كلية العلوم

القسم : علم الحياة

السنة : الثانية

المادة : الوراثة النباتية

المحاضرة: ٩+١٠/نظري/

{{ مكتبة A to Z }}

Facebook Group : مكتبة A to Z

كلية العلوم ، كلية الصيدلة ، الهندسة التقنية

يمكنكم طلب المحاضرات برسالة نصية (SMS) أو عبر (What's app-Telegram) على الرقم 0931497960

المحاضرة 11

الفصل التاسع

التعديل والتحسين الوراثي عند النباتات

The genetic modification and improvement in plants

منذ أن بدأ الإنسان الزراعة وهو يحاول تحسين الطرق الزراعية من خلال التجربة، فكان يحتفظ بالحبوب الجيدة من أجل زراعتها في الموسم التالي، كما كان يتبع برنامج ترك الأرض دون زراعة كل سبع سنوات، بهدف الحصول على مردود أفضل لمزروعاته من الناحيتين الكمية والنوعية. زد على ذلك أن الفلاح اتبع قديماً نظام التغيير الدوري في نوع المحصول الزراعي في أرض ما، مثل زراعة محصول قمح في موسم، يتبعه في الموسم الذي يليه زراعة نوع من أنواع البقوليات؛ لأنّ البقوليات تغني الأرض بالنتروجين. وكل هذه المحاولات من أجل تحسين أنواع الكائنات الحية وتكييفها بشكل يناسب حاجاته، فسعى لاختيار الصفة الجيدة، وحافظ عليها، وأبعد الصفة السيئة، وهكذا حصل على سلالات محسنة بصفاتها.

ثم دخلت تطبيقات علم الوراثة على النبات والحيوان من أجل تحسين صفاتها والحصول من خلال الانتخاب على أفضل السلالات المرغوبة والمفيدة اقتصادياً، واستبعاد السلالات الرديئة الصفات وغير المرغوبة.

مع تطور علم الوراثة، واكتشاف البنية الحلزونية للحمض النووي الريبي منقوص الأوكسجين DNA، وإثبات الشيفرة الوراثية، وظهور إنزيم الربط DNA Ligase، إضافة إلى عزل أول إنزيم قاطع Restrection enzyme ، عام 1970 ، يقوم بقص شريط الـ DNA في مواقع محددة، ظهر علم الهندسة الوراثية Genetic engineernig، الذي يهتم بدراسة التراكيب الوراثية للكائنات الحية من نباتات وحيوانات؛ بهدف معرفة القوانين التي تتحكم بالصفات الوراثية لهذه الكائنات، ومن ثمّ التدخل الإيجابي في المورثات المسؤولة عن تلك الصفات، وتعديلها، وإصلاح العيوب التي تطرأ عليها. وأصبح من السهل نقل المورثة المسؤولة عن صفة مرغوب بها من كائن حي إلى آخر؛ بهدف تحسين الجودة،

أو زيادة الإنتاج، أو مكافحة الأمراض والآفات، وهذا هو التعديل الوراثي Genetic modification. والتعديل الوراثي هو إدخال صفات جديدة على صنف ما من النباتات، أو الحيوانات؛ باستخدام التقنيات البيولوجية الحيوية؛ بهدف تحسين نوعية المنتج الزراعي، وجودته. وتعرّف التقانة الحيوية Biotechnology بأنها التعديل والتحسين التقني للكائنات الحية، أو أنها تطبيق المبادىء العلمية الهندسية، بوسائط حيوية مثل الخلايا الحيوانية أو النباتية، والكائنات الحية الدقيقة، والإنزيمات، وذلك لتوفير السلع الزراعية والحيوانية، بهدف تحضير الأغذية والمستحضرات الطبية.

