

## مدخل إلى الفيزيولوجيا البيئية

### Introduction to Ecophysiology

#### ما الفيزيولوجيا البيئية؟ What's Ecophysiology

تعدُّ الفيزيولوجيا البيئية النباتية فرعاً من الفيزيولوجيا التطبيقية يُعنى بدراسة البيئة والفيزيولوجيا معاً، اعتماداً على علم البيئة، علم البيئة التطبيقي، علم البيئة المائية، علم البيئة البرية، علم المناخ الحيوي، التغير المناخي والحياة، فيزيولوجيا التغذية المعدنية، فيزيولوجيا النمو والتمايز الخلوي، العلاقات المائية، الكيمياء النباتية، أي تدمج الفيزيولوجيا البيئية النباتية بين البيئة النباتية ومقاومة النباتات للإجهاد البيئي.

نادراً ما يكون النبات موجوداً في ظروف بيئية مثالية، وغالباً ما يتعرض في دورة حياته لظروف بيئية قاسية، كالجفاف وارتفاع أو انخفاض كبير في درجة الحرارة، ونقص أو زيادة كبيرة في شدة الإضاءة؛ ما يسبب الإجهاد الذي يترك تأثيره السلبي في جميع العمليات الفيزيولوجية بصفة عامة والاستقلابية بصفة خاصة، وهناك أضرار مختلفة فعلاً تقع على النبات، ولا بد من معرفة آلية مقاومة النباتات المختلفة لهذه الإجهادات، ويعد إجهاد الجفاف من أهم المشكلات التي تواجه التوسع الزراعي في أغلب مناطق العالم، لاسيما في المناطق الجافة وشبه الجافة.

تعدُّ فيزيولوجيا الإجهاد من أكثر موضوعات الفيزيولوجيا البيئية صعوبة ( Levitt 1982)، بسبب اعتمادها على (Larcher 1995):

- ✓ جميع فروع فيزيولوجيا النبات،
  - ✓ صعوبة الدراسات الحقلية على المستوى التقني أو على مستوى تحليل البيانات والقياسات والنتائج،
  - ✓ تحديد مسؤولية العوامل والإجهادات البيئية المتزامنة والمتداخلة.
- ويرتبط المسار اليومي والفصلي للنمو، وإنتاج المادة العضوية لأنواع النباتية المختلفة بفعالية التركيب الضوئي لدى النباتات، ويصعب تحديد مدى هذه الفعالية ومدى ارتباطها بالعوامل المؤثرة خلال فترة زمنية معينة، ضمن الظروف الحقلية بسبب تداخل كثير من العوامل البيئية (ضوء، ماء، درجة الحرارة، ...)، والعوامل الداخلية (نسبة اليخضور،

العجز المائي الداخلي، الوضع المائي الداخلي، المواد الناتجة عن التفاعل، ...، والعوامل الوراثية والتطورية.

ثم يتطلب إظهار الصورة الكاملة للتركيب الضوئي أو أية عملية فيزيولوجية أخرى، تحت تأثير العوامل المختلفة، إجراء كثير من البحوث والدراسات المعمّقة التي تحتاج بدورها كثيراً من الخبرة والتحليل العلمي الدقيق. فدراسة احتياجات الأنواع وتحملها لمجمل العوامل والاختلاف فيما بينها جميعاً تحدّد توزيع الأنواع النباتية وغازاتها، وإن كانت احتياجات الأنواع كثيرة، مثل: الكربون والنيتروجين والحموض الأمينية، وغيرها... فالأفضل دراستها مع النظر في موضوع الطاقة.

### التوزيع الفيزيولوجي للنبات Physiological Distribution of Plant

لكمية المطر المتساقطة وتوزيعها السنوي دور كبير في تحديد الأنواع النباتية التي تستوطن رقعة معينة من الكرة الأرضية، فمثلاً: يختلف الغطاء النباتي في المنطقة التي تتميز بفصل جاف وفصل رطب عن الغطاء النباتي في منطقة أخرى تستقبل الكمية نفسها من المطر ولكنها موزّعة على جميع فصول السنة. وللماء تأثير مباشر في جميع العمليات الفيزيولوجية والاستقلابية في الخلايا النباتية، كالنمو وحركة النبات وحركة الثغور والإنبات والتفاعلات الكيميائية واستجابة النباتات لمحتوى الرطوبة في الوسط البيئي حيث تعيش، إذ تظهر غالباً على صفاتها المورفولوجية والتشريحية.

