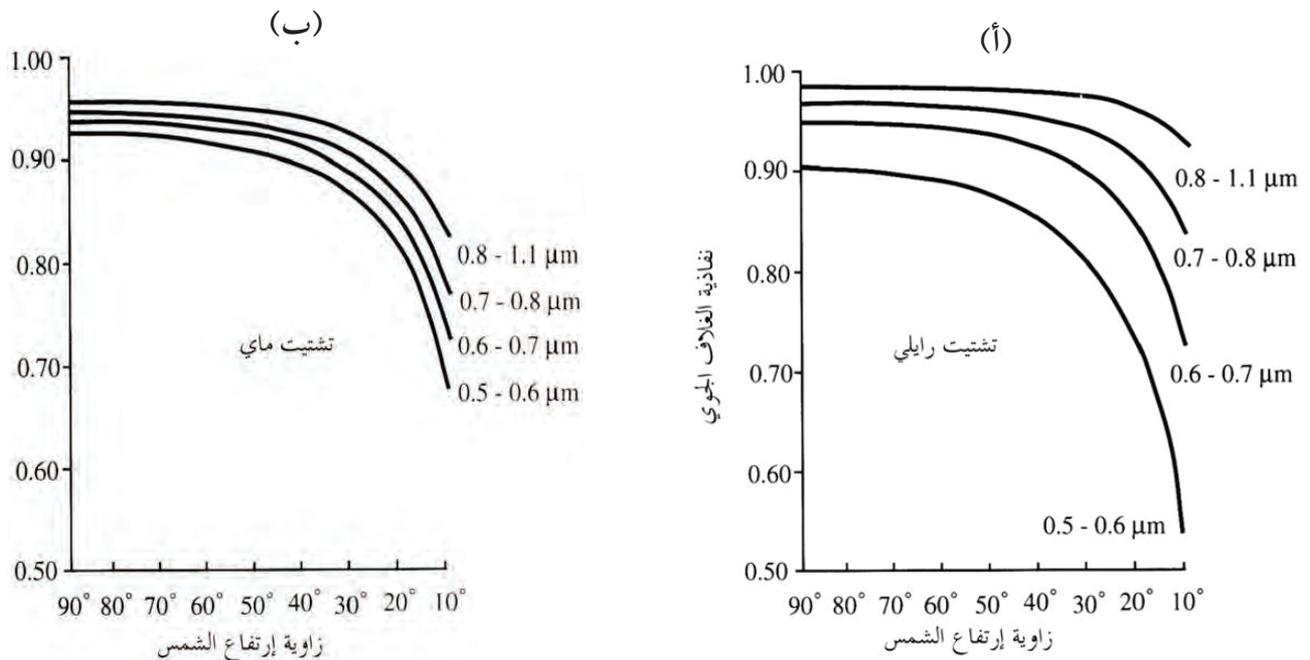
ينص قانون تشتيت (رايلي) (الذي يحدث الجزء الأكبر منه في الجزء العلوي من الغلاف الجوي على إرتفاع 9 كلم إلى 10 كلم) على أن مقدار التشتيت يتناسب عكسياً مع القوة الرابعة للطول الموجي ($\frac{1}{\lambda^4}$)؛ فعلى سبيل المثال، عند استخدام صور (MSS)، فإن قوة التشتيت لنطاق الأشعة الخضراء ذات الطول الموجي ($0.5\mu\text{m}-0.6\mu\text{m}$) تبلغ أربعة أضعاف قوة التشتيت لنطاق الأشعة تحت الحمراء القريبة ذات الطول الموجي ($0.7\mu\text{m}-0.8\mu\text{m}$). وتشتيت (رايلي) هو الذي يسبب ظهور السماء باللون الأزرق في الظهر واللون الأحمر والبرتقالي عند غياب الشمس؛ فالسبب في ذلك يعود إلى أنه عند الظهر تكون مسافة مرور الأشعة خلال الغلاف الجوي قصيرة، وبالتالي فإن الملاحظ من سطح الأرض يرى اللون الأزرق بعد انحرافه بواسطة مشتت (رايلي)، بينما عند الغروب فإن الملاحظ لا يرى إلا

اللون الأخضر والأحمر (الأصفر والبرتقالي)، وهي الأشعة ذات الطول الموجي الأطول من الأزرق، والتي تمر خلال مسافة أطول، حيث لا يمر من هذه المسافة الطويلة إلا الموجات ذات الطول الموجي الأطول التي تتعرض لتأثير أقل من تشتيت (رايلي).

في عام 1906م نشر العالم الألماني الفيزيائي "جوستاف ماي" (Gustaf Mie) دراساته التي تصف التشتيت الجوي الناتج من جسيمات أكبر من التي يسببها تشتيت (رايلي) ومنها الهباء، والدخان، وقطرات الماء، وغيرها؛ وهذه الجزيئات قطر يقارب الطول الموجي للأشعة المشتتة؛ ولذلك، نجد أن جزيئات الهباء أو الغبار التي يساوي قطرها الطول الموجي للأشعة الخضراء والحمراء للضوء المرئي تسبب ظهور السماء باللون الأصفر (خليط من اللون الأخضر والأحمر).

للهباء عدة أنواع منها: الغبار الخفيف (يقاس قطر ذراته بالميكرون) الناتج من هبوب الرياح، والأملاح البحرية الناتجة من تبخر الماء من فقاعات الماء المنبعثة من البحار إلى الجو بعد انفجارها، والغازات المنبعثة (مثل نترات الكبريت) من المصادر الطبيعية كالبراكين والنباتات المتحللة، أو من المصادر الاصطناعية كحرق النباتات الزراعية.

يزداد مقدار التشتيت الناتج من الغلاف الجوي (ويعبر عنه بنقص نفاذية الغلاف الجوي من خلال علاقة تناسب عكسية)، سواء كان تشتيت (رايلي) أم تشتيت (ماي)، مع انخفاض زاوية ارتفاع الشمس. الشكل (2-3) يوضح هذه العلاقة عند عدد من الأطوال الموجية للأشعة.



شكل 2-3 (أ) تأثير تشتيت (رايلي) وزاوية الشمس على الأشعة الساقطة من الشمس والمارة إلى سطح الأرض. (ب) تأثير تشتيت (ماي) وزاوية الشمس على الأشعة الساقطة من الشمس والمارة إلى سطح الأرض. المصدر: [7].

يمكن حساب مقدار التشتيت الناتج من جزئيات الغلاف الجوي (Molecular Scattering) خلال الأوقات المختلفة من السنة بدقة، بينما من الصعب حساب التشتيت الناتج من الهباء والمسمى بالتشتيت الهبائي (Aerosol Scattering) نظراً للتغيرات الكبيرة في درجة تركيز الهباء ونوعه في الجو. ويجب التنويه هنا بأن الجو في الحالة الجوية الحقيقية (Real Atmosphere) يحتوي على جزئيات الغلاف الجوي والهباء متحدة، مما يؤدي إلى وجود ظاهرتي التشتيت كليهما في نفس الوقت.

من الآثار المترتبة على ظاهرة تشتيت الأشعة أن الأشعة ذات الأطوال الموجية القصيرة (فوق البنفسجية والزرقاء) لا تعد ذات فائدة في الاستشعار عن بعد؛ لأن السطوع (الانعكاس) المسجل في الصورة يمثل سطوع الغلاف الجوي وليس سطوع المعالم؛ ولذلك، نجد أنظمة التصوير تستثني هذه الأشعة باستخدام مرشحات. يضاف إلى ذلك أن التشتيت يتسبب في توجيه بعض من الأشعة من خارج مجال الرؤية للمستشعر (IFOV) إلى فتحة جهاز التصوير (Sensor Aperture)؛ كذلك يتسبب التشتيت في جعل الأجسام الأكثر ظلمة تظهر أكثر سطوعاً والأكثر سطوعاً أكثر ظلمة.

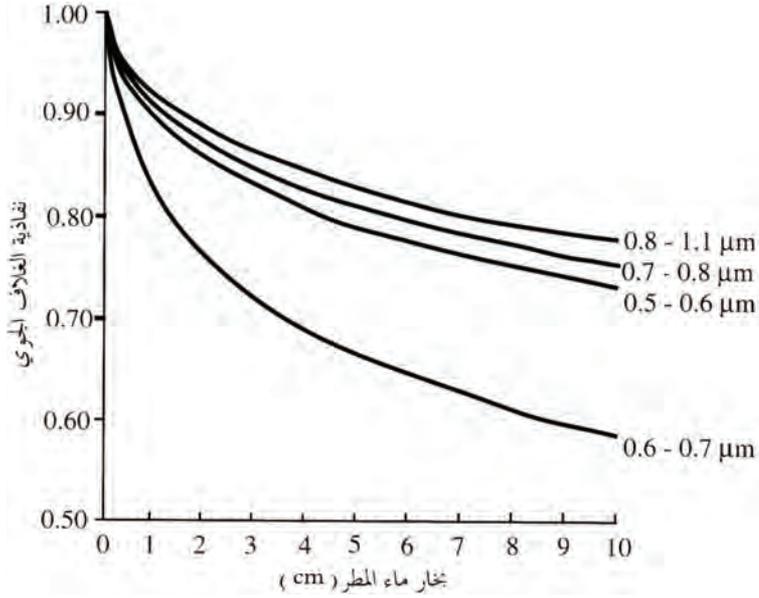
2-2-1-2 الامتصاص:

يتمثل حدوث ظاهرة الامتصاص (Absorption) في أن الغلاف الجوي يمتص كامل أو جزءاً من طاقة الأشعة المارة خلاله، ثم يعيد إشعاعها بأطوال موجية أطول. وكما هي الحال في عملية تشتيت الإشعاع، فإن غازات الغلاف الجوي والهباء يسببان (أيضاً) امتصاصاً لبعض طاقة الأشعة.

يسمى الامتصاص الناتج من غازات الغلاف الجوي بالامتصاص الجزيئي (Molecular Absorption)، بينما يسمى الامتصاص الناتج من الهباء بالامتصاص الهبائي (Aerosol Absorption)، وكما هي الحال مع التشتيت، فإن الامتصاص يعتمد (أيضاً) على الطول الموجي للأشعة.

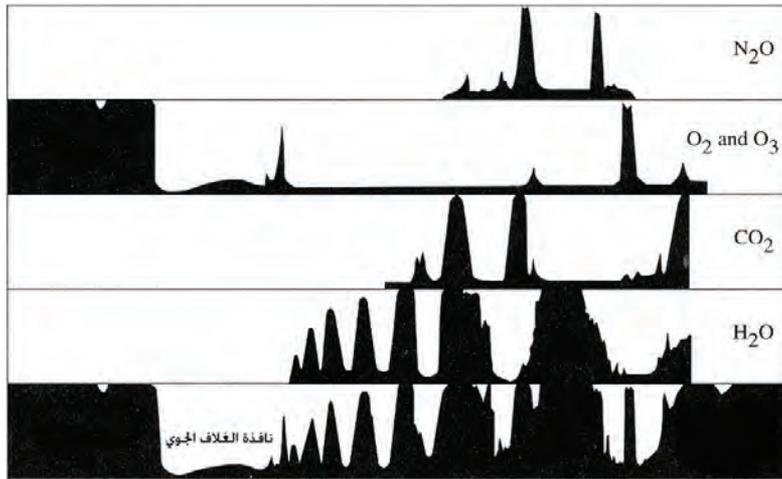
هناك ثلاثة أنواع من الغازات تعتبر مسؤولة عن معظم الامتصاص الجزيئي للأشعة، أولها: الأوزون (O_3) الذي ينتج من تفاعل الإشعاعات فوق البنفسجية ذات الطاقة العالية مع جزيئات الأوكسجين (O_2) في الأجواء العليا من الغلاف الجوي (أكثر تركيز للأوزون موجود على ارتفاع 20 إلى 30 كلم)؛ وثانيها: ثاني أكسيد الكربون (CO_2) الذي يوجد في الطبقة السفلى من الغلاف الجوي؛ وثالثها: بخار الماء (H_2O) الذي يوجد أيضاً بشكل أساسي في الطبقات السفلى من الغلاف الجوي، ويزداد مقدار الامتصاص الناتج من جزيئات بخار الماء في الغلاف الجوي (ويعبر عنه بنقص نفاذية الغلاف الجوي) بازدياد قطر تلك الجزيئات.

الشكل (2-4) يوضح هذه العلاقة عند عدد من الأطوال الموجية للأشعة.



شكل (2-4) تأثير امتصاص بخار الماء الموجود في الغلاف الجوي على الأشعة الساقطة من الشمس والمارة إلى سطح الأرض. المصدر: [7].

ويتم تفادي جزء كبير من كمية الامتصاص للطاقة في الطيف المرئي الناتج من جزئيات الغلاف الجوي (الامتصاص الجزيئي) عن طريق التصوير بالمستشعرات ضمن نطاقات محددة تسمى نوافذ الغلاف الجوي (Atmospheric Windows) (شكل 2-5). المساحات البيضاء في الشكل تمثل قطاعات الأشعة في الطيف الكهرومغناطيسي التي تنفذ (لا يحدث لها امتصاص) من خلال الغلاف الجوي، وهي التي يتم التصوير من خلالها بالمستشعرات المحمولة على الأقمار. وعلى عكس الامتصاص الناتج عن جزئيات الغلاف الجوي والذي يمكن حسابه بدقة خلال أوقات السنة، فإن الامتصاص الناتج عن الهباء (الامتصاص الهبائي) - كما هي الحال في التشتيت الناتج منه - متغير ويعتمد على الحالة الجوية أثناء التصوير، وبالتالي يصعب حساب تأثيره.



شكل (2-5) نوافذ الغلاف الجوي (Atmospheric Windows) لبخار الماء، ومجموعة من الغازات.

2-1-2-3 الانكسار:

يحدث الانكسار (Refraction) للأشعة في الغلاف الجوي عند مرورها خلال طبقات مختلفة الكثافة من الغلاف الجوي نتيجة لاختلاف الرطوبة، ودرجة الحرارة، والصفاء. ويمكن ملاحظة ذلك في الصيف الحار على الأجسام التي ترى من بعيد كالطرق السريعة، ومواقف السيارات حيث يُرى تموجات حولها.

2-1-2-4 معادلات انتقال الطاقة والتصحيح الجوي:

يمكن التقليل من أثر الغلاف الجوي على الإشعاعات التي يستقبلها مستشعر القمر بإحدى طريقتين: إما بالتصوير من عدة اتجاهات (Multiple Looks)، أو التصوير بعدة نطاقات (Multiple Bands)؛ والهدف من ذلك هو إزالة بيانات تأثير الغلاف الجوي المضافة بطرحها من صورتين ملتقطتين بزوايتين مختلفتين لنفس المنطقة، أو من نطاقين مختلفين لنفس الصورة ونفس المنطقة. إلا أن إزالة التأثير الجوي بالطريقة الثانية يظل أدق من إزالته بالطريقة الأولى، نظراً لأنه في الطريقة الأولى يكون هناك اختلاف في تأثير الغلاف الجوي بين الصورتين نتيجة للاختلاف بينهما في طول المسافة من الهدف على سطح الأرض إلى المستشعر على متن القمر (Atmospheric path) بسبب التصوير من اتجاهين مختلفين، في حين يكون تأثير الغلاف الجوي في الطريقة الثانية - من الناحية النظرية - متساوياً في صورتين النطاقين نتيجة للتساوي في طول المسافة من الهدف على سطح الأرض إلى المستشعر في الصورتين، إلا أنه - ومن الناحية العملية - هناك اختلاف في تأثير الغلاف الجوي من نطاق إلى آخر بسبب اختلاف الطول الموجي. وعملية إزالة تأثير الغلاف الجوي بالطريقتين السابقتين يعتبر تصحيحاً نسبياً لتأثير الغلاف الجوي (Relative Atmospheric Correction). أما إذا تم التصحيح لتأثير الغلاف الجوي بحساب القيم المطلقة والحقيقية لكميات الإشعاعات المختزلة أو المضافة للإشعاعات الحقيقية للمعالم، ومن ثم تصحيح الإشعاعات المنعكسة من المعالم على سطح الأرض إلى المستشعر بناء عليها، فإنه سيتم الحصول على القيمة الحقيقية لانعكاسات المعالم، وبالتالي الحصول على صورة خالية من الأخطاء الإشعاعية.

يتم حساب مقدار التشتيت أو الامتصاص الذي تحدثه جزيئات الغلاف الجوي والهباء للإشعاع في طريقه من الشمس إلى الأرض، ومن الأرض إلى المستشعر عن طريق حل معادلات انتقال الطاقة (Radiative Transfer Equations)، وهذه المعادلات من التعقيد بمكان لا يسمح الخوض فيها هنا، ولكن لمزيد من التفاصيل يمكن الرجوع إلى (Chandrasekhar, 1960; Kondratyev, 1969; Kaufman, 1989; Vermote et al., 1997; Liang, 2004). وحل هذه المعادلات ينتج منه حساب قيمة نفاذية الغلاف الجوي (Atmospheric Transmittance) التي تشمل التشتيت والامتصاص، وحساب كمية الإشعاع الناتج من تشتيت جزيئات الغلاف الجوي والهباء المسمى بإشعاع المسار (Path Radiance) الذي ليس له علاقة بسطح الأرض، ويتعين التخلص منه. وينتج عن حل هذه المعادلات (أيضاً) حساب كمية

الإشعاع المباشر الساقط على سطح الأرض من الشمس (Solar Direct Irradiance) بعد اختزاله من الغلاف الجوي، وضوء السماء أو الإشعاع المنتشر (Diffuse Irradiance / Sky Light) المحيط بالهدف الناتج من عملية تشتيت الإشعاع المباشر الساقط من الشمس بواسطة الغلاف الجوي والهباء. ويمكن حل هذه المعادلات من خلال برامج انتقال الطاقة (Radiative Transfer Codes) التي تم تطويرها من قبل الباحثين المهتمين في هذا المجال، ومنها برنامج (LOWTRAN) (Issacs et al., 1987)، وبرنامج (MODTRAN-4) (Berk et al., 1998)، وبرنامج (6S) (Vermote et al., 1997)، ويوجد حالياً برامج تجارية توظف مثل هذه البرامج، كبرنامج (ATCOR) (Richter, 2001a; 2001b; 2003) التجاري الذي يستخدم برنامج (MODTRAN-4) لأداء عملية التصحيح الجوي، وكذلك التصحيح الطبوغرافي لصور الأقمار الاصطناعية عن طريق برنامج "إيرداس إيماجن" (Erdas Imagine).

ونظراً للتعقيد الكبير الذي يغلف معادلة انتقال الطاقة (Radiative Transfer Equation) وعدم اتساع المجال هنا للدخول في تفاصيلها لكون هذا الكتاب يقتصر فقط على تناول أساسيات الاستشعار عن بعد، فإننا سنتطرق إليها فيما سيأتي بشيء من الاختصار.

مقدار الأشعة الإجمالية (Global Irradiance) الواصلة إلى سطح الأرض (إلى هدف معين) لفترة طيفية معينة $(\lambda_2 - \lambda_1)$ (على سبيل المثال، للفترة الطيفية للضوء الأخضر: $0.5\mu\text{m} - 0.6\mu\text{m}$) بوحدة وات لكل م² هي عبارة عن تكامل لمجموعة من المركبات على النحو التالي:

$$E_g = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} (E_{0\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda \text{ (Wm}^{-2}\text{)}$$

حيث E_g الإشعاع الإجمالي الواصل إلى سطح الأرض، و λ الطول الموجي للأشعة، و $E_{0\lambda}$ الإشعاع الطيفي (عند طول موجي معين) المباشر الساقط من الشمس (Spectral Solar Direct Irradiance) عند الحافة العلوية للغلاف الجوي، و T_{θ_0} نفاذية الغلاف الجوي عند زاوية ارتفاع الشمس (Atmospheric Transmittance at Sun Zenith Angle)، و θ_0 زاوية ارتفاع الشمس (زاوية الشمس منسوبة إلى الاتجاه الرأسى)، و $E_{d\lambda}$ ضوء السماء أو الإشعاع المنتشر الطيفي (Spectral Skylight / Diffuse Irradiance).

عند سقوط أشعة الشمس على سطح الأرض فإن جزءاً من هذه الأشعة ينعكس باتجاه المستشعر، والجزء الآخر يُمتص حسب خصائص الانعكاس لسطح الأرض التي تختلف من جسم لآخر. فإذا افترضنا أن سطح الأرض لديه خاصية انعكاس تشتيت منتظم (Diffuse Reflector)، أو بمعنى آخر سطح ذو خاصية (لامبرت) (Lambertian Reflector) الذي يعكس بالتساوي في جميع الاتجاهات، فإن قيمة الإشعاع المنعكس من سطح الأرض إلى مستشعر القمر ($\text{Radiance} - L_T$) بوحدة ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$) وات لكل متر مربع لكل "ستيراديان" (Steradian)، وهي وحدة قياس زاوية الإشعاع (شكل (2-12))، تكون على النحو التالي:

$$L_T = \frac{I}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} RT_{\theta_v} (E_{0\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 + E_{d\lambda}) d\lambda \quad (\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1})$$

حيث θ_v زاوية النظر (View Angle) للمستشعر منسوبة إلى الاتجاه الرأسي (Nadir)، و T_{θ_v} نفاذية الغلاف الجوي عند زاوية النظر للمستشعر، و R متوسط انعكاس الهدف على سطح الأرض. كم من الرائع أن يكون الإشعاع المنعكس من سطح الأرض (L_T) مساوياً للإشعاع المسجل من مستشعر القمر (L_S). ولكن ولسوء الحظ لا يساوي الإشعاع المنعكس الإشعاع المسجل، وهذا يرجع إلى أن هناك إشعاعات إضافية تأتي من عدة اتجاهات وتسقط ضمن مدى مجال الرؤية اللحظية (IFOV) للاقطات المستشعر. هذه الإشعاعات الإضافية تشمل الإشعاع المنتشر أو ضوء السماء الناتج من تشتيت جزيئات الغلاف الجوي والهباء للضوء المباشر الساقط من الشمس، والإشعاع المنعكس من التضاريس المجاورة، وتشكل في مجموعها إشعاع المسار (L_P) (شكل (2-6)). وبناءً على ذلك، فإن الإشعاع الكلي المسجل بواسطة المستشعر يصبح كالتالي:

$$L_S = L_T + L_P \quad (\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1})$$

نتيجة لوجود الغلاف الجوي فإن الأشعة الساقطة من الشمس لا تصل بكاملها إلى سطح الأرض نتيجة لتعرضها للتشتيت، والامتصاص أثناء مرورها من الغلاف الجوي. يُعبر عن النفاذية الجوية (T_θ) بأنها عبارة عن نسبة الأشعة التي تصل إلى الأرض إلى الأشعة الكلية قبل احتكاكها بالغلاف الجوي. ولفهم ذلك، فإنه في الحالة الافتراضية لغياب الغلاف الجوي تصبح نفاذية الأشعة من الغلاف الجوي (100%) أو (1). ويمكن حساب النفاذية على النحو التالي:

$$T_\theta = e^{-\tau / \cos \theta}$$

حيث τ السماكة البصرية للغلاف الجوي (Atmospheric Optical Thickness)، و θ زاوية مسار الأشعة حيث سنطلق عليها θ_0 للأشعة الساقطة من الشمس إلى سطح الأرض، و θ_v للأشعة المنعكسة من سطح الأرض إلى مستشعر القمر؛ ولذلك سنعتبر عن قدرة الغلاف الجوي على تنفيذ الضوء (الأشعة) من الشمس إلى الأرض بـ T_{θ_0} ، وقدرة الغلاف الجوي على تنفيذ الضوء من سطح الأرض إلى مستشعر القمر بـ T_{θ_v} ؛ والسماكة البصرية للغلاف الجوي للأشعة عند طول موجي معين $\tau(\lambda)$ تمثل التضعيف الناتج من الغلاف الجوي (Atmospheric Attenuation) وتشمل بصورة أساسية تشتيت (رايلي) (τ_m)، وتشتيت (ماي) (τ_p)، والامتصاص الانتقائي (τ_a)، بحيث يمكن حسابها على النحو التالي:

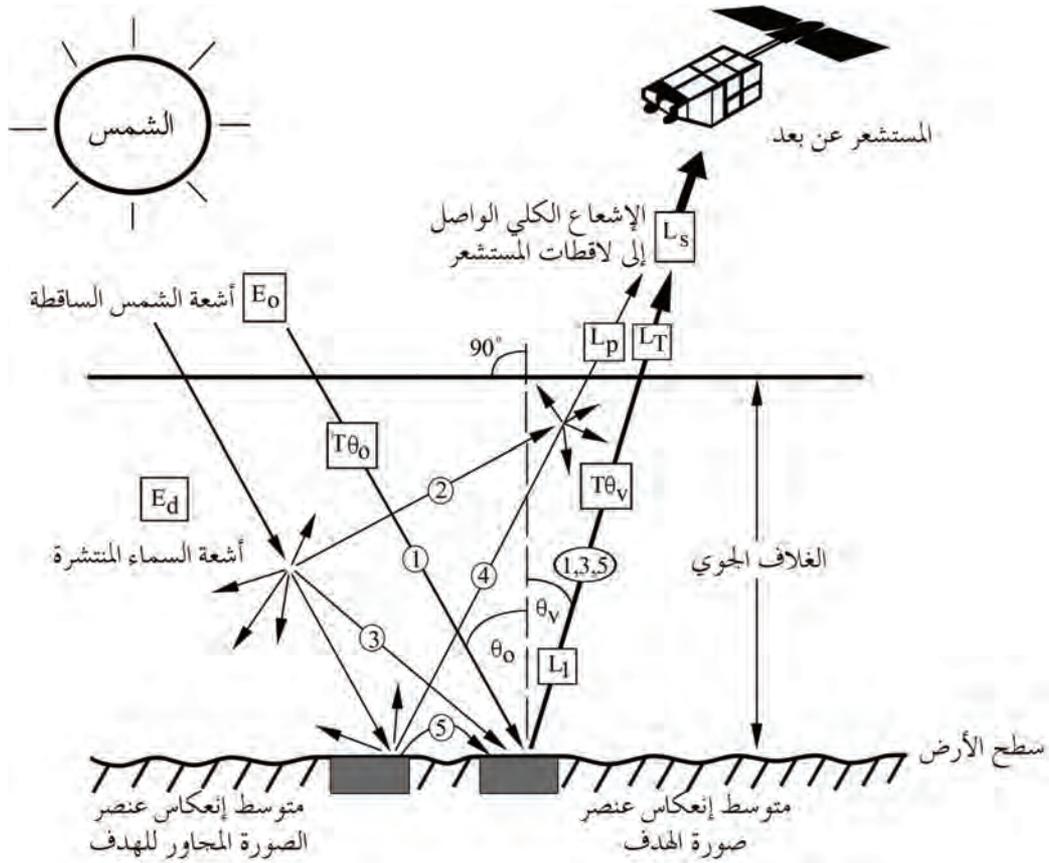
$$\tau(\lambda) = \tau_m + \tau_p + \tau_a$$

حيث تشمل السهاكة البصرية للامتصاص الانتقائي الكثافات البصرية لغازات الأوكسجين، والأوزون، وثاني أكسيد الكربون، وبخار الماء على النحو التالي:

$$\tau_a = \tau_{H_2O} + \tau_{O_2} + \tau_{O_3} + \tau_{CO_2}$$

لسوء الحظ، وكما ذكر آنفاً، لا يستقبل المستشعر الانعكاس الصادر عن المعلم على سطح الأرض (الناتج من سقوط مجموعة مصادر من الأشعة عليه، ومنها الإشعاع المباشر الساقط من الشمس (E_0))، والإشعاع المنتشر أو ضوء السماء (E_d))، والانعكاسات الساقطة من التضاريس المجاورة، وغيرها))، وإنما يستقبل إشعاعات أخرى ليس لها علاقة بالمعلم، ويجب التخلص منها، ومنها الإشعاع المنتشر أو ضوء السماء، والإشعاع المنعكس من التضاريس المجاورة اللذان ينعكس جزء منهما مباشرة إلى مجال الرؤية اللحظي للمستشعر مضيفان إشعاعات إضافية إلى المعلم تسمى بإشعاع المسار (L_p) (شكل (2-6)).

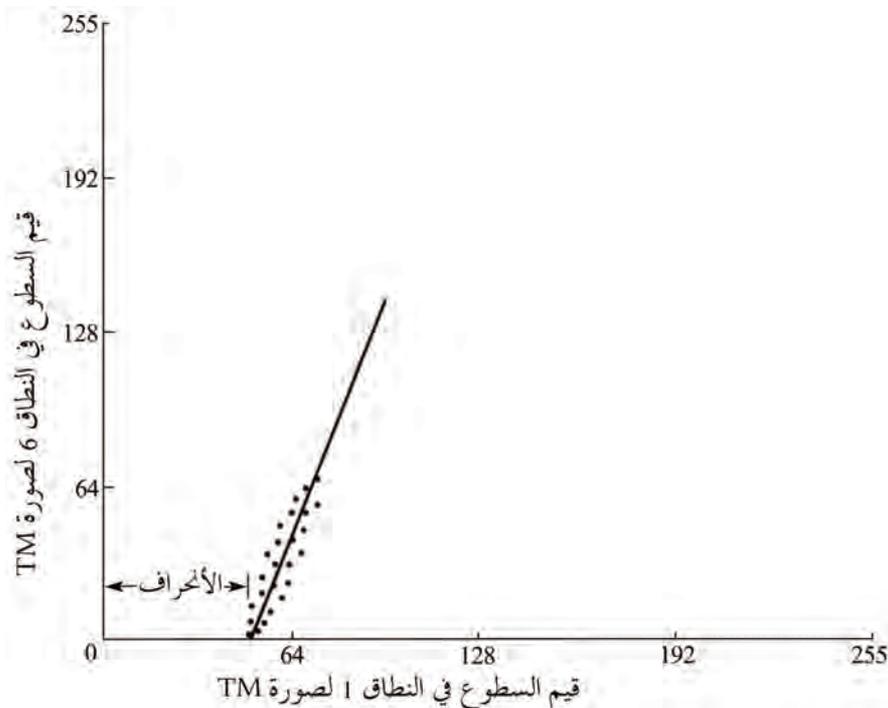
هناك عدة طرق تستخدم لإزالة إشعاع المسار (L_p)، وهو الذي يشكل الضبابية (Haze) التي تظهر في الصورة الفضائية، إلا أن أبسطها يتم بأن تحدد منطقة في الصورة بحيث تكون منطقة ظل أو ماء نقي، لتحقيق افتراض أن الانعكاس الصادر عنها مساوياً للصفير، ثم يتم رسم قيم السطوح لعناصر الصورة للمنطقة المختارة في النطاق المرئي (على سبيل المثال، نطاق الأشعة الزرقاء TM1) مقابل قيم السطوح لنفس عناصر الصورة في نطاق تحت الحمراء (على سبيل المثال، نطاق TM6)، في رسم مبعثر (Scatter plot) (شكل (2-7)). يرسم في الرسم المبعثر أفضل خط يمثل توزيع القيم بين النطاقين بواسطة الانحسار الخطي (Linear Regression) عن طريق ضبط المربعات الدنيا (Least Squares Adjustment). إذا لم يوجد في الصورة ضبابية، وهذا نادر الحدوث، فإن الخط سيمر خلال نقطة الأصل للرسم المبعثر، أما إذا كان هناك ضبابية في الصورة، فإن الخط سيتقاطع مع المحور (X) (النطاق TM1) عند قيمة سطوح معينة (القيمة 48 في الشكل (2-7)). قيمة الانحراف (مسافة التقاطع على المحور X) تمثل الضبابية المضافة إلى النطاق (TM1) التي يجب طرحها من جميع قيم عناصر النطاق (TM1). وللتخلص من الضبابية في النطاقات الأخرى، فإنه يتم رسم قيمها مقابل قيم النطاق (TM6) لتحديد الانحراف (الضبابية)، ومن ثم إزالتها بنفس الطريقة. هذه الطريقة قد لا تكون ملائمة، وخصوصاً عند التصوير المائل، حيث تكون مسافة الغلاف الجوي غير متساوية في جميع أجزاء الصورة، وبالتالي يكون تأثير الغلاف الجوي مختلفاً من عنصر صورة إلى آخر حسب طول مسافة الغلاف الجوي. لذلك، يجب (قبل عملية التصحيح من تأثير الغلاف الجوي) تصحيح قيم عناصر الصورة التي ليست متعامدة (Off-Nadir Pixel Values) مع المستشعر إلى الوضع المتعامد بطريقة مشابهة لما ذكر في فقرة (2-1-1) (تصحيح اختلاف زاوية ارتفاع الشمس)، ولكن باستخدام زاوية ميلان التصوير بدلاً من زاوية ارتفاع الشمس.



شكل (2-6) مصادر الإشعاعات المختلفة التي يستقبلها المستشعر. المصدر: [7].

ومن الطرق الأخرى ذات الدقة العالية لإزالة إشعاع المسار "الطريقة المحسنة لطح الأجسام المظلمة" (Improved Dark Object Subtraction-DOS) (Chavez, 1988; 1989). هذه الطريقة مبسطة أيضاً، وقدمت نتائج مرضية، على الرغم من أنها لا ترتقي إلى دقة الطرق المعقدة التي تستخدم معادلات انتقال الطاقة، مثل: (LOWTRAN)، و (MODTRAN). ويتلخص عمل هذه الطريقة بتحديد قيمة أولية للضبابية (Initial Haze Value) لأحد نطاقات الأشعة المرئية (الأزرق، أو الأخضر، أو الأحمر) في الصورة، يسمى النطاق المرجعي، ثم حساب قيم الضبابية لكل نطاق من النطاقات الأخرى في الصورة بمعامل ضرب قيمته عبارة عن نسبة النموذج الجوي النسبي (Relative Atmospheric Model) لكل نطاق إلى النموذج الجوي النسبي لنطاق القيمة الأولية للضبابية. يوجد خمسة نماذج جوية نسبية (Chavez, 1988; Mather, 1999) تتراوح بين جو صافٍ جداً (Very Clear) قيمة النموذج النسبي له (λ^4) ، حيث λ هي الطول الموجي للنطاق، وجو ضبابي جداً (Very Hazy) قيمة النموذج النسبي له $(\lambda^{0.5})$. ويتم تحديد النموذج الجوي النسبي المناسب بأنه النموذج الذي تقع القيمة الأولية للضبابية في مدى القيم الضبابية الابتدائية الخاصة به، حيث اقترح الباحثون (على سبيل المثال، Chavez, 1988; Mather, 1991) مدى من القيم الضبابية الابتدائية لكل نموذج، ويتم تحديد القيمة

الأولية للضبابية على أساس أنها قيمة السطوع (BV) التي تزداد عندها عدد عناصر الصورة بشكل كبير وحاد في الـ (هستوغرام) الذي يتم استعراضه باستخدام أي من برامج معالجة الصور. وبعد تحديد قيمة الضبابية لكل نطاق (ممثلة بقيمة سطوع)، والتي تمثل إشعاع المسار المضاف إلى الصورة الحقيقية والمطلوب التخلص منه، يتم طرحها من قيمة السطوع لكل عنصر (Pixel) من عناصر الصورة في ذلك النطاق. بعد إيجاد قيمة الضبابية (Haze) بوحدة قيمة سطوع (BV) لكل نطاق يتم تحويلها إلى قيمة إشعاع تمثل قيمة إشعاع المسار (L_p) باستخدام معادلة التحويل الخاصة بذلك (يمكن الرجوع إلى فقرة (2-1-5) للتعرف على معادلات التحويل الخاصة بصور القمر الفرنسي (سبوت)، والقمر الأمريكي (لاندسات)). الصورة الناتجة تمثل صورة فضائية مصححة إلى درجة كبيرة من تأثيرات الغلاف الجوي. للراغبين في مزيد من التفاصيل عن هذه الطريقة الرجوع إلى (Chavez, 1988; 1989; 1996). الشريحة (2) تعرض صورة للقمر الفرنسي (سبوت 4) قبل وبعد التصحيح لتأثيرات الغلاف الجوي بالطريقة المحسنة لطرح الأجسام المظلمة (DOS) لمنطقة تضم مدينتي حريملاء، وملهم وتقع على بعد 70 كلم شمال غرب مدينة الرياض.



شكل (2-7) إزالة الضبابية الناتجة من الغلاف الجوي بواسطة الانحسار الخطي للنطاق (1) و(6) لصورة (TM). الخط يقطع محور النطاق (1) عند قيمة 48 التي يجب طرحها من جميع قيم عناصر النطاق 1. المصدر: [4]

بالرجوع إلى معادلة انتقال الطاقة، وبسبب أن عرض النطاقات (Band Widths) المستخدمة في أنظمة الاستشعار عن بعد ضيقة نسبياً (على سبيل المثال، $0.5\mu\text{m}-0.6\mu\text{m}$ للنطاق الأخضر)، فإنه

بالإمكان إعادة صياغة معادلتني الأشعة الإجمالية الواصلة إلى سطح الأرض (E_g) والإشعاع المنعكس من سطح الأرض (L_T) إلى مستشعر القمر (التي سبق التطرق إليها آنفاً) بدون التكامل على النحو التالي:

$$E_g = E_{0\Delta\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 \Delta\lambda + E_d$$

حيث $E_{0\Delta\lambda}$ متوسط الإشعاع الشمسي الطيفي المباشر (Average Spectral Irradiance) في الفترة الطيفية ($\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$)، و

$$L_T = \frac{1}{\pi} R T_{\theta_v} (E_{0\Delta\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 \Delta\lambda + E_d)$$

بحيث يصبح الإشعاع الكلي الواصل إلى المستشعر كالتالي:

$$L_S = \frac{1}{\pi} R T_{\theta_v} (E_{0\Delta\lambda} T_{\theta_0} \cos \theta_0 \Delta\lambda + E_d) + L_P$$

ويمكن بناء العلاقة بين قيم السطوع في الصورة، والإشعاع المقيس من المستشعر على متن القمر على النحو التالي:

$$L_S = (K \times BV_{ijk}) + L_{min}$$

حيث BV_{ijk} قيمة السطوع لعنصر الصورة (Pixel)، و K يمكن حسابها كالتالي:

$$K = \frac{(L_{max} - L_{min})}{C_{max}}$$

حيث C_{max} أعلى قيمة يمكن أن تسجل أو تصلها قيمة السطوع (على سبيل المثال، 255، باستخدام مدى ديناميكي قدره 8 بت)، و L_{max} أعلى قيمة إشعاع مسجلة بواسطة لاقط المستشعر بوحدة ($Wm^{-2} Sr^{-1}$)، و L_{min} أقل قيمة إشعاع مسجلة بواسطة لاقط المستشعر بوحدة ($Wm^{-2} Sr^{-1}$).

3-1-2 التصحيح لتأثير طبوغرافية الأرض، وظاهرة عدم تماثل الانعكاس للأجسام:

في بداية السبعينات بدأ الاهتمام بتأثير الطبوغرافيا (Topographic Effect) على تفسير الصور الفضائية، حيث ذكر بعض الباحثين (أمثال: Justice, 1978; Miller et al, 1978; Fleming et al, 1975) وجود مشكلات في عملية تفسير الصور الفضائية متعددة الأطياف في التضاريس الوعرة والجبلية بسبب تأثير الطبوغرافيا. بعد ذلك تناولت العديد من الدراسات (أمثال: Cicone and Malila, 1977)

1990. Thomson and Jones, 1985; Stohr and West) بالبحث - وبشكل مباشر - تأثير ميل واتجاه التضاريس على الصور الفضائية. ويمكن تعريف التأثير الطبوغرافي بأنه: التغير في الإشعاع المنعكس من السطوح المائلة مقارنة بالسطوح المستوية نتيجة لاتجاه ميول التضاريس؛ ولذلك، فإن تأثير الطبوغرافيا ينتج منه أن تظهر ميول التضاريس المواجهة للشمس (Sun-Facing Slopes) أكثر سطوعاً في الصورة من الميول المظاهرة للشمس (Sun-Facing-Away Slopes). ويمكن القول بأن الزاوية المشكلة بين الشمس والتضاريس والمستشعر (Sun-Terrain-Sensor Geometry) تتغير بتغير التضاريس، وينتج منها تغيير في درجة الإشعاع (السطوع) في الصورة. وقد أُكشِف أن درجة التأثير الطبوغرافي تتغير بتغير زاويتي ارتفاع وسمت الشمس (Sun Azimuth and Zenith Angles)، وزاويتي انحدار وسمت التضاريس (Terrain Slope and Aspect).

ويمكن فصل تأثير الطبوغرافيا على كمية الإشعاع الملتقط بواسطة المستشعرات الفضائية إلى جزأين، هما الإضاءة (Illumination)، والانعكاس (Reflection)؛ فالطبوغرافيا تُحوِّر قيمة الإشعاع الساقط من الشمس (الإضاءة) وفق زاوية السقوط (Incidence Angle) المنسوبة إلى المتجه العمودي على سطح التضاريس المائل فقط، فيما تُحوِّر قيمة الانعكاس من المعالم حسب زاوية السقوط، وزاوية الانعكاس (Exitance Angle). وتأثير الطبوغرافيا على الإشعاع الساقط من الشمس مفهوم، ويمكن حسابه عن طريق ضرب قيمة هذا الإشعاع بجيب تمام زاوية السقوط:

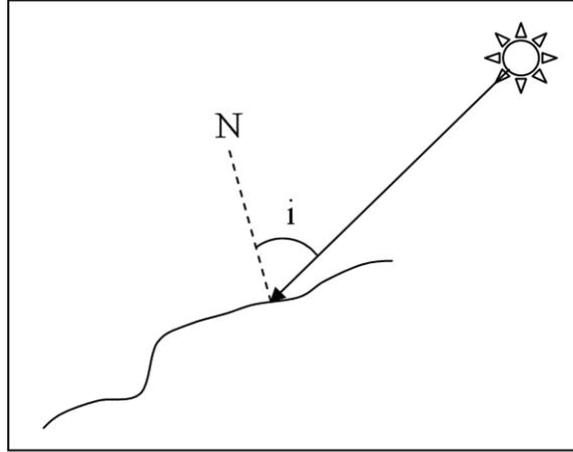
$$E_T = E_S \cos(i)$$

حيث E_T قيمة الإشعاع الساقط على السطح بعد أخذ تأثير ميلان التضاريس بالحسبان، و E_S هو الإشعاع الساقط من الشمس، و i زاوية السقوط (الإضاءة)، وهي الزاوية المحصورة بين متجه الإشعاع المباشر الساقط من الشمس، والمتجه المتعامد مع السطح المائل (الشكل 2-8)، وتحسب على النحو التالي:

$$\cos(i) = \cos \theta_s \cos \theta_n + \sin \theta_s \sin \theta_n \cos(\varphi_n - \varphi_s)$$

حيث θ_s زاوية ارتفاع الشمس محسوبة من محور Z ، و θ_n زاوية ميلان التضاريس، و φ_s زاوية سمت الشمس (منسوبة إلى الشمال)، و φ_n زاوية سمت ميل التضاريس.

هناك أشعة أخرى ولكن تأثيرها ضعيف (الإشعاع المباشر الساقط من قرص الشمس هو السائد) تساهم في إضاءة التضاريس. من هذه الأشعة الضوء المنتشر أو ضوء السماء الذي تطرقنا إليه آنفاً والذي تزداد كميته بزيادة الجزء المرئي من السماء، والإشعاع المنعكس من التضاريس المجاورة.



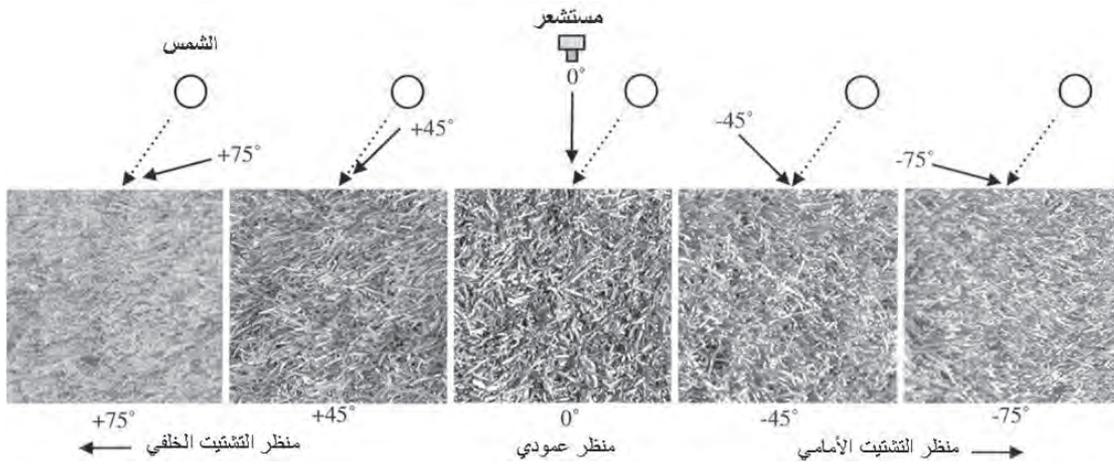
شكل (2-8) رسم توضيحي هندسي يوضح زاوية السقوط للإشعاع المباشر الساقط من الشمس.

ذكرنا بأن تأثير الطبوغرافيا على الإضاءة (الإشعاعات الساقطة من الشمس) مفهوم، ويمكن حسابه بدقة، إلا أن تأثير التضاريس على الانعكاس ما زال غير مفهوم بدرجة كافية نظراً لأن انعكاس الأشعة يتأثر (بالإضافة إلى التضاريس) بما يسمى بظاهرة عدم تماثل (انتظام) الانعكاس (Reflectance Anisotropy) من الأجناب المختلفة للسطوح (المعالم) على سطح الأرض أثناء سقوط أشعة الشمس عليها. ومعظم أنواع السطوح على الأرض لا تعكس بتماثل أو انتظام (Anisotropic /Non-Lambertian) في جميع الاتجاهات، وتبرز هذه الخاصية بشكل أكبر في حالتين، هما: عندما تكون زاوية النظر متعامدة مع زاوية ميل التضاريس (أي مواجهة لها)، ويطلق عليها التشتيت الخلفي (Backward Scattering)، وعندما تكون زاوية النظر في نفس اتجاه زاوية ميل التضاريس، ويطلق عليها التشتيت الأمامي (Forward Scattering)، وهي في الحالة الأولى أبرز، وخصوصاً عند أقصى قيمة لها، وتسمى النقطة الساخنة (Hot Spot)، وتحدث عندما تكون زاوية سقوط الشمس متطابقة تقريباً مع زاوية النظر (شكل (2-10)).

وفيما يتعلق بالمناطق الصحراوية، تُبين بعض الدراسات (مثل: Holben and Justice, 1980; Takemata et al, 2000) أن الأراضي الصحراوية، وخصوصاً الكثبان الرملية، ذات خاصية انعكاس منتظم (Lambertian)، فيما تبين بعض الدراسات الأخرى (مثل: Shoshany, 1993; Karnieli and Cierniewski, 2001) عكس ذلك. وفي إحدى الدراسات الحديثة في هذا المجال (Alomran and McCullagh, 2008b) عن خصائص انعكاس التربة الصحراوية الجافة (Desert Bare Soil) تبين أنها لا تعكس بانتظام، وتظهر هذه الخاصية في ميول التضاريس المواجهة للشمس بشكل أكبر من ميول التضاريس المظاهرة للشمس.

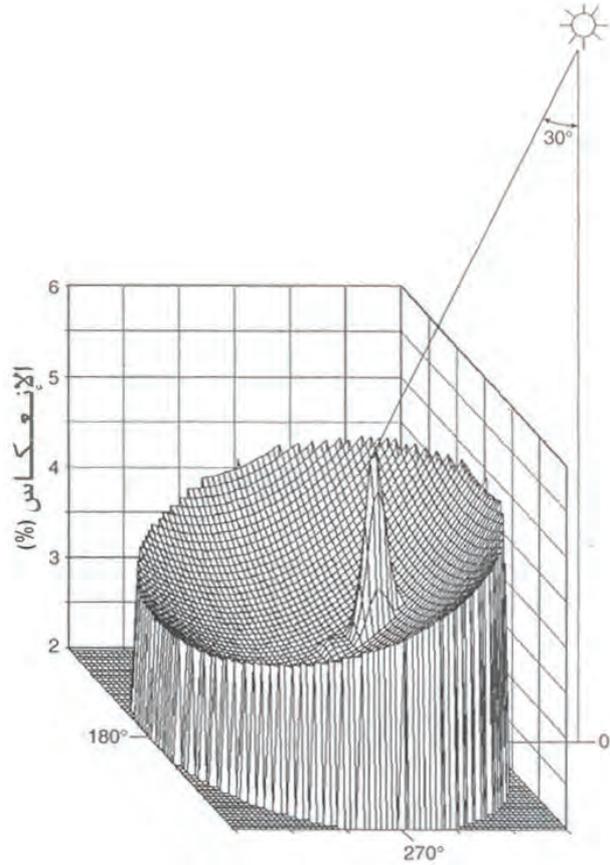
عدم التماثل في انعكاس السطح يسمى بالـ "تأثير ثنائي الاتجاه" (Bidirectional Effect)، وسمي ثنائي الاتجاه؛ لأن انعكاسية السطح تخضع للعلاقة بين كمية الإشعاع المنعكس (Reflected Radiance) و(1) زوايا سقوط أشعة الشمس، و(2) زوايا النظر للمستشعر. وحسب زوايا سقوط أشعة الشمس، وزوايا نظر المستشعر تظهر السطوح ساطعة أو مظلمة. مثال على ذلك: عندما تسير حول مسطح عشبي أخضر، أو حوض سباحة

عميق؛ فإنه يظهر أحياناً ساطعاً وأحياناً مظلماً حسب الزاوية التي تنظر إليها بالنسبة إلى زاوية سقوط أشعة الشمس عليه. ولتوضيح هذه الظاهرة بتفصيل أكثر، يعرض الشكل (2-9) حقلاً عشبياً يتعرض لأشعة الشمس بزاوية ارتفاع شمسية (Sun Zenith Angle) ثابتة هي (35°). خمس الصور المعروضة في الشكل لهذا العشب تم التقاطها عند خمس زوايا نظر (Viewing Angles) مختلفة بواسطة مستشعر (راديو ميتر طيفي) حقيقي. أُلْتَقِطت هذه الصور كلها في نفس "السطح الأساسي الشمسي" (Solar Principal Plane)، وهو السطح الذي يتشكل عندما يقع مصدر الإشعاع (الشمس في هذه الحالة)، والهدف (العشب في هذه الحالة)، والمستشعر في نفس السطح (أي على نفس الخط). زوايا النظر الخمس المستخدمة هي عمودية (0°)، ومائلتين ($\pm 45^\circ$)، ومائلتين أخريين ($\pm 75^\circ$). يظهر العشب بصورة عامة أسطع عندما يَصوَّر المستشعر التشيت الخلفي للأشعة (Backward Scattered Radiation)، مقارنة بالتشيت الأمامي للأشعة (Forward Scattered Radiation)، وهذا يعني، على سبيل المثال، أن الصورة في أقصى اليسار الناتجة من الأشعة المشتتة الأمامية عند زاوية $+75^\circ$ هي الأسطع، مع ملاحظة أن درجة سطوع العشب عند زاويتي $+75^\circ$ و -75° أعلى من درجة سطوعه عندما كانت زاوية نظر المستشعر عمودية (0°) (الشكل 2-9).



شكل (2-9) تأثير الانعكاس ثنائي الاتجاه على حقل عشبي يتم تصويره بخمسة زوايا نظر (0° ، $\pm 45^\circ$ ، و $\pm 75^\circ$) في نفس "السطح الأساسي الشمسي" (Solar Principal Plane) عند زاوية ارتفاع شمس ثابتة قدرها 35° . زاوية ارتفاع الشمس معلمة بخط منقط، وزوايا نظر المستشعر معلمة بالخطوط السوداء المتصلة. المصدر: [8].

وأشد حالات عدم التماثل في انعكاس السطح (التأثير ثنائي الاتجاه) عندما يكون المستشعر، والهدف، ومصدر الأشعة (الشمس على سبيل المثال) في نفس السطح الأساسي الشمسي، وهو ما تم توضيحه في الحالات الخمس في الشكل (2-9). والحالة الشديدة (القصوى) في ذلك عندما تتطابق زاوية سقوط الأشعة مع زاوية نظر المستشعر حيث تكون قيمة الانعكاس (ممثلة بدرجة السطوع) في أعلى قيمها، وتسمى في هذه الحالة كما أشير سابقاً بـ "البقعة الساخنة"، أي لا يكون الظل ظاهراً في الصورة. التعرف على المفهوم الهندسي لهذه الظاهرة موضح في الشكل (2-10).

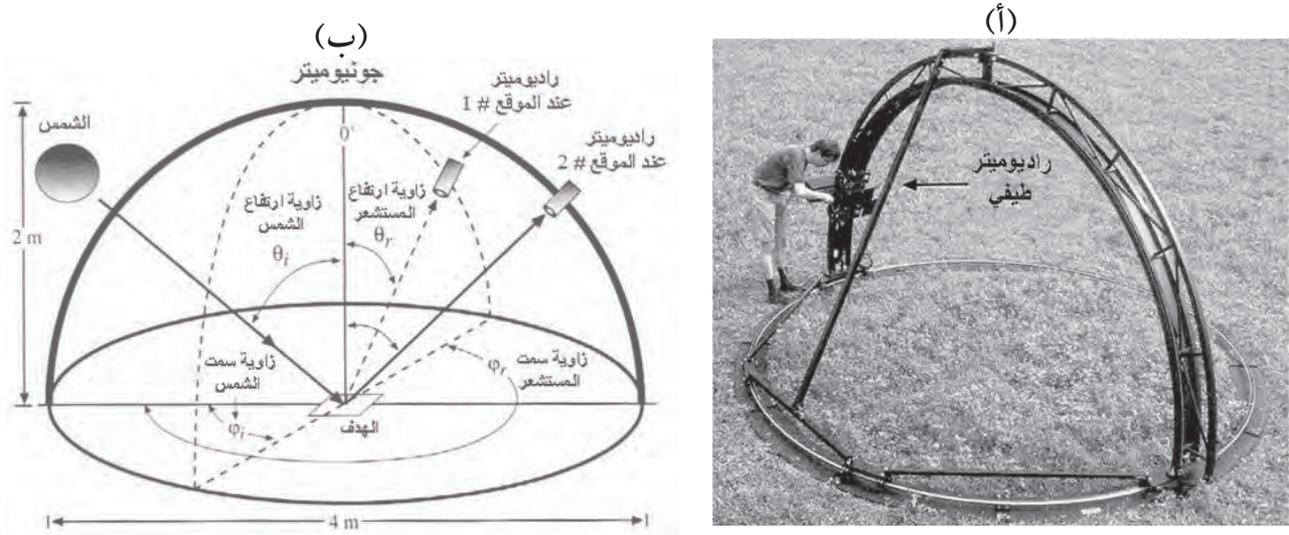


شكل (2-10) دالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه (BRDF) للنطاق الطيفي ($0.4\mu\text{m}-0.7\mu\text{m}$) لحقل صويا. التواء الظاهر في الشكل يسمى بالنقطة الساخنة (Hot Spot)، ويبتج عندما تكون زاوية سقوط الشمس مطابقة تقريباً لزاوية النظر، وهي في هذا الشكل عند الزاوية التسامتية الشمسية. المصدر: [1].

تُوصف عدم تماثلية الانعكاس بدالة تسمى "دالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه" (Bidirectional Reflectance Distribution Function-BRDF) (الشكل 2-10). ولكل معلم (جسم) دالة توزيع انعكاسات ثنائية الاتجاه فريدة تصف قيم الانعكاس غير المتماثلة له حسب ميلانه واتجاهه وزوايا ارتفاع وسمت الشمس. تتأثر هذه الدالة بعدة متغيرات، الأهم منها الخواص البصرية والهندسية (Geometrical and Optical Properties) للجسم. تُحل هذه الدوال باستخدام قيم انعكاسات مقيسة من عدة زوايا كمدخلات، ومن ثم تُستخرج قيم الخواص المذكورة آنفاً، أو قيمة الأشعة المنعكسة عند أي اتجاه مطلوب (fr). ويمكن الحصول على قيم الانعكاسات المقاسة من عدة زوايا إما من صور متعددة زوايا النظر ملتقطة بواسطة أقمار صناعية، كالقمر "موديس" (MODIS)، أو بواسطة (راديو مترات) حقلية.

من أهم الأجهزة التي تستخدم حقلياً في قياس دالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه (BRDF) للسطوح المختلفة الـ "جونوميتر" (Goniometer). الـ (جونوميتر) جهاز يستخدم لقياس الزوايا، واشتقت كلمة (Goniometer) من كلمتين إغريقيتين، هما (Gonio) وتعني الزاوية، و (Metron) وتعني قياس. يتكون الـ (جونوميتر) من (راديو مترات) طيفي (Spectro-Radiometer) يقيس الإشعاعات المنعكسة من السطوح عند

أطوال موجية مختلفة مركب على زلاجة (Sled) تُدار بمحرك على سكة معدنية مقوسة لقياس زاوية الارتفاع للمستشعر (Zenith Arc Rail)، وسكة معدنية مقوسة أخرى تتحرك عليها السكة المعدنية التي تحمل الـ(راديو ميتر) لقياس زاوية السميت للمستشعر (Azimuth Arc Rail) (شكل (2-11)). فبالإمكان عند لحظة معينة (فترة قصيرة جداً)، أي عندما تكون زاويتا سمت وارتفاع الشمس (θ_i, φ_i) ثابتتين، أن تُحرك الـ(راديو ميتر) وتأخذ عدة قياسات للأشعة المنعكسة من السطح عند عدة زوايا سمت وارتفاع (θ_r, φ_r) مختلفة للـ(راديو ميتر). فإذا أظهرت القياسات قيم انعكاسات مختلفة، فإن هذا السطح يمتلك خاصية انعكاس غير متماثل (Anisotropy)، أو ما يسمى بتأثير (BRDF)، وبالتالي يتعين تصحيح الصور الفضائية من هذه التأثيرات عند الرغبة في مقارنة، أو تجميع صور فضائية ملتقطة في مواسم مختلفة.



شكل (2-11) (أ) جهاز "جونيوميتر" (Goniometer) لقياس دالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه (BRDF) للسطح باستخدام (راديو ميتر) طيفي مثبت فيه. (ب) مثال افتراضي لكيفية عمل (الجونيوميتر) حيث يقيس الـ(راديو ميتر) الطيفي كمية الإشعاع (Radiance) المنعكس من السطح عند موقعين مختلفين. في الموقع الأول (كمثال) يقيس كمية الإشعاع المنعكس عند زاوية سمت شمسية φ_i وزاوية ارتفاع شمسية θ_i وزاوية سمت (راديو ميتر) φ_r وزاوية نظر (راديو ميتر) θ_r . المصدر: [8].

ويمكن التعبير عن المعادلة العامة لدالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه (BRDF) لوحدة زاوية جامدة (Solid Angle) على النحو التالي (Woodham and Lee, 1985):

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)}$$

حيث $f_r(\text{sr}^{-1})$ دالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه (BRDF)، التي تعرف بأنها نسبة الإشعاع (dL_r)

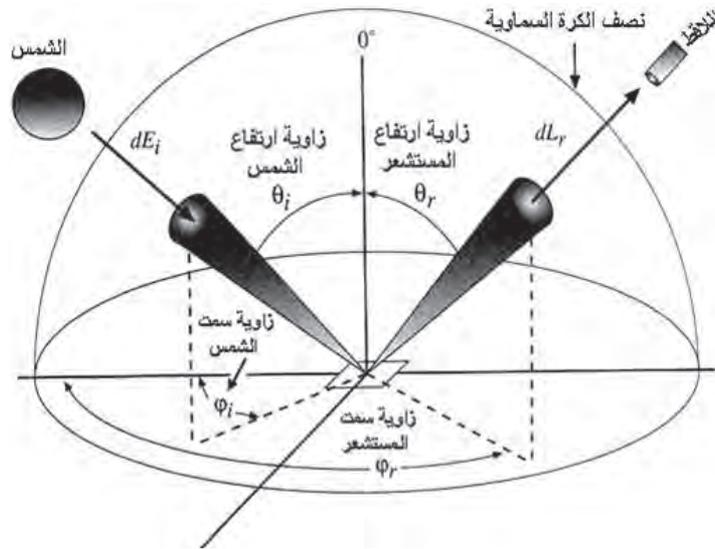
المنعكس من سطح الأرض باتجاه محدد (θ_r, φ_r) بوحدة وات لكل متر مربع لكل "ستيراديان" (Steradian) ($Wm^{-2} sr^{-1}$) إلى الإشعاع الساقط من الشمس (dE_i) إلى سطح الأرض باتجاه محدد (θ_i, φ_i) بوحدة وات لكل متر مربع (Wm^{-2})؛

و dL_r الإشعاع الاتجاهي المنعكس من سطح الأرض (Directional Radiance) باتجاه معين (المستشعر، مثلاً) من خلال زاوية جامدة بوحدة "ستيراديان" ($Solid Angle Steradian, sr^{-1}$) (شكل 2-12)؛

و dE_i الإشعاع الاتجاهي الساقط من مصدر الأشعة (الشمس، مثلاً) (Directional Irradiance)؛
و θ الزاوية القطبية مقيسه من محور Z؛

و φ زاوية السميت مقيسه من محور X بعكس عقارب الساعة؛

و \vec{i} و \vec{r} يشيران إلى سقوط الأشعة وانعكاسها.



شكل (2-12) مفهوم ومعاملات دالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه (BRDF). يتعرض الهدف إلى إشعاع ساقط من الشمس (dE_i , Irradiance) بزاويتي سميت، وارتفاع محددتين ويستقبل المستشعر الإشعاع المنعكس (dL_r , Radiance) من الهدف بزاويتي سميت وارتفاع محددتين. المصدر: [8].

الـ (ستيراديان) هي وحدة القياس المترية للزاوية الجامدة (Solid Angle)، وهي الزاوية ثنائية الأبعاد في الفراغ ثلاثي الأبعاد. والزاوية الجامدة هندسياً عبارة عن الزاوية المقابلة لمساحة من سطح الكرة مقتطع بواسطة مخروط دائري مفتوح رأسه مركز الكرة، والمساحة من سطح الكرة المقابلة للزاوية تأخذ شكل الدائرة. تقيس هذه الزاوية حجم ظهور الجسم بالنسبة إلى الناظر (لاقط المستشعر، مثلاً)، فالجسم الصغير القريب من الناظر يقابل نفس الزاوية الجامدة التي يقابلها جسم أكبر منه، ولكنه أبعد عن الناظر.

فعلى سبيل المثال، عند الكسوف نجد أن القمر ذو الحجم الصغير والقريب من الناظر من سطح الأرض يجلب عنه الشمس ذات الحجم الأكبر والأبعد مسافة عنه.

تم تقسيم دوال توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه إلى ثلاثة أقسام رئيسية هي: النماذج الرياضية (Physical Models)، والنماذج شبه التجريبية (Semi-Empirical Models)، والنماذج التجريبية (Empirical Models). نماذج القسم الأول هي الكثيرة التعقيد (لأنها تصف متغيرات كثيرة)، وذات الدقة العالية، وتصف الخصائص الفيزيائية والحيوية للمعالم، بينما نماذج القسم الثاني أقل تعقيداً وأسرع حسابياً في التنفيذ، وأما نماذج القسم الثالث فهي بسيطة وسهلة حسابياً، ولكن معاملاتها لا تصف الخصائص الفيزيائية الحيوية وإنما شكل دالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه (BRDF). لمزيد من التفاصيل عن هذا الموضوع يمكن الرجوع إلى (Kimes et al. 1985; Li and Strahler, 1985; Liang and Stahler, 1994; Barnsley et al. 1997a; Barnsley et al. 1997b; Chen and Cihlar, 1997; Richter, 1997; Chopping, 1998; Jensen, 1996; Lucht and Schaaf, 2000; Dymond et al. 2001; Roberts, 2001).

من أبسط نماذج دالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه التجريبية وأكثرها استخداماً نموذج "لامبرت" (Lambertian Model)؛ وتعود بساطته إلى أنه يفترض أن الجسم يعكس بانتظام (بقيم متساوية في جميع الاتجاهات) كما في المعادلة التالية :

$$f_r = \frac{\rho}{\pi} \quad (\text{عندما يمتص الجسم بعض الأشعة Loss Reflector})$$

$$f_r = \frac{I}{\pi} \quad (\text{عندما يكون الجسم عاكساً مثالياً Loss-less Reflector})$$

حيث ρ انعكاس نصف الكرة السماوي (Hemispherical Reflectance). ومن النماذج التجريبية البسيطة الأخرى النموذج المشهور المسمى بنموذج "مينارت" (Minnaert Model)، وصيغته كما يلي:

$$f_r = \frac{K+1}{2\pi} [\cos(i) \cos(e)]^{k-1}$$

حيث k معامل (مينارت)، وتعتمد قيمته على الطول الموجي للإشعاع، ونوع المادة المكونة للمعلم، وشدة انحدار (slope) واتجاه (Aspect) ميلان المعلم.

وكما ذكر سابقاً فإن تأثير الطبوغرافيا (حسب شدة الميل واتجاهه)، وتأثير عدم تماثلية الانعكاس يؤديان إلى ظهور المعالم المتشابهة بدرجات انعكاس مختلفة في الصورة، وهذا بالطبع ذو أثر سلبي سواء على مفسري الصور للاعتقاد بوجود أنواع مختلفة من المعالم على الرغم من أنها نوع واحد، أو على عملية

التصنيف الآلي للصور (Classification) التي تعتمد على الخصائص الطيفية حيث يتم استخلاص أكثر من صنف لنفس المعلم نتيجة لتغير درجة انعكاسه، أو عند تجميع (Mosaic) صور ملتقطة في أوقات مختلفة من السنة.

وكما أن هناك العديد من الدراسات (تم الإشارة إليها آنفاً) التي تناولت بالبحث تأثير ميل واتجاه التضاريس على ظهور المعالم في الصور الفضائية، فإن هناك أيضاً دراسات عديدة أخرى (مثل: Smith et al. 1980; Justice et al. 1981; Chen et al. 2001; Falkenstrum and Ekstrand, 2002) بحثت في نتيجة تأثير ميل واتجاه التضاريس على التصحيح الطبوغرافي للصور.

وهناك العديد من النماذج الرياضية التي يمكن استخدامها لتصحيح أثر الطبوغرافيا في الصور. من هذه النماذج ما ذكر آنفاً، وهو نموذج "لامبرت" (Lambert)، أو ما يُسمى عند كثير من الباحثين بنموذج جيب التمام (The Cosine model)، وهو من النماذج الشائعة الاستخدام لتصحيح من تأثير الطبوغرافيا فقط (لا يصحح لتأثير عدم تماثلية الانعكاس (Anisotropy)؛ بافتراض أن المعلم يعكس بالتساوي في جميع الاتجاهات). في هذا النموذج يتم التصحيح للاختلاف في الانعكاس الناتج من اختلاف زاوية سقوط أشعة الشمس، ولشدة انحدار واتجاه ميلان التضاريس وذلك بقسمة قيمة الانعكاس للصورة غير المصححة (سواء كانت ممثلة بقيمة سطوع (BV)، أو قيمة إشعاع (Radiance)، أو قيمة انعكاس (Reflectance)) على جيب تمام زاوية السقوط على النحو التالي:

$$L_n = \frac{L_T}{\cos(i)}$$

حيث L_n قيمة الإشعاع بعد التصحيح الطبوغرافي (أي إرجاعه كما لو كان على سطح مستو)، و L_T قيمة الإشعاع قبل التصحيح (على سطح مائل)، و $\cos(i)$ جيب تمام زاوية السقوط.

من النماذج الأخرى الشائعة الاستخدام التي يتجاوز تصحيحها تأثير طبوغرافية الأرض ليشمل التصحيح لعدم تماثلية الانعكاس نموذج (مينارت) الذي تم تطويره من قبل الباحثين (Smith et al. 1980)، ولا يزال مستخدماً حتى الآن، وصيغته حسب قانون (مينارت) (Minnaert, 1941) على النحو التالي:

$$L_n = \frac{L_T}{\cos^k(i) \cos^{k-1}(e)}$$

حيث k معامل (مينارت) الذي يؤشر إلى أية درجة يقرب المعلم أو يبتعد عن كونه منتظم (متماثل) الانعكاس في جميع الاتجاهات (Lambertian)، ويخفف من تأثير تضخيم قيم الانعكاس (Overcorrection) بعد التصحيح التي يسببها نموذج (لامبرت) عند زوايا السقوط الكبيرة.

هناك نموذج آخر شائع الاستخدام يقوم بدور مشابه للدور الذي يقوم به نموذج (مينارت)، وهو نموذج "جيب التمام شبه التجريبي" (Semi-Empirical Cosine) أو (C-Correction)، الذي قام بتطويره الباحثون (Teillet et al., 1982) ولازال مستخدماً حتى الآن، وصيغته على النحو التالي:

$$L_n = L_T \frac{\cos(\theta_s) + C}{\cos(i) + C}$$

حيث C مُعامل يشبه مُعامل (مينارت) في التخفيف من تأثير تضخم قيم الانعكاس عند زوايا السقوط الكبيرة.

قيم معاملي C و "مينارت" (k) ليست ثابتة دائماً، فهي تتغير حسب الطول الموجي (النطاق)، ونوع الغطاءات الأرضية، وزوايا سقوط أشعة الشمس، وزوايا النظر (التصوير)، وزوايا ميول واتجاهات التضاريس. وفيما يتعلق بالأراضي الصحراوية، وهي مهمة في هذا السياق نظراً لكون المملكة مغطاة في معظمها بهذا النوع من الأراضي، تُبين إحدى الدراسات (Alomran and McCullagh, 2008a)، وهي حسب اعتقاد المؤلف الوحيدة في هذا المجال التي تجرى على الأراضي الصحراوية الجرداء، أنّ قيم معاملي C و (مينارت)، اللذين تم استخدامها في هذه الدراسة مقياساً لتحديد خاصية الانعكاس المتماثل من عدمه للتربة الصحراوية الجرداء (Desert Bare Soil) تتغير (أي أن هذه التربة لا تعكس بشكل متماثل (Anisotropic) حسب تغير درجة ميل التضاريس، ويأخذ شكل التغير في قيمها شكل منحنى من الدرجة الثانية، وتوجد خاصية الانعكاس المتماثل ($C=0$, $k=1$) عند الميول القريبة من 25° .

هناك العديد من الدراسات التي أُجريت لتحديد أفضل نماذج التصحيح الطبوغرافي التجريبية أداءً، ومن ضمنها الثلاثة النماذج التي تم التطرق إليها آنفاً. وكانت معظم هذه الدراسات تُجرى على أراضي نباتية (في الغالب غابات)، والقليل إن لم يكن النادر منها كان يُجرى على الأراضي الصحراوية. من ضمن أحدث الدراسات التي تتناول الأراضي الصحراوية دراسة للباحثين (Alomran and McCullagh, 2010) التي بينت أن الفروقات في أداء نماذج التصحيح الطبوغرافي الثلاثة كان قليلاً، إلا أن أفضلها بوجه عام (وخصوصاً في التضاريس المستوية إلى المتوسطة (0° إلى 25°)) كان نموذج جيب التمام شبه التجريبي (C-Correction)، يليه نموذج جيب التمام (Cosine) خصوصاً في التضاريس الوعرة الحادة ($<25^\circ$)، ونموذج "مينارت" (Minnaert).

يتعين قبل التصحيح الطبوغرافي للصورة الفضائية تهيئة نموذج الارتفاعات الرقمية (Digital Elevation Model-DEM) المناسب، بحيث يغطي نفس المنطقة التي تغطيها الصورة وبمقاس خلية (Cell Size) يتوافق مع درجة وضوح الصورة الفضائية (على سبيل المثال، تحتاج صورة (ETM+) ذات درجة الوضوح 30م إلى نموذج ارتفاعات رقمية ذي المستوى الثاني (DEM Level-2))،

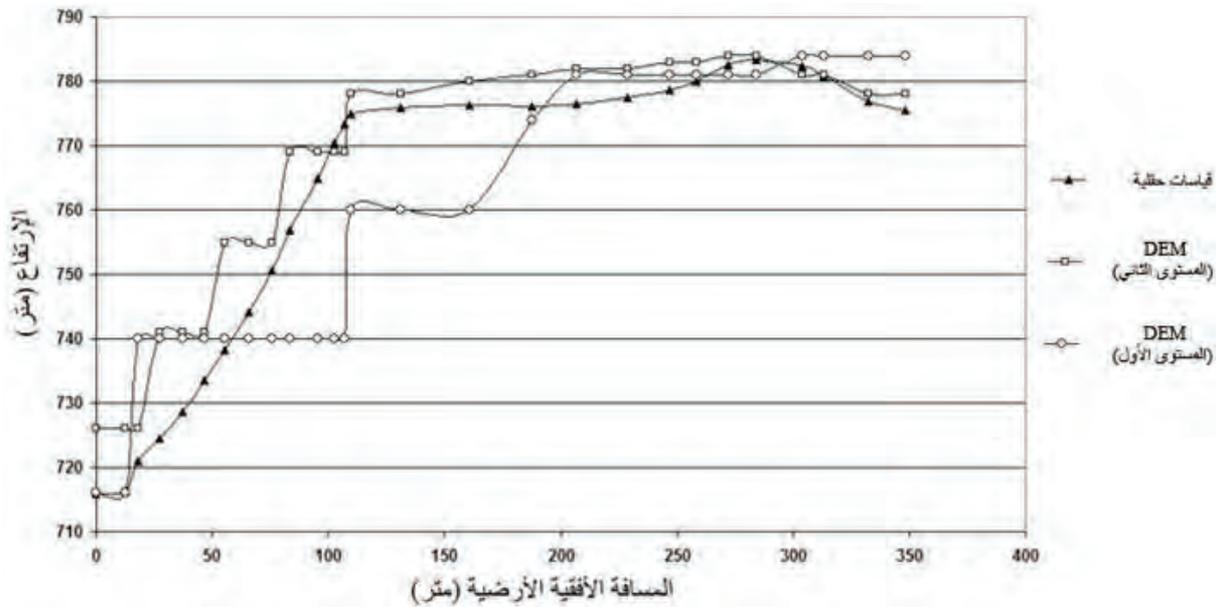
ويكون بمرجع جغرافي دقيق مكانياً لضمان مطابقة كل عنصر من عناصر الصورة الفضائية المصححة هندسياً مع ارتفاع التضاريس الحقيقي المقابل له على الطبيعة. وقبل إجراء عملية التصحيح الطبوغرافي يتم إنتاج صورة لميول التضاريس (Slope) وصورة أخرى لاتجاهات هذه الميول (Aspect) من نموذج الارتفاعات الرقمية باستخدام أحد البرامج المتخصصة في معالجة الصور كبرنامج "أيرداس" (ERDAS)، أو برنامج "إنفي" (ENVI)، أو غيرها من البرامج الأخرى (شريحة 3)). ستكون هاتان الصورتان متطابقتين في مساحة التغطية ومقاس الخلية مع نموذج الارتفاعات الرقمية الذي أنتجتا منه. يتم بعد ذلك حساب قيمة جيب تمام زاوية سقوط أشعة الشمس ($\cos(i)$) المقابلة لكل عنصر من عناصر الصورة الفضائية (Pixel) باستخدام قيمة ميل التضاريس واتجاهه وزاويتي ارتفاع وسمت الشمس عن طريق المعادلة التي تم التطرق إليها آنفاً. قيمة جيب تمام زاوية سقوط أشعة الشمس المحسوبة تأخذ في الاعتبار تأثير زوايا سقوط الشمس والتضاريس على الأشعة الساقطة من الشمس، بحيث لو قسمت قيمة الإشعاع المنعكس من السطح (المسجل في الصورة) على جيب تمام زاوية سقوط أشعة الشمس، فإنها ستعيد قيمته كما لو كان منعكساً من تضاريس مستوية. أخيراً، تُجرى عملية التصحيح الطبوغرافي لكل عنصر من عناصر الصورة بما يقابلها من قيمة جيب تمام زاوية سقوط أشعة الشمس باستخدام أحد نماذج التصحيح التجريبية المتخصصة، كنموذج (مينارت) أو غيره، التي تم تناولها آنفاً.

تعتمد كفاءة تصحيح الصور الفضائية من تأثيرات طبوغرافية الأرض (وأهمها التخفيف من وجود الظل في الصورة) باستخدام أي من نماذج التصحيح الطبوغرافي، وكما أشير آنفاً، على التوافق في درجة الوضوح (مقاس الخلية) بين الصورة الفضائية ونموذج الارتفاعات الرقمية وما يحسب منه من بيانات ميل واتجاه للتضاريس وجيب تمام زاوية سقوط أشعة الشمس، وعلى الدقة المكانية (الجغرافية) لهذه البيانات، وتطابق بعضها بعضاً جغرافياً. والتوافق في درجة الوضوح بين الصورة الفضائية، ونموذج الارتفاعات الرقمية على قدر كبير من الأهمية. فكلما ضعفت درجة وضوح أو تفاصيل (Resolution) نموذج الارتفاعات الرقمية، كلما قلت محاكاته لشكل تضاريس سطح الأرض الحقيقي، وبالتالي تؤثر على كفاءة التصحيح الطبوغرافي؛ فعلى سبيل المثال، يعرض الشكل (2-13) من خلال مقطع رأسي (Profile) لأحد جنبي أحد الأودية في نفس المنطقة الموضحة في الشريحة (3) التي تقع شمال غرب مدينة الرياض - مقارنة بصرية بين الارتفاعات المأخوذة من نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول، والارتفاعات المأخوذة من نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الثاني قياساً ببيانات ارتفاعات مرجعية محلية؛ وقد تم تحديد قيمة الارتفاع من نموذج الارتفاعات الرقمية على أساس أنها قيمة ارتفاع الخلية الأقرب (Nearest Neighbor) للنقطة المحلية.

يبلغ طول المسافة الأرضية الأفقية لهذا المقطع الرأسي 350م، حيث يبدأ المقطع الرأسي من بطن

الوادي (ولمسافة 20م)، ثم يتجه صعوداً عبر حافة الوادي (حتى المسافة الأفقية 100م) ثم يستقر أفقياً عبر سهل واسع (حتى المسافة الأفقية 350م).

يلاحظ من الشكل (2-13)، وخصوصاً في الجزء المنحدر من الوادي في المسافة الأفقية الأرضية (20م - 100م)، أن الارتفاعات المأخوذة من نموذج الارتفاعات الرقمية ذو المستوى الثاني تحاكي (قريبة من) بيانات الارتفاعات الحقلية بشكل أكبر من الارتفاعات المأخوذة من نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول. كما يلاحظ أيضاً من هذا الجزء أن ما يسمى بتأثير التكرس (Artifact Effect) يظهر في بيانات نموذج الارتفاعات الرقمية ذو المستوى الأول بشكل أكبر من بيانات نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الثاني. كل ذلك يرجع إلى درجة الوضوح (التفاصيل)، والدقة المكانية (Positional accuracy) الأعلى لنموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الثاني مقارنة بالمستوى الأول. هذه الفروقات بين النموذجين تقل في المناطق المستوية (بطن الوادي في المسافة الأفقية الأرضية (0م - 20م)، والسهل الواسع في المسافة الأفقية الأرضية (100م - 350م)). هذا الضعف في الدقة وفي محاكاة ارتفاعات التضاريس الحقيقية لنموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول مقارنة بالمستوى الثاني يؤثر أيضاً على دقة حساب قيم ميل واتجاه التضاريس، ومن ثم قيم جيب تمام زاوية سقوط أشعة الشمس التي تحسب منها، وبالتالي على كفاءة التصحيح الطبوغرافي للصور الفضائية.



شكل (2-13) مقارنة بصرية بين الارتفاعات المأخوذة من نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول، والارتفاعات المأخوذة من نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الثاني قياساً ببيانات ارتفاعات مرجعية حقلية. المقارنة موضحة من خلال مقطع رأسي (Profile) لأحد جنبي أحد الأودية في نفس المنطقة الموضحة في الشريحة (3) التي تقع شمال غرب مدينة الرياض. تظهر الفروقات بين نموذجي الارتفاعات في محاكاة ارتفاعات التضاريس، وفي تأثير التكرس (Artifact Effect) في الجزء المنحدر من الوادي في المسافة الأفقية الأرضية (20م - 100م)، وتقل الفروقات بينهما في المناطق المستوية (0م - 20م، و100م - 350م). المصدر: [9].

الشريحة (4) توضح تأثير درجة تفاصيل أو دقة وضوح نموذج الارتفاعات الرقمية على نتيجة التصحيح لتأثير طبوغرافية الأرض لنفس المنطقة الموضحة في الشريحة (3). فكما هو واضح من الشريحة (4)، تظهر فعالية نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الثاني (DEM level-2) في التصحيح الطبوغرافي (تخفيف أثر الظل) في الصورة بشكل أكبر من نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول (DEM level-1).

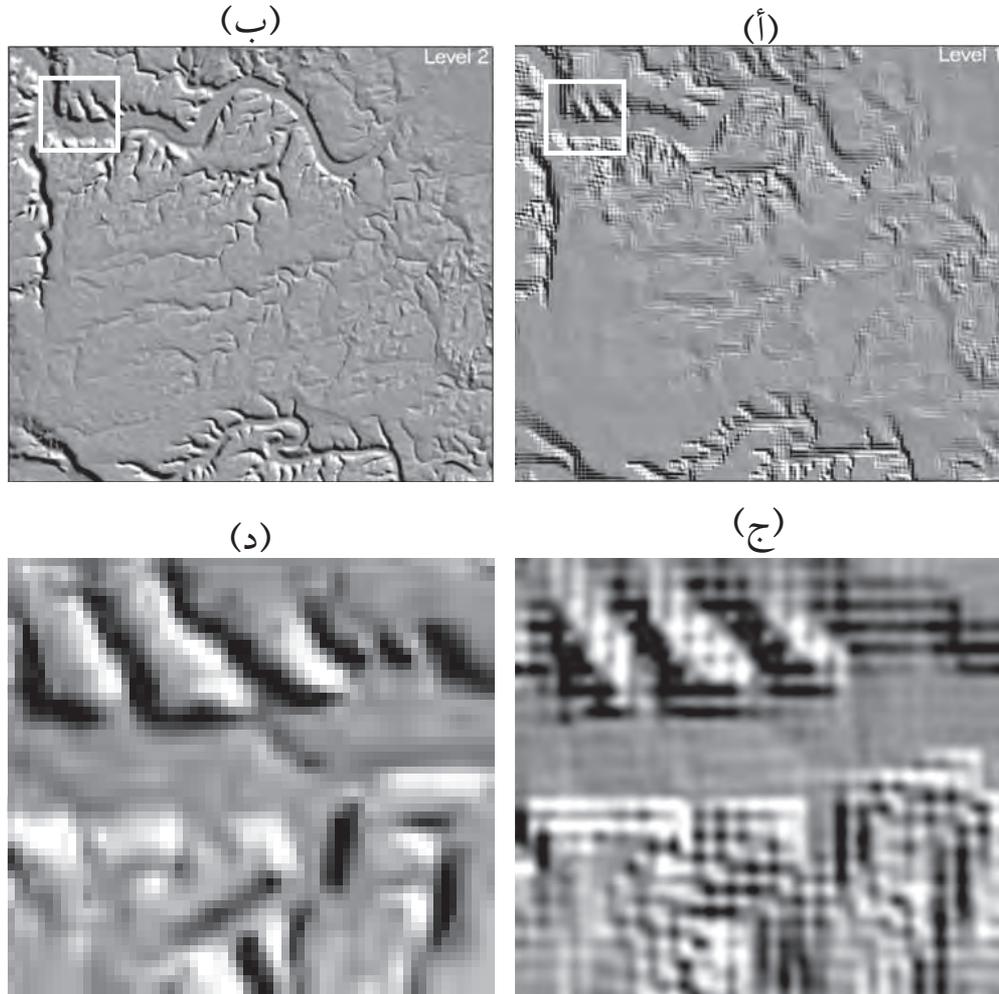
تم في الشريحة (4) توضيح تأثير درجة وضوح نموذج الارتفاعات الرقمية على نتيجة التصحيح الطبوغرافي بصرياً، ولغرض دراسة هذا التأثير كمياً، فقد أجريت عدة دراسات حديثة (Alomran and McCullagh, 2010; Alomran and McCullagh, 2009; Alomran and McCullagh, 2008a), تبحث في إمكانية استخدام نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول بدرجة الوضوح 100م بدلاً عن نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الثاني بدرجة الوضوح 30م في التصحيح الطبوغرافي للصور الفضائية في المناطق الصحراوية، وهي حسب علم المؤلف من الدراسات القليلة إن لم تكن الوحيدة في هذا التخصص. نبعت هذه الفكرة من البحث عن إمكانية التغلب على مشكلة عدم توافر بيانات ارتفاعات رقمية ذات المستوى الثاني لكامل المملكة بغرض عمل خارطة غطاء أرضي وطنية للمملكة. بينت هذه الدراسات أن نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول الذي يغطي كامل المملكة يمكن أن يحل محل نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الثاني في التضاريس المستوية وذات الميول البسيطة (0° إلى 5°). وفي إحدى الدراسات (Alomran and McCullagh, 2010) تبين أن أفضل أداء لنموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول بدلاً عن نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الثاني يكون في ميول التضاريس المواجهة للشمس (Sun-Facing Slopes)، وأسوأ أداء له يكون في الميول المظاهرة للشمس (Sun-Facing-Away Slopes).

ونظراً للدور المهم لنموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) في تصحيح الصور الفضائية من التأثير الطبوغرافي، فقد تم تخصيص الفقرتين القادمتين ((1-3-1-2)، و((2-3-1-2)) للحديث عن نماذج الارتفاعات الرقمية، وطريقة حساب ميل واتجاه التضاريس منها.

1-3-1-2 نموذج الارتفاعات الرقمية:

نموذج الارتفاعات الرقمية بشكل مبسط عبارة عن ملف مشابه لملفات الصور من حيث تمثيلها بمصفوفة ثنائية الأبعاد، ولكن بدلاً من درجة السطوع لعنصر الصورة (Pixel) التي تمثل انعكاس سطح الأرض لمنطقة معينة؛ فإن كل عنصر أو خلية (Cell) في نموذج الارتفاعات الرقمية يمثل الارتفاع عن مستوى سطح البحر لتلك لمنطقة، ومساحة هذه المنطقة تصغر وتكبر وفق ما يسمى بدرجة وضوح (Resolution)، أو فاصل مكاني (Post Spacing) لهذا النموذج. فمثلاً، تمثل كل خلية ارتفاع في نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الثاني

(DEM level-2) مساحة 30×30 م من سطح الأرض، بينما تمثل كل خلية ارتفاع في نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول (DEM level-1) مساحة 100×100 م. الشكل (2-14) يعرض لغرض الإيضاح هذين النموذجين لنفس المنطقة الموضحة في الشريحة (3)، ويلاحظ قدرة نموذج الارتفاعات الرقمية ذو المستوى الثاني على إيضاح التفاصيل الجيومورفية (القنوات المائية الطبيعية) بشكل أكبر من نموذج الارتفاعات الرقمية ذي المستوى الأول.



شكل (2-14) (أ) و (ب) مجسمان ثلاثيا الأبعاد لنموذجي الارتفاعات الرقمية ذات المستوى الأول (DEM level-1) والمستوى الثاني (DEM level-2) لنفس المنطقة في الشريحة (3)، تم إنشاؤهما بزاويتي ارتفاع وسمت شمسية قدرهما 45° . (ج) و (د) جزءان مكبران للمربعين الأبيضين المعلمين في (أ) و (ب).

تُنتج بيانات الارتفاعات الرقمية بصيغتين من الإحداثيات: الصيغة الأولى ذات مسقط (UTM، مثلاً)، حيث يكون فيها مقاس الخلايا متساوياً في كامل المنطقة (30×30 م، مثلاً)، وتسمى في هذه الحالة نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM)، والصيغة الثانية جغرافية، حيث يُمثل مقاس الخلية بالثنائي

الجغرافية (Arc-Seconds)، ويطلق عليها أسم "بيانات ارتفاعات التضاريس الرقمية" (Digital Terrain Elevation Data-DTED)، وهي أكثر استخداماً في التطبيقات العسكرية، وقد بدأ إنتاجها عن طريق الوكالة الوطنية للاستخبارات المكانية (National Geospatial-Intelligence Agency-NGA) الأمريكية. ونظراً لتمثيل قياس الخلايا في هذه البيانات بالثنائي الجغرافية، فإن مقياس الخلية في هذا النوع من البيانات يختلف باختلاف الموقع نسبة إلى خط الاستواء، بحيث يزداد مقياس الخلية كلما اقتربنا من خط الاستواء ويقل كلما ابتعدنا عن خط الاستواء باتجاه الأقطاب. والبيانات الكثيرة الشبكية من هذا النوع هي البيانات ذات المستوى الأول (DTED Level-1) بمقياس خلية قدرة ثلاث ثواني جغرافية (3arc-sec)، أي ما يقارب 100 م في منطقتنا، والبيانات ذات المستوى الثاني (DTED Level-2)، وهي ذات التفاصيل الكثيرة بمقياس خلية قدرة ثانية جغرافية واحدة (1arc-sec)، أي ما يقارب 30 م. ويوجد صيغ أخرى لهذه البيانات تمثل درجات تفصيل أقل أو أكثر من هاتين الصيغتين، كالبيانات ذات المستوى صفر (DTED Level-0) بمقياس خلية قدره ثلاثون ثانية جغرافية (30Arc-sec)، أي ما يقارب 1 كلم.

توجد تطبيقات كثيرة لبيانات الارتفاعات الرقمية، منها العسكري، والمدني. ومن هذه التطبيقات حساب ميل (Slope)، واتجاه (Aspect)، وانحناء (Curvature) التضاريس التي تستخدم في تطبيقات مدنية كثيرة، كتصحيح الصور الفضائية من تأثير طبوغرافية الأرض، والجيومورفولوجيا، وبناء السدود، وغيرها. ومن التطبيقات العسكرية تحديد الرؤية المتبادلة، وتحديد مناطق تغطية الرادارات، وإنتاج مناظر ثلاثية الأبعاد تستخدم في تكوين طيران تشبيهي لأية منطقة، وغيرها.

2-3-1-2 استخراج ميل التضاريس، واتجاهها من بيانات الارتفاعات الرقمية:

يتم حساب مقدار ميل التضاريس (Slope)، واتجاه هذا الميل (Aspect) عند نقطة معينة من الاشتقاق الجزئية (Partial Derivatives) لداله الارتفاع في اتجاه "الشرق - الغرب" $\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)$ ، واتجاه "الشمال - الجنوب" $\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)$ على النحو التالي:

$$Slope = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2}$$

$$Aspect = \tan^{-1} \left(\frac{\partial z / \partial y}{\partial z / \partial x}\right)$$

إذا تم تقريب الدالة المتصلة $\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)$ بدالة منفصلة (Discrete Function)، وسميها (B1)، وبنفس المبدأ تسمية $\left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)$ بـ (B2)، فإنه يمكن حساب الميل واتجاهه على النحو التالي:

$$Slope = \tan^{-1} \sqrt{B_1^2 + B_2^2}$$

$$Aspect = \tan^{-1} \left(\frac{B_2}{B_1} \right)$$

هناك العديد من الدراسات التي أُجريت للوصول إلى أفضل خوارزمية (Algorithm)، أو صيغة رياضية يمكن منها حساب الميل، واتجاهه بدقة. بعض من هذه الدراسات (مثل: Sharpnack and Akin, 1969; Travis et al, 1975; Evans, 1980; Horn, 1981; EPPL7, 1987; Frank, 1988; Jones et al, 1995; Shary, 1995; al, 1988; Shanholtz et al, 1990; Fleming and Hoffer, 1979; Beasely and Huggins, 1982; Dozier and Strahler, 1983; Ritter, 1987; Zevenbergen and Thorne, 1987; Moore et al, 1993; Skidmore, 1989; Srinivasan and, 1998a; Engel, 1991; Florinsky, 1998a) تقارن بين بعض من هذه الطرق، وتبين أن أداء الطرق التي تستخدم الخلايا الثماني المحيطة أفضل من الطرق التي تستخدم الخلايا الأربع فقط. ومن بين الطرق التي تستخدم الخلايا الثماني، بينت بعض الدراسات (مثل: Skidmore, 1989; Carter, 1992; Florinsky, 1998a) أن طرق (Sharpnack and Akins, 1969; Evans, 1980; Horn, 1981) كانت هي الفضلى. وتتبنى بعض البرامج التجارية المتخصصة طرقاً مشابهة لهذه الطرق، فبرنامج (إيرداس إيماجن)، على سبيل المثال، يستخدم خوارزمية مشابهة لطرق (Sharpnack and Akins, 1969; Evans, 1980).

