http://krishipravahika.vitalbiotech.org/

कृषि प्रवाहिका: ई-समाचार पत्रिका

e-ISSN: 2583 – 0430

*कृषि-प्रवाहिका: ई-समाचार पत्रिका,* (2026) वर्ष 6, अंक 6, 28-31

Article ID:598

# द्वितीयक उपापचयी यौगिक: पौध प्रतिरक्षा एवं जैविक रक्षा तंत्र का केंद्रीय आधार

**आशुतोष शर्मा[1], राजेश कुमार सिंह[1], आशुतोष सिंह[1], राकेश कुमार[1], विक्रम सिंह गौड[2], चन्दर मोहन[3]**

[1]रानी लक्ष्मी बाई केंद्रीय कृषि विश्वविद्यालय, झाँसी, उ.प्र., [2]कृषि महाविद्यालय, बालाघाट, जवाहरलाल नेहरू कृषि विश्वविद्यालय, जबलपुर, म.प्र, [3]क्षेत्रीय मक्का अनुसंधान एवं बीज उत्पादन केंद्र, बेगूसराय, बिहार

अनुरूपी लेखक

**राकेश कुमार***

पौधे पृथ्वी के स्थलीय पारितंत्रों के आधारभूत घटक हैं, जो न केवल खाद्य श्रृंखला के प्राथमिक उत्पादक के रूप में कार्य करते हैं, बल्कि वैश्विक जैव–भूरासायनिक चक्रों, जैव विविधता के संरक्षण तथा पारिस्थितिकीय संतुलन को बनाए रखने में भी महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। तथापि, उनका जीवन निरंतर विभिन्न जैविक एवं पर्यावरणीय चुनौतियों से प्रभावित होता रहता है। रोगजनक सूक्ष्मजीवों, कीटों, शाकाहारी जीवों तथा तापमान, सूखा, लवणता, पराबैंगनी विकिरण और भारी धातुओं जैसे प्रतिकूल पर्यावरणीय कारकों के कारण पौधों को निरंतर तनाव का सामना करना पड़ता है। चूँकि पौधे गतिहीन जीव हैं और खतरे की स्थिति में स्थान परिवर्तन करने में सक्षम नहीं होते, इसलिए विकासक्रम के दौरान उन्होंने अत्यंत जटिल, समन्वित एवं बहुस्तरीय प्रतिरक्षा तंत्र विकसित किया है, जो उन्हें बाह्य आक्रमणों तथा प्रतिकूल परिस्थितियों से प्रभावी सुरक्षा प्रदान करता है।

पौध प्रतिरक्षा प्रणाली को सामान्यतः दो प्रमुख स्तरों में विभाजित किया जाता है। प्रथम स्तर व्यापक एवं प्रारंभिक रक्षा तंत्र का प्रतिनिधित्व करता है, जिसमें पौधे बाह्य रोगजनकों से संबद्ध संरक्षित आणविक संकेतों की पहचान करके प्रतिरक्षा प्रतिक्रिया प्रारंभ करते हैं। द्वितीय स्तर अधिक विशिष्ट, स्थानीयकृत तथा शक्तिशाली रक्षा प्रतिक्रिया का प्रतिनिधित्व करता है, जो रोगजनकों द्वारा उत्पन्न विशिष्ट प्रभावकारी अणुओं की पहचान के पश्चात सक्रिय होती है। ये दोनों प्रतिरक्षा स्तर रोगजनकों के आक्रमण की पहचान, संकेत संचरण तथा रक्षा–संबंधी जीनों के सक्रियण में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। यद्यपि प्रतिरक्षा संकेतों का निर्माण इन प्रणालियों द्वारा किया जाता है, किंतु इन संकेतों को वास्तविक जैव–रासायनिक सुरक्षा में परिवर्तित करने का कार्य मुख्यतः द्वितीयक उपापचयी यौगिकों द्वारा संपन्न होता है। यही कारण है कि पौध प्रतिरक्षा के अध्ययन में द्वितीयक उपापचयी यौगिकों को केंद्रीय महत्व प्रदान किया जाता है।

