• أدى رش نباتات الخيار بـ dipotassium hydrogenophosphate (وهو: K_2HPO_4) إلى تنشيط تكوين مستوى عالٍ من المقاومة الجهازية ضد الفطر *Colletotrichum lagenarium* مسبب مرض الأنثراكنوز، وصاحبت تلك المقاومة ظهور موت موضعى لبعض خلايا الخيار بفعل ملح الفوسفات، وهو الذى تطور – فيما بعد – إلى بقع متحللة منظورة. ولقد سبق موت الخلايا تمثيل سريع لكل من الـ superoxide، والـ hydrogen peroxide، كما ظهرت – نتيجة للمعاملة بالفوسفات – زيادة موضعية وجهازية فى مستوى كل من حامض السلسيلك الحر والمرتبط (Orober وآخرون ٢٠٠٢).

• أدت معاملة نباتات الطماطم والفلفل بأى من الـ acilbenzolar-S-methyl بتركيز ٢٪ أو ٤٪ (حجم/حجم)، أو فوسفات البوتاسيوم بتركيز ٢٥ مللى مول، أو ammonium lignosulfonate بتركيز ٢٪ + ١٠ مللى مول فوسفات بوتاسيوم، ثم عدواها بالبكتيريا *Xanthomonas campestris* pv. *vesicatoria*.. أدت إلى خفض إصابتهما جوهريًّا بالبقع البكتيرية (Abbasi وآخرون ٢٠٠٢).

حامض الفوسفورس وأيونات الفوسفونيت والفوسفونات

من المصطلحات الحديثة الاستخدام – نسبيًّا فى المجال الزراعى: حامض الفوسفورس phosphorus acid (وليس حامض الفوسفوريك phosphoric acid)، وأيون الفوسفيت phosphate (وليس الفوسفات phosphate)، والفوسفونيت phosphonite، والفوسفونات phosphonate. وعلى خلاف حامض الفوسفوريك الذى يحتوى على أربع ذرات أكسجين (H_3PO_4)، فإن حامض الفوسفورس (H_3PO_3) والمركبات ذات الصلة به تحتوى على ثلاث ذرات أكسجين فقط.

وبينما يعد حامض الفوسفوريك والمركبات ذات الصلة به من المغذيات النباتية، فجميعها أسمدة فوسفاتية، فإن حامض الفوسفورس والمركبات ذات الصلة به تقوى الجهاز المناعى النباتى ضد الإصابات الفطرية. وبذا.. فإن أى من مجموعتى المركبات لا يمكن أن تحل محل الأخرى.

تُسوق أملاح الفوسفيت phosphite لحامض الفوسفورس phosphorus acid (= PO_3^{3-} وتأخذ الرمز Phi) — وهى صورة مختزلة من الفوسفات phosphate لحامض الفوسفوريك (= PO_4^{3-} وتأخذ الرمز Pi) — على نطاق واسع إما كمبيدات فطرية، وإما كسماد، وأحيانًا كمنشط حيوى، وذلك أمر محير بالنسبة لكل من الموزعين والمزارعين. هذا.. إلا أن الأمر المؤكد أن الـ Phi لا يمكن أن يمد النبات بالفوسفور P؛ وبذا لا يمكنه أن يُعضد أو يحل محل الـ Pi كمغذٍ بأى قدر كان. كذلك فإن الـ Phi ليس له أى تأثير مفيد على نمو النباتات السليمة غير المصابة بالأمراض؛ سواء استعمل منفردًا أو مع الـ Pi بنسب مختلفة أو معدلات مختلفة. هذا.. ولا يكون تأثير الـ Phi على النباتات ثابتًا ومنتظمًا، ولكنه يعتمد — بقوة — على وضع الـ Pi بالنباتات. ويكون التأثير الضار للـ Phi واضحًا — فقط — فى حالات نقص الفوسفور، ويزداد هذا التأثير الضار للـ Phi مع زيادة نقص الفوسفور عن المستوى الذى يتسبب فى خفض أقصى نمو نباتى ممكن بمقدار ١٠٪ –٢٠٪، وحتى حالات النقص الشديد. وفى الحالات القليلة التى وجد فيها أن الـ Phi يُحسِّن من النمو النباتى فإن الأغلب الأعم أن مرد ذلك التأثير كان إلى مكافحته لإصابات مرضية، أو بسبب تحول جزء من الـ Phi بالأكسدة بفعل كائنات التربة إلى Pi، إلاّ أن هذا التأثير الأخير لا يكون كفؤًا فى مد النباتات باحتياجاتها من الفوسفور (Thao & Yamakawa ٢٠٠٩).