ويتم حساب ميل التضاريس في اتجاه "الشرق - الغرب" (B1)، و"الشمال - الجنوب" (B2) بطريقة (Sharpnack and Akins, 1969) على النحو التالي:

$$B_1 = \frac{(z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7)}{6w_x}$$

$$B_2 = \frac{(z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9)}{6w_y}$$

حيث تمثل z_1 الى z_9 قيم الارتفاعات للخلايا الثاني المحيطة بالهدف (شكل (2-15))، و w_x و w_y أبعاد الخلية باتجاه "الشمال - الجنوب"، و "الشرق - الغرب"، على التوالي.

z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

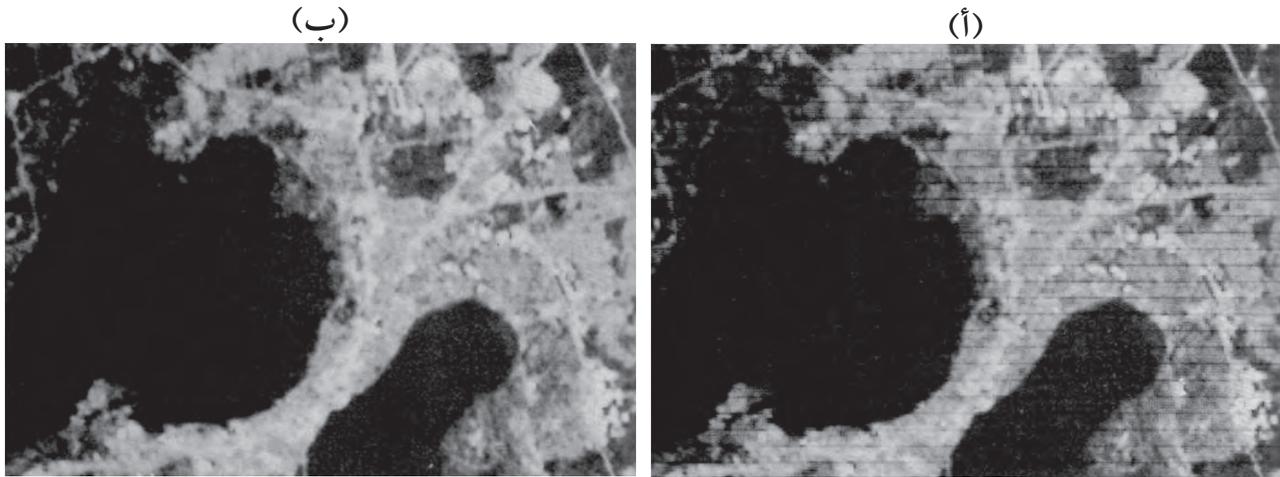
شكل (2-15) رسم توضيحي لنافذة مقاسها (3×3) تستخدم في حساب قيمة ميل (Slope) واتجاه (Aspect) التضاريس لخلية الارتفاع في مركز النافذة.

ولحساب محصلة الميل (النهائية)، واتجاهه يتم التعويض بقيم $(B1)$ و $(B2)$ في معادلات الميل (Slope)، واتجاهه (Aspect) المذكورة آنفاً.

4-1-2 إزالة الضوضاء من الصورة:

من المؤثرات الأخرى على الصورة الفضائية إشعاعياً الضوضاء (Noise)، وهي الشوشرة غير المرغوب فيها التي تظهر في الصورة. وتنتج هذه الضوضاء من سوء في معايرة اللاقطات الإلكترونية أثناء التقاط الإشارة الكهربائية القادمة من المنطقة الخاضعة للتصوير، أو من عملية التحويل من الإشارة الكهربائية إلى الرقمية، أو من تسجيل البيانات على متن القمر. والضوضاء في الصورة إما أن تُخفي المحتوى الإشعاعي للمعالم تماماً أو تقلل منه؛ لذلك، يجب أن تسبق عملية إزالة الضوضاء من الصورة أية عملية تحسين أو تصنيف للصورة. وطبيعة الضوضاء في الصورة إما أن تكون نظامية (Systematic)، أو بمفهوم آخر دورية (Periodic)، أي تظهر بانتظام في الصورة على مسافات متساوية، أو أن تكون عشوائية (Random)، أي ليس لها نمط معين، أو قد تكون خليطاً من النوعين. فمثلاً، نظام تصوير الماسح المتعدد الأطياف (Whisk-Broom Scanner) الذي يمسح مجموعة خطوط في كل اتجاه ينتج أحياناً صوراً تحتوي على خطوط متكررة تمتد على عرض الصورة تسمى (Stripping)، ولها قيم سطوع أكبر أو أصغر من قيم سطوع الخطوط الأخرى للاقطات الأخرى (شكل (2-16أ)). يحدث هذا نتيجة لاختلال في معايرة أحد اللاقطات الإلكترونية في المستشعر، وبالتالي يستقبل هذا اللاقط الإشارات

القادمة من الأرض بطريقة تختلف عن بقية اللاقطات الأخرى. كان هذا النوع من المشكلات يظهر بشكل متكرر في الماسح المتعدد الأطياف (MSS) على متن الأقمار الأمريكية (لاندسات 1، 2، 3)، رغم معايرة جميع لاقطات هذا الماسح قبل إطلاق الأقمار.

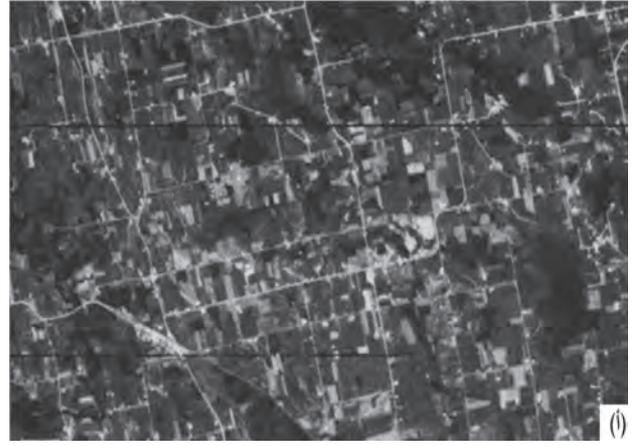


شكل (2-16) إزالة الضوضاء النظامية المتمثلة في الخطوط المتكررة (Stripping). (أ) صورة تظهر فيها خطوط على عرض الصورة نتيجة لخلل في ضبط اللاقطات. (ب) نفس الصورة بعد إزالة هذه الخطوط. المصدر: [1].

هناك عدة طرق تم تطويرها لإزالة هذه الضوضاء، ومنها: طريقة مقارنة الـ (هستوغرامات)؛ ويتلخص عمل هذه الطريقة باختصار ببناء (هستوغرام) البيانات لكل لاقط في نطاق معين، ومن ثم مقارنة هذه الـ (هستوغرامات) عن طريق القيم المتوسطة (Mean and Median) لهذه الـ (هستوغرامات) لتحديد اللواقط التي أحدثت المشكلة، وبعد ذلك تُعدل (هستوغرامات) خطوط الصورة المعطوبة عن طريق معامل ضبط يسمى ”معامل ضبط السلم الرمادي“ (Gray Scale Adjustment Factor). الشكل (2-16 ب) يعرض صورة شكل (2-16 أ) بعد إزالة خطوط الضوضاء.

من أشكال الضوضاء النظامية الأخرى فقدان أو عطب خط (Line Drop) في الصورة. ويتم التخلص من هذه المشكلة باستخدام عدة طرق لا يتسع المجال للخوض في تفاصيلها، ومنها استبدال الخط المفقود أو المعطوب بمتوسط قيم سطوع عناصر الصورة للخط الأسفل والأعلى منه (شكل (2-17)).

النوع الآخر من الضوضاء هو الضوضاء العشوائية (ضوضاء غير نظامية) التي توجد في الصورة، ويتم التعامل معها بطريقة مختلفة تماماً عن الضوضاء النظامية. في هذا النوع من الضوضاء يكون هناك تغيرات غير منتظمة في قيم السطوع بين عناصر الصورة، وهو ما يسبب ”ظاهرة الملح والفلفل“ (Salt & Pepper Appearance) في الصورة (شكل 2-18 أ).



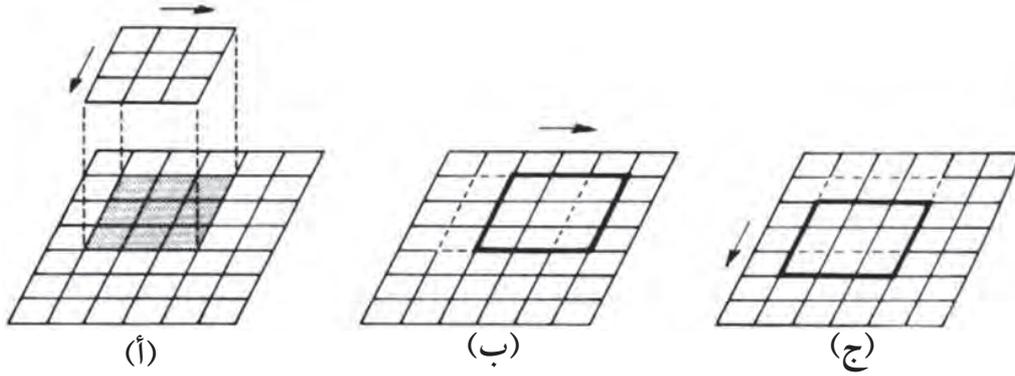
شكل (2-17) إزالة الضوضاء النظامية المتمثلة في فقدان أو عطب خط (Line Drop). (أ) الصورة الأصلية وتحتوي على خطين مفقودين. (ب) الصورة بعد ترميمها باستبدال الخطين المفقودين بمتوسط قيم سطوع الخطوط الأسفل والأعلى منها. المصدر: [1].



شكل (2-18) إزالة الضوضاء العشوائية. (أ) صورة أصلية وتبدو "ظاهرة الملح والفلفل" عليها. (ب) صورة مصححة. المصدر: [1].

ويتم اكتشاف هذا النوع من الضوضاء ألياً (باستخدام برنامج المعالجة) بمقارنة قيمة سطوع عنصر الصورة المطلوب فحصه مع قيم العناصر المجاورة له، فإذا تعدى الفرق بينهما قيمة يحددها محلل الصورة (في العادة تكون كبيرة)، فإن عنصر الصورة المفحوص يشكل ضوضاء في الصورة. ولإزالة هذه الضوضاء فإنه يتم تمرير نافذة بمقاس معين (يفضل 3×3 ، أو 5×5) (شكل (2-19)) تسمى مرشح الأغلبية (Majority Filter)، ثم تستبدل قيمة سطوع عنصر الصورة ذي الضوضاء بمتوسط قيم سطوع عناصر الصورة المحيطة به في النافذة. الشكل (2-18 ب) يعرض صورة الشكل (2-18 أ) بعد إزالة الضوضاء. ويمكن كذلك استخدام هذه الطريقة وبنفس الأسلوب مع الصورة المصنفة (Classified Image) للتغلب

على نفس المشكلة وهي إزالة (ظاهرة الملح والفلل)؛ ولكن يعاب على هذه الطريقة في التعامل مع الصور المصنفة إمكانية إزالتها للظواهر الخطية ذات السماكات القليلة، كالطرق الضيقة، مثلاً (لمزيد من التفاصيل يمكن الرجوع إلى فقرة (5-1-4)).



شكل (2-19) مفهوم النافذة في عملية التصحيح. (أ) تطبيق نافذة مقاس (3×3) على الصورة. (ب) انتقال النافذة على طول خط من عنصر إلى عنصر. (ج) انتقال النافذة من خط إلى خط. المصدر: [1].

2-1-5 تحويل الصورة من قيم سطوع إلى قيم إشعاع وانعكاس:

تتكون الصور الفضائية من نطاق (Band) أو أكثر، وكل نطاق (يمثل قطاعاً من الطيف الكهرومغناطيسي) عبارة عن مصفوفة ثنائية الأبعاد. كل عنصر من هذه المصفوفة (Pixel) يمثل منطقة من سطح الأرض قيمة مساحتها تعتمد على دقة الوضوح المكانية (Spatial Resolution) للمستشعر؛ وقيمة السطوع (Brightness Value-BV) لعنصر الصورة عبارة عن تمثيل لكمية الطاقة (Radiance) المنعكسة من سطح الأرض. فالمعلم الذي يعكس معظم الطاقة الساقطة عليه (كالأسطح المعدنية المصقولة) يظهر بقيمة سطوع عالية (بيضاء) في الصورة، بينما المعلم الذي يمتص معظم الطاقة مثل المياه العميقة النقية يبدو داكناً في الصورة.

وتمثل قيمة سطوع الصورة ضمن سلم رمادي (Gray Scale) يحتوي في الغالب على 256 قيمة سطوع (باستخدام مدى ديناميكي قدرة 8 بت) تتراوح بين 0 و 255، حيث تمثل القيمة 255 أعلى درجات السطوع، و 0 أدنى درجات الدكّانة (الشكل 1-7).

إذا كانت منطقة العمل صغيرة، ويغطيها صورة واحدة، فإن معالجة الصورة تتم على قيم السطوع مباشرة، أما إذا كانت المنطقة كبيرة ويغطيها أكثر من صورة، أو أن الصور ملتقطه في مواسم مختلفة، أو من أنواع مختلفة من المستشعرات، فإن ذلك يتطلب تحويل هذه القيم إلى قيم قياسية تُسمى قيم الانعكاس (Reflectance)، ويرمز لها بالرمز (ρ) ، وقيمة الانعكاس عبارة عن نسبة الإشعاع المنعكس

من السطح على الإشعاع الساقط عليه. هذا يجعلنا نتعامل مع خصائص المادة بدلاً من كمية الإشعاع التي تختلف باختلاف الوقت والمستشعر. ويتطلب تحويل قيم السطوع إلى قيم انعكاس إلى تحويلها أولاً إلى قيم إشعاع (Radiance-L) بالاستعانة بمعامل الإزاحة (Offset)، والاكْتساب (Gain) (الذين يرفقان عادة بصور الأقمار الاصطناعية، أو يتم حسابهما بالاستعانة بقياسات أرضية) على النحو التالي:

صور القمر الفرنسي (سبوت):

$$L = \frac{BV}{gain} + offset$$

وُفترض قيمة الإزاحة في صور القمر (سبوت) في العادة صفرًا.
صور القمر الأمريكي (لاندسات):

$$L = \frac{BV - offset}{gain}$$

يتم بعد ذلك تحويل قيم الإشعاع (L) إلى قيم انعكاس (ρ) عن طريق المعادلة التالية بافتراض أن المعلم مُتمثل الانعكاس في جميع الاتجاهات (Lambertian/Isotropic):

$$\rho_{Lamb} = \frac{\pi d^2 L_T}{E_s \cos(i)}$$

حيث L_T الإشعاع المنعكس من المعلم إلى المستشعر، وتحسب قيمته، كما وُضح آنفًا في القسم الخاص بـ "معادلات انتقال الطاقة والتصحيح الجوي" من خلال العلاقة ($L_S = L_T + L_P$)، حيث L_S الإشعاع الواصل إلى القمر، و L_P إشعاع المسار المنعكس إلى المستشعر الذي ليس له علاقة بانعكاس الجسم، و $E_s \cos(i)$ قيمة إشعاع الشمس المباشر بعد تعديل قيمته حسب ميل واتجاه التضاريس بافتراض خصائص تمثّل الانعكاس للمعلم في جميع الاتجاهات. وإذا افترضنا أن المعلم ليس مُتمثل الانعكاس (Non-Lambertian/Anisotropic)، ونريد أن نحسب تأثير ذلك باستخدام نموذج (مينارت)، فستكون المعادلة كالتالي:

$$\rho_{Minnaert} = \frac{\pi d^2 L_T * \cos(e)}{E_s [\cos(i) * \cos(e)]^k}$$

2-2 التصحيح الهندسي:

تتميز الصور الفضائية عن الخارطة - بصورة عامة - في أنها تشمل جميع ما يحتويه سطح الأرض من معالم، وتظهر هذه المعالم في الصورة بشكل مشابه لما تراه العين، في حين يتم تمثيل هذه المعالم في الخارطة على شكل رموز تحتاج إلى التدريب على التعامل معها، وعلى مفتاح خارطة لشرحها. إلا أن الخارطة تحتوي على معلومات قد لا يستطيع الشخص العادي استخلاصها من الصورة، حيث يكون قد تم استنباط هذه المعلومات من الصورة عن طريق مفسرين متخصصين، وبعض الأجهزة والبرامج التي توفر إمكانية الرؤية ثلاثية الأبعاد للمعالم عن طريق زوج من الصور المتداخلة (Stereo Pair). ولكن يجب ملاحظة أن الصورة الفضائية لا يمكن استخدامها بديلاً عن الخارطة التقليدية مباشرة بعد استقبالها من القمر الصناعي لكونها تحتوي على نوع من التشوهات - النوع الأول هو: التشوهات النظامية (Systematic Distortions)، وهي متوقعة ومعروفة أثناء تصميم القمر، ومنها التشوه الناتج من دوران الأرض باتجاه الشرق تحت القمر أثناء التصوير، والذي يتسبب في قيام الماسح بمسح خط (Line) يغطي منطقة من الأرض مزاحة إلى الغرب قليلاً عن الخط السابق في الصورة، وهو ما يسمى بتشوه الطي (Skew Distortion)؛ ويتم التخلص من هذا التشوه وغيره من التشوهات النظامية الأخرى في محطات الاستقبال الأرضية، كمحطة الاستقبال في مدينة الملك عبد العزيز للعلوم والتقنية. ومثال على هذا النوع من الصور المصححة نظامياً، صور المستوى الأول أ (Level-1A) لأقمار (سبوت 1، 2، 4).

النوع الثاني من التشوهات هو التشوهات الهندسية التي يمكن حصرها باختصار شديد (لا يتسع المجال هنا إلى الدخول في تفاصيلها) في تشوهات متعلقة بالمستشعر على متن القمر كالتغيرات (Variations) في ارتفاع القمر، وتوجيهه (Attitude) المستشعر، وزاوية التصوير (View Angle)، أو قد تكون متعلقة بالأرض كانهاء سطح الأرض (Earth Curvature)، أو الإزاحة الناتجة من ارتفاع التضاريس (Relief Displacement). وتتم عملية التصحيح (التقويم) الهندسي لهذه التشوهات بالاستعانة بنقاط ضبط أرضية (Ground Control Points-GCPs) موزعة بانتظام على الصورة، وهي عبارة عن معالم أرضية معروفة الموقع بدقة كبيرة بالإحداثيات الجغرافية (خطوط الطول والعرض)، أو بإحداثيات أحد المساقط (مثل مسقط (ماركيتور) المستعرض العالمي (UTM))؛ ويتم الحصول على إحداثيات هذه النقاط إما من خارطة، أو من خلال قياسات أرضية باستخدام وسائل المساحة التقليدية، أو نظام تحديد المواقع الكوني (GPS). ويشترط في هذه النقاط أن تكون واضحة في الصورة وصغيرة المساحة (كنقطة تقاطع طريقين، أو زاوية سور أحد المنازل) بحيث يستطيع المشغل أن يتعرف عليها، ويحدد إحداثياتها المحلية في الصورة (مثلة بالصف (Row)، والعمود (Column)) بشكل دقيق.

وتتم عملية تصحيح الصورة هندسياً عن طريق نماذج (دوال) هندسية يتم حلها، وإيجاد قيم معاملاتها بالتعويض بالإحداثيات الجغرافية، وإحداثيات الصورة المحلية لنقاط الضبط كمدخلات. والتصحيح الهندسي يمكن أن يكون تجريبياً (Empirical)، وذلك بالتصحيح من مسقط (Projection) إلى آخر متجاهلين النموذج

الهندسي للمستشعر (Sensor Geometry)، والإزاحة الناتجة من ارتفاع التضاريس (Relief Displacement)، أو أكثر دقة بإدخال النموذج الهندسي للمستشعر، والإزاحة الناتجة من ارتفاع التضاريس في الحسبان.

في التصحيح الهندسي التجريبي، يتم التصحيح باستخدام نماذج تحويل رياضية، كالدوال المتعددة الحدود (Polynomials)، أو التكسية المطاطية (Rubber Sheeting)، أو تحويل "أفين" (Affine Transformation)، أو التحويل الإسقاطي (Projective Transformation)، الخ. وتكوّن هذه النماذج الهندسية العلاقة التجريبية (Empirical Relationship) بين الخارطة (الإحداثيات الأرضية)، والصور (الإحداثيات المحلية)؛ والذي يتحكم في هذه العلاقة هي نقاط الضبط الأرضية التي سبق التطرق إليها.

أما في التصحيح الهندسي الدقيق، فإن عملية التصحيح الدقيقة تتم بالتصحيح العمودي (Ortho-rectification) بالاستعانة بالنموذج الهندسي للمستشعر (Sensor Rigorous Model)، أو نموذج الدوال الأساسية (Rational Function Model-RFM) الذي سيتم التطرق إليه لاحقاً، حيث يتم نقل الصورة من المسقط المنظوري المركزي (Central Perspective Projection) إلى المسقط العمودي (Orthogonal Projection)؛ ويتم في هذه الطريقة التصحيح للتشوهات الناتجة من ميلان المستشعر (Sensor Attitude)، والإزاحة الناتجة من ارتفاع التضاريس، وغيرها من التشوهات المذكورة آنفاً من خلال استخدام صور بينها تغطية مشتركة (Stereo Models) للمنطقة المطلوب تصحيحها. وتعتمد كمية الإزاحة الناتجة من ارتفاع التضاريس على ارتفاع الطيران، وارتفاع المعالم، ومساحة تغطية الصورة، ومقدار ميلان (Tilt) الصورة، والمواقع النسبية للمعالم في الصورة. الجدير بالذكر هنا أن كثيراً من هذه التشوهات (باستثناء الإزاحة الناتجة من ارتفاع التضاريس) تم التغلب عليه في الجيل الجديد من الأقمار (سبوت-5، ايكونوس، كويكبيرد، جيواي، وورلديو، إلخ)، بحيث يمكن توفير دقة جغرافية جيدة للصورة الفضائية المستقبلية والمعالجة معالجة أولية تصل إلى أقل من 50 م (تصل في بعضها إلى ما يقارب 10 م أو أقل، كما في صور القمر جيواي والقمر وورلديو) بدون تصحيح هندسي باستخدام نقاط ضبط أرضية. يعود الفضل في ذلك إلى أجهزة تتبع النجوم (Star Trackers)، وأجهزة نظام تحديد المواقع الكوني (GPS) الدقيقة المحمولة على متنها. ويتعين التنويه هنا إلى أن هذه الدقة المعلنة تقتصر على المناطق المستوية، حيث تزداد هذه الأخطاء بشكل كبير في المناطق الجبلية نتيجة للإزاحة الأفقية أو القطرية للتضاريس في الصورة عن مواقعها الأصلية.

وفيما يلي استعراض لبعض الطرق المستخدمة في عملية التصحيح (التقويم) الهندسي.

2-2-1 الدوال المتعددة الحدود:

الدوال المتعددة الحدود (Polynomials) إما أن تكون خطية (من الدرجة الأولى)، أو غير خطية (من الدرجة الثانية وأعلى) والتي تسمى عند بعضهم بالتكسية المطاطية (Rubber Sheeting). التحويل باستخدام الدوال المتعددة الحدود من الدرجة الأولى يكون مناسباً لإسقاط صورة خام على مسقط خرائطي

سطحي (Planar Map Projection)، أو لتحويل مسقط خرائطي سطحي إلى آخر، أو لتصحيح صور تغطي مساحات صغيرة. فعلى سبيل المثال، التحويل باستخدام دالة متعددة الحدود من الدرجة الأولى يكون مناسباً لتصحيح الصور الفضائية التي سبق إسقاطها سطحياً (Projected Onto Plane)، مثل صور (Level-1B) للقمر (سبوت)، إلى المسقط الخرائطي المطلوب. الدالة المتعددة الحدود من الدرجة الثانية تصحح التشوهات التي لا يمكن للدرجة الأولى تصحيحها، ويناسب استخدامها (على سبيل المثال) في التحويل من الإحداثيات الجغرافية (خط طول، خط عرض) إلى مسقط أفقي للأخذ بالاعتبار كروية سطح الأرض لمناطق واسعة، وفي التقليل من التشوهات الأخرى التي تحدث للصورة مثل التشوهات البانورامية (Panoramic Distortions)، والالتواءات غير الخطية (Non-Linear Skew)، وتشوهات العدسة، وغيرها من التشوهات الأخرى. الدالة من الدرجة الثالثة تناسب تصحيح الصور الجوية المشوهة (Distorted Aerial Photography)، والخرائط الرقمية المنتجة من فرز خرائط ورقية بها التواءات، وصور الرادار.

كلما زادت درجة الدالة المتعددة الحدود، كلما زاد عدد معاملاتها التي يجب حساب قيمها، وبالتالي زيادة عدد نقاط الضبط المطلوبة، فالدالة من الدرجة (t) تشتمل على عدد $(2 \sum_{i=1}^{t+1} i)$ من المعاملات، وتحتاج إلى استخدام نقاط ضبط أفقية يبلغ عددها $(\frac{(t+1)(t+2)}{2})$ ؛ ويتم حساب قيم المعاملات عن طريق حل مصفوفة التحويل (Transformation Matrix) للمعادلات المتعددة الحدود بعد التعويض فيها بقيم إحداثيات نقاط الضبط الأرضية (مرصودة باستخدام نظام التحديد الكوني (GPS) أو من خرائط أو صور مصححة)، وقيم إحداثيات الصورة باستخدام طريقة ضبط المربعات الدنيا (Least Squares Adjustment) للوصول إلى قيمة المعاملات لأفضل معادلة.

تُصحَّح الدالة من الدرجة الأولى (الخطية) التغيرات في مقياس الرسم في اتجاه (X)، واتجاه (Y)، والالتواء الخطي (Linear Skew)، ودوران المحاور (Rotation)، والإزاحة (Shift/offset) في مركز المحاور في اتجاه (X)، واتجاه (Y) عن طريق المعادلة التالية:

$$x = a_0 + a_1X + a_2Y$$

$$y = b_0 + b_1X + b_2Y$$

حيث x ، و y إحداثيات الصورة المشوهة (غير المصححة)، وتمثل برقم الصف (Raw)، ورقم العمود (Column)، و X ، و Y الإحداثيات الأرضية (الصورة المصححة)، و $(a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2)$ المعاملات التي تُكوّن العلاقة بين إحداثيات الصورة المشوهة، وإحداثيات الخارطة. وفي حالة كان التصحيح الأفقي على أساس أن التشوه في مقياس الرسم في الشماليات يختلف عن مقياس الرسم في الشرقيات، فإن التصحيح

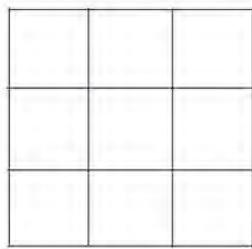
يسمى "تحويل أفين" (Affine Transformation). ويمكن وصف الصيغة العامة للدالة المتعددة الحدود لأية درجة على النحو التالي:

$$x = \left(\sum_{i=0}^t \right) \left(\sum_{j=0}^i \right) a_k X^{i-j} Y^j$$

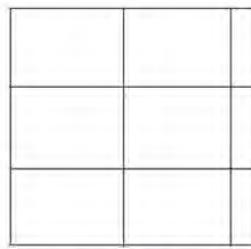
$$y = \left(\sum_{i=0}^t \right) \left(\sum_{j=0}^i \right) b_k X^{i-j} Y^j$$

حيث تمثل t درجة الدالة المتعددة الحدود، و a_k و b_k المعاملات، و X ، و Y إحداثيات الصورة المصححة (الأرضية)، و x ، و y إحداثيات الصورة غير المصححة، وقيمة k يمكن حسابها من المعادلة التالية:

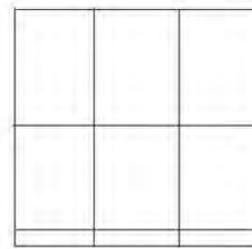
$$k = \frac{i \times i + j}{2} + j$$



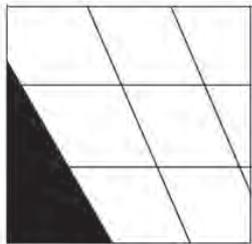
الصورة قبل التحويل



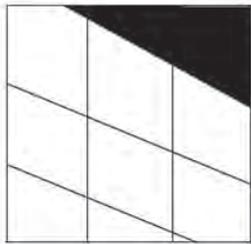
التغير في مقياس الرسم في اتجاه (X)



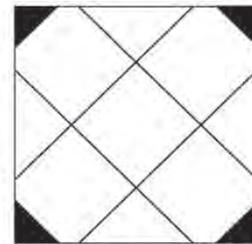
التغير في مقياس الرسم في اتجاه (Y)



التغير في الأنتواء (skew) في اتجاه (X)



التغير في الأنتواء (skew) في اتجاه (Y)

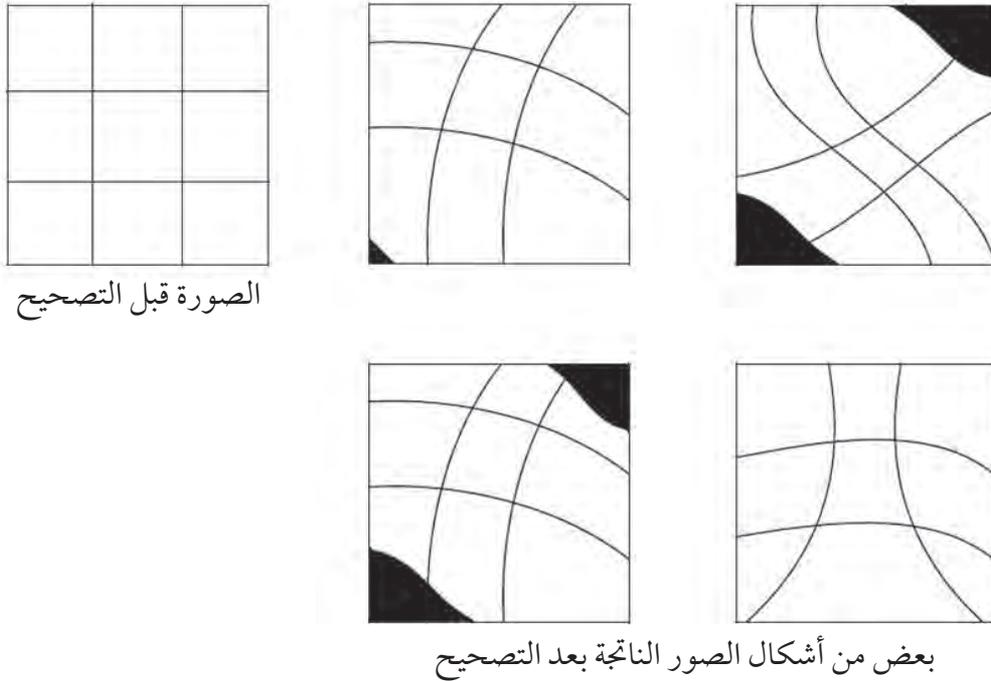


الدوران

شكل (20-2) نماذج من بعض الآثار المترتبة على استخدام الدوال متعددة الحدود الخطية (الدرجة الأولى). المصدر: [10].

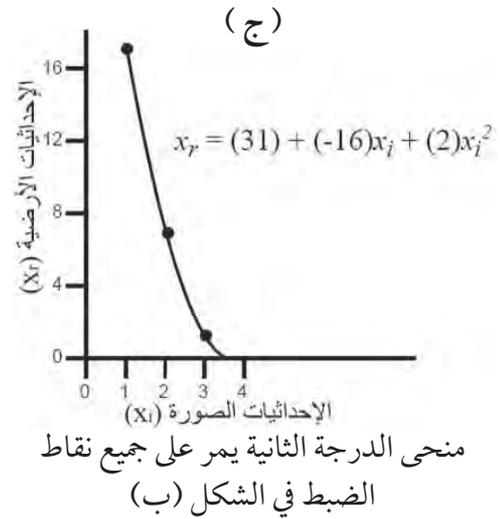
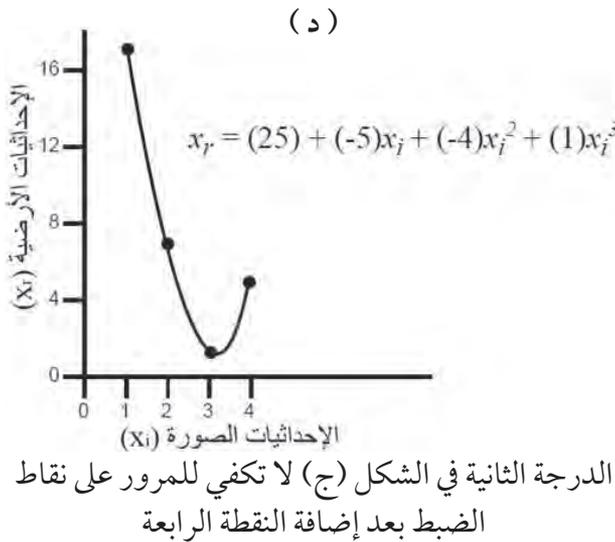
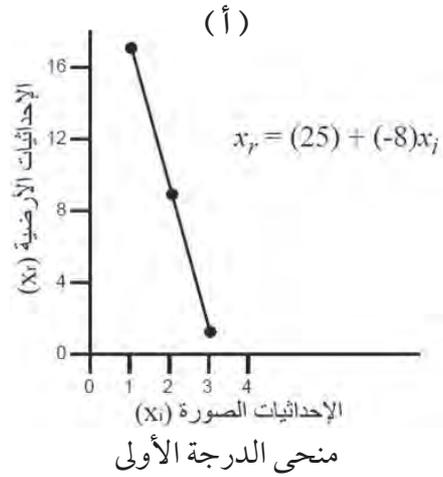
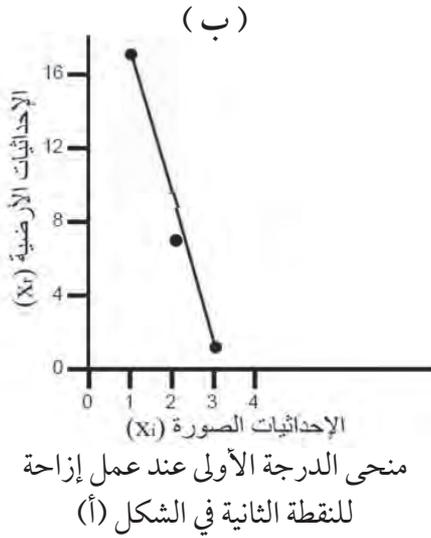
يوضح الشكل (20-2) التغيرات الممكنة التي تطرأ على الصورة بعد التصحيح باستخدام الدالة المتعددة الحدود من الدرجة الأولى.

ويوضح الشكل (2-21) بعضاً من التغيرات الممكنة التي تطرأ على الصورة بعد التصحيح باستخدام بعض الدوال غير الخطية.



شكل (2-21) بعض من التغيرات المحتملة التي تحدث للصورة نتيجة التقويم باستخدام بعض الدوال المتعددة الحدود غير الخطية. المصدر: [10].

وعلى الرغم من أن استخدام الدرجات العالية (High Order) للدالة المتعددة الحدود يتم في العادة لإجراء عمليات تصحيح هندسي عالية التعقيد، فإنه يجب التنويه إلى أمر هام، وهو أن استخدام درجة عالية للدالة المتعددة الحدود للمرور بجميع نقاط الضبط (Perfect Fit) لا يعني في جميع الأحوال صحة أو دقة التصحيح، حيث إن ذلك يمكن أن يوفر تصحيحاً جيداً في المناطق التي تقع فيها نقاط الضبط فقط، أما المناطق الأخرى، فيحصل بها تشوهات إضافية مقارنة بالصورة الأصلية. الشكل (2-22) يوضح هذه المشكلة، حيث أدى التحويل باستخدام دالة من الدرجة الثالثة إلى تشوهه، وعدم اتساق في معلومات الصورة. من وجهة نظر كاتب هذه السطور ومن خلال التجربة العملية، فإنه عند تصحيح صور تغطي مناطق مستوية وصغيرة المساحة؛ فإنه يُفضّل استخدام معادلة متعددة الحدود من الدرجة الأولى، وعندما تكون المنطقة جبلية أو كبيرة المساحة، فإن استخدام الدرجة الثانية يعتبر كافياً ويعطي نتائج أكثر دقة من الدرجة الأولى. وقد ذكر في بعض الدراسات بأن استخدام معادلات متعددة الحدود ذات درجات منخفضة (Low Order) يعطي نتائج دقيقة عندما تكون الأرض مستوية، وأن إدخال الارتفاعات في المعادلات كثيرة الحدود لتصحيح صور تغطي مناطق جبلية يرفع من الدقة لتصل إلى عنصر صورة واحد (One Pixel) في بعض الأحيان.



(هـ)

إحداثيات (x) بعد التصحيح

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
3				4		2										1	

شكل (2-22) تأثير استخدام درجة عالية للدالة المتعددة الحدود. يوضح الشكل (هـ) التشوه الناتج من استخدام دالة من الدرجة الثالثة (الشكل (د)) على الصورة في البعد الأفقي (X). المصدر: [10].

الناظر إلى معادلة الدالة من الدرجة الأولى المشار إليها آنفاً يستوحي أن المعادلة معكوسة، حيث إنه كيف

يتم وضع القيم المعلومة في الطرف الأيسر للمعادلة (إحداثيات الصورة المشوهة (x,y))، والقيم المجهولة (إحداثيات الصورة المصححة (X,Y)) في الطرف الأيمن. هذا بالفعل ما يحدث في عملية التصحيح، حيث إنه يتم إعداد مصفوفة (Matrix) فارغة على نظام الإحداثيات الأرضي المطلوب (UTM، مثلاً) تمثل الصورة المصححة الناتجة (Output Image)، ثم يتم بعد ذلك التعويض بقيم الإحداثيات الأرضية (X,Y) لعناصر الصورة الفارغة (المصفوفة) في المعادلة للحصول على قيم إحداثيات الصورة المشوهة المناظرة لها (الصف، العمود (x,y)). بعد إيجاد قيم إحداثيات الصورة المشوهة تبعاً لكل خلية فارغة في مصفوفة الصورة المصححة بقيمة السطوع لعنصر الصورة المقابل لها من عناصر الصورة المشوهة عند الإحداثي الذي تم تحديده. هذه العملية موضحة في الشريحة (5ب)، حيث تعرض الشريحة المصفوفة الناتجة من عملية تحويل إحداثيات الصورة المشوهة إلى إحداثيات الخارطة، مركبة على مصفوفة الصورة المشوهة.

من الناحية العملية، وكما هو واضح من الشريحة (5)، فإنه عند تطبيق معادلة التحويل، فإن موقع إحداثيات الصورة المشوهة (الصف، العمود) المحسوب من المعادلة لا ينطبق تماماً على مركز عنصر الصورة المشوهة الأصلي، وقد يقع في مكان ما بين عدد من عناصر هذه الصورة؛ لذلك، يتم تحديد قيمة سطوع عنصر الصورة التي سنملاً بها الخلية الفارغة في الصورة المصححة بعدة طرق، تسمى طرق استيفاء الكثافة (Intensity Interpolation Methods). في الطريقة الأولى - وهي أبسط الطرق، وتسمى "الجار الأقرب" (Nearest Neighbor) - يتم اختيار قيمة سطوع أقرب عنصر صورة لإحداثيات الصورة المشوهة المحسوبة من معادلة التحويل. من مميزات هذه الطريقة محافظتها على قيم عناصر الصورة الأصلية، وبساطتها حسابياً (أسرع في عملية المعالجة باستخدام الحاسب الآلي)، فيما يعاب عليها بأن المعالم في الصورة المصححة الناتجة تظهر بمظهر متكسر (Stairy Stepped / Artifact Appearance) (الشكل 2-23أ). الطريقة الثانية هي "الاستيفاء الخطي الثنائي" (Bilinear Interpolation)، وهي أكثر تعقيداً من الطريقة الأولى؛ لأنها توجد قيمة سطوع اصطناعية (Synthetic BV) جديدة لعنصر الصورة تُملاً به الخلية الفارغة في الصورة المصححة، وتُحسب هذه القيمة متوسطاً موزوناً (Weighted Average) لقيم عناصر الصورة الأصلية الأربعة المحيطة بموقع الإحداثيات المحسوب من معادلة التحويل على النحو التالي:

$$BV_{wt} = \frac{\sum_{k=1}^4 \frac{Z_k}{D_k^2}}{\sum_{k=1}^4 \frac{1}{D_k^2}}$$

حيث Z_k قيم السطوع لعناصر الصورة الأربعة غير المصححة المحيطة بالموقع، و D_k^2 مربع المسافة بين عنصر الصورة المحيط بالموقع والموقع، و BV_{wt} المتوسط الموزون لقيم السطوع. من مميزات هذه الطريقة أنها تنتج صورة ذات مظهر ناعم لا يحتوي على المظهر المتكسر الذي يظهر عند استخدام الطريقة الأولى (شكل 2-23ب)، ولكن يعاب عليها أنها تغير قيم الصورة الأصلية نوعاً ما؛ لكون ناتج قيمة سطوع عنصر الصورة

المصححة مشتق من قيم سطوع مجموعة من عناصر الصورة الأصلية؛ لذلك، يُنصح بأن لا تجري عملية التصحيح الهندسي بهذه الطريقة إلا بعد الانتهاء من عمليات معالجة الصورة التي تعتمد على قيم عناصر الصورة الأصلية. الطريقة الثالثة هي "الطي التكعيبي" (Cubic Convolution)، وهي أعقد من الطريقتين السابقتين؛ لأنها توجد قيمة سطوع صناعية لعنصر الصورة المصححة مشتقة من قيم (16) عنصر من عناصر الصورة الأصلية المحيطة. من مميزات هذه الطريقة أنها تنتج صورة ذات قوام أنعم من الطرق السابقة (شكل (2-23 ج))، ولكن يعاب عليها أنها تغير قيم سطوع الصورة الأصلية، وأنها ذات عمليات حسابية مكثفة.

(ب)



(أ)



(ج)



شكل (2-23) الصور الناتجة من استخدام طرق استيفاء الكثافة في عملية التصحيح الهندسي لصورة أحادية الطيف (غير ملونة) من القمر (سبوت) لمنطقة التقاطع الإسفلتي المؤدي إلى مدينة ملهم الجديدة. (أ) صورة الجار الأقرب (Nearest Neighbor). (ب) صورة الاستيفاء الخطي الثنائي (Bilinear Interpolation). (ج) صورة الطي التكعيبي (Cubic Convolution). تظهر صورة الاستيفاء الخطي الثنائي أكثر نعومة من صورة الجار الأقرب (أقل مظهراً متكسراً للظواهر الخطية)، فيما تظهر صورة الطي التكعيبي أكثر الطرق الثلاث نعومةً.

2-2-2 التحويل الإسقاطي:

تم عادة عملية التحويل الإسقاطي (Projective Transformation) باستخدام النموذج الإسقاطي ثنائي الأبعاد (2-D Projective Model) بالصيغة الموضحة أدناه للتحويل من مستوي (Plane) إلى آخر

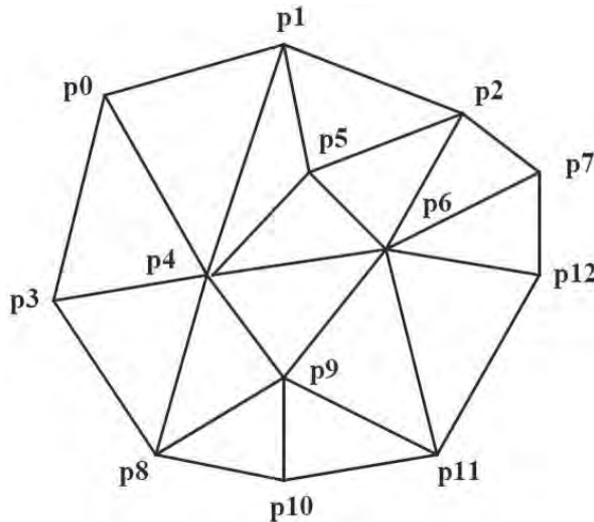
في المناطق شبه المستوية:

$$X = \frac{a_1 x + b_1 y + c_1}{a_3 x + b_3 y + l} \quad \text{and} \quad Y = \frac{a_2 x + b_2 y + c_2}{a_3 x + b_3 y + l}$$

حيث تحتوي المعاملات a_s ، و b_s في المعادلة ضمناً على معاملات التوجيه الداخلي والخارجي (Interior and Exterior Orientation Parameters)، و X ، و Y تمثل الإحداثيات الأرضية، و x ، و y إحداثيات الصورة.

3-2-2 التصحيح المبني على التثليث:

لإجراء عملية التصحيح المبنية على التثليث (Triangle-Based Rectification)، فإنه من الضروري تثليث نقاط الضبط إلى شبكة من المثلثات بحيث تمثل نقاط الضبط رؤوس هذه المثلثات. ذكر (Watson، 1992) أربع طرق لهذا النوع من التصحيح، وهي (Delaunay, Arbitrary, Optimal, Greedy). وتثليث "ديلوناي" (Delaunay Triangulation) هو الأكثر استخداماً من هذه الطرق؛ والمبدأ الأساسي لهذه الطريقة هو إنشاء شبكة من المثلثات بين نقاط الضبط بشرط ألا يحتوي أي مثلث على نقطة ضبط بداخله. الشكل (2-24) يوضح شبكة مثلثات مكونة من (13) نقطة ضبط.



شكل (2-24) رسم توضيحي لطريقة التصحيح المبنية على التثليث باستخدام شبكة مثلثات مكونة من (13) نقطة ضبط. المصدر: [10].

بعد إنشاء شبكة المثلثات يتم تصحيح منطقة كل مثلث على حده؛ وميزة هذه الطريقة أنها تقسم المنطقة إلى أجزاء، وبالتالي إذا كانت المشكلة الهندسية للمنطقة معقدة (تضاريس جبلية أو متعددة أنواع التضاريس) فإن

تقسيم هذه المنطقة إلى أجزاء يوفر إمكانية إجراء تصحيح مبسط لكل جزء (مثلث) على حده، وبالتالي توفر تصحيحاً أدق لكامل المنطقة. ويتم التصحيح إما باستخدام دالة خطية متعددة الحدود (من الدرجة الأولى) أو دالة غير خطية متعددة الحدود (من الدرجة الثانية وأعلى).

2-2-4 التصحيح العمودي:

يُعرّف التصحيح العمودي (Ortho-Rectification) بأنه وضع المعالم في وضعها العمودي (Orthographic Position) بدون أي ميلان، أو تشويه في مقياس الرسم، أو إزاحة للتضاريس. وتحتاج عملية التصحيح العمودي للصورة إلى معرفة عوامل التوجيه الخارجي الستة، وهي الإحداثيات ثلاثية الأبعاد (X_L, Y_L, Z_L) لمركز الإسقاط (محطة الإضاءة) (Exposure Station / Perspective Center)، وزوايا ميلان كاميرا التصوير الثلاث (ω, ϕ, κ) ، وارتفاع التضاريس التي يمكن الحصول عليها من نموذج الارتفاعات الرقمية. ويتم حساب عوامل التوجيه الخارجي الستة للصورة من عملية التثليث الجوي (في حالة الصور الجوية)، أو التثليث الفضائي (في حالة استخدام صورة فضائية) لزوج مجسم (صورتين بينها تغطية مشتركة) على الأقل باستخدام معادلات تسمى "معادلات الارتباط الخطي" (Collinearity Equations). ومعادلات الارتباط الخطي تمثل الحالة التي يتم فيها وقوع المعلم مع صورته مع مركز الإضاءة على خط واحد مستقيم في الحيز ثلاثي الأبعاد. وتشتمل هذه المعادلات على الإحداثيات الأرضية، والإحداثيات المحلية للصورة، وعوامل التوجيه الخارجي الستة على النحو التالي:

$$x = -f \left[\frac{m_{11}(X - X_L) + m_{12}(Y - Y_L) + m_{13}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \right]$$

$$y = -f \left[\frac{m_{21}(X - X_L) + m_{22}(Y - Y_L) + m_{23}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \right]$$

حيث x ، y إحداثيات الصورة و X ، Y ، و Z الإحداثيات الأرضية، و X_L ، Y_L ، و Z_L الإحداثيات الأرضية لمركز الإضاءة، و m_2 عوامل تشتمل ضمناً على زوايا ميلان الكاميرا.

وينتج من حل معادلات الارتباط الخطي في عملية التثليث الجوي إيجاد قيم معاملات التوجيه الخارجي لكل صورة، والإحداثيات الأرضية لمركز الإضاءة، والإحداثيات الأرضية لنقاط الربط (Tie Points)، وهي نقاط تقع في مناطق التغطية المشتركة لكل زوج مجسم من الصور (Stereo Pair) تستخدم - لاحقاً -

نقاط ضبط أرضية لهذه الصور (لمزيد من التفاصيل يمكن الرجوع إلى Wolf and Dewitt, 2000).

فيما يتعلق بالصور الفضائية، سنأخذ مثلاً القمر الفرنسي (سبوت 2) الذي يستخدم نظام دفع المكنسة في التصوير. يُعامل كل خط ممسوح (Scan Line) في هذه الحالة وكأنه صورة مستقلة ذات بعد بؤري قدره 1084 ملم، وهو البعد البؤري لنظام التصوير (High Resolution Visible-HRV). يترتب على ذلك أن يكون لكل خط ممسوح زوايا ميلان، ومركز إسقاط خاص به؛ ولهذا السبب فإن إحداثيات الصورة في اتجاه y (اتجاه سير القمر) تكون دائماً صفراً.

$$x = -f \left[\frac{m_{11}(X - X_L) + m_{12}(Y - Y_L) + m_{13}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \right]$$

$$0 = -f \left[\frac{m_{21}(X - X_L) + m_{22}(Y - Y_L) + m_{23}(Z - Z_L)}{m_{31}(X - X_L) + m_{32}(Y - Y_L) + m_{33}(Z - Z_L)} \right]$$

عند إجراء الحسابات يتم افتراض وقوع مراكز الإسقاط لكل خطوط المسح في خط ناعم (Perspective Centers of Scan Lines Lie on Smooth Line). وتستخدم البيانات الفلكية (Ephemeris Data) التي تحتوي على موقع القمر، ومنتجه سرعته، وزوايا ميلانه، والوقت الدقيق لتصوير خط المسح المركزي (Center Scan Line) في عملية التثليث الفضائي لصور القمر (سبوت). وتتألف عوامل التوجيه الخارجي لصور هذا القمر من مركز الإسقاط لخط المسح المركزي، والتغير في مراكز الإسقاط على طول المدار. وبحساب عوامل التوجيه الخارجي لخط المسح المركزي، فإنه يمكن حساب عوامل التوجيه الخارجي لأي خط مسح آخر اعتماداً على المسافة بين ذلك الخط ومركز الصورة، والتغيرات في مواقع مراكز الإسقاط وزوايا الميلان. ولذلك، فإن العوامل التي تُحسب قيمها من التثليث الفضائي بطريقة الضبط الكامل (Bundle Adjustment) هي:

(1) الإحداثيات الأرضية لمركز الإسقاط لخط المسح المركزي.

(2) زوايا الدوران لخط المسح المركزي.

(3) المعاملات (مُمثلة بمعادلات متعددة الحدود منخفضة الدرجة نظراً للحركة الناعمة للقمر في المدار من خط مسح لآخر) التي يمكن منها حساب زوايا الدوران، ومراكز الإسقاط لخطوط المسح الأخرى.

(4) الإحداثيات الأرضية لكل نقاط الضبط ونقاط الربط.

2-2-5 نماذج الدوال الأساسية:

استخدام المعلومات الهندسية للكاميرا، ومعلومات مدار القمر في التثليث الفضائي والتصحيح العمودي للصور يعطي دقة كبيرة؛ ولكن، وعلى العكس من أقمار (سبوت) الفرنسية وغيرها، تكون هذه المعلومات غير متوفرة في الجيل الجديد من الأقمار التجارية العالية الدقة (مثل ايكونوس، كويكبيرد، جيوآي، وورلدفيو، إلخ)؛ ويتم التغلب على هذه المشكلة باستخدام نموذج الدوال الأساسية (Rational Function Model-RFM) بديلاً عن نموذج الكاميرا الحقيقي الدقيق (Sensor Rigorous Model). ونموذج الدوال الأساسية عبارة عن النسبة بين دالتين متعددي الحدود على النحو التالي:

$$x = \frac{p_1(X,Y,Z)}{p_2(X,Y,Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} a_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} b_{ijk} X^i Y^j Z^k}$$

$$y = \frac{p_3(X,Y,Z)}{p_4(X,Y,Z)} = \frac{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} c_{ijk} X^i Y^j Z^k}{\sum_{i=0}^{m_1} \sum_{j=0}^{m_2} \sum_{k=0}^{m_3} d_{ijk} X^i Y^j Z^k}$$

حيث x ، و y يمثلان إحداثيات الصورة، و X ، Y ، و Z الإحداثيات الأرضية، و a ، و b ، و c ، و d معاملات الدوال الأساسية (Rational Polynomial Coefficients-RPCs). ولحل نموذج الدوال الأساسية (RFM) لغرض استخلاص قيم العوامل، فإنها يجب أن تحول إلى معادلة خطية، وتحل بواسطة ضبط المربعات الدنيا (Least Squares Adjustment). وقد أثبتت كثير من الدراسات أنه عند استخدام نموذج دوال أساسية مناسب فإنه يمكن الحصول على دقة مقاربة للدقة المنتجة باستخدام نموذج الكاميرا الحقيقي. وتوفر كثير من البرامج التجارية هذا النوع من الحلول للتعامل مع صور هذه الأقمار التجارية. فعلى سبيل المثال، يمكن لبرنامج (إيرداس) استخدام البيانات التي تقدمها الشركات المشغلة لهذه الأقمار (وهي الصور، ومعاملات الدوال الأساسية (RPCs)) مع نماذج الارتفاعات الرقمية (DEM) لإنتاج الصور المصححة عمودياً (Ortho Images). وبطريقة أخرى يمكن لهذه البرامج استخدام الصور المجسمة (صور بينها تغطية مشتركة) التي تقدمها أيضاً الشركات المشغلة، ومعاملات الدوال الأساسية (RPCs) لإنتاج الصور المصححة عمودياً وكذلك نماذج الارتفاعات الرقمية.

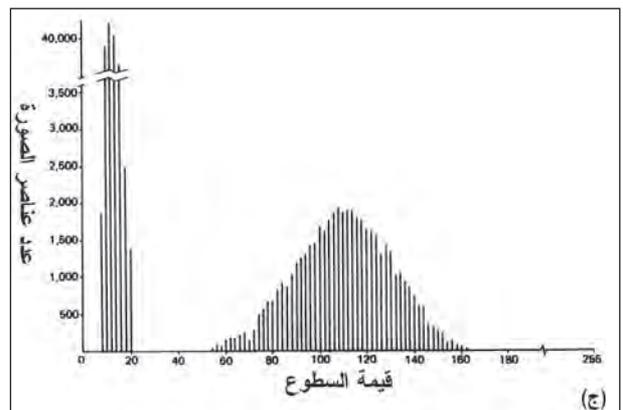
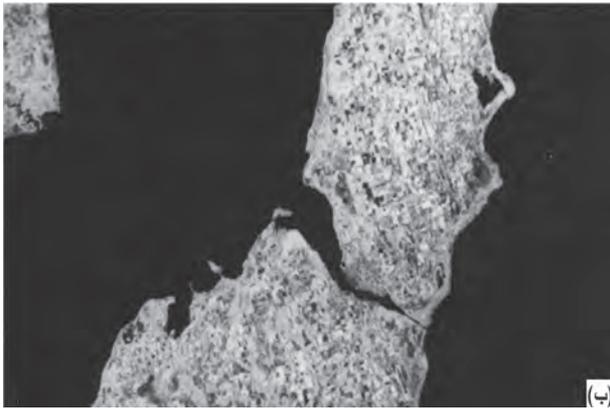
الفصل الثالث |

تحسين الصور

Image Enhancement

1-3 معالجة التباين:

1-1-3 تقنيع الصور:

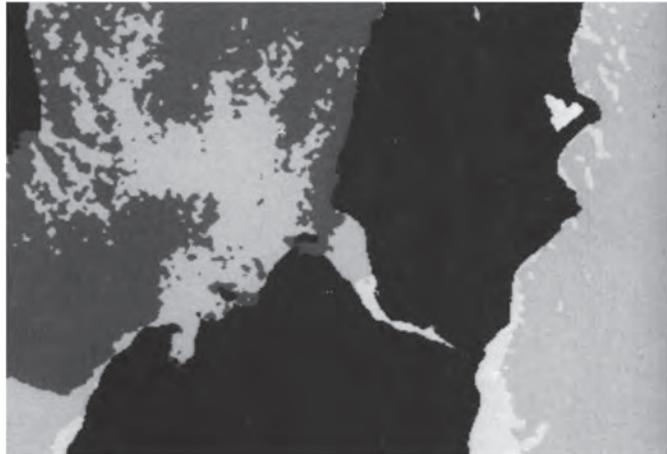


شكل (1-3) الحاجز الإشعاعي، أو تقنيع الصورة. (أ) صورة النطاق الأول (الأزرق) الأصلية لصورة (TM). (ب) صورة النطاق الرابع (تحت الحمراء القريبة) لنفس الصورة. (ج) (هستوغرام) صورة النطاق الرابع. (د) صورة النطاق الأول، وتحتوي على قيم السطوع للماء فقط. المصدر: [1].

تقنيّة الصورة (Image Masking) عبارة عن تجزئة الصورة إلى قسمين، القسم الأول يشتمل على عناصر الصورة ذات قيم السطوع (BV) التي تقل عن القيمة التي يحددها المحلل، وتسمى حاجزاً (Threshold)، والقسم الثاني يشتمل على عناصر الصورة ذات قيم السطوع التي تكون أعلى من القيمة المحددة من قبل المحلل. والغرض من استخدام هذه الطريقة هو عمل قناع على جزء معين من الصورة، مع المحافظة على قيم السطوع في الجزء الآخر من الصورة. ومثال على ذلك هو: عندما نريد أن نحافظ على قيم السطوع لمنطقة مغمورة بالماء، وحجب، أو عمل قناع على اليابسة في النطاق الأول (الأزرق) لصورة (TM) على الرغم من وجود تداخل في قيم السطوع لعناصر الصورة في منطقتي اليابسة والماء (شكل (3-1أ)). في هذه الحالة يُستخدم نطاق تحت الحمراء القريبة (TM4) الذي يعكس الماء فيه بشكل ضعيف جداً (شكل (3-1ب، ج))، ثم يعمل قناع على قيم السطوع الكبيرة ($BV > 40$) التي تمثل اليابسة في هذا النطاق. وبعد تحديد عناصر الصورة التي عمل لها قناع في نطاق تحت الحمراء القريبة، يتم إعطاء عناصر الصورة المقابلة لها في النطاق الأزرق (TM1) القيمة (0). يكون الناتج عبارة عن صورة للنطاق الأزرق تحتوي على التدرج في قيم السطوع للماء فقط (شكل (3-1د)).

3-1-2 التشریح الإشعاعي:

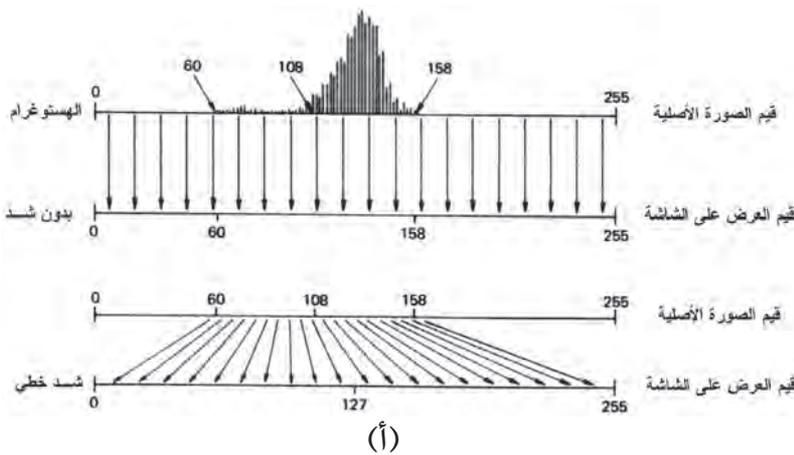
التشریح الإشعاعي (Level Slicing) هو عملية تجزئة قيم السطوع في صورة معينة إلى فترات أو أجزاء معينة، وذلك بتقسيم قيم السطوع الموزعة على محور السينات في الـ (هستوغرام) إلى فترات، يحددها المشغل أو المحلل حسب التطبيقات المطلوبة، كل فترة تحتوي على مدى من قيم السطوع. الشكل (3-2) يمثل هذه العملية بعد تطبيقها على منطقة الماء في صورة النطاق (TM1) الموضحة في الشكل (3-1).



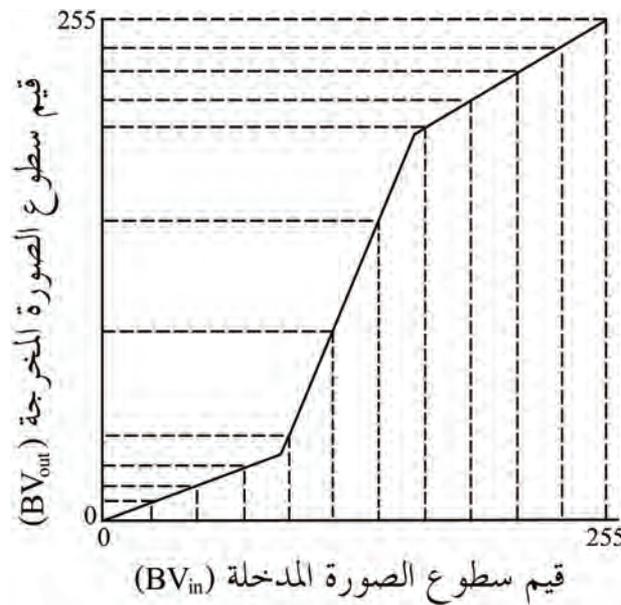
شكل (3-2) عملية تشریح إشعاعي طُبِّقت على منطقة الماء في النطاق الأول من صورة (TM) الموضحة في الشكل (3-1). المصدر: [1].

3-1-3 تحسين التباين:

تستقبل المستشعرات عن بعد الأشعة المنعكسة من المعالم على سطح الأرض، وتختلف كمية الأشعة المنعكسة من معلم إلى آخر عند طول موجي (نطاق) معين وفقاً لعدة أسباب، منها: اختلاف الخصائص الطيفية والهندسية بين المعالم، والاختلاف النسبي لمواقع هذه المعالم بالنسبة للشمس. هذا الاختلاف في الانعكاس يؤدي إلى وجود تباين (Contrast) بين هذه المعالم في الصورة، إلا أن هذا التباين يكون في كثير من الأحيان منخفضاً (Low Contrast Image) نتيجة لعكس هذه المعالم كمية متقاربة من الأشعة؛ لهذا السبب، نجد القليل من الصور تغطي كامل المدى الديناميكي (Dynamic Range) لقيم سطوع جهاز العرض (على سبيل المثال، 0 إلى 255 للمدى الديناميكي 8 بت)، حيث تحتل قيم السطوع لمعظم الصور جزءاً محدوداً فقط من المدى الديناميكي (على سبيل المثال، 0 إلى 100)، وهو ما يؤدي إلى إنتاج صور منخفضة التباين يصعب على المفسر من خلالها القدرة على التفريق بين المعالم المختلفة ذات قيم السطوع المتقاربة (العين البشرية قادرة على التفريق في حدود 8 إلى 16 قيمة سطوع فقط).



وتحسين تباين هذه الصور يتم من خلال الاستفادة من كامل المدى الديناميكي لقيم سطوع جهاز العرض بشد التباين في الصورة الأصلية لاحتلال المدى الضيق من قيم السطوع فيها لكامل المدى الديناميكي، وبالتالي الحصول على صورة يمكن للعين البشرية أن تفرق بين المعالم المختلفة فيها من خلال قيم سطوع متباعدة. لتوضيح هذه العملية، يعرض الشكل (3-3أ) (هستوغرام) صورة لجزء من مدينة الرياض قيم السطوع فيه محصورة في نطاق ضيق من كامل المدى الإشعاعي (قيم السطوع تتراوح بين 60 و 158)؛ فلو عرضنا هذه الصورة بشكلها الحالي على جهاز عرض ذي مدى ديناميكي يساوي 8 بت (شكل (3-3ب))، فإنه لن يتم الاستفادة في هذه الحالة من مدى قيم السطوع الذي يتراوح بين 0 و 59، ومدى قيم السطوع الذي يتراوح بين 59 و 255؛ لذلك، يُلجأ في هذه الحالة إلى مد (شد) المدى الإشعاعي الحالي الضيق للصورة بانتظام على كامل المدى الإشعاعي المتاح لجهاز العرض (شكل (3-3أ)). الشكل (3-3ج) يعرض الصورة الناتجة بعد إجراء شد التباين. ينتج من هذا الشد أن قيم السطوع العالية (Light) تزداد سطوعاً، وقيم السطوع المنخفضة (Dark) تزداد دكافة. شد قيم السطوع بانتظام على كامل مدى العرض هي من أحد أنواع الشد الخطي (Linear Stretch) الذي سنتناوله مع أنماط أخرى من الشد الخطي، وغير الخطي لاحقاً.



شكل (3-4) تمثيل بياني للجدول المرجعي (Look Up Table). المصدر: [10].

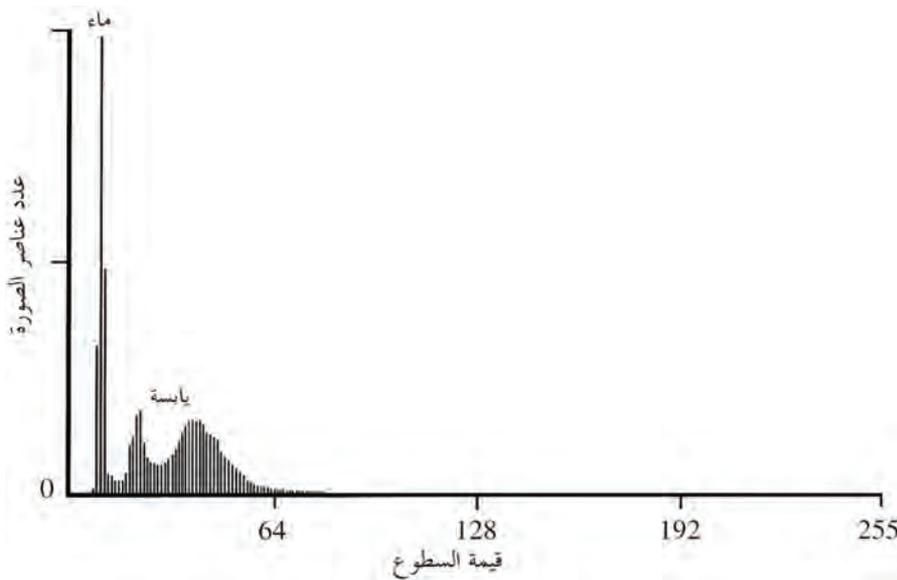
لتسريع عملية الشد باستخدام الحاسب الآلي؛ فإنه قبل إجراء عملية الشد على الصورة يتم تطبيق (من خلال برنامج) خوارزمية الشد المشار إليها آنفاً (على سبيل المثال، الشد المنتظم الخطي) على جميع قيم السطوع المتوافرة في المدى الديناميكي (0 إلى 255، مثلاً)، ومن ثم حساب قيم السطوع المقابلة لها،

ووضعها في جدول يسمى جدول المرجع (Look Up Table). هذا الجدول سيحتوي على جميع قيم السطوع المتوافرة بالمدى الديناميكي (BV_{in})، وما يقابلها من قيم السطوع المُخرجة (BV_{out}) (شكل (3-4)). بعد ذلك (وأثناء المعالجة) يقوم البرنامج بالمرور على كل عنصر (Pixel) في الصورة المُدخلة (غير المشدودة)، ويقرأ قيمة السطوع له، ثم يبحث عما يقابلها من القيم المُخرجة في الجدول المرجعي، ثم يعوض بقيمتها في الصورة المُخرجة (المشدودة).

سنترك فيما يلي إلى بعض من الطرق الأكثر استخداماً في عملية شد تباين الصور.

3-1-3-1 شد التباين الخطي:

شد التباين بشكل عام، وكما أشير (سابقاً) عبارة عن: مد أو توسيع قيم سطوع الصورة المُدخلة (الأصلية) بالاستفادة من المدى الكلي لقيم السطوع المتوافرة لجهاز العرض؛ وشد التباين الخطي (Linear Contrast Stretching)، أو ما يسمى بشد التباين الخطي المنتظم، هو أحد أنواع شد التباين، والتطبيق الأمثل له يتم على صور الاستشعار عن بعد التي يأخذ شكل الـ (هستوغرام) لها شكل التوزيع القياسي (Normal Distribution)، أو "توزيع جاوس" (Gaussian Distribution)، أو قريباً منه. يعني (هستوغرام جاوس) أن تكون جميع قيم السطوع محصورة في مدى ضيق أحادي (Single Mode)، وهي حالة مثالية قليل وجودها، وخصوصاً في الصور التي تحتوي على معالم مختلفة الانعكاسات كالماء واليابسة (شكل (3-5)).

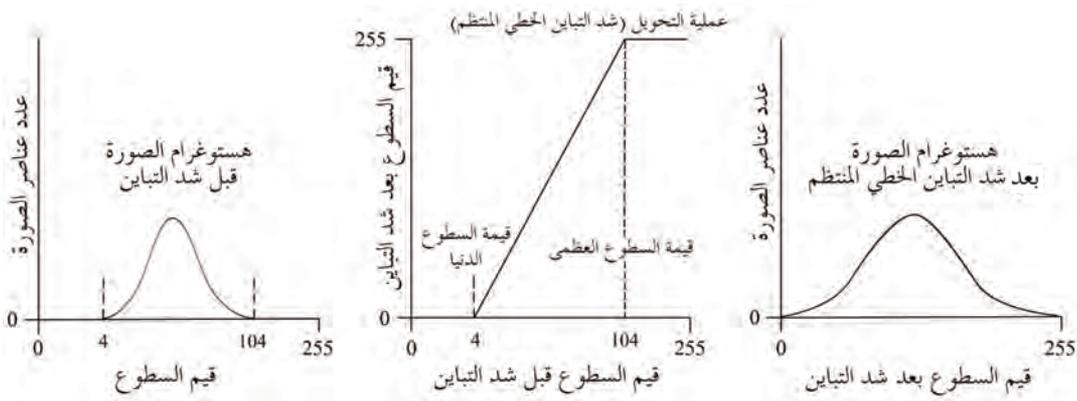


شكل (3-5) نموذج لـ (هستوغرام) متعدد الصيغ (Multiple Modes)؛ يوضح أن الصورة تحتوي على معالم مختلفة الانعكاس تشمل الماء واليابسة. المصدر: [7].

لإجراء عملية شد التباين الخطي المنتظم المشار إليه آنفاً، يتعين على المحلل أن يحدد قيمة السطوع القصوى (max_k) ، وقيمة السطوع الدنيا (min_k) ، ومن ثم حساب قيمة السطوع لأي عنصر في الصورة المخرجة حساب المعادلة التالية:

$$BV_{out} = \frac{BV_{in} - min_k}{max_k - min_k} quant_k$$

حيث BV_{in} قيمة السطوع لعنصر الصورة قبل الشد، و BV_{out} قيمة السطوع لعنصر الصورة بعد الشد، و $quant_k$ طول المدى الديناميكي الذي يمكن عرض قيم السطوع الناتجة من عملية الشد عليه (شكل (6-3)).

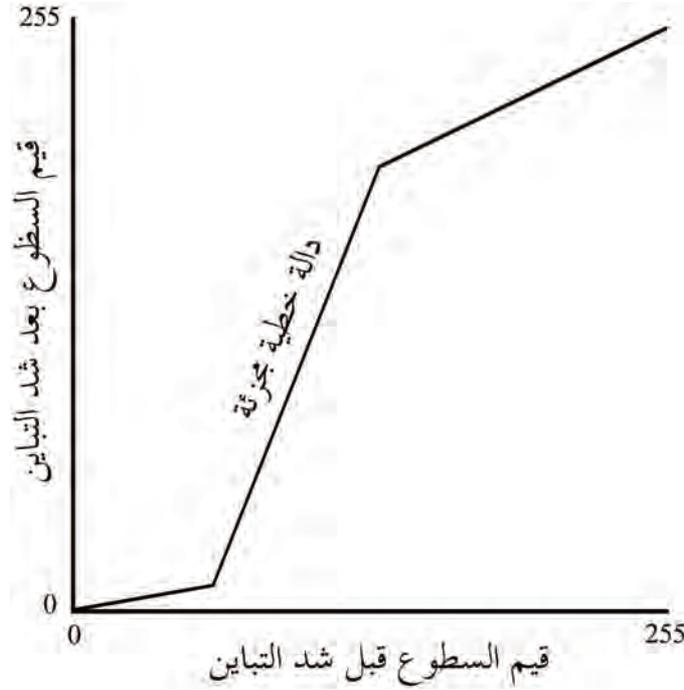


شكل (6-3) النتيجة النظرية لشد التباين الخطي المنتظم لصورة ذات هستوغرام بخاصية توزيع "جاوس" (Gaussian Distribution). المصدر: [7].

من عيوب الشد الخطي المنتظم أن الأعداد القليلة من عناصر الصورة تأخذ مدى من قيم السطوع مساوٍ لمدى الأعداد الكبيرة من عناصر الصورة؛ وتبرز هذه السلبية في الصور التي لا يحمل الـ (هستوغرام) لها طبيعة (جاوس)، أو يكون ثنائي الصيغ (Bi-modal) أو ثلاثي الصيغ (Tri-modal)، إلخ؛ وللتغلب على هذه المشكلة، يتم تطبيق نوع آخر من شد التباين الخطي، وهو الشد الخطي المجزأ (Piecewise Linear Stretch)، وهو عبارة عن قطع من الخطوط المستقيمة متصلة بعضها ببعض بنقاط تسمى نقاط انفصال (Break Points) (شكل (7-3)).

تُمكن هذه الطريقة من توزيع قيم السطوع للصورة المطلوب شدها على عدة فترات من مدى السطوع الكامل لجهاز العرض، بحيث يتم زيادة التباين في بعض مناطق الـ (هستوغرام)، وتنقيصه في مناطق أخرى حسب رغبة المحلل؛ ويستخدم هذا النوع من شد التباين لأغراض تحليلية خاصة، بحيث يُمكن تخصيص نطاق كبير من قيم السطوع في الصورة المخرجة لمدى صغير من قيم السطوع

للصورة المدخلة. فعلى سبيل المثال، إذا كانت المعالم المائية ممثلة بمدى ضيق من قيم السطوع في الصورة المدخلة (قبل الشد)، فيمكن تحسين القدرة على التمييز بين هذه المعالم بشد هذا المدى الضيق من التباين على مدى أوسع من قيم سطوع الصورة المخرجة (قيم العرض).



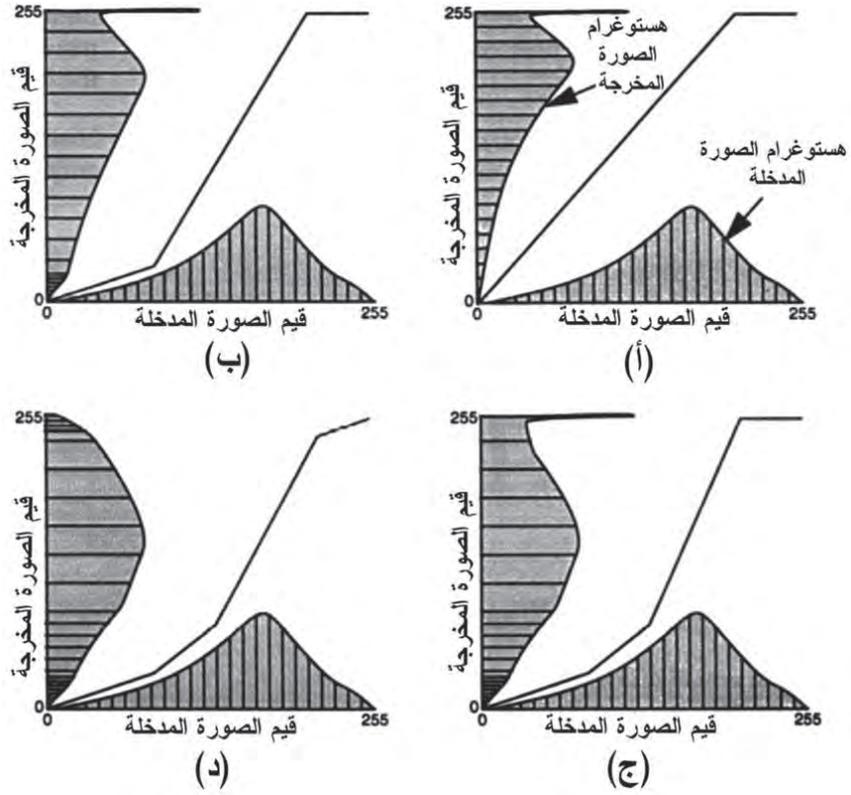
شكل (3-7) مفهوم شد التباين الخطي المجزء. يتم شد أجزاء محددة من الـ(هستوغرام) خطياً؛ ويلاحظ في الشكل التغير في ميل قطع الخطوط المستقيمة. المصدر: [7].

الشكل (3-8) يعرض عدد من نماذج الشد الخطي المجزء.

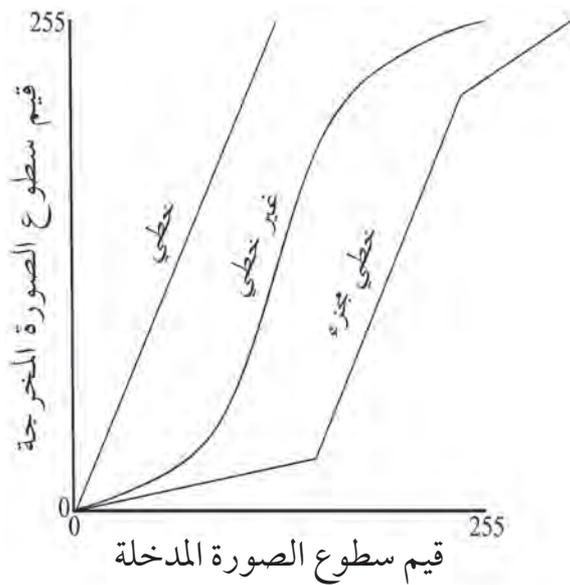
3-1-3-2 شد التباين غير الخطي:

يختلف شد التباين غير الخطي (Non-Linear Contrast Stretching) عن الخطي بأنه يقوم بعملية زيادة أو نقص التباين بشكل تدريجي متغير، وليس خطياً بميل معين (شكل (3-9)).

في هذا النوع من الشد يكون هناك توازن في تخصيص قيم السطوع حسب عدد عناصر الصورة، بحيث يتم تخصيص مدى أكبر من قيم السطوع لعناصر الصورة التي يكثر وجودها في الصورة المدخلة، وبالتالي يكون هناك عدد متساو من عناصر الصورة المخرجة عند كل قيمة سطوع.

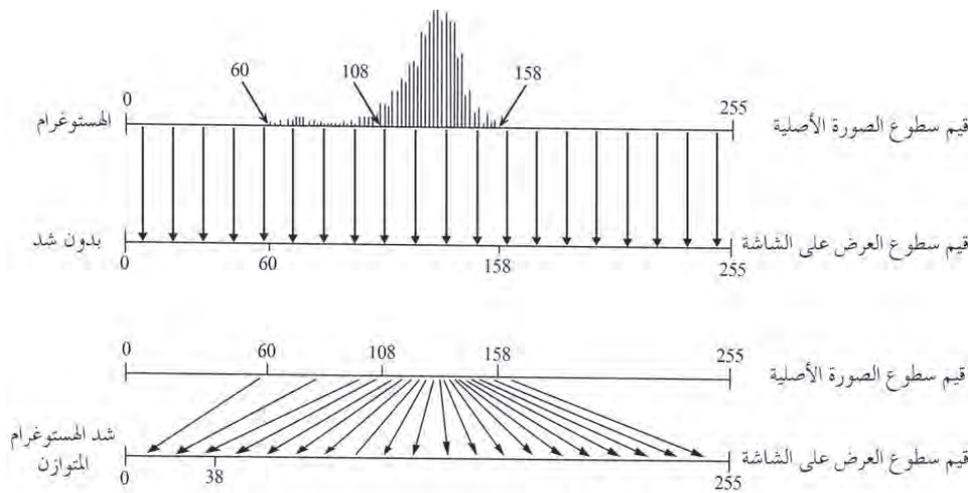


شكل (3-8) نماذج من شد التباين الخطي المجزء. (أ) دالة شد خطي، وتظهر قيم السطوع للصورة المخرجة مقصورة عند 255. (ب) نقطة انفصال أضيفت إلى دالة الشد الخطي المنتظم. (ج) نقطة انفصال أخرى أضيفت إلى دالة الشد الخطي. (د) نقطة الانفصال العلوية في الدالة أزيحت إلى الأسفل اليمين، بحيث تصبح قيم السطوع للصورة المخرجة غير مقصورة عند 255 كما في (أ). المصدر: [10].



شكل (3-9) التباين غير الخطي مقارنة بنوعي شد التباين الخطي. المصدر: [10].

من أنواع شد التباين غير الخطي ما يسمى بشد الـ (هستوغرام) المتوازن (Histogram-Equalized Stretch)؛ في هذا النوع من الشد يتم توزيع قيم السطوع للصورة المدخلة على قيم السطوع للصورة المخرجة بحسب كثرة تكرار وجودها (حسب عدد عناصر الصورة) كما هو واضح من الشكل (3-10). في الشكل (3-10)، تم تخصيص مدى كبيراً في مدى قيم سطوع الصورة المخرجة (من 39 الى 255) لقيم سطوع الصورة المدخلة التي يكثر وجودها (من 108 الى 158)، بينما تم تخصيص مدى ضيق من قيم سطوع الصورة المخرجة لقيم سطوع الصورة المدخلة التي يقل وجودها في الصورة (من 60 الى 108). والمجال لا يتسع هنا لشرح النموذج أو العلاقة الرياضية التي تقوم بهذه العملية.



شكل (3-10) شد الـ (هستوغرام) المتوازن (Histogram-Equalized Stretch) كأحد أنواع شد التباين غير الخطي. المصدر: [1].

3-1-4 مطابقة الـ (هستوغرام):

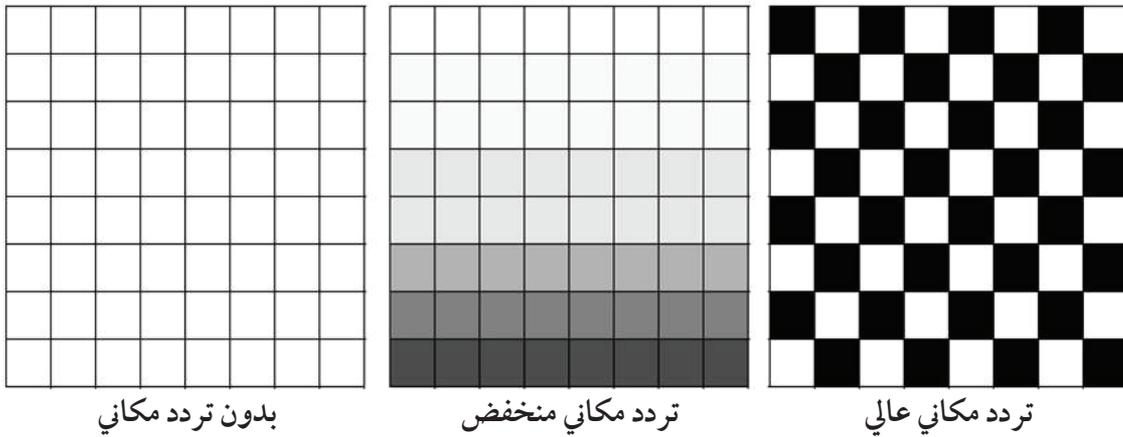
مطابقة الـ (هستوغرام) (Histogram Matching) عبارة عن عملية يتم فيها تغيير (هستوغرام) صورة معينة ليطلق (هستوغرام) صورة أخرى عن طريق تكوين جدول مرجعي (Look up Table) يحول مدى وقيم سطوع الصورة المدخلة إلى مدى وقيم سطوع مقارنة لمدى وقيم سطوع الصورة المرجعية. هذه العملية مفيدة عندما نريد أن نعمل مطابقة بين صورتين متجاورتين يراد تجميعهما (Image Mosaic)، أو عندما نريد عمل مطابقة بين صورتين تغطي نفس المنطقة، وبينهما اختلاف بسيط في قيم السطوع نتيجة للعوامل الجوية أو التغيير في زوايا ميلان الشمس بغرض تحديد التغيرات (Change Detection) التي طرأت في هذه المنطقة خلال فترة معينة، أو لأي غرض آخر.

وللحصول على نتائج مرضية لعملية مطابقة الـ (هستوغرام)، فإنه يتعين تحقق الشروط التالية:

- 1) أن يكون الشكل العام لـ (هستوغرام) (Histogram General Shape) الصورتين متشابهاً.
- 2) أن تكون النسبة بين المعالم المضيئة (Light Features) والمعالم المظلمة (Dark Features) متشابهة.
- 3) أن تكون دقة الوضوح المكانية (Spatial Resolution) للصورتين متساوية.

2-3 التحسين المكاني:

فيما يتعامل التصحيح الإشعاعي (Radiometric Correction) مع كل عنصر من عناصر الصورة (Pixel) مستقلاً، نجد أن التحسين المكاني (Spatial Enhancement) يعدل من قيمة سطوع عنصر الصورة بناء على قيم سطوع عناصر الصورة المحيطة به؛ والتحسين المكاني له علاقة بأحد خصائص الصورة، وهي التردد المكاني (Spatial Frequency). ويُعرّف التردد المكاني بأنه: عدد التغيرات في قيم السطوع لعناصر الصورة في وحدة المسافة. الشكل (3-11) يعرض أمثلة توضح معنى التردد المكاني المرتفع، والمنخفض، والمساوي للصفر.



شكل (3-11) الترددات المكانية (Spatial Frequencies). المصدر: [10].

الصورة ذات التردد المكاني العالي، أو ما يسمى بالصورة الخشنة هي الصورة التي تتغير فيها قيم سطوع عناصر الصورة في مسافة قصيرة (عدد قليل من عناصر الصورة)، كالشوارع داخل المناطق العمرانية، وعلى العكس من ذلك، فالصورة ذات التردد المكاني المنخفض أو ما يسمى بالصورة الناعمة هي الصورة التي تتغير فيها قيم سطوع عناصر الصورة في مسافة طويلة (عدد كبير من عناصر الصورة)، كالحقول الزراعية

الواسعة، أو مناطق الكثبان الرملية الكبيرة.

هناك العديد من الطرق المستخدمة لتحسين المكاني للصورة، إلا أننا سنناقش هنا أهمها، وهي: الترشيح (Filtering)؛ وتتم عملية الترشيح في نطاقين مختلفين هما: النطاق المكاني (Spatial Domain)، والنطاق الترددي (Frequency Domain). وستتناول فيما يلي (وبشيء من التفصيل) هذين النوعين.

1-2-3 الترشيح في النطاق المكاني:

تتم عملية الترشيح في النطاق المكاني باستخدام مرشحات مكانية (Spatial Filters) تقوم بإبراز أو إخفاء البيانات ذات الترددات المكانية العالية، أو المنخفضة في الصورة المطلوب ترشيحها، وهناك نوعان رئيسان من هذه المرشحات المكانية هما: المرشح المنخفض النفاذية (Low-Pass Filter)، والمرشح العالي النفاذية (High-Pass Filter).

1-1-2-3 المرشح المنخفض النفاذية:

المرشح المنخفض النفاذية مصمّم إما لإزالة الضوضاء من الصورة، أو لإبراز المعالم ذات التردد المكاني المنخفض، وحجب المعالم ذات التردد المكاني العالي؛ وتتم أبسط أشكال عملية الترشيح المنخفض النفاذية باستبدال قيمة سطوع عنصر الصورة المدخلة (غير المرشحة) بمتوسط موزون (Weighted Average) لقيم سطوع العناصر المحيطة به؛ وتتم هذه العملية بتمرير نافذة (Window) ذات مقاس معين، تمثل المرشح المنخفض النفاذية، على الصورة المدخلة كما في الشكل (3-12)، ثم ضرب قيمة السطوع لكل عنصر من عناصر الصورة المدخلة بالمعامل (Coefficient) المقابل له في النافذة، ثم جمع هذه القيم وقسمتها على عدد عناصر النافذة للحصول على متوسط قيم سطوع هذه العناصر، ثم التعويض بهذه القيمة (قيمة بديلة) لقيمة سطوع العنصر الذي يقع في مركز النافذة من الصورة المدخلة (BV_5). ويمكن صياغة خوارزمية هذه العملية لنافذة ذات مقاس (3×3) على النحو التالي:

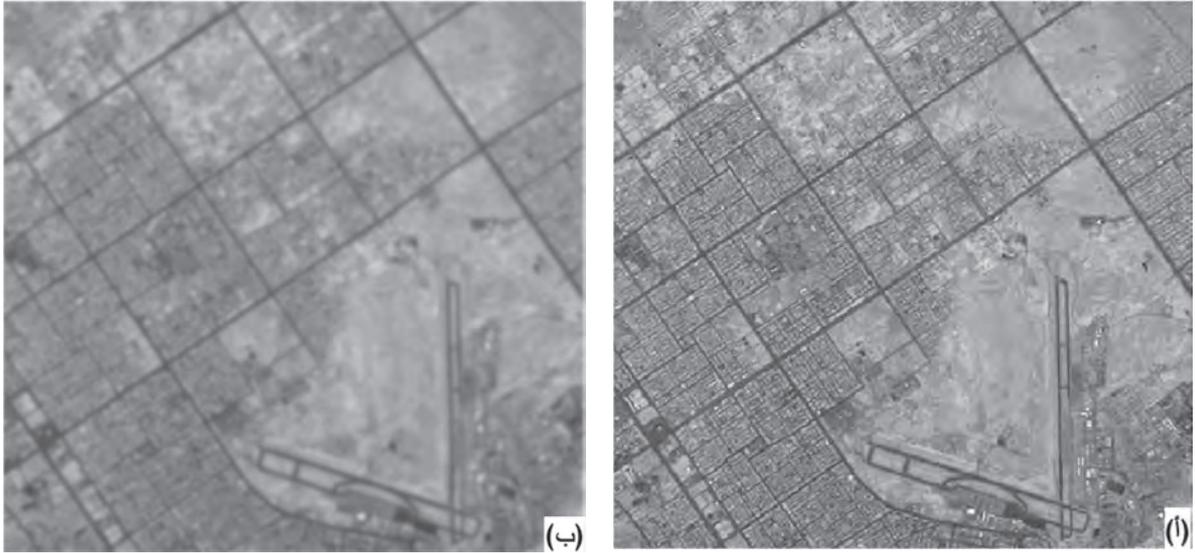
$$BV_{5,out} = \text{Int} \frac{\sum_{i=1}^{n=9} c_i * BV_i}{n} = \text{Int} \frac{C_1 * BV_1 + C_2 * BV_2 + \dots + C_9 * BV_9}{9}$$

حيث $BV_{5,out}$ قيمة السطوع الناتجة من عملية الترشيح لعنصر الصورة الواقع بمركز النافذة، و C مُعامل الوزن لقيمة سطوع عنصر الصورة المدخلة، و $BV_{1,2,\dots,9}$ قيم سطوع عناصر الصورة المدخلة في نافذة الترشيح.

1	1	1
1	1	1
1	1	1

شكل (3-12) نافذة مرشح منخفض النفاذية مقاس (3×3). قيم عوامل هذه النافذة تنتج متوسطاً بسيطاً لقيم سطوع عناصر الصورة المحيطة بعنصر مركز النافذة.

تمر هذه النافذة على جميع عناصر الصورة الأصلية، وتجري عليها نفس العملية الحسابية السابقة، لتنتج صورة جديدة مرشحة. الشكل (3-13) يوضح أثر المرشح المنخفض النفاذية على صورة أحادية الطيف (Panchromatic) من القمر الفرنسي (سبوت).



شكل (3-13) تأثير تطبيق المرشح المنخفض النفاذية على الصورة. (أ) نفس الصورة أحادية الطيف للقمر الفرنسي (سبوت) المعروضة في الشكل (3-3) ب) جزء من مدينة الرياض. (ب) نفس الصورة بعد تطبيق مرشح منخفض النفاذية عليها.

يعمل المرشح المنخفض النفاذية على تنعيم الصورة وإظهارها أكثر ضبابية (غشاوة)؛ وكلما زاد مقاس النافذة (9×9، مثلاً)، كلما كانت درجة نعومة وضبابية الصورة أكبر. وللتقليل من الضبابية التي تظهر في الصورة المرشحة، فإنه يتم تطبيق نوافذ بعوامل أوزان غير متساوية (Unequal Weighted Window) كما في الشكل (3-14).

0.25	0.50	0.25
0.50	1.00	0.50
0.25	1.00	0.25

شكل (3-14) نافذة مرشح منخفض النفاذية بعوامل أوزان غير متساوية.

نظراً لكون مقاس النافذة فردياً (3×3، 5×5، ... إلخ)، فإن الصورة الناتجة (المرشحة) تكون أصغر من الصورة الأصلية بعمودين (عمود في كل طرف من طرفي الصورة) وصفين (صف في كل طرف من طرفي الصورة). وللتغلب على هذه المشكلة، فإنه يتم اللجوء إلى بعض التقنيات التي منها زيادة مقاس الصورة المدخلة صناعياً بتكرار قيم العناصر على أطراف الصورة.

