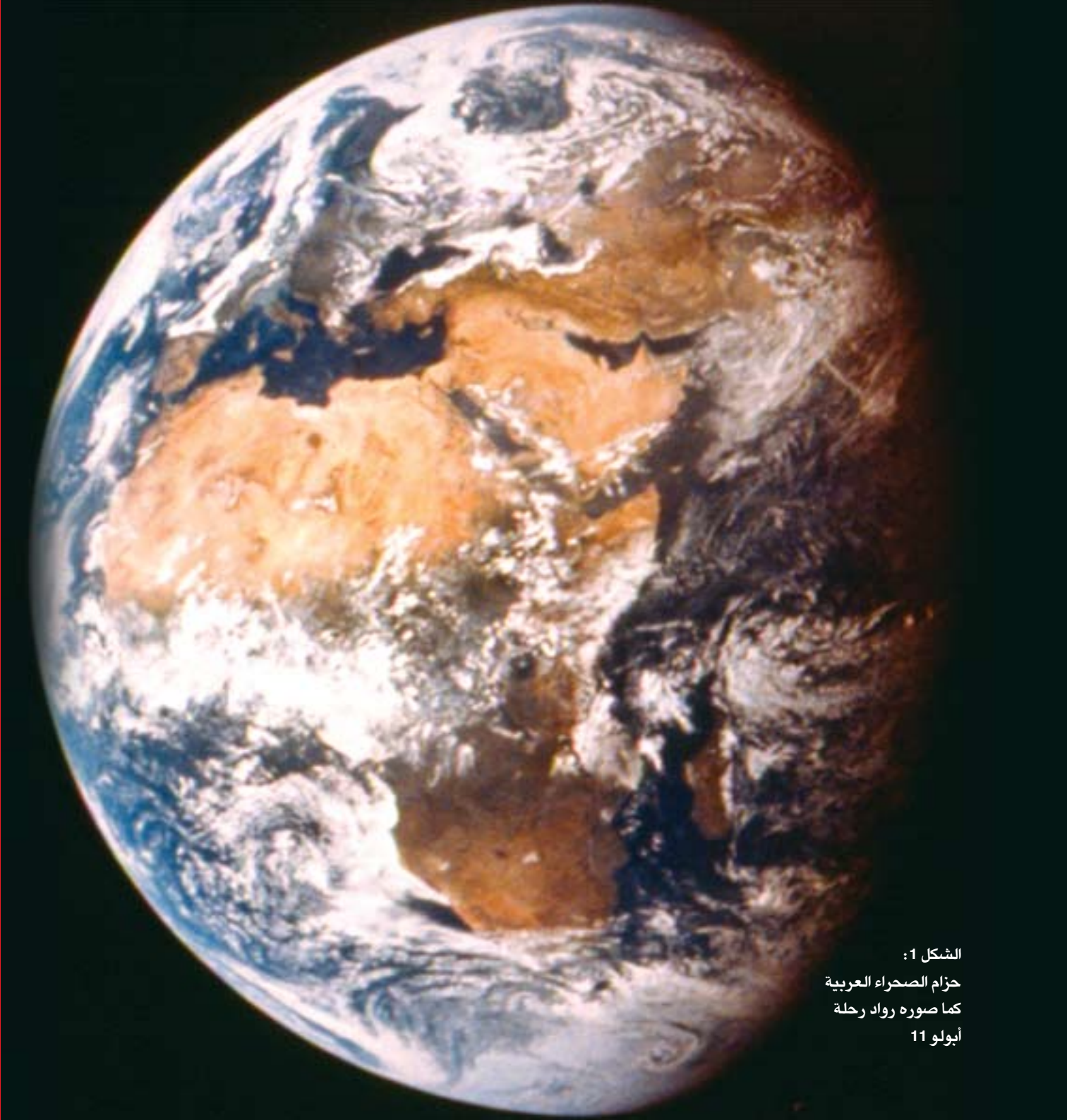


الاستشعار عن بعد لاستكشاف المياه الجوفية في العالم العربي

فاروق الباز



الشكل 1:

حزام الصحراء العربية

كما صوره رواد رحلة

أبولو 11

1. مقدمة

ميكانيكياً بمعدلات أعلى بكثير من معدل حركة المياه في مسام الصخور. وقد نتجت هذه الممارسات من غياب المعرفة ببيئة المياه الجوفية، سواء من قبل المسؤولين الرسميين أو المزارعين المحليين. وساهمت هذه الممارسات ونتائجها في شيوع الاعتقاد الخاطئ بأن موارد المياه الجوفية لا يمكن الاعتماد عليها، وأنها استنزفت في جزء كبير من العالم العربي. ولكن الواقع هو أن موارد المياه الجوفية تكون أكثر وفرة لو تم ترسيمها بدقة واستخدامها بحكمة وإدارتها بشكل سليم.

من المفيد هنا توضيح كيفية توزيع المياه على كوكب الأرض (الشكل 2). تمثل المياه المالحة في المحيطات والبحار 97% من كل المياه على الكوكب الأزرق. ولكن الأجسام المائية العذبة التي تترك أثراً ملموساً علينا تشكل نسبة ضئيلة من مخزونات المياه العذبة التي تمثل 3% من المياه على الأرض. وتحتوي الكتل الجليدية القطبية والأنهار الجليدية الجبلية على 70% من المياه العذبة. أما المياه الجوفية فتتمثل الـ30% المتبقية، وهي نسبة تزيد أكثر من 30 ضعفاً على مجموع المياه العذبة الموجودة في الأنهار والبحيرات والمستنقعات على سطح الأرض.

مثل هذه الأرقام تجعلنا نتأمل كيف تتوزع هذه الموارد المائية غير المرئية، وأين تكمن، لكي نتمكن من معرفة مواقعها وكيفية استخدامها وإدارتها بحكمة. إن المياه الجوفية في العالم العربي هي أكثر كمية وانتشاراً من الاعتقاد السائد، خاصة في الصحارى المغطاة بالرمال والبعيدة عن مراكز السكان. ومن المهم أن نعرف أن هذه المياه تجمعت وتراكمت خلال مناخات أكثر رطوبة في الماضي، ولهذا فإنها لا تتجدد حالياً، وتتوجب إدارتها بشكل مناسب لضمان استدامتها.

2. موارد المياه الجوفية

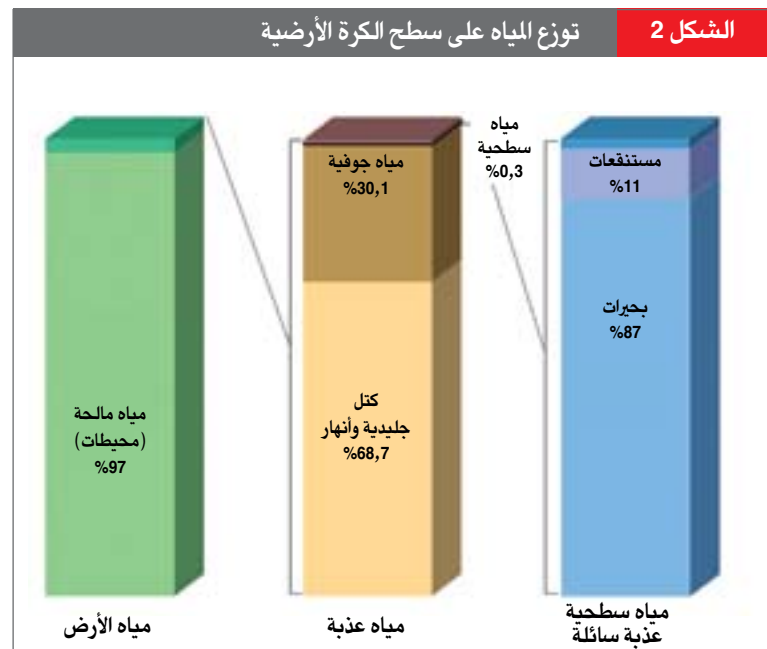
تبدأ قصة المياه الجوفية عندما تتجمع مياه الأمطار على سطح الأرض. الجاذبية هي القوة الدافعة لهذا الحراك، حيث تنتقل المياه من المناطق الأعلى إلى الأقل ارتفاعاً فوق الصخور وخلالها. والمياه الموجودة تحت السطح تكون محمية من السخونة والتبخّر بفعل أشعة الشمس، وبالتالي تبقى محتجزة في بنية الصخور لآلاف السنين. وخلال رحلتها عبر الصخور، تنتقل عبر النفاذية الأولية أي المساحات المفتوحة بين حبيبات الصخور، و/أو النفاذية الثانوية التي تحدث بتكسر الصخور أو تصدعها.

يعتقد كثيرون في العالم العربي أن المياه تحت سطح

تقع الدول العربية في أكثر الأراضي جفافاً في العالم، التي تتضمن شمال أفريقيا وشبه الجزيرة العربية (الشكل 1). وفي المنطقة ثلاثة أنهار رئيسية فقط، هي النيل ودجلة والفرات، تزود قطاعاً ضيقاً من الأراضي بمياه مستمرة طوال السنة. أما بقية المنطقة فهي مضطرة للاعتماد على موارد مائية متواضعة. ويتم تزويد المياه لأغراض الشرب عن طريق تحلية مياه البحر، خاصة في منطقة الخليج العربي. ولكن بقية الدول تعتمد بشكل كبير على المياه الجوفية لأغراض الاستهلاك البشري والنشاطات الزراعية. ولهذا، فإن المياه الجوفية تمثل عنصراً رئيسياً للحياة في المنطقة العربية.

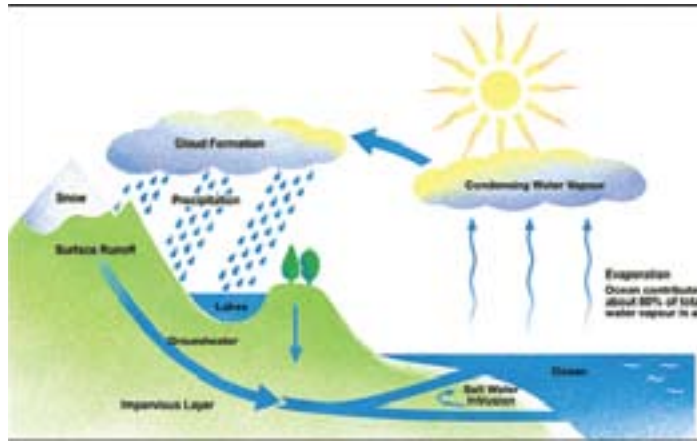
اعتمدت المناطق التي شهدت تجمعات بشرية قليلة على المياه التي تنساب عبر الصخور في المناطق المرتفعة لخرج على شكل ينابيع، وهي تسمى "واحات" في شمال أفريقيا و"عيوناً" في الشرق الأوسط و"أفلاجاً" في جنوب شبه الجزيرة العربية. كانت هذه الموارد كافية للمجتمعات القليلة الانتشار والعدد في الماضي، ولكن كميات كبيرة من المياه تم ضخها مؤخراً من الآبار العميقة، حيث تراجعت طبقات المياه الجوفية، ما أعطى انطباعاً باستنزاف هذه الموارد.

من أسباب الاعتقاد الشائع بمحدودية المياه الجوفية: أولاً، حفر عدد كبير جداً من الآبار في مواقع متقاربة، وفي معظم الحالات إلى العمق نفسه. ثانياً، ضخ المياه



الدورة المائية

الشكل 3



المصدر: Government of South Africa

في شمال أفريقيا وحوض الربع الخالي في شبه الجزيرة العربية (El Baz, 1998a and b). وفي أماكن متفرقة، تعوق هذا الحوض الواسع المكون من الحجر الجيري، والذي يبدو أفقياً، كتل صخرية غير نفاذة، بما في ذلك جبال من الغرانيت وصخور بركانية. لكن هذه الأحواض عموماً تمتد تحت الكثبان الرملية في الصحراء الكبرى أو شبه الجزيرة العربية لمسافات شاسعة.

III. تراكم المياه الجوفية

يعتمد اتجاه جريان المياه السطحية على التضاريس الطبوغرافية (الشكل 3)، فكلما ازدادت درجة الميلان السطحي ازداد تسارع الجريان. ولكن هذا النمط يعتمد عادة على اتجاه الصدوع والشقوق في الصخور السطحية. وبينما تقوم المياه السطحية بتعرية الصخور لتخلق مساراً سهلاً لها (الشكل 4)، ينشأ نمط للتصريف المائي (Gaber et al., 2010). الأطراف الحادة للمسار الذي يتخذ شكل V تشير إلى اتجاه المياه نحو الأسفل. مثل هذا النمط في الأراضي الجافة يشير إلى التضاريس التي كانت متواجدة أثناء نشوئها، ولهذا فإن تحليل النمط الذي تركته المياه الجارية في الماضي على الأرض يعتبر أمراً أساسياً للتنبؤ بتراكم المياه الجوفية.

هكذا أيضاً يؤدي تراكم المياه السطحية في الأحواض الطبوغرافية المنخفضة إلى تشكيل بحيرات قد تبقى لآلاف السنين. وعلى حدود البحيرات تتشكل مصاطب متدرجة (جلول) نتيجة تراكم حطام الصخور من الأنهار والسيول التي تغذي الأحواض الجوفية. وفي حال تغير

الأرض موجودة على شكل بحيرات أو أنهار جوفية. لكنها في الحقيقة موجودة في الفراغات بين حبيبات الصخور أو في الشقوق. في الحالة الأولى، يمكن أن تتخيل كأساً مليئة برمال الشاطئ: الرمال تملأ الكأس، ولكن تبقى فراغات كبيرة بين الحبيبات. اسكب ماء في الكأس، وسوف تجد أن الماء يحتل المساحات المتاحة بين حبيبات الرمال. هذا يفسر طبيعة الأحواض الجوفية الكبيرة في أنحاء كثيرة من المنطقة العربية.

الصخور التي تتكون بشكل أساسي من حبيبات رملية متجاورة، أو الصخور الرملية، وصخور أخرى مثل الحجر الجيري أو الكلسي، تتواجد فيها فراغات غير متجانسة ولكن مترابطة تسمح بمرور المياه. في بعض الحالات، تتكون فراغات كبيرة من خلال تذيب الصخور الحاضنة، فتتشكل الكهوف المائية. وتنساب المياه في هذه الصخور لتنتقل من المناطق العالية إلى المنخفضة. وتحتوي الصخور الجيرية على مواد كيميائية قابلة للذوبان، فتقوم المياه العابرة بإذابة الأملاح. وفي حالات غير عادية يؤدي ذوبان الأملاح في الصخور الحاضنة إلى جعل المياه أكثر ملوحة من مياه البحار.

