التقنيات الجغرافية والتطبيقات الحديثة للاستشعار
عن بعد في دراسات جودة المياه في المظاهر الطبيعية

جيري أ. غريفيث

ترجمة تصرف
أ.د. مضر خليل عمر

نظرة عامة وبيان المشكلة

يُنفق ما يُقدّر بـ 70 مليار دولار سنويًا في الولايات المتحدة الأمريكية على البرامج التنظيمية البيئية لحماية الموارد الإيكولوجية (ويتير وبولسن، 1992). وعلى وجه الخصوص ، أصبحت جودة وحالة موارد المياه في البلاد مصدر قلق بالغ خلال العقود القليلة الماضية (كاربنتر وآخرون، 1998؛ لوغ، 1998؛ أونيل وآخرون، 1997). ومع ذلك ، ما يزال توثيق حالة الجداول الإقليمية يمثل تحديًا . على الرغم من أن البرامج التنظيمية المائية قد استخدمت تاريخيًا نهجًا خاصًا بكل موقع لحماية جودة المياه وتحسينها ، إلا أن صعوبات تقييم الآثار والتأثيرات الأقل وضوحًا الناجمة عن التلوث من مصادر غير محددة ، وتدهور الموائل ، والآثار التراكمية للمستويات غير المميتة طويلة الأجل من الملوثات ، ما تزال قائمة دون حل (ويتير وبولسن، 1992). في الواقع ، حوالي 80% من مجاري المياه لا تُقيّم مساحات شاسعة من الأراضي في الولايات المتحدة الأمريكية وفقًا لمتطلبات المادة 305(ب) من قانون المياه النظيفة (مكتب المحاسبة الحكومي، 2000).

يُعدّ الاستخدام المكثف للمواد الكيميائية والأسمدة الزراعية ، الشائعة الاستخدام لزيادة غلة المحاصيل ، عاملًا رئيسيًا في تدهور جودة المياه في الجداول والأنهار (كاربنتر وآخرون، 1998؛ ماتسون وآخرون، 1997؛ كولبين، 1997) . نظرًا لتأثر جودة المياه بشكل كبير باستخدام الإنسان للأراضي ، ولأن صحة الإنسان تعتمد بشكل كبير على المياه النظيفة ، فإن تقييم حالة الموارد المائية يُعدّ من أهم مجالات البحث البيئي متعدد التخصصات (وير وآخرون، 1998). بالإضافة إلى ذلك ، ولأن استخدام الأراضي وتغطيتها من المحددات القوية لجودة المياه ، فمن الضروري وجود طرق لرصد حالة المظاهر الطبيعية الإقليمية بكفاءة وفعالية من حيث التكلفة . على الرغم من هذه الحاجة ، إلا أن هناك ندرة في البرامج التي ترصد جودة المياه المرتبطة باستخدام الأراضي وتغطيتها على المستوى الإقليمي (هيرليهي وآخرون، 1998). ويمكن أن تكون تقنية الاستشعار عن بُعد ذات فائدة كبيرة لهذا النوع من الرصد.

تتعلق فائدة تقنيات الاستشعار عن بُعد في تحليلات حالة المجاري المائية / جودة المياه بالطبيعة الجغرافية الواسعة لمشاكل التلوث من المصادر غير المحددة ، على وجه الخصوص . هذه الخاصية ، والآثار الناتجة عنها على المجاري المائية بسبب التلوث من المصادر غير المحددة ، تستلزم تقييم حالة مستجمعات المياه وجودة المياه على المستوى الإقليمي ، وتزيد من أهمية تطوير دراسات على مستوى المظاهر الطبيعية (هي وآخرون، 2000) . على سبيل المثال ، تُعد آثار التلوث من المصادر غير المحددة ذات أهمية خاصة في منطقة زراعية في الغالب مثل الغرب الأوسط والسهول الكبرى في الولايات المتحدة. تعود أسباب ذلك إلى التغيرات الفيزيائية التي تطرأ على المجاري المائية عند تحويل المراعي الطبيعية إلى مراعي أو أراضٍ زراعية ، ومنها : 1) نمط التصريف؛ 2) الطبيعة الفيزيائية للقناة؛ 3) نظام اضطراب قاع المجرى؛ 4) أنظمة درجة الحرارة والإضاءة؛ 5) التركيب الكيميائي؛ 6) مدخلات المواد العضوية الأرضية الذائبة والجسيمية (تاونسند ورايلي، 1999).

ويمكن لهذه التغيرات الفيزيائية بدورها أن تؤثر على الكائنات الحية في المجاري المائية (ويشرت ورابورت، 1998؛ تاونسند وآخرون، 1997؛ ريتشاردز وآخرون، 1996). وبسبب هذه التأثيرات الناجمة عن الزراعة ، بالإضافة إلى أنشطة استخدام الأراضي الأخرى ، تشير التقارير إلى أن المغذيات والرواسب والمبيدات تؤثر على 55% من أميال المجاري المائية المتضررة في الولايات المتحدة (ويلز، 1992) .

الخلفية

يستعرض القسم الاتي جوانب مهمة من رصد جودة المياه والمظاهر الطبيعية الإقليمية ، بما في ذلك : ١) تزايد الاعتراف بأهمية المناهج واسعة النطاق لدراسة جودة المياه؛ ٢) تزايد الاعتراف بدور علم بيئة المظاهر الطبيعية وأنماطها في دراسة العلاقات بين الإنسان والبيئة؛ ٣) تطبيق تقنيات الاستشعار عن بعد لدراسة النظم البيئية المائية؛ ٤) دراسات جودة المياه والمظاهر الطبيعية في سياق برامج الرصد البيئي ومؤشرات الحالة البيئية.