يأمل علماء الهندسة الوراثية أن ينجحوا في إنتاج نوعيات متعددة من المحاصيل الزراعية الوفيرة الإنتاج، المقاومة للآفات والحشائش الضارة، وذلك باستعمال التقنيات الحديثة، مكملين بذلك جهود علماء الوراثة التقليدية، لرفع القيمة الغذائية لهذه المحاصيل بفترة زمنية قصيرة، وبوسائل حديثة لا يمكن الوصول إليها بالطرق التقليدية، ومن أهم مزايا الهندسة الوراثية:

1. السرعة في نقل المورثات من كائن إلى آخر، بدلاً من الطرق التقليدية التي تحتاج إلى سنوات طويلة في استعمال التهجين والتربية، فتختصر الكثير من الجهد والوقت.
2. نقل المورثات بطرق مباشرة، مضمونة النتائج بحيث لا تسمح بنقل المورثات غير المرغوبة التي تكون محمولة على الصبغي، وتنتقل بالطرق التقليدية مسببة مشكلات مهمّة.
3. نقل المورثات بوساطة الهندسة الوراثية قضى على البعد النوعي بين الكائنات الحية، إذ يمكن نقل مورثة مرغوبة من جرثوم Bacteria إلى الإنسان، أو النبات، وبالعكس (هي إمكانية نقل المورثات المرغوب بها عبر الأجناس)، خلافاً لما هو متبع في الطرق التقليدية.
4. نقل مورثات خالية من الأمراض، مسؤولة عن صفات وراثية مرغوبة، إلى كائنات حية جديدة، تنقصها هذه الصفات.

مع بعضها البعض، يقود إلى إعادة ظهور ظاهرة قوة الهجن. تقود هذه الظاهرة إلى زيادة في الإنتاج تزيد عن 40% قياساً للمجتمع النباتي التي أعطت هذه السلالات النقية.

هكذا إذا تمّ التهجين بين سلالات متقاربة فإنه يمكن للنسل الناتج أو الهجن Hypride أن يكون في بعض الحالات ذا نوعية جيدة، تفوق كثيراً النوعية الأصلية للمجتمعات التي نتجت منها السلالات المتقاربة، فيلقب ذلك بقوة الهجن. كذلك عندما يتم التهجين بين سلالات مختلفة نسبياً الواحدة عن الأخرى فإنه يمكن في كثير من الحالات الحصول على هجن تظهر نوعية خاصة، مميزة وقد لقب ذلك العالم Dobzhansky عام 1952 بالوفرة أو الغزارة.

ثالثاً- التعديل الوراثي باستخدام تقنيات الهندسة الوراثية:

مع تطور علم الوراثة، وظهور الهندسة الوراثية، أصبح عزل المادة الوراثية من الأمور السهلة التحقيق، وأصبح من السهل صنع نسخ عديدة من الـ DNA، كما أمكن معرفة تسلسل النكليوتيدات ضمن المورثة. ببساطة أصبح اليوم من الممكن عزل المورثة ونقلها ونسخها، وإعادة إدخالها ثانيةً إلى المتعضية نفسها أو غيرها بعد تعديلها، وبذلك تمكن علماء البيولوجيا من التعامل مع الخلية على مستوى المورثة، وتمكنوا من تحقيق التحسين الوراثي للنباتات والحيوانات، التي كان علماء الوراثة والتربية التقليديون يقفون أمامها عاجزين بسبب صعوبة الحصول على تراكيب وراثية مرغوبة، وهذا فتح الباب على مصراعيه؛ لنقل المورثات من كائن إلى كائن آخر، وهذا كان ضرباً من الخيال فيما مضى.

قبل تتبع خطوات تعديل النبات وراثياً باستخدام تقنيات الهندسة الوراثية لا بدّ من التعرّف على النواقل.

1. **النواقل Vectors:** هي وسيلة لنقل المورثات وحفظها، وتكون في الغالب فيروسات، أو قطعاً من الـ DNA موجودة في الجراثيم بشكل مستقل عن مادتها الوراثية، تسمى بلازميدات Plasmids. تمتاز النواقل بقدرتها على التكاثر الذاتي داخل الخلية الجرثومية، ومن ثمّ نسخ المورثة المحملة عليها، ويجب أن تحتوي على أماكن قص متعددة بوساطة إنزيمات قاطعة مختلفة، وذلك لزيادة إمكانية تحميل مورثات مختلفة لها نهايات طرفية ذات تتالي أسس آزوتية مختلفة. كما ويجب أن تحتوي النواقل على مورثات مقاومة للمضادات الحيوية؛ لتسهل عملية انتخاب المستعمرة التي تحوي الناقل الحامل للمورثة الجديدة (قطعة DNA المؤشبة). يوجد أنواع عدة للنواقل، منها الطبيعية، ومنها الصناعية، أو شبه الصناعية، حيث تصنّع مخبرياً من مواد موجودة في الطبيعة، وتختلف هذه النواقل عن بعضها بعدة أمور منها حجم قطعة الـ DNA التي تستطيع حملها، ونذكر من النواقل:

a. **البلازميد** Plasmid: يستخدم البلازميد لنقل قطع من الـ DNA مرغوبة، مرتبطة معه، إلى الكائنات بما فيها النباتات، فقد استخدم لإدخال صفات مرغوبة عند نبات التبغ. ويعد البلازميد من أشهر النوقل، وهو قطعة من الـ DNA بشكل دائري، مضاعفة السلسلة، موجودة في أغلب أنواع الجراثيم، وخاصةً *E.coli*، وفي بعض أنواع الخميرة. يمتاز البلازميد بقدرته على التكاثر الذاتي بمعزل عن صبغي الخلية البكتيرية، ويعد البلازميد عنصر إضافي للمورثات يمكن للجراثيم أن تعيش من دونه، فهو ليس ضرورياً للجراثيم، ولكن يضيف إليها مزيداً من الصفات الجيدة التي تمكنها من التأقلم مع ظروف البيئة المختلفة، والاستمرار في العيش. وتملك البلازميدات مورثات مقاومة للمضادات الحيوية، فتحمي الخلية البكتيرية من تأثير المضادات عليها، مثل المورثات المقاومة Resistance

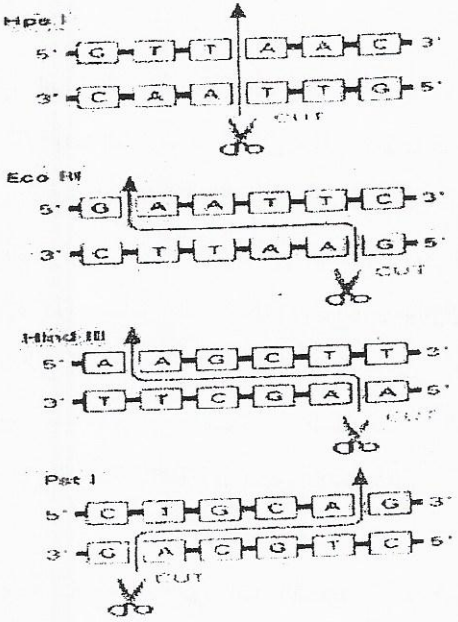
للمضادين الحيويين Ampicillin و Tetracycline، إضافة إلى ذلك، فإنّ معظم البلازميدات المعروفة لها خرائط وراثية، وهذا يساعد على توقع مكان قطع DNA واختباره؛ باستخدام إنزيم تحديد معين لتلك المنطقة المراد إضافة قطع جديدة من الـ DNA إليها. وتستطيع البلازميدات استقبال قطعة DNA لا يتعدى حجمها 10 kb.

b. **الناقلات الفيروسية** Viral Vectors: أشهرها الفاج لامدا Lambda phage الذي يتطفل على *E.coli*، وهو جزيئة من الـ DNA موجودة داخل رأس الفيروس المكون من البروتين، ويستطيع هذا النوع من الناقلات حمل قطعة DNA (بمعنى تنسيل قطعة DNA) يصل حجمها حتى 23 kb.

c. **الكوسميد** Cosmid: الكوسميد هو هجين من DNA مأخوذ من الفاج لامدا مع DNA البلازميد، حيث يستطيع نقل قطعة DNA تصل إلى 50kb.

d. **صبغي الخميرة الصناعي** Yeast Artificial Chromosome أو YAC: لقد طوّر YAC من صبغيات الخميرة، لنقل قطعة DNA أكثر من 500 kb. وهو قطعة DNA مترابطة، وتحتوي على مركز للصبغي Centro mer، وطرفين للصبغي Telomeres، وسلسلة طويلة مستقلة ذاتياً؛ للإنتشار في الخلية المضيفة، وهي مقطع للتناسخ الذاتي Autonomous Replicating Sequence (ARS).