بالإضافة إلى المسام بين حبيبات الصخور، تمر المياه السطحية عبر الشقوق في الصخور الصلبة (El-Baz, 1998a). ومع أن الصخر نفسه يكون غير نفاذ، فإن حركة كتل الصخور بعضها على بعض تؤدي إلى خلق مسام. وإذا تحركت الكتل على امتداد شق، أفقياً أو عمودياً، تتحطم الصخور المتواجدة على هذا الامتداد، ما يؤدي إلى خلق ممرات مفتوحة ومتصلة تساهم في إحداث نفاذية ثانوية (NRC, 1996). ويمكن للمياه أن تنتقل من ارتفاع أعلى إلى أدنى من خلال هذه الشقوق لمئات الكيلومترات (الشكل 3). وقد تتواجد على شكل ينابيع أو واحات أو عيون أو أفلاج (Rizk and El-Etr, 1997; Rizk, 1998). وقد تظهر على شكل سبخات أو بحيرات على السطوح الصحراوية المنخفضة وعلى مسافات بعيدة جداً عن مصدر المياه.

تنساب كميات كبيرة من المياه إلى جوف الأرض عن طريق النفاذية الطبيعية (في فجوات الصخور) أو النفاذية المستحدثة (التي تتسبب بها الصدوع) (El-Baz and Bisson, 1987). ويبدأ تدفق المياه من ارتفاعات عالية، وتستمر في الانحدار إلى مستويات أدنى عن طريق الجاذبية، ولا تتوقف إلا عندما تصل إلى سطح مشبع بالمياه أو غير نفاذ. بهذه الطريقة تتكون الأحواض الجوفية التي تبلغ سماكتها مئات الأمتار، مثل الحوض النوبي

الصور المتعددة الأطياف (Multispectral images)

الصور الفضائية الأكثر شيوعاً كانت تلك التي التقطتها المجسات الرقمية والتي بدأت من خلال برنامج «لاندسات» لوكالة الفضاء الأميركية «ناسا» عام 1972. كانت العملية تتم من المركبة الفضائية على ارتفاع 900 كيلومتر فوق سطح الأرض، حيث يقوم مجسّ بالإطلاع على صفوف من النقاط الدقيقة، فيقيس أشعة الشمس المنعكسة من كل نقطة، ويحوّل البيانات الخاصة بكثافة الضوء إلى قيم رقمية يرسلها إشعاعياً إلى محطات استقبال على الأرض.

يسمح التصوير الرقمي من الفضاء باستخدام فلاتر أمام عدسة المجسّ لفصل الضوء المنعكس إلى موجات مختلفة الأطوال (الشكل 5). كما يسمح بتكرار تغطية المنطقة ذاتها من الارتفاع ذاته وبالأداة ذاتها لغايات المقارنة بهدف اكتشاف التغيرات الزمانية. عندما ينفذ ذلك عن طريق وضع مجموعتين من البيانات إحداها فوق الأخرى بواسطة برنامج كومبيوتر، يتم إنتاج خرائط دقيقة تحدد التغيرات في المنطقة (Singh, 1989). وتعتبر هذه العملية جوهرية لتقييم التغيرات البيئية، وخاصة زيادة استخدام المياه الجوفية في الزراعة.

الصور التي يتم التقاطها عن طريق نظام «لاندسات» الشائع، ولا سيما مجسّ المخطط الموضوعي المعزز (Enhanced Thematic Mapper)، تلتقط البيانات في سبع موجات طيفية. ويتميز هذا النظام بدقة وضوح تصل إلى 30 متراً في الأطياف المرئية ودون الحمراء القصيرة الموجة. ويحوي النظام أيضاً حزمة بانكروماتية حساسة للألوان تغطي مدى واسعاً من الطيف المرئي بدقة وضوح تصل إلى 15 متراً. بالإضافة إلى ذلك، تقوم حزمتان إشعاعيتان بجمع البيانات من المنطقة تحت الحمراء الحرارية، وهي مفيدة في عدة تطبيقات إذ إن دقة وضوحها العالية تجعلها مناسبة لتحديد الخصائص الطبيعية لتضاريس الأرض (Lillesand et al., 2004).

لا يقتصر استخدام بيانات لاندسات المتعددة الأطياف على المجالات الفيزيائية، فعلى سبيل المثال يمكن استخدامها في تحديد معدل التبخر في الزراعة المروية. إن المعلومات حول التبخر يمكن أن تجعل استخدامات المياه مقتصرة على الاحتياجات المحددة للنباتات.

البيانات الحرارية (Thermal data)

الشذوذات الباردة التي تظهر على البيانات الحرارية للأراضي

مستوى البحيرة، ربما بسبب تراجع كميات الأمطار، تتكون مصاطب جديدة في مستويات أدنى. وعلى حدود البحيرات حيث تكثر المصاطب المتدرجة، يمكن تأريخ المستويات المختلفة للبحيرة بواسطة بقايا الكائنات الحية في المدرجات.

هذا يوضح أن لكل معلّم من المعالم التي نراها في الأراضي الجافة اليوم هنالك قصة حول كيفية وماهية وزمان وألية تشكيل خصائصه السطحية. وتنوع هذه الخصائص يجعل من الضروري دراسة تفاصيل الأراضي الصحراوية من أجل فهم تاريخها. إن دراسة أشكال الأراضي على امتداد مساحات شاسعة من المنطقة العربية تتطلب رؤية عامة شاملة، كما يوضح الشكل 4 مثلاً. وتقدم صور الأقمار الاصطناعية أفضل مصدر للمعلومات حول المناطق الصحراوية، خاصة في ما يتعلق باستكشاف المياه الجوفية (El-Baz, 1988, 1998b).

IV. صور الأقمار الاصطناعية

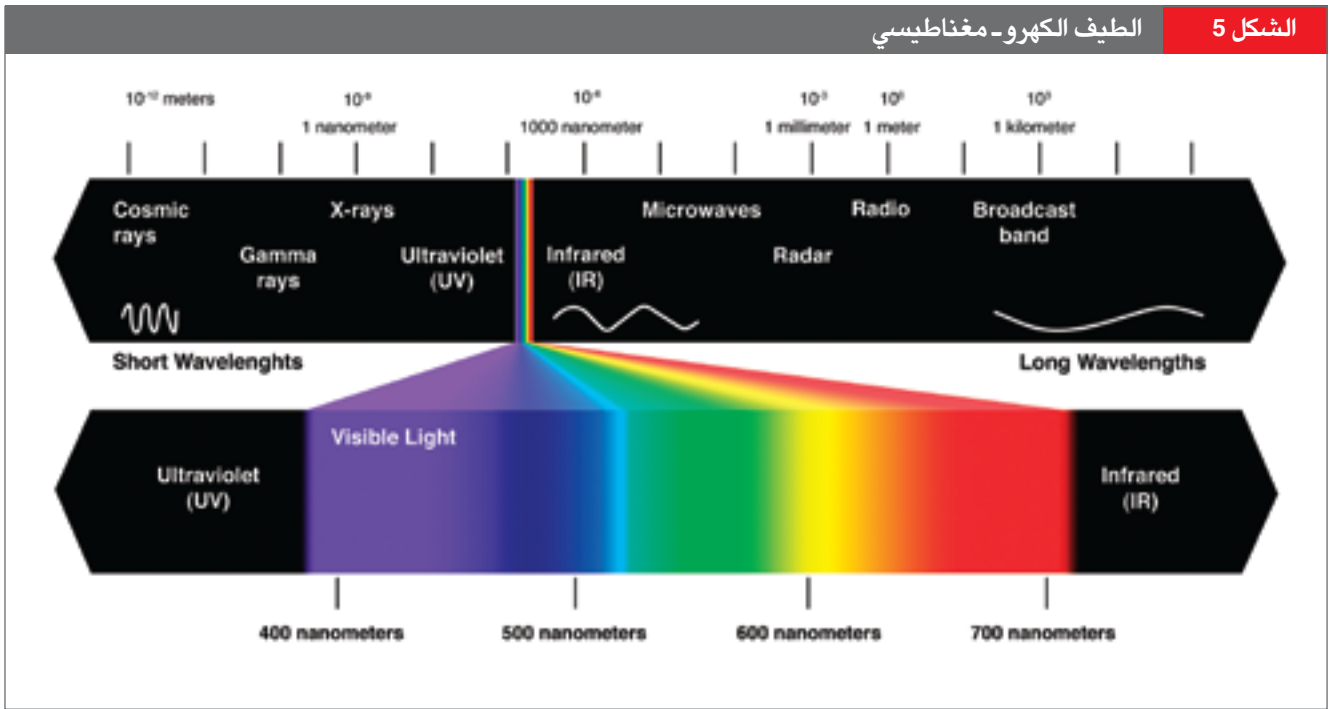
شهدت تقنيات تصوير الأرض من الفضاء تقدماً تقنياً مطرداً خلال العقود الخمسة الماضية. كانت أولى الصور الفضائية تلك التي التقطها رواد الفضاء من المركبات الفضائية التي دارت حول الأرض في ستينات القرن الماضي. وتم توثيق معظمها على أفلام ملونة، زدتنا بتلميحات حول طبيعة وتركيبية المناطق التي تم تصويرها. ولكن توافرت معلومات أكثر للاحقا بواسطة الصور المتعددة الأطياف.

شبهات التصريف المتشعبة كما تظهر في صورة فضائية

الشكل 4

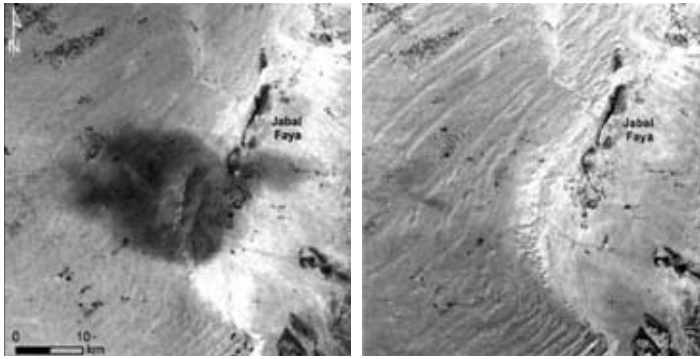


الشكل 5 الطيف الكهرو-مغناطيسي



صورتان حراريتان للمشاركة (الإمارات العربية المتحدة) قبل وبعد سقوط الأمطار على جبال عُمان إلى الشرق والتي تسببت بحدوث تغير شاذ نحو البرودة (المنطقة الداكنة) قرب جبل فاية

الشكل 6



تتسرب المياه العذبة إلى خليج عُمان من خلال صدوع جبلية تم تحديدها أيضاً باستخدام البيانات الحرارية (Ghoneim et al., 2005).

الرادار التصويري (Imaging radar)

توافر الجيل الثالث من صور الأقمار الاصطناعية عن طريق الاستشعار عن بعد بواسطة الرادار (Elachi and Granger, 1982; Elachi et al., 1984). وبعكس الاستشعار السلبي لاشعاع الشمس المنعكس، فإن مجس الرادار يرسل الموجات نحو الأرض ويسجل الحزمة

تمثل مواقع تواجد المياه على السطح أو قربه. هذا لأن المحتوى الحراري الكامن للمياه (الرطوبة في التربة) يبطن امتصاص الإشعاع الحراري وانعكاسه. وبناء على ذلك، ففي وقت محدد ضمن دورة التسخين النهارية يتأخر تسخين التربة الرطبة (Pratt and Ellyett, 1979). كذلك، يتباطأ التبريد أثناء الليل أيضاً. ولهذا فإن للتربة الرطبة قصوراً ذاتياً حرارياً أعلى (higher inertia)، يظهر على شكل شذوذات باردة في البيانات الحرارية التي يتم تجميعها خلال ساعات النهار. يمكن أيضاً كشف المياه العذبة التي تتسرب إلى البحار عن طريق التباينات في درجة الحرارة.

يتم تحديد الشذوذات الحرارية وتسربات المياه العذبة باستخدام بيانات برنامج MODIS الكومبيوتر المتاح مجاناً. فتسترجع البيانات لفترات مختلفة بعد حالات تساقط المطر الشديد، وهي متوافرة في برنامج «بعثة وضع خرائط تساقط الأمطار في المناطق الإستوائية» منذ العام 1998. ويتم تأكيد وجود الشذوذات الحرارية ومداهما باستخدام بيانات لاندسات ذات الدقة المكانية العالية. وأخيراً تُقرن مواقعها وتوزيعها مع الخصائص البنوية وخصائص التصريف المائي على الخرائط.

طبقت هذه الإجراءات بنجاح في شمال الإمارات العربية المتحدة، حيث تم تحديد شذوذ حراري في إمارة الشارقة وربطه بمرور مياه الأمطار عبر صدع رئيسي يقود إلى منطقة أدنى غرب جبل فاية (الشكل 6). إلى ذلك،

Radarsat 1 إلى مدار قريب من المناطق القطبية ومتواقت مع الشمس على ارتفاع 798 كيلومتراً فوق الأرض. وبعكس الأقمار الاصطناعية البصرية التي تتحسس أشعة الشمس المنعكسة، فإن أنظمة الرادار تبث طاقة الموجات الصغرى نحو السطح وتسجل الانعكاس. وهكذا يستطيع الرادار أن يصور الأرض في الليل والنهار تحت أي ظروف جوية، سواء الغيوم أو الأمطار أو الثلوج أو الغبار أو الضباب.

الصور العالية الوضوح (High resolution imaging)

يعتبر «إيكونوس» مثلاً على قمر اصطناعي لمراقبة الأرض لأغراض تجارية، يتميز بصور عالية الوضوح وبدورة إعادة تصوير من 11 يوماً. في الموقع الأسفل (نظير السمات) يغطي نظام التصوير لهذا القمر رقعة بعرض 11 كيلومتراً ويطبق تكنولوجيا التنظيم الخطي (linear array) ويجمع البيانات في أربع حزمات متعددة الطيف بدقة وضوح تصل إلى 4 أمتار على الأرض (Lillesand et al., 2004).