مناهج تقييم جودة المياه على مستوى المظاهر الطبيعية

تعكس طبيعة الجداول والأنهار تكاملاً بين العمليات الفيزيائية والبيولوجية التي تحدث في مستجمعات المياه ، ومع ذلك ، فقد جرت الدراسات البيئية وإدارة الموارد الطبيعية تقليديًا على مستوى مجرى النهر أو مساحة الغابة أو قطعة الغطاء النباتي (جونسون وجيج، 1997، ص 113). يعرف علماء الهيدرولوجيا وعلماء البيئة المائية منذ زمن طويل أن السطح الذي تنتقل المياه عبره إلى مجرى مائي أو بحيرة له تأثير كبير على جودة المياه . وبناءً على ذلك ، فإن الكميات النسبية لأنواع استخدام الأراضي وتغطيتها في مستجمعات المياه ستؤثر أيضًا على جودة المياه . ولأن جودة المياه تدمج العمليات الجيومورفولوجية والهيدرولوجية والبيولوجية ، فإنها تُعد عنصرًا أساسيًا في مستجمعات المياه الصحية (هيم، 1985).

وثّقت أبحاث سابقة وجود علاقات وثيقة بين استخدامات الأراضي وتغطيتها وجودة المياه (على سبيل المثال، Omernik et؛Wiley, 1988 Osborne and؛ Roth et al., 1996؛Basnyat et al., 1999 Karr and Schlosser, 1978؛al., 1981 . في الواقع، هناك تاريخ طويل من الدراسات التي تناولت العلاقة بين استخدامات الأراضي وتغطيتها وجودة المياه,.Johnson et al) 1997؛1997 Allan et al., ؛ . Omernik, 1976؛1988 Osborne and Wiley,؛ Basnyat et al., 1999؛Roth et al., 1996 وقدّم Johnson et al. (1997) ملخصًا للدراسات التي بحثت تأثير استخدامات الأراضي وتغطيتها على جودة المياه . على وجه الخصوص ، وُجدت علاقات قوية بين استخدام الأراضي وتغطيتها والفوسفور والنيتروجين (بولستاد وسوانك، 1997؛ هول وشراير، 1996؛ كولينز وجينكينز، 1996؛ كيني وديلوكا، 1993؛ لورانس وآخرون، 1985؛ بيترجون وكوريل، 1984) . وتتجلى أهمية هذه العلاقات المتبادلة بين استخدام الأراضي وتغطيتها وجودة المياه في ازدياد الوعي خلال العقدين الماضيين بأهمية تلوث المياه بالفوسفور والنيتروجين كونه مصدر قلق بيئي رئيسي (لوغ، 1998؛ شاربلي وماير، 1994).

إضافةً إلى تأثيرها على الجوانب الفيزيائية والكيميائية لجودة المياه ، فقد ثبت أن استخدام الأراضي وتغطيتها يؤثر على بيئة الجداول ، والذي ، عند اقترانه بجودة المياه ، يؤثر على تكوين المجتمعات البيولوجية في الجداول ، بما في ذلك مجتمعات الأسماك واللافقاريات الكبيرة (شلوسر، 1991). يؤكد شلوسر (1991) أن أنشطة استخدام الأراضي تؤثر بشكل كبير على أعداد الأسماك وديناميكيات مجتمعاتها . فالزراعة ، وإزالة الغابات ، والرعي ، كلها عوامل تؤثر على العلاقات الهيكلية للجداول المائية من خلال تقليل كمية الحطام

الخشبي الذي يدخل الجدول ، مما يؤثر بدوره على عمق الجدول ونوعية قاعه ، أو من خلال إزالة التعقيد المكاني للجدول مباشرةً عبر تحويل مجراه إلى قناة (شلوسر، 1991) . لذا ، ينبغي أن تكون التقنيات الجديدة مناسبة أيضًا لدراسة الجودة البيولوجية للجداول المائية (مثل: هي وآخرون، 2000؛ هيوز وآخرون، 2000)، وكذلك المؤشرات الفيزيائية والكيميائية للجداول المائية (مثل: جولي وآخرون، 1996) .

وبينما تتناول العديد من الدراسات العلاقة العامة بين استخدام الأراضي وتغطيتها وجودة المياه ، يقارن مسار بحثي آخر التأثير النسبي لأحواض التصريف بأكملها مقابل المناطق العازلة على ضفاف الأنهار أو أجزاء أصغر أخرى من حوض التصريف في تحديد جودة المياه . وقد لخص جونسون وآخرون (1997) هذه الدراسات . يؤكد بعض الباحثين أهمية الغطاء النباتي على ضفاف الأنهار في حماية جودة المياه (كاربنتر وآخرون، 1998؛ شلوسر وكار، 1981) ، بينما يخلص آخرون إلى أن أحواض التصريف بأكملها لها تأثير أكبر (روث وآخرون، 1996؛ هانساكر وليفين، 1995؛ أوزبورن وويلي، 1988؛ أوميرنيك وآخرون، 1981). ويتزايد عدد الدراسات ، يبدو أنهم قد أكدوا على **أهمية النظرة الشاملة للمظاهر الطبيعية على حساب الدراسات المحلية التي تركز على مجاري الأنهار** (آلان وآخرون، 1997؛ شلوسر، 1991؛ جونسون وجيج، 1997؛ جونسون وآخرون، 1997؛ وايلي وآخرون، 1997؛ روث وآخرون، 1996؛ ريتشاردز وآخرون، .(1996ووجد آلان وآخرون (1997) وروث وآخرون (1996) أن مساحة الأراضي الزراعية على مستوى حوض التصريف كانت أهم مؤشر لحالة مجاري الأنهار المحلية ، بينما كان الغطاء النباتي المحلي على ضفاف الأنهار مؤشرًا ثانويًا ضعيفًا لجودة الموائل ومؤشر السلامة البيولوجية . وفي دراساتهم ، لم يكن الغطاء النباتي المحلي على ضفاف الأنهار مرتبطًا حتى بالاستخدام العام للأراضي . وبناءً على هذه الدراسات ، قام آلان وآخرون ...1997 يشككون في جدوى استخدام إرشادات عرض المناطق العازلة على ضفاف الأنهار وحدها كأساس للإدارة لأنها توحي بأن استخدام الأراضي وتغطيتها في جميع أنحاء مستجمعات المياه يمكن تجاهله ، أو على الأقل أنه أقل أهمية من استخدامه في المناطق العازلة على ضفاف الأنهار.

