

يشهد النظام المناخي للأرض ارتفاعاً في درجة الحرارة فإن معظم الارتفاع في درجات الحرارة خلال نصف القرن الماضي أدت إلى مجموعة من التغيرات البيئية والأحداث المناخية المتطرفة كان سببه الانبعاثات للغازات الدفيئة وبسبب هذه الانبعاثات البشرية فإن العقود الأربعة الماضية كانت أكثر دفئاً من أي عقد سابق لها منذ عام 1850 مما أدى إلى تراكم الغازات الدفيئة في الغلاف الجوي، والتي تشمل بشكل رئيسي ثاني أكسيد الكربون (CO₂)، والتي تحبس الحرارة من الشمس وتؤدي إلى الاحتباس الحراري. (1) بالإضافة إلى حدوث تأثيرات بعيدة المدى حيث تؤثر على جوانب مختلفة من الحياة وتشمل هذه العوامل ارتفاع منسوب مياه البحر، وزيادة تواتر وشدة الظواهر الجوية المتطرفة، والتحول في التنوع البيولوجي، والتهديدات التي يتعرض لها الأمن الغذائي (2) كما أدى تغير المناخ إلى تغييرات في أنماط الطقس في جميع أنحاء العالم حيث أن ظاهرة الاحتباس العالمي ساهمت في زيادة وقوع موجات الحر الشديدة، وتهدد هذه التغيرات ليس فقط الحياة البشرية ولكنها تعطل أيضاً الإنتاج الزراعي، ونظراً لتغير التنوع البيولوجي والمناخ مع مرور الوقت، يمكن للكائنات الحية أن تتطور وتتكيف مع البيئات الجديدة. فإن إحدى الطرق المفيدة للحفاظ على التنوع الوراثي هي التعديل الوراثي، وهو التغيير المباشر للتركيب الجيني للكائن الحي. تم استخدام التقنيات الوراثية للبحث عن البكتيريا المسببة للأمراض وكذلك صحة البشر والحيوانات والنباتات. لقد حدث ثورة في علم الأحياء الدقيقة البيئي منذ سنوات من خلال مجموعة من تقنيات التعديل الوراثي، بما في ذلك Zinc-finger nuclease (ZFNs)، والنوكليازات الداخلية المؤثرة الشبيهة بمنشط النسخ (TALENs)، وطرق المعالجة الحيوية القائمة على التعديل الوراثي لسلالات ميكروبية محددة، ودراسة علم الأحياء الدقيقة باستخدامها. لقد دفع العلماء البكتيريا المعدلة وراثياً، وغيرها من طرق تحرير الجينات لتطوير المحاصيل والثروة الحيوانية التي يمكنها إدارة تأثيرات تغير المناخ بشكل أفضل (4). التي تتكون من البكتيريا والفيروسات والفطريات والكائنات الحية الدقيقة الأخرى، تلعب دوراً حاسماً في النظم البيئية الموجودة فوق التربة وتحت التربة. وتأثيرها على امتصاص العناصر الغذائية، والقدرة على التكيف مع الإجهاد (5). الغرض من البحث تكمن أهمية البحث في تسليط الضوء على كيف يمكن أن يلعب التعديل الوراثي دوراً في معالجة تغير المناخ وكيف يمكن استخدام الميكروبات المعدلة وراثياً كحل للمشكلة. علاوة على ذلك يركز البحث على استكشاف تقنيات التعديل الوراثي المختلفة المتاحة للاستخدام على الميكروبات، واستهداف جينات محددة داخل الميكروبات من أجل إنشاء أنواع معدلة وراثياً وينظر أيضاً في التقنيات المختلفة التي يمكن استخدامها لتحقيق ذلك مثل كريسبر-كاس 9 وتقنيات تعديل الجينات الأخرى. يذكر أن بعض تقنيات التعديل الوراثي التي يتم تطبيقها بفعالية على الكائنات متعددة الخلايا التي تحتوي على نسبة عالية من الحمض النووي لن تكون