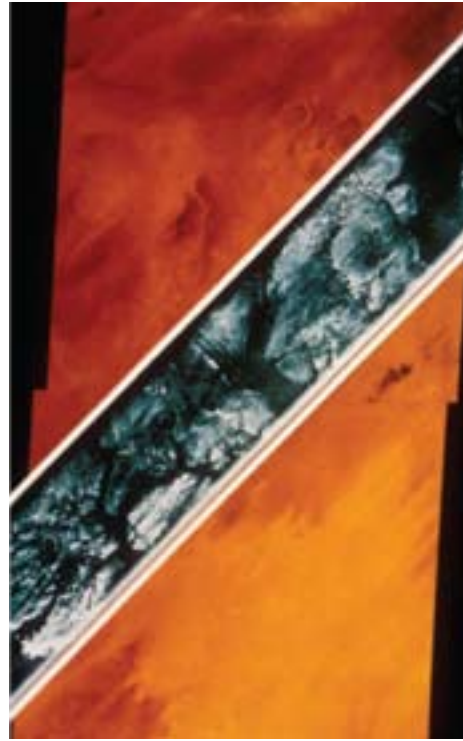
كذلك، تم إطلاق القمر «كويك بيرد» من قبل شركة ديجيتال غلوب في مدار متوازٍ مع الشمس ومنخفض نسبياً على ارتفاع 450 كيلومتراً، مما يسمح للكاميرا المثبتة عليه بتمييز الأجسام الموجودة على الأرض بقطر 61 سنتيمتراً. بهذا المستوى العالي جداً من دقة الوضوح يمكن بسهولة تمييز تفاصيل الأبنية والبنى التحتية. ويعادل المدى الطيفي ذلك الذي يتميز به إيكونوس.

وقد قامت دول أخرى بإطلاق أقمار تصوير متعددة الأطياف، لقدرة هذه الأقمار على دراسة البيئة والموارد الطبيعية على الأرض. على سبيل المثال، أرسلت فرنسا مجموعة من رحلات SPOT وتبعها أقمار روسية وهندية ويابانية وصينية. وخلال السنوات القليلة الماضية أطلقت بعض الدول العربية أقماراً للتصوير، حيث بدأت السعودية بهذا التوجه، وتبعها مصر التي تقوم الآن بإدارة نظام متعدد الأطياف بدقة تصوير تصل إلى 7,8 أمتار على سطح الأرض. وتخطط الجزائر حالياً لإطلاق قمرها الخاص، كما تفكر الإمارات العربية المتحدة في إطلاق وتشغيل أقمار اصطناعية للتصوير. وتساعد هذه الأنظمة في المسح الدقيق للموارد الطبيعية على امتداد العالم العربي، مع التركيز الخاص على المياه الجوفية.

V. المنهجيات

يتطلب الاستكشاف الحديث لموارد المياه الجوفية مجموعة

الشكل 7
موجات الرادار تكشف مسار نهر قديم تحت رمال الصحراء



اللاسلكية العائدة، أو ما يسمى الصدى. بهذه الطريقة تبدو سطوح طبقات الصخور والترسبات الخشنة براقية بسبب الانعكاس المنتشر. أما التربة الملساء فتبدو داكنة بسبب انعكاس موجات الرادار بعيداً عن اللواقط التي تستقبل الإشارات والموجودة على المركبة الفضائية. إحدى مزايا هذه الطريقة هي قدرة الرادار على اختراق الرمال الدقيقة الجافة لإظهار التضاريس الخفية (الشكل 7). ويساعد هذا المبدأ على كشف مسارات الأنهار السابقة تحت رمال الصحراء، التي تعطي دلالات حول مواقع تجمعات المياه الجوفية في البيئات الجافة. وقد تم إخضاع هذا المبدأ للتجربة في عدة مواقع في شرق الصحراء الكبرى.

رادار التصوير المكوكي SIR سلسلة من ثلاثة أجهزة رادار عملت على المكوك الفضائي الأميركي. وكان الجهاز الثالث جزءاً من مهمة مشتركة لجمع أول بيانات متعددة الأطياف والاستقطابات ناتجة عن الجهازين (SIR-C/XSAR Jensen, 2000).

إلى ذلك، قامت كندا بإطلاق أنظمة «رادارسات» كأقمار اصطناعية تجارية لمراقبة الأرض. أطلق أول تلك الأقمار

ويمكن أن يساهم إنتاج صورة فسيفسائية من عدة صور فضائية منفردة في تزويد تغطية شاملة لدولة كاملة. تتضمن هذه العملية ثلاث خطوات: أولاً، إعادة اختزال الصور إلى دقة أعلى. ثانياً، مطابقة مستوى السطوح لكل الصور. ثالثاً، مزج المناطق المتداخلة. في حالة مصر، تم استخدام صورة فسيفسائية (الشكل 8) للمرة الأولى لكشف قصة المياه الجوفية. وتوضح الصورة بجلاء أن خطوط الكثبان الرملية تتجه من الشمال إلى الجنوب (El-Baz, 1979). والسبب في ذلك أن الرياح في مصر تهب عادة من الشمال. هذه الرمال المكونة من الكوارتز لا توجد لها أصول من الصخور في الشمال. وفي الوقت نفسه، فإن الصخور المكشوفة إلى الجنوب تتكون بشكل أساسي من الصخور الرملية. فتم الافتراض بأن الرمال لم تنتقل من المصدر بواسطة الرياح، بل بواسطة المياه من الجنوب. وبناء على ذلك بدأ البحث عن مجار مدفونة لأنهار قديمة (El-Baz, 1982, 1988 and 2000).

تصنيف الصور هو استخدام المعلومات الطيفية في صورة متعددة الأطياف لتصنيف كل «بكسل» من الصورة من أجل إنتاج خرائط قطاعية تمثل أنواعاً مختلفة من الغطاء الأرضي. وهناك نوعان رئيسيان من التصنيف: غير الخاضع للإشراف والخاضع للإشراف. التصنيف غير الخاضع للإشراف يكون مفيداً في التمييز الأولي لأنواع الطيف، وهو عملية استكشافية حيث احتساب التصنيف يحدد الفئات الطيفية من دون إشراف المستخدم. أما التصنيف الخاضع للإشراف فيتضمن معرفة مسبقة بالبيانات من أجل «تدريب» الكمبيوتر على تحديد الفئات في الصورة بناء على المعلومات المتوفرة (Gaber et al., 2010).

كشف التغيير هو عملية تحديد الاختلافات في حالة جسم أو ظاهرة ما عن طريق مراقبتها في أوقات مختلفة (Singh, 1989). وهناك عدة وسائل لكشف التغيير قد تتعلق بموارد المياه الجوفية في الصحراء، مثل تحديد الاختلافات في الغطاء النباتي. يتم تقييم التغييرات بين التصنيفات كمياً في صور المراحل الأولى والنهائية. وتعتبر خرائط تحديد التغيير مثالية لتوضيح الاختلافات في الصور بين وقتين مختلفين.

نظم المعلومات الجغرافية

أفضل عرض مرئي يربط بين المجموعات المعقدة من المعلومات الرقمية يتم من خلال استخدام قاعدة بيانات منظمة بنويًا وترابطيًا. يقدم نظام المعلومات الجغرافية GIS الأدوات الأساسية لإنتاج قاعدة البيانات

من عمليات تحويل الصور وتجهيزها، وتحليلاً قائماً على نظم المعلومات الجغرافية (GIS). كما يتطلب أعمالاً مساندة في المختبرات والميدان للتحقق من المعلومات المستقاة من الأقمار الاصطناعية. يوضح القسم الآتي الطرائق المستخدمة في هذه الأبحاث.

تحليل البيانات الرقمية

التجهيز المسبق لصور الأقمار الاصطناعية يتيح إنتاج خرائط لأنظمة التصريف (السطحية والقريبة من السطح)، والتراكيب الجيولوجية، والشذوذات الحرارية، والوحدات الجيولوجية والجيومورفولوجية، وتوزيع الغطاء النباتي. يتم تنفيذ عمليات التجهيز المسبق للصور قبل تحليل البيانات، وتتضمن التصحيح الرقمي الإشعاعي والجيومتري. في التصحيح الإشعاعي، يتم إحداث توافق بين جميع الصور التي تم جمعها في أيام وأوقات مختلفة، ومن قبل عدة مجسات، ليصبح من الممكن مقارنتها مباشرة، إلا في حالة نسبة الموجات التي تنتج قيمة نسبية وليس مطلقة. أما التصحيحات الجيومترية (الرياضية) فتتناول البيانات غير المنتظمة من المجسات ووضوح المناطق الأرضية والانحناء ودوران الأرض. وتعتمد هذه التصحيحات على نوعية البيانات المستخدمة.

تحويل الصور يتضمن عدة نطاقات من البيانات (صورة واحدة متعددة الأطياف، أو صور متعددة الأزمنة، أو صور من عدة مجسات) لإنتاج صورة واحدة توضح خصائص محددة من سطح الأرض. بعض الأمثلة على تحويل الصور اقتطاعها أو تحديد نسبها (subtraction or ratios). يتم تطبيق أسلوب اقتطاع الصور لتحديد الاختلافات أو التغييرات بين صور للمنطقة نفسها ولكن في تواريخ مختلفة. أما أسلوب نسبية الصور فيتم تطبيقه للحصول على معلومات محددة حول حالة سطح الأرض، مثل مؤشرات الغطاء النباتي، حيث ينعكس وجود غطاء نباتي سليم بشكل واضح في الأشعة تحت الحمراء، ويتم امتصاصه بقوة في نطاق الضوء المرئي الأحمر من الطيف، مقارنة بالتربة والمياه التي تظهر انعكاسات شبه متماثلة في الطيف الأحمر أو الأشعة تحت الحمراء القريبة.

ويتم تطبيق أساليب تعزيز الصور في المراحل النهائية لتحسين مزاياها الدلالية. ينتج عن العملية تغييرات في القيم الرقمية، ولذلك يجب أن تكون هذه الخطوة في نهاية مراحل تجهيز الصور. ويمكن أن تحدث العملية عن طريق امتدادات تعمل مع المخطط البياني للصور أو من خلال فلاتر مكانية توضح أو تكبح الخصائص المختلفة بناء على ترددها المكاني.

صورة فسيفسائية "موزاييك" مكونة من 65 صورة فردية من "لاندسات" تظهر خطوطاً متوازية من الكثبان الرملية في مصر

الشكل 8



تكوين التربة وأنواع الصخور وأنماط استخدامات الأراضي المعتمدة على مزايا المؤشرات لكل مجموعة من البيانات (Gaber et al., 2010).

قد تحتوي مخرجات نظم المعلومات الجغرافية على معلومات تم استخراجها من مجموعة من طبقات الخرائط باستخدام أي مزيج من عمليات التحليل. أما

هذه للخصائص المكانية والسمات والمواقع الجيولوجية المحددة.

تساهم عملية معالجة البيانات وتحليلها في نظم المعلومات الجغرافية في حل مشاكل بحثية محددة. ويتم إجراء بعض هذه المهام في نطاق ارتفاعات الأراضي والهطول المطري والميلان وغير ذلك، بينما يعالج البعض الآخر مثل

وتسمى «صفيحة سليمة الرملية الكبرى» نسبة إلى واحة سليمة الواقعة على حدودها الشرقية. وتعتبر هذه الواحة موقعاً هاماً على امتداد درب الأربعين لقوافل الجمال، من دارفور في شمال غرب السودان نحو وادي النيل في مصر. وقد تم اكتشاف العديد من خطوط التصريف المائي في مناطق مرتفعة عن صفيحة سليمة الرملية الكبرى بواسطة صور الأقمار الاصطناعية، ومنها أربعة خطوط رئيسية تقود إليها مباشرة من جهة الغرب (الشكل 9). أما نظام التصريف الواقع في أقصى الشمال فيتجه نحو الشرق ويمتد لمسافة 150 كيلومتراً في الطول، كما أن أطول وأعرض أنظمة الوديان تتواجد بمحاذاة اتجاه شمال شرق - جنوب غرب (NE-SW). هذه القنوات العريضة تتكون عادة في ظروف فيضان على امتداد الصفيحة مع كميات مياه سطحية وفيرة (El-Baz, 2000).

تظهر صور SIR-C الفضائية العالية الدقة أن العديد من هذه القنوات العريضة تتضمن جداول صغيرة في قاعها، مما يشير إلى عدة فترات من تدفق المياه. أما الملاحظات الميدانية الناتجة عن الخنادق التي حفرها في أيار (مايو) 1998 فريق مشترك، من سلطة المسوحات الجيولوجية والمعدنية في مصر والمعهد المصري للصحراء، فتشير إلى أن الرطوبة تبدأ على عمق 25 سنتيمتراً في الغطاء الرملي للقنوات الضحلة في منطقة بئر الصفصاف في جنوب مصر. وهذا يدل على أن الرطوبة الناتجة من عواصف مطرية متفرقة انتقلت وحُفظت خلال الفجوات الرملية في القنوات القديمة (El-Baz, 1998b and Hoelzmann et al., 2001).

أظهرت صور الرادار في البداية مسارات أنهر وجداول في شمال غرب السودان، حيث تشير أعرش القنوات إلى تلك المنطقة. ويمكن تفسير هذا النمط بأنه يشير إلى تواجد وتراكم المياه الجوفية في المنطقة الشرقية الأكثر انخفاضاً. وقد قام المؤلف بالتنبيه إلى هذه الحالة تكراراً لوزارة الزراعة واستصلاح الأراضي في مصر منذ العام 1982. وفي النهاية، بدأت الحكومة في العام 1995 بحفر مجموعة من الآبار الاستكشافية ومراقبتها للسنوات الخمس اللاحقة، لتأكيد وجود كميات كبيرة من المياه الجوفية. وفي العام 2000 تم تخصيص 10 آلاف فدان من أجل التنمية الزراعية لشركات من القطاع الخاص في مصر.

اليوم هناك أكثر من 500 بئر في منطقة شرق العينات لسقاية الحقول الزراعية باستخدام الري الدائري بالرياح. وتتضمن المحاصيل المزروعة القمح والبقول السوداني وغيرها من المحاصيل الغذائية الأساسية. وقد أثبت القمح

المخرجات النهائية فهي خرائط تفاعلية في شكل رقمي تمثل خصائص منطقة الدراسة. وسيتم ايضاح ذلك في دراسات الحالات الواردة أدناه.