### توزيع الأنواع المتوطنة Endemic species

هنالك 243 نوعاً متوطناً في سورية استناداً إلى الدراسات السابقة (مسح موتيرد (Mutierd survey)، للمقارنة فإن سورية ولبنان تضم 330 نوعاً متوطناً، أي نحو 8% من المجموع النباتي متوطن في البلدين.

الجدول . الفصائل 15 المتوطنة ومعدّل التوطن لأنواع الفصائل.

معدّل توطّن أنواع الفصائل	إجمالي الأجناس والأنواع		الأنواع المتوطنة	الفصائل	
	S	G			
13	402	50	52	Fabaceae	الفولية
8	332	106	29	Asteraceae	النجمية
15	180	31	27	Lamiaceae	الشفوية

17	142	24	25	Liliaceae	الزنبقية
39	41	4	16	Iridaceae	السوسنية
7.8	154	24	12	Apiaceae	الخيمية
9	108	15	10	Scrophulariaceae	الخنزيرية
33	21	11	7	Caryophyllaceae	القرنفلية
3.8	184	21	7	Brassicaceae	الملفوفية
8	25	12	6	Ranunculaceae	الحدوانية
9.8	51	5	5	Euphorbiaceae	الأفورية
4	90	29	4	Boraginaceae	الحممية
1.7	227	5	4	Capanulaceae	الكامبانولية
12	25	7	3	Malvaceae	الخبيزية

الجدول . الأجناس 9 وأنواعها ومعدل التوطن.

المعدل %	عدد الأنواع المتوطنة	إجمالي عدد الأنواع	الأنواع المتوطنة	الفصائل		
38	12	23	<i>Iris</i>	Iridaceae	السوسنية	1
28	31	110	<i>Astragalus</i>	Fabaceae	الفولية	2
26.6	10	45	<i>Centaurea</i>	Asteraceae	النجمية	3
26	12	46	<i>Allium</i>	Liliaceae	الزنبقية	4
22	8	36	<i>Verbascum</i>	Scrophulariaceae	الخنزيرية	5
13	4	30	<i>Salvia</i>	Lamiaceae	الشفوية	6
13	7	53	<i>Trifolium</i>	Fabaceae	الفولية	7
11	4	35	<i>Vicia</i>	Fabaceae	الفولية	8
11	5	45	<i>Euphorbia</i>	Euphorbiaceae	الأفورية	9

الجدول . مناطق الحماية الرسمية في سورية.

العام	المنطقة (هكتار)	مجال التنوع الحيوي الأساسي	الموقع	منطقة الحماية
2001	653	غابة السنديان المتدهورة	السويداء	ضمنة السويداء
2005	133	غابة	القنيطرة	جباتا الخشب
2004	600	مواقع تراثية	ريف دمشق	دير مار موسى
2006	19.000	غابة البطم المتدهورة	حمص/ ريف دمشق	اللزاب
2005	17500	أراض متدهورة	ريف دمشق	دير عطية
1999	11.000	غطاء أخضر	حماة	أبو قبيس

اللجاة	السويداء	أراض متدهورة	2000	2006
--------	----------	--------------	------	------

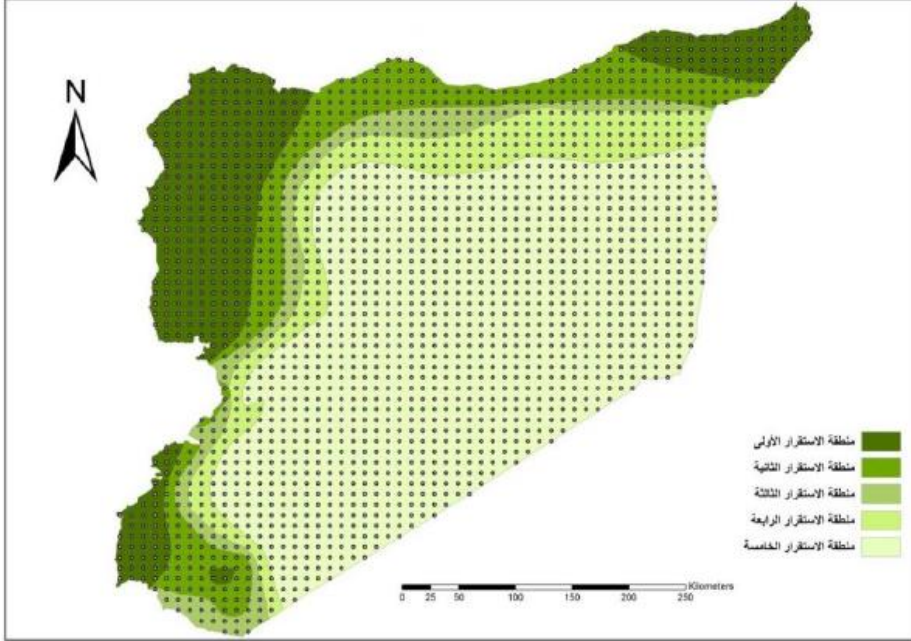
### AL-Lajat (Man and Biosphere PA):



الشكل . اللجاة (منطقة محمية).

