مراقبة إجهاد الغطاء النباتي واضطرابات صحته: منظور الاستشعار عن بُعد

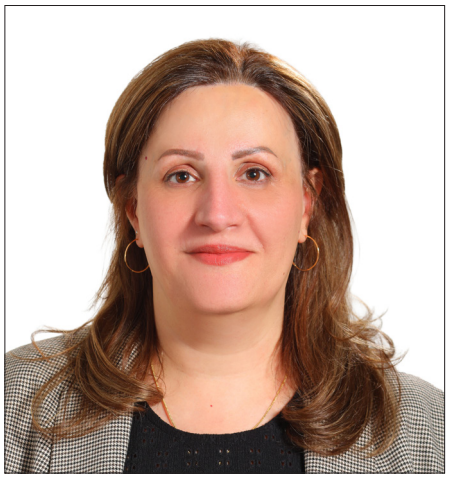
تشكل النباتات الركيزة الأساسية للنظم البيئية الأرضية، وهي عنصر جوهري لتحقيق الأمن الغذائي والحفاظ على التنوع الحيوي الذي يدعم استقرار المناظر الطبيعية الزراعية والبيئية. ومن ثم، فإن الجهود المنسقة الرامية إلى الحفاظ على صحة الغطاء النباتي، مع الاعتراف بدوره المحوري في الإنتاج الزراعي والاستقرار البيئي، تُعد ضرورة ملحّة. ومع ذلك، أظهرت الدراسات أن تكثيف الإنتاج يضع ضغوطاً كبيرة على النظم الطبيعية، مما يسهم في تدهور التربة، وفقدان التنوع الحيوي، وظهور أشكال متعددة من التلوث البيئي. ويُضاف تغيّر المناخ إلى هذه التحديات، حيث يؤدي تزايد تكرار وحدّة الظواهر الجوية المتطرفة—مثل الجفاف وموجات الحر والعواصف الشديدة وفترات البلل والجفاف الممتدة—إلى التأثير على المحاصيل المزروعة والمراعي والغابات وأنواع الغطاء النباتي الطبيعي وشبه الطبيعي الأخرى. وتحد هذه الاضطرابات من قدرة المناظر الطبيعية على توفير الغذاء والألياف والخدمات البيئية الأساسية لرفاه الإنسان. وعلى هذا الأساس، يبقى تحقيق أهداف التنمية المستدامة، خاصة الهدف 2 والهدف 15، التي تركز على الأمن الغذائي وحماية البيئة والإدارة المستدامة للموارد الطبيعية، من أبرز التحديات المعاصرة.

عوامل إجهاد الغطاء النباتي

تتعرض النباتات في جميع النظم البيئية إلى مجموعة واسعة من عوامل الإجهاد، وهي أي ظروف أو عوامل بيئية تؤثر سلباً على النمو أو العمليات الفسيولوجية أو التطور. ويمكن تصنيف هذه العوامل ضمن فئتين رئيسيتين:

1 . الإجهادات اللاأحيائية:(Abiotic)

تشمل: التطرف الإشعاعي، الملوحة، الغمر الطويل أو التشبع بالماء، الاضطجاع(lodging) ، الجفاف، الإجهاد الحراري، ارتفاع تركيزات CO_2 في الغلاف الجوي، التعرض للمواد الكيميائية الزراعية، البرودة والصقيع، اختلال العناصر الغذائية، وتلوث المعادن الثقيلة.



2 . الإجهادات الأحيائية:(Biotic)

وتشمل: الآفات، الأمراض، والعوامل البيولوجية الأخرى، والتي غالباً ما تتفاقم بفعل الإجهادات اللاأحيائية. تسهم هذه الضغوط مجتمعة في إضعاف وظائف النبات وإنتاجيته، مما يؤدي إلى انخفاض الإنتاج الزراعي، وتراجع عمل النظم البيئية، وزيادة مخاطر انقراض الأنواع، وتفاقم تهديدات الأمن الغذائي العالمي. وتشمل الأعراض الشائعة: التبقعات، والاصفرار، والذبول، والشيخوخة المبكرة، وكلها مؤشرات على الضرر الفسيولوجي الذي يقلل من الإنتاجية وجودة المحاصيل. ورغم أن تحديث ممارسات إدارة الأراضي وتكثيف الإنتاج الزراعي يستهدفان زيادة الكفاءة والإنتاج، إلا أن هذه العمليات كثيراً ما تزيد من قابلية النباتات للإصابة بالآفات والأمراض، خصوصاً في الأنظمة أحادية المحصول. كما تسهم التجارة العالمية وتغير المناخ في انتشار الآفات والأمراض الغازية إلى مناطق جديدة، مما يجعل الحاجة إلى أساليب مبتكرة وسريعة وواسعة النطاق لرصد صحة الغطاء النباتي وإدارة عوامل الإجهاد أكثر إلحاحاً.