VI. دراسات حالات

لا يمكن لأي مساهمة أن تكون شاملة بالدرجة الكافية لتغطي جميع احتمالات تواجد المياه الجوفية في المنطقة العربية. في ما يأتي أمثلة من الأجزاء الشرقية من الصحراء الكبرى وشمال أفريقيا (مصر وليبيا والسودان) وشبه الجزيرة العربية (السعودية وعمان) ومنطقة شرق المتوسط (لبنان).

شرق العوينات (جنوب غرب مصر)

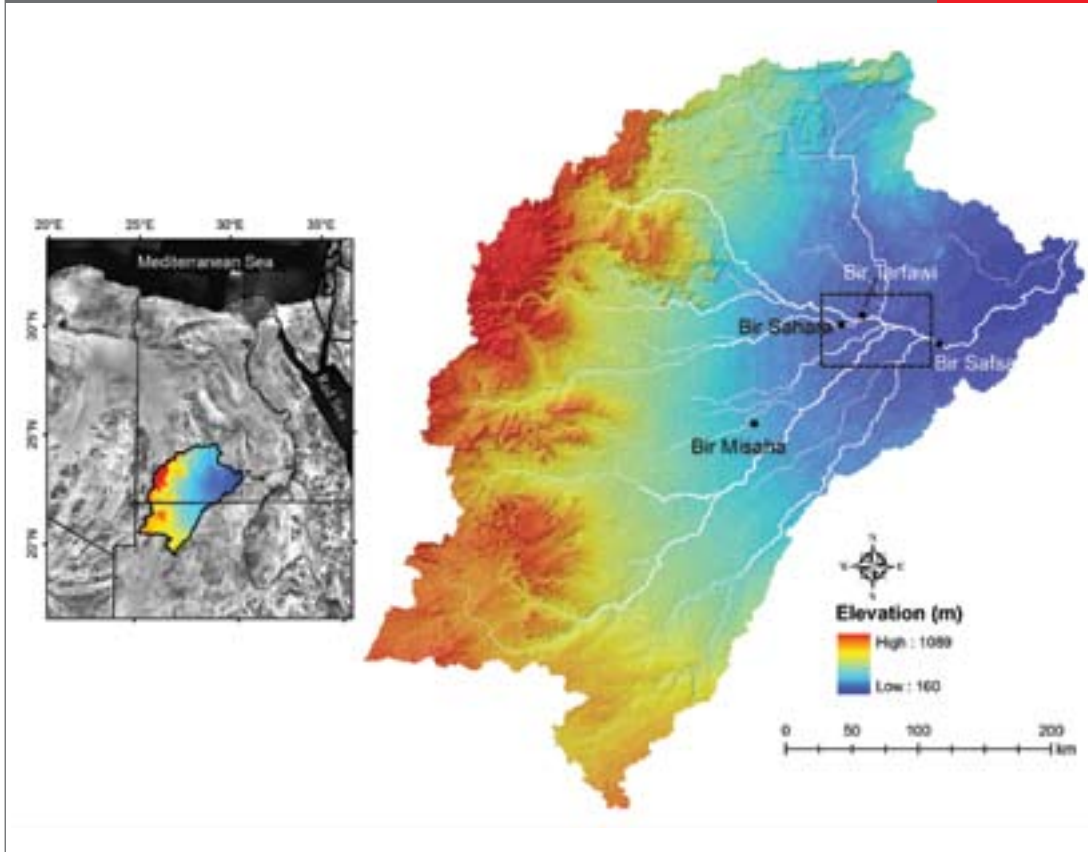
تمثل الصحراء الكبرى أكبر حزام صحراوي على الأرض، حيث تمتد لمسافة 6000 كيلومتر تقريباً من الشرق إلى الغرب. وتتضمن أجزاءها الشرقية بعض أشد المناطق جفافاً على الكوكب، حيث يعتبر الإشعاع الشمسي الذي تتلقاه قادراً على تبخير 200 ضعف من كميات المياه المتساقطة عليها (Henning and Flohn, 1977). هذه الظروف الشديدة الجفاف تتطلب اعتماداً كاملاً على المياه الجوفية من أجل الاستهلاك البشري والنشاطات الزراعية. وقد تفاقمت تلك الحالة نتيجة ازدياد السكان واحتياجاتهم من الغذاء والألياف (El-Baz and El-Ashry, 1991).

وعلى رغم أن الصحراء الكبرى هي حالياً جافة ومعرضة لتأثيرات شدة الرياح الآتية من الشمال، فإن الدلائل الأثرية تشير إلى أن هذه المنطقة شهدت مناخاً أكثر رطوبة في الماضي (Wendorf et al., 1977; Haynes, 1985; Haynes and Mead, 1987; Haynes et al., 1979 and 1989; Pachur and Hoelzmann, 1991; Pachur and Wunnemann 1996; Pachur and Rottingen, 1997). وقد أدى وجود المياه السطحية أثناء فترات المناخ الرطب في الماضي إلى تشكيل بحيرات في أحواض طبوغرافية. وتعتبر صور الأقمار الاصطناعية أدوات ممتازة لدراسة خصائص الصحارى (El-Baz, 2000). وبالإضافة إلى أنواع البيانات المذكورة أعلاه، يمكن استخدام بيانات بعثة مهمة الدراسة الطبوغرافية للرادار الميكوي (SRTM) وإظهار مشاهد ثلاثية الأبعاد لسطح الأرض (El-Baz et al., 2000; Ghoneim and El-Baz 2007a and b).

في جنوب غرب مصر منطقة رملية منبسطة على مسافة 300 كيلومتر، تمتد على الحدود المصرية - السودانية،

منطقة شرق العوينات في جنوب غرب مصر حيث تظهر بيانات الرادار الطبوغرافية وجود عدة مسارات لأنهر قديمة تؤدي الى منطقة منخفضة تقوم فيها نشاطات زراعية (المنطقة داخل الاطار)

الشكل 9



صورة لرادار المكوك الفضائي تظهر نهريين قديمين جنوب واحة كفرة في جنوب شرق ليبيا

الشكل 10



بشكل خاص أهميته لإنتاج الطحين في طواحين أسوان من أجل الخبز الذي يوزع في قرى وبلدات جنوب مصر. ان هذه المصادر المائية المثبتة كفيلا بدعم زراعة أكثر من 150 ألف فدان لمدة لا تقل عن 100 سنة (El-Baz, 1998; Robinson et al., 1999 and 2000). هذه الحالة بالذات تؤكد الحاجة الماسة الى دراسة التضاريس الصحراوية في المنطقة العربية لكشف مصادر المياه الجوفية الكامنة من أجل فائدة شعوبها.

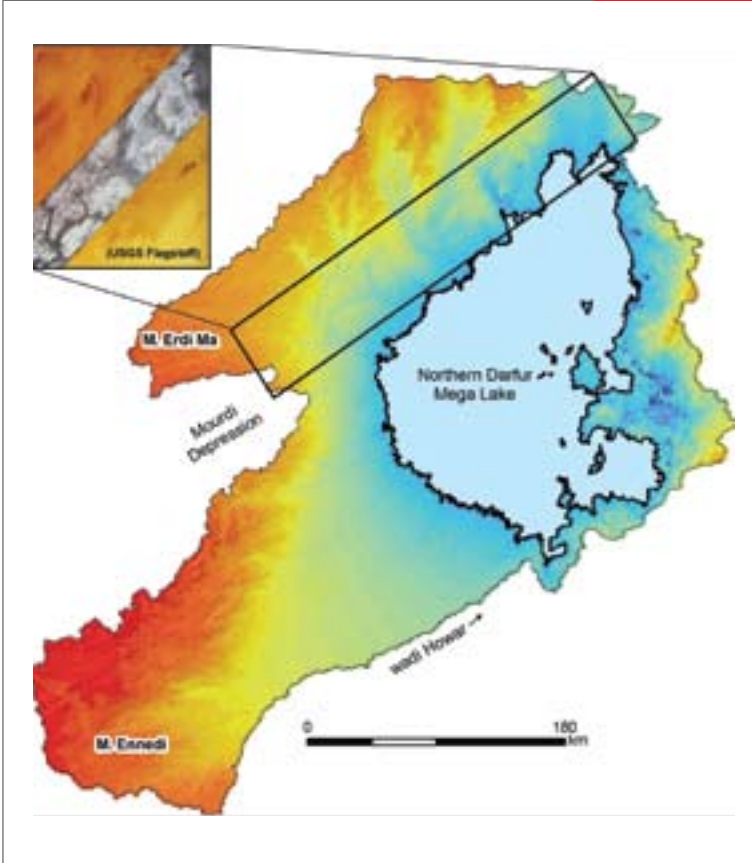
في مثل هذه البيئة الحارة والجافة، يستخدم الري بالتنقيط للأشجار والري بالرذاذ (مرشات) للمحاصيل مثل الحبوب. في حالة الري بالرذاذ، تكون قياسات التبخر خلال عدة مواسم مفيدة جداً، ان تضمن اقتصار الري بالرذاذ على الاحتياجات الأساسية للمحاصيل.

منطقة كفرة (جنوب شرق ليبيا)

إلى الشمال الغربي من منطقة شرق العوينات في مصر، تظهر الصور المأخوذة من لاندسات وأبولو - سويوز لمناطق جنوب شرق ليبيا أن واحة كفرة هي المكان

بحيرة دارفور الشمالية القديمة كما أظهرتها صور المكوك الفضائي والبيانات الطبوغرافية

الشكل 11



ويمتد جبل مرة في المحافظات الثلاث. وهو يساهم في سقوط بعض الأمطار، ولكن بشكل متباعد ومتفاوت في المكان والزمان. وقد تسبب الجفاف الكبير خلال العقدين الماضيين في سنوات من الاضطراب والنزاع على امتداد حافة حزام «الساحل» الصحراوي في شمال أفريقيا، وتسبب في هجرات سكانية تبعثها حرب شرسة في إقليم دارفور. كان شح المياه هو السبب الرئيسي في اندلاع الصراع الذي حدث بين المجتمعات الزراعية والرعية المرتحلة في دارفور. وألحقت المجتمعات الرعية أضراراً بالغة بالكثير من المجتمعات الزراعية. ولهذا من الضروري تطوير تقنيات جديدة ومبتكرة لتحديد مواقع مصادر مائية إضافية لتلبية الحاجات الملحة للناس.

في دارفور الشمالية، أشارت تحليلات الصور الفضائية إلى تحديد خصائص خطية مقوسة تشذ عن البيئة المحيطة، على ارتفاع 573 متراً فوق سطح البحر (Ghoneim and El-Baz, 2007b). وأثبت التحليل الجيومورفولوجي الدقيق لهذه المعالم الخطية غير المتواصلة أنها بقايا سواحل بحيرة قديمة

المأهول الوحيد في هذه المنطقة من الصحراء الكبرى الشرقية. كانت هذه الواحة موقعا هاما لقوافل الجمال الآتية من تشاد في اتجاه الشمال نحو البحر المتوسط. وقد تم تطوير مزارعها ذات نمط الري الدائري في بداية الستينات عن طريق شركة «أوكسيدنتال» النفطية، كأحد المشاريع المتضمنة في اتفاقية الامتياز الممنوحة لها لاستكشاف النفط. وكانت هذه المزارع مرئية لرواد الفضاء في دورانهم حول الأرض، نتيجة التباين الواضح بين لون الغطاء النباتي والمناطق الرملية المحيطة. هذا التباين لم يتم التقاطه فقط من خلال الصور المرئية، بل أيضاً عن طريق الأطياف تحت الحمراء القريبة وبيانات الرادار.

كشفت بيانات رادارات والمكوكي مسارات قناتين قديمتين مدفونتين تحت الرمال (الشكل 10). القناة الغربية الأطول والأضيق والتي تمر في واحة كفرة تبدأ من اتجاه الحدود مع تشاد. أما القناة الشرقية الأعرض فتتجه في مسار من الشمال الغربي إلى الجنوب الشرقي، وتبدأ من المناطق المرتفعة الواقعة غرب هضبة الجلف الكبير في جنوب غرب مصر. ولهذا بدا واضحاً أن مواقع واحة كفرة والمزارع ذات الري الدائري ترتبط مباشرة بوجود هذين النهرين السابقين (El-Baz, 2000).

جدير بالذكر أن منطقة كفرة هي واحدة من خمسة أحواض رئيسية يتم ضخ المياه منها لتزويد مشروع النهر الاصطناعي العظيم في ليبيا الذي يعتمد بشكل مباشر على هاتين القناتين. لقد كان النهران اللذان غدياً القناتين نشيطين خلال فترات رطبة في الماضي، تماماً كما في حالة مصر. ومن المؤكد أن هاتين القناتين امتلأتا بالمياه في الفترة التي تتراوح منذ 11 ألف سنة إلى 5 آلاف سنة خلت. وبما أن بعض الغيوم الممطرة تصل بشكل متقطع إلى جبل تبيستي، يحدث بعض التجديد للمياه الجوفية في المنطقة عن طريق القناة الغربية.

دارفور الشمالية (شمال غرب السودان)

يقع إقليم دارفور (موطن قبيلة فور) في شمال غرب السودان، جنوب منطقة شرق العوينات في مصر ومنطقة كفرة في ليبيا. وينقسم حالياً إلى ثلاث محافظات: الشمالية والغربية والجنوبية (والآن هنالك اتجاه لتقسيمها إلى أربع محافظات). وتمثل محافظة دارفور الشمالية بشكل خاص مثالا واضحا على الخصائص البيئية للمناطق الشرقية من الصحراء الكبرى في شمال أفريقيا، حيث يزداد الجفاف كلما اتجه المرء شمالاً نحو مصر وليبيا.

نظام فضائي لدمج البيانات الأرضية لمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

راشيل ماكdonل

منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، حول المتغيرات الأرصادية وتدفقات المياه السطحية والجوفية، فإنّ معلومات هامّة حول عدد من العناصر الرئيسية الأخرى، في كثير من بلدان المنطقة، هي إما غير موجودة وإما مضطربة من حيث تغطيتها الزمانية والمكانية. ويبدو أنّ هناك صعوبة في فهم حركة استخدام المياه واستهلاكها بالرغم من أهميتها لعدد كبير من مختلف أصحاب المصلحة.

