



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ  
ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ

**ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΠΟΝΙΑΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**  
**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΜΑΚΕΔΟΝΙΑΣ**



**‘ΠΑΛΗΘΥΣΜΟΙ ΤΡΑΧΕΟΣ ΒΛΗΤΟΥ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΙ ΣΕ  
ΖΙΖΑΝΙΟΚΤΟΝΑ-ΑΝΑΣΤΟΛΕΙΣ ΤΗΣ ΔΡΑΣΗΣ ΤΟΥ ΕΝΖΥΜΟΥ ALS’**

**Υπεύθυνος Καθηγητής: Αρισταΐδης Π. Παπαπαναγιώτου**

**Σπουδαστής : Χρήστος Αντωνίου (FG31308)**

Φλώρινα, 2023

### Δήλωση περί μη λογοκλοπής

Δηλώνω ότι είμαι ο συγγραφέας της παρούσας εργασίας με τίτλο ‘Πληθυσμοί τραχέος βλήτου ανθεκτικοί σε ζιζανιοκτόνα-αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS’, η οποία συντάχθηκε στα πλαίσια της πτυχιακής μου εργασίας και παραδόθηκε το μήνα Φεβρουάριο του έτους 2023. Η αναφερόμενη εργασία δεν αποτελεί αντιγραφή, ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν αναφέρονται σαφώς στη βιβλιογραφία και στο κείμενο, ενώ κάθε εξωτερική βοήθεια, αν υπήρξε, αναγνωρίζεται ρητά.

Όνομα (κεφαλαία)

AM

Υπογραφή:

ΑΝΤΩΝΙΟΥ ΧΡΗΣΤΟΣ

FG31308

Ημερομηνία: 8/2/2023

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε πειράματα φυτοδοχείων αξιολογήθηκαν 18 πληθυσμοί του είδους τραχύ βλήτο (*Amaranthus retroflexus* L.) προερχόμενοι από αγρούς καλλιέργειας ηλίανθου, καλαμποκιού και σόγιας, για την πιθανότητα επιλογής ανθεκτικότητας και σταυρανθεκτικότητας στα ζιζανιοκτόνα imazamox και tribenuron methyl [αναστολείς της δράσης του ενζύμου οξικογαλακτική συνθάση (ALS)]. Επιπλέον, διερευνήθηκαν οι δυνατότητες εναλλακτικής χημικής καταπολέμησης των πληθυσμών τραχέος βλήτου με εφαρμογή των ζιζανιοκτόνων tembotrione (τρικετόνη) και το βενζοϊκό παράγωγο dicamba, τα οποία είναι εγκεκριμένα για μεταφυτρωτικές εφαρμογές στην καλλιέργεια καλαμποκιού. Οι πληθυσμοί εκτέθηκαν στη συνιστώμενη (X), διπλάσια (2X) και τετραπλάσια (4X) δόση όλων των ζιζανιοκτόνων. Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν και δύο ευαίσθητοι πληθυσμοί αναφοράς εναντίον των οποίων εφαρμόστηκαν οι δόσεις X/8, X/4, X/2 και X (συνιστώμενη) των ζιζανιοκτόνων. Η εφαρμογή των επεμβάσεων πραγματοποιήθηκε με επιστήθιο ψεκάστηρα ακριβείας τύπου AZO, όταν τα φυτά του ζιζανίου βρίσκονταν στο στάδιο των 3-4 φύλλων. Κάθε επέμβαση είχε τρεις επαναλήψεις (φυτοδοχεία), ενώ το κάθε πείραμα επαναλήφθηκε δύο φορές. Οι περισσότεροι πληθυσμοί εμφάνισαν σταυρανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα imazamox και tribenuron. Αντίθετα, οι περισσότεροι πληθυσμοί καταπολεμήθηκαν ικανοποιητικά με τα ζιζανιοκτόνα tembotrione και dicamba (βενζοϊκο παράγωγο) στη συνιστώμενη δόση (X) εφαρμογής, ενώ καταπολεμήθηκαν άριστα (100%) με τις δόσεις 2X και 4X.

**Λέξεις κλειδιά:** τραχύ βλήτο (*Amaranthus retroflexus* L.), ALS-αναστολείς, σταυρανθεκτικότητα, σουλφονουλουργίες, ιμιδαζολιόνες, βενζοϊκό παράγωγο, τρικετόνες

## ABSTRACT

Eighteen redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.) populations originating from sunflower, corn and soybean fields, were evaluated in whole-plant, pot experiments for possible evolution of ALS-inhibitor herbicide resistance, cross-resistance to the herbicides imazaax and tribenuron methyl. Moreover, the possibilities of effective chemical control of the above mentioned redroot pigweed populations with the application of the herbicides tembotrione (tricotone) and dicamba (benzoic) which are registered for post-emergence applications in corn crops were also studied. The putative resistant redroot pigweed populations were exposed to the recommended (X) twice (2X) and four times (4X) the recommended field rate of all herbicides. Two herbicide susceptible (reference) populations exposed at herbicide rates X/8, X/4, X/2 and X (recommended) were also included in the present study. Herbicides were applied using a portable field plot AZO sprayer, when weeds reached the 3-4 leaf stage. Each treatment (herbicide by dose) had three replications (pots) and the experiment was performed twice. Most populations studied, were cross-resistant to both imazamox and tribenuron methyl. On the contrary, many redroot pigweed populations were effectively controlled with the application of the recommended (X) rate of tembotrione and dicamba. Moreover, the application of 2X and 4X rates of tembotrione and dicamba resulted in excellent (100%) control of all population

**Key words:** Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.), ALS-inhibitors, cross-resistance, sulfonylureas, imidazolinones, benzoic, tricotone

## Περιεχόμενα

<b>Κεφάλαιο 1. ΜΟΝΟΓΡΑΦΙΑ ΤΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΤΡΑΧΥ ΒΛΗΤΟ</b> .....	7
1.1 Εισαγωγή.....	7
1.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά του είδους <i>Amaranthus retroflexus</i> .....	7
1.3 Οικολογικές-εδαφικές απαιτήσεις .....	13
1.4 Επιπτώσεις στις καλλιέργειες .....	14
<b>Κεφάλαιο 2. ΖΙΖΑΝΙΟΚΤΟΝΑ-ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΕ ΖΙΖΑΝΙΟΚΤΟΝΑ</b> .....	15
2.1 Ζιζανιοκτόνα-αναστολείς της βιοσύνθεσης διακλαδισμένης αλυσίδας αμινοξέων (ένζυμο ALS ή AHAS) .....	16
2.1.1 Σουλφονουλουρίες (Sulfonylureas) .....	19
2.1.2 Ιμιδαζολινόνες (Imidazolinones) .....	20
2.1.3 Πυριμιδινυλβενζοϊκά (Pyrimidinylbenzoates) .....	21
2.1.4 Τριαζολοπυριμιδίνες (Triazolopyrimidines) .....	22
2.1.5 Σουλφονυλαμινοκαρβονυλοτριαζολινόνες .....	22
2.2 Ανθεκτικότητα ζιζανίων σε ζιζανιοκτόνα.....	24
2.2.1 Εισαγωγή-ορισμοί.....	24
2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ανθεκτικότητας ζιζανίων σε ζιζανιοκτόνα .....	25
2.2.3 Μηχανισμοί ανθεκτικότητας ζιζανίων σε ζιζανιοκτόνα .....	27
2.2.4 Η ανθεκτικότητα των ζιζανίων σε παγκόσμια κλίμακα .....	27
2.2.5 Εξέλιξη της ανθεκτικότητας στην Ελλάδα .....	28
2.2.6 Ανάπτυξη ανθεκτικότητας σε ζιζανιοκτόνα αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS .....	29
2.2.7 Επιλογή ανθεκτικότητα στο είδος τραχύ βλήτο ( <i>A. retroflexus</i> ) και σε άλλα είδη του γένους <i>Amaranthus</i> .....	31
2.2.8 Μέθοδοι διαχείρισης της ανθεκτικότητας .....	34
<b>Κεφάλαιο 3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ</b> .....	36
<b>Κεφάλαιο 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ</b> .....	39
<b>ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	57
<b>ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ</b> .....	59

## **Κεφάλαιο 1. ΜΟΝΟΓΡΑΦΙΑ ΤΟΥ ΕΙΔΟΥΣ ΤΡΑΧΥ ΒΛΗΤΟ**

### **1.1 Εισαγωγή**

Στο γένος *Amaranthus* συγκαταλέγονται ετήσια ή μικρής διάρκειας πολυετή είδη (Dorling, 2008), τα οποία κάποια είναι 'εξημερωμένα' και χρησιμοποιούνται σε γεωργικές χρήσεις, κάποια είναι απειλούμενα είδη, ενώ ορισμένα είναι ενδημικά και άλλα αποτελούν σοβαρά ζιζάνια με ευρύτατη εξάπλωση και παρουσία σε διαφορετικές περιοχές και παραγωγικά συστήματα. Το όνομα του γένους προέρχεται από την ελληνική λέξη 'αμάραντος' που σημαίνει άφθατος, αθάνατος, ακατάλυτος, ονομασία που δόθηκε γιατί τα άνθη των φυτών διατηρούνται για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα (Assad κ.ά., 2017). Τα είδη του γένους *Amaranthus* χαρακτηρίζονται από γενετική ποικιλομορφία και εμφανίζουν ποικιλία στη μορφή ανάπτυξής τους, το ύψος που αποκτούν τελικά τα φυτά, τον αριθμό των ταξιανθιών που σχηματίζουν, το χρώμα των σπόρων, την απόδοση των σπόρων και την περιεκτικότητά τους σε πρωτεΐνη, την αντοχή του σε ζωικούς εχθρούς και ασθένειες και την προσαρμοστική ικανότητα που επιδεικνύουν σε διαφορετικούς εδαφικούς τύπους, αντίδραση του εδάφους (pH), κλιματικές συνθήκες, ύψος βροχόπτωσης και διάρκειας φωτοπεριόδου (Assad κ.ά., 2017). Το είδος *Amaranthus retroflexus* (τραχύ βλήτο) απαντάται ως ιθαγενές είδος στη βόρεια Αμερική. Είναι ετήσιο, εαρινό φυτό που αναπαράγεται με σπόρους. Φυτρώνει κυρίως τους μήνες Απρίλιο και Μάιο (Βασιλάκογλου και Δήμας, 2017).

### **1.2 Μορφολογικά χαρακτηριστικά του είδους *Amaranthus retroflexus***

Το τραχύ βλήτο είναι εαρινό, δικοτυλήδονο φυτό όρθιας έκφυσης που μπορεί να αποκτήσει ύψος έως 150cm. Το νεαρό σπορόφυτο έχει ωοειδείς έως επιμήκειες, έμμισχες κοτυληδόνες, χωρίς τρίχες (Εικόνα 1). Οι κοτυληδόνες είναι πράσινου χρώματος και κοκκινίζουν στην κάτω επιφάνεια. Η υποκοτύλη των νεαρών σποροφύτων είναι ερυθρόχρορη και δεν έχει τρίχες (Εικόνα 2).



**Εικ. 1.** Νεαρό σπορόφυτο τραχέος βλήτου στο στάδιο των δύο πρώτων πραγματικών φύλλων.



**Εικ. 2.** Η κάτω επιφάνεια των κοτυληδόνων, των πρώτων πραγματικών φύλλων και η υποκοτύλη είναι έντονα ερυθρόχρωμες ('red root pigweed').

Ο βλαστός του τραχέος βλήτου είναι όρθιας έκφυσης, διακλαδισμένος, τραχύς στην αφή, κυλινδρικού σχήματος, πράσινου χρώματος και πολύ συχνά φέρει τρίχες στην επιφάνειά του (Εικόνα 3). Το ύψος του βλαστού κυμαίνεται μεταξύ 20cm και 150cm (Ελευθεροχωρινός και Γιαννοπολίτης, 2009).



**Εικ. 3.** Το στέλεχος των φυτών καλύπτεται από τρίχες.

Τα φύλλα είναι ωσειδή, με κυματοειδή περιφέρεια, ωχροπράσινου χρώματος, με ευδιάκριτα νεύρα τα οποία τους προσδίδουν τραχειά υφή (Εικόνα 4).



**Εικ. 4.** Αναπτυγμένο φυτό του είδους *A. Retroflexus*.

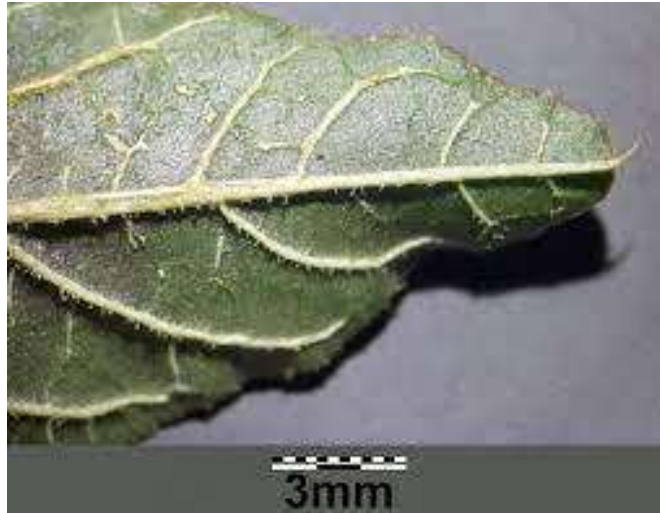


Σε κάποιους βιότυπους, στην άνω επιφάνεια του ελάσματος υπάρχει μια λευκή κηλίδα ακανόνιστου σχήματος (Εικόνα 5).



**Εικ. 5.** Ορισμένοι βιότυποι του ζιζανίου εμφανίζουν χαρακτηριστική λευκή κηλίδα στο έλασμα των φύλλων.

Τα φύλλα (ιδιαίτερα τα κατώτερα φύλλα) του ζιζανίου είναι έμμισχα και εναλλασσόμενα, φέρουν τρίχες και σχηματίζουν κοιλότητα στην κορυφή του ελάσματος, εντός της οποίας σχηματίζεται αγκάθι ως απόληξη της μεσαίας νεύρωσης (Εικόνα 6) (το χαρακτηριστικό αυτό δεν παρουσιάζεται σε όλους τους βιοτύπους/πληθυσμούς του ζιζανίου).



**Εικ. 6.** Στα κατώτερα φύλλα συχνά υπάρχει κοιλότητα στην κορυφή του ελάσματος και αγκάθι στην άκρη της μεσαίας νεύρωσης

Τα ανώτερα φύλλα είναι επίσης έμμισχα, μεγάλα, ωοειδή, μυτερά, ωχροπράσινα, με τραχιά υφή. Η ταξιανθία είναι σταχυόμορφη, συμπαγής με πράσινο χρώμα (Εικόνα 7). Τα άνθη (αρσενικά και θηλυκά) έχουν 5 σέπαλα, δεν έχουν πέταλα, ενώ περιβάλλονται από μεγάλου μήκους (έως 8cm) βράκτια φύλλα. Τα θηλυκά άνθη έχουν μία ωοθήκη με τρεις στύλους, ενώ τα αρσενικά έχουν 5 στήμονες (Βασιλάκογλου και Δήμας, 2017). Οι ταξιανθίες φέρονται είτε επάκρια στην κορυφή των βλαστών ή σε μασχάλες φύλλων και τις πλευρικές διακλαδώσεις που σχηματίζει το κεντρικό στέλεχος (Εικόνα 8). Το φυτό ανθίζει την περίοδο Ιουλίου έως Σεπτεμβρίου).

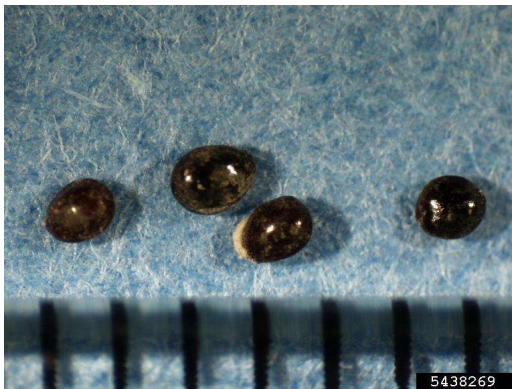


**Εικ. 7.** Τα άνθη των φυτών είναι πράσινα και είναι τοποθετημένα σε παχείς και συμπαγείς στάχεις.



**Εικ. 8.** Οι ταξιανθίες σχηματίζονται επάκρια και στις μασχάλες των φύλλων και των πλευρικών διακλαδώσεων.

Ο καρπός είναι κάψα που φέρει εγκάρσια σχισμή και περιέχει ένα σπόρο. Κάθε φυτό μπορεί να παράγει 115.00-200.000 σπόρους. Οι σπόροι είναι σφαιροειδείς, λείοι, πεπλατυσμένοι, μικρού μεγέθους (1mm) και μαύρου χρώματος (Εικόνα 9).



**Εικ. 9.** Οι σπόροι του ζιζανίου είναι μικρού μεγέθους, πεπλατυσμένοι, σφαιροειδείς και λείοι.

#### **Οικολογικές-εδαφικές απαιτήσεις**

Το τραχύ βλήτο είναι κοσμοπολίτικο είδος, απαντάται και αποτελεί σοβαρό ζιζάνιο σε όλες τις ανοιξιάτικες καλλιέργειες. Μπορεί να επιβιώσει και να αναπτυχθεί σε μεγάλη ποικιλία εδαφικών-κλιματικών συνθηκών και αντίδρασης του εδάφους (pH). Συγκεκριμένα, αναπτύσσεται καλύτερα σε αργιλώδη ή αμμο-αργιλώδη εδάφη από άποψη μηχανικής σύστασης, τα οποία χαρακτηρίζονται από ικανοποιητική υδατοχωρητικότητα και διαθέτουν εύρος pH μεταξύ 4.5 και 8.0. Συνήθως, προτιμά εδάφη πλούσια σε θρεπτικά στοιχεία, αν και εμφανίζει ανεκτικότητα στη μειωμένη διαθεσιμότητα θρεπτικών στοιχείων (O'Brien και Price, 1983). Οι καλλιεργούμενοι αγροί αποτελούν ιδανικό ενδιαίτημα για την ανάπτυξη του ζιζανίου και οι έρευνες δείχνουν ότι η παρουσία του τραχέος βλήτου συνδέεται με υψηλά επίπεδα νιτρικών στο έδαφος και χαμηλά επίπεδα φώσφορου και κάλιου (Dieleman κ.ά., 2000; Pratt κ.ά., 1999). Το τραχύ βλήτο χαρακτηρίζεται από υψηλή ικανότητα προσαρμογής σε σημαντικό εύρος κλιματικών συνθηκών, αλλά η ανάπτυξη και η αναπαραγωγική του ικανότητα ευνοείται ιδιαίτερα σε περιοχές όπου επικρατούν υψηλές θερμοκρασίες και θερμό κλίμα. Το είδος *A. retroflexus* δεν αναπτύσσεται καλά σε συνθήκες περιορισμένης ηλιακής ακτινοβολίας (είναι C<sub>4</sub> φυτό).