3-2-1-2-3 المرشح العالي النفاذية:

على العكس من المرشح المنخفض النفاذية، نجد أن المرشح العالي النفاذية (High-Pass Filter) مصمم لإبراز المعالم ذات التردد المكاني العالي كالطرق في المناطق العمرانية، وحجب المعالم ذات التردد المكاني المنخفض، وهي المعالم قليلة التغير في النطاق المكاني كالحقول الزراعية الواسعة. ويمكن تكوين مرشح ذي نفاذية عالية مبسط بطرح قيمة سطوع عنصر الصورة الناتجة من المرشح المنخفض النفاذية من ضعف قيمة سطوع عنصر الصورة المقابل لها في الصورة الأصلية.

$$BV_{high} = 2BV_{orig} - BV_{low}$$

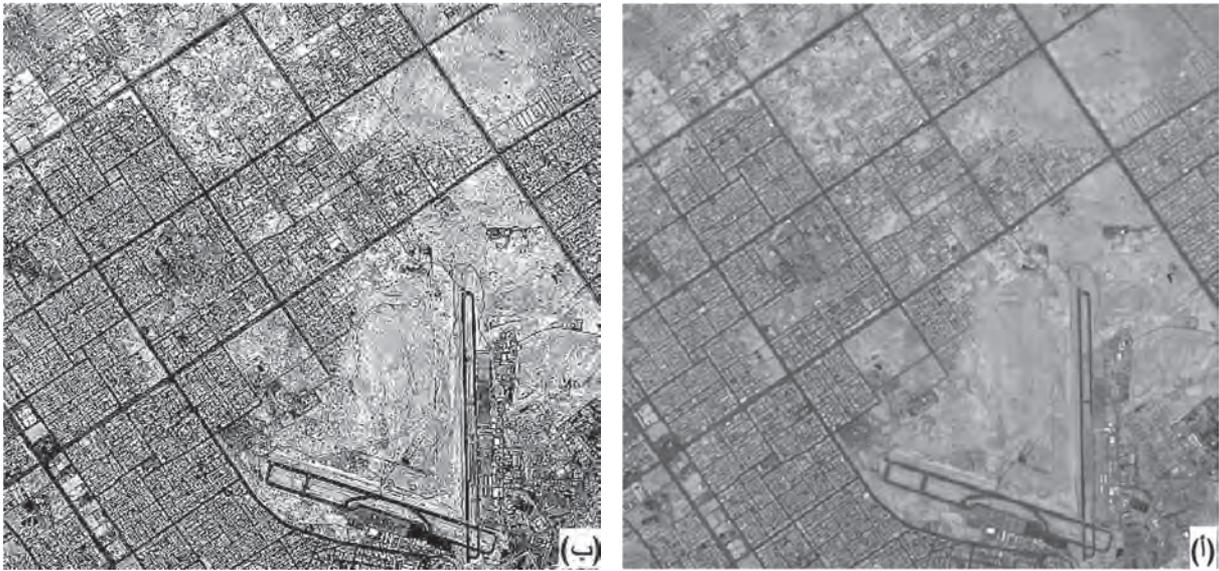
حيث BV_{high} قيمة السطوع الناتجة من الترشيح العالي النفاذية، و BV_{orig} قيمة سطوع الصورة المدخلة، و BV_{low} قيمة السطوع الناتجة من الترشيح المنخفض النفاذية.

الشكل (3-15) يعرض بعض الأمثلة على النوافذ المستخدمة في الترشيح العالي النفاذية.

يكون (هستوغرام) الصورة الناتجة من عملية الترشيح العالي النفاذية في العادة ضيقاً نسبياً (قيم عناصر الصورة المرشحة تحتل جزءاً صغيراً من مدى قيم السطوع لجهاز العرض). لذلك، يُفضل بعد إجراء عملية الترشيح العالي النفاذية أن يتم عمل شد لتباين الصورة المرشحة قبل معاينتها بصرياً. الشكل (3-16) يوضح أثر المرشح العالي النفاذية.

1	-2	1	-1	-1	-1
-2	5	-2	-1	9	-1
1	-2	1	-1	-1	-1

شكل (3-15) نافذتان لمرشحين عاليي النفاذية مقاس (3×3).



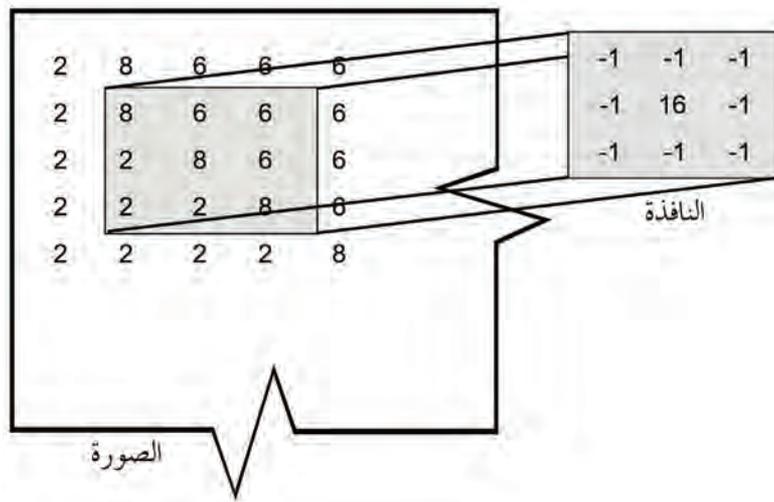
شكل (3-16) تأثير تطبيق المرشح العالي النفاذية على الصورة. (أ) نفس الصورة أحادية الطيف للقمر الفرنسي (سبوت) المعروضة في الشكل (3-3) لجزء من مدينة الرياض. (ب) نفس الصورة بعد تطبيق مرشح عالي النفاذية عليها.

3-1-2-3-3 الطي:

عملية الطي (Convolution) ليست جديدة، وإنما تم التطرق إليها في المرشحات المكانية العالية والمنخفضة النفاذية؛ وهي عبارة عن تمرير نافذة (نواة) (Kernel) تحتوي على معاملات، وتكون في الغالب مربعة (3×3، أو 5×5،..... إلخ) على الصورة المدخلة (الأصلية المراد إجراء عملية الطي عليها)، ثم حساب قيمة السطوع لعنصر الصورة المخرجة الواقع في مركز النافذة عن طريق إجراء عملية حسابية بين عوامل النافذة، وقيم سطوع عناصر الصورة المدخلة؛ وتتم هذه العملية على كل عنصر من عناصر الصورة المدخلة بشكل مماثل لما كان معمول به في المرشحات المكانية التي تم التطرق إليها سابقاً؛ لذلك هناك من يرى بأن الترشيح المكاني يعد واحداً من التطبيقات المختلفة لعملية الطي،

وهناك من يرى أن عملية الطي تعد واحدة من طرق الترشيح المكاني، وهناك أيضاً من يعتبرهما كلمتين مترادفتين.

الشكل (3-17) يعرض نافذة طي مقاس (3×3) تُستخدم لإبراز الظواهر الخطية كما في الترشيح العالي النفاذية؛ وتتم هذه العملية بضرب كل معامل من معاملات نافذة الطي بما يقابله من قيم سطوع عناصر الصورة المدخلة، ثم إضافة القيم الناتجة جبرياً، وقسمة المجموع على المجموع الجبري لعوامل النافذة للحصول على عناصر صورة تنحصر قيم سطوعها في مدى قيم سطوع عناصر الصورة المدخلة (الأصلية).



شكل (3-17) تطبيق نافذة (نواة) طي (Convolution Kernel) مقاس (3×3) تُستخدم لإبراز الظواهر الخطية. المصدر: [10].

الشكل (3-18) يعرض قيم سطوع الصورة المخرجة بعد إجراء عملية الطي على الصورة المدخلة الموضحة في الشكل (3-17).

	1	2	3	4	5
1	2	8	6	6	6
2	2	11	5	6	6
3	2	0	11	6	6
4	2	2	2	8	6
5	2	2	2	2	8

شكل (3-18) القيم الناتجة من عملية نافذة الطي الموضحة في الشكل (3-17). المصدر: [10].

الشكل (3-19) يعرض مثلاً آخرًا على عملية الطي لإنتاج صورة ذات ترشيح مكاني منخفض باستخدام نافذة مقاس (3×3) قيم عواملها تساوي $\frac{1}{9}$ ؛ وإجراء عملية الطي على الصورة المدخلة باستخدام هذه النافذة تتم عن طريق الجمع الجبري لنتائج ضرب العوامل في قيم سطوع عناصر الصورة المدخلة.

ج. قيمة الصورة المطوية	ب. قيم الصورة الأصلية	أ. النافذة
	67	1/9
	67	1/9
70	70	1/9
	68	1/9
	71	1/9
	72	1/9
	71	1/9
	72	1/9

$$\begin{aligned} & \frac{1}{9}(67) + \frac{1}{9}(67) + \frac{1}{9}(72) + \\ & \frac{1}{9}(70) + \frac{1}{9}(68) + \frac{1}{9}(71) + \\ & \frac{1}{9}(72) + \frac{1}{9}(71) + \frac{1}{9}(72) = \\ & \frac{630}{9} = 70 \end{aligned}$$

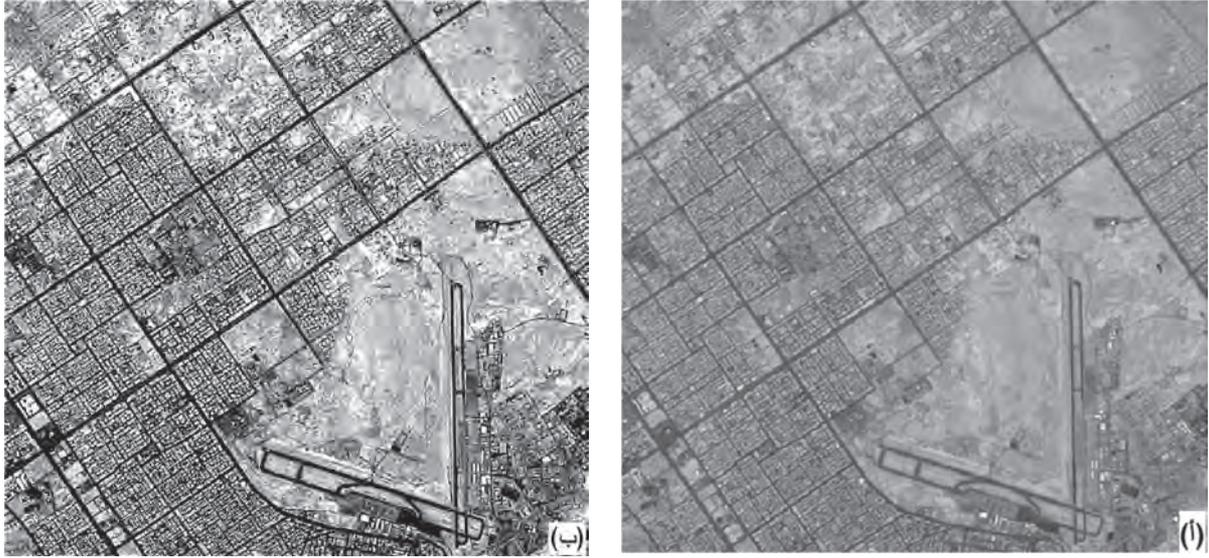
شكل (3-19) عملية طي لإنتاج صورة ذات ترشيح منخفض. (أ) النافذة المستخدمة في عملية الطي مقاس (3×3) وقيم عواملها تساوي $\frac{1}{9}$. (ب) قيم سطوع عناصر الصورة المدخلة الواقعة في النافذة. (ج) قيمة سطوع عنصر الصورة المخرجة في مركز النافذة بعد إجراء عملية الطي، وتساوي متوسط قيم عناصر الصورة المدخلة الواقعة في النافذة. المصدر: [1].

3-2-1-4 تحسين الحواف:

معظم المعلومات التي يمكن أن تُستخلص من الصور الفضائية في تطبيقات الاستشعار عن بعد المختلفة تكون موجودة في الحواف (الحدود) التي تحيط بالمعالم ذات الاهتمام؛ والحواف التي تراها العين البشرية هي ببساطة عبارة عن التغير في قيم السطوع بين عناصر الصورة المتجاورة؛ وتقنية تحسين الحواف (Edge Enhancement) تزيد من وضوح هذه الحواف، ومن إمكانية تحليلها ودراستها بعمق أكثر.

عملية الترشيح العالي النفاذية للصورة التي يتم تصميمها لإبراز المعالم ذات التردد العالي (المعالم الخطية، كالطرق وغيرها) تعاني من مشكلة عدم المحافظة على المعالم ذات التردد المنخفض في الصورة، كالحقول الزراعية الواسعة، وغيرها؛ لذلك تأتي أهمية عملية تحسين الحواف بإبراز المعالم ذات التردد العالي مع المحافظة قدر الإمكان على المعالم ذات التردد المنخفض؛ وتتم هذه العملية (باختصار) بأن يتم أولاً ترشيح الصورة بمرشح عالي النفاذية (شكل (3-16 ب))، ثم إضافة كامل قيمة سطوع عنصر الصورة في

الصورة المدخلة، أو الجزء المتبقي منه بعد الترشيح العالي النفاذية إلى قيمة عنصر الصورة المرشحة، ثم شد تباين الصورة الناتجة المحسنة حوافها (شكل 3-20 ب).



شكل (3-20) تأثير تحسين الحواف على الصورة. (أ) نفس الصورة أحادية الطيف للقمر الفرنسي (سبوت) المعروضة في الشكل (3-3 ب) لجزء من مدينة الرياض. (ب) نفس الصورة بعد إجراء عملية تحسين حواف لها.

تحسين حواف الصورة يتم بطريقتين، إما بطريقة خطية (Linear Edge Enhancement)، أو بطريقة غير خطية (Non-Linear Edge Enhancement). وستتناول هنا بشيء من التفصيل هاتين الطريقتين.

تحسين الحواف الخطي:

من الطرق المبسطة لتحسين الحواف خطياً إجراء الفرق المتحرك (Running Difference Operation) بطرح قيمة عنصر الصورة من الذي يليه في الاتجاه الذي نريد إبراز الحواف فيه. ويمكن لعملية تحسين الحواف أن تتم في أي اتجاه يريده المحلل، والعلاقات الرياضية المذكورة أدناه تقوم بعملية تحسين الحواف أفقياً وعمودياً وقطرياً:

$$\begin{aligned}
 BV_{out,i,j} &= BV_{in,i,j} - BV_{in,i,j+1} + K && \text{- تحسن الحواف الرأسية} \\
 BV_{out,i,j} &= BV_{in,i,j} - BV_{in,i-1,j} + K && \text{- تحسن الحواف الأفقية} \\
 BV_{out,i,j} &= BV_{in,i,j} - BV_{in,i+1,j+1} + K && \text{- تحسن الحواف القطرية (شمال شرق)} \\
 BV_{out,i,j} &= BV_{in,i,j} - BV_{in,i-1,j+1} + K && \text{- تحسن الحواف القطرية (جنوب شرق)}
 \end{aligned}$$

ويُنتج من عملية الطرح إما قيمة سالبة أو قيمة موجبة، ولهذا تضاف قيمة (K) (تساوي عادة 127) للقيم السالبة الناتجة من عملية الطرح لجعل قيمة السطوع الناتجة موجبة، وتقع بين 0 و255. ويؤدي ذلك إلى جعل قيم السطوع الناتجة لعناصر الصورة المتجاورة ذات قيم السطوع المتقاربة في الصورة المدخلة الأصلية قريبةً من قيمة 127، أما إذا كان هناك اختلاف كبير بين قيم السطوع لعناصر الصورة المتجاورة، فإن قيم السطوع الناتجة تبتعد كثيراً عن قيمة 127 سواء إلى الأعلى (حتى 255) أم إلى الأدنى (حتى 0)؛ ولذلك فإن الصورة الناتجة تصبح وكأنها عمل لها شد للتلوين.

من العمليات الأخرى لتحسين الحواف خطياً تحسين الحواف في بعدين (Two Dimensional)، بدلاً من بعد واحد كما ذكر آنفاً، باستخدام نوافذ تسمى "أفئعة البوصلة المائلة" (Compass Gradient Masks) التي من أمثلتها ما يلي:

-1	1	1
-1	-2	1
-1	1	1

نافذة تظهر الحواف
الشمالية الشرقية

1	1	1
-1	-2	1
-1	-1	1

نافذة تظهر الحواف
الشرقية

1	1	1
1	-2	1
-1	-1	-1

نافذة تظهر الحواف
الشمالية

وبنفس المبدأ يمكن تكوين نوافذ بوصلة مائلة أخرى تظهر الحواف في الاتجاهات المختلفة الأخرى (الغرب، الجنوب، الجنوب الغربي، الخ).

من النوافذ الأخرى التي تهدف إلى إبراز الحواف "طبي لابلاس" (Laplace Convolution) التي من أمثلتها ما يلي:

(ج)

-1	1	1
-1	-2	1
-1	1	1

نافذة تظهر الحواف
الشمالية الشرقية

(ب)

1	1	1
-1	-2	1
-1	-1	1

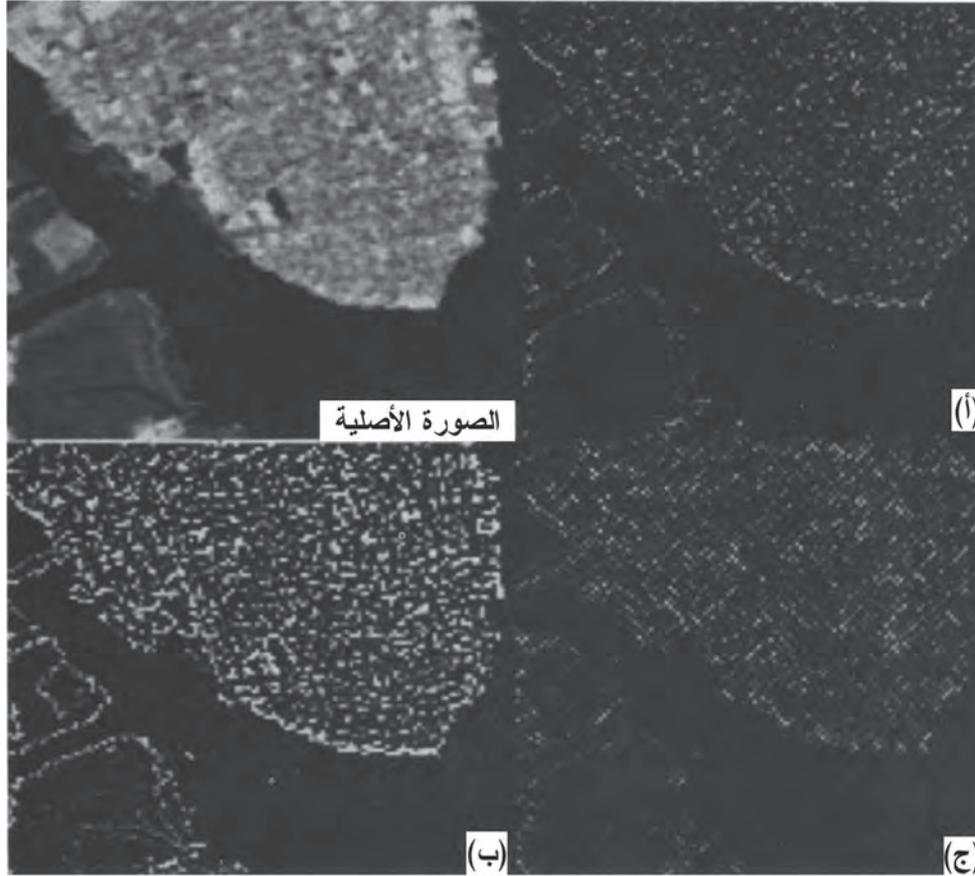
نافذة تظهر الحواف
الشرقية

(أ)

1	1	1
1	-2	1
-1	-1	-1

نافذة تظهر الحواف
الشمالية

الشكل (3-21) يعرض نتائج تطبيق نوافذ لابلاس السابقة على النطاق الرابع (تحت الحمراء القريبة) لصورة (TM)؛ ويتضح من خلال الشكل أن أياً من النوافذ الثلاث لم تحسن الحواف في المناطق الحضرية.



شكل (3-21) تطبيق نوافذ لابلاس (أ)، و(ب)، و(ج) على النطاق الرابع لصورة (TM). المصدر: [4].

ونتيجة للصعوبة في تفسير الصورة الناتجة من عملية تحسين الحواف باستخدام طي (لابلاس)، فإنه يتم إضافة الصورة الناتجة للصورة الأصلية مرة أخرى باستخدام النافذة التالية:

(د)

0	-1	0
-1	5	-1
0	-1	0

الشكل (3-22) يعرض نتيجة إضافة تحسين (لابلاس) إلى الصورة الأصلية الموضحة في الشكل (3-21) عن طريق النافذة (د)؛ وهذه الطريقة تعد من أحسن الطرق لتحسين المعالم ذات التردد العالي في المناطق الحضرية.



شكل (3-22) نتيجة تطبيق النافذة (د) على نفس الصورة الأصلية الموضحة في الشكل (3-21). هذه النافذة تحسب حواف (لابلاس)، وتضيفه إلى الصورة الأصلية. لاحظ الزيادة في تفاصيل المعالم الحضرية. المصدر: [4].

تحسين الحواف غير الخطي:

تتم عملية تحسين الحواف غير الخطي باستخدام إتحاد غير خطي من قيم عناصر الصورة، وباستخدام نوافذ بمقاس (2×2) أو (3×3). ومن الطرق المستخدمة في هذه العملية ما يسمى بـ"كاشف سوبل للحواف" (Sobel's Edge Detector)، وهو عبارة عن نافذة (3×3) تمر على عناصر الصورة الأصلية، وتجري عليها العملية الرياضية التالية:

BV ₁	BV ₂	BV ₃
BV ₄	BV ₅	BV ₆
BV ₇	BV ₈	BV ₉

$$\text{Sobel} = (X^2 + Y^2)^{1/2}$$

حيث:

Sobel: قيمة عنصر الصورة المحسنة،

$$X = (BV_3 + 2BV_6 + BV_9) - (BV_1 + 2BV_4 + BV_7)$$

$$Y = (BV_1 + 2BV_2 + BV_3) - (BV_7 + 2BV_8 + BV_9)$$

ويمكن - أيضاً - اكتشاف الحواف مباشرة بـ "كاشف سوبل للحواف" باستخدام النوافذ التالية:

$$X = \begin{array}{|c|c|c|} \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline -2 & 0 & 2 \\ \hline -1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array} \quad Y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 1 & 2 & 1 \\ \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline -1 & -2 & -1 \\ \hline \end{array}$$

$$\text{Sobel} = (X^2 + Y^2)^{1/2}$$

ومن الكاشفات الأخرى للحواف "كاشف روبرت للحواف" (Robert's Edge Detector)، الذي يتم من خلاله اكتشاف الحواف عن طريق العملية الرياضية التالية:

$$\text{Robert} = X + Y$$

حيث:

Robert: قيمة عنصر الصورة المحسنة،

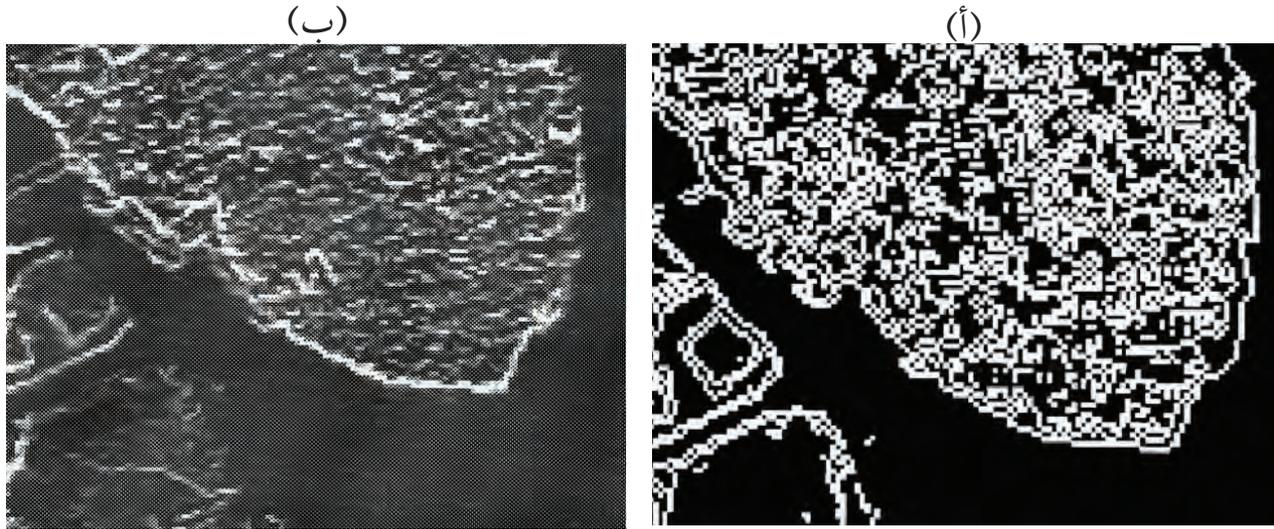
$$X = |BV_5 - BV_9|$$

$$Y = |BV_6 - BV_8|$$

ويمكن - أيضاً - اكتشاف الحواف مباشرة بـ "كاشف روبرت للحواف" باستخدام النوافذ التالية:

$$X = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 1 & 0 \\ \hline 0 & 0 & -1 \\ \hline \end{array} \quad Y = \begin{array}{|c|c|c|} \hline 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 1 \\ \hline 0 & -1 & 0 \\ \hline \end{array}$$

الشكل (3-23) يوضح أثر تطبيق "كاشفي سوبل وروبرت للحواف" على النطاق الرابع لصورة (TM) الأصلية الموضحة في الشكل (3-21).



شكل (3-23) تطبيق بعض عمليات تحسين الحواف غير الخطي للنطاق الرابع لصورة (TM). (أ) صورة الحواف الناتجة من تطبيق "كاشف سوبل للحواف". (ب) صورة الحواف الناتجة من تطبيق "كاشف روبرت للحواف". المصدر: [7].

3-2-2-2 الترشيح في النطاق الترددي:

الترشيح المكاني الذي كنا قد تناولناه كان في النطاق المكاني (Spatial Domain) باستخدام الإحداثيات، أو الأبعاد المكانية للصورة الأصلية (y,x) ، إلا أن هناك نظام إحداثيات (محاور) آخر يمكن من خلاله ترشيح الصورة، وهو النطاق الترددي (Frequency Domain)؛ ويتم ذلك رياضياً بفصل الصورة إلى مكوناتها الأساسية من الترددات المكانية عن طريق "تحويل فوريير" (Fourier Transform)، نسبة إلى العالم (فوريير). وفي وقت لاحق تم تطوير هذا التحويل، وأصبح يسمى "تحويل فوريير السريع" (Fast Fourier Transform-FFT).

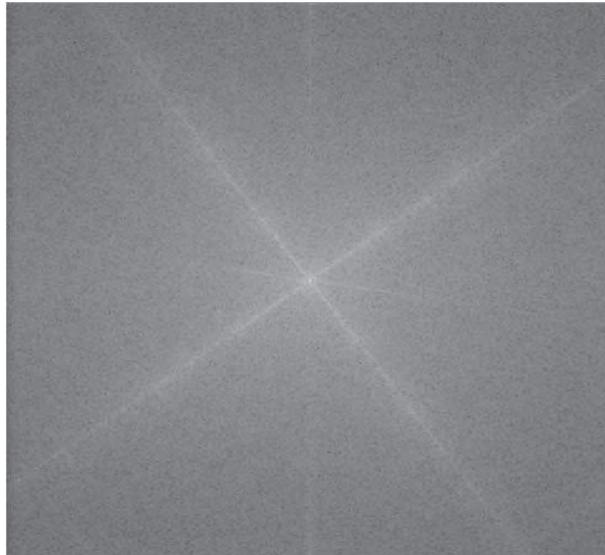
الوصف الرياضي لهذا التحويل خارج عن نطاق هذا المقرر، إلا أنه باختصار محاولة تكوين دالة مستمرة (Continuous Function) لتمثيل قيم السطوع المنفصلة (Discrete BV Values) على امتداد صف أو عمود في الصورة. ويتم ذلك بتمثيل القمم (Peaks)، والقيعان (Valleys) لقيم سطوع عناصر الصورة على امتداد الصف، أو العمود في الصورة باتحادٍ من موجات الجيب (جا)، وجيب التمام (جتا)، وبترددات (Frequencies)، وقوة إشارات (Amplitude)، وأطوار (Phases) مختلفة. وبعد فصل الصورة إلى مكوناتها الأساسية من الترددات المكانية المتعددة يمكن عرض هذه القيم على رسم مبعثر (Scatter Plot) ثنائي الأبعاد يعرف بـ "طيف فوريير" (Fourier Spectrum) (شكل (3-24)).

تُرسَم الترددات المنخفضة (Low Frequencies) حول مركز الطيف، وتدرجياً وإلى خارج المركز ترسم الترددات العالية. المعالم الأفقية في الصورة الأصلية تشكل المركبات العمودية في الطيف، فيما تشكل المعالم العمودية المركبات الأفقية.

(أ)



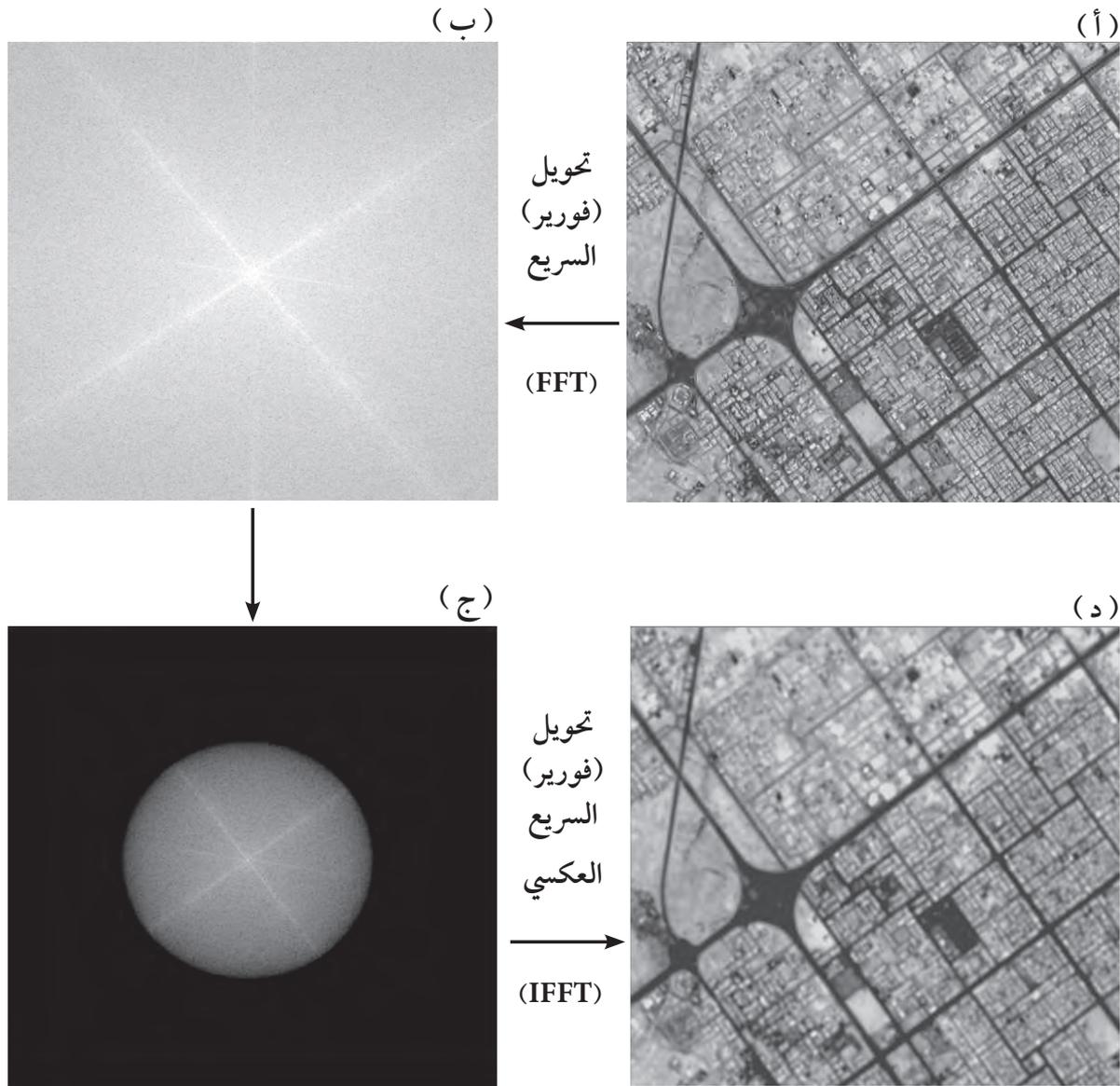
(ب)



شكل (3-24) تحويل (فورير) (أ) الصورة الأصلية (في النطاق المكاني)، وهي عبارة عن صورة أحادية الطيف (غير ملونة) للقمر الفرنسي (سبوت) لمنطقة صغيرة تقع شمال مدينة الرياض. (ب) طيف (فورير) (في النطاق الترددي) لهذه الصورة.

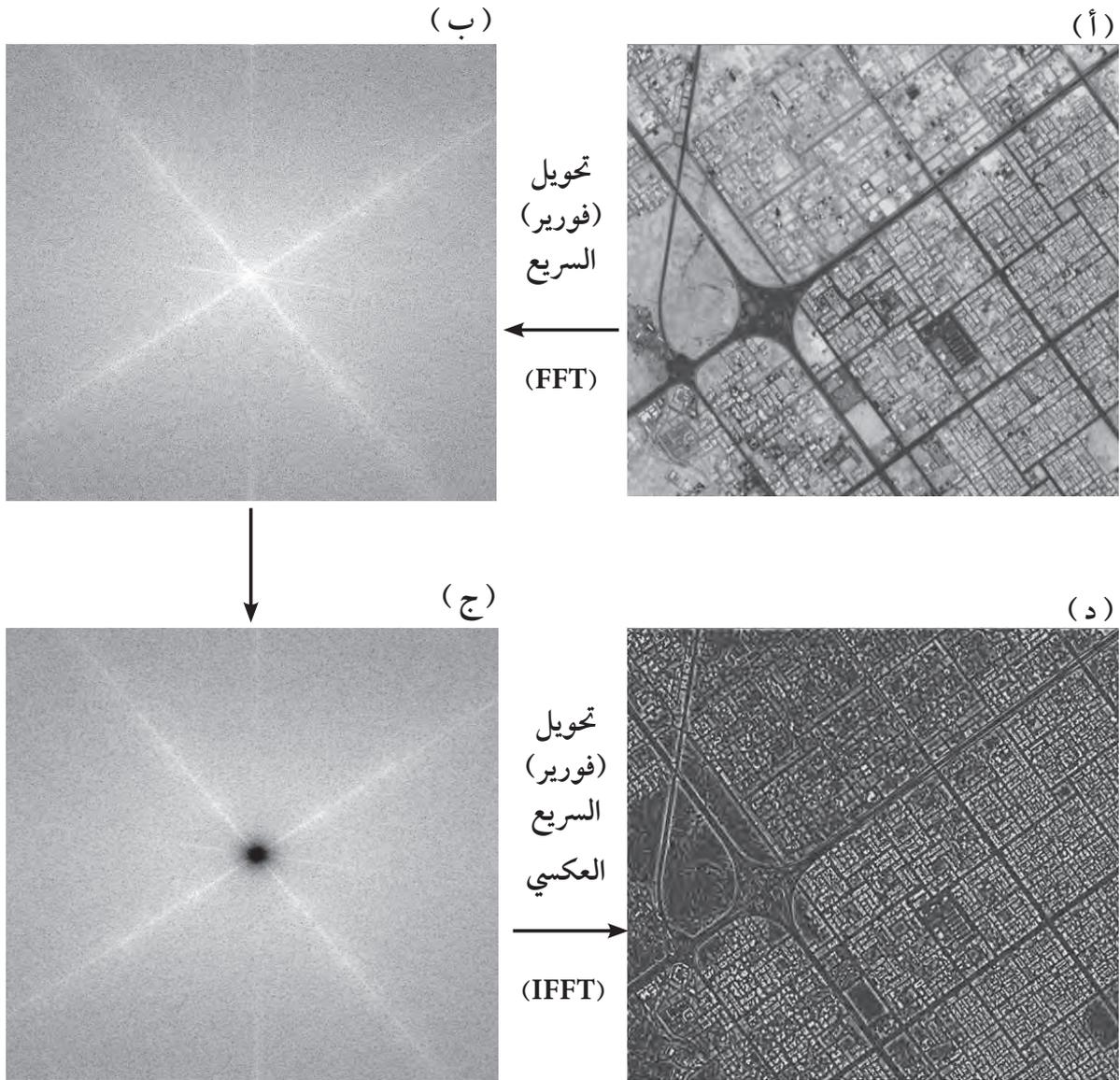
بالإمكان إعادة تكوين الصورة الأصلية من طيف (فورير) بتطبيق علاقة عكسية لتحويل (فورير) السريع، وهو ما يسمى بـ "تحويل فورير العكسي السريع" (Inverse Fast Fourier Transform-IFFT). ويمكن الاستفادة من هذه الإمكانيات في عمليات معالجة الصور، ومنها على سبيل المثال، الترشيح

المنخفض أو العالي النفاذية، حيث يتم أولاً تحويل الصورة الأصلية المراد ترشيحها من النطاق المكاني إلى النطاق الترددي عن طريق تحويل (فورير) السريع (FFT)، ثم تطبيق المرشح (العالي أو المنخفض النفاذية) مباشرة على صورة طيف (فورير) في إحداثياتها الترددية، ثم تطبيق تحويل (فورير) العكسي (IFFT) لاسترجاع الصورة المرشحة في الإحداثيات المكانية (الصورة التقليدية). الشكل (3-25) يعرض مثلاً لعملية الترشيح المنخفض النفاذية بتطبيق مرشح دائري حاجب للترددات العالية (Circular High Frequency Blocking Filter) على طيف (فورير) للصورة المعروضة في الشكل (3-24أ).



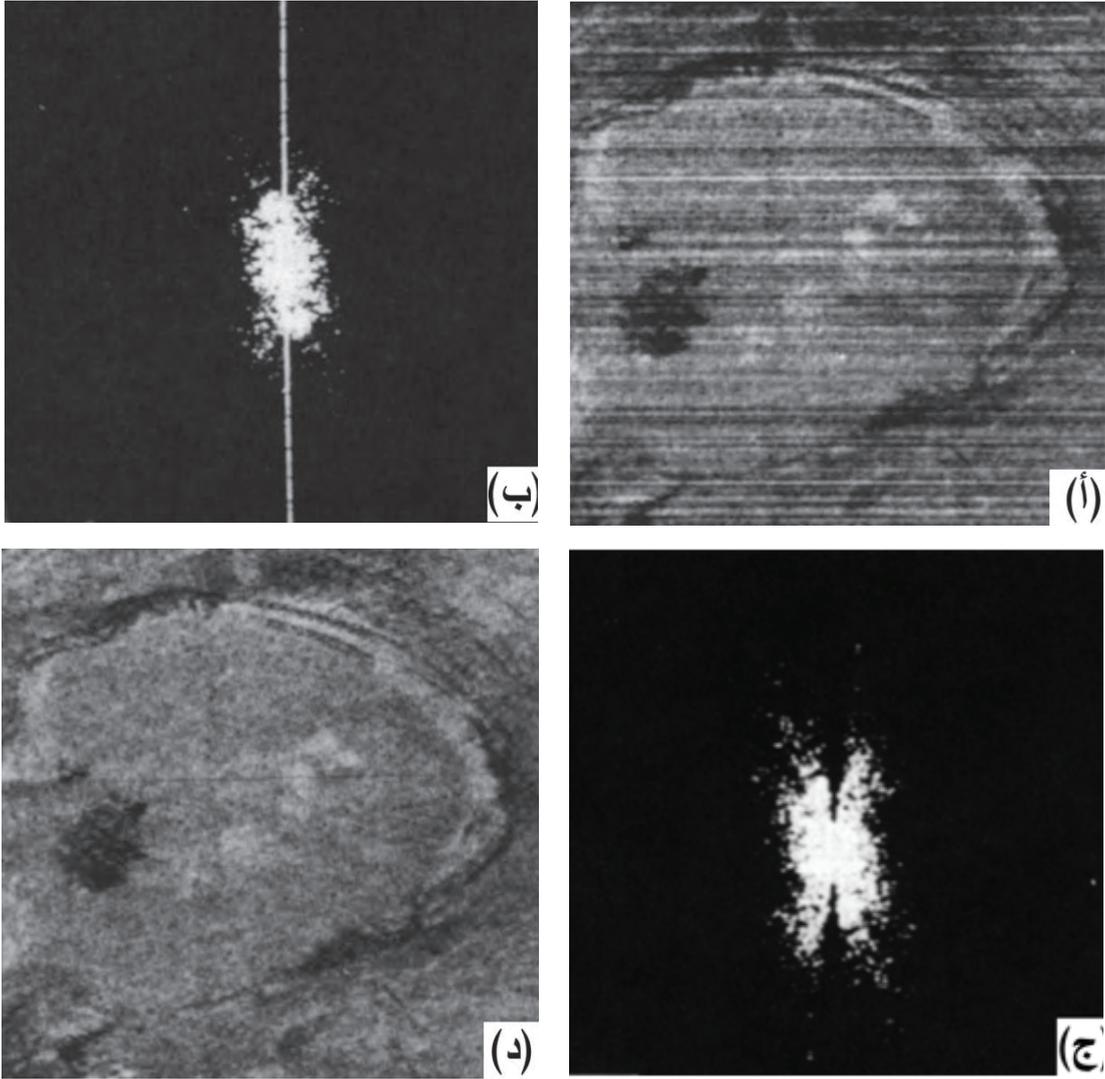
شكل (3-25) مراحل عملية الترشيح المنخفض النفاذية في النطاق الترددي للصورة. (أ) الصورة الأصلية (في النطاق المكاني)، وهي صورة القمر الفرنسي (سبوت) أحادية الطيف المعروضة في الشكل (3-24أ) لجزء من مدينة الرياض. (ب) صورة طيف (فورير). (ج) طيف (فورير) بعد تطبيق مرشح دائري حاجب للترددات العالية (ترشيح منخفض النفاذية). (د) الصورة الناتجة بعد عملية الترشيح المنخفض النفاذية.

بطريقة عكسية، يعرض الشكل (3-26) مثلاً لعملية الترشيح العالي النفاذية بتطبيق مرشح دائري حاجب للترددات المنخفضة (Circular Low Frequency Blocking Filter).



شكل (3-26) مراحل عملية الترشيح العالي النفاذية في النطاق الترددي للصورة. (أ) الصورة الأصلية (في النطاق المكاني). (ب) صورة طيف (فورير). (ج) طيف (فورير) بعد تطبيق مرشح دائري حاجب للترددات المنخفضة (ترشيح عالي النفاذية). (د) الصورة الناتجة بعد عملية الترشيح العالي النفاذية.

ومن التطبيقات الأخرى المفيدة لعملية الترشيح في النطاق الترددي باستخدام تحويل (فورير) إزالة الضوضاء (Noise Removal) من الصورة. الشكل (3-27) يوضح استخدام تحويل (فورير) لإزالة خطوط ضوضاء أفقية متكررة في صورة.



شكل (3-27) إزالة الضوضاء في النطاق الترددي. (أ) صورة تحتوي على ضوضاء (خطوط أفقية متكررة). (ب) طيف (فوريير) لهذه الصورة. (ج) تطبيق مرشح الوند العمودي على طيف (فوريير). (د) التحويل العكسي لطيف (فوريير) وتظهر الصورة فيه خالي. المصدر: [1].



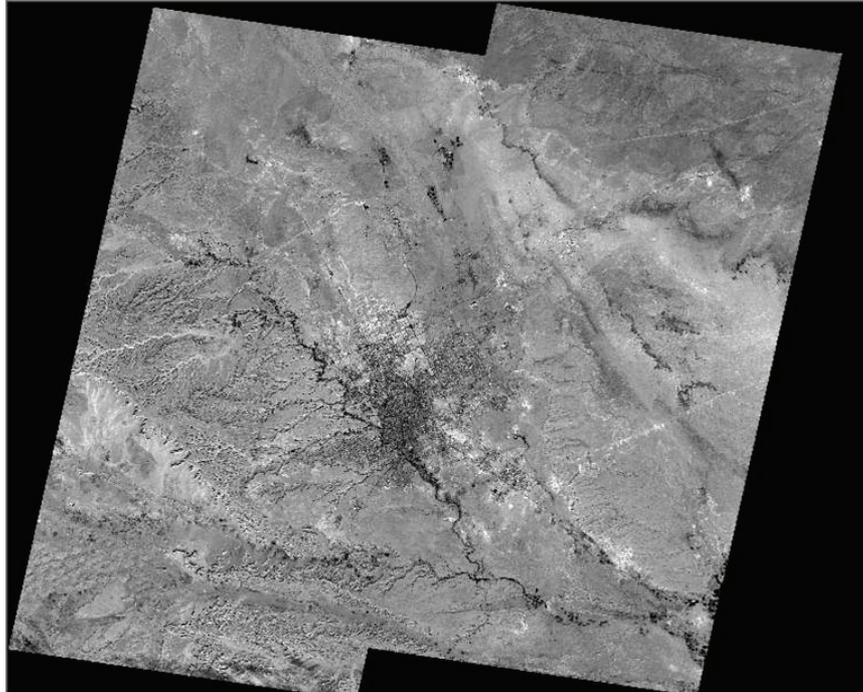
الفصل الرابع |

تحويل ومعالجة الصور متعددة المصادر

Multi-Image Transformation and Manipulation

1-4 تجميع الصور:

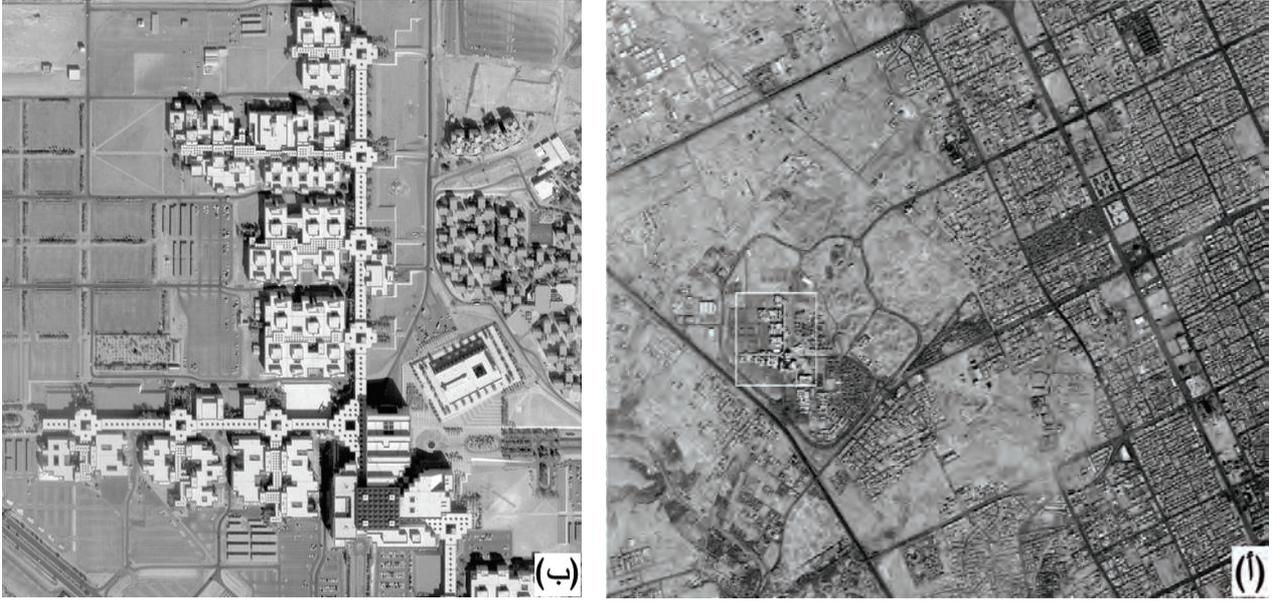
تجميع الصور (Image Mosaic) عبارة عن ضم صورتين أو أكثر للحصول على صورة واحدة؛ وتبرز الحاجة إلى استخدام هذه العملية عندما تكون المنطقة تحت الدراسة أو المعالجة كبيرة، ويغطيها أكثر من صورة (شكل (1-4)). ولإجراء هذه العملية، يجب أن تكون الصور المطلوب تجميعها قد سجلت (Registered) بعضها مع بعض سواء على نظام إحداثيات أرضي مشترك (على سبيل المثال، WGS84 UTM) أم على إحداثيات ملف صورة خام (صف Raw، وعمود Column).



شكل (1-4) صورة تغطي مدينة الرياض وماحولها، تم تجميعها من أربع صور أحادية الطيف من القمر الفرنسي (سبوت).

2-4 تجزئة الصورة:

تجزئة الصورة (Image Sub-setting) تعني تقسيم الصورة إلى عدة أقسام، وتستخدم هذه الطريقة عندما تكون الصورة كبيرة (حجم الملف كبير)، والمنطقة المطلوبة تمثل جزءاً صغيراً من هذه الصورة؛ ولا تقتصر الفائدة من هذه العملية على اقتطاع منطقة الاهتمام فقط، بل يتعدى ذلك إلى التقليل من بيانات أو حجم الصورة لغرض تسريع عملية المعالجة (شكل (2-4))؛ لذلك يمكن تجريب عدد من عمليات المعالجة على جزء من الصورة، ومن ثم تطبيقها على كامل الصورة، كعملية تصنيف الصور، أو شد التباين، أو الترشيح المكاني، أو غير ذلك من العمليات الأخرى؛ ولو تم تجريب هذه العمليات على كامل الصورة لأخذت وقتاً طويلاً في المعالجة والتحليل، وتتضح فائدة هذه العملية أكثر عند التعامل مع الصور المتعددة النطاقات ذات الحجم كبير.



شكل (2-4) عملية تجزئة الصور. (أ) صورة أحادية اللون للقمر الأمريكي (إيكونوس) لجزء من مدينة الرياض (بعض من منشآت جامعة الملك سعود). (ب) جزء مقتطع من هذه الصورة (المنطقة داخل المربع الأبيض) لبعض منشآت جامعة الملك سعود.

3-4 النسبة الطيفية:

نجد في كثير من الأحيان أن نفس النوع من المعالم يعكس بقيم مختلفة في الأجزاء المتفرقة من الصورة؛ ويرجع السبب في ذلك إلى اختلاف درجة تعرض تلك المعالم إلى أشعة الشمس.

إختلاف درجة التعرض لأشعة الشمس يؤثر على قدرة مفسر الصورة على تحديد هوية المعالم بالطريقة الصحيحة، وهذا الاختلاف في درجة التعرض إلى أشعة الشمس يسببه عدة عوامل منها: الاختلاف

في طبيعة التضاريس، والظل، واختلاف زاوية ارتفاع الشمس في الفصول المختلفة (شكل (2-1)). فمثلاً، نجد أن قيمة السطوع لمعلم معين في منطقة الظل تكون ضعيفة في جميع النطاقات، بينما نجدها أقوى في المناطق المعرضة للشمس.

”النسبة الطيفية“ (Spectral Ratioing) تقنية تستخدم في مثل هذه الحالة للتخفيف من أثر تلك المشكلة، بحيث تجعل المعالم تحافظ قدر الإمكان على قيم سطوعها، والخصائص الطيفية لها بغض النظر عن الاختلاف في درجة التعرض لأشعة الشمس، وليس هذا فحسب، بل إنها مفيدة أيضاً في استخراج بعض المعلومات التي لا تكون متوافرة في نطاق واحد من نطاقات الصورة.

والصيغة الرياضية المبسطة للنسبة الطيفية هي: قسمة قيمة السطوع لعنصر الصورة في نطاق معين على قيمة سطوعه في نطاق آخر:

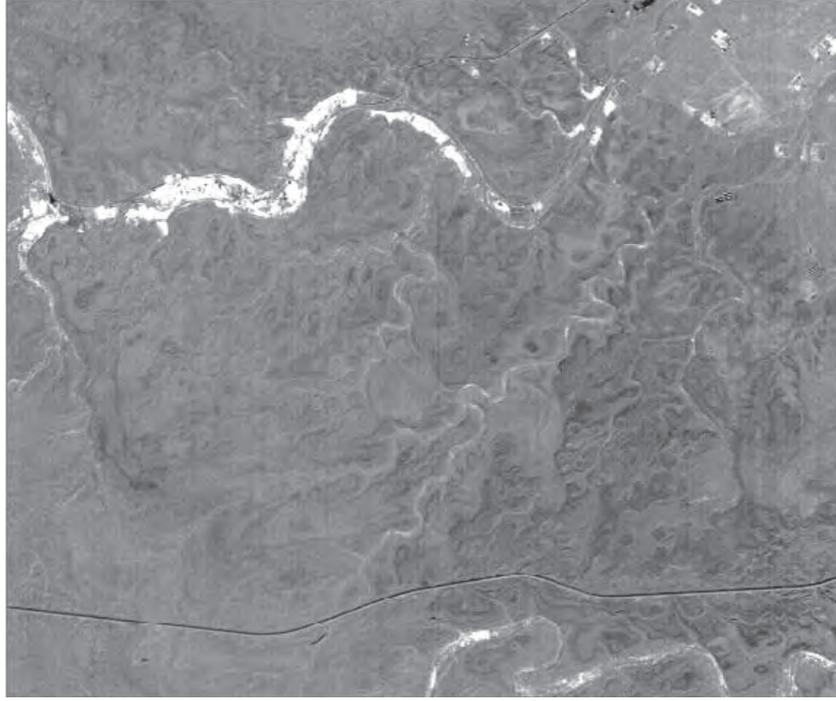
$$BV_{i,j,r} = \frac{BV_{i,j,k}}{BV_{i,j,l}}$$

حيث $BV_{i,j,r}$ قيمة سطوع عنصر الصورة الناتجة من عملية النسبية الطيفية، و $BV_{i,j,l}$ قيمة سطوع عنصر الصورة الأصلية في النطاق k ، و $BV_{i,j,l}$ قيمة سطوع عنصر الصورة الأصلية في النطاق l ، و (i, j) رقما الصف والعمود لعنصر الصورة.

ويعتمد عدد الصور النسبية التي يمكن الحصول عليها على عدد النطاقات في الصورة الأصلية؛ فإذا كان لدينا صورة مكونة من أربعة نطاقات، فإنه يمكن الحصول على عدد (12) صورة نسبية مشتقة من تلك أربع النطاقات الأصلية. العدد (12) جاء من خلال العلاقة الرياضية: عدد النطاقات \times (عدد النطاقات - 1).

الشكل (4-3) يعرض أحد الصور النسبية الناتجة من قسمة نطاق تحت الحمراء القريبة على نطاق الأحمر (NIR/Red) لنفس صورة القمر (سبوت) المعروضة في الشريحة (3أ) للمنطقة التي تقع شمال غرب مدينة الرياض.

إضافة إلى التخفيف من أثر الاختلاف في درجة التعرض لأشعة الشمس، تفيد (كذلك) الصورة النسبية الناتجة من قسمة نطاق تحت الحمراء القريبة على نطاق الأحمر، كما هي الحال في أدلة الحياة النباتية في تحديد أنواع وصحة النباتات نتيجة استخدام نطاق تحت الحمراء القريبة الذي يحمل معلومات مهمة عن حالة النبات (فقرة (4-8)).



شكل (3-4) الصورة النسبية الناتجة من قسمة نطاق تحت الحمراء القريبة على نطاق الأحمر لنفس صورة (سبوت) المعروضة في الشريحة (3أ) للمنطقة التي تضم مدينتي حريملاء، وملهم شمال غرب مدينة الرياض.

قسمة قيم سطوع عناصر الصورة لمعلم معين في نطاق معين على قيم سطوعه في نطاق آخر تُنتج نسبة قيمتها متساوية في جميع أجزاء الصورة لهذا المعلم، سواء المعرض منه لأشعة الشمس أم الواقع في الظل. لسوء الحظ؛ فالعملية الحسابية المذكورة آنفاً، والمستخدم للحصول على الصورة النسبية ليست مُيسرة دائماً، حيث إنه يمكن أن تكون قيمة السطوع $(BV_{i,j})$ في البسط أو المقام في هذه المعادلة تساوي 0، وهو ما سيؤثر على قيمة سطوع عنصر الصورة المخرجة $(BV_{i,j,r})$ ، فإما أن تكون القيمة غير معرفة إذا كان المقام يساوي 0، أو تكون 0 إذا كان البسط يساوي 0. وباستثناء القيمة غير المعرفة، ستنحصر قيم سطوع عناصر الصورة المخرجة بين $\frac{1}{255}$ و 255، مروراً بالصففر، إلا أن المشكلة تكمن في أنه لا يمكن التعبير عن القيم الكسرية باستخدام مدى العرض الديناميكي 8 بت (255-0). لحل هذه المشكلة يتم استخدام عدد من الطرق، منها المعايير (Normalization)، حيث يتم استبدال قيم سطوع عناصر الصورة النسبية التي تساوي 1 بقيمة 128، والقيم التي تتراوح بين $\frac{1}{255}$ و 1 بالقيم من 1 إلى 128 عن طريق المعادلة التالية:

$$BV_{i,j,n} = \text{int}((BV_{i,j,r} \times 127) + 1)$$

أما قيم سطوع عناصر الصورة النسبية التي تتراوح بين 1، و 255، فتستبدل بالقيم من 128 إلى 255 عن طريق المعادلة التالية:

$$BV_{i,j,n} = \text{int}\left(128 + \frac{BV_{i,j,r}}{2}\right)$$

حيث $BV_{i,j,n}$ قيمة سطوع عنصر الصورة المعيارية؛ وباستخدام هذه الطريقة نحصل على عناصر للصورة النسبية المخرجة تتراوح قيمها بين 0 و 255، وتتوافق مع مدى العرض 8 بت. ومن الطرق الأخرى استخدام قيم عناصر الصورة الأصلية في النطاقات المختلفة مباشرة على النحو التالي:

$$BV_{i,j,n} = K(\arctan \frac{BV_{i,j,k}}{BV_{i,j,l}})$$

إذا عوض عن قيمة (K) بالقيمة 162.34، فإن قيم عناصر الصورة النسبية المخرجة ستتراوح بين 0 و 255.

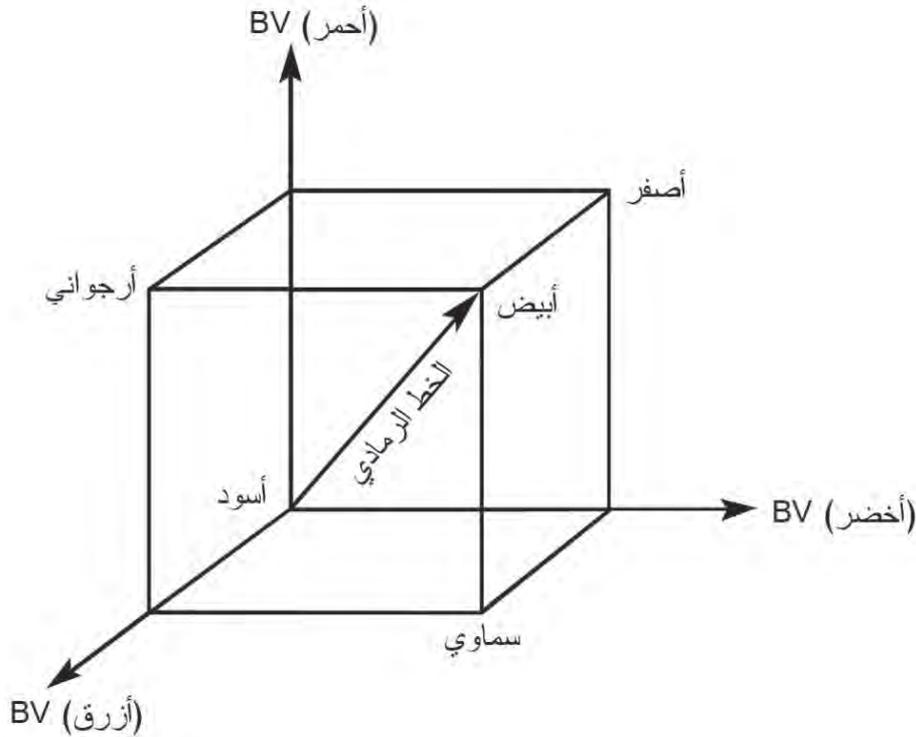
إن تحديد النطاقين المناسبين اللذين يستخدمان في عملية النسبة الطيفية ليس بالأمر السهل، ففي العادة يقوم المحلل بتكوين جميع الصور النسبية الممكنة من النطاقات المختلفة للصورة، ثم يختار الصورة النسبية التي تحتوي على المعلومات الكبرى، إلا أن هناك عدة طرق قد ظهرت أكثر موضوعية من هذه الطريقة لاختيار أفضل الصور النسبية، ومنها: عامل الدليل المثالي (Optimum Index Factor-OIF)، حيث يتم ترتيب الصور النسبية حسب الأفضلية من حيث كمية المعلومات المتوافرة بها، والمجال هنا لا يتسع للخوض في تفاصيل هذه الطريقة وغيرها من الطرق الأخرى.

يمكن عرض ثلاث من الصور النسبية بديلاً عن ثلاث من النطاقات الأصلية على شكل صورة ملونة مزيفة (False Color). من مميزات هذه الصورة النسبية الملونة أنها تحتوي على معلومات طيفية أكثر من المعلومات الطيفية الموجودة في الصورة الملونة المكونة من ثلاثة النطاقات الأصلية، إلا أن احتواء هذه الصورة على كم أكبر من المعلومات لا يوحي دائماً بأنها الأفضل، فعلى الرغم من أنها تحتوي على معلومات أكبر من الصورة الأصلية، فإنها قد لا تحتوي على معلومات معينة يريد مفسر الصورة، وتكون موجودة في الصورة الأصلية، إلا أننا نعود أيضاً إلى مشكلة تحديد التركيبة الفضلى من الصور النسبية المتعددة المناسبة للعرض الملون. حل هذه المشكلة يتم أيضاً باستخدام طريقة عامل الدليل المثالي التي تم التطرق إليها آنفاً، حيث تُرتب الصور النسبية الملونة حسب الأفضلية، فالصورة الملونة النسبية التي تحتوي على أكبر تغير (Highest Variance) في المحتوى الإشعاعي، وأقل علاقة في المحتوى الإشعاعي (Lowest Correlation) بين نطاقاتها تأخذ الترتيب الأول. ستشتمل الصورة النسبية الملونة (وكما أشير سابقاً) على كمية معلومات أكبر من الصورة الملونة المكونة من النطاقات الأصلية.

4-4 التحويل الأمامي، والعكسي من الفراغ القياسي للألوان الأساسية إلى فراغ الكثافة

واللون والتشبع:

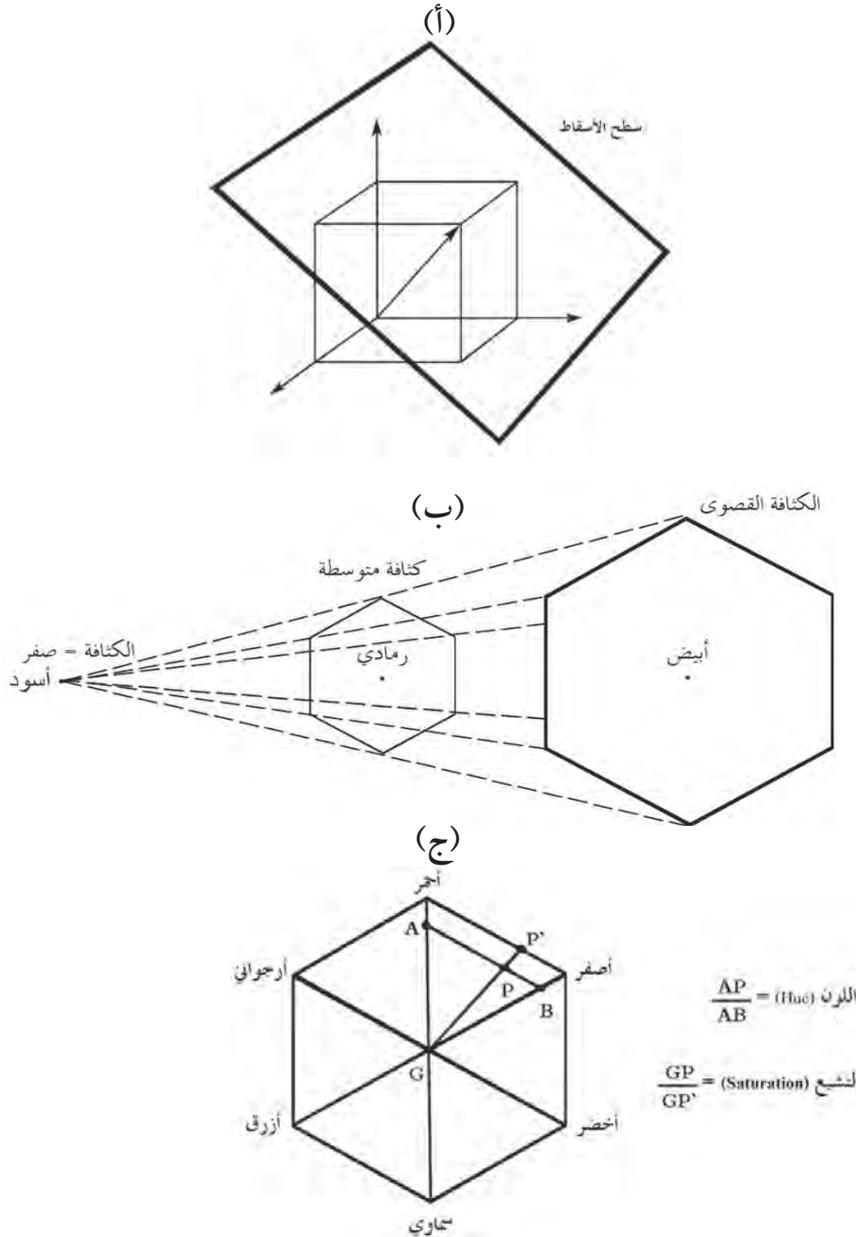
تُعرض الصورة الرقمية الملونة في العادة بتركيبة من الألوان الثلاثة الأساسية وهي: الأزرق (Blue-B)، والأخضر (Green-G)، والأحمر (Red-R). الشكل (4-4) يوضح العلاقة بين هذه الألوان الثلاثة في جهاز العرض. تُمثّل هذه العلاقة في مكعب يسمى مكعب اللون (Color Cube)، وتُحدّد أبعاده الثلاثة قيمة السطوع لكل لون. في أجهزة العرض القادرة على العرض في 8 بت، يقسم كل محور إلى 256 (0-255) قيمة سطوع، وبالتالي يمكن الحصول على 256^3 (16.777.216) تركيبة لون مختلفة مكونة من الأزرق، والأخضر، والأحمر. وكل عنصر صورة يمكن تمثيله على شاشة العرض بإحداثيات محددة تُمثّل إحدى تركيبات اللون داخل مكعب اللون، ولها قيمة في كل لون من الألوان الأساسية. يُعرّف الخط القطري الواصل بين نقطة الأصل في المكعب إلى النقطة النظرية، كما يتضح من الشكل (4-4)، بالخط الرمادي (Gray Line)، بحيث إن أي عنصر من عناصر الصورة يقع على هذا الخط يكون له مُركّبات متساوية من اللون الأزرق، والأخضر، والأحمر ($BV_b = BV_g = BV_r$).



شكل (4-4) مكعب اللون (Color Cube). المصدر: [1].

الطريقة الأخرى التي تُمثّل بها الصورة الملونة هي استخدام مُركّبات الكثافة (Intensity-I)، واللون (Hue-H)، والتشبع (Saturation-S). تمثل الكثافة قيمة السطوع، ويمثل اللون الطول الموجي السائد

(وهو ما يتعارف عليه باللون)، ويمثل التشبع النقاوة (Purity)، وهي درجة سيادة طول موجي مفرد على لون معين (Degree to which specific color is dominated by a single wavelength).

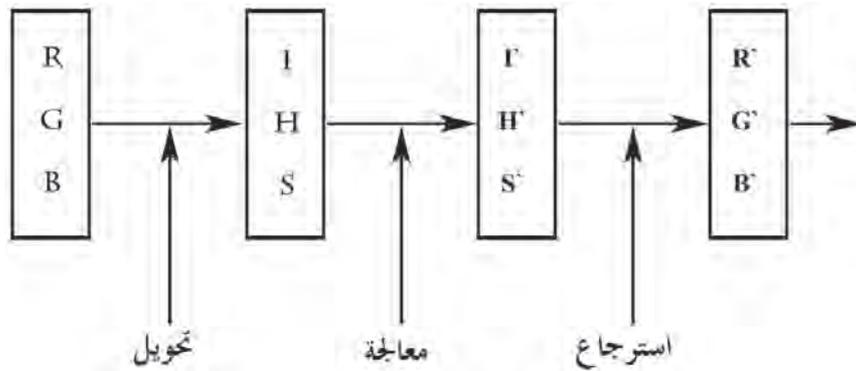


شكل (4-5) نموذج ألوان المخروط السداسي (Hexgon Color Model). (أ) إسقاط مكعب اللون على سطح مستوي. (ب) تكوين المخروط السداسي، حيث يُحدّد مقياس أي مخروط بكثافة عنصر الصورة. (ج) تعريف قيم اللون (Hue)، والتشبع (Saturation) لعناصر الصورة. المصدر: [1].

وتحويل الصورة من الألوان الأساسية (RGB) إلى مُركّبات الكثافة واللون والتشبع (IHS) قبل عمليات المعالجة يوفر تحكماً أكثر في عمليات تحسين الألوان التي قد لا تكون متوافرة في الألوان

الأساسية. وهناك العديد من الطرق للتحويل من مُركّبات الألوان الأساسية إلى مُركّبات الكثافة واللون والتشبع. الشكل (4-5أ) يوضح إحدى هذه الطرق، والتي تسمى بنموذج ألوان المخروط السداسي (Hexagon Color Model)، وهي عبارة عن إسقاط مكعب اللون على سطح مستوي عمودي على الخط الرمادي (Gray Line) منتجاً مضلعاً سداسياً (Hexagon). إذا حرك سطح الإسقاط المستوي تدريجياً في المدى من الأبيض إلى الأسود عبر الخط الرمادي، فإنه يتم الحصول على مضلعات سداسية تصغر كلما اتجهنا إلى الأسود حتى تصبح نقطة، وتكون أكبر ما يمكن عند الأبيض (شكل (4-5ب)). سلسلة هذه المضلعات تسمى المخروط السداسي (Hexacone)، ومن خلال هذا المخروط يمكن تعريف الكثافة (I) بأنها المسافة بين الأسود، وأية نقطة اسقاط للمضلع السداسي على طول الخط الرمادي، ويمكن كذلك تحديد قيمة اللون (H)، والتشبع (S) عند أية نقطة كثافة داخل المضلع السداسي المطلوب. ففي الشكل (4-5ج) يعبر عن اللون بالزاوية حول المضلع السداسي، ويعبر عن التشبع بالمسافة إلى النقطة الرمادية (نقطة التقاء الخط الرمادي مع المضلع السداسي)، فكلما ابتعدنا عن النقطة الرمادية داخل المضلع السداسي للخارج، كلما زادت درجة تشبع اللون.

من خلال العلاقات الرياضية البيانية في الشكل (4-5ج)، يمكن التحويل من نظام الألوان الأساسية إلى نظام مُركّبات الكثافة واللون والتشبع، والتفصيل في هذه العلاقات الرياضية لعملية التحويل خارج عن نطاق هذا المقرر.



شكل (4-6) التحويل الأمامي والعكسي من الألوان الأساسية إلى مُركّبات الكثافة، واللون، والتشبع في عمليات معالجة الصور. المصدر: [1].

الشريحة (6) تعرض نفس صورة (سبوت) المعروضة في الشريحة (3أ) للمنطقة التي تقع شمال غرب مدينة الرياض بعد تحويلها إلى ألوان طبيعية (Natural Colours) باستخدام نطاقات تحت الحمراء القريبة، والأحمر، والأخضر، وصور مُركّبات الكثافة واللون والتشبع المستخلصة منها.

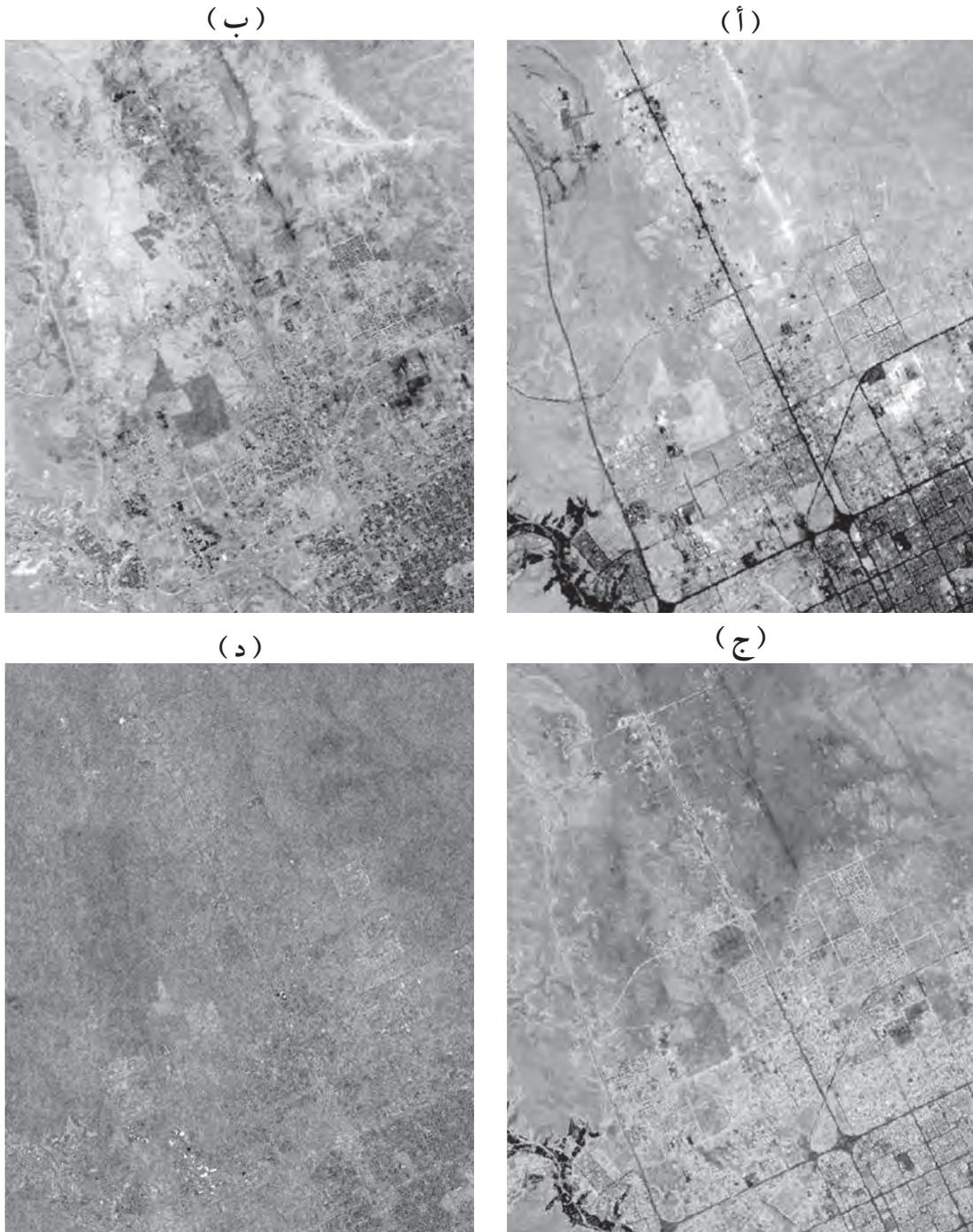
يفيد تحويل قيمة السطوع من نظام الإحداثيات الفراغي للألوان الأساسية إلى نظام الإحداثيات الفراغي لمركبات الكثافة واللون والتشبع (الذي تم التطرق إليه سابقاً) كمرحلة متوسطة أو بينية (Intermediate) في كثير من عمليات معالجة الصور (شكل (4-6))؛ حيث يتم التحويل من مركبات الألوان الأساسية إلى مركبات الكثافة واللون والتشبع أولاً، ثم تُجرى عمليات المعالجة المطلوبة على مركبات الكثافة واللون والتشبع، ثم يتم التحويل بصورة عكسية من هذه المركبات إلى مركبات الألوان الأساسية مرة أخرى.

5-4 المركبات الأساسية:

من عيوب الصور ذات النطاقات المتعددة (Multi-Spectral Images) وجود علاقة (Correlation) قوية بين كثير من نطاقاتها. بمعنى آخر: تحتوي هذه النطاقات على نفس المعلومات، ولها (هستوغرامات) متشابهة في الشكل والتوزيع، وتظهر صورها متقاربة في المحتوى الإشعاعي عند عرضها على الشاشة. يُسمى ذلك بتكرار المعلومات (Information Redundancy) في النطاقات؛ ويتم التغلب على هذه المشكلة من خلال تقنية تقوم بضغط أو تجميع معلومات الصورة الأصلية المتعددة النطاقات في عدد أقل من النطاقات التي تحتوي على نفس معلومات الصورة الأصلية؛ من خلال ذلك نكون قد قللنا من درجة البعدية (Dimensionality)، وهي عدد النطاقات، وتخلصنا من تكرار المعلومات في الصورة الأصلية. وكمثال على ذلك: يمكن اختزال سبعة نطاقات لصورة (TM) في ثلاثة نطاقات مع المحافظة على المحتويات الإشعاعية للصورة الأصلية. اختزال عدد النطاقات مع الاحتفاظ بمحتويات الصورة الأصلية يزيد من فاعلية وكفاءة المعالجة، كتفسير وتصنيف الصور.

من التقنيات المستخدمة في ضغط أو تجميع معلومات الصورة في عدد أقل من النطاقات - التحويل من نظام إحداثيات الصورة الأصلية (النطاقات الطيفية الأساسية: الأخضر، الأحمر، تحت الحمراء القريبة، ... إلخ) إلى نظام إحداثيات آخر (نطاقات أخرى) هو المركبات الأساسية (Principal Components-PCs). يتم اللجوء إلى هذه العملية في غالب الأحيان كعملية تحسين أولية تسبق عملية تفسير وتحليل الصور، أو كعملية معالجة أولية تسبق بعض عمليات المعالجة الأخرى، كالتصنيف (Classification) للتقليل من العمليات الإحصائية المكثفة (زيادة في الوقت المستخدم في العمليات الحسابية باستخدام الحاسب الآلي) المترتبة على استخدام عدد كبير من نطاقات الصورة الأصلية في عملية التصنيف. وفي ظل التوجه الحالي والمستقبلي للتصوير الفضائي كثيف الأطياف (Hyper-Spectral) ستزداد أهمية تحليل المركبات الأساسية لما توفره من إمكانية ضغط لهذا العدد الكبير من النطاقات في عدد أقل. ويمكن إجراء عمليات المعالجة الرقمية، والتحليل إما على

كل مُركِّبة من المُركِّبات الأساسية على حده (أبيض وأسود)، أو بتجميعهن بالترتيب الذي يرغب فيه المحلل.

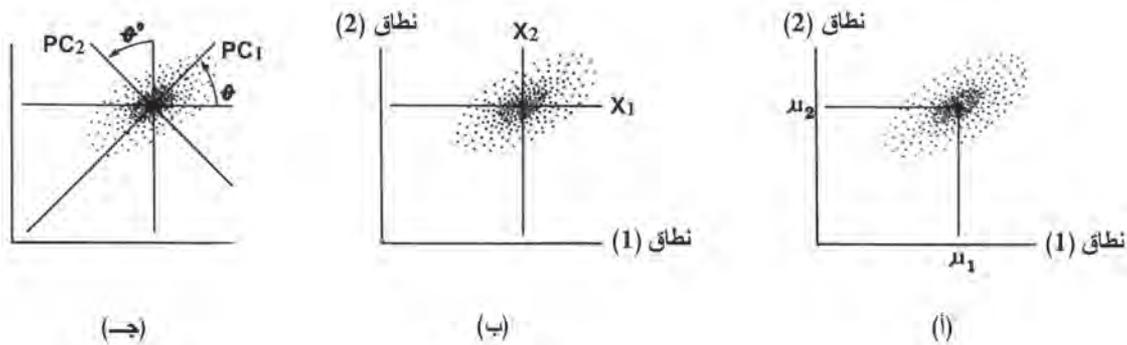


شكل (4-7) صور لأربع من المُركِّبات الأساسية الناتجة من تحويل النطاقات السبعة لصورة (TM) لجزء من شمال غرب مدينة الرياض. (أ) المركبة الأساسية الأولى. (ب) المركبة الأساسية الثانية. (ج) المركبة الأساسية الثالثة. (د) المركبة الأساسية السابعة. يلاحظ التدرج في الانخفاض المعلوماتي (الإشعاعي) الكبير بين هذه المُركِّبات.

وكمثال على استخدام عملية التحويل إلى المركبات الأساسية في إختزال عدد نطاقات الصورة الأصلية في عدد أقل من النطاقات مع المحافظة على المحتوى المعلوماتي لهذه الصورة، نجد أن النطاقات السبع لصورة (TM) تحتوي على معلومات متكررة خصوصاً بين نطاقات الأشعة المرئية (الأزرق، والأخضر، والأحمر)، وبين نطاقات تحت الحمراء (القريبة والمتوسطة)؛ ولغرض الإيضاح تعرض الشريحة (7) التشابه في المعلومات (التقارب في المحتوى الإشعاعي عند عرضها على الشاشة) بين نطاقات الأشعة المرئية الثلاثة. عند تحويل النطاقات السبعة لصورة (TM) إلى المركبات الأساسية، فإن معظم معلومات الصورة الأصلية تكون قد جمعت في المركبة الأولى (PC1) التي تحتوي على ما يقارب 90٪ من مجمل معلومات الصورة الأصلية، فيما تحتوي المركبة الثانية (PC2) والمركبة الثالثة (PC3) على ما يقارب 5٪ من مجمل المعلومات، والجزء اليسير المتبقي من معلومات الصورة الأصلية قد جمع في المركبات الأربع الباقية (PC4 إلى PC7). وكنتيجة لذلك، يمكن الاكتفاء بالمركبات الأولى والثانية والثالثة، والاستغناء عن بقية المركبات.

الشكل (4-7) يعرض المركبات الأساسية الأولى، والثانية، والثالثة، والسابعة الناتجة من تحويل سبعة نطاقات لصورة (TM) المعروضة في الشريحة (7) لجزء من مدينة الرياض. الإكتفاء بأربع مركبات (في هذا الشكل) هو لغرض إيضاح التدرج في المحتوى المعلوماتي للمركبات الذي تم التطرق إليه آنفاً. وإيراد المركبة السابعة (في هذا الشكل) لغرض إبراز أقل محتوى معلوماتي لهذه المركبات.

لن يتم هنا الخوض في تفاصيل العملية الرياضية للتحويل من نطاقات الصورة الأصلية إلى المركبات الأساسية، إلا أنه يمكن توضيحها بيانياً بشكل مبسط كما في الشكل (4-8).



شكل (4-8) تمثيل بياني للعلاقة المكانية بين المركبتين الأساسيتين الأولى والثانية. (أ) رسم مبثغر لنطاقين أصليين. (ب) تكوين نظام إحداثيات جديد بعمل إزاحة لمحوري النطاقات الأصلية إلى محوري (X_1) و (X_2) . (ج) عمل دوران لمحوري (X_1) و (X_2) حول مركزهما $(\mu_1$ و $\mu_2)$ ، بحيث تمثل المركبة الأساسية الأولى المحور الرئيس للقطع الناقص، والمركبة الأساسية الثانية المحور الثانوي للقطع الناقص. المصدر: [7].

الشكل (4-8أ) يعرض رسماً مبعثراً (Scatter Plot) لنطاقين في صورة، كل نقطة سوداء تحدد قيمتي السطوع لعنصر صورة في النطاقين، وعند هذه النقطة يوجد في النطاق الأول عدد معين من عناصر الصورة، وعدد معين من عناصر الصورة للنطاق الثاني؛ يأخذ هذا الرسم المبعثر شكل القطع الناقص (Ellipse)، وهو ما يعنى وجود علاقة قوية (Strong Correlation) في المحتوى الإشعاعي بين النطاقين. كلما ازداد القطع الناقص تفلطحاً (أي ازدياد طول المحور الرئيس ونقص طول المحور الثانوي)، كلما ازدادت العلاقة بين النطاقين، وبالتالي ستحتوي المركبة الأولى على معلومات أكبر، والمركبة الثانية على معلومات أقل، وهو ما يؤدي إلى فعالية أكبر في التحويل إلى المركبات الأساسية. الشكل (4-8ب) يعرض محورين جديدين (X_1 و X_2)، نقطة تقاطعها هي مركز القطع الناقص، وهي نفس نقطة تقاطع متوسطي قيم عناصر الصورة للنطاقين (μ_1 و μ_2)؛ وبالتمثيل الرياضي، تكون قيمة $X_1 =$ (قيمة سطوع النطاق 1 μ_1)، وقيمة $X_2 =$ (قيمة سطوع النطاق 2 μ_2)؛ ولتمثيل المحاور الجديدة (محاور المركبات الأساسية) رياضياً، فإنه يجب أن يعمل دوران لمحاور (X_1) و (X_2) بزواية (\emptyset) (شكل (4-8ج)). وبإجراء عملية الدوران يكون قد تم تكوين محور المركبة الأساسية الأولى (PC1)، وهو المحور الرئيس للقطع الناقص (Major Axis) الذي يحتوي (كما هو واضح من الشكل) على معظم المعلومات، أو التغير (Variance) في الصورة الأصلية، ومحور المركبة الأساسية الثانية (PC2)، وهو المحور الثانوي للقطع الناقص (Minor Axis) الذي يحتوي على جزء بسيط من معلومات الصورة الأصلية؛ ويعبر عن عملية الدوران خطياً على النحو التالي :

$$BV_{p1} = a BV_1 + b BV_2$$

$$BV_{p2} = c BV_1 + d BV_2$$

حيث BV_1 و BV_2 قيمتا سطوع عنصر الصورة في الإحداثيات الأصلية في النطاقين، و BV_{p1} و BV_{p2} قيمتا سطوع عنصر الصورة في إحداثيات المركبات الأساسية PC1 و PC2، و a و b و c و d عوامل معادلة التحويل.

4-6 دمج بيانات الصور:

يقصد بدمج بيانات الصور (Image Data Fusion) بعملية دمج نوعين من أنواع الصور في صورة واحدة للاستفادة من الخصائص الموجودة في كل صورة؛ وعلى الرغم من أن عملية الدمج يمكن أن تتم بين عدة أنواع (مصادر) من بيانات الاستشعار عن بعد، كدمج الصور المتعددة الأطياف مع صور الرادار،

أو دمج الصور المتعددة الأطياف مع بيانات الارتفاعات الرقمية (DEM)، إلا أن الأشهر بينها هو دمج صورة متعددة الأطياف (ملونة) ذات درجة وضوح منخفضة مع صورة أحادية الطيف (أبيض وأسود) ذات درجة وضوح أعلى وتحتل نفس القطاع من الطيف الكهر ومغناطيسي؛ وتوجّه مثل هذه العملية في الغالب لأغراض العرض والتفسير البصري فقط من قبل المشغل، ولا يقصد بها تحليل البيانات رقمياً. ومن الأمثلة على ذلك: دمج صورة (سبوت) متعددة الأطياف (SPOT5-XS) ذات درجة الوضوح 10 م مع صورة (سبوت) أحادية الطيف (SPOT5-PAN) ذات درجة الوضوح 5.2 م أو 5 م، أو دمج صورة (ETM+) المتعددة الأطياف ذات درجة الوضوح 30 م مع صورة (ETM+) أحادية الطيف ذات درجة الوضوح 15 م. ويتطلب تطبيق هذه التقنية مطابقة الصور مكانياً؛ بأن يقوم المحلل بتصحيح الصور هندسياً (Geometric Correction)، بحيث يكون لكلتا الصورتين نفس المرجع الجغرافي.

هناك العديد من الطرق المستخدمة لإجراء مثل هذه العملية، إلا أنه يمكن حصرها في ثلاثة أقسام من الإجراءات هي:

- (1) إجراءات النطاق الطيفي.
- (2) إجراءات النطاق المكاني.
- (3) الإجراءات الجبرية.

4-6-1 إجراءات النطاق الطيفي:

تتم إجراءات النطاق الطيفي (Spectral Domain Procedures) بإسقاط نطاقات الصورة المتعددة الأطياف (النطاقات) ذات درجة الوضوح المنخفضة إلى فراغ نطاقات طيفي (Spectral Data Space)، ثم البحث عن أكثر النطاقات الجديدة (المسقط) علاقة (Most Correlated) بالصورة أحادية الطيف واستبداله بالصورة أحادية الطيف ذات درجة الوضوح العالية. وستتناول هنا (وبشيء من التفصيل) طريقتين أكثر شيوعاً في هذا النوع من الإجراءات، وهما دمج البيانات بالتحويل الأمامي، والعكسي من الفراغ القياسي للألوان الأساسية (RGB) إلى فراغ الكثافة، واللون، والتشبع (IHS)، ودمج البيانات باستخدام المركبات الأساسية (Principal Component Transfer).

4-6-1-1 دمج بيانات الصور بالتحويل الأمامي، والعكسي من الفراغ القياسي للألوان الأساسية إلى فراغ الكثافة واللون والتشبع:

تتلخص عملية دمج الصور المتعددة الأطياف (الملونة) المنخفضة الوضوح مع الصور أحادية الطيف العالية الوضوح بهذه الطريقة بأن يتم تحويل نطاقات الصورة المتعددة الأطياف (النطاقات) من الفراغ

القياسي الملون (RGB Space) إلى فراغ الكثافة واللون والتشبع (IHS Space)، ثم إجراء عملية شد للصورة أحادية الطيف بحيث تكون مقارنة لمركبة الكثافة (Intensity) من حيث متوسط (Mean) قيم عناصر الصورة والتغير (Variance)؛ بعد ذلك تُستبدل مركبة الكثافة للصورة الأصلية متعددة الأطياف بالصورة أحادية الطيف المشدودة، ويعاد إسقاط الصورة وإرجاعها إلى الفراغ القياسي الملون مرة أخرى (فقرة (4-4)).

وكمحصلة لذلك، فإن الصورة الناتجة ستحتفظ بالألوان الأصلية، ولكن ستكون بدرجة وضوح أعلى. الشريحة (8) تعرض صورة ملونة لجزء من مدينة الرياض بدقة وضوح 10 م تم إنتاجها بنفس الطريقة باستخدام صورة أحادية الطيف (Panchromatic) للقمر الفرنسي (سبوت 4) بدرجة وضوح 10 م، وصورة متعددة الأطياف (TM) للقمر الأمريكي (لانداست 5) بدرجة وضوح 30 م.

4-6-1-2-4 دمج بيانات الصور باستخدام المركبات الأساسية:

يتم اللجوء إلى دمج بيانات الصور باستخدام المركبات الأساسية عندما نريد دمج صورة متعددة الأطياف وغير محدودة بثلاثة نطاقات (كما في الطريقة الأولى الموضحة في فقرة (4-6-1-1)) مع صورة أحادية الطيف؛ ويتلخص عمل هذه التقنية بأن يتم تحويل الصورة الأصلية المتعددة الأطياف ذات درجة الوضوح المنخفضة إلى المركبات الأساسية (فقرة (4-5))، ثم إجراء عملية شد للصورة أحادية الطيف ذات درجة الوضوح العالية حتى تقارب المركبة الأولى من المركبات الأساسية من حيث متوسط قيم عناصر الصورة (Mean) والتغير (Variance)، أو (كما ذكر في بعض المراجع) حتى يتطابق الـ (هستوغرام) بينهما في القيم العظمى والصغرى فقط مع المحافظة على الشكل العام لـ (هستوغرام) الصورة أحادية الطيف؛ بعد ذلك تُستبدل المركبة الأساسية الأولى بالصورة أحادية الطيف المشدودة، ثم يعاد تركيب صورة المركبات الأساسية إلى هيئة الصورة الأصلية.

4-6-2-4 إجراءات النطاق المكاني:

تتلخص إجراءات النطاق المكاني (Spatial Domain Procedures) - باختصار - باستخلاص المعلومات ذات التردد العالي (High Frequency Variations) من الصورة أحادية الطيف ذات درجة الوضوح العالية وإدراجها في الصورة المتعددة الأطياف ذات درجة الوضوح المنخفضة. من الأمثلة على ذلك تقنية المرشح العالي النفاذية (High Pass Filter)، حيث يتم في هذه التقنية تطبيق مرشح عالي النفاذية على الصورة أحادية الطيف لاستخلاص المعلومات العالية التردد، وهي التي تحمل التفاصيل المكانية الدقيقة في الصورة، ثم إدراج هذه المعلومات في الصورة متعددة الأطياف ذات التفاصيل المكانية الضعيفة، مع مراعاة المحافظة على قيم السطوع للصورة الأصلية.

4-6-3 الإجراءات الجبرية:

سنتناول من الإجراءات الجبرية (Algebraic Procedures) مثلاً "نموذج بروفي" (Brovey Model). تم تطوير نموذج (بروفي) لتحسين قدرة تفسير الصورة بصرياً للمعالم التي تقع في طرفي الـ(هستوغرام)، وهي مناطق الانعكاس المنخفض، كالظل والماء في طرف، ومناطق الانعكاس العالي، كالمناطق الحضرية في الطرف الآخر، عن طريق زيادة التباين في تلك المناطق؛ لذلك لا يُنصح باستخدام هذه التقنية لمن يتطلب عملهم التعامل مع قيم الإشعاع (السطوع) الأصلية للصورة. في الجانب الآخر تُعتبر هذه التقنية ذات فائدة في إنتاج صورة ملونة (RGB) مناسبة للتفسير البصري بدرجة عالية من التباين للمعالم التي تقع في طرفي الـ(هستوغرام). ونظراً لكون الغرض من هذه التقنية هو إنتاج صورة ملونة تُعرض بالألوان الأساسية (RGB)، فإن ذلك يتطلب استخدام ثلاثة نطاقات فقط من الصورة الأصلية المتعددة النطاقات في عملية التحويل، كنطاقات (1، 2، 3) من صور (HRV) للقمر (سبوت)، أو نطاقات (2، 3، 4) من صور (TM) للقمر (لاندسات). ويتم عرض النطاقات الناتجة (1، 2، 3) على الشاشة بالألوان الأساسية (R,G,B) على التوالي.