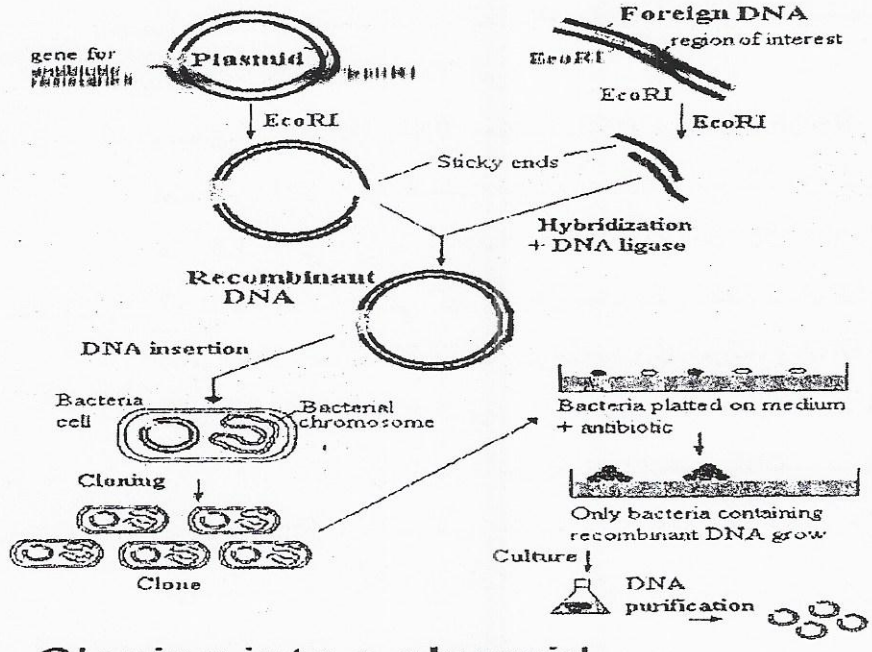
Recognition sequence، يعرف باسم موقع القطع أو موقع التعرّف، حيث تعطي نهايات قابلة للالتصاق Coesive end أو صادقة Blunt. إنّ العديد من إنزيمات التحديد (المقصات الحيوية) تقطع شريط الـ DNA بشكل متعرج Staggered cuts، بحيث ينتُج من قطع شريط DNA طرفان لزجان Sticky ends مفردي الشريط، وقابلان للصق، مثل إنزيم التحديد Eco RI . وبعضها يقطع شريط الـ DNA بشكل عمودي، مثل إنزيم التحديد Hpa I (الشكل 65). هذا يسهل عملية لصق قطعة DNA أخرى، قطعت بنفس الإنزيم القاطع، باستخدام إنزيم الربط أو اللصق DNA Ligase، فتتزاوج القواعد الآزوتية للقطعتين مع بعضهما، وينتج قطعة DNA مركبة من قطعتين مختلفتين، تسمى قطعة DNA مؤشبة Recombinant DNA.



الشكل (65): قطع شريط الـ DNA ببعض إنزيمات التحديد (*Pst I, Hind III, Eco RI, Hpa I*) والحصول على نهايات قابلة للالتصاق.

3. **التنسيل Cloning:** يتم استخلاص الـ DNA من النبات وتقطيعه إلى قطع صغيرة باستخدام إنزيمات التحديد المناسبة، وتحديد القطعة المراد تنسيلها، ثم تبدأ مراحل عملية التنسيل على الشكل آتي:

- **الحصول على قطعة DNA مؤشبة Recombinant - DNA**، أي ربط قطعة الـ DNA، المراد تنسيلها، مع ناقل Vector. يتم ذلك عن طريق إدخال هذه القطعة إلى بلازميد Plasmid مناسب يؤدي دور ناقل Vector، ولديه القدرة على التكاثر الذاتي. لهذا الغرض يجب قص قطعة الـ DNA والبلازميد بإنزيم تحديد واحد مناسب، وهكذا يتم قطع DNA المورثة، و DNA الناقل في نفس موقع التسلسل النكليوتيدي، ومن ثمّ يوضعا معاً، ويرتبط DNA المورثة مع DNA الناقل عن طريق تكامل نكليوتيدات موقع القطع، وبمساعدة إنزيم الربط DNA Ligase، الذي يضاف إلى المزيج، فينشأ عن ذلك DNA مؤشب، كما هو موضّح في الشكل (66).



الشكل (66): التنسيل ضمن البلازميد في الأوساط الحية.