دور الخصائص الحيوية والبيوكيميائية

يرتكز تقييم إنتاجية وصحة النباتات أو حالتها من حيث الإجهاد أو الإصابة على مراقبة كيفية امتصاص

النبات للضوء وتحويله إلى طاقة كيميائية وتخصيصها للنمو والدفاع. وتوفر الخصائص الحيوية مثل ارتفاع مسقط الشجرة(tree canopy)، ومساحة الأوراق(LAI) ، وجزء الإشعاع الفعال الممتص(fAPAR) ، والخصائص البيوكيميائية (مثل الكلوروفيل، والكاروتينويدات، والأنثوسيانين، والنيتروجين، واللجنين) مؤشرات أساسية تعكس عملية البناء الضوئي، نمو النبات، قدرته الإنتاجية، والكشف المبكر عن الإجهاد أو المرض.

وتختلف الأعضاء النباتية التي تستهدفها عوامل الإجهاد باختلاف نوعه (أحيائي أو لاأحيائي)، إلا أن النتيجة النهائية واحدة: اضطراب المسارات الأيضية، انخفاض كفاءة البناء الضوئي، وتعطل نقل الماء والعناصر، مما يحد من نمو النبات وأدائه. فعلى سبيل المثال، تُحدِث مسببات الأمراض أو الحشرات اضطرابات في المسارات الأيضية والمكونات الخلوية، وتطلق استجابات دفاعية تظهر كبصمات بيوكيميائية قابلة للرصد، مثل تغيرات في تركيز الكلوروفيل أو زيادة المركبات الفينولية. وتكشف الخصائص الحيوية بدورها عن تغيرات مبكرة في بنية ووظيفة المظلة النباتية (tree canopy) قد لا تظهر عند التركيز على الخصائص البيوكيميائية وحدها. ومن الأمثلة العملية ذلك الانحناء(الاضطجاع) التدريجي في سيقان المحاصيل (lodging)، والذي يمكن استشعاره مبكراً من خلال تغير شكل المظلة أو انخفاض صلابة الساق. وبالإضافة إلى ذلك، فإن التغيرات في سلوك الثغور أو في الأوعية الناقلة تؤدي إلى انخفاض النتح وارتفاع حرارة الأوراق، وهي إشارات مبكرة قابلة للرصد قبل ظهور الأعراض المرئية.ومع ذلك، فإن قياس هذه الخصائص على نطاق واسع وبوتيرة زمنية عالية يُعد مكلفاً أو غير عملي نظراً للتغيرات السريعة في النمو والمراحل الفينولوجية.

ديناميكية الغطاء النباتي والاستشعار عن بُعد

يلعب الاستشعار عن بُعد دوراً محورياً في مواجهة هذه التحديات، إذ يوفر مصدراً قوياً لرصد التغيرات في حالة الغطاء النباتي وخصائصه الحيوية والبيوكيميائية كدلائل مبكرة على الإجهاد أو التهديدات أو الاضطرابات. وتتيح قدرة الأقمار الصناعية على جمع بيانات واسعة النطاق ومتكررة وغير مدمرة بديلاً فعالاً للمراقبة المنهجية واتخاذ الإجراءات الملائمة في الوقت المناسب.

تشمل بيانات الاستشعار عن بُعد نطاقات طيفية متعددة: المرئي، القريب من تحت الأحمر، تحت الأحمر القصير، الحراري، والميكروويف. ومن خلال جمع البيانات من منصات مختلفة سواء الأقمار الصناعية أو الطائرات أو الطائرات بدون طيار أو أجهزة الحقل وبمستويات مختلفة من الدقة المكانية، يمكن تقييم استجابة النباتات لمجموعة واسعة من الإجهادات مثل:

- الإجهاد المائي الناجم عن الجفاف
- الاضجاع(lodging)
- سوء التغذية الناتج عن الملوحة أو الحموضة
- نقص أو زيادة النيتروجين
- الأمراض والآفات المرتبطة بالحرارة أو الرطوبة العالية

توفر الأقمار الصناعية والطائرات تغطية واسعة تتيح المقارنة بين المواقع والأنواع والظروف البيئية، بينما توفر الطائرات بدون طيار وأجهزة الحقل تفاصيل دقيقة على مستوى النبات الواحد عبر مراحل النمو المختلفة.وقد تناولت العديد من الدراسات قياس الخصائص الحيوية والبيوكيميائية باستخدام الاستشعار عن بُعد للكشف عن اضطرابات صحة النبات. ومع ذلك، فإن التمييز بين عوامل الإجهاد المختلفة لا يزال تحدياً بسبب التشابه بين الاستجابات الطيفية والفسيولوجية التي تنتج عن عوامل متعددة. كما يؤدي تفاعل عوامل الإجهاد إلى زيادة تعقيد البصمة الطيفية، مما يحد من قدرة النماذج على التعميم عبر مواقع أو مواسم مختلفة. وعلى الرغم من أن أجهزة الحقل والطائرات بدون طيار قد تساعد في دراسة هذه الإشارات المتداخلة بدقة أعلى، إلا أن القيود التقنية وصغر نطاق الدراسة يحدّ من نقل النتائج إلى نطاقات أوسع.