द्वतीयक उपापचयी यौगिक ऐसे विशिष्ट जैव–अणु हैं, जो प्राथमिक उपापचय से उत्पन्न होने के बावजूद प्रत्यक्ष रूप से वृद्धि, विकास अथवा प्रजनन जैसी मूलभूत जैविक प्रक्रियाओं में भाग नहीं लेते। इसके विपरीत, ये पौधों की रक्षा, अनुकूलन, प्रतिस्पर्धात्मक क्षमता तथा दीर्घकालिक अस्तित्व को सुनिश्चित करने में महत्वपूर्ण योगदान देते हैं। इन यौगिकों का वितरण सामान्यतः सीमित होता है तथा वे विशिष्ट पौध कुलों, वंशों अथवा प्रजातियों में पाए जाते हैं। एल्कलॉइड, टरपेनॉयड, फेनोलिक यौगिक, फ्लैवोनॉयड, टैनिन तथा ग्लूकोसाइनोलेट्स जैसे अनेक द्वितीयक उपापचयी पदार्थ पौधों में रासायनिक रक्षा तंत्र के रूप में कार्य करते हैं। इनका जैवसंश्लेषण प्रायः रोगजनकों के आक्रमण, कीट क्षति अथवा पर्यावरणीय तनावों के प्रति प्रतिक्रिया स्वरूप प्रेरित होता है, जिससे पौधे बदलती परिस्थितियों के अनुरूप स्वयं को अनुकूलित कर पाते हैं।

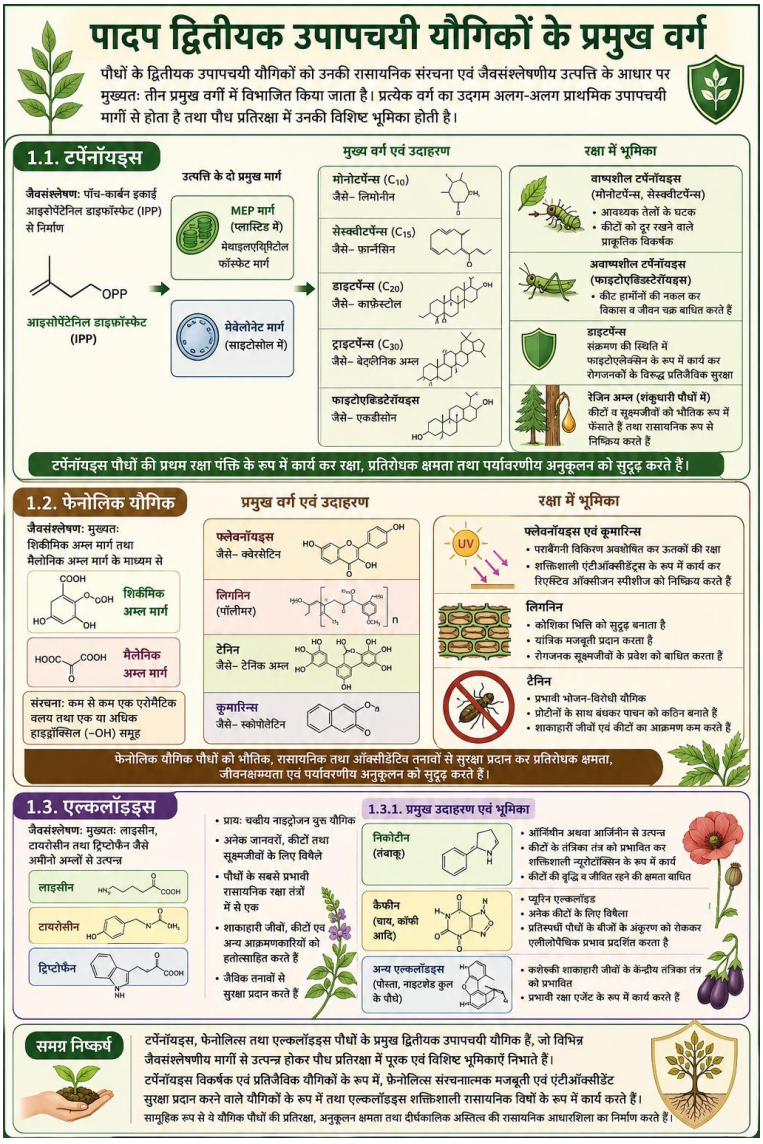
पारिस्थितिकीय दृष्टि से द्वितीयक उपापचयी यौगिकों के कार्य अत्यंत बहुआयामी हैं। एक ओर ये पुष्पों, फलों तथा अन्य अंगों में रंग एवं सुगंध उत्पन्न करके परागणकर्ताओं तथा बीज प्रसारकों को आकर्षित करते हैं, वहीं दूसरी ओर अनेक यौगिक रोगजनकों, कीटों तथा शाकाहारी जीवों के लिए विषैले, प्रतिकर्षक अथवा वृद्धि–अवरोधक सिद्ध होते हैं। इसके अतिरिक्त, कई द्वितीयक उपापचयी पदार्थ शक्तिशाली प्रतिऑक्सीकारक के रूप में कार्य करके ऑक्सीडेटिव तनाव से कोशिकाओं की रक्षा करते हैं तथा पौधों को सूखा, लवणता और तापीय तनाव जैसी प्रतिकूल परिस्थितियों का सामना करने में सहायता प्रदान करते हैं। इस प्रकार ये यौगिक पौधों के लिए एक प्रभावी जैव–रासायनिक कवच का निर्माण करते हैं, जो उनके अस्तित्व एवं पर्यावरणीय अनुकूलन का आधार बनता है।

