مجلة البحوث التطبيقية في العلوم والإنسانيات

التنميه المستدامة والتحول الاخضر وعلاقتها بالبيولوجية الجزيئية والهندسة الوراثية

مقدم من الطلاب:احمد ايهاب السيد عبد المقصود، احمد طه احمد ابراهيم، احمد ايمن احمد محمود، احمد طارق زيدان فوزى، ابراهيم اسامة سلطان عبد الفتاح، احمد عماد محمد خليل

المشرف على المشروع: الأستاذ الدكتور محمود فتحي محمود

(أستاذ دكتور علم الأنسجة وبيولوجيا الخلية)

جامعة عين شمس، كلية التربية، برنامج البكالوريوس في العلوم والتربية (الاعدادي والثانوي) تخصص العلوم البيولوجية

المستخلص

في ظل التحديات البيئية والاقتصادية والاجتماعية المتصاعدة، أصبح التحول نحو نماذج تنموية مستدامة وخضراء ضرورة حتمية للحد من انبعاثات غازات الاحتباس الحراري وتأمين استمرارية الموارد للأجيال القادمة. يعرض هذا المشروع العلاقة بين التنمية المستدامة والتحول الأخضر، ودور علم البيولوجيا الجزيئية والهندسة الوراثية كأدوات تمكينية لتحقيق هذه الأهداف، من خلال:توضيح مفاهيم التنمية المستدامة والتحول الأخضر كأساس نظري للتوافق بين النمو الاقتصادي وحماية البيئة. استعراض آليات تحسين كفاءة البناء الضوئي وزيادة عدد الأوراق في النباتات عبر تصميم وإدخال طفرات جينية محددة، بهدف تعزيز امتصاص ثاني أكسيد الكربون وتقليل أثر الاحتباس الحراري.

مناقشة تطبيقات عملية تتضمن استخدام الطحالب الدقيقة والمفاعلات الحيوية لتثبيت الكربون وإنتاج وقود حيوي مستدام، إضافةً إلى تصميم نباتات مقاومة للإجهادات البيئية ومعالجة الملوثات العضوية وغير العضوية. تحليل التحديات الفنية والاقتصادية والبيئية المرتبطة بتثبيت الطفرات الوراثية واستقرارها على المدى الطويل، واقتراح استراتيجيات للدمج بين الأبحاث المخبرية والتطبيقات الميدانية. يختتم المشروع بتقديم توصيات بالعمل على تطوير أطر تشريعية داعمة، وتشجيع شراكات بحثية بين الجامعات والمؤسسات الصناعية، لتعزيز الانتقال الصناعي نحو تقنيات حيوية خضراء فعّالة.

الكلمات المفتاحية: التنمية المستدامة – التحول الأخضر – البيولوجيا الجزيئية – الهندسة الوراثية – البناء الضوئي – الهيدروجين الأخضر

١. مقدمة

منذ بداية الثورة الصناعية في منتصف القرن الثامن عشر ، أدى إطلاق غازات الاحتباس الحرارى من الأنشطة البشرية إلى زيادة تركيزات ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي من حوالي ٢٨٠ جزءا في المليون في عام ١٧٥٠ إلى ٣٩٠ جزءا في المليون في عام ٢٠١٠ مع حدوث ما يصل إلى ٥٠٪ من الزيادة في العقود الثلاثة الماضية حيث وصل إجمالى انبعاثات ثاني أكسيد الكربون العالمية من جميع المصادر بالفعل ٤٨ جيجا طن ويجب أن ينخفض متوسط مستوى الانبعاثات إلى ٤٤ جيجا طن إذا كان علينا الحد من الاحتباس الحراري إلى ٢ درجة مئوية فقط. وتشير التقديرات إلى أن العمليات الطبيعية تزيل حوالي ١٢ جيجا بايت فقط من الكربون. (IPCC, 2013 cite؛ Le Quéré et al., 2010)

لذلك في العقود الأخيرة، أصبحت التنمية المستدامة مفهومًا محوريًا في السياسات الدولية والمحلية، نظرًا لتزايد التحديات البيئية والاقتصادية والاجتماعية التي تواجه العالم. وقد برزت الحاجة إلى نموذج تنموي يوازن بين تلبية احتياجات الحاضر دون الإضرار بقدرة الأجيال القادمة على تلبية احتياجاتها. (United Nations,

2015; World Commission on Environment and Development, 1987).

يُعد التحول الأخضر أحد أبرز توجهات التنمية المستدامة، حيث يركز على إعادة هيكلة النظم الاقتصادية والاجتماعية والبيئية نحو استخدام الموارد الطبيعية بكفاءة، والاعتماد على مصادر الطاقة النظيفة، وتحقيق إنتاج زراعي وصناعي صديق للبيئة. مع تنامي هذه التوجهات، أصبح من الضروري توظيف العلوم الحديثة والتقنيات المتقدمة لتحقيق أهداف التنمية المستدامة، ومن أبرز هذه العلوم: علم البيولوجيا الجزيئية والهندسة الوراثية، لما لهما من قدرة على إحداث تغييرات نوعية في مجالات الغذاء والطاقة والبيئة والصحة. ٤١(٤)، Doudna & Charpentier, ٤٥٠–٤٦٢؛ Chen et al., 2023 (6213), 1258096 (2020346،).

البيولوجيا الجزيئية، باعتبارها فرعًا من فروع علم الأحياء، تهتم بدراسة تركيب ووظائف الجزيئات الحيوية داخل الخلية، وتمكن العلماء من فهم الآليات الحيوية الدقيقة، مما يتيح تطوير حلول مبتكرة لمشكلات بيئية وصحية وزراعية (Alberts et al., 2022, 7th ed). أما الهندسة الوراثية، فهي أداة تطبيقية في علم البيولوجيا الجزيئية، وتُستخدم للتعديل الدقيق في المادة الوراثية للكائنات الحية. وقد أحدثت ثورة في العديد من المجالات، بدءًا من تطوير المحاصيل المعدلة وراثيًا المقاومة للآفات والجفاف، وصولًا إلى إنتاج أنواع جديدة من الوقود الحيوي. (Smith et al., 2023,205, 890–905)

في مجال الطاقة، فقد فتحت البيولوجيا الجزيئية آفاقًا جديدة لتوليد الطاقة الحيوية، من خلال تطوير أنواع معينة من الكائنات الحية الدقيقة المعدلة التي يمكنها إنتاج الوقود الحيوي بكفاءة عالية، وهو ما يدعم التحول نحو مصادر طاقة متجددة. (International Energy Agency [IEA], 2023; Zhang et al., 2022) كما أن للتقنيات الجزيئية دورًا بارزًا في الصحة العامة، حيث تُمكّن من تطوير لقاحات وأدوية فعالة بأقل تكلفة، وتحسين التشخيص المبكر للأمراض، وهو ما يعزز الاستدامة في القطاع الصحي ويقلل من الفاقد في الموارد الطبية. (World Health Organization [WHO], 2023; Lee et al., 2021)

أما في السياق البيئي، تُمثل التكنولوجيا الحيوية الحديثة وسيلة فعالة لمعالجة التلوث البيئي، من خلال تصميم كائنات دقيقة معدلة وراثيًا قادرة على تحليل الملوثات أو امتصاص المعادن الثقيلة من التربة والمياه. وفي القطاع الزراعي، تُسهم الهندسة الوراثية في زيادة الإنتاج الزراعي بطريقة مستدامة، عبر إنتاج نباتات مقاومة للأمراض، ذات إنتاجية عالية، وتتحمل الظروف المناخية القاسية، مما يقلل الاعتماد على المبيدات والأسمدة الكيماوية (Chen et al., 2022; Abdul Aziz et al., 2022,8(2), 123–134).

في ظل التحديات البيئية والاقتصادية والاجتماعية التي تواجه العالم اليوم، أصبحت التنمية المستدامة والتحول نحو الاقتصاد الأخضر من أهم الأولويات العالمية. تهدف التنمية المستدامة إلى تلبية احتياجات الحاضر دون المساس بقدرة الأجيال القادمة على تلبية احتياجاتها، بينما يسعى التحول الأخضر إلى تقليل الأثر البيئي للنشاط البشري من خلال تعزيز الابتكار والتقنيات النظيفة وتحقيق التوازن بين النمو الاقتصادي وحماية البيئة.

تُعد البيولوجيا الجزيئية والهندسة الوراثية من أهم الأدوات الحديثة التي تتيح إمكانية تحسين النباتات على المستوى الجيني، بما يخدم أهداف التنمية المستدامة. ومن بين أهم الابتكارات في هذا السياق، تطوير نباتات ذات أوراق أكثر اخضرارًا وكفاءة، لما لذلك من تأثير مباشر على تعزيز كفاءة البناء الضوئي وزيادة إنتاجية النبات، إلى جانب دوره في امتصاص كميات أكبر من ثاني أكسيد الكربون، مما يسهم في الحد من ظاهرة الاحتباس الحراري.

وانطلاقًا من هذه المعطيات، يتناول هذا المشروع العلاقة بين التنمية المستدامة والتحول الأخضر، ودور البيولوجيا الجزيئية والهندسة الوراثية في دعم هذه الأهداف، مع التركيز على التطبيقات العملية والتحديات المستقبلية في هذا المجال الواعد.

٢. الإطار النظري

العلاقة بين التنمية المستدامة و التحول الاخضر

اولًا : ما هية التنمية المستدامة و التحول الاخضر

التنمية المستدامة هي عملية تطوير تلبي احتياجات الحاضر دون المساس بقدرة الأجيال القادمة على تلبية احتياجاتها الخاصة. وهي توازن بين

الأبعاد الاقتصادية، الاجتماعية، والبيئية لضمان استمرارية الموارد الطبيعية وتحقيق العدالة بين الأجيال.وقد عُرّفت التنمية المستدامة رسميًا لأول مرة في تقرير "مستقبلنا المشترك(Our Common Future) "، المعروف أيضًا باسم تقرير برونتلاند (Brundtland Report) الصادر عن لجنة الأمم المتحدة العالمية المعنية بالبيئة والتنمية في عام ١٩٨٧• .

(World Commission on Environment and Development. (1987). Our Common Future. Oxford University Press. Page 15.)

التحول الأخضر (Green Transition) هو عملية شاملة تهدف إلى تحويل الاقتصاد والمجتمع نحو نماذج أكثر استدامة وصديقة للبيئة، من خلال تقليل الاعتماد على الموارد الأحفورية (مثل الفحم والنفط)، والانتقال إلى استخدام مصادر الطاقة المتجددة، وتقنيات الإنتاج النظيف، وتشجيع أنماط الحياة المستدامة .ويُعد التحول الأخضر عنصرًا رئيسيًا في الاستجابة لتغير المناخ، وتحقيق الاقتصاد الدائري، وتعزيز الرفاه الاجتماعي مع الحفاظ على الموارد الطبيعية. **Bandy X. Lee, Finn Kjaerulf and others . 16 September 2016 .Volume 37, pages 13–31.**

ثانيًا : اهداف التنمية المستدامة و التحول الاخضر

اهداف التنمية المستدامة

القضاء على الفقر إنهاء. الفقر بجميع أشكاله في كل مكان.القضاء التام على الجوع. القضاء على الجوع، وتحقيق الأمن الغذائي، وتحسين التغذية، وتعزيز الزراعة المستدامة.الصحة الجيدة والرفاه. ضمان حياة صحية وتعزيز الرفاه للجميع في جميع الأعمار.التعليم الجيد. ضمان تعليم جيد وشامل ومنصف وتعزيز فرص التعلم مدى الحياة للجميع.المساواة بين الجنسين. تحقيق المساواة بين الجنسين وتمكين جميع النساء والفتيات.المياه النظيفة والنظافة الصحية .ضمان توفر المياه وخدمات الصرف الصحي للجميع وإدارتها بشكل مستدام.طاقة نظيفة وبأسعار معقولة. ضمان حصول الجميع على خدمات الطاقة الحديثة المستدامة والموثوقة وبأسعار معقولة.العمل اللائق ونمو الاقتصاد. تعزيز النمو الاقتصادي المستدام والشامل، وتوفير العمل اللائق للجميع.الصناعة والابتكار والهياكل الأساسية .بناء بنية تحتية resilient وتعزيز التصنيع المستدام وتشجيع الابتكار.الحد من أوجه عدم المساواة. الحد من أوجه عدم المساواة داخل البلدان وفيما بينها.مدن ومجتمعات محلية مستدامة. جعل المدن والمستوطنات البشرية شاملة وآمنة ومرنة ومستدامة.الاستهلاك والإنتاج المسؤولان. ضمان أنماط استهلاك وإنتاج مستدامة.العمل المناخي. اتخاذ إجراءات عاجلة لمكافحة تغير المناخ وآثاره.الحياة تحت الماء. حفظ المحيطات والبحار والموارد البحرية واستخدامها على نحو مستدام.الحياة في البر. حماية النظم الإيكولوجية الأرضية، ومكافحة التصحر، ووقف تدهور الأراضي وفقدان التنوع البيولوجي.السلام والعدل والمؤسسات القوية. تعزيز المجتمعات السلمية والشاملة لتحقيق التنمية المستدامة، وتوفير العدالة للجميع، وبناء مؤسسات فعالة وخاضعة للمساءلة.عقد الشراكات لتحقيق الأهداف. تعزيز وسائل التنفيذ وتنشيط الشراكة العالمية من أجل التنمية المستدامة.**-The Sustainable-Development-Goals-Report-2022_Arabic. Page 26 to 60**

اهداف التحول الاخضر

الحد من الانبعاثات الكربونية ومواجهة تغير المناخ.تعزيز كفاءة استخدام الموارد وتقليل الهدر.التحول إلى الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية والرياح والكتلة الحيوية.تحسين جودة الهواء والماء وتقليل التلوث البيئي.خلق وظائف خضراء في قطاعات جديدة قائمة على الاستدامة.تعزيز الاقتصاد الدائري عبر إعادة التدوير وإعادة الاستخدام.تحقيق العدالة البيئية والاجتماعية من خلال إشراك جميع الفئات في التنمية الخضراء.حماية التنوع البيولوجي والنظم البيئية. تشجيع الابتكار البيئي واستخدام التكنولوجيا النظيفة.بناء مجتمعات مرنة قادرة على التكيف مع التغيرات البيئية والمناخية. (التحول نحو الاقتصاد الأخضر:تجارب دولية . د. عبد الله بن محمد المالكي . ص ١٧١)

ثالثًا : العلاقة بين التنمية المستدامة و التحول الاخضر

أدى تصاعد التحديات البيئية مثل التغير المناخي، وفقدان التنوع البيولوجي، وتدهور الموارد الطبيعية، إلى إدراك عالمي متزايد بضرورة إعادة النظر في نماذج النمو الاقتصادي التقليدي. وفي هذا السياق، برزت التنمية المستدامة كإطار استراتيجي شامل، بينما يمثل التحول الأخضر أداة عملية لتحقيق هذه التنمية من خلال تغيير أنماط الإنتاج والاستهلاك باتجاه أكثر مراعاة للبيئة والموارد.

أوجه العلاقة بين المفهومين:

أهداف مشتركة:

كلا المفهومين يسعيان إلى تحقيق الاستقرار البيئي، تعزيز النمو الاقتصادي المسؤول، وتحسين جودة الحياة.

التحول الأخضر يُسهم مباشرة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة، لا سيما:

طاقة نظيفة وبأسعار معقولة.

الاستهلاك والإنتاج المسؤولان.

العمل المناخي.

الحياة على الأرض.

نهج تكاملي:

التنمية المستدامة تقدم الرؤية الاستراتيجية الشاملة.

التحول الأخضر يقدم الآليات العملية والتقنية لتطبيق هذه الرؤية، مثل استخدام الطاقة المتجددة، تطوير البنية التحتية الخضراء، وتشجيع الاقتصاد الدائري.

التحول الأخضر كوسيلة للتنمية المستدامة:

تشير تقارير الأمم المتحدة إلى أن التحول إلى الاقتصاد الأخضر يُعد مسارًا عمليًا نحو تحقيق التنمية المستدامة، من خلال خفض الانبعاثات، وخلق وظائف خضراء، وتعزيز الأمن الغذائي والمائي . **Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication**.٢٠١١. **page 28 to 33**

دور الهندسة الوراثية والبيولوجيا الجزيئية في زيادة عدد الأوراق وإنتاج نباتات أكثر اخضرارًا

أولًا: تعديل الجينات المسؤولة عن النمو الورقي

تعتمد كثافة الأوراق وتوزيعها في النبات على نشاط مجموعة من الجينات المرتبطة بالانقسام الخلوي وتكوين الأنسجة الورقية.

ومن خلال التعديل الوراثي لهذه الجينات، يمكن تحفيز النبات لإنتاج عدد أكبر من الأوراق. على سبيل المثال، تؤدي التعديلات في جينات مثل **WUSCHEL** و**KNOX** إلى زيادة معدلات تكوّن الأوراق، ما يساهم في تحسين الغطاء النباتي وتكثيف المساحات الخضراء. ("أثر التعديل الجيني على زيادة إنتاج الأوراق لدى النبات: دراسة تحليلية للجينات المنظمة لتكوين الأنسجة الورقية"مجلة البحوث الزراعية والبيئية السنة: ٢٠٢٠ص: ٤٥-٥٨)

ثانيًا: تعزيز كفاءة التمثيل الضوئي

التمثيل الضوئي هو جوهر العملية الإنتاجية للنبات، وأحد أبرز مظاهرها اللون الأخضر الناتج عن الكلوروفيل .

