ووجد أن أعراض الإصابة بالفيرس ، قد تلاشت تقريبًا حينما أضيفت ١٢ نيكليوتيدة فى هذا الموقع الجينى، ونمت النباتات التى تمت عدواها بهذه الطفرة من الفيرس بصورة طبيعية (Shepherd وآخرون ١٩٨٢)

الجينوم الإنسانى والجينومات النموذج

الجينوم الإنسانى

بدأت فكرة رسم خريطة شفرة الجينوم الإنسانى فى منتصف ثمانينيات القرن العشرين، ومع نهاية ذلك العقد كان قد تحقق لهذا المشروع ما يكفى من قوة الدفع للتفكير جديًا فى تنفيذه وقد جاءت البداية من الولايات المتحدة حيث بدأ مشروع الجينوم الإنسانى Human Genome Project – رسميًا – فى أكتوبر ١٩٩٠. ومع تكوين جمعية الجينوم الإنسانى Human Genome Organisation فى العام ذاته أخذ المشروع طابعًا دوليًا، حيث كان الهدف من تلك الجمعية هو تنسيق الجهود التى بذلها العلماء فى هذا الخصوص فى عديد من دول العالم.

ولقد كان الهدف هو الانتهاء من المشروع فى بدايات القرن الحادى والعشرين، إلاّ أنه انتهى فعليًا فى عام ٢٠٠٠. ومن خلال هذا المشروع أمكن التعرف على نحو ١٠٠٠٠٠ جين فى الجينوم الإنسانى، ولكن هذه الجينات لم تمثل سوى ٥٪ من الدنا الجينومى الذى قدر أنه يحتوى على نحو ثلاثة بلايين زوج من النيكيلوتيدات.

الجينومات النموذج أو الموديل

إلى جانب الجينوم الإنسانى، فقد بدأ العلماء – كذلك – وقاموا بتطوير موديلات جينومية أخرى تمثل كل منها مجموعة من الكائنات، مثل جينومات كل من

١ – البكتيريا *E coli*.

٢ – الخميرة (الفطر) *Saccharomyces cerevisiae*.

٣ – النيماتودا *Caenorhabditas elegans*.

٤ – النبات *Arabidopsis thaliana*.

٥ – الحشرة *Drosophila melanogaster*.

٦ – الفأر.

٧ – الخنزير (عن Nicholls وآخرين ١٩٩٤).

الجينوم النباتى الموديل أرابيدوبسس ثاليانا

على الرغم من أن تحسين النباتات بطرق الهندسة الوراثية يمكن أن يعتمد على نقل جينات إليها من أى كائن حىّ، فإن النباتات تبقى هى المصدر الرئيسى لتلك الجينات، ولمّا كان التعامل مع النباتات على مستوى الدنا ليس بالسهولة التى يكون عليها التعامل مع الكائنات الدقيقة؛ لذا .. كان الاتجاه نحو اختيار نبات "موديل" يسهل التعامل معه ويتم التركيز عليه للتعرف على جينومه الكامل.

ونظرًا لما يتمتع به النبات *Arabidopsis thaliana* من مزايا عديدة تجعل التعامل معه أمرًا ميسورًا عن غيره من النباتات الراقية، فقد اختير ليكون هو النبات "الموديل"، حيث تناوله الكثير من الباحثون فى عديد من دول العالم بالدراسة المفصلة جزيئيًّا، وربط ذلك بالمستوى الخلوى، وبنموه وتطوره، وبصفاته المميزة. وحاليًّا .. يعتبر هذا النبات كائن قنطرى لإسراع تطوير نباتاتنا الاقتصادية وراثيًّا، حيث يُستعان بجيناته الهامة فى تطوير الأنواع النباتية الأخرى، إما بنقلها بصورة مباشرة إلى الأنواع الأخرى، وإما باستعمالها فى التعرف على الجينات المثيلة لها فيها (عن Flavell ١٩٩٢).

يعتبر *A. thaliana* أحد نباتات العائلة الصليبية (الكرنبية) الذى طالما استخدم فى الدراسات الوراثية الكلاسيكية لمدة تزيد عن أربعة عقود، ولكنه لم يصبح أحد أهم الكائنات المستخدمة فى البحوث الوراثية إلاّ منذ منتصف ثمانينيات القرن الماضى حينما أتضح أن الهيئة الكروموسومية لهذا النبات صغيرة للغاية، ولا تحتوى – تقريبًا – على أى دنا مكرر كذلك الذى ينتشر ويتوزع بطول الكروموسومات فى الأنواع الأخرى. وقد برز *A. thaliana* منذئذٍ كموديل مناسب للدراسات الوراثية فى المملكة النباتية، مثل دراسة وتحليل العمليات الأيضية، والتطور، والاستجابة لمختلف عوامل الشدّ البيئى، والمقاومة للأمراض والحشرات ... إلخ.