وعلى الرغم من أن جذور وأوراق النباتات يمكنها امتصاص حامض الفوسفورس، فإنها لا تستفيد منه كمصدر للفوسفور كما أسلفنا؛ نظرًا لبقائه ثابتًا فى النبات على تلك الصورة. كذلك فإن مركبات حامض الفوسفورس تتحلل فى التربة إلى صور فوسفورية ميسرة للامتصاص، إلا أن تلك العملية تتم ببطء شديد لا يمكن معها الاعتماد على تلك المركبات كمصدر سمادى.

وتجدر الإشارة إلى أن الفوسفيت phosphite — الذى كثيرًا ما يسوق على أنه مغذٍ نباتى ومصدر متميز للفوسفور — لا يفيد إطلاقًا فى هذا الشأن، لا عن طريق إضافته إلى التربة ولا عن طريق رش الأوراق؛ بل إنه.. وعلى العكس — يضعف النمو النباتى عند

نقص الفوسفات، وذلك كما وجد من دراسة أجريت على السبانخ (Thao وآخرون ٢٠٠٨).

يُنشِّط أيون الفوسفيت الجهاز الدفاعى النباتى ضد الإصابات الفطرية، وكانت بداية اكتشاف هذا الأمر مع فطر الفيتوفثورا *phytophthora* مسبب مرض الندوة المتأخرة. وحاليًّا .. تلعب مركبات حامض الفوسفورس (الـ phosphite، والـ phosphonites) دورًا هامًّا كمواد فعّالة فى مقاومة الفطريات وبخاصة من رتبة Oomycota. وقد بدأ الأمر بإدخال المبيدين الفطريين أليت Aliette، وفوستيل ألومنيوم Fosetyl-A1 وتلاهم ظهور عدة مبيدات فطرية بتفاعلات بسيطة يتحد فيها أيون الفوسفونيت مع أى من البوتاسيوم أو الصوديوم أو الألومنيوم، وتتضمن قائمة المبيدات التجارية أسماء مثل ProPhyt، و Phostrol، و Phosguard .

ومن أمثلة الحالات التى أدت فيها المعاملة بأملاح الفوسفيت إلى حث تطوير مقاومة جهازية فى النباتات ضد بعض الأمراض، ما يلى:

• وجد أن إضافة حامض الفوسفونيك مع مياه الرى بتركيز ٤ جم من المادة الفعالة/ لتر وفرت مكافحة جيدة للفطر *Bremia lactucae* مسبب مرض البياض الزغبى فى الخس استمرت لمدة ١٤ يومًا على الأقل (Wicks وآخرون ١٩٩٤).

• أعطت معاملة أوراق القلقاس بحامض الفوسفورس phosphorous acid بتركيز ١٤ مل/لتر مكافحة ممتازة للفحة الأوراق التى يسببها الفطر *Phytophthora colacasiae* (Semisi وآخرون ١٩٩٨).

• أدى رش نباتات البطاطس بحامض الفوسفونيك إلى خفض إصابة الدرنات بالفطر *Phytophthora infestans* — مسبب مرض الندوة المتأخرة — بشدة، وقد كان كافيًا — لهذا الغرض — الرش بالحامض بمعدل ٤ كجم للهكتار (١,٧ كجم للفدان) مرة واحدة فى منتصف موسم النمو أو قرب نهايته لحماية الدرنات من الإصابة بالفطر فى المخازن (Cooke & Little ٢٠٠٢).

• أفاد رش النموات الخضرية للبطاطس قبل الحصاد بحامض الفوسفورس phosphorous acid فى خفض شدة الإصابة فى الدرنات بعد الحصاد بكل من الفطرين *Phytophthora infestans* (مسبب مرض الندوة المتأخرة)، و *P. erythroseptica* (مسبب مرض العفن الوردى pink rot)، إلاّ أن المعاملة لم تكن مؤثرة فى الفطر *Pythium ultimum*، علمًا بأنه تمت عدوى الدرنات بعد الحصاد بكل من الفطريات الثلاثة (Johnson وآخرون ٢٠٠٤).

