

تكامل

نقطة إنطلاق لإقتصاد دائري

مسودة: v 0.18

المقدمة

مبادرة تكامل هي مجموعة من المشاريع الصغيرة المتكاملة التي تهدف إلى إنشاء وحدة اقتصادية مستدامة، وتوفير مصادر للطاقة المتجددة من خلال الوقود الحيوي، والعمل على سد أي فجوات غذائية في السوق المحلي في منطقة الطور وسيناء.

هذا المشروع هو مبادرة تكاملية بين المصريين في الخارج والمصريين داخل البلاد لإنشاء وحدة إنتاجية اقتصادية دائرية متكاملة تعمل على تحقيق المنفعة لجميع الأطراف المعنية وفقًا لاحتياجاتهم المختلفة. ويهدف إلى توفير فرصة استثمارية تربط المصريين بالخارج بوطنهم الأم من خلال استثمارات مباشرة تضمن لهم مصدر دخل استثماري مستدام، مع تحقيق أثر تنموي محلي يعزز الاقتصاد الوطني. ويسهم المشروع في تطوير السوق المحلية عبر توفير استثمارات أجنبية مباشرة – حتى وإن كانت من المصريين بالخارج – مما يساعد على خلق فرص عمل جديدة، وتعزيز سلاسل القيمة في قطاعات حيوية مثل الطاقة والزراعة، فضلًا عن سد الفجوات في الموارد الأساسية التي تحتاجها شبه جزيرة سيناء، والتي تعتمد حاليًا على الإمدادات الحكومية. إن هذا النموذج الاقتصادي يحقق تكاملًا بين رأس المال المصري في الخارج والاحتياجات التنموية المحلية، ويقدم نموذجًا يمكن تكراره مستقبلاً في مشروعات أخرى تهدف إلى التنمية المستدامة وربط المغتربين بمسيرة التطوير في مصر.

إلى جانب البعد الاقتصادي، فإن مدينة الطور وسيناء بوجه عام تحمل عمقًا هوياتيًا بالغ الأهمية في صميم أهداف المشروع، نظرًا لقيمتها القومية والسياحية والدينية، التي جعلتها عبر التاريخ نقطة تلاقي ثقافي وحضاري. إن الحفاظ على هذا العمق الهوياتي وتعزيزه، خاصة لدى الأجيال الثانية والثالثة من المصريين في الخارج، يُعد جزءًا من رؤية المشروع، حيث يسعى إلى إبقاء الرابط قويًا بين هذه الأجيال ووطنهم الأم من خلال الاستثمار في مشاريع تنموية مستدامة تساهم في الحفاظ على هوية سيناء الفريدة، مع احترام قيمها التراثية والدينية وتعزيز الاستفادة الاقتصادية منها بما لا يخل بمكانتها التاريخية والسياحية.

على الصعيد الاستراتيجي، يتماشى المشروع مع رؤية مصر 2030 واستراتيجية الطاقة المستدامة لعام 2035 التي تركز على تنويع مصادر الطاقة وتقليل الانبعاثات. وقد أكدت مصر في قمة المناخ COP27 التزامها بتنفيذ مشروعات رائدة في مجالات الطاقة النظيفة وخفض الكربون. كما أطلقت الحكومة المصرية حديثًا سوقًا طوعيًا لتداول أرصدة الكربون في البورصة المصرية بهدف تحفيز مشروعات خفض الانبعاثات [٥٥]. وعليه، فإن مشروع إنتاج الديزل الحيوي من الأزولا يُعتبر مساهمة مباشرة في تحقيق هذه الأهداف عبر توفير وقود متجدد منخفض الانبعاثات والمشاركة المحتملة في آلية أرصدة الكربون.

تكمن أهمية المشروع أيضًا في تلبية احتياجات الطاقة المحلية في منطقة سيناء والمناطق النائية. إن توفير وقود ديزل حيوي محلي يمكن أن يدعم خطط التنمية في سيناء عبر تأمين مصدر طاقة للمولدات والآليات الزراعية ووسائل النقل، بشكل أكثر استدامة وأقل تأثيرًا على البيئة مقارنة بالوقود الأحفوري التقليدي. وبالإضافة إلى ذلك، يبرز المشروع قيمة الأزولا بوصفه موردًا وطنيًا غير مستغل بشكل كافٍ حتى الآن، مما يفتح آفاقًا جديدة للتنمية الزراعية والصناعية في آن واحد.

حجر الزاوية في هذا المشروع هو تدشين منظومة متكاملة لإنتاج الديزل الحيوي من نبات الأزولا في شبه جزيرة سيناء، بما يتوافق مع الاستراتيجيات الوطنية للطاقة المستدامة في مصر. يعدّ المشروع استراتيجيًا لعدة اعتبارات؛ فهو يستثمر الأزولا - وهو نبات سرخسي مائي سريع النمو - كمصدر غير تقليدي للوقود، مما يسهم في تعزيز أمن الطاقة والحدّ من الاعتماد على الواردات البترولية. تجدر الإشارة إلى أن مصر تستورد جزءًا كبيرًا من احتياجاتها من وقود الديزل لتلبية الطلب المحلي [٥٦]،

ولذلك فإن تطوير إنتاج محلي لبدائل الديزل التقليدي يحمل أهمية بالغة في تقليل فاتورة الاستيراد ودعم الاستقلالية في مجال الطاقة.

ومن ثم، يحقق المشروع تكاملاً مع سياسات مصر في الطاقة المستدامة. فالحكومة المصرية وضعت ضمن أولوياتها زيادة مساهمة المصادر المتجددة وغير التقليدية في مزيج الطاقة الوطني، سواء من خلال التوسع في الطاقة الشمسية والرياح أو من خلال الوقود الحيوي. ويأتي هذا التوجه انسجاماً مع استراتيجية الطاقة المتكاملة والمستدامة حتى 2035 والتي تسعى لرفع نسبة الطاقة النظيفة وتقليل الانبعاثات [٥٥]. يسهم المشروع في هذه الجهود عبر إدخال مصدر متجدد للوقود يمكن أن يُخفّض من البصمة الكربونية لقطاع النقل والزراعة، ويعزّز وفاء مصر بالتزاماتها في اتفاق باريس للمناخ وبخططها الوطنية لخفض انبعاثات الغازات الدفيئة.

تفاصيل المشروع

الرؤية العامة

يمتد المشروع على مساحة إجمالية تبلغ حوالي 100 هكتارات في منطقة الطور بسيناء. تم تخصيص 25% من هذه المساحة لإقامة مزارع الأزولا المائية، وإنشاء المصانع الحيوية (Bio-refineries) والبنية التحتية الضرورية لاستخلاص الزيوت وإنتاج الوقود الحيوي وإعادة تدوير المخلفات. ويتم تصميم هذه المنشآت الحيوية لإعادة تدوير الموارد بشكل متكامل وإنتاج فائض من الطاقة يكفي لتلبية احتياجات المشروع بالكامل. أما الجزء المتبقي فيخصص لإنشاء نموذج زراعي يعتمد على الاقتصاد الدائري، حيث تتكامل الأنشطة الزراعية والصناعية بشكل يضمن الاستخدام الأمثل للموارد وإعادة تدوير المخلفات في منظومة إنتاجية مستدامة.

الاقتصاد الدائري هو نموذج إنتاج مستدام يهدف إلى إعادة استخدام الموارد وتقليل النفايات عبر دورات مغلقة تزيد الكفاءة وتقلل الأثر البيئي. في هذا السياق، يتم دمج عدة مشاريع زراعية وصناعية ضمن الـ 75% من مساحة المشروع لتحقيق التكامل الإنتاجي والبيئي.

المرحلة التجريبية: المشروع التجريبي

تُخصص هذه المرحلة الأولية لتنفيذ مشروع تجريبي على مساحة 20 فداناً يتم استئجارها خصيصاً لهذا الغرض. تغطي هذه المرحلة جميع الأنشطة التجريبية المتعلقة بزراعة الأزولا، وعمليات التكسير الحراري (Pyrolysis)، والتخمير الحيوي، وعملية الأسترة (Transesterification). كما تتضمن استكمال كافة المستندات الرسمية المطلوبة والحصول على الموافقات التنظيمية اللازمة. في هذه المرحلة، سيتم إعادة تقييم دراسة الجدوى وإجراء التعديلات الضرورية على الخطة الاستراتيجية والتنفيذية للمشروع، وذلك بناءً على نتائج التجارب الميدانية والمعطيات العملية التي ستتحقق.