### 1.3 Επιπτώσεις στις καλλιέργειες

Το τραχύ βλήτο (όπως και άλλα είδη του γένους *Amaranthus*), αποτελεί ένα εξαιρετικά ανταγωνιστικό ζιζάνιο σε μεγάλο εύρος καλλιεργούμενων ειδών. Σε παγκόσμια κλίμακα, αποτελεί αξιόλογο ζιζάνιο σε 60 διαφορετικές καλλιέργειες σε 70 χώρες. Είναι ικανό να εκδηλώσει έντονο ανταγωνισμό για θρεπτικά στοιχεία, νερό, και χώρο αξιοποιώντας ένα αξιόλογο εύρος τακτικών επιβίωσης (Moghadam κ.ά., 2021). Η υψηλή ανταγωνιστική ικανότητα των ειδών *Amaranthus* οφείλεται στο υψηλό αναπαραγωγικό τους δυναμικό, στην παρατεταμένη βιωσιμότητα των σπόρων τους, το λήθαργο, το χρόνο και την ταχύτητα βλάστησης του σπόρου, την παρατεταμένη περίοδο φυτρώματος που εκδηλώνεται σε διαδοχικά κύματα, στην έντονη και ταχύτατη βλαστική τους ανάπτυξη, στη θερμική τους σταθερότητα λόγω του φωτοσυνθετικού μηχανισμού (C<sub>4</sub> φυτά) που τα χαρακτηρίζει, καθώς και στην υψηλή αποτελεσματικότητα χρήσης του νερού (Assad κ.ά., 2017). Τα είδη του γένους *Amaranthus* και το τραχύ βλήτο ειδικότερα, αποικίζουν αποτελεσματικά πολλά παραγωγικά συστήματα, ιδιαίτερα γραμμικών καλλιεργειών (Moghadam κ.ά., 2021). Αποτελούν πολύ σοβαρά ζιζάνια στις καλλιέργειες βαμβακιού, καλαμποκιού, σόγιας, ζαχαρότευτλων, σόργου, καθώς και σε μεγάλο αριθμό κηπευτικών καλλιεργειών (Holm κ.ά., 1997; Weaver και MacWilliams, 1980). Η ένταση της παρουσίας του είδους *A. retroflexus* και οι επιπτώσεις του ανταγωνισμού που προκαλεί αποβαίνουν ιδιαίτερα σοβαρές, ιδιαίτερα σε καλλιέργειες ανθοκηπευτικών, φυτών μεγάλης καλλιέργειας, καθώς και βιομηχανικών φυτών. Ειδικότερα, όταν το τραχύ βλήτο αναπτύσσεται σε υψηλούς πληθυσμούς (περισσότερα από 30 φυτά/m<sup>2</sup>), επιφέρει απώλειες στην απόδοση των καλλιεργειών σόγιας και καλαμποκιού οι οποίες μπορεί να ανέλθουν σε ποσοστό 90%, ενώ σημαντική είναι και η επίπτωσή του στην παραγωγικότητα της αραχίδας και του βαμβακιού (Ma et al., 2015) (Εικόνες 10 και 11).

Οι αρνητικές επιδράσεις των βλήτων περιλαμβάνουν μείωση των αποδόσεων και της ποιότητας των συγκομιζόμενων προϊόντων και παραγωγή δευτερογενών μεταβολιτών που ασκούν αξιόλογη αλληλοπαθητική δράση σε βάρος των καλλιεργούμενων ειδών, επηρεάζοντας δυσμενώς την αύξηση και την ανάπτυξή τους. Οι απώλειες στην απόδοση είναι σημαντικά υψηλότερες όταν τα φυτά του ζιζανιού φυτρώνουν σε αρχικά στάδια ανάπτυξης της καλλιέργειας και εκδηλώνουν ανταγωνισμό σε βάρος των καλλιεργούμενων φυτών καθ' όλη τη διάρκεια της βλαστικής περιόδου (Mirshekari κ.ά., 2010). Τα είδη του γένους *Amaranthus* αποτελούν ξενιστές σημαντικών εχθρών και ασθενειών των καλλιεργούμενων ειδών και λειτουργούν ως 'δεξαμενές' μόλυσματος και εστίες οικοδόμησης υψηλών πληθυσμών ζωικών εχθρών, ενώ η γύρη που παράγουν και

απελευθερώνουν προκαλεί αλλεργικές αντιδράσεις στους ανθρώπους (Costea κ.ά., 2004). Παρατηρήθηκε ότι το τραχύ βλήτο και άλλα είδη του γένους *Amaranthus* εμφανίζουν συμπτώματα αλληλοπάθειας στις καλλιέργειες και είναι δηλητηριώδη για τα οικόσιτα ζώα (Athanasova, 1995).



**Εικ. 10.** Αγροί σόγιας μολυσμένοι με πληθυσμούς βλήτων.



**Εικ. 11.** Φυτό τραχέος βλήτου αναπτύσσεται δίπλα σε νεαρά φυτά βαμβακιού (αριστερά) και (δεξιά).

## **Κεφάλαιο 2. ΖΙΖΑΝΙΟΚΤΟΝΑ-ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΖΙΖΑΝΙΩΝ ΣΕ ΖΙΖΑΝΙΟΚΤΟΝΑ**

## 2.1 Ζιζανιοκτόνα-αναστολείς της βιοσύνθεσης διακλαδισμένης αλυσίδας αμινοξέων (ένζυμο ALS ή AHAS)

Τα ζιζανιοκτόνα της ομάδας αυτής ανήκουν στις οικογένειες των σουλφονουλουριών, των ιμιδαζολινονών, των πυριμιδινυλθειοβενζοϊκών, των τριαζολοπυριμιδινών και των σουλφονυλαμινοκαρβονυλοτριαζολινονών (Πίνακας 1). Τα ζιζανιοκτόνα που δρουν με τον συγκεκριμένο μηχανισμό δράσης χρησιμοποιούνται προφυτρωτικά ή μεταφυτρωτικά για την αντιμετώπιση ετήσιων και πολυετών ζιζανίων σε διάφορες καλλιέργειες ή σε μη γεωργικές εκτάσεις. Απορροφώνται από τις ρίζες και τα φύλλα των φυτών και μετακινούνται στους μεριστωματικούς ιστούς διά μέσου του ξυλώματος και του φλοιώματος (Ελευθεροχωρινός, 2008).

Ο μηχανισμός δράσης τους σχετίζεται με αναστολή της δράσης του ενζύμου οξικογαλακτική συνθάση (ALS, AcetoLactate Synthase), γνωστού και ως συνθάση του ακετοϋδροξυβουτυρικού οξέος (AHAS, AcetoHydroxyAcid Synthase). Το ALS είναι ένζυμο-κλειδί που καταλύει την πρώτη αντίδραση στη βιοσύνθεση των αμινοξέων βαλίνης, λευκίνης και ισολευκίνης, τα οποία χαρακτηρίζονται από διακλαδισμένα αλυσίδα ατόμων άνθρακα (Ελευθεροχωρινός, 2008).

**Πίνακας 1.** Χημικές οικογένειες ζιζανιοκτόνων και αντιπροσωπευτικά μέλη που αναστέλλουν τη δράση του ενζύμου ALS (από: Χατζηλαζαρίδου, 2013).

Οικογένεια ζιζανιοκτόνων	Δραστικές ουσίες
Σουλφονουλουρίες	Halosulfuron, azimsulfuron
Ιμιδαζολινόνες	Imazamox, imazapyr, imazaquin
Τριαζολοπυριμιδίνες	Florasulam, penoxsulam

Πυριμιδινυλθειοβενζοϊκά	Bispyribac, pyriithiobac, pyriminobac
Σουλφονυλαμινοκαρβονυλοτριαζολινόνες	Flucarbazone, propoxycarbazone

Το ένζυμο ALS απαντάται στα φυτά και στους μικροοργανισμούς και όχι στους ζωικούς οργανισμούς. Το ένζυμο ALS αν και κωδικοποιείται από το *ALS* γονίδιο του πυρήνα των φυτών, μεταφέρεται μέσω ενός πεπτιδίου μεταφορέα εντός των πλαστιδίων (χλωροπλάστες) του κυττάρου όπου και δρα (Ελευθεροχωρινός, 2008). Ο αριθμός των *ALS* γονιδιακών θέσεων που ελέγχουν την κωδικοποίηση του ALS ενζύμου ποικίλει βάσει του βαθμού πλοειδίας των φυτών (Scarabel κ.ά., 2004).

Το ALS ή AHAS αποτελεί ένζυμο-κλειδί κατά τη βιοσύνθεση βαλίνης, λευκίνης και ισολευκίνης (αμινοξέων με διακλαδισμένη αλυσίδα ατόμων άνθρακα). Τα προαναφερθέντα ένζυμα αποτελούν πρόδρομες ουσίες κατά τη βιοσύνθεση δευτερογενών μεταβολιτών (κυανογενή γλυκοζίδια, γλυκοζινολικά, ακυλιωμένα σάκχαρα). Ειδικότερα, το ALS ένζυμο καταλύει τη συμπύκνωση δύο μορίων πυροσταφυλικού οξέος για την παραγωγή ενός μορίου 2-οξικογαλακτικού οξέος ή ενός μορίου πυροσταφυλικού οξέος και ενός μορίου α-κετοβουτυρικού οξέος για την παραγωγή CO<sub>2</sub> και 2-ακετοϋδροξυβουτυρικού οξέος. Η παραγωγή των δύο αυτών ουσιών είναι απαραίτητη για τη βιοσύνθεση των αμινοξέων βαλίνης και ισολευκίνης (Ελευθεροχωρινός, 2008). Η βιοσύνθεση του αμινοξέος λευκίνη εικάζεται ότι πραγματοποιείται μέσω τριών διαδοχικών ενζυμικών αντιδράσεων επί του 2-κετο-ισοβαλερικού οξέος. Η δράση του ALS ενζύμου προϋποθέτει ως συμπράγοντες την παρουσία διφωσφορικής θειαμίνης (ThDP), ενός κατάλληλου δισθενούς μεταλλικού κατιόντος και του φλαβινο-αδενινοδινουκλεοτιδίου (FAD) (Ελευθεροχωρινός, 2008). Η αναστολή της δράσης του ALS ενζύμου και η επακόλουθη αναστολή της βιοσύνθεσης των τριών αμινοξέων με διακλαδισμένη αλυσίδα ατόμων άνθρακα (βαλίνη, λευκίνη και ισολευκίνη) εξαιτίας της δράσης των ζιζανιοκτόνων της ομάδας αυτής έχει ως συνέπεια την αναστολή της κυτταροδιαίρεσης εντός ολίγων ημερών από την απορρόφηση των ζιζανιοκτόνων, η οποία οδηγεί σε αναστολή της αύξησης των φυτών και τελικώς στη νέκρωσή τους.



Τα συμπτώματα της από εδάφους δράσης των ζιζανιοκτόνων-αναστολέων της δράσης του ενζύμου ALS (Ελευθεροχωρινός, 2008) περιλαμβάνουν: (1) αναστολή της αύξησης των νεαρών φυτών (παραμένουν στο στάδιο των κοτυληδόνων μέχρι και των δύο πραγματικών φύλλων), (2) περιορισμένη ανάπτυξη (σε αριθμό και μήκος) των πλάγιων ή δευτερογενών ριζών, (3) αυξημένη σύνθεση ανθοκυανών (ερυθρόχροα φυτά), (4) χλώρωση και τελικά (5) νέκρωση.

Τα συμπτώματα της από φυλλώματος δράσης τους περιλαμβάνουν: (1) αναστολή της αύξησης των φυτών, (2) αυξημένη σύνθεση ανθοκυανών, αποχρωματισμό των νεύρων των φύλλων και (3) νέκρωση των μεριστωματικών ιστών. Τα προαναφερθέντα συμπτώματα εμφανίζονται εντός ολίγων ημερών από τη μετακίνηση των ζιζανιοκτόνων στους μεριστωματικούς ιστούς, ενώ η νέκρωση των φυτών επέρχεται 2-4 εβδομάδες αργότερα (Ελευθεροχωρινός, 2008).

Η δράση του ενζύμου ALS αναστέλλεται από την πρόσδεση των ζιζανιοκτόνων μέσω σχηματισμού δεσμών υδρογόνου και υδρόφοβων δεσμών. Αυτό σημαίνει ότι η αναστολή της δράσης του ενζύμου διαφοροποιείται από τον αριθμό, το είδος και τη θέση των σχηματιζόμενων χημικών δεσμών μεταξύ ενζύμου ALS και ζιζανιοκτόνων-αναστολέων του. Ειδικότερα, οι σουλφονουρίες σχηματίζουν δεσμό υδρογόνου με το αμινοξύ προλίνη (Pro) στη θέση 197 (Pro 197) του ενζύμου ALS και υδρόφοβο δεσμό με το αμινοξύ τρυπτοφάνη (Trp) στη θέση 574 (Trp574) του ενζύμου ALS. Οι μιδαζολινόνες σχηματίζουν υδρόφοβο δεσμό με την Trp574 ή με το αμινοξύ αλανίνη (Ala) στη θέση 122 (Ala122) και δεσμό υδρογόνου με το αμινοξύ σερίνη (Ser) στη θέση 653 (Ser653).

Επίσης, η Ala στη θέση 205 (Ala205), το ασπαρτικό οξύ (Asp) στη θέση 376 (Asp376), η αργινίνη (Arg) στη θέση 377 (Arg377) και η γλυκίνη (Gly) στη θέση 654 (Gly654) συμμετέχουν στην πρόσδεση μεταξύ του ενζύμου ALS και των ζιζανιοκτόνων της ομάδας αυτής. Η αναστολή της δράσης του ενζύμου ALS και η μη βιοσύνθεση των αμινοξέων βαλίνης, λευκίνης και ισολευκίνης προκαλεί την εξάντληση των αποθεμάτων των τριών αμινοξέων και τη μη βιοσύνθεση των απαραίτητων πρωτεϊνών, η οποία αναστέλλει την κυτταροδιαίρεση που οδηγεί σε αναστολή της αύξησης και τελικώς στη νέκρωση των φυτών (Ελευθεροχωρινός, 2008).

Η αναστολή της δράσης του ενζύμου ALS και η αναστολή της βιοσύνθεσης των αμινοξέων διακλαδισμένης αλυσίδας ατόμων άνθρακα βαλίνης, λευκίνης και ισολευκίνης προκαλεί την εξάντληση των αποθεμάτων των τριών αμινοξέων. Ως συνέπεια, αναστέλλεται η βιοσύνθεση των

απαραίτητων πρωτεϊνών, η κυτταροδιαίρεση και τελικά υφίσταται αναστολή της αύξησης και νέκρωση των φυτών. Τα συμπτώματα φυτοτοξικής δράσης που εκδηλώνονται στα φυτά-στόχους από την εφαρμογή των ζιζανιοκτόνων αυτής της ομάδας από εδάφους περιλαμβάνουν περιορισμένη ανάπτυξη των πλάγιων ή δευτερογενών ριζών, αναστολή της αύξησης των νεαρών φυτών, αυξημένη σύνθεση ανθοκυανών, χλώρωση και τελικά, νέκρωση των ευαίσθητων φυτών. Στα συμπτώματα της δράσης από την εφαρμογή των ζιζανιοκτόνων αυτής της ομάδας από φυλλώματος συγκαταλέγονται η αναστολή της αύξησης των φυτών, η χλώρωση, η αυξημένη σύνθεση ανθοκυανών, ο αποχρωματισμός των νεύρων των φύλλων και των μεριστωματικών ιστών. Τα πρώτα συμπτώματα φυτοτοξικότητας εμφανίζονται εντός λίγων ημερών από τη μετακίνηση των ζιζανιοκτόνων στους μεριστωματικούς ιστούς. Αντίθετα, η νέκρωση των φυτών επέρχεται 2-4 εβδομάδες αργότερα (Ελευθεροχωρινός, 2008).

### **2.1.1 Σουλφονουλουρίες (Sulfonylureas)**

Ο βασικός χημικός τους τύπος αποτελείται από αρυλομάδα, σουλφονουλουρική (θειϊκή) γέφυρα και ετεροκυκλική ομάδα. Η πρώτη δραστική ουσία της χημικής οικογένειας των σουλφονουλουριών (chlorsulfuron) ανακαλύφθηκε το 1977 και χρησιμοποιήθηκε για την χημική αντιμετώπιση πλατύφυλλων και την καταστολή σημαντικών αγρωστωδών ζιζανίων στις καλλιέργειες χειμερινών/εαρινών σιτηρών. Δέκα χρόνια μετά την ανακάλυψη του chlorsulfuron, η οικογένεια των σουλφονουλουριών περιελάμβανε 230 δραστικές ουσίες.

Τα ζιζανιοκτόνα της οικογένειας αυτής είναι δραστικά σε δόσεις 10-100 φορές μικρότερες από εκείνες των ήδη χρησιμοποιούμενων ζιζανιοκτόνων. Είναι διασυστηματικά και εφαρμόζονται στο έδαφος (προφυτρωτικά) ή και στο φύλλωμα (μεταφυτρωτικά), για την αντιμετώπιση ετήσιων και πολυετών ζιζανίων σε διάφορες καλλιέργειες. Απορροφώνται από τις ρίζες και τα φύλλα και μετακινούνται στους μεριστωματικούς ιστούς των φυτών διά μέσου του ξυλώματος και του φλοιώματος. Η δράση των ζιζανιοκτόνων φυλλώματος εκδηλώνεται εντός ολίγων ημερών από την εφαρμογή τους (Ελευθεροχωρινός, 2008).