- **زراعة قطعة DNA المؤشبة في وسط حي:** يلي عملية الحصول على قطعة DNA مؤشبة، نقل هذه القطعة المؤشبة إلى خلية حية مضيفة، في الغالب تستخدم الجراثيم، وبشكل خاص *E.coli* ، في عملية الزراعة؛ وذلك لسهولة إدخال الناقل إليها، وسرعة انقسامها (تنقسم البكتريا تقريباً كل 20 دقيقة)، إضافة إلى توفر طرق اختبار خاصة تعتمد على خاصية الحماية من المضادات الحيوية. فيتضاعف الناقل داخل الخلية الجرثومية منتجاً أعداداً كبيرة من النسخ المطابقة له.

- اختيار المستعمرة المحتوية على المورثة المطلوبة (الناقل مع القطعة المضافة) **من خلال عملية التنقية أو الغربلة Screening**، ويسمح لها بالتكاثر عن طريق أطباق الزراعة Culture plates أو في محاليل سائلة، فينتج أعداد كبيرة من المستعمرات الجرثومية المحتوية على الناقل المؤشب (الشكل 66).

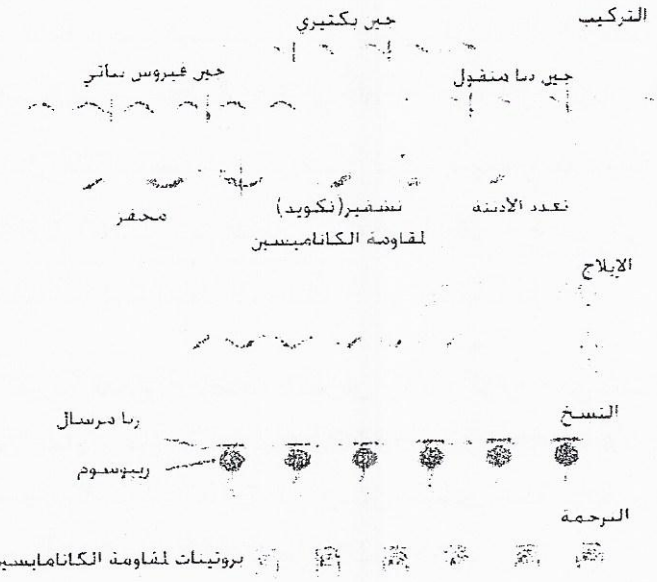
- يتم التعرّف على المستعمرات التي تحوي على الناقل المؤشب، ومن ثمّ نقلها إلى طبق جديد لتتم تغذيتها والمحافظة عليها؛ لكي تستمر بالتكاثر، ويكون داخل هذه الجراثيم أعداد كبيرة من النواقل المهجنة، تتم عملية استخلاص الـ DNA المؤشب ، ثمّ فصله من DNA الناقل، فنحصل على عدد كبير من قطع الـ DNA المتطابقة، وبذلك تنتهي عملية التنسيل.

b. **تجهيز المورثة المعزولة بإضافة المحرض ومقطع نهاية:** لكي تستطيع المورثة أن تعبّر عن نفسها، عن طريق نسخ RNA Messenger transcript mRNA، وترجمته على الجسيمات الريبية إلى بروتين، ليظهر صفة نباتية مرغوبة (الشكل 67)، يجب أن تتكون هذه المورثة من ثلاث مناطق:

- **المنطقة الأولى** تسمى المحفز أو المحرض Promotor Sequence، تسبق في موقعها موقع المورثة البنيوية المطلوب نسخها، وهذه المنطة تساعد على تحديد بدء وزمن عمل المورثة وموقع تعبيرها.
- **المنطقة الثانية** هي منطقة التشفير Coding region ، وتحمل معلومات تحدد نوع البروتين الذي تشفر له المورثة.
- **المنطقة الثالثة** يطلق عليها اسم منطقة النهاية End saquence أو مقطع النهاية، وهي مسؤولة عن إنهاء عمل نسخ الـ mRNA.

تمكن علماء الهندسة الوراثية من مزج هذه المناطق الثلاث وتجميعها من مورثات مختلفة، لتنتج ما يسمى بالمورثات الكيميرية Chemeric gene، وبذلك اختار

علماء الهندسة الوراثية محفزات متباينة؛ لتوجيه تعبير المورثة إلى النسيج أو العضو المرغوب به، مثل الأوراق، البذور، الجذور..... .