المرحلة التأسيسية: تدشين البنية التحتية لإعادة التدوير

يهدف هذا النموذج إلى إنشاء نظام بيئي زراعي متكامل يستفيد من كل الموارد المتاحة، نموذج مستدام يعتمد على الاقتصاد الدائري بحيث لا توجد نفايات، بل يتم إعادة استخدام كل المخلفات لإنتاج مواد جديدة ذات قيمة. عبر هذا التكامل، يتم تعزيز الأمن الغذائي، وتحقيق الاستدامة البيئية، وخفض التكاليف التشغيلية، وزيادة الإنتاجية الزراعية دون الحاجة إلى استهلاك مفرط للموارد الطبيعية.

بهذه الطريقة، يصبح المشروع مركزاً اقتصادياً محلياً يقدم حلاً مستداماً للزراعة والطاقة والغذاء، مما يعزز الاقتصاد المحلي ويخلق فرص عمل مستدامة.

إجمالي مساحة المشروع	100 هكتار	100 %
مزارع زراعة الأزولا	25 هكتار	25 %
مزارع تعتمد على الاقتصاد الدائري	75 هكتار	75 %

إنتاج الأزولا ومعدلات الاستخلاص: يتميز نبات الأزولا بمعدل نمو سريع جداً، حيث يمكنه مضاعفة كتلته الحيوية خلال فترة 2-5 أيام في الظروف الملائمة في البيئات المائية الغنية بالمغذيات (مثل حقول الأرز الآسيوية)، يمكن أن يصل إنتاج الأزولا إلى حوالي 8-10 طن من الوزن الطازج لكل هكتار في الدورة الزراعية الواحدة. وقد سُجِّلَتْ إنتاجية قصوى بنحو 37.8 طن وزن طازج/هكتار في بعض التجارب، أي ما يعادل 2.78 طن وزن جاف/هكتار. وعلى أساس سنوي، تشير دراسات إلى إمكانية تحقيق إنتاج يصل إلى 83 طن وزن جاف/الهكتار/السنة في الظروف المثالية مع الحصاد المنتظم كل 1-2 أسبوع [OBI]. وبناءً على هذه الأرقام، فمن المتوقع أن ينتج المشروع كمية كبيرة من الكتلة الحيوية للأزولا سنوياً. فعلى سبيل المثال، حتى بافتراض معدل إنتاج متحفظ نسبياً (لنقل 30 طن وزن جاف لكل هكتار سنوياً)، يمكن للمساحة المزروعة بالأزولا (حوالي 26 هكتار) أن تولد ما يقارب 780 طن من الأزولا الجافة سنوياً.

يمر إنتاج الوقود الحيوي من الأزولا بعدة مراحل لاستخلاص أقصى قيمة من الكتلة الحيوية، وذلك على النحو التالي:

• استخلاص الزيت النباتي من الأزولا:

يحتوي نبات الأزولا على نسبة زيوت طبيعية في بنيته. وتتفاوت التقديرات حول محتوى الزيت في الأزولا على أساس الوزن الجاف، حيث وجد أن الأزولا تحتوي تقريباً 8% من وزنها الجاف زيتاً ليبيدية قابلة للاستخلاص [OBI]. بل أشارت بعض الدراسات إلى إمكانية زيادة محتوى الدهون إلى نحو 11% في مراحل النمو التكاثري للأزولا. تتم عملية الاستخلاص عبر تجفيف الكتلة الحيوية ثم استخدام طرق فيزيائية وكيميائية (مثل العصر الميكانيكي أو الاستخلاص بالمذيبات) للحصول على الزيت الخام. وقد حققت تجارب مخبرية استخلاصاً للزيت بمردود يصل إلى 34% من وزن الأزولا الجاف باستخدام مذيبات عضوية وتقنيات محسنة [OBI]، مما يبرز الإمكانية العالية لاستخراج كميات كبيرة من الزيت في الظروف المثلى. في نطاق المشروع، من المتوقع عملياً إنتاج زيت يعادل حوالي 5-10% من الوزن الجاف للأزولا. وعليه، قد ينتج عن 780 طن من الأزولا الجافة سنوياً نحو 60 طن من الزيت النباتي الخام (كقيمة متوسطة تقديرية). هذا الزيت هو المادة الأولية لإنتاج الديزل الحيوي.

• تخمير الكتلة الحيوية لإنتاج الإيثانول:

بعد استخراج الزيت من الأزولا، تبقى كمية كبيرة من الكتلة الحيوية المنزوعة الزيت (غنية بالكربوهيدرات والبروتين). يتم توجيه هذه الكتلة إلى عملية تخمير حيوي لإنتاج الإيثانول. يتضمن ذلك معالجة المادة الحيوية بالأحماض والإنزيمات لتحليل السليولوز والنشويات إلى سكريات بسيطة، ثم إضافة خمائر (مثل خميرة الخبز *Saccharomyces*) لتخمير السكريات إلى

إيثانول. أظهرت البحوث أن كل 1 كجم من المادة الجافة للأزولا يمكن أن ينتج حوالي 90 جرامًا من الإيثانول عبر التخمر [٥٥]. وبناء على ذلك، يمكن نظريًا توليد ما يقارب 70-80 طن من الإيثانول سنويًا من الكتلة الحيوية المتبقية (بحال توفرت 780 طن جاف للسنة). يتميز إنتاج الإيثانول هنا بأنه يُستخدم بشكل تكاملي في عملية إنتاج الديزل الحيوي ذاتها (كما سنوضح)، مما يقلل الحاجة إلى كحول خارجي (الميثانول) ويجعل العملية أكثر اعتمادًا على موارد متجددة داخلية.

• التكسير الحراري (الانحلال الحراري) للمنتجات الثانوية:

بعد مرحلة التخمر، تبقى مخلفات صلبة تشمل اللينين وبقايا الكتلة الحيوية غير المتحللة إضافة إلى البكتيريا الميتة من عملية التخمر. هذه المخلفات الغنية بالكربون تُعالج بعملية التكسير الحراري (Pyrolysis) في مفاعل خاص عند درجات حرارة مرتفعة (حوالي 400-500°م) وفي غياب الأكسجين. الهدف من ذلك هو تحويل هذه المخلفات إلى منتجات ذات قيمة: فحم حيوي، وزيت حيوي، وغاز صناعي. تشير الدراسات إلى أن الانحلال الحراري المباشر للأزولا يمكن أن يحوّل نحو ثلث وزنها الجاف إلى زيت حيوي سائل، وحوالي 40% إلى فحم حيوي صلب، والنسبة المتبقية غازات [٥٦]. على سبيل المثال، حققت تجربة تفكيك حراري بدون عامل حفاز عائذ زيت حيوي يقارب 30.6% من وزن الأزولا، وفحم حيوي 39.5%، وغازات (30%) [٥٧]. وعند استخدام حفّازات معينة يمكن تقليل كمية الزيت وزيادة جودة طاقته ورفع حصة الفحم الحيوي [٥٨]. في إطار المشروع، من المتوقع معالجة كافة المخلفات العضوية بهذه التقنية لضمان عدم وجود أي فاقد غير مستغل، ولتعظيم العوائد من المنتجات الفرعية. بذلك يتم إنتاج كميات سنوية تقديرية من الفحم الحيوي ربما تتجاوز 200 طن، والزيت الحيوي السائل بحدود 150-200 طن، بالإضافة إلى الغاز الصناعي الناتج والذي سيُستفاد منه لتوليد الطاقة اللازمة للتشغيل الداخلي. الجدول التالي يلخص مسارات المعالجة وكميات المنتجات المتوقعة سنويًا (تقديرات):

المكوّن المعالج	العملية المستخدمة	المنتجات الرئيسية (سنويًا)
زيت الأزولا الخام	الأسطرة (مع الإيثانول)	ديزل حيوي: ~60-70 طن جلسرين: ~6-7 طن
الكتلة الحيوية المنزوعة الزيت	التخمير الحيوي (إيثانول)	إيثانول: ~70 طن (يُستخدم معظمه داخليًا)
المخلفات الصلبة بعد التخمر	التكسير الحراري (500°م)	فحم حيوي: ~250 طن زيت حيوي: ~180 طن غاز اصطناعي: مكافئ ~180 طن

(ملاحظة: الأرقام أعلاه تقديرية افتراضية تعتمد على فرضيات إنتاج معتدلة لكتلة أزولا جافة بنحو 780 طن/سنة ومردود عمليات ضمن النطاق المذكور في الدراسات. الأرقام الفعلية قد تختلف وفق كفاءة التشغيل والظروف البيئية.)