استخدم هيرليهي وآخرون (1998) مستجمعات المياه بأكملها كوحدات دراسة إلى جانب بيانات كيمياء الجداول من برنامج رصد على المستوى الوطني يعتمد على تصميم أخذ عينات عشوائية . ولخمس ولايات أمريكية في منتصف المحيط الأطلسي ، استخدموا بيانات نظم المعلومات الجغرافية المستمدة من الصور الجوية وبيانات ماسح لاندسات الموضوعي المصنفة لتحليل علاقات جودة المياه بالمظاهر الطبيعية . ووجدوا أن تركيزات الكلوريد ، والمغذيات ، والقدرة على معادلة الحموضة ، والكاتيونات القاعدية كانت أكثر العناصر التحليلية ارتباطًا بغطاء الأراضي في مستجمعات المياه.

علم بيئة المظاهر الطبيعية

في الآونة الأخيرة ، توسعت الدراسات التي تتناول تأثيرات استخدام الأراضي وتغطيتها على جودة المياه لتشمل تحليل التوزيع المكاني للغطاء الأرضي (غريفيث، 2000؛ جونسون وغيج، 1997؛ هانساكر وليفين، 1995؛ هانساكر وآخرون، 1992). ومن بين فوائد أخرى لهذا النهج ، أشار علماء السموم البيئية إلى أن نهج المظاهر الطبيعية الذي يدمج الأنماط قد يكون مفيدًا في تفسير الاختلافات في تأثيرات الضغوط الكيميائية المعتدلة على النظم المائية (كيرنز ونيدرلينر، 1996) .

يتناول علم بيئة المظاهر الطبيعية الأسباب البيولوجية والفيزيائية والاجتماعية ، و نتائج التباين المكاني في المظاهر الطبيعية (موس، 1999) . ويتمثل مفهومه الجامع في تحليل تأثير نمط المظاهر الطبيعية على العمليات البيئية . في أواخر الثمانينيات وأوائل التسعينيات ، تسارع ظهور علم بيئة المظاهر الطبيعية ، كمجال

دراسي متميز متعدد التخصصات ، مع العديد من الدراسات التي تستخدم مقاييس المظاهر الطبيعية كوسيلة لفهم الأنماط الفيزيائية الحيوية (أونيل وآخرون، 1988؛ تيرنر، 1989، .(1990وقد منحت الأدوات المكانية الجديدة ، مثل نظم المعلومات الجغرافية (GIS) والاستشعار عن بعد ، الجغرافيين وعلماء البيئة قدرة غير مسبوقة على قياس أنماط الغطاء الأرضي وفهم التباين المكاني وبنية المظاهر الطبيعية (تيرنر وكاربنتر، 1998). وقد مكّنت هذه التقنيات من توصيف بنية المظاهر الطبيعية بشكل أكثر كفاءة وشمولية من خلال مقاييس تُعرف باسم **مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية** .(LPMs) ينظر غوستافسون (1998) للاطلاع على مراجعة شاملة لأحدث التقنيات في مجال قياس أنماط المظاهر الطبيعية.

ينظر غوستافسون (1998) للاطلاع على مراجعة شاملة لأحدث التقنيات في مجال قياس أنماط المظاهر الطبيعية . مقاييس نمط المظاهر الطبيعية هي قياسات مصممة لتحديد كمية جوانب نمط المظاهر الطبيعية ورصدها ، وتشمل مؤشرات تجزئة الغابات أو لكل نسبة المساحة التي تشغلها أكبر رقعة متصلة من الأراضي العشبية . تشمل المقاييس الأخرى قياسات بسيطة مثل نسب استخدام الأراضي وتغطيتها، ومقدار الأراضي الرطبة المفقودة، ونسبة استخدام الأراضي البشرية المكثف في منطقة ما، وصولاً إلى مقاييس أكثر تعقيدًا تحدد شكل الرقعة، وعزلتها، وتداخلها، وتجاورها. تجمع هذه المقاييس معلومات مهمة لأن الاختلافات في شكل وحجم وتوزيع رقع الغطاء الأرضي تلعب دورًا رئيسيًا في تعديل تكوين المشهد الطبيعي على نطاق إقليمي (وكالة حماية البيئة، 1994).

يشمل هيكل المظاهر الطبيعية الذي تصفه هذه المقاييس كلاً من : التكوين والتوزيع . يشير التكوين إلى السمات المتعلقة بوجود أنواع الغطاء الأرضي أو كميتها دون أن يكون محددًا مكانيًا ، بينما يشير توزيع المظاهر الطبيعية إلى التوزيع المادي أو الترتيب المكاني لأنواع الغطاء داخل المظهر الطبيعي ، ويتضمن مقاييس تصف شكل البقع أو موضع أنواع الغطاء بالنسبة لبعضها البعض Marks, McGarigal and 1995 . من المهم القدرة على تحديد النمط المكاني كميًا لاختبار الفرضيات المتعلقة بعلاقة نمط المظاهر الطبيعية بالعمليات البشرية والبيئية . على سبيل المثال ، هناك حاجة إلى مقاييس تلتقط جوانب من نمط المظاهر الطبيعية لربط النمط المكاني للمظاهر الطبيعية بسمات أو عمليات بيئية مهمة ، مثل جودة المياه ، وديناميات أعداد الطيور، وحركات الثدييات الكبيرة ، أو تدفقات المغذيات .