لا يخفى ما للبيانات الصحيحة من أهمية بالنسبة لاتخاذ القرارات السليمة. ففي مجال الماء، لا بدّ من فهم معدّلات وأحجام عدد من العناصر داخل أيّ توازن مائي في مختلف الظروف المناخية، وذلك لوضع سياسات المياه وإدارتها بشكل مستمرّ وفعال. وإذا كانت بعض المعلومات متوافرة في

البيانات المدخلة والمُخرجات المُتملّة في نظام دمج البيانات الأرضية لمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا

الجدول أ

معايير ثابتة	حقول التأثير الأرصادي	معطيات حول الوضع	عيّنات مُخرجات نظام دمج البيانات
الارتفاع	تساقط المطر	الغطاء النباتي	التوازنات المائية
نوعية النبات / استخدام الأراضي	الإشعاع الهبوطي	الغطاء الثلجي	خرائط أنواع المحاصيل واستخدام الأراضي
علو النباتات	درجة حرارة الجو	رطوبة التربة السطحية	استهلاك المياه بحسب المحاصيل والنباتات
دليل كثافة الغطاء النباتي	الرطوبة النوعية	خزن الماء الأرضي	مراقبة مستويات المكامن وتقلبات منسوب المياه الجوفية
خشونة السطح	سرعة واتجاه الريح	درجة الحرارة السطحية	تدفقات المياه السطحية والجوفية
كثافة وعمق الجذور	الضغط السطحي		
نسيج التربة			
نسبة انعكاس الإشعاع الشمسي			
القصور الذاتي الحراري			
الابتعاثية			

تساقط المطر المأخوذ من أجهزة استشعار الأقمار الصناعية للإدخال في نموذج نظام دمج البيانات الأرضية لمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا.

الشكل أ

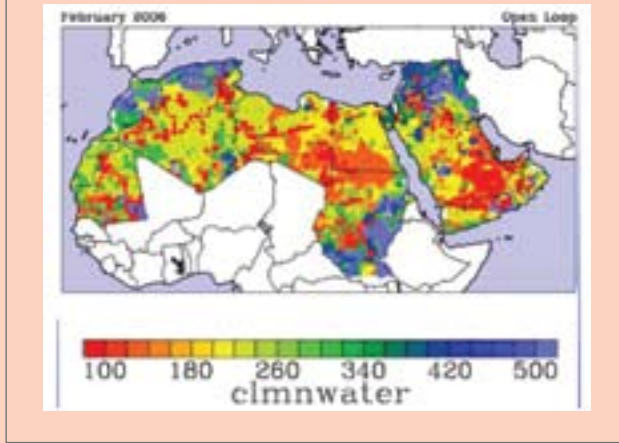


الحجم الهائل لهذه البحيرة والحالة الطبوغرافية للمنطقة يشيران إلى أن البحيرة تشكلت في فترات العصر البليستوسيني (الحديث الأقرب) الرطبة، عندما كان المطر وفيراً على مدى فترات طويلة من الزمن.

ضخمة (الشكل 11). وأظهرت النمذجة الهيدرولوجية لحوض البحيرة أنها في امتدادها الأقصى احتلت مساحة 30,750 كيلومتراً مربعاً، وربما احتوت على 2530 كيلومتراً مكعباً من المياه أثناء امتلائها. (Ghoneim and El-Baz, 2007b).

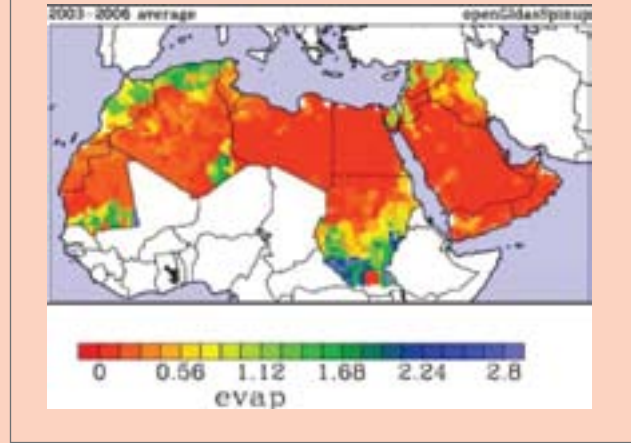
دورة المياه

الشكل ج



دورة المياه

الشكل ب



وجريان الأنهار، وخبز مياه الثلوج. وفي الشكليين ب و ج نموذجان من هذه المخرجات. وبما أن بيانات بعض المتغيرات الأرضية الهامة تُقاس بشكل متكرر فإنه يمكن أيضاً القيام بمراقبة شبه آنية للعمليات المائية الأساسية.

يتم حالياً إعداد المحور المركزي لنظام دمج البيانات الأرضية لمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا في المركز الدولي للزراعة الملحية في دبي، حيث ستركز النشاطات البحثية على إنتاج مجموعات بيانات إقليمية لتوضع بتصريف مسؤولي إدارة المياه وأصحاب القرار حيث يمكنهم الوصول إليها عبر موقع رئيسي على شبكة الإنترنت. بالإضافة إلى ذلك، سيتم تطوير القدرات في عدد من مراكز الاستشعار النائية في بلدان المنطقة حيث سينصب عمل إعداد النماذج على مشاكل المياه وخصوصاً تلك التي تهم البلدان المعنية.

وإذا ما ترسخت هذه القدرات، فإن تلك المراكز يمكن أن تكون منبراً تنطلق منه أبحاث جديدة، وهذا ما سيركز الجهود على توقعات تدفقات المياه واستخداماتها في المستقبل بناءً على حركية التحولات البيئية والمناخية والاقتصادية والاجتماعية في المنطقة. كما إن إمكانيات التقديرات المستقبلية سوف تسهل على صناع القرار اختيار السياسات والمبادرات اللازمة لمواجهة الصعوبات التي قد تنشأ في المستقبل على صعيد توافر المياه والأمن الغذائي.

د. راشيل ماكندول مستشارة في المركز الدولي للزراعة الملحية، دبي.

وللمساهمة في حل هذه المشكلة، فإن مركز غودارد للرحلات الفضائية التابع لوكالة الفضاء الأمريكية (ناسا) قد طور، بتمويل من وكالة التنمية الدولية الأمريكية، نموذجاً مختصاً بكل منطقة محددة لدمج بيانات الأراضي. تستخدم هذه المجموعة المتشابكة من برامج الكمبيوتر معادلات حسابية لتوضيح العمليات الطبيعية لخبز المياه وتدفعها. وقد تم إعداد نماذج لمناطق أميركا الشمالية وأميركا الجنوبية وأوروبا. ويستند نظام وضع النماذج إلى بيانات الأقمار الاصطناعية التابعة لوكالة ناسا، ومعطيات الرصد الميداني من بلدان منطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا، والتحليلات المتوافرة التي تتيحها مختلف مجموعات الأبحاث الدولية. ويكتسب نظام دمج البيانات الأرضية بمنطقة الشرق الأوسط وشمال أفريقيا أهمية خاصة بالنسبة للمنطقة نظراً لأنه يوحد المعطيات من مصادر عديدة متنوعة ويمكن بواسطته إصدار بيانات حول المواقع التي تفتقر إلى نقاط رصد أرضي. تشمل عملية إعداد النموذج على خطوات حسابية خاصة تضمن ربط البيانات الناتجة ربطاً وثيقاً بسجل البيانات المرصودة، في حال توافرها، وذلك للحد من الأخطاء.

يوضح الجدول - أ البيانات المستخدمة في إعداد النموذج، كما تظهر في الشكل - أ عينة من مداخلات مجموعة بيانات تساقط المطر الخاصة بالمنطقة.

سوف يوفر النموذج تقديرات للأحوال والتدفقات المائية ذات الصلة بإدارة الموارد المائية في جميع أنحاء المنطقة. كما إنه سيصدر سلسلة خرائط موقوتة لمتغيرات هامة مثل تقلبات المياه وخبزها، ورطوبة التربة، ودرجة الحرارة السطحية، واستهلاك المياه بحسب المحاصيل والنباتات،

يدعى «بحيرة دارفور الشمالية العظيمة». وتوزعت بقايارسوبيات البحيرة الهولوسينية في منتصف منطقة البحيرة، وتم تحديدها وأحاطها بشكل دقيق جداً (Haynes, 1985; Haynes and Mead 1987; Haynes et al., 1979

أما في العصر الهولوسيني، فقد شهدت المنطقة فترات مطرية متكررة ولكن بكميات أمطار أقل مقارنة بما حدث في العصر البليستوسيني. وكانت المنطقة الوحيدة التي شهدت إغراقاً بالمياه العذبة هي الجزء المركزي مما

الفضائية ونشر النتائج، أوصل المؤلف نتائج الدراسة إلى المسؤولين في السودان، بمن فيهم الرئيس السوداني ووزير الزراعة والموارد المائية. وقد تبني هؤلاء المسؤولون مبادرة «1000 بئر من أجل دارفور». وأجريت العملية نفسها في دارفور الشمالية، حيث رحب المسؤولون المحليون بالنتائج العلمية.

وقد رحبت الأمم المتحدة بهذه التطورات، وركزت على أهمية التحليل العلمي وعملية اختيار الآبار. وتبذل جهود حالياً لوضع مبادرة الألف بئر تحت رعاية الأمم المتحدة لضمان المساءلة والشفافية. ومن الضروري اختيار مواقع هذه الآبار بحيث تكون في مناطق الكثافة السكانية في دارفور جنوب البحيرة القديمة.

وهذا ممكن، لأن هطول الأمطار السنوي خلال موسم العواصف يعيد تغذية المياه الجوفية عن طريق قنوات عديدة على امتداد منحدرات جبل مرة. وفي الوقت الحالي يقوم فريق جامعة بوسطن باستخدام كل البيانات الفضائية المتاحة لاختيار أفضل المواقع لحفر الآبار بحثاً عن مصادر جديدة للمياه. وفي التحليل النهائي، فإن البرنامج المقترح لحفر الآبار هو مثال ملموس على استخدام تكنولوجيا الصور الفضائية المتقدمة لحل مشاكل شح المياه وتخفيف الأزمات الإنسانية.

الربع الخالي (شبه الجزيرة العربية)

شبه الجزيرة العربية مساحة شاسعة من الصحراء يفصلها البحر الأحمر عن الصحراء الكبرى في شمال أفريقيا. تحدها من الغرب والجنوب سلاسل جبلية عالية، تنحدر تدريجياً إلى منطقة منخفضة في الجزء الجنوبي الأوسط من شبه الجزيرة. في هذه المنطقة المنخفضة تقع الكثبان اللامتناهية للربع الخالي (El-Baz, 1998b). وكما في غرب مصر، يحوي الربع الخالي كل أشكال الكثبان تقريباً: المستقيمة والهلالية والنجمية.

ويوجد في شمال الربع الخالي مثال كامل لتركيز المياه الجوفية عن طريق الشقوق. في هذه الحالة، تقتفي منطقة الصدوع مسار نهرين سابقين. يبدأ النهر الغربي في جبال الحجاز على شكل نمط من التصريف المائي يشبه أغصان الشجر ويقود إلى قناة واحدة هي وادي الرماح. وبعد منطقة ظلت مغطاة لفترة طويلة بانهايارات رملية تحركها الرياح، ظهر مقطع مستقيم أخر لواد برز من تحت الرمال، هو وادي البطين. ولا بد أن الواديين كانا متصلين في مرحلة ما (الشكل 12) لتكوين نظام موحد في الماضي (El-Baz, 1998a).

and 1989; Pachur and Hoelzmann, 1991; Pachur and Rottingen, 1997; Pachur and Wunnemann, 2001). (1996; Hoelzmann et al., 2001).

أثناء فترة بقاء المياه في منخفض دارفور الشمالي، والتي استمرت لآلاف السنين، تسربت الكمية الأكبر إلى تحت سطح الأرض، عن طريق النفاذية الأصلية للصخور الرملية الموجودة تحت السطح و/أو النفاذية الثانوية التي تتسبب بها الشقوق في الصخور. وكما ظهر واضحاً من بيانات «رادارات 1»، فإن هناك مقطعاً شبه متصل يمتد لمسافة نحو 48 كيلومتراً ما زال محفوظاً بشكل جيد في الزاوية الشمالية الشرقية من البحيرة. يمثل هذا المقطع خطأ سليماً بعرض كيلومتر واحد تقريباً، ويحتوي على أربع علامات أفقية متوازية لسواحل سابقة، تحدد مراحل متميزة ومختلفة من انحسار البحيرة. وبما أن هذه العلامات تتسم بإشارات داكنة في صور الرادار، فإنها غالباً ما تتكون من رسوبيات ذات حبيبات دقيقة نسبياً.

تشير الخطوط الساحلية إلى أن مستوى البحيرة بقي ثابتاً لفترات طويلة. وتتميز المنطقة التي يقع فيها مقطع الساحل بنمط معقد من الكثبان الرملية البراقة وشبه المتحركة (Haynes, 1985). وبالإضافة إلى منطقة الخط الساحلي للبحيرة، هنالك العديد من الوديان الصغيرة على بيانات «رادارات 1» تختفي عندما تتصل بمنطقة الخط الساحلي، وهذا ما يشير إلى احتمال تعديل لخصائص القنوات في هذا المستوى المحدد من مستويات البحيرة. ان اختراق الخطوط الساحلية الخارجية بينما بقيت المناطق الداخلية سليمة يدل على أن الجريان المائي على السطح أصبح أضعف وأن الأودية الصغيرة لم تعد تصل إلى البحيرة مثل الأودية الأكبر منها (Ghoneim and El-Baz, 2007b).

على الحافة الشمالية الشرقية لمنخفض البحيرة، هنالك مقطع آخر محفوظ جيداً من الخط الساحلي على المستوى ذاته (573 متراً فوق سطح البحر) ويتميز بوجود أشكال طبوغرافية متميزة التقطتها بيانات رادارات 1 (Ghoneim and El-Baz, 2007a and b). طول هذا المقطع المقوس نحو 20 كيلومتراً، وعرضه كيلومتراً، وارتفاعه 3-5 أمتار. وتشير الحواجز المتوازية التي تميزه إلى أن البحيرة القديمة كانت مستقرة لفترات طويلة على هذا المستوى، كما يمكن متابعة امتداد الخط الساحلي المقابل على الجهة الغربية في كل البيانات التي تمت دراستها.