ويمكن صياغة تحويل (بروفي) رياضياً باستخدام صورة متعددة النطاقات (منخفضة الوضوح الملونة)، وصورة أحادية الطيف (عالية الوضوح) على النحو التالي:

$$BV_{nb(1)} = \frac{BV_{mb(1)}}{BV_{mb(1)} + BV_{mb(2)} + BV_{mb(3)}} * BV_h$$

$$BV_{nb(2)} = \frac{BV_{mb(2)}}{BV_{mb(1)} + BV_{mb(2)} + BV_{mb(3)}} * BV_h$$

$$BV_{nb(3)} = \frac{BV_{mb(3)}}{BV_{mb(1)} + BV_{mb(2)} + BV_{mb(3)}} * BV_h$$

حيث $BV_{mb(1)}$ ، و $BV_{mb(2)}$ ، و $BV_{mb(3)}$ قيم السطوع للنطاقات الثلاثة للصورة الأصلية المتعددة النطاقات، و BV_h قيمة السطوع للصورة العالية الوضوح، و $BV_{nb(1)}$ و $BV_{nb(2)}$ و $BV_{nb(3)}$ قيم السطوع للنطاقات الجديدة الناتجة من عملية التحويل.

4-7 تحديد التغيرات:

غالب التغيرات التي تحدث على سطح الأرض يكون سببها الإنسان، ويتأثر حجم هذه التغيرات بعدة

عوامل، من أهمها: الزمن الذي تربطه علاقة طردية مع حجم هذه التغيرات. والسؤال الذي يتبادر إلى الذهن هو: كيف نكتشف أو نحدد التغيرات التي حدثت في منطقة جغرافية معينة، وخلال فترة معينة؟ الجواب المتوقع لهذا السؤال هو: عن طريق إجراء مقارنة بصرية (Visual Comparison) بين صور جوية ملتقطة في بداية ونهاية تلك الفترة لتحديد تلك التغيرات، إلا أن استخدام هذه الطريقة يترتب عليه جهد كبير، وبطء، وأخطاء في عملية الإنتاج. أدت هذه الأسباب (مجتمعة) إلى استخدام تقنية تحديد التغيرات رقمياً (Digital Change Detection)؛ ويأتي استخدام الصور الفضائية - كأحد الوسائل الفعالة لقياس تلك التغيرات - لستة أسباب رئيسية هي:

- 1) دقة الوضوح الزمنية (Temporal Resolution) العالية التي توفر إمكانية إعادة تصوير المنطقة المحددة من سطح الأرض بشكل دوري قصير الأمد (القمر الفرنسي (سبوت) - على سبيل المثال - قادر على إعادة تصوير نفس المنطقة عمودياً كل 26 يوم).
- 2) المحافظة على نفس مقياس الرسم.
- 3) المحافظة على نفس زاوية التصوير.
- 4) قلة إزاحة التضاريس (Relief Displacement) نتيجة الارتفاع الكبير للقمر.
- 5) قدرة الأقمار على التصوير بعدة نطاقات طيفية.
- 6) أن تصوير نفس المنطقة يتم في نفس الوقت من كل يوم للتقليل من تأثير التغير في زاوية ارتفاع الشمس.

وتُخدم تقنية تحديد التغيرات - باستخدام الصور الفضائية - العديد من التطبيقات المدنية، كالتخطيط الحضري، ومراقبة البيئة (التصحّر، التسخين الكوني، إلخ)، وبعض التطبيقات العسكرية، كتقييم الأضرار بعد عمليات القصف الجوي، ومراقبة انتشار أسلحة الدمار الشامل، إلخ.

الافتراض التقني الهام الذي تبنى عليه عملية تحديد التغيرات رقمياً هو أنه سيترتب على التغير في الغطاء الأرضي (Land Cover) من شكل إلى آخر خلال فترة معينة اختلاف في المحتوى الإشعاعي (قيمة السطوع) لعنصر الصورة بين صورتين التقطتا في بداية ونهاية تلك الفترة.

وإجراء عملية تحديد التغيرات رقمياً بين صورتين التقطتا في وقتين مختلفين يتطلب تحقق عدة شروط، أهمها:

- 1) التطابق المكاني للمعالم، ويتم ذلك بإجراء عملية تسجيل بين هاتين الصورتين (Image to Image Registration)، أو بتسجيلها على مسقط خرائطي (Map Projection) مشترك بعملية تقويم هندسي، وهو الأفضل؛ ويفضل عند إجراء عملية التقويم الهندسي استخدام طريقة "الجار الأقرب" في استيفاء الكثافة (Nearest Neighbor Intensity Interpolation)

للمحافظة على قيم سطوع عناصر الصورة الأصلية، كما يجب ألا يتجاوز خطأ التسجيل $\frac{1}{4}$ إلى $\frac{1}{2}$ عنصر صورة (Pixel)؛ لأن ذلك سيترتب عليه خطأ في تحديد التغيرات.

(2) أن تكون الصور ملتقطة بنفس المستشعر، ولها نفس درجة الوضوح المكانية، ودرجة الوضوح الإشعاعية، وزاوية الالتقاط، وبالنطاقات الطيفية نفسها، وفي التاريخ والوقت عينه؛ لأن ذلك سيضمن لنا أن التغير في الانعكاسات الطيفية يكون عائداً إلى التغير في المعالم نفسها على سطح الأرض، وليس نتيجة لعوامل خارجية تؤدي إلى تغير في خصائص انعكاسات المعالم.

تلعب دقة الوضوح الطيفية (Spectral Resolution) للمستشعر دوراً كبيراً في دقة تحديد التغيرات في الغطاءات الأرضية؛ فعلى سبيل المثال، نظام التصوير (MSS) لأقمار (لاندسات 1، 2، 3) الأمريكية المكون من أربعة نطاقات (نطاق أخضر، ونطاق أحمر، ونطاقي تحت حمراء قريبة) غير مناسب لتحديد التغيرات في المناطق الحضرية نظراً لكونه مصمماً في الأساس لتحليل التضاريس، وليس للمناطق الحضرية، ونظراً لوجود تكرار (Redundancy) في المعلومات في النطاقين الأخضر والأحمر، وفي نطاقي تحت الحمراء الذي يؤدي إلى وجود تداخل في المحتوى الإشعاعي بين المناطق السكنية والمناطق الزراعية.

دقة الوضوح المكانية (Spatial Resolution) تلعب - أيضاً - دوراً مهماً في دقة تحديد التغيرات؛ فعلى سبيل المثال، لا نتوقع إمكانية تحديد التغيرات على مستوى المنازل الفردية باستخدام صور (MSS) و (TM) ذات دقة الوضوح 79 م و 30 م. إلا أن استخدام صور الجيل الجديد من الأقمار العالية الوضوح (أقل من 1 م)، وذات النطاقات المتعددة (مثل ايكونوس، كويكبيرد، جيواي، وورلدفيو) يمكن أن توفر إمكانية كبيرة لتحديد التغيرات بمستوى عالٍ من التفاصيل، وبمقياس رسم كبير.

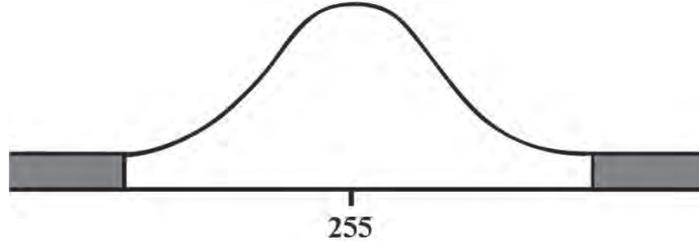
ستتناول فيما يلي اثنين من الخوارزميات (Algorithms) المستخدمة في تحديد التغيرات رقمياً، وهما طرح الصور، ونسبة الصور.

4-7-1 طرح الصور:

طرح الصور (Image Differencing) عبارة عن طرح قيم سطوع عناصر الصورة القديمة من قيم سطوع عناصر الصورة الحديثة. وعند استخدام الصور بدقة وضوح إشعاعية 8 بت (من 0 إلى 255)، فإن عملية الطرح سينتج منها قيم سطوع سالبة وموجبة تتراوح بين - 255 و + 255. وللتخلص من القيم السالبة، يتم معايرة القيم الناتجة بتحويلها جميعاً إلى قيم موجبة عن طريق إضافة ثابت على النحو التالي:

$$dBV_{i,j,k} = BV_{i,j,k}(1) - BV_{i,j,k}(2) + C$$

حيث $dBV_{i,j,k}$ التغير في قيمة السطوع من الصورة القديمة إلى الصورة الحديثة، و $BV_{i,j,k}(1)$ قيمة سطوع عنصر الصورة القديمة، و $BV_{i,j,k}(2)$ قيمة سطوع عنصر الصورة الحديثة، و C ثابت (على سبيل المثال، 255). عند استخدام قيمة 255 للثابت (C)، فإننا سنحصل على (هستوغرام) بتوزيع (جاوس) القياسي (Gaussian Distribution)، بحيث إن عناصر الصورة التي لم يحدث لقيم سطوعها أي تغير بين الصورة الحديثة والقديمة (أي أن القيمة الناتجة من عملية الطرح تساوي 0 قبل المعايرة و 255 بعد المعايرة) تكون موزعة حول المتوسط (255)، في حين تتركز في أطراف (ذيلي) الـ(هستوغرام) عناصر الصورة التي حدث لقيم سطوعها تغيرٌ (شكل (4-9)). السؤال المهم في هذه العملية هو: أين يمكننا أن نضع الحد الفاصل (Threshold) في الـ(هستوغرام) لكي نحدد العناصر التي حدث بها تغير، والعناصر التي لم يحدث بها؟ الجواب هو باختيار انحراف قياسي (Standard Deviation) من المتوسط، ثم اختباره للتأكد من أن التغيرات قد تم تحديدها بطريقة صحيحة. ويمكن للمحلل (الذي تعتبر المنطقة مألوفة لديه) أن يجرب عدداً من قيم الحد الفاصل حتى الوصول إلى أفضل قيمة لتحديد التغيرات. وبعد تحديد عناصر الصورة التي حدث بها تغير، يتم عرضها على الصورة الحديثة بلون مميز.

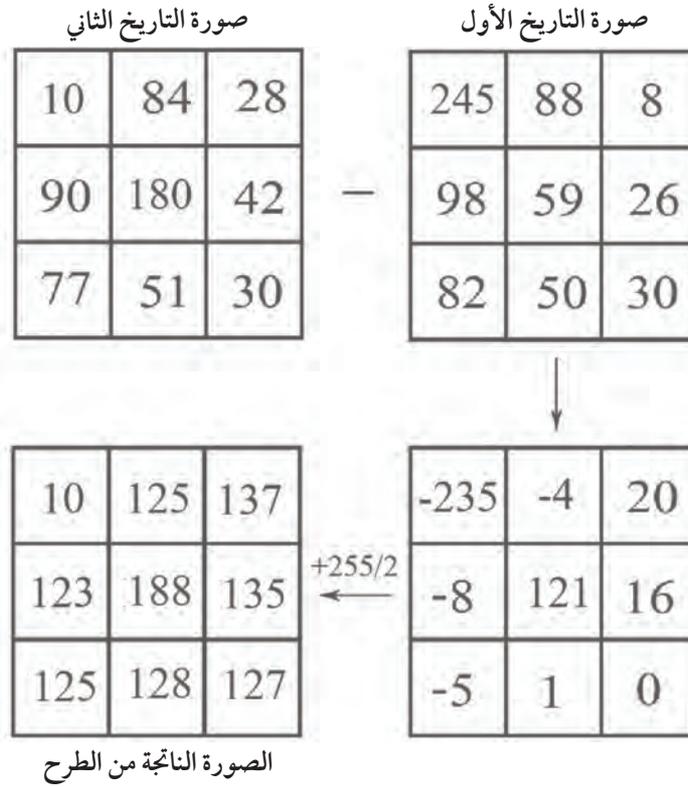


شكل (4-9) (هستوغرام) الصورة المعايرة الناتجة من عملية طرح الصور.

عرض جميع قيم سطوع الصورة الناتجة من العملية السابقة (تتراوح بين 0 و 510) يتطلب توافر نظام قادر على العرض بمدى ديناميكي قدره 9 بت. في حال عدم توافر هذه الإمكانيات، يمكن قسمة قيمة السطوع الناتجة ($dBV_{i,j,k}$) على 2، وإستخدام نظام عرض ذي مدى ديناميكي 8 بت (من 0 إلى 255). وفي هذه الحالة ستكون عناصر الصورة التي لم يحدث لقيم سطوعها أي تغير بين الصورة الحديثة والقديمة موزعة حول قيمة المتوسط (127).

من الطرق الأخرى للتغلب على القيم السالبة الناتجة من عملية الطرح - إضافة قيمة 255 إلى ناتج الطرح، ثم قسمة المجموع على 2 (شكل (4-10)) على النحو التالي:

$$BV_{diff}(i, j) = \frac{[255 + \{BV_1(i, j) - BV_2(i, j)\}]}{2}$$



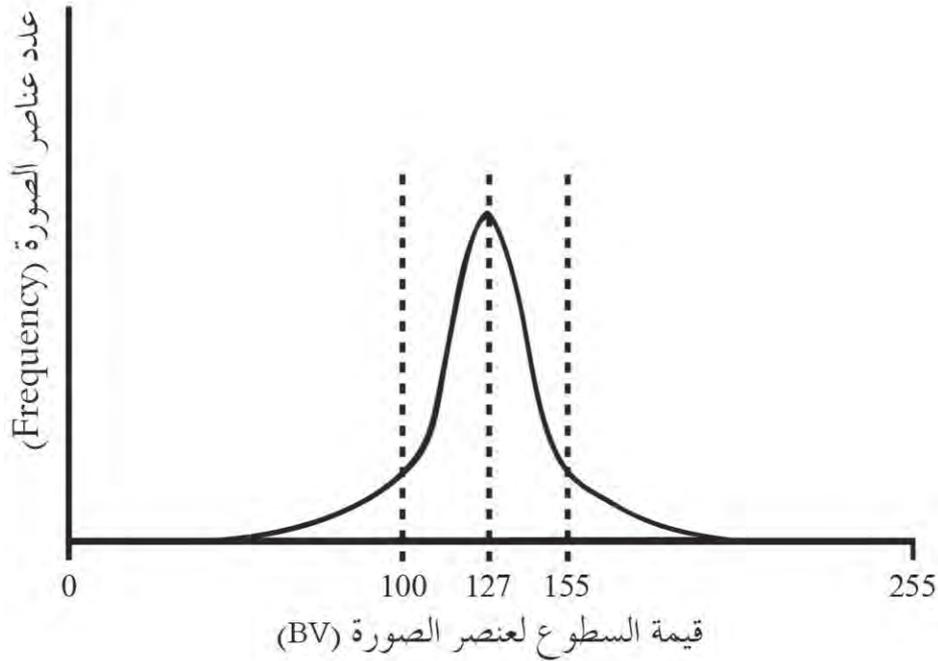
شكل (4-10) تكوين صورة "تحديد التغيرات" بطرح صورتين مختلفتي تاريخ الالتقاط ذواتي مدى ديناميكي 8 بت (تراوح قيم السطوح بين 0 و 255)، وإضافة قيمة 127 للتغلب على القيم السالبة الناتجة من عملية الطرح. المصدر: [11].

وإذا كان الاهتمام مركزاً على قيمة (Magnitude) التغير بغض النظر عن اتجاهه (Direction)، فيمكن استخدام الطريقة التالية:

$$BV_{absdiff}(i, j) = |BV_1(i, j) - BV_2(i, j)|$$

تضمن القيمة المطلقة في المعادلة إنتاج قيم موجبة.

سيأخذ شكل (هستوغرام) الصورة الناتجة من المعادلة الأولى ($BV_{diff}(i, j)$) التوزيع القياسي بقيمة عظمى عند قيمة السطوح 127 (شكل (4-11))، حيث ستمثل عناصر الصورة ذات قيمة السطوح 127 المناطق التي لم تتغير، بينما تمثل عناصر الصورة في ذيلي الـ (هستوغرام) المناطق التي قد تغيرت بشكل كبير. وفيما يتعلق بالمعادلة الثانية ($BV_{absdiff}(i, j)$)، ستكون القيمة العظمى (عدد عناصر الصورة التي لم تتغير) لـ (هستوغرام) الصورة عند قيمة السطوح 0، وعناصر الصورة (المناطق) التي حدث بها تغير باتجاه الذيل.



شكل (4-11) (هستوغرام) صورة "تحديد التغيرات" الناتجة من طرح صورتين مختلفتي تاريخ الالتقاط بعد إضافة قيمة 255 إلى القيم الناتجة من عملية الطرح، ثم قسمة المجموع على 2 (القيمة 127 في الشكل تشير إلى أن قيمة الاختلاف (التغير) تساوي 0). القيم الفاصلة (Threshold) لتحديد التغيرات في هذا الشكل هي 100، و155، ويفترض بين هاتين القيمتين عدم وجود تغيرات، بينما تمثل المناطق على جنبيها باتجاه أطراف الـ (هستوغرام) التغيرات التي حدثت. المصدر: [6].

إذا أخذنا الشكل (4-11) كمثال، وأردنا عرض المنتج النهائي، وهو صورة تحديد التغيرات باستخدام القيم الفاصلة في الشكل، فإنه يمكن إعطاء عناصر الصورة المتغيرة - وهي ذات قيم السطوع من 0 إلى 100 - لوناً معيناً (الأبيض، مثلاً)، وعناصر الصورة غير المتغيرة ذات القيم من 100 و 150 لوناً آخر (الأسود، مثلاً) باستخدام جدول مرجعي (Look up Table). ونتيجة لذلك، فإنه يمكن للنظر إلى الصورة الناتجة أن يتعرف على مناطق التغير، وعدم التغير من خلال هذين اللونين.

يجب التنويه هنا إلى وجود عدد من المحاذير التي لا يأخذها الكثير من المحللين أو مطوري برامج معالجة الصور في الاعتبار، والتي تؤثر على صحة المعلومات الناتجة من تحديد التغيرات باستخدام طرح الصور المباشر الذي تم تناوله آنفاً. من هذه المحاذير:

(1) استخدام صورتين ملتقطتين في فترتين (موسمين) مختلفتين من السنة؛ إذ يؤدي ذلك إلى وجود اختلاف في زاويتي ارتفاع وسمت الشمس (Sun Zenith and Azimuth Angles) خلال فصول السنة بين الصورتين، وبالتالي اختلاف في قيم الانعكاس للمعالم التي لم يطرأ عليها تغير خلال هذه الفترة نتيجة لخاصية عدم تماثل الانعكاس (Reflectance Anisotropy) الطبيعية المرتبطة بمعظم الأجسام على سطح الأرض. هذه الخاصية (والتي تم التطرق إليها في فقرة (2-1-3)) تنتج من الاختلاف في زوايا ارتفاع وسمت أشعة الشمس الساقطة، وزاوية نظر

المستشعر إلى الأرض (Sensor View Angle)، وتوصف بـ ”دالة توزيع الانعكاسات ثنائية الاتجاه“ (Bidirectional Reflectance Distribution Function-BRDF).

- (2) اختلاف الحالة الجوية بين الصورتين (وجود غبار، هباء، بخار ماء، إلخ) التي تؤدي - أيضاً - إلى اختلاف في قيم الانعكاس من نفس المعالم.
- (3) عدم تماثل قيم السطوع (BV) من مستشعر لآخر نتيجة الاختلاف في طريقة حساب قيم السطوع للصورة، ومعايرة المستشعرات، وحساسية هذه المستشعرات.

لذلك من المفضل قبل عملية طرح الصور تحويل (إرجاع) قيم السطوع إلى قيم الإشعاع الأصلية التي تعكسها الأجسام من سطح الأرض بوحدة (Radiance)، أو قيمة انعكاس (Reflectance) بدون وحدة. من هذا المنطلق، فإنه - ولغرض الحصول على نتائج صحيحة، ودقيقة، وتعكس الحقيقية - يتعين على المحلل التصحيح لجميع التأثيرات المشار إليها آنفاً قبل إجراء عملية المقارنة بين الصورتين (لمزيد من التفاصيل عن كيفية التصحيح لهذه التأثيرات والتحويل من قيم السطوع إلى قيم الإشعاع والانعكاس يمكن الرجوع إلى الفقرات (2-1-4)، و(3-1-2)، و(2-1-5)).

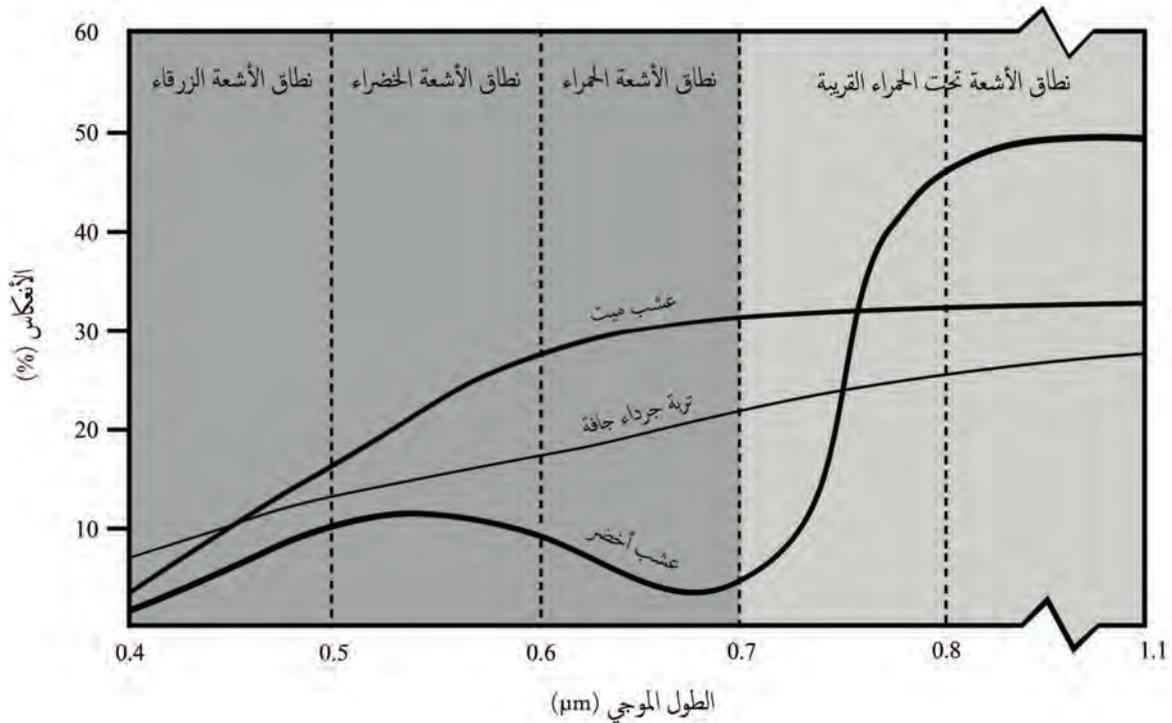
2-7-4 نسبة الصور:

كما قد تطرقنا في الفقرة (3-4) إلى هذه العملية، وفوائدها في التغلب على التغير في المحتوى الإشعاعي في الصورة الناتج من ظروف التصوير، كوجود الظلال في منطقة من الصورة، وعدم وجوده في منطقة أخرى، أو التغير في زاويتي ارتفاع وسمت الشمس خلال السنة، وغير ذلك من العوامل الأخرى. هذه العملية مفيدة - أيضاً - في عملية تحديد التغيرات التي حدثت في فترة زمنية معينة. فعند تطبيق المعادلة الواردة في الفقرة (3-4)، فإن قيم سطوع عناصر الصورة التي لم يحدث بها تغير ستكون 1، أما العناصر التي حدث بها تغير، فستكون قيمها أكبر أو أصغر من 1، بحيث تكون إما كسرية، أو عدداً صحيحاً، أو صفراً، أو غير معرفة. وللتغلب على هذه المشكلة، فإنه يتم إعادة تدرج (Scaling) قيم عناصر الصورة الناتجة من عملية النسبة للوصول إلى قيم قياسية مناسبة للعرض (0-255، مثلاً) (تفاصيل هذه العملية موضحة في فقرة (3-4)). وبنفس الطريقة المستخدمة في طرح الصور (فقرة (4-7-1)) يتم تكوين (هستوغرام) تحتوي أطرافه على عناصر الصورة التي حدث بها تغيرات. تحديد القيمة الفاصلة بين عناصر الصورة ”المتغيرة“ و”غير المتغيرة“ على الـ (هستوغرام) يُبنى (كما ورد أيضاً في الفقرة السابقة) على تجربة وخبرة المحلل.

تحديد التغيرات عن طريق نسبة الصور بالصيغة الرياضية المشار إليها آنفاً يتطلب، كما هي الحال مع طريقة تحديد التغيرات بطرح الصور (فقرة (4-7-1))، الأخذ بالاعتبار جميع التأثيرات البيئية والهندسية والإلكترونية والتصحيح لها.

8-4 أدلة الحياة النباتية:

يعتبر جمع المعلومات الدقيق عن أنواع وصحة النباتات، وكميات المحاصيل وغيرها من التطبيقات الزراعية عن طريق أخذ قراءات وقياسات حقلية - أمراً مكلفاً من الناحية الزمنية والمادية، وأحياناً يكون مستحيلاً، وخصوصاً في بعض المناطق التي يصعب الوصول إليها إما بسبب وعورة المكان، أو بسبب عدم استطاعة الدخول إلى الملكيات الخاصة. ويمكن التغلب على هذه العوائق من خلال معالجة الصور الفضائية لبعض من الأقمار الأكثر استخداماً في هذا المجال، كـ(لاندسات)، و(سبوت)، و(نوا) (NOAA)، و(موديس) (MODIS). ومفهوم عملية معالجة الصور لهذا الغرض هو تخفيض عدد نطاقات الصور بحيث نحصل على قيمة مفردة لكل عنصر صورة تصف خصائص النبات، كالإنتاجية (Productivity)، ودليل مساحة أوراق النبات (Leaf Area Index- LAI)، والمحتوى الخضري، وغيرها. وهناك العديد من الخوارزميات التي تستخدم لاستخلاص مثل هذه المعلومات من الصور الفضائية تسمى أدلة الحياة النباتية (Vegetation Indexes).



شكل (4-12) منحنيات الانعكاسات الطيفية للفترة الطيفية (0.4 μm - 1.1 μm) لثلاثة معالم على سطح الأرض: العشب الأخضر، والعشب الميت، والتربة الجرداء الجافة. المصدر: [7].

تمهيداً للدخول في تفاصيل عمليات حساب الأدلة النباتية، سنتناول خصائص الانعكاس لثلاثة من المعالم الأكثر انتشاراً على سطح الأرض. الشكل (4-12) يعرض خصائص الانعكاسات الطيفية لعشب

أخضر معافي، و لعشب ميت، ولأرض جرداء جافة. ويتضح من خلال هذا الشكل بأن العشب الأخضر المعافي يعكس بشكل كبير (من 40 إلى 50 %) الأشعة فوق الحمراء القريبة ($0.7\mu\text{m} - 1.1\mu\text{m}$) الساقطة عليه، وبشكل أقل الأشعة المرئية ($0.4\mu\text{m} - 0.7\mu\text{m}$)، بينما نجد العشب الميت يعكس الأشعة المرئية بدرجة أكبر من العشب الأخضر المعافي. أما الأرض الجرداء الجافة، فإنها تعكس الأشعة المرئية بدرجة أكبر من العشب الأخضر المعافي، وأقل من العشب الميت؛ لكنها تعكس الأشعة تحت الحمراء بدرجة أقل من العشب الأخضر والعشب الميت.

من أوائل أدلة الحياة النباتية وأكثرها انتشاراً ”دليل الحياة النباتية المبني على الطرح المعايير“ (Normalised Defference Vegetation Index-NDVI). خوارزمية هذا الدليل ببساطة عبارة عن قسمة الفرق بين قيمتي نطاقي الأشعة الحمراء، وتحت الحمراء القريبة على مجموع قيمتيهما على النحو التالي:

$$NDVI = \frac{BV_{NIR} - BV_{Red}}{BV_{NIR} + BV_{Red}}$$

أول من طور هذا الدليل الباحثون (Rouse et al., 1973)، وقد حسبوا الطرح المعايير لقيم السطوح من النطاقين السابع والخامس لصور (MSS) على النحو التالي:

$$NDVI7 = \frac{MSS7 - MSS5}{MSS7 + MSS5}$$

ولقد تم أيضاً استخدام نفس الخوارزمية لحساب هذا الدليل من النطاقين السادس والخامس لصور (MSS) على النحو التالي:

$$NDVI6 = \frac{MSS6 - MSS5}{MSS6 + MSS5}$$

بعد ذلك طور مجموعة أخرى من الباحثين (Deering et al., 1975) هذا الدليل بإضافة قيمة 0.5، وأخذ الجذر التربيعي للمجموع، وسموه دليل الحياة النباتية المُحوَّل (Transformed Vegetation Index-TVI). المعادلات التالية توضح خوارزمية هذا الدليل باستخدام النطاق السابع، والسادس، والخامس لصور (MSS):

$$TVI6 = \sqrt{NDVI6 + 0.5}$$

$$TVI7 = \sqrt{NDVI7 + 0.5}$$

وجد بعد ذلك باحثون آخرون أن إضافة قيمة 0.5 لم تتخلص من القيم السالبة في دليل الحياة النباتية المُحوّل، واقترحوا خوارزمية أخرى على النحو التالي:

$$TVI6 = \frac{NDVI6 + 0.5}{Abs(NDVI6 + 0.5)} \sqrt{Abs(NDVI6 + 0.5)}$$

$$TVI6 = \frac{NDVI7 + 0.5}{Abs(NDVI7 + 0.5)} \sqrt{Abs(NDVI7 + 0.5)}$$

حيث Abs القيمة المطلقة.

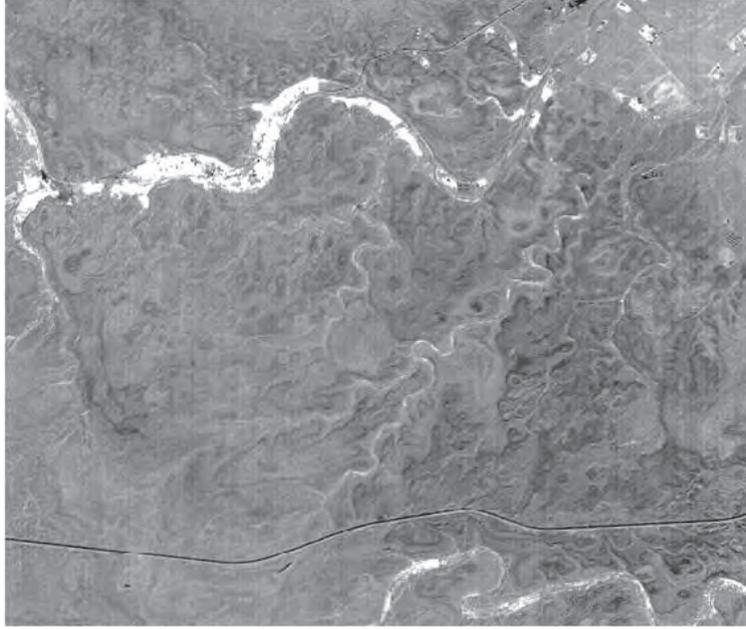
النسخة الحالية لدليل الحياة النباتية المبني على الطرح المعايير (NDVI) لصور المستشعر (TM) لأقمار (لانداست 4، 5)، وصور المستشعر (HRV) لأقمار (سبوت)، وصور المستشعر (AVHRR) لأقمار (نوا) التي طوّرها الباحثون (Marsh et al., 1992; Larsson, 1993; Eastman and Fulk, 1993) هي على النحو التالي:

$$NDVI_{TM} = \frac{TM4 - TM3}{TM4 + TM3}$$

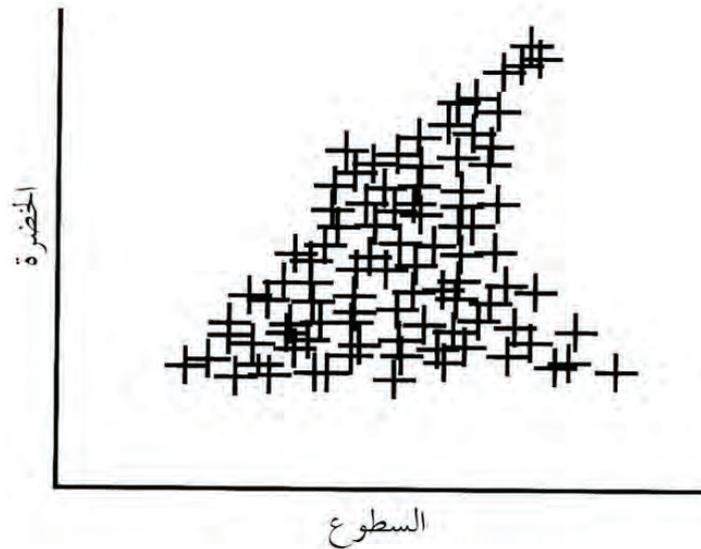
$$NDVI_{HRV} = \frac{XS3 - XS2}{XS3 + XS2}$$

$$NDVI_{AVHRR} = \frac{IR - Red}{IR + Red}$$

الشكل (4-13) يوضح صورة دليل الحياة النباتية المبني على الطرح المعايير التي تم حسابها من صورة المستشعر (HRV) للقمر (سبوت). عناصر الصورة ذات السطوع الكبرى تمثل محتوى نباتياً أكبر.



شكل (4-13) صورة دليل الحياة النباتية المبني على الطرح المعايير (NDVI) المنتجة من صورة المستشعر (HRV) للقمر (سبوت) لمنطقة حريملاء، وملهم شمال غرب مدينة الرياض. عناصر الصورة ذات السطوع الكبرى تمثل محتوى نباتي أكبر، وهي مناطق نبات النخيل في الوديين الممتدين من الشرق إلى الغرب في أعلى وأسفل الصورة وأشجار الطلح في بعض الشعاب المتفرقة في الصورة.

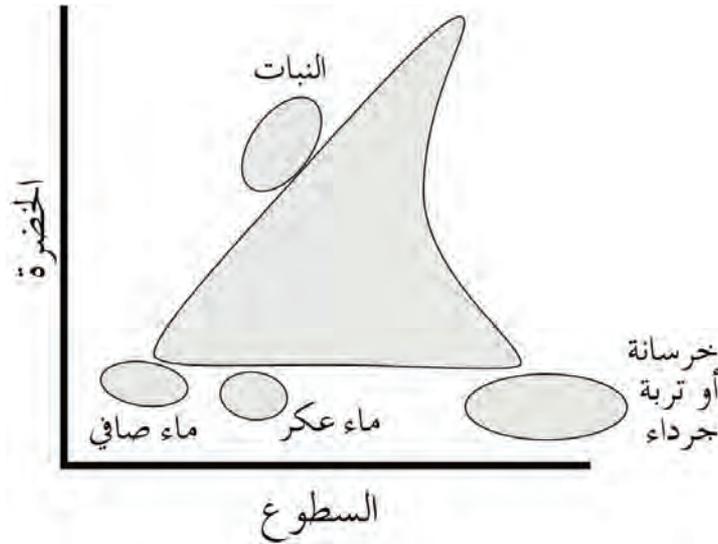


شكل (4-14) رسم بياني للمستوي (Plane) الذي يجمع بين القيم الطيفية لدليل السطوع، ودليل الخضرة لتحويل القبة الكوزية (TCT) لمنطقة زراعية، ويلاحظ توزيع النقاط الذي يأخذ شكل القبة. المصدر: [7].

من أهم أدلة الحياة النباتية المستخدمة حالياً ما يسمى بـ "تحويل القبة الكوزية" (Tasseled Cap Transformation-TCT) الذي تم تطويره من قبل الباحثين (Kauth and Thomas, 1976).

هذا الدليل عبارة عن تحويل متعامد (Orthogonal Transformation) للحيز الفراغي (Space) للنطاقات الأصلية لصورة (MSS) إلى حيز فراغي جديد رباعي الأبعاد يمكن تفسيره كمركبات للحياة النباتية (Vegetation Components). وقد تم اختبارها بدقة، وثبتت فعاليتها، وهو يستخدم اليوم على نطاق واسع في مجال الأبحاث الزراعية. وقد سُمي هذا التحويل بهذا الاسم نظراً لأنه يأخذ شكل القبعة (Cap) (شكل (4-14)). ورباعية أبعاده تُثَلَّ بأربعة محاور جديدة، هي دليل سطوع التربة (Soil Brightness Index-SBI)، ودليل النبات الأخضر (Green Vegetation Index-GVI) اللذان يحتويان على معظم معلومات الصورة (95% - 98%)، ودليل المحتوى (الحشوة) الأصفر (Soil Yellow Stuff Index-YVI)، ودليل المعلومات غير ذات العلاقة (Non-Such Index-NSI) الذي يحتوي على التأثيرات الجوية (Haze).

وقد وجد الباحثان بأنه يمكن تفسير أو شرح 98% من التغير (Variance) في الخصائص الطيفية لعدة أنواع مختلفة من التربة باستخدام دليل سطوع التربة (SBI)، وخلصوا إلى أن التربة الجرداء تقع على خط مواز لمحور السطوع، وكلما زاد البعد (المسافة) عمودياً عن خط التربة، كلما زاد وجود النباتات في مجال الرؤية لعنصر الصورة (Pixel Field of View) (شكل (4-15)).



شكل (4-15) مواقع أنواع مختلفة من الغطاءات الأرضية على مستوي (السطوع-الخضرة) الطيفي. ويلاحظ العلاقة القوية بين السطوع والتربة الجرداء، وبين الخضرة والنباتات. المصدر: [7].

وحسب (Kauth and Thomas, 1976)، فإن حساب قيم الأدلة الأربعة سابقة الذكر لعنصر صورة (MSS) للقمر (لاندسات 1) يكون على النحو التالي:

$$SBI = 0.433MSS4 + 0.632MSS5 + 0.586MSS6 + 0.264MSS7$$

$$GVI = -0.290MSS4 - 0.562MSS5 + 0.600MSS6 + 0.491MSS7$$

$$YVI = -0.829MSS4 + 0.522MSS5 - 0.039MSS6 + 0.194MSS7$$

$$NSI = 0.223MSS4 + 0.012MSS5 - 0.543MSS6 + 0.810MSS7$$

بينما يمكن حساب قيم الأدلة الأربعة لعنصر صورة (MSS) للقمر (لاندرسات 2) حسب الباحثين (Thompson nad Wehmanen, 1980; Kauth et al., 1979) على النحو التالي:

$$SBI = 0.332MSS4 + 0.603MSS5 + 0.675MSS6 + 0.262MSS7$$

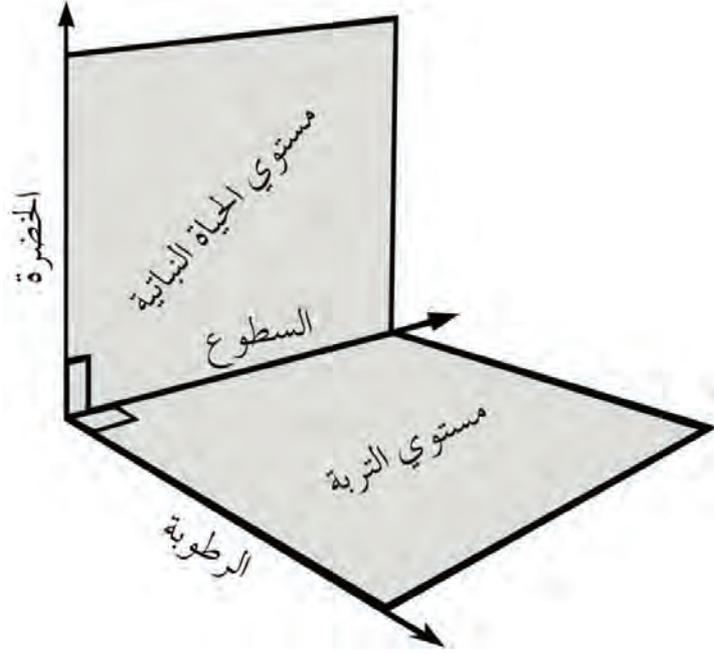
$$GVI = -0.283MSS4 - 0.660MSS5 + 0.577MSS6 + 0.388MSS7$$

$$YVI = -0.899MSS4 + 0.428MSS5 + 0.076MSS6 - 0.041MSS7$$

$$NSI = -0.016MSS4 + 0.131MSS5 - 0.452MSS6 + 0.882MSS7$$

وقد وسع الباحثون (Crist, 1983; Crist and Cicone, 1984a, b) مفهوم عملية تحويل القبعة الكوزية (TCT) ليشمل بيانات ستة نطاقات لصور (TM) (باستثناء نطاق تحت الحمراء الحراري)، حيث وجدوا أن بيانات هذه النطاقات تحتل ثلاثة أبعاد (أو أدلة)، وهي السطوع (Brightness)، والخضرة (Greenness)، والرطوبة (Wetness)، وتشكل ثلاثة سطوح مستوية، هي سطح التربة (Plane of Soil)، و سطح الحياة النباتية (Plane of Vegetation)، و سطح انتقالي بينهما، هو سطح الرطوبة (Plane of Wetness) ذو العلاقة بالغطاء النباتي، والمحتوى المائي في التربة (شكل (4-16)، و جدول (4-1)).

وقيمة السطوع عبارة عن متوسط موزون (Weighted average) لقيم ستة النطاقات، لكن قيمة الخضرة عبارة عن التباين (Contarst) بين نطاقات الأشعة المرئية، وتحت الحمراء القريبة مع مشاركة بسيطة من نطاقي الأشعة تحت الحمراء المتوسطة (TM5, TM7)، وقيمة الرطوبة يمكن وصفها بالتباين بين نطاقي الأشعة تحت الحمراء المتوسطة ونطاقي الأشعة الحمراء، وتحت الحمراء القريبة (TM3, TM4).



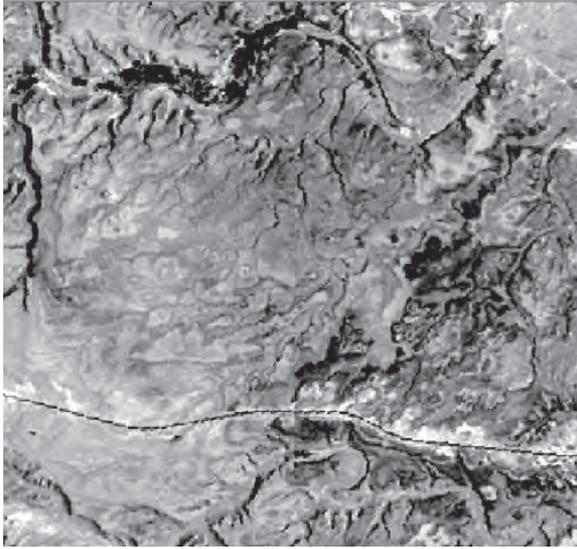
شكل (4-16) الحيز ثلاثي الأبعاد (الخصرة، السطوع، الرطوبة) لتحويل القبة الكوزية الناتج من صور (TM)، والذي يحدد مستويين، هما مستوي النبات، ومستوي التربة. المصدر: [6].

جدول (4-1) معاملات تحويل القبة الكوزية لأدلة الخصرة، والسطوع، والرطوبة لصور (TM). المصدر: [6].

النطاق	1	2	3	4	5	7
السطوع	0.3037	0.2793	0.4343	0.5585	0.5082	0.1863
الخصرة	-0.2848	-0.2435	-0.5436	0.7243	0.0840	-0.1800
الرطوبة	0.1509	0.1793	0.3299	0.3406	-0.7112	-0.4572

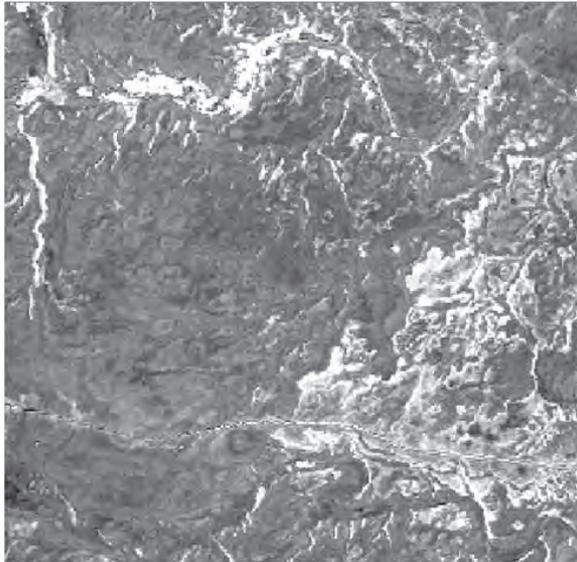
يوضح الشكل (4-17) صور مُركَّبات الخصرة، والسطوع، والرطوبة التي تم إنتاجها من ستة نطاقات (باستثناء نطاق تحت الحمراء الحرارية) لصورة (TM) للمنطقة التي تضم مدينتي حريملاء، وملهم شمال غرب مدينة الرياض باستخدام تحويل القبة الكوزية (TCT). زيادة درجة البياض في صورة المُركَّبة تدل على زيادة القيمة التي تمثلها هذه المُركَّبة. فعلى سبيل المثال، المناطق البيضاء (الساطعة) في صورة مُركَّبة الخصرة تدل على وجود نباتي كثيف، ومنها مزارع النخيل في الوديين الممتدين من الشرق إلى الغرب في أعلى وأسفل الصورة. والمناطق الساطعة في صورة مُركَّبة الرطوبة تشير إلى مناطق المحتوى المائي في النبات والتربة، وهي في هذه الحالة متمثلة في مزارع النخيل والسبخات المتفرقة في المنطقة. وفي صورة مُركَّبة السطوع ذات العلاقة بالتربة، تشير المناطق الكثيرة البياض في الصورة إلى مناطق التربة الجرداء الجافة ذات خاصية الانعكاس الأعلى.

(أ)

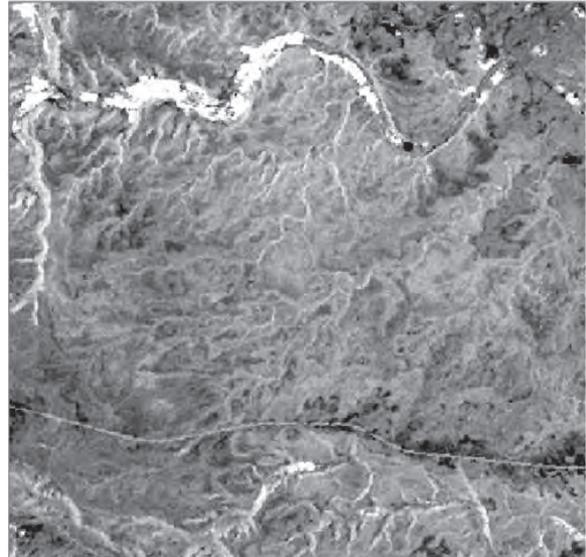


شكل (4-17) ناتج عملية تحويل القبعة الكوزية (TCT) لصورة (TM) لمنطقة مدينتي حريملاء، وملهم. (أ) صورة مركبة السطوع (Brightness). (ب) صورة مركبة الخضرة (Greenness). (ج) صورة مركبة الرطوبة (Wetness). زيادة درجة البياض في صورة المركبة تدل على زيادة القيمة التي تمثلها هذه المركبة.

(ج)



(ب)

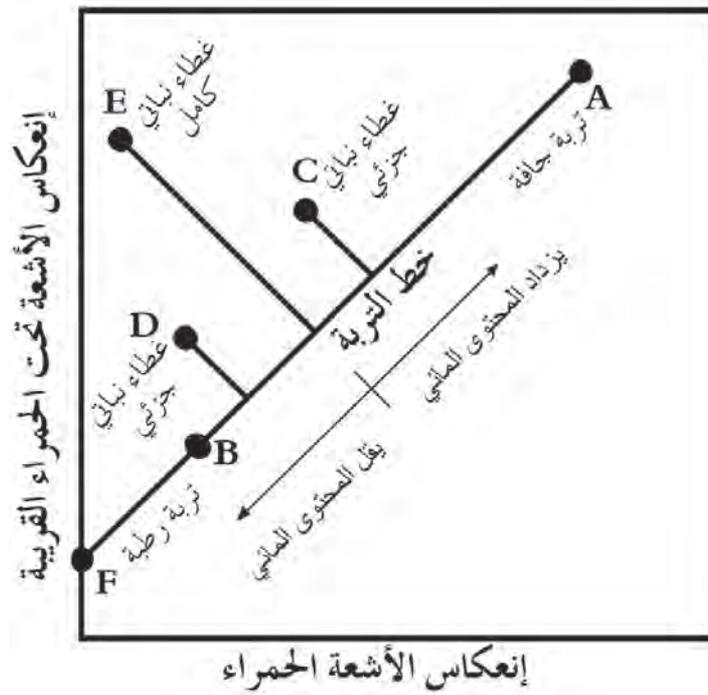


شملت عملية تحويل القبعة الكوزية أيضاً صور الجيل الجديد من أقمار (لاندسات). الجدول (4-2) يعرض معاملات تحويل القبعة الكوزية لأدلة الخضرة، والسطوع، والرطوبة لصور (ETM+) للقمر (لاندسات 7) (Huang et al., 2002).

جدول (4-2) معاملات تحويل القبعة الكوزية لأدلة الخضرة، والسطوع، والرطوبة لصور (ETM+). المصدر: [12].

النطاق	1	2	3	4	5	7
السطوع	0.3561	0.3972	0.3904	0.6966	0.2286	0.1596
الخضرة	-3344	-0.3544	-0.4556	0.6966	-0.0242	-0.2630
الرطوبة	0.2626	0.2141	0.0926	0.0656	-0.7629	-0.5388

من الأنواع الأخرى للأدلة النباتية ما يسمى بـ "دليل الحياة النباتية المتعامد" (Perpendicular Vegetation Index) الذي طوّره الباحثون (Richardson and Wiegand, 1977)؛ وقد تبنى هؤلاء الباحثون تطوير هذا الدليل على أساس أن طول المسافة العمودية عن خط التربة يعتبر مؤشراً على التطور النباتي (شكل (4-18)). وبشكل عام، فإننا كلما ابتعدنا عن خط التربة باتجاه اليسار، كلما زادت كمية وجود المحتوى النباتي، فالنقطة (E) تمثل غطاء نباتيا كاملا، فيما تمثل النقطتان (C) و (D) منطقتين مغطاتين جزئياً بالنبات، بحيث تمثل الأولى تربة جافة، والثانية تربة رطبة.



شكل (4-18) العلاقة بين النبات، والتربة التي تشكل خلفية (Soil Background) باستخدام دليل الحياة النباتية المتعامد. المصدر: [7].

بالاعتماد على هذا المنطق تم تطوير دليلي حياة نباتية متعامدين لصور (MSS) على النحو التالي:

$$PVI7 = [(0.355MSS7 - 0.149MSS5)^2 + (0.355MSS7 - 0.852MSS7)^2]^{0.5}$$

$$PVI6 = [(-2.507 - 0.457MSS5 + 0.498MSS6)^2 + (2.734 + 0.498MSS5 - 0.543MSS6)^2]^{0.5}$$

ونظراً لكون هذين الدليلين غير فعّالين حسابياً، ولا يفرقان بين يمين ويسار خط التربة (أي الماء من

النبات الأخضر)، فقد اقترح الباحثان (Perry and Lautenschlager, 1984) أدلة نباتات متعامدة جديدة تأخذ بالاعتبار هذه العوامل على النحو التالي:

$$PVI6 = \frac{1.091MSS6 - MSS5 - 5.49}{\sqrt{1.091^2 + 1}}$$

$$PVI7 = \frac{2.4MSS7 - MSS5 - 0.01}{\sqrt{2.4^2 + 1}}$$

■ ■ ■

الفصل الخامس |

تصنيف الصور

Image Classification

1-5 مقدمة:

هناك فرق بين البيانات (Data) والمعلومات (Information)، فالبيانات لا تحتوي على معلومات تفيد المستخدم، وإنما هي عبارة عن صور خام، أو أي شكل من أشكال مصادر البيانات الخام الأخرى، بينما المعلومات هي الناتج من عملية تحليل البيانات التي يستطيع المستخدم فهمها والتعامل معها. وهناك عدة طرق لاستخلاص المعلومات من البيانات الخام، منها: استخلاص المعلومات عن طريق عمليات المسح الجوي أثناء إعداد الخرائط الطبوغرافية، وعملية تصنيف الصور (Image Classification) التي تسبق إنتاج خرائط الأغراض (Thematic Maps) التي تمثل الغطاءات الأرضية (Land Cover) لمنطقة جغرافية معينة. وسيقتصر الحديث في هذا الفصل على النوع الثاني من هذه الطرق.

تتم عملية التصنيف في العادة باستخدام المعلومات أو الأنماط الطيفية (Spectral Patterns) الموجودة في الصورة المتعددة الأطياف (النطاقات) أساساً حسابياً رقمياً لتقسيم عناصر الصورة إلى عدة أصناف تمثل الغطاءات الأرضية. ويسمى التصنيف على أساس المعلومات الطيفية بـ "التعرف على النمط الطيفي" (Spectral Pattern Recognition)، وهو العلم أو الفن المستخدم في اشتقاق معلومات إحصائية من الأنماط أو الخصائص الطيفية (Spectral Patterns) لعناصر الصورة، وإدخالها كأساس في عملية تقسيم عناصر الصورة إلى أصناف بناء على معايير (Criteria) رياضية. يعني ذلك أن كل معلم على سطح الأرض له خصائص طيفية، أو نمط طيفي عبارة عن اتحاد من قيم سطوع عناصر الصورة (BVs) في النطاقات المختلفة.

من عيوب التصنيف على أساس المعلومات الطيفية أنه لا يأخذ في الاعتبار الخصائص الهندسية في الصورة، أي علاقة عنصر الصورة بما يحيط به من عناصر أخرى، وإنما يعتمد على الخصائص الطيفية التي تحددها قيمة الإشعاع (Radiance) الممثلة بقيمة السطوع لعنصر الصورة عند عدد من الأطوال الموجية (النطاقات) المختلفة؛ وللتغلب على العيوب الناتجة من استخدام الخصائص الطيفية يتم استخدام نوع أو نمط آخر من التصنيف يعتمد على البعد المكاني، أي تصنيف عنصر الصورة على أساس علاقته بما يجاوره من

عناصر الصورة الأخرى، ويسمى بـ "التعرف على النمط المكاني" (Spatial Pattern Recognition). تستخدم المصنفات من هذا النوع بعضاً من الخصائص الهندسية التي تربط بين عناصر الصورة مكانياً، ومنها نسيج الصورة (Image Texture)، ومقاس المعلم (Feature Size)، وشكل المعلم (Feature Shape)، والاتجاه (Directionality)، والتكرار (Repetition)، والسياق (Context)؛ وتحاول هذه الأنواع من المصنفات أن تقوم صناعياً بدور مفسر الصورة البصري؛ ولذلك فإن هذا النوع من التصنيف يعد أكثر تعقيداً من النوع الأول (التعرف على النمط الطيفي) وأكثر عملياتٍ حسابية.

هناك نوع ثالث من أنماط التصنيف، وهو التصنيف على أساس البعد الزمني ويسمى بـ "التعرف على النمط الزمني" (Temporal Pattern Recognition)، حيث يتم الاعتماد على عنصر الزمن مساعداً في عملية التصنيف. ولتوضيح أهمية هذا النمط من التصنيف، فإننا لو اكتفينا - على سبيل المثال - بالتصنيف على أساس النمط الطيفي، والنمط المكاني لحقل قمح، فإن نتيجة التصنيف ستختلف من زمن لآخر، حيث سيصنف حقل القمح في بداية فصل الخريف عند نثر البذور تربة جرداء (Bare Soil)، وحقل برسيم (Alfalfa) في فصل الربيع. ولكن لو أدخلنا عنصر الزمن في عملية التصنيف، فإنه سيتم تصنيفه بشكل صحيح.

هناك أنماط أخرى من التصنيف تتم بالاعتماد على معلومات إضافية (Ancillary Data) جُمعت أو أُنتجت بطرق ليست ذات علاقة بالاستشعار عن بعد، كبيانات الارتفاعات الرقمية (DEM)، وميول (Slope) واتجاهات (Aspect) التضاريس (لمعرفة كيفية استخراج ميول التضاريس واتجاهاتها من بيانات الارتفاعات الرقمية يمكن الرجوع إلى فقرة (2-3-1-2)).

في القادم من هذا الفصل سيتم التطرق إلى هذه الأساليب من التصنيف، وسيكون التركيز على التصنيف على أساس النمط الطيفي نظراً لكثرة استخدامه في مجال خرائط الغطاء الأرضي.

5-2 التصنيف بالاعتماد على النمط الطيفي:

هنالك أسلوبان لإجراء مثل هذا النوع من التصنيف، أولهما الاعتماد على عنصر الصورة الكامل (Pixel-Based Classification)، بافتراض أن عنصر الصورة يمثل غطاءً أرضياً واحداً، وثانيهما الاعتماد على عنصر الصورة المختلط (Mixed(Sub)-Pixel Classification)، بافتراض أن عنصر الصورة يحتوي على أكثر من غطاء أرضي. وستتناول فيما يلي بشيء من التفصيل هذين الأسلوبين.

5-2-1 التصنيف بالاعتماد على عنصر الصورة الكامل:

يمكن إجراء عملية التصنيف بهذا الأسلوب بثلاث طرق تعتبر هي المشتهرة في هذا المجال، وهي التصنيف

المراقب (Supervised Classification)، والتصنيف غير المراقب (Unsupervised Classification)، والتصنيف باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks). وسيتم في البداية تناول الطريقتين الأوليين نظراً لوجود عمليات ومفاهيم مشتركة بينهما، فيما يتم بعد ذلك التطرق إلى الطريقة الثالثة.

في التصنيف المراقب يكون لدى المحلل علم سابق ببعض أنواع الغطاءات الأرضية في المنطقة، سواء عن طريق خارطة، أم عن طريق صور جوية، أم من خلال معرفة وخبرة شخصية لدى المحلل عن المنطقة؛ ويقوم المحلل بتعريف هذه الغطاءات الأرضية على الصورة المطلوب تصنيفها عن طريق تحديد عينات تمثل تلك الغطاءات الأرضية، وتسمى عينات تدريب (Training Samples). وعن طريق هذه العينات يكون المشغل قد حدد وصفاً رقمياً أو إحصائياً يمثل الخصائص الطيفية للغطاءات الأرضية في الصورة ليستخدمه برنامج التصنيف (Classification Algorithm) أثناء عملية التصنيف؛ وبعد ذلك، تتم مقارنة كل عنصر (Pixel) من عناصر الصورة (عن طريق برنامج التصنيف) بكل عينة تدريب، ثم يصنف هذا العنصر إلى عينة التدريب القريبة إحصائياً منه. الشريحة (9) تعرض مثلاً توضيحاً لصورة الغطاءات الأرضية (الأصناف) الناتجة من عملية تصنيف مراقب لنفس صورة سبوت المكونة من ثلاثة نطاقات (الأخضر، والأحمر، وتحت الحمراء القريبة) والمعرضة في الشريحة (3أ) للمنطقة التي تقع شمال غرب مدينة الرياض. يغطي غالب منطقة الصورة تربة صحراوية جرداء، وسبخات، وقليل من الغطاء النباتي (النخيل) والمنشآت الحضرية.

تم تصنيف الصورة إلى سبع (7) غطاءات أرضية، تشمل نباتات وعدداً من أنواع من التربة الصحراوية. يوجد تداخل بين بعض الأصناف، ومنها على سبيل المثال، دخول بعض أنواع السبخات (في أجزاء متفرقة من الصورة) والطريق المعبد (أسفل الصورة) تحت صنف "النباتات". يعود ذلك إلى قلة عدد العينات المأخوذة وإمكانية اشتراك أكثر من صنف في عينة واحدة. وسبب عدم أخذ عينات كافية في هذا التصنيف يعود إلى أنه قد أعد لغرض التوضيح فقط، ولم يقصد منه إنشاء خارطة غطاء أرضي دقيقة. ويمكن حل هذه المشكلة بزيادة عدد عينات التدريب بقدر كافٍ لتمثيل الأصناف الموجودة في الصورة، ومراعاة دقة استخلاص العينة بحيث لا تشتمل على أكثر من صنف طيفي (تحديد حجم وشكل عينات التدريب التي تمثل الغطاءات الأرضية موضح في مرحلة التدريب في التصنيف المراقب في فقرة (5-2-1-1)).

يختلف التصنيف غير المراقب عن التصنيف المراقب بأن المحلل ليس لديه علم سابق بأنواع الغطاءات الأرضية الموجودة في المنطقة بسبب نقص في المعلومات المتوافرة لديه؛ ولذلك فإن عملية تحديد عينات التدريب لا تتم من قبل المحلل، وإنما يتولى ذلك الحاسب الآلي عن طريق تقسيم الصورة إلى مجموعات أو أصناف طيفية (Clusters/Spectral Classes) بناء على قيم إحصائية (Statistical Values) يحددها المحلل من خلال برنامج التصنيف. الشريحة (10) تعرض مثلاً توضيحاً لصورة الأصناف الناتجة من عملية تصنيف غير مراقب لنفس الصورة المعرضة في الشريحة (9أ). وتأتي مسؤولية المحلل بعد ذلك في تجميع أو تعليم (Labeling) هذه الأصناف الطيفية إلى أصناف معلوماتية (Informational Classes) تمثل الغطاءات الأرضية الموجودة في المنطقة.

كما في التصنيف المراقب (شريحة (9))، يوجد -أيضاً- تداخل بين بعض الأصناف، كالتداخل بين النباتات والطريق المعبد، وأنواع من السبخات. يعود ذلك إلى العدد المحدود من الأصناف الطيفية الذي تم اختياره (7 أصناف طيفية) لعملية التصنيف الطيفي غير المراقب باستخدام تجميع "آيزوداتا" (ISODATA) (فقرة (5-1-1-1-2))، نظراً لكون هذا المثال مجرد توضيح لعملية التصنيف غير المراقب، ولم يقصد منه إجراء عملية تصنيف دقيقة. ويمكن تصحيح ذلك بزيادة عدد الأصناف الطيفية المستخدمة.

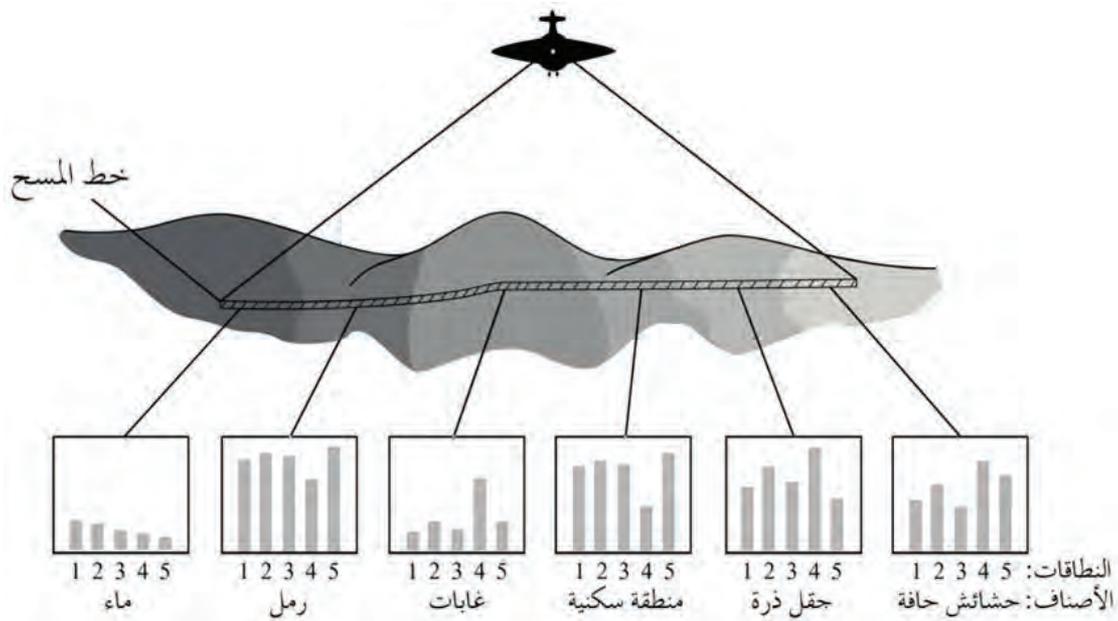
وفيما يتعلق بمقارنة نتائج التصنيف، فعلى الرغم من وجود بعض الاختلافات، إلا أن هناك تشابهاً واضحاً بين ناتج عملية التصنيف المراقب (شريحة (9))، وناتج عملية التصنيف غير المراقب (شريحة (10)).

تعبيراً مراقب أو غير مراقب المستخدمان في عملية التصنيف يعودان إلى الطريقة التي يتم بها تدريب (Training) الحاسب الآلي للتعرف على الأنماط الطيفية الموجودة في الصورة. وعملية التدريب (وكما أشير إليها آنفاً) عبارة عن عملية تحديد المعايير (Criteria) التي تُمكن الحاسب الآلي - عن طريق برنامج التصنيف - من التعرف بها على الأنماط الطيفية (الأصناف) الموجودة في الصورة. وتدريب الكمبيوتر للتعرف على الأنماط الطيفية يتم بطريقتين: الأولى تسمى التدريب المراقب (Supervised Training)، ويتم فيها تدريب الكمبيوتر للتعرف على الأنماط الطيفية الموجودة في الصورة عن طريق المحلل، وذلك بأن يختار المحلل مجموعات من عناصر الصورة (عينات التدريب) تمثل الأصناف أو الغطاءات الأرضية الموجودة في الصورة بناء على المعرفة السابقة بالمنطقة لديه؛ وبعد تحديد الغطاءات الأرضية (الأنماط الطيفية) الموجودة في الصورة عن طريق عينات التدريب يكون قد تم تقسيم الصورة إلى عدد من الأصناف التي تغطي منطقة جغرافية معينة. الطريقة الثانية تسمى التدريب غير المراقب (Unsupervised Training)، وتختلف عن الطريقة الأولى في عدم توافر معلومات مرجعية، سواء حقلية (Ground Truth) أم من صور وخرائط، وعدم إلمام من المحلل بأنواع الغطاءات الأرضية الموجودة في المنطقة قبل عملية التصنيف، وبالتالي فإن تحديد الغطاءات الأرضية يتم ألياً عن طريق الكمبيوتر. ويتمثل دور المحلل في هذه الطريقة في تزويد الكمبيوتر ببعض المعايير التي تساعد على استخلاص أنماط إحصائية (Statistical Patterns) تكون موجودة في الصورة. ونتيجة هذه العملية عبارة عن صورة مقسمة إلى أنماط طيفية لا تمثل - بالضرورة - غطاءات أرضية يمكن التعرف عليها بصرياً (كثيرة بنوع معين، أو حقل زراعي لمحصول معين)، وإنما هي عبارة عن مجموعات من عناصر الصورة (Clusters) المتشابهة في الخصائص الإحصائية تسمى أصنافاً طيفية.

ينتج من عملية التدريب في كلتا الطريقتين (المراقب وغير المراقب) معلومات إحصائية (كمتوسط (Mean) قيم سطوح عناصر الصورة في كل نطاق، والتغير البيني (Covariance) بين قيم السطوح في نطاقين أو أكثر) فريدة لكل صنف تسمى بصمات أو توقيعات (Signatures). تُستخدم هذه البصمات بعد ذلك بواسطة قواعد القرار (Decision Rules)، كمصنف المسافة الدنيا للمتوسطات، أو مصنف الأنابيب المتوازية، أو غيرها من المصنفات الأخرى التي سيتم التطرق إليها لاحقاً في عملية التصنيف.

5-2-1-1-1-2-5 التصنيف المراقب:

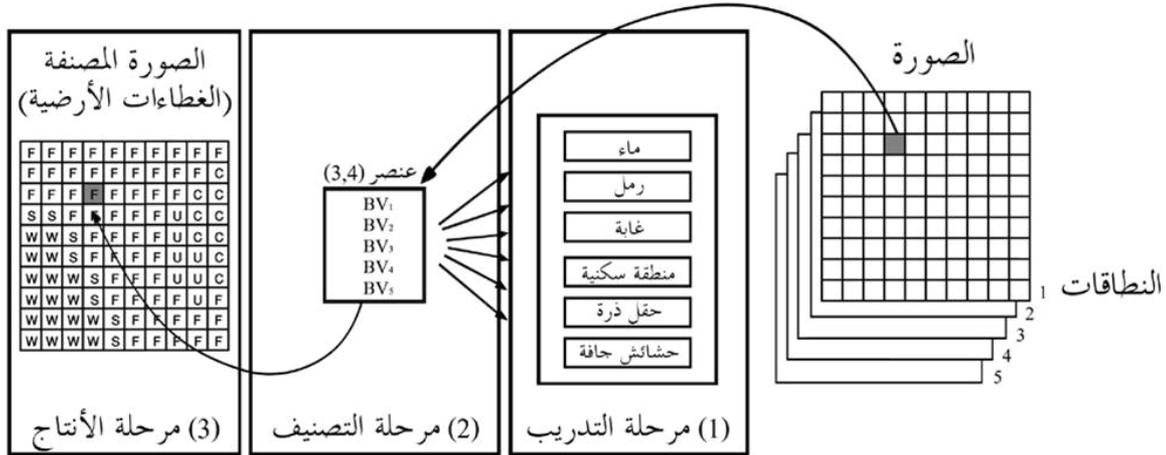
كما هو معلوم، تُمثّل الصورة الرقمية بعناصر (Pixels)، وكل عنصر له قيمة سطوع (BV) تُمثل الانعكاس الصادر من المعلم المقابل له على سطح الأرض. فإذا كانت الصورة مكونة من عدة نطاقات طيفية، فإنه سيكون لكل عنصر قيمة سطوع في كل نطاق $(BV_1, BV_2, \dots, BV_n)$. الشكل (5-1) يعرض مثلاً افتراضياً لقيم السطوع لعناصر صورة ذات خمس نطاقات على امتداد خط مسح (Scan Line) لستة غطاءات أرضية مختلفة على سطح الأرض.



شكل (5-1) مثال افتراضي لقيم السطوع لستة غطاءات أرضية على خط مسح واحد لصورة مكونة من خمسة نطاقات (الأزرق، الأخضر، الأحمر، تحت الحمراء القريبة، تحت الحمراء الحرارية). المصدر: [1].

تتم عملية التصنيف في ثلاث مراحل (شكل (5-2)). المرحلة الأولى هي: مرحلة التدريب (Training Stage)، ويتم فيها تحديد عينات تدريب تمثل الأصناف أو الغطاءات الأرضية المختلفة في الصورة، والمرحلة الثانية هي مرحلة التصنيف (Classification Stage)، ويتم فيها تصنيف كل عنصر في الصورة إلى عينة التدريب (الصنف) الأقرب إحصائياً له، وإذا لم يشابه عنصر الصورة أي من الغطاءات الأرضية المحددة بعينات التدريب؛ فإنه يصنف بصنف يسمى غير معرف (Unknown). بإنهاء هذه المرحلة، يكون قد تم إنتاج صورة مصنفة (Classified Image) عبارة عن مصفوفة (Matrix) ثنائية الأبعاد، كل عنصر فيها يأخذ قيمة تمثل الغطاء الأرضي المقابل له على الطبيعة. المرحلة الثالثة هي مرحلة الإنتاج (Output Stage)، حيث يتم فيها إخراج الناتج من عملية التصنيف في ثلاثة منتجات: المنتج الأول عبارة عن خارطة أغراض (Thematic Map) تمثل الغطاءات الأرضية المختلفة في الصورة، وكل غطاء أرضي يُمثل بلون معين، والمنتج الثاني عبارة عن جداول تمثل الخصائص الإحصائية للغطاءات الأرضية، والمنتج الثالث

عبارة عن ملفات بيانات رقمية (Digital Data Files) تستخدم مع معلومات أخرى في نظم المعلومات الجغرافية (GIS).



شكل (2-5) المراحل الرئيسية في عملية التصنيف المراقب. المصدر: [1].

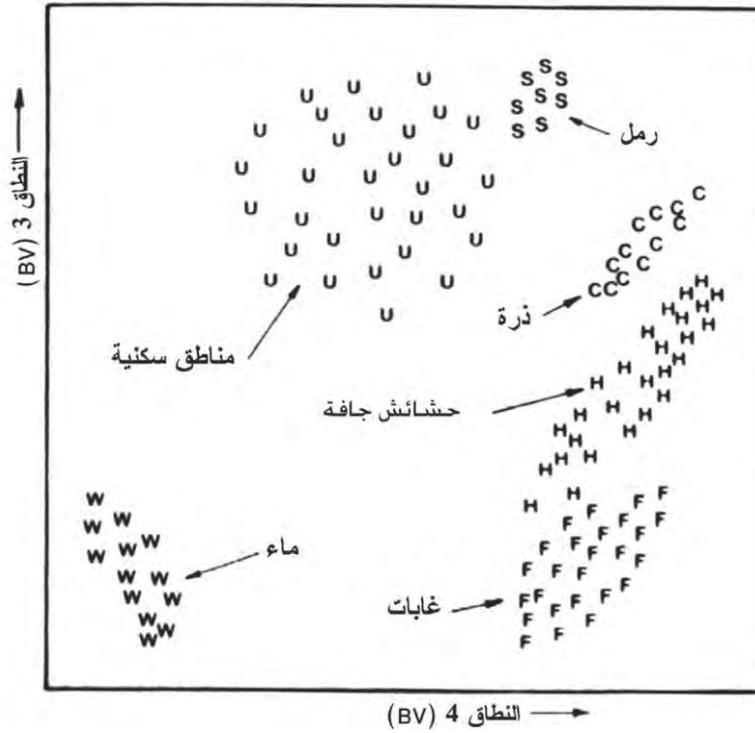
سنتناول (فيما يلي وبشيء من التفصيل) المرحلة الأولى والمرحلة الثانية من عملية التصنيف، أما المرحلة الثالثة، فلا يتسع المجال هنا للتطرق إليها، وسيتم التطرق إلى المرحلة الثانية قبل المرحلة الأولى لسببين: السبب الأول أن مرحلة التصنيف تمثل أساس عملية التصنيف، حيث يتم خلال هذه المرحلة تقييم النمط الطيفي لكل عنصر صورة باستخدام الحاسب الآلي، وعن طريق قواعد قرار يتم تكوينها في مرحلة التدريب (جمع عينات التدريب) لتحديد هوية كل عنصر صورة، ومن ثم تصنيفه إلى الغطاء الأرضي الأقرب له، والسبب الثاني هو أن فهم مرحلة التصنيف يساعد على فهم المتطلبات التي يجب تحقيقها في مرحلة التدريب.

مرحلة التصنيف:

ستتعامل (ولغرض البساطة في الشرح) مع العرض البياني لصورة ذات نطاقين بحيث تكون عملية تصنيفها ثنائية أبعاد، على الرغم من أن استخدام الحاسب الآلي والسرعة الكبيرة التي يوفرها يُمكن من التعامل مع عدد كبير من النطاقات. لنفترض أنه في مرحلة التدريب تم تكوين ست عينات تدريب تمثل ستة أصناف أوغطاءات أرضية موجودة في الصورة، وهي مناطق سكنية (Urban-U)، وحقل ذرة (Corn-C)، وحشائش جافة (Hay-H)، وغابات (Forest-F)، وماء (Water-W)، ورمل (Sand-S).

الشكل (3-5) يعرض رسم مبعثر (Scatter Plot) لتلك العينات في نطاقين من نطاقات الصورة،

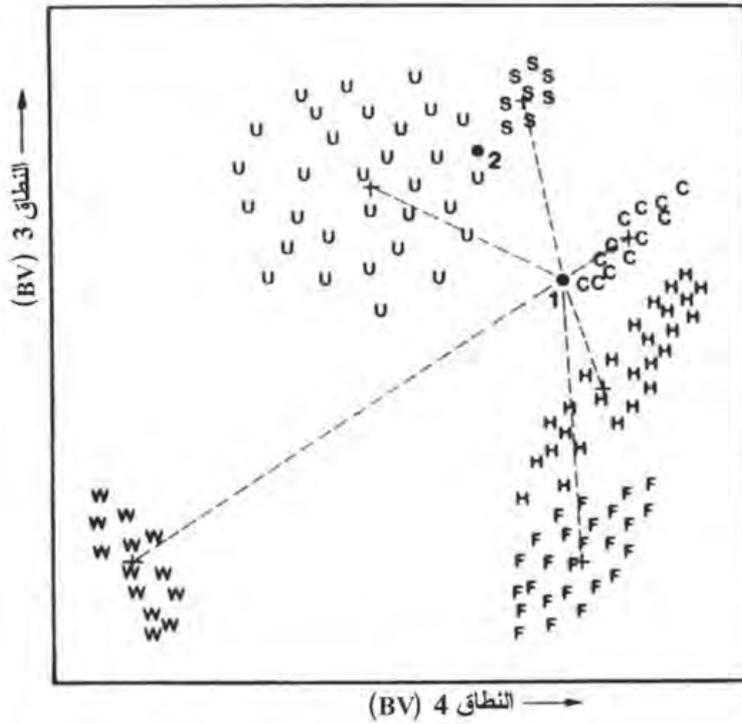
حيث يمثل المحور الرأسي والمحور الأفقي قيم سطوع عناصر الصورة لتلك العينات في هذين النطاقين. يلاحظ من الشكل عدم التداخل بين عينات التدريب، وهو ما يدل على أن عينات التدريب تمثل غطاءات أرضية مختلفة.



شكل (3-5) قيم سطوع لست عينات مرسومة على رسم مبعثر ثنائي الأبعاد. المصدر: [1].

ستتطرق في هذه المرحلة إلى ثلاث من قواعد القرار (Decision Rules) التي بموجبها يتم تصنيف كل عنصر في الصورة إلى عينة التدريب التي تمثل الغطاء الأرضي الأقرب نمطاً طيفياً له، وهي مصنف المسافة الدنيا للمتوسطات، ومصنف الأنابيب المتوازية، ومصنف الاحتمالات العظمى.

مصنف المسافة الدنيا للمتوسطات: الشكل (4-5) يوضح - بيانياً - مفهوم عمل مصنف المسافة الدنيا للمتوسطات (Minimum Distance to Means Classifier). لتنفيذ عملية التصنيف بهذه الطريقة، يجب أولاً حساب المتوسط الحسابي لقيم سطوع عناصر كل عينة تدريب (ممثل بعلامة "+") في الشكل)، بعد ذلك يتم حساب المسافة المتجهة (Vector Distance) بين قيمة سطوع عنصر الصورة المطلوب تصنيفه، والمتوسط الحسابي لكل عينة تدريب؛ ثم يصنف ذلك العنصر إلى عينة التدريب الأقرب مسافة طيفية له. فمثلاً، سوف يصنف عنصر الصورة رقم (1) في الشكل إلى عينة التدريب الأقرب له، وهي حقل الذرة (C).



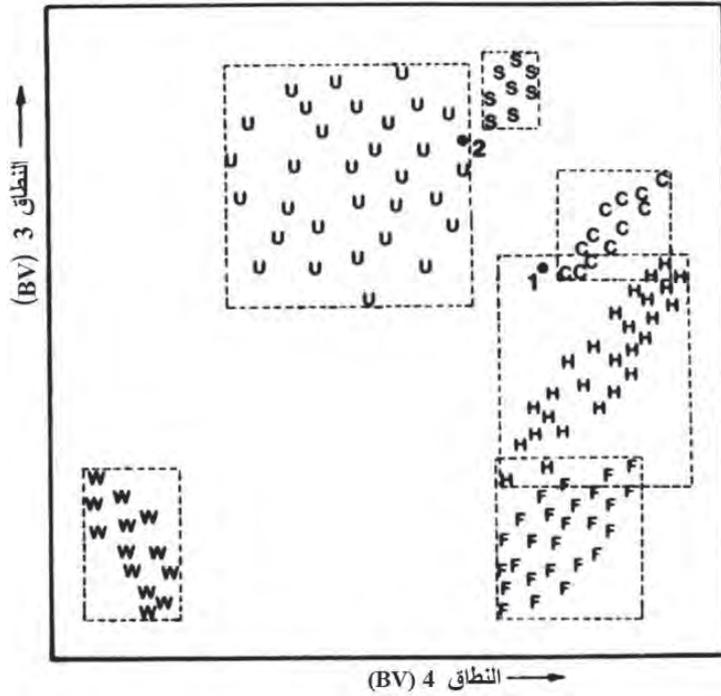
شكل (4-5) مصنف المسافة الدنيا للمتوسطات. المصدر: [1].

هذه الطريقة سريعة حسابياً وفعّالة، ولكن يعاب عليها أنها غير حساسة لدرجة التغير (Degree of Variance) في المحتوى الإشعاعي (ممثلاً بقيم السطوع). فمثلاً، سوف يصنف عنصر الصورة رقم (2) في الشكل إلى عينة التدريب ذات المتوسط الحسابي الأقرب مسافة له، وهي الرمل (S)، على الرغم من أن التغير الكبير (Great Variability) في المحتوى الإشعاعي لعينة تدريب المناطق السكنية (U) يوحي بمنطقية تصنيف هذا العنصر لها، ويمكن التغلب على هذا العيب من خلال مصنف الأنابيب المتوازية.

مصنف الأنابيب المتوازية: لدى مصنف الأنابيب المتوازية (Parrallelpiped Classifier) حساسية أكبر تجاه التغير في المحتوى الإشعاعي لعينة التدريب، وذلك لأخذه بعين الاعتبار أكبر وأصغر قيمة سطوع لعناصر الصورة في كل عينة تدريب في جميع النطاقات الداخلة في عملية التصنيف؛ يعني ذلك أن عينات التدريب تظهر على شكل أنابيب متوازية (أو مستطيلات عند استخدام نطاقين) كما في الرسم المبعر في الشكل (5-5). وتظهر حساسية هذا المصنف للتغير في المحتوى الإشعاعي عند تصنيف عنصر الصورة رقم (2) الواقع بين الرمل والمناطق السكنية، حيث سيتم تصنيف هذا العنصر، كما يتضح من الشكل، كم منطقة حضرية بدلاً من الرمل.

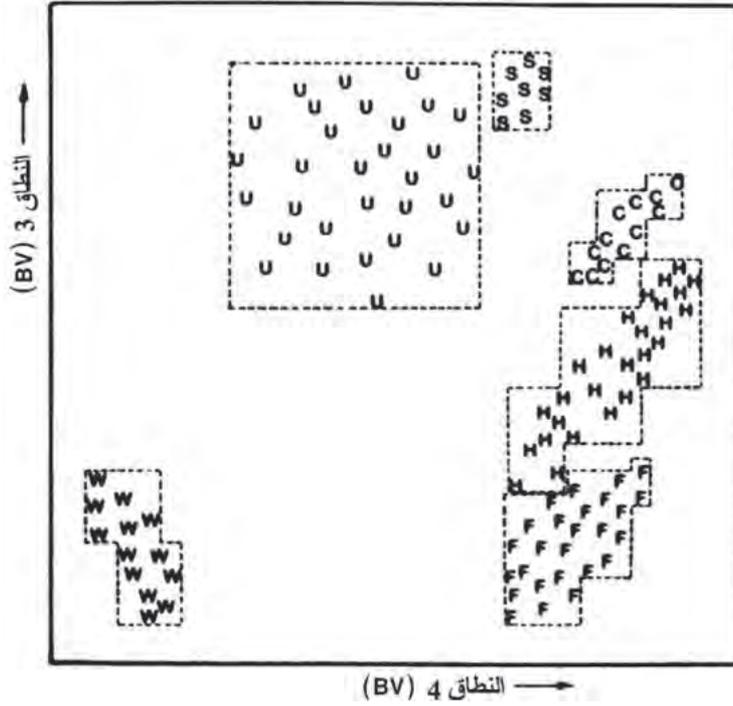
من الصعوبات التي تواجه استخدام هذا المصنف، وتضعف أداءه وجود منطقة مشتركة (Overlap) بين عيني تدريب، كما حدث بين حقل الذرة (C)، والحشائش الجافة (H)؛ فعندما تقع

قيمة سطوع عنصر صورة في المنطقة المشتركة، فإنه سيحدث اشتباه لأية عينة تدريب سيتم تصنيف هذا العنصر، فإما أن يُصنف بصنف يسمى (مشتبه به)، أو يصنف اختيارياً لإحدى عيني التدريب. وجود المنطقة المشتركة بين عينات التدريب عند استخدام هذا المصنف ناتجة من وجود علاقة قوية (High Correlation) في المحتوى الإشعاعي بين النطاقات لعينات التدريب؛ وتظهر هذه العلاقة (بيانياً) بأن يأخذ الرسم المبعثر لعينة التدريب في نطاقين شكل القطع الناقص (Ellipse)، وهو ما يعني أن التغير في قيم سطوع عناصر الصورة للعينة متشابه في النطاقين، كما هي الحال في حقل الذرة، والحشائش الجافة في الشكل (5-5)؛ لذلك سيتسم أداء هذا المصنف بالضعف وعدم الدقة في حالة كون عينات التدريب ذات علاقة قوية. ضعف دقة هذا المصنف تتضح في هذا الشكل من خلال تصنيف عنصر الصورة رقم (1) إلى صنف الحشائش الجافة على الرغم من أن صنف حقل الذرة أقرب له.



شكل (5-5) مصنف الأنابيب المتوازية. المصدر: [1].

للتغلب على هذه المشكلة، وهي عدم حساسية هذا المصنف للعلاقة القوية في المحتوى الإشعاعي بين النطاقات لعينات التدريب؛ فإنه يتم تحويل المستطيلات المفردة التي تمثل عينات التدريب إلى سلسلة من المستطيلات تأخذ شكل الدرج (شكل (5-6)). يتميز هذا المصنف المُحسَّن عن سابقه بالسرعة وفعالية الأداء.



شكل (5-6) مصنف الأنابيب المتوازية بعد تعديله إلى سلسلة مستطيلات تأخذ شكل الدرج. المصدر: [1].

مصنف الاحتمالات العظمى: من مميزات مصنف الاحتمالات العظمى (Maximum Likelihood Classifier) عن غيره من المصنفات السابقة أنه حساس للتغير (Variance)، والعلاقة في المحتوى الإشعاعي (Correlation) بين النطاقات لعينات التدريب (الأصناف). ومن التعابير المستخدمة لوصف العلاقة القوية تعبير التغير البيئي (Covariance) الذي يعني ميل قيم سطوع عناصر الصورة للتغير بطريقة متشابهة في نطاقين أو أكثر؛ فإذا كانت قيم سطوع عناصر الصورة لعينة تدريب معينة في نطاق معين تزداد عند زيادة قيم سطوع عناصر الصورة لهذه العينة في النطاق الآخر، فإنه يمكن القول بأن هناك تغيراً بينياً موجباً (Positive Covariance) كما هي الحال مع عينة حقل الذرة في الشكل (5-3)؛ أما إذا كانت قيم سطوع عناصر الصورة لعينة التدريب في نطاق معين تنقص مع زيادة قيم سطوع عناصر الصورة في النطاق الآخر، فإنه يمكن القول بأن هناك تغيراً بينياً سالباً (Negative Covariance) كما هي الحال مع عينة الماء (W). وتمثل قيم التغير والتغير البيئي لعينة التدريب في مصفوفة بحيث تمثل العناصر القطرية في هذه المصفوفة قيم التغير (Variance) لعينة التدريب في النطاقات المستخدمة في التصنيف، بينما تمثل بقية العناصر في المصفوفة التغير البيئي (Covariance) لعينة التدريب في تلك النطاقات. وبنفس الطريقة، يمكن - كذلك - تمثيل قيم العلاقة (Correlation) بين النطاقات لعينة التدريب كما في جدول (5-1). وتحسب قيم التغير، والتغير البيئي عن طريق معادلات رياضية لا يتسع المجال هنا للخوض فيها. أما قيم العلاقة، فتحسب عن طريق معادلة رياضية تدخل قيم التغير، والتغير البيئي حدوداً فيها، وتتراوح قيمها بين 0 و 1، حيث تدل قيمة 0 على عدم وجود أية علاقة بين قيم عناصر الصورة لعينة في

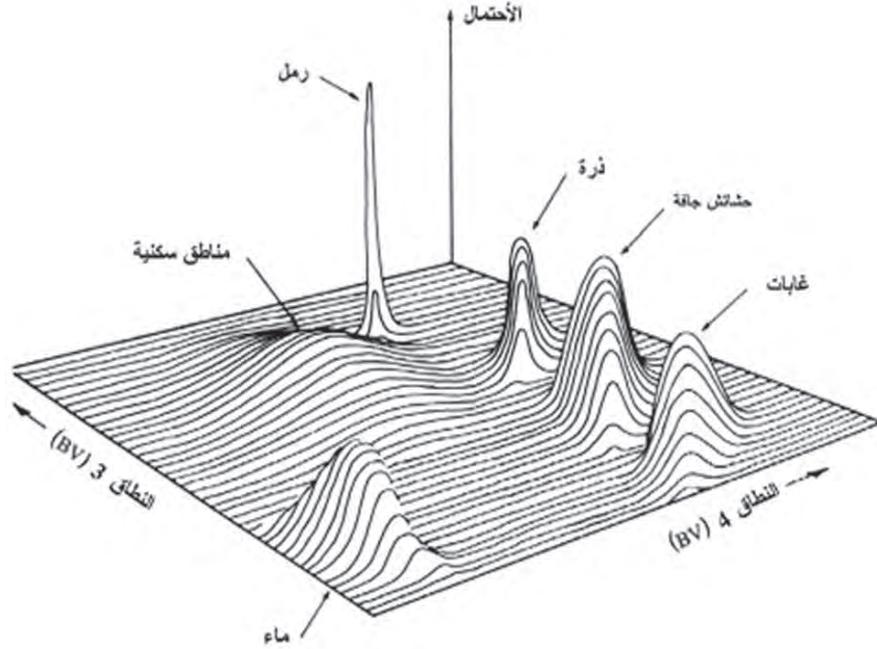
نطاقين، بينما تدل قيمة 1 على وجود علاقة قوية بين قيم سطوح عناصر الصورة في النطاقين. وسنستخدم فيما يلي عند شرح طريقة عمل هذا المصنف) التغير البيئي بدلاً من العلاقة.

جدول (5-1) مثال للقيم الإحصائية لست عينات تدريب لأحد الأصناف (منطقة سكنية) لصورة (TM). المصدر: [4].

6	5	4	3	2	1	
28.20	55.70	36.7	29.80	28.80	70.60	المتوسط
6.70	10.72	4.53	5.65	3.96	6.90	الإحراف القياسي
44.90	114.90	20.60	31.90	15.70	47.60	التغير
16	32	26	19	22	59	القيمة الصغرى
48	84	52	45	41	91	القيمة العظمى
مصفوفة التغير (Variance) والتغير البيئي (Covariance)						
					47.65	1
				15.70	24.76	2
			31.91	20.34	35.71	3
		20.56	12.01	8.27	12.45	4
	114.89	22.30	38.81	23.79	34.71	5
44.92	60.63	12.99	30.86	18.70	30.46	6
مصفوفة العلاقة (Correlation)						
					1.00	1
				1.00	0.91	2
			1.00	0.91	0.92	3
		1.00	0.47	0.46	0.40	4
	1.00	0.46	0.64	0.56	0.47	5
1.00	0.84	0.43	0.82	0.70	0.66	6

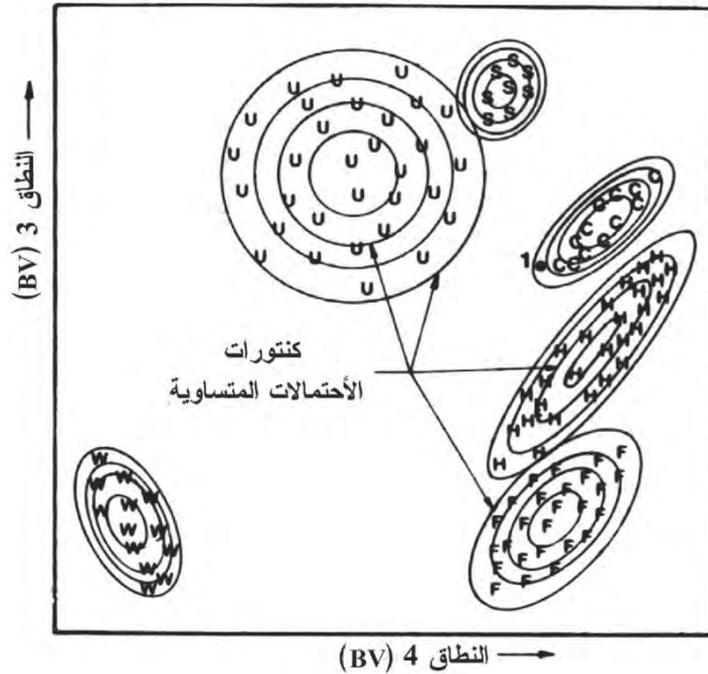
نظراً لأن هذا المصنف يُقيّم التغير والتغير البيئي لعينة التدريب في عملية التصنيف، كما ذكر آنفاً، فإنه سوف يتم وضع افتراض بأن الـ (هستوغرام) الذي يمثل عناصر الصورة لعينة التدريب يأخذ شكل التوزيع القياسي (أو توزيع "جاوس") (Gaussian/Normal Distribution) الذي يأخذ شكل الجرس. ومن خلال هذا الافتراض، يمكن وصف الـ (هستوغرام) لعينة التدريب بعاملين، هما: متجه المتوسط (Mean Vector)، ومصفوفة التغير البيئي (Covariance Matrix) بين النطاقات، وبواسطة هذين العاملين يمكن حساب احتمالية انتماء عنصر الصورة المطلوب تصنيفه إلى أية عينة تدريب.

الشكل (5-7) يعرض رسماً توضيحياً ثلاثي الأبعاد بين العلاقة بين الاحتمالية (Probability) (المحور الرأسية)، وقيم سطوح عناصر الصورة في نطاقين (المحورين الأفقيين). الأسطح التي تأخذ شكل الأجراس في هذا الشكل تسمى دوال كثافة الاحتمال (Probability Density Functions)، وتستخدم هذه الدوال في حساب احتمالية انتماء عنصر الصورة المطلوب تصنيفه لأية عينة تدريب، ويتم تصنيف عنصر الصورة إلى عينة التدريب (الصنف) الذي حصل فيه هذا العنصر على أكبر قيمة احتمال فيها.