الشكل (67): تصميم المورثات الكميرية من مورثات كائنات مختلفة.
(المحفز من فيروس نباتي، ومنطقة التشفير من جراثيم *E.coli*، ومقطع النهاية من *Agrobacterium*)، ثمّ يتم إدخال المورثات الكميرية إلى خلية نباتية تقوم بنسخ mRNA ليترجم على الجسيمات الريبية إلي بروتينات.

c. **ادخال المورثة إلى النسيج النباتي المراد تعديله:** هناك طرق عديدة لنقل المورثة المعزولة، ودمجها في مورثات الكائن المراد تعديله وراثياً، نذكر منها التحول Transformation، والحقن Injection، استخدام الفيروسات والبلازميدات واستخدام المدفع الحيوي Biolistic gun:

1. **النقل بالبلازميد Ti**: أول نظام استخدم لهندسة النباتات وراثياً هو نقل المورثة المرغوبة إلى النبات؛ باستخدام قدرة جراثيم التربة *Agrobacterium tumefaciens*، المسببة لمرض الورم التاجي Grown gall disease عند نبات التبغ. يعود سبب المرض إلى وجود البلازميد Ti في الجرثوم، الذي يحث على نمو الأورام. فعند دخول هذا الجرثوم إلى النبات عبر جرح فيه، فإنّ جزءاً من البلازميد Ti ينتقل إلى نواة الخلية النباتية، ويندمج معها. أطلق على هذا الجزء من الـ DNA اسم الـ DNA المتحول Transform – DNA (T-DNA). يحمل T- DNA العديد من المورثات منها مورثات اصطناع الهرمونات النباتية، التي تؤدي إلى سرعة تكاثر الخلايا، وتكوين كتل من الخلايا الجذرية التي تعرف بالورم التاجي، وتصبح تلك الأورام بيئة ملائمة، ومصدراً غذائياً لتلك الجراثيم. لكي تكون تلك الجراثيم فعّالة كأداة للنقل المورثي، لا بدّ من استئصال الجزء غير المفيد من مورثات البلازميد Ti ووضع المورثة المرغوبة مكانه. ولقد نجحت Mary dell chilton وآخرون عام 1983 في استئصال المورثات الممرضة دون المساس بآلية نقل الـ DNA.

2. **المدفع الحيوي Biolistic gun**: تستعمل هذه الطريقة بشكل واسع في العالم النباتي، حيث يتم تحميل المورثة المؤشبة على كرات دقيقة من الذهب. توضع الكرات (البلازميد مع المورثة المراد نقلها إلى النبات) في خرطوش خاص، وتطلق باتجاه هدف هو على الأغلب مزارع نسج، أو أجزاء نباتية جنينية، أو بروتوبلاست Protoplast. يسمح للأنسجة بالنمو Development، والتمايز إلى نبات بالغ محوّر وراثياً Transgenic. لقد تمّ تطوير أول قمح قاسٍ محور وراثياً Transgenic durum whear عام 1996؛ باستخدام البلازميد pBARGUS، لإدخال المورثة bar، المقاومة لمبيد الأعشاب غليفوسينات Glyphosinate herbicide. في هذه الحال استخدم المدفع الحيوي؛ لإدخال

البلازميد pBARGUS بوساطة قوة الضغط؛ باستخدام غاز الهيليوم المضغوط.

3. **دمج المورثات في خلايا البروتوبلاست Protoplast fusion:** تتم إزالة الجدر السيلولوزية الخلوية إنزيمياً، لأنّ الثقوب الموجودة في الجدار الخلوي أصغر من أن تسمح لجزيئات الـ DNA بالعبور من خلالها بسهولة، ويبقى الغشاء البلازمي الذي يمكن لـ DNA اجتيازه؛ بمساعدة بوليمير عضوي مثل البولي ايتيلين غليكول. كما يمكن دمج الـ DNA في خلايا البروتوبلاست بوساطة الثقب الكهربائي Elecetroporation، إذ تقوم نبضات كهربائية قصيرة، عالية الفولطية، بإحداث ثقوب سريعة الزوال في غشاء الخلية العارية من الجدار الخلوي، فتمر من خلالها جزيئات الـ DNA. لكن وجد أنّ هذه التقانة صعبة التطبيق في كثير من الحبوب، كما ينتج عنها نباتات عقيمة.

