البوتاسيوم عن محتوى جذور وأوراق الصنف الحساس، وكان ذلك مصاحبًا بقدرة أكبر للصنف المتحمل على استبعاد الألومنيوم من أنصال الأوراق (Miyasaka وآخرون ١٩٩٣ب).

وراثة تحمل الألومنيوم

أجريت معظم دراسات وراثة تحمل الألومنيوم على محاصيل الحبوب، وخاصة القمح والراى والشعير والسورجم، والتى كانت صفة التحمل فى معظمها بسيطة، ولكن وجد — مؤخرًا — من دراسات أجريت على الأرز أن صفة التحمل فيه كمية.

القمح

دُرست وراثة تحمل الألومنيوم — باستفاضة — فى القمح، الذى يُعرف منه عديدًا من الأصناف المقاومة، منها: Atlas 66، و ET3، وWaalt، و BH 1146، و Neepawa. وأوضحت الدراسات الوراثية أن تحمل الألومنيوم فى القمح مردها إلى جين واحد سائد، لكن أرجعت صفة التحمل إلى عديد من الجينات الرئيسية فى أصناف أخرى من القمح. وقد أُرجع تحمل الألومنيوم فى الصنف BH 1146 إلى الجين Alt_{BH} الذى يقع على الكروموسوم 4DL. وقد وجد ارتباط قوى بين هذا الجين ومعلما الدنا Xbcd1230، و Xcdo1395، وخاصة المعلم الأول (عن Samac & Tesfaye ٢٠٠٣).

ويستدل من دراسة أجريت على ٣٦ صنفًا من القمح دُرِس فيها الطول النسبى للجذر وإفرازه لحامض الماليك؛ بهدف تقدير مدى تحملها للألومنيوم .. أظهر تحليل للارتباط لهذين المتباينين أن ٨٤٪ من الاختلافات فى الطول النسبى للجذر أمكن تفسيرها بكميات حامض الماليك المفرزة. ويعنى ذلك أن غالبية الاختلافات المشاهدة بين أصناف القمح فى تحملها للألومنيوم مردها إلى آلية فسيولوجية واحدة (Kochian وآخرون ٢٠٠٤).

الراى

يعد الراى من أكثر محاصيل الحبوب تحملاً لعوامل الشدِّ البيئى، بما فى ذلك شدِّ الألومنيوم. وهذا المحصول — على خلاف القمح — غير متوافق ذاتيًّا، أى خلطى التلقيح، وربما يفسر ذلك اكتشاف عددًا أكبر من جينات تحمل الألومنيوم فى هذا المحصول عما اكتشف فى القمح. ومثل القمح .. يحمل الذراع الطويل للكروموسوم الرابع فى الراى جين تحمل رئيسى Alt3. وقد وجد أن هذا الجين يرتبط بالمعلمات الوراثية الخاصة بتتبع الجين Alt_{BH}؛ بما يفيد احتمال تشابه الجينين الخاصين بتحمل الألومنيوم فى المحصولين. وقد وجد جين آخر لتحمل الألومنيوم Alt1 على الذراع القصير للكروموسوم السادس (Kochian وآخرون ٢٠٠٤).

هذا .. وتتوزع جينات مقاومة الألومنيوم فى القمح على الكروموسومات: $5A^L$، $6A^S$، و $2D^L$، و $4D^L$، و $4B^L$، و 5D، و 7D، بينما تتوزع جينات المقاومة فى الراى على الكروموسومات: 3R، و 4R، 6R، مع العلم أن نقل كروموسوم الرى تلك إلى القمح يؤدى إلى تثبيط فعل ما تحمله من جينات مقاومة الألومنيوم (Singh ١٩٩٣).

الشعير

وجد فى الشعير جينًا رئيسيًّا لتحمل الألومنيوم على الذراع الطويل للكروموسوم الرابع أُعطى الرمز Alp. وهذا الجين — كما هو الحال بالنسبة للجين Alt3 فى الراى — يرتبط بالمعلمات الوراثية الخاصة بتتبع جين القمح Alt_{BH}، بما يوحى بتشابه الجينات الثلاثة. هذا إلاّ إنه على خلاف الراى والقمح، فإن الشعير حساس بوضوح لسمية الألومنيوم، ولا يُظهر قدرة على التحمل إلا للمستويات المنخفضة جدًّا من العنصر (Kochian وآخرون ٢٠٠٤). ومن بين أصنافه المتحملة والمتوسطة الحساسية Dayton، و Harlan Hybrid، على التوالى. وقد تبين أن الجين Alp متعدد الآليلات؛ الأمر الذى يفسر تعدد مستويات التحمل بين الأصناف المتحملة (Samac & Tesfaye ٢٠٠٣).