इन यौगिकों के निर्माण में पर्याप्त ऊर्जा एवं उपापचयी संसाधनों का निवेश यह संकेत देता है कि पौध जीवन में उनका महत्व अत्यधिक है। वर्तमान समय में जीनोमिक्स, ट्रांसक्रिप्टोमिक्स, मेटाबोलोमिक्स तथा उपापचयी अभियांत्रिकी जैसी उन्नत जैव–प्रौद्योगिकीय विधियों के विकास ने द्वितीयक उपापचयी यौगिकों के जैवसंश्लेषणीय मार्गों एवं नियामक नेटवर्कों के अध्ययन को नई दिशा प्रदान की है। इन प्रक्रियाओं की गहन समझ न केवल पौध प्रतिरक्षा के मूलभूत सिद्धांतों को स्पष्ट करती है, बल्कि कृषि क्षेत्र में भी व्यापक

संभावनाएँ प्रस्तुत करती है। इस ज्ञान के आधार पर ऐसी फसल किस्मों का विकास संभव है, जिनमें प्राकृतिक रासायनिक रक्षा क्षमता अधिक सुदृढ़ हो तथा जो रोगों, कीटों एवं जलवायु परिवर्तन से उत्पन्न बढ़ते पर्यावरणीय दबावों के प्रति अधिक सहनशील हों। अतः यह स्पष्ट है कि द्वितीयक उपापचयी यौगिक केवल सहायक रासायनिक उत्पाद नहीं हैं, बल्कि पौध प्रतिरक्षा, पर्यावरणीय अनुकूलन एवं दीर्घकालिक अस्तित्व के केंद्रीय स्तंभ हैं। इन यौगिकों के जैवसंश्लेषण, नियमन तथा प्रतिरक्षात्मक कार्यों की विस्तृत समझ भविष्य में खाद्य सुरक्षा, सतत कृषि तथा जलवायु–सहिष्णु कृषि प्रणालियों के विकास में महत्वपूर्ण योगदान प्रदान कर सकती है। इसी संदर्भ में पौध प्रतिरक्षा में द्वितीयक उपापचयी यौगिकों की भूमिका का अध्ययन वैज्ञानिक तथा कृषि दोनों दृष्टियों से अत्यंत प्रासंगिक एवं आवश्यक है।