تفاصيل المعالجة والإنتاج: تتم عملية إنتاج الديزل الحيوي عبر تفاعل كيميائي يسمى الأسطرة التحويلية (Transesterification)، حيث يتفاعل الزيت المستخلص من الأزولا مع كحول (الإيثانول الحيوي المنتج) بوجود محفز (هيدروكسيد البوتاسيوم مثلاً). نتيجة هذا التفاعل تتحول الأحماض الدهنية في الزيت إلى إسترات الكيل (وهي الديزل الحيوي المطلوب) وينتج أيضًا الجلسرين كمادة ثانوية. سيتم استخدام الإيثانول الحيوي المنتج محليًا بديلاً عن الميثانول التقليدي لضمان أن جميع مدخلات العملية حيوية المصدر. بعد التفاعل، تُفصل طبقة الديزل الحيوي عن الجلسرين وتنقى للحصول على وقود بمعايير مطابقة للمواصفات. الجلسرين الخام يُجمع لمعالجته أو يبيعه كما سنوضح في قسم المنتجات الثانوية.

فيما يخص التخمر، تتم في مفاعل حيوي (bioreactor) يمكن التحكم بحرارته ودرجة الحموضة فيه. سيجري أولاً تحليل مسبق للمادة العضوية (عبر إضافة حمض مخفف ثم معادلته، أو استخدام إنزيمات خاصة) لتحويل أكبر قدر من الكربوهيدرات المعقدة إلى سكريات بسيطة قابلة للتخمير. ثم تضاف الخميرة وتبدأ عملية التخمر لإنتاج مزيج من الإيثانول وثنائي أكسيد الكربون. يتم تقطير الإيثانول الناتج لفصله بدرجة نقاء عالية لاستخدامه. جزء من الإيثانول قد يُعاد استخدامه مباشرة في دورة

الأسطرة (حيث إن التفاعل يتطلب كحولاً بنسبة محددة)، مما يقلل شراء مواد كيميائية من الخارج. الفائض من الإيثانول - إن وُجد - يمكن الاستفادة منه كوقود بديل أو بيعه تجارياً (مثل استخدامه مذيئاً أو وقوداً لمواقد نظيفة).

بالنسبة إلى التكسير الحراري، سُنْفَذ في وحدات مخصصة تعمل بعملية مستمرة أو شبه مستمرة لتحقيق كفاءة أعلى. المخلفات الصلبة المجففة تُغذَى إلى فرن الحرق اللاهوائي، حيث تتحلل حرارياً إلى فحم حيوي يبقى في المفاعل، وغازات وبخار مكثف يُحوّل عبر مبادل حراري إلى سائل (الزيت الحيوي). سيتم تصميم النظام بحيث يُستغل الغاز الصناعي (Syngas) الناتج - وهو مزيج من أول وثاني أكسيد الكربون والهيدروجين وغازات خفيفة أخرى - كوقود لتسخين المفاعل نفسه أو لتوليد طاقة كهربائية/حرارية للموقع. هذا التكامل يجعل العملية أكثر اعتماداً على الطاقة الذاتية وأقل اعتماداً على مصادر وقود خارجية.

إدارة المنتجات الثانوية: يولي المشروع عناية خاصة للاستفادة الكاملة من جميع المنتجات الثانوية المتولدة، لضمان تحقيق مفهوم المصفاة الحيوية المتكاملة وعدم طرح أي مخلفات غير مستغلة. يشمل ذلك:

- الجلسرين:

سيتم جمع الجلسرين الخام الناتج من عملية إنتاج الديزل الحيوي (والذي يعادل تقريباً 10% من كمية الزيت المعالج). يحتوي الجلسرين الخام عادةً على شوائب (كالميثانول أو الإيثانول الزائد والكاتيونات) ويتم تنقيته إلى درجة تقارب 80-85%. يمكن تسويق هذا الجلسرين للاستخدام في صناعات محلية مثل صناعة الصابون والمنظفات أو كمادة أولية في مصانع الكيماويات (كإنتاج الجلسرين المقطر أو مشتقاته). كما يمكن استخدام الجلسرين كركيزة لإنتاج البيوجاز عبر الهضم اللاهوائي أو كمضاف علفي بكميات محدودة، ما يفتح عدة خيارات أمام المشروع لتحقيق دخل إضافي أو فوائض بيئية من خلاله.

- الفحم الحيوي (Biochar):

يمثل الفحم الحيوي أحد المخرجات الأساسية من وحدة التكسير الحراري. سيتم تبريد الفحم الحيوي وجمعه. يتميز هذا الفحم بمسامية عالية وقدرة على تحسين خصائص التربة، كما يحتوي على نسبة كبيرة من الكربون الثابت. سيستخدم الفحم الحيوي في تحسين التربة في المناطق الصحراوية المحيطة (سواء ضمن المشروع لزراعة أخرى أو بيعه للمزارعين في سيناء). إضافة الفحم الحيوي إلى التربة الرملية ثبت أنها تزيد من قدرتها على الاحتفاظ بالمياه وتقلل معدلات الرشح بشكل ملحوظ (Böhl, 2008)، مما يساعد في استصلاح الأراضي وتحسين الإنتاجية الزراعية مع تقليل استهلاك المياه - وهي فائدة مهمة في بيئة شبه جزيرة سيناء الجافة. إلى جانب ذلك، يُسهم دفن الفحم الحيوي في التربة في عزل الكربون على المدى الطويل (حيث يبقى الكربون ثابتاً في التربة لعقود أو قرون)، مما يمنح المشروع ميزة بيئية إضافية من حيث خفض صافي انبعاثات الكربون.

- الغاز الصناعي:

سيتم استغلال الغاز الناتج من التكسير الحراري - الذي يضم مزيجاً من غازات قابلة للاحتراق - كوقود لتوليد الطاقة في الموقع. فعبر حرق هذا الغاز في مولدات أو مراحل خاصة، يمكن إنتاج طاقة كهربائية أو حرارة تُغَطّي جزءاً كبيراً من احتياجات العمليات (مثل تسخين المفاعل الحراري، تشغيل معدات الاستخلاص والتقطير). بهذه الطريقة يقل اعتماد المشروع على شبكة الكهرباء أو على وقود أحفوري خارجي، مما يقلل التكاليف التشغيلية ويحسن البصمة الكربونية للعملية. أي فائض من الغاز يمكن معالجته لتخليصه من الشوائب واستخدامه وقوداً صناعياً في أفران مصنعية أو بيعه إن أمكن ذلك ضمن حدود الأمان والاشتراطات البيئية.

- الزيت الحيوي (Bio-oil):

السائل الزيتي الناتج من التكثيف في عملية الانحلال الحراري سيتم تجميعه وتخزينه. الزيت الحيوي له خصائص تختلف عن الوقود الأحفوري التقليدي (فهو أكثر لزوجة وحموضة وأقل استقراراً كيميائياً)، لكنه يعد وقوداً بديلاً يمكن

استخدامه في تطبيقات معينة. من المخطط استخدام جزء من الزيت الحيوي كوقود في الغلايات لتوليد بخار أو حرارة لعمليات المعالجة داخل المشروع ذاته، مما يقلل أيضًا من استهلاك أي وقود أحفوري. كما توجد إمكانية لتطوير هذا الزيت من خلال معالجته (مثلًا بالهدرجة) لتحويله إلى وقود يشبه الديزل أو الكيروسين يمكن بيعه كمنتج إضافي. في المدى القريب، يمكن تسويق الزيت الحيوي الخام كوقود للصناعات الثقيلة (مثل مصانع الأسمت أو أفران الطوب) التي قد تستعمل زيتًا منخفض الجودة في عملياتها، وبالتالي يتحقق دخل إضافي وتقليل للهدر.

المرحلة النهائية: تكامل وتوطين الاقتصاد الدائري

بعد تدشين البنية التحتية الأولية لإعادة التدوير، سيتم الاستفادة من المنشآت والبنية التحتية التي تم إنشاؤها مسبقًا لتوطين باقي الأنشطة الزراعية والصناعية والاقتصادية في إطار الاقتصاد الدائري. ستشمل هذه المرحلة توسيع وتكامل المشاريع الأخرى مثل زراعة الأشجار (الأكاسيا والنخيل والزيتون)، تربية الأسماك والروبيان والطيور، وإنتاج الفحم الحيوي والسماد العضوي. وسيتم التركيز بشكل خاص على استغلال الموارد المتاحة محليًا بشكل مستدام، وتلبية الاحتياجات المحلية من الطاقة والأغذية ومنتجات السماد العضوي، مما يعزز تماسك المشروع اقتصاديًا وبيئيًا، ويساهم في تحسين ظروف الحياة والتنمية في المنطقة.

المشروعات المتكاملة المقترحة للمستثمرين في الـ 75% من مساحة المشروع

1. زراعة أشجار الأكاسيا والنخيل والزيتون:

- التكامل مع النظام: توفر الأشجار الظل لمزارع الأزولا، وتساعد جذورها العميقة في تحسين خصوبة التربة واحتباس المياه.
- الفائدة الإضافية: يتم استخلاص الزيوت من النخيل والزيتون، كما يتم استخدام مخلفات التقليم لإنتاج الفحم الحيوي (Biochar) وتحسين التربة.