ومن أهم مميزات *A. thaliana*، ما يلى:

١ – النبات صغير الحجم (٢٥–٣٠ سم)، ويعد أصغر النباتات الراقية المعروفة؛ وبذا يمكن زراعة أعداد كبيرة منه فى حيز صغير فى حجرات النمو.

٢ – تأقلمه على ظروف بيئية متباينة.

٣ – يكمل النبات دورة حياته خلال فترة زمنية قصيرة تبلغ حوالى ٥–٨ أسابيع.

٤ – يُنتج النبات أعدادًا كبيرة من البذور تصل إلى ٤٠٠٠٠ بذرة للنبات الواحد.

٥ – يستجيب النبات لمختلف طرق التحول الوراثى المعروفة.

٦ – الصغر الشديد للهيئة الكروموسومية للنبات، وهى التى تقدر بنحو ٧ × ١٠^{٧} أزواج من النيكليوتيدات؛ وبالمقارنة .. فهى تبلغ نحو ٢٠ ضعف حجم الهيئة الكروموسومية للبكتيريا *E. coli*، وحوالى ١/١٠٠ من حجم الهيئة الكروموسومية للذرة.

٧ – لا يوجد بالهيئة الكروموسومية سوى القليل جدًّا من الدنا المكرر المنتشر هنا وهناك على امتداد الكروموسومات؛ فنجد أن التتابعات الفريدة (التى لا نظير لها) للدنا تبلغ – فى المتوسط – حوالى ١٢٠٠٠٠ ألف زوج من النيكليوتيدات طولاً فى *A. thaliana*، مقارنة بنحو ١٠٠٠ زوج منها طولاً فى الذرة.

٨ – النبات ثنائى التضاعف.

٩ – يتلقح النبات ذاتيًّا فى الطبيعة، مع نسبة ضئيلة جدًّا من التلقيح الخلطى.

ومن أهم عيوب استخدام *A. thaliana* فى الدراسات الوراثية الصغر الشديد لحجم أزهاره؛ الأمر الذى يتطلب استخدام العدسات المكبرة لأجل خصيها وتلقيحها عند الرغبة فى إجراء التهجينات (عن Gardner وآخرين ١٩٩١، و Coury & Feldman ١٩٩٨).

ولقد بدأ تحليل جينوم *A. thaliana* فى عام ١٩٩٠، واستكمل رسميًّا فى ديسمبر من عام ٢٠٠٠.

بلغ إجمالى عدد الجينات للنبات *A. thaliana* – بعدما اكتملت دراسة جينومه – حوالى ٢٦٠٠٠ جين (حوالى ١١٦ مليون نيكيلوتيدة). وعلى الرغم من أن هذا العدد لا يقل بدرجة كبيرة عما فى عديد من النباتات الزراعية الهامة، إلاّ أن صغر الحجم

الكامل للدنا في هذا النبات أسهم في مهمة دراسته تفصيليًا. فمثلاً يزيد حجم الدنا في نباتات مثل التبغ والقمح بمقدار ٢٠، و ٦٠ ضعف حجم الدنا في الـ *Arabidopsis* – على التوالي – مما يجعل من الصعوبة بمكان البحث عن الجينات في هذه الكمية الزائدة من الدنا.

وعلى الرغم من أن جينوم الـ *Arabidopsis* يزيد عن جينوم *Escherichia coli* بمقدار ٢٥ ضعف فقط، فإن النبات أكثر تعقيدًا بكثير من البكتريا، وهو يقوم بأداء العمليات الحيوية ذاتها التي يقوم بها أي نبات آخر. وفي الواقع .. فإن الـ *Arabidopsis* والإنسان يحتويان – تقريبًا – على نفس العدد من الجينات.