تختلف الاحتياجات المائية من نبات لآخر كما تختلف في النبات الواحد حسب طور النمو والفصل والبيئة المزروع فيه، إضافة إلى أن العوامل البيئية المختلفة التي يتعرض لها النبات تؤثر تأثيراً كبيراً في النتج وبالتالي في الاحتياجات المائية، فمثلاً درجات الحرارة المنخفضة والمرتفعة، سرعة الرياح، الرطوبة الجوية، المحتوى المائي الأرضي، الموسم، النبات نفسه، كلها عوامل تؤثر في معدلات البخر - نتج والتي تكون عالية في الصيف منخفضة في الشتاء دائماً.

كما أن الأمطار خلال فترة الإزهار عامل مهم في تحديد عقد الثمار. وتسبب الأمطار الأضرار كإتلاف اللقاح وإتلاف عصارات المياسم، وتخفيض حيوية اللقاح، والإضرار بنشاط الحشرات الملقحة.



الشكل . توزيع النباتات وغازاتها والزراعة حسب مناطق الاستقرار الزراعي في سورية.

### ظاهرة الاستفراد/ الأليلوباثي Allelopathy

عملية تنطوي على مُستقلبات ثانوية تنتجها النباتات والأحياء الدقيقة والفيروسات والفطريات التي تؤثر في نموّ وتطوّر النظم الحياتية والزراعية عندما تنمو معاً في المجتمع النباتي نفسه، بما في ذلك التأثيرات الإيجابية والسلبية. توجد المركّبات ذات التأثير الأليلوباثي (مواد كيميائية ضارة في أكثر الحالات أو منشّطة لنبات آخر) في أجزاء النباتات (الجذور، الأوراق، والسوق، والبذور والأزهار). وتُعدّ الفينولات والغللافونات والتربينويدات وحمض الكومارين من المواد ذات التأثير الأليلوباثي، وتكون هذه المواد على صورة سائلة أو صلبة أو غازية (Karmegam *et al.*, 2014).

### العوامل البيئية المجهدة Stress Ecological Factors

يمكن أن يحدث النموّ النباتيّ تحت ظروف الإجهادات المختلفة والموارد الشحيحة low input، ويتضمن ذلك عناصر التوازن المائي في الوسط المحيط، والتربة والنبات والهواء، وعناصر الجهد المائي للتربة، وكفاءة استعمال النبات للماء، والجفاف المناخي، ومقاومة النباتات للجفاف والحرارة والإشعاع.

تتضمن العوامل البيئية المجهدة: العوامل البيئية الحياتية والعوامل اللاحياتية التي تشمل بدورها: الضوء ودرجة الحرارة والغلاف الجوي والهواء والتربة والماء والتضاريس وعوامل أخرى لها دور في تنظيم العمليات الحيوية والتفاعلات الكيميائية في الخلية. وإلى جانب ذلك، يتّصف التركيب الوراثي للنباتات بأهميّة كبيرة، فما حياة النباتات إلا نتيجة تفاعل البيئة مع التركيب الوراثي، إذ تؤثر العوامل البيئية في نموّ النباتات وتطوّرها، وهي تتداخل فيما بينها في تأثيرها في العمليات الفيزيولوجية، فالنباتات تستجيب للعامل البيئي على نمط واحد، لكن استجابة النباتات لأي عامل تختلف باختلاف شدته أو تركيزه إلى التركيز الحدّي threshold (العتبة)، ولكلّ عامل بيئي حدّ أدنى minimum وحدّ أقصى maximum وحدّ أمثل optimum، فالعمليات الفيزيولوجية والاستقلابية جميعها تصل إلى أقصى معدّل بها عندما يصل تركيز العامل إلى الحدّ الأمثل، وينخفض معدّل العمليات بزيادة تركيز العامل البيئي أو نقص شدّته عن الحد الأمثل.