### 1. पादप द्वितीयक उपापचयी यौगिकों के प्रमुख वर्ग

पौधों के द्वितीयक उपापचयी यौगिकों को उनकी रासायनिक संरचना एवं जैवसंश्लेषणीय उत्पत्ति के आधार पर मुख्यतः तीन प्रमुख वर्गों में विभाजित किया जाता है। प्रत्येक वर्ग का उद्गम अलग–अलग प्राथमिक उपापचयी मार्गों से होता है तथा पौध प्रतिरक्षा में उनकी विशिष्ट भूमिका होती है।




#### 1.1. टर्पेनॉयड्स:

टर्पेनॉयड्स पौधों में पाए जाने वाले सबसे बड़े एवं संरचनात्मक रूप से अत्यंत विविध द्वितीयक उपापचयी यौगिकों का समूह हैं, जो पौध प्रतिरक्षा एवं अनुकूलन में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। इनका जैवसंश्लेषण पाँच–कार्बन इकाई आइसोपेंटेनिल डाइफॉस्फेट से होता है, जिसका निर्माण दो प्रमुख मार्ग में प्लास्टिड संचालित मेथाइलएरिथ्रिटोल फॉस्फेट मार्ग तथा साइटोसोल में संचालित मेवेलोनेट मार्ग द्वारा किया जाता है।

टर्पेनॉयड्स जैविक एवं अजैविक तनावों के विरुद्ध पौधों की प्रथम रक्षा पंक्ति के रूप में कार्य करते हैं। मोनोटर्पेन्स एवं सेस्क्वीटर्पेन्स जैसे वाष्पशील टर्पेनॉयड्स आवश्यक तेलों के प्रमुख घटक होते हैं और शाकाहारी कीटों को पौधों से दूर रखने वाले प्राकृतिक विकर्षक के रूप में कार्य करते हैं। दूसरी ओर, फाइटोएक्डिस्टेरॉयड्स जैसे अवाष्पशील टर्पेनॉयड्स कीट हार्मोनों की नकल कर उनके विकास एवं जीवन चक्र को बाधित करते हैं। संक्रमण की स्थिति में डाइटर्पेन्स नए सिरे से संश्लेषित होकर फाइटोएलैक्सिन के रूप में रोगजनकों के विरुद्ध प्रतिजैविक सुरक्षा प्रदान करते हैं। इसके अतिरिक्त, शंकुधारी पौधों में पाए जाने वाले रेज़िन अम्ल कीटों एवं सूक्ष्मजीवों को भौतिक रूप से फँसाने तथा रासायनिक रूप से निष्क्रिय करने में सक्षम होते हैं। इस प्रकार, टर्पेनॉयड्स पौधों की रक्षा, प्रतिरोधक क्षमता तथा पर्यावरणीय अनुकूलन को सुदृढ़ करने वाले अत्यंत महत्वपूर्ण जैव–सक्रिय यौगिक हैं।

### 1.2. फेनोलिक यौगिक:

फेनोलिक यौगिक पौधों में पाए जाने वाले महत्वपूर्ण द्वितीयक उपापचयी पदार्थ हैं, जो प्रतिरक्षा, संरक्षण तथा पर्यावरणीय अनुकूलन में केंद्रीय भूमिका निभाते हैं। इनका जैवसंश्लेषण मुख्यतः शिकीमिक अम्ल मार्ग तथा मैलोनिक अम्ल मार्ग के माध्यम से होता है। संरचनात्मक रूप से इन यौगिकों में कम से कम एक एरोमैटिक वलय तथा एक या अधिक हाइड्रॉक्सिल समूह उपस्थित होते हैं, जो इन्हें विशिष्ट रासायनिक एवं जैविक गुण प्रदान करते हैं। फेनोलिक यौगिकों के प्रमुख वर्गों में फ्लेवोनॉयड्स, लिग्निन, टैनिन तथा कूमारिन्स शामिल हैं, जिनकी रक्षा संबंधी भूमिकाएँ विविध एवं महत्वपूर्ण हैं।