فعالة في الميكروبات لذلك من الضروري اختيار التقنية الصحيحة المناسبة، ومن خلال استخدام هذه التكنولوجيا الوراثية الحديثة يحدد الجانب الرئيسي من البحث الاستخدامات المحتملة للميكروبات المعدلة وراثياً في التخفيف من تغير المناخ. وتشمل بعض الأمثلة استخدام الأنواع المعدلة وراثياً في احتجاز الكربون وتخزينه، وتعزيز إعادة تدوير المغذيات وصحة التربة، والمعالجة البيولوجية لمخلفات الملوثات. تساعد هذه الإجراءات المختلفة للميكروبات على تطوير فرص وأبحاث جديدة حيث إنها توسع المعرفة الحالية بالتعديل الوراثي في المجال المعني وتأثيراته المحتملة في المستقبل. والمخاطر التجريبية غير المعروفة، والتأثيرات البيئية طويلة المدى وغير المقصودة، وإمكانية انقراض نوع معين في حالة فشل الميكروبات المعدلة وراثياً في الدراسات أو التطبيق الحقيقي. ويتم أيضاً عرض التصورات العامة والاعتبارات الأخلاقية حول موضوعات البحث البيولوجي وكيف يمكن للتعديل الوراثي في الكائنات الحية الدقيقة أن يؤثر على الآراء المجتمعية وقبول التقنيات الوراثية. أهداف البحث يهدف البحث إلى معرفة الدور المهم للتقنيات التكنولوجية الحيوية الجديدة ومدى فاعليتها في التخفيف من آثار تغير المناخ في ظل تحديات القطاع الزراعي. تتعرض النظم الزراعية العالمية والأمن الغذائي لضغوط متزايدة نتيجة لأزمة المناخ، والتي من المحتمل أيضاً أن تؤدي إلى تفاقم أمراض النبات والحيوان وما ينتج عنها من خسائر في الإنتاجية (6). تاريخياً، استخدم المزارعون ومنتجات الماشية مضادات الميكروبات لعلاج ومنع العدوى في المحاصيل والحيوانات وكذلك لتشجيع نمو بعض الأنواع الحيوانية، وبالتالي تعزيز الإنتاج الزراعي. ولكن قد يواجه المزارعون ومربي الماشية الذين يضطرون إلى استخدام مضادات الميكروبات في كثير من الأحيان ضغوطاً على النباتات والحيوانات لتلبية الطلب وتعزيز الإنتاجية مع تفاقم عواقب التغيرات المناخية. ونظراً إلى فشل العلاجات السابقة، فمن المتوقع أيضاً أن يرتفع استخدام المضادات الحيوية والأدوية المضادة للفطريات لعلاج أمراض النبات (7). قد يؤدي الاستخدام المستمر غير السليم للمضادات الحيوية إلى زيادة إحداث المقاومة. كما قد يتأثر توافر العناصر الغذائية وكميتها والدورة الميكروبية بالمناخ والتغيرات الفيزيائية في التربة، والتي قد تكون ذات عواقب سلبية على النظام البيئي (8). حيث أنه يتم إنتاج

واستهلاك الغازات الدفيئة الرئيسية التي تساهم في ظاهرة الاحتباس الحراري CO₂ و CH₄ و N₂O بواسطة الكائنات الحية الدقيقة. كما أن للميكروبات تأثير على صحة الإنسان. فإن عامة الناس أقل وعياً بالعلاقة بين البكتيريا ونوعية حياة الإنسان أو بين تغير المناخ والصحة العامة، حيث تتأثر التجمعات الميكروبية بتغير المناخ؛ الأمر الذي يمكن أن يكون له تأثير على نوعية الحياة بشكل عام. والتي يشعر بالمعاناة منها سكان البلدان النامية أكثر من غيرهم نتيجة لأنهم يتأثرون بشكل غير متناسب بالآثار السلبية لتغير المناخ (9) ، ومن الجيد أن العديد من المحاولات