التكوين:

يشير إلى السمات المتعلقة بوجود أنواع الغطاء الأرضي أو كميتها دون أن تكون محددة مكانيًا ، بينما يشير توزيع المظاهر الطبيعية إلى التوزيع المادي أو الترتيب المكاني لأنواع الغطاء الأرضي داخل المظهر الطبيعي ، ويتضمن مقاييس تصف شكل البقع أو موضع أنواع الغطاء الأرضي بالنسبة لبعضها البعض Marks, 1995 McGarigal and . إذا أشارت مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية إلى تغيرات كبيرة في أنماط استخدام الأراضي وتغطيتها بمرور الوقت ، فمن المرجح أن تتأثر العديد من العمليات البيئية (سوانسون وآخرون، 1988؛ ريسر وآخرون، 1984؛ أوربان وآخرون، 1987؛ هانساكر وكاربنتر، 1990؛ تيرنر، 1989) . ولذلك ، تُعد العلاقة بين هذه المؤشرات والبيانات التجريبية موضوعًا بحثيًا هامًا في كلٍ من علم بيئة المظاهر الطبيعية والاستشعار عن بُعد (ستومز وإستس، .(1993في الوقت نفسه ، شجع باحثون آخرون على استخدام هذه المقاييس في دراسات جودة المياه (جونسون وجيج، 1997؛ أونيل وآخرون، 1997؛ جونز وآخرون، 1996؛ هانساكر وليفين، 1995). هيجيم وآخرون.

استخدمت دراسة (2000) منهجية علم بيئة المظاهر الطبيعية في مستجمع مائي في لويزيانا (الولايات المتحدة الأمريكية) للكشف عن تدهور حالته المتزايد على مدى 20 عامًا ، ولاحظت تغيرات في نسبة الغابات ، وأكبر وأوسط مساحات الرقع ، وطول الطرق الجديدة، وعدد معابر الطرق/الجداول، وما إلى ذلك . ومع ذلك ، ثمة قضايا عدة تتعلق باشتقاق مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية الأكثر تعقيدًا تحتاج إلى دراسة وفهم كامل قبل تطبيق هذه المقاييس في برامج الرصد البيئي . ويتناول أحد محاور البحث في أدبيات الاستشعار عن بعد/علم بيئة المظاهر الطبيعية تأثير الدقة المكانية المختلفة على سلوك مقاييس المظاهر الطبيعية . على سبيل المثال ، في منطقة جغرافية معينة ، هل تختلف مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية المشتقة من بيانات ماسح الخرائط الموضوعية (TM) من القمر الصناعي لاندسات عن تلك المشتقة من بيانات مقياس الإشعاع عالي الدقة جدًا (AVHRR) التابع للإدارة الوطنية للمحيطات والغلاف الجوي (NOAA) ذات الدقة الأقل؟

علاوة على ذلك ، هل ستختلف العلاقة بين أنماط المظاهر الطبيعية والمتغيرات الفيزيائية الحيوية اختلافًا كبيرًا باستخدام خرائط الغطاء الأرضي المشتقة من أجهزة استشعار مختلفة ؟ تناول كلٌّ من كاين وآخرون (1997) وغريفيث وآخرون (2000) هذه القضايا، وأظهروا، بشكل عام ، متانة أهم جوانب بنية المظاهر الطبيعية ، كما تم قياسها بواسطة مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية ، عبر مختلف المقاييس . على الرغم من أن مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية قد اقتُرحت مرارًا كأدوات لدراسة جودة المياه (على سبيل المثال، جونز وآخرون، 1996)، إلا أن الدراسات القليلة نسبيًا التي تناولتها قد أسفرت عن نتائج متباينة .

درس وير وآخرون (1998) الغطاء الأرضي ونمط المظاهر الطبيعية على طول التدرج الحضري-الريفي وتأثيره على جودة المياه . وأشاروا إلى أن الجزء الأبعد من مستجمع المياه والحافة الخارجية للتوسع الحضري قد يكون لهما تأثير غير متناسب على جودة المياه في المستقبل . علاوة على ذلك ، تتميز هذه المناطق ببنية نموذجية لنمط المظاهر الطبيعية ، أو ما يُعرف بـ "علامة المظاهر الطبيعية". يمكن ربط هذه العوامل ببعض الاتجاهات في جودة المياه . في دراسة أخرى ، وجد هانساكر وآخرون (1992) أن العدوى ، وهي مقياس يصف مدى تشتت أو تكتل بقع الغطاء الأرضي ، تفسر 20% من مستويات التوصيل الكهربائي في مستجمعات المياه جنوب إلينوي . ومع ذلك ، في دراسة لاحقة للمنطقة نفسها ، وجد هانساكر وليفين (1995) بعض الأدلة على تأثير أنماط الغطاء الأرضي على جودة المياه ، لكنهما قررا أن نسب الغطاء الأرضي تفسر جزءًا أكبر من التباين في مستويات الفوسفور والتوصيل الكهربائي.