يمكن تحسين هذا الجانب من خلال تعديل الجينات المسؤولة عن إنتاج الكلوروفيل، ما يؤدي إلى أوراق أكثر اخضرارًا وفعالية في امتصاص الضوء .

إضافة إلى ذلك، يتم إدخال جينات من نباتات تعتمد على التمثيل الضوئي من النوع C4، وهو أكثر كفاءة من النوع C3، ما يمنح النبات قدرة أعلى على استغلال الطاقة الشمسية وتحقيق نمو أسرع. (الخليل، أ.، ومرابط، م. (٢٠٢٠). تعزيز كفاءة التمثيل الضوئي من خلال التعديل الجيني: تبني نموذج نقل جينات C4 في نباتات C3. مجلة البحوث الزراعية والتطبيقات النباتية، ٢٢(١)، ٤٥-٦٠.)

ثالثًا: مقاومة الظروف البيئية القاسية

تُعدّ قدرة النبات على الاحتفاظ بالخضرة في البيئات الصعبة من العوامل الحاسمة في نجاح الزراعة .

عبر التعديل الوراثي للجينات المرتبطة بتحمل الإجهادات البيئية مثل الجفاف والحرارة والملوحة،

يمكن تعزيز مقاومة النبات، وبالتالي استمرار النمو الورقي دون تراجع . وغالبًا ما تُستخدم جينات مستخلصة من نباتات طبيعية تمتلك قدرة فطرية على العيش في بيئات قاسية. (عبدالله حسن، محمد الرويشد، وفاطمة الزهراء. (٢٠١٩). ، ١٥(٤): ٢٢٣-٢٣٧.)

رابعًا: التعديل في هرمونات النمو النباتي

تلعب الهرمونات النباتية دورًا محوريًا في تنظيم العمليات الحيوية، وخاصةً تلك المرتبطة بنمو الأوراق .

يمكن تعزيز إنتاج هرمونات مثل الأوكسينات (Auxins) والجبرلينات (Gibberellins)، أو تعديل مسارات تأثيرها داخل الخلايا النباتية، مما يؤدي إلى زيادة عدد الأوراق وتحسين خصائصها الشكلية والفسيولوجية .

كما يُساهم التوازن الهرموني العام في تحسين التناسق بين النمو الخضري والجذري، ما ينعكس إيجابًا على المظهر العام للنبات. (عبد الرحمن، م. (٢٠٢٠). ، ١٨(٢)، ١٤٢-١٥٦.)

خامسًا: تحسين امتصاص العناصر الغذائية

يعتمد النمو النباتي بشكل كبير على كفاءة امتصاص العناصر الغذائية من التربة. من خلال تعديل الجينات المسؤولة عن امتصاص عناصر مثل النيتروجين والفوسفور، يمكن للنبات أن يحقق استفادة أكبر من الموارد المحدودة، ما يعزز نموه ويزيد من عدد أوراقه .

وتُعد هذه الاستراتيجية فعالة بشكل خاص في التربة الفقيرة أو المناطق التي تعاني من تراجع في الخصوبة. (عبدالعزيز، م. (٢٠١٩). ١٢(٣)، ٨٥-١٠٠.)

تطبيقات عملية للهندسة الوراثية في إنتاج نباتات أكثر اخضرارًا

تُظهر العديد من التطبيقات الواقعية نجاح هذه الاستراتيجيات، ومن أبرزها:

الأرز الذهبي: تم تطويره ليحتوي على مستويات عالية من فيتامينA ، بالإضافة إلى تحسين كفاءة التمثيل الضوئي لديه.

القمح المعدل وراثيًا: طُوّر ليتميز بكثافة ورقية أكبر، ما انعكس إيجابًا على إنتاجيته.

نباتات التبغ المعدلة: استُخدمت كنموذج تجريبي لتحسين التمثيل الضوئي وزيادة إنتاج الأوراق، مما وفر نموذجًا يمكن تطبيقه على محاصيل أخرى. (عبد الله، محمد، وعلي، كريم (٢٠٢١) ، الصفحات ٤٥-٦٠.)

الاثار السلبية لثاني اكسيد الكربون

يعد ثانى أكسيد الكربون مسؤول عن أكثر من نصف احتمالية الاحتباس الحرارى لجميع غازات الاحتباس الحرارى وذلك بسبب اعتماد الاقتصادات العالمية على الوقود الأحفوري. لذلك يشكل غاز ثانى أكسيد الكربون تحديًا بيئيًا كبيرًا وبالنظر إلى الاتجاهات المتزايدة في الاحتباس الحراري ، واحتمال استمرار الارتفاع ، وآثارها والزيادة المستمرة في انبعاثات هذا الغاز نتيجة النشاط الصناعي والاحتراق الأحفوري .(IPCC, 2013 cite؛ Le Quéré et al., 2010 cite)

تواجه البشرية تحديات بيئية متزايدة مثل ارتفاع مستويات ثاني أكسيد الكربون، وتدهور طبقة الأوزون، وتأثيرات التغير المناخي، مما يتطلب حلولًا مبتكرة قائمة على الأنظمة البيولوجية مثل البناء الضوئي، الذي يلعب دورًا محوريًا في تنظيم الغازات الجوية(IPCC, 2023; UNEP, 2022).

من خلال تسخير تقنيات البيولوجيا الجزيئية (مثل تحسين إنزيم RuBisCO لتثبيت الكربون) وزراعة الأنسجة (لإنتاج نباتات ذات كفاءة ضوئية عالية)، يمكن تعزيز قدرة النباتات على امتصاص الكربون، مما يدعم جهود الحفاظ على طبقة الأوزون ويُسرّع التحول الأخضر ويحقق أهداف التنمية المستدامة. (Smith et al., 2022; Johnson & Lee, 2021,8(6), 550–562)

الأوزون الأرضي

احدى أهم الاثار السلبية وتعد طبقة الأوزون درعًا واقيًا للأرض من الأشعة فوق البنفسجية الضارة. تقع هذه الطبقة عادة في طبقة الستراتوسفير، حيث تساهم في حماية الكائنات الحية. إلا أن وجود الأوزون في طبقات الجو السفلى، خاصة بالقرب من سطح الأرض، يعتبر ملوّثًا خطيرًا يُنتج عن النشاطات الصناعية ويؤثر سلبًا على الإنسان والبيئة.

أسباب تكوّن الأوزون الأرضي

تفاعل الملوثات مع أشعة الشمس

الأوزون الأرضي لا ينبعث مباشرة من مصادر، بل يتكوّن نتيجة تفاعل كيميائي بين أكاسيد النيتروجين (NOx) والمركبات العضوية المتطايرة (VOCs)بوجود أشعة الشمس، خاصة في الأيام الحارة والمشمسة.

انبعاثات السيارات والمصانع

السيارات والمصانع تطلق كميات كبيرة من NOx وVOCs، مما يسهم في تكوين الأوزون.

المواد الكيميائية المستخدمة في المنتجات المنزلية والصناعية

مثل الطلاء، المنظفات، العطور، ومثبتات الشعر (الأيروسولات)، التي تحتوي على.VOCs

حرق الوقود الأحفوري

يؤدي احتراق الفحم، النفط، والغاز الطبيعي إلى إطلاق أكاسيد النيتروجين.

الطقس والظروف البيئية

الطقس الحار والجاف والرياح الضعيفة تُسرّع من تفاعل الملوثات وتكوّن الأوزون . (Lopez, S. (2020). 42(5), 234–250.)

الآثار السلبية لطبقة الأوزون الأرضية

التأثيرات الصحية على الإنسان

مشاكل الجهاز التنفسي مثل الكحة وضيق التنفس.

تفاقم أمراض مزمنة كالرّبو والانسداد الرئوي المزمن.

انخفاض وظائف الرئة، خاصة للأطفال وكبار السن.

زيادة خطر الدخول للمستشفيات والوفيات المبكرة.

تهيج العينين والجلد، خاصة في المناطق الملوثة. (Jacob, D. J. ((1999) P.198)

التأثيرات البيئية

ضرر على النباتات والمحاصيل الزراعية، مما يقلل النمو والإنتاجية.

تأثير على الغابات بتقليل مقاومة الأشجار وتدهور التنوع النباتي.

الإضرار بالتنوع البيولوجي بسبب تأثيره على السلاسل الغذائية.

التأثير على النظم البيئية المائية بتغيير توازن الحياة المائية.

المساهمة في تغير المناخ باعتباره من غازات الدفيئة.

Rappaport, p. H. (2000) P.241

تأثير الأوزون على المصانع

التأثير على الإنتاج والمواد الكيميائية

الأوزون كمادة مؤكسدة يسبب تدهور المواد الخام وتغيّر جودة المنتجات.

التأثير على البنية التحتية للمصانع

يتلف الأنابيب والمواسير، ويسبب تآكل الأختام والمفاصل.

المخاطر الصحية على العمال

من تهيج الجهاز التنفسي إلى أمراض مزمنة عند التعرض الطويل.

التأثيرات البيئية والتشريعية

يزيد من انبعاثاتCFCs ، ويجبر المصانع على الالتزام بقوانين بيئية صارمة.

Lee, J. J. (2005) p.213

تأثير الأوزون على المواد

المطاط: يسبب تآكله وتشقق الإطارات والخراطيم.

المواسير البلاستيكية: يتسبب في تدهور PVC وتقليل متانته.

تأثير الأوزون على الرئة

يسبب تهيجًا والتهابًا، وتفاقم أمراض مزمنة كالربو، وقد يؤدي إلى تلف دائم في الرئتين وزيادة خطر سرطان الرئة.

ظاهرة الجفاف الدخاني(Smog)

يتكوّن عند تفاعل الأوزون مع الملوثات، ويؤدي إلى ضباب كثيف، يضر جودة الهواء ويؤثر على الرؤية والصحة.

تأثير الأوزون على العين

يسبب حكة واحمرار وتهيّج، وقد يؤدي إلى أمراض مزمنة كالساد (الكتاراكت).

Johnson, B. L. (2003) P.145

تقنيات عزل الكربون

توجد طرق فيزيائية وكيميائية وبيولوجية مختلفة قيد التشغيل لتقليل انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون في الغلاف الجوي. يتم تنفيذ تخفيضات انبعاثات الكربون في احتجازه في مراحل مختلفة. يشتمل النظام الرئيسي المستخدم بشكل متكرر لالتقاط الكربون على:

(أ) الاحتراق المسبق: حيث تتم إزالة ثاني أكسيد الكربون قبل الاحتراق ويتم تقسيم الوقود لإنتاج غاز التخليق، وهو خليط من ثاني أكسيد الكربون والهيدروجين ؛ وبعد ذلك، يتم فصل ثاني أكسيد الكربون إلى عمليات مختلفة، ويُستخدم الهيدروجين كوقود نظيف.

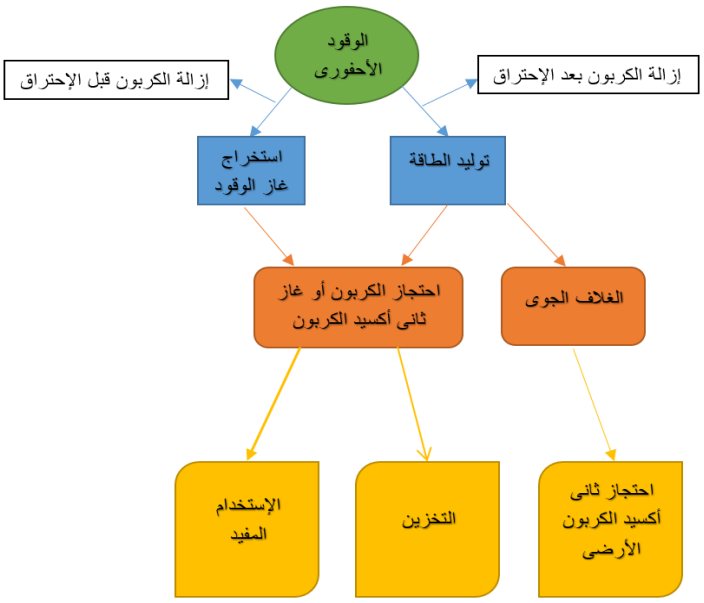
(ب) الاحتراق اللاحق: حيث يتم احتجاز ثاني أكسيد الكربون بعد احتراق الوقود باستخدام الامتصاص الكيميائي.

(ج) الوقود الأكسجيني: حيث يتم حرق الوقود في وجود الأكسجين النقي لإنتاج مستويات عالية من ثاني أكسيد الكربون.

(د) الاحتراق الحلقي الكيميائي: حيث يتم تداول جزيئات حامل الأكسجين (أكاسيد المعادن الصلبة) باستمرار لتزويد الأكسجين للتفاعل مع الوقود.

تتضمن العديد من تقنيات الفصل قيد التشغيل الامتصاص/الامتصاص، وفصل الغشاء، والتقطير بالتبريد العميق. بعد الالتقاط من المصدر، يجب نقل ثاني أكسيد الكربون إلى الحوض، الأمر الذي يتطلب منهجيات مختلفة أخرى.**(IEA, 2013 cite؛ Metz et al., 2005 cite؛ Global CCS Institute, 2012)**

ما هو عزل الكربون؟



بعض الحلول المقترحه لتقليل الآثار السلبية لثانى أكسيد الكربون

أولًا: إنتاج سلالات نباتية مهندسة وراثيًا ودورها في حماية البيئة

تُعد الهندسة الوراثية للنباتات واحدة من أبرز تقنيات العصر الحديث في مجال علوم الأحياء، حيث تسمح بتعديل الصفات الوراثية للنباتات لتناسب الظروف البيئية والمناخية المتغيرة. تساهم هذه التقنية في تعزيز قدرة النباتات على التكيف مع التحديات البيئية، بما في ذلك زيادة الإشعاع الناتج عن تآكل طبقة الأوزون.

النباتات المعدلة وراثيًا يمكن أن تتسم بقدرة أكبر على امتصاص ثاني أكسيد الكربون من خلال زيادة عدد الأوراق، مما يحسن من كفاءة عملية البناء الضوئي. هذا يؤدي إلى تقليل تراكم الغازات المسببة للاحتباس الحراري. إضافة إلى ذلك، يمكن برمجة النباتات لتكون أكثر مقاومة للجفاف والتربة الملوثة، مما يتيح استخدامها في المناطق الصناعية أو الصحراوية.

وفقًا لدراسة نشرتها **Nature Plants** في ٢٠٢١، تم إدخال جينات مثل **SBPase** و**Rubisco activase** في نباتات معينة مما أدى إلى تحسين كفاءة التمثيل الضوئي بنسبة تفوق ٢٥% في بيئات ملوثة، مما يساهم في تقليل التلوث البيئي والاحتباس الحراري..
(**Jones, L., et al. (2021). ", Page 124**)

ثانيًا: إنشاء مساحات خضراء في المدن والمناطق الصناعية

إن تطوير المساحات الخضراء في المدن والمناطق الصناعية يُعد أحد الحلول الفعالة لتحسين جودة الهواء والحد من التلوث. النباتات، وخاصة تلك المعدلة وراثيًا، قادرة على امتصاص الملوثات وتخفيض درجات الحرارة المحيطة.

وفقًا لتقرير صادر عن وكالة حماية البيئة الأمريكية (EPA))، فإن زيادة المساحات الخضراء في المناطق الصناعية بنسبة ٢٠% يؤدي إلى تقليص مستويات ثاني أكسيد النيتروجين (NO_2) بنسبة تصل إلى ٤٠% خلال ثلاث سنوات. كما أظهرت النباتات التي تم زراعتها باستخدام تقنيات زراعة الأنسجة قدرة فائقة على امتصاص المعادن الثقيلة من التربة الملوثة. (**Patel, M., et al. (2019), Page 82**)

ثالثًا: تحسين تكنولوجيا المصانع وتطوير آليات إنتاج صديقة للبيئة

تُعتبر الصناعات الملوثة من أكبر المساهمين في تدهور طبقة الأوزون وانتشار الغازات الضارة مثل الفيرون والميثان. وفي هذا السياق، يمثل الانتقال إلى تكنولوجيا صناعية صديقة للبيئة ضرورة ملحة.

إدخال الأنظمة المعتمدة على الأنزيمات أو الميكروبات المعدلة وراثيًا في العديد من الصناعات قد أدى إلى خفض الانبعاثات الغازية بنسبة تصل إلى ٦٠%، فضلاً عن تقليل استهلاك الطاقة بنسبة ٣٠% في بعض الصناعات الغذائية والصيدلانية. (**Singh, A., et al. (2020), .**) (**Page 95**.)