लिग्निन कोशिका भित्ति को सुदृढ़ बनाकर पौधों को यांत्रिक मजबूती प्रदान करता है तथा रोगजनक सूक्ष्मजीवों के प्रवेश को बाधित करता है। टैनिन प्रभावी भोजन–विरोधी यौगिकों के रूप में कार्य करते हैं और प्रोटीनों के साथ बंधकर उनके पाचन को कठिन बना देते हैं, जिससे शाकाहारी जीवों एवं कीटों का आक्रमण कम होता है। फ्लेवोनॉयड्स एवं कूमारिन्स पराबैंगनी विकिरण को अवशोषित कर पौध ऊतकों को क्षति से बचाते हैं तथा शक्तिशाली एंटीऑक्सीडेंट्स के रूप में कार्य करते हुए तनाव के दौरान उत्पन्न रिएक्टिव ऑक्सीजन स्पीशीज़ को निष्क्रिय करते हैं। परिणामस्वरूप कोशिकीय क्षति कम होती है और पौधों की तनाव–सहनशीलता बढ़ती है। इस प्रकार, फेनोलिक यौगिक पौधों को भौतिक, रासायनिक तथा ऑक्सीडेटिव तनावों से सुरक्षा प्रदान कर उनकी प्रतिरोधक क्षमता, जीवनक्षम्यता एवं पर्यावरणीय अनुकूलन को सुदृढ़ करते हैं।

### 1.3. एल्कलॉइड्स:

एल्कलॉइड्स पौधों में पाए जाने वाले महत्वपूर्ण नाइट्रोजन युक्त द्वितीयक उपापचयी यौगिक हैं, जो मुख्यतः लाइसीन, टायरोसीन तथा ट्रिप्टोफैन जैसे अमीनो अम्लों से उत्पन्न होते हैं। संरचनात्मक रूप से ये प्रायः चक्रीय यौगिक होते हैं और अनेक जानवरों, कीटों तथा सूक्ष्मजीवों के लिए अत्यधिक विषैले सिद्ध होते हैं। इस कारण एल्कलॉइड्स पौधों के सबसे प्रभावी रासायनिक रक्षा तंत्रों में से एक माने जाते हैं। इनका प्रमुख कार्य शाकाहारी जीवों, कीटों एवं अन्य आक्रमणकारियों को हतोत्साहित करना तथा पौधों को जैविक तनावों से सुरक्षा प्रदान करना है।

#### 1.3.1. निकोटीन:

निकोटीन तंबाकू में पाया जाने वाला एक प्रमुख एल्कलॉइड है, जो ऑर्निथीन अथवा आर्जिनीन से उत्पन्न होता है। यह कीटों के तंत्रिका तंत्र को प्रभावित कर शक्तिशाली न्यूरोटॉक्सिन के रूप में कार्य करता है, जिससे कीटों की वृद्धि एवं जीवित रहने की क्षमता बाधित होती है। इसी प्रकार, कैफीन एक प्यूरिन एल्कलॉइड है, जो अनेक कीटों के लिए विषैला होता है तथा प्रतिस्पर्धी पौधों के बीजों के अंकुरण को रोककर एलीलोपैथिक प्रभाव भी प्रदर्शित करता है। पोस्ता एवं नाइटशेड कुल के पौधों में पाए जाने वाले अन्य एल्कलॉइड्स कशेरुकी शाकाहारी जीवों के केंद्रीय तंत्रिका तंत्र को प्रभावित कर प्रभावी रक्षा एजेंट के रूप में कार्य करते हैं। समग्र रूप से, टर्पेनॉयड्स, फेनोलिक्स तथा एल्कलॉइड्स पौधों के प्रमुख द्वितीयक उपापचयी यौगिक हैं, जो विभिन्न जैवसंश्लेषणीय मार्गों से उत्पन्न होकर पौध प्रतिरक्षा में पूरक एवं विशिष्ट भूमिकाएँ निभाते हैं। टर्पेनॉयड्स विकर्षक एवं प्रतिजैविक यौगिकों के रूप में, फेनोलिक्स संरचनात्मक मजबूती एवं एंटीऑक्सीडेंट सुरक्षा प्रदान करने वाले यौगिकों के रूप में तथा एल्कलॉइड्स शक्तिशाली रासायनिक विषों के रूप में कार्य करते हैं। सामूहिक रूप से ये यौगिक पौधों की प्रतिरक्षा, अनुकूलन क्षमता तथा दीर्घकालिक अस्तित्व की रासायनिक आधारशिला का निर्माण करते हैं।