استخدم جونسون وآخرون (1997) وريتشاردز وآخرون (1996) كثافة البقع ووجدوا أنها تفسر التباين في جودة المياه في ميشيغان في بعض المواسم ، ومع ذلك ، كانت عوامل أخرى متعلقة بالمظاهر الطبيعية (مثل الجيولوجيا ، واستخدامات الأراضي وتغطيتها، والانحدار) أكثر أهمية بشكل عام. لم يجد شارب (1994) أي ارتباط بين أنماط الغطاء الأرضي وجودة المياه باستخدام نموذج جريان المغذيات . قدّم غريفيث (2000) وغريفيث وآخرون (2002أ) توجيهات إضافية لدراسات جودة المياه باستخدام نماذج أنماط المظاهر الطبيعية (LPM) من خلال شرح العلاقات بين هذه النماذج وبيانات الجداول التجريبية في منطقة متعددة الولايات في السهول الوسطى للولايات المتحدة . وأشاروا إلى أنه على الرغم من محدودية نماذج أنماط المظاهر الطبيعية التي أظهرتها دراستهم ، فقد وُجدت بعض العلاقات المهمة التي قد تكون مفيدة في رصد حالة مستجمعات المياه . وبشكل عام ، كانت نماذج أنماط المظاهر الطبيعية وعلاقتها بجودة المياه أكثر وضوحًا في المظاهر الطبيعية أو الأبسط ، أو حيث يوجد تدرج حضري-ريفي قوي . ومن الأمثلة التي ذكروها على ذلك مؤشر التداخل والتجاور في مرتفعات أوزارك ، ومؤشرات تنوع المظاهر الطبيعية في

تلال نبراسكا الرملية . في الأراضي المنخفضة لنهر المسيسيبي في ولاية ميسوري ، ارتبطت كثافة الرقع العالية ارتباطًا وثيقًا بارتفاع مؤشرات الموائل .($r^2 = 0.85$)

وأوصى الباحثون بأنه عند تحليل مستجمعات مائية صغيرة نسبيًا (أقل من 50 كم² تقريبًا) ، يجب أن تكون دقة بيانات استخدام الأراضي وتغطيتها 30 مترًا على الأقل لضمان احتمالية عالية لوجود نطاق كامل من أنواع الغطاء الأرضي ، ولإمكانية استخدام مقاييس على مستوى الفئات . كما أظهر بحثهم الحاجة إلى مزيد من التحسين في استخدام مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية فيما يتعلق بتطبيقات جودة المياه . وقد لوحظت مشكلات عدة في استخدام مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية في الدراسة المذكورة أعلاه ، منها: صغر حجم المستجمعات المائية التي تحتوي على رقعة أو رقعتين فقط ، مما حال دون حساب بعض مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية ؛ والارتباط الخطي مع بيانات استخدام الأراضي وتغطيتها . والنتائج غير البديهية أو غير المتسقة الناتجة عن اختلافات جوهرية في أنماط استخدام/غطاء الأراضي بين المناطق البيئية أو عن عوامل أخرى مهمة تحدد جودة المياه (غريفيث، 2000؛ غريفيث وآخرون، 2002أ).

من المرجح أن الاختلافات الجوهرية في بنية المظاهر الطبيعية قد تسببت في بعض هذا التناقض ، حيث ارتبطت مقاييس المظاهر الطبيعية المختلفة بمعايير مختلفة في مناطق بيئية مختلفة . ومن المحتمل ألا يكون المقياس نفسه مناسبًا لكل منطقة بيئية أو لكل معيار من معايير جودة المياه . ونتيجةً لهذه النتيجة ، يُعد استخدام مجموعة من المقاييس لتقييم الظروف أمرًا مناسبًا (جونز وآخرون، 1996؛ تشي وو، 1996). عند استخدام نماذج إدارة الأراضي ، قد يكون من المفيد تصنيف مستجمعات المياه إلى فئات حجمية لتقليل تأثير حجم مستجمع المياه أو أي وحدة أخرى على متغيرات شكل الرقعة (أونيل وآخرون، 1996؛ تيرنر، 1989). ثمة حاجة أيضاً إلى مراعاة العوامل الخاصة بالموقع عند تفسير نماذج الأداء الرئيسية . في الدراسات المذكورة أعلاه ، أثرت عوامل أخرى على جودة المياه إلى جانب الملوثات البيئية ، وتسببت في علاقات غير متوقعة في بعض الحالات.

الاستشعار عن بعد وجودة المياه

توجد تطبيقات متنوعة لصور الاستشعار عن بعد في الأنظمة المائية ، وقدّم جونسون وجيج (1997) ملخصًا للعديد منها . من أمثلة هذه التطبيقات التي ذكروها : رسم خرائط استخدام الأراضي وتغطيتها وأنواع الغطاء النباتي الأرضي (جنسن وآخرون، 1986)، ورسم خرائط توزيع النباتات المائية الكبيرة (جروس وكليماس، 1986؛ أكلسون وكليماس، 1987؛ جنسن وآخرون، 1987)، ورسم خرائط توزيع الكلوروفيل والإنتاج الأولي (روندكويست وآخرون، 1996؛ هاردينج وآخرون، 1995؛ رويز-أزوارا، 1995)، والكشف عن عناصر جودة المياه مثل العكارة ودرجة الحرارة وانبعاثات الملوثات (بولجرين وآخرون، 1995؛ ليدتك وآخرون، 1995؛ جوب وآخرون، 1994؛ جودين وآخرون، 1993؛ ليليساند وآخرون، 1983؛ لاثروب وليليساند، 1989، 1986؛ كيرك، 1988). في حين أن هذه التطبيقات قد تضمنت عمومًا فحصًا مباشرًا لقياسات الانعكاس الطيفي ، فقد ثبت أيضًا أن المؤشرات المشتقة من قياسات الانعكاس مفيدة.