بعد انتهاء ترسيم حدود البحيرة من خلال البيانات

المكوك الفضائي، حيث أظهرت البيانات الطبوغرافية عدة مسارات لأنهار قديمة نحو المنخفض الذي يطوق كثبان الربع الخالي. ويعتقد أن هذه الأودية كانت مجاري أنهار بائدة جلبت كميات كبيرة من المياه إلى المنخفض الذي يمثل حالياً الربع الخالي. وهذا يشير إلى أن باطن الكثبان في الربع الخالي يمكن أن يحتوي على أكبر تجمعات المياه الجوفية في شبه الجزيرة العربية. ولا بد من الإشارة إلى أن آبار النفط التي تم حفرها في المنطقة قد وجدت المياه على أعماق متعددة وبمستويات مختلفة من الملوحة.

حوض آل وهيبة الرملي (شرق عمان)

رمال آل وهيبة هي عبارة عن تجمعات من الجسيمات تشبه الحبال، متواجدة في منخفض يشبه ثمرة الاجاص على امتداد الساحل الشرقي لسلطنة عمان. وقام بدراسة هذه المنطقة فريق بحثي من جامعة بوسطن بهدف تقييم مكامن المياه الجوفية في البلاد.

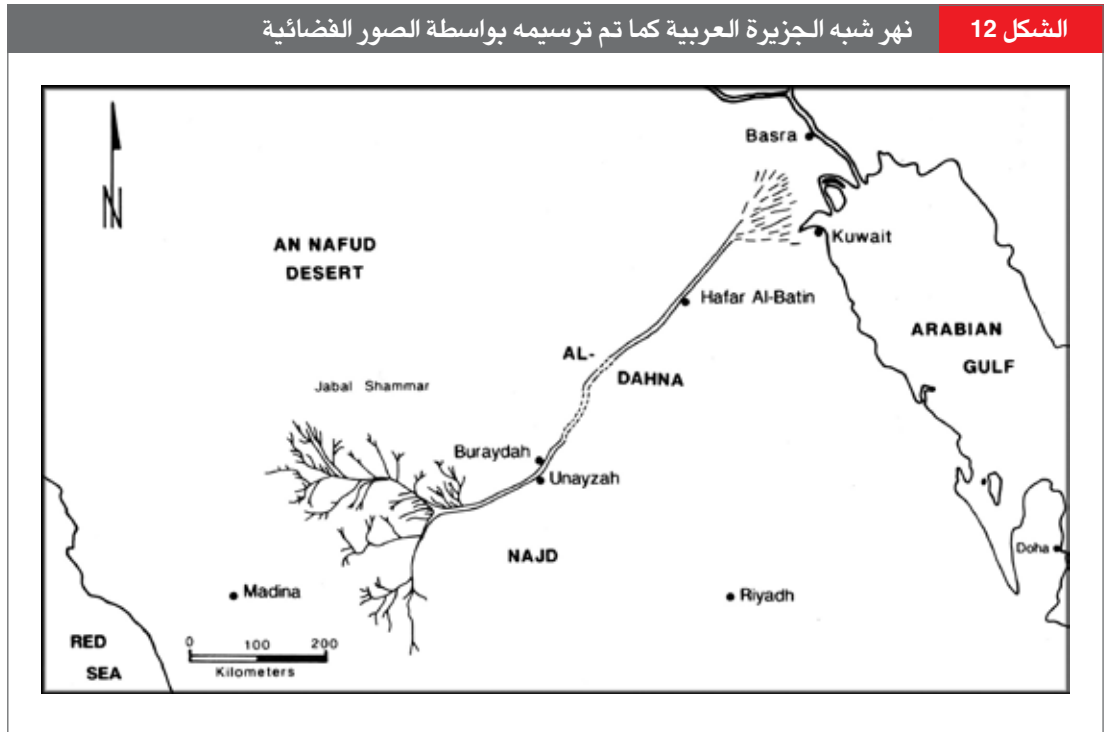
تظهر الصور الفضائية بشكل واضح تأثير التصريف المائي السطحي والقنوات القديمة على تطور رمال حوض آل وهيبة. فقد أظهرت صور الرادار عدة قنوات قديمة ومظاهر متصلة بها. ويصل الامتداد الجنوبي الشرقي لخطوط التصدع من المرتفعات إلى شمال حوض آل وهيبة ومنه إلى النهاية الجنوبية الغربية للرمال العالية. وقد ظهر أن التآكل النهري المستمر لهذا

تعرضت المنطقة الواقعة بين مساري النهرين إلى الكثير من العوامل التي أدت إلى الشقوق والكسور الصخرية. ويعتقد أنها كانت مصدراً رئيسياً لأحواض المياه الجوفية في منطقة القصيم في وسط شبه الجزيرة العربية. وتم حفر العديد من الآبار في هذه المنطقة إلى أعماق تجاوزت الكيلومتر، وتضاعف الضخ لري مزارع القمح بكثافة طوال أكثر من عقدين. لذلك تراجع منسوب المياه الجوفية في الحوض سريعاً إلى حالة خطيرة، وتم هجران الكثير من المزارع.

على كل حال، وتاماً مثل حالة النهر القديم الذي أدى إلى نشوء واحة كبرى في جنوب شرق ليبيا، فإن هذه الأودية حددت مواقع ثلاث بلدات-واحات هي بريدة وعنيزة وحفر الباطن (الشكل 12). وأصبح هذا الواقع عنصراً أساسياً في إثبات أن سطح الأرض في دولة الكويت كان سابقاً عبارة عن دلتا النهر القديم الذي صرف المياه من جبال الحجاز على بعد 850 كيلومتراً إلى غرب ساحل الخليج العربي (El-Baz, 1998a). وقد تم تطوير هذه النظرية من خلال أدلة إضافية لبيانات مستقاة من الأرض حول خصائص سطح الأرض في الكويت (El-Baz and Al Sarawy, 1996).

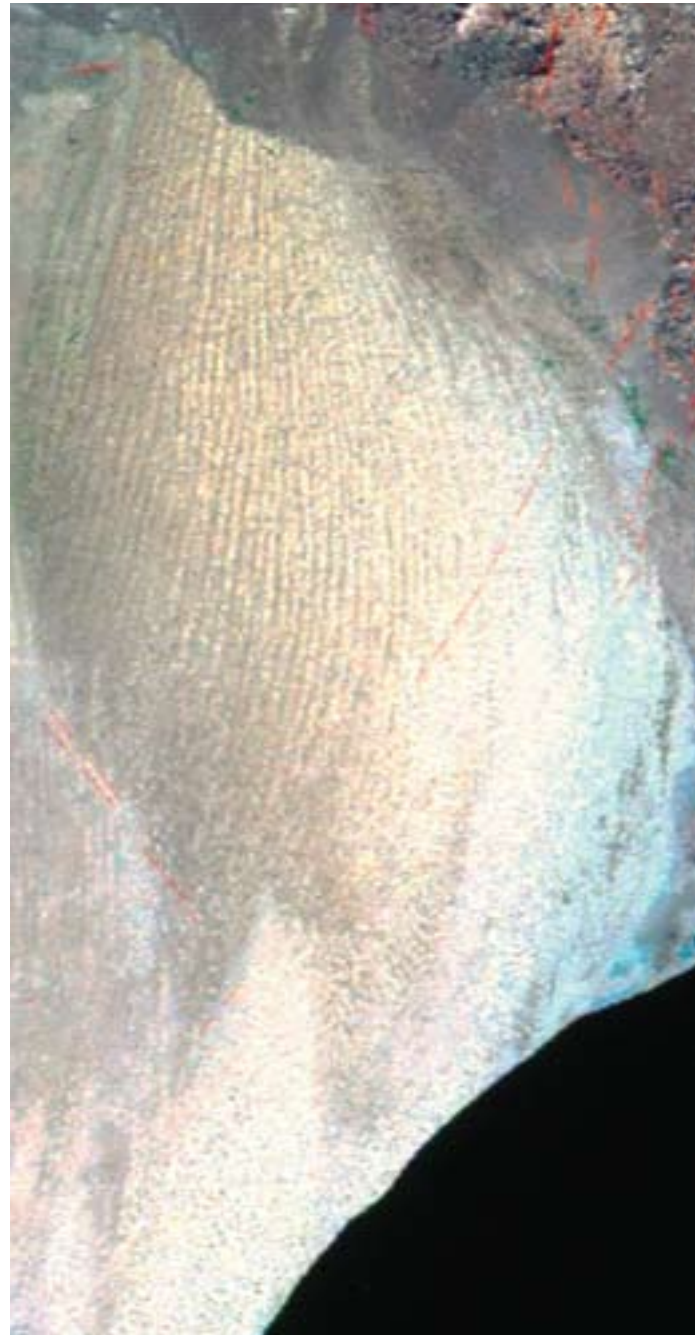
ان حقيقة وجود أنهار كانت تمر عبر شبه الجزيرة العربية تم إثباتها لاحقاً عن طريق البيانات الفضائية لرحلات

الشكل 12 نهر شبه الجزيرة العربية كما تم ترسيمه بواسطة الصور الفضائية



الشكل 13

رمال آل وهيبة في عُمان



وتشير الرؤية في هذه المنطقة إلى أن الأنظمة النهرية المضبوطة بنيويًا، التي كانت سائدة في المراحل الرطبة من تاريخ المناخ، وضعت كمية كبرى من المواد الأصلية في رمال آل وهيبة على فوهة نظام التصريف المائي. وكانت تلك الحالة مسؤولة أيضاً عن الأحجام الكبيرة للمياه الجوفية التي تم تصريفها إلى حوض آل وهيبة. وبناء على هذه الملاحظات تم اكتشاف حوض مائي يصل عمقه إلى 100 متر ويمتد على مساحة 1000 كيلومتر مربع ويحتوي على نحو 12 بليون متر مكعب من المياه الجوفية.

ما إن تغير المناخ وسادت الظروف الجافة، حتى أصبحت الرياح هي العامل الرئيسي المساهم في تعديل تضاريس السطح. فأعدت تشكيل وفرز الرمال التي رسبتها المياه في الكثبان الرملية وحقول الرمال التي تشكل معالم اليوم، وهو تسلسل من الأحداث مشابه لما لوحظ في صفيحة سليمة الرملية في شرق الصحراء الكبرى (El-Baz, 1988, 1998a and b, 2000). وكما هي الحال في شرق الصحراء الكبرى ومناطق جافة أخرى، فإن التغير من الظروف الرطبة إلى الجافة لم يكن بسيطاً، حيث كانت هنالك فترات من الجفاف ونشاطات متزايدة للرياح، تتناوب مع فترات ماطرة منذ العصر الثالثي إلى بداية العصر الهولوسيني.

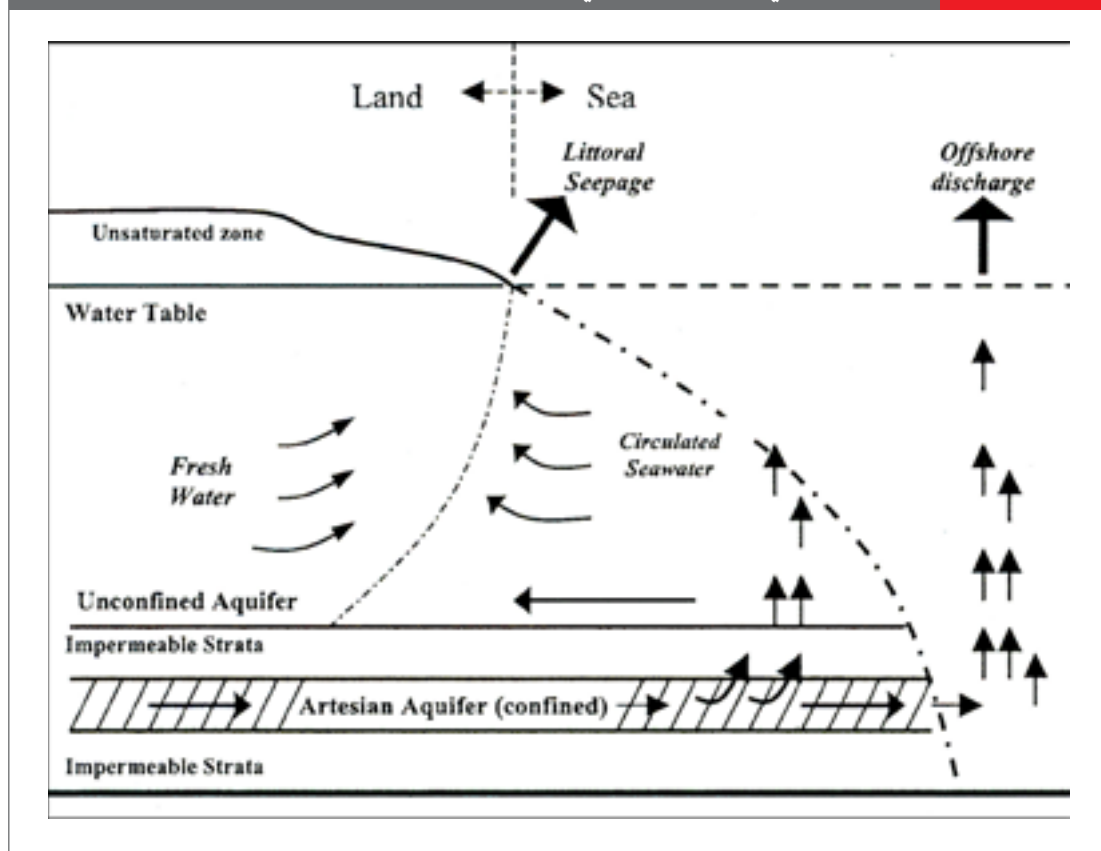
إن كثافة الرمال في حوض آل وهيبة تعكس مدى عمق هذا الحوض. لقد امتلأ مركز الحوض بأكثف الرسوبيات من الرمال العالية، ويحوي أكثر تراكيز المياه الجوفية. أما الجوانب الجنوبية فهي مليئة بكميات أقل من الرمال. ويمكن فهم مدى سماكة الرمال إذا أخذت الأصول النهرية بعين الاعتبار. أما المناطق الجنوبية الشرقية، وهي عبارة عن وديان مضبوطة من جبال الحجر (شوهدت عن طريق صور لاندسات والرادار)، فهي تمثل النمط السائد من الترسبات النهرية التي زودت الكمية الأكبر من الرمال التي تملأ الحوض. كما أن هذه الوديان ربما أوصلت المكونات الرملية إلى المنطقة الشمالية لتكوين الأيوليانيت (Aeolianite) الذي يمتد إلى الخارج، علماً أن حافات الرمل والأيوليانيت غنية بالكربونات.