Τα ευαίσθητα ζιζάνια-στόχοι εκδηλώνουν αναστολή της αύξησής τους, αντιδρούν με αυξημένη σύνθεση ανθοκυανών, χλώρωση και τελικά υφίστανται νέκρωση των μεριστωματικών ιστών. Η νέκρωση όμως των φυτών επέρχεται σε 2-4 εβδομάδες από την εφαρμογή τους. Η δράση

των ζιζανιοκτόνων εδάφους εκδηλώνεται εντός ολίγων ημερών από το φύτευμα των ζιζανίων με περιορισμένη ανάπτυξη των ριζών, αυξημένη σύνθεση ανθοκυανών, χλώρωση, αναστολή της αύξησης και τελικά νέκρωση των φυτών (Ελευθεροχωρινός, 2008).

Η ταυτόχρονη εφαρμογή μερικών πλατυφυλλοκτόνων της χημικής οικογένειας των σουλφονουλουριών με ζιζανιοκτόνα αγρωστωδών ζιζανίων πρέπει να αποφεύγεται διότι μειώνει τη δράση των αγρωστωδοκτόνων εναντίον ορισμένων αγρωστωδών ζιζανίων. Αυτό οφείλεται στην ανταγωνιστική δράση που αναπτύσσεται μεταξύ των μη συνδυαζόμενων ζιζανιοκτόνων, η οποία στις περισσότερες περιπτώσεις είναι αποτέλεσμα της μειωμένης απορρόφησης και μετακίνησης των αγρωστωδοκτόνων. Επίσης, η ταυτόχρονη μεταφυτρωτική εφαρμογή των ζιζανιοκτόνων rimsulfuron ή primisulfuron με τα πλατυφυλλοκτόνα dicamba ή MCPA δεν συνιστάται επειδή μειώνει τη δράση τους εναντίον του πολυετούς αγρωστώδους είδους βέλιουρα (*Sorghum halepense*), καθώς και εναντίον ειδών μουχρίτσας (*Echinopchloa oryzoides* και *E. phyllopogon*) (Damalas κ.ά, 2012).

Οι σουλφονουλουρίες συμπεριφέρονται στο έδαφος ως ασθενή οξέα. Η προσρόφησή τους από τα κολλοειδή του εδάφους δεν είναι ισχυρή και γι' αυτό η πιθανότητα έκπλυσής τους είναι μεγάλη (Ελευθεροχωρινός, 2008; Weber κ.ά., 2000). Ο χρόνος παραμονής κάποιων σουλφονουλουριών στο έδαφος, αν και εφαρμόζονται σε πολύ χαμηλές δόσεις, είναι συχνά μεγαλύτερος από 12 μήνες. Ο χρόνος παραμονής τους στο έδαφος μειώνεται με τη μείωση της δόσης εφαρμογής των ζιζανιοκτόνων. Επίσης, μειώνεται με μείωση του pH του εδάφους, η οποία πρέπει να συνδυάζεται με αύξηση της υγρασίας και άνοδο της θερμοκρασίας του εδάφους (Eleftherohorinos, 1987; Ελευθεροχωρινός, 2008).

### **2.1.2 Ιμιδαζολινόνες (Imidazolinones)**

Η οικογένεια αυτή των ζιζανιοκτόνων αναπτύχθηκε μετά το 1970. Το πρώτο ζιζανιοκτόνο που αναπτύχθηκε ήταν το imazamethabenz-methyl και ακολούθησε η ανάπτυξη των ζιζανιοκτόνων imazapyr, imazaquin, imazamox και imazapic. Ο βασικός χημικός τους τύπος αποτελείται από έναν αρωματικό δακτύλιο (συνήθως πυριδίνη) με την καρβοξυλική ομάδα και από τον ιμιδαζολινικό δακτύλιο.

Οι ιμιδαζολινόνες εφαρμόζονται στο έδαφος ή και στο φύλλωμα των ζιζανίων. Απορροφώνται από τις ρίζες και τα φύλλα και μετακινούνται εντός των φυτών διά μέσου του ξυλώματος και του φλοιώματος. Η δράση τους από φυλλώματος εκδηλώνεται με αναστολή της αύξησης των φυτών, χλώρωση, αυξημένη σύνθεση ανθοκυανών και τελικώς νέκρωση των μεριστωματικών ιστών. Η νέκρωση όμως των φυτών επέρχεται σε 3-5 εβδομάδες από την εφαρμογή τους. Η δράση από εδάφους εκδηλώνεται εντός ολίγων ημερών από το φύτευμα των ζιζανίων. Τα ευαίσθητα ζιζάνια-στόχοι εμφανίζουν περιορισμένη ανάπτυξη των ριζών, αυξημένη σύνθεση ανθοκυανών, χλώρωση, αναστολή της αύξησης και τελικώς νέκρωση των φυτών.

Οι ιμιδαζολινόνες συμπεριφέρονται στο έδαφος ως ασθενή οξέα. Η προσρόφησή τους από τα κολλοειδή του εδάφους δεν είναι ισχυρή και γι' αυτό η πιθανότητα έκπλυσής τους είναι μεγάλη (βαθμός έκπλυσης 4 έως 5). Ο χρόνος παραμονής τους στο έδαφος, αν και εφαρμόζονται σε πολύ χαμηλές δόσεις, συχνά είναι μεγαλύτερος από 12 μήνες, με αποτέλεσμα ευαίσθητες καλλιέργειες να είναι αδύνατον να εγκατασταθούν την επόμενη καλλιεργητική περίοδο. Η απομάκρυνσή τους από το έδαφος γίνεται κυρίως μέσω μικροβιακής αποδόμησης και δευτερευόντως μέσω χημικής διάσπασης. Οι απώλειες που υφίστανται λόγω εξάτμισης ή/και λόγω φωτοχημικής διάσπασης είναι ασήμαντες έως μέτριες (Ελευθεροχωρινός, 2008).

### **2.1.3 Πυριμιδιθυλβενζοϊκά (Pyrimidinylbenzoates)**

Ο βασικός χημικός τους τύπος περιλαμβάνει έναν πυριμιδινικό δακτύλιο ενωμένο με βενζοϊκό οξύ μέσω ατόμων S ή O. Το bispyribac εφαρμόζεται μεταφυτρωτικά με επεμβάσεις στο φύλλωμα για την αντιμετώπιση ζιζανίων στην καλλιέργεια του ρυζιού (Kaloumenos κ.ά., 2013), ενώ το pyriithiobac εφαρμόζεται στο φύλλωμα και στο έδαφος για την αντιμετώπιση ετήσιων πλατύφυλλων ζιζανίων στην καλλιέργεια του βαμβακιού (Kaloumenos κ.ά., 2005).

Τα ζιζανιοκτόνα της οικογένειας αυτής συμπεριφέρονται στο έδαφος ως ασθενή οξέα. Η προσρόφησή τους από τα κολλοειδή του εδάφους δεν είναι ισχυρή και γι' αυτό η πιθανότητα έκπλυσής τους είναι μεγάλη. Τα ζιζανιοκτόνα αυτής της χημικής οικογένειας είναι δραστικά σε πολύ μικρότερες δόσεις από τα περισσότερα χρησιμοποιούμενα ζιζανιοκτόνα. Ο χρόνος παραμονής του bispyribac στο έδαφος είναι 1-2 μήνες, ενώ του pyriithiobac κυμαίνεται από 6 έως 14 μήνες (Ελευθεροχωρινός, 2008).

#### **2.1.4 Τριαζολοπυριμιδίνες (Triazolopyrimidines)**

Ο βασικός χημικός τους τύπος αποτελείται από τριαζολοπυριμιδικό δακτύλιο, σουλφαμυδική γέφυρα και φαινυλικό ή πυριδινικό δακτύλιο. Δρουν κυρίως από φυλλώματος και δευτερευόντως από εδάφους. Απορροφώνται από τις ρίζες και τα φύλλα των ζιζανίων και μετακινούνται διά μέσου του ξυλώματος και του φλοιώματος. Είναι δραστικά σε πολύ μικρότερες δόσεις από ό,τι τα περισσότερα από τα χρησιμοποιούμενα ζιζανιοκτόνα. Είναι αποτελεσματικά εναντίον ετήσιων πλατύφυλλων ζιζανίων, ενώ στο φάσμα δράσης τους συμπεριλαμβάνονται και ορισμένα ετήσια αγρωστώδη ή και κυπεροειδή είδη (ιδιαίτερα για το ζιζανιοκτόνο penoxsulam).

Το penoxsulam εφαρμόζεται μεταφυτρωτικά στην καλλιέργεια του ρυζιού, ενώ το pyroxsulam, σε ετοιμόχρηστο μίγμα με το florasulam και την προστατευτική ουσία cloquintocet-mexyl, εφαρμόζεται μεταφυτρωτικά στα χειμερινά σιτηρά για αντιμετώπιση αγρωστωδών και πλατύφυλλων ζιζανίων. Τα ζιζανιοκτόνα της οικογένειας αυτής συμπεριφέρονται στο εδαφικό διάλυμα ως ασθενή οξέα. Η προσρόφησή τους από τα κολλοειδή του εδάφους δεν είναι ισχυρή και γι' αυτό η πιθανότητα έκπλυσής τους είναι μεγάλη. Η υπολειμματική τους διάρκεια στο έδαφος κυμαίνεται από 1 έως 9 μήνες, ενώ η απομάκρυνσή τους από το έδαφος γίνεται κυρίως μέσω μικροβιακής αποδόμησης (Ελετθεροχωρινός, 2008),

#### **2.1.5 Σουλφονυλαμινοκαρβονυλοτριαζολινόνες (Sulfonylaminocarbonyltriazolinones)**

Η οικογένεια αυτή περιλαμβάνει τα ζιζανιοκτόνα φυλλώματος flucarbazone, propoxycarbazone και thiencarbazone. Τα flucarbazone και propoxycarbazone είναι αποτελεσματικά κυρίως εναντίον ετήσιων αγρωστωδών ζιζανίων. Όμως, στο φάσμα δράσης τους συγκαταλέγονται και ορισμένα ετήσια, πλατύφυλλα ζιζάνια. Τα ζιζανιοκτόνα αυτής της χημικής οικογένειας απορροφώνται εύκολα από τα φύλλα και τις ρίζες των ζιζανίων και μετακινούνται εντός των φυτών-στόχων διά μέσου του φλοιώματος και του ξυλώματος, αντιστοίχως. Είναι δραστικά σε πολύ μικρότερες δόσεις από ό,τι τα περισσότερα από τα ήδη χρησιμοποιούμενα ζιζανιοκτόνα.

Τα ζιζανιοκτόνα flucarbazone, propoxycarbazone και thiencarbazone συ- μπεριφέρονται στο εδαφικό διάλυμα ως ασθενή οξέα. Η προσρόφησή τους από τα κολλοειδή του εδάφους δεν είναι ισχυρή. Ως συνέπεια, η πιθανότητα έκπλυσής τους είναι μεγάλη, ενώ η απομάκρυνσή τους από το έδαφος γίνεται κυρίως μέσω μικροβιακής αποδόμησης (Ελευθεροχωρινός, 2008).

## 2.2 Ανθεκτικότητα ζιζανίων σε ζιζανιοκτόνα

### 2.2.1 Εισαγωγή-ορισμοί

Η **ανθεκτικότητα** (resistance) των ζιζανίων στα ζιζανιοκτόνα ορίζεται ως ‘η επιλεγμένη γενετική ικανότητα ορισμένων βιοτύπων ζιζανίων να επιβιώνουν από την εφαρμογή συνιστώμενων δόσεων ζιζανιοκτόνων στις οποίες είναι ευαίσθητος ο αρχικός πληθυσμός ζιζανίων’ (De Prado και Franco; Ελευθεροχωρινός, 2008). Έτσι, η ανθεκτικότητα προηγείται του αρχικού πληθυσμού των ευαίσθητων ζιζανίων, που επιλέγονται λόγω συνεχούς πίεσης επιλογής (selective pressure) από την επαναλαμβανόμενη χρήση του ίδιου ζιζανιοκτόνου, στη συνέχεια εξελίσσεται και τελικά κυριαρχεί. (Ελευθεροχωρινός, 2020).

Η **αντοχή** (tolerance) ορίζεται διεθνώς ως ‘η κληρονομική ικανότητα όλων των φυτών ενός είδους ζιζανίου να επιβιώνουν και να αναπαράγονται στην εξ αρχής εφαρμογή της συνιστώμενης δόσης ενός ζιζανιοκτόνου’. Επομένως, σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς προκύπτει το συμπέρασμα ότι η αντοχή είναι διαφορετική από την ανθεκτικότητα.

Η **διασταυρούμενη ανθεκτικότητα** (cross-resistance) ορίζεται ως ‘η ανθεκτικότητα ενός πληθυσμού ζιζανίου σε δύο ή περισσότερα ζιζανιοκτόνα που έχουν τον ίδιο μηχανισμό-τρόπο δράσης και ανήκουν στην ίδια ή σε διαφορετικές χημικές κατηγορίες’. Αρκετοί παράγοντες φαίνεται να επηρεάζουν το εύρος των ζιζανιοκτόνων έναντι των οποίων το ζιζάνιο θα αναπτύξει ανθεκτικότητα, μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται το είδος του ζιζανίου και οι φυσικοχημικές βιολογικές διαφορές που υφίστανται (δυνατότητα πρόσβασης στον στόχο δράσης ή ικανότητας μεταβολισμού) μεταξύ των ζιζανιοκτόνων (Ελευθεροχωρινός, 2020).

Η **πολλαπλή ανθεκτικότητα** (multiple resistance) είναι η ‘η ανθεκτικότητα ενός ζιζανίου σε περισσότερα από ένα ζιζανιοκτόνα που ανήκουν σε διαφορετική οικογένεια ή και στην ίδια έχουν διαφορετικό μηχανισμό δράσης’. (Ελευθεροχωρινός 2008). Ο μηχανισμός κληρονόμησης της πολλαπλής ανθεκτικότητας ελέγχεται από περισσότερα από ένα γονίδια.

Το είδος της ανθεκτικότητας (απλή, σταυρανθεκτικότητα, πολλαπλή ανθεκτικότητα) και ο ρυθμός ανάπτυξής της επηρεάζονται από παράγοντες του ζιζανίου, του ζιζανιοκτόνου και της εφαρμοζόμενης γεωργικής πρακτικής.

### 2.2.2 Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή ανθεκτικότητας ζιζανίων σε ζιζανιοκτόνα

Σύμφωνα με τον Ελευθεροχωρινό (2008) οι παράγοντες που έχουν σχέση με το ζιζάνιο και επηρεάζουν σημαντικά την ανάπτυξη ανθεκτικών βιοτύπων στα ζιζανιοκτόνα είναι:

1. Η συχνότητα των γονιδίων ανθεκτικότητας στο φυσικό πληθυσμό
2. Ο αριθμός των γονιδίων που ελέγχουν την ανθεκτικότητα
3. Ο βαθμός κυριαρχίας των γονιδίων ανθεκτικότητας
4. Ο τρόπος κληρονόμησης των γονιδίων ανθεκτικότητας
5. Ο τρόπος επικονίασης των ζιζανίων
6. Η ικανότητα των ζιζανίων για παραγωγή οργάνων αναπαραγωγής
7. Η προσαρμοστικότητα των ανθεκτικών έναντι των ευαίσθητων βιοτύπων των ζιζανίων
8. Το απόθεμα οργάνων αναπαραγωγής του ζιζανίου στο έδαφος

Οι σημαντικότεροι παράγοντες που έχουν σχέση με το ζιζανιοκτόνο και επηρεάζουν την ανάπτυξη ανθεκτικών βιοτύπων ζιζανίων είναι:

1. Η ένταση της δράσης του
2. Η υπολειμματική του διάρκεια
3. Ο μηχανισμός δράσης του

Οι παράγοντες που σχετίζονται με την εφαρμοζόμενη γεωργική πρακτική και επηρεάζουν σημαντικά την επιλογή ανθεκτικότητας των ζιζανίων είναι:

1. Η δόση εφαρμογής του ζιζανιοκτόνου
2. Η συχνότητα εφαρμογής του
3. Η χρήση μιγμάτων ζιζανιοκτόνων
4. Η εναλλαγή ζιζανιοκτόνων στον ίδιο αγρό
5. Η συνδυασμένη χρήση εναλλακτικών μεθόδων αντιμετώπισης
6. Το εφαρμοζόμενο σύστημα αμειψισποράς των καλλιεργειών  
Ο τρόπος κατεργασίας του εδάφους

Η πιθανότητα ανάπτυξης ανθεκτικών βιοτύπων ενός ζιζανίου στα ζιζανιοκτόνα είναι μεγαλύτερη όταν



1. Ο μηχανισμός ανθεκτικότητας ελέγχεται από ένα γονίδιο (η επιλογή του από το ζιζανιοκτόνο είναι πιο εύκολη)
2. Η συχνότητα εμφάνισης του γονιδίου ανθεκτικότητας στο φυσικό πληθυσμό είναι μεγάλη
3. Ο μηχανισμός ανθεκτικότητας ελέγχεται από κυρίαρχο γονίδιο
4. Οι κληρονόμοι ανθεκτικότητας οφείλονται σε DNA του πυρήνα
5. Το ζιζάνιο είναι σταυρογονιμοποιούμενο
6. Το ζιζάνιο παράγει μεγάλη ποσότητα οργάνων αναπαραγωγής
7. Το ζιζάνιο έχει μεγάλο απόθεμα οργάνων αναπαραγωγής στο έδαφος
8. Η προσαρμοστικότητα των ανθεκτικών βιοτύπων του ζιζανίου είναι μεγαλύτερη από εκείνη των ευαίσθητων βιοτύπων
9. Ο μηχανισμός δράσης του ζιζανιοκτόνου ελέγχεται από ένα μόνο γονίδιο
10. Το ζιζανιοκτόνο είναι πολύ δραστικό
11. Το ζιζανιοκτόνο εφαρμόζεται σε μεγάλες δόσεις
12. Το ζιζανιοκτόνο εφαρμόζεται συνεχώς
13. Το ζιζανιοκτόνο έχει μεγάλη υπολειμματική διάρκεια
14. Δεν εφαρμόζονται μίγματα ζιζανιοκτόνων
15. Δεν γίνεται εναλλαγή ζιζανιοκτόνων στο ίδιο αγρό
16. Δεν γίνεται συνδυασμένη χρήση μεθόδων αντιμετώπισης
17. Δεν γίνεται αμειψισπορά των καλλιεργειών
18. Εφαρμόζεται ελάχιστη κατεργασία εδάφους και όχι βαθύ όργωμα

### 2.2.3 Μηχανισμοί ανθεκτικότητας ζιζανίων σε ζιζανιοκτόνα

Η ανθεκτικότητα των ζιζανίων στα ζιζανιοκτόνα μπορεί να οφείλεται σε φυσιολογικούς και/ή βιοχημικούς μηχανισμούς των φυτών. Οι σημαντικότεροι φυσιολογικοί μηχανισμοί των ζιζανίων που συνεισφέρουν στην ανθεκτικότητά τους στα ζιζανιοκτόνα είναι:

- Η μείωση του ρυθμού απορρόφησης του ζιζανιοκτόνου
- Η μείωση του ρυθμού μετακίνησης του ζιζανιοκτόνου, ενδοφυτικά
- Η τροποποίηση στην ενδοκυτταρική κατανομή του ζιζανιοκτόνου

Στους βιοχημικούς μηχανισμούς των ζιζανίων στους οποίους οφείλεται η ανθεκτικότητά τους στα ζιζανιοκτόνα συμπεριλαμβάνονται (Ελευθεροχωρινός, 2008):

- Η ικανότητά τους να μεταβολίζουν τα ζιζανιοκτόνα μέσω: (1) διεργασιών μετατροπής αποδόμησης των μορίων τους, (2) σχηματισμού συμπλόκων με συστατικά των κυττάρων και (3) εναπόθεσής τους στα κυτταρικά τοιχώματα και στα χυμοτόπια.
- Η υπερπαραγωγή του ενζύμου που αποτελεί θέση-δράσης του ζιζανιοκτόνου
- Η τροποποίηση της θέσης-δράσης του ζιζανιοκτόνου

Ο σχηματισμός των συμπλόκων ζιζανιοκτόνων με γλουταθειόνη, σάκχαρα ή αμινοξέα αναστέλεται από τα αντίστοιχα ένζυμα γλουταθειόνη-S-τρανσφεράση, γλυκοζυτρανσφεράση και τρανσαμινάση (Ελευθεροχωρινός, 2008).