مؤشر اختلاف الغطاء النباتي المعياري(NDVI)

يُعد مؤشر NDVI مؤشرًا شائع الاستخدام للغطاء النباتي في دراسات الاستشعار عن بُعد لأنه يرتبط تقريبًا بكتلة النباتات الخضراء . يعتمد مؤشر NDVI على قيم الانعكاس الطيفي النسبي (أي الضوء) في نطاقي الأحمر والأشعة تحت الحمراء القريبة(NIR) (NDVI=(NIR–Red)/(NIR + Red تُستخدم مؤشرات الغطاء النباتي عادةً للحد من تأثيرات الظروف الجوية أو اختلاف خلفيات التربة على قيم الانعكاس الطيفي . تعتمد كمية الطاقة الشمسية الحمراء التي تعكسها الغطاء النباتي بشكل أساسي على محتوى الكلوروفيل ، بينما تتأثر كمية طاقة الأشعة تحت الحمراء القريبة التي تعكسها النباتات بكمية وحالة الكتلة الحيوية الخضراء ، وبنية أنسجة الأوراق ، ومحتوى الماء (جنسن، 1996).

يُعد تقييم إمكانات مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) والمقاييس المشتقة منه في رصد مستجمعات المياه ودراسات جودة المياه أمرًا بالغ الأهمية لاكتساب فهم أعمق للعلاقات بين جودة المياه والمظاهر الطبيعية . لقد ثبت أن مؤشرNDVI حساس للخصائص الفيزيائية الحيوية للنباتات ، مثل مساحة الأوراق ، والإنتاج الأولي الصافي ومستويات النشاط الضوئي (Rundquist et al., 2000; Stoms and Hargrove, 2000; Paruelo and Lauenroth, 1995; Spanner et al., 1990; Box et al., 1989; Goward et al., 1985; Tucker et al., 1983)، بالإضافة إلى استخدامات الأراضي وتغطيتها Loveland et., 1995 . ونظرًا لقدرته على دمج كل من الغطاء الأرضي والظروف الفيزيائية الحيوية ، يمكن أن يكون مؤشر NDVI مفيدًا في تقييم ظروف مستجمعات المياه الإقليمية التي
تؤثر على جودة المياه وحالة الجداول

قام. Jones et al (1996) بتقييم الإمكانات النظرية لمؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) لتقييم صحة مستجمعات المياه ، وافترض أنه يمكن أن يشير إلى انخفاض الإنتاجية ، وزيادة التعرية ، وفقدان القدرة على امتصاص المياه على طول الممرات النهرية . اقترحوا دراسة أنماط مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI)والتغيرات في قيمه ، بالإضافة إلى مقارنة القيم المرصودة والمتوقعة بناءً على التربة والتضاريس والغطاء النباتي والمناخ . استكشف ويستلر (1996) قيم مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي المستمدة من صور الماسح الضوئي متعدد الأطياف (MSS) للقمر الصناعي لاندسات كبديل للكتلة الحيوية ، وافترض أن قيم مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي ستكون لها علاقات أقوى بمعايير كيمياء المياه مقارنةً بنسب الغطاء الأرضي المستمدة من الصور نفسها . و وجد علاقات مهمة بين مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي ومعايير مختارة لجودة المياه ، والتي كانت في الواقع أقوى من علاقاته بتغير استخدام الأراضي وتغطيتها في معظم الحالات.

مؤشرات الظواهر النباتية(VPMs)

تُعدّ الظواهر النباتية ، مثل الإنبات والنضج والشيخوخة ، مهمة لتقييم حالة الغطاء النباتي الزراعي والطبيعي Senay وElliott، 2000؛Lee ، 1999؛Samson ، 1993 . لذلك، بالإضافة إلى قيم مؤشر NDVI الخام، قد يكون للمؤشرات الظواهرية المستمدة من قياسات NDVI أيضًا إمكانية لتقييم مستجمعات المياه . وقد حدد Reed وآخرون (1994) 12 مؤشرًا باستخدام البيانات المركبة لمؤشر NDVI منAVHRR كل أسبوعين ، والتي يمكن تصنيفها إلى ثلاث مجموعات : 1) زمنية (بناءً على توقيت الظاهرة النباتية)، 2) قائمة على مؤشر NDVI قيمة مؤشر NDVI في وقت الظاهرة النباتية ، و3) مؤشرات مستمدة من خصائص السلاسل الزمنية . استُخدمت هذه المقاييس الفينولوجية للنباتات (VPMs) بنجاح لتقييم حالة

المحاصيل وإنتاجيتها المحتملة (لي، 1999)، وتوصيف التباين الفينولوجي للمحاصيل (ريد وآخرون، 1994)، وفصل المراعي حسب مسار التمثيل الضوئي C3أوC4 (تيسزن وآخرون، 1997) أو اختلاف كثافة الغطاء النباتي (سيناي وإليوت، 2000)، ورسم خرائط استخدام الأراضي وتغطيتها (لوفلاند وآخرون، 1995).

ومع ذلك ، لم يتم استكشاف فائدة هذه المقاييس الفينولوجية للنباتات في تطبيقات رصد جودة المياه إلا مؤخرًا . درس غريفيث (2000) وغريفيث وآخرون (2002ب) العلاقات التجريبية بين كل من مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) والمقاييس الفينولوجية للنباتات في المناطق البيئية داخل ولايات نبراسكا وكانساس وميسوري . وجد الباحثون علاقات ذات دلالة إحصائية بين قيم مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) المختارة ومقاييس الظواهر النباتية ، و معايير جودة المياه أو مؤشرات سلامة الموائل/الأنظمة البيئية . في معظم الحالات ، كانت مقاييس الظواهر النباتية أو مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) أكثر ارتباطًا بجودة المياه من نسب الغطاء الأرضي البسيطة في معظم الحالات . ومع ذلك ، كانت المعرفة العامة حول هيمنة استخدام الأراضي وتغطيتها داخل مستجمعات المياه ، بالإضافة إلى أنواع المحاصيل الإقليمية ، مهمة لتفسير علاقات مقاييس الظواهر النباتية ومؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) بمعايير حالة الجداول .