الأخيرة لتعديل الجينات أظهرت نتائج واعدة في إعطاء مقاومة لمسببات الأمراض ودرجات الحرارة المرتفعة التي تعزز تكاثر العدوى الميكروبية . تاريخ الكائنات المعدلة وراثيا استخدام الكائنات المعدلة وراثياً (GMOs) في الزراعة بدأ منذ حوالي 10, 000 عام، شهد العصر الحديث للتعديل الوراثي خطوة هامة في عام 1972 عندما قام Stanley Cohen و Herbert Boyer بابتكار تقنيات تسمح بإجراء تعديلات بسلاسل الحمض النووي في نقاط محددة عن طريق وسائل كيميائية، ودمجها في سلسلة حمض نووي مختلفة. في نفس الوقت، وضع Cohen منهجيات لإدخال هذه السلاسل الحمضية المعدلة في خلايا الكائنات الدقيقة، مما أدى إلى إنشاء كائنات معدلة وراثياً قادرة على إنتاج الهرمونات تحت ظروف محكمة (12) . وقد انتهت هذه الجهود المشتركة بإنشاء شركة Genetech في عام 1976 ، حيث تم دمج الجينات البشرية المسؤولة عن إنتاج الإنسولين في سلالات ميكروبية. بعد ذلك، بدأت هذه الكائنات المعدلة وراثياً في تخليق الإنسولين، مما يشكل تقدماً هاماً في مجال التكنولوجيا الحيوية. بالإضافة إلى ذلك، قامت بإنتاج الهرمون البشري من الكائنات المعدلة وراثياً بتسهيل التدخلات الطبية، مثل مساعدة نمو الأفراد المصابين بالقزمية للوصول إلى طولهم الكامل. إضافة إلى أن 67 في المائة من الجبن المنتج في الولايات المتحدة مصنوع من المنفحة المستمدة من الكائنات المعدلة وراثيا (8) . وتم تقديم شكل اصطناعي من هرمون النمو البقري (BGH) مع الهندسة الوراثية من قبل شركة Monsanto في عام 1994 بهدف زيادة إنتاج الحليب. ولكن يشعر المنتقدون بالقلق من أن الهرمونات قد تلحق الضرر بالحيوانات و تلوث إمدادات الحليب. إلى جانب عامة الناس (13) . تطبيقات التعديل الجيني في القطاع الزراعي وتشمل التطبيقات الأخرى إنتاج المنتجات غير البروتينية (البلاستيك الحيوي) أو المنتجات غير الصناعية (نباتات الزينة). كما تم أيضاً هندسة عدد من الحيوانات وراثياً لزيادة الإنتاج وتقليل التعرض للأمراض. على سبيل المثال، تم تصميم سمك السلمون لينمو بشكل أكبر وينضج بشكل أسرع (14) . يساعد تقليل الحرث في التخفيف من تآكل التربة والتلوث، فضلاً عن توفير فوائد بيئية غير مباشرة مثل تقليل تلوث المياه من المبيدات الحشرية وجريان الأسمدة (15). من شبه المؤكد أن التحسينات في تكنولوجيا التعديل الوراثي ستسمح للأراضي المهمشة بأن تصبح أكثر فعالية وقد تسهل معالجة التربة الملوثة عن طريق إدخال جينات تمنح القدرة على تحمل الضغوط غير الحيوية مثل الجفاف أو الغمر، والحرارة أو البرودة الشديدة، والملوحة، والألمنيوم، والمعادن الثقيلة (17). ولذلك فإن التعديل الجيني يمكن أن يقدم لنا احتمالية تعزيز إنتاجية الأراضي الزراعية مع الحد من التأثير البيئي. إن التأثيرات المحتملة لتغير المناخ على مجتمعات الميكروبات في التربة ونشاطها، والتي يمكن أن تؤثر على ردود الفعل البيولوجية للميكروبات على تغير المناخ من خلال نمو النبات وتكوين النباتات. تتعلق بالتأثيرات الغير مباشرة لزيادة