4. **طريقة الحقن المجهري** Micro injection: تتم طريقة الحقن المجهري باستخدام إبرة خاصة؛ لحقن المادة الوراثية داخل نواة الخلية تحت مجهر خاص، يسمى Micro manipulater، ولقد استخدمت هذه الطريق لإنتاج النعجة دوللي. لكن وجد أنها طريقة غير عملية؛ لأسباب عدة، منها أنّ طرف الإبرة المستخدمة قد ينسد أو ينكسر بسهولة، كما أنّ إدخال الـ DNA إلى الخلايا عملية مجهدة، إضافة إلى عدم ضمان التحام المورثة المراد نقلها مع مجين الخلية.

5. **النقل بوساطة آكل الجراثيم** Phage: سمي انتقال صفة وراثية من خلية جرثومية إلى خلية جرثومية أخرى، بوساطة فيروس آكل الجراثيم، باسم النقل بالفاج Transudation، حيث تندمج قطعة من صبغي DNA الجرثوم في صبغي آكل الجراثيم. وعندما يغزو هذا الفيروس جرثوماً آخر فإنّ قطعة

DNA الجرثوم الموجودة مع DNA الفيروس تنتقل إلى الجرثوم المضيف الجديد، وهكذا تنتقل صفات من جرثوم إلى آخر عبر الفاج، وهذا ما يسمى بالتحول الانتقالي، الذي تمّ شرحه بالتفصيل في فصل التكاثر عند الأحياء الدقيقة.

رابعاً – فوائد وتطبيقات الهندسة الوراثية:

لقد أصبح للهندسة الوراثية أهداف عظيمة تحقّق بعضها، والعمل جارٍ لتحقيق الباقي، ولن تنتهي الطموحات التي فتحها هذا العلم لخدمة البشرية في المجالات كافة. ولقد تمّ تطبيق الهندسة الوراثية في مجالات عديدة كالطب، والزراعة، والبيئة، وإنتاج الغذاء..... إلخ. وتطبق الهندسة الوراثية في ثلاثة مجالات رئيسة، هي:

a. نقل المورثات Gene transfer إلى الكائنات الحية من نباتات أو حيوانات؛ بهدف تحسين صفاتها مثل تحسين مقاومتها للأمراض، أو تحسين معدل نموها.
b. العلاج الوراثي بإدخال المورثات إلى خلايا الإنسان المريض وراثياً؛ بهدف تعديل تركيبه الوراثي، وتحويله إلى تركيب طبيعي.
c. الإنتاج المكثف لبعض الجزيئات الكيميائية الحيوية Biochemical molecules التي لها أهمية في علاج بعض الأمراض مثل هرمون الأنسولين، وهرمون النمو..... .

نذكر من فوائد الهندسة الوراثية في مجال تطوير المحاصيل الزراعية:

1. **إنتاج نباتات مقاومة للأمراض الفيروسية:** لاتوجد وسيلة مباشرة؛ لعلاج المحاصيل المصابة بالفيروسات، سوى الوقاية من الإصابة بها باتباع دورة زراعية مناسبة، إضافة إلى التخلص من الأعشاب وبقايا المحاصيل السابقة التي تشكل عائلاً ثانياً للفيروس في حال عدم وجود العائل الأساسي، وكذلك استعمال المبيدات الحشرية القاتلة للحشرات الناقلة للفيروس. فكانت فكرة إنتاج نباتات مقاومة للأمراض

الفيروسية هي من أهم الدراسات التي قدمتها الهندسة الوراثية؛ لتحسين الإنتاج النباتي. وتعتمد الفكرة على الوقاية المضادة التي وجدت أنّ عدوى النباتات، بفيروسات ضعيفة، تحصن النباتات عند إصابتها بسلالات أكثر شدة، وهذا أدى إلى تحسين الإنتاج الزراعي. وعندما تمكن Petashe وزملاؤه سنة 1990 من نقل المورثة المسؤولة عن إنتاج الغلاف البروتيني، لفيروس فسيفساء التبغ TMV، إلى البندورة، عبّرت هذه المورثة عن نفسها، وأنتجت البروتين الذي يغلف الفيروس. فوجد Petashe أنّ نباتات البندورة قاومت الإصابة بالفيروس، وأثبت صحة نظريته الافتراضية القائلة إنّ الغلاف البروتيني لفيروس فسيفساء التبغ يزيد من مقاومة النبات لسلالات هذا الفيروس، وغيره من الفيروسات القريبة الصلة به. ومن هنا جاءت فكرة الوقاية المضادة.