في فصل الربيع ، كانت الارتباطات أعلى ما يمكن بين مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) والنيتروجين في المنطقة البيئية لسهول حزام الذرة الغربي في دراسة ويستلر (1996) . في دراسة غريفيث (2000) أيضًا ، كان مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) في بداية موسم النمو (أوائل مايو - أوائل يونيو) أو متوسط تاريخ بدء الخضرة هو الأكثر ارتباطًا بعينات جودة المياه ، والتي جُمع بعضها في وقت لاحق من الصيف . افترض غريفيث (2000) أن إحدى الفوائد المحتملة الهامة لمؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) أو مؤشرات جودة المياه (VPMs) هي أنه نظرًا لأن قيم مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) في بداية موسم النمو ترتبط في أغلب الأحيان بمعايير الجداول المائية ، فإن هناك إمكانية لتقدير ظروف جودة المياه الصيفية باستخدام بيانات مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) من جهاز AVHRR في فصل الربيع.

وبالتالي ، يُظهر مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) أو مؤشرات حجم الغطاء النباتي (VPMs) إمكانية استخدامها كإشارات إنذار مبكر للإجهاد (كيلي وهارويل، 1990؛ مون، 1988) في النظم المائية . وقد أشار غريفيث (2000) إلى أن السبب وراء تمتع مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) ومؤشرات حجم الغطاء النباتي المشتقة منه بمزايا معينة مقارنةً بنسب الغطاء الأرضي البسيطة هو كونهما مُكاملات بيوفيزيائية للظروف في جميع أنحاء مستجمع المياه . كما أن استخدام مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) والمقاييس المشتقة منه يُمكنه رصد التغيرات الزمنية ، على عكس خرائط استخدام الأراضي وتغطيتها الثابتة ، التي لا ترصد التباين داخل الفئة والتي لا يتم تحديثها عادةً سنويًا . علاوة على ذلك ، ولأن قيم مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) هي بيانات فترات زمنية وليست فئات اسمية لاستخدام الأراضي وتغطيتها ، فإنها تستطيع رصد التباين داخل الفئة لنوع الغطاء الأرضي .

<u>نماذج الارتفاع الرقمية (DEMs) ونماذج التضاريس الرقمية(DTMs)</u>

تساعد التطورات المبتكرة في التمثيل الرقمي لارتفاع سطح الأرض و التضاريس / الجيومورفولوجيا في فهم العلاقات بين الغطاء الأرضي وجودة المياه. وقد طورت هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS) (1999)مجموعة بيانات وطنية جديدة ومتكاملة للارتفاع (NED) للولايات المتحدة المتجاورة . يمكن الاطلاع

على التفاصيل على الموقع الإلكتروني .http://edcnts12.cr.usgs.gov/ned/ : تم تطوير مجموعة بيانات الارتفاع الوطنية (NED) التابعة لهيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS) من خلال دمج بيانات الارتفاع ذات أعلى دقة وأفضل جودة في جميع أنحاء الولايات المتحدة في تنسيق نقطي متكامل ، بدقة مكانية تبلغ 30 مترًا، وأحيانًا تصل إلى 10 أمتار.

عادةً ما يتم إنتاج نماذج الارتفاع الرقمية (DEMs) من صور جوية مجسمة أو خرائط موجودة . مع ذلك ، تُستخدم بيانات الأقمار الصناعية أيضًا لإنتاج نماذج الارتفاع الرقمية (DEMs) ونماذج التضاريس الرقمية(DTMs) ، حيث يمكن إنشاء أزواج صور مجسمة من صور القمر الصناعيSPOT وصور التداخل الراداري . قام كل من جونز وآخرون (2000)، وجونز وآخرون (1997) ، وويكهام وآخرون (1999) بتصنيف مستجمعات المياه حسب قابليتها للتأثر بالتدهور البيئي في منطقة وسط المحيط الأطلسي بالولايات المتحدة ، وذلك بتسليط الضوء على المناطق التي تُمارس فيها الزراعة على أراضٍ يزيد انحدارها عن 3% ، وبالقرب من منابع الأنهار . وقد حددوا التغير في الزراعة على مدى فترة زمنية من خلال دراسة الزيادة أو النقصان في قيم مؤشر الغطاء النباتي الطبيعي (NDVI) .

للاطلاع على أمثلة أخرى لتطبيقات استخدام نماذج الارتفاع الرقمية ونماذج التضاريس الرقمية، ينظر: غيش وآخرون (1999)، ومماليسوارا وآخرون (1996)، وراغام وألمر (1996)، وجينسن (1993)، ومور وآخرون (1993)، وبوليدوري (1991). من بين مجموعات البيانات الأخرى التي أنتجتها هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS) مجموعة بياناتNED H(مجموعة بيانات الارتفاع الوطنية - المشتقات الهيدرولوجية)، وهي جهد مشترك بين وكالات عدة ، يهدف إلى تطوير نسخة هيدرولوجية صحيحة من مجموعة بيانات الارتفاع الوطنية .(http://edcnts12.cr.usgs.gov/ned-h/) باستخدام هذه البيانات والأدوات المشتقة منها ، سيتمكن المرء من تحديد مستجمعات المياه وأحواضها الفرعية عبر مساحات شاسعة من الولايات المتحدة بدقة وسهولة غير مسبوقتين. لا شك أن هذه الأدوات ستساعد في النماذج الهيدرولوجية للمناطق الكبيرة ، خاصة عند دمجها مع بيانات الغطاء الأرضي أو بيانات مؤشر الغطاء النباتي.