تركيز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي على الميكروبات في التربة، من خلال زيادة تركيز التمثيل الضوئي للنباتات ونقل الكربون من التمثيل الضوئي إلى الجذور الدقيقة والفطريات (18). لكي يتمكن النظام البيئي من أداء الأنشطة الأساسية (مثل تحليل الكتلة الحيوية ، ودورة المغذيات ، واعتدال ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي ، وما إلى ذلك) تشكل الكائنات الحية في التربة جزءاً مهماً من التنوع البيولوجي الأرضي في العالم . وذلك لإصلاح وتحسين نوعية التربة وتقليل خطر تدهور التربة ، وزيادة نشاط وتنوع أنواع الحيوانات والنباتات في التربة أمر بالغ الأهمية (19). توضح الأبحاث كيف تتكيف الميكروبات في التربة مع التغير المناخي المستمر، مبينة أن المناطق ذات التنوع النباتي الأكبر تتوافق مع الميكروبات الأكثر نشاطاً في التربة وزيادة تخزين الكربون. فإن التغير المناخي يقلل تدريجياً من تنوع العديد من النظم البيئية النباتية، مما قد يؤثر على قدرة التربة على تخزين الكربون (20). تحتوي التربة على غالبية احتياطيات الكربون الموجودة على الأرض. قد يؤدي أي زيادة في الاحترار نتيجة للأنشطة البشرية إلى تغييرات جوهرية في توازن الكربون ويحفز إطلاق الكربون المخزن إلى الغلاف الجوي، مما يزيد من الاحترار العالمي. علاوة على ذلك، قد يؤدي ارتفاع درجات الحرارة إلى تعزيز دورة الكربون بين التربة والغلاف الجوي (21). يمكن أن تزيد الحرارة المرتفعة أيضاً من سرعة عمليات الميكروبات، من المتوقع أن يحدث فقدان يقدر بحوالي 55 ± 50 بيتاجرام من الكربون من طبقات التربة السطحية بحلول عام 2050، مما قد يسرع من ظاهرة التغير المناخي (22). تلعب الميكروبات في التربة دوراً حاسماً في تخزين الكربون من خلال تحليل المواد العضوية وتسهيل تخزين الكربون، مما

يساعد في تقليل مستويات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي (23). علاوة على ذلك، تسهل التربة التي تحتوي على مستويات رطوبة كافية أو تلك التي تسكنها الميكروبات المقاومة للجفاف تخزين الكربون بسهولة أكبر. ومع ذلك، يؤدي تصاعد التغير المناخي إلى تفاقم ظاهرة التصحر وتوسع الأراضي القاحلة، مما يشير إلى انخفاض في توافر التربة المناسبة لتثبيت الكربون بشكل فعال ما لم يتم تطوير ودعم التدخلات الميكروبية بنشاط (24). تمتلك الميكروبات المعدلة وراثياً في التربة القدرة على تعزيز نمو النبات وتحسين امتصاص العناصر الغذائية من خلال آليات مثل تثبيت النيتروجين وذوبان المعادن الأساسية مثل الفوسفور واليوتاسيوم والزنك. يمكن لهذه الميكروبات أيضاً أن تساهم في تقوية النباتات بيولوجياً، مما يحسن من توافر المغذيات الدقيقة مثل السيلينيوم والحديد والزنك في المحاصيل الغذائية الرئيسية (25). تكيف ميكروبات التربة مع التغير المناخي مما يمكنها من الاستجابة السريعة والتكيف والتطور بمعدلات أعلى نسبياً نظراً لفترات أجيالها القصيرة (26). تواجه هذه الكائنات تأثيرات مباشرة ناتجة عن تغير المناخ، بالإضافة إلى التأثيرات