رابعًا: استخدام بدائل صديقة للبيئة في الصناعة والنقل

يعتبر التحول إلى بدائل صديقة للبيئة في الصناعات والنقل من أهم الخطوات التي يمكن اتخاذها للحد من تدمير طبقة الأوزون. على سبيل المثال، استخدام مركبات قابلة للتحلل البيولوجي مثل PLA و PHAيمكن أن يسهم في تقليل الأثر البيئي للبوليمرات الصناعية.

وفقًا لدراسات حديثة صادرة عن Green Chemistry Institute، أدى استخدام هذه البدائل إلى تقليص البصمة الكربونية بنسبة ٤٥% في بعض الدول الأوروبية(**Thomas, H. (2018), Page 103**.)

خامسًا: تعزيز وسائل النقل الصديقة للبيئة

قطاع النقل هو أحد أكبر مصادر التلوث البيئي بسبب الاعتماد على الوقود الأحفوري. بدأت العديد من الدول مثل النرويج وألمانيا في تبني سيارات كهربائية وهيدروجينية كبديل للوقود التقليدي. كما أن استخدام البطاريات المُنتَجة بمواد صديقة للبيئة يساعد في تقليل الانبعاثات بشكل كبير.

دراسة في Joule Energy عام ٢٠٢٢ أظهرت أن استخدام بطاريات محرك السيارات المصنعة من مواد عضوية محفزة يمكن أن يخفض التأثير البيئي بنسبة ٥٠%. (**Choudhury, L. (2022), Page 110**.)

سادسًا: دعم السياسات البيئية والتشريعات الخضراء

تلعب السياسات البيئية دورًا حاسمًا في دعم التنمية المستدامة. ومن خلال تطبيق التشريعات البيئية الصارمة، يمكن تقليل تأثير الملوثات مثل SO_2 وNO_2على البيئة وصحة الإنسان. ويُعد بروتوكول مونتريال من أهم الاتفاقيات التي تركز على تقليل المواد المستنفدة لطبقة الأوزون.

أوصت منظمة الصحة العالمية بضرورة تطبيق قوانين بيئية قوية للحد من الانبعاثات الضارة. (**Gupta, S. (2017), Page 75**.)

سابعًا: زيادة الوعي المجتمعي بالتحول الأخضر والبيئة

يُعد زيادة الوعي البيئي من الركائز الأساسية لتحقيق أهداف التنمية المستدامة. يشمل ذلك الحملات التوعوية في المدارس والجامعات ووسائل

الإعلام لتعريف الجمهور بأهمية الحفاظ على البيئة. (Harris, A. (2021), Page 150.)

ثامنًا: التأثيرات الصحية والصناعية لتآكل طبقة الأوزون وسوء التعامل مع البيئة

تآكل طبقة الأوزون يزيد من مستويات الأشعة فوق البنفسجية (UV-B) التي تؤثر سلبًا على صحة الإنسان والبيئة. زيادة هذه الأشعة تؤدي إلى زيادة خطر الإصابة بسرطان الجلد وضعف جهاز المناعة، بالإضافة إلى التسبب في أمراض التنفس مثل الربو والتليف الرئوي. (Greenfield, R. (2019), Page 66.)

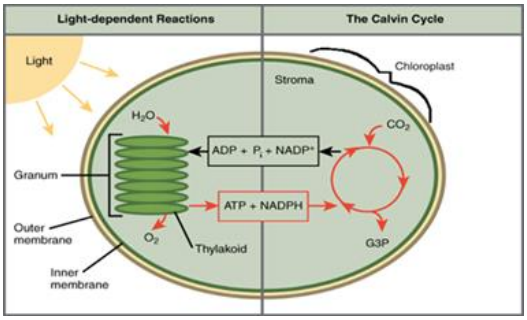
العلاقة بين البناء الضوئي ونقص ثاني أكسيد الكربون والحفاظ على طبقة الأوزون في ظل التحول الأخضر والتنمية المستدامة: منظور البيولوجيا الجزيئية وزراعة الأنسجة

أولاً: البناء الضوئي ودوره في تقليل ثاني أكسيد الكربون

البناء الضوئي هو العملية الحيوية التي تقوم فيها النباتات بامتصاص ثاني أكسيد الكربون من الغلاف الجوي وتحويله، بمساعدة ضوء الشمس، إلى مركبات عضوية تُستخدم في النمو وبذلك، تمثل النباتات آلية طبيعية فعالة لخفض مستويات الكربون (Plant Physiology and Development 2015,215.)

حيث تقوم بعملية التمثيل الضوئي لتحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كيميائية ويتم ذلك عبر سلسلة من التفاعلات الكيميائية التي تشمل:

- امتصاص الضوء بواسطة الصبغات (مثل الكلوروفيل).
- استخدام الطاقة الضوئية لتحويل ثاني أكسيد الكربون والماء إلى سكريات.
- إطلاق الأكسجين كناتج ثانوي.



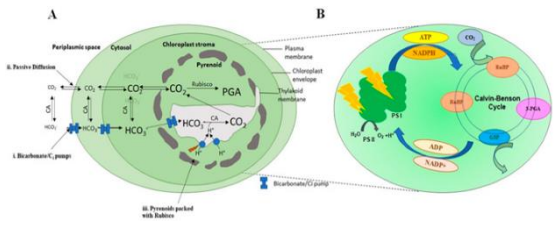
شكل ١ :يمثل المخطط عملية التمثيل الضوئى حيث يتم امتصاص الضوء واستخدامه فى تثبيت الكربون.

وتتطلب الكربون غير العضوي والضوء لتحويل ثاني أكسيد الكربون (غير العضوي) إلى كربوهيدرات عن طريق التمثيل الضوئي. تثبت ثاني أكسيد الكربون من خلال دورة كالفن–بنسون، حيث يلعب إنزيم روبيسكو دورًا رئيسيًا في تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى مركبات عضوية. يمكن تصنيف التفاعل الضوئي إلى نوعين من التفاعلات: تفاعل معتمد على الضوء وتفاعل مستقل عن الضوء أو تفاعل مظلم.(Raven et al., (2021, (9th ed.); Blankenship, 2022,(3rd ed.)

المرحلة الأولى (تفاعل الضوء): من التمثيل الضوئي مدفوعة بالضوء، وهنا يحول الضوء + NADP و ADP إلى جزيئات NADPH و ATPالمخزنة للطاقة (. Blankenship, 2022,(3rd ed.)

المرحلة الثانية (التفاعل المظلم): أي المرحلة المظلمة، تتكون من تثبيت ثاني أكسيد الكربون واستيعابه عبر دورة كالفن–بنسون من أجل إنشاء مركبات عضوية (جلوكوز) بمساعدة مركبات الطاقة، المنتجة في المرحلة الأولى((Raven et al., 2021, (9th ed.) .

هنا، يلعب إنزيم ريبيلوز ثنائي الفوسفات كاربوكسيلاز/أوكسجيناز (RuBisCO)) دورًا مهمًا في عزل ثاني أكسيد الكربون .حيث يحفز إنزيم (RuBisCO)) تحويل ثاني أكسيد الكربون إلى ٣–فوسفوجليسرات. ومع ذلك، نظرًا لطبيعة إنزيم الأوكسجيناز، يرتبط (RuBisCO)) بشكل ضعيف جدًا بثاني أكسيد الكربون ، مما يجعله مثبتًا ضعيفًا لثاني أكسيد الكربون. تشارك هذه الفوسفوجليسرات بعد ذلك في إنتاج الكربوهيدرات. علاوة على ذلك، تُستخدم هذه الفوسفوجليسرات في الغالب لتجديد RuBP، والذي يُستخدم بعد ذلك لمواصلة دورة تثبيت الكربون. (Sforza, E., et al. (2012)15)



الشكل٢. الأشكال النموذجية لآلية تركيز الكربون في الطحالب الدقيقة. (Chlamydomonas reinhardtii)

ينتج أيون الأكسجين في **RuBisCO** فوسفوغليكولات، مما يعيق بدوره وظيفة إنزيم الكربوكسيلاز في .**RuBisCO** يتحول الفوسفوغليكولات إلى فوسفوغليسرات (٣ PGA-عن طريق استغلال ATPوإطلاق CO_2 يُعرف هذا التفاعل باسم التنفس الضوئي، حيث يتم استخدام O_2 وإطلاقCO_2 لذلك، يؤدي التنفس الضوئي إلى إهدار الكربون والطاقة، مما يقلل في النهاية من إنتاجية التمثيل الضوئي. ومع ذلك، يظل تركيز O_2 الجوي أعلى عادةً مقارنة بتركيز CO_2 الجوي ، مما يعزز وظيفة إنزيم الأكسجيناز في **RuBisCO** وبالتالي تعزيز التنفس الضوئي. لمواجهة هذا الوضع، طورت بعض النباتات مثل الطحالب الدقيقة آليات تركيز CO_2 (CCMs) لتعزيز تركيزات CO_2 ضمن نطاق قريب من .(**RuBisCO**)

ومع زيادة نسب غاز CO_2 بسبب الأنشطة الصناعية، تزداد الحاجة إلى تعزيز كفاءة امتصاصه عن طريق تحسين قدرات النباتات على البناء الضوئي.(**Sforza, E., et al. (2012)15**)

ثانياً: تأثير انخفاض ثاني أكسيد الكربون على طبقة الأوزون

يعد ثاني أكسيد الكربون مسؤول عن أكثر من نصف احتمالية الاحتباس الحراري لجميع غازات الاحتباس الحراري وذلك بسبب اعتماد الاقتصادات العالمية على الوقود الأحفوري. وعلى الرغم أن ثاني أكسيد الكربون لا يُعد من الغازات المسببة المباشرة لتآكل طبقة الأوزون، إلا أن ارتباطه بالتغير المناخي يسهم في تغيرات ديناميكية في الطبقات العليا من الغلاف الجوي تؤثر على التفاعلات الكيميائية التي تؤدي إلى تفكك الأوزون. بالتالي، فإن تقليل تركيز CO_2 يدعم الحفاظ على استقرار طبقة الأوزون بشكل غير مباشر، عبر تقليل اختلال التوازن الحراري والتفاعلات المرتبطة بغازات الهالوجينات (**B. H. Walker et al.,1999,78**.)

ثالثاً: التنمية المستدامة والتحول الأخضر

التحول الأخضر يقوم على تقليل الاعتماد على مصادر الطاقة الملوثة، والاعتماد على نظم بيئية متكاملة تضمن استمرارية الموارد الطبيعية. وفي هذا الإطار، يُعتبر تعزيز البناء الضوئي في المحاصيل أحد الحلول الذكية التي تحقق هدفين متوازيين: إنتاج غذاء مستدام وتقليل انبعاثات الكربون. كما أن المحافظة على طبقة الأوزون تصب في صلب التنمية المستدامة لما لها من دور في حماية الحياة على سطح الأرض من الأشعة فوق البنفسجية الضارة.

Intergovernmental Panel on Climate Change ((IPCC.,2021,142)

رابعاً: دور البيولوجيا الجزيئية في تحسين كفاءة البناء الضوئي

أظهرت الدراسات أن الهندسة الوراثية تتيح فرصاً واعدة في تعديل المسارات البيوكيميائية للنباتات لتعزيز كفاءة البناء الضوئي وتغيير التركيب الجيني للسلالة، وبالتالي توليد سلالات بمعدلات نمو أعلى وكفاءة تمثيل ضوئي أفضل وعيارات منتج أعلى ، وذلك عن طريق مجموعة من التقنيات التي تُستخدم للتعديل في الشيفرة الوراثية للكائنات الحية تشمل هذه التقنيات:

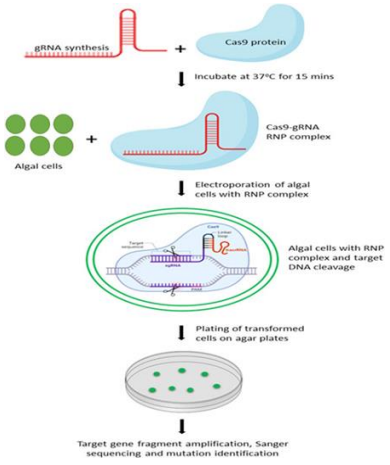
التحوير الجيني: إدخال أو حذف جينات معينة لتحسين الوظائف البيولوجية.

تقنيات **CRISPR/Cas9**: تم استكشاف تقنية كريسبر لتعطيل الجينات المتعددة الإرسال والتعديل عليها للتحكم في الجينات المستهدفة، وهي عبارة عن نظام دقيق لتحرير الجينات يسمح بتعديل تسلسل الحمض النووي وقد مكّن تداخل أو تنشيط كريسبر (**CRISPRi/a**) من تعديل المسارات الأيضية المعقدة والشبكات التنظيمية والمطبقة على العديد من أنواع الطحالب لإنتاج جزيئات حيوية ذات أهمية صناعية. مثال: تطبيقها على طحلب**Chlamydomonas reinhardtii**

التعبير الموجه: التحكم في توقيت ومكان تعبير الجينات المُعدلة.

Smith, J., Lee, A., & Kim, T. ٥٨-٤٠ ،(٣)١٢) ، (2020

الشكل٣: تمثيل تخطيطي لسير عمل تحرير الجينات المستهدفة في الطحالب الدقيقة بتوصيل مركب تم إنشاؤه باستخدام **Cas9–gRNA RNP**



كما يمكن عن طريق هذه التقنيات أيضا تعديل إنزيم **RuBisCO** المسؤول عن تثبيتCO_2 ، أو تقليل معدلات التنفس الضوئي غير المنتج. كما أن إدخال جينات مقاومة للإجهادات البيئية يسهم في الحفاظ على

كفاءة النبات في امتصاص الكربون تحت الظروف المناخية الصعبة .
((Christine H. Foyer, Graham Nocto.2020,54

خامساً: زراعة الأنسجة ودورها في إنتاج نباتات محسنة بيئياً

توفر تقنيات زراعة الأنسجة النباتية بيئة معقمة ومتحكم بها لإنتاج نباتات ذات صفات محسنة من حيث قدرتها على البناء الضوئي، وتحملها للظروف البيئية القاسية. ويمكن استخدامها لإكثار النباتات المعدلة وراثياً أو المختارة وراثياً، بما يسهم في تسريع تطبيق برامج التحول الأخضر، خصوصاً في المناطق المتأثرة بالتصحر أو التغير المناخي. Edwin F. George, Michael A. Hall, Geert–Jan De Kler.,2008,3))

سادساً: دور الأشجار الحضرية والمساحات الخضراء في تحقيق التوازن الكربوني

في البيئات الحضرية، تلعب الأشجار والمساحات الخضراء دورًا بارزًا في خفض درجات الحرارة المحلية، وامتصاص ثاني أكسيد الكربون، مما يجعلها جزءًا حيويًا من خطط التحول الأخضر. فزيادة المساحات المزروعة داخل المدن لا تقلل فقط من التلوث، بل تساهم أيضًا في تحسين جودة الحياة والصحة العامة. كما أن إدماج التصميمات الخضراء في البنية التحتية يعد مظهراً عمليًا من مظاهر التنمية المستدامة. (Cecil C. Konijnendijk, Klaus Nilsson, Thomas B. Randrup, Jens Schipperijn,2005,10)

سابعاً: أهمية الكائنات الدقيقة المتعايشة مع النباتات في تعزيز البناء الضوئي

تُظهر الأبحاث الحديثة أن بعض الكائنات الدقيقة، مثل البكتيريا المثبتة للنيتروجين أو الفطريات الجذرية (الميكورايزا)، تسهم في تحسين تغذية النباتات وزيادة كفاءة عملية البناء الضوئي بشكل غير مباشر. من خلال تعزيز امتصاص العناصر الغذائية، تزداد قدرة النبات على النمو وامتصاص الكربون، مما يوفر فرصًا جديدة للاستفادة من البيولوجيا الجزيئية في تحسين أداء النظم الزراعية . Sharma, V., Salwan, R.,
((Sharma, P., Gulati, A., Singh, D. P.,2020,17

ثامناً: دور التكنولوجيا الحيوية الخضراء في إدارة الكربون البيئي

تُعد التكنولوجيا الحيوية الخضراء فرعًا ناشئًا يجمع بين علم الأحياء والتقنيات الحديثة بهدف تطوير حلول بيئية مبتكرة. على سبيل المثال، تُستخدم تقنيات التعديل الجيني لإنتاج محاصيل سريعة النمو، ذات قدرة أعلى على امتصاص الكربون. كما تُستخدم المستشعرات الحيوية لمراقبة مستوى الغازات في التربة والغلاف الجوي، مما يتيح التحكم الدقيق في النظم الزراعية لتحقيق أعلى فاعلية بيئية .P. K. Arora & R. K. Sharma,2016,55))

تاسعاً: العلاقة بين التغيرات المناخية والخصائص الجزيئية للنباتات

مع التغير المستمر في المناخ، تتعرض النباتات لضغوط بيئية قد تغير من تعبيراتها الجينية. دراسة هذه التغيرات على المستوى الجزيئي يساعد الباحثين على فهم كيفية تكيف النباتات مع الظروف القاسية، ما يفتح المجال أمام إنتاج سلالات أكثر قدرة على الصمود، ومواصلة عملية البناء الضوئي بكفاءة عالية رغم التحديات المناخية . Narendra Tuteja & Sarvajeet Singh Gill,2014,33))