### 2.2.4 Η ανθεκτικότητα των ζιζανίων σε παγκόσμια κλίμακα

Η πρώτη αναφορά για ανάπτυξη ανθεκτικού ζιζανίου αφορούσε στο ζιζανιοκτόνο 2,4-D (ανήκει στη χημική οικογένεια των φαινοξυαλκανοϊκών) και έγινε το 1957 στη Χαβάη (Hilton, 1957). Βέβαια, το 1968 για πρώτη φορά δημοσιεύτηκαν στοιχεία για την ανάπτυξη ανθεκτικών βιοτύπων του ζιζανίου μαρτιάκος (*Senecio vulgaris*), το οποίο παρουσίασε μειωμένη ευαισθησία στις τριαζίνες simazine και atrazine (Ryan, 1970). Έκτοτε, η πίεση επιλογής που άσκησαν οι επαναλαμβανόμενες επεμβάσεις ζιζανιοκτόνων με εξειδικευμένο μηχανισμό δράσης σε τεράστιες καλλιεργούμενες εκτάσεις συνετέλεσαν σε ραγδαία επιλογή ανθεκτικών πληθυσμών ζιζανίων. Μέχρι σήμερα σε παγκόσμια κλίμακα, έχουν αναφερθεί 515 ξεχωριστές περιπτώσεις (είδος ζιζανίου x μηχανισμός/θέση δράσης) ζιζανίων με ανθεκτικότητα σε ζιζανιοκτόνα. Συνολικά,

ανθεκτικότητα σε ζιζανιοκτόνα έχει ταυτοποιηθεί σε 267 (διακόσια εξήντα επτά) είδη ζιζανίων (154 δικοτυλήδων και 113 μονοκοτυλήδων ειδών). Προσέτι, επιλεγεί ανθεκτικοί πληθυσμοί σε διάφορα είδη ζιζανίων στις 21 από τις συνολικά 31 υπάρχουσες θέσεις δράσης ζιζανιοκτόνων και σε 165 διαφορετικά ζιζανιοκτόνα. Σε παγκόσμια κλίμακα, έχουν αναφερθεί ανθεκτικά είδη ζιζανίων σε 97 διαφορετικές καλλιέργειες, σε 72 χώρες (Hear, 2022).

### 2.2.5 Εξέλιξη της ανθεκτικότητας στην Ελλάδα

Τα μέχρι σήμερα δεδομένα δείχνουν ότι στην Ελλάδα έχουν εμφανίσει ανθεκτικότητα 23 είδη ζιζανίων (Hear, 2022; Ελευθεροχωρινός, 2020) σε ζιζανιοκτόνα που αναστέλλουν: (1) τη ροή ηλεκτρονίων στο φωτοσύστημα II (PSII), (2) τη δράση του ενζύμου ACCase, (3) τη δράση του ενζύμου ALS και (4) τη δράση του ενζύμου EPSPS (Ελευθεροχωρινός, 2020). Αναλυτικότερα, το είδος **κοινή μουχρίτσα** (*Echinochloa crus-galli*) εμφάνισε ανθεκτικότητα στο ζιζανιοκτόνο propanil, το **τραχύ βλήτο** (*Amaranthus retroflexus*) και η **λουβουδιά** (*Chenopodium album*) ανέπτυξαν ανθεκτικότητα στο ζιζανιοκτόνο metribuzin (Eleftherohorinos κ.ά., 2000), η **αγριοτομάτα** (*Solanum nigrum*) ανέπτυξε ανθεκτικότητα στο ζιζανιοκτόνο prometryn, η λεπτή ήρα (*Lolium rigidum*) ανέπτυξε πολλαπλή ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα chlorsulfuron, mesosulfuron+iodosulfuron, clodinafop, diclofop και tralkoxydim (Kaloumenos κ.ά., 2012), η **κοινή παπαρούνα** (*Paraver rhoeas*) ανέπτυξε σταυρανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα chlorsulfuron, tribenuron, triasulfuron, mesosulfuron+iodosulfuron, florasulam, pyriithiobac και imazamox, το πολυετές αγρωστώδες **βέλιουρας** (*Sorghum halepense*) ανέπτυξε διασταυρωτή ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα quizalofop, propaquizafop και fluazifop-P-butyl (Παπαπαναγιώτου κ.ά., 2017a), η **χειμερινή αγριοβρώμη** (*Avena sterilis*) ανέπτυξε διασταυρωτή ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα diclofop, clodinafop, fenoxaprop, tralkoxydim και pinoxaden (Παπαπαναγιώτου κ.ά., 2015b) και στους ALS-αναστολείς (mesosulfuron+iodosulfuron, pyroxsulam) (Παπαπαναγιώτου κ.ά. 2017d), η **όρθια μουχρίτσα** (*Echinochloa oryzicola*) ανέπτυξε σταυρανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα penoxsulam, bispyribac, imazamox, foramsulfuron, nicosulfuron και rimsulfuron (Kaloumenos κ.ά., 2013a), το **κόκκινο ρύζι** (*Oryza sativa*) ανέπτυξε σταυρανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα imazamox και imazethapyr (Kaloumenos κ.ά., 2013b), η **μικρόκαρπη φάλαρη** (*Phalaris minor*) στους ACCase-αναστολείς diclofop, clodinafop propargyl και fenoxaprop (Travlos, 2012), η **μοσχοκύπερη** (*Cyperus difformis*) στους

ALS-αναστολείς azimsulfuron, halosulfuron, imazosulfuron (Ntoanidou κ.ά., 2016), το **άγριο σινάπι** (*Sinapis arvensis*) και το **ράπιστρο** (Ntoanidou κ.ά., 2019) στους ALS-αναστολείς tribenuron και imazamox (Ntoanidou κ.ά., 2017) και **είδη κόνυζας** (*Conyza canadensis* και *C. albida*) ανέπτυξαν ανθεκτικότητα στο ζιζανιοκτόνο glyphosate (Travlos και Chachalis, 2013). Επίσης, πληθυσμοί των αγρωστωδών ζιζανίων **ανεμόχορτο** (*Apera spica-venti*) και **μίλιο** (*Milium vernale*) ανέπτυξαν ανθεκτικότητα σε ACCase- (diclofor, clodinafor propargyl) και ALS-αναστολείς (chlorsulfuron, mesosulfuron+iodosulfuron, pyroxsulam) (Παπαπαναγιώτου κ.ά., 2017c), ενώ πληθυσμοί των ειδών μικρόκαρπη (*Galium spurium*), και μεγάλοκαρπη (*Galium aparine*) κολλητσίδα (Παπαπαναγιώτου κ.ά., 2017d) και του είδους μικρόκαρπη καμελίνα (*Camelina microcarpa*) (Παπαπαναγιώτου κ.ά., 2017e), ανέπτυξαν ανθεκτικότητα σε ζιζανιοκτόνα-αναστολείς του ενζύμου οξικογαλακτική συνθάση (ALS) (chlorsulfuron, tribenuron, florasulam, pyroxsulam+florasulam, mesosulfuron+iodosulfuron).

#### 2.2.6 Ανάπτυξη ανθεκτικότητας σε ζιζανιοκτόνα αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS

Η χρήση των ζιζανιοκτόνων αυτού του μηχανισμού δράσης (ζιζανιοκτόνα που ανήκουν στις χημικές οικογένειες των σουλφονουριών, μιδαζολινών, πυριμιδυλβενζοϊκών, τριαζολοπυριμιδινών, σουλφονυλαμινοκαρβονυλτριαζολινονών) για περισσότερο από 40 έτη συνέβαλε στην ανάπτυξη πολύ μεγάλου αριθμού ανθεκτικών βιοτύπων που ανήκουν σε 171 είδη ζιζανίων (66 αγρωστωδών και 105 πλατύφυλλων ειδών) (Heap, 2022). Ο μηχανισμός ανθεκτικότητας των περισσότερων βιοτύπων οφείλεται σε τροποποίηση του ενζύμου (θέση δράσης) ALS ή AHAS (συνθετάση του οξικογαλακτικού οξέος ή οξικογαλακτική συνθετάση). Το ένζυμο κωδικοποιείται εντός του πυρήνα και είναι το ένζυμο-κλειδί κατά τη βιοσύνθεση των αμινοξέων με διακλαδισμένη αλυσίδα ατόμων άνθρακα, βαλίνη, λευκίνη και ισολευκίνη εντός των χλωροπλαστών (όπου μεταφέρεται μέσω ενός πεπτιδίου-μεταφορέα).

Η τροποποίηση της θέσης δράσης (ανθεκτικό ένζυμο ALS ή AHAS) των ALS-αναστολέων και η επακόλουθη ανάπτυξη ανθεκτικότητας ελέγχεται από ένα γονίδιο. Οι βιότυποι των ζιζανίων, με βάση τη θέση αντικατάστασης των αμινοξέων του ενζύμου ALS ή AHAS και την ανάπτυξη ανθεκτικότητας ή σταυρανθεκτικότητας στα διάφορα ζιζανιοκτόνα, θα μπορούσαν να καταταγούν σε έξι ομάδες.

Συγκεκριμένα, η πρώτη ομάδα περιλαμβάνει βιοτύπους ζιζανίων με ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα που ανήκουν στην οικογένεια των ιμιδαζολινονών και ευαισθησία στα ζιζανιοκτόνα των σουλφονουλουριών και πυριμιδιδυλβενζοϊκών. Στους συγκεκριμένους ανθεκτικούς βιοτύπους η ανθεκτικότητα του ενζύμου ALS ή AHAS συνδέεται με αντικατάσταση του αμινοξέος αλανίνη (Ala) στη θέση 122 από το αμινοξύ θρεονίνη (Thr) (Ala122-Thr).

Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει βιότυπους ζιζανίων με σταυρανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα των σουλφονουλουριών, πυριμιδιδυλβενζοϊκών και τριαζολοπυριμιδινών, αλλά ευαισθησία στα ζιζανιοκτόνα των ιμιδαζολινονών. Η ανθεκτικότητα του ενζύμου ALS ή AHAS συνδέεται με αντικατάσταση του αμινοξέος προλίνη (Pro) στη θέση 197 από διάφορα αμινοξέα [θρεονίνη (Thr), αλανίνη (Ala), αργινίνη (Arg), γλουταμίνη (Gln), σερίνη (Ser), ισολευκίνη (Ile), λευκίνη (Leu) ή ιστιδίνη (His)] (Pro197-Ser κ.ά.). Η τροποποίηση αυτή παρέχει στους βιοτύπους αυτών των ζιζανίων ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα των σουλφονουλουριών, επειδή η αντικατάσταση του αμινοξέος προλίνη (ευαίσθητοι βιότυποι) από άλλα αμινοξέα δεν επιτρέπει τη σύνδεσή τους (δημιουργία δεσμού υδρογόνου) με το ένζυμο ALS. Η αδυναμία πρόσδεσης συντελεί στη μη αναστολή της βιοσύνθεσης των τριών προαναφερθέντων αμινοξέων στα ανθεκτικά φυτά. Αντίθετα, η τροποποίηση αυτή δεν παρέχει ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα των ιμιδαζολινονών, επειδή αυτά σχηματίζουν δεσμό με αμινοξέα άλλων θέσεων του ενζύμου AHAS [υδροφόβο δεσμό με τρυπτοφάνη (Trp) στη θέση 574 ή με αλανίνη (Ala) στη θέση 122 και δεσμό υδρογόνου με σερίνη (Ser) στη θέση 653] (Ελευθεροχωρινός, 2008).

Η τρίτη ομάδα περιλαμβάνει βιότυπους ζιζανίων με ευαισθησία στα ζιζανιοκτόνα των σουλφονουλουριών και ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα των ιμιδαζολινονών, αλλά και βιότυπους με μέτρια σταυρανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα των χημικών οικογενειών των σουλφονουλουριών, των ιμιδαζολινονών, των πυριμιδιδυλβενζοϊκών και των τριαζολοπυριμιδινών. Η πρωτεϊνική εξέταση αυτών των βιοτύπων έδειξε ότι η ανθεκτικότητα του ενζύμου ALS ή AHAS συνδέεται με αντικατάσταση του αμινοξέος τρυπτοφάνη (Trp) στη θέση 574 από το αμινοξύ λευκίνη (Leu) (Trp573-Leu). Η πέμπτη ομάδα περιλαμβάνει βιότυπους ζιζανίων με ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα των ιμιδαζολινονών και ευαισθησία στα ζιζανιοκτόνα των σουλφονουλουριών και τριαζολοπυριμιδινών. Η ανθεκτικότητα του ενζύμου ALS ή AHAS σε αυτούς τους βιοτύπους συνδέεται με αντικατάσταση του αμινοξέος σερίνη (Ser) στη θέση 653 από

το αμινοξύ θρεονίνη (Thr) (Ser652-Thr) ή ασπαραγίνη (Asn) (Ser653-Asn) (Ελευθεροχωρινός, 2008).

Τέλος, η έκτη ομάδα περιλαμβάνει ένα είδος βλήτου (*Amaranthus hybridus* L.) με σταυρανθεκτικότητα σε όλα τα ζιζανιοκτόνα-αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS ή AHAS. Η πρωτεϊνική εξέταση αυτού του βιοτύπου αποκάλυψε ότι η ανθεκτικότητα του ενζύμου ALS ή AHAS οφείλεται σε αντικατάσταση του ασπαρτικού (Asp) από το γλουταμικό (Glu) στη θέση 376 (Asp376-Glu). Επίσης, η ανθεκτικότητα ορισμένων βιοτύπων ζιζανίων δεν οφείλεται στην τροποποίηση της θέσης δράσης των ζιζανιοκτόνων (ανθεκτικό ένζυμο ALS ή AHAS) αλλά στην ικανότητα των φυτών για μεταβολισμό των ζιζανιοκτόνων μέσω υδροξυλίωσης [καταλύεται από το ένζυμο μονοοξυγονάση (CytP<sub>450</sub>)] και στη συνέχεια σχηματισμού συμπλόκου με γλυκόζη (Ελευθεροχωρινός, 2008). Συγκεκριμένα, ένας βιότυπος του ζιζανίου *Lolium rigidum* είναι ήδη ανθεκτικός στο ζιζανιοκτόνο chlorsulfuron λόγω του προαναφερθέντος μηχανισμού μεταβολισμού (Christopher κ.ά., 1992; από Ελευθεροχωρινός, 2008).

### **2.2.7 Επιλογή ανθεκτικότητα στο είδος τραχύ βλήτο (*A. retroflexus*) και σε άλλα είδη του γένους *Amaranthus***

Ιδανικά, για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των ειδών του γένους *Amaranthus* απαιτείται η επίτευξη αξιόλογης υπολειμματικής διάρκειας χημικής καταπολέμησης, καθώς τα είδη *Amaranthus* εμφανίζουν πολλαπλά, διαδοχικά ‘κύματα φυτρώματος’ στη διάρκεια κάθε καλλιεργητικής περιόδου. Πολλά ζιζανιοκτόνα (τα οποία εφαρμόζονται τόσο προφυτρωτικά όσο και μεταφυτρωτικά) που έχουν έγκριση για την καταπολέμηση παλύφυλλων ζιζανίων σε σημαντικό εύρος καλλιεργούμενων ειδών εμφανίζουν υψηλή αποτελεσματικότητα εναντίον των ειδών *Amaranthus* spp. Όμως, οι επαναλαμβανόμενες επεμβάσεις που πραγματοποιούνται για την χημική τους αντιμετώπιση συνετέλεσαν στην επιλογή εξαιρετικά μεγάλου αριθμού ανθεκτικών πληθυσμών σε είδη του γένους *Amaranthus* σε μεγάλο αριθμό καλλιεργειών, σε παγκόσμια κλίμακα (Heap, 2022). Οι ανθεκτικοί πληθυσμοί σε κάθε καλλιεργούμενο αγρό συνήθως ‘αναδύονται’ ανεξάρτητα, ως ανταπόκριση στην ισχυρή πίεση επιλογής που ασκούν οι πραγματοποιούμενες επεμβάσεις ενός ή διαφορετικών ζιζανιοκτόνων με τον ίδιο όμως μηχανισμό δράσης (Beckie και Tardif, 2012). Για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των ζιζανίων στις

περισσότερες καλλιέργειες επικράτησε η εφαρμογή ζιζανιοκτόνων ιδιαίτερα υψηλής αποτελεσματικότητας, αλλά εξειδικευμένου μηχανισμού δράσης. Η τάση αυτή συνδυάστηκε με την ανάπτυξη υψηλής παραγωγικότητας αγρο-οικοσυστημάτων στα οποία υιοθετήθηκε η μονοκαλλιέργεια και η εγκατάλειψη της εναλλαγής καλλιεργειών, καθώς και της εφαρμογής πολλών διαφορετικών αλληλοσυμπληρούμενων μέτρων-στρατηγικών αντιμετώπισης των ζιζανίων. Αυτό συνετέλεσε στην άσκηση εξαιρετικά υψηλής πίεσης επιλογής στους πληθυσμούς των ζιζανίων και προκάλεσε την ραγδαία επιλογή ανθεκτικών πληθυσμών, ιδιαίτερα σε είδη που χαρακτηρίζονταν από μια ιδιαίτερα υψηλή εγενή δυνατότητα ταχύτερης και εντονότερης επιλογής ανθεκτικότητας (*Lolium rigidum*, *Alopecurus myosuroides*, *Echinochloa* spp., *Amaranthus* spp., *Conyza* spp.) (Heap, 2022).