شكل (5-7) رسم ثلاثي الأبعاد، يوضح دوال كثافة الاحتمالات المعرفة بمصنف الاحتمالات العظمى. المصدر: [1].

يمثل مصنف الاحتمالات العظمى احتمالات الانتهاء لعينات التدريب بخطوط كنتورية، كل خط كنتوري يأخذ قيمة احتمال واحدة (شكل (5-8)). والخطوط الكنتورية التي تأخذ أشكال القطع الناقص تدل على حساسية هذا المصنف للتغير البيئي. بناء على ذلك، سيتم تصنيف عنصر الصورة رقم 1 كحقل ذرة (شكل (5-8)).



شكل (5-8) الخطوط الكنتورية لقيم الاحتمالات المعرفة بمصنف الاحتمالات العظمى. المصدر: [1].

من عيوب مصنف الاحتمالات العظمى كثافة العمليات الحسابية التي تزيد من زمن المعالجة باستخدام الحاسب الآلي، إلا أنه يمكن التغلب على هذه المشكلة باستخدام الجدول المرجعي (Look Up Table) الذي يتم تكوينه بحساب الاحتمالات لجميع قيم السطوح الموجودة في الصورة في جميع النطاقات الداخلة في عملية التصنيف، ثم تُصنف هذه القيم (بناء على الاحتمالية الكبرى) إلى الأصناف (عينات التدريب) المعدة سابقاً في مرحلة التدريب. بهذه الطريقة سيحتوي الجدول المرجعي على جميع قيم سطوح عناصر الصورة المتوافرة في الصورة، والصنف الذي تنتمي إليه كل قيمة من هذه القيم؛ بعد ذلك، وفي مرحلة التصنيف، يتم المرور على كل عنصر صورة، وتُقرأ قيمة سطوحه في جميع النطاقات الداخلة في عملية التصنيف، ثم يُعطى الصنف الذي يقابله في الجدول. ستجعل هذه العملية إجراءات حسابات الاحتمالات تتم مرة واحدة فقط، وهي عند إعداد الجدول.

من الوسائل الأخرى المستخدمة في التغلب على مشكلة كثافة العمليات الحسابية وبطء عمليات المعالجة في هذا المصنف تخفيض عدد النطاقات، ويتم ذلك بتحويل النطاقات الأصلية إلى المُركّبات الأساسية التي تم التطرق إليها في الفقرة (4-5).

مرحلة التدريب:

عملية التدريب (كمرحلة من مراحل عملية التصنيف) تحتاج إلى علاقة وثيقة بين المحلل والصورة، وإلى معلومات مرجعية (Reference Data) يتم الحصول عليها إما ميدانياً، أو مما يتوافر من وثائق أو خرائط أو صور، أو من خلال المعرفة السابقة بالمنطقة الجغرافية التي تغطيها الصورة، وتحديد دقة عملية التدريب درجة النجاح في عملية التصنيف، وبالتالي دقة المعلومات المشتقة من عملية التصنيف. تهدف عملية التدريب (كما ذكر آنفاً) إلى استخراج مجموعة من البيانات الإحصائية التي تصف النمط الطيفي لكل غطاء أرضي مطلوب تصنيفه في الصورة. ولذلك، فإن تحديد حجم (Size)، وشكل (Shape)، وتوجيه (Orientation) عينات التدريب (Training Samples) التي تمثل الغطاءات الأرضية يتم في هذه المرحلة. وللحصول على نتائج تصنيف مقبولة، فإنه يجب أن تكون عينات التدريب معبرة (Representative)، وشاملة (Comprehensive) بحيث تغطي جميع الغطاءات الأرضية الموجودة في الصورة. يقودنا ذلك إلى إعادة الحديث عن نوعي الأصناف المستخدمة في عملية التصنيف، وهما الأصناف الطيفية، والأصناف المعلوماتية.

الأصناف الطيفية يحددها المحلل بأخذ عينات تدريب لجميع الأصناف التي تظهر في الصورة، وذات خصائص طيفية مختلفة، ثم يُجمّعها في مرحلة لاحقة في الأصناف المعلوماتية. والمثال على ذلك، عندما نريد أن تشمل الصورة المُصنّفة على صنف واحد للماء (صنف معلوماتي)، فإن المحلل يأخذ عينات تمثل جميع

أصناف الماء الموجودة في الصورة، كصنف الماء الصافي، وصنف الماء العكر، وغير ذلك من أصناف الماء الأخرى، وتسمى هذه الأصناف أصنافاً طيفية؛ ثم يقوم المحلل بعد ذلك بتجميع هذه الأصناف في صنف معلوماتي واحد هو صنف الماء. وينطبق هذا الأسلوب على الأصناف المعلوماتية الأخرى، كصنف "الزراعة" الذي يُستخلص من تجميع عدد من الأصناف الطيفية الزراعية، مثل صنف الحبوب، والحمضيات، وغير ذلك من الأصناف الطيفية الأخرى.

عند اختيار عينات التدريب في الصورة، فإنه يفضل أخذ أكثر من عينة (حقل) لكل صنف (غطاء أرضي)، بحيث نضمن تغطية جميع أشكال هذا الصنف في الصورة، وبالتالي الرفع من فرصة التمثيل الصحيح له. وفيما يتعلق بحجم عينة التدريب، فالآراء في ذلك مختلفة، فحسب (Mather, 1999)، لا يعني كِبَر حجم عينه التدريب - بالضرورة - أنه أفضل، فحجم العينة يعتمد على عدد نطاقات الصورة، والخصائص الإحصائية المطلوب تحديدها للأصناف في الصورة، ومنها على سبيل الخصوص متوسط (Mean) وتغير (Variance) قيم السطوع للصنف في كل نطاق، والتغير البيني (Covariance) بين كل زوج من النطاقات؛ ويرى (Mather, 1999) أن حجم العينة المطلوب بوحدة عناصر الصورة (Pixels) لكل صنف هو (30p)، حيث (p) هي عدد النطاقات. فلو افترضنا أننا نتعامل مع صوره ذات نطاق واحد، فإن حجم العينة لكل صنف هو 30 عنصر صورة.

ويرى (Campbell, 2002) أن يختار المحلل عدداً من حقول التدريب (Training Fields) المتفرقة في الصورة لتمثيل عينة التدريب لكل صنف، بحيث يتراوح عددها بين 5 و 10 حقول، ولا يقل عدد عناصر الصورة الإجمالي لها مجتمعة (أي الحجم الإجمالي لعينة التدريب) عن 100 عنصر صورة لكل صنف. يوفر هذا العدد ضماناً أن يكون تقييم الخصائص الإحصائية دقيقاً؛ وينصح في نفس الوقت بآلا يكون كل حقل تدريب من هذه الحقول المتفرقة المختارة لكل صنف كبيراً؛ لكي لا يُشرك أصنافاً أخرى. ويرى بأن يكون كل حقل تدريب من هذه الحقول صغير الحجم مقارنة بالحجم الإجمالي لعينة التدريب المطلوبة لكل صنف. وحسب (Joyce, 1978)، فإن الحد الأدنى، والمفضل، والأعلى للمساحة الأرضية لكل حقل من حقول التدريب المتفرقة للصنف هي 4 هكتارات، و 16 هكتار، و 65 هكتار على التوالي. وإذا أُستخدم عدد عناصر الصورة مقياساً بدلاً من المساحة الأرضية، فإنه يقترح أن تتراوح مساحة حقل التدريب بين 10 و 40 عنصر صورة (MSS). ويمكن تقدير عدد عناصر الصورة المقابل لهذا العدد عند استخدام نوع آخر من الصور (TM، HRV، إلخ) بحسب درجة وضوح هذا النوع من الصور مقارنة بصور (MSS).

ومن الآراء الأخرى في هذا المجال ما يقترحه (Jensen, 1996) بأن القاعدة العامة في تحديد حجم عينة التدريب هي أن حجم عينة التدريب لكل صنف تكون ($< 10 \times$ عدد النطاقات). فعلى سبيل المثال، إذا كانت الصورة المراد تصنيفها تشتمل على ثلاث نطاقات، فإن حجم العينة لكل صنف هو 30 عنصر صورة.

من المقترحات الأخرى ما يراه (Lillesand and Kiefer, 2000) من أن عدد عناصر الصورة التي تحتويها كل عينة تدريب يجب أن لا تقل نظرياً (إحصائياً) عن $(n+1)$ ؛ وذلك لكي يتمكن من حساب الخصائص الإحصائية لهذه العينة أو الصنف، حيث (n) هي عدد النطاقات. كما يريان أن الحد الأدنى لحجم عينة التدريب يتراوح بين $(10n)$ و $(100n)$ عنصر صورة نظراً لأن تقدير قيم الخصائص الإحصائية كالمتوسط، والتغير، والتغير البيئي يتحسن كلما زاد عدد عناصر الصورة.

طرق تمثيل عينات التدريب:

تمثل عينة التدريب في العادة بمضلع (Polygon) مكون من قطع من المتجهات (Vectors) تحيط بعناصر الصورة المكونة لتلك العينة (شريحة (11)). إحداثيات رؤوس مضلع عينة التدريب (Polygon Vertices) إما أن تكون أرضية (جغرافية) بعد تصحيح الصورة هندسياً، أو بإحداثيات صورة (صف، عمود) قبل تصحيح الصورة هندسياً.

هناك طرق أخرى لتمثيل عينات التدريب، منها: طريقة البذرة (Seed) المستخدمة في بعض برامج معالجة الصور (كبرنامج ERDAS)؛ يتلخص عمل هذه الطريقة في أنه يتم تحديد عنصر صورة (Pixel)، وهو البذرة ليكون نواة لعينة التدريب المطلوبة، ثم تُجرى عملية مقارنة بين عنصر البذرة، وكل عنصر من عناصر الصورة المحيطة به عن طريق معاملات طيفية (Spectral Parameters) يحددها المحلل؛ فعناصر الصورة المحيطة التي توافق هذه المعاملات يتم ضمها إلى عنصر البذرة؛ وتقف هذه العملية عند الوصول إلى عنصر صورة لا يوافق المعاملات الطيفية المحددة. وبعد اكتمال تجميع عناصر الصورة المكونة لعينة التدريب، يتم تحويل العينة من عناصر صورة شبكية (Raster Pixels) إلى مضلع (Polygon).

فحص عينات التدريب:

بعد اختيار عينات التدريب، يُجرى عليها فحص نوعي للتأكد من أن كل عينة تدريب نقية طيفياً (Spectrally Pure)، أي لا تشتمل على أكثر من صنف طيفي واحد، وأن توزيع الـ (هستوغرام) لها قياسياً. فكل عينة تحتوي على أكثر من صنف طيفي، كعينة الحشائش الجافة في نطاق "الأخضر" (شكل $(5-9)$)، يجب أن تفصل إلى عدة أصناف. تحدث هذه العملية في الغالب عند إدخال عناصر صورة لصنف طيفي مجاور ضمن عناصر الصورة لعينة التدريب. من العمليات المستخدمة في فحص الجودة لعينات التدريب، أو ما يسمى بعمليات تكرير عينات التدريب (Training Samples Refinement):

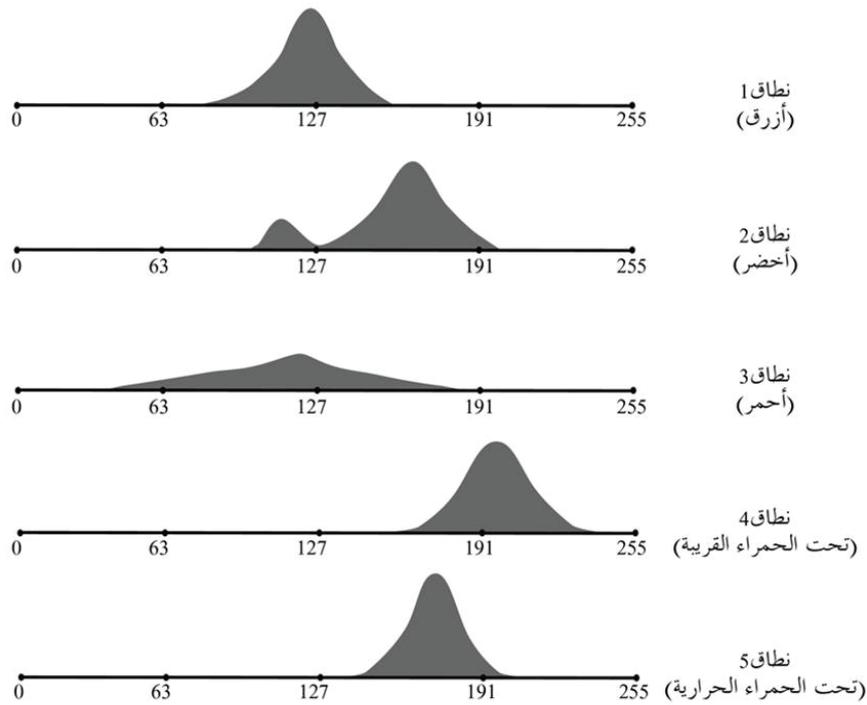
(1) التمثيل البياني للنمط الطيفي (Graphical Representation of Spatial Pattern).

(2) التعبير الكمي للفواصل الطيفية بين عينات التدريب (Quantitative Expressions Of Category Separation).

(3) التصنيف الذاتي لعينات التدريب (Self-Classification Training Set Data).

وستتناول فيما يلي بشيء من التفصيل هذه العمليات.

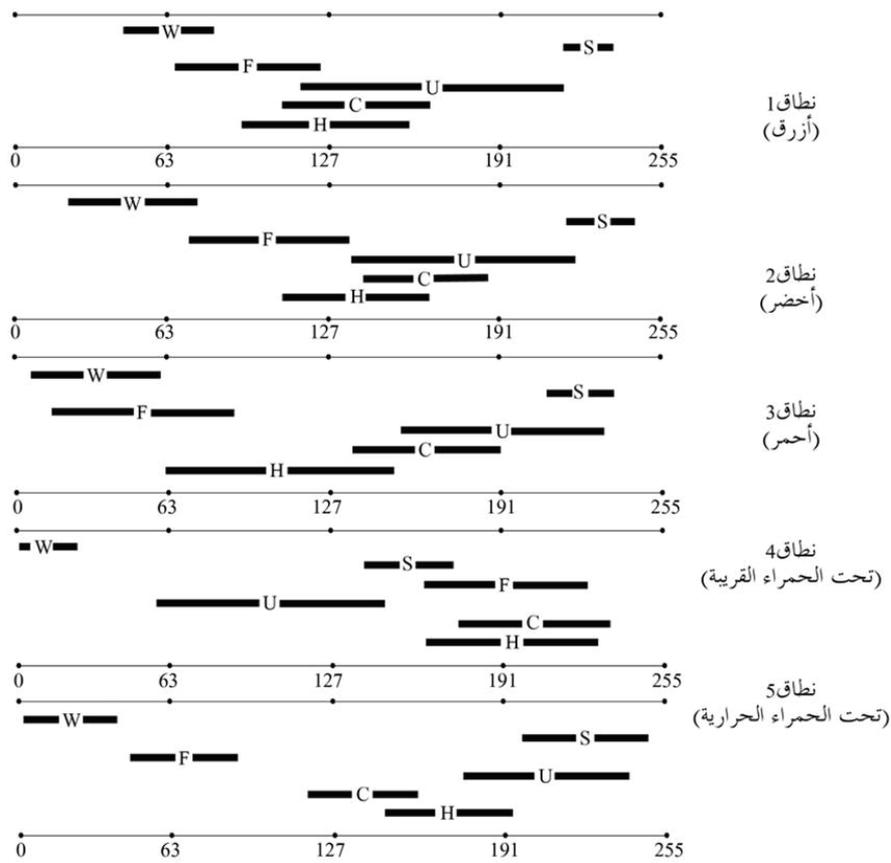
التمثيل البياني للنمط الطيفي: يفيد العرض البياني لك (هستوغرام) في حالة استخدام مصنف الإحتمالية العظمى في التأكد فيما إذا كان التوزيع قياسياً؛ فعينة تدريب الحشائش الجافة كما يتضح من الشكل (5-9) لها (هستوغرام) ذو توزيع قياسي في جميع النطاقات ماعدا النطاق الأخضر (2)، حيث يحتوي على قمتين. يعني ذلك: أن عينة تدريب الحشائش الجافة تحتوي على صنفين طيفيين، إما أن يكونا صنفين مختلفين، أو يكونا صنفين فرعيين من أصناف الحشائش الجافة.



شكل (5-9) (هستوغرامات) لعينة التدريب لصنف "الحشائش الجافة" في خمسة نطاقات. المصدر: [1].

يكون توزيع الـ (هستوغرام) مفيداً عند تحليل كل عينة تدريب على حدة، أما إذا كان الهدف هو إجراء مقارنة بين أكثر من عينة تدريب بتحليل الفواصل الطيفية بينها، فإن ذلك يتطلب عرض تلك العينات على رسم طيفي مركب يشتمل على التوزيع الطيفي لجميع عينات التدريب في جميع النطاقات

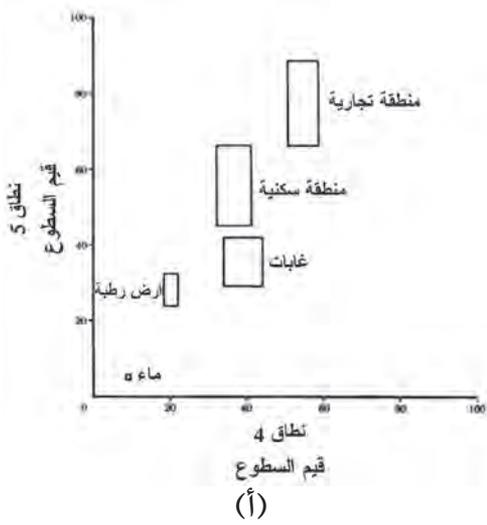
(شكل (5-10)). كما هو واضح من الشكل (5-10)، فقد رُسمت كل عينة تدريب في كل نطاق طيفي على شكل خط بعرض طيفي يساوي $(2 \pm)$ انحراف قياسي، والمتوسط الطيفي لكل عينة منها قد مُثل بالحرف الأول لاسم الصنف لهذه العينة. يتضح من خلال الشكل أن هناك تداخل بين عينة تدريب حقل الذرة (C)، وعينة تدريب الحشائش الجافة (H) في كل النطاقات الطيفية، وهذا يعني أن عملية التصنيف في هذه الحالة لن تكون ناجحة، سواء عند إجرائها على نطاق طيفي واحد أم على أكثر من نطاق. أما بقية عينات التدريب، فهي منفصلة طيفياً على مستوى النطاق الطيفي الواحد، أو على مستوى النطاقات مجتمعة، كما هي الحال مع عيني تدريب الغابة (F) والماء (W). ملخص ذلك: للحصول على تصنيف ناجح، فإن ذلك يتطلب ألا يكون هناك أي تداخل في عينات التدريب في نطاق طيفي واحد على الأقل.



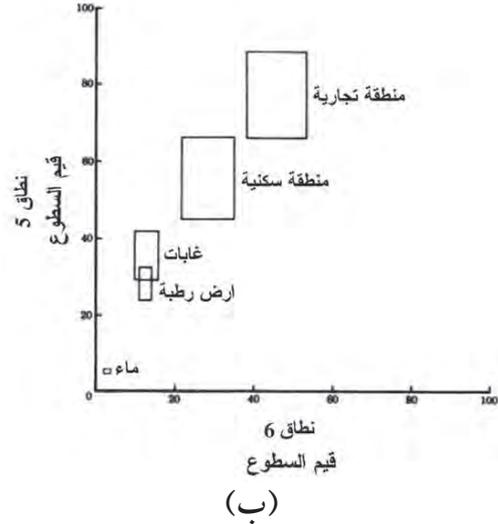
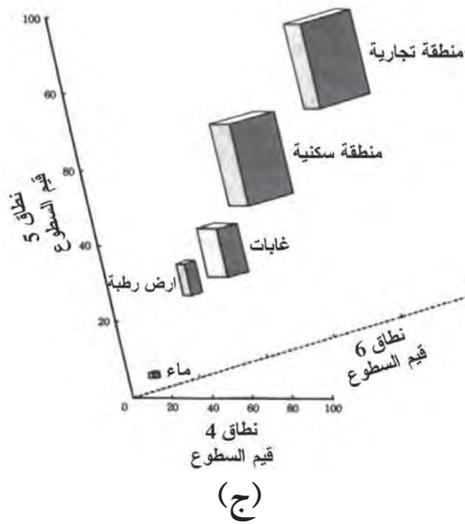
شكل (5-10) رسوم طيفية مركبة لعينات التدريب في خمسة نطاقات. المصدر: [1].

ومن الطرق الأخرى لفحص عينات التدريب بالتمثيل البياني للنمط الطيفي عرض عينات التدريب على رسم ثنائي الأبعاد عند استخدام نطاقين (شكل (5-11أ، ب))، أو ثلاثي الأبعاد (شكل (5-11ج)) عند استخدام ثلاثة نطاقات للتأكد من عدم وجود تداخل بين عينات التدريب.

وتتجلى فائدة استخدام الرسم ثلاثي الأبعاد أو أكثر في أنه قد يظهر أن هناك تداخلاً بين عينتي تدريب في نطاقين معينين ولكن استخدام البعد الثالث (النطاق الثالث) سيوضح أن هناك فاصلاً طيفياً بين عينات التدريب في هذا النطاق، كما هي الحال مع عينتي تدريب الغابات، والأرض الرطبة، مما يسمح بإجراء عملية التصنيف.



شكل (5-11) عرض بياني لعينات تدريب لخمسة غطاءات أرضية في صورة (TM). (أ) عرض بياني ثنائي الأبعاد لعينات التدريب في النطاقين 4 و 5. (ب) عرض بياني ثنائي الأبعاد لعينات التدريب في النطاقين 5 و 6. (ج) عرض بياني ثلاثي الأبعاد لعينات التدريب في النطاقات 4 و 5 و 6. المصدر: [4].



التعبير الكمي للفواصل الطيفية بين عينات التدريب: يتم في هذه العملية حساب الفاصل الطيفي بين كل زوج من عينات التدريب، ويوضع في مصفوفة. ويُمثل الفاصل الطيفي في هذه العملية بمعامل يسمى التباعد (Divergence)، وهو من أوائل المعايير التي استخدمت في قياس الفاصل الطيفي بين صنفين، أو عينتي تدريب. ويتم حساب التباعد بين عينتي تدريب عن طريق الصيغة الرياضية الموضحة أدناه (لا يتسع المجال هنا للدخول في تفاصيلها) التي تدخل متجهات المتوسط (Mean Vector) لهما ومصنفات التغير البيئي (Covariance Matrices) بينهما كمحددات فيها.

التباعد (Divergence) = د (متجهي المتوسط للصنفين، مصفوفتي التغير البيني بين الصنفين)

الجدول (2-5) يعرض مصفوفة تحتوي على قيم التباعد بين عينات التدريب (الأصناف) التي تم التطرق إليها في مرحلة التصنيف على مقياس يمتد بين 0 و 2000. تدل القيمة 2000 على وجود فاصل كبير بين عيني التدريب، فيما تدل القيمة التي تقل عن 1500 على وجود فاصل صغير بين عيني التدريب، مما يدل على أن عيني التدريب عبارة عن صنفين متشابهين طيفياً واستخدامهما في عملية التصنيف لن يعطي نتائج دقيقة.

جدول (2-5) مصفوفة التباعد التي تستخدم في تقييم الفواصل الطيفية بين عينات التدريب. المصدر: [2].

الصنف	ماء	رمل	غابة	منطقة سكنية	حقل ذرة	حشائش جافة
ماء	0					
رمل	1998	0				
غابة	1996	1994	0			
منطقة سكنية	1953	898	1882	0		
حقل ذرة	1997	1938	1812	1823	0	
حشائش جافة	1992	1976	1628	1938	1362	0

التصنيف الذاتي لعينات التدريب: بعد اختيار عينات التدريب يتم إجراء عملية تصنيف ذاتي باستخدام إحدى الطرق الثلاث التي سبق التطرق إليها في مرحلة التصنيف لكل عنصر صورة من عناصر عينات التدريب إلى عينات التدريب المختارة؛ ونتيجة التصنيف تُعرض على شكل مصفوفة تسمى مصفوفة الخطأ (Error Matrix) (جدول (3-5)) التي تستخدم في حساب دقة التصنيف، وستتناولها بشيء من التفصيل في الفقرة (5-1-5). فإذا كانت عناصر المصفوفة غير القطرية تساوي 0 (أي لا تحتوي على عناصر صورة)، فإن ذلك يدل على أن عملية التصنيف صحيحة، ولا يوجد تداخل بين عينات التدريب؛ أما إذا كانت عناصر المصفوفة غير القطرية تحتوي على بعض الأرقام، فإن ذلك يدل على أن عملية التصنيف ليست صحيحة تماماً، وأن هناك تداخلاً بين عينات التدريب حيث تم تصنيف بعض عناصر الصورة في بعض العينات خطأً إلى عينات أخرى؛ فعلى سبيل المثال، نجد في جدول (3-5) أن خمسة عناصر من عينة تدريب الغابة قد صنفت خطأً عينة تدريب ماء.

بالإضافة إلى عناصر الصورة المصنفة لعينات التدريب، فإن الجدول يحتوي على نسبة صحة التصنيف لعينات التدريب؛ فإذا تجاوزت هذه النسبة الحد المسموح به (يُحدد من قبل المحلل)، فإن عينة التدريب تحتاج إلى تعديل أو إعادة.

جدول (5-3) مصفوفة الخطأ الناتجة من عملية التصنيف الذاتي لعينات التدريب. المصدر: [2]

الغطاءات الأرضية	عدد عناصر الصورة المصنفة	النسبة الصحيحة	عدد عناصر الصورة المصنفة إلى الغطاءات الأرضية			
			ماء	رمل	غابة	منطقة سكنية
ماء	480	100	480	0	0	0
رمل	68	76	0	52	0	16
غابة	356	88	5	0	313	0
منطقة سكنية	248	51	0	20	40	126
حقل ذرة	402	85	0	0	0	342
حشائش جافة	438	82	0	0	0	79

5-2-1-2-5 التصنيف غير المراقب:

المصنفات غير المراقبة لا تستخدم عينات التدريب أساساً لعملية التصنيف، ولكنها تستخدم برنامجاً يقوم آلياً بتجميع (Clustering) عناصر الصورة في مجموعات من الأصناف الطيفية بناء على خصائص، أو معايير طيفية يحددها المحلل. ونظراً لأن تكوين هذه الأصناف الطيفية يتم عن طريق تجميع عناصر الصورة بناء على قيم سطوع هذه العناصر (BVs)، والخصائص الطيفية لها، وبدون تدخل من المحلل، فإنه من المتوقع ألا تمثل هذه الأصناف غطاءات أرضية مألوفة لدينا؛ لذلك يأتي دور المحلل هنا بتحديد هوية هذه الأصناف الطيفية وما تمثله من غطاءات أرضية مألوفة على الطبيعة من خلال مقارنتها بمعلومات مرجعية (كاليانات الحقلية، والخرائط، والصور الجوية، وغير ذلك من المعلومات المرجعية الأخرى)، ثم تجميعها فيما يسمى بالأصناف المعلوماتية.

هناك العديد من الطرق التي تستخدم في التصنيف غير المراقب. من هذه الطرق طريقة متوسطات-K (K-Means)، التي يقوم فيها المحلل بتحديد عدد اختياري من الأصناف أو المجموعات (Clusters)، ثم يقوم البرنامج المستخدم في عملية التصنيف بتحديد القيم المتوسطة (Mean Values) لهذه المجموعات، بحيث تكون موزعة على مسافات طيفية متساوية على طول مدى قيم السطوع للصورة. يقوم بعد ذلك البرنامج بعملية تصنيف كل عنصر صورة إلى المجموعة ذات قيمة المتوسط الطيفي الأقرب له؛ وبعد عملية التصنيف يعاد حساب القيمة المتوسطة الجديدة لكل مجموعة، ثم يعاد تصنيف عناصر الصورة مرة أخرى بناء على القيم المتوسطة الجديدة للمجموعات. وتستمر هذه العملية بشكل متكرر لعدة دورات (Iterations) حتى الوصول إلى مرحلة لا يوجد فيها تغيير واضح في قيم متوسطات المجموعات بين دورات عمل هذا البرنامج. الطابع الدوري لهذه الطريقة يجعلها تحتاج إلى عمليات حسابية مكثفة تستهلك وقتاً ليس بالقليل باستخدام الحاسب الآلي؛ لذلك تنفذ هذه الطريقة في العادة على أجزاء مختارة من الصورة بدلاً من الصورة كاملة. من التقنيات المستخدمة في التصنيف غير المراقب بهذه الطريقة "تجميع آيزوداتا" (ISODATA Clustering) الذي سنتناوله في الفقرة القادمة.

من الطرق الأخرى المستخدمة في عملية التجميع في التصنيف غير المراقب استخدام نسيج (Texture)، أو خشونة (Roughness) الصورة أساساً لتكوين قيم متوسطات المجاميع؛ ويُحدّد النسيج بقيمة التغيّر (Variance) المحسوب في نافذة بمقاس معين (مثلاً) 3×3 ، تمر على عناصر الصورة، فالنافذة التي بها قيمة التغيّر أقل من قيمة اختيارية يضعها المحلّل للبرنامج تمثل الحد الفاصل للتغير (Variance Threshold) - تعتبر ناعمة (Smooth)، والنافذة التي بها قيمة التغيّر أكبر من هذه القيمة تعتبر خشنة (Rough). وتكون قيمة متوسط أول نافذة ناعمة في الصورة هي قيمة متوسط الصنف الطيفي الأول أو المجموعة الأولى، وتكون قيمة متوسط ثاني نافذة ناعمة في الصورة هي قيمة متوسط المجموعة الثانية، وتستمر هذه العملية حتى الوصول إلى العدد الأقصى من المجاميع الذي يحدده المحلّل. عند الوصول إلى العدد الأقصى من المجاميع يقوم البرنامج بحساب المسافات الطيفية بين هذه المجاميع، ثم دمج أقرب مجموعتين مسافةً طيفيةً في مجموعة واحدة، ثم يستمر عمل النافذة بهذه الطريقة حتى الانتهاء من كامل الصورة. بعد الانتهاء من تحليل كامل الصورة، يقوم البرنامج بحساب المسافات الطيفية بين المجاميع مرة أخرى، ثم يقوم بدمج كل المجموعات التي تكون المسافة الطيفية الفاصلة بينها أقل من قيمة أخرى يحددها المحلّل. والمجاميع النهائية الناتجة بعد عملية الدمج تستخدم عينات تدريب في عملية التصنيف باستخدام أي من المصنّفات (قواعد القرار) التي سبق التطرق إليها، كمصنّف المسافة الدنيا للمتوسطات، أو مصنّف الاحتمالات العظمى، أو أي مصنّف آخر.

تجميع أيزوداتا:

كلمة (ISODATA) إختصار لعبارة "تقنية تحليل البيانات الدورية الذاتية" (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique)، وهي تقنية تم تطويرها في عام 1974م. تستخدم هذه التقنية قاعدة قرار "المسافة الدنيا للمتوسطات" التي سبق التطرق إليها في عملية التصنيف. كلمة الدورية الواردة في أسم هذه العملية تعني أن عملية التصنيف تعاد لأكثر من مرة، وكلمة الذاتية تعني أنها تحدد المجاميع (Clusters) بأقل مشاركة ممكنة من المحلّل.

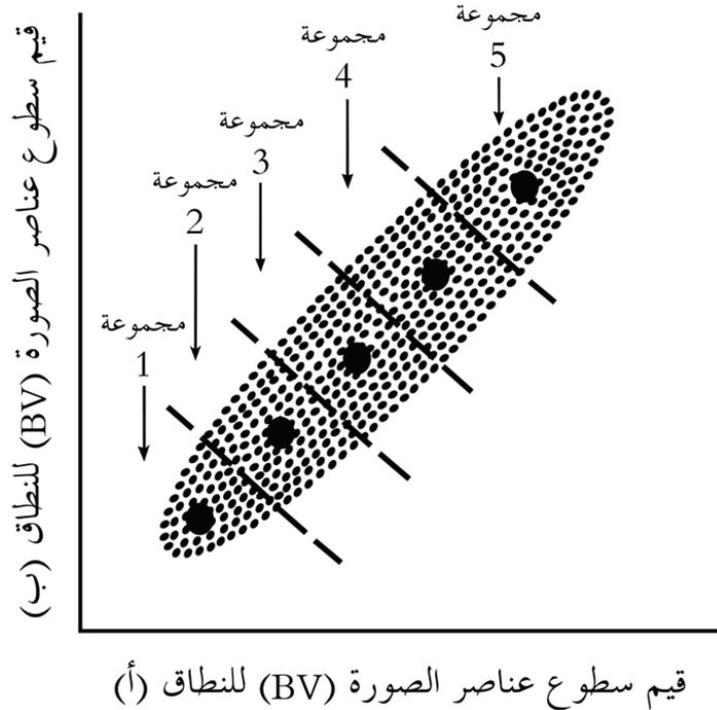
تبدأ هذه العملية بتحديد عدد معين من قيم المتوسطات الحسابية الإختيارية للمجاميع، ثم يُصنّف كل عنصر من عناصر الصورة إلى المجموعة القريبة مسافةً طيفية له. وهذه المسافة عبارة عن قيمة سطوع عنصر الصورة مطروحاً منها المتوسط الحسابي للمجموعة. بعد هذه العملية يعاد حساب المتوسط الحسابي لكل مجموعة، ثم تعاد عملية التصنيف مرة أخرى بنفس الطريقة. وتستمر هذه العملية حتى الوصول إلى قيم (معاملات) يحددها المحلّل قبل بدء العملية، وهي على النحو التالي:

(1) الحد الأعلى لعدد المجاميع، وهو عدد الأصناف التي يريد المحلّل تصنيف الصورة إليها. والحد الأعلى لعدد هذه المجاميع يمكن أن يقل بعد حذف المجاميع التي يكون عدد عناصر الصورة التي تنتمي إليها أقل من عدد معين يحدده المحلّل أيضاً أثناء عملية التجميع.

(2) الحد التقاربي (Convergence Threshold)، وهو النسبة العظمى التي يحددها المحلل لعدد عناصر الصورة في أي صنف التي لا يتغير تصنيفها إلى صنف آخر خلال التنقل بين دورات عمل هذا المصنّف.

(3) الحد الأعلى من عدد دورات العمل المطلوبة لهذا المصنّف.

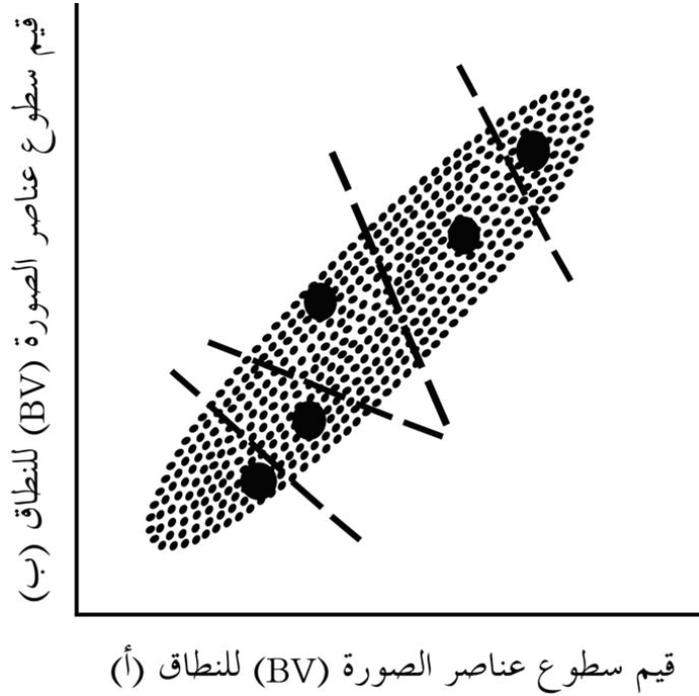
في الدورة الأولى لعمل مُصنّف (آيزوداتا) يتم تحديد عدد المجاميع (الأصناف الطيفية) المطلوبة من قبل المحلّل، ثم يقوم البرنامج بتحديد متوسطات حسابية (Means) اختيارية لهذه المجاميع تُوزع بانتظام على المدى الإشعاعي (قيم السطوع) لنطاقات الصورة. يبدأ بعد ذلك البرنامج في تحليل عناصر الصورة عنصراً عنصراً بدءاً من أول عنصر في الصورة (في الركن الأيسر الأعلى) وبالالتجاه من اليسار إلى اليمين، حيث يتم حساب المسافة الطيفية بين قيمة سطوع كل عنصر، والمتوسط الحسابي لكل مجموعة، وهي حاصل طرح قيمة متوسط المجموعة من قيمة سطوع عنصر الصورة، ثم يصنف العنصر للمجموعة القريبة مسافة طيفية له. تستمر هذه العملية حتى الانتهاء من كامل عناصر الصورة (شكل (5-12)).



شكل (5-12) تجميع "آيزوداتا" (ISODATA)، الدورة الأولى. المصدر: [10].

بعد الانتهاء من هذه الدورة يعاد حساب المتوسط الحسابي الجديد لكل مجموعة؛ ونتيجة لذلك سيكون هناك انحراف للمتوسطات الحسابية الجديدة عن مواقعها السابقة كما يتضح من الشكل (5-13).

وتستخدم هذه المتوسطات الحسابية الجديدة في الدورة الثانية، بحيث يتم تصنيف عناصر الصورة مرة أخرى إلى المجاميع الأقرب مسافة طيفية لها حسب المتوسطات الحسابية الجديدة. وتستمر هذه الدورات حتى الوصول إلى إحدى القيمتين الموضوعتين من قبل المحلل عند بدء عملية تجميع (آيزوداتا)، وهما الحد التقاربي، والحد الأعلى من عدد دورات العمل المطلوبة.

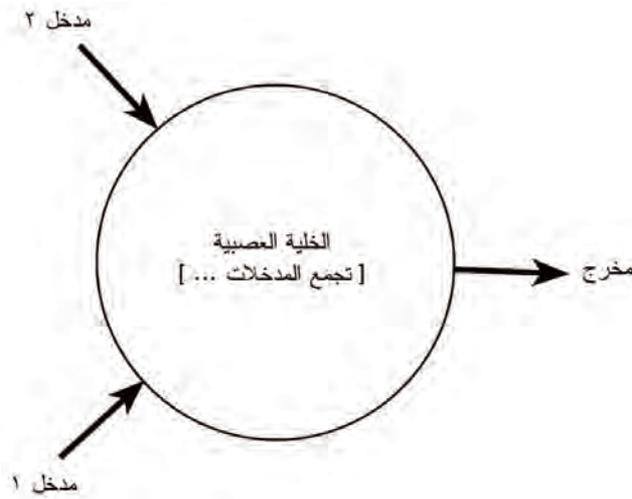


شكل (5-13) تجميع (آيزوداتا)، الدورة الثانية. المصدر: [10].

3-1-2-5- التصنيف باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية:

لم يتم حتى الآن التعرف بشكل دقيق على مكونات المخ وكيفية عمله، إلا أنه يمكن وصفه بشكل تقريبي بأنه عبارة عن: مجموعة من الخلايا العصبية تقوم بأداء مجموعة من الوظائف، ومنها السمع والبصر وغيرها من الوظائف الأخرى. فعلى سبيل المثال، تعمل العينان (وهما أهم نظام تفسير يمتلكه جسم الإنسان) كمستشعرين بحيث تقومان بتحويل الإشارة القادمة من الخارج إلى نبضات كهربائية تُنقل إلى المخ الذي يقوم بتفسيرها أنياً، ويجوؤها إلى صورة ثلاثية الأبعاد. ويتكون المخ من عدد كبير جداً (يقارب مئة البليون) من المعالجات تدعى خلايا عصبية (Neurons)، وتتصل كل خلية بما يقارب عشرة آلاف خلية عصبية أخرى؛ وقد خلق الله هذه الخلايا العصبية مرتبطة ببعضها ببعض بنظام معقد، بحيث إن كل خلية عصبية تستقبل ما تنتجه (Output) خلايا عصبية أخرى من إشارات مدخلات لها (Input)، وتعالجها، ثم ترسلها مخرجات إلى خلايا عصبية أخرى تمثل مدخلات لها. واعتماداً على هذا المفهوم، فقد تم اختراع

الشبكات العصبية الاصطناعية (Artificial Neural Networks-ANN) التي تقوم بتمثيل عمل المخ من خلال مجموعة مترابطة من وحدات المعالجة (خلايا عصبية صناعية) تُستخدم لحل المشكلات المختلفة. كل خلية عصبية صناعية (Artificial Neuron) عبارة عن حاسوب بسيط يستقبل من خلايا عصبية أخرى مجموعة من المدخلات بأوزان معينة (Weighted Inputs)، ثم يجمع هذه المدخلات الموزونة، فيجري على هذا المجموع عملية حسابية بسيطة بالمقارنة وفق حدود (Thresholding)، ثم يرسل هذه المخرجات إلى خلايا عصبية صناعية أخرى مدخلات لها (شكل (5-14)).



شكل (5-14) رسم توضيحي لخلية عصبية تستقبل مدخلين بأوزان معينة، تم جمعها، ثم تُجري عملية حسابية على المجموع، ثم تُخرج النتيجة. المصدر: [6].

يمكن وصف عملية جمع المدخلات الموزونة القادمة من الخلايا العصبية الأخرى التي تقوم بها الخلية العصبية بالصيغة الرياضية التالية:

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i$$

حيث تمثل S مجموع n من المدخلات من الخلايا العصبية، و w_i الوزن المصاحب للمدخل القادم من الخلية العصبية i ، و x_i قيمة المدخل القادم من الخلية العصبية i .

أما المقارنة وفق حدود، فهي باختصار عبارة عن مقارنة قيمة مجموع المدخلات (S) بقيمة محددة سابقاً لنفترض أنها (T)، فإذا كانت قيمة (S) أكبر من قيمة (T)، فإن الخلية العصبية الاصطناعية ترسل مُخرَجاً (Output) إلى الخلية العصبية المربوطة بها من أسفل. المصطلح الذي يطلق على هذا النموذج هو نموذج

”التغذية الأمامية“ (Feed-Forward)، لأن المعلومات تتقدم من المدخلات الأولية إلى المخرجات النهائية. يفتقر هذا النموذج (الذي يعتبر بسيطاً) إلى مكوّن مهم وهو القدرة على التعلّم؛ لذلك من الضروري إجراء عملية تدريب (Training) لشبكة الخلايا العصبية الاصطناعية لكي تقوم بتنفيذ المهام المطلوبة منها بشكل مفيد. وتتلخص عملية التدريب في: توفير عينات تدريب، ومقارنة مخرجات شبكة الخلايا العصبية الاصطناعية مع المخرجات المتوقعة (الحقيقية) (Expected Output)، فإذا وُجد اختلاف بين المخرجين، فإنه يتم إعادة ضبط قيم الأوزان المصاحبة للروابط بين الخلايا العصبية المكونة للشبكة (تُختار القيم الابتدائية للأوزان عشوائياً) لتحسين فرص تطابق المخرجين، وهكذا تستمر عملية التدريب حتى يتوافق المخرجان؛ من هذا المنطلق يُدرج هذا النوع من التصنيف تحت التصنيف المراقب. وتشابه هذه العملية إلى حد ما تدريب الوالدين طفلها على تعلم القراءة، حيث يتم تعليم الطفل من خلال إعادة تصحيح أخطاء التعرف على الحروف وأصوات نطقها خلال عملية تسمى ”تطوير قدرات القراءة“.

وقد تطورت نماذج الشبكات العصبية الاصطناعية في الآونة الأخيرة وأصبحت أكثر تعقيداً. ومن أكثر نماذج الشبكات العصبية استخداماً في مجال الاستشعار عن بعد ما يسمى بالشبكات العصبية ذات الانتشار العكسي (Back-Propagation Neural Networks) التي سيتم وصفها لاحقاً.

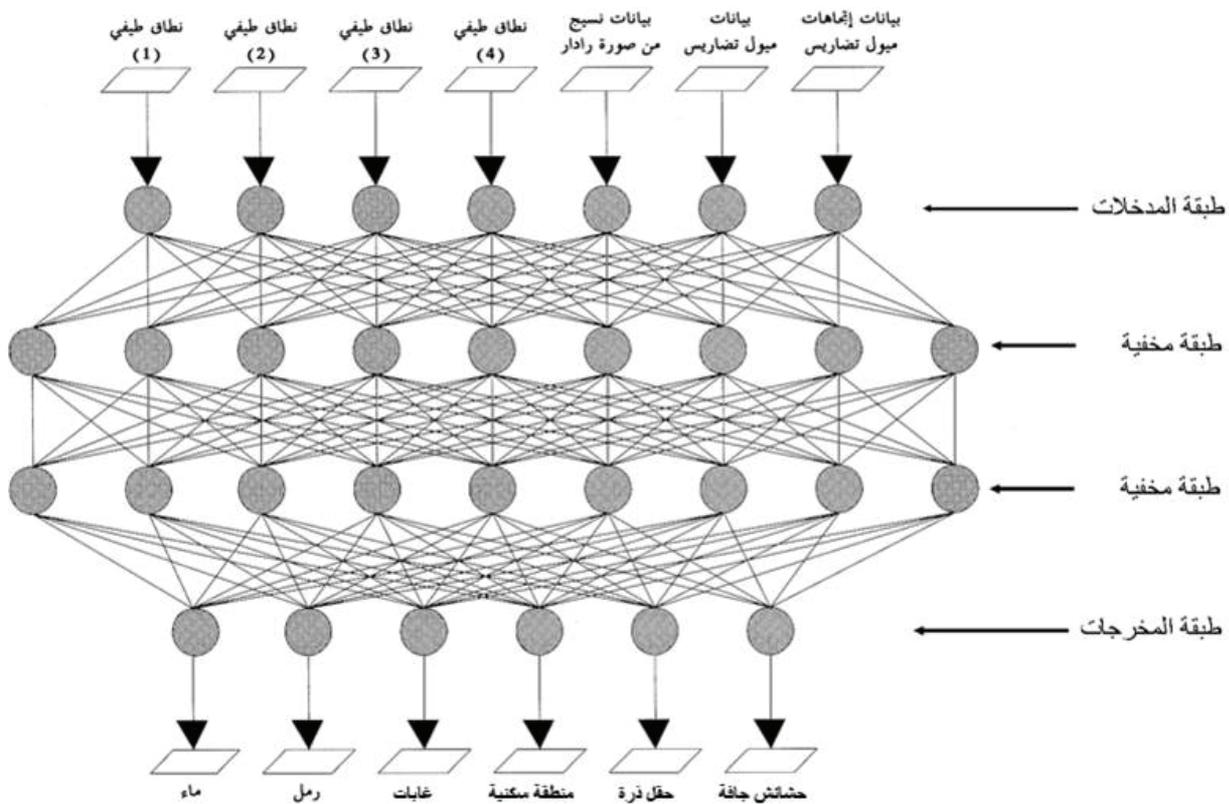
من مميزات الشبكات العصبية أنها لا تُلزم - في عملية تصنيف الصور - أن تكون عينات التدريب ذات توزيع قياسي (جاوس)، كما هي الحال في التصنيف باستخدام الاحتمالات العظمى؛ ولذلك تسمح هذه الميزة لمصنفات الشبكة العصبية أن تستخدم قطاعاً أوسع من البيانات التي تستخدمها المصنفات التقليدية. الميزة الأخرى هي أنه بمجرد إنهاء عملية تدريب الشبكة العصبية (على الرغم من أنها طويلة) فإن إجراء عملية التصنيف نفسها على الصور تتم بشكل سريع مقارنة بالمصنفات الأخرى.

تتكون الشبكة العصبية الاصطناعية من ثلاث أو أكثر من الطبقات، كل طبقة تتكون من مجموعة من الخلايا العصبية، أو نقاط الاتصال (Nodes)؛ فهناك طبقة للمدخلات (Input Layer)، وأخرى للمخرجات (Output Layer)، وطبقة أو أكثر من الطبقات المخفية (Hidden Layers). وتمثل نقاط الاتصال في طبقة المدخلات النطاقات الطيفية للصورة، ومعالم نسيجية (Texture Features)، وأية منتجات أخرى سواء من منتجات الصور، أم غيرها (كالمحتوى المائي للتربة، وبيانات الارتفاعات، وميول واتجاهات التضاريس، إلخ). ونقاط الاتصال في طبقة المخرجات تمثل الأصناف المتوقع إنتاجها من عملية التصنيف؛ فإذا كان استخدام الشبكة العصبية لغرض تصنيف صورة، فإن كل نقطة اتصال من طبقة المخرجات تمثل صنفاً من الأصناف المتوقع إنتاجها.

وبين طبقة المدخلات، وطبقة المخرجات تأتي الطبقات المخفية والتي تتكون كل طبقة منها من عدة نقاط اتصال، كل نقطة اتصال ترتبط بعدة نقاط اتصال في الطبقة التي تسبقها، والتي تليها؛ تُمثل هذه الروابط بأوزان تتحكم في تدفق المعلومات خلال الشبكة. ويكون عدد الطبقات المخفية اختيارياً، والقاعدة العامة

في ذلك هي أنه: كلما زاد عدد الطبقات المخفية في الشبكة العصبية، كلما زادت قدرتها على حل المشكلات كثيرة التعقيد، ولكن هذه الزيادة تقلل من قدرتها على التعامل مع المشكلات المركبة (تكون مخصصة لمشكلة معينة)، وتزيد من الوقت المخصص لعملية تدريبها.

يعرض الشكل (5-15) مثالاً على شبكة عصبية مستخدمة لتصنيف الغطاءات الأرضية بالاعتماد على خليط من المعلومات الطيفية (نطاقات الصورة)، والنسجية، والطبوغرافية. في هذا المثال يوجد سبع نقاط اتصال في طبقة المدخلات، بحيث تمثل النقاط من 1 إلى 4 أربعة نطاقات لصورة متعددة الأطياف، والنقطة 5 معلم نسيجي تم استخلاصه من صورة رادار، والنقطتان 6 و 7 قيمة ميل التضاريس واتجاهه؛ ويأتي بعد طبقة المدخلات طبقتين مخفيتين، تتكون كل واحدة منهما من تسع نقاط اتصال؛ ويأتي بعد الطبقات المخفية طبقة المخرجات التي تتكون من ست نقاط اتصال، كل واحدة من هذه النقاط تمثل غطاء أرضياً (ماء، رمل، غابات، منطقة سكنية، حقل ذرة، حشائش جافة). وعند تليم هذه الشبكة بسبع القيم المدخلة لعنصر الصورة (Pixel)، فإنها ستنتج المخرج المطلوب وهو الغطاء الأرضي الذي يمثل عنصر الصورة من بين الغطاءات الست المحددة بالصورة؛ ويتم ذلك (كما ذكر آنفاً) بعد تدريب هذه الشبكة من قبل المحلل على هذا النوع من التصنيف.



شكل (5-15) مثال على شبكة عصبية صناعية تحتوي على طبقة واحدة للمدخلات، وطبقتين مخفيتين، وطبقة واحدة للمخرجات. المصدر: [1].

التنوع في بيانات المدخلات في الشبكة العصبية يؤدي إلى اختلاف في مدى قيمها من مدخل إلى آخر؛ فعلى سبيل المثال، تتراوح قيم النطاقات الطيفية بين 0 و 255، بينما تُمثَل قيم ميول التضاريس بنسبة مئوية، واتجاهات التضاريس بدرجات تتراوح بين 0 و 360؛ لذلك (وكمطلب من متطلبات تشغيل الشبكة العصبية) يجب توحيد مدى قيم هذه البيانات بين 0 و 1.

تتم عملية التدريب بشكل تكراري (Iterative) بحيث يتم تزويد الشبكة بقيم المدخلات والمخرجات، بحيث تمثل كل مجموعة من المدخلات مثلاً على النمط (الغطاء الأرضي) المطلوب تعلمه أو التدريب عليه من قبل الشبكة، وكل مجموعة من المخرجات تمثل المخرج (الغطاء الأرضي) المطلوب إنتاجه استجابة لمجموعة المدخلات؛ وخلال عملية التدريب، تعدل الشبكة (أوتوماتيكياً) أوزان الروابط بين كل زوج من نقاط الاتصال بطريقة تقلل الخطأ (Discrepancy) بين المخرج المطلوب (المتوقع)، والمخرج الذي ينتج من الشبكة.

نظراً لأن القيم المستخدمة - ومنها قيم المخرجات (الغطاءات الأرضية) - تتراوح بين 0، و 1، فإنه من الناحية المثالية (في الشكل (5-15)) ستكون قيم ستة من المخرجات السبعة الناتجة لعنصر صورة معين تساوي 0، وقيمة المخرج السابع وهو المطابق لنوع الغطاء الأرضي لعنصر الصورة تساوي 1.

5-2-2-2-5 التصنيف على أساس عنصر الصورة المختلط:

ينشأ عنصر الصورة المختلط (Mixed Pixel) عندما يستقبل لاقط المستشعر في مجال الرؤية اللحظي له انعكاساً من أكثر من غطاء أرضي، أو معلّم على سطح الأرض. بمعنى: أن قيمة السطوح المسجلة (BV) لعنصر الصورة لا تمثل إشعاعاً ناتجاً من غطاء أرضي واحد، وإنما خليط من إشعاعات لعدة غطاءات أرضية (شكل (1-15)). هذا يسبب مشكلةً في عملية التصنيف لاحقاً، نظراً لأن الخصائص الطيفية لعنصر الصورة في هذه الحالة لا تمثل غطاءً أرضياً واحداً، وإنما خليطاً من عدة غطاءات أرضية.

للتعامل مع عناصر الصورة المختلطة، يوجد نوعان من عمليات التصنيف، هما "تحليل الخليط الطيفي" (Spectral Mixture Analysis)، والتصنيف المشوش (Fuzzy Classification)، اللذان يعملان على أساس ما يسمى بـ "تصنيف عنصر الصورة الجزئي" (Sub-Pixel Classification). سنتناول فيما يلي (وبشيء من التفصيل) هذين التصنيفين.

5-2-2-2-5 تحليل الخليط الطيفي:

توجد عناصر الصورة المختلطة في العادة عند حواف مناطق الغطاءات الأرضية، أو على امتداد بعض الغطاءات الأرضية الخطية كالأنهار، أو الطرق السريعة (أي في التنقل بين المعالم ذات التباين العالي)؛ وقد

أثبتت بعض الدراسات أن أعداد عناصر الصورة المختلطة في الصورة تزداد، كلما قلت دقة الوضوح المكانية للمستشعر.

تُجرى عملية تحليل الخليط الطيفي باستخدام العديد من التقنيات التي تعتمد في الأساس على مقارنة البصمات الطيفية المختلطة (Mixed Spectral Signatures) بمجموعه من البصمات الطيفية النقية المرجعية (Pure Reference Spectra) المقيسة في المعمل، أو في الميدان، أو من الصورة نفسها. ويتج من هذا التحليل تقدير تقريبي للمساحات الجزئية الأرضية التي تحتلها الأصناف (الغطاءات الأرضية) في عنصر صورة واحد.

نظراً لأن الكثير من الغطاءات الأرضية توجد بشكل مُختلط في المنطقة من الأرض المقابلة لمجال الرؤية اللحظي لعنصر الصورة، حتى ولو كان تصويرها بواسطة مستشعرات ذات درجة وضوح عالية، فإن طريقة تحليل الخليط الطيفي توفر تمثيلاً أكثر واقعية للطبيعة الحقيقية لسطح الأرض من الطريقة التي تعين غطاء أرضياً واحداً يكون هو السائد على الغطاءات الأخرى في هذا العنصر.

يتم عادة (في تحليل الخليط الطيفي) استخدام نماذج خلط خطية (Linear Models)، يفترض أن الإشعاع الطيفي الملتقط بواسطة لاقط المستشعر لمنطقة من الأرض تقابل مجال الرؤية اللحظي له (مُثلاً في عنصر الصورة) - عبارة عن خليط خطي (Linear Mixture) من البصمات الطيفية لكل الغطاءات الأرضية المختلفة الموجودة في هذه المنطقة؛ وتسمى هذه البصمات الطيفية بالأعضاء النهائية (End Members)، والوزن الذي يُعطى لكل عنصر نهائي في النموذج الخطي للخليط الطيفي يعتمد على نسبة المساحة التي يغطيها العضو النهائي في المنطقة المقابلة لعنصر الصورة.

المدخلات (Inputs) لنموذج الخليط الخطي هي بصمة طيفية مفردة مسجلة (Observed) لكل عنصر من عناصر الصورة. والمخرجات من نموذج الخليط الخطي ستكون مجموعة صور (صورة لكل عنصر نهائي) توضح الجزء (Fraction) الذي يحتله كل عضو نهائي في كل عنصر صورة.

يتطلب إجراء تحليل الخليط الخطي تحقق شرطين في آن واحد: الشرط الأول هو إن مجموع الأجزاء (Fractional Proportions) لكل الأعضاء النهائية الموجودة في عنصر الصورة يجب أن تساوي 1، ويعبر عنها رياضياً على النحو التالي:

$$\sum_{i=1}^N F_i = F_1 + F_2 + \dots + F_N = 1$$

حيث تُمثّل F_1, F_2, \dots, F_N الكسر (الجزء) الذي يحتله كل عنصر نهائي في عنصر الصورة. الشرط الثاني هو أنه في كل نطاق معين، قيمة السطوع (BV_λ) لكل عنصر صورة تساوي مجموع قيم

السطوع التي يمكن الحصول عليها لهذا العنصر عندما يكون مغطى بالكامل بكل غطاء من الغطاءات الأرضية (الأعضاء النهائية)، وقيمة السطوع الخاصة بكل عنصر نهائي تكون موزونة بقيمة تمثل الجزء (F) الذي يحتله هذا العنصر النهائي فعلياً في عنصر الصورة مضافاً إليها خطأ مجهول (Unknown Error). ويمكن التعبير عن هذا رياضياً على النحو التالي:

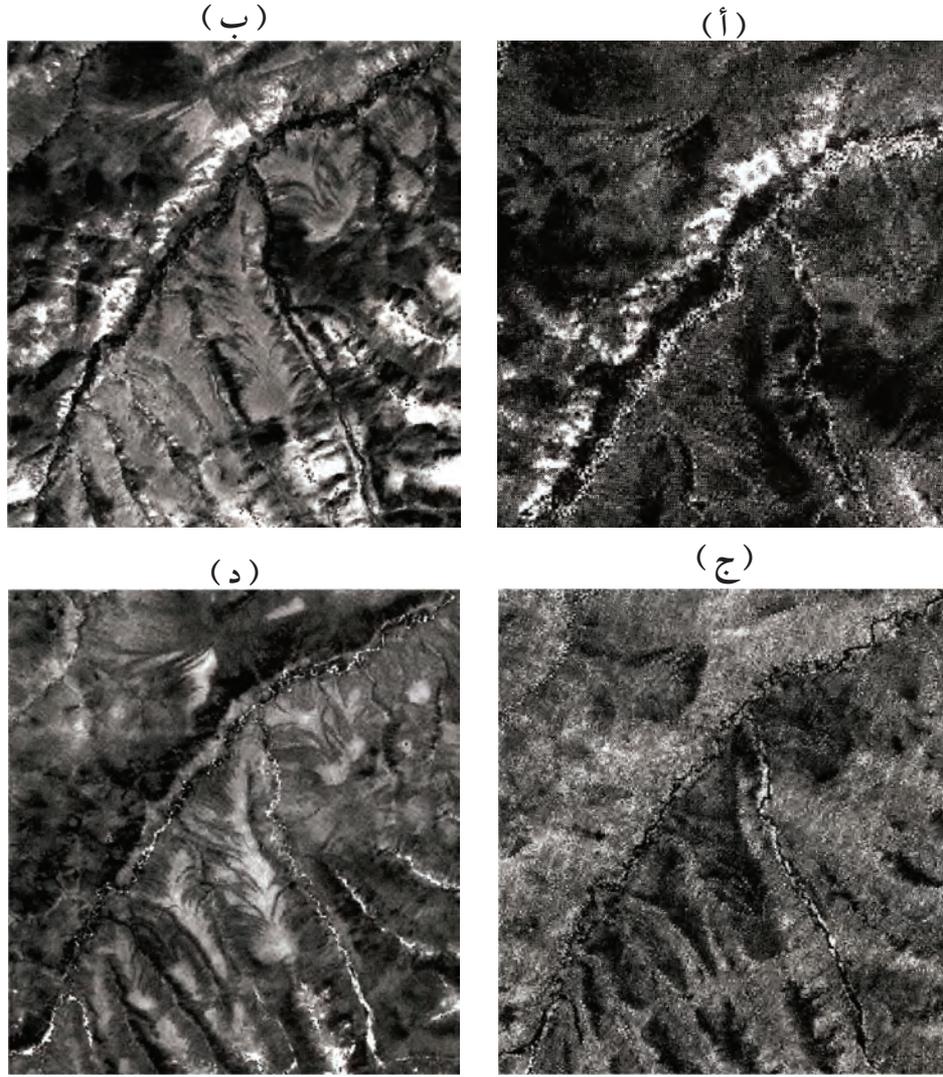
$$BV_{\lambda} = F_1BV_{\lambda,1} + F_2BV_{\lambda,2} + \dots + F_NBV_{\lambda,N} + E_{\lambda}$$

حيث BV_{λ} قيمة السطوع المركبة (الفعلية) لعنصر الصورة التي تم التقاطها بواسطة لاقط المستشعر في النطاق λ ، و F_1, F_2, \dots, F_N أجزاء عنصر الصورة التي تحتلها (تغطيها) عدد N من الأعضاء النهائية، و $BV_{\lambda,1}, BV_{\lambda,2}, \dots, BV_{\lambda,n}$ قيم السطوع لعنصر الصورة التي يمكن استقبالها بواسطة لاقط المستشعر لو كان عنصر الصورة مغطى بالكامل بهذا العنصر النهائي، و E_{λ} قيمة الخطأ.

سيكون هناك نسخة من هذه المعادلة لكل نطاق من الصورة المتعددة النطاقات؛ لذلك لو كان هناك عدد (B) من النطاقات، سيكون هناك عدد (B) من هذه المعادلة، بالإضافة إلى معادلة مجموع الأجزاء المذكورة آنفاً. يعني ذلك أنه: سيكون هناك عدد $(1+B)$ من المعادلات المتوافرة للحل لإيجاد قيم (F_1, F_2, \dots, F_N) ؛ فلو كان عدد المجاهيل (وهي الأجزاء الممثلة للأعضاء النهائية في عنصر الصورة (F_1, F_2, \dots, F_N)) يساوي (عدد النطاقات + 1)، فإنه يمكن حل المعادلات آنياً لإنتاج حل فريد (Exact Solution) بدون إيجاد قيمة الخطأ في المعادلة؛ وأما إذا كان (عدد النطاقات + 1) أكبر من عدد المجاهيل (N) ، فإنه يمكن حساب قيمة الغطاء الجزئي (F_i) لكل عضو نهائي، وقيمة الخطأ باستخدام مبادئ "ضبط المربعات الدنيا" (Least Square Adjustment)؛ أما لو كان عدد الأعضاء النهائية الموجودة في الصورة أكبر من (عدد النطاقات + 1)، فلن يكون هناك حل للمعادلات، ولن نستطيع تحديد قيم الأجزاء الممثلة للأعضاء النهائية (F_i) .

الشكل (5-16) يعرض مثلاً لمنتجات تحليل الخليط الطيفي الخطي لصورة (TM) لتحديد الغطاءات الجزئية لعدد من الغطاءات الأرضية (شجر (Trees)، وشجيرات (Shrubs)، ونباتات عشبية (Herbaceous Plants)) لمحمية طبيعية وطنية في وسط ولاية الآسكا.

الشكل (5-16أ) يعرض أحد نطاقات الصورة الأصلية، وهو النطاق الرابع (تحت الحمراء القريبة)، بينما الأشكال (5-16ب إلى د) تعرض ناتج عملية التحليل لكل عضو (صنف) من الأعضاء النهائية.



شكل (5-16) تحليل الخريط الطيفي لصورة (TM) لمحمية وطنية في وسط ولاية (الأسكا). (أ) الصورة الأصلية للنطاق الرابع (تحت الحمراء القريبة). (ب) صورة الغطاء الجزئي للأشجار. (ج) صورة الغطاء الجزئي للشجيرات. (د) صورة الغطاء الجزئي للنباتات العشبية. عناصر الصورة الساطعة (Bright Pixels) في هذه الصور تمثل الغطاء الجزئي الأكبر. المصدر: [1].

2-2-2-5 التصنيف المشوش:

تقسم المصنفات إلى مصنفات ناعمة (Soft Classifiers)، ومصنفات قاسية (Hard Classifiers). المصنفات القاسية هي المصنفات التقليدية التي تناولناها آنفاً، والتي تعتمد - في عملية التصنيف - على إعطاء كل عنصر صورة صنفاً واحداً محدداً؛ وهذا المبدأ يتطلب وجود مناطق في الصورة مغطاة بغطاء أرضي مفرد أو متجانس، ويحتل مساحة أكبر نسبياً من مجال الرؤية اللحظي للاقط المستشعر (عنصر الصورة)؛ أما المصنفات الناعمة (ومنها المصنفات المشوشة (Fuzzy Classifiers)) فإنها تُستخدم عندما يوجد أكثر من غطاء أرضي واحد في مجال الرؤية اللحظي للاقط المستشعر، وبناء على ذلك فهي لا تعين صنفاً أرضياً واحداً

لكل عنصر صورة، بل تُشرك أكثر من صنف في هذا العنصر؛ ولذلك تُعطي هذه الأصناف درجات عضوية تُحدّد قيمها درجة انتماء عنصر الصورة لهذه الأصناف.

يعالج التصنيف المشوش (كما ذكر آنفاً) المشكلة المتمثلة في نسب عنصر الصورة إلى صنف واحد من الأصناف المحددة للصورة على الرغم من أن لهذا العنصر خصائص طيفية تُمكنه من الانتماء إلى أكثر من صنف. يتم ذلك من خلال منطق التشويش (Fuzzy Logic) الذي يستخدم في كثير من المجالات ومنها (وبأهمية كبيرة) مجال الاستشعار عن بعد؛ وأهمية منطق التشويش في مجال الاستشعار عن بعد - وخصوصاً في عملية التصنيف - في أنه يسمح بعضويات جزئية (Partial Memberships) لعدة أصناف للمشاركة في عنصر صورة واحد، وهو في هذا الجانب يتعامل مع مشكلة عنصر الصورة المختلط التي تم التطرق آنفاً لأحد حلولها، وهو "تحليل الخليط الخطي". والعضوية الجزئية تمثل قياساً لمدى انتماء عنصر الصورة إلى صنف معين. فعلى سبيل المثال، عندما تصنف المصنفات التقليدية عنصر صورة بصنف واحد إما: "غابة"، أو "ماء"، نجد أن مصنف التشويش (Fuzzy Classifier) يسمح بتعيين درجة 0.3 للماء و0.7 للغابة لهذا العنصر، حيث يتراوح سلم درجات العضوية بين 0 (بدون عضوية) و1 (عضوية كاملة)، والقيم المتوسطة بين هاتين القيمتين تحدد العضوية الجزئية لصنف أو أكثر من بين الأصناف الأخرى (جدول (4-5)).

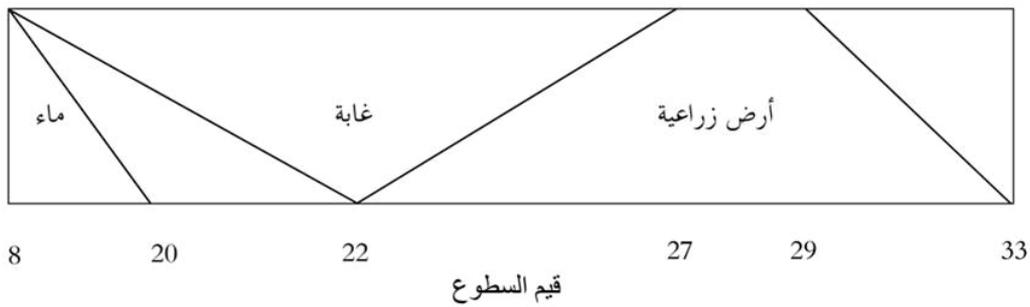
جدول (4-5) مثال على العضوية الجزئية لعدد من الغطاءات الأرضية في مجموعة من عناصر الصورة. المصدر: [3].

الصنف	A	B	C	D	E	F	G
ماء	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
منطقة حضرية	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.085
طرق	0.00	0.35	0.00	0.00	0.99	0.79	0.14
غابات	0.07	0.00	0.78	0.98	0.00	0.00	0.00
مراعي	0.00	0.33	0.21	0.02	0.00	0.05	0.00
أرض محاصيل	0.92	0.30	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00

ويُحدّد مصنف التشويش درجات العضوية اعتماداً على دالة تسمى دالة العضوية (Membership Function). وتُحدّد العضوية للأصناف إما بعلاقات عامة (General Relationships)، أو قواعد تعريفية (Definitional Rules) تصف العلاقات بين البيانات (الصور) والأصناف. وفي حالة الاستشعار عن بعد، تُشتق دوال العضوية لكل صورة خاضعة للتحليل من بيانات تجريبية تسمى بيانات تدريب، وتصف دالة العضوية العلاقة بين عضوية الصنف وقيمة السطوع في عدة نطاقات.

الشكل (5-17) يقدم مثلاً على ذلك، حيث يعرض طريقة التصنيف المشوش لعناصر الصورة في نطاق واحد (على الرغم من أنه يمكن تطبيقها على صورة بعدة نطاقات) إلى ثلاثة أصناف (ماء، وغابة، وأرض زراعية). يمثل المحور الأفقي قيم السطوع في الصورة، بينما يمثل المحور الرأسي درجة العضوية بقيمة دنيا

تساوي 0 عند أسفل المحور، وقيمة عليا تساوي 1 عند أعلى المحور؛ فصنف "الماء" يتكون من عناصر الصورة التي لها قيم سطوع تتدرج من 8 إلى 20، حيث ستكون عناصر الصورة ذات قيم السطوع التي تساوي 8 وأقل في الغالب مغطاة بالكامل (نقية) بالماء، وصنف "الأرض الزراعية" يشتمل على عناصر الصورة ذات قيم السطوع التي تتراوح بين 22 و33، بحيث تكون عناصر الصورة المغطاة بالكامل بصنف "الأرض الزراعية" محصورة بين قيم السطوع 27 و29، أما عناصر الصورة ذات قيمة السطوع 24 (على سبيل المثال) فيمكن أن تكون مجزأة إلى "غابة" و "أرض زراعية". المناطق غير المصنفة في الشكل ليست مغطاة بأي صنف من الأصناف الثلاثة.



شكل (5-17) مثال على دوال العضوية في التصنيف المشوش. المصدر: [3].

3-5 التصنيف بالاعتماد على النمط المكاني:

يعتمد التصنيف بالاعتماد على النمط المكاني في تقسيمه لعناصر الصورة إلى أقسام (أو أصناف) - على علاقة عنصر الصورة بعناصر الصورة المحيطة به؛ لذلك يأخذ هذا التصنيف في الاعتبار عدداً من العلاقات المكانية بالصورة، كنسيج الصورة (Image Texture)، وحجم المعلم (Feature Size)، وشكل المعلم (Feature Shape)، والسياق الموجود فيه المعلم (Feature Context). ونظراً لاتساع المجال في هذه العلاقات المكانية، فإننا سنكتفي بالحديث عن جانبين مهمين منها، هما نسيج الصورة، وسياق الصورة.

1-3-5 التصنيف بالاعتماد على نسيج الصورة:

من الصعوبة بمكان الحصول على تعريف دقيق للنسيج، وصعوبة تعريفه تماثل صعوبة قياسه، إلا أنه يمكن تعريف النسيج ببساطة بأنه: التغير في قيم السطوع أو اللون (Tone) خلال منطقة معينة من الصورة، أو التغير في نمط العلاقة المكانية بين قيم السطوع لعناصر الصورة المتجاورة في منطقة معينة؛ ويوصف النسيج - في العادة - بتعابير معينة مثل "خشن" (Rough)، و"ناعم" (Smooth). ودرجة نعومة وخشونة النسيج تعتبر نسبية، حيث يعتمد ذلك على مقياس (درجة) التغيرات التي نريد تسميتها نسيجاً. فعلى سبيل

المثال، الأنسجة ذات المقياس الدقيق (Micro-Scale Textures) التي يمكن تحديدها عن طريق الصور الأحادية الطيف (Panchromatic) للمستشعر (HRV) للقمر الفرنسي (سبوت) ذات درجة الوضوح 10م لا يمكن تحديدها باستخدام صور المستشعر (AVHRR) لأقمار (نوا) ذات درجة الوضوح الأضعف (1.1كلم).

ينطوي تصنيف منطقة معينة من سطح الأرض إلى غطاءات أرضية منفصلة - على صعوبة نظراً للتغيرات الطيفية للغطاءات الأرضية ضمن هذه المنطقة؛ فالمناطق الأرضية المثالية هي التي تتكون من قطاعات متجانسة طيفياً (Spectrally Homogeneous Patches)، ويمكن عمل خرائط لها بدون صعوبة، حيث يمكن إنجاز ذلك بطريقة مباشرة بمطابقة المحتويات الطيفية للأصناف المعلوماتية المطلوبة مع المحتويات الطيفية في الصورة، كما هو الحال في التصنيف التقليدي، ولكن لا تتوافر هذه الحالة المثالية على أرض الواقع، وإنما نجد أن معظم المناطق على سطح الأرض تتكون من تنوع في المعالم ذات الخصائص الطيفية المختلفة (Spectrally Heterogeneous Patches). فعلى سبيل المثال، تتكون "المنطقة السكانية غير المزدحمة" من عدة غطاءات أرضية، كتيجان الأشجار، وسقوف المنازل، والطرق المعبدة، ومواقف السيارات، إلخ؛ لذلك يتعين تصنيف هذه المنطقة تركيبة متكاملة (Composite Categories) بدلاً من تصنيف مكوناتها كل على حده، مما يعنى إجراء عملية التصنيف بالتركيز على النمط الإجمالي للتغيرات (Overall Pattern Variation). وعلى الرغم من أن مفسري الصور يستطيعون - حدسياً بطبيعتهم البشرية - التعرف على مثل هذه الأنماط المركبة، فإن خوارزميات المصنفات الرقمية تواجه صعوبة كبيرة في تصنيف الصور التي تحتوي على مثل هذه التركيبة، لكونها قد صُممت على أساس تصنيف كل صنف طيفي منفصل إلى صنف معلوماتي منفصل.

تحاول مصنفات النسيج (Texture Classifiers) (في العادة) قياس نسيج الصورة من خلال العلاقات المكانية والطيفية بين عناصر الصورة المتجاورة؛ فعلى سبيل المثال، يمكن أن يوفر الانحراف القياسي (Standard Deviation) لقيم السطوع في نافذة ذات مقياس معين، وتتم بانتظام على كامل الصورة - قياساً تقريبياً للتغير الطيفي خلال مسافات قصيرة نسبياً، وبالتالي قياساً لنسيج الصورة، مما يُمكن المحلل من تصنيف الغطاءات الأرضية تركيبة متكاملة، وعلى الرغم من ذلك، فإن الحصول على نتائج مرضية للتصنيف يتطلب استخدام أساليب أكثر تعقيداً لقياس النسيج من الذي ذكر آنفاً؛ فعلى سبيل المثال، هناك مقاييس نسيج تُستخدم (في عملية التصنيف) العلاقات بين قيمة سطوع عنصر الصورة المركزية في النافذة، وقيم السطوع لعناصر الصورة المتجاورة في النافذة عند مسافات واتجاهات متغيرة. ويعتقد بأن مقاييس النسيج التي تستخدم عدداً كبيراً نسبياً من عناصر الصورة المتجاورة (يصل مقياس النافذة أحياناً إلى 64×64) تعمل بشكل أفضل من مقاييس النسيج التي تستخدم عدداً أقل من عناصر الصورة المتجاورة، لكن العمل بهذه المقاييس الكبيرة للنسيج ينطوي على مشكلات عدة، منها: عندما تتمركز هذه النافذة الكبيرة على الحدود بين الغطاءات الأرضية، وإن مثل هذا المقياس الكبير لمقياس النسيج مقارنة بحجم الأصناف المطلوب ظهورها - يُضعف من درجة التفاصيل المكانية (Spatial Resolution) لخارطة الغطاء الأرضي النهائية.

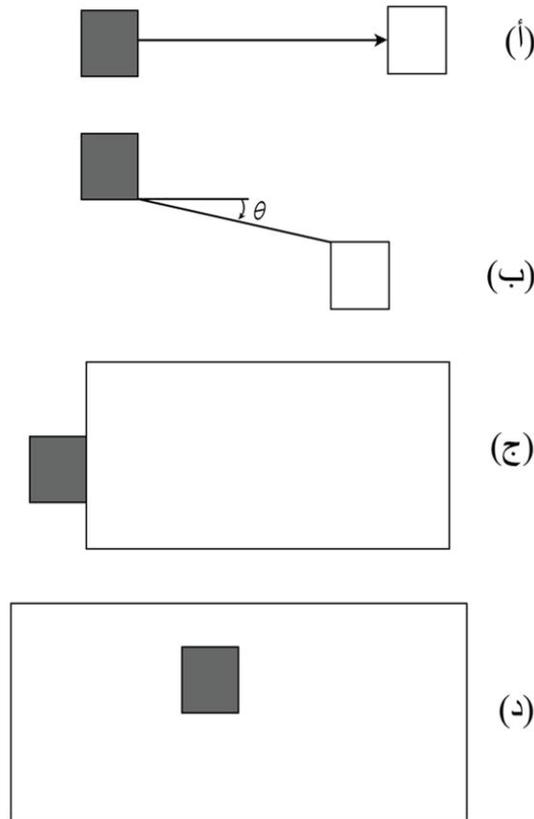
5-3-2 التصنيف بالاعتماد على سياق معلومات الصورة:

تُشتق المعلومات السياقية (Contextual Information) في الصورة المطلوب تصنيفها من العلاقات المكانية بين عناصر الصورة؛ ويختلف "السياق" عن "النسيج" في أن النسيج يشير إلى العلاقات المكانية البينية (Spatial Interrelationships) بين عناصر صورة غير مصنفة داخل نافذة ذات مقاس محدد، بينما السياق يُحدّد بالعلاقات المكانية (Spatial Relationships) بين عناصر الصورة سواء كانت مصنفة أو غير مصنفة، وفي أي مكان في الصورة (ليس محصوراً داخل نافذة)؛ ويُستخدم المصنف السياقي (Contextual Classifier) -في الغالب- مع عناصر الصورة بعد تصنيفها، بحيث تكون وظيفته إعادة تصنيف (Reassign) عناصر الصورة بشكل ملائم حسب المعلومات السياقية التي يتبعها هذا المصنف.

يوضح الشكل (5-18) مفهوم التصنيف بالاعتماد على سياق معلومات الصورة من خلال أربعة أنواع من الروابط التي تربط بين عنصر (أو مجموعة عناصر) الصورة المطلوب تصنيفها (الجزء المظلل)، وأصناف مجموعات عناصر أخرى في الصورة (الجزء غير المظلل). أول وأسهل هذه الروابط المسافة (شكل (5-18أ))؛ فعلى سبيل المثال، يمكن إعطاء مجموعة عناصر صورة غير مصنفة صنف أرض محاصيل زراعية مَسْقِيَّة (Irrigated Cropland) إذا كانت تبدو أرضاً زراعية، وتبعد عن سطح مائي مسافة معينة يتم تحديدها من قبل المحلل، أما إذا كانت المسافة أكبر من المسافة المحددة، فإنه يمكن تصنيفها إما أرضاً خالية، أو أرض محاصيل زراعية غير مَسْقِيَّة. الرابط الثاني هو استخدام مسافة واتجاه (شكل (5-18ب)). النوع الثالث من الروابط والذي يعد من أهم العوامل المساعدة على التصنيف السياقي هو التماس، أو التجاور (Contiguity) (شكل (5-18ج))؛ فعلى سبيل المثال، يمكن التعرف على (أو تصنيف) مناطق استخدام أراضي (Landuse Regions) معينة في المناطق الحضرية من خلال التصاقها، أو مجاورتها لغطاءات، أو استخدامات أرضية أخرى. النوع الرابع من الروابط هو الاحتواء (Inclusion) (شكل (5-18د))، حيث يمكن تصنيف غطاءات أرضية حسب موقعها داخل غطاءات أرضية أخرى.

من هذا المنطلق، يعتبر التصنيف (بالاعتماد على سياق معلومات الصورة) مشابهاً لأساليب تفسير الصور التي يستخدمها المفسر البشري، وهي أن الغطاء أو الاستخدام الأرضي في الصورة يُستخلص أو يحدد من خلال علاقته بالمناطق الأخرى في الصورة. فعلى سبيل المثال، يُستعان بأحجام وأشكال الأراضي (Parcels) في التعرف على الاستخدامات الأرضية لها، والتعرف على هوية الأراضي المجاورة لها؛ فخصائص الترتيب المكاني للمناطق الصناعية، والسكنية، والزراعية في المناطق الحضرية تسمح بتحديد هوية أراضي داخلها لم يكن بالإمكان تحديدها باستخدام المصنفات التقليدية التي تعتمد على المعلومات الطيفية فقط.

وتُستخدم المصنفات السياقية - كذلك - مع صور قد سبق تصنيفها، بحيث تعيد (بشكل صحيح) تصنيف عناصر الصورة المصنفة التي تظهر منفردة أو معزولة، أو تشكل مناطق صغيرة جداً قليلة الفائدة والأهمية للمستخدم. ويعتبر استخدام المصنفات السياقية في هذه الحالة تجميلاً، إلا أنه قد يكون ذا فائدة في نتائج التصنيف النهائية.



شكل (5-18) التصنيف بالاعتماد على سياق معلومات الصورة باستخدام أربعة أنواع من الروابط. المناطق المظلمة تمثل عناصر الصورة المراد تصنيفها، والمناطق غير المظلمة تمثل عناصر أخرى مصنفة في الصورة يراد التصنيف إليها. (أ) رابط المسافة. (ب) رابط المسافة والاتجاه. (ج) رابط الاتصال. (د) رابط الاحتواء. المصدر: [3].

4-5 التصنيف بالاستعانة ببيانات إضافية:

يقصد بالمعلومات الإضافية (Ancillary Data) أي بيانات خارجية (غير الصورة الأصلية) تستخدم في عملية التصنيف. من الأمثلة على هذه البيانات: نماذج الارتفاعات الرقمية (Digital Elevation Model - DEM)، وبيانات شدة ميول التضاريس، واتجاهاتها، وانحنائها (Slope, Aspect, Curvature)، والبيانات الجيولوجية، وبيانات أنواع التربة ومحتواها المائي، والصور النسبية الطيفية لنطاقات الصورة (Bands Ratio)، وصور المركبات الأساسية (Principal Components)، وصور "دليل الحياة النباتية المبني على الطرح المعيار" (NDVI).

استخدام بعض البيانات الإضافية مساعداً في عملية التصنيف قد يسبب مشكلة، ويظهر ذلك عند محاولة استخلاص عينات التدريب. فعلى سبيل المثال، لا ترتبط بعض من الأصناف بعلاقة مع الارتفاع، ومن ذلك أن العلاقة بين صنف الماء والارتفاع ضعيفة، وبالتالي فإن إدراج بيانات الارتفاعات في عينات التدريب في هذه الحالة يمكن أن يُقلل من كفاءة المصنف في التعرف على مثل هذه الأصناف بدلاً من تحسينها. وعلى الرغم من ذلك، فإن عدد من الباحثين (Strahler et al., 1978) استطاعوا تحسين دقة التصنيف باستخدام بيانات إضافية، كارتفاعات وميول واتجاهات التضاريس، حيث وصلت دقة التصنيف إلى 77٪ بدلاً من 57٪ باستخدام البيانات الطيفية فقط.

يستلزم السماح باستخدام البيانات الإضافية تحقق ثلاث شروط أساسية هي:

- (1) أن تكون هذه البيانات بهيئة رقمية.
- (2) أن تكون هذه البيانات مناسبة للمشكلة المطروحة.
- (3) أن تكون هذه البيانات متوافقة (Compatible) مع بيانات الاستشعار عن بعد (الصور) المطلوب تصنيفها، ويشمل ذلك التوافق في مقياس الرسم، ومستوى التفاصيل (كدرجة الوضوح المكانية)، والدقة، والمرجع الجغرافي، وتاريخ الحصول على البيانات عندما يكون فارق الوقت ذا أهمية.

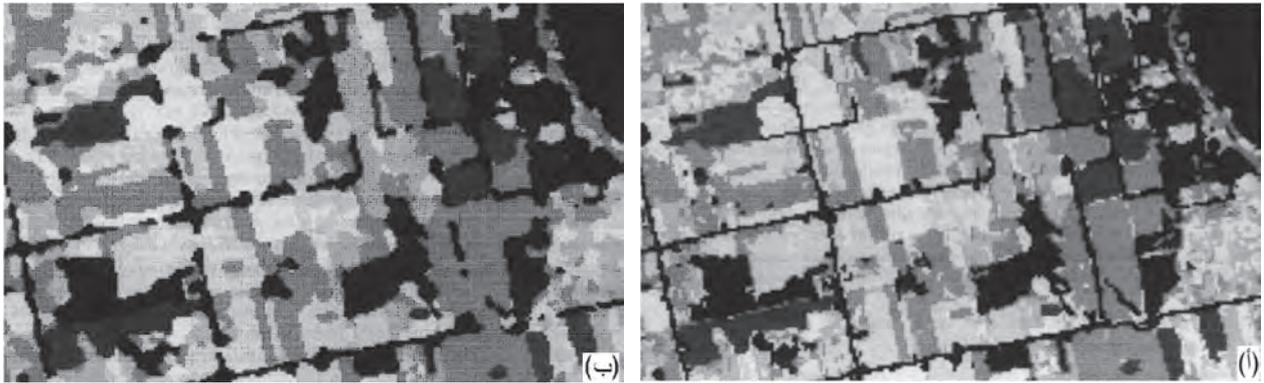
تحقيق التوافق بين البيانات الإضافية، وبيانات الاستشعار عن بعد يستلزم الاختيار الصحيح لنوع البيانات الإضافية، ومن ثم الحصول عليها، إلا أن الحصول على هذه البيانات الإضافية المتوافقة ينطوي أحياناً على صعوبة تؤدي إلى اللجوء إلى استخدام بيانات إضافية متوافرة سابقاً (Off the shelf) مما يؤدي إلى عدم تحقق هذه المطابقة لكون معيار استخدامها هنا كان بسبب توافرها، وليس بسبب توافقها مع بيانات الاستشعار عن بعد المطلوب تصنيفها؛ وعدم التوافق يُلزم المحلل بأن يقوم بجهد إضافي يتضمن تسجيل (Registering) المعلومات الإضافية مع بيانات الاستشعار عن بعد على نفس المرجع الجغرافي، ومطابقة مستوى التفاصيل بينهما، والتصحيح للفوارق الناتجة من اختلاف أزمنة الحصول عليها.

يتم استخدام البيانات الإضافية مع بيانات الاستشعار عن بعد بشكل عام بطريقتين: الطريقة الأولى تتم باستخدام البيانات الإضافية كبيانات أساسية تضاف إلى بيانات الاستشعار عن بعد ومن ثم إجراء عملية التصنيف عليهما، وهي في هذه الحالة تعمل كقناة أو نطاقاً إضافياً إلى نطاقات بيانات الاستشعار عن بعد الطيفية المستخدمة، إلا أنه - ولسوء الحظ - لم يثبت، وعلى نطاق واسع فعالية استخدام البيانات الإضافية كقنوات أو نطاقات إضافية في تحسين دقة التصنيف. الطريقة الثانية تتم بإستخدام البيانات الإضافية كبيانات مساعدة في عملية التصنيف؛ ومن التقنيات المستخدمة في ذلك تقنية الطباقية (Stratification)، وهي تقسيم الصورة إلى مناطق يمكن تحديدها عن طريق البيانات الإضافية نظراً لصعوبة تحديدها من خلال

بيانات الاستشعار عن بعد. والطبقية هي في الأساس تطبيق لإستراتيجية التصنيف الطبقي (Layered Classification)، حيث يتعامل المحلل مع كل طبقة (منطقة) بشكل منفصل كما لو كانت صورة مستقلة، بحيث يستخلص منها عينات تدريب مستقلة، ومن ثم تجري عملية التصنيف على كل طبقة بشكل مستقل. يقوم بعد ذلك المحلل بعملية دمج لهذه التصنيفات لتمثل المنتج النهائي صورة مصنفة واحدة.

5-5 التنعيم بعد التصنيف:

تظهر الصورة المصنفة للناظر بمظهر الملح والفلفل (Salt-and-Pepper Appearance)، ويعني هذا المصطلح وجود نوع من الضوضاء عبارة عن نقط (عناصر صورة مصنفة) متناثرة في الصور المصنفة (شكل (5-19أ))، كوجود عناصر صورة حشائش جافة مبعثرة في حقول الذرة؛ للتغلب على هذه المشكلة يُلجأ إلى ما يسمى بـ "التنعيم بعد التصنيف" (Postclassification Smoothing) التي يهدف إلى التخلص من هذه الضوضاء؛ لكي لا يظهر إلا الأصناف السائدة (شكل (5-19ب)).

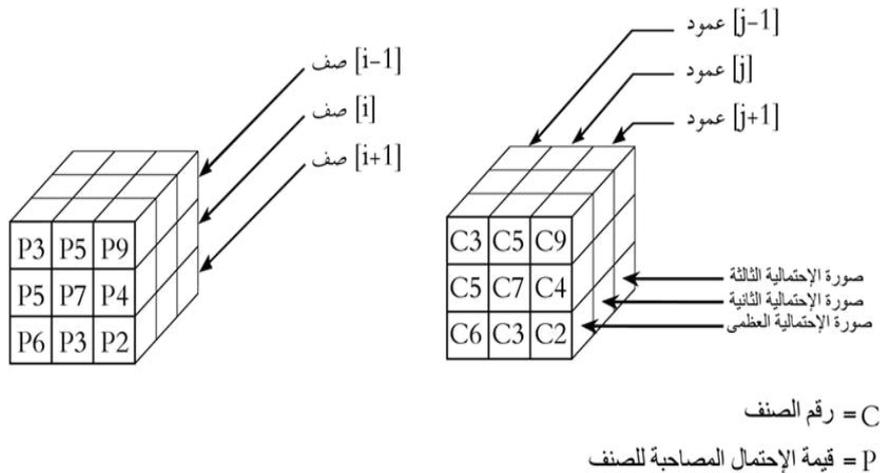


شكل (5-19) التنعيم بعد التصنيف. (أ) الصورة المصنفة الأصلية. (ب) الصورة المصنفة بعد التنعيم. يلاحظ اختفاء بعض الطرق بعد عملية التنعيم. المصدر: [2].

من التقنيات المستخدمة في تنعيم الصورة المصنفة - الترشيح باستخدام مرشح الأغلبية (Majority Filter). تتم هذه العملية بتمرير نافذة بمقاس معين (3×3، 5×5، الخ) على الصورة المصنفة، ثم يتم تحديد الصنف السائد (الأكثر تواجداً) في النافذة، فإذا كان الصنف الذي يقع في مركز النافذة مختلفاً عن الصنف السائد في النافذة؛ فإنه يتم استبداله بالصنف السائد، أما إذا كان الصنف الذي يقع في مركز النافذة مشابهاً للصنف السائد فإنه يترك بدون تغيير. وإذا لم يكن هناك صنف سائد في النافذة (العدد اللازم لتحديد الأكثرية أو السيادة يحدده المحلل)، فيترك الصنف الواقع في مركز الصورة بدون تغيير.

من عيوب مرشح الأغلبية (بصيغته المذكورة أعلاه) أن لديه سلوكاً ينحو إلى إزالة المعالم الخطية ذات السماكات الصغيرة، كالطرق الضيقة، والحدود بين الغطاءات الأرضية المختلفة (شكل (5-19 ب)). للتغلب على هذه المشكلة، يتم تضمين مرشح الأغلبية أوزان مكانية (Spatial Weighing) عن طريق خوارزمية خاصة للمحافظة على الحدود بين الغطاءات الأرضية. ومن الحلول الأخرى لهذه المشكلة، تحديد مساحة دنيا للغطاءات الأرضية بحيث لا تزال الغطاءات الأرضية التي مساحتها أكبر من هذه المساحة أثناء عملية التنعيم.

من الطرق الأخرى التي يمكن استخدامها في تنعيم الصورة المصنفة، مع المحافظة على المعالم الخطية - استخدام بعد ثالث لنافذة تنعيم الصورة، وتضمين قيم الاحتمالات المستخدمة في عملية تصنيف الصورة في هذه النافذة (Alomran, 1994). هذه الطريقة مناسبة للصورة المصنفة بمصنف الاحتمالات العظمى، بحيث يتم استخدام ثلاث من الصور الناتجة من هذا المصنف، وهي صورة الأصناف ذات الاحتمالات العظمى، وصورة الأصناف ذات الاحتمالات الثانية، وصورة الأصناف ذات الاحتمالات الثالثة (Maximum, Second, and Third Likelihood Classified Images). إضافةً إلى ثلاث الصور المصنفة، يتم استخدام قيم الاحتمالات المصاحبة لها التي تم تصنيف تلك الصور بناءً عليها (شكل (5-20)). إن عمل هذه الطريقة يتم بتمرير نافذتين ثلاثيتين الأبعاد في آن واحد، بحيث تمر النافذة الأولى على ثلاث الصور المصنفة، والنافذة الأخرى على قيم الاحتمالات المصاحبة لتلك الصور. يتم بعد ذلك تحديد الصنف السائد (ذي الأغلبية) في النافذة التي تمر على الصور المصنفة، ليحل محل الصنف الموجود في مركز النافذة. أما إذا تساوى صنفان أو أكثر في أغلبية الوجود في النافذة، فيتم الرجوع إلى نافذة الاحتمالات، ويحسب متوسط قيم الاحتمالات لكل صنف من الأصناف المتساوية في أغلبية الوجود في النافذة، ومن ثم يستبدل الصنف الموجود في مركز النافذة بالصنف الذي يملك أعلى متوسط لقيم الاحتمالات.