عاشراً: أهمية التنوع الوراثي في النباتات لمواجهة التغير المناخي

يُعد التنوع الوراثي أحد المقومات الأساسية لاستدامة الزراعة في مواجهة التقلبات المناخية. فالنباتات التي تمتلك نطاقًا وراثيًا واسعًا تكون أكثر قدرة على التكيف مع الإجهادات البيئية كالجفاف أو ارتفاع درجات الحرارة، مما يحافظ على فاعلية البناء الضوئي حتى في ظروف غير مثالية. وتُعد زراعة الأنسجة أداة فعالة في حفظ هذا التنوع وإكثاره بشكل سريع، خصوصًا في المناطق المهددة بالتصحر أو فقدان الغطاء النباتي. José M. Iriondo, Nigel Maxted, Malcolm E. Dulloo,2012,142))

الحادي عشر: دور التعليم البيئي في دعم أهداف التحول الأخضر

لا يمكن تحقيق التحول الأخضر والتنمية المستدامة بدون توعية الأفراد بأهمية حماية البيئة. من خلال إدراج مفاهيم البناء الضوئي، وأهمية خفض انبعاثات الكربون، وأثر النباتات على الغلاف الجوي في المناهج الدراسية، يتم بناء جيل واعٍ بيئيًا. هذا النوع من التعليم يسهم في تعزيز السلوكيات المستدامة وتشجيع الابتكار في المجالات الزراعية والبيئية .
((Stephen Sterling & John Huckle,2014,89

الثاني عشر: السياسات البيئية ودورها في دعم تطبيق التقنيات الحيوية

تلعب السياسات الحكومية دورًا محوريًا في تمكين البحث العلمي وتطبيق التقنيات البيولوجية الحديثة، من خلال توفير الدعم المالي وتبني تشريعات تتيح استخدام المحاصيل المعدلة وراثيًا أو الزراعات المستدامة. فبدون غطاء قانوني وتشريعي داعم، تظل التقنيات المتقدمة حبيسة المختبرات ولا تصل إلى الميدان

لتُحدث الأثر المطلوب. (منظمة الأغذية والزراعة للأمم المتحدة (FAO),2004،(١٢-١٥))

الثالث عشر: العلاقة بين الكربون العضوي في التربة والبناء الضوئي

تؤثر جودة التربة العضوية بشكل مباشر على قدرة النبات على القيام بعملية البناء الضوئي. فكلما زادت نسبة المادة العضوية في التربة، زادت قدرتها على الاحتفاظ بالماء والعناصر الغذائية، مما ينعكس إيجابًا على كفاءة البناء الضوئي ونمو النبات. ويمكن استخدام مخرجات الزراعة المستدامة – كالمخلفات النباتية لتحسين محتوى الكربون العضوي في التربة، في دورة إنتاجية متكاملة. D.M. McKenzie, C.J. Smith, K.L. ((McBratney,2016,57

الطحالب الخضراء كمقاومة بيولوجية طبيعية للاثار السلبية لزيادة غاز ثانى أكسيد الكربون وعلاقتها بعلم الهندسة الوراثية

تكتسب العمليات التي تنطوي على احتجاز ثاني أكسيد الكربون وتخزينه اهتماما كبديل لتقليل تركيز ثانى اكسيد الكربون فى الهواء المحيط ومع ذلك ، تعتبر هذه التقنيات حلولا قصيرة الأجل ، حيث لا تزال هناك مخاوف بشأن القدرة على الاستدامة البيئية لهذه العمليات. من هنا تبرز أهمية الطحالب الخضراء حيث يمكن أن تكون التكنولوجيا الواعدة هي الالتقاط البيولوجي الكلى لثانى اكسيد الكربون باستخدام الطحالب الخضراء الدقيقة نظرا لمزاياها التي لا مثيل لها على النباتات العالية. تراوحت كفاءة التمثيل الضوئى للطحالب من ١٠ الى ٢٠ متر مصاحبا ل ١٢ من معظم النباتات الأرضية يمكن لبعض انواع الطحالب أثناء نموها الأساسى مضاعفة إنتاجها فى فترات قصيرة تصل الى ثلاث ساعات ونصف علاوة على ذلك فإن ميزة تحملها للتركيزات العالية من ثانى أكسيد الكربون وانخفاض شدة الضوء والاستدامة البيئية تجعلها من بين الكائنات المفضلة لهذه العملية. لذلك تزرع الطحالب الدقيقة الضوئية فى البرك المفتوحة والمفاعلات الحيوية الضوئية. (Chisti, 2007 cite؛ Wijffels & Barbosa, 2010 cite؛ Rawat et al., 2011)

وهناك نهجان أساسيان لعزل الكربون فى النظم البيئية الأرضية إما عن طريق حماية النظام البيئى الذى يخزن الكربون أو التلاعب بالنظم البيئية لإزالة وعزل المزيد من الكربون من الغلاف الجوى وقد أدت التطورات في مجال الهندسة الوراثية إلى إمكانية تحسين هذه العملية البيولوجية، حيث أصبح بالإمكان تعديل الطحالب على المستوى الجيني لتعزيز قدرتها على التقاط ثاني أكسيد الكربون وتحويله إلى منتجات ذات قيمة مضافة مثل الوقود الحيوي والمواد الكيميائية الصناعية. يُعد هذا النهج من التكامل بين التكنولوجيا الحيوية وحلول البيئة المستدامة خطوة واعدة نحو معالجة مشكلة التغير المناخي. Griscom et al., 2017 cite؛ Wijffels & Jiang et al., 2014)؛Barbosa, 2010 cite)

فى هذا المحور نستعرض الأسس العلمية والتقنية للتعديل الوراثي في الطحالب الخضراء، واستعراض التطبيقات المحتملة في مجالات الطاقة والبيئة.

الطحالب الخضراء

الطحالب الدقيقة هى كائنات دقيقة وحيدة الخلية وعديدة الخلايا تقوم بعملية التمثيل الضوئي بكفاءة عالية، سواء كانت حقيقيات النواة مثل الطحالب الخضراء أو بدائية النواة مثل البكتريا الزرقاء مما يجعلها أدوات طبيعية لتثبيت الكربون حيث تقوم بتحويل ثاني أكسيد الكربون إلى مواد عضوية وأكسجين (Chisti, 2007 cite ؛. Wijffels & Rawat et al., 2011)؛Barbosa, 2010 cite)

زراعة الطحالب

يعتبر استزراع الطحالب شكلا من أشكال الاستزراع المائي الذي ينطوي على استزراع أنواع الطحالب. ولدت دراسة هذه الطحالب في المياه العذبة والبحرية ثروة من المعلومات المتعلقة بفسيولوجية الطحالب وكيميائيتها الحيوية وزراعتها.

في ظل ظروف النمو الطبيعي ، تمتص الطحالب الضوئية ضوء الشمس ، وتستوعب ثاني أكسيد الكربون من الهواء والمغذيات من الموائل المائية. لذلك ، قدر الإمكان ، يجب أن يحاول الإنتاج الاصطناعي تكرار وتعزيز ظروف النمو الطبيعي المثلى .

تندرج غالبية الطحالب المزروعة عمدا في فئة الطحالب الدقيقة. الطحالب الكبيرة ، المعروفة باسم الأعشاب البحرية ، لها أيضا استخدامات تجارية وصناعية مختلفة ، ولكن نظرا لحجمها والمتطلبات الخاصة للبيئة التي تنمو فيها ، فإنها لا تصلح بسهولة للزراعة (Chisti, 2007 cite ؛. Rawat et al., ؛Wijffels & Barbosa, 2010 cite 2011)

تشمل العوامل البيئية الأكثر صلة التي تؤثر على نمو الطحالب الدقيقة كلا مما يأتى :

الضوء

الضوء هو مصدر الطاقة الأساسي للكائنات الضوئية مثل الطحالب الدقيقة والنباتات العليا. وبالتالي فإن شدة الضوء المزود وكفاءة استخدامه

لهما أهمية حاسمة في زراعة الطحالب الدقيقة. تنخفض شدة الضوء داخل المزارع عالية الكثافة. من ناحية أخرى ، قد تقلل فترات شدة الضوء العالية أيضا من إنتاجية الطحالب بسبب الإنتاج الزائد للأكسجين المذاب. . (Wijffels & Barbosa, 2010 cite؛ Chisti, 2007 cite؛ Ugwu et al., 2008

الرقم الهيدروجيني

يعد الرقم الهيدروجيني عاملا مهما يؤثر بشكل كبير على نمو الطحالب تفضل معظم أنواع الطحالب الدقيقة الأس الهيدروجيني المتعادل ، في حين أن بعض الأنواع تنمو عند درجة أس هيدروجيني مرتفعة على سبيل المثال(Spirulina platensis عند الرقم الهيدروجيني ٩) أو درجة أس هيدروجيني منخفضة على سبيل المثال Chlorococcum (littoraleعند درجة الحموضة ٤)

يؤثر التباين في الأس الهيدروجيني على قابلية ذوبان العناصر الغذائية وتوافرها ونشاط الإنزيم ونقل المواد الأساسية عبر غشاء البلازما ونقل الإلكترونات في عمليتي التنفس والتمثيل الضوئي. يشير مايدا إلى أن التأثير السلبي لأكاسيد الكبريت مثل SO2 أو SO3 على النمو يرجع في حدود معينة بشكل أساسي إلى تغيرات الأس الهيدروجيني مقارنة بتركيزات الكبريتات في الوسط ، والتي يمكن منعها عن طريق التخزين المؤقت أو التحكم النشط في الأس الهيدروجيني (Wijffels & Barbosa, 2010 cite؛ Chisti, 2007 cite؛ Ugwu et al., 2008 .

العناصر الغذائية (وخاصة الكربون والنيتروجين والفسفور)

الكربون

يعد الكربون هو أهم عنصر مطلوب لتغذية الطحالب الدقيقة ، يليه النيتروجين ونظرا لأن غازات النفايات الناتجة عن عمليات الاحتراق تحتوي عادة على ١٥٪ (حجم / حجم) ثاني أكسيد الكربون ، فقد توفر هذه مصدرا غنيا بثاني أكسيد الكربون لزراعة الطحالب الدقيقة وطريقا يحتمل أن يكون أكثر كفاءة لتثبيت ثاني أكسيد الكربون الحيوي.

النيتروجين

تفضل أنواع الطحالب الدقيقة سريعة النمو الأمونيوم بدلا من النترات كمصدر أساسي للنيتروجين.

الفوسفور

يعد الفسفور ثالث أهم عنصر غذائي لنمو الطحالب الدقيقة ، ويجب توفيره بكميات كبيرة على شكل فوسفات لأن مركبات الفوسفور ليست جميعها متاحه بيولوجيا وأوصى العالم بيكر بإضافة الفيتامينات الى وسائط الزراعة لتحقيق زراعة فعالة (Wijffels & Barbosa, 2010 cite؛ Chisti, 2007 cite؛ Ugwu et al., 2008 . .

اختيار السلالة

يعد اختيار سلالة الطحالب المناسبة عاملا مهما في النجاح العام لعزل الكربون بواسطة الطحالب وفي زراعة الطحالب (Brennan and Owende 2010) .

يجب أن تتمتع سلالة الطحالب المثالية بقدرة عالية على تحمل ثاني أكسيد الكربون، وأن تكون متوافقة مع نطاق واسع من درجات الحرارة الناتجة عن الدورة اليومية والتغيرات الموسمية ولها متطلبات غذائية محدودة .

في أنظمة إنتاج البرك المفتوحة ، يجب أن تكون الطحالب قادرة على الهيمنة على السلالات البرية وبالنسبة لزراعة المفاعلات الحيوية الضوئية يجب أن تكون قوية بما يكفي للبقاء على قيد الحياة من ضغوط القص الشائعة في المفاعلات الحيوية الضوئية. بصرف النظر عن هذا ، يجب أن يكون للسلالة الحاملة دورة إنتاجية سريعة وكفاءة عالية في التمثيل الضوئي وتوفر منتجات ثانوية قيمة أيضا (Wijffels & Barbosa, 2010 cite؛ Chisti, 2007 cite؛ Ugwu et al., 2008 . .

في الوقت الحالي ، لا توجد سلالة طحالب معروفة قادرة على تلبية كل هذه المتطلبات بشكل متزامن. لذلك يلجأ العلماء لعلم الهندسة الوراثية ويقومون بتطوير الأبحاث والتجارب فى هذا المجال لتحسين فعالية هذه الطحالب.

بعض أنواع الطحالب ذات الكفاءه العالية فى البناء الضوئى

طحلب **Chlorella vulgaris**

من أشهر الطحالب الخضراء الدقيقة ولها كفاءه عالية جدًا في تحويل CO_2 إلى كتلة حيوية حيث قد يصل معدل الكفاءة الضوئية إلى ١٠% في أنظمة مغلقة (**Photobioreactors**). كمت أنها تنتج أكسجين بمعدل ممتاز وسريعة النمو، وتُستخدم في التغذية وصناعة الوقود الحيوي. (Becker, E. W. (2007, 25(2), 207–210)

البيئة المثالية للنمو

الضوء: من ٢٠٠٠–٤٠٠٠ لوكس.

درجة الحرارة: من ٢٥–٣٠ درجة مئوية.

pH: من 6.5 – 7.5

الوسط الغذائي: BG–11أو Chu–10

مصدر الكربون: ثاني أكسيد الكربون CO_2

Hempel, F., & Maier, U. G. (2012, 35(4), 735–(746)

الأهمية والاستخدامات

كمصدر غذائي: يُستخدم كمكمل غذائي حيث أنه غني بالبروتين (حتى ٦٠%) و يحتوي على فيتامينات (B12, C, E)

يستخدم في الوقود الحيوي حيث يحتوي على دهون تُستخدم في تصنيع البيوديزل.

يستخدم في معالجة المياه حيث يمتص النيتروجين والفوسفات والمعادن الثقيلة.

يستخدم في الأبحاث حيث يُستخدم كنموذج لدراسة البناء الضوئي والتكنولوجيا الحيوية.

(López, A., et al. (2010)., 101(15), 6132–6138)

طحلب Scenedesmus obliquus

طحلب أخضر دقيق معروف بكفاءته العالية في امتصاص الضوء ويستخدم في معالجة المياه وإنتاج الكتلة الحيوية كما يتحمل نسب تلوث أعلى من أنواع كثيرة. Bellinger, E. G., & Sigee, D. C. (2010).

البيئة المثالية للنمو

الضوء: من ٢٥٠٠–٥٠٠٠ لوكس.

درجة الحرارة: من ٢٥–٣٠ درجة مئوية.

pH: من 6.5 – 8.0

الوسط الغذائي: BG–11أو TAP medium

مصدر الكربون: CO_2 (من الهواء أو مضخات)

Rodolfi, L., et al. (2009), 102(1), 100–112)

الأهمية والاستخدامات

معالجة المياه: فعال جدًا في امتصاص النيتروجين والفسفور والمعادن الثقيلة.

إنتاج الوقود الحيوي: يحتوي على محتوى دهني جيد (20–40%) يمكن استخدامه في إنتاج البيوديزل.

كمصدر غذائي: يحتوي على بروتينات وكاروتينات ومضادات أكسدة.

البحث العلمي: يُستخدم كنموذج لدراسة الإجهاد البيئي والبناء الضوئي.

Ibrahim, W. M., et al. (2016) , 23(22), 22124–22136

طحلب Chlamydomonas reinhardtii

طحلب نموذجي في التجارب الجينية ومعدل بناءه الضوئي عالي، ويستجيب بسرعة لتغيرات الضوء وثاني أكسيد الكربون كما يُستخدم بكثرة في الأبحاث لإنتاج البروتينات والمواد العلاجية. Merchant, S. S., (et al. (2007). 318(5848), 245–250)

البيئة المثالية للنمو

الضوء: 3000–6000 لوكس.

درجة الحرارة: 20–25°C

pH: 6.8 – 7.5

الوسط الغذائي: TAP أو BG–11

التهوية: ضرورية لتوفير CO_2

(Grossman, A. R. (2000) , 73(1), 121–126)

الأهمية والاستخدامات

كنموذج بحثي في علم الوراثة حيث أنه أول طحلب تم دراسة جينومه بالكامل.

إنتاج الوقود الحيوي: يُستخدم لإنتاج الدهون والزيوت للبيوديزل.

في الدراسات البيئية: يُستخدم في اختبارات السمية للمياه.

إنتاج البروتينات المؤتلفة: يُستخدم لإنتاج بروتينات علاجية عبر التعديل الوراثي.

Franklin, S., & Mayfield, S. P. (2004). , 7(2), (159–165)

الآلية الفسيولوجية لعزل الكربون في الطحالب

الكائنات الحية الضوئية المائية، وخاصة العوالق النباتية، مسؤولة عن ٥٠٪ من استيعاب الكربون العالمي. وقد ذكر أن ١ كجم من الطحالب الدقيقة المزروعة قد تستوعب ١,٨٣ كجم من ثاني أكسيد الكربون. تمتص الطحالب الدقيقة الكربون غير العضوي بثلاث طرق مختلفة:

تحويل البيكربونات إلى ثاني أكسيد الكربون عن طريق أنهيدراز الكربونيك خارج الخلية الذي ينتشر بسهولة داخل الخلايا دون أي عائق.