السورجم

وجد جين واحد رئيسى سائد يتحكم فى تحمل سمية الألومنيوم فى السورجم أُعطى الرمز Alt_{SB}. وعلى خلاف الجينات Alp، و Alt3، و Alt_{BH}، فإن الجين Alt_{SB} لا يرتبط بالمعلمات الوراثية (RFLPs، و SSRs) الخاصة بها، كما أن استجابة التحمل فى السورجم تستغرق أيامًا لكى تظهر كاملة، بما يعنى أن السورجم يسلك مسارًا وراثيًا وفسيولوجيًا لتحقيق تحمل الألومنيوم يختلف عما فى القمح والشعير والراى (Kochian وآخرون ٢٠٠٤). وقد وجد أن درجة توريث صفة تحمل الألومنيوم فى السورجم عالية نسبيًا (Singh ١٩٩٣).

الذرة

وجد أن صفة تحمل الألومنيوم فى الذرة يتحكم فيها جين واحد متعدد الآليلات. وعلى الرغم من تحديد جين واحد – أعطى الرمز Alm1 – لتحمل الألومنيوم فى الذرة، فقد اقترح – كذلك – جين آخر أُعطى الرمز Alm2، مع وجودهما على الكروموسومين أرقام ١٠، و ٦، على التوالى. وقد تبين أن الجين Alm1 ذة تأثير أقوى على تحمل الملوحة فى الذرة عن الجين Alm2 (عن Samac & Tesfaye ٢٠٠٣).

هذا .. إلا أن Krill وآخرين (٢٠١٠) وجد أن صفة تحمل الألومنيوم فى الذرة كمية يتحكم فيها أربعة جينات، كما يلى:

Zea mays Alt_{SB} like (ZmASL)

Zea mays aluminum-activated malate transporter 2 (ALMT2)

S-adenosyl-L-homocysteinase (SAHH)

Malic Enzyme (ME)

الأرز

يُعد الأرز أحد أبرز الأمثلة على الطبيعة الكمية لصفة تحمل سمية الألومنيوم. ولقد تبين من عدة تلقيحات أجريت بين تحت النوعين *indica*، و *japonica*، وبين

indica والنوع البرى *Oryza rufipogon* وجود ٢٧ موقعًا (QTLs) ذو أهمية بالنسبة لتحمل الألومنيوم، وذلك كما قدرت بواسطة معدل النمو النسبى للجذور (Kochian وآخرون ٢٠٠٤).

وقد أمكن استخدام تحليل الـ RFLP تحديد ٩ مناطق جينية على ثمانى كروموسومات ذو علاقة بتحمل الألومنيوم، إلا أن واحدة من الـ QTLs — هى QA1R1a — التى عُرِّفت بمعلم الدنا WG110 — وكانت على الكروموسوم رقم ١ — أظهرت أكبر تأثير على نمو جذور الأرز فى مزارع مائية تحتوى على الألومنيوم (Samac & Tesfaye ٢٠٠٣).

فول الصويا

أمكن فى فول الصويا باستخدام تحليل الـ RFLP تحديد خمس QTLs — كل ذات تأثير محدود — تتحكم فى مستوى تحمل الألومنيوم، وذلك فى تلقيح بين الصنف المتحمل Young والسلالة الحساسة PI 416937 (عن Samac & Tesfaye ٢٠٠٣).

البسلة

دُرست وراثة تحمل الألومنيوم فى البسلة فى نباتات الآباء والجيلين الأول والثانى والتلقيحات الرجعية للتلقيح بين السلالتين المتحملتين Azad PI، و PC-55-11-1-2 والسلالتين الحساستين PC-493-5، و PSM-2، مع إجراء التقييم فى محلول مغذٍ يحتوى على ٣٠ جزءًا فى المليون من الألومنيوم، ومع الصبغ بالهيماتوكسلين وملاحظة استعادة الجذور لنموها. وقد أوضحت النتائج أن صفة التحمل بسيطة وسائدة ويمكن نقلها بسهولة ببرنامج تربية بالتهجين الرجعى (Singh & Choudhary ٢٠١٠).

الهندسة الوراثية لتحمل الألومنيوم

يبين جدول (١٢–١) بعض حالات التحول الوراثى التى أجريت بهدف تحسين تحمل الألومنيوم فى النباتات.