شكل (5-20) نافذتا الأصناف والاحتمالات (ثلاثيتا الأبعاد) المستخدمتان في عملية تنعيم الصورة.

5-5-6 دقة التصنيف:

تُعتبر بيانات الاستشعار عن بعد (الصور) أساساً لعمل خرائط الغطاء الأرضي (Landcover Maps)؛ وتقاس دقة الخرائط المنتجة من بيانات الاستشعار عن بعد بمعياريين، هما: دقة الموقع (Location Accuracy)، ودقة التصنيف (Classification / Thematic Accuracy).

دقة الموقع هي: مقدار الخطأ الأفقي في موقع المعلم على الخارطة نسبة إلى موقعه الحقيقي على الأرض، ودقة التصنيف تعني: نسبة الخطأ في تمثيل الغطاءات الأرضية على الخارطة.

يتعين التنويه هنا إلى الأثر الكبير الذي تسببه طبوغرافية التضاريس (Topographic Effects) على المحتوى الطيفي لصور الأقمار الاصطناعية، وبالتالي على دقة التصنيف.

ينتج التأثير الطبوغرافي من الاختلاف في زاوية ارتفاع الشمس وانحرافها عن الشمال (Solar Zenith & Azimuth Angles) من صورة إلى أخرى، ودرجة ميل واتجاه التضاريس (Terrain Slope and Aspect) من مكان إلى آخر. يؤدي هذا التأثير إلى اختلاف في الانعكاس الطيفي بين الغطاءات الأرضية المتشابهة، بمعنى: أنه يمكن لغطائين أرضيين متشابهين أن يظهر في الصورة بشكل مختلف، وبالتالي سيصنفان بصنفين مختلفين؛ لذلك، يجب - قبل عملية التصنيف - التخلص من التأثير الطبوغرافي باستخدام بعض تقنيات التصحيح الطبوغرافي (Topographic Correction Techniques) (فقرة (3-4)، و(2-1-3) للمزيد من التفاصيل). يساعد هذا التصحيح الطبوغرافي على التقليل من التغير في المحتوى الطيفي الناتج من الاختلاف في زوايا الإضاءة وميول التضاريس، وبالتالي في زيادة دقة التصنيف، وهو ما يراه الكثير من الباحثين (أمثال: Tokola et al., 2001; Itten and Meyer, 1993; Gitas and Devereux, 2006).

5-6-1 تقييم الدقة:

سنتحدث في هذا الجزء عن الأسباب التي تدعونا لتقييم الدقة، ونبذة تاريخية عن تطورها، والطرق المستخدمة فيها، والخطوات المتبعة فيها.

5-6-1-1 أسباب تقييم الدقة:

تحتاج خارطة الغطاءات الأرضية المنتجة من بيانات الاستشعار عن بعد (كغيرها من الخرائط) إلى تقييم دقة لعدة أسباب منها:

(1) زيادة جودة معلومات الخارطة، وذلك بتحديد الأخطاء ثم تصحيحها.

(2) الحاجة - أحياناً - إلى عمل مقارنة بين تقنيات، أو برامج، أو محللين، لاختيار الأفضل في عملية التصنيف.

(3) إذا كانت خارطة الغطاءات الأرضية ستستخدم في عملية صنع القرار.

5-1-6-2 نبذة تاريخية عن تطور تقييم الدقة:

بدأ التفكير في عملية تقييم الدقة في الخمسينات من هذا القرن عندما رأى بعض الباحثين أهمية التقييم الكمي لدقة تفسير الصور الجوية. تبع ذلك (وفي نفس الفترة) دعوة رئيس الجمعية الأمريكية للمسح الجوي والاستشعار عن بعد (ASPRS) في عام 1952 م إلى استخدام الإحصاء في المسح الجوي؛ وفي عام 1956 م قدم الباحثان "يونج" (Young) و"ستوكلر" (Stoeckler) (في ورقة أَعَدَّاهَا) تقنيات لتقييم تفسير الصور تشتمل على مصفوفة الخطأ لمقارنة تصنيف الصور بالتصنيف الحقلية؛ إلا أن هذه التقنيات لم تجد الاهتمام في ذلك الوقت، واستمر هذا الوضع حتى ظهور تقنية معالجة الصور رقمياً مع إطلاق القمر الصناعي الأمريكي (لاندسات 1) في عام 1972 م. بعد ذلك صدر عن الباحثين "هورد" (Hord) و"برونر" (Brooner) في عام 1976 م، والباحثين "جندرن" (Genderen)، و"لوك" (Lock) في عام 1977 م - عدد من المعايير والتقنيات لاختبار دقة الخرائط؛ وفي بداية الثمانينات أُجريت عدة دراسات أكثر عمقاً، وأُقرَّح عدد من التقنيات الجديدة عن طريق بعض الباحثين أمثال "روسنيلد" (Rosenfield) في عام 1982 م، و"كونجالتون" (Congalton) في عام 1983 م، و"أرونوف" (Aronoff) في عام 1985 م. ومنذ نهاية الثمانينات وحتى وقتنا الحاضر ما زالت تُبذل جهود كبيرة في تطوير تقنيات تقييم الدقة.

5-1-6-3 طرق تقييم الدقة:

تقييم دقة خارطة الغطاءات الأرضية يمكن أن يكون كمياً (Quantitative)، أو نوعياً (Qualitative). في هذا الجزء من المقرر سنتناول التقييم الكمي، نظراً لأنه يهدف إلى تحديد وقياس أخطاء الخارطة من خلال مقارنة المعالم على الخارطة مع معلومات مرجعية صحيحة لهذه المعالم. وبسبب التكلفة المالية والجهد الكبيرين اللذين سوف يترتبان على تقييم الدقة في حال تطبيقها على جميع المعالم على خارطة الغطاء الأرضي، فإن عملية التقييم تتم (كما في الخرائط الطبوغرافية التقليدية) على عينة (Sample) من الخارطة، وإختيار العينة يتطلب شرطين أساسيين هما: تصميم طريقة محايدة (Unbiased) لاختيار العينة، وتحليل دقيق لبيانات هذه العينة.

5-1-6-4 خطوات تقييم الدقة:

يتم تقييم الدقة على أربع مراحل، هي على النحو التالي:

(1) تصميم العينة (Sample Design) التي تمثل الخارطة عند إجراء عملية التقييم.

- (2) تجميع بيانات العينة (Sample Data Collection).
 - (3) بناء وتحليل مصفوفة الخطأ (Building and Analysing the Error Matrix).
 - (4) تحليل النتائج.
- ستتناول فيما يلي ثلاث المراحل الأولى، أما المرحلة الرابعة، فلن يتم التطرق إليها نظراً لأنها تختلف من حالة (مشروع) إلى أخرى.

تصميم العينة:

نظراً لأن تقييم الدقة يفترض أن المعلومات المعروضة في مصفوفة الخطأ (التي ستتطرق إليها لاحقاً) هي تمثيل حقيقي للخارطة (الصورة المصنفة) المطلوب تقييم دقتها، فإنه (عند تصميم العينة) يجب الأخذ بالأعتبارات التالية:

- (1) كيفية توزيع المعلومات في الخارطة.
 - (2) ما هي وحدة العينة (Sample Unit) المناسبة.
 - (3) كم عدد العينات التي يجب أخذها.
 - (4) كيف يتم اختيار العينات.
- والمجال هنا، لا يتسع للخوض في تفاصيل هذه المرحلة.

تجميع بيانات العينة:

تشتمل العينة التي تمثل الخارطة على وحدات أصغر تسمى (Units)؛ وهي إما أن تكون عناصر صورة (Pixels)، أو مجاميع (Clusters)، أو مضلعات (Polygons). وهذه الوحدات تشكل الأصناف أو الغطاءات الأرضية للخارطة المطلوب تقييمها، ويجب أن تتطابق وحدات هذه العينة في الخارطة مع الوحدات (العينات) المرجعية (Reference Units) التي ستقارن بها أثناء إجراء عملية التقييم. ويمكن الحصول على الوحدات المرجعية إما من صورة جوية، أو صور فيديو محمولة على طائرة، أو قياسات حقلية، أو غير ذلك من المصادر الأخرى.

وخرائط الغطاءات الأرضية المتوافرة لا تمثل مرجعاً يعتمد عليه، لأنها في الأصل قد أنتجت من صور، وبالتالي تكون قد فقدت جزءاً من الدقة؛ ولذلك يُفترض أن تكون بيانات أو عينات المرجع صحيحة 100٪ لكي يتم تقييم الخارطة بموجبها.

ونوعية مصدر البيانات المرجعية تعتمد على تعقيد نهج التصنيف (Classification Scheme) للخارطة المطلوب تقييمها. وكقاعدة عامة، كلما كان نهج تصنيف الخارطة سهلاً، كلما كان تجميع البيانات المرجعية سهلاً. فعلى سبيل المثال، إذا كانت الخارطة المصنفة تشتمل على نهج تصنيف بسيط، كغابات، وحقول زراعية، ألخ، فإن استخدام الصور الجوية كبيانات مرجعية في هذه الحالة يكفي. أما إذا كان نمط التصنيف أعقد، كتصنيف الغابات إلى أشجار بلوط، وأشجار جوز، فإن البيانات المرجعية تحتاج إلى دقة أكثر، كقياس قطر تاج الشجرة مثلاً.

بناء وتحليل مصفوفة الخطأ:

تُجرى عملية تقييم الدقة على مصفوفة الخطأ (Error Matrix)، وهي مصفوفة مربعة (Square Array) مكونة من عدد متساوٍ من الصفوف والأعمدة تمثل عدد الأصناف أو الغطاءات الأرضية. تمثل الأعمدة البيانات المرجعية (Reference Data) للعينات أو الأصناف، وتمثل الصفوف بيانات الخارطة (الصورة المصنفة المطلوب تقييمها) لهذه العينات أو الأصناف. الشكل (5-21) يعرض مصفوفة خطأ لأربعة أصناف نباتية، وهي الأشجار النفضية الموسمية (Deciduous Trees)، والأشجار دائمة الخضرة (Coniferous Trees)، وأراضي زراعية (Agriculture)، وحشائش (Shrubs).

يتضح من الشكل (5-21) أن أربع وحدات قد صنفت بالخطأ في الخارطة على أنها أشجار موسمية، بينما البيانات المرجعية تبين أنها أشجار دائمة الخضرة. هذا الخطأ يُسمى سوء تصنيف (Missclassification). وتقييم أو تقدير هذا الخطأ كميًا من مصفوفة الخطأ يتم عن طريق بعض معايير الدقة واسعة الاستخدام في مجال تقييم دقة خرائط الغطاءات الأرضية، ومنها:

- الدقة الإجمالية (Overall Accuracy).
- دقة المنتج (Producer's Accuracy).
- دقة المستخدم (User's Accuracy).

الدقة الإجمالية (ببساطة) عبارة عن مجموع العناصر القطرية للمصفوفة (وحدات العينة المصنفة تصنيفاً صحيحاً) مقسوماً على العدد الكلي لوحدات العينة في المصفوفة؛ وهذه الدقة تُعد من أكثر معايير الدقة استخداماً من قبل صانعي خرائط الغطاءات الأرضية.

ونظراً لأن الدقة الإجمالية لا تقيم دقة كل صنف على حده، فإنه يتم اللجوء إلى دقة المنتج، ودقة المستخدم، اللتين تُحسبان من بقية عناصر مصفوفة الخطأ؛ وسنعطي هنا مثلاً يوضح أهمية حساب دقة

المنتج، و دقة المستخدم بدلاً من الاقتصار على الدقة الإجمالية وحدها. فمن خلال الشكل (5-21)، يتضح أن الدقة الإجمالية تساوي 74٪، ولنفترض أن لدينا الرغبة في تقييم دقة تصنيف الأشجار الموسمية وحدها، فإن ذلك يتطلب حساب دقة المنتج بقسمة عدد وحدات العينة الصحيحة للأشجار الموسمية (65) على العدد الكلي لعينات الأشجار الموسمية المرجعية (75)، وهي مجموع عناصر العمود، ونتيجة ذلك هي 87٪، وتعتبر دقة جيدة. بالوقوف عند هذا الحد، قد يقول قائل: إن نتيجة عملية التصنيف متوسطة في مجملها، وكافية بالنسبة إلى صنف الأشجار الموسمية. ولكن إصدار مثل هذا الاستنتاج يعتبر خطأ جسيماً؛ لأنه عند حساب دقة المستخدم بقسمة عدد وحدات العينة الصحيحة للأشجار الموسمية (65) على العدد الكلي لعينات الأشجار الموسمية الناتجة من عملية التصنيف (115) نحصل على نسبة 57٪ فقط؛ وهذا يعني أنه على الرغم من أن نسبة 87٪ من وحدات صنف الأشجار الموسمية قد حددت بأنها أشجار موسمية، فإن 57٪ فقط من الأشجار الموسمية المحددة على الخارطة المصنفة متطابقة مع الموجود على الأرض.

	البيانات المرجعية				مجموع الصفوف
	D	C	AG	SB	
D	65	4	22	24	115
C	6	81	5	8	100
AG	0	11	85	19	115
SB	4	7	3	90	104
مجموع الأعمدة	75	103	115	141	434

الغطاءات الأرضية
D = أشجار موسمية
C = أشجار دائمة الخضرة
AG = أراضي زراعية
SB = حشائش

دقة المنتج	دقة المستخدم	الدقة الإجمالية
$D = 65/75 = 87\%$	$D = 65/115 = 57\%$	$(65+81+85+90)/434 = 321/434 = 74\%$
$C = 81/103 = 79\%$	$C = 81/100 = 81\%$	
$AG = 85/115 = 74\%$	$AG = 85/115 = 74\%$	
$SB = 90/141 = 64\%$	$SB = 90/104 = 87\%$	

شكل (5-21) مصفوفة الخطأ لتصنيف أربعة غطاءات أرضية. المصدر: [13].

تمثيل مصفوفة الخطأ رياضياً:

في الفقرة السابقة تم تمثيل الخطأ في المصفوفة وصفيًا، ولكن عند الرغبة في إجراء التحليل على مصفوفة

الخطأ إحصائياً، فإنه يتعين تمثيل هذه المصفوفة رياضياً. لنفترض أن $(i = 1, 2, 3, \dots, k)$ تمثل الصفوف في المصفوفة، وهي الأصناف أو الغطاءات الأرضية في الخارطة المصنفة، و $(j = 1, 2, 3, \dots, k)$ تمثل الأعمدة في المصفوفة، وهي الأصناف أو الغطاءات الأرضية للبيانات المرجعية. ولنفترض أيضاً، وكما هو واضح من الشكل (5-22)، أن:

$$n_{i+} = \sum_{j=1}^k n_{ij}$$

$$n_{+j} = \sum_{i=1}^k n_{ij}$$

من ذلك، يمكن حساب "دقة المنتج" رياضياً على النحو التالي:

$$\frac{n_{jj}}{n_{+j}} = \text{دقة المنتج للصف (العمود) } j$$

وبنفس الطريقة يمكن حساب "دقة المستخدم" كالتالي:

$$\frac{n_{ii}}{n_{i+}} = \text{دقة المستخدم للصف (الصف) } i$$

ويمكن حساب "الدقة الإجمالية" على النحو التالي:

$$\frac{\sum_{i=1}^k n_{ii}}{n} = \text{الدقة الإجمالية}$$

من التقنيات الأخرى المستخدمة في حساب دقة التصنيف "تحليل كبا" (Kappa Analysis)، وناتج هذا التحليل قيمة تسمى "إحصاء خات" (Khat Statistics)، وهي القيمة التقريبية لـ (كبا) Estimate (-of Kappa)، وتتراوح قيمتها بين 0 و 1، أو بين 0 و 100 نسبة مئوية، ويمكن حساب قيمة (كبا) التقريبية (\hat{K}) على النحو التالي:

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+i}}$$

وعلى الرغم من أن تحليل (كابا) قد استخدم في السابق في علم الاجتماع وعلم النفس، إلا أنه لم يتم طرقة من قبل مجتمع الاستشعار عن بعد إلا في عام 1981م عن طريق الباحث "كونجالتون" (Congalton)، ولم يتم نشره في مجلات الاستشعار عن بعد إلا في عام 1983م عن طريق نفس الباحث. ومنذ ذلك الحين، نُشرت عدة أوراق توصي باستخدام هذه التقنية، ومن ثم أصبح استخدامه جزءاً لا يتجزأ من عمليات تقييم الدقة.

وحسب (Congalton and Green, 1999)، فإنه ليس هناك رأي علمي واضح حول تفضيل أحد المعيارين (الدقة الإجمالية، و(كابا)) على الآخر، فمجتمع الاستشعار عن بعد مازال يستخدم كلا المعيارين حتى الآن. إلا أن هناك من يفضل استخدام (كابا)، نظراً لأن حساب الدقة الإجمالية لا يأخذ في الاعتبار إلا قيم العناصر القطرية (Diagonal Elements) في مصفوفة الخطأ، في حين أن حساب (كابا) يأخذ في الحسبان العناصر القطرية، وكذلك العناصر غير القطرية (Off-Diagonal Elements) التي تحتوي على أخطاء الحذف (Errors of Omission)، وهي حذف عينات من الأصناف الصحيحة، وأخطاء الإضافة (Errors of Commissions)، وهي العينات من الأصناف الأخرى التي تم بالخطأ تصنيفها إلى صنف معين.

		مجموع الصفوف			
		مجموع الأعمدة			
		(البيانات المرجعية)			
		مجموع الصفوف			
		n_{i+}			
		1	2	K	
الصفوف = i (البيانات المُصنَّفة)	1	n_{11}	n_{12}	n_{1k}	n_{1+}
	2	n_{21}	n_{22}	n_{2k}	n_{2+}
	K	n_{k1}	n_{k2}	n_{kk}	n_{k+}
مجموع الأعمدة	n_{+j}	n_{+1}	n_{+2}	n_{+k}	n

شكل (5-22) التمثيل الرياضي لمصفوفة الخطأ. المصدر: [13].

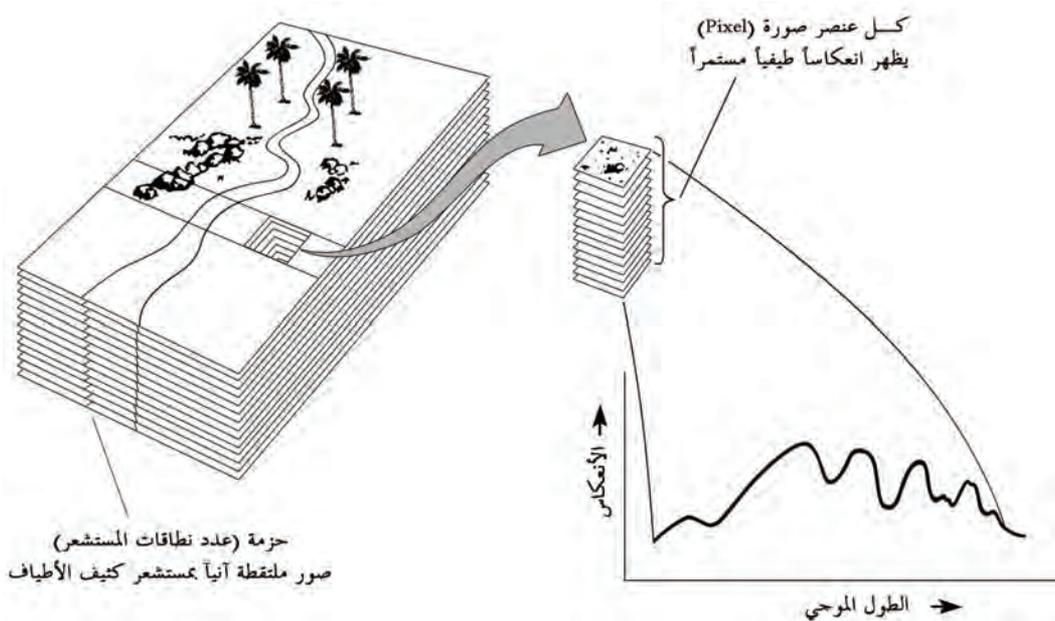


الفصل السادس |

الاستشعار عن بعد الكثيف الأطياف

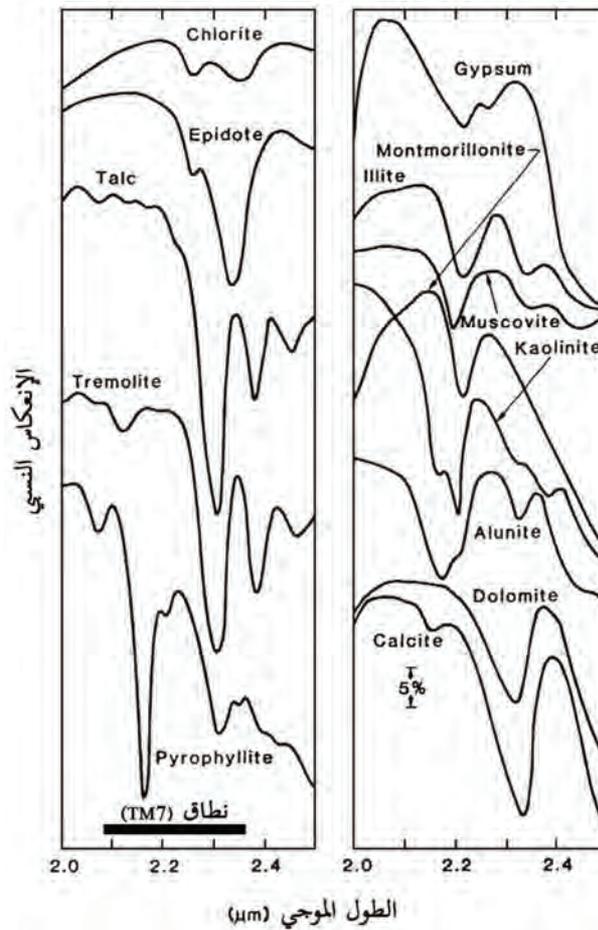
Hyper-Spectral Sensing

يتم الاستشعار عن بعد الكثيف الأطياف باستخدام أجهزة تصوير تسمى المستشعرات الكثيفة الأطياف (Hyper-Spectral Sensors) أو "سبكتروميترات" (Spectrometers). تلتقط هذه الأجهزة الصور في عدد كبير من النطاقات الضيقة والمتواصلة في الأقسام المرئية، وتحت الحمراء القريبة، وتحت الحمراء المتوسطة، وتحت الحمراء الحرارية من الطيف الكهرومغناطيسي؛ وتستشعر هذه الأجهزة - كما هي الحال مع المستشعرات المتعددة الأطياف (Multi-Spectral Sensors) - بعدة أنماط منها: المسح الخطي بتأرجح المكنسة (Whisk-Broom) بواسطة مرآة متأرجحة (Oscillating Mirror) سواء كان متعامداً على (Cross-track) أم موازياً (Along-Track) لمسار القمر، والمسح الخطي بدفع المكنسة (Push-Broom)، والمسح ثنائي الأبعاد (2-D Framing Arrays).



شكل (6-1) مفهوم الاستشعار عن بعد الكثيف الأطياف. المصدر: [3]

لدى المستشعرات الكثيفة الأطياف القدرة على التصوير في متتين (200) أو أكثر من النطاقات الطيفية الضيقة (Narrow Beamwidths) المتوالية، وهو ما يُمكن من إنشاء منحنيات انعكاس طيفية متواصلة (Continuous Reflectance Spectrum) لأي عنصر من عناصر الصورة (شكل (6-1))؛ لذلك تُمكن هذه المستشعرات بقدرتها على التصوير في نطاقات طيفية ضيقة من التفريق بين المعالم الأرضية ذات خصائص الانعكاس المتقاربة جداً، والتي لا يمكن كشفها باستخدام المستشعرات المتعددة الأطياف (Multi-Spectral Sensors) التي تصور في نطاقات طيفية واسعة (Coarse Bandwidths).

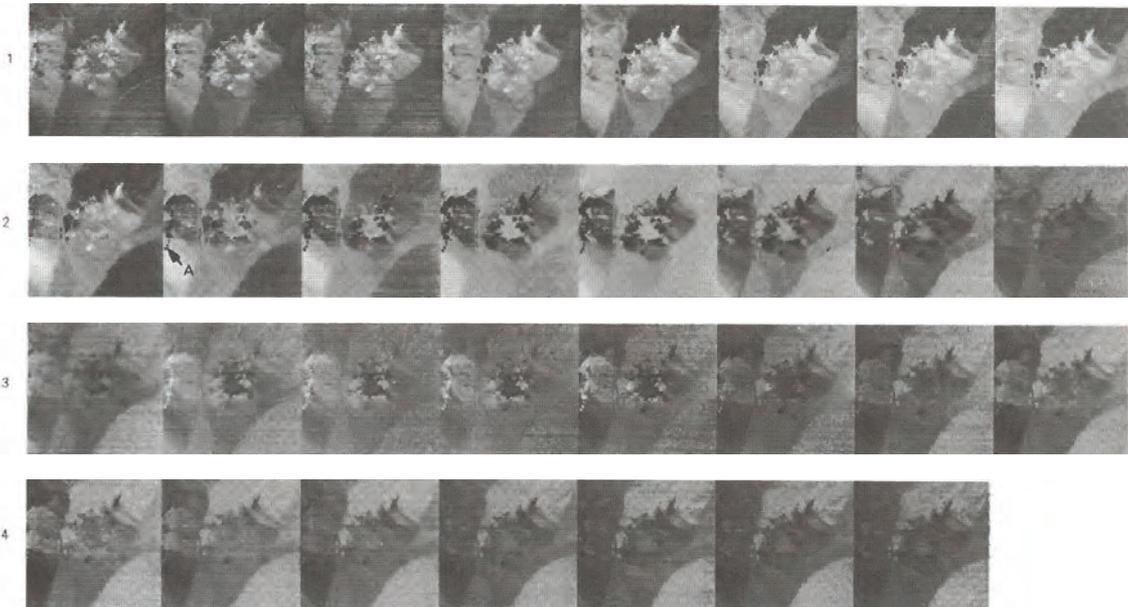


شكل (6-2) منحنيات انعكاسات مخبرية مختارة توضح خصائص الانعكاس والامتصاص لبعض المعادن. عرض النطاق السابع لنظام التصوير (TM) (TM7 Bandwidth) للقمر الأمريكي (لانداست) موضحاً - أيضاً - بالشكل لغرض المقارنة. المصدر: [1].

يعرض الشكل (6-2) منحنيات الانعكاسات الطيفية المقيسة في المعمل لعدد من المعادن المشهورة للفترة الطيفية (2.0 μm - 2.5 μm)؛ ويلاحظ في الشكل التغيرات الدقيقة في درجات الانعكاس هذه

المعادن في الفترة الطيفية القصيرة نسبياً، ويتضح من هذا الشكل أهمية الاستشعار الكثيف الأطياف من أن عرض النطاق السابع لنظام التصوير للقمر ”لاندسات“ (TM7 Bandwidth) لا يستطيع توفير إلا نقطة انعكاس واحدة (One Point Reflectance Data) تقابل عرض نطاق طيفي قدره ($0.27\mu\text{m}$)، في حين أن المستشعر الكثيف الأطياف قادر على تسجيل الكثير من نقاط الانعكاس في هذه الفترة باستخدام عدة نطاقات ضيقة عرض كل منها ($0.01\mu\text{m}$).

وخلاصة ما سبق، فإن الميزة التي يقدمها الاستشعار عن بعد الكثيف الأطياف هي القدرة على توفير منحنيات انعكاس طيفية تفصيلية لكل عنصر صورة تُمكن من التفريق الدقيق بين الغطاءات الأرضية ذات التشابه الكبير، ومنها المعادن، والنباتات، والماء، والثلج، إلخ. كما أن العدد الكبير من النطاقات الضيقة التي يستشعرها المستشعر عن بعد الكثيف الأطياف تعتبر بديلاً جيداً للبيانات الطيفية المقيسة في المعامل، أو من خلال المسوحات الأرضية المكلفة. وعلاوة على هذه المزايا، فإن هناك سلبية تصاحب استخدام الاستشعار عن بعد الكثيف الأطياف، وهي ضخامة حجم بيانات صورها نتيجة للعدد الكبير من النطاقات المُستشعرة.



شكل (3-6) صور لواحد وثلاثين (31) من النطاقات الطيفية الكثيفة للفترة الطيفية

($1.98\mu\text{m}-2.48\mu\text{m}$) لصخور بركانية في ولاية (نيفادا) الأمريكية تم التقاطها بواسطة أحد أجهزة التصوير الكثيفة الأطياف. النطاقات مرتبة على التوالي، وتبدأ بالنطاق رقم (32) في الجزء العلوي الأيسر من الشكل، وتنتهي بالنطاق (62) في الجزء الأسفل الأيمن. المصدر: [1].

تشمل تطبيقات الاستشعار عن بعد الكثيف الأطياف العديد من المجالات، منها: تحديد أنواع الغطاءات النباتية، وأمراض النباتات، والمحتوى المائي في أوراق الأشجار، وأنواع المحاصيل وحالتها، واكتشاف

المعادن، وخصائص الثلج، إلخ. فعلى سبيل المثال، يعرض الشكل (6-3) استخدام واحد وثلاثين (31) نطاقاً من النطاقات الطيفية الكثيفة المتوالية للفترة الطيفية (1.98µm-2.48µm) من الطيف الكهرومغناطيسي لتحديد هوية المعادن في منطقة بركانية. النطاقات مرتبة على التوالي، وتبدأ بالنطاق رقم (32) في الجزء العلوي الأيسر من الشكل، وتنتهي بالنطاق (62) في الجزء الأسفل الأيمن. بالمقارنة مع المستشعرات ذات النطاقات الواسعة (مثل TM) (التي لا تستطيع التفريق بين المعادن المختلفة في الفترة الطيفية المشار إليها آنفاً)، نجد أنه من خلال صور النطاقات الإحدى والثلاثين يمكن التعرف على التغيرات في الخصائص الطيفية للمعادن؛ فعلى سبيل المثال، المنطقة المُعلّمة (A) في صورة النطاق (41) عبارة عن مجموعة نقاط داكنة تمثل وجود معدن الـ(Alunite)، ويرجع ظهور مناطق معدن الـ(Alunite) داكنة في النطاقات (41 إلى 44) إلى خصائص الامتصاص القوية لهذا المعدن في الموجات ذات الطول (2.13µm - 2.18µm)؛ في حين تظهر مناطق هذا المعدن نقاطاً مضيئة في النطاقات (49 إلى 52) نتيجة لخاصية الانعكاس القوية لهذا المعدن في موجات هذه النطاقات.

تحتفظ العديد من الوكالات الحكومية والشركات بمجموعات من المنتجات الطيفية للعديد من المواد؛ فعلى سبيل المثال، تمتلك هيئة المساحة الجيولوجية الأمريكية (USGS) مكتبة طيفية رقمية تحتوي على ما يقارب خمسمئة (500) من منحنيات الانعكاسات الطيفية للمعادن، والنباتات، والمواد الأخرى. كما يحتفظ مركز الهندسة الطبوغرافية للجيش الأمريكي (US Army Topographic Engineering) بالمنحنيات الطيفية للعديد من المواد، ومنها المعادن، والتربة، والصخور، والمعالم الصناعية، وغيرها للفترة الطيفية (0.4µm-2.5µm)

وكما هي الحال مع البيانات متعددة الأطياف تحتاج البيانات الكثيفة الأطياف إلى إجراء تصحيح لتأثيرات الغلاف الجوي لكي تكون مقارنتها بمنحنيات الانعكاس بالمكتبة الطيفية صحيحة.



الفصل السابع |

الاستشعار عن بعد الإيجابي بموجات الميكروويف

Active Microwave Sensing

1-7 مقدمة:

تشغل موجات الميكروويف حيزاً من الطيف الكهرومغناطيسي، وتتراوح الأطوال الموجية لها بين 1 مم و1 م. وكنا قد تطرقنا سابقاً في الفقرة (1-2-3) إلى الاستشعار عن بعد السلبي بموجات الميكروويف (Passive Microwave Sensing)، وهو: تسجيل المستشعرات انبعاثات موجات الميكروويف (Microwave Emissions) القادمة من سطح الأرض عن طريق مستشعرات تسمى "راديوميترات" (Radiometers). أما في هذا الفصل، فستحدث عن الاستشعار عن بعد الإيجابي بموجات الميكروويف (Active Microwave Sensing) عن طريق مستشعرات إيجابية (Active Sensors) تنتج طاقة الميكروويف، وتبثها إلى سطح الأرض، ثم تسجل العائد منها. تُمكن هذه الخاصية في المستشعرات الإيجابية من مقارنة الطاقة المباشرة من المستشعر (معروفة الخصائص) إلى سطح الأرض بالطاقة العائدة من سطح الأرض في تحديد خصائص السطوح بدقة أكثر من المستشعرات السلبية التي يقتصر دورها على الاستقبال فقط للأشعة المنبعثة من سطح الأرض.

يوفر التصوير بموجات الميكروويف، ومنها الرادار (RADAR)، مميزات كبيرة مقارنة بالتصوير بموجات الضوء المرئي، وتحت الحمراء القريبة، ومنها القدرة على التصوير في معظم الظروف الجوية نظراً لقدرة هذه الموجات ذات الطول الموجي الطويل على اختراق المؤثرات الجوية، كالغيوم، والمطر الخفيف، والدخان؛ ومن المميزات الأخرى للتصوير بموجات الميكروويف القدرة على التصوير ليلاً، لكون التصوير بهذه الموجات لا يعتمد على إضاءة الشمس سطح الأرض.

سنتناول في هذا الفصل (وبشيء من التفصيل) بعض الجوانب المهمة المتعلقة بالاستشعار عن بعد بنظام الرادار، ويشمل ذلك الحديث عن تاريخ نشأة الرادار، وأنواع أنظمتها من حيث الاستخدام والتقنية المستخدمة فيها. كما سيتم التطرق (وفي جانب كبير من هذا الفصل) إلى نظام رادار الرؤية الجانبية (Side Looking Radar-SLR) من حيث المفاهيم الأساسية لعمله، والخصائص الهندسية ودرجة الوضوح المكانية لصوره،

واستخدام ظاهرة تأثير وإزاحة ”دوبلر“ (Doppler) وأهميتها في عمل نظام رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (Synthetic Aperture Radar-SAR)، وتفسير صور الرادار وفقاً للخصائص الفنية التي يعمل بها جهاز الرادار. ويختم الفصل بتقديم نبذة عن تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (Interferometry) الحديثة نسبياً (ظهرت خلال العقدين الماضيين)، وذات الأهمية الكبيرة في حساب بيانات ارتفاعات التضاريس الرقمية، وحساب الإزاحات أو التشوهات التي تحدث لسطح الأرض أو المعالم الصناعية عليها بشكل دقيق.

2-7 تاريخ نشأة الرادار:

تعود البدايات الأولى للرادار إلى العالم ”جيمس ماكسويل“ (James Maxwell) (1831م-1879م) الذي عرّف بالخصائص الأساسية للأشعة الكهرومغناطيسية. أكد بعد ذلك العالم الألماني ”هنرك هيرتز“ (Heinrich Hertz) (1857م-1894م) ما جاء به العالم (ماكسويل)، ودرس (بعمق) خصائص وطبيعة انتشار الطاقة في قطاعات الميكروويف والراديو من الطيف الكهرومغناطيسي. كان هذا العالم - والذي سُرّف اسمه باستخدامه وحدة قياس للتردد - من الأوائل الذين درسوا خصائص انعكاس موجات الراديو من السطوح المعدنية وبدؤوا بالأبحاث التي أدت إلى تطوير الراديو والرادار الحديث.

وفي عام 1897م عندما كان العالم الروسي ”إلكساندر بوبوف“ (Alexander Popov) (الذي يعمل في مدرسة البحرية الملكية الروسية) يجري اختبارات على أجهزة اتصال بين سفينتين في بحر البلطيق لاحظ تداخلاً (تشويشاً) في إشارات الاتصالات بين السفينتين بسبب مرور سفينة ثالثة بينهما؛ وقد سجل هذه الملاحظة في تقرير له، وتنبأ أن تُستخدم هذه الظاهرة لاحقاً في اكتشاف الأهداف.

وأول من استخدم موجات الراديو في اكتشاف وجود أجسام معدنية على بعد العالم الألماني ”كرستيان هولسمير“ (Christion Hulsmeyer) في عام 1904م، حين برهن أنه يمكن اكتشاف (ولكن من دون تحديد مسافة) سفينة في ضباب كثيف. وفي عام 1917م وضع العالم ”نيكولا تيسلا“ (Nicola Tesla) مخططاً لفهم وحدات رادار بدائي.

ويرى العديد من الباحثين أن البداية الحقيقية للرادار تعود إلى عام 1922م عندما كان العالمان ”البيرت تايلور“ و”ليو يونج“ (Albert Taylor & Leo Young) (اللذان يعملان لصالح البحرية الأمريكية) يجريان تجارب على بث موجات الراديو العالية التردد واكتشافها إمكانية استخدام موجات الراديو لاكتشاف الأهداف الكبيرة. جاء ذلك عندما نصبوا جهازي بث واستقبال راديو على ضفتي النهر، ووجدوا أن تيار ماء النهر الذي يفصل بين جهاز البث، وجهاز الاستقبال قد اعترض الإشارة المنقولة مما عنى لهما إمكانية استخدام ذلك في اكتشاف الأجسام الكبيرة، ومنها سفن العدو. تَوَاصَلَ تطور التصاميم بعد ذلك إلى أن تم الوصول إلى فكرة أن يكون البث والاستقبال في جهاز واحد بدلاً من وضع جهازي البث والاستقبال في مكانين مختلفين؛ ثم تحولت

هذه الفكرة إلى جهاز في الفترة من 1933م إلى 1935م في ثلاث دول، هي أمريكا، وألمانيا، واليابان.

وقبل الحرب العالمية الثانية طور باحثون من أمريكا، وفرنسا، وبريطانيا، وألمانيا، وإيطاليا، واليابان، والاتحاد السوفيتي بشكل سري وبدون معرفة الطرف الآخر تقنيات أوصلت إلى النسخة الحديثة من الرادار؛ ويعود تطوير أول جهاز متكامل يعمل بنبضات الرادار (Pulsed System) إلى الباحث الأمريكي "روبرت بيج" (Robert Page) في معمل الأبحاث البحرية في عام 1934م، تلا ذلك الباحث الألماني "رودولف كونهولد" (Rudolf Kohnhold) في عام 1935م عندما عرض جهاز رادار يعمل بنبضات الرادار، ثم العالم البريطاني "روبرت واتسون وات" (Robert Watson Watt) في نفس العام؛ ويذكر أن البريطانيين هم أول من استفاد من الرادار وسيلة دفاع ضد هجومات الطائرات، حيث برهن فريق العالم (روبرت واتسون وات) إمكانية استخدام أنظمة الرادار وسيلة دفاع عن بريطانيا، وهو ما مهد لجعل هذه الفكرة تستخدم أساساً لبناء شبكة الرادارات الدفاعية البريطانية ضد الطائرات الألمانية في الحرب العالمية الثانية.

توالى بعد ذلك جهود تطوير أنظمة الرادار، ومنها أنظمة الاستشعار عن بعد بموجات الرادار حتى الوصول إلى أنظمة رادار تصوير الرؤية الجانبية، ومنها المحمول جواً (Side-Looking Airborne Radar - SLAR).

وفيما يتعلق بالاستشعار عن بعد الفضائي بموجات الرادار، فقد بدأت هذه الحقبة بإطلاق القمر الاصطناعي "سيسات" (Seasat) في عام 1978م، واستمرت الجهود في هذا المجال برادار مكوك الفضاء الأمريكي (Shuttle Imagery Radar - SIR)، وبتجارب "كوزموس" (COSMOS) الروسية في الثمانينات.

ومع بداية التسعينات وبالتحديد في عام 1991م أُطلق ثلاثة أقمار رادار، وهي "ألماز-1" (Almaz-1) الروسي، و"إي آر إس-1" (ERS-1) الأوروبي، و"جي إي آر أس" (JERS) الياباني، وتبع ذلك إطلاق مجموعة من الأقمار الأخرى، ومنها أول قمر رادار كندي "رادارسات-1" (Radarsat-1) في عام 1995م.

ومع بداية القرن الحادي والعشرين تم إطلاق مجموعة من أقمار الرادار القادرة على التصوير عالي الوضوح (تصل إلى 1م)، ومتعدد الاستقطاب، ومنها "رادارسات-2" (Radarsat-2) الكندي، و"كوزمو سكايميد" (Cosmo Skymed) الإيطالي، و"تيراسار إكس" (TerraSar-X) الألماني.

3-7 أنواع أنظمة الرادار:

يمكن تقسيم أنظمة الرادار إما حسب الاستخدام (الوظيفة التي تؤديها)، كرادارات الملاحية، ورادارات مراقبة الطرق، ورادارات الخرائط، إلخ، أو حسب التقنية المستخدمة في تصنيعها، كرادارات النبضة، ورادارات الموجة المستمرة، ورادارات الرؤية الجانبية، إلخ. وفيما يلي نبذة مختصرة عن هذه الأنظمة.

7-3-1 أنواع أنظمة الرادار من حيث الاستخدام:

كلمة (RADAR) اختصار للعبارة الإنجليزية (Radio Detection and Ranging). وكما يشير اسمه، يستخدم نظام الرادار موجات الراديو (Radio Waves) لاكتشاف وجود الأجسام وتحديد مسافاتها ومواقعها. وإمكانية قياس المسافة (Ranging) تتم بقياس الوقت من بث نبضة الرادار إلى استقبالها، ومن ثم حساب المسافة باستخدام الوقت، وسرعة الضوء (سرعة النبضة).

لا تقتصر أنظمة الرادار المستخدمة على تطبيقات الاستشعار عن بعد (إنتاج صور رادار جوية أو فضائية) فقط، فهي تدخل في العديد من التطبيقات، ومنها أنظمة الملاحة، ومراقبة الحركة الجوية، والبحرية، ومراقبة الأحوال الجوية، ومراقبة الفضاء الخارجي، وأنظمة الدفاعات الجوية، والمضادة للصواريخ، الخ. وتأتي أنظمة الرادار، حسب التطبيقات المستخدمة، في العديد من الأشكال والتركيبات المتعلقة بأجهزة البث والاستقبال والهوائي، والطول الموجي، وأسلوب المسح، الخ. وفيما يلي نبذة مختصرة عن هذه الأشكال.

رادارات البحث (Search Radars): يستخدم هذا النوع من الأنظمة نبضات راديو قصيرة الطول الموجي لمسح مساحات واسعة. ومن الأنظمة المستخدمة في هذا المجال، نظام الإنذار المبكر الطائر (AWAX)، وأنظمة البحث السطحية (أنظمة مراقبة السواحل، وأنظمة الحرب المضادة للغواصات)، الخ.

رادارات الأهداف (Targeting Radars): يعمل هذا النوع من الأنظمة بنفس المبدأ المستخدم في النوع الأول، إلا أنه يسمح مساحات أصغر بكثير من التي يمسحها النوع الأول. ومن الأنظمة المستخدمة في هذا المجال، أنظمة توجيه الصواريخ (صواريخ جو-جو، وصواريخ أرض-أرض، وصواريخ أرض-جو، وصواريخ أرض-أرض)، وأنظمة الاستطلاع ومراقبة ميدان المعركة (أنظمة المراقبة الأرضية، وأنظمة المراقبة الجوية).

رادارات الأحوال الجوية (Weather Radars): تشبه هذه الرادارات رادارات البحث، إلا أنها تستخدم موجات الرادار باستقطابات مختلفة (فردية، أو ثنائية) حسب التطبيق المطلوب. فعلى سبيل المثال، يتطلب تحديد أشكال المطر استخدام استقطاب ثنائي.

رادارات الملاحة (Navigation Radars): تشبه هذه الرادارات رادارات البحث، ولكنها تستخدم أطوال موجية أقصر بكثير من المستخدمة في رادارات البحث. ومن الأنظمة المستخدمة في هذا المجال أنظمة الملاحة في السفن والطائرات التجارية طويلة المدى، وأنظمة مراقبة حركة المرور الجوية. وتستخدم أبراج المراقبة الجوية نوعين من الرادارات، رئيسية، وثانوية؛ فالرادارات الرئيسية (التقليدية) تستقبل الانعكاسات من جميع المعالم الجوية (غيوم، طائرات، الخ)، بينما تبث الرادارات الثانوية نبضات خاصة وتصغي إلى الرد القادم من جهاز البث في الطائرة القادمة. رد الطائرة يشتمل على شفرة تُعرّف بشخصيتها ومهمتها؛ وفي حالة الطائرات العسكرية، يرسل جهاز البث بالطائرة معلومات عن الدولة التي تملك

هذه الطائرة والهدف من قدومها، وتمكّن هذه المعلومات أنظمة الدفاع الجوي من التعرف على الطائرات المعادية من الصديقة.

رادارات مراقبة الطرق (Traffic Radars): ومنها مسدسات الرادار المستخدمة من قبل الشرطة في مراقبة السرعة.

رادارات تتبع التضاريس (Terrain-Following Radars): تمكّن هذه الرادارات الطائرات (آلياً) من المحافظة على ارتفاع منخفض وثابت. ويتلخص مفهوم عملها في: أن يبث الرادار إشارات أمام الطائرة، ويستقبل العائد منها، ثم يحللها لمعرفة ارتفاعات التضاريس أمام الطائرة، ثم تُستخدم هذه المعلومات بواسطة الطيار الآلي بالطائرة للمحافظة على ارتفاع ثابت فوق سطح الأرض. وتُستخدم هذه التقنية بشكل أساسي في الطائرات المقاتلة لتمكنها من الطيران على ارتفاع منخفض لتجنب رادارات العدو؛ كما أنها تُستخدم أحياناً في الطائرات المدنية المتخصصة بالتصوير للمحافظة على ارتفاع ثابت أثناء التصوير.

رادارات الخرائط (Mapping Radars): تُستخدم هذه الرادارات في مسح مناطق واسعة لتطبيقات الاستشعار عن بعد والخرائط. هذه التطبيقات تجعل استخدامها يقتصر على الأهداف الساكنة، وخصوصاً التضاريس؛ لذلك تعتمد هذه الرادارات في عملها على استخدام تقنية رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (SAR) التي سنتطرق إليها لاحقاً في هذا الفصل. من الأنظمة المستخدمة في هذا المجال رادار التصوير (Imaging Radar) الذي سنتناوله في الفقرة التالية. يُقدّم رادار التصوير صور (بيانات) ثنائية الأبعاد لسطح الأرض في اتجاه المدى (Range)، وهو الاتجاه المتعامد مع مسار حامل الرادار (طائرة أو قمراً اصطناعياً)، واتجاه السمّ (Azimuth)، وهو اتجاه مسار حامل الرادار.

رادارات التصوير (Imaging Radars): يبث ويستقبل (بالتناوب) رادار التصوير نبضات بأطوال موجية محددة (تراوح بين 1 سم و 1 م)، يقابلها ترددات تتراوح بين 300 ميغاهرتز و 30 جيجا هرتز، وباستقطاب فردي، أو ثنائي، أو متعدد. يتم في هذه الرادارات بث نبضات عالية الطاقة (تقارب 1500 نبضة/ثانية) إلى الأهداف أو المنطقة المطلوب تصويرها، وتتراوح مدة كل نبضة (Pulse Duration)، وتسمى أيضاً بعرض النبضة (Pulse Width)، بين 10 و 15 مايكروثانية، وتغطي النبضة حزمة صغيرة من الترددات، يتوسطها التردد المعلن للرادار المستخدم.

يتراوح عرض نطاقات رادار التصوير النموذجية بين 10 و 200 ميغاهرتز؛ وعند ضرب نبضات الرادار سطح الأرض تشتت طاقة هذه النبضات في كل اتجاه ويعود جزءاً منها باتجاه الهوائي يسمى (Backscatter). يتم تحويل العائد من هذه الطاقة إلى هيئة رقمية، ثم تُسجل في جهاز تسجيل لمعالجتها في وقت لاحق وعرضها على شكل صورة. يُحدّد عرض نطاق النبضة (Pulse Bandwidth) المستخدم درجة وضوح المدى، فكلما زاد عرض نطاق النبضة زادت درجة وضوح المدى؛ ويحدد طول الهوائي درجة وضوح السمّ، فكلما زاد طول الهوائي زادت درجة وضوح السمّ.

7-3-2 أنواع أنظمة الرادار من حيث التقنية المستخدمة فيها:

يمكن تقسيم أنظمة الرادار من حيث طريقة عملها بشكل أساسي إلى رادارات النبضات (Pulse Radars)، ورادارات الموجات المتصلة (Continuous Wave Radars)؛ ففي النوع الأول الذي يستخدم هوائياً (Antenna) واحداً، يتم بث موجات الرادار على شكل نبضات متقطعة، ويتم استقبال صدى هذه النبضات (العائد من الأهداف) خلال الفترات الزمنية الفاصلة بين بث هذه النبضات باستخدام مفتاح إلكتروني يحول وضع الهوائي من حالة البث إلى الاستقبال، ومن الاستقبال إلى البث بشكل ترددي. أما النوع الثاني، فإنه يبث ويستقبل في آن واحد (عن طريق هوائيين في العادة) موجات متصلة ثابتة السعة.

تقسيم أنواع الرادار من حيث التقنية المستخدمة يذهب في التفاصيل إلى أبعد من النوعين الرئيسيين المذكورين آنفاً. فهناك العديد من التصنيفات، إلا أن أكثرها تداولاً يضم الأنواع التالية:

رادار النبضات: ينقسم نظام رادار النبضات (الذي يعتمد في عمله على إرسال سيل من نبضات الرادار واستقبال العائد (المنعكس) منها من الأهداف) إلى نوعين رئيسيين: النوع الأول "رادار النبضات البسيط" (Simple Pulse Radar)، الذي يعتمد في عمله على إرسال نبضة عن طريق باث الهوائي، ثم يستقبل صدى (انعكاس) هذه النبضة عن طريق مُستقبل الهوائي، وبعد استقبال انعكاس هذه النبضة يبث باث الهوائي نبضة أخرى، وهكذا تستمر العملية بين بث واستقبال عن طريق مفتاح مُزامن مصمم لهذا الغرض يسمى "المُزَاج" (Duplexer) يمنع بث النبضات أثناء استقبال الهوائي للإشارات المنعكسة من الأهداف. هذا النوع من الرادارات (والذي يعتبر من أكثر أنظمة الرادار نموذجية) يستطيع تحديد مكان وسرعة تحرك الهدف، ولكن ليس بدقة كبيرة؛ وتحديد مكان الهدف (المسافة من الهوائي) يُحسب من خلال ضرب سرعة النبضة (سرعة الضوء) في الزمن (الزمن الكلي لذهاب وعودة الإشارة مقسوماً على 2)؛ وتُحسب سرعة تحرك الهدف بقسمة المسافة التي يقطعها الهدف بين موقعين على الزمن الذي يستغرقه الهدف للانتقال بين هذين الموقعين. يعتمد هذا النوع (في معظم أشكاله) على هوائي يدور ماسحاً أكبر منطقة ممكنة من الأفق (تصل إلى 360°). من الأمثلة الشائعة لهذا النظام مؤشر الموقع المستوي (Plane Position Indicator)، الذي يملك شاشة عرض دائرية بها ماسح قطري يدور عارضاً انعكاسات الأجسام المحيطة بالهوائي ضمن الدائرة المحددة، وتتحدث الصورة على الشاشة بشكل مستمر حسب دوران الهوائي؛ ويُستخدم هذا الرادار في اكتشاف الأهداف المتحركة والثابتة في العديد من التطبيقات، ومنها: مراقبة الحركة الجوية والبحرية، والاستطلاع العسكري، إلخ.

النوع الثاني هو "رادار النبضات المعتمد على تأثير دوبلر" (Pulse-Doppler Radars). هذا الرادار أكثر تعقيداً من النوع الأول لاعتماده في طريقة عمله على ظاهرة "إزاحة تردد دوبلر" (Doppler Frequency Shift) الذي يتم من خلالها حساب سرعة الهدف اعتماداً على التغير في تردد الموجات المنعكسة منه نتيجة للتغير في موقعه (مسافته) نسبة إلى الهوائي (يمكن الرجوع إلى فقرة (7-6-3) لمزيد من التفاصيل). إن اعتماده على هذه الظاهرة يمنحه ميزة إضافية أخرى مقابل النوع الأول، وهي قدرته على التفريق بين

الأهداف المتحركة والأهداف الساكنة؛ ويندرج تحت هذا النوع وفقاً لهذه الميزة الرادار المسمى بـ "رادار إظهار الأهداف المتحركة" (Moving-Target Indication-MTI Radar).

رادار الموجات المتصلة: يستطيع رادار الموجات المتصلة قياس سرعة الأهداف المتحركة بدقة أعلى من رادار النبضات، ولكنه لا يقدم أية معلومات عن المسافة إلى الهدف؛ وقياسه للسرعة يعتمد على ظاهرة إزاحة تردد (دوبلر) كما في "رادار النبضات المعتمد على تأثير دوبلر" الذي تم التطرق إليه آنفاً، ولكن باستخدام موجات متصلة بدلاً من النبضات المتقطعة.

من التطبيقات التي شاعت كثيراً على استخدام هذا النوع - مراقبة سرعة السيارات؛ ولكون هذا النوع من أنظمة الرادار يستخدم ظاهرة تأثير (دوبلر)، فإنه قادر - أيضاً - على التفريق بين الأهداف المتحركة (كالطائرات)، والأهداف الثابتة أو بطيئة الحركة غير المرغوب فيها (Clutters) (كالبنائيات، والغيوم، والجبال، الخ).

رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية: ينتمي رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (Synthetic Aperture Radar-SAR) إلى أنظمة رادار التصوير (Imaging Radars)، ويعمل بمفهوم "رادار الرؤية الجانبية" (Side Looking Radar-SLR) الذي سنتناوله بالتفصيل في الفقرة (7-6). يتم تركيب رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية إما على طائرة، أو قمر اصطناعي لتصوير سطح الأرض وإنتاج صورة ثنائية الأبعاد. سُمي برادار فتحة الإغلاق الاصطناعية؛ لأنه يستخدم تحرك هوائي الرادار الصغير (النتاج من حركة الطائرة أو القمر الاصطناعي المحمول عليه) للتعويض عن طول الهوائي الكبير جداً اللازم للتصوير عالي دقة الوضوح عند استخدام نظام رادار ثابت ذي فتحة إغلاق حقيقية (Real Aperture Radar).

تحرك الطائرة أو القمر يُمكن الهوائي الصغير المثبت عليها من أخذ قياسات متكررة من عدة مواضع، ثم يعالج مُستقبل الهوائي هذه الإشارات المخزنة ويجعلها كما لو كانت استقبلت من هوائي ثابت كبير جداً (فقرة 7-6-3) لمزيد من التفاصيل). المبدأ الأساسي الذي يعمل عليه رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية هو تحرك الهوائي عمودياً على اتجاه بث شعاع الرادار؛ ويسمى اتجاه حركة هوائي الرادار (اتجاه الطائرة أو القمر الاصطناعي) بالسمت ودرجة وضوح الصورة في هذا الاتجاه بدرجة وضوح السمت (Azimuth Resolution)، والاتجاه المتعامد عليه بالمدى ودرجة وضوح الصورة في هذا الاتجاه بدرجة وضوح المدى (Range Resolution).

رادار مصفوفة الهوائيات: معظم أنظمة الرادار تستخدم هوائياً مفرداً كبيراً مثبتاً في مكان واحد، ويمكن تدويره ميكانيكياً أثناء التصوير لتغيير اتجاه شعاع الرادار. أما هوائي رادار مصفوفة الهوائيات (Phased-Array Radar)، فهو مُكوّن من مصفوفة من مئات أو آلاف الهوائيات الصغيرة المنفصلة التي يمكن تدوير كل واحد منها منفرداً، ثم يقوم النظام بدمج الإشارات التي يتم تجميعها من هذه الهوائيات الصغيرة. في هذا الرادار، يستطيع مُستقبل الهوائي التغيير من طريقة دمج الإشارات القادمة من الهوائيات الصغيرة لتغيير اتجاه شعاع الرادار حسب الزاوية المطلوبة. والميزة الأخرى التي يقدمها هوائي رادار مصفوفة الهوائيات أنه يستطيع أن يغير اتجاه شعاع الرادار إلكترونياً بسرعة كبيرة (بدون تأخير) تصل إلى عدة أضعاف السرعة التي يغير بها أي هوائي رادار ميكانيكي تقليدي مفرد اتجاه الشعاع. السرعة العالية في تغيير اتجاه شعاع الرادار إلكترونياً توفر

لهذا الرادار إمكانية تتبع عدة أهداف في آن واحد، وبدون الحاجة إلى تحريك منظومة الهوائي الكبيرة ميكانيكياً. إضافة إلى الأنواع الأربعة الرئيسية الأكثر شيوعاً من أنظمة الرادار التي تم تناولها آنفاً، يتعين التنويه إلى أن هناك - أيضاً - أنواعاً أخرى من هذه الأنظمة التي لا يتسع المجال هنا للتطرق إليها، ومنها رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية المعكوس (Inverse SAR)، ورادار ثلاثي الأبعاد (3D Radar)، ورادار الأمطار (Precipitation Radar)، ورادار قياس كثافة السحب (Cloud Profile Radar)، إلخ.

7-4 تردد إعادة بث النبضات:

في معظم أنظمة الرادار لا يستطيع جهاز الاستقبال، وجهاز البث العمل في آن واحد، فجهاز الاستقبال لا يستطيع التقاط العائد من الإشارات أثناء قيام جهاز البث بإرسال الإشارات؛ لذلك، يُستخدم جهاز "المزواج" (Duplexer) لنقل صيغة عمل الرادار من باث إلى مستقبل، ومن مستقبل إلى باث بمعدل ثابت محدد. معدل (تردد) الانتقال من صيغة البث إلى صيغة الاستقبال للرادار يقاس بخاصية تسمى "تردد إعادة بث النبضات" (Pulse Repetition Frequency-PRF). في الكثير من أنظمة الرادار يكون لكل نظام قيمة تردد إعادة بث نبضات (PRF) ثابتة تُحدد أثناء مرحلة التصميم اعتماداً على طول المدى (المسافة) المطلوب بأن يصل إليه الرادار؛ لتوضيح ذلك، يُحسب المدى الأدنى (Minimum Range) بضرب طول النبضة (زمن) في سرعة الضوء مقسوماً على 2 (ذهاب الإشارة وعودتها)؛ ولكي تكتشف الرادارات قصيرة المدى الأهداف القريبة فإنها تحتاج إلى استخدام نبضات قصيرة مع فواصل زمنية قصيرة بينها لضمان عدم وصول النبضة المنعكسة من الهدف إلى جهاز الاستقبال أثناء بث النبضة التالية؛ وبالتالي عدم قدرة جهاز الاستقبال على تحديد الاختلاف في المسافة.

هذا التأثير ينطبق أيضاً على المدى الأقصى (Maximum Range)، فإكتشاف الرادارات طويلة المدى للأهداف البعيدة يتطلب منها استخدام نبضات طويلة مع فواصل زمنية طويلة بينها.

وعلى الرغم من صعوبة الجمع بين مدى قصير، ومدى طويل مناسبين في آن واحد، أصبحت الأنواع الجديدة من الرادارات - بعد التطورات الحديثة في الهندسة الالكترونية - قادرة على تغيير قيمة تردد إعادة بث النبضات الخاصة بها، وبالتالي تغيير مداها؛ فيمكن لهذه الرادارات الحديثة أن تطلق نبضتين خلال خلية واحدة (One cell)، واحدة للمدى القريب (على سبيل المثال، 10 كلم)، وأخرى منفصلة للمدى الطويل (على سبيل المثال، 100 كلم).

7-5 العوامل التي تؤثر على فعالية استخدام الرادار:

الضوضاء: تظهر الضوضاء (Noise) على شكل تغيرات عشوائية مُركّبة على الإشارات الحقيقية (المرغوبة)

المستقبلية بالهوائي؛ وكلما كانت طاقة الإشارات المرغوبة ضعيفة، كلما كان تمييزها من الضوضاء أصعب، كما هي الحال عندما تريد أن تسمع شخصاً يهمس إليك بالقرب من طريق مزدحم بالسيارات؛ وهذه الضوضاء يمكن أن تكون داخلية تسببها المكونات الداخلية لنظام الرادار، أو خارجية تسببها مصادر خارجية تكون في الغالب أشعة حرارية طبيعية تصدرها الخلفية الأرضية المحيطة بالهدف.

تُحدّد قدرة نظام الرادار على التغلب على الإشارات غير المرغوب فيها (الضوضاء) بـ "نسبة الإشارة إلى الضوضاء" (Signal-to-Noise Ratio-SNR) التي تُعرّف بأنها: نسبة قوة الإشارة الحقيقية القادمة من الهدف إلى قوة إشارة الضوضاء القادمة من الخلفية الأرضية المحيطة بالهدف؛ فكلما كانت قيمة نسبة الإشارة إلى الضوضاء (SNR) لنظام الرادار عالية، كلما كانت قدرته على التفريق بين إشارات الأهداف الحقيقية، وإشارات الضوضاء عالية.

الإشارات غير المرغوبة: يشار إلى الإشارات غير المرغوب فيها (والتي تعد من أنواع الضوضاء) باصطلاح (Clutter)، وهي الإشارات العائدة من أهداف غير مرغوب فيها من قبل محلل صورة الرادار. تنتج هذه الإشارات بسبب وجود أجسام (إما طبيعية: كالبحر، والأشجار، والمطر، والطيور، أو صناعية: كالبنيات، والسيارات، إلخ) قريبة من جهاز بث شعاع الرادار، وينعكس صداها إلى المستقبل لتظهر في الصورة. تستخدم إشارات الـ (Clutter) عسكرياً للتشويش على رادارات العدو؛ وذلك بنشر رقائق معدنية صغيرة الحجم تُكوّن انعكاسات كثيرة باتجاه جهاز استقبال رادار العدو لإخفاء تحركات القوات، أو السفن، أو الطائرات.

التشويش: يقصد بالتشويش (Jamming) الإشارات التي تُبثّ من مصدر خارجي بنفس تردد موجات الرادار المستخدمة في الرصد لكي تحجب الأهداف التي يهدف الرادار تصويرها؛ ويمكن أن يكون التشويش مقصوداً (كما هي الحال في الحرب الإلكترونية)، أو غير مقصود عندما يكون من جهات صديقة تستخدم أجهزة تعمل بنفس التردد.

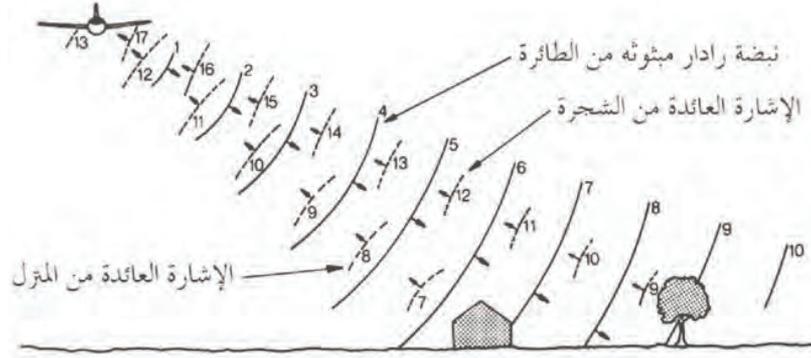
6-7 نظام رادار الرؤية الجانبية:

تعود البدايات الأولى لنظام رادار الرؤية الجانبية (Side-Looking Radar-SLR System) إلى أواخر الأربعينات من القرن الماضي، عندما تم تطوير نظام رادار رؤية جانبية محمول جواً لأغراض الاستطلاع العسكري؛ ثم أصبح بعد ذلك نظاماً نموذجياً لجميع الاستخدامات سواء العسكرية أو المدنية لقدرته على التصوير في معظم الظروف الجوية، وفي الليل والنهار. ويعود سبب تسميته برادار الرؤية الجانبية لكون الهوائي مثبتاً أسفل الطائرة وموجهاً إلى الجانب.

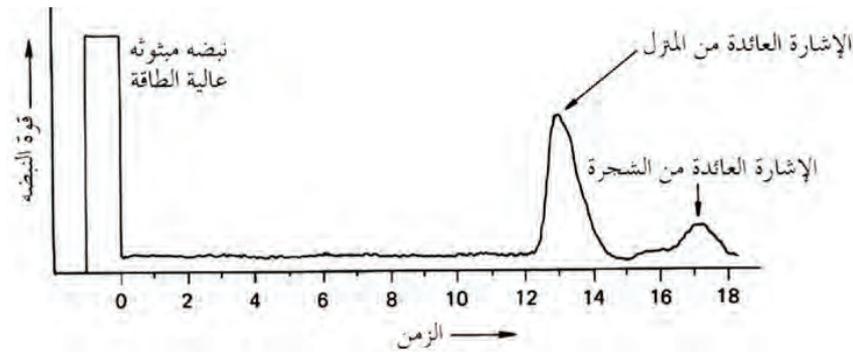
وعلى الرغم من التطورات الكبيرة في صناعة هذا النظام إلا أن تطبيقات تقنية الرادار في مراقبة موارد الأرض (علاوة على نشاطها الكبير) لم تكتمل بعد؛ فما زالت خصائص الانعكاس الرادارية من المعالم المختلفة على سطح الأرض غير معروفة بشكل دقيق، وتحتاج إلى جهود إضافية للتعرف عليها.

7-6-1 مفهوم عمل نظام رادار الرؤية الجانبية:

تُبث طاقة الميكروويف من هوائي الرادار على شكل نبضات ذات طاقة عالية على مدى زمني قصير جداً يقاس بالمليكرونانية (10^{-6} ثانية). يوضح الشكل (7-1) مفهوم انتشار نبضة رادار الرؤية الجانبية منذ انطلاقتها من الهوائي، وحتى وصولها إلى سطح الأرض، ثم عودة صدها إلى الهوائي. عند الزمن (6)، تصل مقدمة الموجة (Wave Front) لهذه النبضة إلى المنزل، وعند الزمن (7)، تنعكس مقدمة الموجة للنبضة من المنزل باتجاه الهوائي، وعند الزمن (12)، تصل النبضة المنعكسة إلى الهوائي (شكل (7-1أ)). تُسجّل إشارة النبضة العائدة عند وصولها إلى الهوائي على مخطط استجابة الهوائي (شكل (7-1ب)). عند الزمن (9)، تنعكس مقدمة الموجة للنبضة المرسله من الشجرة، ويصل صدها (انعكاسها) إلى الهوائي عند الزمن (17)، ثم تسجل على مخطط استجابة الهوائي؛ ونظراً لأن خاصية الانعكاس للشجرة أضعف من خاصية الانعكاس للمنزل، فإن العائد من إشارة الشجرة سيكون أضعف من العائد من إشارة المنزل (شكل (7-1ب)).



(أ) انتشار نبضة رادار خلال (17) مرحلة زمنية، تشمل انطلاق النبضة من الهوائي وحتى عودة صدها للهوائي.



(ب) تسجيل الإشارة العائدة من سطح الأرض إلى الهوائي.

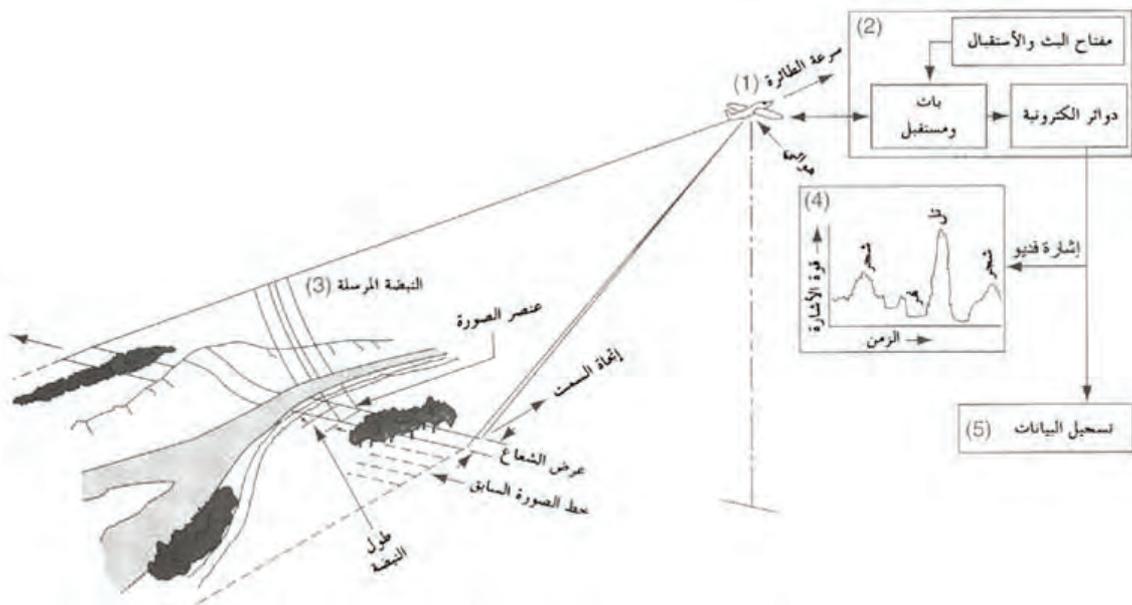
شكل (7-1) مفهوم عمل نظام رادار الرؤية الجانبية (SLR). المصدر: [1].

يعتمد تسجيل الإشارات العائدة من المعالم (على سطح الأرض) على الصورة على بعد هذه المعالم من الهوائي؛ وتتكون صورة الرادار (كما هي الحال مع الصور المرئية) من قيم الانعكاس القادمة من المعالم، وهي العائد من إشارات الرادار (مثلة بقيمة سطوع (BV) تتناسب طردياً مع انعكاسية المعالم)، والمواقع المكانية (X,Y) في الصورة لهذه المعالم والتي تعتمد على مسافاتهما من الهوائي. ويتم حساب المسافة إلكترونياً بمعرفة الزمن الذي استغرقته النبضة في طريقها إلى المعلم، وعودتها منه إلى الهوائي، وسرعة النبضة المعروفة سابقاً (سرعة الضوء) على النحو التالي:

$$\overline{SR} = \frac{ct}{2}$$

حيث \overline{SR} المسافة المائلة (Slant Range) بين المعلم الهوائي، و c سرعة الضوء (3×10^8 م/ث)، و t الزمن بين بث النبضة، واستقبال العائد منها. يتم القسمة على (2) في المعادلة لأن الزمن المستخدم يشمل الذهاب والعودة للنبضة.

يوضح الشكل (7-2) كيفية عمل رادار الرؤية الجانبية؛ فأثناء تقدم الطائرة يعمل الهوائي باستمرار، وبشكل ترددي ببث (كبات) واستقبال (كمستقبل) النبضات الرادارية (1) عن طريق مفتاح مُزامن (Synchronizer Switch) يحول وضع الهوائي من بث إلى مستقبل، ومن مستقبل إلى بث ترددياً (2). ينعكس جزء من النبضة المرسلة إلى المعالم على سطح الأرض الموجودة على امتداد عرض شعاع هوائي مفرد (Single Antenna Beamwidth) (3)، وتُستقبل عن طريق الهوائي، وتُعالج ثم تُسجل (5). المعروض في الجزء (4) عبارة عن رسم توضيحي للإشارات العائدة من خط بيانات (مسح) واحد.



شكل (7-2) المفهوم التشغيلي لنظام رادار الرؤية الجانبية. المصدر: [1].

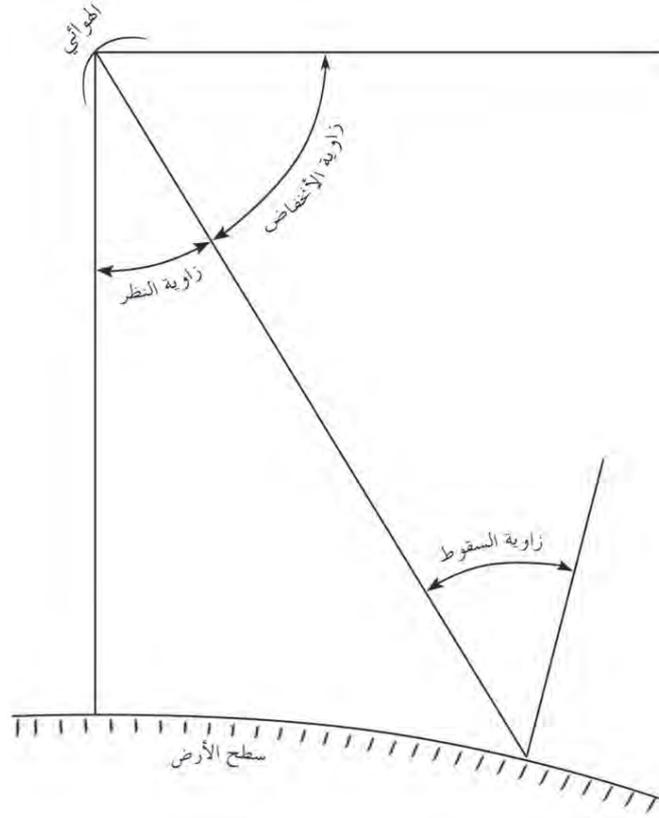
الشكل (7-3) الذي يعرض صورة فضائية رادارية للقمر (سيسات) لمنطقة مكونة من صخور رسوبية ملتوية (Folded Sandstone) لجبال (الأبلاش) في ولاية (بنسلفانيا)، يوضح هيئة الصورة الرادارية، وطبيعة الإشعاع الجانبي لنظام رادار الرؤية الجانبية. يُلاحظ في الصورة أن الميول الطبوغرافية المواجهة للقمر (هوائي الرادار) تعكس بقوة، وتظهر مضيئة أكثر في الصورة من الأرض المستوية، أو الميول الطبوغرافية غير المواجهة للقمر.



شكل (7-3) صورة رادارية للقمر "سيسات" (Seasat) لمنطقة صخور رسوبية ملتوية لجبال (الأبلاش) بولاية (بنسلفانيا) بالولايات المتحدة الأمريكية. المصدر: [1].

يعرض شكل (7-4) الاصطلاحات الهندسية المستخدمة في التصوير برادار الرؤية الجانبية. زاوية النظر (Look Angle) لنظام الرادار هي الزاوية المحصورة بين المحور العمودي أسفل الطائرة (Nadir)، والمعلم على سطح الأرض، والزاوية المكملّة لزاوية النظر هي زاوية الانخفاض (Depression Angle)؛ أما زاوية السقوط (Incident Angle)، فهي الزاوية المحصورة بين شعاع الرادار الساقط على الأرض، والمحور العمودي على سطح الأرض عند نقطة السقوط.

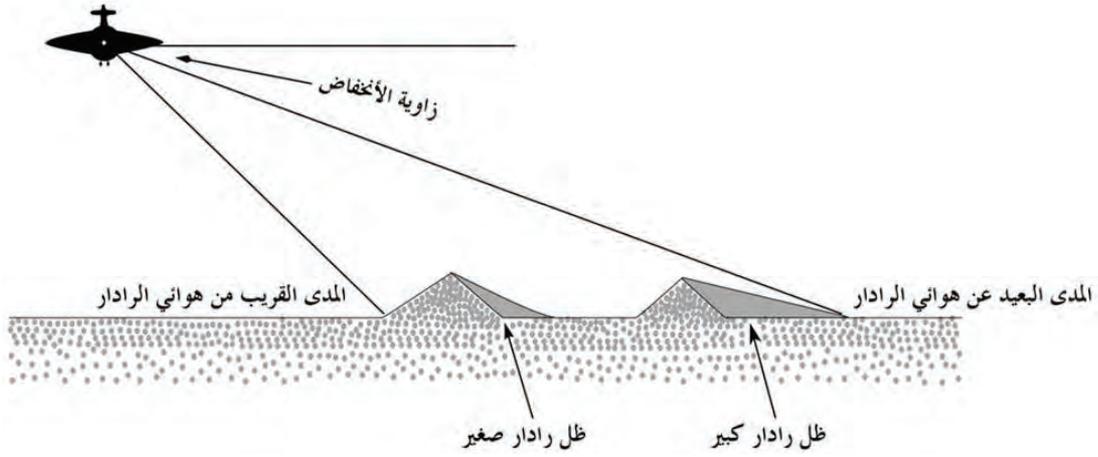
عندما يصور نظام الرادار المحمول جواً سطحاً مستوياً، فإن زاوية السقوط تساوي تقريباً زاوية النظر، أما إذا كان التصوير فضائياً (أي أن الارتفاع كبير، والمنطقة المصوّرة كبيرة)، فإن زاوية السقوط ستكون أكبر بقليل من زاوية النظر نظراً لانحناء سطح الأرض.



شكل (7-4) المصطلحات الهندسية المستخدمة في التصوير برادار الرؤية الجانبية. المصدر: [1].

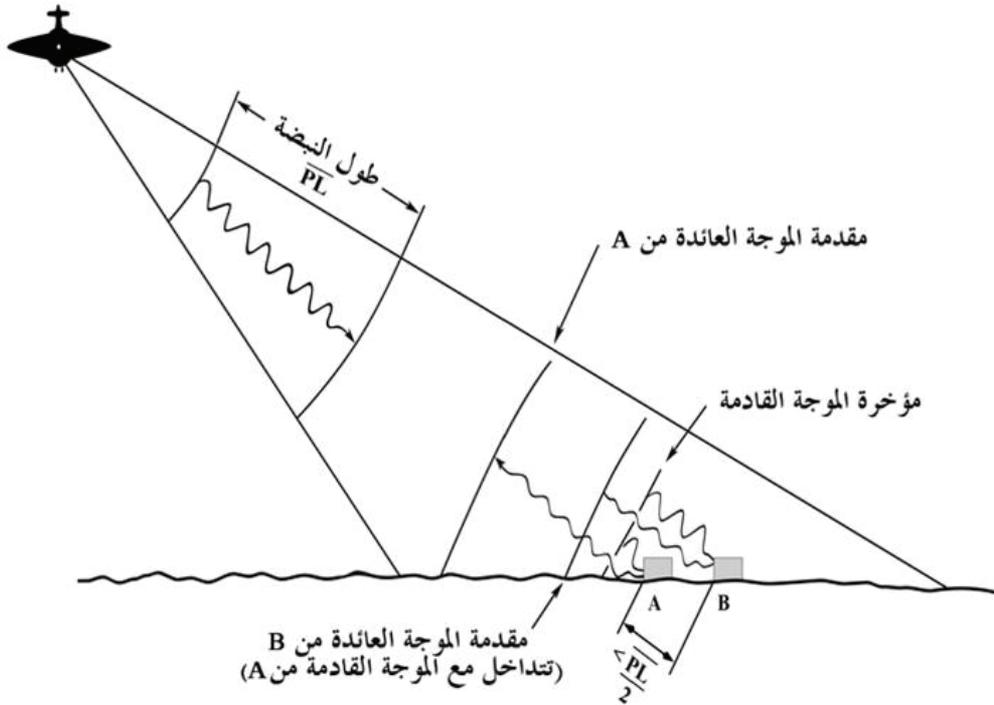
يشكل اتجاه النظر (Look Direction) للرادار أهمية كبيرة في تصوير المسطحات الأرضية (Landscapes) سواء كانت طبيعية أم صناعية؛ فاتجاه النظر المتعامد مع ميول التضاريس يؤدي إلى أن يكون ظل الرادار (Radar Shadow) في أصغر حالاته، وعندما يكون اتجاه النظر موازياً لميول التضاريس، فإن ظل الرادار يكون فيه صغيراً؛ ولا يعتمد طول الظل فقط على طبيعة التضاريس المحلية - كما ذكر آنفاً - وإنما يعتمد أيضاً على بُعد المعالم من المستشعر (المسافة الجانبية)، فالمعالم القريبة من المستشعر (Near Range) ستسبب ظلاً هو الأصغر في الصورة، بينما تسبب المعالم البعيدة عن المستشعر (Far Range) ظلاً هو الأكبر (شكل (7-5)). وبوجه عام، فإن ظل الرادار في المناطق ذات التضاريس الوعرة (عالية الميول) غير محبذ نظراً لأنه يجب مناطق كبيرة من الظهور في الصورة.

توجيه المنشآت (Structure Orientations)، ونمط الاستخدام الأرضي (Landscape Patterns) في المسطحات الأرضية الاصطناعية (كما في المناطق الحضرية) - يشكل (أيضاً) أثراً مهماً على العائد من إشارات الرادار، وبالتالي على شكل ظهور هذه المعالم في صور الرادار. فعلى سبيل المثال، عند تصوير منطقة حضرية من اتجاه نظر يوفر انعكاساً كبيراً (عائداً كبيراً من إشارات الرادار) من المنشآت المشيدة على طول محور معين، فإن ظهور هذه المنشآت في الصورة سيختلف كثيراً عما لو صوّرت من اتجاه نظر آخر يكون إنعكاس هذه المنشآت فيه ضعيفاً.



شكل (5-7) ظل الرادار. المصدر: [3].

2-6-7 درجة الوضوح المكانية لصور نظام رادار الرؤية الجانبية:



شكل (6-7) اعتماد درجة وضوح المدى (Range Resolution) على طول النبضة. المصدر: [1].

هناك عاملان يتحكمان في درجة الوضوح (التمييز) المكانية (Spatial Resolution) لصور الرادار، هما طول النبضة (Pulse Length)، وعرض شعاع الهوائي (Antenna Beamwidth)؛ فكما يتضح

من الشكل (6-7)، يتحكم طول النبضة (الذي يحدده طول مدة بثّ الهوائي لنبضة الطاقة (Burst of Energy)) في درجة الوضوح المكانية لعنصر الصورة (Cell Size) باتجاه إنتشار النبضات؛ هذا الاتجاه يسمى "المدى"، ودرجة الوضوح في هذا الاتجاه تسمى "درجة وضوح المدى" (Range Resolution). في الجانب الآخر، يتحكم عرض شعاع الهوائي في درجة الوضوح لعنصر الصورة في اتجاه الطيران؛ هذا الاتجاه يسمى "السمت"، ودرجة الوضوح في هذا الاتجاه تسمى "درجة وضوح السمت" (Azimuth Resolution).

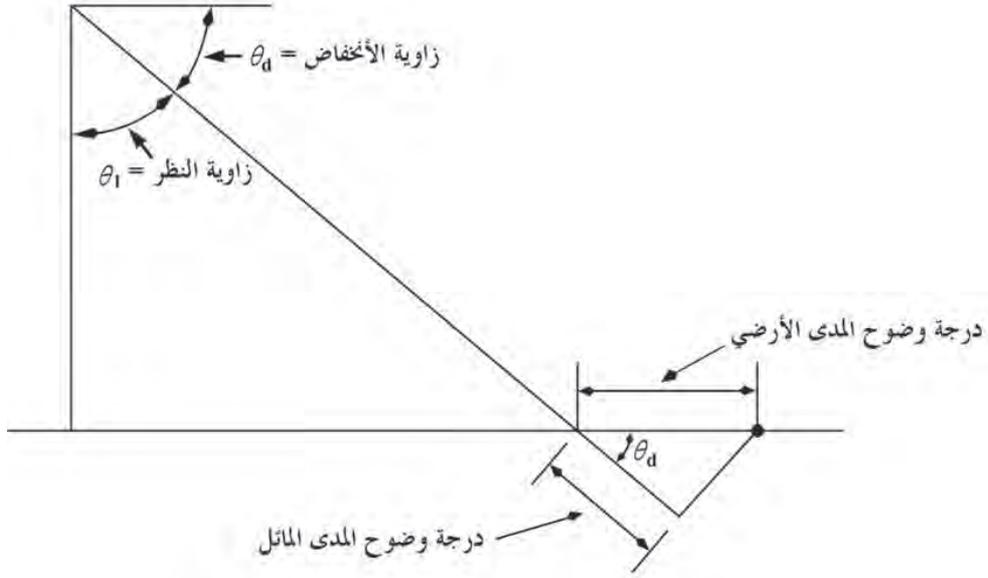
درجة وضوح المدى:

لكي يتمكن نظام رادار الرؤية الجانبية من تصوير معلمين متجاورين على سطح الأرض بشكل منفصل؛ فإن ذلك يتطلب استقبال الإشارة المنعكسة من هذين المعلمين بشكل منفصل، وأن أي تداخل في الإشارتين المنعكستين يؤدي إلى إندماج صورتهم، ولا يمكن التفريق بينهما. في الشكل (6-7) يُلاحظ أن مسافة المدى المائلة (Slant-Range Distance) (المسافة المباشرة بين الهدف والرادار) بين المبنيين (A)، و(B) أقل من نصف طول النبضة المرسله من الهوائي $(\frac{PL}{2})$ ؛ يؤدي ذلك إلى أن النبضة ذهبت إلى (B)، ورجع صداها إلى (A) بينما مازالت نهاية النبضة عند A مستمرة في الانعكاس؛ ونتيجة لذلك يحصل تداخل بين الإشارتين، ويصوّر هذان المبنيان على أنها جسم واحد كبير يمتد من (A) إلى (B)، فلو كانت مسافة المدى المائلة بين المبنيين (A)، و(B) أكبر من $\frac{PL}{2}$ ، فإنه سيتم استقبال الإشارتين منفصلتين، وينتج من ذلك صورتان منفصلتان للمبنيين.

مما سبق يتبين أن درجة وضوح المدى المائل (Slant-Range Resolution) لا تعتمد على المسافة من الطائرة (جهاز الرادار)، وإنما تعتمد على طول النبضة (درجة وضوح المدى المائل تساوي نصف طول النبضة). وعلى الرغم من أن درجة وضوح المدى المائل لا تتغير مع المسافة من جهاز الرادار، فإن درجة وضوح المدى الأرضية (Ground Range Resolution) - التي تسمى أحياناً درجة وضوح المدى (Range Resolution) - تتغير مع تغير المسافة من الرادار. كما يتضح من الشكل (7-7)، تتغير درجة وضوح المدى الأرضي عكسياً مع جيب تمام زاوية الانخفاض $(\cos\theta_d)$ ، وهذا يعني أن درجة وضوح المدى الأرضي تقل مع زيادة مسافة المدى المائل (المسافة من جهاز الرادار)، وبالتالي فإنه يمكن حساب درجه وضوح المدى الأرضية على النحو التالي:

$$R_r = \frac{c\tau}{2\cos\theta_d}$$

حيث R_r درجه وضوح المدى الأرضية، و τ مدة بثّ النبضة (Pulse Duration).



شكل (7-7) العلاقة بين درجة وضوح المدى المائل، ودرجة وضوح المدى الأرضي. المصدر: [1].

مثال:

يبث نظام رادار رؤية جاذبية نبضات خلال مدة (0.1 μsec)، فما هي درجه وضوح المدى لهذا النظام عند زاوية انخفاض 45°؟

الحل:

من المعادلة السابقة:

$$R_r = \frac{(3 * 10^8 \text{ m/sec})(0.1 * 10^{-6} \text{ sec})}{2 * 0.707} = 21 \text{ m}$$

درجه وضوح السمات:

كما يتضح من الشكل (7-8)، تعتمد درجة الوضوح المكانية لصورة رادار الرؤية الجانبية في اتجاه السمات (Azimuth Resolution) على عرض الشعاع الزاوي (Angular Beamwidth-β) للهوائي، والمسافة الأرضية من الطائرة (GR)، فكلما ابتعدنا عن الطائرة، فإن درجة وضوح السمات تضعف. فالجسمان (A)، و(B) يمكن تصويرهما منفصلين عند المسافة (GR₁)، بينما لا يمكن تصويرهما منفصلين عند المسافة (GR₂).

ويمكن حساب درجة وضوح السمات R_a على النحو التالي:

$$R_a = \overline{GR} * \beta$$

مثال:

إذا كان عرض الشعاع الزاوي لهوائي رادار الرؤية الجانبية يساوي (1.8 mrad)، فاحسب درجة وضوح السميت للنظام عند المدى الجانبي (6km)، والمدى الجانبي (12km)؟

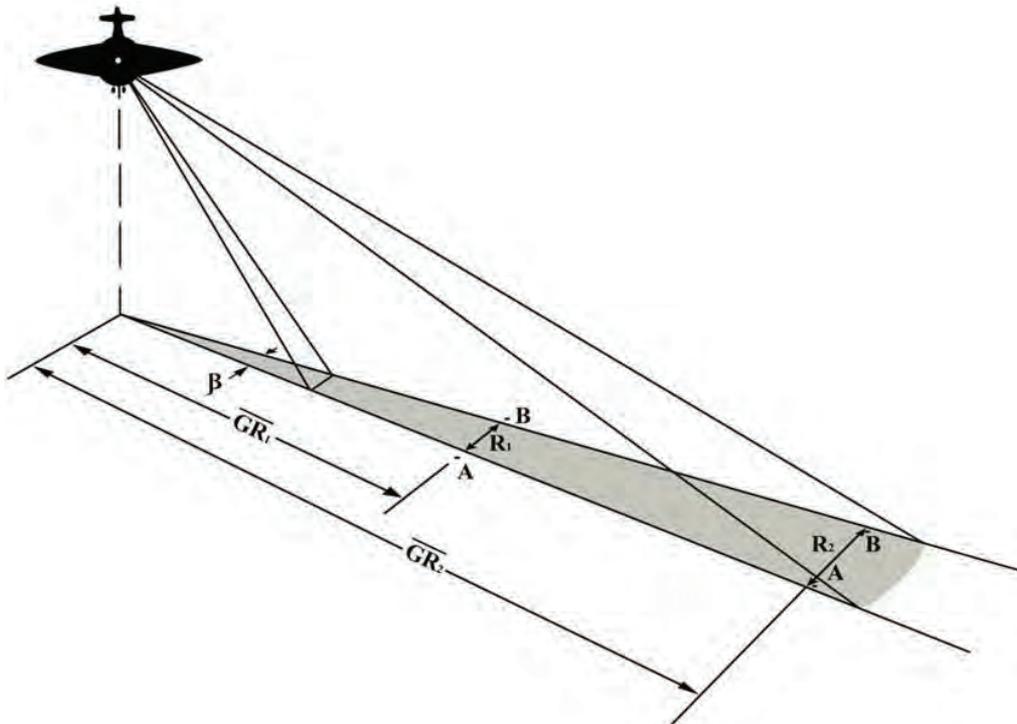
الحل:

درجة وضوح السميت عند المسافة الأرضية (6km):

$$R_{a6km} = (6 * 10^3 m)(1.8 * 10^{-3}) = 10.8m$$

درجة وضوح السميت عند المسافة الأرضية (12km):

$$R_{a12km} = (12 * 10^3 m)(1.8 * 10^{-3}) = 21.6m$$



شكل (7-8) اعتماد درجة وضوح السميت على عرض الشعاع للهوائي، والمدى (المسافة) الأرضي. المصدر: [1].

يتناسب عرض الشعاع الزاوي للهوائي طردياً مع الطول الموجي للنبضة المرسله (λ)، ويتناسب عكسياً مع طول الهوائي (AL) على النحو التالي:

$$\beta = \frac{\lambda}{AL}$$

عند استخدام أي طول موجي (Wavelength) لموجات الرادار، فإنه يمكن التحكم بعرض الشعاع للهوائي بإحدى طريقتين: إما بالتحكم بالطول الحقيقي (Physical Length) للهوائي، أو بتصنيع طول هوائي افتراضي (Synthesizing a Virtual Antenna Length). تسمى أنظمة الرادار التي يتحكم فيها الطول الحقيقي للهوائي بعرض الشعاع - بأنظمة رادار فتحة الإغلاق الحقيقية (Real Aperture Radar Systems)، ومنها بعض رادارات الرؤية الجانبية المحمولة جواً (Side-Looking Airborne Radar System-SLAR) للاستخدامات العسكرية. وحسب المعادلة السابقة، إذا أردنا الحصول على عرض شعاع زاوي ضيق (Narrow Beamwidth) (درجة وضوح سمت عالية)، سيكون طول الهوائي لهذا النظام كبيراً (عدة أضعاف الطول الموجي)؛ فعلى سبيل المثال، إذا أردنا الوصول إلى عرض شعاع زاوي يساوي (10mrad)، فإننا سنحتاج إلى هوائي طوله $[(10 \times 10^{-3}) / (5 \times 10^{-2}) = 5m]$ ، وإذا أردنا الوصول إلى عرض شعاع زاوي أصغر (2mrad، مثلاً) (درجة وضوح سمت أعلى)، فإننا سنحتاج إلى هوائي بطول (25m).

تتميز أنظمة الرادار التي تعمل بفتحة إغلاق حقيقية بسهولة في التصميم، ومعالجة البيانات. ولكن بسبب مشكلة درجة الوضوح العالية المطلوبة دائماً، والتي تحتاج إلى هوائيات طويلة، فإن تشغيل هذا النوع من الأنظمة يخضع لعدة قيود منها: أن تكون مسافة التصوير الجانبية قصيرة، وأن يكون ارتفاع الرادار (الطائرة، مثلاً) عن سطح الأرض منخفضاً، والطول الموجي لموجات الرادار قصير نسبياً؛ هذه القيود من الصعب فرضها نظراً لأن قصر المسافة الجانبية للتصوير وانخفاض الارتفاع يقلل من مساحة منطقة التغطية، وقصر الطول الموجي للموجات يزيد من تأثير الغلاف الجوي عليها؛ وقد تم التغلب على نقاط ضعف الرادار ذو فتحة الإغلاق الحقيقية المذكورة آنفاً بما يسمى بنظام رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية. الحديث عن هذا النظام ينطوي على كثير من التعقيدات والتفاصيل الفنية، ولكن سيقتصر في الفقرة القادمة على الحديث - وباختصار - عن الأسس التي بني عليها مفهوم عمل هذا النظام.