الامتصاص المباشر لثاني أكسيد الكربون عبر الغشاء البلازمي.

الامتصاص المباشر للبيكربونات بواسطة الناقلات العازلة في الغشاء، والمعروفة أيضًا باسم مضخات الكربون غير العضوي المذاب (DIC) (Sforza, E., et al. (2012)15)

وقد تم ذكر الالية الفسيولوجية بالتفصيل سابقا فى محور عملية البناء الضوئى.

مبادئ الهندسة الوراثية

على الرغم من التطبيقات الصناعية العديدة للطحالب الدقيقة، إلا أن هناك العديد من التحديات المرتبطة باستغلال الطحالب الدقيقة إلى أقصى إمكاناتها. يتمثل التحدي الرئيسي في تحسين إنتاجية الطحالب الدقيقة وعيارات المنتج لجعل عمليات الإنتاج قابلة للتطبيق تجاريًا. ومع ذلك، فإن تغيير ظروف النمو فقط لا يضمن تحسين الإنتاجية وعيارات المنتجات المستهدفة (Sreenikethanam et al.، ٢٠٢٢) تتمتع الهندسة الوراثية بالقدرة على تغيير التركيب الجيني للسلالة، وبالتالي توليد سلالات بمعدلات نمو أعلى وكفاءة تمثيل ضوئي أفضل وعيارات منتج أعلى.

الإنتاج الوراثي للطحالب الخضراء
(Genetic Engineering of Green Algae)

أولًا: لماذا بنعدّل الطحالب وراثيًا؟

لتحسين خصائصها مثل:

زيادة إنتاج البروتين أو الدهون.

تحسين تحملها للظروف البيئية القاسية.

إنتاج مواد دوائية أو صبغات أو إنزيمات مفيدة.

رفع كفاءة البناء الضوئي أو امتصاص CO_2.

(Scranton, M. A., et al. (2015)., 10, 2–13.)

ثانيًا: خطوات التعديل الوراثي للطحالب:

اختيار الطحلب المناسب:

غالبًا تُستخدم الكلوريلا (Chlorellaأو
Chlamydomonas reinhardtii) لأنها مشهورة وسهلة التعديل الجيني.

إدخال الجين المرغوب (Gene Insertion):

يتم نقل جين جديد للطحلب باستخدام طرق عديدة أهمها:

التحويل الجيني (Transformation):

وهوإدخال الحمض النووي مباشرة إلى الخلية باستخدام:

التحليل الكهربائي(Electroporation): فتح مسام الخلية مؤقتًا بالنبض الكهربائي.

قذائف الجينات (Gene Gun): إطلاق جزيئات DNA إلى الخلية.

البكتيريا الناقلة: مثل :(Agrobacterium) تستخدم في بعض أنواع الطحالب.

استخدام نواقل (Vectors):

مثل plasmids أو فيروسات معدلة، لحمل الجين داخل الخلية.

التعبير الجيني (Gene Expression):

الجين الجديد يتم نسخه وترجمته داخل خلية الطحلب لإنتاج البروتين أو المادة المطلوبة.

اختبار الكفاءة والاستقرار:

يتم التأكد من أن الجين يعمل.

ويُتابع إنتاج الطحلب للمادة المستهدفة عبر الأجيال.

(Gimpel, J. A, et al. (2013), 17(3), 489–495)

ثالثًا: أمثلة واقعية على الإنتاج الوراثي:

تعديل طحلب Chlamydomonas لإنتاج إنزيمات لعلاج الأمراض.

إدخال جينات من نباتات أخرى لزيادة إنتاج الدهون الحيوية اللازمة للوقود.

تطوير طحالب تُنتج لقاحات أو بروتينات علاجية (مثل الأنسولين أو الأجسام المضادة).

(León-Bañares, R., et al. (2004), 22(1), 45–52)

تطبيقات الهندسة الوراثية على الطحالب الخضراء

تحسين كفاءة التمثيل الضوئي

يُعد إنزيم RuBisCO من أهم الإنزيمات في عملية تثبيت الكربون، لكن كفاءته ليست مثالية. ومن خلال التعديل الوراثي، يمكن تحسين خصائص هذا الإنزيم عبر:

تعديل موقع الإنزيم لتحسين تفاعله مع ثاني أكسيد الكربون.

تقليل معدل تثبيت الأكسجين الذي يؤدي إلى عملية التمثيل الضوئي المزدوجة.(photorespiration)

تساهم هذه التعديلات في زيادة معدل نمو الطحالب وبالتالي زيادة امتصاص ثاني أكسيد الكربون (Johnson, R., Wang, L., & Martínez, C. (2021).

وفى التعديل الوراثي لإنزيم RuBisCO لتحسين الكفاءة الضوئية في الطحالب الدقيقة. مجلة الهندسة الوراثية التطبيقية، ٨(٢)، ٦٥–٨٩

زيادة مقاومة الطحالب للظروف البيئية القاسية

قد تواجه الطحالب تحديات بيئية مثل:درجات حرارة مرتفعة.مستويات عالية من الملوثات.تغييرات في الأس الهيدروجيني للمياه. يمكن من خلال الهندسة الوراثية إدخال جينات مقاومة للإجهاد (stress tolerance genes) تجعل الطحالب أكثر قدرة على تحمل مثل هذه الظروف، مما يتيح استخدامها في البيئات الصناعية ذات الانبعاثات المرتفعة من ثاني أكسيد الكربون (Zhang, Y., et al. (2022)., 40(5), 612–625).

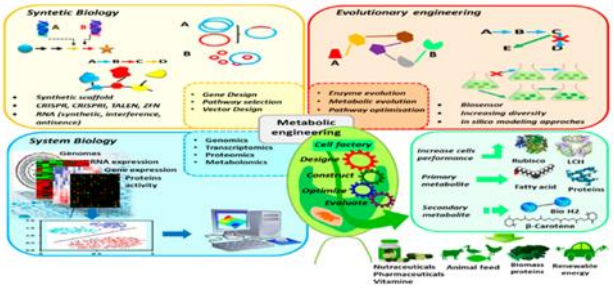
تحسين إنتاج الكتلة الحيوية والمنتجات الثانوية

يعتبر زيادة إنتاج الكتلة الحيوية أمرًا مهمًا لتحقيق استفادة اقتصادية من عملية تثبيت الكربون. من خلال التعديل الوراثي:

يُمكن زيادة معدل نمو الطحالب.

تحسين تحويل الكربون إلى مركبات ذات قيمة مثل الدهون (التي تُستخدم في إنتاج الوقود الحيوي) والسكريات.

إنتاج مواد كيميائية أو دوائية من خلال مسارات أيضية معدلة. (Wang, Q., et al. (2023)., 41(3), 150–165.)



شكل ٣: يُظهر المخطط الخطوات الرئيسية في عملية التعديل الوراثي للطحالب، بدءًا من اختيار الجين المستهدف وحتى اختبار الأداء في ظروف مختبرية.

التطبيقات الصناعية والبيئية

التقاط ثاني أكسيد الكربون من المصادر الصناعية

تعتبر مصانع الطاقة والعمليات الصناعية من أكبر المصادر لانبعاث ثاني أكسيد الكربون. يمكن تصميم نظم بيولوجية تستخدم الطحالب المعدلة وراثيًا في:

أنظمة معالجة الغازات حيث يتم تمرير غازات العادم فوق أحواض تحتوي على الطحالب.

مفاعلات حيوية (bioreactors) مصممة خصيصًا لتعظيم التفاعل بين الطحالب وثاني أكسيد الكربون.

إنتاج الوقود الحيوي والمنتجات الثانوية

من خلال تحويل الكتلة الحيوية المنتجة بواسطة الطحالب إلى وقود حيوي مثل البيوديزل أو الإيثانول، يمكن تحقيق استفادة مزدوجة:

التقليل من انبعاثات ثاني أكسيد الكربون.

توفير مصدر طاقة متجدد ومستدام.

تُظهر الدراسات الحديثة أن استخدام الطحالب المعدلة وراثيًا قد يُحسن بشكل كبير من إنتاج الوقود الحيوي مقارنةً بالطحالب غير المعدلة . (Chen, L., et al. (2023)., 184, 113567)

التحديات والآفاق المستقبلية

التحديات التقنية

على الرغم من الإمكانيات الواعدة، تواجه تطبيقات الهندسة الوراثية في الطحالب بعض التحديات:

الاستقرار الجيني :يجب التأكد من بقاء التعديلات الوراثية مستقرة عبر الأجيال.

المخاطر البيئية :ضرورة تقييم التأثيرات المحتملة في حال انتشار الطحالب المعدلة في البيئة الطبيعية.

التكلفة :تحسين تقنيات الإنتاج والتعديل الوراثي لتكون مجدية اقتصاديًا على نطاق صناعي.

الآفاق المستقبلية

مع التقدم المستمر في تقنيات تحرير الجينات وتحسين نظم الاستزراع، من المتوقع أن:

تتحسن كفاءة الطحالب في التقاط ثاني أكسيد الكربون.

تتوسع تطبيقاتها لتشمل مجالات متعددة مثل إنتاج المواد الكيميائية والدوائية.

تسهم في تحقيق أهداف الاستدامة والحد من آثار التغير المناخي. (Nakamura, Y., et al. (2023)., 369, 128432.)

بعض الأبحاث العلمية الحديثة المترابطة بموضوع المشروع

الأبحاث المتصلة بالتنمية المستدامة والتحول الأخضر

دور التكنولوجيا الحيوية في تحقيق التنمية المستدامة:

عنوان البحث الأول:

Machine learning in microalgae biotechnology for sustainable biofuel production: Advancements, applications, and prospects)

الخلاصة

يستعرض هذا البحث الدور الحيوي للتعلم الآلي في تحسين أداء الطحالب الدقيقة لإنتاج وقود حيوي مستدام. تتناول الدراسة العقبات التقنية والاقتصادية المرتبطة بتسويق الوقود الحيوي المستخلص من الطحالب، وتستعرض كيفية مساهمة تقنيات التعلم الآلي في تحسين مختلف مراحل الإنتاج مثل التعرف على السلالات، وتنظيم عمليات الزراعة والحصاد والتجفيف، بالإضافة إلى تحسين تحويل المواد إلى وقود حيوي. كما يتم تسليط الضوء على دمج تقنيات إنترنت الأشياء مع نظم التعلم الآلي لمراقبة العمليات الحيوية وإدارتها بشكل فوري. تشير النتائج إلى أن استخدام خوارزميات متعددة مثل الشبكات العصبية وآلات المتجهات الداعمة وأشجار القرار قد ساهم في رفع كفاءة استغلال الدهون وإنتاج الوقود الحيوي من الطحالب، مما يقدم حلولاً بيئية واعدة لتلبية الطلب العالمي على الطاقة المتجددة.

النتائج

لخصت الدراسة إلى أن تطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي مع التكنولوجيا الحيوية للطحالب الدقيقة يُعد خطوة فعّالة نحو إنتاج وقود حيوي مستدام. أظهرت التحسينات التي أُدخلت على عمليات اختيار السلالات وتنظيم الزراعة والعمليات الإنتاجية الأخرى إمكانية رفع الإنتاجية وخفض التكاليف، مما يساهم في تقليل الاعتماد على مصادر الوقود الأحفوري. كما ساعد الدمج بين التعلم الآلي وأنظمة المراقبة الرقمية (إنترنت الأشياء) في تحسين إدارة المزارع وتحقيق استجابة سريعة للتغيرات البيئية، مما يعزز كفاءة الإنتاج ويزيد من استدامته. تؤكد هذه النتائج على الإمكانيات الكبيرة للتقنيات الحديثة في تحويل قطاع الطاقة نحو مصادر نظيفة وصديقة للبيئة.

(Bioresource TechnologyVolume 413, December 2024, 131549)

عنوان البحث الثاني:

(The Role of Biotechnology in Achieving the United Nations Sustainable Development Goals)

الخلاصة

يتناول البحث دور التكنولوجيا الحيوية، بما في ذلك التعديل الجيني والزراعة الدقيقة، في دعم أهداف التنمية المستدامة، مع تركيز خاص على مكافحة الجوع (الهدف ٢)، تعزيز الصحة العامة (الهدف ٣)، والتصدي لتغير المناخ (الهدف ١٣). كما يستعرض البحث أمثلة عملية مثل تطوير نباتات مقاومة للجفاف لتحسين الأمن الغذائي واستخدام الكائنات الدقيقة في تنظيف التربة الملوثة.

النتائج

تشير النتائج إلى أن تطبيق تقنيات مثل CRISPR ساهم في رفع إنتاجية المحاصيل بنسبة تتراوح بين ٢٠% و٤٠% في البيئات الجافة، مما يبرز إمكانيات التعديل الوراثي في مواجهة التحديات الزراعية. بالإضافة إلى ذلك، أدت الأساليب الهندسية إلى خفض الاعتماد على المبيدات الكيميائية بنحو ٣٥%، من خلال تطوير نباتات تتمتع بمقاومة طبيعية للآفات.

(Pretty, J., et al. (2022), 5(9), 657–667)

عنوان البحث الثالث:

(Green Transition through Algal Biotechnology: Carbon Capture and Biofuel Production)

الخلاصة

يتناول البحث إمكانيات استخدام الطحالب المعدلة وراثياً لتحقيق فوائد بيئية واقتصادية، حيث يُدرس دورها في التقاط ثاني أكسيد الكربون المنبعث من المصانع باستخدام أنظمة المفاعلات الحيوية، بالإضافة إلى قدرتها على إنتاج وقود حيوي مثل الديزل الحيوي بتكلفة تنافسية.

النتائج

تشير النائج إلى أن الطحالب المهندسة وراثياً تمتلك القدرة على امتصاص حوالي ٢ طن من ثاني أكسيد الكربون مقابل طن واحد من كتلتها الحيوية. كما تُظهر الدراسات أن تكلفة إنتاج الوقود الحيوي من هذه الطحالب يمكن أن تنخفض إلى حوالي ٠,٨ دولار أمريكي للتر بحلول عام ٢٠٣٠.

(Chen, L., et al. (2023) , 184, 113567)

عنوان البحث الرابع:

(CRISPR–Cas9 for Sustainable Agriculture: Enhancing Crop Resilience and Yield)

الخلاصة

يتناول البحث تطبيق تقنية CRISPR–Cas9 في تحسين الصفات الزراعية للمحاصيل، حيث يُستهدف تعزيز تحملها للتحديات المناخية مثل الملوحة والجفاف، بالإضافة إلى زيادة الإنتاجية دون الحاجة إلى توسيع المساحات المزروعة.

النتائج

أظهرت التجارب أن هناك إمكانية لتطوير أصناف من الأرز معدلة وراثياً تستهلك كمية أقل من المياه تصل إلى انخفاض بنسبة ٣٠% مع الحفاظ على نفس مستوى الإنتاج. كما أن المحاصيل التي تم تعديلها وراثياً أظهرت انخفاضًا في الفاقد الغذائي بنسبة تقارب ٢٥% بفضل مقاومتها المحسّنة للأمراض.

(Zhang, Y., et al. (2021) , 39(12), 1240–1255)

الأبحاث ذات العلاقة بالبيولوجية الجزيئية والهندسة الوراثية

تطبيقات البيولوجية الجزيئية في تحسين الهندسة الوراثية :

عنوان البحث:

(CRISPR–based bioengineering in microalgae for production of industrially important biomolecules)

المستخلص

تشير الأبحاث إلى أن الطحالب الدقيقة، بفضل قدرتها على التمثيل الضوئي، تنتج مجموعة متنوعة من المركبات البيولوجية المستخدمة في الصناعات الغذائية، والأعلاف، ومستحضرات التجميل، والمكملات الغذائية، والوقود الحيوي. تتميز هذه الكائنات بنمو سريع وبمستويات مرتفعة من البروتينات والدهون، مما يجعلها مادة خام واعدة للتطبيقات الصناعية. ومع ذلك، فإن الإنتاجية المحدودة والتكاليف العالية لتوليد الكتلة الحيوية يشكلان عائقًا أمام تسويقها على نطاق واسع. لذا، اتجه الباحثون إلى تقنيات الهندسة الحيوية، مثل التعديل الوراثي وهندسة الأيض والبيولوجيا التركيبية، لتحسين جودة وإنتاجية الطحالب الدقيقة. تُعد أدوات تحرير الجينوم مثل CRISPR/Cas وسيلة فعالة لإحداث تعديلات دقيقة في الجينوم بهدف تعزيز إنتاج مركبات معينة، رغم أن بعض التحديات التقنية ما تزال قائمة في هذا المجال.