تسبب الإجهاد ظروف بيئية، مثل: الغدق water-logging والجفاف ودرجات الحرارة المرتفعة أو المنخفضة، وملوحة التربة المفرطة excessive soil salinity ونقص المعادن في التربة inadequate mineral in the soil والضوء الشديد أو الخافت. تتعرّض النباتات لتغيّرات كثيرة في العوامل البيئية المختلفة التي تحيط بها، وتكون هذه التغيرات يومية أو موسمية، وهكذا تتأثر العمليات الفيزيولوجية بالتغيرات البيئية المختلفة؛ ويحدث تغيّر في عمليات البناء (الضوء، CO<sub>2</sub>)، وفي مكونات النباتات (تأثير الضوء في تمدّد الأوراق وفي اخضرارها)، يترك تأثيراً في انطلاق عملية جديدة لها دور في تنظيم النمو النباتي وتطوره، ما يحدّ أو يمنع من نجاح النباتات في منطقة معينة وتوزيعه فيها، ولكي يصون النبات حياته واستمراره لا بدّ أن يقاوم الضغوط البيئية ويتحمّل هذه التغيرات.

## الإجهاد البيئي Environmental Stress

الإجهاد البيئي هو تغيّر فيزيولوجي يحدث عندما تتعرّض الأنواع النباتية للظروف القاسية أو غير المرغوب فيها، لا تهدّد حياتها بالضرورة، بل قد تكون حافزاً لاستجابتها للتكيف لهذه الظروف. ويكون الإجهاد على أنماط.

الإجهاد الفيزيائي Physical Stress هو مجموعة من الظروف تتسبب في إحداث تغييرات ملموسة في العمليات الفيزيولوجية تؤدي تدريجياً إلى إحداث الضرر، إذ تؤثر

بطريقة إيجابية أو سلبية في الأنماط الفيزيولوجية، فالجفاف يزيد من النشاط الإنزيمي إلى حد معين وإذا زاد على ذلك فإنه يحدث تثبيطاً قوياً.

الإجهاد الكيميائي Chemical Stress هو مجموعة من المواد الكيميائية الملوثة الضارة تتسبب في إحداث تغييرات ملموسة في العمليات الفيزيولوجية، كالمبيدات والعناصر الثقيلة والسموم الكيميائية الطبيعية أو الصناعية، وغيرها، وكذلك الزيادة المرتفعة في تركيز الملوحة أو الرقم الهيدروجيني pH.

الإجهاد الفيزيولوجي Physiological Stress هو انعكاس لمجموعة من الضغوط البيئية لإحداث تغييرات في فيزيولوجيا النباتات، ويسمى أيضاً الإجهاد الحيوي Biological Stress، تمييزاً له من الإجهاد المغيّر للأبعاد Strain، والذي يعرف بأنه التغيير الجزئي في المادة نتيجة للإجهاد، يعود إلى الوضع الطبيعي إذا كان خفيفاً وإلا بقي ثابتاً ودائماً، ويمكن أن يميز بالتغيير الفيزيولوجي الحادث استجابة للإجهاد البيئي الذي لا يؤدي بالضرورة إلى تخفيض بالنمو أو التكاثر، وهو الذي يختص بآليات التداخل بين المجتمعات وتأثير العوامل المرضية.

## فيزيولوجيا الإجهاد البيئي Stress Physiology

### أضرار الإجهاد Damages of Stress

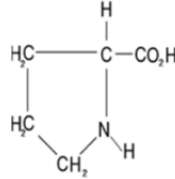
مادام الإجهاد عاملاً شديداً التأثير فإنه يترك أضراراً متباينة على النباتات، كالاتي:  
(1) الأضرار المباشرة للإجهاد direct stress injury:- تحدث الأضرار المباشرة عند التعرض للإجهاد حيث ينتج عنه شدّ غير مرن (غير عكسي) يؤثّر مباشرة وبسرعة؛ ما يؤدي إلى موت النبات بعد فترة قصيرة، فالتجمّد الفجائي للنبات مميت بسبب تمزّق الأغشية الخلوية بفعل البلورات الثلجية.

(2) الأضرار غير المباشرة للإجهاد Indirect Stress Injury:- تحدث الأضرار غير المباشرة عند التعرض للإجهاد حيث ينتج عنه شدّ مرّن elastic strain، وهي غير ضارة عملياً لكن استمرار الشدّ قد يتحوّل إلى شدّ غير مرّن، فيضرّ بالنبات أو يؤدي إلى موته، إذ تسبّب درجة الحرارة المنخفضة شداً مرناً يؤدي إلى نقص في معدّل جميع العمليات الفيزيائية والكيميائية داخل النبات، ويحدث أن يضطرب التوازن في الاستقلاب أو يتراكم بعض المركبات السامة؛ فيجلب الضرر أو الموت للنبات.