Αρχικά, επιλέχθηκαν πληθυσμοί βλήτων με ανθεκτικότητα στις τριαζίνες η οποία οφείλονταν σε μια σημειακή μετάλλαξη στο γονίδιο psbA των χλωροπλαστών, το οποίο κωδικοποιεί για την παραγωγή της πρωτεΐνης D1 στην οποία το αμινοξύ σερίνη (Ser) έχει αντικατασταθεί στη θέση 264 από το αμινοξύ γλυκίνη (Gly) [Ser264Gly] (Costea κ.ά., 2004). Η ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα της χημικής οικογένειας των τριαζινών παρουσιάζει μητρική κληρονομία, ελέγχεται από ένα ημι-κυρίαρχο γονίδιο του πυρήνα και συντελεί σε μειωμένη προσαρμοστική ικανότητα των επιλεγμένων ανθεκτικών πληθυσμών ζιζανίων. Η μειωμένη προσαρμοστική ικανότητα εκφράζεται με μειωμένους ρυθμούς φωτοσύνθεσης, μειωμένη παραγωγή βιομάζας, καθώς και αναπαραγωγική ικανότητα, ιδιαίτερα όταν οι ανθεκτικοί πληθυσμοί εκτίθενται σε συνθήκες-περιβάλλον ανταγωνισμού (Vila-Aiub κ.ά., 2009).

Αμέσως μετά την αρχική τους ανακάλυψη οι αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS υιοθετήθηκαν με ενθουσιασμό από τους παραγωγούς στα περισσότερα παραγωγικά συστήματα παγκοσμίως. Οι αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS χαρακτηρίζονται από εξαιρετικά υψηλή αποτελεσματικότητα ακόμα και σε χαμηλές δόσεις εφαρμογής, ευρύ φάσμα δράσης σε πολύ μεγάλο αριθμό ζιζανίων, υψηλή εκλεκτικότητα (ασφάλεια) στα περισσότερα καλλιεργούμενα είδη και χαμηλή τοξικότητα για τα θηλαστικά (Tranel και Wright, 2002). Αυτά τα χαρακτηριστικά συνετέλεσαν στην εκτεταμένη, επαναλαμβανόμενη χρησιμοποίησή τους στις αροτραίες καλλιέργειες για την αποτελεσματική καταπολέμηση τόσο αγρωστωδών όσο και πλατύφυλλων ζιζανίων. Δυστυχώς, τα ζιζανιοκτόνα αυτών των χημικών οικογενειών έχουν εξαιρετικά εξειδικευμένο μηχανισμό δράσης και επιλέγουν ταχύτερα ανθεκτικούς πληθυσμούς ακόμα και

μετά από έκθεση σε περιορισμένο αριθμό επαναλαμβανόμενων επεμβάσεων (Beckie και Tardif, 2012; Tranel και Wright, 2002). Ως συνέπεια, επιλέχθηκαν πολλοί πληθυσμοί του είδους τραχύ βλήτο με ανθεκτικότητα σε ζιζανιοκτόνα- αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS (Chen κ.ά., 2015; Francischini κ.ά., 2014; McNaughton κ.ά., 2005; Scarabel κ.ά., 2007) και άλλα είδη *Amaranthus* spp. (Ferguson κ.ά., 2001).

Στις περισσότερες καταγεγραμμένες περιπτώσεις η ανθεκτικότητα των επιλεγμένων πληθυσμών βλήτων οφείλεται σε τροποποίηση της θέσης δράσης, συνέπεια σημειακών μεταλλάξεων στο ALS γονίδιο που είναι υπεύθυνες για τη μειωμένη ευαισθησία του ενζύμου στα ζιζανιοκτόνα-αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS (Tranel και Wright, 2002). Βέβαια, ο Cao και οι συνεργάτες του (Cao κ.ά., 2021) ανέφεραν ότι ένας πληθυσμός του είδους τραχύ βλήτο ήταν ανθεκτικός στη σουλφονουρία thifensulfuron-methyl και σταυρανθεκτικός σε άλλους ALS-αναστολείς (imazethapyr, flumetsulam, bispyribac-sodium), λόγω αυξημένης ικανότητας μεταβολισμού των ζιζανιοκτόνων συνέπεια δράσης των αποτοξικοποιητικών ενζύμων μονοξυγονάσες του κυτοχρώματος P450 (επιλογή μηχανισμού ανθεκτικότητας που δεν οφείλεται σε τροποποίηση της θέσης δράσης, non-target-site resistance, NTSR).

Επίσης, σε πληθυσμούς τραχέος βλήτου που αναπτύσσονταν σε καλλιέργειες βαμβακιού στη Βραζιλία έχει αναφερθεί επιλογή πολλαπλής ανθεκτικότητας σε ζιζανιοκτόνα της χημικής οικογένειας των τριαζινών (atrazine, prometryn) και των ALS-αναστολέων (trifloxysulfuron-sodium, pyriithiobac-sodium), (Francischini κ.ά., 2019). Προσέτι, οι Wang κ.ά. (2019) και Wang κ.ά. (2017) ανακάλυψαν πληθυσμούς τραχέος βλήτου που ανέπτυξαν πολλαπλή ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα που αναστέλλουν τη δράση των ενζύμων οξικογαλακτική συνθάση [acetolactate synthase (ALS)] και οξειδάση του πρωτοπορφυρινογόνου [protoporphyrinogen oxidase (PPO)]. Οι προαναφερθέντες πληθυσμοί τραχέος βλήτου αναπτύσσονταν σε καλλιέργειες σόγιας στην Κίνα. Η επιλογή πολλαπλώς ανθεκτικών πληθυσμών σε ζιζανιοκτόνα διαφορετικού μηχανισμού δράσης καταγράφεται με πολύ μεγαλύτερη συχνότητα σε πληθυσμούς των συγγενικών ειδών *Amaranthus powellii* (Diebold κ.ά., 2003) και *A. tuberculatus* (Moq.) J.D. Sauer (Foes κ.ά., 1998; Tranel, 2020), συγκριτικά με πληθυσμούς του είδους τραχύ βλήτο. Τα συγκεκριμένα είδη είναι δίοικα υποχρεωτικά σταυρογονιμοποιούμενα και χαρακτηρίζονται από υψηλή γενετική πλαστικότητα. Η ροή γονιδίων που πραγματοποιείται με τη μεταφορά της γύρης μεταξύ διαφορετικών φυτών διασφαλίζει τη μεταφορά και τη συσσώρευση γονιδίων ανθεκτικότητας είτε



σε επίπεδο εμμονωμένων φυτών είτε σε επίπεδο πληθυσμών. Η επιλογή πολλαπλώς ανθεκτικών πληθυσμών καθιστά δύσκολη τη χημική καταπολέμηση των συγκεκριμένων πληθυσμών καθώς περιορίζει δραματικά τις επιλογές εναλλακτικών ζιζανιοκτόνων-μηχανισμών δράσης για τη βιώσιμη παραγωγή των καλλιεργούμενων ειδών.

### **2.2.8 Μέθοδοι διαχείρισης της ανθεκτικότητας**

Υπάρχουν διάφορα μέτρα που μπορούν να ληφθούν για τη μείωση της πιθανότητας επιλογής νέων βιοτύπων/πληθυσμών με ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα. Ειδικότερα, η εναλλαγή ζιζανιοκτόνων και η χρήση μιγμάτων ζιζανιοκτόνων μειώνει την πιθανότητα ανάπτυξης ανθεκτικών βιοτύπων καθώς παρέχει την δυνατότητα για: (α) περιορισμένη χρήση ενός και μόνο ζιζανιοκτόνου, (β) χρήση μιγμάτων ζιζανιοκτόνων με διαφορετικό μηχανισμό δράσης, (γ) διαδοχική εφαρμογή επεμβάσεων στην ίδια καλλιέργεια με ζιζανιοκτόνα διαφορετικού μηχανισμού δράσης και (δ) χρήση μη εκλεκτικών και ευρέως φάσματος ζιζανιοκτόνων στα πρώιμα εμφανιζόμενα ζιζάνια.

Η αμειψισπορά μπορεί να αποτρέψει την επιλογή ανθεκτικών βιοτύπων μέσω της δυνατότητας που παρέχει για: (α) αποφυγή έκθεσης των ζιζανίων για μεγάλο χρονικό διάστημα στο ίδιο ζιζανιοκτόνο, (β) εφαρμογή άλλων μεθόδων αντιμετώπισης των ζιζανίων και σε διαφορετικό χρόνο, (γ) εφαρμογή άλλων ζιζανιοκτόνων λόγω ανάπτυξης διαφορετικής καλλιέργειας και (δ) καλλιέργεια ανταγωνιστικότερων καλλιεργούμενων φυτών εναντίον των ζιζανίων.

Επιπλέον, μέτρα που συμβάλλουν στη μείωση του κινδύνου εμφάνισης και της εδραίωσης ανθεκτικών σε ζιζανιοκτόνα πληθυσμών ζιζανίων είναι η λήψη-υιοθέτηση καλλιεργητικών μέτρων μεταξύ των οποίων συγκαταλέγονται: (α) η καλή προετοιμασία της σποροκλίνης, (β) η χρήση πιστοποιημένου σπόρου, (γ) η κατάλληλη εποχή σποράς, (δ) η πυκνότερη και σε ομοιόμορφο βάθος σπορά και (ε) η ορθή χρήση του νερού και των λιπασμάτων.

Τα καλλιεργητικά μέτρα εξασφαλίζουν γρήγορη και ομοιόμορφη εγκατάσταση μιας υγιούς καλλιέργειας, η οποία παρουσιάζει μεγαλύτερη ανταγωνιστική ικανότητα εναντίον των ζιζανίων. Επίσης, η κατεργασία του εδάφους με βαθύ όργωμα μειώνει περισσότερο την

πιθανότητα επιλογής και τον ρυθμό ανάπτυξης ανθεκτικών ζιζανίων στα ζιζανιοκτόνα, σε σχέση με την ελάχιστη κατεργασία του εδάφους. Αυτό αποδίδεται στο ότι το βαθύ όργωμα αναστρέφει το έδαφος και ‘κατανέμει’ τους σπόρους των ανθεκτικών ζιζανίων σε μεγάλο βάθος με αποτέλεσμα να μειώνεται η ποσότητά τους κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, όπου αυτοί φυτρώνουν ευκολότερα και ακολούθως αναπτύσσονται σε ανθεκτικά φυτά (Ελευθεροχωρινός, 2008). Η υιοθέτηση των παραπάνω μέτρων σε συνδυασμό με την χρησιμοποίηση/εφαρμογή αποτελεσματικών ζιζανιοκτόνων, συμβάλλει στην αντιμετώπιση των ζιζανίων και στη μείωση της πιθανότητας επιλογής ανθεκτικών βιοτύπων σε ζιζανιοκτόνα.

Η ολοκληρωμένη διαχείριση των ζιζανίων, που βασίζεται στη συνδυασμένη αξιοποίηση διαφορετικών μεθόδων αντιμετώπισης των ζιζανίων και δεν βασίζεται/εξαρτάται αποκλειστικά στη χημική αντιμετώπισή τους (στοχεύει στη διαχείριση των ζιζανίων με περιορισμό των επεμβάσεων των ζιζανιοκτόνων στις απολύτως απαραίτητες), είναι το σύστημα με τη μεγαλύτερη συμβολή στη μείωση της πιθανότητας ανάπτυξης ανθεκτικών ζιζανίων, αφού έχει ως στόχο τη διαχείριση και όχι την πλήρη εξάλειψή τους (άσκηση μη ισχυρής πίεσης επιλογής) (Ελευθεροχωρινός, 2008).

Τέλος, η αντιμετώπιση των ήδη αναπτυχθέντων ανθεκτικών βιοτύπων ενός ζιζανίου μπορεί να γίνει με: (α) εφαρμογή άλλων ζιζανιοκτόνων που έχουν διαφορετικό μηχανισμό δράσης, (β) εφαρμογή άλλης (μη χημικής) μεθόδου, (γ) αμειψισπορά που επιτρέπει την εφαρμογή άλλων ζιζανιοκτόνων και άλλων μεθόδων καταπολέμησης, (δ) καλλιέργεια γενετικώς τροποποιημένων φυτών με ανθεκτικότητα σε ευρέως φάσματος, μη-εκλεκτικά, μεταφυτρωτικά ζιζανιοκτόνα.

### Κεφάλαιο 3. ΥΛΙΚΑ-ΜΕΘΟΔΟΙ

Δεκαοκτώ επιλεγμένοι πληθυσμοί του είδους τραχύ βλήτο (*Amaranthus retroflexus* L.) αξιολογήθηκαν σε πειράματα φυτοδοχείων για πιθανή ανάπτυξη ανθεκτικότητας σε ζιζανιοκτόνα-αναστολείς της δράσης του ενζύμου οξικογαλακτική συνθάση (ALS). Οι πληθυσμοί του ζιζανίου προέρχονταν από καλλιέργειες ηλίανθου, καλαμποκιού και σόγιας οι οποίες αναπτύσσονταν σε περιοχές του νομού Καβάλας (Ελευθερούπολη, Τενάγη Φιλίππων). Ταυτόχρονα, διερευνήθηκαν οι δυνατότητες αποτελεσματικής χημικής αντιμετώπισης των ανωτέρω πληθυσμών του ζιζανίου, καθώς αξιολογήθηκαν τα ζιζανιοκτόνα tembotrione και dicamba, αντίστοιχα, τα οποία είναι εκλεκτικά και εγκεκριμένα για την πραγματοποίηση μεταφυτρωτικών εφαρμογών στην καλλιέργεια του καλαμποκιού (η οποία συχνά διαδέχεται τις καλλιέργειες ηλίανθου ή σόγιας στα παραγωγικά συστήματα της περιοχής προέλευσης των ύποπτων για επιλογή ανθεκτικότητας σε ζιζανιοκτόνα πληθυσμών τραχέος βλήτου). Στα πειράματα φυτοδοχείων ύποπτων πληθυσμών του ζιζανίου τραχύ βλήτο για την πιθανή επιλογή ανθεκτικότητας σε ζιζανιοκτόνα-αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS αξιολογήθηκαν δύο εγνωσμένης ευαισθησίας πληθυσμοί αναφοράς, οι οποίοι συλλέχθηκαν από φυτά που αναπτύσσονταν σε σημείο της περιοχής δειγματοληψίας μακριά από καλλιεργούμενους αγρούς (ο πρώτος) και από την αστική ζώνη της Θεσσαλονίκης (ο δεύτερος), οι οποίοι δεν είχαν δεχθεί ποτέ εμπειβάσεις με ζιζανιοκτόνα.

Τα πειράματα εγκαταστάθηκαν στο αγρόκτημα του Τμήματος Τεχνολόγων Γεωπόνων του ΤΕΙ Δυτικής Μακεδονίας, στη Φλώρινα, κατά το διάστημα τέλη Ιουνίου-αρχές Αυγούστου του έτους 2021. Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν σε πλαστικά φυτοδοχεία διαστάσεων 10x10x9cm. Η σπορά των σπόρων των πληθυσμών τραχέος βλήτου πραγματοποιήθηκε σε εδαφικό μίγμα που αποτελούνταν από έδαφος (με τα ακόλουθα φυσικοχημικά χαρακτηριστικά: 48.0% πηλός, 31.6% άργιλλος, 20.4% άμμος, περιεκτικότητα 1.3% σε οργανική ουσία και 7.8 τιμή οξύτητας (pH) (1:1 H<sub>2</sub>O)], τύρφη και άμμο σε αναλογία 1:1 (ο/ο). Σε κάθε φυτοδοχείο τοποθετήθηκαν 30 περίπου σπόροι του ζιζανίου, οι οποίοι καλύφθηκαν προσεκτικά με λεπτό στρώμα 1cm του ίδιου εδαφικού μίγματος.

Όταν τα νεαρά σπορόφυτα έφτασαν στο στάδιο των δύο φύλλων αραιώθηκαν με προσοχή, ώστε τελικά να παραμείνουν και να αναπτυχθούν πέντε ομοιόμορφα φυτά τραχέος βλήτου σε κάθε φυτοδοχείο. Η κανονική ανάπτυξη των φυτών και η κάλυψη των αναγκών τους σε θρεπτικά στοιχεία διασφαλιζόνταν με εφαρμογή πλήρους διαφυλλικού λιπάσματος δύο φορές την

εβδομάδα, ενώ η άρδευση πραγματοποιούνταν δύο φορές την ημέρα μέχρι το στάδιο κορεσμού του εδάφους. Κάθε εβδομάδα γίνονταν εκ νέου τυχαιοποίηση των φυτοδοχείων ώστε τα φυτά να αναπτύσσονταν σε ομοιόμορφες συνθήκες περιβάλλοντος.