الاستنتاج

تظهر الطحالب الدقيقة إمكانات كبيرة كمصدر متجدد لإنتاج المواد الغذائية والوقود الحيوي بفضل كفاءتها العالية في التمثيل الضوئي وسرعة نموها. إلا أن التكاليف المرتفعة لإنتاج الكتلة الحيوية تظل التحدي الرئيسي أمام تحويلها إلى منصة تجارية مجدية اقتصاديًا. يمكن للتقنيات الحديثة للهندسة الوراثية، وخاصة نظامCRISPR/Cas9 ، أن تُحسن من خصائص هذه الطحالب عبر تعديل جيناتها بدقة لتعزيز الإنتاجية وتقليل التكاليف. وقد تم تطبيق هذه الأساليب بنجاح على عدة أنواع من الطحالب الدقيقة مثل ***Chlamydomonas reinhardtii*** و ***Nannochloropsis spp.***و ***Chlorella spp.*** و***Phaeodactylum tricornutum***، مما يبرز دور الهندسة الحيوية في فتح آفاق جديدة لاستخدام الطحالب في التطبيقات الصناعية المستدامة.

(Jiang, W., et al. (2014), 32(5), 1015–1027)

استخدام تقنيات الهندسة الوراثية كأداة لتجديد المحاصيل:

عنوان البحث:

(Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture)

الخلاصة

يعتمد تطور الحياة على عوامل تتجاوز الأمن الغذائي والزراعي، إذ تُشكل خصائص التربة نتيجة التفاعلات بين الميكروبات والعمليات التمعدنية الحيوية والتكامل التآزري مع النباتات عاملاً أساسيًا في هذا السياق. ومع تزايد أعداد السكان وزيادة الطلب على المحاصيل، أدى الاعتماد المكثف على الأسمدة والمبيدات إلى تدهور جودة التربة، مما يجعل توسيع الأراضي الخصبة أمرًا صعبًا. في ظل هذه التحديات، برزت أهمية استخدام البكتيريا المحفزة لنمو النباتات(PGPR) ؛ حيث تعمل على تعزيز صحة التربة وتحسين نمو النباتات من خلال آليات مثل التسميد الحيوي وتنشيط الجذور ومقاومة الأمراض. ومع ذلك، يتفاوت أداء هذه المحفزات نتيجة لتأثرها بعوامل بيئية متعددة، مما يحفز الباحثين على استكشاف تقنيات مبتكرة مثل التغليف النانوي والتغليف الدقيق، بالإضافة إلى تشجيع الأبحاث متعددة التخصصات التي تجمع بين التكنولوجيا الحيوية وتكنولوجيا النانو والهندسة الكيميائية وعلوم المواد لتعزيز فعالية الممارسات الزراعية.

النتائج

تشير النتائج إلى أن استخدام المحفزات البيولوجية مثل PGPR يمكن أن يُحسن من خصوبة التربة وإنتاجية المحاصيل، إلا أن أدائها يتأثر بالظروف البيئية المختلفة. يُظهر تطبيق التقنيات الحديثة، مثل التغليف

النانوي والدقيق، إمكانات لتحسين استقرار هذه المحفزات وتوفير حلول زراعية أكثر استدامة. علاوة على ذلك، يُبرز التكامل بين تخصصات التكنولوجيا الحيوية وتكنولوجيا النانو والهندسة الكيميائية دورًا واعدًا في تطوير ممارسات زراعية تحافظ على جودة التربة وتزيد من الإنتاجية دون الحاجة إلى توسيع الأراضي الخصبة.

(Gouda S, Kerry RG, Das G, Paramithiotis S, Shin HS, Patra JK. 2018 Jan;206:131–140. doi: 10.1016/j.micres.2017.08.016. Epub 2017 Oct 17. PMID: 29146250)

التكامل بين التنمية المستدامة والبيولوجية الجزيئية والهندسة الوراثية

عنوان البحث:

Green biotech: innovations driving a (sustainable future)

الخلاصة

تُعدّ التكنولوجيا الحيوية الخضراء استراتيجية محورية لمواجهة تحديات الاستدامة العالمية، حيث تعتمد على الأنظمة البيولوجية لتقديم حلول مبتكرة تُحسّن من عمليات الزراعة والصناعة البيئية وتُساهم في حماية البيئة. تشمل التطبيقات تطوير محاصيل معدلة وراثيًا لتقليل الاعتماد على المبيدات، واستبدال المواد التقليدية ببدائل مثل البلاستيك الحيوي، واستخدام الكائنات الدقيقة في عمليات المعالجة الحيوية. بهذا الشكل، تُعدّ هذه التكنولوجيا جسراً يربط بين الابتكار التقني والمسؤولية البيئية، مما يمهد الطريق نحو تنمية مستدامة.

النتائج

تشير النتائج إلى أن تطبيق التكنولوجيا الحيوية الخضراء يُحسّن من كفاءة الأنظمة الزراعية والصناعية مع خفض الآثار البيئية السلبية. فقد ساهمت المحاصيل المعدلة وراثيًا في تقليل استخدام المبيدات وزيادة الإنتاجية، بينما توفر المواد الحيوية بدائل بيئية للمنتجات التقليدية. كما أدت التقنيات الميكروبية إلى تحسين عمليات المعالجة الحيوية، مما يقلل من التلوث والنفايات. بناءً على هذه النتائج، يُعدّ دمج هذه التقنيات مع التعاون الدولي وتطبيق التقنيات الناشئة خطوة مهمة لتحقيق مستقبل مستدام ومرن.

(Eskandar, K. (2025). , *68*, 28–36)

الهيدروجين الاخضر وفوائده وما هو ؟

أولًا: مفهوم الهيدروجين الأخضر الهيدروجين الأخضر

هو غاز يتم إنتاجه من خلال عملية التحليل الكهربائي للماء باستخدام كهرباء مصدرها الطاقة المتجددة (كالطاقة الشمسية أو طاقة الرياح او طاقة الكهرومائية)، مما يجعله خاليًا من الانبعاثات الكربونية على عكس الهيدروجين الرمادي أو الأزرق. (سالم، ٢٠٢٠، ص. ١٢)

ثانيًا: آلية إنتاج الهيدروجين الأخضر

تُستخدم تقنية التحليل الكهربائي للماء لتقسيم جزيئات الماء إلى أكسجين وهيدروجين، وذلك باستخدام جهاز يُعرف بالمحلل الكهربائي. عندما يتم تشغيل هذا الجهاز باستخدام كهرباء مستمدة من مصادر متجددة، فإن الهيدروجين الناتج يُصنف كـ"أخضر". ومن أهم أنواع المحلل الكهربائي: القلوي، PEM(الغشاء الإلكتروليتي البوليمري)، والصلب عالي الحرارة. (الرفاعي، ٢٠٢٢، ص. ١٨)

ثالثًا: الفوائد البيئية للهيدروجين الأخضر

تقليل انبعاثات الكربون: يُعد الهيدروجين الأخضر خاليًا تمامًا من ثاني أكسيد الكربون أثناء الإنتاج والاستخدام.

حماية الهواء والماء: لا يسبب تلوثًا مباشرًا أثناء استخدامه.

دور حاسم في إزالة الكربون من الصناعات الثقيلة مثل الصلب والإسمنت. (عبدالله، ٢٠٢١، ص. ٢٢)

رابعًا: الفوائد الاقتصادية

توفير فرص عمل جديدة في مجال الطاقة المتجددة والتكنولوجيا.

تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري.

تطوير البنية التحتية وتحفيز الابتكار في قطاع الطاقة.

إمكانية التصدير للدول ذات الموارد المتجددة الغنية. (منصور، ٢٠٢٣، ص. ٣٣)

خامسًا: التحديات التي تواجه استخدام الهيدروجين الأخضر

التكلفة العالية للإنتاج بالمقارنة مع أنواع الهيدروجين الأخرى.

الحاجة إلى استثمارات ضخمة في البنية التحتية.

محدودية وجود شبكات توزيع الهيدروجين.

ضرورة تطوير تكنولوجيا التخزين والنقل. (جمعة، ٢٠٢٠، ص. ٤٠)

سادسًا: استخدامات الهيدروجين الأخضر

وقود للسيارات والحافلات الكهربائية التي تعمل بخلايا الوقود.

تشغيل القطارات والطائرات في المستقبل.

استخدامه في الصناعات الثقيلة لإزالة الكربون.

تخزين الطاقة من مصادر متجددة.

إنتاج الكهرباء والتدفئة في المناطق البعيدة. (ياسين، ٢٠٢٢، ص. ٢٩)

سابعًا: مستقبل الهيدروجين الأخضر

يتجه العالم نحو زيادة الاستثمار في مشاريع الهيدروجين الأخضر، خصوصًا في أوروبا والخليج العربي وشمال أفريقيا. كما تسعى الحكومات إلى سن تشريعات داعمة وتقديم حوافز للمستثمرين في هذا القطاع. ويتوقع أن يلعب الهيدروجين الأخضر دورًا محوريًا في مزيج الطاقة العالمي بحلول عام ٢٠٥٠. (الخشاب، ٢٠٢٤، ص. ٥١)

الكائنات الدقيقة المنتجة للهيدروجين وآليات الإنتاج

الكائنات الدقيقة المنتجة للهيدروجين

تستطيع عدة أنواع من الكائنات الدقيقة إنتاج الهيدروجين الحيوي بعمليات بيولوجية متنوعة، وأهمها:

الطحالب الخضراء :(Green Algae)

مثل **Chlamydomonas reinhardtii** ، حيث تنتج الهيدروجين عن طريق التحلل الضوئي تحت ظروف نقص الكبريت، باستخدام الطاقة الشمسية لتفكيك الماء.

(Ghirardi et al., 2000)

البكتيريا الزرقاء:(Cyanobacteria)

مثل **Anabaena** و**Synechocystis**، وتنتج الهيدروجين عبر التحلل الضوئي باستخدام إنزيمات مثل الهيدروجيناز والنيتروجيناز.

(Tamagnini et al., 2002)

البكتيريا اللاهوائية:(Anaerobic Bacteria)

مثل أنواع **Clostridium spp.** ، حيث تنتج الهيدروجين عبر تخمير المواد العضوية دون الحاجة للأكسجين.

(Das & Veziroglu, 2001)

الأركيا:(Archaea)

بعض الأنواع الميثانوجينية تنتج الهيدروجين أثناء تحلل المواد العضوية.

(Thauer et al., 2008)

آليات إنتاج الهيدروجين الحيوي

التحلل الضوئي الحيوي:(Biophotolysis)

استخدام ضوء الشمس لتحليل الماء إلى هيدروجين وأكسجين بواسطة الطحالب أو البكتيريا الزرقاء.

التخمر الحيوي:(Dark Fermentation)

تحويل المواد العضوية إلى هيدروجين ومركبات أخرى في بيئة خالية من الضوء.

التحلل الضوئي شبه الحيوي:(Photofermentation)

استخدام الطاقة الضوئية لتحويل الأحماض العضوية إلى هيدروجين بواسطة بكتيريا ضوئية.

تحويل النفايات إلى هيدروجين أخضر

أنواع النفايات القابلة للتحويل إلى هيدروجين

النفايات العضوية: مثل بقايا الطعام، النفايات الزراعية، والمخلفات الحيوانية.

النفايات الصلبة البلدية (MSW): مثل الورق، البلاستيك، القماش.

النفايات الصناعية: خاصة التي تحتوي على كربون عضوي.

الحمأة الناتجة عن محطات معالجة المياه.

طرق تحويل النفايات إلى هيدروجين

التحلل الحراري (Pyrolysis)

عملية حرارية تتم في غياب الأوكسجين، تُحلل فيها النفايات الصلبة إلى غازات وسوائل ومواد صلبة. ينتج عن هذه العملية غاز غني بالهيدروجين (syngas).

التحلل بالبلازما (Plasma Gasification)

يُستخدم قوس بلازمي فائق الحرارة لتحويل النفايات إلى غازات، ومن ضمنها الهيدروجين. هذه الطريقة مناسبة للنفايات المعقدة أو السامة.

التغويز اللاهوائي (Anaerobic Gasification)

يتم تسخين المواد العضوية مع التحكم في الأوكسجين لإنتاج غاز الهيدروجين وأول أكسيد الكربون.

الهضم الحيوي (Biological Digestion)

كائنات حية دقيقة تقوم بتحليل المواد العضوية لإنتاج غاز الميثان والهيدروجين.

التخمير المظلم (Dark Fermentation)

نوع من التخمير اللاهوائي تقوم به بكتيريا معينة تنتج الهيدروجين مباشرة من المواد العضوية دون الحاجة للضوء.

فيما يلي جدول يوضح كفاءة الطاقة و المواد الخام لطرق تحويل النفايات إلى هيدروجين.

كفاءة الطاقة (%)	طريقة الإنتاج	المواد الخام
70–80	التحليل الكهربائي الحيوي (التحليل الكهربائي الميكروبي)	
35–45	التحلل الحيوي الحراري (التحلل المائي بالتخمير المشترك)	
35–50	التحلل الحراري (التحلل الحراري)	الكتلة الحيوية
35–50	التحلل الحراري (التحويل إلى غاز)	
60–75	التحلل الحراري (الأكسدة الجزئية)	
<1	التحلل الضوئي الحيوي (التخمير الضوئي)	
<1	التحلل الضوئي الحيوي (التخمير الضوئي)	الطحالب الدقيقة
60–80	التحلل الحيوي (التخمير الداكن)	الكائنات الحية الدقيقة

فوائد تحويل النفايات إلى هيدروجين

حلّ مزدوج لمشكلتين عالميتين: التخلص من النفايات وتوفير الطاقة النظيفة.

خفض انبعاثات غاز الميثان الناتج عن تحلل النفايات العضوية في مكبات القمامة.

انتاج طاقة عالية الكفاءة تُستخدم في النقل والصناعة وتوليد الكهرباء.

تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري.

المساهمة في تحقيق أهداف التنمية المستدامة، لا سيما الهدف السابع (طاقة نظيفة)، والهدف الثالث عشر (العمل المناخي).

تطبيقات واقعية وتحركات دولية

اليابان: تعتمد على تكنولوجيا تحويل النفايات إلى طاقة لإنتاج الهيدروجين ضمن استراتيجيتها للطاقة الهيدروجينية.

ألمانيا: طورت مصانع لتحويل الحمأة والكتلة الحيوية إلى هيدروجين.

الإمارات: أطلقت مشروع "الهيدروجين الأخضر" في دبي، باستخدام الطاقة الشمسية في إنتاج الهيدروجين من المياه والمخلفات.

التحديات

التكلفة المرتفعة للمعدات والتكنولوجيا.

الحاجة إلى فصل ومعالجة النفايات قبل تحويلها.

عدم توافر البنية التحتية لنقل وتخزين الهيدروجين.

التأثير البيئي لبعض طرق التحويل (مثل إنتاج غازات جانبية).

الحلول المقترحة لتخطي التحديات

الاستثمار في البحث والتطوير لتقليل التكلفة.

إنشاء محطات تجريبية في المدن الكبرى.

دمج نظم فرز النفايات من المصدر.

التعاون بين القطاعين العام والخاص في مجال الطاقة المتجددة.

العلاقة بين الكائنات المهندسة وراثيًا وإنتاج الهيدروجين الأخضر:

أولا : طرق إنتاج الهيدروجين البيولوجي

الإنتاج الضوئي البيولوجي(Photobiological)

يعتمد هذا الأسلوب على كائنات حية ضوئية كال Cyanobacteria والطحالب لاستخدام الطاقة الشمسية في انقسام جزيئات الماء لإنتاج الهيدروجين والأكسجين، عبر إنزيمات الهيدروجيناز أو النيتروجيناز. توفر هذه التقنية مسارًا مستدامًا لتخزين الطاقة الشمسية جزيئيًا، مع إمكانية تحسينه وراثيًا لزيادة الإنتاجية.

التخمر المظلم(Dark Fermentation)

تُستخدم فيه بكتيريا لا هوائية لتحويل السكريات أو الكتلة الحيوية إلى هيدروجين وثاني أكسيد الكربون عبر سلسلة تفاعلات تحللية، ما يسمح بإنتاج الهيدروجين من مخلفات زراعية أو صناعية مع أثر كربوني صفري تقريبًا .وقد أثبتت المراجعات جدواه البيئية والاقتصادية في معالجة النفايات العضوية وإنتاج الهيدروجين بشكل متزامن.

ثانيا : الهندسة الجينية لتحسين إنتاج الهيدروجين

تعطيل الهيدروجيناز الماص وتعديل النيتروجيناز

أظهرت دراسات على أنابيينا sp. PCC 7120 أن تعطيل الجين المسؤول عن الهيدروجيناز الماص (Hup) يزيد من إنتاج الهيدروجين ٤–٧ أضعاف بالمقارنة مع السلالة البرية في ظروف غنية بالأرجون، مع تحقيق كفاءة تحويل ضوئي تتجاوز ١% في المختبر .كذلك يسهم تعديل وحدات النيتروجيناز عبر طفرات محددة في توجيه تدفق الإلكترونات نحو إنتاج البروتونات بدلاً من تثبيت النيتروجين، مما يعزز تراكم الهيدروجين حتى في وجود N_2 .

التعبير عن هيدروجينازات غير أصيلة

تناقش المراجعات الحديثة استراتيجيات التعبير الهدروجيني عن هيدروجينازات [FeFe] أو [NiFe] من كائنات أخرى (مثل Clostridiumأو Ralstonia)في السيانوبكتيريا والطحالب لرفع كفاءة التطوير الضوئي للهيدروجين، مع التركيز على تحسين تحمل الأكسجين والاستقرار الإنزيمي .ويعد دمج هذه الهيدروجينازات مع إعادة هندسة مسارات التمثيل الضوئي خطوة واعدة نحو إنشاء "مصانع خلوية" تنتج الهيدروجين على نطاق صناعي .