(3) الأضرار الثانوية secondary stress injury: - تنشأ الأضرار الثانوية نتيجة تعرّض النبات لإجهاد أساسي، فمثلاً: عند تعرّض النباتات لدرجة حرارة مرتفعة فإن ذلك لا يضرّ بالنباتات مباشرة، لكن ذلك يدفع إلى الإجهاد الجفافي في النباتات بسبب زيادة البخر نتج على معدّل الامتصاص؛ ما يحدث ضرراً لاحقاً للنبات (أي ضرراً ثانوياً).  
تنشأ حالة من الشد الفيزيائي أو الشد الكيميائي عند تعرّض النبات لإجهاد حياتي (حيوي أو بيولوجي)، وقد تكون التغييرات التي تحدث عكسية، تزول بإزالة الإجهاد، عندما يكون الإجهاد خفيفاً، لكن زيادة شدة الإجهاد على حدّ معيّن قد تسبّب تغييرات دائمة على النباتات، أو ضارة بها أو تدفعها إلى الموت.

### البرولين The Proline

البرولين حمض أميني غير قطبي، مهم لتركيب البروتينات، هو الحمض الأميني الوحيد من 20 حمضاً أمينياً الذي تكون فيه زمرة الأمين  $NH_2$  غير حرّة، إذ يحتوي وظيفية ثانوية وليست أولية، ويسمى الحمض الإميني imin acid، يتراكم البرولين داخل النبات عادة كردّ فعل لتكيفه أو تحسّسه مع إجهاد معيّن (درجات الحرارة المنخفضة، الملوحة، نقص الماء)، الذي يمكن معرفته مبكراً خلال دورة حياة النبات، فتراكمه في نباتات عديدة كالقمح والشعير مستقلّ عن طور النمو النباتي لكنّه مرتبط بالتغذية المائية، وله دور مهم على المستوى الخلوي في صون ضغط تناضحي داخلي مرتفع.



الشكل . الصيغة العامة للبرولين.

ويرتبط تراكم البرولين في النباتات بوجود إجهاد مائي أو حراري أو ملحي.

### اليخضور The Chlorophyll

هنالك علاقة عكسية بين مستوى تراكم البرولين وخسارة محتوى اليخضور الكلّي، فالنوع النباتي الذي يكون فيه تراكم أكثر للبرولين يكون أكثر انخفاضاً لليخضور والعكس صحيح، واستعمال مادة الغاباكولين gabaculine يكشف عن تركيب اليخضور والبرولين اللذين يتنافسان على الغاباكولين لأنه سليف precursor مشترك بينهما.



يؤدي تعرّض النبات للجفاف إلى ارتفاع البرولين على مستوى الصانعات الخضراء وينخفض معدّل دورة كالفن الذي يمنع أكسدة NADPH إلى NADP<sup>+</sup>، عندما يجتمع مع الضوء العالي الإلكترون المتدفّق في سلسلة نقل الإلكترون عن طريق NADP<sup>+</sup> المستقبل الإلكتروني غير الكافي الذي يؤدي إلى إنتاج الأوكسجين الداخلي في مركز التفاعل PSI وتراكم ROS الذي يعمل على هدم الغشاء وبالتالي تخفيض اليخضور.

### التكيّفات النباتية لظروف الإجهاد

#### Plant adaptation to Stress Conditions

تنتج النباتات بذوراً أكثر بكثير جداً مما يستوعبه موئلها، فالعوامل المحدّدة كثيرة جداً، وتكون البعثة وسيلة مهمة لانتشارها، وتختلف مقدرة البذور على مقاومة الظروف البيئية غير الملائمة حسب الأنواع، وتتمكّن النباتات من الاحتفاظ بالحيوية أسابيع أو سنوات. وتدخل بذور أنواع كثير من النباتات في مرحلة السبات وتختلف مقدرتها على ذلك حسب الأنواع، وإن كانت الظروف ملائمة، وتُحسب السعة التكاثرية بالعلاقة:

$$\text{السعة التكاثرية} = (\text{معدل البذور المتكوّنة} * \text{نسبة الإنبات}) / 100$$

يبدأ الإنبات/ الإنتاش وينشط الجنين مكوناً البادرة seedling، ويترك مجمل العوامل البيئية معاً تأثيراً في نمو النبات الإعاشي؛ ما يرسم حالة النبات ومستقبله.

تُقسم النباتات المقاومة للملوحة في الترب الملحية saline soils، كالاتي:

+ نباتات ملحية حقيقة Halophytes يمكنها النمو والعيش متحمّلة للملوحة الزائدة، وموئلها البيئات الملحية، وأهم الفصائل النباتية الملحية: الفصيلة الرمرامية Chenopodiaceae والبلمباجينية Plumbaginaceae والفرانكينية Frankeniaceae.