Οι επεμβάσεις των ζιζανιοκτόνων πραγματοποιήθηκαν όταν τα φυτά των ζιζανίου βρίσκονταν στο στάδιο των 4 φύλλων. Για κάθε πληθυσμό συμπεριελήφθηκαν γλαστράκια που δεν δέχθηκαν επεμβάσεις των ζιζανιοκτόνων (μάρτυρες). Οι επεμβάσεις πραγματοποιήθηκαν με φορητό ψεκαστήρα ακριβείας τύπου AZO (AZP-SPRAYERS, P.O. Box 350-6710 BJ EDE Ολλανδία), ο οποίος φέρει ιστό έξι ακροφυσίων τύπου ριπιδίου 8002 (TeeJet Spray Systems, Co., P.O. Box 7900, Wheaton, IL 60188, Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής) και έχει πλάτος 2,4m. Ο ψεκαστήρας ακριβείας ήταν ρυθμισμένος ώστε να εφαρμόζει όγκο ψεκαστικού υγρού 30lt/στρέμμα και λειτουργούσε με σταθερή πίεση ψεκασμού 280kPa. Η αποτελεσματικότητα της κάθε επέμβασης των ζιζανιοκτόνων εναντίον των πληθυσμών του είδους *Amaranthus retroflexus* αξιολογήθηκε με προσδιορισμό της υπέργεια φυτομάζας (χλωρού βάρους) των φυτών σε κάθε φυτοδοχείο, τέσσερις εβδομάδες μετά την πραγματοποίηση των επεμβάσεων. Το χλωρό βάρος αποτελεί μια από τις απλούστερες παραμέτρους που καταδεικνύει την ευρωστία των φυτών και χρησιμοποιείται ευρύτατα για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των επεμβάσεων των ζιζανιοκτόνων. Ακολούθως, το χλωρό βάρος εκφράστηκε σε % αναστολή της ανάπτυξης των φυτών σε σχέση με τον ανέκαστο μάρτυρα κάθε πληθυσμού, σε κάθε ένα είδος ζιζανίου.

Η στατιστική επεξεργασία (ανάλυση της παραλλακτικότητας, ANOVA) πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τα δεδομένα χλωρού βάρους των φυτών του είδους τραχύ βλήτο (*Amaranthus retroflexus*), τα οποία εκτέθηκαν στην εφαρμογή των ζιζανιοκτόνων-αναστολέων του ενζύμου ALS (imazamox και tribenuron methyl) για τους ύποπτους για επιλογή ανθεκτικότητας πληθυσμούς. Το πειραματικό σχέδιο ήταν το πλήρως τυχαιοποιημένο (Complete random Design, CRD) και για κάθε επέμβαση ζιζανιοκτόνου υπήρχαν τρεις επαναλήψεις. Η ομοιογένεια των δεδομένων που προέκυψαν από τον πειραματισμό ελέγχθηκε χρησιμοποιώντας τη δοκιμή (test) Barlett (Scedenor και Cochram, 1989), σύμφωνα με την οποία δεν παρατηρήθηκαν αποκλίσεις από την κανονικότητα (δεν καταγράφηκαν διαφορές μεταξύ των δύο πειραμάτων). Έτσι, τα στοιχεία αναλύθηκαν συνολικά για τα δύο πειράματα που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της ενδεχόμενης επιλογής ανθεκτικότητας σε κάθε ένα από τα δύο είδη ζιζανίων. Οι διαφορές στους μέσους όρους των επεμβάσεων συγκρίθηκαν σε

επίπεδο σημαντικότητας 5%, χρησιμοποιώντας το κριτήριο της ελάχιστης σημαντικής διαφοράς (LSD).



**Εικ. 12.** Γενική όψη του πειράματος φυτοδοχείων για την αξιολόγηση πιθανής επιλογής ανθεκτικότητας σε επιλεγμένους πληθυσμούς του ζιζανίου τραχύ βλήτο.

#### Κεφάλαιο 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ-ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Οι δύο ευαίσθητοι πληθυσμοί αναφοράς του ζιζανίου τραχύ βλήτο (B19 και B20) καταπολεμήθηκαν άριστα (επίπεδο καταπολέμησης 100%) όταν εκτέθηκαν στην υποτετραπλάσια (X/4), μισή (X/2), καθώς και τη συνιστώμενη (X) δόση, αντίστοιχα, των ζιζανιοκτόνων-αναστολέων της δράσης του ενζύμου ALS (imazamox, tribenuron methyl) (Εικόνα 13), καθώς και του βενζοϊκού παράγωγου με δράση συνθετικής αυξίνης dicamba και της τρικετόνης tembotrione που δρα αναστέλλοντας τη δράση του ενζύμου 4-HPPD (Εικόνα 14) (Πίνακας 2).



**Εικ. 13.** Ανταπόκριση της έκθεσης του ευαίσθητου πληθυσμού αναφοράς B20 στην υποοκταπλάσια (x/8), υποτετραπλάσια (x/4), υποδιπλάσια (x/2) και συνιστώμενη (x) δόση των ζιζανιοκτόνων imazamox (I) και tribenuron (T).



**Εικ. 14.** Ανταπόκριση της έκθεσης του ευαίσθητου πληθυσμού αναφοράς B20 στην υποοκταπλάσια ( $x/8$ ), υποτετραπλάσια ( $x/4$ ), υποδιπλάσια ( $x/2$ ) και συνιστώμενη ( $x$ ) δόση των ζιζανιοκτόνων dicamba (D) και tembotrione (Te).

**Πίνακας 2.** Ανταπόκριση των δύο ευαίσθητων πληθυσμών αναφοράς (B19, B20) του ζιζανίου τραχύ βλήτο στις επεμβάσεις των ζιζανιοκτόνων imazamox (I), Tribenuron methyl (Tr), tembotrione (T) και dicamba (D) στην υποοκταπλάσια (X/8), υποτετραπλάσια (X/4), υποδιπλάσια (X/2) και συνιστώμενη (X) δόση (κάθε τιμή αποτελεί το μέσο όρο έξι επαναλήψεων (φυτοδοχείων)).

Ζιζανιοκτόνα / δόσεις εφαρμογής	Ευαίσθητοι πληθυσμοί αναφοράς τραχέος βλήτου	
	B19	B20
IX/8	100	100
IX/4	100	100
IX/2	100	100
IX	100	100
TrX/8	100	100
TrX/4	100	100
TrX/2	100	100
TrX	100	100
TX/8	100	100
TX/4	100	100
TX/2	100	100
TX	100	100
DX/8	100	100
DX/4	100	100
DX/2	100	100
DX	100	100

Όμως, όπως καταδεικνύεται και στον Πίνακα 3 που ακολουθεί οι περισσότεροι πληθυσμοί τραχέος βλήτου που αξιολογήθηκαν στην παρούσα μελέτη αποδείχθηκαν ανθεκτικοί ή σταυρανθεκτικοί στα δύο ζιζανιοκτόνα (imazamox, tribenuron methyl) αναστολής της δράσης του ενζύμου οξικογαλακτική συνθάση (ALS) που αξιολογήθηκαν.



**Πίνακας 3.** Ανταπόκριση 18 πληθυσμών του ζιζανίου τραχύ βλήτο στις επεμβάσεις των ζιζανιοκτόνων imazamox (I), Tr (tribenuron methyl), tembotrione (T) και dicamba (D) στη συνιστώμενη (X), διπλάσια (2X) και τετραπλάσια (4X) δόση (κάθε τιμή αποτελεί το μέσο όρο έξι επαναλήψεων (φυτοδοχείων)).

Ζιζανιοκτόνα / Δόσεις εφαρμογής	ΥΠΟΠΤΟΙ ΓΙΑ ΕΠΙΛΟΓΗ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΠΛΗΘΥΣΜΟΙ ΤΡΑΧΕΟΣ ΒΛΗΤΟΥ ( <i>A. retroflexus</i> L.)																	
	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10	B11	B12	B13	B14	B15	B16	B17	B18
<b>Ix</b>	9	4	100	90	0	0	0	0	21	0	4	0	0	2	100	0	1	22
<b>I2x</b>	13	6	100	100	0.3	20	29	17	42	0	5	9	0	13	100	6	18	29
<b>I4x</b>	38	19	100	100	3	26	75	28	100	3.3	43	22	7	22	100	11	33	42
<b>Trx</b>	40	0	0	0	46	11	46	54	7	0	44	6	0	2	100	50	0	48
<b>Tr2x</b>	42	35	29	20.5	61	36	59	76	41	1.8	54	10	0	50	100	88	5	84
<b>Tr4x</b>	80	40	69	54.3	63	61	77	100	53	20.1	82	28	7	77	100	100	44	91
<b>Tx</b>	92	100	100	37.5	72	72	65	74	75	44.8	77	60	76	91	100	78	100	100
<b>T2x</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<b>T4x</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<b>Dx</b>	100	92	39.7	36.7	38.5	100	100	72.5	100	77	93	100	77.3	100	100	100	100	100
<b>D2x</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
<b>D4x</b>	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Ειδικότερα, ανάμεσα στους 18 πληθυσμούς του είδους τραχύ βλήτο που αξιολογήθηκαν για πιθανή επιλογή ανθεκτικότητας σε ζιζανιοκτόνα αναστολής της δράσης του ενζύμου οξικογαλακτική συνθάση (ALS), αποδείχθηκε ότι μόνο ο πληθυσμός B15 ήταν ευαίσθητος (100% καταπολέμηση) και στους δύο ALS-αναστολείς τόσο στη συνιστώμενη (X), όσο και στις υψηλότερες δόσεις εφαρμογής [διπλάσια (2X) και τετραπλάσια (4X) της συνιστώμενης] (Εικόνα 15) (Πίνακας 3). Προσέτι, ο πληθυσμός B15 αποδείχθηκε ευαίσθητος και στα δύο άλλα ζιζανιοκτόνα με διαφορετικό μηχανισμό δράσης που αξιολογήθηκαν, το βενζοϊκό παράγωγο dicamba και την τρικετόνη tembotrione και στις τρεις δόσεις (X, 2X, 4X) που εφαρμόστηκαν (Εικόνα 16) (Πίνακας 3).



**Εικ. 15.** Ανταπόκριση της έκθεσης του πληθυσμού B15 στη συνιστώμενη (x), διπλάσια (2x) και τετραπλάσια (4x) δόση των ζιζανιοκτόνων imazamox (I) και tribenuron (T).



**Εικ. 16.** Ανταπόκριση της έκθεσης του πληθυσμού B15 στη συνιστώμενη (x), διπλάσια (2x) και τετραπλάσια (4x) δόση των ζιζανιοκτόνων dicamba (D) και tembotrione (Te).

Η υμιδαζολινόνη imazamox απέτυχε να καταπολεμήσει αποτελεσματικά τους περισσότερους πληθυσμούς τραχέος βλήτου που αξιολογήθηκαν στην παρούσα μελέτη (Πίνακας 3). Ειδικότερα, η εφαρμογή της συνιστώμενης δόσης (X) του ζιζανιοκτόνου, συνετέλεσε σε επίπεδα καταπολέμησης μόλις 0-22.3%, ενώ τρεις πληθυσμοί (B3, B15 και B4) καταπολεμήθηκαν πολύ καλά έως άριστα (επίπεδα καταπολέμησης 100%, 100% και 90.7%, αντίστοιχα). Η εφαρμογή της διπλάσιας της συνιστώμενης (2X) δόσης του imazamox δεν βελτίωσε την καταπολέμηση των πληθυσμών τραχέος βλήτου που αξιολογήθηκαν καθώς 14 πληθυσμοί εμφάνισαν μείωση του χλωρού βάρους κατά 0-29.2%, ένας (B9) 42.1%, ενώ τρεις πληθυσμοί (B3, B4 και B15) καταπολεμήθηκαν άριστα (μείωση χλωρού βάρους κατά 100%). Παρομοίως, η εφαρμογή της τετραπλάσιας της συνιστώμενης (4X) δόσης του imazamox προκάλεσε μείωση του χλωρού βάρους 13 πληθυσμών του ζιζανίου κατά 3.2-43.2%, ενώ ο πληθυσμός B7 υπέστη μέτρια μείωση του χλωρού βάρους κατά 74.7%, ενώ οι πληθυσμοί B3, B4, B9 και B15 καταπολεμήθηκαν άριστα (100%).

Οι πληθυσμοί του ζιζανίου συλλέχθηκαν κυρίως από αγρούς ηλίανθου οι οποίοι καλλιεργήθηκαν με υβρίδια τα οποία διαθέτουν/χαρακτηρίζονται από ανεκτικότητα στις επεμβάσεις των ζιζανιοκτόνων της χημικής οικογένειας των ιμιδαζολινών (τεχνολογία Clearfield®), καθώς και από καλλιέργειες σόγιας (στις οποίες έχει έγκριση κυκλοφορίας το ζιζανιοκτόνο imazamox). Συνεπώς, οι συγκεκριμένοι πληθυσμοί εκτέθηκαν σε επαναλαμβανόμενες εφαρμογές του imazamox σε παραγωγικά συστήματα που χαρακτηρίζονται από μειωμένη εφαρμογή αμειψισποράς ή εναλλαγή ηλίανθου-σόγιας και δευτερευόντως καλαμποκιού. Οι συνεχόμενες επεμβάσεις του imazamox άσκησαν αναπόφευκτα ισχυρή πίεση επιλογής στους αρχικούς πληθυσμούς τραχέος βλήτου που αναπτύσσονταν στους καλλιεργούμενους αγρούς και προκάλεσαν την ‘ανάδυση’ των ανθεκτικών πληθυσμών του ζιζανίου, με το συγκεκριμένο ζιζανιοκτόνο να λειτουργεί ως ο κύριος παράγοντας επιλογής τους.

Οι περισσότεροι πληθυσμοί τραχέος βλήτου παρουσίασαν σταυρανθεκτικότητα και στη σουλφονουλουρία tribenuron methyl (Πίνακας 3). Ειδικότερα, η έκθεση των πληθυσμών στη συνιστώμενη δόση (X) του ζιζανιοκτόνου προκάλεσε μείωση του χλωρού βάρους 16 πληθυσμών κατά 0-48.2%, ενώ ο πληθυσμός B8 υπέστη μείωση του χλωρού βάρους των φυτών κατά 53.7% και μόνο ο πληθυσμός B15 καταπολεμήθηκε άριστα (μείωση του χλωρού βάρους των φυτών κατά 100%). Ομοίως, η εφαρμογή της διπλάσιας της συνιστώμενης δόσης (2X) του ζιζανιοκτόνου συνετέλεσε σε επίπεδα καταπολέμησης 0-50.5% σε 11 πληθυσμούς τραχέος βλήτου, ενώ εναντίον τεσσάρων πληθυσμών (B5, B7, B8, B11) καταγράφηκαν επίπεδα αποτελεσματικότητας 61.5%, 58.8%, 75.7% και 54%, αντίστοιχα. Δύο πληθυσμοί (B16 και B18) καταπολεμήθηκαν αποτελεσματικά (μείωση χλωρού βάρους κατά 87.7% και 83.8%, αντίστοιχα) και μόνο ο ευαίσθητος πληθυσμός B15 καταπολεμήθηκε άριστα (100% καταπολέμηση). Τέλος, η εφαρμογή της τετραπλάσιας δόσης (4X) της σουλφονουλουρίας tribenuron methyl συνετέλεσε σε επίπεδα καταπολέμησης 7.3-54.3% σε 7 πληθυσμούς και 60.7-82.5% σε άλλους 7 πληθυσμούς του ζιζανίου, ενώ πολύ καλή έως άριστη καταπολέμηση (91-100%) καταγράφηκε εναντίον των βιοτύπων B8, B15, B16 και B18.

Αρκετοί από τους ύποπτους πληθυσμούς του τραχέος βλήτου (PR2, PR6, PR10, PR11, PR12, PR13, PR14, PR17) παρουσίασαν σταυρανθεκτικότητα τόσο στην ιμιδαζολινόνη imazamox, όσο και στη σουλφονουλουρία tribenuron-methyl, γεγονός που αντανακλά το μοτίβο της εφαρμογής ζιζανιοκτόνων σε αυτά τα εντατικά συστήματα παραγωγής. Η σουλφονουλουρία

tribenuron χρησιμοποιείται συχνά σε καλλιέργειες ηλίανθου στις οποίες οι παραγωγοί επιλέγουν να καλλιεργήσουν υβρίδια τεχνολογίας Express Sun<sup>®</sup>, τα οποία διαθέτουν/παρουσιάζουν ανεκτικότητα σε ζιζανιοκτόνα της χημικής οικογένειας των σουλφονουλουριών. Συνήθως, το tribenuron-methyl χρησιμοποιείται σε ταυτόχρονη εφαρμογή με κάποιο αγρωστοδοκτόνο [είτε κάποιο ζιζανιοκτόνο της χημικής οικογένειας των αρυλοξυφαινοξυαλκανοϊκών (aryloxyphenoxypropionates) ή πιο συχνά κάποιο ζιζανιοκτόνο της χημικής οικογένειας των κυκλοεξανδινών (cyclohexanediones)], για διεύρυνση του φάσματος δράσης και αποτελεσματική αντιμετώπιση με ‘ένα πέρασμα’ τόσο πλατύφυλλων όσο και στενόφυλλων ζιζανίων στην καλλιέργεια του ηλίανθου. Συχνά, οι τεχνολογίες ηλίανθου Clearfield<sup>®</sup> και Express Sun<sup>®</sup> εναλλάσσονται σε παραγωγικά συστήματα στα οποία εφαρμόζεται συνεχής καλλιέργεια ηλίανθου ή σε αγρούς όπου ‘παρεμβάλλονται’ και άλλα καλλιεργούμενα είδη που διαδέχονται τον ηλίανθο στο σύστημα αμειψισποράς. Η εναλλαγή των δύο τεχνολογιών εφαρμόζεται για να επιτευχθεί αποτελεσματική καταπολέμηση ορισμένων ειδών ζιζανίων όπως η λουβουδιά (*Chenopodium album* L.) ή την καταστολή της ανάπτυξης ορισμένων πολυετών ειδών όπως το πολυετές κίρσιο (*Cirsium arvense* L.), εναντίον των οποίων το imazamox δεν έχει ιδιαίτερα υψηλή αποτελεσματικότητα.