**सारणी–1:** पादप रोगजनकों एवं कीटों के प्रबंधन में द्वितीयक उपापचयी यौगिकों की भूमिका

| फसल | द्वितीयक उपापचयी यौगिक | रोगजनक/कीट |
|---|---|---|
| गेहूँ | लिग्निन | स्टेम रस्ट रोग |
| मक्का | कैफिक अम्ल | ग्लोमरेला ग्रामिनिकोला |
| धान | फाइटोएलेक्सिन | व्हाइट–बैक्ड प्लांट हॉपर |
| जंगली अरहर | फ्लेवोनॉयड्स | ग्राम पॉड बोरर |
| किन्नू/मैंडरिन | रेटिसिन–ए | तंबाकू मोज़ेक विषाणु |
| हेनबेन | ट्रोपेन एल्कलॉइड्स | स्यूडोमोनास पुटीडा |
| लहसुन | एल्कलॉइड्स, ग्लाइकोसाइड्स, टैनिन्स, टर्पेनॉयड्स, फ्लेवोनॉयड्स, सैपोनिन्स | अल्टरनेरिया सोलेनाई |

**2. संकेतन एवं प्राइमिंग**

द्वितीयक उपापचयी यौगिक केवल विषैले पदार्थों, विकर्षकों अथवा संरचनात्मक रक्षा घटकों के रूप में ही कार्य नहीं करते, बल्कि वे पौधों में अत्यंत महत्वपूर्ण संकेतन अणुओं की भूमिका भी निभाते हैं। ये यौगिक पौधों के भीतर तथा पौधों के बीच रक्षा–संबंधी सूचनाओं के संचार में महत्वपूर्ण योगदान देते हैं, जिससे वे संभावित जैविक एवं अजैविक तनावों के प्रति पहले से तैयार हो जाते हैं। उदाहरण के लिए– ग्लूकोसाइनोलेट्स, जो मुख्यतः ब्रैसिका कुल की फसलों में पाए जाने वाले रक्षा यौगिक हैं, उनके अपघटन से उत्पन्न वाष्पशील यौगिक महत्वपूर्ण संकेतक अणुओं के रूप में कार्य करते हैं। ये वाष्पशील संकेत आसपास के पौधों तक पहुँचकर उनमें रक्षा संबंधी जीनों को सक्रिय कर देते हैं। परिणामस्वरूप, पड़ोसी पौधे संभावित रोगजनक या कीट आक्रमण के प्रति पहले से ही अपनी रक्षा प्रणाली को सुदृढ़ कर लेते हैं। इसी प्रकार, फाइटोएलेक्सिन्स पौधों द्वारा रोगजनक संक्रमण अथवा तनाव की स्थिति में तीव्रता से संश्लेषित किए जाने वाले प्रतिजैविक यौगिक हैं। ये यौगिक पौधों की संकेत–प्रतिक्रिया प्रणाली का उत्कृष्ट उदाहरण प्रस्तुत करते हैं। किसी रोगजनक के आक्रमण के तुरंत बाद इनके उत्पादन में वृद्धि होती है, जो यह दर्शाती है कि द्वितीयक उपापचय और इफेक्टर–प्रेरित प्रतिरक्षा के बीच घनिष्ठ संबंध मौजूद है।