+ نباتات متحمّلة للملوحة، وهي على درجات، مثل: *Cynodon*, *Imperata*, *Shanginia*، من النباتات الحولية أو المعمرة، ومن الشجيرات الطرفاء *Tamarix*.

### مقاومة الإجهاد البيئي Resistance of Environmental Stress

مقاومة الإجهاد Stress Resistance هي كميّة الإجهاد اللازم لقتل 50% من

خلايا الكائن الحي تحت الاختبار، ولها أنماط مختلفة، كالاتي:

<sup>1</sup>= المقاومة بالتجنّب stress avoidance، تتصف النباتات التي تقاوم بالتجنّب بوجود طرائق فيزيائية أو كيميائية لمنع دخول الإجهاد إلى داخل النسج، مثلاً: تركيز منخفض للملح داخل النسج مقارنة بتركيزه خارجها.

=2 المقاومة بالتحمل Stress Tolerance، تتصف النباتات التي لا يمكنها منع دخول الإجهاد إلى نسجها بمقدرتها على منع أو تحمل الشد الذي يسببه الإجهاد.

=3 التكيف Adaptation: تتمكّن النباتات التي تقاوم التغيرات في وسطها المحيط من تحمل قدر معين من التغيير، بامتلاك تحوّرات تركيبية ووظيفة قابلة للتوريث تزيد احتمال انتشار هذه النباتات في البيئة التي تغيّرت.

=4 التقسية Hardening: تتمكّن النباتات التي تقاوم التغيرات في وسطها المحيط عن طريق تعريضها لدورات من الإجهاد الخفيف؛ ما يفيد في التعوّد على مقاومة الإجهاد الشديد عند تعرّضها له.

لا ريب في أن دراسة الماء، بخصائصه المميزة وحكم أهميته ووجوده في النبات، تستأثر بأهمية كبيرة في فيزيولوجيا الإجهاد المائي water stress physiology وفهم الجوانب المختلفة من حياة النباتات، ويتضمن ذلك الصفات الفيزيائية والكيميائية والحيوية للماء، وكذلك العلاقات المائية في النبات، وما يرتبط مع ذلك من خصائص للتربة ومحلول التربة، وامتصاص النبات للماء، وكذلك بنية النباتات والظروف المناخية وميزات البخر - نتح والثغور، وغيرها.

#### العوامل التي تسمح بالتنظيم التناضحي

ما دام الماء يعدّ عاملاً محدداً للإنتاج لاسيما الحبوب فإن تكثيف الخلايا مع وضع ما يرتبط بظاهرة التنظيم التناضحي لأنه إجراء حياتي يحمي العضو من تأثير نقص الماء. تختلف استجابة الأنماط الوراثية لنقص الماء حسب الأنواع، يُعدّ التنظيم التناضحي معياراً مهماً في مقاومة الجفاف، يسمح بإعطاء أهمية لبعض مظاهر المقاومة بتخفيض الضغط المائي والإبقاء على الضغط الانتجاخي بتراكم مختلف المواد ذات دور المنظم - التناضحي Osmo-regulator، تكون هذه المواد المتراكمة عموماً حموضاً عضوية (الماليك malic)، وشوارد (Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, K<sup>+</sup>)، وسكريات ذائبة، وحموضاً أمينية (الجليسين بيتاين Glycine betaine، البرولين).

إن النباتات التي تتعرّض لظروف غير عادية، مثل: الإضاءة الشديدة chilling، البرودة الشديدة، الحرارة الشديدة، التعطيش، التغدّق، الإشعاع، التلوث بالغازات السامة أو زيادة تركيز غاز معين مثل الأوزون، الإصابة بالعوامل الممرضة والطفيليات، كل تلك

العوامل وغيرها من عوامل الإجهاد البيئي تنشط وينشط بعضها بعضاً في زيادة إنتاج جذور الأوكسجين النشط active oxygen species.

وتتدخل أصناف من الإنزيمات لحماية النسيج ضد عمليات الأوكسدة الناتجة عن فعل جذور الأوكسجين النشط والناتجة أصلاً تحت ظروف الإجهاد.

ويرجع السبب في السمية phytotoxicity الشديدة الناتجة عن الأوزون O<sub>3</sub> لمقدرته الشديدة على التأكسد لإنتاج أنواع جزيئية سامة toxic molecular specie، مثل: سوبر أكسيد super oxide anion، الجذور الهيدروكسيلية hydroxyl radicals، بيروكسيد الهيدروجين hydrogen peroxide.