ويعتقد أن الأيوليانيت تكوّن من ترسبات كلسية من البحيرة قامت بتجميع الكربونات وتسببت في تلاحم وتقوية الترسبات الرملية في العمق. أما الترسبات العليا من المادة نفسها فبقيت رخوة، ما جعلها معرضة لآثار الرياح خلال فترات المناخ الجاف. وأما الرمال الأكثر نضوجاً والثرية بالكوارتز في الجنوب، فيمكن أن تعزى إلى المسافات الكبيرة التي قطعتها من الجبال الشمالية

النظام كان السبب الرئيسي لظاهرة وجود خط مستقيم للحافة الجنوبية الغربية للكثبان الكبيرة. وهذا الحال يذكر بالمواقع الأخرى حيث تحدث نهايات الكثبان نتيجة قطع القناة. وعلى نحو مشابه، تسببت مناطق الصدوع والأودية في استقامة الحافات الشمالية الشرقية لرمال آل وهيبة (الشكل 13).

رسم تخطيطي للمياه العذبة وهي تنساب في المناطق الساحلية

الشكل 13



المياه العذبة في العالم (El-Baz, 1998b). هذا الوضع يبدو شبيهاً بصحارى راجستان الرملية في شمال غرب الهند، ومنطقة سمبسون في أستراليا، ومنطقة تاليمان في الصين (El-Baz, 1998b). ولهذا يبدو أن تجمع كميات كبيرة من الرمال السطحية في المناطق الجافة حالياً قد يمثل إشارات سطحية الى وجود مياه جوفية.

شرق البحر المتوسط (لبنان)

تم التيقن من مرور المياه الجوفية عبر مناطق الشقوق الصخرية في عدة مناطق. وتعتبر حركتها في الصدوع إحدى الآليات الممكنة لتجمع المياه بكميات كبيرة (El-Baz and Bisson, 1987; NRC, 1996). إلى ذلك، فإن الجريان السطحي للمياه نحو البحر يجب أن يحظى بكثير من الاهتمام على طول المناطق الساحلية في العالم العربي. ويحدث تصريف المياه العذبة إلى البحر إما عن طريق الجريان السطحي المباشر (من الأنهر والجداول) وأما كتصريف من المياه الجوفية وهي الظاهرة التي تسمى عادة «ينابيع تحت البحر» أو «الأنهر الخفية». وتعتبر منطقة شرق البحر المتوسط مثلاً نموذجياً لهذه الظاهرة الهيدرولوجية، خاصة في سواحل لبنان (Shaban et al., 2005).

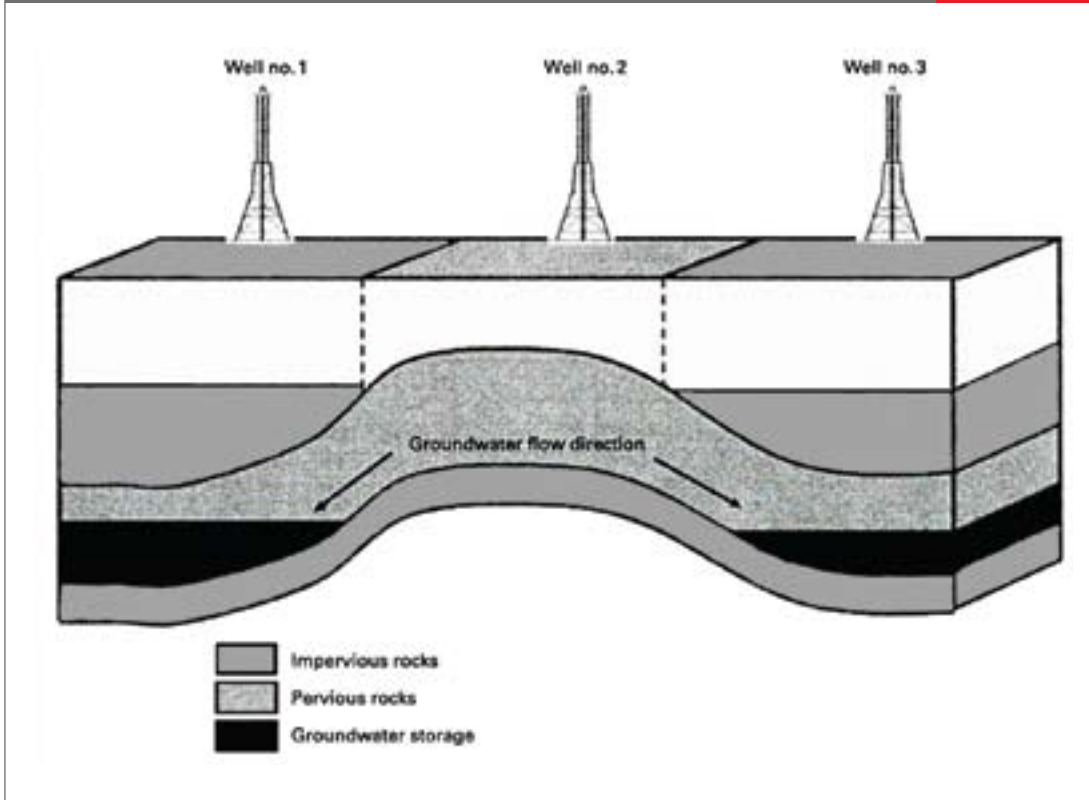
(المزود الرئيسي للرمال)، إذ ان انتقال الرمال لمسافات بعيدة يؤدي إلى ذوبان نسب أكبر من الكربونات.

هذا الترابط بين التركيب السائد للرمال مع نوعية الصخور المحيطة يبدو واضحاً أيضاً في حالة صفيحة سليمة الرملية في جنوب غرب مصر (El-Baz, 1998b)، حيث الرمال غنية بالكوارتز كما هو متوقع إذا نشأت من الصخور الرملية النوبية الموجودة تحت صفيحة سليمة الرملية والى الغرب، مقارنة بالصخور الكلسية في المنطقة الشمالية الشرقية. ويتطابق ذلك مع نظام الترسيبات النهرية المتجه نحو الشرق والشمال (كما يلاحظ من اتجاهات التصريف القديمة (Robinson et al., 1999 and 2000) خلال المراحل المناخية الرطبة، التي تبعتها أنظمة الرياح المتجهة من الشمال إلى الجنوب والتي لا تزال سائدة حتى اليوم (El-Baz et al., 2000).

بناء على ذلك، فإن مشاهدات الاستشعار عن بعد تشير إلى أن حوض آل وهيبية يتضمن مصادر شاسعة من المياه الجوفية، وهو نسخة مصغرة عن المنخفضات المليئة بالرمال في شرق الصحراء الكبرى (أكبر كتلة معروفة من

تحديد مواقع المياه الجوفية من خلال تركيبة تحت سطح الأرض حيث يمكن وجود بئر جافة بين بئرين منتجتين

الشكل 14



هذه التطبيقات، لأنها تحوي عدداً من الأنهار وتنوعاً في الظروف المناخية. وفي الوقت نفسه، فإن محطات قياس الأمطار والمخططات الهيدرولوجية غير كافية أو غير متوفرة. ويتميز الهطول المطري في هذه المنطقة بمعدلات عالية وتكرارات لذروات الهطول. وتتسبب المنحدرات الجبلية (75 - 100 م/كلم) وقصر الأنهار (أقل من 50 كلم) في طاقة عالية للتدفق المائي نحو البحر، حيث تكون المدة عادة أقل من 5 ساعات. وهذا ما يظهره التباطؤ الزمني المنخفض الذي يصل معدله الى 2,4 (Shaban et al., 2005 and 2007).

تخف طاقة التدفق العالية للمياه الجارية من الأنهار الساحلية في لبنان عبر الصدوع وقنوات الكارست والكهوف، بالإضافة إلى النسبة العالية للتعرجات في مسارات الأنهر. ويشير فقدان الكبير للمياه العذبة من الأنهر عن طريق هذا النظام الهيدرولوجي إلى الحاجة الملحة لتنفيذ مشاريع لحصاد المياه السطحية. وبالإضافة إلى ذلك، فإن إنشاء سدود على مجاري الأنهار بهدف الحصاد المائي قد يطيل زمن بقاء المياه على السطح من أجل تغذية الأحواض الجوفية العديدة

تؤدي المعدلات العالية لهطول الأمطار في المنطقة (بمعدل 950 - 1100 ملم) إلى تواجد كميات كبيرة من مياه الجريان السطحي التي تتدفق بسرعة نحو البحر بسبب انحدار سطح الأرض. إلى ذلك، تتسرب المياه الجوفية من الأحواض الساحلية إلى البحر على امتداد الصخور (الشكل 14)، إضافة إلى أنظمة الصدوع المتعددة التي تزيد تدفق المياه الجوفية نحو البحر (Shaban et al., 2007).

يوجد في لبنان 14 نهراً صغيراً، ثلاثة منها داخلية تنشأ من سهل البقاع، وهو منخفض يقع بين سلسلتين جبليتين. وتتدفق مياه الأنهر الساحلية مباشرة إلى البحر المتوسط. وتم مؤخراً استخدام تقنيات الاستشعار عن بعد في الدراسات الهيدرولوجية في المنطقة. وكما في حالة الإمارات العربية المتحدة (الشكل 6) تم استخدام بيانات MODIS-Terra و TRMN بسبب إمكانية الحصول عليها بشكل يومي وهذا ما يسمح بالمراقبة المتكررة. ويمكن لهذا التوجه في حال تم تحسينه أن يستبدل التقنيات الأخرى بفضل الكلفة البسيطة والموثوقية العالية.

وتعتبر المناطق الساحلية في لبنان مثالية لاستخدام

المياه الجوفية في شرق الصحراء الكبرى. لقد تم تحديد بحيرتين قديمتين هائلتين في جنوب غرب مصر وفي شمال غرب السودان. كما تم كشف مجريين لنهرين قديمين كانا سبب نشوء واحة كبرى ومياهها الجوفية في جنوب شرق ليبيا. كذلك تم تحديد منطقة الربع الخالي في وسط شبه الجزيرة العربية، ومنطقة وهبية في شرق عُمان، كمواقع يمكن أن تتواجد فيها كميات كبيرة من المياه الجوفية. وينسب بعض هذه المياه إلى البحر عبر شقوق تحت سطح الأرض.

بناء على هذه النتائج، نقترح هنا إطلاق دراسة كبرى في المنطقة العربية كافة، بهدف تحديد المواقع التي يمكن أن تحتوي على تجمعات من المياه الجوفية. ويجب جمع كل البيانات المتاحة لكل دولة أو منطقة، لأن استخدام بيانات جزئية يمكن أن يؤدي إلى نتائج مغلوطة. كما يجب معالجة البيانات وتحليلها والربط بينها وتحديثها ضمن قاعدة بيانات فعالة من نظم المعلومات الجغرافية. وفي الدول المتجاورة، يجب تبادل قواعد البيانات بحرية من أجل التخطيط للاستخدام المنصف لمصادر المياه الجوفية المشتركة. ويجدر اعتبار هذه المبادرة ذات أولوية قصوى من أجل استثمار هذا المورد الثمين لمصلحة الشعوب العربية. ولكي يتم تطبيق ذلك بالطريقة الصحيحة، علينا أن نتبنى مقاربة جديدة بعيدة عن الطريقة التقليدية في العمل. ان التمسك بنظريات قديمة حول المياه الجوفية في العالم العربي من شأنه أن يعيق استفادتنا من هذا المورد الحيوي. يجب أن نتقبل الأفكار الجديدة بينما نقوم بتطبيق النظريات السليمة لاختبار اقتراحات جديدة. علينا أن نكون شغوفين بتعلم ما هو جديد، ومستعدين لتحدي النظريات المقبولة، وقادرين على القيام بالتجارب من أجل إنتاج معرفة جديدة. ان هذه المعرفة الجديدة سوف تسمح لنا باستخدام مواردنا بشكل فعال وسليم من دون أن نُؤذي البيئة.

من الواضح أن معظم العالم العربي لا يزال غير مرسم بدقة في ما يتعلق بتواجد مصادر المياه الجوفية. والحجم الهائل للدراسات المنشورة عن المياه الجوفية في العالم العربي يشير إلى الآتي: أولاً، سوف يزداد شح المياه الحالي نتيجة النمو السكاني العالي وتغير المناخ. ثانياً، هناك ضخ جائر يستنزف الأحواض المائية المنتجة، مع عدم وجود ضوابط تشريعية كافية لضمان استدامتها. ثالثاً، لم يتم تحديد كميات المياه الجوفية التي تضمن الاستخدام العادل في الأحواض المائية المشتركة. رابعاً، ما زالت مساحات شاسعة من الصحارى العربية غير مدروسة وغير مستكشفة.

في المنطقة. من المهم أيضاً أن نأخذ في الاعتبار تأثيرات التراكيب الموجودة تحت السطح على مواقع تواجد المياه الجوفية. ان وجود التراكيب غير المنتظمة تحت السطح بسبب طي طبقات الأرض وتصدها يتسبب في اقتصار تواجد المياه على مناطق محددة. في مثل هذه الحالات، أي بئر يتم حفرها بين بئرين منتجتين يمكن أن تكون جافة (الشكل 15). ولهذا فإن معرفة التركيبة الجيولوجية لمنطقة ما تعتبر ضرورية لاستكشاف المياه الجوفية.

VII. خلاصة

تمثل المياه الجوفية أحد أثمن الموارد الطبيعية في العالم العربي. ونتيجة للظروف الجافة وشح الأمطار في المنطقة، هنالك اعتقاد خاطئ بأن المياه الجوفية شحيحة أو تم استنزافها. وفي واقع الأمر أن أجزاء واسعة في هذه المنطقة ما زالت تنتظر استكشاف مكائنها من المياه الجوفية، بما في ذلك المساحات الشاسعة المغطاة بالرمال في الصحراء الكبرى والربع الخالي. والسبب هو الإدراك الحديث أن هذه الرمال العربية تم تدوير شكلها ونقلها وترسيبها بواسطة مياه سطحية جارية أثناء فترات المناخ الرطب، الذي تناوب مع المراحل الجافة في الماضي الجيولوجي، وكانت آخر الفترات الرطبة قبل 5000 سنة. وخلال المراحل الجافة، مثل الفترة الحالية، تعمل الرياح على الترسبات الرملية لتكوين الكثبان الصحراوية.