2. تربية الأسماك والروبيان في أحواض مائية:

- التكامل مع النظام: يتم استخدام المياه المتبقية من مزارع الأزولا في استزراع الأسماك، بينما يتم إعادة استخدام مخلفات الأسماك كمخصب طبيعي للزراعة.
- الفائدة الإضافية: إنتاج مصادر بروتين غذائي مستدامة، وتحسين كفاءة إعادة تدوير المغذيات داخل النظام.

3. تربية البط والدواجن:

- التكامل مع النظام: يمكن تربية البط بجوار أحواض الأزولا حيث يتغذى على الحشرات والمخلفات، بينما يتم تجميع روث الطيور لاستخدامه كسماد عضوي عالي الجودة.
- الفائدة الإضافية: تقليل الحاجة للأسمدة الصناعية وتحسين خصوبة التربة بشكل طبيعي.

4. إنتاج الفطريات الصالحة للأكل:

• التكامل مع النظام: يتم زراعة الفطريات على مخلفات القش ونبات الأزولا، مما يحول المواد العضوية إلى مصادر غذائية ذات قيمة عالية.

• الفائدة الإضافية: توفير مصدر غذائي محلي غني بالبروتين والمعادن، وتقليل النفايات العضوية.

5. زراعة محاصيل غذائية وأعلاف:

• التكامل مع النظام: يتم زراعة محاصيل مثل الذرة والبرسيم الحجازي لاستخدامها كأعلاف للحيوانات والدواجن، مع الاستفادة من الري بالمياه الغنية بالمغذيات من أنظمة الاستزراع المائي.

• الفائدة الإضافية: إنتاج علف محلي يقلل تكاليف الإنتاج ويحد من الحاجة لاستيراد العلف من الخارج.

6. وحدة إنتاج الوقود الحيوي ومعالجة المخلفات:

• التكامل مع النظام: يتم استخراج الزيوت من الأزولا والنباتات الأخرى لإنتاج وقود حيوي (Biodiesel)، بينما يتم استخدام الجلسرين الناتج في عمليات التخمير لإنتاج الإيثانول.

• الفائدة الإضافية: توفير مصدر طاقة نظيف للمعدات الزراعية، وتقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري.

7. صناعة الفحم الحيوي والسماذ العضوي:

• التكامل مع النظام: يتم تحويل المخلفات الزراعية إلى فحم حيوي (Biochar) يُستخدم لتحسين التربة وزيادة احتفاظها بالمياه.

• الفائدة الإضافية: تقليل فقدان المغذيات في التربة، وتحسين جودة الأراضي الزراعية بشكل مستدام.

الفوائد البيئية والاقتصادية للنظام المتكامل:

م	المشروع	التكامل مع النظام	الفوائد البيئية والاقتصادية
1	مزارع الأزولا	مصدر للزيوت الحيوية والأعلاف	تقليل الاعتماد على الوقود الأحفوري وإنتاج علف مستدام
2	أشجار الأكاسيا والنخيل والزيتون	توفر الظل وتحسن خصوبة التربة	إنتاج زيوت طبيعية وتخزين الكربون وتحسين جودة التربة
3	استزراع الأسماك والروبيان	استخدام المياه الغنية بالمغذيات من مزارع الأزولا	تحسين الأمن الغذائي وزيادة كفاءة إعادة التدوير
4	تربية البط والدواجن	تغذية على الحشرات والمخلفات النباتية	إنتاج بروتين حيواني مستدام وإنتاج سماذ عضوي طبيعي
5	إنتاج الفطريات	استخدام المخلفات الزراعية كوسط نمو	تحويل النفايات إلى منتجات غذائية ذات قيمة
6	زراعة الأعلاف والمحاصيل الغذائية	الاستفادة من المياه المعاد تدويرها والأسمدة العضوية	تقليل الحاجة لاستيراد الأعلاف وتحقيق الاكتفاء الذاتي
7	إنتاج الوقود الحيوي	إعادة تدوير الزيوت وتحويلها إلى ديزل حيوي	تقليل الانبعاثات الكربونية وتوفير طاقة نظيفة

8	إنتاج الفحم الحيوي والسماد العضوي	استخدام المخلفات الزراعية	تحسين التربة وزيادة الإنتاجية الزراعية
---	--------------------------------------	---------------------------	---

التأثير البيئي

يسعى المشروع إلى تحقيق أثر بيئي إيجابي واضح عبر عدة جوانب. أولها خفض الانبعاثات الكربونية من خلال إحلال الديزل الحيوي محل وقود الديزل الأحفوري. فعند استخدام الديزل الحيوي المنتج من الأزولا لتشغيل المركبات أو المولدات، يتم تقليل صافي انبعاثات ثاني أكسيد الكربون؛ لأن الكربون المنبعث عند احتراق الوقود الحيوي هو بالأصل جزء من دورة الكربون الطبيعية (سحبته النباتات سابقاً من الجو أثناء نموها)، بعكس الوقود الأحفوري الذي يضيف كربوناً جديداً للغلاف الجوي عند احتراقه. بهذا الإحلال يمكن خفض البصمة الكربونية لقطاع النقل أو الطاقة المحلية. علاوة على ذلك، تتميز الأزولا بأنها لا تنافس على أراضي زراعية غذائية ولا تتسبب في تغييرات استخدام الأراضي على نطاق واسع، مما يجنب أحد أهم جوانب القلق في بعض أنواع الوقود الحيوي (مثل وقود الإيثانول من الذرة الذي قد يزاحم إنتاج الغذاء). الأزولا تنمو في أحواض مائية ويمكن استخدام مياه منخفضة الجودة أو أراضٍ غير صالحة للزراعة التقليدية، مما يعني أن إنتاج هذا الوقود الحيوي لن يكون على حساب الأمن الغذائي أو موارد الأراضي الخصبة.

إلى جانب خفض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون، يساهم المشروع في خفض ملوثات الهواء الأخرى. فالديزل الحيوي عادةً ما يحترق أنظف من الديزل النفطي التقليدي، إذ يحتوي على نسبة أقل من الكبريت، وبالتالي يساهم في تقليل انبعاثات أكاسيد الكبريت المسؤولة عن الأمطار الحمضية. كما أن الديزل الحيوي يتمتع بخصائص احتراق تنتج جسيمات دقيقة أقل نسبياً، مما يحسن جودة الهواء المحلي خصوصاً عند استخدامه في المناطق السكنية أو القريبة من التجمعات. هذا جانب مهم في سيناء إذا ما استخدم الديزل الحيوي في مولدات الكهرباء بالقرى أو المعدات السياحية في المناطق البيئية الحساسة.

تحسين جودة التربة عبر استخدام الفحم الحيوي:

كما أسلفنا، سيتم إنتاج كميات كبيرة من الفحم الحيوي في هذا المشروع. إن إعادة هذا الفحم إلى التربة (سواء في مشاريع زراعية تكميلية ضمن أرض المشروع أو توزيعها على مزارع قريبة) سيكون له أثر إيجابي مزدوج بيئياً وزراعياً. فبيئياً، يثبت الفحم الحيوي الكربون في التربة لفترات طويلة، مما يُعتبر وسيلة لعزل الكربون والتخفيف من تغير المناخ. وزراعياً، أظهرت الأبحاث في شمال سيناء نفسها أن إضافة نسب بسيطة من الفحم الحيوي (0.4 – 0.8% من وزن التربة) أدت إلى زيادة قدرة التربة الرملية على الاحتفاظ بالمياه بنسبة 44% إلى 70% مقارنة بالتربة غير المعدلة، وتقليل فقد المياه بالصرف وتحسين توفرها للنبات. هذا يعني أن استخدام الفحم الحيوي الناتج من المشروع يمكن أن يحسن خصوبة التربة الرملية في سيناء ويزيد إنتاجيتها النباتية، مساهماً في استصلاح المزيد من الأراضي الزراعية هناك. كذلك يعمل الفحم الحيوي على تحسين تهوية التربة وتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري منها (مثل أكسيد النيتروز) عبر تثبيت النيتروجين في بنية معقدة، مما يعزز الاستدامة البيئية للأنشطة الزراعية في المنطقة.