غير المباشرة، مثل زيادة مستويات ثاني أكسيد الكربون (27). تمتلك هذه الميكروبات القدرة على التكيف مع الظروف البيئية المتغيرة من خلال استراتيجيات تكيف متنوعة، وتجارب تحولات تطورية، تظهر هذه الكائنات مرونة فسيولوجية قد توفر درجة من الحماية ضد تغير المناخ الناجم عن النشاط البشري (29). علاوة على ذلك، فإن مجتمعات التربة التي تتكيف مع تقليل توافر المياه أو دورات الجفاف والرطوبة المتكررة قد تعاني من تحولات هيكلية أو وظيفية أقل في استجابتها لتغيرات النظم الهيدرولوجية المتغيرة (30). تعكس العلاقة بين تنوع النباتات وارتفاع نشاط ميكروبات التربة، جنباً إلى جنب مع زيادة تخزين الكربون، والتفاعل البيئي المعقد داخل النظم البيئية. ومع ذلك، تُعد تأثيرات تغير المناخ المستمرة تحديات كبيرة لهذا التوازن الدقيق. بينما يمكن تخزين الكربون بسهولة في التربة التي تحتوي على رطوبة كافية أو تحتضن مجتمعات ميكروبية قوية، تهديدات التصحر المتزايدة وتوسع المناطق القاحلة تُهدد توافر التربة المناسبة لتثبيت الكربون بشكل مثالي (31). ويمكن للجهود المبذولة لتحسين تخزين الكربون وتعزيز قدرة التربة على الاحتفاظ بالمياه، جنباً إلى جنب مع زراعة محاصيل متينة، تترابط وثيقاً مع ترميم ميكروبيوم التربة. تلعب المجتمعات الميكروبية دوراً حيوياً في تصحيح تدهور التربة عبر جوانبها الفيزيائية والكيميائية والبيولوجية، وهو أمر أساسي لاستراتيجيات فعالة لتثبيت الكربون والعناصر الأخرى (32). يعتبر الاستكشاف المعقد للأسس الجينية والجزيئية للتكيف من النقاط الأساسية في البحوث البيولوجية المعاصرة، التي تهدف إلى تحديد الطفرات الكامنة وراء التحولات التطورية الكبيرة. جنباً إلى جنب مع التغيرات التنظيمية في تعبيرات الجينات التي تعزز الحدثة والابتكار (33)، الآثار الإيجابية والسلبية لتطبيق التعديل الجيني على المحافظة على التوازن البيئي يوفر التعديل الوراثي لميكروبات التربة طرقاً واعدة لتعزيز الممارسات الزراعية المستدامة. ومن خلال تحسين السمات المفيدة لهذه الميكروبات، يمكننا دعم نمو النباتات، وزيادة توافر العناصر الغذائية، وتقليل الاعتماد على الأسمدة الكيماوية والمبيدات الحشرية. ومع ذلك، فمن الضروري مواصلة البحث حول الآثار البيئية والسلامة لهذه الكائنات المعدلة وراثياً لضمان مساهمتها بشكل إيجابي في الزراعة وصحة النظام البيئي. يمثل التعديل الوراثي لميكروبات التربة وسيلة واعدة لتعزيز الإنتاجية الزراعية والاستدامة والأمن الغذائي. ومن خلال الاستفادة من قدرات هذه الكائنات المعدلة، يمكن أن يؤدي التعديل الوراثي لميكروبات التربة إلى تطوير محاصيل ذات إنتاجية وجودة أفضل (34)، تحمل هذه التعديلات الجينية إمكانية زيادة كبيرة في إنتاج المحاصيل، على غرار التطورات التي شهدتها الثورة الخضراء. من خلال تعزيز المقاومة ضد الأمراض وضغوط البيئة، يمكن للمحاصيل المعدلة وراثياً تقديم غذاء محسن للمستهلكين (34). حيث تساهم المحاصيل المعدلة وراثياً والتي تم تصميمها لتحمل التحديات مثل