يؤدي الإجهاد إلى تكوين جذور الأوكسجين النشط والتأثير في سلسلة نقل الإلكترون. وقد لوحظت زيادة في هدم الأغشية وزيادة في البيروكسيدات الدهنية،

**جذور الأوكسجين التفاعلي ROS = Free radicals = Reactive oxygen species**

الجذور/ الجذيرات الحرة Free radicals

إن النباتات التي تتعرض للعديد من الظروف الجوية القاسية كالانخفاض أو الارتفاع الشديد في درجة الحرارة أو النقص الشديد في محتوى التربة من العناصر المغذية أو ظروف التعطيش أو التغدق، والظروف الحياتية غير العادية أو الإصابة بالعوامل المرضية أو التلوث بالأوزون أو الإضاءة الشديدة أو الإشعاع الشديد، كل تلك الظروف تؤثر سلبياً في نمو النباتات وجودة وكمية الإنتاج.

تسبب الجذيرات الحرة تخريب وهدم الخلايا والنسج النباتية، والمواد المضادة للأوكسدة التي تقوم بصون هذه الخلايا والنسج النباتية تحت ظروف الإجهاد.

وجذيرات الأوكسجين الحرة من أهم العوامل المؤدية إلى دخول النبات في طور الهرم، عن طريق تنشيط عمليات الأوكسدة الضارة للجزيئات الحياتية والتي تؤدي إلى هدم الخلايا وموت النبات.

أهم العوامل التي تظهر في الخلايا والنسج النباتية تحت ظروف الإجهاد:

نشاط ليبوكسيجيناز Lipoxigenase activity الذي يهدم الحموض الدهنية poly unsaturated fatty acids بفعل الأوكسجين ليعطي منتجات الهيدروبيروكسيد hydroperoxide products، وله دور مهم في هدم دهون الأغشية المحرصة بالإجهاد.

جذور الأوكسجين المنشط Activated oxygen species

المركبات المنشّطة المرتبطة بالإجهاد stressed promoting compounds، مثل: الإثيلين ethylene وحمض الجاسمونيك jasmonic acid. لا ريب في أن عوامل عديدة أخرى تحدّد درجة استجابة النبات لظروف الإجهاد البيئية، مثل: نوع الإجهاد الحاصل، عدد المرّات التي يتعرّض فيها النبات للإجهاد، فترة التعرّض لظروف الإجهاد، شدّة الإجهاد، التركيب الوراثي، وجود بعض العوامل المنشّطة المشجّعة لمضاعفة تأثير وشدة الإجهاد، آليات مقاومة الإجهاد.

### المواد الكانسة للجذيرات الحرّة

### Scavenging compounds of Free radicals

أنماط الجذيرات الحرّة Types of free radicals

جذور الأوكسجين المنشّط هي المادة المؤكسدة الرئيسية التي تهدم الخلايا والنسج النباتية

تحت ظروف الإجهاد، وهذه الجذيرات الأوكسجينية هي:

1	Superoxide radicals $O_2^-$	2	Hydroxyl radicals OH
3	Singlet oxygen radicals $O_2^1$	4	Peroxyl radicals $H_2O_2$
5	Alkoxy radicals Ro	6	Peroxyl radicals Roo
7	Poly unsaturated fatty acids	8	Semi quinone free radicals
9	Atomic oxygen radicals (O)	10	Photolytic ozonation radicals ( $O_3$ )
11	Sulfur monoxide radicals (So)		

هذه المواد جذور الأوكسجين المنشّط لاسيما OH و  $O_2^-$  مواد مؤكسدة قويّة جداً وتقوم سريعاً بمهاجمة الجزيئات الحياتية biomolecules، مثل: جزيئات الدنا؛ ما يؤدي إلى خلل شديد في عمليات الاستقلاب واختلال وظيفي لا يمكن إصلاحه أو تعويضه فيسبب موت خلايا النسج النباتي.

الدور الفيزيولوجي لجذيرات الأوكسجين المنشّط في النسج النباتية

يمكن أن تتميز جذيرات الأوكسجين الحرّة المتكوّنة في الخلايا النباتية بدور مهم في العمليات الفيزيولوجية كإلحاق الضرر الخلوي، منشّطات الهرم، الأوكسدة الاستقلابية. ويجري إنتاج جذور السوبر أوكسيد  $O_2^-$  superoxide radicals في الصانعات الخضراء من خلال التفاعل PSI يجري التحكم في هذا الأوكسجين النشط بتحويله إلى بيروكسيد  $H_2O_2$ ، وإذا لم يحدث كنس للبيروكسيد هنا فإن تثبيث  $CO_2$  إلى سكريات يتوقّف خلال ثوانٍ ما يؤدي إلى حدوث ذبول واضح. والإنتاج المستمر من البيروكسيد الناتج من  $O_2$  هنا يعمل على تثبيط بعض إنزيمات حلقة كالفن وكذلك أكسدة وهدم نواتج عملية التركيب الضوئي.