7-6-3 رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية:

يشار برادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (Synthetic Aperture Radar-SAR) إلى التقنية المستخدمة في محاكاة الهوائي الطويل جداً اللازم للتصوير العالي دقة الوضوح باستخدام نظام رادار ثابت ذي فتحة إغلاق حقيقية (Real Aperture Radar)، وذلك بدمج الإشارات التي يستقبلها الهوائي أثناء تحركه (محمولاً

بطائرة، أو قمر اصطناعي) في مساره. تعنى الفتحة (Aperture) المنفذ المستخدم لجمع الطاقة المنعكسة لتكوين الصورة؛ وفي حالة الكاميرا العادية، تكون هي فتح باب الكاميرا (Shutter Opening)، بينما في الرادار هي الهوائي؛ وتتشكل فتحة الإغلاق الاصطناعية بتحرك فتحة الإغلاق الحقيقية (وهي الهوائي) خلال سلسلة متوالية من المواقع في مسار حامل الرادار.

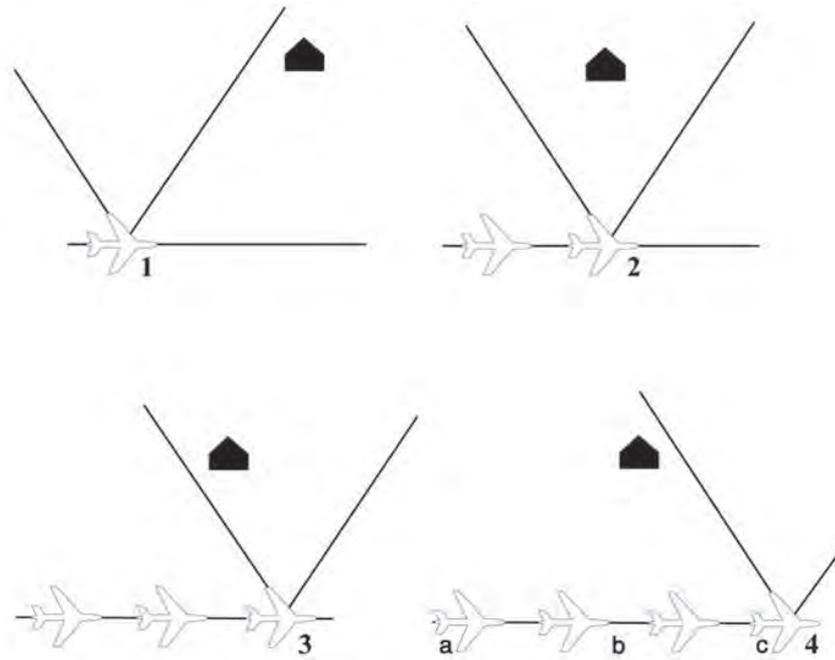
وقبل التطرق إلى مفهوم عمل رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية، سنقدم نبذة عن ظاهرة تأثير وإزاحة (دوبلر) التي يعتمد رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية في عمله عليها.

يعود اسم (دوبلر) إلى العالم الفيزيائي النمساوي "كريستيان دوبلر" (Christian Doppler) (1803م - 1853م) الذي اكتشف في عام 1942م ما يسمى بـ "تأثير (إزاحة) دوبلر" (Doppler Effect / Shift)، وهو التغير الذي يحدث في تردد الموجات بسبب الحركة النسبية بين مصدر هذه الموجات (Source)، والملاحظ (Observer) لها؛ هذا الاكتشاف يختص بموجات الصوت إلا أنه ينطبق كذلك على جميع أنواع الموجات الكهرومغناطيسية (كالضوء، والميكروويف، والراديو، الخ).

ويمكن تعريف تأثير (دوبلر) - ببساطة - بأنه: التغير في تردد الموجات بالنسبة إلى الملاحظ الذي يتحرك باتجاه مصدر هذه الموجات، أو التغير في تردد الموجات التي يصدرها الجسم المتحرك (المصدر) باتجاه الملاحظ؛ وتفسير ذلك هو: أن الموجات الصادرة عن الجسم المتحرك (المصدر) باتجاه الملاحظ تنضغط (Squeezed)، ويزداد ترددها كلما اقترب هذا المصدر من الملاحظ حتى تصل إلى قيمتها الحقيقية في اللحظة التي يصل فيها المصدر إلى الملاحظ، ثم يتناقص ترددها بابتعاد المصدر عن الملاحظ؛ وهذا يعني أن الطول الموجي يقصر (التردد يزداد) مع قصر المسافة بين المصدر والهدف، والعكس صحيح؛ ومن الأمثلة على ذلك: عندما يُطلق قطار قادم من بعيد صافرته، فنبرة صوت (Pitch) هذه الصافرة تكون ضعيفة في البداية، وتزداد قوتها كلما اقترب القطار من الملاحظ (المحطة)، وفي اللحظة التي يصل فيها القطار الملاحظ تكون في أعلى قوتها (وهي قوة صوت الصافرة الحقيقية)، ثم يبدأ صوت الصافرة بالضعف تدريجياً كلما ابتعد القطار عن المحطة. التغير في قوة صوت الصافرة هو تغير في تردد الموجات بانتقالها من التردد الضعيف إلى التردد القوي، ثم إلى الضعيف مرة أخرى نتيجة ظاهرة تأثير/إزاحة (دوبلر).

خلاصة ما سبق: أن تأثير/إزاحة (دوبلر) ينتج من الحركة النسبية بين مصدر الموجات والملاحظ، أو بعبارة أخرى ينتج من فرق السرعة النسبي بين مصدر الموجات والملاحظ. وقد لاحظ العالم (دوبلر) بأن الطول الموجي (أو التردد) لأي نوع من الموجات الكهرومغناطيسية المنبعثة من مصدر باتجاه ملاحظ متحرك - يحدث له إزاحة بمعامل ضرب قيمته تساوي $(\frac{v}{c})$ ، حيث v سرعة الملاحظ، و c سرعة انتشار الموجات؛ فعلى سبيل المثال، عندما يطلق قطار قادم إلى محطة صافرته، وهو يسير بسرعة 120 كلم/س، فإن مقدار إزاحة تردد صوت الصافرة (بالأخذ بالاعتبار أن سرعة الصوت هي 1260 كلم/س) يساوي تقريباً 10٪. $(100 * \frac{120}{1260})$ ، مما يعني أن قوة الصوت تزداد 10٪ عند المرور بالمحطة، وتنقص 10٪ قبل وبعد المرور بها.

يُستخدم تأثير/ إزاحة (دوبلر) في العديد من التطبيقات المختلفة التي تعتمد على موجات الرادار. من هذه التطبيقات، استخدامه مرورياً في المراقبة المرورية لسرعة العربات، فرجل المرور (المصدر) يُطلق (بواسطة جهاز) موجات رادار متواصلة على السيارة (الهدف) أثناء تحركها، ثم يقوم الجهاز بحساب مقدار إزاحة (دوبلر) من الفروقات في الطول الموجي (التردد) بين موجات الرادار المتوالية المنعكسة من الهدف أثناء الحركة، ثم يحسب منها السرعة النسبية، وهي سرعة السيارة إذا كان المصدر (رجل المرور) ثابتاً؛ فالفروقات في الطول الموجي (التردد) بين الموجات المنعكسة ناتج عن تأثير (دوبلر)، وهو أنه كلما قصرت المسافة بين المصدر والهدف كلما قصر الطول الموجي (زاد التردد) لموجات الرادار المنعكسة إلى المصدر، والعكس صحيح. بعد أن تناولنا مفهوم تأثير/ إزاحة (دوبلر)، نعود الآن إلى شرح مفهوم عملية تشغيل الرادار ذو فتحة الإغلاق الاصطناعية (SAR).



شكل (7-9) تصوير سطح الأرض باستخدام نظام رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية. يُجَزَّن النظام التاريخ الكامل للإشارات المنعكسة من سطح الأرض أثناء تحرك الهوائي على طول المسار (abc). المصدر: [3].

يختلف مفهوم، وتصميم، وتقنية رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية عن رادار فتحة الإغلاق الحقيقية بشكل جذري؛ وللتعرف على مفهوم عمل رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية سنستعين بالشكل (7-9)، و(7-10). يعرض الشكل (7-9) مثلاً توضيحياً لتصوير سطح الأرض باستخدام رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية. عند الموقع (1) تكون المنطقة المطلوب تصويرها خارج نطاق شعاع الرادار المحمول جواً، بينما عند الموقعين (2) و(3) تكون المنطقة قد دخلت في مجال الشعاع، وعند الموقع (4) تكون الطائرة قد تحركت بحيث لم تعد المنطقة في نطاق شعاع الرادار. المبدأ الذي يعمل عليه رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية هو أن الأجسام في

الصورة يتم تعريضها لأشعة الرادار لفترة زمنية أثناء مرور الطائرة، فيستقبل الرادار الإشارات المنعكسة من كل جسم من هذه الأجسام على سطح الأرض في هذه الفترة، ثم يُخزن التاريخ الكامل لهذه الانعكاسات فيها؛ وتخزين هذه الانعكاسات يسمح - لاحقاً - بإعادة بناء إشارات الرادار المنعكسة، وكأنها تم استقبالها بواسطة هوائي طويل يحتل كامل منطقة (abc)، على الرغم من أنه تم في الواقع استقبالها بواسطة هوائي أقصر بكثير كان يتحرك من الموقع (1) إلى الموقع (4). من هذا المنطلق، فإن اصطلاح فتحة الإغلاق الاصطناعية يشير إلى الطول الاصطناعي للهوائي مقابل الطول الحقيقي للهوائي المستخدم في رادار فتحة الإغلاق الحقيقية.

إن تنفيذ هذه الإستراتيجية لتحديد المواقع المكانية (Spatial Positions) للأجسام ضمن المنطقة المعرضة لإشعاع الرادار - يتم عن طريق استخدام تأثير/ إزاحة (دوبلر) التي تطرقنا إليها آنفاً؛ فالإزاحات في تردد موجات الرادار (Frequency Shift) التي يتعرض لها الجسم تتناسب مع المسافة بينه وبين مصدر موجات الرادار (الطائرة)؛ فعند أية لحظة معينة وحسب ظاهرة تأثير (دوبلر)، فإن الجسم عند الحافة الأمامية لشعاع الرادار يعكس نبضات الرادار بتردد أقوى نسبياً من تردد النبضات الأصلية المرسله إليه نتيجة لمواجهته للرادار (الطائرة)، فيما يعكس هذا الجسم عندما يكون عند الحافة الخلفية لشعاع الرادار - النبضات بتردد أضعف نسبياً من تردد النبضات المرسله إليه نتيجة لوقوعه خلف الطائرة (شكل (7-10)). ونظراً لأن تردد موجات الرادار المرسله معروف بدقة مسبقاً من خلال تصنيعه، فإنه بالإمكان، وبمعرفة سرعة الطائرة مقارنة تردد الموجات المنعكسة من الأجسام التي يسجلها نظام الرادار بتردد الموجات المرسله المعروفة سابقاً وتحديد مقدار الإزاحة في التردد؛ ومعرفة الإزاحة في التردد تمكن النظام من تحديد المواقع الحقيقية للانعكاسات في الصورة.



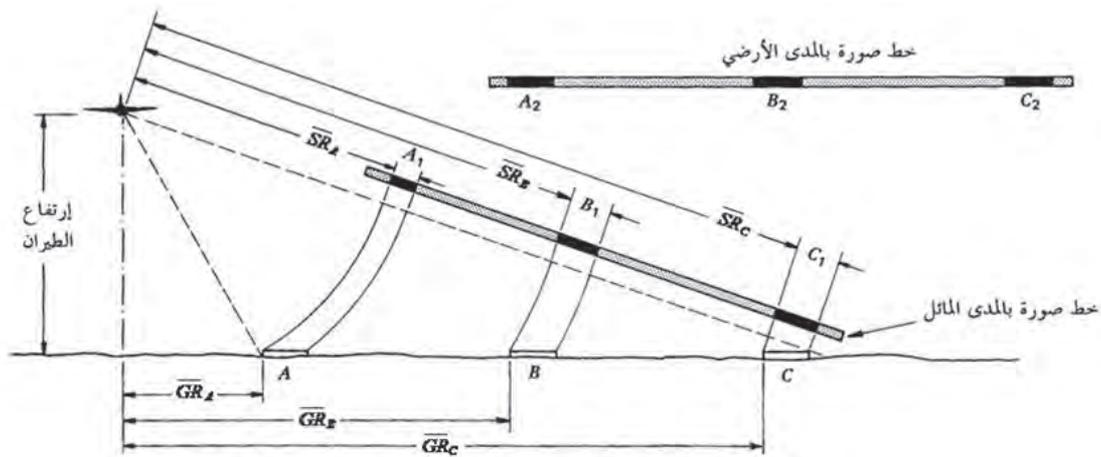
شكل (7-10) الإزاحات في تردد موجات الرادار (Frequency Shift) التي تتعرض لها المعالم على سطح الأرض ضمن مجال الرؤية لنظام الرادار. المصدر: [3].

7-6-4 الخصائص الهندسية لصور نظام رادار الرؤية الجانبية:

تختلف الخصائص الهندسية لصور نظام رادار الرؤية الجانبية بشكل جذري عن الخصائص الهندسية لصور الكاميرات الجوية التقليدية، أو صور الأقمار الاصطناعية؛ ويعود هذا الاختلاف إلى الاختلاف في طريقة عمل هذه الأنظمة، حيث إن نظام رادار الرؤية الجانبية يعمل بناء على قياس المسافة بدلاً من قياس الزاوية؛ وسنركز فيما يلي على ثلاثة اختلافات جوهرية لنظام رادار الرؤية الجانبية عن النظامين الآخرين، وهي تشوه مقياس الرسم (Scale Distortion)، وإزاحة التضاريس (Relief Displacement)، واختلاف المنظر (Parallax).

تشوه مقياس الرسم:

يعمل نظام رادار الرؤية الجانبية بنوعين من أنظمة تسجيل الصور. الأول نظام تسجيل صور المدى المائل (Slant-Range Image Recording System)، وهو تسجيل العائد من الإشارات على خط المدى المائل؛ ويترتب على ذلك أن فروقات الزمن بين صدى النبضات (الإشارات العائدة) من الأجسام تتناسب طردياً مع المسافة المائلة (Slant Distance) بدلاً من المسافة الأفقية (الأرضية) (شكل (7-11)). النظام الثاني هو نظام تسجيل صور المدى الأرضي (Ground-Range Image Recording System)؛ وفي هذا النظام يتم تصحيح الوقت بدالة القطع الزائد (Hyperbolic Timing Correction)، بحيث تتناسب المسافة بين المعالم في الصورة طردياً مع المسافة الأفقية الأرضية بين هذه المعالم.



شكل (7-11) رسم توضيحي يوضح العلاقة بين المدى الأرضي، والمدى المائل. المصدر: [1].

يوضح الشكل (7-11) ثلاثة معالم (C, B, A) ذات مقاسات متساوية، والمسافات بينها متساوية، وتتردد في البعد عن جهاز الرادار، أقربها (A)، ثم (B)، ثم (C).

تُظهر صورة المدى المائل مقاسات غير متساوية لهذه الأجسام، ومسافات غير متساوية بينها، وهذا ناتج من أن صورة المدى المائل تعتمد على الزمن الذي تستغرقه الإشارة العائدة من المعلم؛ ينتج من ذلك مقياس رسم متغير، أقله عند المسافات القريبة من الرادار، ويزداد وفق دالة القطع الزائد (Hyperbolic) كلما ابتعدنا عن الرادار؛ ولذلك نجد في الصورة أن عرض المعلم "A" (A_1) أصغر من عرض المعلم "B" (B_1)، وعرض المعلم (B) أصغر من عرض المعلم "C" (C_1)، وكذلك الحال في المسافات بين هذه المعالم الثلاثة، فالمسافة بين "A"، و"B" (\overline{AB}) أصغر من المسافة بين "B"، و"C" (\overline{BC}) (شكل (7-11))؛ ولكن بتصحيح الوقت بدالة القطع الزائد ينتج تساوي عرض المعالم ($A = B = C$)، وفي المسافات بينها ($\overline{AB} = \overline{BC}$) في صورة المدى الأرضي .

يجب التنويه هنا بأن التغير في مقياس الرسم يتناسب عكسياً مع ارتفاع جهاز الرادار عن سطح الأرض؛ لذلك نجد عند تثبيت عرض التصوير (Swath Width) (على سبيل المثال، 15 كلم)، أن التغير في مقياس الرسم عبر الصورة يقل مع ازدياد ارتفاع الطائرة. إلا أن هذا التغير في مقياس الرسم يكون صغيراً عند الارتفاعات العالية جداً، كما في صور أنظمة الرادار المحمولة على الأقمار الاصطناعية.

التغير في مقياس الرسم في صورة المدى المائل يجعلها غير قابله للاستخدام الخرائطي (غير صالحة لإجراء قياسات عليها)؛ لذلك يتطلب الأمر تحويل المسافة أو المدى المائل إلى المدى الأرضي؛ فبالرجوع إلى الشكل (7-12)، يمكن حساب المدى الأرضي (\overline{GR}) التقريبي من المدى المائل (\overline{SR})، وارتفاع المستشعر عن سطح الأرض (H') بافتراض وجود تضاريس مستوية على النحو التالي:

$$\overline{SR}^2 = H'^2 + \overline{GR}^2$$

$$\overline{GR} = (\overline{SR}^2 - H'^2)^{0.5}$$

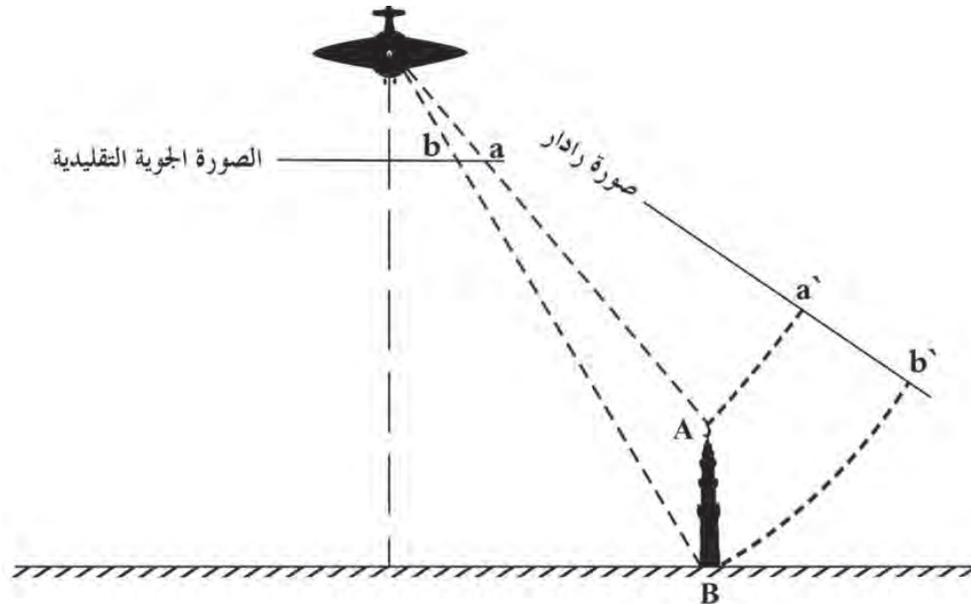
من العوامل الأخرى (غير التضاريس) التي تؤثر على مقياس الرسم - عوامل الطيران؛ فهذه العوامل تؤثر على مقياس رسم السمات (Azimuth Scale)، وهو مقياس الرسم باتجاه الطيران، ومقياس رسم المدى (Range Scale)، وهو مقياس الرسم المتعامد على خط الطيران.

يعتمد الأول على السرعة الأرضية للطائرة (هناك تزامن بين سرعة الطائرة، ونظام تسجيل الصور)، ويعتمد الثاني على سرعة الطائرة وسرعة الضوء (سرعة نبضة الرادار). والمحافظة على مقياس رسم موحد بينهما يشكل مهمة صعبة، ويتطلب تحكماً كبيراً في عوامل جمع البيانات (Data Collection Parameters). وتتم هذه العملية في أنظمة الرادار المحمولة جواً عن طريق نظام تحكم وملاحة بالعزم الذاتي (Inertial Navigation and Control System) الذي يقود الطائرة على ارتفاع وسرعة ملائمين، ويقيس زوايا

ميلان الطائرة (Roll، Crab، Pitch) للمحافظة على زاوية ثابتة لشعاع الهوائي مع خط سير الطائرة، وتوفير تزامن بين تسجيل البيانات، والسرعة الأرضية للطائرة.

إزاحة التضاريس:

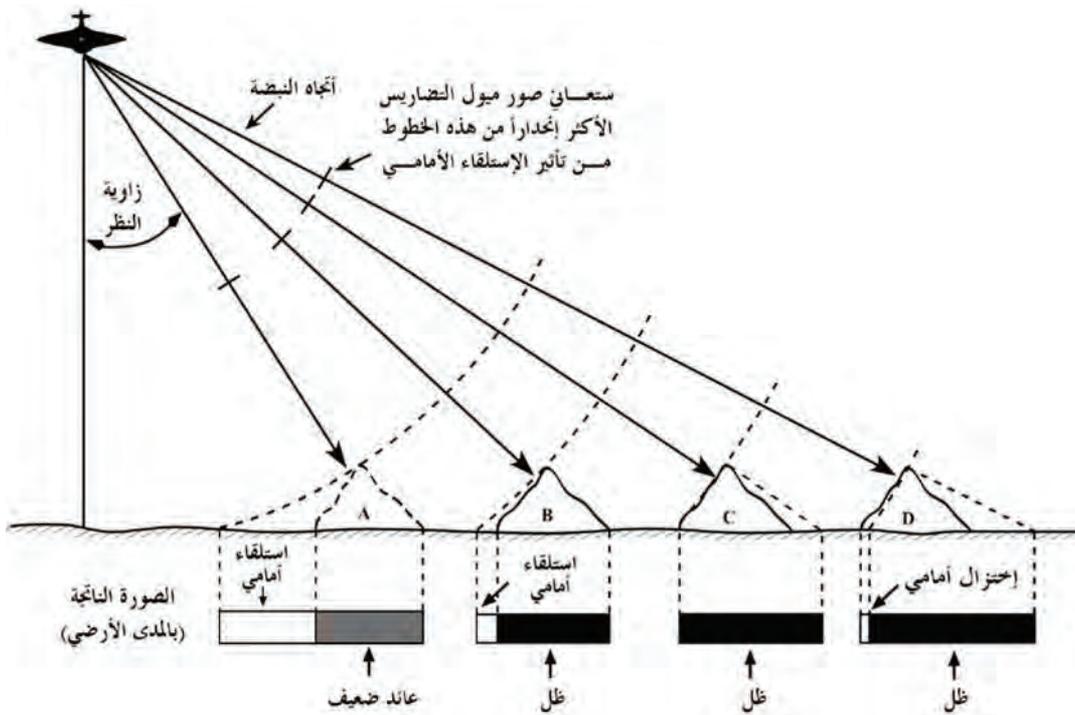
على الرغم من أن إزاحة التضاريس في نظام رادار الرؤية الجانبية ذات بعد أحادي (One-Dimensional)، و متعامدة مع خط الطيران - مشابهة في ذلك الماسح الخطي (Line Scanner) التقليدي، إلا أنها تختلف عنه وعن الصور الجوية - كذلك - في أن اتجاهها معاكس، أي أن ظهور المعالم البعيدة عن الهوائي (الرادار) في الصورة تكون أقرب من المعالم القريبة منه؛ ويرجع ذلك إلى أن مواقع المعالم في صور الرادار تحدد المسافة بين تلك المعالم والهوائي بدلاً من زاوية النظر؛ فعلى سبيل المثال، عندما تضرب نبضة الرادار معلماً عمودياً فإن عائد (صدى) النبضة من أعلى المعلم سيصل إلى الهوائي قبل العائد من أسفل المبنى، وبالتالي فإن ذلك سيتسبب في استلقاء هذا المعلم أفقياً (Lay Over) على المعالم القريبة منه، ويظهر كأنها يميل (Lean) إلى نقطة التعامد (Nadir) (إلى أول الصورة). تسمى هذه الظاهرة بـ "تأثير الاستلقاء الأفقي" (Radar Layover Effect)، ويزداد هذا التأثير كلما اقتربنا من الهوائي (أي كلما زادت زاوية الانخفاض Depression Angle). يوضح الشكل (7-12) هذا التأثير، ويقارنه بإزاحة التضاريس في الصورة الجوية التقليدية.



شكل (7-12) العلاقة بين ظاهرتي إزاحة التضاريس في صورة الرادار، والصورة الجوية التقليدية. المصدر: [1].

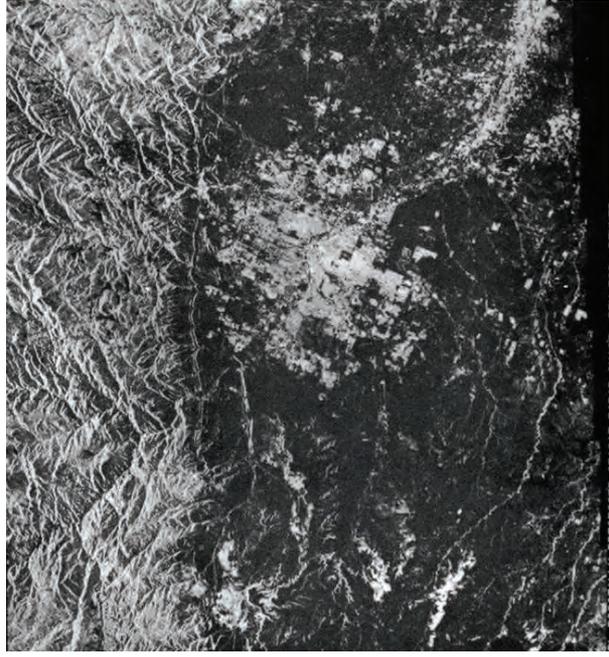
تسبب ميول التضاريس المواجهة للهوائي والقريبة منه تأثير استلقاء أفقي كبير جداً؛ ويظهر ذلك عندما

يكون ميل التضاريس أكثر انحداراً من الخط المتعامد مع اتجاه النبضة، وهو ما يسمى بزواوية النظر. تظهر هذه الحالة على الجانب الأيسر من المعلمين (A)، و(B) في الشكل (7-13)؛ ونتيجة لذلك، فإن قمم هذه الميول ستُصوّر قبل قواعدها مسببة تأثير الاستلقاء الأفقي. ويظهر من تمثيل الصورة في الشكل بأن كمية إزاحة الاستلقاء الأفقي تزداد كلما قربت المعلم من الهوائي (أي كلما صغرت زاوية النظر). وعندما يكون ميل التضاريس أقل انحداراً من الخط المتعامد على اتجاه النظر (Look Direction)، كما في المعلم (D)، فإنه لن يظهر هناك استلقاء أفقي؛ لأن نبضة الرادار ستصل قاعدة المعلم قبل قمته، ولكن مقاس السطح المائل للمعلم (D) في الصورة سيصغر (Compressed)؛ ويسمى هذا التأثير بالاختزال الأمامي (Foreshortening Effect). ويزداد هذا التأثير حدة كلما اقترب ميل سطح المعلم من التعامد مع اتجاه النظر. عند المعلم (C)، يتعامد ميل السطح مع اتجاه النظر تماماً، مما يؤدي إلى اختزال صورة ميل السطح إلى طول يساوي 0.



شكل (7-13) تأثير تضاريس سطح الأرض على صور الرادار. المصدر: [1].

تظهر ظاهرة الاختزال الأمامي عادة في التضاريس ذات الميول المتوسطة إلى الحادة التي تقع في منطقة المدى المتوسط إلى البعيد (عن الهوائي) من الصورة (من وسط إلى يمين الصورة)؛ وتؤدي هذه الظاهرة إلى أن تظهر صورة ميول التضاريس القريبة من الهوائي أكثر انحداراً من ميولها الطبيعية، فيما تظهر ميول التضاريس البعيدة من الهوائي أقل انحداراً من ميولها الطبيعية (شكل (7-14)).



شكل (7-14) صورته توضح ظاهرة الاختزال الأمامي وظاهرة ظل الرادار. يلاحظ في الطرف الأيسر من الصورة (أي المنطقة القريبة من مستشعر الرادار) المظهر غير الطبيعي للتضاريس كنتيجة لظاهرة الاختزال الأمامي، وازدياد الظل باتجاه الجزء الأيمن من الصورة. المصدر: [3].

لعملي زاوية النظر، وميل التضاريس تأثير آخر على ظاهرة أخرى مهمة، وهي ظل الرادار (Radar Shadow)؛ فعائد الإشارات من الميول غير المواجهة للهوائي (Slopes Facing-Away From Antenna) يكون ضعيفاً، أو لا يكون هناك عائد أصلاً. ففي الشكل (7-13)، نجد أن ميل الجانب الأيمن من المعلم (A) غير مواجه للهوائي (المستشعر)، وبما أن ميله أقل انحداراً من اتجاه النظر؛ فإنه سيتعرض لنبضات الرادار، ولكن تعرضه سيكون ضعيفاً جداً، وبالتالي فإن العائد من الإشارات من هذا السطح سيكون ضعيفاً منتجاً صورة مظلمة نوعاً ما. ومن جهة أخرى، نجد أن ميل الجانب الأيمن للمعلم (B) مواز لاتجاه النظر، مما يعني أنه لن يتعرض لنبضات الرادار، وبالتالي فإن الهوائي لن يستقبل أي عائد من الإشارات مما ينتج منه صورة مظلمة تماماً لهذا السطح.

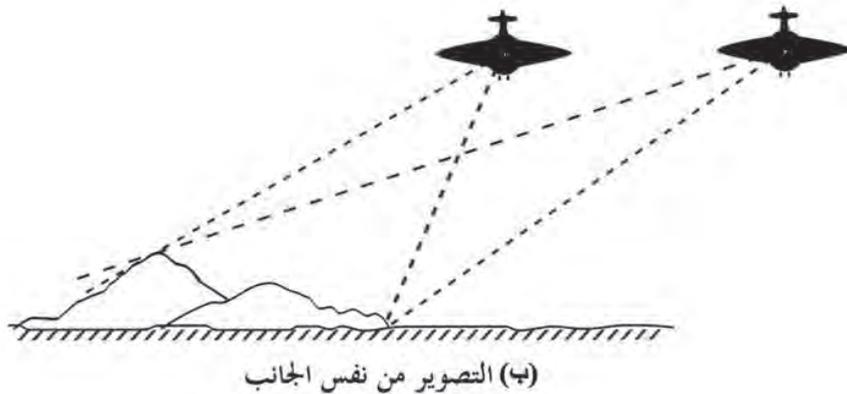
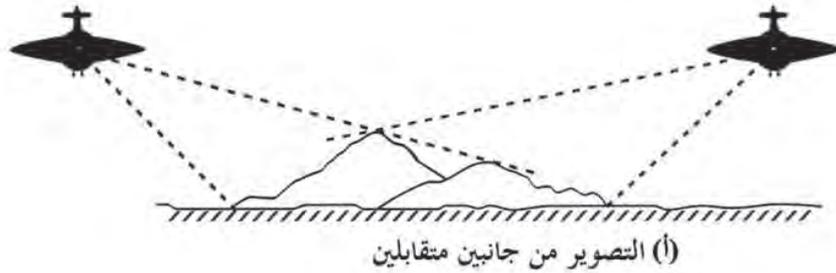
عندما يكون ميل السطح غير مواجه للهوائي، وزاوية ميله أكثر انحداراً من اتجاه النظر كما في المعلمين (C)، و(D)، فإن المنطقة غير المعرضة لنبضات الرادار ستمتد لما وراء هذا السطح المائل مسبباً ذلك حجب للمنطقة خلف هذا السطح المائل بالظل. كما يتضح من الشكل (7-13)، يزداد طول الظل مع زيادة المسافة الجانبية من الهوائي بسبب زيادة زاوية النظر، أي أنه لو كان المعلم (D) مكان المعلم (A) (أي كان أقرب إلى هوائي الطائرة)، فإن منطقة الظل خلف سطحه المائل ستكون معرضة لنبضات الرادار، وبالتالي لن تكون في ظل. الشكل (7-14) يوضح هذه الظاهرة، حيث يزداد الظل باتجاه يمين الصورة (بازدياد المسافة من الهوائي).

يجب التنويه هنا إلى أن ظل الرادار في الصورة الرادارية يكون مظلماً (أسوداً) تماماً، عكس الظل في الصورة الجوية، أو الفضائية العادية الذي لا يكون مظلماً تماماً نتيجة لتعرضه لضوء السماء (الإشعاع

المتشر) (Skylight / Diffuse Sun's Irradiance).

اختلاف المنظر:

عند تصوير جسم من جهتين مختلفتين (من خطي طيران مختلفين)، فإنه ينتج من ذلك إزاحة تضاريس تفاضلية (Differential Relief Displacement) لهذا الجسم تسبب "اختلاف منظر" (Parallax) لهذا الجسم في صورتَي رادار الرؤية الجانبية، مما يسمح برؤية مجسمة لهذا الجسم. من هذا المنطلق، فإنه للحصول على صورة مجسمة لمنطقة ما، فإن ذلك يتطلب الحصول على زوج صور مجسم (Stereo Pair) من خلال تصوير هذه المنطقة من خطي طيران متقابلين (شكل (7-15)). إلا أن هناك صعوبة في الرؤية المجسمة للصور باستخدام هذه التقنية؛ نظراً لأن "الرؤية الجانبية" (Side-Lighting) (وهي الاختلافات النسبية في الزوايا بين الهوائي والتضاريس الناتجة من التغيرات في اتجاه التضاريس) للرادار ستكون منعكسة (Reverse) في صورتَي الزوج المجسم؛ لهذا السبب، يُلتقط زوج صور الرادار (Stereo Pair) - في العادة - من خطي طيران مختلفين على نفس الارتفاع، ومن نفس الجانب (شكل (7-15))؛ وهذا يضمن أن يكون اتجاه بث نبضات الرادار، وتأثير الرؤية الجانبية متشابهاً في كلا الصورتين. من الممكن - أيضاً - التقاط زوج صور الرادار من نفس الجانب باستخدام ارتفاعي طيران مختلفين على نفس خط الطيران (أي زاويتي نظر مختلفتين).



شكل (7-15) اتجاهات الطيران للحصول على زوج مجسم (Stereo Pair) من صور رادار الرؤية الجانبية. (أ) التصوير من جانبيين متقابلين. (ب) التصوير من نفس الجانب على ارتفاعين مختلفين. المصدر: [1].

يعرض الشكل (7-16) زوجاً مجسماً لصور رادار فضائية لتضاريس بركانية في (شيلي) التقطتا من نفس الجانب، وعلى نفس الارتفاع ولكن بزوايتي نظر مختلفتين (45° و 54°). فبالإضافة إلى استخدام هذا الزوج للرؤية المجسمة للصور، فإنه يمكن قياس اختلاف المنظر (Parallax)، واستخدامه في حساب ارتفاعات المعالم. يتم تحديد اختلاف المنظر (كما هي الحال في الصور الجوية) بقياس إزاحة المعلم في كلتا الصورتين المكونتين للنموذج المجسم؛ وتشكل هذه القياسات جزء من علم المسح الراداري (Radargrammetry)، الذي لا يتسع المجال هنا إلى التطرق إليه.



شكل (7-16) زوج مجسم لصور من "نظام تصوير الرادار المكوكي-ب" (Shuttle Imaging Radar (SIR)-B) بمقياس رسم (1:350.000) لتضاريس بركانية التقطتا من نفس الجانب، وعلى نفس الارتفاع، ولكن من زاويتي نظر مختلفتين. المصدر: [1].

7-7 تفسير صور الرادار:

تتكون صورة الرادار من عدة نقاط (Dots)، أو عناصر صورة (Pixels)، بحيث تمثل قيمة السطوع لكل عنصر كمية العائد من إشارة الرادار (Back-Scatter) المنعكسة من منطقة محددة من سطح الأرض. تمثل المناطق المظلمة (Dark) في الصورة عائداً ضعيفاً من إشارات الرادار، بينما تمثل المناطق الساطعة (Bright) عائداً قوياً من الإشارات؛ والتغير في كمية العائد من إشارات الرادار (مُمَثَّلة بقيم السطوع في الصورة) هو نتاج للتغيرات في شكل وخواص سطح الأرض. وخلافاً لأنظمة الاستشعار عن بعد السلبية (مثل التصوير

الجوي الفوتوغرافي والفضائي)، فإن أنظمة الاستشعار عن بعد الإيجابية (الرادار أحدها) تَبَثُّ إلى سطح الأرض أشعة معروفة الخواص، ممَّا يتيح للمفسر - من حيث المبدأ - القدرة على التفريق بين المعالم في الصورة نظراً لكون الأشياء غير المعروفة لديه (خارج خصائص أشعة الرادار المعروفة) أصبحت هي حالة سطح الأرض (وهي خصائص المعالم المختلفة التي تؤثر على شكل ظهورها في الصورة (Image Appearance)).

يجرنا الكلام السابق وقبل الدخول في مناقشة العوامل التي تؤثر على كمية العائد من إشارات الرادار من الأهداف - إلى مناقشة معادلة الرادار، حيث يمكن صياغة مجموعات المتغيرات التي تؤثر على قيم السطوع لمنطقة معينة في صورة الرادار في المعادلة التالية:

$$P_r = \frac{\sigma G^2 P_t \lambda^2}{(4\pi)^3 R^4}$$

حيث P_r الطاقة المنعكسة من سطح الأرض إلى الهوائي، و R المسافة بين الهدف والهوائي، و P_t الطاقة المرسله من الهوائي إلى سطح الأرض، و λ الطول الموجي للطاقة المرسله، و G اكتساب الهوائي (Antenna Gain) الذي يقيس قدرة النظام على تركيز الطاقة.

المتغير الوحيد ذو العلاقة بخصائص المعالم على سطح الأرض هو معامل التشتيت الخلفي (-Back Scattering Coefficient-σ). هذا المعامل هو مجال تركيز محلل الصور نظراً لكونه يحمل معلومات عن سطح الأرض، وقيمته تحمل معلومات متعلقة بكمية العائد من طاقة الرادار من المعالم على سطح الأرض. من المعلوم أن التشتيت الخلفي (Back-Scattering) ذو علاقة بخصائص نظام الرادار (وهي: الطول الموجي، والاستقطاب، ودرجة وضوح السمات لموجات الرادار)، واتجاه سطوح التضاريس والمعالم، وزاوية السقوط لأشعة الرادار، يضاف إلى ذلك خصائص سطح الأرض، ومنها: خشونة السطح، ورطوبة التربة، والغطاء النباتي، والطبوغرافية التفصيلية (الجزيئات المكونة) للمعلم (-Micro Topography).

ونظراً للعلاقات المتداخلة المعقدة بين خصائص سطح الأرض (المذكورة آنفاً)، فإنه من الصعب على المفسر إجراء تفسير مفصل لكل متغير من هذه المتغيرات على حدة، وخصوصاً في ظل تداخل معالم صناعية معها. سيتم فيما يلي تقديم نبذة عن أهم هذه الخصائص وتأثيرها على كمية العائد من إشارات الرادار من الأهداف، وبالتالي على كيفية ظهورها (درجة السطوع) في الصورة، والتي يتعين على مفسر صورة الرادار إدراكها عند إجراء عملية التحليل.

7-7-1 الطول الموجي وحجم الهدف:

كما هو معلوم، فإن من أكثر الميزات التي يقدمها التصوير بالرادار هي قدرة موجاته الطويلة نسبياً (مقارنةً

بموجات الأشعة المرئية، أو الأشعة تحت الحمراء القريبة المستخدمة في أنظمة التصوير الكهرو بصري) على تجاوز المؤثرات الجوية؛ ومقدار تأثر موجات الرادار بالغلاف الجوي يعتمد على الطول الموجي لها، فكلما صغر الطول الموجي، زاد تأثير الغلاف الجوي وخصوصاً من السحب والأمطار. وعلى الرغم من أن موجات الرادار قليلة التأثير بشكل عام بالمطر والسحب إلا أن المطر الكثيف (Heavy Precipitation) يُنتج عائداً (صدىً) من إشارات الرادار لا يستهان به، ويتناسب هذا العائد طردياً مع مقدار $\frac{D^6}{\lambda^4}$ ، حيث D قطر قطرة المطر، و λ الطول الموجي لإشارة الرادار. واستناداً إلى ذلك، يوفر استخدام إشارات الرادار قصيرة الطول الموجي (>2سم) إمكانية تسجيل عائد أو صدى من السحب وقطرات المطر الصغيرة في الأجواء؛ مما يساهم في تحديد مناطق الأمطار الجوية في أنظمة المراقبة الجوية؛ إلا أن الجانب السلبي في هذا المجال هو استخدام هذه النطاقات ذات الطول الموجي القصير (مثل X، و K) لتصوير سطح الأرض، حيث سيؤدي المطر إلى إضعاف أو تشتيت إشارات الرادار بشكل كبير؛ لذلك يُلجأ في هذه الحالة إلى استخدام نطاقات ذات طول موجي أطول.

الجدول (1-7) يعرض قائمة بأكثر نطاقات موجات الرادار استخداماً، واختيار النطاق المناسب يكون حسب الغرض المطلوب تحقيقه؛ وإن اختيار حروف هذه النطاقات قد تم في الفترات الأولى لتطوير أنظمة الرادار؛ وذلك لضمان السرية والأمن العسكريين.

جدول (1-7) نطاقات موجات الرادار الشائعة الاستخدام. المصدر: [1].

النطاق	الطول الموجي	التردد
	$\lambda(\text{cm})$	$\nu=c\lambda^{-1}$ [MHz(10^6 cycles sec $^{-1}$)]
K_a	0.75-1.1	40000 - 26500
k	1.1-1.67	26500 - 18000
K_u	1.67-2.4	18000 - 12500
x	2.4-3.75	12500 - 8000
c	3.75-7.5	8000 - 4000
s	7.5-15	4000 - 2000
L	15-30	2000 - 1000
p	30-100	1000 - 300

بالعودة إلى تأثير الطول الموجي لإشارات الرادار على كمية العائد منها من الأهداف، إذا كان الطول الموجي أصغر كثيراً من حجم (مقاس) (Size) الهدف؛ فإن الموجة سترتد بطريقة مشابهة لارتداد الضوء من مرآة عاكسة؛ وإذا كان الطول الموجي أكبر من حجم الهدف، فإن الهدف لن يكون مرئياً في

الصورة نتيجة للانعكاس الضعيف لموجات الرادار منه.

يقيس العلماء في الكثير من الأحيان العائد من إشارة الرادار (Backscatter)، يسمى أيضاً قطاع الرادار العرضي (Radar Cross Section)، بوحدة "المساحة" (كالمتر المربع)؛ فالعائد من إشارة الرادار يكون له علاقة بحجم الجسم، فالأجسام التي يساوي حجمها الطول الموجي أو أطول تظهر ساطعة في الصورة، وتعتبر خشنة (Rough)، بينما تظهر الأجسام التي يكون حجمها أصغر من الطول الموجي مظلمة، وتعتبر ناعمة (Smooth)؛ فالنبات - على سبيل المثال - يعتبر سطحاً خشناً نسبة للأطوال الموجية المستخدمة في أنظمة رادار التصوير، وبالتالي يظهر في الصورة رمادياً أو رمادياً فاتحاً؛ كما أن السطوح المستوية (التي تعكس قليلاً أو لا تعكس أصلاً إلى الهوائي) تظهر دائماً مظلمة.

ومن الوسائل الأخرى التي يستخدمها العلماء في قياس العائد من إشارة الرادار - ما يسمى بقطاع الرادار العرضي المُسَوَّى (Normalized Cross Section)، ولا علاقة له بمقاس عنصر الصورة أو المساحة، وإنما يقاس "بالديسبل" (Decibel-dB)؛ وتتراوح قيم إنعكاس السطوح الطبيعية بين +5dB (ساطع جداً) و-40dB (مظلم جداً).

2-7-7 شكل الهدف:

يؤثر الشكل الهندسي للأهداف بشكل كبير على كمية العائد من إشارات الرادار؛ فعلى سبيل المثال، يمكن للأهداف بسبب تركيبها الهندسي المعقد أن تعكس بقوة أكبر من لو كان بسبب حجمها فقط، والجسم الذي يعكس بهذا النمط يسمى "عاكس زاوية" (Corner Reflector) (شكل (7-21))، ويظهر نقطة مضيئة في صورة الرادار. ومن دلالة اسمها عليها، تأخذ هذه الأجسام شكل الزاوية (مُكوَّنة من ثلاثة سطوح تلتقي في نقطة واحدة)، كزوايا المباني، وتتواجد عادة في المناطق الحضرية بسبب وجود السطوح الخرسانية والمعدنية التي تُكوِّن أشكالاً هندسية معقدة، وفي المناطق الريفية والزراعية بوجود السطوح المعدنية لمباني المزارع، والآلات الزراعية، وأبراج الكهرباء، وغيرها.

تُستخدم عواكس الزاوية (اصطناعياً) في القوارب لتُمكِّن من رؤيتها في حالة فقدانها، أو لتجنب اصطدامها مع سفن أخرى، أو كنقاط عاكسة لمعايرة صور الرادار، أو كعواكس دائمة (Persistent Scatterers) في المناطق الخالية من المنشآت الصناعية في تقنية "قياس تداخل موجات الرادار" (InSAR) التي سنتطرق إليها في الفقرة (7-8).

انطلاقاً من نفس المبدأ، يُراعى في تصميم زوايا سطوح الأهداف المطلوب عدم كشفها بالرادار (كطائرات الشبح المقاتلة) أن تكون سطوحها مصنعة بطريقة خاصة يتم فيها التخلص من الزوايا الداخلية، وتجنب السطوح والحواف العمودية العاكسة لموجات الرادار.

7-7-3 الاستقطاب:

من العوامل الأخرى المهمة المؤثرة على نوع وكمية العائد من إشارات الرادار، والتي يتعين على محلل صورة الرادار أن يدركها "الاستقطاب" (Polarization). ويُقصد بالاستقطاب توجيه (Orientation) مجال الطاقة الكهر ومغناطيسية المنبعثة والمستقبلة من الهوائي.

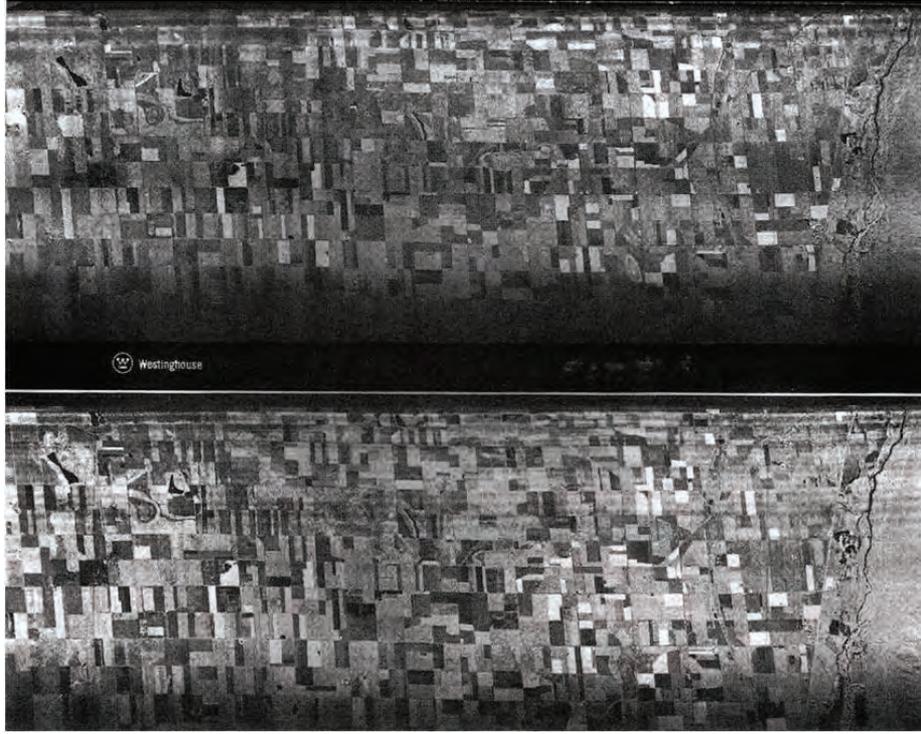
في أنظمة الرادار المتعددة الاستقطاب (Polarmetric Radar System) تُرشد الإشارة بطريقة ما بحيث تُقيد اهتزازات الموجة الكهربية (Electrical Wave Vibrations) في مستوى واحد متعامد مع اتجاه انتشار الموجة (الموجات غير المستقطبة تهتز في جميع الاتجاهات المتعامدة مع اتجاه انتشار الموجة).

ويمكن تصميم نظام الرادار بحيث يبث موجات رادار مستقطبة إما أفقياً (H)، أو رأسياً (V)، ويستقبل العائد منها إما أفقياً، أو رأسياً. من هذا المنطلق يمكن التعامل مع أربعة تركيبات من بث واستقبال إشارات الرادار، وهي بث أفقي واستقبال أفقي (HH)، وبث أفقي واستقبال رأسي (HV)، وبث رأسي واستقبال أفقي (VH)، وبث رأسي واستقبال رأسي (VV).

ويتم الحصول على الصور ذات الاستقطاب المتماثل (Like-Polarized) من خلال البث والاستقبال الأفقي (HH)، أو البث والاستقبال الرأسي (VV)، بينما يمكن الحصول على الصور ذات الاستقطاب المتقاطع (Cross-Polarized) من خلال البث الأفقي والاستقبال الرأسي (HV)، أو البث الرأسي والاستقبال الأفقي (VH).

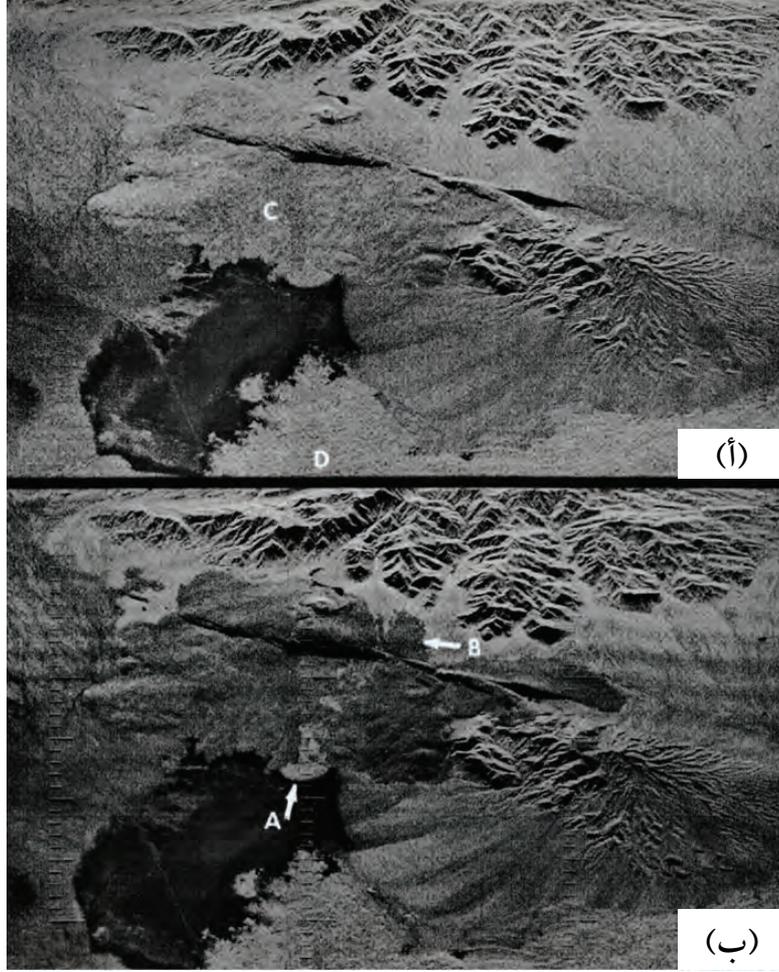
في العادة، تبث أنظمة تصوير الرادار إشارات مستقطبة أفقياً، وتستقبل المنعكس منها (الصدى) من التضاريس باستقطاب أفقي، إلا أن هناك أنظمة أخرى تبث إشارات مستقطبة أفقياً، وتستقبل (بشكل منفصل) المنعكس منها باستقطاب أفقي، ورأسي، منتجة بذلك صورتين منفصلتين للتضاريس (صورة استقطاب أفقي متماثل (HH)، وصورة استقطاب متقاطع أفقي رأسي (HV)) (شكل (7-17)).

ونظراً لكون طبيعة الأجسام المختلفة على سطح الأرض تُحوّر (تُعدّل) استقطاب الإشارة التي تعكسها، فإن صيغة استقطاب الإشارة تؤثر على كيفية ظهور هذه الأجسام في الصورة؛ وبالمقارنة بين الصورتين في الشكل (7-17)، يمكن للمحلل أن يحدد الأجسام التي لديها قابلية لاستقطاب الإشارة؛ فهذه الأجسام تغير الاستقطاب، وتعكس الإشارة المبعثة المستقطبة أفقياً إلى الهوائي إشارة مستقطبة رأسياً؛ وتظهر هذه الأجسام ساطعة في صورة الاستقطاب المتقاطع الأفقي الرأسي (HV)، بينما تظهر مظلمة أو رمادية مظلمة (Dark Gray) في صورة الاستقطاب المتماثل الأفقي (HH). من خلال هذه الظاهرة، تُمكن مقارنة الصورتين من اكتشاف المناطق غير المستقطبة الجيدة.



شكل (7-17) صورة لمنطقة زراعية في (كانزس الغربية) بالولايات المتحدة الأمريكية توضح استقطاب موجات الرادار. الصورة العلوية باستقطاب متماثل أفقي (HH)، والصورة السفلية باستقطاب متقاطع أفقي رأسي (HV). المصدر: [3].

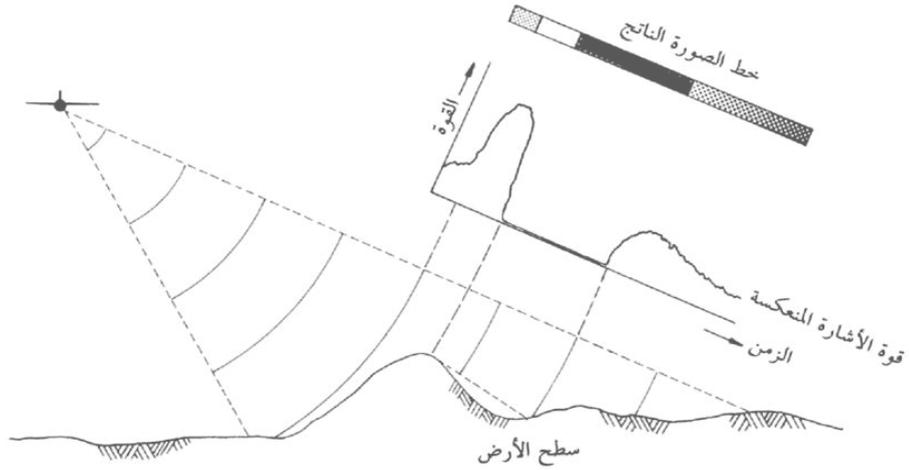
يعرض الشكل (7-18) إحدى الحالات التي يمكن لصورة الاستقطاب المتقاطع الأفقي الرأسي (HV) أن تحتوي على معلومات أكثر من صورة الاستقطاب المتماثل الأفقي (HH). تحتوي هاتان الصورتان وهي لنفس المنطقة - على تضاريس طبيعية تشمل جبلاً، وأودية، ورواسب مصبات أودية مروحية (Alluvial Fans)، وتدفقات بركانية؛ وفي أعلى الصورة يظهر ظل الرادار بشكل واضح نتيجة شدة الانحدارات في المنطقة الجبلية. يظهر المصب المروحي للوادي (العلامة A) في صورة الاستقطاب المتقاطع الأفقي الرأسي (HV) بسطوع أكبر من التدفقات البازلتية المجاورة لها، في حين نجدهما يظهران بسطوع متماثل في صورة الاستقطاب المتماثل الأفقي (HH)؛ وترجع زيادة السطوع في المصب المروحي للوادي إلى احتوائه على غطاء نباتي أكثر كثافةً من الموجود في التدفقات البازلتية. كما أنه عند العلامة (B) في صورة الاستقطاب المتقاطع الأفقي الرأسي (HV)، نجد (أيضاً) أن التباين في درجة السطوع بين المصب المروحي للوادي والتدفق البركاني البازلتي كبيراً، بينما لا نجد ذلك في صورة الاستقطاب المتماثل الأفقي (HH). ومن المعلومات الأخرى التي يمكن أن تقدمها صورة الاستقطاب المتقاطع الأفقي الرأسي (HV) - مقارنة بصورة الاستقطاب المتماثل الأفقي (HH) - ما يظهر عند العلامتين (C)، و(D)، حيث إن درجة سطوع التدفق البازلتي عند العلامة (D) أكثر من كمية السطوع للتدفق البازلتي الآخر (ناتج من فوهة بركانية أخرى) عند العلامة (C)، في حين أن كلا التدفقين لهما درجة سطوع متقاربة في صورة الاستقطاب المتماثل الأفقي (HH).



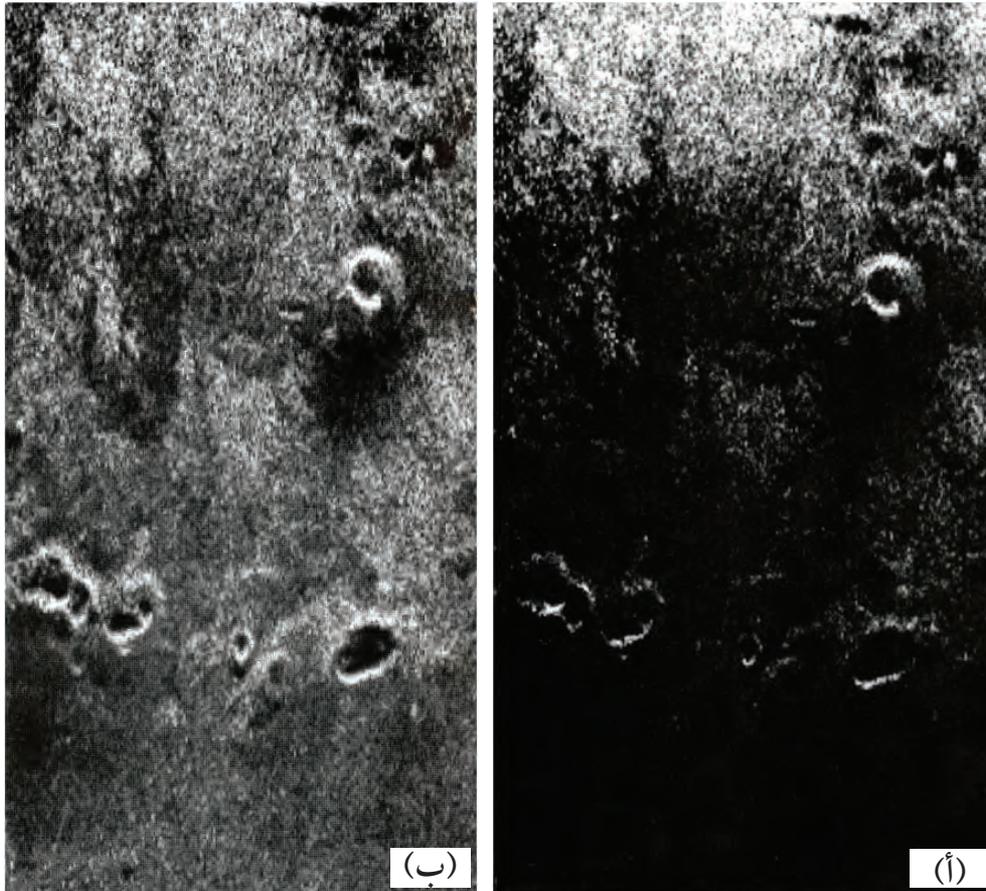
شكل (7-18) (أ) صورة رادارية بالاستقطاب المتماثل الأفقي (HH). (ب) صورة رادارية لنفس المنطقة بالاستقطاب المتقاطع الأفقي الرأسي (HV). المصدر: [1].

7-7-4 زاوية سقوط أشعة الرادار وميول التضاريس:

تتأثر كمية العائد من إشارات الرادار (مُمثلة بقيم السطوع والظل في الصورة) كثيراً بزاوية السقوط (Incidence Angle) لشعاع الرادار، وميول التضاريس؛ فالتغيرات في زاوية السقوط ينتج منها عائد راداري قوي من ميول التضاريس المواجهة للهوائي (Facing Slopes)، وعائد ضعيف نسبي، أو بدون عائد من ميول التضاريس المظاهرة للهوائي (Facing-Away Slopes). يعرض الشكل (7-19) رسماً توضيحياً للعلاقة بين قوة الإشارة العائدة من التضاريس والزمن. يظهر في أعلى الرسم خط الصورة (Image Line) الناتج بعد تحويل إشارات الرادار العائدة إلى قيم سطوع؛ ويلاحظ في الشكل الإشارة القوية العائدة من الميل المواجه للرادار (تُمثّل بقيمة سطوع عالية في خط الصورة)، ثم منطقة عدم وجود عائد (ظل) ممثلة بلون أسود في خط الصورة نتيجة لانحجابها عن نبضات الرادار بسبب الجبل، ثم عائد ضعيف من التضاريس غير المواجهة تماماً للهوائي.



شكل (7-19) تأثير العلاقة الهندسية بين هوائي الرادار، والتضاريس على صور الرادار.
المصدر: [1].



شكل (7-20) التصحيح لظاهرة ضعف السطوع نتيجة زيادة المسافة الجانبية في صور الرادار. (أ) صورة رادار محمول جواً لأحد البراكين في ولاية (هاواي) قبل التصحيح. (ب) نفس الصورة بعد التصحيح، ويلاحظ أن الظلمة قد خفّت بدرجة كبيرة في المدى البعيد عن الهوائي (أسفل الصورة). الفرق في زاوية النظر بين المدى القريب (أعلى الصورة) والمدى البعيد (أسفل الصورة) 14° . المصدر: [1].

هناك ظاهرة مهمة ذات علاقة بزواوية السقوط لشعاع الرادار، وهي الضعف المنتظم في قيم السطوع عبر الصورة مع ازدياد المسافة الجانبية؛ يعود ذلك إلى أن كمية العائد من إشارة الرادار تتناسب عكسياً مع زاوية السقوط، وهذا يعني أنه إذا ازدادت زاوية السقوط، ازدادت المسافة الجانبية من الهوائي، وزيادة المسافة الجانبية تؤدي إلى ضعف العائد من الإشارة؛ يؤدي ذلك إلى أن صورة الرادار تزداد ظلمةً بازدياد المسافة الجانبية، وهو ما يسمى بضعف السطوع نتيجة زيادة المسافة الجانبية (Range Brightness Falloff). يكون هذا التأثير أشدَّ حدةً في صور الرادار المحمول جواً منه في صور الرادار المحمول على القمر الاصطناعي، نظراً لأن مدى زاوية النظر في الرادار المحمول جواً أكبر من زاوية النظر في الرادار المحمول على القمر بسبب انخفاض ارتفاع الطائرة مقارنة بارتفاع القمر عند استخدام عرض تصوير (Swath Width) متماثل؛ ويتم التغلب على هذا الأثر - إلى حد ما - باستخدام نماذج رياضية متخصصة ينتج منها صور لا يرى فيها هذا الأثر بالعين المجردة. يعرض الشكل (7-20) صورة رادار قبل التصحيح، والصورة نفسها بعد تصحيحها باستخدام نموذج تصحيح تجريبي مبسط (Simple Empirical Model).

5-7-7 خشونة السطح:

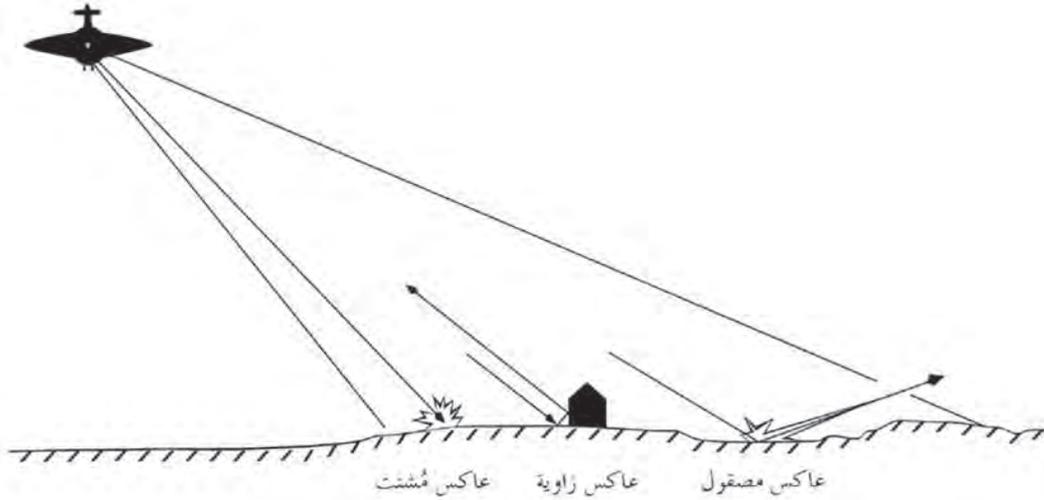
تعريف خشونة السطح (Surface Roughness) في أنظمة الرادار أكثر تعقيداً، ويختلف عن تعريفها بالمفهوم اليومي عند الناس؛ نظراً لأن الخشونة المستخدمة في الرادار لا تعتمد فقط على تركيبية السطح، بل تعتمد - أيضاً - على الطول الموجي لإشارة الرادار وزاوية سقوطها. وعلاوة على وجود تعاريف متعددة لخشونة السطح، إلا هناك تعريفاً شائعاً، وهو "معياري رايلي" الذي ينص على: أنه يمكن اعتبار السطح خشناً (Rough)، ويعمل عاكساً مُشْتَتاً (Diffuse Reflector) إذا كان جذر مربع متوسط اختلافات ارتفاعات السطح (RMS Of Height Variations) أكبر من ثمن الطول الموجي مقسوماً على جيب تمام زاوية السقوط المحلية لموجة الرادار:

$$RMS_h > \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i}$$

وُثِّتت هذه السطوح طاقة الرادار الساقطة عليها في كل الاتجاهات، وتعيد جزءاً لا بأس به منها إلى هوائي الرادار (شكل (7-21)). ويُعد السطح ناعماً (Smooth)، ويعمل كعاكس مصقول (Specular Reflector) وفقاً لمعيار (رايلي) إذا كان جذر مربع متوسط اختلافات ارتفاعات السطح أصغر من ثمن الطول الموجي مقسوماً على جيب تمام زاوية السقوط المحلية لموجة الرادار:

$$RMS_h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i}$$

ويعكس هذا النوع من السطوح معظم الطاقة الساقطة عليه بعيداً عن هوائي المستشعر (شكل (21-7)).



شكل (21-7) ثلاثة من الأصناف الشائعة لعاكس موجات الرادار. المصدر: [3].

جدول (2-7) فئات خشونة سطح الأرض وفقاً لمعيار (رايلي) المطور عند ثلاث زوايا سقوط. المصدر: [1].

جذر متوسط مربع اختلافات الارتفاعات (cm)			تصنيف الخشونة
نطاق K _p (λ = 0.86 cm)	نطاق X (λ = 3.2 cm)	نطاق L (λ = 23.5 cm)	
			(أ) زاوية سقوط محلية (20°)
0.04 >	0.14 <	1.00 >	ناعم
0.04-0.21	0.14-0.77	1.00-5.68	متوسط
0.21 <	0.77 <	5.68 <	عشش
			(ب) زاوية سقوط محلية (45°)
0.05 >	0.18 >	1.33 >	ناعم
0.05-0.28	0.18-1.03	1.33-7.55	متوسط
0.28 <	1.03 <	7.55 <	عشش
			(ج) زاوية سقوط محلية (70°)
0.10 >	0.37 >	2.75 >	ناعم
0.10-0.57	0.37-2.13	2.75-15.6	متوسط
0.57 <	2.13 <	15.6 <	عشش

من العيوب المأخوذة على معيار (رايلي) أنه لا يأخذ في الاعتبار السطوح متوسطة الخشونة (بين السطح الخشن والسطح الناعم)، لذلك يتم استخدام "معيار رايلي المطور" (Modified Rayleigh Criterion) الذي يعتبر السطح خشناً إذا كان جذر متوسط اختلافات ارتفاعات السطح أكبر من $\frac{\lambda}{4.4}$ مقسوماً

على جيب تمام زاوية السقوط المحلية، وناعماً إذا كان جذر مربع متوسط اختلافات ارتفاعات السطح أصغر من $\frac{\lambda}{25}$ مقسوماً على جيب تمام زاوية السقوط المحلية، والقيم المتوسطة بين هذه القيم تُعبر عن السطوح المتوسطة الخشونة. يعرض الجدول (7-2) تصنيف خشونة السطح وفقاً لمعيار (رايلي) المطور اعتماداً على تغيرات ارتفاعات السطوح (مُمَثَّلًا لتركيب السطح)، والطول الموجي (مُمَثَّلًا بثلاث نطاقات مُستخدمة في أنظمة الرادار هي: L, X, Ka)، وزاوية السقوط (مُمَثَّلًا بثلاثة زوايا سقوط هي: 20°, 45°, 70°).

7-7-6 المحتوى المائي لسطح الأرض:

تتأثر كمية العائد من إشارات الرادار بالمحتوى المائي (أحد الخصائص الكهربائية) لسطح الأرض؛ فالأجسام المائية تظهر ساطعة في الصورة، والأجسام الجافة تظهر مظلمة؛ والاستثناء من هذه القاعدة هو السطوح المائية الناعمة، حيث تتصرف كالسطوح المستوية، وتعكس نبضات الرادار بعيداً عن الهوائي، وتظهر نتيجة لذلك مظلمة في الصورة.

8-7 قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية:

يُسجل نظام رادار التصوير معلومتين لكل عنصر (Pixel) من عناصر الصورة، هما سعة (Amplitude) الموجة (قوة إشارة الرادار) المنعكسة التي تُمَثَّل بقيمة سطوع في الصورة الرادارية التقليدية، وطور (Phase) الموجة التي غالباً ما تُتجاهل في كثير من التطبيقات.

من التقنيات التي تتعامل مع بيانات طور الموجة تقنية "قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية" (Interferometric Synthetic Aperture Radar-InSAR). تستخدم هذه التقنية الفعالة والحديثة (ظهرت في بداية التسعينات) هذه البيانات في حساب نماذج الارتفاعات الرقمية (DEM)، وفي حساب الإزاحات أو التشوهات (Displacement / Deformation) التي تحدث لسطح الأرض، أو المعالم الصناعية عليه بشكل دقيق يصل إلى بضعة مليمترات، أو سنتمترات. وفي حين تُمكن القياسات الحقلية الجيوديسية المشتملة على الرصد بنظام تحديد المواقع الكوني (GPS)، والتثليث والتسوية بالأجهزة التقليدية من قياس التشوهات التي تحدث لسطح الأرض في فترات زمنية قصيرة جداً (تصل إلى ثوانٍ)، ولمناطق صغيرة، وبجهد كبير، تأتي تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (InSAR) مكتملة لهذه الأدوات بحيث تُمكن بجهد قليل من أخذ قياسات لمناطق أوسع، وعلى فترات متباعدة تتراوح بين عدة أيام وأشهر.

وحساب الإزاحة في سطح الأرض يدخل في العديد من التطبيقات الهامة، كمرابعة، وقياس التشوهات الناتجة من الانزلاقات الأرضية، والزلازل، والبراكين، وهبوط وارتفاع المنشآت في المناطق الحضرية (Urban Uplift and Subsidence)، وحركة الألواح الجليدية، إلخ.

ويتعين التنويه بأن هذه التقنية ليست التقنية الوحيدة المستخدمة في حساب بيانات الارتفاعات الرقمية، فيمكن حسابها أيضاً من خلال تقنية أخرى تستخدم سعة الموجة، وليس طورها، وهي ”المسح (الرسم) الراداري“ (Radargrammetry).

حساب بيانات الارتفاعات الرقمية (DEM) في تقنية المسح الراداري يتم باستخدام زوج من صور الرادار (Stereo Pair) الملتقطة من زاويتي سقوط مختلفتين، مشابهة في ذلك مفهوم المسح الجوي (Photogrammetry) التقليدي المستخدم في استخلاص الارتفاعات من الصور الجوية أو الفضائية (فقرة (7-6-4)). إلا أن دقة بيانات ارتفاعات التضاريس الرقمية المنتجة من تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية - والتي تصل إلى مستوى 1م، وخصوصاً بعد إطلاق الجيل الجديد من أقمار الرادار (Cosmo Skymed، TeraSAR-X، Radarsat-2) - تكون في الغالب أعلى من دقة البيانات المنتجة من تقنية المسح الراداري.

في تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية، يتم حساب الارتفاع، أو الإزاحة في سطح الأرض عند كل عنصر (Pixel) من عناصر صورة الرادار من الفرق بين طورَي (Phase Difference) إشارتي الرادار لصورتين ملتقطتين لنفس المنطقة من سطح الأرض، ومن موقعين (زاويتي نظر Viewing Angles) مختلفين لجهاز الرادار؛ يُطلق على هذه الطريقة تقنية ”قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية التفاضلي“ (Differential InSAR)، أحد أكثر التقنيات المستخدمة شيوعاً في قياس التداخل التي سنتطرق إليها في الفقرة (7-8-1). يوفر الفرق بين طورَي إشارات الرادار في الصورتين قياساً دقيقاً (يصل إلى بضعة أجزاء من الطول الموجي المستخدم) للمسافة بين الهوائي، والهدف على سطح الأرض، مما يُمكن من قياس ارتفاع التضاريس، أو الإزاحة التي تحدث لسطح الأرض.

يُطلق على صورة فوارق الأطوار بين الصورتين الراداريتين الناتجة من استخدام هذه التقنية صورة التداخل (Interferogram)؛ وتتكون هذه الصورة من حواف (Fringes)، تُمثل كل حافة منها طولاً موجياً كاملاً (2π)، وتُعرض إما بالتدرج الرمادي، أو بالألوان المتدرجة من البنفسجي إلى الأحمر كما في الشريحة (12).

لتوضيح مفهوم صورة التداخل، وكيفية تمثيلها للإزاحات التي تحدث لسطح الأرض، تعرض الشريحة (13) صورة تداخل تمثل إزاحة نصف كروية (على شكل قبة) إلى الأعلى لسطح الأرض؛ وتُمثل هذه الإزاحة في صورة التداخل على شكل حواف (حلقات) دائرية ملونة متكررة النمط (Repeated Fringes) بسبب الطبيعة الدورية لطور الموجة؛ وتُمثل كل حافة منها فرقاً في الطور بين الصورتين قدره طول موجي كامل (λ)، وفي نفس الوقت إزاحة لسطح الأرض إلى الأعلى بمسافة قدرها نصف الطول الموجي ($\frac{\lambda}{2}$) لإشارة الرادار المستخدمة. ويعود السبب في كون مقدار الإزاحة يساوي نصف الطول الموجي إلى أن إشارة الرادار تقطع ضعف المسافة (ذهاباً وإياباً) من الهوائي إلى الهدف، وتعود مرة أخرى إلى الهوائي، مما يعني أن مقدار إزاحة سطح الأرض المقيسة في هذه الحالة ستساوي ضعف فرق الطور بين الصورتين،

وبالتالي يجب قسمتها على 2. فعلى سبيل المثال، عند استخدام صور قمر الرادار الأوربي ”إي آر إس“ (ERS) الذي يعمل بطول موجي قدره 5.6 سم، فإن الحافة الواحدة في صورة التداخل تمثل إزاحة أرضية قدرها 2.8 سم (شريحة 13)؛ وتحديد مقدار الإزاحة الكلية يتم عن طريق ضرب عدد الحواف في مقدار الإزاحة لكل حافة.

تتضمن صورة التداخل على عدة أنواع من المعلومات حسب الصيغة الرياضية الموضحة أدناه، هي المعلومات الطبوغرافية المتمثلة في ارتفاع التضاريس (Topographic Phase)، والإزاحة التي حدثت لسطح الأرض بين زمني التقاط الصورتين (Surface Displacement Phase)، والتأثيرات الجوية (Atmospheric Phase) الناتجة بشكل أساسي من بخار الماء، والضوضاء (Noise Phase)، وافترضية استواء سطح الأرض (Flat Earth Phase):

$$\varnothing_{InSAR} = \varnothing_{flat} + \varnothing_{topo} + \varnothing_{defo} + \varnothing_{atm} + \varnothing_{noise}$$

يمكن إزالة مُركبة تسطّيح الأرض (\varnothing_{flat}) بتصحيح معلومات المدار (Orbit Information Correction) نتيجة افتراض تسطّيح الأرض، ومُركبة الضوضاء (\varnothing_{noise}) (بتطبيق مرشح خاص على صورة التداخل، ومركبة التأثيرات الجوية (\varnothing_{atm}) بالتخلص أو الإقلال من تأثير الغلاف الجوي الذي يسبب تأخير في انتشار طور الموجات بسبب التغيرات الزمنية والمكانية لبخار الماء بعدة طرق، منها: استخدام بيانات أرضية أو فضائية؛ وإذا كانت الفترة بين زمني التقاط الصورتين قصيرة، فإنه يمكن افتراض عدم وجود تغيرات (إزاحة) في سطح الأرض ($\varnothing_{defo}=0$)، وبذلك يمكن اختصار الصيغة الرياضية السابقة في الآتي:

$$\varnothing_{InSAR} = \varnothing_{topo}$$

في هذه الحالة، تُمثّل قيمة الطور في صورة التداخل قيمة ارتفاع التضاريس التي تمثل نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM).

وبنفس المبدأ، إذا كان الهدف هو حساب الإزاحة في سطح الأرض بدلاً من حساب ارتفاع التضاريس، فإنه يتم استخدام نموذج ارتفاعات رقمية منتج سابقاً لتقدير قيمة ارتفاع التضاريس، ثم حذفها من صورة التداخل. وبما أن حساب الإزاحة الدقيقة والبطيئة التي حدثت لسطح الأرض يتطلب التقاط الصور بفواصل زمني غير قصير، فإن ذلك سيتطلب أيضاً حساب الاختلافات في التأثير الجوي الناتج من اختلاف أزمنة التقاط الصور، ثم حذفها من صورة التداخل؛ وبذلك يمكن اختصار العلاقة الرياضية الأساسية في الآتي:

$$\varnothing_{InSAR} = \varnothing_{defo}$$

7-8-1 التقنيات المستخدمة في قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية:

يندرج تحت تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (InSAR) التي أٌعترف بها في الآونة الأخيرة أداة فعالة وقليلة التكاليف لتحديد ومراقبة الإزاحات (التشوهات) الدقيقة والبطيئة التي تحدث لسطح الأرض - ثلاث تقنيات رئيسة هي:

- (1) تقنية "قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية التفاضلي" (Differential InSAR).
- (2) تقنية "قياس التداخل باستخدام العواكس الدائمة" (Permanent/Persistent Scatterer - PSI/Interferometry).
- (3) تقنية "المجموعات الجزئية لخطوط الأساس القصيرة" (Small Baseline Subsets-SBAS).

تستخدم هذه التقنيات بفعالية في العديد من التطبيقات، كمراقبة الزلازل، وتقدير حركة الكشبان الجليدية، ومراقبة النشاطات البركانية، ومراقبة الهبوط في المناطق الحضرية، وإنتاج نماذج الارتفاعات الرقمية، وتصنيف الغطاء الأرضي، ومراقبة الانزلاقات الأرضية، ومراقبة إنتاج الغاز والبترو، إلخ. إلا أن أكثرها شيوعاً هو مراقبة الهبوط في المناطق الحضرية، يليه إنتاج نماذج الارتفاعات الرقمية، ثم مراقبة النشاطات الزلزالية.

سيُكفى فيما يلي بتقديم نبذة عن التقنية الأولى والتقنية الثانية فقط لكثرة شيوعهما.

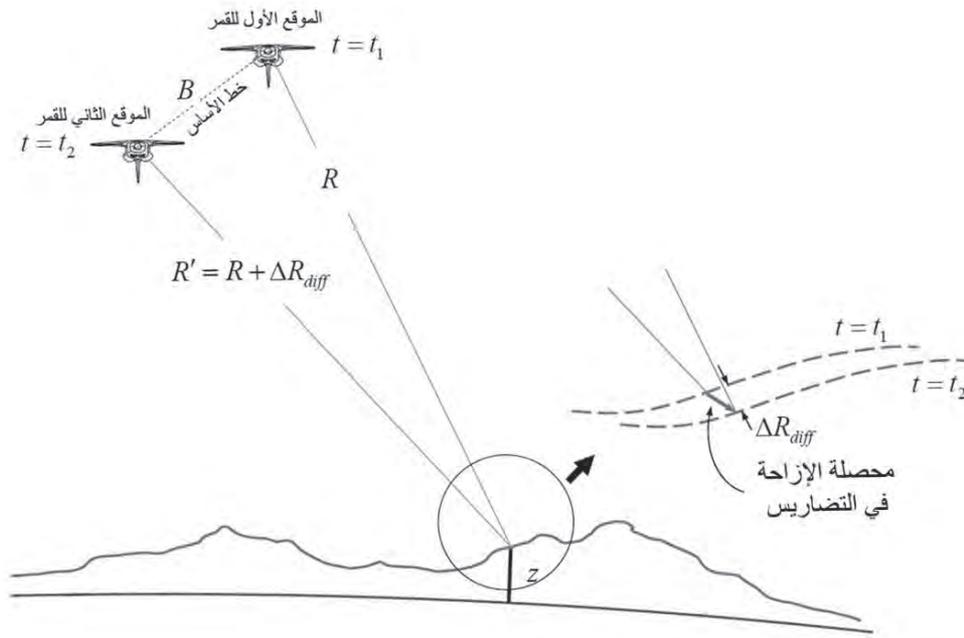
7-8-1-1 تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية التفاضلي:

تُستخدم تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية التفاضلي (Differential InSAR) في العديد من المجالات، ومنها: المسح الأرضي الدقيق (Geodesy)، والاستشعار عن بعد، وتتميز بقدرتها على مراقبة الإزاحات الدقيقة التي تحدث في سطح الأرض خلال فترات زمنية تتراوح بين عدة أيام وعدة سنين لمناطق واسعة تصل مساحتها إلى 100 كم × 100 كم، وبدقة عالية جداً تصل إلى مستوى المليمترات (بضعة أجزاء من الطول الموجي).

يتم قياس الإزاحة في سطح الأرض من الفرق في الطور بين موجات الرادار المنعكسة من سطح الأرض إلى موقعي القمر (عند بداية ونهاية الفترة التي حدثت فيها الإزاحة). فحسب الشريحة (14)، ينتج من الإزاحة في سطح الأرض للأسفل أن يكون طول الإشارة المنعكسة من سطح الأرض إلى الموقع الثاني للقمر (آخر الفترة، وتمثل الصورة الثانية) أطول قليلاً من طول الإشارة المنعكسة إلى الموقع الأول للقمر (أول الفترة، وتمثل الصورة الأولى).

قياس الإزاحة التي تحدث لسطح الأرض، سواء كان إلى الأعلى، أم إلى الأسفل، أو إلى الأجناب يتطلب التقاط القمر لصورتين على الأقل لنفس المنطقة من موقعين متقاربين في الفضاء عند بداية، ونهاية الفترة المطلوبة (t1، و t2)؛ ويتطلب الأمر أن تكون الخصائص الهندسية (Image Acquisition Geometry)

للمسار الأول للقمر (الصورة الأولى) أقرب ما يمكن من الخصائص الهندسية للمسار الثاني (الصورة الثانية)؛ وبتعبير آخر: يجب أن تكون المسافة بين موقعي القمر، وهو ما يسمى بخط الأساس (Baseline) أقصر ما يمكن. تُسمى هذه الطريقة بـ "قياس التداخل بالمسار المتكرر" (Repeated-Pass Interferometry)، وتتم باستخدام هوائي رادار واحد. الشكل (7-22) يوضح بيانياً هذه الطريقة، حيث يمكن قياس الإزاحة التي تحصل لسطح الأرض (ΔR_{diff}) من قياس فرق الطور بين موجات الرادار المنعكسة من الهدف إلى موقعي هوائي الرادار (عند الزمن t_1 و t_2).

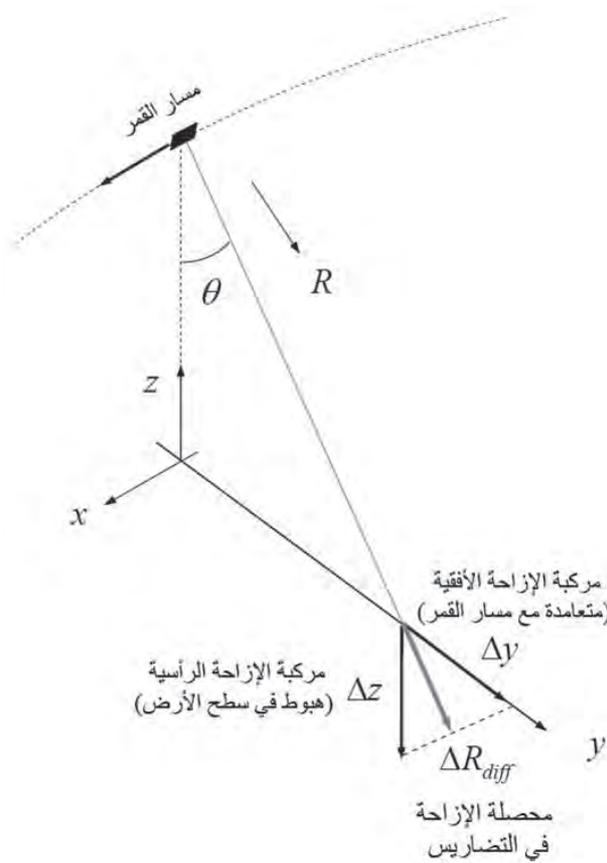


شكل (7-22) رسم توضيحي يبين مفهوم قياس التشوه في سطح الأرض بطريقة قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق التفاضلي باستخدام المدار المتكرر. المصدر: [14].

يمكن تقسيم الإزاحة في خط النظر لشعاع الرادار (ΔR_{diff}) الموضحة في الشكل (7-22) إلى مركبتين: الأولى في الاتجاه الرأسي (Z)، وتمثل في هذه الحالة الهبوط في سطح الأرض، والثانية في الاتجاه الأفقي المتعامد على مسار القمر (Y)، وتمثل في هذه الحالة حركة سطح الأرض الأفقية (شكل (7-23)).

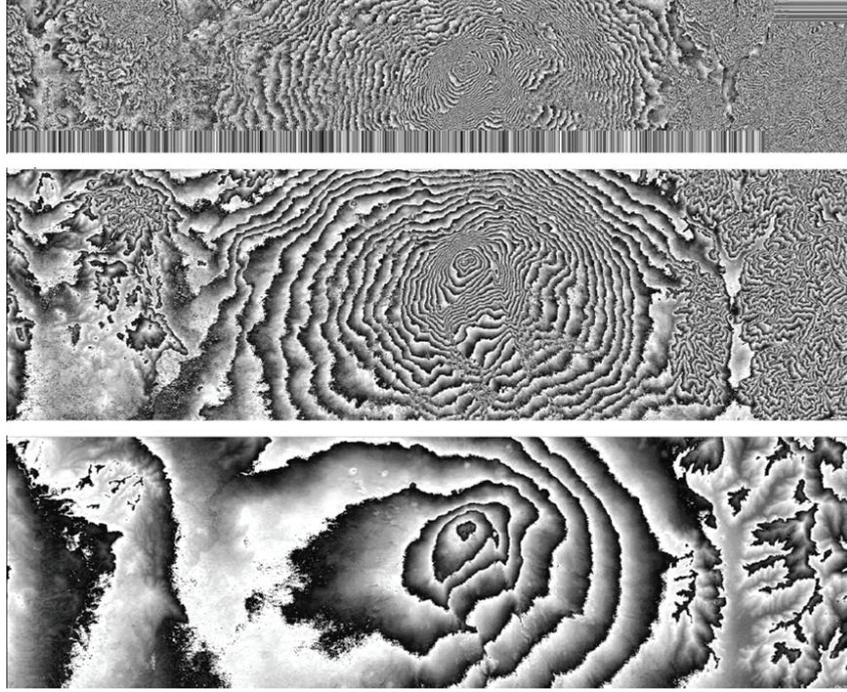
إضافة إلى صورتَي الرادار الملتقطتين بوضع هندسي متشابه، يتطلب استخدام هذه التقنية لقياس الإزاحة التي تحدث لسطح الأرض - توفر نموذج ارتفاعات رقمية (DEM) سابق الإنتاج؛ إلا أنه في حالة عدم توافر نموذج ارتفاعات رقمية، فإن استخدامها يتطلب توافر ثلاث صور ملتقطة (أيضاً) بوضع هندسي متماثل. تُستخدم الصورتان الأولى والثانية اللتان تلتقطان بفواصل زمني قصير بينها في إنتاج صورة التداخل الأولى التي تسمى صورة التداخل المرجعية (Reference Interferogram)، أو صورة التداخل الطبوغرافية

(Topographic Interferogram)، وهي في هذه الحالة تمثل ارتفاعات التضاريس الحقيقية قبل الإزاحة (نموذج الارتفاعات الرقمية)؛ وتستخدم الصورتان الأولى والثالثة الملتقطتان بفواصل زمني طويل بينهما (الذي حدث خلاله الإزاحة) في إنتاج صورة التداخل الثانية التي تمثل ارتفاعات التضاريس + الإزاحات (التشوهات) التي حدثت لسطح الأرض. وبطرح صورة التداخل الثانية من الأولى (المرجعية) تنتج صورة التداخل التفاضلية (Differential Interferogram) التي تحتوي على حواف ذات ألوان متدرجة تمثل الإزاحات التي حدثت لسطح الأرض؛ كل حافة تمثل إزاحة في سطح الأرض مقدارها نصف الطول الموجي ($\frac{\lambda}{2}$) لإشارات الرادار المستخدمة (شريحة (15)).



شكل (7-23) تقسيم محصلة الإزاحة في خط النظر لشعاع الرادار (ΔR_{diff}) إلى مركبتين: في الاتجاه الرأسي (Z)، وتمثل الهبوط في سطح الأرض، وفي الاتجاه الأفقي المتعامد على مسار القمر (Y)، وتمثل حركة سطح الأرض الأفقية. المصدر: [14].

لتوضيح حساسية قياس التداخل للطول الموجي لموجات الرادار، يعرض الشكل (7-24) صور تداخل مُنتجة من استخدام ثلاثة نطاقات (أطوال موجية) رادارية مختلفة، هي نطاق (X) بطول موجي قدره 3 سم، ونطاق (C) بطول موجي قدره 5.6 سم، ونطاق (L) بطول موجي قدره 23.5 سم؛ ويلاحظ في الشكل أن صورة النطاق (X) هي الأدق (الأقصر طولاً موجياً)، يليها صورة النطاق (C)، ثم صورة النطاق (L).



شكل (7-24) مثال توضيحي لحساسية قياس التداخل للطول الموجي لموجات الرادار. الطول الموجي مُمثَّل هنا بثلاثة نطاقات (X, C, L). المصدر: [14].

عند حساب الإزاحات التي تحدث لسطح الأرض، تُمكن خطوط الأساس القصيرة التي يتراوح طولها بين 0 م و 100 م من تجاهل التأثير الطبوغرافي (ارتفاع التضاريس) على النتائج. ولكن عند الرغبة في تحديد الإزاحات التي تحدث في سطح الأرض عند استخدام خطوط أساس طويلة (> 100 م)؛ فإنه يمكن استخدام نموذج ارتفاعات رقمية (DEM) لتمثيل التأثير الطبوغرافي، ثم إزالته.

ولإنتاج نموذج الارتفاعات الرقمية، فإن القيم النموذجية العظمى لخط الأساس تتمثل بين 100 م و 600 م، أما لقياس الإزاحة، فإنها تتمثل بين 0 م و 100 م.

الشروط الأساسية لاستخدام طريقة قياس التداخل بالمسار المتكرر:

يتطلب استخدام هذه الطريقة تحقق ثلاثة شروط رئيسية:

- (1) عدم حدوث تغيرات كبيرة في سطح الأرض بين زمني التقاط الصورتين (يُسمح بتغيرات لا يتجاوز مقدارها الطول الموجي).
- (2) تماثل الحالة الجوية في زمني التقاط الصورتين.
- (3) ثبات زاوية النظر للهوائي.

المهمة المكوكية لقياس الطبوغرافيا بالرادار باستخدام طريقة قياس التداخل بمسار مفرد:

يتم إنتاج نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) باستخدام تقنية التداخل بطريقتين: الطريقة الأولى تتم باستخدام صورة التداخل لإنتاج نموذج الارتفاعات الرقمية باستخدام تأثير الرؤية الثنائية/المجسمة (Stereoscopic Effect) بفارق بسيط بين موقعي التصوير في الفضاء (Observation Positions) لصورتين ملتقطتين بنفس هوائي الرادار؛ وإذا كان هناك فاصل زمني بين التقاط الصورتين، فإنه يجب الأخذ في الاعتبار أن تكون مساهمة الأطوار الأخرى (كالتأثيرات الجوية) أقل ما يمكن.

الطريقة الأخرى هي: استخدام هوائيين منفصلين على نفس المركبة يلتقطان الصور في نفس الوقت؛ لضمان عدم وجود فروقات في التأثيرات الجوية، وتشوهات في سطح الأرض بين الصورتين؛ وقد استخدمت هذه الطريقة في "المهمة المكوكية لقياس الطبوغرافيا بالرادار" (Shuttle Radar Topography Mission-SRTM) في عام 2000م.