2. **إنتاج نباتات مقاومة للحشرات:** اعتمدت فكرة إنتاج نباتات مقاومة للحشرات، خلال الثلاثين سنة الماضية، على إنتاج بروتين، تنتجه جراثيم *Bacillus thuringiensis*. استخدمت تلك المستخلصات البروتينية، على نطاق واسع، في مقاومة الحشرات حرشفية الأجنحة، التي تعتبر آفات رئيسة، حيث ترتبط تلك البروتينات بالأغشية الطلائية لأمعاء الحشرات المستهدفة، فيتم ثقب الأغشية وانتقال الشوارد من البروتينات الطلائية لأمعاء الحشرات، وتؤدي إلى تعطيل قدرة الحشرات على التغذية فالموت. مثل هذه المبيدات ليس لها تأثير سام في الثدييات، ولا في أنواع الحشرات الأخرى، وفاعليتها لا تدوم طويلاً، فهي آمنة بيئياً. لذلك تم نقل المورثة التي تنتج هذه البروتينات إلى النباتات لتصبح قادرة على إنتاجها في أنسجتها مباشرة.

3. **إنتاج نباتات مقاومة لمبيدات الحشائش:** نظراً لمنافسة الحشائش للنباتات في كل من الماء، والغذاء، وضوء الشمس، وتشكل الحشائش مأوى للأمراض والآفات، وهذا يؤدي إلى انخفاض المحصول بنسبة كبيرة. كما أنّ وجود بذور الحشائش م

المحاصيل يقلل من قيمتها النوعية ويزيد من تكاليف التنظيف والتنقية، لذلك لا بدّ من استخدام مبيدات الحشائش لرفع القيمة الاقتصادية للمحاصيل. وقد تبيّن أنّ المادة الفعالة، في مبيد الحشائش، المستخدم لمقاومة الحشائش العريضة الأوراق، تقوم بتثبيط الإنزيم الضروري لإنتاج الأحماض الأمينية العطرية التي تحتاج إليها النباتات في النمو. فقام كل من Stocher و Camai، بعزل المورثة المسؤولة عن إنتاج هذا الإنزيم من الجراثيم، ومن ثمّ أدخالها في البندورة، وفول الصويا، والقطن، وغيرها من المحاصيل؛ لتتمكن تلك النباتات من تحمل مبيد الحشائش دون أن تصاب بأي أذى.

4. **إنتاج نباتات ذات خصائص غذائية فائقة:** لقد أمكن الحصول على نباتات معدّلة وراثياً، تستطيع تثبيت الآزوت الجوي، وذلك بإدخال المورثة nife في النباتات المرغوب إغناؤها بالآزوت. توجد المورثة nife في جراثيم *Azetobacot sp.* التي تتطفل على جذور البقوليات. وسعى الباحثون إلى إنتاج نباتات تتوافر بها الأحماض الأمينية المهمّة مثل الليسين والتربتوفان الضروريين، اللذين يعجز الإنسان والحيوانات وُحيدة المعدة عن تصنيعهما داخل الجسم، لذا يجب أن تتوفر في غذاء هذه الكائنات. فتمّ عزل المورثات المسؤولة عن إنتاج مثل هذه الأحماض الأمينية وإدخالها في بعض النباتات؛ لإغنائها بمثل هذه الأحماض الأمينية.

كما استخدمت تقانات الهندسة الوراثية في مجالات عديدة، نذكر بعضها:

- إنتاج حيوانات تقاوم الفيروسات.
- إنتاج أغنام ذات صوف عالي الجودة.
- إنتاج لقاحات ضد أمراض الدواجن.
- تحويل مخلفات المزارع إلى سماد عضوي.
- الاستفادة من مخلفات الغابات من قلف، ونشارة خشب، وكذلك من نفايات مصانع السكر، وتحويلها باستخدام الجراثيم المعدلة وراثياً إلى بروتينات يمكن استخدامها في تصنيع اللحوم.