الجفاف والحرارة في تعزيز الإنتاجية الشاملة من خلال تقليل خسائر المحاصيل. يُتوقع أن تأتي أكبر زيادات في الإنتاجية من السمات المعدلة وراثياً التي تعزز القدرات الإنتاجية من خلال تعزيز نمو النبات وكفاءة التمثيل الضوئي. تقنيات تعديل الجينات الجديدة من المرجح أن توسع نطاق الخصائص المرغوبة للمحاصيل (36). مما يؤكد مساهمة تعديلها جينياً في تعزيز صحة التربة وتنوعها البيولوجي (36). مما يسمح لها بالازدهار في البيئات الجديدة أو المتغيرة. تتضمن هذه العملية اتخاذ القرارات الاستراتيجية لتمكين تكيف النظام بفعالية للتفاعل مع التغيرات البيئية وتحقيق أهداف مستدامة (37). لقد تم اكتشاف التعديل الجيني لميكروبات التربة كوسيلة محتملة لتعزيز إنتاجية المحاصيل، وتحسين امتصاص المغذيات، وزيادة مقاومة الآفات في النظم الزراعية. ومع ذلك، هناك مخاوف محورية مرتبطة بالآثار السلبية المحتملة لاستخدام ميكروبات التربة المعدلة وراثياً في الزراعة. يمكن أن يؤدي إدخال سلالات ميكروبات التربة المعدلة وراثياً إلى ظهور سلالات مقاومة في الكائنات المستهدفة، مما يثير تحديات طويلة الأجل في إدارة الآفات والسعي نحو الممارسات الزراعية المستدامة (38). الآثار الإيجابية: تلعب المجتمعات

الميكروبية في نظم التربة دوراً حيوياً في تعزيز الممارسات الزراعية المستدامة. تتضمن مشاركتها في وظائف أساسية مثل تثبيت العناصر الغذائية وتعددين المعادن وتحريكها، كل هذه الوظائف تساهم بشكل كبير في نمو النبات وصحة النظام الإيكولوجي. وقد أدت استغلال قدرات هذه الميكروبات إلى تطوير الأسمدة الحيوية، وهي منتجات تساهم في تحسين تغذية المحاصيل بالعناصر الغذائية الأساسية. علاوة على ذلك، أحدثت التطورات في هندسة الميكروبات فتح آفاقاً جديدة في مجال مكافحة تغير المناخ. من خلال التهجين والتعديل الجيني، يمكن جعل الميكروبات تتكيف لامتناس أو تخزين غازات الاحتباس الحراري مثل ثاني أكسيد الكربون والميثان وأكسيد النيتروجين، مما يساهم في جهود الاستدامة البيئية (40). تعمل بعض السلالات كعوامل فعالة في مكافحة الأمراض النباتية، بينما تعزز السلالات الأخرى امتصاص العناصر الغذائية، مما يؤدي إلى تحسين نمو النبات. ومع ذلك، فإن النجاح في دمج البكتيريا المعدلة وراثياً في نظم الزراعة يعتمد على عوامل مثل تركيب التربة ومستويات الرطوبة والتنافس مع الأنواع الأخرى والتفاعل مع جذور النبات (41). تقنيات تعديل الجينات مثل CRISPR-Cas9 يمكن أن تلعب دوراً حاسماً في معالجة الجينات التي تعزز مقاومة الجفاف (42)، مما ينتج سلالات تساعد النباتات في إدارة بعض المشكلات الهامة مثل الإجهاد المائي بشكل فعال. علاوة على ذلك، يمكن للكائنات المعدلة وراثياً تعزيز تحلل الملوثات في التربة، بما في ذلك المعادن الثقيلة والمبيدات الحشرية والهيدروكربونات. على عكس الميكروبات الطبيعية ذات القدرات المحدودة في ظل وجود تغيرات مناخية، يمكن للميكروبات المعدلة وراثياً تعزيز معدلات التحلل بسبب مساراتها الأيضية المتغيرة، مما يؤدي إلى زيادة