**3. प्राइमिंग में योगदान**

प्राइमिंग वह प्रक्रिया है जिसमें पौधे किसी पूर्व संकेत, हल्के तनाव या रासायनिक उत्तेजना के प्रभाव से अपनी रक्षा प्रणाली को इस प्रकार तैयार कर लेते हैं कि भविष्य में होने वाले तनावों के प्रति वे अधिक तीव्र एवं प्रभावी प्रतिक्रिया दे सकें। कई द्वितीयक उपापचयी यौगिक इस प्रक्रिया में महत्वपूर्ण भूमिका निभाते हैं। ये पौध कोशिकाओं को "सतर्क अवस्था" में बनाए रखते हैं, जिससे रोगजनक संक्रमण, कीट आक्रमण या पर्यावरणीय तनाव की स्थिति में रक्षा प्रतिक्रियाएँ अधिक शीघ्रता से सक्रिय हो जाती हैं। इस प्रकार, द्वितीयक उपापचयी यौगिक पौध प्रतिरक्षा के केवल प्रत्यक्ष रासायनिक हथियार ही नहीं हैं, बल्कि वे रक्षा संकेतों के संचार, प्रतिरक्षा जीनों की सक्रियता तथा प्राइमिंग प्रक्रियाओं के माध्यम से पौधों की अनुकूलन क्षमता एवं तनाव–सहनशीलता को भी बढ़ाते हैं। इसलिए इन्हें पौध प्रतिरक्षा एवं रक्षा तंत्र का एक केंद्रीय नियामक घटक माना जाता है।

**सारणी–2:** अजैविक तनावों के अंतर्गत पौधों में द्वितीयक उपापचयी यौगिकों के उत्पादन पर प्रभाव

| अजैविक तनाव | द्वितीयक उपापचयी यौगिक वर्ग | पौध प्रजाति |
|---|---|---|
| पराबैंगनी विकिरण | फ्लेवोनॉयड्स | अरेबिडोप्सिस थालियाना में तनाव सहनशीलता |
| उच्च पराबैंगनी विकिरण | एल्कलॉइड्स | क्लेमाटिस टेर्निफ्लोरा |
| नीला प्रकाश | एन्थोसाइनिन | टमाटर में फूल आने की तेज प्रक्रिया |
| सूखा | फ्लेवोनॉयड्स | गेहूँ की पत्तियाँ के ताप अनुकूलन में कार्यात्मक भूमिका |
| लवणीयता | एन्थोसाइनिन | अरेबिडोप्सिस थालियाना में तनाव सहनशीलता |
| उच्च तापमान | जिन्सेनोसाइड | में जिनसिनोसाइड को संरक्षित करने का काम |
| ओज़ोन तनाव | एन्थोसाइनिन, रोज़मैरिनिक अम्ल, टैनिन | लेमन बाम में तनाव सहनशीलता को बढ़ावा |
| भारी धातु तनाव | फ्लेवोनॉयड्स | अंगूर में तनाव सहनशीलता को बढ़ावा |

**निष्कर्ष**

द्वितीयक उपापचयी यौगिक निस्संदेह पौध प्रतिरक्षा प्रणाली का रासायनिक आधार हैं। ये पौधों को विविध एवं गतिशील रक्षा तंत्र प्रदान करते हैं, जो संरचनात्मक सुदृढ़ीकरण (जैसे–लिग्निन), वाष्पशील विकर्षकों (जैसे–टर्पेन्स) तथा शक्तिशाली कोशिका–विषैले यौगिकों (जैसे–एल्कलॉइड्स) तक विस्तृत हैं। इन यौगिकों की रक्षा संबंधी भूमिकाएँ अत्यंत बहुआयामी हैं और वे पौधों को रोगजनकों, कीटों तथा विभिन्न पर्यावरणीय तनावों के विरुद्ध प्रभावी सुरक्षा प्रदान करते हैं। यद्यपि इन यौगिकों का जैवसंश्लेषण पौधों के लिए ऊर्जा एवं संसाधनों की दृष्टि से महंगा होता है, फिर भी उनका निरंतर उत्पादन इस तथ्य को स्पष्ट करता है कि पौधों के अस्तित्व, अनुकूलन तथा दीर्घकालिक जीवनक्षम्यता के लिए इनकी भूमिका अत्यंत आवश्यक है। प्रतिकूल पर्यावरणीय परिस्थितियों और निरंतर जैविक चुनौतियों के बीच जीवित रहने के लिए पौधे इन यौगिकों पर व्यापक रूप से निर्भर रहते हैं।