الاستخدام المستدام للموارد وتقليل الفاقد:

يتبنى المشروع مبدأ الاقتصاد الدائري في جميع خطواته لضمان كفاءة استخدام الموارد الطبيعية وتقليل أي نفايات. فالماء المستخدم في مزارع الأزولا سيتم تدويره قدر الإمكان والاحتفاظ به في نظام مغلق (مع تعويض الفاقد بالتبخّر فقط)، ويمكن استعمال مياه ذات جودة أقل (مثل مياه صرف زراعي معالجة أو مياه آبار مالحة بنسب خفيفة) لتنمية الأزولا كونها قادرة على النمو في ظروف مائية متنوعة. هذه الميزة تقلل الضغط على موارد المياه العذبة. أيضاً

العناصر الغذائية (مثل الفوسفور والعناصر الصغرى) المضافة لأحواض الأزولا لتعزيز نموها يمكن استعادتها جزئيًا من خلال إعادة تدوير مياه الأحواض أو استخدام بقايا المخلفات (كالفحم الحيوي الغني بالرماد المحتوي على المعادن) في تسميد الأحواض من جديد. وهكذا يقل الاعتماد على أسمدة كيميائية خارجية.

من جهة أخرى، لا ينتج عن المشروع تقريبًا أي مخلفات ضارة تحتاج للتخلص منها، فجميع المخرجات يتم الاستفادة منها: سواء منتجات أساسية أو فرعية أو ثانوية. حتى انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون من عملية التخمير سيتم توجيهها إن أمكن إلى دفيئات زراعية مجاورة لتعزيز نمو نباتات أخرى أو إطلاقها بأمان دون ضرر (مع إمكانية احتسابها ضمن دورة الكربون الحيوية وليست الأحفورية). وبذلك يمثل المشروع نموذجًا للإنتاج الأنظف الذي يحدّ من الفاقد Waste Minimization ويحوّل المواد التي كان يمكن أن تصبح ملوثات إلى موارد قيمة.

الجدوى الاقتصادية

تعتمد الجدوى الاقتصادية للمشروع على تحقيق توازن إيجابي بين تكاليف الإنتاج والتشغيل من جهة وعائدات بيع المنتجات المتعددة من جهة أخرى، مدعومة بالعوائد البيئية (مثل أرصدة الكربون) التي يمكن تحويلها إلى قيمة مالية. فيما يلي تحليل لأهم العناصر الاقتصادية:

تحليل التكاليف: تشمل التكاليف الرأسمالية التأسيسية للمشروع ثمن شراء أو تخصيص الأرض (إذا لم تكن أرضاً حكومية مجانية)، وتكاليف إنشاء أحواض الأزولا والبنية التحتية المائية (بما في ذلك بطانات الأحواض، مضخات المياه، منظومات التغذية بالمواد المغذية)، إضافة لتكاليف شراء المعدات الصناعية (معامل الاستخلاص بالمذيبات أو المكابس، مفاعلات التخثير، وحدة التقطير لفصل الإيثانول، مفاعل التكسير الحراري، وحدة الأسترة لإنتاج الديزل الحيوي، ومعدات الفصل والتنقية).

كما تشمل التكاليف الرأسمالية إنشاء مرافق التخزين للمنتجات (صهاريج للإيثانول والديزل الحيوي، خزانات للزيت الحيوي) وتجهيزات السلامة ومعالجة المياه ومختبر مراقبة الجودة. تشير التقديرات الأولية لمشروعات مشابهة أن الاستثمار المبدئي لمصنع ديزل حيوي بطاقة صغيرة إلى متوسطة قد يبلغ بضعة ملايين من الدولارات. فعلى سبيل المثال، قُدِّرَت تكلفة إنشاء مشروع لجمع وتصنيع 10,000 طن/سنة من زيت الطهي المستعمل إلى ديزل حيوي في مصر بحوالي 92.4 مليون جنيه مصري (بأسعار 2021) أي ما يعادل تقريباً 5-6 مليون دولار [1]، وهذا لمشروع ذي طاقة إنتاجية أكبر قليلاً من مشروعنا المقترح. لذا يمكن توقع أن التكلفة الاستثمارية لمشروع الأزولا ستكون في نطاق قريب من ذلك الحد، مع فروقات تعتمد على التقنيات الإضافية (وحدة التخثير والتكسير الحراري قد ترفع الكلفة).

التكاليف التشغيلية

- تكاليف العمالة والتشغيل (رواتب الفنيين، عمال المزارع، المهندسين، الإداريين).
- تكاليف الطاقة (كهرباء لتشغيل المضخات والآلات، وقود احتياطي إن لزم). لكن يُنتظر أن جزءاً من احتياجات الطاقة سيتم تلبيته داخلياً من الغاز الصناعي والزيت الحيوي المنتجين.
- تكاليف المواد الخام الثانوية: مثل المواد المُذِبة للاستخلاص (إن لم يتم استرجاعها بالكامل)، الإنزيمات أو الأحماض اللازمة لعملية التخثير، المحفز الكيميائي في تفاعل الأسترة، و مواد تعبئة وتغليف للمنتجات النهائية.
- تكاليف الصيانة الدورية للمعدات والأحواض، وتكاليف معالجة المياه (لمنع نمو طحالب ضارة في أحواض الأزولا أو لتنقية المياه المعاد تدويرها)، وتكاليف مراقبة الجودة والاختبارات المعملية لكل دفعة من الوقود الحيوي المنتج للتأكد من مطابقته للمواصفات.

مصادر الدخل المتوقعة

بالمقابل، مصادر الدخل المتوقعة متعددة، تشمل ما يلي:

• بيع الديزل الحيوي:

المنتج الرئيسي هو الديزل الحيوي (وقود البيوديزل) الذي سيباع في السوق. من المتوقع إنتاج عشرات الأطنان سنوياً منه (تقديراً السابق ~60 طن/سنة أي نحو 68 ألف لتر سنوياً). يمكن تسويق هذا الوقود بعدة طرق: إما بخلطه بنسبة معينة مع ديزل تقليدي وبيعه لشركات التوزيع (إذا سمحت التشريعات بمزجه في الوقود التجاري)، أو توفيره مباشرة لجهات تحتاج وقوداً نظيفاً (مثل شركات سياحية تعمل في المحميات، أو منشآت حكومية ترغب في اعتماد وقود حيوي)، أو حتى تصديره إلى أسواق تطلب الوقود الحيوي (كالسوق الأوروبية التي لديها سياسات تشجيعية لاستخدام الوقود المتجدد). يبلغ سعر الديزل الحيوي عالمياً نطاقاً مقارباً لسعر الديزل النفطي أو أعلى قليلاً بحسب الدعم والسياسات؛

فإذا افترضنا سعر بيع يقارب 0.8 دولار لكل لتر (سعر تقريبي في السوق الدولية للديزل الحيوي)، فإن العائد السنوي من هذه الكمية يمكن أن يكون في حدود 50-60 ألف دولار (أي قرابة 1.5 مليون جنيه مصري بأسعار الصرف الحالية). بالطبع يرتفع العائد بزيادة حجم الإنتاج وتحسينه.

• بيع الزيت الحيوي (البيرولييه):

يشكل الزيت الحيوي السائل المستخرج من التكسير الحراري منتجاً قابلاً للبيع كوقود بديل. على الرغم من أن قيمته السوقية أقل من الديزل الحيوي عالي الجودة، فإنه قد يجد سوقاً في التطبيقات الصناعية كما ذكرنا. يمكن تقدير سعر للزيت الحيوي الخام بحوالي 200-300 دولار للطن (كمكافئ لقيمة حرارية أقل من الوقود الأحفوري). فإذا أنتج المشروع مثلاً 180 طن زيت حيوي سنوياً وتم بيعه بمتوسط 250 دولار/طن، يكون العائد حوالي 45 ألف دولار سنوياً. هذا دخل إضافي مهم، خاصة أن المادة الخام له (المخلفات الصلبة) ليس لها بديل آخر سوى استخدام محدود كسماد لو لم تُعالج.

• بيع الفحم الحيوي:

من المتوقع إنتاج مئات الأطنان من الفحم الحيوي سنوياً. هذا المنتج له سوق متنامية سواء محلياً أو عالمياً، نظراً لاستخداماته المتعددة في تحسين التربة وترشيح المياه وحتى كوقود صلب نظيف نسبياً. في السوق المحلية، يمكن تسويق الفحم الحيوي للمشاريع الزراعية الجديدة في سيناء أو الصوب الزراعية أو مشاتل التشجير، وربما لوزارة البيئة أو الجهات البحثية التي تنفذ برامج لخفض الكربون. يتراوح سعر الطن من الفحم الحيوي بحسب جودته واستخدامه بين 1000 إلى 3000 جنيه مصري محلياً (تقريباً 30-100 دولار)، وقد يرتفع في الأسواق العالمية الخاصة بمشروعات تعويض الكربون إلى ما يعادل 150-200 دولار للطن نظراً لقيمته في أرصدة الكربون. وعلى افتراض بيع 250 طن بحوالي 50 دولار للطن (سعر متحفظ للسوق المحلية)، فإن الإيراد 12,500 دولار سنوياً (قرابة 375 ألف جنيه). وإذا تم تسجيل الفحم الحيوي كآلية تعويض كربون دولية يمكن أن يتضاعف هذا الرقم وفق سعر الكربون العالمي.