اتجاهات المستقبل

معالجة أوجه القصور والتعقيدات في استخدام بيانات الاستشعار عن بعد لرصد اضطرابات صحة النبات والإجهاد تطلب إجراء مزيد من التحقيقات لفهم كامل

لتأثير العوامل الحيوية واللاحيوية الفردية ، وتأثيراتها المضاعفة على ديناميكيات الخصائص الفيزيائية الحيوية والكيميائية الحيوية للغطاء النباتي ، وكذلك بصماتها الطيفية على مستوى الورقة والمظلة tree canopy. هذا الفهم ضروري لتحسين موثوقية التقييم المستشعر عن بعد لاضطرابات صحة الغطاء النباتي وعوامل الإجهاد.

لتعزيز قابلية التعميم والنقل لنماذج الاستشعار عن بعد للكشف عن إجهاد النبات، يتم تبني نُهج هجينة بشكل متزايد تجمع بين المبادئ الفيزيائية والتعلم القائم على البيانات .تدمج هذه النُهج النماذج الفيزيائية ، مثل نماذج نقل الإشعاع التي تحاكي كيفية تفاعل الضوء مع الغطاء النباتي ، مما يوفر رؤية ميكانيكية حول كيفية تأثير التباين الناجم عن الإجهاد في الخصائص الفيزيائية الحيوية والكيميائية الحيوية على إشارة الاستشعار عن بعد ، مع نماذج التعلم الآلي القادرة على التقاط العلاقات المعقدة وغير الخطية ضمن مجموعات البيانات الكبيرة.

ومع ذلك، لا يزال اختيار نماذج نقل الإشعاع المناسبة أو خوارزميات التعلم الآلي ودعمها بملاحظات ميدانية واسعة وعالية الجودة أمرًا ضروريًا لتعزيز موثوقية الكشف عن الإجهاد على مقاييس متعددة وعبر ظروف بيئية متباينة .يجب جمع الملاحظات الميدانية عالية الجودة من خلال تجارب ميدانية ومخبرية مخصصة لدراسة العمليات الفسيولوجية للنبات بشكل شامل تحت عوامل إجهاد فردية ومتعددة ، بالإضافة إلى ديناميكياتها الكيميائية الحيوية، والفيزيائية الحيوية، والطيفية المرتبطة بها.

توفر بيانات المراقبة الأرضية المتاحة مجانًا من منصات مثل Sentinel-2 ، التي تُعد نطاقاتها الطيفية ذات الحافة الحمراء حساسة بشكل خاص لحالة الغطاء النباتي ، و Sentinel-1 للمستشعر الراداري ذو الفتحة الاصطناعية (SAR) ، الذي يوفر قياسات مستقلة عن الطقس ، دورات عودة متكررة وهي ذات قيمة عالية لتحليل التباينات الزمنية في الاستجابات الطيفية للغطاء النباتي والإشارة إلى إجهاد النبات .كما توفر بعثات الساتل الطيفي الفائق، بما في ذلك EnMAP ، وDESIS ، و PRISMA ، إمكانات كبيرة .يتيح دقتها الطيفية الدقيقة ، المقدمة بالعديد من النطاقات الطيفية الضيقة ، الكشف عن التباينات الطفيفة في الخصائص الفيزيائية الحيوية والكيميائية الحيوية في مرحلة الإجهاد المبكرة ، مما يحسن القدرة على تقييم عوامل الإجهاد المتنوعة.

من المتوقع أن تؤدي الانبعاثات الطيفية الفائقة القادمة، مثل CHIME ، إلى تقدم كبير في مجال الاستشعار عن بعد للغطاء النباتي وصحة النبات .مع زمن عودة متوقع عالي (من أسبوع إلى أسبوعين بمجرد نشر الكوكبة بالكامل) ، ستوفر CHIME سجلات زمنية مجانية وأكثر ثراءً بكثير من أدوات الطيف الفائق السابقة المحمولة بالفضاء .سيعزز هذا التوفر المعزز للبيانات تطوير نماذج متطورة وذكية للكشف عن ورصد إجهاد واضطرابات الغطاء النباتي عبر النظم البيئية الأرضية المتنوعة.

روشنك درويش زاده

كلية علوم المعلومات الجغرافية ومراقبة الأرض (ITC)، جامعة تويننتي، هولندا

r.darvish@utwente.nl