إنتاج المركبات الحيوية. يساهم هذا بشكل كبير في تحسين صحة التربة وجهود العلاج (43). وفي السياق الزراعي، يمكن للميكروبات أن تكون حيوية في تعزيز تحمل المحاصيل مثل الطماطم والذرة والفلل للجفاف. أظهرت أبحاث شركات الهندسة الوراثية أن المحاصيل المثمرة بالميكروبات المفيدة تسجل محاصيل خضرية أعلى وتظهر مقاومة أفضل للظروف الحارة والجافة. مما يفتح آفاقاً محتملة لزيادة إنتاجية المحاصيل (44). وتحقق ذلك من خلال تسهيل عمليات مثل تثبيت النيتروجين وإذابة العناصر الغذائية الحيوية مثل الفوسفور والبوتاسيوم والزنك (45). يُمكن وجود التعايش البيولوجي للميكوريزا في النباتات من تراكم المعادن الثقيلة، وزيادة مستوى تحمل النباتات لمختلف الضغوط مثل الجفاف والملوثات، وبالإضافة إلى ذلك، يمكن أن تؤثر التأثيرات التفاعلية لمجموعات الميكروبات إيجاباً على امتصاص المعادن النباتية، وإنتاجية المحاصيل، وقدرة النباتات على تحمل ومواجهة القيود البيئية (46، 47). هناك عدد كبير من الكائنات الحية الدقيقة التي تمتلك القدرة على تعزيز تغذية النبات من خلال زيادة توافر المغذيات النباتية في التربة وتسهيل امتصاص هذه المغذيات من قبل النباتات. بالإضافة إلى ذلك، يمكن للميكروبات المفيدة التخفيف بشكل غير مباشر من إجهاد نقص المغذيات النباتية، على سبيل المثال، عن طريق زيادة نشاط الأنزيمات المضادة للأوكسدة النباتية لحماية النباتات من تراكم أنواع الأكسجين التفاعلية (ROS) الناتج عن الإجهاد (48). الآثار السلبية: الإضطرابات البيئية: تتمتع الميكروبات المعدلة وراثياً عند إدخالها في البيئات الطبيعية بالقدرة على التفاعل مع الأنواع الأصلية، مما يُثير منافسة على الموارد أو يحدث تغييرات في البيئة. يمكن أن تؤدي هذه التفاعلات إلى اضطرابات في الشبكات البيئية الموجودة، مما ينتج عنه تغيير في تركيب المجتمعات وانخفاض في التنوع البيولوجي (49). ومن هنا يمكن أن يسبب إدخال الميكروبات المعدلة وراثياً في التربة اضطراباً في المجتمعات الميكروبية القائمة، مما قد يؤدي إلى حدوث تغييرات في وظائف النظام البيئي (50). يمكن أن تكون لهذه الاضطرابات تأثيرات واسعة النطاق على خصوبة التربة وصحة النبات والتوازن بين الميكروبات المفيدة والضارة. قد يؤدي تدفق الجينات والنقل الأفقي (HGT) إلى عواقب غير مقصودة، مثل نقل جينات مقاومة المضادات الحيوية إلى البكتيريا الممرضة أو إنشاء سلالات جديدة مسببة للأمراض. واحدة من أكبر المخاوف المتعلقة بالميكروبات المعدلة وراثياً في التربة هي القدرة على انتقال الجينات الأفقي إلى ميكروبات أخرى. يمكن أن يؤدي ذلك إلى انتشار جينات مقاومة المضادات الحيوية أو سمات ضارة أخرى إلى الميكروبات الممرضة، مما يشكل تهديداً لصحة الإنسان والحيوان (51). مما يبرز الإمكانية الكبيرة للسمية على نطاق صغير ناتجة عن المركبات التي تنتجها هذه الميكروبات. كما يمكن أن تؤثر هذه الميكروبات بشكل غير مباشر على صحة الإنسان من خلال تأثيرها على سلامة الغذاء وجودته وعناصره الغذائية (52).