• أدى سقى الكرنب بعد يوم واحد من الشتل بمبيد الفوسفونيت الفطرى phosphonate fungicide باسم AG3 إلى الحد – بشدة – من إصابته بمرض الجذر الصولجانى الذى يسببه الفطر *Plasmodiophora brassicae* (Abbasi & Lazarovits ٢٠٠٦أ).

• أدى نقع بذور الخيار فى محلول فوسفونيت لمدة ١٠ دقائق إلى حمايتها وحماية البادرات بعد الإنبات من الإصابة بعدة أنواع من الفطر *Pythium*، منها: *P. aphanidermatum*، و *P. ultimum*، و *P. irregulare*، وذلك بنسبة ٨٠٪، واستمر تأثير المعاملة حتى مع تخزين البذور لمدة وصلت إلى ١٨ شهرًا قبل زراعتها. وبعد ستة أسابيع من الزراعة كانت نسبة النباتات المتبقية ٦٣٪ فى معاملة الفوسفونيت مقارنة بنسبة ١٨٪ فى الكنترول (Abbasi & Lazarovits ٢٠٠٦ب).

• أدى استخدام المبيد FNX-100 المحتوى على الفوسفونيت phosphonate إلى مكافحة مرض عفن التاج الفيتوفثورى فى الكوسة والقرع العسلى بصورة جوهرية، وكان أفضل استخدام للمبيد عن طريق "سقى" النباتات فى الحقل، وليس بطريق الرش على النموات الخضرية (Yandoc-Ables وآخرون ٢٠٠٧).

أدى رش نباتات البطاطس أسبوعيًّا بأىٍّ من خمسة أنواع من الفوسفونيت phosphonates، هى:

Dipotassium phosphonate-dipotassium phosphate

Potassium phosphite

Mono and dipotossium phosphorus acid

Mono- and dibasic sodium, potassium and ammonium phosphites

Aluminum tris O-ethyl phosphonate

أدى إلى خفض نسبة إصابة الدرنات بالفطر *Phytopthora infestans* – نسبيًّا – عند الحصاد مقارنة بالإصابة عند معاملة الرش بالمبيد chlorathalonil، وكان هذا التأثير واضحًا – خاصة – بعد شهرين من تخزين الدرنات (Mayton وآخرون ٢٠٠٨).

أى إن أى INA

كان المركب 2,6-dichloroisonictonic acid مع الـ methyl ester الخاص به (يعرفان معًا باسم INA) هما أول المركبات الكيميائية المصنعة التى أظهرت قدرة على إحداث استجابات دفاعية فى النباتات ضد المسببات المرضية الفطرية والبكتيرية الرئيسية.

وأعقب ذلك ظهور مركب آخر محضر صناعيًّا هو acibenzolar-S-methyl (اختصارًا: BTH، وهو موضوع العنوان التالى) كان أوسع تأثيرًا من INA فى حث تكوين مقاومة جهازية ضد مدى واسع من المسببات المرضية فى النباتات. وعلى خلاف الـ INA– الذى لم تكن النباتات ذات قدرة عالية على تحمله – فإن النباتات أظهرت قدرة عالية على تحمل الـ BTH. ولذا.. تم إدخال هذا المركب فى الزراعة كمنشط نباتى تحت الأسماء التجارية Bion، و Actigard، و Boost (Beckers & Corath ٢٠٠٧).

مشتقات الـ بى تى إتش BTH، والـ أى إس إم ASM

اكتشفت مجموعتين من المركبات الكيميائية التى يمكنها محاكاة النشاط البيولوجى الذى يحدث خلال تكوين المقاومة الجهازية المستحثة فى النباتات بواسطة المسببات المرضية المحدثة للتحللات necrogenic pathogens، وهما:

١– الـ 2,6,dichloro isonicotinic acid (اختصارًا: INA) ومشتقاته وقد أسلفنا الإشارة إليه، وهو يتشابه فى تركيبه البنائى مع تركيب حامض السلسيلك (شكل ٧–١).