• بيع أرصدة الكربون (الكربون كريديت):

يوفر المشروع فرصة للحصول على إيراد إضافي من بيع أرصدة الكربون الناتجة عن خفض الانبعاثات أو عزل الكربون. فكل طن من ثاني أكسيد الكربون يتم تجنبه أو عزله يمكن بيعه كرصيد في الأسواق الطوعية أو التنظيمية. يمتلك هذا المشروع مصادر متعددة لهذه الأرصدة: استخدام الديزل الحيوي بدل الأحفوري يخفض انبعاثات مكافئة يمكن احتسابها كأرصدة، وعزل الكربون في الفحم الحيوي في التربة يمكن أن يصدر كشهادة إزالة كربون. مصر حديثاً أطلقت إطار تنظيمي لتداول شهادات خفض الانبعاثات (CERs) في البورصة المصرية عام 2024 [٢٠٢٤] [٢٠٢٤]، مما يعني أنه بالإمكان تسجيل المشروع لدى الهيئة المختصة (FRA) للحصول على شهادات موثوقة قابلة للبيع. إذا تمكن المشروع من عزل أو تخفيض بضعة آلاف من أطنان مكافئ CO₂ سنوياً (وهذا ممكن بالنظر إلى كمية الفحم الحيوي المنتجة وبدائل الوقود)، وباعتبار سعر متوسط 10-20 دولار لكل طن مكافئ في السوق الحالية، فإن العائد المحتمل يتراوح بين 20 إلى 50 ألف دولار سنوياً في مرحلة أولى، قابل للزيادة مع ارتفاع أسعار الكربون أو تحسين أداء المشروع. هذا المصدر المالي قد يكون حاسماً في تحسين ربحية المشروع، خاصة مع توجه الشركات والمؤسسات لشراء أرصدة الكربون لتحقيق أهداف الاستدامة الخاصة بها.

• مصادر دخل أخرى محتملة:

يشمل ذلك بيع الجلسرين كما أسلفنا (سعره قد يبلغ 5000-8000 جنيه للطن للجلسرين الخام غير المكرر في السوق المحلي، مما يعطي بضع مئات آلاف الجنيهات من 6-7 طن سنوياً)، وكذلك توفير خدمات بيئية (مثل معالجة مياه الصرف باستخدام أحواض الأزولا، أو بيع الأزولا الفائضة كعلف للمزارع السمكية أو الحيوانية إن وجد طلب محلي،

حيث تُستخدم الأزولا أحيانًا كعلف مكمل عالي البروتين بنسبة 19-30% بروتين في المادة الجافة (TOD). هذه المدخلات وإن كانت ثانوية مقارنة بالوقود الحيوي نفسه، إلا أنها تُحسن العائد الإجمالي وتوزع المخاطر المالية عبر منتجات متعددة.

بناءً على ما سبق، يمكن إعداد حساب مبدئي للعائد على الاستثمار. فمثلاً إذا كانت التكاليف الاستثمارية الكلية (رأس مال + تشغيل للسنة الأولى) حوالي 100 مليون جنيه مصري، وكانت الإيرادات السنوية كما قدرنا (مثلاً 1.5 مليون جنيه من biodiesel + 1.4 مليون من bio-oil + 0.37 مليون من biochar + 1.5 مليون من carbon credits + 0.2 مليون من glycerin = ~5 مليون جنيه سنوياً في السنوات الأولى)، فإن فترة الاسترداد البسيطة قد تكون في حدود 5 إلى 7 سنوات. ومع التحسين التدريجي في الإنتاج والأسعار (خاصة إذا ارتفع إنتاج الأزولا أو تحسنت أسعار الكربون)، قد تقل فترة الاسترداد. الجدير بالذكر أن دراسة ما قبل الجدوى لمشروع جمع زيوت طهي وإنتاج البيوديزل في مصر أظهرت معدل عائد داخلي 47% وفترة استرداد 4.1 سنة للوحدة التصنيعية (TOD)، مما يدل على أن مشروعات الوقود الحيوي يمكن أن تكون مجدية مالياً للغاية إذا توفرت عوامل نجاح مثل رخص المادة الخام أو الدعم الحكومي. في حالتنا، قد تكون التكاليف أعلى قليلاً بسبب زراعة المادة الخام، لكن في المقابل لدينا منتجات فرعية مربحة ودعم محتمل عبر أرصدة الكربون.

العوامل المؤثرة على الجدوى الاقتصادية: من المهم التأكيد أن الربحية ستعتمد على كفاءة إدارة المشروع وتخفيض التكاليف قدر الإمكان. على سبيل المثال، إذا تمكنا من:

- زيادة إنتاجية الأزولا لكل فدان عبر تحسين التغذية ونظام الحصاد (وبالتالي زيادة كمية الزيت والوقود المنتجة دون زيادة كبيرة في التكاليف)،
- واستخدام الطاقة الذاتية (الغاز الصناعي والزيت الحيوي) لتقليل فاتورة الكهرباء والوقود الخارجية،
- والحصول على إعفاءات أو دعم حكومي (مثل تخصيص أرض مجانية أو قروض ميسرة لمشروعات الطاقة المتجددة، أو إعفاءات جمركية على المعدات، أو دعم سعر الكربون)،

فإن ذلك سيُحسن بشكل جوهري من العوائد. أيضاً اقتصاديات الحجم تلعب دوراً؛ فزيادة حجم المشروع مستقبلاً (مثلاً لمضاعفة الإنتاج) قد تزيد التكاليف بنسبة أقل من زيادة الإيرادات، مما يرفع الربحية الكلية. ولذا يعتبر المشروع الحالي قابلاً للتوسع تدريجياً لتعظيم العائد بعد إثبات جدواه في المرحلة الأولية.

الدراسة القانونية والتنظيمية

يتطلب تنفيذ المشروع وتسويق منتجاته الامتثال لمجموعة من القوانين واللوائح المصرية التي تحكم قطاع الوقود والطاقة، وكذلك استيفاء الاشتراطات البيئية والتنظيمية المتعلقة بالاستثمار في سيناء والتعامل مع منتجات غير تقليدية كأرصدة الكربون. فيما يلي عرض لأهم الجوانب القانونية:

تشريعات بيع واستخدام الديزل الحيوي في مصر: حتى تاريخه، لا يوجد قانون مصري خاص ينظم بشكل مفصل إنتاج أو خلط الديزل الحيوي ضمن وقود النقل، نظراً لكون الصناعة لاتزال حديثة العهد في البلاد. ومع ذلك، يخضع إنتاج الوقود وبيعه عموماً لإشراف وزارة البترول والثروة المعدنية. فمن الناحية العملية، يجب على الشركة المنفذة الحصول على رخصة لإنشاء وتشغيل مصنع لإنتاج الوقود الحيوي، بما في ذلك موافقة الهيئة العامة للبترول أو الجهات ذات الصلة إذا كان المنتج موجّهاً للاستخدام المحلي كوقود. غالباً سيُطلب الالتزام بمواصفات قياسية لجودة البيوديزل؛ وإذا لم تكن مصر قد أصدرت مواصفة

قياسية وطنية بعد، فيمكن الاسترشاد بالمواصفات الدولية (مثل المواصفة الأوروبية EN 14214 للديزل الحيوي أو الأمريكية ASTM D6751) لضمان قابلية المنتج للاستخدام في المحركات دون ضرر. ومن المحتمل أن تصدر جهات التقييس المصرية مواصفات محلية للديزل الحيوي مع بدء ظهور مشاريع من هذا النوع. على الشركة أيضًا التنسيق مع شركات توزيع المنتجات البترولية المعتمدة للدخول إلى منظومة تسويق الوقود، حيث إن بيع الوقود للمستهلكين النهائيين يتم عبر محطات مرخصة. في حال كان توجه المشروع للتصدير، فيجب الامتثال لإجراءات الجمارك والتصدير، والحصول على شهادات جودة معترف بها عالميًا. باختصار، لا توجد موانع قانونية أمام بيع الديزل الحيوي في مصر، شريطة الحصول على التراخيص الصناعية اللازمة وضمان جودة المنتج. بل إن الدولة المصرية بدأت تنظر إلى هذه الصناعة باهتمام ضمن استراتيجيات الاقتصاد الأخضر.