الميكروبات المعدلة وراثياً للنظم الزراعية إن بكتيريا الازوتوباكتر هي من الأنواع حرة المعيشة والمثبتة للنيتروجين فمن الممكن أن تقدم التعديلات الجينية أداة قوية لتعزيز وظائف بكتيريا الازوتوباكتر، التي تلعب دوراً مهماً في تثبيت النيتروجين وتساهم بشكل كبير في دورة النيتروجين من خلال تحويل النيتروجين الجوي إلى أشكال يمكن للنباتات الاستفادة منها (53). فيمكن للتعديل الجيني تحسين هذه الكائنات لتعزيز سماتها المفيدة وقدرتها على التكيف مع ظروف البيئة المتنوعة. هذا التطور

التكنولوجي ليس فقط يعزز الإنتاجية الزراعية، *vinelandii*. (الشكل 1) Azotobacter species cells, H. 1920, VOL العديد من الجهود البحثية على تعديل الجينات لبكتيريا الآزوتوباكتر لتعزيز قدراتها وخصائصها. تهدف هذه التعديلات إلى زيادة قدرتها على تثبيت النيتروجين، وتحسين استيطان النباتات، وتعزيز سمات النمو، وتحسين فعاليتها الهيكلية. تُعتبر بكتيريا *Azotobacter vinelandii* ذات أهمية خاصة بسبب قدرتها على إنتاج الجينات. تتضمن التنظيم الجيني لإنتاج الجينات في هذه النوع مجموعة من الجينات المسؤولة عن توليد الجينات، وبلمرتها، ونقلها، وتعديلها، وتصديرها (58). حيث يُظهر الحمض النووي لبكتيريا *Azotobacter* العديد من أوجه التشابه في نوع الجين وعوامل التعرف، وذلك ربما بسبب حجم خلاياها الكبير. تقوم إدخال الكائنات الحية الدقيقة المعدلة وراثياً المصممة لمعالجة الجذور بتحفيز تغييرات في البكتيريا المحلية المرتبطة بالجذور مع الحفاظ على التربة المحيطة. وهذا يسلط الضوء على التأثير المحتمل للكائنات الحية الدقيقة المعدلة وراثياً على مجتمعات الكائنات الحية الدقيقة في التربة ويؤكد على ضرورة المزيد من البحوث لفهم الآثار طويلة الأمد لمثل هذه التقنيات المقدمة (59). وبناءً على العديد من الدراسات التجريبية السابقة بالميكروبات المعدلة وراثياً يمكنها البقاء على قيد الحياة في التربة والجذور و بشكل أفضل من مثيلاتها الغير معدلة (60). (الشكل 2) Matthyse AG. Role of bacterial cellulose fibrils in *Agrobacterium tumefaciens* infection. J Bacteriol. 1983; doi:10. 1128/jb. 2.906–915 بكتيريا *Agrobacterium tumefaciens* وهي أداة شائعة للتعديل الوراثي في النباتات والتي ذات صلة بهندسة ميكروبات التربة وتعتبر أحد أدوات الهندسة الوراثية التي ساعدت في إطلاق صناعة التكنولوجيا الحيوية الزراعية حيث يتم استغلال قدرته على نقل الحمض النووي إلى الخلايا النباتية لأغراض الهندسة الوراثية (61). كما تشتهر بأنها من مسببات الأمراض النباتية في التربة؛ بسبب قدرتها الفريدة على نقل الحمض النووي إلى الخلايا النباتية مما يسبب أمراض مثل مرض التاج المراري.