Η υψηλής έντασης σταυρανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα imazamox και tribenuron methyl που καταγράφηκε σε πολλούς πληθυσμούς (Εικόνες 17 και 19) τραχέος βλήτου που μελετήθηκαν στην παρούσα μελέτη, υποδηλώνουν πιθανή επιλογή συγκεκριμένων σημειακών μεταλλάξεων στο *ALS* γονίδιο, συνέπεια της πίεσης επιλογής που δέχθηκαν από τις συνεχείς, επαναλαμβανόμενες επεμβάσεις τους. Σε αυτές συγκαταλέγονται η αντικατάσταση του αμινοξέος τρυπτοφάνη (Trp) από το αμινοξύ λευκίνη (Leu) στη θέση 574 (Nandula κ.ά., 2020), καθώς και η αντικατάσταση του ασπαρτικού (Asp) από το γλουταμικό (Glu) στη θέση 376 (Asp376-Glu) (Huang κ.ά., 2016) του *ALS* γονιδίου που καθιστούν τα φυτά των επιλεγέντων πληθυσμών ανθεκτικά στα ζιζανιοκτόνα όλων ανεξαιρέτως των χημικών οικογενειών των ALS-αναστολέων.

Οι πληθυσμοί τραχέος βλήτου που αξιολογήθηκαν στην παρούσα μελέτη δεν παρουσίασαν πολλαπλή ανθεκτικότητα και σε άλλους μηχανισμούς δράσης, πέραν της σταυρανθεκτικότητας που ανέπτυξαν στους ALS-αναστολείς. Ειδικότερα, η τρικετόνη tembotrione αποδείχθηκε ιδιαίτερα αποτελεσματική (επίπεδα καταπολέμησης 91-100%) ακόμα και με την εφαρμογή της συνιστώμενης δόσης (X) εναντίον 7 πληθυσμών (Εικόνες 18 και 20), ενώ εναντίον άλλων 9

πληθυσμών προκάλεσε μείωση του χλωρού βάρους τους κατά 59.8-78.5%. Ιδιαίτερα χαμηλά επίπεδα καταπολέμησης καταγράφηκαν εναντίον δύο πληθυσμών (B4 και B10) του ζιζανίου, καθώς η μείωση του χλωρού βάρους των φυτών δεν υπερέβει το 37.5% και 44.8%, αντίστοιχα, σε σύγκριση με τους αφέκαστους μάρτυρες του κάθε πληθυσμού. Βέβαια, η εφαρμογή της διπλάσιας (2X) και τετραπλάσιας (4X) δόσης του συνετέλεσε στην επίτευξη άριστης καταπολέμησης (100%), όλων των πληθυσμών του ζιζανίου. Τα παραπάνω δεδομένα υποδηλώνουν ότι η έκθεση κάποιων πληθυσμών σε επαναλαμβανόμενες επεμβάσεις του tembotrione σε καλλιέργειες αραβοσίτου που ακολουθούν τον ηλιάνθο ή τη σόγια στο σύστημα αμειψισποράς που έχει υιοθετηθεί στα συγκεκριμένα παραγωγικά συστήματα συνετέλεσαν στην επιλογή ορισμένων λιγότερο ευαίσθητων (διαφοροποίηση ευαισθησίας), αλλά όχι ανθεκτικών πληθυσμών τραχέος βλήτου, καθώς οι πολλαπλάσιες της συνιστώμενης δόσης του ζιζανιοκτόνου καταπολεμούν άριστα τους πληθυσμούς του ζιζανίου. Βέβαια, οι πληθυσμοί αυτοί δεν καταπολεμούνται αποτελεσματικά με τη συνιστώμενη δόση του ζιζανιοκτόνου και μπορεί να υπάρξουν αποτυχίες κατά τις επεμβάσεις που πραγματοποιούν οι παραγωγοί στον αγρό.

Παρομοίως, το βενζοϊκό παράγωγο dicamba με δράση αυξίνης καταπολέμησε με την εφαρμογή της συνιστώμενης δόσης (X), πολύ καλά έως άριστα (92-100% μείωση του χλωρού βάρους) 12 από τους 18 πληθυσμούς τραχέος βλήτου (Εικόνες 18 και 20). Επίσης, καταπολέμησε ικανοποιητικά τρεις πληθυσμούς (B8, B10 και B13) επιτυγχάνοντας επίπεδα καταπολέμησης 72.5%, 77% και 77.3%, αντίστοιχα. Όμως, το dicamba όταν εφαρμόστηκε στη μέγιστη συνιστώμενη δόση (X) απέτυχε να καταπολεμήσει τρεις πληθυσμούς τραχέος βλήτου, τους B3, B4 και B5, καθώς προκάλεσε μείωση του χλωρού βάρους των φυτών τους κατά μόλις 39.7%, 36.7% και 38.5%, αντίστοιχα. Ομοίως με το tembotrione, η εφαρμογή των πολλαπλάσιων δόσεων [διπλάσια (2X) και τετραπλάσια (4X)] του dicamba εξασφάλισε άριστη καταπολέμηση (100%) όλων των πληθυσμών τραχέος βλήτου που αξιολογήθηκαν στην παρούσα μελέτη. Συνεπώς, τόσο το tembotrione όσο και το dicamba μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως αποτελεσματικές εναλλακτικές λύσεις για τη διαχείριση των περισσότερων πληθυσμών τραχέος βλήτου που ανέπτυξαν ανθεκτικότητα σε ζιζανιοκτόνα αναστολής της δράσης του ενζύμου ALS.

Η υψηλή αρχική αποτελεσματικότητα του ορμονικού ζιζανιοκτόνου dicamba εναντίον πολλών πλατύφυλλων ειδών (συμπεριλαμβανομένων και ειδών του γένους *Amaranthus*) συνετέλεσε στη δημιουργία γενετικά τροποποιημένων φυτών σόγιας και βαμβακιού με

ανθεκτικότητα σε μεταφωτρωτικές και προφωτρωτικές επεμβάσεις του ζιζανιοκτόνου (Montgomery κ.ά. 2017; Cahoon κ.ά., 2015). Αξίζει να αναφερθεί, ότι σε άλλες χώρες και αγροοικοσυστήματα έχουν ήδη επιλεγεί πληθυσμοί ειδών βλήτων (*Amaranthus tuberculatus*, *A. palmeri*) που εμφανίζουν ανθεκτικότητα εκτός του glyphosate, glyphosinate, αναστολέων της δράσης του πρωτοπορφυρογόνου και σε ορμονικά ζιζανιοκτόνα με δράση ενδογενούς αυξίνης όπως το dicamba (Bobadilla κ.ά., 2021) 2,4-D (Bernards κ.ά., 2012; Crespo κ.ά., 2017).

Στη χώρα μας όπου δεν έχουν αναφερθεί ακόμα σοβαρές αποτυχίες με την μεταφωτρωτική εφαρμογή τόσο του dicamba όσο και του tembotrione εναντίον πληθυσμών τραχέος ή άλλων ειδών βλήτων σε καλλιέργειες καλαμποκιού, τα ζιζανιοκτόνα αυτά μπορούν να 'παρεμβάλλονται' μεταξύ των επεμβάσεων ή να συνδυάζονται με ζιζανιοκτόνα-αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS. Αυτή η προσέγγιση συντελεί στην επιβραδύνση της ταχύτητας εκδήλωσης ή ακόμα και σε αποτροπή της ανάδυσης ανθεκτικότητας στους πληθυσμούς τραχέος και νέων εισβολικών ειδών βλήτου, αλλά και άλλων σημαντικών πλατύφυλλων ειδών ζιζανίων. Η στρατηγική αυτή εναλλαγής δραστικών ουσιών με διαφορετικό μηχανισμό δράσης είναι υψηλότερης αποτελεσματικότητας και μεγαλύτερης ασφάλειας στην περίπτωση ενός αυτογονιμοποιούμενου είδους όπως το τραχύ βλήτο (*Amaranthus retroflexus*). Αντίθετα, σε συγγενικά είδη βλήτων όπως τα *Amaranthus palmeri* και *A. tuberculatus* που είναι σταυρογονιμοποιούμενα, η διασπορά γονιδίων ανθεκτικότητας μέσω της μεταφοράς γύρης (gene flow) μεταξύ φυτών διαφορετικού φύλου συντελεί σε συσσώρευση ανθεκτικών αλληλομόρφων και κατ' επέκταση μηχανισμών ανθεκτικότητας, καθιστώντας μεμονωμένα φυτά ή ολόκληρους πληθυσμούς πολλαπλώς ανθεκτικούς σε διαφορετικούς μηχανισμούς δράσης (Bobadilla κ.ά., 2021; Li κ.ά., 2022; Wang κ.ά., 2017), αποστερώντας τους παραγωγούς από πολλά διαθέσιμα ζιζανιοκτόνα και απειλώντας τη βιώσιμη διαχείριση των συγκεκριμένων πληθυσμών και την παραγωγικότητα πολλών παραγωγικών συστημάτων.



**Εικόνα 17.** Ανταπόκριση της έκθεσης του πληθυσμού B10 στη συνιστώμενη (x), διπλάσια (2x) και τετραπλάσια (4x) δόση των ζιζανιοκτόνων imazamox (I) και tribenuron (T).





**Εικόνα 18.** Ανταπόκριση της έκθεσης του πληθυσμού Β10 στη συνιστώμενη (x), διπλάσια (2x) και τετραπλάσια (4x) δόση των ζιζανιοκτόνων dicamba (D) και tembotrione (Te).



**Εικ. 19.** Ανταπόκριση της έκθεσης του πληθυσμού B13 στη συνιστώμενη (x), διπλάσια (2x) και τετραπλάσια (4x) δόση των ζιζανιοκτόνων imazamox (I) και tribenuron (T).



**Εικ. 20.** Ανταπόκριση της έκθεσης του πληθυσμού B13 στη συνιστώμενη (x), διπλάσια (2x) και τετραπλάσια (4x) δόση των ζιζανιοκτόνων dicamba (D) και tembotrione (Te).

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο πληθυσμός B3 καταπολεμήθηκε άριστα με την εφαρμογή όλων των δόσεων (X, 2X, 4X) της ιμιδαζολινόνης imazamox, ενώ παρουσίασε πολύ χαμηλά επίπεδα καταπολέμησης όταν εκτέθηκε στις αντίστοιχες δόσεις της σουλφονυλουρίας tribenuron methyl (0%, 29%, 69%, αντίστοιχα) (Εικόνα 21). Τα δεδομένα αυτά υποδηλώνουν ότι η ανθεκτικότητα οφείλεται πιθανώς σε επιλογή σημειακής μετάλλαξης [ενδεχομένως αντικατάστασης του αμινοξέος προλίνη (Pro) στη θέση 197 (Pro197) στο *ALS* γονίδιο] που κωδικοποιεί για το τροποποιημένο ένζυμο ALS, η οποία καθιστά τα φυτά του συγκεκριμένου πληθυσμού ανθεκτικά αποκλειστικά στα ζιζανιοκτόνα της χημικής οικογένειας των σουλφονυλουριών, ενώ ταυτόχρονα παραμένουν ευαίσθητα στα ζιζανιοκτόνα της χημικής οικογένειας των ιμιδαζολινών (Beckie και Tardif, 2012).



**Εικ. 21.** Ανταπόκριση της έκθεσης του πληθυσμού B3 στη συνιστώμενη (x), διπλάσια (2x) και τετραπλάσια (4x) δόση των ζιζανιοκτόνων imazamox (I) και tribenuron (T).

Ο πληθυσμός B3 καταπολεμήθηκε άριστα με την εφαρμογή της τρικετόνης tembotrione (100%) τόσο στη συνιστώμενη (X) όσο και τις πολλαπλάσιες (2X, 4X) αυτής δόσεις. Όμως, η εφαρμογή του βενζοϊκού παράγωγου dicamba στη δόση X απέτυχε να καταπολεμήσει τον συγκεκριμένο πληθυσμό, καθώς συνετέλεσε σε μείωση του χλωρού βάρους κατά μόλις 39.7% σε σύγκριση με τα φυτά του αφέκαστου μάρτυρα (Πίνακας 3, Εικόνα 22).



**Εικ. 22.** Ανταπόκριση της έκθεσης του πληθυσμού B3 στη συνιστώμενη (x), διπλάσια (2x) και τετραπλάσια (4x) δόση των ζιζανιοκτόνων dicamba (D) και tembotrione (Te).

Ο πληθυσμός αυτός προήλθε από πολυετή καλλιέργεια καλαμποκιού στην οποία συχνά χρησιμοποιείται ετοιμόχρηστο σκεύασμα που περιέχει τρεις δραστικές ουσίες (nicosulfuron, rimsulfuron και dicamba) για την αποτελεσματική αντιμετώπιση με 'ένα πέρασμα' τόσο του πολυετούς αγρωστώδους είδους βέλιουρας (*Sorghum halepense*), όσο και ενός ευρέος φάσματος σημαντικών αγρωστωδών (*Echinochloa* spp., *Setaria* spp., *Digitaria sanguinalis*) και πλατύφυλλων (*Amaranthus* spp., *Chenopodium album*, *Solanum nigrum*, *Xanthium strumarium*) ζιζανίων. Γενικότερα, το dicamba χρησιμοποιείται ευρέως για την καταπολέμηση των πλατύφυλλων ζιζανίων στους αγρούς καλλιέργειας του καλαμποκιού στη χώρα μας. Συνεπώς, οι συχνές επεμβάσεις με το συγκεκριμένο ζιζανιοκτόνο επέλεξαν φυτά με μειωμένη ευαισθησία (ανεκτικότητα, tolerance) που καθιστούν μη αποτελεσματική τη συνιστώμενη δόση εφαρμογής του, τα οποία όμως ελέγχονται μετά από έκθεσή τους σε υψηλότερες δόσεις (2X, 4X) εφαρμογής.

Στα πλαίσια της χημικής καταπολέμησης είναι αναγκαία η εφαρμογή ζιζανιοκτόνων που διαθέτουν διαφορετικό μηχανισμό δράσης από τα ευρείας χρήσης μεταφυτρωτικά ζιζανιοκτόνα, ώστε είτε να επιβραδυνθεί η επιλογή πληθυσμών βλήτων με ανθεκτικότητα στα ζιζανιοκτόνα ανατολής της δράσης του ενζύμου ALS ή να καταστεί δυνατή η αποτελεσματική διαχείριση ήδη ανθεκτικών πληθυσμών/βιοτύπων. Ιδιαίτερη σημασία αποκτούν πλέον τα προφυτρωτικά ζιζανιοκτόνα που είναι εγκεκριμένα στην καλλιέργεια του καλαμποκιού κυρίως, αλλά και σε καλλιέργειες βιομηχανικών φυτών (ηλιάνθου, βάμβακος), καθώς και σε κηπευτικές καλλιέργειες. Ειδικότερα, μπορούν να χρησιμοποιηθούν εναλλακτικά τα ζιζανιοκτόνα που ανήκουν στις χημικές οικογένειες:

(1) των γλωρακεταμίδων (π.χ. S-metolachlor, dimethenamid-P, pethoxamid, εγκεκριμένων στην καλλιέργεια του καλαμποκιού, καθώς και βάμβακος, ζαχαροτεύλων το πρώτο), που δρουν αναστέλλοντας τη βιοσύνθεση πολύ μεγάλης αλυσίδας λιπαρών οξέων [VLFA]

(2) των δινιτροανιλινών (π.χ. pendimethalin, εγκεκριμένου στην καλλιέργεια καλαμποκιού, βάμβακος και πολλών κηπευτικών ειδών), που δρουν αναστέλλοντας τη μίτωση στο στάδιο της προμετάφασης κατά τη διαίρεση των φυτικών κυττάρων

(3) των ισοξαζολών (isoxaflutole), που έχουν έγκριση για προφυτρωτική και νωρίς μεταφυτρωτική εφαρμογή στην καλλιέργεια του καλαμποκιού και δρουν αναστέλλοντας τη βιοσύνθεση καροτενοειδών, λόγω ανστολής της δράσης του ενζύμου διοξυγονάση του υδροξυφαινυλοπυροσταφυλικού οξέος [4-HPPD]. Τα προφυτρωτικά ζιζανιοκτόνα χαρακτηρίζονται από μειωμένο κίνδυνο ανάπτυξης ανθεκτικότητας, ενώ μειώνουν και την εξάρτηση στα μεταφυτρωτικά (υψηλού ρίσκου για επιλογή ανθεκτικότητας) ζιζανιοκτόνα. Βέβαια, σε εδάφη με εξαιρετικά υψηλά επίπεδα οργανικής ουσίας (όπως αυτά που αναπτύσσονταν οι πληθυσμοί τραχέος βλήτου της παρούσας μελέτης) δεν είναι εφικτή η χρησιμοποίηση προφυτρωτικών ζιζανιοκτόνων, λόγω ισχυρής δέσμευσης των εφαρμοζόμενων δραστικών ουσιών στα οργανικά κολλοειδή.

Η εναλλαγή ζιζανιοκτόνων με μειωμένο κίνδυνο επιλογής ανθεκτικών πληθυσμών και η εναλλαγή όλων των διαθέσιμων μηχανισμών δράσης εγκεκριμένων σε κάθε καλλιέργεια θα πρέπει να συνδυάζεται με καλλιεργητικά (τήρηση/υιοθέτηση αμειψισποράς, χρησιμοποίηση ανταγωνιστικών ή αλληλοπαθητικών ειδών/ποικιλιών που αναστέλλουν την ανάπτυξη ή ανταγωνίζονται ικανοποιητικά τα ζιζάνια, αυξημένη ποσότητα σπόρου για την εγκατάσταση

πυκνότερης και ανταγωνιστικότερης καλλιέργειας) και άλλα μέτρα στα πλαίσια της ολοκληρωμένης διαχείρισης (Integrated Weed Management, IWM) των ζιζανίων (Ελευθεροχωρινός, 2020). Με την υιοθέτηση στρατηγικών ολοκληρωμένης διαχείρισης ως ανταπόκριση στην αυξημένη συχνότητα και ένταση της παρουσίας ανθεκτικών στα ζιζανιοκτόνα πληθυσμών ειδών του γένους *Amaranthus* εκτιμάται ότι μπορεί να μειωθεί καθοριστικά ο κίνδυνος επιλογής νέων ανθεκτικών πληθυσμών τραχέος βλήτου και κυρίως να αποφευχθεί η επιλογή πληθυσμών του ζιζανίου με πολλαπλή ανθεκτικότητα σε ζιζανιοκτόνα.