مرّت تجارب التصوير الفضائي برادار فتحة الإغلاق الاصطناعية على متن المكوك الفضائي بأربع مراحل: المرحلة الأولى تمثلت في تجربة "نظام تصوير المكوك الراداري - أ" (Shuttle Imaging Radar-SIR-A) على متن المكوك كولومبيا في عام 1981م، واستغرقت مدة تشغيل نظام التصوير 54 ساعة، صُوِّر خلالها ما يقارب أربعة ملايين ميل مربع من سطح الأرض؛ وتمت عملية التصوير باستخدام النطاق (L)، وزاوية هبوط (Depression Angle) ثابتة قدرها (40°) ، واستقطاب أحادي أفقي (HH)، ودرجة وضوح ثابتة $(40 \times 40 \text{ م})$.

المرحلة الثانية تمثلت في تجربة "تصوير المكوك الراداري - ب" (SIR-B)، وهي شبيهة بتجربة (SIR-A)، باستثناء قدرة النظام على التصوير بزوايا هبوط متغيرة $(30^\circ, 60^\circ)$ ، نتج منها قدرة على التصوير بدرجاتي وضوح مدى مختلفين (17م، 58م)، ودرجة وضوح سمت ثابتة (25م).

المرحلة الثالثة كانت في عام 1994م، وتمثلت في تجربة (SIR-C/X-SAR)؛ وفي هذه التجربة أمكن التصوير بثلاثة نطاقات (X, C, L) مع القدرة على البث والاستقبال باستقطاب أفقي ورأسي، والقدرة على التصوير بدرجات وضوح تتراوح بين 10م و200م.

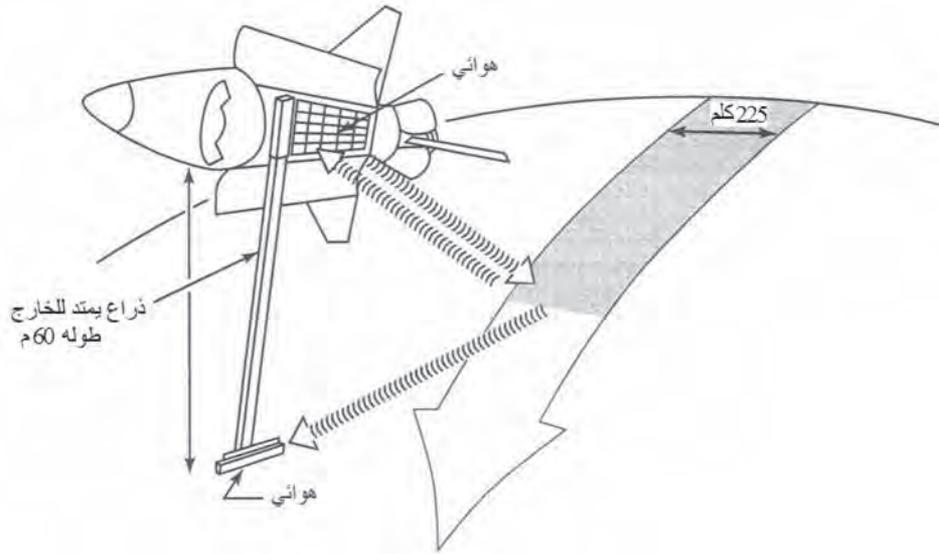
المرحلة الرابعة كانت الهامة، والنقلة النوعية التي لفتت النظر كثيراً في مجال قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (InSAR)، وتمثلت في المهمة المكوكية لقياس الطبوغرافيا بالرادار (SRTM).

هذه المهمة عبارة عن مجهود بحثي دولي تقوده وكالة الاستخبارات الجيومكانية الوطنية الأمريكية (NGA)، ووكالة الطيران والفضاء الأمريكية (NASA) لإنتاج نماذج ارتفاعات رقمية (DEM) شبه كونية متكاملة تُقارب تغطيتها 80٪ من مساحة العالم (بين خطي عرض 56° جنوباً و 60° شمالاً)، وأنجزت هذه المهمة في فبراير عام 2000م خلال أحد عشر يوماً على متن المكوك "أنديفور" (Endeavour) بالاعتماد على نظام التصوير الراداري (SIR-C/X-SAR) الذي استخدم في الرحلة المكوكية عام 1994م.

صُمم نظام التصوير ليعمل بطريقة "قياس التداخل بمسار مفرد" (Single-Pass Interferometry) باستخدام نطاقين (X,C)، وتحقق طريقة قياس التداخل بمسار مفرد في هذه المهمة بتركيب هوائي في حجرة نظام التصوير كما في المهام الثلاث السابقة، وهوائي آخر مركب على ذراع طوله 60م يمتد خارج المكوك بعد استقرار المكوك في مداره (شكل (7-25)).

نتج عن هذه المهمة نوعان من بيانات ارتفاعات التضاريس الرقمية (Digital Terrain Elevation Data-DTED): النوع الأول هو بيانات ارتفاعات التضاريس الرقمية (المستوى الأول) (DTED Level-1)، وتبلغ درجة وضوحها ثلاث ثواني جغرافية (3 Arc-Second) (تعادل ما يقارب 90م في مناطق المملكة العربية السعودية). يتوفر هذا النوع من البيانات لكافة مناطق العالم، باستثناء مناطق صغيرة ذات طبيعة جبلية عالية.

النوع الثاني هو بيانات ارتفاعات التضاريس الرقمية (المستوى الثاني) (DTED Level-2)، وتبلغ درجة وضوحها ثانية جغرافية واحدة (1 Arc-Second) (تعادل ما يقارب 30م في مناطق المملكة). سُمح بنشر هذه البيانات للمناطق التي تغطي الولايات المتحدة الأمريكية فقط.

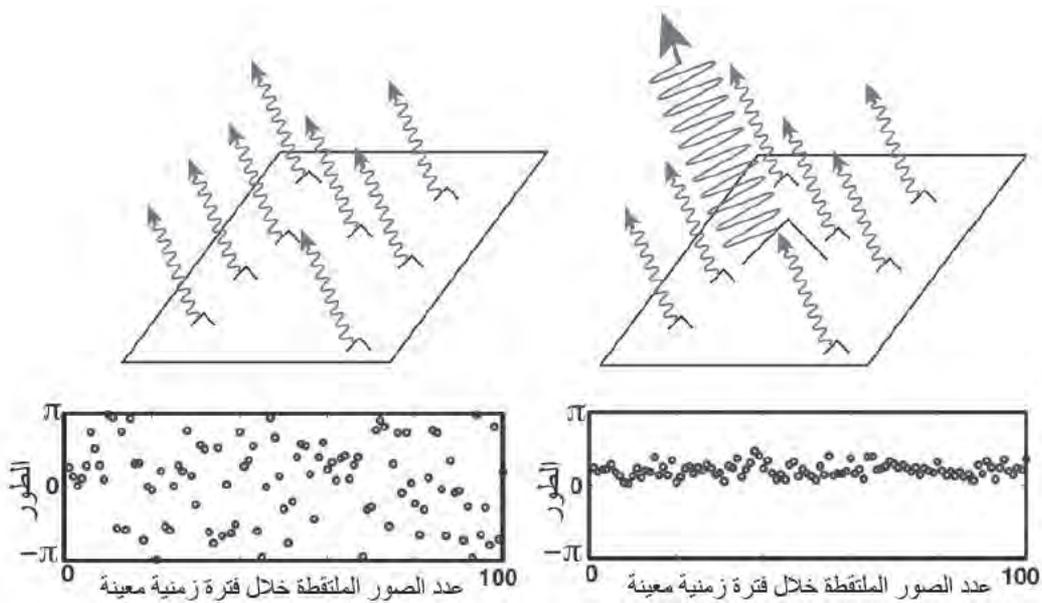


شكل (7-25) المهمة المكوكية لقياس الطبوغرافيا بالرادار (SRTM) باستخدام تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (InSAR). المصدر: [3].

7-8-1-2 قياس التداخل باستخدام العواكس الدائمة:

من المشكلات المتعلقة باستخدام تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (InSAR) التقليدية (وهي عديدة، وتم ذكرها في فقرة (7-8-3))، وخصوصاً عند استخدام موجات الرادار القصيرة (نطاق "C"، على سبيل المثال) - محدودية قدرتها على مراقبة التحركات

(الإزاحات) الأرضية البطيئة (على مستوى بضعة مليمترات/ سنة) في المناطق ذات الغطاءات الأرضية المتغيرة موسمياً (كالغطاءات النباتية). محدودية القدرة على مراقبة التحركات ناتجة من الارتباطات الزمنية الضعيفة بين انعكاسات المعالم في الصور الرادارية الملتقطة خلال فواصل زمنية طويلة (Temporal De-Correlation)؛ فكما هو معروف، قيمة عنصر الصورة في الصورة الرادارية (شاملاً ذلك - أيضاً - الصور عالية الوضوح) عبارة عن خليط من قيم الانعكاس (Scatters) القادمة من عدة مصادر على سطح الأرض؛ فإذا تغيرت قيم هذه الانعكاسات بين الصور الملتقطة عبر فترات زمنية متباعدة (كما هي الحال في الغطاء النباتي نتيجة لتغيراته الموسمية)، فإن قيم طور الموجات ستتغير بشكل عشوائي في المنطقة المطلوب تحليلها، وهو ما يؤدي إلى وجود حالة عدم ارتباط طوري زمني (Temporal Phase De-Correlation)؛ ولذلك إن وُجد جسم (غطاء أرضي) ثابت الانعكاس زمنياً هو الأقوى والسائد على الانعكاسات الأخرى المحيطة به (Background Scatterers) في عنصر الصورة، فإن التغير في طور موجات الرادار المنعكسة الناتج من التحركات النسبية للانعكاسات الأخرى في عنصر الصورة ستخف، وتكون صغيرة بحيث تجعل من الممكن استخلاص إشارة إزاحات سطح الأرض. يُسمَّى الجسم (عنصر الصورة) الثابت والسائد الانعكاس بالعاكس الدائم (Persistent Scatterer) (أو الهدف المتناسك "Coherent Target")، ويُعرَّف بأنه: الهدف الذي تكون سعة وطور الموجه له ثابتين، ولا يتغيران مع الوقت. الشكل (7-26) يعرض رسماً توضيحياً يبين ثبات وتشتت طور موجة الرادار لعنصر صورة يحتوي على انعكاس سائد، وعنصر صورة آخر يحتوي على انعكاسات مشتتة.



شكل (7-26) رسم تمثيلي يبين ثبات، وتشتت طور موجة الرادار لتوضيح مفهوم العاكس الدائم (Persistent Scatterer). (أ) عنصر صورة يحتوي على انعكاس سائد. (ب) عنصر صورة آخر يحتوي على انعكاسات مشتتة. المصدر: [16].

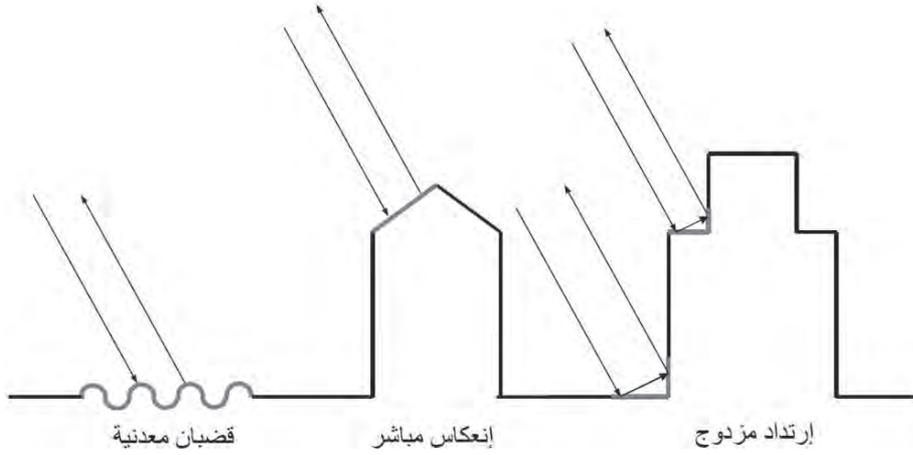
يُمكن العدد المحدود من العواكس الثابتة الطور زمنياً (كزاوية مبنى، أو جذع شجرة، أو نتوء صخري، الخ) الناتج من عدم الارتباط الطوري لصور رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية الملتقطة على فواصل زمنية متباعدة لمناطق متغيرة موسمياً - من إجراء تحليل قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (InSAR) عليها. من هذا المنطلق، واعتماداً على هذه العواكس الثابتة نشأت تقنية "قياس التداخل باستخدام العواكس الدائمة" (Persistent Scatterer Interferometry-PSI).

تأتي هذه التقنية ضمن التطورات الحديثة في مجال تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية التقليدية (InSAR)، وأصبحت في العقدين الأخيرين من الأدوات الفعالة في قياس الإزاحات (التشوهات) التي تحدث لسطح الأرض بدقة عالية تصل إلى مستوى 1 ملم؛ وقد ساهمت هذه التقنية في الآونة الأخيرة (كما هي الحال مع تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية التفاضلي Differential InSAR) في العديد من التطبيقات، ومنها مراقبة الهبوط والارتفاع في المناطق الحضرية، وإزاحات سطح الأرض الناجمة عن الانزلاقات الأرضية، والنشاطات البركانية، والفيضانات، الخ.

تعود البدايات الأولى لتطوير هذه التقنية إلى الباحثين "هانسن" و"يوساي" (Hansen and Usay, 1997; Usay, 1997) حينما لاحظوا أن بعض الأهداف الصناعية تُظهر تماسكاً عالياً (High Coherence) حتى عند استخدام صور تداخل ذات مدد طويلة (Long Time Span Interferometry)، وخطوط أساس كبيرة؛ إلا أن براءة هذه التقنية تنسب إلى جامعة ميلان التقنية (Technical University of Milan) في عام 1999م؛ وقد تبين - لاحقاً - أنه يمكن الاستفادة من الأهداف الثابتة الانعكاس (Persistent Scatterers) في مراقبة الإزاحة التي تحدث لسطح الأرض؛ فقد استخدم الباحثون "فيرتي"، و"بارتي"، و"روكا" (Ferreti et al., 2001; 2000) حزمة من صور رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (مطلوب أكثر من 20 صورة) لتكوين صور تداخل تفاضلية، وتحديد وعزل عناصر الصورة (الأهداف) ذات الانعكاس الدائم (الثابت) في صور التداخل اعتماداً على ثبات انعكاسها في جميع الصور المستخدمة. وإضافة إلى الباحثين المذكورين آنفاً، ساهم باحثون آخرون - أيضاً - في تطوير طرق تحديد وعزل عناصر الصورة ذات الانعكاس الدائم في صور التداخل (أمثال: Crosetto et al., 2003; Lyons and Sandwell, 2003).

تعتمد هذه التقنية (وكما ذكر في بداية هذه الفقرة) على دراسة شبكة من العواكس الدائمة في سلسلة من صور التداخل المتراكمة للفترة المطلوب حساب الإزاحة التي حدثت خلالها (شريحة 16))؛ وتتراوح عدد صور التداخل بين 50 و100 صورة، بينما يتراوح عدد النقاط الثابتة الانعكاس بين 50 و200 نقطة/كلم 2.

هذه التقنية شائعة الاستخدام، ومفيدة في المناطق الحضرية التي تتوفر فيها منشآت دائمة (غير متغيرة) الانعكاس. الشكل (7-27) يعرض نماذج من العواكس الدائمة في هذه المناطق.



شكل (7-27) نماذج من العواكس الدائمة (Persistent Scatterers). المصدر: [14].

2-8-7 العوائق التي تحد من استخدام تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق

الاصطناعية:

من العوائق التي تحد من الاستخدام الفاعل لتقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (InSAR):

- (1) الغطاءات الأرضية المتغيرة موسمياً (كالغطاءات النباتية والثلجية الكثيفة).
- (2) المناطق الصغيرة المساحة.
- (3) المناطق الطبوغرافية الوعرة.
- (4) معدّلات التشوهات الأرضية العالية.
- (5) التغييرات (الإحداثيات) الكبيرة من صنع الإنسان في سطح الأرض.
- (6) العدد غير الكافي من صور الرادار.

ومن العوائق الأخرى ظاهرتا الاستلقاء (Layover)، والظل (Shadow) المصاحبتان لصور رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية (فقرة (7-6-4) لمزيد من التفاصيل)؛ ويمكن التغلب على هاتين الظاهرتين من خلال دمج صور المدارات الصاعدة (Ascending Orbits) والهابطة (Descending Orbits) لنفس المنطقة؛ فعلى سبيل المثال، قمر الرادار الأوربي (ERS) غير قادر على تصوير حوالي 30٪ من مساحة منطقة جبلية في المدار الهابط، بينما تنخفض هذه المساحة إلى 7٪ عند دمج المدار الهابط مع المدار الصاعد.

ومن العوائق الأخرى (كذلك) أن تقنية قياس تداخل موجات رادار فتحة الإغلاق الاصطناعية تُحدّد الإزاحة في سطح الأرض في اتجاه خط النظر لشعاع الرادار (Line of Sight Direction of Radar)

(Beam)، وهذا يعني أنه لا يمكن قياس إلا مُركبة واحدة فقط للتشوه باستخدام صورة تداخل مفردة؛ ويمكن الحد من هذه المشكلة باستخدام عدة مسارات للقمر بزوايا نظر مختلفة للهوائي للحصول على المركبات (الاتجاهات) الأخرى للإزاحات.



الفصل الثامن |

الاستشعار عن بعد الإيجابي بالـ(لايدار)

LIDAR Sensing

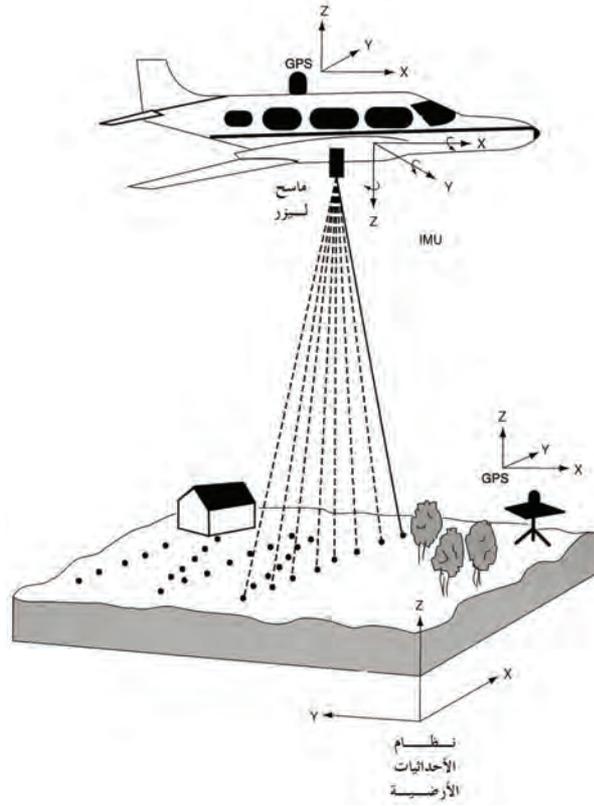
كلمة ”لايدار“ (LIDAR) اختصار لعبارة إنجليزية مكونة من عدة كلمات هي (Light Detection And Ranging)، وهو نظام استشعار عن بعد إيجابي (Active) يعتمد على ضوء الليزر (Laser) في قياس ارتفاع المعالم والتضاريس.

والليزر اختصار لعبارة (Light Amplification by Stimulated Emission Radiation)، وهو في نظام الـ(لايدار) عبارة عن أشعة دقيقة التوجيه ذات طاقة عالية مستخلصة من نطاقات الأشعة المرئية (Visible)، ونطاقات الأشعة تحت الحمراء (Infra Red-IR) من الطيف الكهرومغناطيسي.

وتعتمد تقنية الـ(لايدار) في قياس الارتفاع على إرسال نبضات ليزر (من الطائرة، مثلاً) بتوقيتات دقيقة باتجاه سطح الأرض (المعالم المختلفة)، وقياس الزمن من إرسال النبضة وحتى عودتها منعكسة من سطح الأرض، ثم حساب المسافة بين المستشعر وسطح الأرض من خلال الزمن وسرعة نبضة الليزر (سرعة الضوء)، ومن ثم ترجمتها إلى ارتفاعات؛ والتقنية المستخدمة في نظام الـ(لايدار) تشابه في هذا الجانب تقنية الرادار.

تعود بداية استخدام أنظمة الـ(لايدار) لتحديد الارتفاعات إلى نهاية السبعينات. فكانت أنظمة الـ(لايدار) الأولى تقيس ارتفاعات سطح الأرض تحت مسار الطائرة مباشرة، ولم تكن تحمل مرايا للقياسات الجانبية، ولا أجهزة لتحديد المكان الدقيق للطائرة (نظام تحديد المواقع الكوني GPS) أثناء جمع المعلومات وتحديد التوجيه الزاوي لجهاز الاستشعار (وحدة قياس القصور الذاتي -Inertial Measurement Unit-IMU)، إضافة إلى أنها كانت عالية التكلفة، وليست ذات فاعلية اقتصادية لمسح مناطق واسعة؛ ولم تدرج تقنية الـ(لايدار) كنظام استشعار عن بعد إلا في وقت متأخر، وذلك بعد التطورات الكبيرة في أجهزة قياس القصور الذاتي (IMU)، وأجهزة نظام تحديد المواقع الكوني.

يشتمل نظام الاستشعار عن بعد بالـ(لايدار) على طائرة مسح جوي مزودة بنظام تحديد المواقع الكونية (لتحديد الموقع ثلاثي الأبعاد للمستشعر)، ووحدة قياس القصور الذاتي، وجهاز بث نبضات ليزر سريع (15000 نبضة/ثانية)، وساعة توقيت دقيقة جداً، وجهاز حاسب آلي، ووحدة تخزين بيانات (شكل 8-1).



شكل (8-1) مكونات نظام الاستشعار عن بعد الجوي بالـ(لايدار). المصدر: [1].

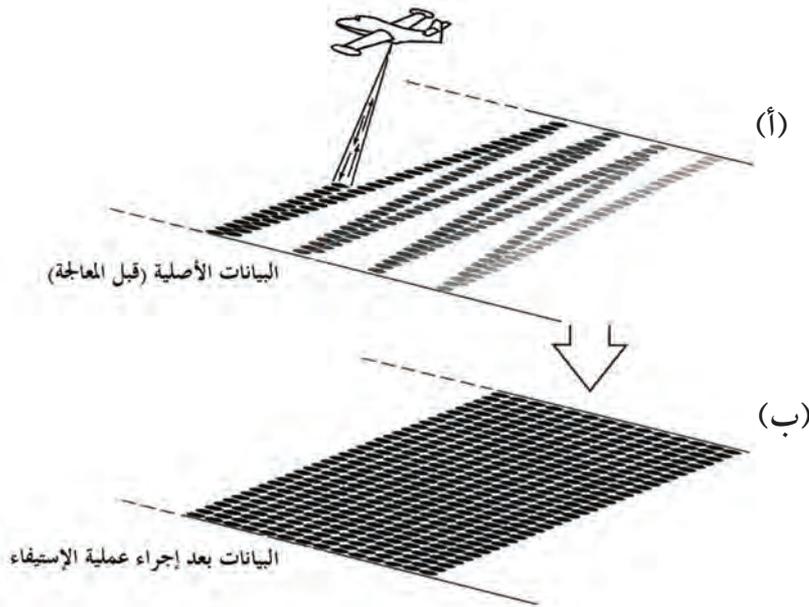
تستخدم أنظمة الاستشعار عن بعد بالـ(لايدار) مرآيا متأرجحة (Oscillating Mirrors) سريعة لإرسال نبضات أشعة الليزر على أجناب مسار الطائرة (Across-Track)، وتسجيل العائد منها لآلاف النقاط على سطح الأرض. الناتج من هذه العملية عبارة عن مصفوفة (مثل الصورة) من النقاط تمثل الاختلافات في الارتفاعات للمنطقة المسوحة، وكل نقطة منها تسمى (Posting)، وهذه النقاط موزعة بشكل غير منتظم؛ ولذلك فهي تخضع لعملية استيفاء (Interpolation) للحصول على شبكة منتظمة (Regular Grid) تمثل سطح الأرض (شكل (8-2)).

بيانات الـ(لايدار) عبارة عن أعداد ضخمة من النقاط ثلاثية الأبعاد (X,Y,Z)، ويعتمد عددها على تعقيد طبيعة المنطقة المسوحة (ارتفاعات النباتات، تغيرات التضاريس، إلخ)؛ وفي الحالة المثالية، يحتاج كل 1 كلم² من المناطق الحضرية إلى 77000 نقطة، في حين يحتاج كل 1 كلم² من المناطق المفتوحة التي تحتوي على أشجار طويلة إلى 135000 نقطة.

وتختلف درجة وضوح (تفاصيل) صورة الـ(لايدار) من نظام إلى آخر، حيث يعتمد ذلك على تصميم النظام وتشغيله، شاملاً ذلك ارتفاع الطائرة، وانفراج شعاع الليزر (Beam Divergence)؛ فهناك أنظمة تسمى "بصمة قدم صغيرة" (Small Footprint) قادرة على جمع بيانات بدرجة وضوح عالية تتراوح بين 0.5 قدم و 2.0 قدم،

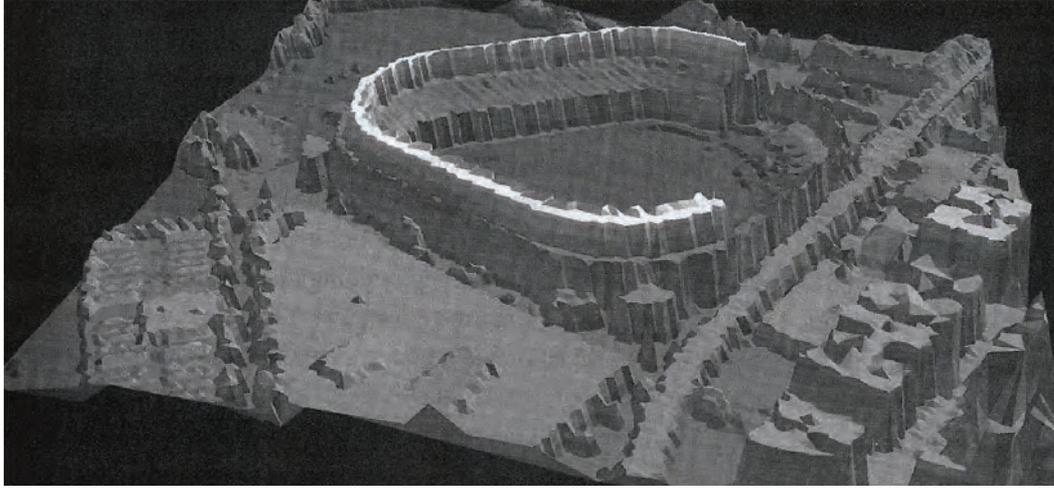
بينما هناك أنظمة أخرى تقتصر قدرتها على جمع بيانات بدرجة وضوح منخفضة قدرها 5 أقدام أو أكبر.

من مميزات المسح بالـ(لايدار) استخدامها مكملاً أو بديلاً لطرق المسح الجوي التقليدي في عمل الخرائط، فالـ(لايدار) في هذا الجانب يستطيع جمع بيانات التضاريس للمنحدرات الشديدة، والمناطق الواقعة في الظل، والمناطق التي يصعب الوصول إليها (كالمناطق الطينية الواسعة). ومن مميزات استخدام الـ(لايدار) في المناطق الحضرية أن العائد من نبضات الليزر يساهم في قياس ارتفاعات الأشجار، وأسطح المنازل، وأية معالم غير محجوبة عن أشعة الليزر؛ ولذلك فإن هذه البيانات بعد التقاطها ومعالجتها تفيد في إنتاج الصور المصححة عمودياً (ORTHO)، وخطوط المناسيب الطبوغرافية (Topographic Contours)، والأعماق البحرية (Bathymetry) القريبة من الشواطئ، وبيانات الارتفاعات الرقمية (DEM)، ورسم المعالم (Feature Extraction).



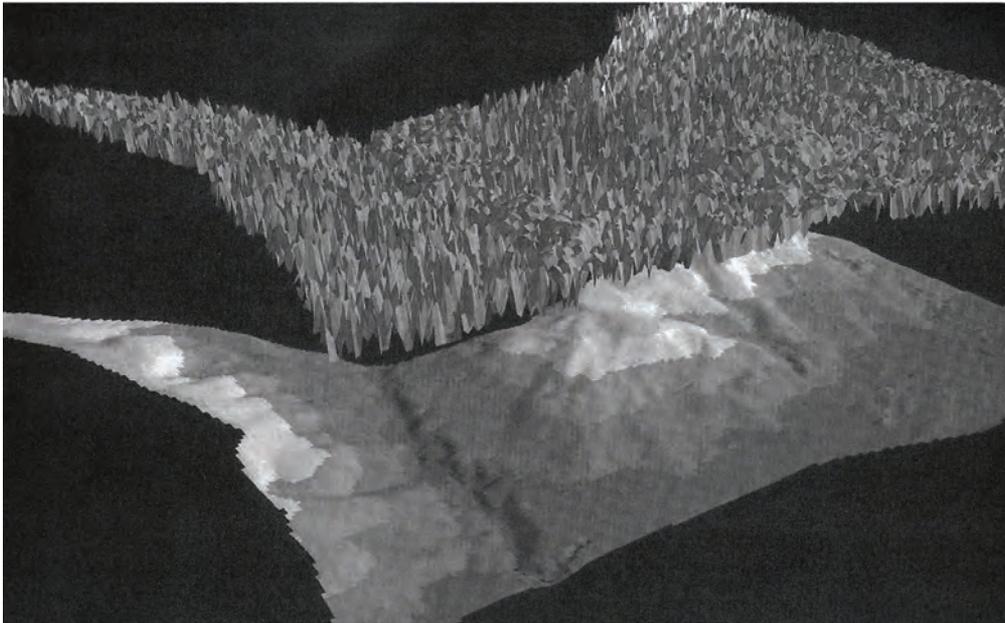
شكل (8-2) جمع بيانات الـ(لايدار). (أ) طريقة جمع البيانات بواسطة مستشعر الـ(لايدار) المحمول جواً، ويلاحظ التوزيع غير المنتظم للنقاط. (ب) مصفوفة منتظمة من النقاط بعد إجراء عملية الاستيفاء. المصدر: [3].

ومن التطبيقات الأخرى المستخدمة للـ(لايدار) في المناطق الحضرية تحديد كثافة المباني، وتخطيط الطرق السريعة، وتخطيط شبكات الأنابيب، وتصميم أنظمة الاتصالات اللاسلكية (شكل 8-3). وإضافة إلى التطبيقات الشائعة الاستخدام للـ(لايدار) التي ذكرت آنفاً، فإنه يستخدم أيضاً (وهو مدار بحث في الآونة الأخيرة) في تقييم صفات الأجزاء الحضرية (Canopy Attributes) للأشجار، شاملاً ذلك تحديد قطر تاج الشجرة، وكثافة الغطاء الحضرى (Canopy Closure)، وبعض الخصائص الفيزيائية الحيوية للأشجار.

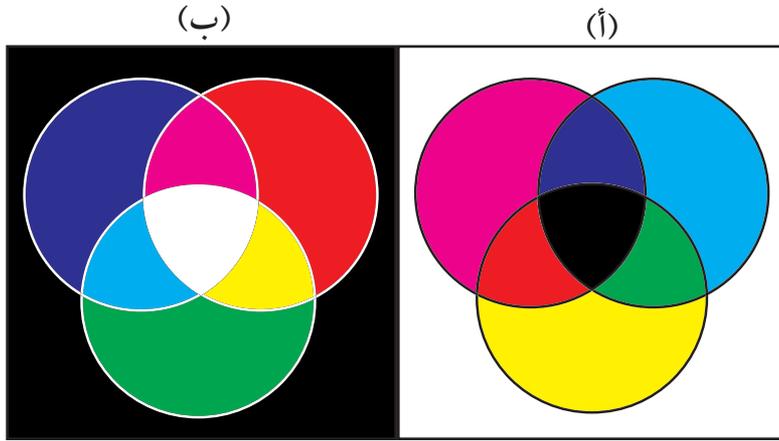


شكل (3-8) بيانات (لايدار) لملاعب رياضي وما حوله من الخدمات في مدينة نيويورك. جمعت البيانات من على ارتفاع 2500 م، ودرجة وضوح 4 م، ودقة مكانية رأسية 11 م. المصدر: [3].

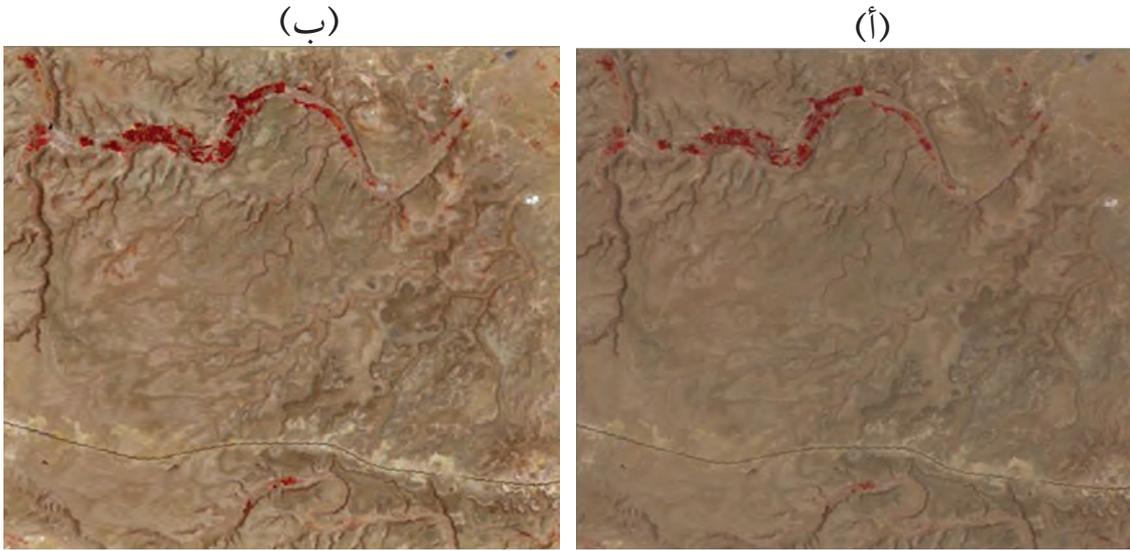
نظام الـ (لايدار) من المستشعرات الفريدة التي تُفَرِّق بين طبقات صور متعددة؛ لذلك يمكن - بعد جمع بيانات الـ (لايدار) - فصلُ العائد من الإشارات فوق مستوى (ارتفاع) معين من العائد من الإشارات تحت هذا المستوى. ويترجم هذا النوع من الفصل في عملية فصل (ترشيح) العائد من سطح الأرض (الممثلة بسطح التضاريس) عن العائد من الغطاء النباتي، أو الصناعي فوق سطح الأرض (شكل 4-8).



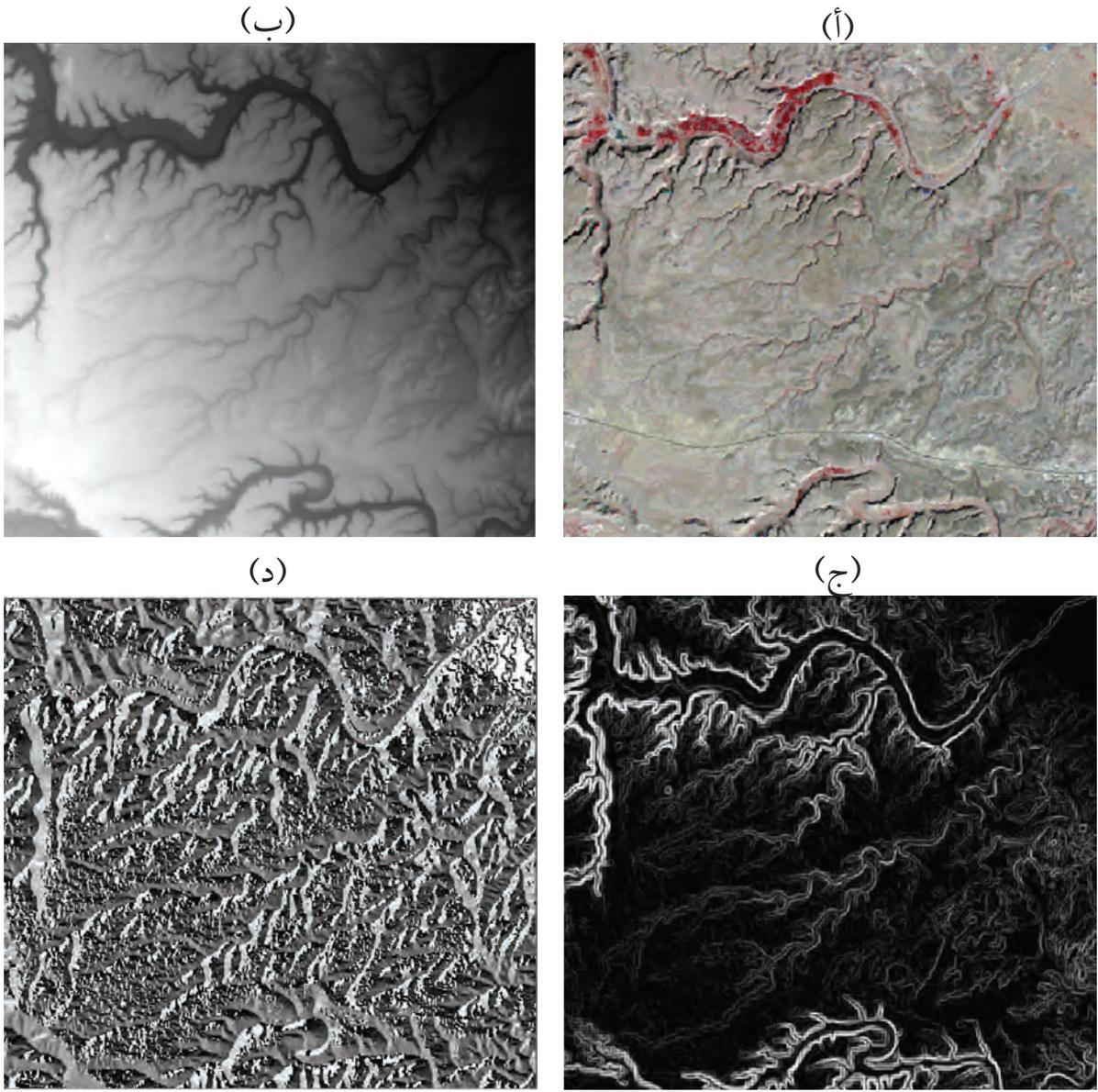
شكل (4-8) صورة (لايدار) تمثل تضاريس سطح الأرض الطبيعية، وفوقها طبقة فصلت عنها تمثل المعالم على هذا السطح. جمعت البيانات من ارتفاع 12000 قدم بدرجة تفاصيل (وضوح) 15 قدم، ودقة مكانية رأسية تقارب 14 بوصة. المصدر: [3].



شريحة (1) مفهوم خلط الألوان. (أ) خلط الألوان الأساسية المختزلة. (ب) خلط الألوان الأساسية المضافة. المصدر: [1]. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (1-2-1).



شريحة (2) التصحيح لتأثيرات الغلاف الجوي بالطريقة المحسنة لطرح الأجسام المظلمة (DOS). (أ) صورة للقمر الفرنسي (سبوت 4) قبل التصحيح. (ب) نفس الصورة بعد التصحيح. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (4-2-1-2).



شريحة (3) تهيئة بيانات الارتفاعات الرقمية، وميول التضاريس، واتجاهات هذه الميول قبل التصحيح الطبوغرافي للصورة الفضائية. تتطلب عملية التهيئة تطابق هذه البيانات مع الصورة الفضائية بدقة في المرجع الجغرافي، وفي مساحة التغطية، ومقاس الخلية. (أ) صورة (سبوت) الفضائية المطلوب تصحيحها لنفس المنطقة المعروضة في الشريحة (2) التي تضم مدينتي حرملاء، وملهم على بعد 70 كلم شمال غرب مدينة الرياض. (ب) نموذج الارتفاعات الرقمية (DEM) لنفس المنطقة. (ج) صورة لميول التضاريس (Slope) تم إنتاجها من نموذج الارتفاعات الرقمية باستخدام برنامج معالجة الصور "إيرداس" (Erdas). (د) صورة لاتجاهات ميول التضاريس (Aspect) تم إنتاجها باستخدام نفس البرنامج. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (2-1-3).

(أ)



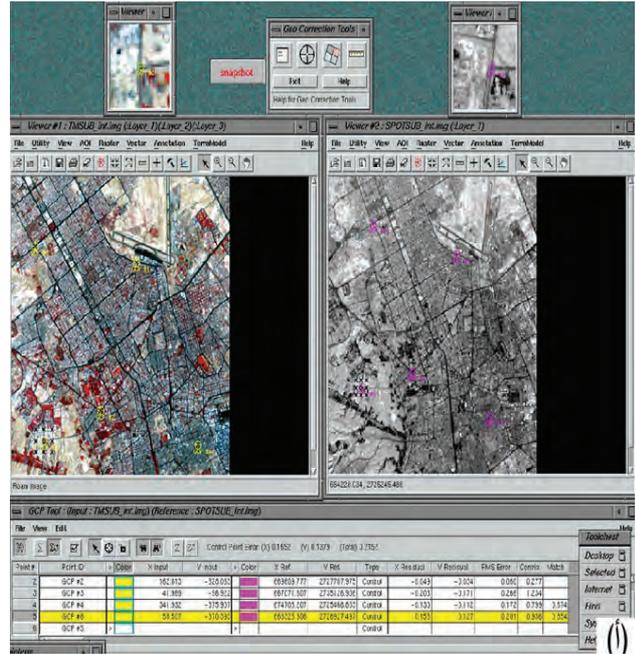
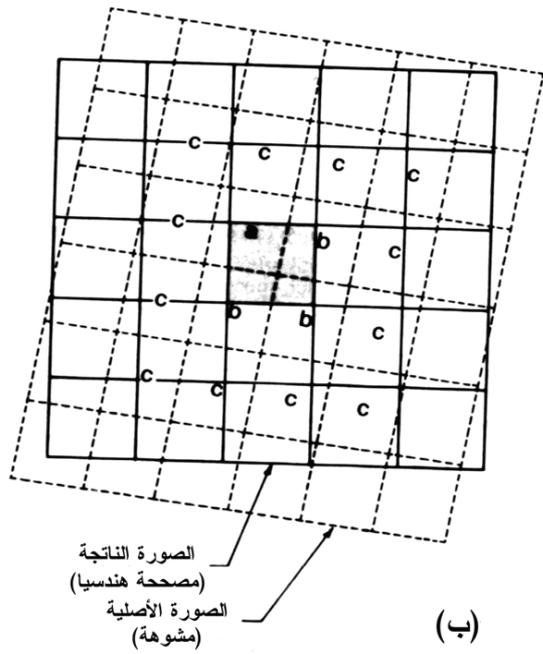
شريحة (4) تأثير درجة وضوح (Resolution) نموذج الارتفاعات الرقمية على نتيجة التصحيح لتأثير طبوغرافية الأرض. (أ) صورة للقمر الفرنسي (سبوت) المعروضة في الشريحة (3أ) قبل التصحيح. (ب) نفس الصورة بعد التصحيح باستخدام نموذج (مينارت) ونموذج الارتفاعات الرقمية ذو المستوى الأول (DEM Level-1) بدرجة وضوح 100 م. (ج) نفس الصورة بعد التصحيح بنموذج (مينارت) باستخدام نموذج الارتفاعات الرقمية ذو المستوى الثاني (DEM Level-2) بدرجة وضوح 30 م. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (2-1-3).

(ج)

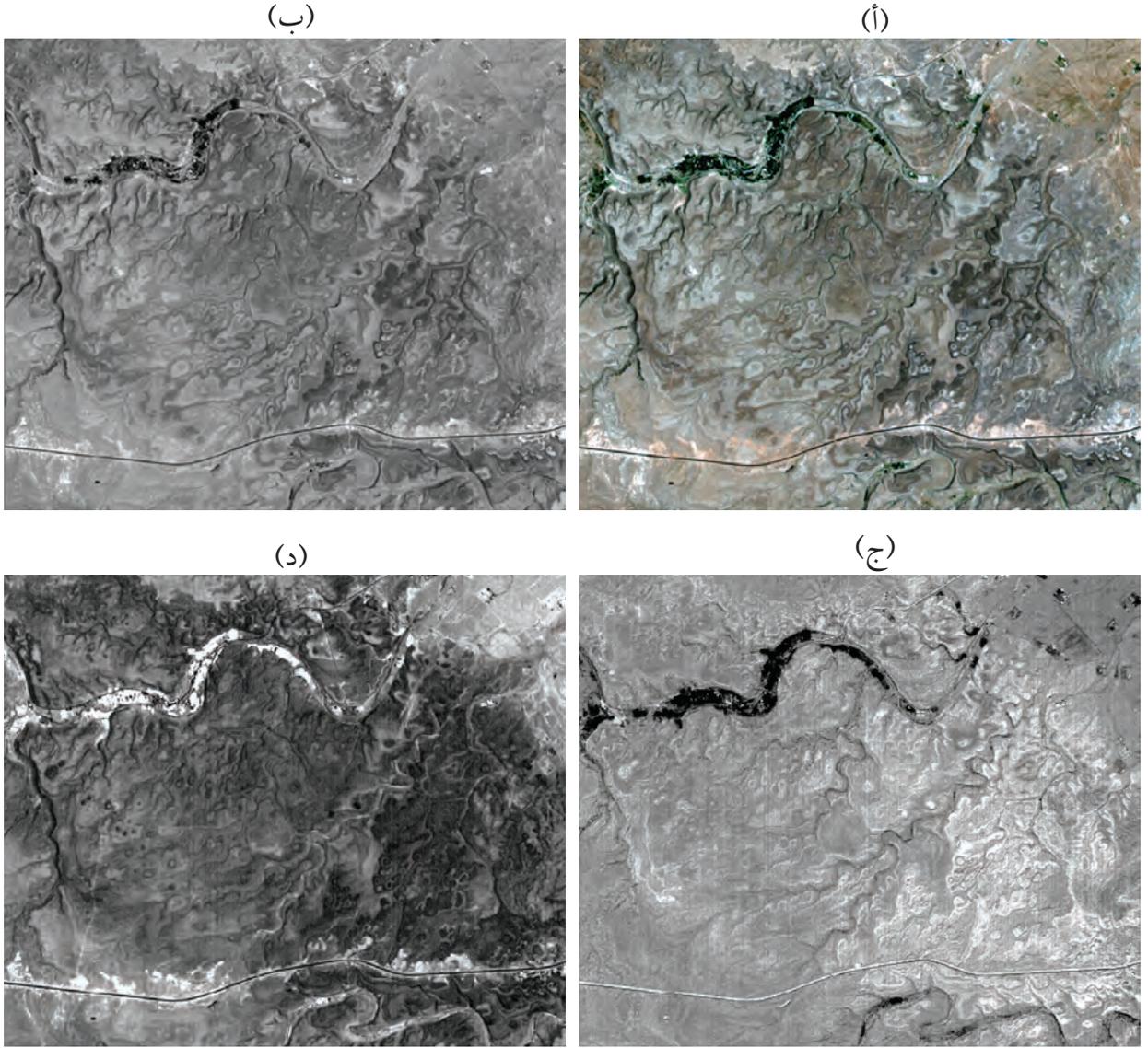


(ب)

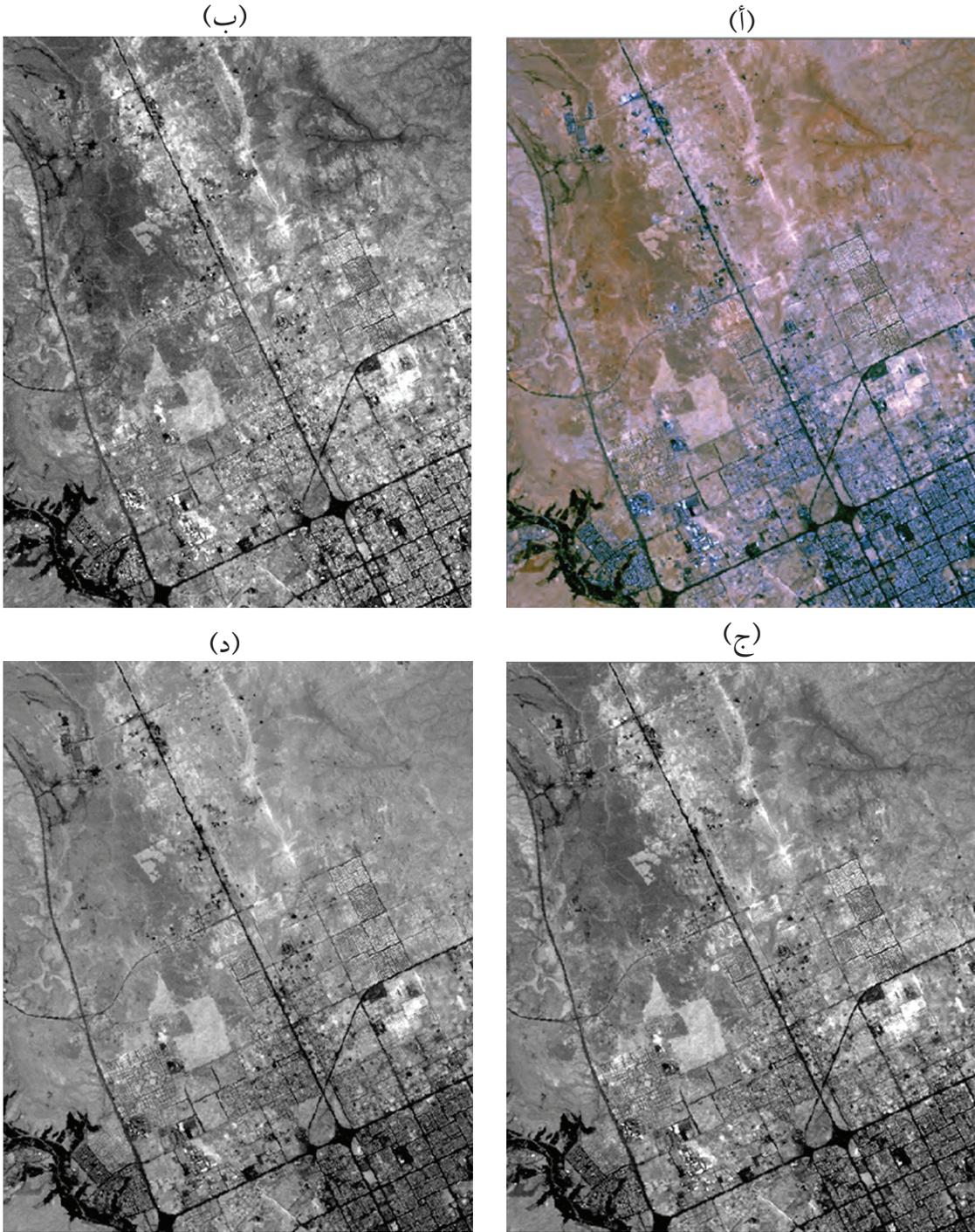




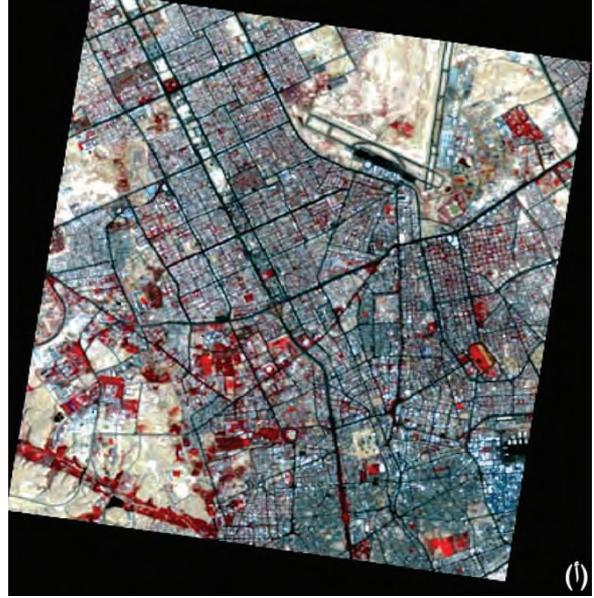
شريحة (5) مبدأ التصحيح الهندسي. (أ) التصحيح الهندسي باستخدام برنامج "إيرداس" (Erdas) لصورة (TM) ملونة لجزء من مدينة الرياض باستخدام نقاط ضبط من صورة أحادية الطيف (Panchromatic) للقمر الفرنسي (سبوت). (ب) مصفوفة صورة مصححة هندسياً مركبة على مصفوفة الصورة قبل تصحيحها (المشوهة). لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (2-2-1).



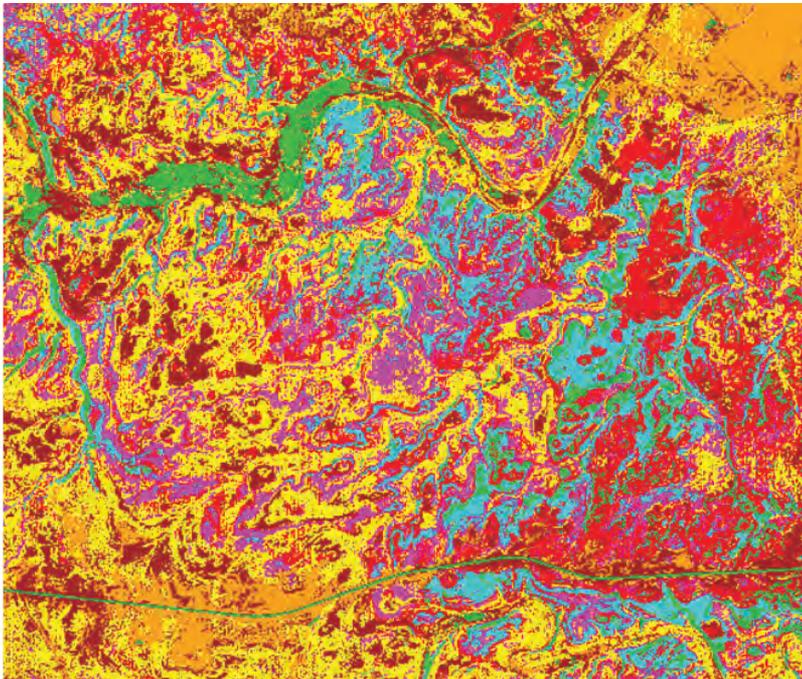
شريحة (6) التحويل من الفراغ القياسي للألوان الأساسية إلى فراغ الكثافة، واللون، والتشبع. (أ) صورة (سبوت) بعد تحويلها إلى ألوان طبيعية (Natural Colours) باستخدام نطاقات تحت الحمراء القريبة، والأحمر، والأخضر. (ب) صورة مُركبة الكثافة (Intinsity) المستخلصة منها. (ج) صورة مُركبة اللون (Hue). (د) صورة مُركبة التشبع (Saturation). لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (4-4).



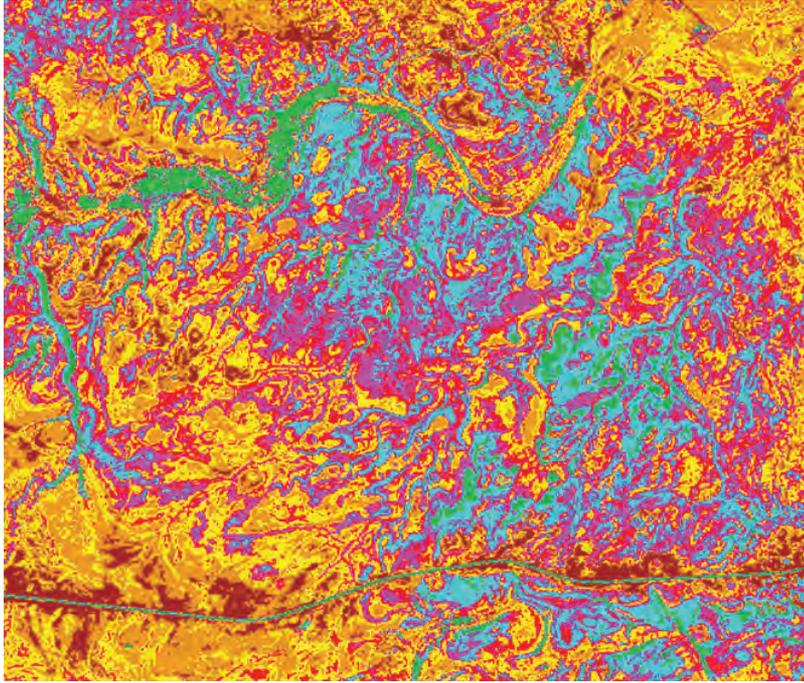
شريحة (7) مثال توضيحي للتشابه أو التكرار في المعلومات (المحتوى الإشعاعي) بين نطاقات الأشعة المرئية الثلاثة لصورة (TM) لجزء من شمال غرب مدينة الرياض. (أ) صورة ملونة مشكلة من النطاقات المرئية الثلاثة. (ب) صورة للنطاق الأزرق. (ج) صورة للنطاق الأخضر. (د) صورة للنطاق الأحمر. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (4-5).



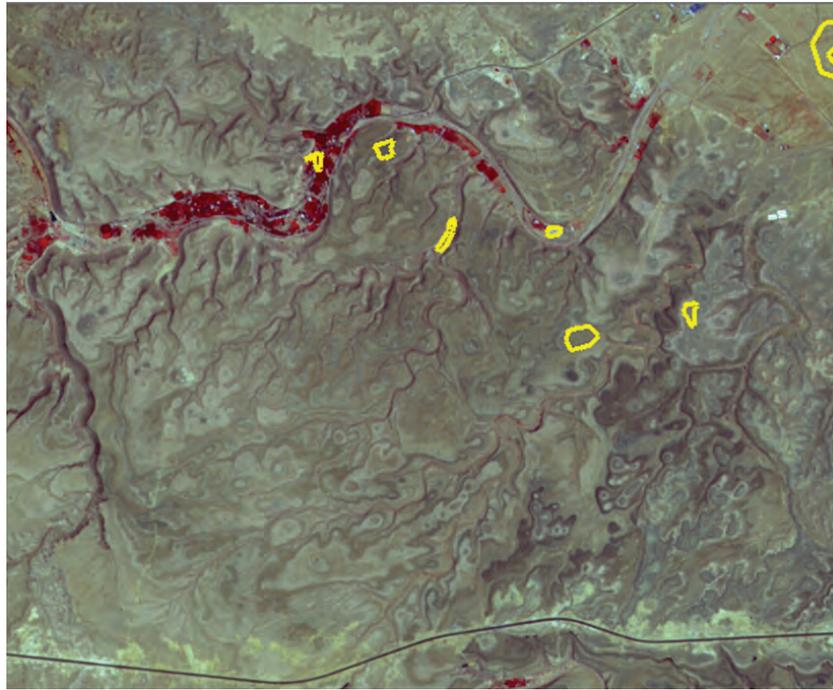
شريحة (8) عملية دمج بيانات الصور (Image Data Fusion). (أ) صورة (TM) متعددة النطاقات (الأخضر، والأحمر، وتحت الحمراء القريبة) للقمر (لاندسات 5) بألوان زائفة لجزء من مدينة الرياض. (ب) صورة أحادية الطيف للقمر (سبوت 4) لنفس المنطقة. (ج) الصورة الملونة (بألوان حقيقية) الناتجة من عملية دمج دقة الوضوح بين الصورتين. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (4-6-1-1).



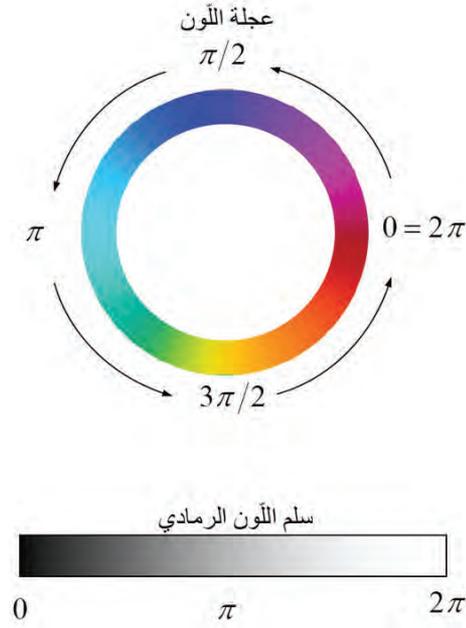
شريحة (9) مثال توضيحي لعملية التصنيف المراقب (Supervised Classification). (أ) صورة (سيوت) لمنطقة تضم مدينتي حريملاء، وملهم شمال غرب مدينة الرياض. (ب) نفس الصورة بعد تصنيفها بالتصنيف المراقب. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (5-2-1).



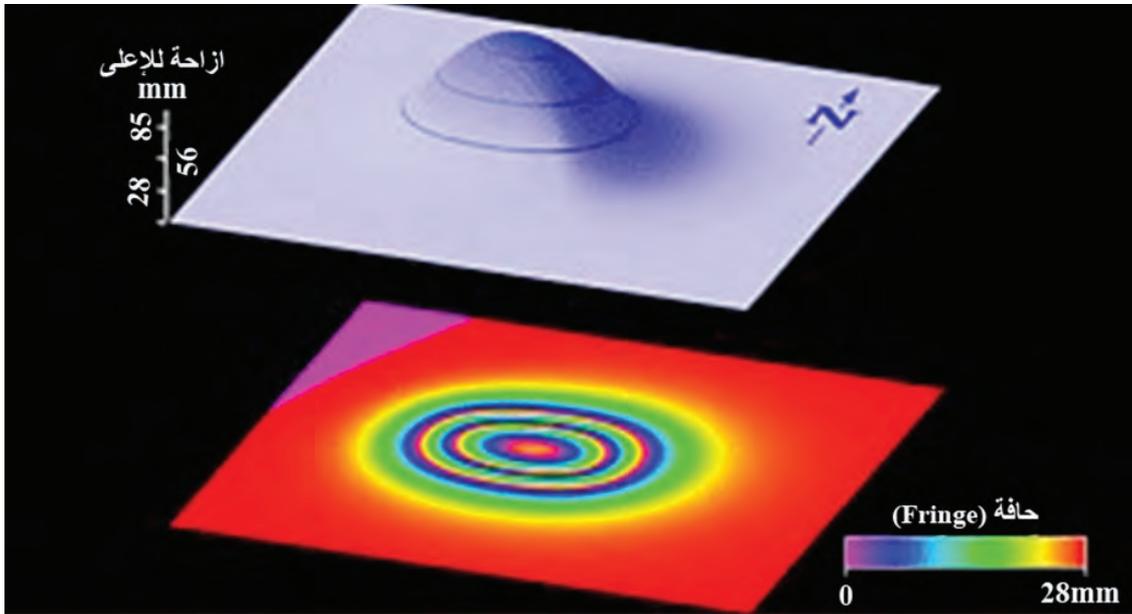
شريحة (10) مثال توضيحي لعملية تصنيف غير مراقب (Unsupervised Classification) لنفس الصورة المعروضة في الشريحة (9أ). لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (5-2-1).



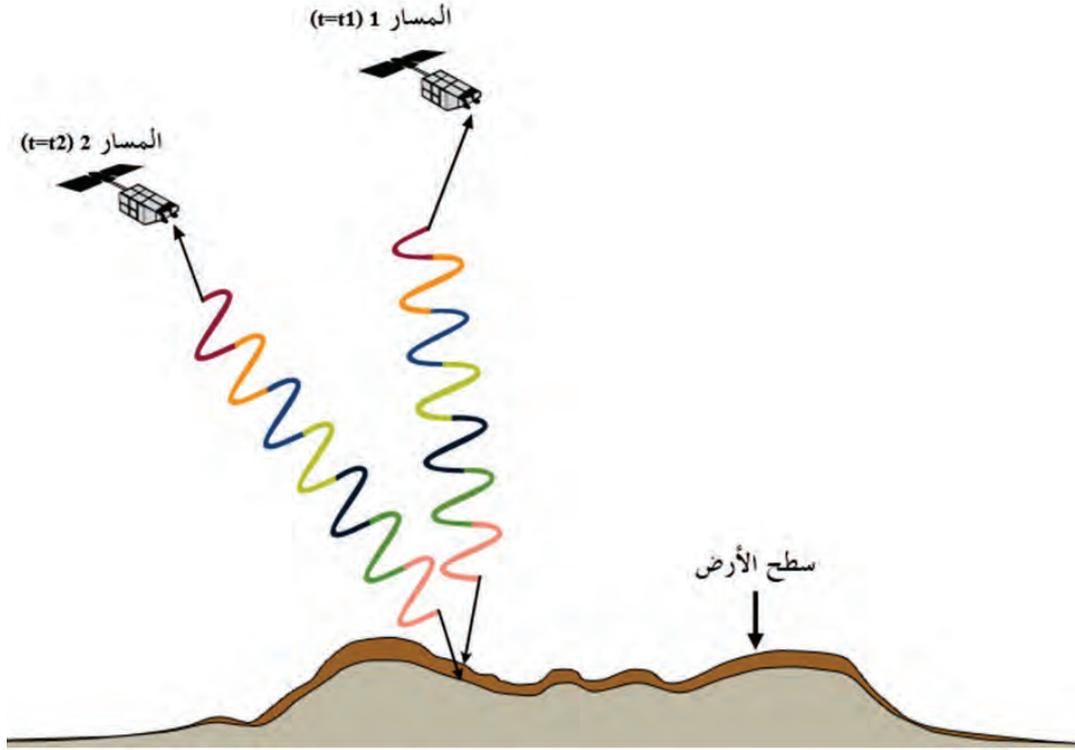
شريحة (11) مزلعات عينات التدريب كما تظهر على شاشة العرض أثناء مرحلة التدريب. هذه العينات هي التي استخدمت في عملية التصنيف المراقب لصورة (سبوت) في الشريحة (9أ). لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (5-2-1-1).



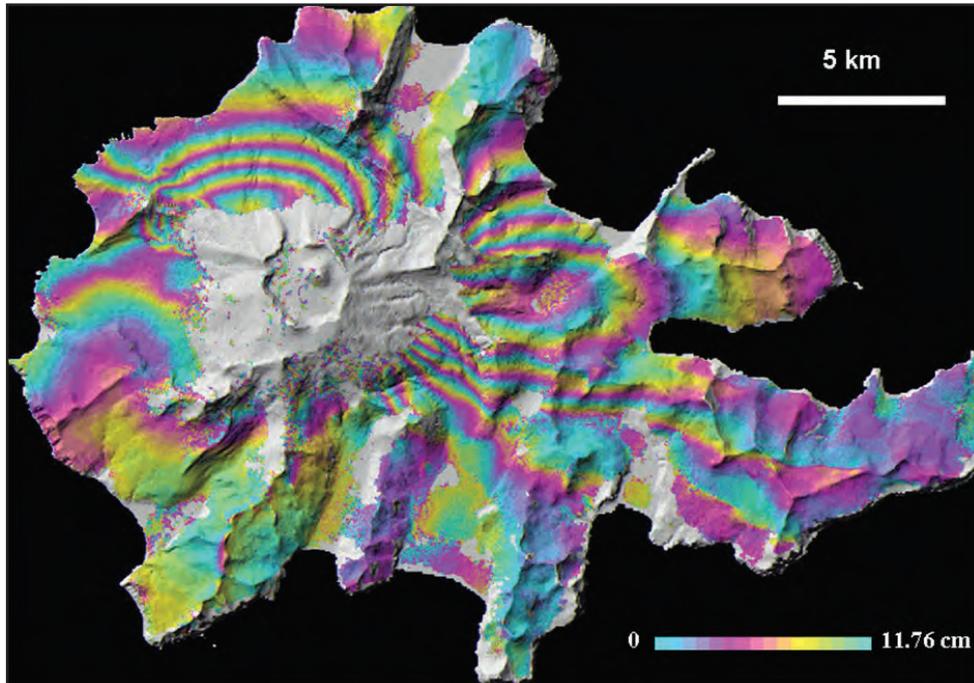
شريحة (12) تمثيل تصويري لطور الموجات. المصدر: [14]. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (7-8).



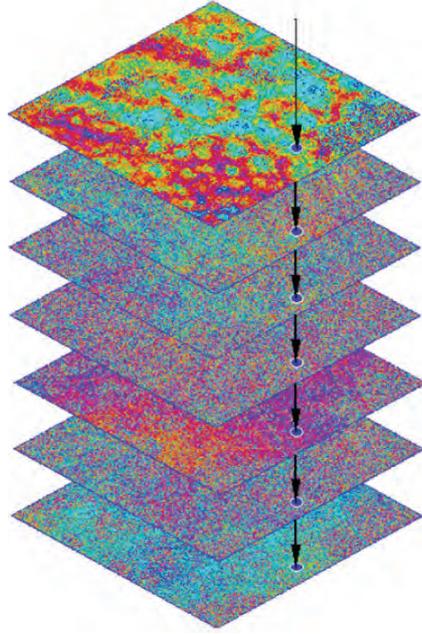
شريحة (13) مثال توضيحي لكيفية تمثيل الإزاحة التي تحدث لسطح الأرض في صورة التداخل (Interferogram). تُمثَّل الإزاحة نصف الكروية (على شكل قبة) في هذا المثال التي تحدث لسطح الأرض على شكل حواف دائرية ملونة (متدرجة من البنفسجي إلى الأحمر) متكررة النمط (Repeated Fringes). ينتج من الإزاحة في سطح الأرض إلى الأعلى بمقدار 10 سم ثلاث حواف للإزاحة، تمثل كل حافة منها إزاحة قدرها 2.8 سم (نصف الطول الموجي المستخدم في قمر الرادار الأوربي "إي آر إس" (ERS)). المصدر: [15]. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (7-8).



شريحة (14) رسم توضيحي يمثل مساهمة حساب الفرق في طور الموجات في حساب التغير (الإزاحة) في ارتفاع التضاريس بدقة تصل إلى بضعة أجزاء من الطول الموجي. المصدر: [15]. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (7-8-1-1).



شريحة (15) صورة تداخل (Interferogram) مُنتجة من صور قمر الرادار الياباني "جى إي آر أس" (JERS) تكسو صورة مجسمة تمثل التشوهات الرأسية في سطح الأرض لجزيرة "أكوتان" (Akutan Island) التي حدثت في الفترة بين 1994م - 1997م، ويلاحظ أن كل حافة تمثل إزاحة (تشوه) في سطح الأرض مقداره نصف الطول الموجي المستخدم في قمر الرادار الياباني (23.52 سم). المصدر: [15]. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (7-8-1-1).



شريحة (16) قياس التداخل باستخدام العواكس الدائمة (PSI) يعتمد على دراسة نقاط ثابتة الانعكاس (Persistent Scatters) في سلسلة متراكمة من صور التداخل (Interferograms). المصدر: [14]. لمزيد من التفاصيل، ارجع إلى الفقرة (2-1-8-7).

Alomran, A., 1994. Evaluation of Using Probability Values and a Third Dimension in the Filter Window on Smoothing Classified Image, *unpublished manuscript*. College of Engineering, University of Wisconsin–Madison, USA.

Alomran, A. I. and McCullagh, M. J., 2008a. Evaluation of adequacy of DEM level–1 as an alternative to level–2: in a context of a case study for radiometric normalization of desert bare soil in Saudi Arabia. *Proceedings of SPIE Europe Remote Sensing*, Cardiff, Wales, UK, Volume 7110.

Alomran, A. I. and McCullagh, M. J., 2008b. Towards new methodology for improvement of topographic and anisotropic correction of desert bare soil. *Proceedings of SPIE Europe Remote Sensing*, Cardiff, Wales, UK, Volume 7110.

Alomran, A. I. and McCullagh, M. J., 2009. Can DEM level–1 Adequately replace level–2 for radiometric correction of satellite imagery for land cover mapping of Saudi Arabia. *Proceedings of the 30th Asian conference on Remote Sensing*, Beijing, China.

Alomran, Ali. I. and McCullagh, M. J., 2010 Assessment of adequacy of DEM level–1 as a substitute for DEM level–2 for radiometric correction of satellite imagery for national land cover mapping of Saudi Arabia. *Proceedings of the 15th Australian Remote Sensing & Photogrammetry conference*, Alice Springs, Australia.

Barker, J. L., and Gunther. F. L., 1983. Landsat–4 sensor performance. *Proceedings of the Eighth W. T. Pecora Memorial Remote Sensing Symposium, 'Land Remote /sensing Advances for the Eighties'*, Sioux Falls. SD: US Geological Survey, 46–74.

Barnsley, M. J., Allison, D. A. and Lewis, P., 1997a. On the information content of multiple–view–

- angle (MVA) images. *International Journal of Remote Sensing*, 18(9), 1937-1960.
- Barnsley, M. J., Lewis, P., Sutherland, M. and Muller, J-P., 1997b. Estimating land surface albedo in the HAPEX-Sahel southern super-site: Inversion of two BRDF models against multiple angle ASAS images. *Journal of Hydrology*, 749-778.
- Beasley, D.B. and Huggins, L.F., 1982. *ANSWERS (Aerial nonpoint source watershed environmental response simulation): User's manual*. U.S. EPA-905/9-82-001. Chicago, IL.
- Berk, A., Bernstein, L. S., Anderson, G. P., Acharya, P. K., Robertson, D. C., Chetwynd, J. H. and Adler-Golden, S. M., 1998. MODTRAN cloud and multiple scattering upgrades with application to AVIRIS, 1998. *Remote Sensing of Environment*, 65, 367-375.
- Campbell, J. B., 2002. *Introduction to Remote Sensing*. 3rd ed. New York: The Guilford Press, 620 p.
- Chandrasekhar, S., 1960. *Radiative Transfer*. New York: Dover Publications Inc., 393 p.
- Chavez, P.S., 1988, An improved dark-object subtraction technique for atmospheric scattering correction of multispectral data. *Remote Sensing of Environment*, 24, 459-479.
- Chavez, P., 1989. Radiometric calibration of Landsat Thematic Mapper multispectral images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 55 (9), 1285-1294.
- Chavez, P., 1996. Image-based atmospheric corrections-revisited and improved. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036.
- Chen, J. M. and Cihlar, J., 1997. A hotspot function in a simple bidirectional reflectance model for satellite applications. *Journal of Geophysical Research*, 25, 907-913.
- Chen, F., Muramoto, K., and Kubo, M., 2001, Improved topographic correction for satellite imagery. *IEICE Transactions on Information and Systems*, E84-D 12:1820-1827.
- Chopping, M. J., 1998. *Linear Semi-Empirical Kernel-Driven Bidirectional Reflectance Distribution Function Models in Monitoring Grassland from Space*. PhD thesis, University of Nottingham.
- Cicone, R., and Malila, W., 1977, Investigation of techniques for inventorying forested regions. *Vol. II. Forestry Information System Requirements and Joint Use of Remotely Sensed and Ancillary Data. Final Report NASA-CR-ERIM-122700-35-F2*.
- Congalton, R. G., and Green, K., 1999. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data:*

Principles and Practices. Boca Raton: Lewis Publishers, 131 p.

Crist, E. P., 1983. The Thematic Mapper tasseled cap—a preliminary formulation. *Proceedings of Machine Processing of Remotely Sensed Data*, Purdue University, West Lafayette, Indiana: Laboratory for Applications of Remote Sensing, 357–363.

Crist, E. P., and Cicone, R. C., 1984a. A physically-based transformation of Thematic Mapper data—the TM Tasseled Cap. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 22, 256–263.

Crist, E. P., and Cicone, R. C., 1984b. Comparison of the dimensionality and features of simulated Landsat-4 MSS and TM data. *Remote Sensing of Environment*, 14, 235–246.

Crosetto, M., Arnaud, A., Duro, J., Biescas, E. and Agudo, M., 2003. Deformation monitoring using remotely sensed radar interferometric data, *Proceedings of 11th FIG Symposium on Deformation Measurements*, Santorini, 2003.

Deering, D. W., Rouse, J. W., Hass, R. H., and Schell, J. A., 1975. Measuring forage production of grazing units from Landsat MSS data. *Proceedings of the 10th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, 2, 1169–1178.

Delacourt, C., Allemand, P., Berthier, E., Raucoules, D., Casson, B., Grandjean, P., Pambrun, C and Varel, E., 2007. Remote-sensing techniques for analysing landslide kinematics: a review. *Bull. Soc. Geol. Fr.*, 178, 89–100, doi:10.2113/gssgfbull.178.2.89.

Dozier, J. and Strahler, A.H., 1983. Ground investigations in support of remote sensing. In: R. N. Colwell, ed. *Manual of Remote Sensing*, Vol. I. Falls Church, Virginia: American Society of Photogrammetry.

Dymond, J. R., Shepherd, J. D. and Qi, J., 2001. A simple physical model of vegetation reflectance for standardizing optical satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 77, 230–239.

Eastman, J. R., and Fulk, M., 1993. Long sequence time series evaluation using standardised principle components. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 59 (6), 991–996.

Eiumnoh, A., and Shrestha, R. P., 2000. Application of DEM Data to Landsat Image Classification: Evaluation in A tropical Wet-Dry Landscape of Thailand. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (3), 297–304.

EPPL, 1987. *Environmental Planning and Programming Language User's Guide*. St Paul,

- Minnesota: Minnesota state Planning Agency.
- Erdas, 1994. *Erdas Field Guide*. Atlanta, Georgia: Erdas, Inc., 628 p.
- Erdas, 1997. *Erdas Field Guide*. Atlanta, Georgia: Erdas, Inc., 600 p.
- Erdas, 2005, *Erdas Field Guide*. Atlanta, Georgia: Erdas, Inc., 744p
- Erdas, 2009. *Erdas Field Guide*. Norcross, Georgia: Erdas, Inc., 824 p.
- Evans, I. S., 1980. An integrated system for terrain analysis for slope mapping. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 36, 274– 295.
- Falkenstrom, H., and Ekstrand, S., 2002, Evaluation of IRS-1C LISS-3 satellite data for defoliation assessment on Norway spruce and Scots pine. *Remote Sensing of Environment*, 82:208– 223.
- Fiete, R. D., 1999. Image Quality and λ FN /p for remote sensing systems. *Optical Engineering* 38 (7), 1229 –1240.
- Fleming, M. D., Berkebile, J. S., and Hoffer, R. M., 1975. Computer Aided Analysis of Landsat I MSS data. *LARS Information Note* 072475.
- Fleming, M. D. and Hoffer, R. M., 1979. Machine processing of Landsat MSS data and DMA topographic data for forest cover type mapping. *LARS Technical Report* 062879, Laboratory for Applications of Remote Sensing, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- Florinsky, I. V., 1998a. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12 (1), 476 1–.
- Frank, T. D., 1988. Mapping dominant vegetation communities in the Colorado Rocky Mountain Front Range with Landsat Thematic Mapper and digital terrain data.. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (4), 1727– 1734.
- Gibson, P. J., and Power, C. H., 2000. *Introductory Remote Sensing: Digital Image Processing and Applications*. London: Routledge, 249 p.
- Gitas I.Z., and Devereux, B.J., 2006, The role of topographic correction in mapping recently burned Mediterranean forest areas from LANDSAT TM images. *International Journal of Remote Sensing*, 27(1):41 – 54.
- Heo, J., and T. W. FitzHugh, 2000. A Standardized Radiometric Normalization Method for

Change Detection Using Remotely Sensed Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66 (2), 173–181.

Holben, B., and Justice, C.O., 1980, The topographic effect on spectral response from nadir-pointing sensors. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46(9):11911200–.

Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H., 2007. Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, 112(B07407), doi:10.1029 / 2006JB004763.

Horn, B., 1981. Hill shading and reflectance map. *Proceedings of IEEE*, 69 (1), 14– 47.

Huang, C., Wylie, B., Homer, C., Yang, L., and Zylstra, G., 2002. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 ETM at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8), 1741– 1748.

Issacs, R. G., Wang, W. C., Worsham, R. D. and Goldenberg, S., 1987. Multiple scattering LOWTRAN and FASCODE models. *Applied Optics*, 26 (7), 1272– 1281.

Jensen, J. R., 1986. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. New Jersey: Prentice–Hall, 379p .

Jensen, J. R., 1996. *Introductory digital Image processing: A remote sensing perspective*. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 318 p.

Jensen, J. R., 2000. *Remote Sensing of the Environment: An earth resource perspective*. New Jersey : Prentice Hall, Inc., 544 p.

Jones, A., Settle, J. and Wyatt, B., 1988. Use of digital terrain data in the interpretation of SPOT–1 HRV multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 9 (4), 669682–.

Joyce, A. T., 1978. Procedures for gathering ground truth information for a supervised approach to computer–implemented land cover classification of Landsat–acquired Multispectral Scanner data. *NASA Reference Publication 1015*. Houston: National Aeronautics and Space Administration, 43 p.

Justice, C. O., 1978. An approximation of the relationship between selected ground properties and Landsat MSS data in an area of complex terrain in southern Italy. *Proceedings of American Society of Photogrammetry and Remote Sensing*, Fall meeting, Albuquerque, New Mexico, 303–328.

- Justice, C.O., Wharton, S.W., and Hoblen, B.N., 1981, Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect of Landsat. *International Journal of Remote Sensing*, 2:213–230.
- Itten, K.I. and Meyer, P., 1993, Geometric and radiometric correction of TM data of mountainous forested areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 31(4):764–770.
- Karnieli A., and Cierniewski, J., 2001, Inferring the roughness of desert rocky surfaces from their bidirectional reflectance data. *Advances in Space Research*, 28(1):171–176.
- Kaufman, Y., 1989. The atmospheric effect on remote sensing and its corrections. In: Asrar, G. (ed.) *Theory and Applications of Optical Remote Sensing*. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1989, 336–428.
- Kauth, R. J., and Thomas, G. S., 1976. The tasseled cap—a graphic description of the spectral–temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data*, West Lafayette, Indiana: Laboratory for Applications of Remote Sensing, 41–51.
- Kauth, R. J., Lambeck, P. F., Richardson, W., Thomas, G. S., and Pentland, A. P., 1979. Feature extraction applied to agricultural crops as seen by Landsat. *Proceedings of the Technical Session, LACIE Symposium*, Houston: National Aeronautics and Space Administration, 705–721.
- Kimes, D. S., New Comb, W. W. and Epema, G. F., 1985. Directional reflectance factor distributions for cover types of Northern Africa. *Remote Sensing of Environment*, 18, 1–19.
- Kondratyev, K. Y., 1969. *Radiation in the Atmosphere*. London: Academic Press, 912 p.
- Larsson, H., 1993. Regression for canopy cover estimation in acacia woodlands using Landsat TM, MSS, and SPOT HRV XS data. *International Journal of Remote Sensing*, 14(11), 2129–2136.
- Li, X. and Strahler, 1985. Geometric–optical modeling of a conifer forest canopy. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 23(5), 705–721.
- Liang, S., 2004. *Quantitative remote sensing of land surfaces*. Hoboken, New Jersey: Wiley and Sons, Inc., 534 p.
- Liang, S. and Strahler, A. H., 1994. Four–stream solution for atmospheric radiative transfer over non–Lambertian surface. *Applied Optics*, 33(24) 5745–5753.

- Lillesand, T.M., and R.W. Kiefer 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 721p.
- Lillesand, T. M., and R. W. Kiefer 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 724 p.
- Lu, Z., Kwoun, O. and Rykhus, R., 2007. Interferometric synthetic aperture radar (InSAR): its past, present and future. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73, 217– 221.
- Lucht, W. and Schaaf, C., 2000. *BRDF Explained*. Boston University, Department of Geography and Center for Remote Sensing Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) and Albedo Research, [online]. Available at: <URL:<http://geography.bu.edu/brdf/brdfexpl.html>> [Accessed 22 January 2003].
- Lyons, S. and Sandwell, D., 2003. Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers, and stacking. *Journal of Geophysical Research*, 108(B1), 2047– 2070.
- March, S. E., Walsh, J. L., Lee, C. T., Beck, L. R., and Hutchinson, C. F., 1992. Comparison of multi-temporal NOAA-AVHRR and SPOT-XS satellite data for mapping landcover dynamics in the West African Sahl. *International Journal of Remote Sensing*, 13 (16), 29973016–.
- Mather, P., 1999. *Computer Processing of Remotely Sensed Images*. Chichester: John Wiley & sons Ltd, 292 p.
- Miller, L. D., Naulchawee, K., and Tom, C., 1978. Analysis of the dynamics of shifting cultivation in the tropical forest of northern Thailand using landscape modelling and classification of Landsat imagery. *NASA Technical Memorandum 79545*, 20 p.
- Minnaert, M., 1941. The reciprocity principle in lunar photometry. *Astrophysical Journal*, 93 (2) , 403– 410.
- Moore, I. D., Gessler, P. E., Nielsen, G. A. and Peterson, G. A., 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 57, 443– 452.
- Okeke, F. I., 2006. InSAR Operational and Processing Steps for DEM Generation. *Proceedings of the 5th International Federation of Surveyors regional conference for Africa*, Accra, Ghana.
- Perry, C. R., and Lautenschlager, L. F., 1984. Functional equivalence of spectral vegetation indices. *Remote Sensing of Environment*, 14, 169– 182.

- Perski, Z., Wojciechowski, T. and Borkowski, A., 2010. Persistent Scatterer SAR interferometry applications on landslides in Carpathians (Southern Poland). *Acta Geodyn. Geomater.*, 7(3) (159), 1– 7.
- Pritchard, M. E., 2006. InSAR, a tool for measuring Earth's surface deformation. *Physics Today*, 68– 69.
- Richardson, A. J., and Wiegand, C. L., 1977. Distinguishing vegetation from soil background information. *Remote Sensing of Environment*, 8, 307– 312.
- Richter, R., 1997. Correction of atmospheric and topographic effects for high spatial resolution satellite imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 18 (5), 1099– 1111.
- Richter, R., 2001a. Atmospheric and topographic correction : Model ATCOR3, version 5.4 , September 2001[online]. *DLR-IB564- 03 / 01 (Report of Institute IFM)*. Available at: <URL: http://www.rese.ch/pdf/atcor3_manual_onl.pdf > [accessed 25 February 2003].
- Richter, R., 2001b. Atmospheric /topographic correction for wide FOV airborne imagery: Model ATCOR4. *Report of Institute IMF*[online]. Available at : <URL: http://www.rese.ch/pdf/atcor4_onl.pdf > [Accessed 25 June 2002].
- Richter, R., 2003. Atmospheric / topographic correction for satellite imagery: ATCOR-2 / 3 User Guide, version 5.5 [online]. *DLR-IB 564- 01 / 03 (Report of Institute IFM)*. Available at: <URL: http://www.rese.ch/pdf/atcor23_manual_onl.pdf > [Accessed 17 September 2003].
- Ritter, P., 1987. A vector-based slope and aspect generation algorithm. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 53 (8), 1109– 1111.
- Roberts, G., 2001. A review of the application of BRDF models to infer land cover parameters at regional and global scales. *Progress in Physical Geography*, 25 (4), 483– 511.
- Rouse, J. W., Hass, R. H., Schell, J. A., and Deering, D. W., 1973. Monitoring vegetation in the great plains with ERTS. *Proceedings of the 3rd ERTS Symposium*, 48– 62.
- Sabins, F. F., 1997. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*, 3rd ed. New York: W. H. Freeman and Company, 494p.
- Shanholtz, V.O., Desai, C.J., Zhang, N., Kleene, J.W. and Metz, C.D., 1990. Hydrologic /water quality modeling in a GIS environment. *ASAE Paper 903 -033*. St. Joseph, MI: ASAE.
- Sharpnack, D. and Akin, G., 1969. An algorithm for computing slope and aspect from elevations.

Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 35, 247–248.

Shary, P. A., 1995. Land surface in gravity points classification by complete system of curvatures. *Mathematical Geology*, 27, 373–390.

Shoshany, M., 1993, Roughness–Reflectance relationship of bare desert soil terrain: An empirical study. *Remote Sensing of Environment*, 45:15–27.

Skidmore, A. K., 1989. A comparison of techniques for calculating gradient and aspect from gridded digital elevation model. *International Journal of Geographical Information Systems*, 3 (4), 323–334.

Simonett, D. S., 1983. The development of and principles of remote sensing. In: Colwell, R. N. (ed.), 1983, 1–36.

Smith, G. M., and Curran, P., 1996. The signal–to–noise–ration (SNR) required for the estimation of foliar biochemical concentrations. *International Journal of Remote Sensing*, 17, 1031–1058.

Smith, J. A., Lin, T. L. and Ranson, K. J., 1980. The Lambertian assumption and Landsat data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 46, 1183–1189.

Srinivasan, R. and Engel, B., 1991. Effect of slope prediction methods on slope and erosion estimates. *American Society of Agricultural Engineers*, 7 (6), 779–783.

Stohr, C.J., and West, T.R., 1985, Terrain and look angle effects upon multispectral scanner response. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51(2):229–235.

Strahler, A. H., 1980. The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data. *Remote Sensing Environment*, 10, 135–163.

Strahler, A. H., Logan, T. L., and Bryant, N. A., 1978. improving forest classification from Landsat by incorporating topographic information. *Proceedings of the 12th International Conference on remote Sensing of Environment*, Ann Arbor, Michigan: Environmental Research Institute of Michigan, 927–942.

Takemata, K., Izumiya, T., and Kawata Y., 2000, Analysis of ADEOS / POLDER data over land surfaces. *Advances in Space Research*, 26(7):1065–1068.

Teillet, P. M., Guindon, B. and Goodenough, D. G., 1982. On the slope–aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 8 (2), 84–106.

Thomson, A. G., and Jones, 1990, Effects of topography on radiance from upland vegetation in

- North Wales. *International Journal of Remote Sensing*, 11(5):829– 840.
- Tokola, T., Sarkela, J., and Linden, V., 2001, Use of topographic correction in Landsat TM-based forest interpretation in Nepal. *International Journal of Remote Sensing*, 22(4):551– 563.
- Townshend, J. R. G., 1980. The Spatial Resolving Power of Earth Resources Satellites: A Review. *NASA Technical Memorandum 82020*, Goddard Spaceflight Center, Greenbelt, MD.
- Travis, M.R., Elsner, G.H., Iverson, W.D. and Johnson, C.G., 1975. VIEWIT: Computation of seen areas, slope, and aspect for land-use planning. *US Department of Agriculture Forest Service General Technical Report PSW11 / 1973*, 70 p Pacific Southwest Forest and Range Experimental Station, Berkeley, California, USA.
- Vermote, E, Tanre, D., Deuze, J., Herman, M., and Morcrette, J., 1997. Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35 (3), 675– 686.
- Watson, D. 1992. *Contouring: A Guide to the Analysis and Display of Spatial Data*. Tarrytown, New York: Elsevier Science.
- Wolf, P. R., and Dewitt, B. A., 2000. *Elements of Photogrammetry with Applications in GIS*. 3rd ed.. Boston: McGraw-Hill, 608 p.
- Woodham, R. J., and Lee, T. K., 1985. Photometric method for radiometric correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 11 (2), 132– 161.
- Yu, J. H., Ge, L. and Rizos, C., 2009. Digital elevation model generation from interferometric synthetic aperture radar using multi-scale method. *Proceedings of the Surveying & Spatial Sciences Institute Biennial International Conference*, Adelaide, Australia.
- Yu, J. H., Li, X., Ge, L. and Chang, H., 2010. Radargrammetry and interferometry SAR for DEM generation. *Proceedings of the 15th Australian Remote Sensing & Photogrammetry conference*, Alice Springs, Australia.
- Zevenbergen, L.W. and Thorne, C.R., 1987. Quantitative analysis of land surface topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 47– 56.
- Zhou X., Chang N. B. and Li S., 2009. Applications of SAR Interferometry in Earth and environmental Science Research. *Sensors*, 9, 18761912–.

مصادر بعض وسائل الإيضاح الواردة في الكتاب

مع وافر الشناء والشكر والتقدير لمؤلفيها ومالكيها

- [1] Lillesand, T. M., and R.W. Kiefer 2000. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 4th ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 724p.
- [2] Lillesand, T.M., and R.W. Kiefer 1987. *Remote Sensing and Image Interpretation*. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 721p.
- [3] Campbell, J. B., 2002. *Introduction to Remote Sensing*. 3rd ed. New York: The Guilford Press, 620p.
- [4] Jensen, J. R., 1986. *Introductory Digital Image Processing: A Remote Sensing Perspective*. New Jersey: Prentice-Hall, 379p.
- [5] Sabins, F. F., 1997. *Remote Sensing: Principles and Interpretation*, 3rd ed. New York: W. H. Freeman and Company, 494 p.
- [6] Mather, P., 1999. *Computer Processing of Remotely Sensed Images*. Chichester: John Wiley & sons Ltd, 292 p.
- [7] Jensen, J. R., 1996. *Introductory digital Image processing: A remote sensing perspective*. 2nd ed. New Jersey: Prentice Hall, Inc, 318 p.
- [8] Jensen, J. R., 2000. *Remote Sensing of the Environment: An earth resource perspective*. New Jersey : Prentice Hall, Inc., 544 p.
- [9] Alomran, A. I. and McCullagh, M. J., 2008. Evaluation of adequacy of DEM level-1 as an alternative to level-2: in a context of a case study for radiometric normalization of desert bare soil in Saudi Arabia. *Proceedings of SPIE Europe Remote Sensing*, Cardiff, Wales, UK, Volume 7110.

- [10] Erdas, 1994; 1997; 2005; 2009. *Erdas Field Guide*. Atlanta, Georgia: Erdas, Inc.
- [11] Gibson, P. J., and Power, C. H., 2000. *Introductory Remote Sensing: Digital Image Processing and Applications*. London: Routledge, 249p.
- [12] Huang, C., Wylie, B., Homer, C., Yang, L., and Zylstra, G., 2002. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 7 ETM at-satellite reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8), 1741– 1748.
- [13] Congalton, R. G., and Green, K., 1999. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Boca Raton: Lewis Publishers, 131 p.
- [14] German Aerospace Center (DLR), accessible at URL: <http://www.dlr.de/en/>
- [15] US Geological Survey (USGS), accessible at URL: <http://www.usgs.gov/>
- [16] Hooper, A., Segall, P. and Zebker, H., 2007. Persistent scatterer InSAR for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*, 112(B07407), doi:10.1029/2006JB004763.