أما عن وظائف تلك الجينات فقد تعرف العلماء على دور الكثير منها، ولكن يبقى نحو ١٥٠٠٠ جين لا تعرف وظائفها على وجه التحديد. ويحاول العلماء التعرف عليها من خلال خاصية قدرة بكتيريا *Agrobacteriun tumefacines* على زرع الدنا الذي تحمله (T-DNA) في أي مكان من جينوم النبات؛ مما يترتب عليه ما اتفق على تعريفه باسم knockout mutant، حيث يختفي تأثير الجين الذي دمج فيه الـ T-DNA؛ لتظهر صفة جديدة لم تكن معروفة من قبل؛ وبذا .. يمكن التعرف على وظيفة الجين الذي يمكن تحديده بسهولة (عن Chrispeels & Sadava ٢٠٠٣).

ومن أهم الخصائص التي تم التوصل إليها بخصوص جينوم نبات *Arabidopsis thaliana* ما يلي (عن Kato وآخرين ٢٠٠٣).

أولاً: الدنا:

الطول	١١٥٤٠٩٩٤٩ bp
عدد الجينات	٢٥٤٩٨
كثافة الجينات	٤,٥ kb/جين
متوسط طول الجين	٢,٠١١ bp
متوسط طول الببتيد peptide	٤٣٤ aa
الـ exons	

متوسط الحجم	٢٥٠ bp
الـ introns	
متوسط الحجم	١٦٨ bp
متوسط العدد/جين	٤,١

ثانيًا: الـ proteome:

الأيض الخلوى	٢٢,٥٪
الـ transcription	١٦,٩٪
الدفاع plant defense	١١,٥٪
signaling	١٠,٤٪
النمو	١١,٧٪
مصير البروتين	٩,٩٪
الانتقال داخل الخلايا	٨,٣٪
الانتقال	٨ ٤٪
تمثيل البروتين	٤,١٪
المجموع	٦٩,٩٪

ويوضح جدول (١٠-١) توزيع تلك الجينات على كروموسومات النبات الخمسة (عن Slater وآخرين ٢٠٠٣)

ولمزيد من التفاصيل عن جينوم *A thaliana* .. يراجع Kato وآخرين (٢٠٠٣)، و Schmidt وآخرين (٢٠٠٣).

جدول (١٠-١): توزيع جينات النبات *Arabidopsis thaliana* على كروموسوماته الخمسة

الخصائص		كروموسوم ١	كروموسوم ٢	كروموسوم ٣	كروموسوم ٤	كروموسوم ٥	المجموع
الطول	Length (kbp)	٢٩١٠٥	١٩٦٤٧	٢٣١٧٣	١٧٥٥٠	٢٥٩٥٣	١١٥٤١٠
الذراع العلوى	Top arm (kbp)	١٤٤٤٩	٣٩٩٧	١٣٥٩٠	٣٠٥٢	١١١٣٢	
الذراع السفلى	Bottom arm (kbp)	١٤٦٥٦	١٦٠٤٠	٩٥٨٢	١٤٤٩٨	١٤٨٠٣	
عدد الجينات	Number of genes	٦٥٤٣	٤٠٣٦	٥٢٢٠	٣٨٢٥	٥٨٧٤	٢٥٤٩٨
الأكسونات:	*Exons:*						
العدد	Number	٣٥٤٨٢	١٩٦٣١	٢٦٥٧٠	٢٠٠٧٣	٣١٢٢٦	١٣٢٩٨٢
الطول الكلى	Total length (kbp)	٨٧٧٣	٥١٠٠	٦٦٥٥	٥١٥١	٧٥٧١	٣٣٢٤٩
النسبة من الطول الكلى	% of total length	٣٠	٢٦	٢٩	٢٩	٢٩	٢٩
المتوسط لكل جين	Average per gene	٥,٤	٤,٩	٥,١	٥,٢	٥,٣	
متوسط الحجم	Average size (bp)	٢٤٧	٢٥٩	٢٥٠	٢٥٦	٢٤٢	
الانترونات	*Introns:*						
العدد	Number	٢٨٩٣٩	١٥٥٩٥	٢١٣٥٠	١٦٢٤٨	٢٥٣٥٢	١٠٧٤٨٤
الطول الكلى	Total length (kbp)	٤٨٢٩	٢٧٦٨	٣٣٩٨	٣٠٣١	٤٠٣٠	١٨٠٥٦
النسبة من الطول الكلى	% of total	١٧	١٤	١٥	١٧	١٦	
متوسط الحجم	Average size (bp)	١٦٨	١٧٧	١٥٩	١٨٦	١٥٩	
كثافة الجينات	Gene density (kbp per gene)	٤,٠	٤,٩	٤,٥	٤,٦	٤,٤	