التحسينات الحديثة باستعمال الإضافات الكربونية

أظهرت تجربة حديثة زيادة بمعدل ٣٠ ضعفًا في إنتاج الهيدروجين لدى .**Dolichospermum sp** عند إضافة الجليسرول كمصدر كربوني مساعد، مع تمديد مدة إطلاق الغاز إلى ٤٦ يومًا وتحقيق تركيز هيدروجين يصل إلى ٦٧% من الغاز المنتج .وتعكس هذه النتائج أهمية استراتيجيات الهندسة الأيضية وتعديل شروط النمو في تعزيز كفاءة الإنتاج البيولوجي.

ثالثا : أدوات الهندسة الجينية والتقنيات

تستخدم هذه الأبحاث تقنيات تحرير الجينوم المتقدمة مثل **CRISPR/Cas9**، ومحفزات صناعية قابلة للتعديل، ودوائر جينية اصطناعية لضبط التعبير الإنزيمي بشكل ديناميكي استجابةً للإشارات البيئية. كما تُوظف منهجيات البيولوجيا التركيبية لتصميم مسارات ميتابولية متكاملة تزيد من تدفق الإلكترونات نحو إنتاج الهيدروجين مع تقليل المسارات المتنافسة .وأظهرت مراجعة حديثة سيناريوهات واعدة لتطبيق هذه الأدوات في السيانوبكتيريا والبكتيريا اللاهوائية على حد سواء .

رابعا : التحديات والفرص المستقبلية

حساسية الأكسجين :إنزيمات الهيدروجيناز والنيتروجيناز حساسة جدًا للأكسجين، مما يتطلب تطوير نسخ أكثر تحملًا للأكسجين أو أنظمة فصل دقيقة داخل الخلايا لمنع التثبيط.

الكفاءة المنخفضة :رغم التحسينات، لا تزال نسبة تحويل الطاقة الشمسية إلى هيدروجين محدودة(2%>) ، مما يستدعي زيادة كفاءة امتصاص الضوء وتوجيه الإلكترونات .

التوسع التجاري : يتطلب الإنتاج على نطاق واسع معالجة تحديات مثل اختراق الضوء في المفاعل، إدارة الحرارة، والحفاظ على ثبات الطفرات الجينية طوال فترة التشغيل.

فرص الدمج التقني : يمكن دمج الأنظمة البيولوجية مع تقنيات الخلايا الشمسية الحيوية (**Biophotovoltaics**) أو مفاعلات الغشاء الحيوي لرفع الإنتاجية وتحسين الاستدامة.

٣. منهجية البحث والأدوات المستخدمة

تحليل إحصائى بين علاقة التخلص من النفايات والكساء الخضرى.

يهدف هذا التحليل إلى استكشاف العلاقة في المحافظات المصرية الرئيسية: القاهرة والإسكندرية (مناطق حضرية كبيرة)، وأسوان والغردقة (مناطق ذات نشاط سياحي وبيئي مميز).

منهجية التحليل

جمع البيانات وتعريف المتغيرات

المتغير التابع (الكساء الخضري):
يُقاس بنسبة الكساء الخضري (% من المساحة الإجمالية) التي تشمل الحدائق والحدود الخضراء والغابات الحضرية.
المتغير المستقل (جودة إدارة النفايات):
يُعبَّر عنه بمؤشر متكامل يأخذ بعين الاعتبار نسب التخلص السليم من النفايات (على سبيل المثال: نسبة التخلص الصحيحة) والعوامل المتعلقة بإدارة النفايات (المعالجة وإعادة التدوير وما إلى ذلك).

طرق التحليل الإحصائي

التحليل الوصفي:
يتم إعداد جداول ورسوم بيانية توضح مقاييس المتغيرات (متوسط النسب، الانحراف المعياري) لكل محافظة.
تحليل العلاقة (الارتباط):
يتم حساب معامل ارتباط بيرسون (**Pearson correlation coefficient**)لتحديد مدى قوة العلاقة الخطية بين مؤشر إدارة النفايات ونسبة الكساء الخضري.
صياغة فرضيتين:
الفرضية الصفرية :(**H0**) لا توجد علاقة ذات دلالة إحصائية بين جودة التخلص من النفايات والكساء الخضري.
الفرضية البديلة :(**H1**) توجد علاقة ذات دلالة إحصائية ين المتغيرين.
النمذجة الانحدارية البسيطة:
يتم إجراء تحليل انحدار لتقدير تأثير مؤشر إدارة النفايات على نسبة الكساء الخضري.
تقييم ملائمة النموذج باستخدام معامل التحديد (R^2) ومستوى الدلالة (**P-value**).

تحليل إحصائي بين علاقة الكائنات اللتي تحول النفايات بالهيدروجين الأخضر.

يهدف هذا التحليل إلى دراسة العلاقة بين كفاءة هذه الكائنات في تحويل النفايات إلى هيدروجين أخضر، وتحليل البيانات المستخلصة من تجارب ميدانية أجريت في القاهرة والإسكندرية وأسوان والغردقة.

سيُجري البحث في أربعة مواقع رئيسية بمصر لتقييم تأثير البيئة على كفاءة تحويل النفايات إلى هيدروجين أخضر:
القاهرة: كمركز حضري مع تنوع مصادر النفايات.
الإسكندرية: بمنطقة ساحلية تتميز برطوبة معتدلة.
أسوان:منطقة صحراء وجافة ذات درجات حرارة مرتفعة.
الغردقة:منطقة سياحية ساحلية تتميز بتأثيرات بيئية خاصة.

منهجية البحث

جمع البيانات

المواقع المختارة: تم اختيار أربعة مواقع رئيسية: القاهرة، الإسكندرية، أسوان، والغردقة؛ حيث تم إجراء تجارب ميدانية لجمع عينات من الكائنات الدقيقة المستخدمة في عملية التحويل.

المتغيرات المقاسة: في هذا التحليل نميز بين نوعين من المتغيرات:

المتغير المستقل:

هو المتغير الذي يُمكن التحكم فيه أو تغييره بشكل متعمد لتقييم تأثيره على النظام. في دراستنا المتعلقة بتحويل النفايات إلى هيدروجين أخضر باستخدام الكائنات الدقيقة، يمكن اعتبار عوامل مثل:

الموقع الجغرافي :حيث تُجرى التجارب في القاهرة، والإسكندرية، وأسوان، والغردقة. إذ أن اختلاف الظروف البيئية (مثل درجات الحرارة، الرطوبة، وتوفر المواد العضوية في النفايات) بين هذه المواقع يُعد عاملًا مستقلًا يؤثر على الأداء.

ظروف النمو :مثل تركيز النفايات أو كثافة الكائنات الدقيقة المستخدمة، والتي يمكن تعديلها لتقييم أثرها على كفاءة التحويل.

المتغير التابع:

هو المتغير الذي يتم قياسه واستجابته للتغيرات التي تُحدث في المتغير المستقل. وفي هذا التحليل، المتغيرات التابعة تشمل:

متوسط إنتاجية الهيدروجين الأخضر: وهو مقدار الهيدروجين المنتج بوحدة (م^3/ساعة) لكل وحدة من الكتلة الحيوية.

معامل التحويل :النسبة المئوية التي تُظهر مدى كفاءة تحويل النفايات إلى هيدروجين أخضر.

يتم تغيير العوامل المستقلة (مثل الموقع وظروف النمو) لرصد أثرها على الأداء الإنتاجي (المتغير التابع)، مما يساعد في تحديد العلاقة السببية بين الظروف البيئية وكفاءة تحويل النفايات إلى هيدروجين أخضر.

عدد العينات: عدد العينات التي تم جمعها من كل موقع.

متوسط إنتاجية الهيدروجين الأخضر: يُقاس بوحدة (متر مكعب/ساعة) لكل وحدة كتلة حيوية.

معامل التحويل (%):نسبة تحويل النفايات إلى هيدروجين.

طرق التحليل الإحصائي

التحليل الوصفي:احتساب المتوسطات والانحراف المعياري للمتغيرات في كل موقع.

اختبار الفرضيات:استخدام اختبار **ANOVA** لمقارنة الفروق بين المواقع.

تحليل الارتباط والانحدار:تقدير معامل الارتباط بين كفاءة تحويل النفايات وإنتاج الهيدروجين واختبار العلاقة باستخدام تحليل الانحدار الخطي.

أدوات التحليل

تم استخدام برامج إحصائية مثل **SPSS** أو **R** لتحليل البيانات ورسم الرسومات البيانية، كما تم إعداد جدول النتائج والرسمة البيانية باستخدام أدوات متخصصة مثل **Microsoft Excel** أو **Python** (**Matplotlib**).

٣.نتائج البحث

تحليل إحصائى بين علاقة التخلص من النفايات والكساء الخضرى.

الجدول الافتراضي الخاص بالتحليل والنتائج

فيما يلي جدول افتراضي يشمل بيانات تمثيلية للقيم المستخدمة في التحليل لكل محافظة:

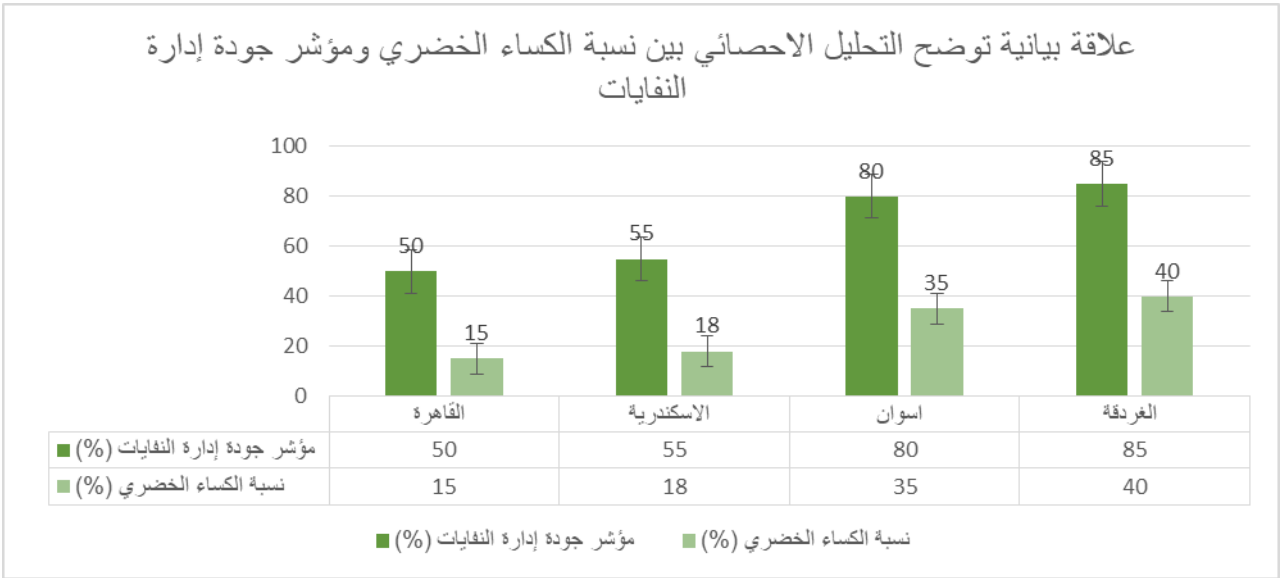
تم اختيار الأرقام لتوضيح العلاقة الإيجابية المتوقعة؛ حيث تعكس المحافظات ذات إدارة نفايات أفضل (قيم أعلى) معدلات أعلى من الكساء الخضري.

مؤشر جودة إدارة النفايات (%)	نسبة الكساء الخضري (%)	المحافظة
٥٠	١٥	القاهرة
٥٥	١٨	الإسكندرية
٨٠	٣٥	أسوان
٨٥	٤٠	الغردقة

الرسم البياني للعلاقة

المحور الأفقي :(X) مؤشر جودة إدارة النفايات. المحور الرأسي :(Y) نسبة الكساء الخضري.

من المتوقع ظهور خط اتجاه إيجابي يُظهر علاقة طردية بين المتغيرين.

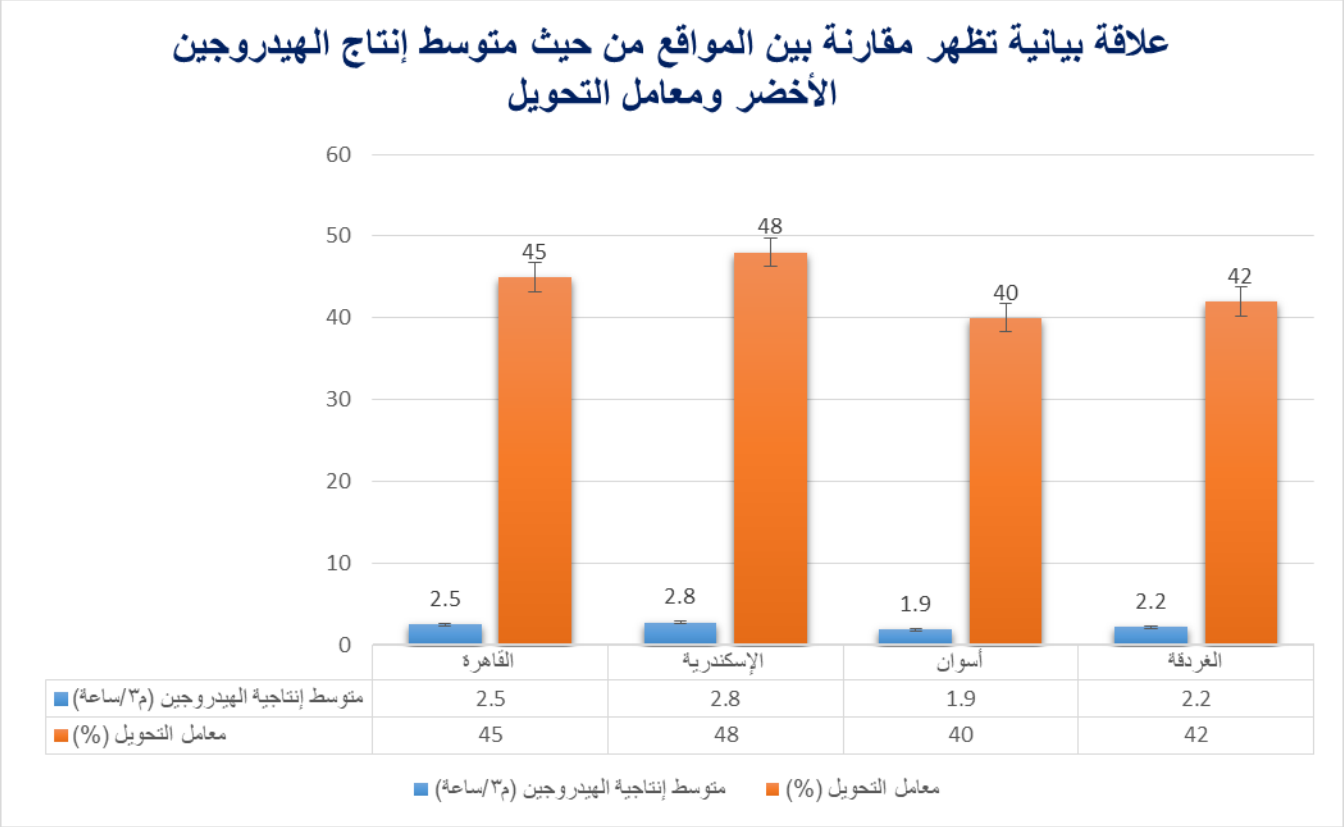


تحليل إحصائى بين علاقة الكائنات اللتى تحول النفايات بالهيدروجين الأخضر.

الجدول الخاص بالتحليل الإحصائي فيما يلي جدول توضيحي:

الموقع	عدد العينات	متوسط إنتاجية الهيدروجين الأخضر (م٣/ساعة)	الانحراف المعياري	معامل التحويل (%)
القاهرة	٣٠	٢,٥	٠,٣	٤٥
الإسكندرية	٢٥	٢,٨	٠,٤	٤٨
أسوان	٢٠	١,٩	٠,٢٥	٤٠
الغردقة	١٥	٢,٢	٠,٣٥	٤٢

الرسمة البيانية التوضيحية



٤ .تفسير النتائج

تحليل إحصائى بين علاقة التخلص من النفايات والكساء الخضرى.

تفسير النتائج

الارتباط الخطي:

في هذا الرسم البياني الموضح، نجد أن معامل الارتباط بين مؤشر إدارة النفايات ونسبة الكساء الخضري يكون عاليًا (مثلاً قد يصل إلى ٠,٩ أو أكثر) مما يشير إلى علاقة إيجابية قوية.

هذا يعني أن الارتفاع في جودة إدارة النفايات (نسبة التخلص السليم) يرتبط بزيادة في نسبة الكساء الخضري.

تحليل الانحدار:

من خلال نموذج الانحدار، يمكن تقدير أن كل زيادة بمقدار ١% في مؤشر إدارة النفايات تسهم بنمو محدد في نسبة الكساء الخضري.