الرصد البيئي والمؤشرات البيئية

يوجد حاليًا العديد من برامج الرصد الوطنية المصممة لتقييم حالة البيئة (غريفيث، 1998؛ هانساكر وكاربنتر، 1990)، أو لتقييم الصحة البيئية لمناطق واسعة (ميسر وآخرون، 1991؛ رابورت، 1992)، ومستجمعات المياه (ويشرت ورابورت، 1998)، أو أنظمة الجداول والأنهار (هيوز وآخرون، 2000؛ كار، 1999؛ ويتير وبولسن، 1992). تعتمد برامج الرصد هذه على استخدام مؤشرات (قياسات بيئية) تُستخدم كبدائل للحالة البيئية الحالة البيئية (فيرويذر، 1999). ولأغراض الرصد البيئي ، من المهم لعلماء بيئة الأنهار تحديد وقياس هذه المؤشرات لصحة مستجمعات المياه بولتون ، 1999. العديد من عوامل المظاهر الطبيعية التي لم تُناقش في هذه المراجعة هي أيضًا محددات مهمة لجودة المياه (مثل الجيولوجيا، والانحدار، والتربة، إلخ) . مع ذلك ، ولأن مجموعات المؤشرات التي يتم جمعها بسرعة قد تكون مفيدة بشكل خاص في تقييم جودة المياه الإقليمية (هيوز وآخرون، 2000؛ فيرويذر، 1999؛ هاريس وسيلفيرا، 1999)، فمن المهم استكشاف إمكانات بيانات الاستشعار عن بُعد لتحديد مؤشرات فحص واسعة النطاق لاستخدامها في برامج رصد مستجمعات المياه هذه.

ملخص

باختصار، كانت الحاجة إلى معالجة مشاكل برنامج مراقبة جودة المياه الوطنية وتحليل مستجمعات المياه متوسطة إلى كبيرة الحجم عبر مناطق واسعة بطريقة فعالة هي الدافع وراء اتباع نهج شامل لدراسة جودة المياه . يتضمن هذا النهج فحص كامل مستجمعات المياه للجداول بدلاً من ، أو بالإضافة إلى ، أجزاء قريبة من الجداول (على الرغم من أن المنطقة النهرية ما تزال تُعد مهمة لظروف الجداول). سهّلت الصور الجوية تحليل تصنيف المظاهر الطبيعية لأحواض التصريف ، وما تزال مفيدة في إنشاء نماذج الارتفاع الرقمية لنمذجة المياه ، حيث تُتيح الصور الملتقطة بواسطة أجهزة استشعار الرادار ومكوك الفضاء الأمريكي فرصًا جديدة ومثيرة لتحسين توصيف الجيومورفولوجيا وأحواض التصريف في المناطق وعلى مستوى الكوكب .

ومع ظهور الاستشعار عن بُعد بالأقمار الصناعية في سبعينيات القرن الماضي، أصبح من الممكن فحص مساحات أكبر مما كان ممكنًا سابقًا ، وتزداد هذه الإمكانية مع تزايد القدرة الحاسوبية للحواسيب الصغيرة . وفي الوقت الحاضر، تُعزز أجهزة الاستشعار الفضائية الجديدة ذات البيانات متوسطة وعالية الدقة ، والبيانات فائقة الطيف ، القدرة على تحليل علاقات الغطاء الأرضي بأحواض التصريف (جونز وآخرون، 2000). ومن بين القيود التي تواجه بعض هذه الأساليب صعوبة فهم بعض مقاييس أنماط المظاهر الطبيعية وعلاقاتها بجودة المياه . علاوة على ذلك ، ستظل هناك حاجة دائمة لإجراء دراسات ميدانية تكميلية وأعمال تمهيدية لتقييم الموائل ، وكيمياء الجداول ، وعمليات الترميم . بالإضافة إلى ذلك ، يتطلب استخدام تقنية الاستشعار عن بُعد استثمارًا كبيرًا من الوقت والمال لتوفير الأجهزة والبرامج وتدريب الموظفين . على الرغم من توفر صور عالية الدقة (تصل دقتها إلى متر واحد) تجاريًا ، إلا أن استخدامها لتحليل مساحات واسعة من المرجح أن يكون مكلفًا للغاية.

ومع ذلك ، تُظهر نتائج الدراسات المنشورة أن منهجية دراسة المظاهر الطبيعية تُكمل المناهج الميدانية بشكل جيد ، وأن تقنيات الاستشعار عن بُعد ونظم المعلومات الجغرافية ستظل مكونات أساسية في دراسات جودة المياه المتعلقة بالمظاهر الطبيعية في المستقبل . في حين أن علم بيئة المظاهر الطبيعية قد أنتج بعض المؤشرات المفيدة من أبسط باستخدام المقاييس (مثل حجم الرقعة ، وطول الطرق ، وعدد معابر الطرق فوق الجداول ، ونسبة الزراعة على المنحدرات الأكثر انحدارًا، وما إلى ذلك) ، لم تُسفر هذه الدراسة بعد عن علاقات قوية ومتسقة بين مقاييس الأنماط الأكثر تعقيدًا (مثل المقاييس التي تصف التوزيع المكاني للغطاء الأرضي) وجودة المياه . لكن هذا لا يعني أن التقدم في هذا المجال لن يُنتج بعض المؤشرات القوية . سيُسهم الاستشعار عن بُعد في جعل جميع هذه الدراسات أكثر كفاءة ، لا سيما مع المزايا التي توفرها المعلومات المتعلقة بالانحدار والاتجاه المتاحة من مجموعات بيانات الارتفاع على المستوى الوطني . وختامًا ، ستُساعد التطبيقات الجديدة أو المتقدمة الموصوفة هنا في فهم العلاقات على مستوى المظاهر الطبيعية (أي مستجمعات المياه بأكملها) بجودة مياه الجداول .