المتطلبات الخاصة ببيع الزيت الحيوي (البيرولي) والثانوية الأخرى: الزيت الحيوي الناتج عن التكسير الحراري يمكن تصنيفه ضمن المنتجات البترولية البديلة أو المواد الكيميائية القابلة للاشتعال. سيتعين على المشروع الالتزام بقوانين تداول المواد البترولية وقوانين الدفاع المدني فيما يخص تخزين ونقل المواد الخطرة. قد يحتاج بيع هذا الزيت إلى جهات صناعية إلى إبرام عقود مباشرة معها لأنه ليس منتجًا قياسيًا متاحًا في السوق العامة. من الناحية التنظيمية، يمكن بيعه كشكل من المازوت الحيوي أو الوقود الصناعي، وربما يتطلب إضافته إلى سجلات منتجات المصنع المرخص إنتاجها. وبما أن هذا المنتج ليس مخصصًا للمركبات، بل للصناعة، فقد يكون الإشراف عليه أخف من إشراف وقود النقل. لكن يتوجب مراعاة قانون البيئة رقم 4 لسنة 1994 وتعديلاته فيما يخص انبعاثات حرق أي وقود في المنشآت الصناعية التي تستخدم الزيت الحيوي، لضمان أن استخدامه يحقق المعايير البيئية (وهذا أمر في صالح الزيت الحيوي لأنه أنظف من المازوت التقليدي من حيث المحتوى الكبريتي). أما الجلسرين والفحم الحيوي فتصنف كمواد كيميائية/زراعية؛ تداول الجلسرين يتطلب الالتزام بمواصفات صحة وسلامة (كونه يمكن استخدامه غذائيًا أو دوائيًا لو نُقي، أو صناعيًا) وربما تسجيله كمادة منتج ثانوي لدى هيئة التنمية الصناعية. الفحم الحيوي يمكن بيعه بحرية كسماد محسن للتربة، وقد يستلزم تسجيلًا كمُنتج أسمدة لدى وزارة الزراعة إذا تم تسويقه على نطاق واسع كمحسن تربوي. هذه إجراءات روتينية لضمان سلامة المستهلك النهائي.

المتطلبات التنظيمية في سيناء: نظرًا لوقوع المشروع في شبه جزيرة سيناء، فهناك بعض الاعتبارات الخاصة. سيناء منطقة استراتيجية تخضع لضوابط في تملك الأراضي والاستثمار. يوجب القانون المصري أن تكون أغلبية ملكية أي مشروع أو أرض في سيناء للمصريين (بنسبة 55% على الأقل) ويمكن أن تتطلب موافقات أمنية عليا للمشاريع الكبرى. لذا سيحرص المشروع على استيفاء موافقة جهاز تنمية سيناء وأجهزة القوات المسلحة إذا لزم الأمر لضمان أن النشاط مسموح في الموقع المقترح ولا يتعارض مع الاعتبارات الأمنية. كذلك ستتم مراعاة قانون البيئة فيما يتعلق بالمناطق الحساسة؛ فإذا كان الموقع قريبًا من محميات طبيعية أو مناطق ساحلية، يجب إجراء دراسة تقييم تأثير بيئي شاملة وعرضها على جهاز شؤون البيئة (EEAA) للحصول على موافقة بيئية قبل البدء في الإنشاء. هذه الدراسة البيئية ستقيم أي أخطار محتملة على التربة أو المياه الجوفية من أحواض الأزولا أو على جودة الهواء من مصنع التكرير الحيوي، وستضمن خططًا للتخفيف من أي آثار سلبية. ومن المتوقع أن يحظى المشروع بموافقة بيئية نظرًا لفوائده في خفض الانبعاثات وإعادة استخدام الموارد، شرط الالتزام بإجراءات السلامة ومنع التسربات من الأحواض إلى البيئة المحيطة.

تنظيمات أرصدة الكربون: على صعيد بيع وتداول أرصدة الكربون الناتجة عن المشروع، فقد أصدرت الهيئة العامة للرقابة المالية (FRA) في أغسطس 2024 الضوابط المنظمة لأول سوق طوعي منظم لتداول شهادات خفض الانبعاثات في مصر. حدد قرار رئيس الهيئة رقم 31 لسنة 2024 قواعد إدراج شهادات خفض الانبعاثات (شهادات الكربون) في البورصة المصرية، بما يتطلب أن تكون المشاريع المصدرة لتلك الشهادات مسجلة في سجل كربون معتمد لدى FRA وأن تكون التخفيضات محققة وموثقة من طرف ثالث معتمد [١٠٠]. لذلك سيقوم المشروع بالسير بإجراءات تسجيله كمشروع خفض انبعاثات؛ بدايةً عبر اختيار مكتب استشاري معتمد لقياس الكربون يقوم بحساب كمية الانبعاثات المخفضة/المزالة سنويًا وفق بروتوكولات معترف بها (مثل بروتوكولات المنهجيات الصادرة عن آليات التنمية النظيفة CDM أو المعايير الطوعية VCS وغيرها). بعد ذلك يُرفع تقرير التحقق إلى هيئة معتمدة تقوم بإصدار الشهادات الكربونية. ثم يمكن إدراج هذه الشهادات في المنصة المصرية لتيّاح بيعها للمشتريين (شركات محلية أو دولية ترغب في معادلة بصمتها الكربونية). يجدر بالذكر أن مصر أنشأت اللجنة العليا لتغير المناخ لتنسيق سياسات خفض الانبعاثات، وبالتالي قد يحتاج المشروع أيضًا إلى إخطار نقاط الاتصال الحكومية (مثل وزارة البيئة) بنيتته ببيع أرصدة دوليًا لضمان عدم ازدواجية العد (أي ألا تُحتسب نفس التخفيضات ضمن جهود مصر الوطنية ثم تُباع للخارج

بدون تنسيق). في كل الأحوال، المناخ القانوني الحالي مشجع ويضع أطرًا واضحة لتجارة الكربون [١٥]، مما سيدعم استفادة المشروع ماليًا من هذا الجانب بشكل رسمي وشفاف.

الدعم والحوافز الحكومية المحتملة: يجدر الإشارة إلى أن الحكومة المصرية تولي اهتمامًا بمشروعات الطاقة الجديدة، وقد صدر قانون الاستثمار رقم 72 لسنة 2017 الذي يمنح حوافز لمشروعات Strategic في المناطق التنموية. كما أن مشروعات الطاقة المتجددة تحظى أحيانًا بحوافز مثل الإعفاء الضريبي المؤقت أو رد جزء من قيمة الأرض إذا حققت أهدافًا محددة. كذلك أعلنت الحكومة عن نيتها تقديم حوافز لمشاريع الهيدروجين الأخضر والأمونيا الخضراء مؤخرًا، ومن الممكن توسيع هذه الحوافز لمشروعات الوقود الحيوي مستقبلاً. سنحرص كمشروع على استكشاف أي برامج دعم أو تمويل أخضر (سواء من الحكومة أو البنوك بتوجيهات البنك المركزي لتمويل المشروعات الخضراء) للاستفادة منها. أيضًا التشريعات البيئية المصرية تشجع على إعادة استخدام المخلفات وتنص على تخفيض رسوم التصريح البيئي للمشروعات التي تثبت أنها تحقق قيمة مضافة بيئية. هذا قد ينطبق على مشروعنا نظرًا لتحويله مخلفات إلى منتجات مفيدة.

باختصار، سيتم إنشاء إطار قانوني وإجرائي متين قبل بدء المشروع، بما يضمن الالتزام بكافة القوانين (التراخيص الصناعية، الاشتراطات البيئية، تنظيمات الطاقة والكربون، وقوانين الاستثمار في سيناء)، وبما يحمي المشروع من أية تحديات قانونية مستقبلية. سنعمل بشفافية مع الجهات الحكومية المعنية لضمان نجاح المشروع في إطار قانوني سليم.

مقارنة مع مشروعات مماثلة

على الرغم من الطبيعة الريادية لمشروع إنتاج الديزل الحيوي من الأزولا في مصر، يمكن الاستفادة من تجارب مشاريع أخرى مشابهة سواء على الصعيد المحلي أو الدولي. فيما يلي عرض لبعض المشاريع ذات الصلة والدروس المستفادة:

مشروعات الوقود الحيوي المحلية (مثل biodiesel من زيوت الطبخ المستعملة):

لدى مصر بالفعل بعض المبادرات في مجال الوقود الحيوي. من أبرزها مشروع جمع زيت الطعام المستعمل وتحويله إلى ديزل حيوي الذي تتبناه وزارة البيئة حاليًا. يستهدف ذلك المشروع جمع 10 آلاف طن زيت سنويًا وتصنيعها لوقود حيوي بغرض التصدير إلى أوروبا. أظهرت دراسة الجدوى له جدوى مالية عالية كما ذكرنا (IRR كبير وفترة استرداد وجيزة)، مما يؤكد أن السوق الدولية للوقود الحيوي نشطة ويمكن لمصر دخولها بمنتجات متنوعة. الدرس المستفاد هنا هو أهمية تأمين مادة خام منخفضة التكلفة وثابتة التوريد لضمان استقرار الإنتاج. في مشروعنا، الأزولا يمكن اعتباره مادة خام مجانية نسبيًا (يتطلب فقط ماء ومغذيات وشمس)، مما يماثل فكرة استخدام زيت مخلفات منخفض التكلفة. هذا التشابه يعني أننا نشارك المشروع المحلي الهدف (تحويل مورد غير مستغل إلى طاقة مستدامة) لكن باختلاف نوع المورد. ويمكن التعاون مستقبلاً بين المشروعين، مثل استخدام جزء من الجلسرين المنتج محليًا في مصنع الزيت المستعمل أو مشاركة المعرفة في أساليب التنقية والجودة.