ينتج عن الإصابة بالعوامل الجرثومية والفيروسية والفطرية الممرضة زيادة في إنتاج جذور الأوكسجين الحرة وكذلك أكسيد النتروجين NO، ويحدث بين جذيرات الأوكسجين وأكسيد النتروجين تفاعل لتكوين مركب بيروكسيد النتريت peroxynitrite الذي يسبب أكسدة خلايا النسيج النباتية، ويحدث طفرات من خلال أكسدة وندرتة الجزيئات الحيوية. أمثلة لبعض المواد الكانسة (المثبّطة) scavengers inhibitors للجذيرات الحرة:

- (1) الأزيد (Azide) (inhibit myeloperoxidase)
  - (2) دابكو (1.4 diazo – bicycle – (2-2-2) octan (DABCO)
  - (3) دي فنيل إيزوبنزوفوران (Diphenylisobenzofuran) (as O<sub>2</sub> trap)
  - (4) أكسيد الديتوريوم (Deuterium oxide)
  - (5) سوبرأوكسيد (Superoxide anion dismutase (SOD) convert (O<sub>2</sub> to H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)
  - (6) سولفيت (Sulfite) (scavenge O<sub>2</sub> produced by xanthin oxidase)
  - (7) بنزوات (Benzoate) (Trap for OH)
  - (8) مانيتول (Mannitol) (scavenge OH)
  - (9) حمض (Ascorbic acid) (oxidized by both H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> to dehydromonoascorbate)
  - (10) تريتون (Triton) (iron chelator) (inhibit peroxiadase)
  - (11) كتالاز (Catalase)
  - (12) ساليسيل (Sallicyl hydroxamic acid (SHAM) (inhibit lipobit lipoxygenase)
  - (13) السيانيد (Cyanide) (metabolic inhibitor)
  - (14) المنظفات (Detergents (chloro mercuri benzoate) (inhibit NADPH<sub>2</sub> oxidase)
- تحتوي الخلية مواد منظفة أو كانسة Scavenging compounds خاصة بها كالأينزيمات والسكريات والحموض النووية والحموض الأمينية.
- دور مضادات الأوكسدة role of antioxidants

تعمل مضادات الأوكسدة على معادلة الجذيرات الحرة في الخلايا والنسيج النباتية، لكن هذه المواد المضادة للأوكسدة يقل محتواها تدريجياً مع ازدياد الإجهاد أو الهرم، ويحدث في هذه الظروف زيادة ملحوظة في نشاط الإنزيمات المؤكسدة التي تقوم بإنتاج جذيرات الأوكسجين المنشط ROS؛ ما يؤدي إلى ازدياد تدهور الخلايا أو النسيج النباتية ودخول النباتات في طور الهرم Senescence.

المواد المضادة للأكسدة antioxidants: قد تكون إنزيمات أو غير إنزيمية، ومن أمثلة الإنزيمات المضادة للأكسدة antioxidant enzymes.

- |   |                              |   |                                    |
|---|------------------------------|---|------------------------------------|
| 1 | Superoxide dismutase         | 2 | Catalase                           |
| 3 | Peroxidase                   | 4 | Ascorbate glutathion cycle enzymes |
| 5 | Ascorbate peroxidase         | 6 | Mono-dehydro ascorbate reductase   |
| 7 | Dehydro- ascorbate reductase | 8 | Glutathion reductase               |

ومن المواد غير الإنزيمية المضادة للأكسدة التي توجد بوفرة في الصانعات الخضراء والميتكونديريا والبيروكسيسوم.

- |   |                     |   |            |
|---|---------------------|---|------------|
| 1 | Ascorbate (vit. C)  | 2 | Glutathion |
| 3 | Tocopherol (vit. E) | 4 | Caroteine  |
| 5 | Flavonoids          |   |            |

تحت الظروف الطبيعية يعمل نظام الحماية من خلال المواد المضادة للأكسدة على حماية المنظومة الخلوية ضد الأكسجين النشط، لكن عند زيادة هذا الأكسجين النشط بدرجة عالية جداً يكون نشاطه أكبر من طاقة النظام الدفاعي للمواد المضادة للأكسدة كما هو الحال في ظروف الإجهاد أو الهرم، وعندئذ يظهر إجهاد الأكسدة Oxidative stress بوضوح.