وتعتبر الصور الفضائية أداة نموذجية للبحث عن احتمال وجود المياه الجوفية في الصحارى العربية. وتتضمن هذه البيانات: أولاً، الصور المتعددة الأطياف التي تعكس المظاهر السطحية بوضوح وتسمح باستدلال تاريخها الجيولوجي. ثانياً، الصور الحرارية التي تظهر مواقع تجمع مياه الأمطار تحت السطح والتي يمكن أن تعيد تغذية المياه الجوفية، وكذلك تسرب المياه الجوفية إلى البحر على طول المناطق الساحلية. ثالثاً، بيانات الرادار التي تخترق الغطاء الرملي لكشف الطبوغرافيا السفلى. رابعاً، بيانات الارتفاع التي توضح اتجاه تدفق المياه السطحية في الماضي وكذلك في الحاضر. ان الربط بين هذه المجموعات من البيانات في نظم المعلومات الجغرافية يتيح لنا معرفة أفضل الطرق لتحديد واستغلال موارد المياه الجوفية.

هذا الفصل يقدم أمثلة حول استخدام البيانات والصور الفضائية لكشف الموارد الكامنة غير المعروفة سابقاً من

بالتعاون بين الحكومات المختلفة.

الحالة الثانية لضرورة جمع البيانات وتحليلها ووضع التشريعات اللازمة تتعلق بإدارة الموارد الكامنة في الصحراء المفتوحة. وكما شرحنا سابقاً في هذا الفصل، فإن هنالك مساحات شاسعة من الأراضي لم يتم استكشافها بعد. والأسئلة الرئيسية التي تتعين الإجابة عنها من خلال حفر آبار استكشافية في الصحارى المفتوحة تتضمن الآتي:

1. ماهي حدود كل حوض أو طبقة للمياه الجوفية؟
2. إلى أي عمق يصل مستوى المياه الجوفية؟
3. ماهي نسبة ملوحة الحوض؟
4. ماهي كمية المياه المحتواة في كل حوض؟
5. ما هي حدود الضخ الآمن التي تضمن استدامة الحوض؟
6. هل سيتم استخدام المياه في المكان نفسه لأغراض الزراعة، أم ستنقل إلى مواقع التواجد البشري (كما في حالة النهر الاصطناعي العظيم في ليبيا)؟

في هذه الحالة المحددة لوجود المياه الجوفية في الأحواض الصحراوية، من الضروري لواضعي السياسات والتشريعات الأخذ بعين الاعتبار أن كل حوض للمياه الجوفية هو في الواقع "حوض أحفوري". وكما أوضحنا في هذا الفصل، فإن المياه تراكمت خلال فترات المناخ الرطب التي استمرت لآلاف السنين في الماضي الجيولوجي. ويمكن إعادة تغذية بعض المواقع الثانوية على امتداد المرتفعات الجبلية، ولكن من النادر جداً أن يؤدي تساقط الأمطار إلى إعادة تغذية الأحواض الجوفية الصحراوية. ومن وجهة نظر صناعة السياسات والتشريعات، يجب اعتبار مثل هذه المياه الجوفية مصدراً محدوداً سيستمر لفترة محددة من الزمن.

في الخلاصة، تحتاج مصادر المياه الجوفية في العالم العربي إلى دراسات دقيقة وتفصيلية، وكذلك إلى جمع البيانات عن طريق الأدوات الحديثة التي تم اختبار نجاحها في أجزاء أخرى من العالم. ومن الواضح أيضاً أن استخدام المياه الجوفية يحتاج إلى إدارة أفضل، من خلال تشريعات تنظيمية متطورة ومدروسة جيداً. ولا يمكن تحقيق أي من هذين الهدفين من دون الاهتمام المستمر لصناع السياسات، مع التركيز على الاستخدام الطويل الأمد. هناك حاجة حالياً إلى جهود وخطط متضافرة من أجل مواجهة تحدي شح المياه في المستقبل.

تنتمي هذه المسائل الحساسة إلى نطاق السياسات، حيث يجب أن تقوم الهيئات الحكومية بجمع وتحليل البيانات المطلوبة لتنظيم استخدام المياه الجوفية. ومن الضروري أيضاً مواصلة اهتمام صناع السياسات على المدى الطويل بهذه البرامج والدراسات، ولهذا يجب أن نأخذ بعين الاعتبار مجموعة من القضايا تحتاج إلى تنظيم من قبلهم.

سياسات مقترحة

من أجل الاستثمار الأفضل لمصادر المياه الجوفية، من المهم تأسيس قاعدة بيانات رقمية شاملة، وتجديدها بشكل مستمر بناء على نتائج البحوث العلمية الجديدة وتقنيات النمذجة والتحليل البياني الأحدث. وجمع البيانات مطلوب لجميع المناطق التي يحتمل فيها استخراج المياه الجوفية من أجل الاستخدامات البشرية أو الزراعية أو الصناعية. وتتضمن البيانات المطلوبة مواقع الآبار بترميز جيولوجي، وأعماقها، ونوعية الصخور التي تحويها، وملوحة المياه، ومعدلات الضخ، إضافة إلى بيانات تاريخية حول التغيرات في مستوى المياه الجوفية مكانياً وزمنياً.

كل هذه البيانات ضرورية من أجل التقييم السليم لموارد المياه الجوفية التي يتم استخدامها باستمرار، والوصول إلى معدلات مناسبة من الضخ لضمان استدامة الأحواض. أحد الأمثلة الساطعة على الضخ الجائر الذي لا يخضع لأي تنظيم هو مثال منطقة القصيم في وسط المملكة العربية السعودية، حيث أدى الضخ غير المنضبط للمياه الجوفية من أجل ري القمح إلى استنزاف المصدر وهجران عدد كبير من الحقول.

أما بالنسبة إلى أحواض المياه الجوفية المشتركة التي تمتد أبعد من الحدود الوطنية، فهناك حاجة إلى قاعدة بيانات تركز على الاستخدام العادل للمورد. وتشير الحالات الدراسية المذكورة سابقاً إلى أن مناطق عديدة تتضمن أحواضاً تمتد عبر الحدود. ومن أهم أحواض المياه الجوفية المشتركة في العالم العربي حوض سليمة بين مصر والسودان، وحوض سيوة - جغبوب بين مصر وليبيا، ومنطقة صدع تبوك بين الأردن والسعودية، وحوض الحماد بين سورية والأردن وفلسطين، والمنطقة الجبلية لشرق البحر المتوسط في كل من لبنان وسورية. ويستحسن جمع المعلومات الضرورية الآن، من أجل تفادي المشاكل الممكنة عندما لا تعود المصادر الموجودة كافية للطلب في المستقبل. وفي هذه الحالة يجب أن تتم خيارات اتخاذ السياسات وأطر التنظيم التشريعي

المراجع

- Elachi, C. and J. Granger (1982). 'Space-borne imaging radars probe "in depth"'. *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) Spectrum*, 19:24-29.
- Elachi, C., L. E. Roth and G.G. Schaber (1984). 'Space-borne radar subsurface imaging in hyperarid regions'. *Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE) Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-22: 383-388.
- El-Baz, F. (1979). *Egypt as Seen by Landsat. (65 Landsat images with explanatory drawings in Arabic and English)*. Dar El-Maaref Press, Cairo, Egypt.
- El-Baz, F. (1982) Genesis of the Great Sand Sea, Western Desert of Egypt. *Presented at the 11th International Congress on Sedimentology, International Association of Sedimentologists, 22-27 August, Hamilton, Ontario, Canada.*
- El-Baz, F. (1988). 'Origin and evolution of the desert'. *Interdisciplinary Science Reviews*, 13: 331-347.
- El-Baz, F. (1998a). The Arab World and Space Research: Where Do We Stand. *The Emirates Center for Strategic Studies and Research, Abu Dhabi, U.A.E.*
- El-Baz, F. (1998b). 'Sand accumulation and groundwater in the eastern Sahara'. *Episodes*, 21(3): 147-151.
- El-Baz, F. (2000). 'Satellite observations of the interplay between wind and water processes in the Great Sahara'. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(6): 777-782.
- El-Baz, F. and T.M. El-Ashry (1991). 'Groundwater for a thirsty Earth'. *Geotimes*, 36(6): 15-18.
- El-Baz, F. and M. Al-Sarawi (1996). 'Kuwait as an alluvial fan of a palaeo-river'. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, Supplement 103: 49-59.
- El-Baz, F. and R. Bisson (1987). *Applying Space-Age Technologies to Water Development in Arid Regions*. Paper 54, U.S. Army Corp of Engineers, Galveston, Texas.
- El-Baz, F., M. Mainguet and C.A. Robinson (2000). 'Fluvio-aeolian dynamics in the north-eastern Sahara: Interrelation between fluvial and aeolian systems and implications to ground water'. *Journal of Arid Environments*, 44: 173-183.
- Gaber, A., Koch, M., and F. El-Baz (2010). *Textural and compositional characteristics of Wadi Feiran deposits, Sinai Peninsula, using Radarsat-1, PAISAR, SRTM and ETM+ data*. *Remote Sensing*, 2001(2): 52-75.
- Ghoneim, E. and F. El-Baz (2007a). 'The application of radar topographic data to mapping of a mega-paleodrainage in the Eastern Sahara'. *Journal of Arid Environments*, 69: 658-675.
- Ghoneim, E. and F. El-Baz (2007b). 'DEM-optical-radar data integration for palaeohydrological mapping in the northern Darfur, Sudan: implications for groundwater exploration'. *International Journal of Remote Sensing*, 28(22): 5001-5018.
- Ghoneim, E., M. Ozdogan, A. Almulla, M. Koch, K. Ahmad and F. El-Baz (2005). 'Thermal anomalies in eastern Arabia: implication to groundwater recharge'. *The Geological Society of America Annual Meeting, Salt Lake City, USA, 16-19 October, 2005, Abstracts with Programs*, 37(7).
- Haynes Jr., C.V. (1985). 'Quaternary studies, Western Desert, Egypt and Sudan - 1979-1983 field seasons'. *National Geographic Society Research Reports*, 16: 269-341.
- Haynes Jr., C.V. and A.R. Mead (1987). 'Radiocarbon dating and paleoclimatic significance of subfossil *Limicolaria* in northwestern Sudan'. *Quaternary Research*, 28: 86-99.
- Haynes Jr., C.V., C.H. Eyles, L.A. Pavlish, J.C. Rotchie and M. Rybak (1989). 'Holocene paleoecology of the Eastern Sahara: Selima Oasis'. *Quaternary Science Reviews*, 8: 109-136.
- Haynes Jr., C.V., P.J. Mehringer and S.A. Zaghoul (1979). 'Pluvial lakes of North-Western Sudan'. *The Geographical Journal*, 145: 437-445.
- Henning, D. and H. Flohn (1977). *Climate Aridity Index Map. U.N. Conference on Desertification, UNEP, Nairobi, Kenya.*
- Hoelzmann, P., B. Keding, H. Berke, S. Kropelin and H. Kruse (2001). 'Environmental change and archaeology: lake evolution and human occupation in the Eastern Sahara during the Holocene'. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 169: 193-217.
- Jensen, J.R. (2000). *Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective*. Prentice Hall, Saddle River, New Jersey.
- Lillesand, T., R. Kiefer and J. Chipman (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation*. Fifth Edition. John Wiley, New York.
- National Research Council (1996) *Rock Fractures and Fluid Flow*. National Academies Press, Washington, District of Columbia.
- Pachur H.J. and P. Hoelzmann (1991). *Paleoclimatic implications of late Quaternary lacustrine sediments in Western Nubia, Sudan*. *Quaternary Research*, 36: 257-276
- Pachur, H.J. and F. Rottinger (1997). 'Evidence for a large extended paleolake in the eastern Sahara as revealed by spaceborne radar lab images'. *Remote Sensing of Environment*, 61: 437-440.
- Pachur, H.J., and B. Wunnemann (1996). 'Reconstruction of the paleoclimate along 30 E in the Eastern Sahara during the Pleistocene/Holocene transition'. *Paleoecology of Africa*, 24: 1-23.
- Pratt, D. and C. Ellyett (1979). 'The thermal inertia approach to mapping of soil moisture and geology'. *Remote Sensing of Environment*, 8: 151-168.
- Rizk, Z.S. (1998). 'Falajes of United Arab Emirates: Geological settings and hydrological characteristics'. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Dhahran, Saudi Arabia, 23(1C):3-25.
- Rizk, Z.S. and H.A. El-Etr (1997). 'Hydrogeology and hydrogeochemistry of some springs in the United Arab Emirates'. *Arabian Journal for Science and Engineering*, Dhahran, Saudi Arabia, 22 (1C):95-111.
- Robinson, C.A., F. El-Baz, M. Ozdogan, M. Ledwith, D. Blanco, S. Oakley and J. Inzana (2000). 'Use of radar data to delineate palaeodrainage flow directions in the Selima Sand Sheet, Eastern Sahara'. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(6): 745-753.
- Robinson, C.A., F. El-Baz and V. Singhroy (1999). 'Subsurface imaging by Radarsat: Comparison with Landsat TM data and implications to ground water in the Selima area, Northwestern Sudan'. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25(3): 268-277.
- Shaban, A., F. El-Baz and M. Khawlie (2007). 'The relation between water wells productivity and lineaments morphology: Selected zones from Lebanon'. *Nordic Hydrology* 38(2): 187-201.
- Shaban, A., M. Khawlie, C. Abdallah and G. Faour (2005). 'Geologic controls of submarine

groundwater discharge: Application of Remote Sensing to Lebanon'. Environmental Geology 47: 512-522.

Singh, A. (1989). *'Digital change detection techniques using remotely-sensed data'*. International Journal of Remote Sensing, 10(6): 989-1003.

Wendorf, F., A. Close, R. Schild, R. Said, C.V. Haynes Jr., A. Gautier and N. Hadidi (1977). *'Late Pleistocene and recent climatic changes in the Egyptian Sahara'*. Geographical Journal, 143: 211-234.