مشروعات دولية لإنتاج الوقود من الطحالب والأزولا:

عالميًا، يعتبر مجال الوقود الحيوي من الطحالب (سواء طحالب مجهرية أو نباتات مائية كالأزولا) مجال أبحاث نشط. على سبيل المثال، في الولايات المتحدة واليابان جرت مشاريع بحثية رائدة لإنتاج الديزل الحيوي من الطحالب الدقيقة ذات المحتوى الزيتي العالي. حققت تلك المشاريع معدلات إنتاج نفطية كبيرة تصل نظريًا إلى عشرات أضعاف المحاصيل الزيتية التقليدية [10]. حيث قُدِّر إنتاج الزيت من بعض أنواع الطحالب الكبيرة (macroalgae) بما يصل إلى 58 ألف لتر زيت للهكتار الواحد في السنة. إلا أن معظم تلك المشاريع لم ينتقل بعد إلى نطاق تجاري واسع بسبب عقبات تقنية واقتصادية؛ أبرزها تكلفة النمو والحصاد والطاقة العالية المطلوبة لمعالجة الطحالب [11]. في المقابل، يُعتبر نبات الأزولا منخفض التكلفة في زراعته وحصاده لعدم حاجته لمفاعلات ضوئية مغلقة أو مدخلات طاقة كبيرة، مما يعطي مشروعنا أفضلية. في المملكة المتحدة، تعمل شركة Azolla Biosystems (مرتبطة بمؤسسة الأزولا العالمية) على تطوير منتجات تجارية من الأزولا تشمل الوقود الحيوي، مستفيدة من الخصائص الفريدة لهذا النبات [12]. كما أشارت دراسات إلى إمكانية دمج زراعة الأزولا مع معالجة مياه الصرف أو مياه البحيرات الملوثة للحصول على فوائد بيئية مزدوجة (تنقية مياه ملوثة + إنتاج وقود حيوي) [13]. هذه الأفكار توسع منظورنا لمستقبل المشروع؛ فبالإضافة للإنتاج القائم بذاته، يمكن مستقبلاً التفكير في تكامل أكبر مع مشروعات بيئية (مثلًا استخدام مياه صرف زراعي غنية بالأسمدة في تغذية أحواض الأزولا وبالتالي تنقيتها، أو زراعة الأزولا في برك مشتركة مع تربية أسماك لتحسين تغذية الأسماك والاستفادة المتبادلة).

الدروس المستفادة وإمكانات التوسع:

يتضح من المشاريع المشابهة أن النجاح التجاري يعتمد على الابتكار المستمر في خفض التكاليف التشغيلية وزيادة الإنتاجية. تجربة الفلبين (في الثمانينيات) في استخدام الأزولا كعلف ومخصب فشلت جزئيًا بسبب مشكلات في الآفات وصعوبة إدارة المزارع بشكل يدوي [14]. استفدنا من ذلك بتضمين خطط لمكافحة الآفات (مثل البعوض أو الفطريات المائية) عن طريق تصميم الأحواض بشكل مناسب واستخدام طرق حيوية للتحكم، وتطوير نظام حصاد ونقل ميكانيكي يقلل الاعتماد على الأيدي العاملة بشكل كبير. أيضًا تأكدت أهمية وجود سوق نشطة للمنتج النهائي قبل التوسع الكبير. في حالتنا، لدينا عدة منتجات ونستهدف عقودًا مسبقة قدر الإمكان (مثلًا مذكرة تفاهم مع شركة وقود محلية لشراء الديزل الحيوي لاستخدام تجريبي في أسطولها، أو اتفاق مع مزارعي مشروع استصلاح لشراء الفحم الحيوي، أو

التنسيق مع وزارة البيئة لضمان شراء أرصدة الكربون عبر صندوق المناخ المصري). مثل هذه الترتيبات ستعطي الثقة عند توسيع نطاق المشروع. كما سنراقب تقدم الأبحاث العالمية حول الأزولا وتحويله إلى وقود (فهناك أبحاث مستمرة في تحسين سلالات أزولا أكثر إنتاجًا للزيت أو أقل محتوى مائيًا). وأي تطور تقني في هذا المجال يمكن تبنيه لاحقًا لدينا، مما يجعل المشروع قابلاً للتحديث التقني المستمر.

وخلاصة المقارنة، يمكن القول إن مشروع الأزولا في سيناء سيكون من أوائل المشاريع العملية عالميًا التي تطبق مفهوم مصفاة حيوية متعددة المنتجات باستخدام الأزولا. ورغم أن بعض مكوناته تم اختبارها في سياقات مختلفة (وقود من زيت الطحالب، إنتاج إيثانول سيلولوزي، توليد فحم حيوي)، إلا أن جمعها معًا في إطار واحد سيكون سابقة تحمل عناصر ابتكار وتميز. نجاح هذا المشروع سيضع مصر في موقع ريادي في هذا المجال، ويفتح الباب لتكرار التجربة في مواقع أخرى داخل البلاد (مثل واحات الصحراء الغربية أو الأراضي منخفضة الملوحة في الدلتا) وحتى التصدير المعرفي لدول المنطقة.

دراسة نقاط القوة، الضعف، الفرص والتهديدات

نقاط القوة:

- توافق المشروع مع رؤية مصر 2030 واستراتيجية الطاقة المستدامة لعام 2035.
- استخدام الأزولا كمصدر متجدد سريع النمو لا ينافس على الأراضي الزراعية الغذائية.
- تقليل الاعتماد على واردات الوقود الأحفوري وتعزيز الاستقلالية في مجال الطاقة.
- تنوع المنتجات والمصادر المالية (ديزل حيوي، زيت حيوي، فحم حيوي، جلسرين، إيثانول، وأرصدة الكربون)، مع إمكانية تقديم نموذج عملي للاقتصاد الدائري مما يفتح فرصاً للتعاون مع الجهات المحلية والدولية المهتمة بتطبيقات الاقتصاد الدائري..
- قدرة الأزولا على النمو في مياه منخفضة الجودة أو مياه صرف زراعي.
- تحقيق فوائد بيئية واضحة، مثل تقليل الانبعاثات الكربونية وتحسين جودة التربة.

نقاط الضعف:

- الحاجة لاستثمار رأسمالي كبير في مرحلة الإنشاء والتشغيل الأولية.
- تعقيد الإجراءات التنظيمية والقانونية، خاصة فيما يتعلق بالأراضي في سيناء.
- الحاجة إلى إدارة تقنية عالية الجودة لضمان كفاءة الإنتاج.
- الاعتماد على ظروف بيئية مناسبة وثابتة لضمان إنتاجية عالية للأزولا.

الفرص:

- سوق متنامية للوقود الحيوي والطاقة المتجددة محلياً ودولياً.
- إمكانية الحصول على دعم حكومي وحوافز اقتصادية لمشروعات الطاقة المتجددة.
- فرص تصدير الديزل الحيوي ومنتجاته الثانوية للأسواق الدولية.
- إمكانية الاستفادة من سوق أرصدة الكربون الجديد في مصر.
- فرص التعاون مع مراكز البحث العلمي والجامعات المحلية والدولية لتحسين التقنيات وزيادة الإنتاجية.

التهديدات:

- تقلب أسعار النفط العالمية وتأثيرها على تنافسية المشروع وربحيته.
- المخاطر البيئية مثل التغيرات المناخية والجفاف وانتشار الآفات التي قد تؤثر على نمو الأزولا.
- أخطار عدم استقرار التشريعات أو تغيرات في السياسات الحكومية، بالإضافة إلى تراجع التزام بعض قادة العالم بمسؤولياتهم تجاه الطاقة النظيفة، وتراجع بعض الدول عن متطلبات الطاقة الخضراء، مما قد يؤثر سلباً على سوق أرصدة الكربون والطلب العالمي على الوقود الحيوي.
- المنافسة مع مصادر وقود بديلة أو مشاريع مماثلة قد تظهر مستقبلاً