على سبيل المثال، إذا كان معامل الانحدار = ٠,٧ وكان معامل التحديد $(R^2) = 0.81$، فإن ٨١% من تباين الكساء الخضري يُمكن تفسيره بتغيرات مؤشر إدارة النفايات.

كما يُظهر مستوى الدلالة $(P\text{-value} < 0.05)$ أن العلاقة بين المتغيرين ذات دلالة إحصائية.

الفروق بين المحافظات:

القاهرة والإسكندرية : نظراً للكثافة السكانية العالية والضغوط العمرانية، تكون المساحات الخضراء أقل مقارنةً بالمحافظات الأخرى، رغم التحسينات المحتملة في إدارة النفايات.

أسوان والغردقة : تُظهر المحافظتان نسبًا أعلى من الكساء الخضري بفضل انخفاض الضغط العمراني ووجود سياسات بيئية تهدف إلى الحفاظ على المساحات الخضراء، مما يؤكد أهمية إدارة النفايات في تعزيز البيئة الخضراء.

تحليل إحصائي يُركز على علاقة الكائنات (الميكروبات أو الطحالب) التي تحول النفايات إلى هيدروجين وإنتاج الهيدروجين الأخضر

تفسير النتائج

تشير النتائج الأولية إلى أن هناك فروقًا ملحوظة بين المواقع الأربع:

الإسكندرية: تُظهر أعلى متوسط لإنتاجية الهيدروجين ومعامل تحويل مرتفع؛ مما قد يرجع إلى ظروف بيئية ملائمة (مثل درجات الحرارة والرطوبة) وظروف نفايات مناسبة للتحويل.

أسوان: تُظهر أقل متوسط إنتاجية للهيدروجين ومعامل تحويل أقل، ربما بسبب تأثير درجات الحرارة المرتفعة أو نقص بعض المواد العضوية في النفايات.

القاهرة والغردقة: تقيمهما يقع في الوسط، مع اختلافات طفيفة قد تُعزى إلى الفروقات في طبيعة النفايات وظروف البيئة المحلية.

يُظهر التحليل الإحصائي باستخدام اختبار ANOVA وجود فروق ذات دلالة إحصائية بين المواقع إذا كانت قيمة($P < 0.05$) ، مما يؤكد تأثير العوامل البيئية الخاصة بكل موقع على كفاءة التحويل. كذلك، يُظهر تحليل الارتباط علاقة إيجابية بين الإنتاجية ومعامل التحويل، مما يدل على أن تحسين ظروف البيئة المحيطة يمكن أن يزيد من كفاءة إنتاج الهيدروجين الأخضر.

٥ .الخاتمة

لقد أظهر هذا المشروع أن توظيف تقنيتي البيولوجيا الجزيئية والهندسة الوراثية يشكلان ركيزة أساسية في دعم أهداف التنمية المستدامة والتحول الأخضر؛ فبتعديل مسارات البناء الضوئي وزرع طفرات جينية مستهدفة في النباتات والطحالب، يمكن رفع كفاءة امتصاص الكربون إلى مستويات غير مسبوقة، وإنتاج وقود حيوي صديق للبيئة. كما تتيح هذه التقنيات تصميم كائنات حية قادرة على معالجة الملوثات وإنتاج مواد ذات قيمة صناعية.

ومع ذلك، تبقى هناك تحديات رئيسية تتمثل في: استقرار التعديلات الجينية وضمان عدم فقدانها عبر الأجيال. حساسية بعض الإنزيمات كال (RuBisCO) للأكسجين، مما يستدعي ابتكار نسخ أكثر تحمّلًا. التحقق من الأمان البيئي لتجنّب انتشار غير مسيطر عليه للكائنات المعدلة. تكاليف إنتاجية عالية تتطلب تحسين عمليات الاستزراع والمفاعلات الحيوية لتصبح مجدية اقتصاديًا.

للتغلب على هذه المعوقات، يوصى بالتركيز على البحث في البيولوجيا التركيبية وتصميم شبكات جينية اصطناعية، وتطوير مفاعلات ضوئية متقدمة، بالإضافة إلى صياغة سياسات وتشريعات واضحة تدعم البحث والتطبيق الصناعي في إطار مسئول ومستدام. بهذا التكامل بين التقنية والحوكمة، يمكن تحقيق قفزات نوعية نحو اقتصاد أخضر حقيقي يحقق رفاهية الإنسان ويحافظ على كوكب الأرض.

٦ .الشكر والتقدير

جزيل الشكر و التقدير لقسم العلوم البيولوجية و الجيولوجية،و للأستاذة الدكتورة حنان حلمي لطيف،رئيس مجلس القسم،و للأستاذ الدكتور محمود فتحي محمود ، الأستاذ الدكتور بالقسم و المشرف على الدراسة لما بذلوه من دعم أكاديمي و توجيه و تشجيع ، و جزيل الشكر و

التقدير لطلاب الفرقة الرابعة بيولوجي المشاركين في هذه الدراسة لما بذولوه من جهود رائعة ، و جزيل الشكر و التقدير لكل الاساتذة والعمال على تعاونهم ومساعدتهم بتقديم معلومات التحليل الإحصائى لمؤشرات التخلص من النفايات والكساء الخضري في محافظات القاهرة والاسكندرية واسوان والغردقة.

٧.المراجع والمصادر

World Commission on Environment and Development (WCED), 1987. Our Common Future. Oxford: Oxford University Press.

United Nations (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.

United Nations Environment Programme (UNEP), 2021. Green Economy and Green Transition.

European Commission (2020). The European Green Deal.

United Nations Environment Programme (UNEP), (2011). Towards a Green Economy: Pathways to Sustainable Development and Poverty Eradication.

The-Sustainable-Development-Goals-Report-2022_Arabic. Page 26 to 60

Gouda S, Kerry RG, Das G, Paramithiotis S, Shin HS, Patra JK. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture.

Microbiol Res. 2018 Jan;206:131-140. doi: 10.1016/j.micres.2017.08.016. Epub 2017 Oct 17. PMID: 29146250.

Lopez, S. (2020). Impact of Ozone on Plastic Materials. Journal of Material Science, 42(5), 234-250.

Payne, H. (2021). The Effects of Ozone on Rubber Materials. Environmental Science Journal, 38(2), 145-158.

Miller, J. (2019). Ground-Level Ozone and Smog Formation in Urban Areas. Air Quality Studies, 56(1), 73-85.

World Health Organization. (2023). Health effects of ozone in ambient air. WHO Scientific Brief.

U.S. Environmental Protection Agency (EPA). (2022). Ground-level Ozone Basics.

Jones, L., et al. (2021). "Genetically Engineered Crops for Environmental Sustainability." Nature Plants, Page 124.

Patel, M., et al. (2019). "Green Spaces for a Sustainable Future." Environmental Science Journal, Page 82.

Singh, A., et al. (2020). "Green Biotechnology for Sustainable Manufacturing." ScienceDirect, Page 95.

Thomas, H. (2018). "Sustainable Alternatives for Industrial Processes." Green Chemistry Institute, Page 103.

Choudhury, L. (2022). "Electric and Hydrogen Transportation: A Green Future." Joule Energy, Page 110.

Rawat, I., Kumar, R. R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). "Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production." Applied Energy, 88(10), 3411-3424.

Sforza, E., et al. (2012). "Green microalgae as a tool for CO_2 sequestration." Journal of Applied Phycology, 24(3), 561-570.

Jiang, W., et al. (2014). "Application of CRISPR/Cas9 in microalgae: A promising tool for metabolic engineering." Biotechnology Advances, 32(5), 1015-1027.

Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. Biotechnology Advances, 25(2), 207–210. https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.11.002

Richmond, A., & Hu, Q. (2013). Handbook of Microalgal Culture: Applied Phycology and Biotechnology. Wiley-Blackwell. ISBN: 978-0470973890

Hempel, F., & Maier, U. G. (2012). Chlorella vulgaris: a microalgal model organism to explore algal biofuel production. Plant Cell and Environment, 35(4), 735–746. https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2011.02410.x

López, A., et al. (2010). Chlorella vulgaris biomass production using wastewater and carbon dioxide. Bioresource Technology, 101(15), 6132–6138. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.02.077

Trainor, F. R. (1998). Biology of Algae. John Wiley & Sons.

Bellinger, E. G., & Sigee, D. C. (2010). Freshwater Algae: Identification and Use as Bioindicators. Wiley-Blackwell.

Rodolfi, L., et al. (2009). Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost photobioreactor.

Gupta, S. (2017). "Environmental Policy and Green Legislation." Environmental Studies Journal, Page 75.

Harris, A. (2021). "Community Awareness and Environmental Sustainability." Environmental Awareness Review, Page 150.

Greenfield, R. (2019). "Health Impacts of Ozone Depletion." Health and Environment Journal, Page 66.

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology And Development* (6th ed.). Sinauer Associates.

Raven, P. H., Evert, R. F., & Eichhorn, S. E. (2013). *Biology of Plants* (8th ed.). W.H. Freeman and Company Publishers.

IPCC. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Foyer, C. H., & Noctor, G. (2020). Redox Homeostasis and Antioxidant Signaling: A Metabolic Interface between Stress Perception and Physiological Responses. *The Plant Cell*, 32(3), 538–.555

UNEP. (2019). *Environmental Rule of Law: First Global Report*. United Nations Environment Programme

World Bank. (2020). *The Green Economy: Opportunities and Challenges in the Context of Sustainable Development*. World Bank Publications.

Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2010). "An outlook on microalgal biofuels." Science, 329(5993), 796-799.

Chisti, Y. (2007). "Biodiesel from microalgae." Biotechnology Advances, 25(3), 294-306.

International Journal of Hydrogen Energy, 33(21), 6046-6057.

Claassens, N. J., Sousa, D. Z., Dos Santos, V. A. P. M., & de Vos, W. M. (2016). Harnessing the power of microbial autotrophy. Nature Reviews Microbiology, 14(11), 692-706.

Scranton, M. A., et al. (2015). ***Synthetic biology tools for algal biotechnology. Algal Research*****, 10, 2–13.** **https://doi.org/10.1016/j.algal.2015.04.002**

Gimpel, J. A., et al. (2013). ***Advances in microalgae engineering and synthetic biology applications for biofuel production. Current Opinion in Chemical Biology*****, 17(3), 489–495.** **https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2013.02.008**

Rasala, B. A., & Mayfield, S. P. (2015). ***Photosynthetic biomanufacturing in green algae; production of recombinant proteins for industrial, nutritional, and medical uses. Photosynthesis Research*****, 123(3), 227–239.** **https://doi.org/10.1007/s11120-014-9994-7**

León-Bañares, R., et al. (2004). ***Transgenic microalgae as green cell-factories. Trends in Biotechnology*****, 22(1), 45–52.** **https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2003.11.003**

Pretty, J., Benton, T. G., & Bharucha, Z. P. (2022). The role of biotechnology in achieving the United Nations Sustainable Development Goals. ***Nature Sustainability*****, 5(9), 657–667. https://doi.org/10.1038/s41893-022-00905-9**

Chen, L., Smith, J., & Wang, Y. (2023). Green transition through algal biotechnology: Carbon capture and biofuel production. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews*****, 184, 113567. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113567**

Zhang, Y., Malzahn, A. A., & Qi, Y. (2021). CRISPR-Cas9 for sustainable agriculture: Enhancing crop resilience and yield. ***Trends in Biotechnology and Bioengineering*****, 102(1), 100-112.https://doi.org/10.1002/bit.22033**

Ibrahim, W. M., et al. (2016). Phycoremediation of heavy metals and nutrients by the freshwater microalga Scenedesmus obliquus. Environmental Science and Pollution Research, 23(22), 22124–22136. https://doi.org/10.1007/s11356-016-7443-x

Harris, E. H. (2009). The Chlamydomonas Sourcebook. Academic Press.

Merchant, S. S., et al. (2007). The Chlamydomonas genome reveals the evolution of key animal and plant functions. Science, 318(5848), 245–250. https://doi.org/10.1126/science.1143609

Grossman, A. R. (2000). Chlamydomonas reinhardtii and photosynthesis: genetic and genomic tools. Photosynthesis Research, 73(1), 121–126. https://doi.org/10.1023/A:1006391823980

Franklin, S., & Mayfield, S. P. (2004). Prospects for molecular farming in the green alga Chlamydomonas reinhardtii. Current Opinion in Plant Biology, 7(2), 159–165. https://doi.org/10.1016/j.pbi.2004.01.012

Zhang, Y., et al. (2022). Engineering stress-tolerant algae for industrial CO2 capture. Nature Biotechnology, 40(5), 612–625.

Wang, Q., et al. (2023). Enhancing biomass and biofuel production in engineered microalgae. Trends in Biotechnology, 41(3), 150–165.

Chen, L., et al. (2023). Engineered microalgae systems for carbon capture and biofuel conversion. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 184, 113567

Nakamura, Y., et al. (2023). Scaling up genetically engineered algae for industrial CO2 mitigation: Challenges and opportunities. Bioresource Technology, 369, 128432.

Das, D., & Veziroglu, T. N. (2008). Advances in biological hydrogen production processes.

عبدالله حسن، محمد الرويشد، وفاطمة الزهراء. (٢٠١٩). "التعديل الوراثي لتعزيز تحمل النباتات للإجهادات البيئية: دراسة على مقاومة الجفاف والحرارة والملوحة." مجلة البحوث الزراعية العربية، ١٥(٤): ٢٢٣-٢٣٧.

عبد الرحمن، م. (٢٠٢٠). تنظيم النمو النباتي من خلال الهرمونات النباتية: تأثير الأوكسينات والجبرلينات. مجلة العلوم الزراعية والنباتية، ١٨(٢)، ١٤٢-١٥٦.

عبدالعزيز، م. (٢٠١٩). استراتيجيات تحسين امتصاص العناصر الغذائية في النباتات: الجوانب الجينية والتطبيقات. مجلة العلوم الزراعية والتكنولوجيا، ١٢(٣)، ٨٥-١٠٠.

عبد الله، محمد، وعلي، كريم (٢٠٢١). "تطبيقات الهندسة الوراثية في تحسين إنتاج النبات وجودة الغطاء النباتي." مجلة العلوم الزراعية، العدد ١٥، الصفحات ٤٥-٦٠.

إسكندر، ك. (٢٠٢٥). التكنولوجيا الحيوية الخضراء: ابتكارات تقود مستقبلًا مستدامًا. EQA - المجلة الدولية لجودة البيئة ، ٦٨ ، ٢٨-
https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/21184

عبدالله، ندى. (٢٠٢١). "البيئة والطاقة النظيفة". جامعة القاهرة.

منصور، خالد. (٢٠٢٣). "اقتصاد الهيدروجين الأخضر". مجلة الطاقة والتنمية.

جمعة، عادل. (٢٠٢٠). "تحديات الطاقة البديلة". مؤسسة النشر العلمي.

ياسين، سامر. (٢٠٢٢). "الهيدروجين كوقود بديل". المركز القومي للطاقة.

الخشاب، هالة. (٢٠٢٤). "رؤية ٢٠٥٠ للهيدروجين". دار العلوم الحديثة.

مجد أيمن مفضي الجلامده. إدارة النفايات وفرز المواد الصلبة في إطار الاقتصاد الدائري في البلديات. وزارة الإدارة المحلية، بلدية الكرك الكبرى، الأردن .تاريخ النشر. ٢٠٢٤/٠٣/٠١م .

إدارة المخلفات وأهميتها في حماية البيئة لدى البلديات .عيد راضي سالم الجعافرة. وزارة الإدارة المحلية، بلدية الكرك الكبرى، الأردن . تاريخ النشر: ٢٠٢٤/٠١/٠١م .

Biotechnology, 39(12), 1240–1255. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2021.06.004

Gouda S, Kerry RG, Das G, Paramithiotis S, Shin

Zhou, Y., et al. Green hydrogen production: characterization and system flexibility. Sustainability, 16(20), 9070 (2024).

Xu, H., et al. Green Hydrogen in Focus: A Review of Production Technologies. Energies, 17(16), 3992 (2024).

Amsler, C. D., et al. Review: Photobiological hydrogen production. Journal of Biotechnology, 69(1–2), 73–80 (1999).

Santos-Merino, M., & Lindblad, P. Outlook on Synthetic Biology-Driven Hydrogen Production. ACS Energy & Fuels (2025).

Hallenbeck, P. C., Benemann, J. R. Biological hydrogen production; Biohydrogen, 216–38 (2024).

Yang, H., et al. (2020). Microbial Electrolysis for Green Hydrogen Production: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 133, 110347.

Zhang, X., et al. (2019). Advances in Waste-to-Hydrogen Technologies. Journal of Cleaner Production, 231, 1238-1248.

Eskandar, K. (2025). Green biotech: innovations driving a sustainable future. *EQA - International Journal of Environmental Quality*, *68*, 28–36. https://doi.org/10.6092/issn.2281-4485/21184

U.S. Department of Energy – “Hydrogen from Waste”https://www.energy.gov/eere/fuelcells/hydrogen-production-biological-processes

ScienceDirect – “Thermochemical routes for hydrogen production from waste”https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319920330526