Επί του παρόντος, συνήθως πραγματοποιούνται επαναλαμβανόμενες επεμβάσεις ζιζανιοκτόνων που χαρακτηρίζονται από υψηλό κίνδυνο επιλογής ανθεκτικότητας που αυξανόμενα καταγράφονται. Η αποκλειστική εξάρτηση επιβάλλει δραστική μείωση της χρήσης των ζιζανιοκτόνων καθώς θα συντελέσει αναπόφευκτα σε αυξημένη επιλογή ανθεκτικών πληθυσμών.

## ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Βασιλάκογλου, Ι. και Κ. Δήμας. 2017. Ζιζάνια. Σύγχρονος οδηγός αναγνώρισης και αντιμετώπισης. Εκδόσεις Σύγχρονη Παιδεία, Θεσσαλονίκη, σελ. 294-297.

Ελευθεροχωρινός Η.Γ. 2008. Ζιζανιολογία: Ζιζάνια, Ζιζανιοκτόνα, Περιβάλλον, Αρχές και Μέθοδοι Διαχείρισης (3η έκδοση), Εκδόσεις Αγροτύπος, Αθήνα, σελ. 408.

Ελευθεροχωρινός Η.Γ. 2020. Ζιζανιολογία Βιολογία και Διαχείριση Ζιζανίων Ζιζανιοκτόνα, Φυτά και Περιβάλλον (5<sup>η</sup> έκδοση), Εκδόσεις Αγροτύπος, Αθήνα, σελ. 497.

Ελευθεροχωρινός Η.Γ., Κ.Ν. Γιαννοπολίτης. 2009. Ζιζάνια: Οδηγός αναγνώρισης, Εκδόσεις Αγροτύπος Α.Ε., Αθήνα, σελ. 38-39, 144-145.

Παπαπαναγιώτου, Α., Γ. Μενεξές, Η. Ελευθεροχωρινός. 2017a. Πληθυσμός βέλιουρα με διασταυρωτή ανθεκτικότητα σε ζιζανιοκτόνα-αναστολείς του ενζύμου ACCase. 19<sup>ο</sup> Επιστημονικό Συνέδριο Ελληνικής Ζιζανιολογικής Εταιρίας, Νέα Ορεσטיάδα, 29-31 Μαρτίου 2017, Πρακτικά, σελ. 92-94.

Παπαπαναγιώτου, Α., Γ. Μενεξές, Η. Ελευθεροχωρινός. 2017b. Πληθυσμοί αγριοβρώμης με διασταυρωτή ανθεκτικότητα σε ζιζανιοκτόνα-αναστολείς του ενζύμου ALS και μελέτη της προσαρμοστικότητάς τους. 19<sup>ο</sup> Επιστημονικό Συνέδριο Ελληνικής Ζιζανιολογικής Εταιρίας, Νέα Ορεσטיάδα, 29-31 Μαρτίου 2017. Πρακτικά, σελ. 26-28.

Παπαπαναγιώτου, Α., Γ. Μενεξές, Η. Ελευθεροχωρινός. 2017c. Πληθυσμοί μίλιου και ανεμόχορτου ανθεκτικοί σε ζιζανιοκτόνα-αναστολείς των ενζύμων ACCase και ALS. 19<sup>ο</sup>



Επιστημονικό Συνέδριο Ελληνικής Ζιζανιολογικής Εταιρίας, Νέα Ορεστειάδα, 29-31 Μαρτίου 2017. Πρακτικά, σελ. 25-26.

Παπαπαναγιώτου, Α., Γ. Μενεξές, Η. Ελευθεροχωρινός. 2017d. Πληθυσμοί μικρόκαρπης κολλητισίδας και μπιφόρας ανθεκτικοί σε ζιζανιοκτόνα-αναστολείς του ενζύμου ALS. 19<sup>ο</sup> Επιστημονικό Συνέδριο Ελληνικής Ζιζανιολογικής Εταιρίας, Νέα Ορεστειάδα, 29-31 Μαρτίου 2017. Πρακτικά, σελ. 28-30.

Παπαπαναγιώτου, Α., Ι. Βασιλάκογλου, Κ. Δήμας, Η. Ελευθεροχωρινός. 2017e. Διερεύνηση της ανάπτυξης διασταυρούμενης ανθεκτικότητας του *Sinapis arvensis* και της ευαισθησίας του *Camelina microcarpa* σε ζιζανιοκτόνα-αναστολείς της δράσης του ενζύμου ALS. 19<sup>ο</sup> Επιστημονικό Συνέδριο Ελληνικής Ζιζανιολογικής Εταιρίας, Νέα Ορεστειάδα, 29-31 Μαρτίου 2017. Πρακτικά, σελ. 17-18.

Χατζηλαζαρίδου, Σ.Λ. 2013. Διερεύνηση ανθεκτικότητας 29 πληθυσμών διαφόρων ειδών μουχρίτσας (*Echinochloa* spp.) σε ζιζανιοκτόνα. Μεταπτυχιακή διατριβή, ΑΠΘ, Θεσσαλονίκη.

## ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Assad, R., Reshi, Z.A., Jan, S., Rashid, I. 2017. Biology of Amaranths. Bot. Rev. <https://doi.org/10.1007/s12229-017-9194-1>.

Athanassova, D.P. 1995. Allelopathic effect of *Amaranthus retroflexus* L. on weeds and crops. In Proceedings of the Seizième Conférence du COLUMA, Journées Internationales sur la Lute Contre les Mauvaises Herbes, Sixteenth COLUMA Conference, International Days on Weed Control, Reims, France, 1996; Association Nationale Pour la Protection des Plantes (ANPP): Paris, France, 1996; vol. 1, pp. 437-442.

Beckie, H.J., F.J. Tardif. 2012. Herbicide cross resistance in weeds. Crop Prot. 35: 15-28.

Bernards, M.L., R.J. Crespo, G.R. Kruger, R.E. Gaussoin, P.J. Tranel. 2012. A waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*) population resistant to 2,4-D. Weed Sci. 60: 379-384.

Bobadilla, L.K., D.A. Giacomini, A.G. Hager, P.J. Tranel. 2021. Characterization and inheritance of dicamba resistance in a multiple-resistant waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*) population from Illinois. Weed Sci. 70: 4-13.

Cahoon, C.W., A.C. York, D.L. Jordan, W.J. Everman, R.W. Seagroves, A.S. Culpepper, P.M. Eure. 2015. Palmer amaranth (*Amaranthus palmeri*) management in dicamba-resistant cotton. Weed Technol. 29: 758-770.

Cao, Y., S. Wei, H. Huang, W. Li, C. Zhang, Z. Huang. 2021. Target-site mutation and enhanced metabolism confer resistance to thifensulfuron-methyl in a multiple-resistant redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) population. Weed Sci. 69: 161-166.

Chen, J., Z. Huang, C. Zhang, H. Huang, S. Wei, J. Chen, X. Wu. 2015. Molecular basis of resistance to imazethapyr in redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.) populations from China. *Pestic. Biochem. Physiol.* 124: 43-47.

Christopher, J.T., S.B. Powles, J.A.M. Holtum. 1992. Resistance to acetolactate synthase-inhibiting herbicides in annual ryegrass (*Lolium rigidum*) involves at least two mechanisms. *Plant Physiol.* 100: 1909-1913.

Costea, M., S.E. Weaver, F.J. Tardif. 2004. The biology of Canadian weeds. 130. *Amaranthus retroflexus* L., *A. powellii* S. Watson and *A. hybridus* L. *Can. J. Plant Sci.* 84: 631-668.

Crespo, R.J., A.B. Wingeyer, G.R. Kruger, C.W. Riggins, P.J. Tranel, M.L. Bernards. 2017. Multiple-herbicide resistance in a 2,4-D-resistant waterhemp (*Amaranthus tuberculatus*) population from Nebraska. *Weed Sci.* 65: 743-754.

Damalas, C.A., A.S. Lithourgidis, I.G. Eleftherohorinos. 2012. *Echinochloa* species control in maize (*Zea mays* L.) with sulfonylurea herbicides applied alone and in mixtures with broadleaf herbicides. *Crop Prot.* 34: 70-75.

Diebold, S.R., K.E. McNaughton, E.A. Lee, F.J. Tardif. 2003. Multiple resistance to imazethapyr and atrazine in Powell amaranth (*Amaranthus powellii*). *Weed Sci.* 51: 312-318.

Dieleman, D.A., D.A. Mortensen, D.D. Buhler, R.B. Ferguson. 2000. Identifying associations among site properties and weed species abundance. II. Hypothesis generation. *Weed Sci.* 48: 576-587.

Dorling, K. 2008. RHS AZ Encyclopedia of garden plants. United Kingdom, 1136.

Eleftherohorinos, I.G. 1987. Phytotoxicity and persistence of chlorsulfuron as affected by activated charcoal. Weed Res. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1987.tb011595.x>

Eleftherohorinos, I.G., I.B. Vasilakoglou, K.V. Dhima. 2000. Metribuzin resistance in *Amaranthus retroflexus* and *Chenopodium album* in Greece. Weed Sci. 48: 69-74.

Ferguson, G.M., A.S. Hamill, F.J. Tardif. 2001. ALS inhibitor resistance in populations of Powell amaranth and redroot pigweed. Weed Sci. 49: 448-453.

Foes, M.T., L. Liu, P.J. Tranel, L.M. Wax, E.W. Stoller. 1998. A biotype of common waterhemp (*Amaranthus rudis*) resistant to triazine and ALS herbicides. Weed Sci. 46: 514-520.

Francischini, A., J. Constantin, R.S. Oliveira Jr., H.K. Takano, R.R. Mendes. 2019. Multiple-and cross-resistance of *Amaranthus retroflexus* to acetolactate synthase (ALS) and photosystem II (PSII) inhibiting herbicides in preemergence. Planta Daninha v37:e019179353.

Francischini, A.C., J. Constantin, R.S. Oliveira Jr., G. Santos, L.H.M. Franchini, D.F. Biffe. 2014. Resistance of *Amaranthus retroflexus* to acetolactate synthase inhibitor herbicides in Brazil. Planta Daninha 32: 437-446. 2014;3292):437-446.

Heap, I. 2022. International survey of herbicide resistant weeds. Available at web site <http://www.weedresearch.com/in.asp>

Hilton, H.W. 1957. Herbicide tolerant strain of weeds. Hawain Sugar Planters Association Annual reports. pp. 69.

Holm, L., J. Doll, E. holm, J. Pancho, J. Herberger. 1997. World weeds: natural histories and distribution. John Wiley & Sons Inc., Toronto, ON. pp. 51-69.

Huang, Z., J. Chen, C. Zhang, H. Huang, S. Wei, X. Zhou, J. Chen, X. Wang. 2016. Target-site basis for resistance to imazethapyr in redroot amaranth (*Amaranthus retroflexus* L.). Pestic. Biochem. Physiol. 128: 10-15.

Kaloumenos, N.S., V.G. Veletza, A.N. Papantoniou, S.G. Kadis. 2005. Influence of pyriithiobac application rate and timing on weed control and cotton yield in Greece. Weed Technol 19: 207-216.

Kaloumenos, N.S., V.C. Tsioni, E.G. Daliani, S.E. Papanastasiou, A.G. Vassileiou, P.N. Laoutidou and I.G. Eleftherohorinos. 2012. Multiple Pro-197 substitutions in the acetolactate synthase of rigid ryegrass (*Lolium rigidum*) and their impact on chlorsulfuron activity and plant growth. Crop Prot. 38: 35-43.

Kaloumenos, N.S., S.L. Chatzizalaridou, P.V. Mylona, A.N. Polydoros, I.G. Eleftherohorinos. 2013a. Target-site mutation associated with cross-resistance to ALS-inhibiting herbicides in late watergrass (*Echinochloa oryzicola* Vasing). Pest Manag. Sci. 69: 865-873.

Kaloumenos, N.S., N. Capote, A. Aguado, I.G. Eleftherohorinos. 2013b. Red rice (*Oryza sativa*) cross-resistance to imidazolinone herbicides used in resistant rice cultivars grown in northern Greece. *Pest. Biochem. Physiol.* 105: 177-183.

Li, W., Y. Cao, Z. Liu, S. Wei, H. Huan, Y. Lan, Y. Sun, Z. Huang. 2022. Investigation of resistance mechanisms to bentazone in multiple resistant *Amaranthus retroflexus* populations. *Pestic. Biochem. Physiol.* 186:105164 doi: 10.1016/j.pestbp.2022.105164.

Ma, X., H. Wu, W. Jiang, Y. Ma, Y. Ma. 2015. Interference between redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.) and cotton (*Gossypium hirsutum* L.): growth analysis. *PLoS ONE* 10(6), e0130475. doi: 10.1371/journal.pone.0130475.

McNaughton, K.E., J. Letarte, E. Lee, F.J. Tardif. 2005. Mutations in ALS confer herbicide resistance in redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) and powell amaranth (*Amaranthus palmeri*). *Weed Sci.* 53: 17-22.

Mirshekari, B., A. Javanshir, H.K. Arbat. 2010. Interference of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) in green bean (*Phaseolus vulgaris*). *Weed Biol. Manag.* 10: 120-125.

Moghadam, S.H., M.T. Alebrahim, A. Tobeh, M. Mohebodini, D. Werck-Reichhart, D. MacGregor, T.M. Tseng. 2021. Redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.) and lamb's quarters (*Chenopodium album* L.) populations exhibit a high degree of morphological and biochemical diversity. *Front. Plant Sci.* 12, p. 593037 <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.593037>.

Montgomery, G.B., A.T. McClure, R.M. Hayes, F.R. Walker, S.A. Senseman, L.E. Steckel. 2017. Dicamba-tolerant soybean combined cover crop to control Palmer amaranth. *Weed Technol.* 32: 109-115.

Nandula, V.K., D.A. Giacomini, J.D. Ray. 2020. Resistance to acetolactate synthase inhibitors is due to a W 574 to L amino acid substitution in the *ALS* gene of redroot pigweed and tall waterhemp. *PLoS One* 2020; 15(6): e0235394.

Ntoanidou, S., N. Kaloumenos, G. Diamantidis, P. Madesis, I. Eleftherohorinos. 2016. Molecular basis of *Cyperus difformis* cross-resistance to ALS-inhibiting herbicides. *Pest. Bioch. Physiol.* 127: 38-45.

Ntoanidou, S., P. Madesis, G. Diamantidis, I. Eleftherohorinos. 2017. Trp 574 substitution in the acetolactate synthase of *Sinapis arvensis* confers cross-resistance to tribenuron and imazamox. *Pest. Bioch. Physiol.* 142: 9-14.

Ntoanidou, S., P. Madesis, I. Eleftherohorinos. 2019. Resistance of *Rapistrum rugosum* to tribenuron and imazamox due to Trp574 or Pro197 substitution in the acetolactate synthase. *Pest Manag. Sci.* 154: 1-6.

O'Brien, G.K., M.L. Price. 1983. Amaranth: Grain and vegetable type. Educational Concerns for Hunger Organization (ECHO) Technical Note. ECHO, North Fort Myers, FL.

Papapanagiotou, A.P., N.S. Kaloumenos, I.G. Eleftherohorinos. 2012. Sterile oat (*Avena sterilis* L.) cross-resistance profile to ACCase-inhibiting herbicides in Greece. *Crop Prot.* 35: 118-126.

Pratt, D.B., M.D.K. Owen, L.G. Clark, A. Gardner. 1999. Identification of the weedy pigweeds and waterhemp of Iowa. Iowa State University, University Extension.

Ryan, G.F. 1970. Resistance of common groundsel to simazine and atrazine. *Weed Sci.* 18:614-616.

Scarabel, L., N. Carraro, M. Sattin, S. Varotto. 2004. Molecular basis and genetic characterization of evolved resistance to ALS-inhibitors in *Papaver rhoeas*. *Plant Sci.* 3: 703-709.

Scarabel, L., S. Varotto, M. Sattin. 2007. A European biotype of *Amaranthus retroflexus* cross-resistant to ALS inhibitors and response to alternative herbicides. *Weed Res.* 47: 527-533.

Snedecor, G.W., W.G. Cochran. 1989. *Statistical Methods*, 8<sup>th</sup> ed. Iowa State University Press, Iowa, USA.

Tranel, P.J., T.R. Wright. 2002. Resistance of weeds to ALS-inhibiting herbicides: what have we learned? *Weed Sci.* 50: 700-712.

Tranel, P.J. 2020. Herbicide resistance in *Amaranthus tuberculatus*. *Pest Manag. Sci.* 77: 43-54.

Travlos, I.S. 2012. Evaluation of herbicide-resistance status on populations of littleseed canarygrass (*Phalaris minor* Retz.) from Southern Greece and suggestions for their effective control. *J. Plant Prot. Res.* 52: 308-313.

Travlos, I.S., D. Chachalis. 2013. Assessment of glyphosate resistant horseweed (*Conyza canadensis* L. Cronq.) and fleabane (*Conyza albida* Willd. Ex Spreng) populations from perennial crops in Greece. *Int. J. Plant Prod.* 7: 665-676.



Vila-Aiub, M.M., P. Neve, S.B. Powles. 2009. Fitness costs associated with evolved herbicide resistance alleles in plants. *New Phytologist* 184: 751-767.

Wang, H., W. Guo, L. Zhang, K. Zhao, L. Ge, X. Lv, W. Liu, J. Wang. 2017. Multiple resistance to thifensulfuron-methyl and fomesafen in redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*) from China. *Chilean J. Agric. Res.* 77 <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392017000400311>.

Wang, H., H. Wang, N. Zhao, B. Zhu, P. Sun, W. Liu, J. Wang. 2019. Multiple resistance to PPO and ALS inhibitors in redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus*). *Weed Sci.* 68(1): 19-26.

Weaver, S.E., E.L. McWillimas. 1980. The biology of Canadian weeds. 44. *Amaranthus retroflexus* L., *A. powellii* S. Wats. and *A. hybridus* L. *Can. J. Plant Sci.* 60: 1215-1234.

Weber, J.B., G.G. Winkerson, H.M. Linker, J.W. Wilcut, R.B. Leidy, S.S. Senseman, W.W. Witt, M. Barret, W.K. Vencill, D.R. Shaw, T.C. Mueller, D.K. Miller, B.J. Brecke, R.E. Talbert, T.F. Peeper. 2000. A proposal to standardize soil/solution herbicide distribution coefficients. *Weed Sci.* 48: 75-88.