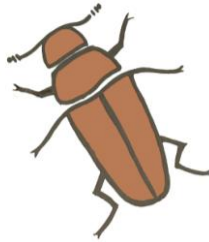




**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΠΟΔΟΜΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΖΩΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΝΤΟΜΟΛΟΓΙΑΣ**

Διδακτορική Διατριβή

Μελέτη της βιολογίας και της καταπολέμησης του *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) μέσω δημογραφικής προσέγγισης



Άννα-Νικολέττα Σκούρη

Επιβλέπων Καθηγητής

Νικόλαος Γ. Καβαλλιεράτος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:

Νικόλαος Γ. Καβαλλιεράτος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ

Γεώργιος Παπαδούλης, Καθηγητής ΓΠΑ

Ιωάννης Γιαννακού, Καθηγητής ΓΠΑ

**ΑΘΗΝΑ
2022**



ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΩΝ ΦΥΤΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΖΩΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΝΤΟΜΟΛΟΓΙΑΣ

Διδακτορική Διατριβή

Μελέτη της βιολογίας και της καταπολέμησης του *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) μέσω δημογραφικής προσέγγισης

“Study of the biology and management of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) through demographic approach”

Άννα-Νικολέττα Σκούρη

Επταμελής Εξεταστική Επιτροπή:

Νικόλαος Γ. Καβαλλιεράτος, Αναπληρωτής Καθηγητής ΓΠΑ (επιβλέπων)

Γεώργιος Παπαδούλης, Καθηγητής ΓΠΑ

Ιωάννης Γιαννακού, Καθηγητής ΓΠΑ

Γεώργιος Κολιόπουλος, Επίκουρος Καθηγητής ΓΠΑ

Αντώνιος Τσαγκαράκης, Επίκουρος Καθηγητής ΓΠΑ

Χρυσοβαλάντης Μαλέσιος, Επίκουρος Καθηγητής ΓΠΑ

Δημήτριος Κωβαίος, Καθηγητής Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης

Μελέτη της βιολογίας και της καταπολέμησης του *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) μέσω δημογραφικής προσέγγισης

Τμήμα Επιστήμης Φυτικής Παραγωγής
Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας & Εντομολογίας

Περίληψη

Το κόκκινο σκαθάρι των αλεύρων, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) είναι ένας σοβαρός εχθρός των αποθηκευμένων προϊόντων. Η επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη και την επιβίωση του εντόμου προσδιορίστηκε σε πέντε σταθερές θερμοκρασίες (20, 25, 30, 32,5 και 35 °C) εργαστηριακά. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ανάπτυξη του *T. castaneum* εξαρτάται από τη θερμοκρασία. Τα δεδομένα προσαρμόστηκαν στο μη γραμμικό μοντέλο Briere, το οποίο υπολόγισε για τη συνολική περίοδο της εμφάνισης των ατελών σταδίων το κατώτερο αναπτυξιακό όριο στους 20,2 °C, το ανώτερο αναπτυξιακό όριο στους 35,3 °C και τη θερμοκρασία για τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης στους 31,2 °C. Το γραμμικό μοντέλο Ikemoto και Takai έδειξε ότι χρειάζονταν 659,7 βαθμο-ημέρες πάνω από το όριο των 16,9 °C ώστε να ολοκληρωθεί η ανάπτυξη από το ωό έως την εμφάνιση των τελείων ατόμων. Η επιβίωση των ατελών σταδίων διέφερε σημαντικά μεταξύ των θερμοκρασιών και περιγράφηκε επαρκώς από μια συνάρτηση ακραίας τιμής. Το πρότυπο έδειξε ότι η υψηλότερη επιβίωση (73,0%) υπολογίστηκε στους 27,4 °C. Η καμπύλη δείχνει ένα λοξό κωδονοειδές σχήμα, υποδεικνύοντας ότι η επιβίωση μειώνεται στα δύο άκρα του εύρους της θερμοκρασίας.

Επιπλέον μελέτη σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας στο *T. castaneum* πραγματοποιήθηκε γνωρίζοντας πως δεν υπάρχουν συγκριτικά στοιχεία για τις δημογραφικές παραμέτρους (δηλαδή τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό, τον ενδογενή ρυθμό αύξησης, τον πεπερασμένο ρυθμό αύξησης, τη μέση διάρκεια γενεάς και τον χρόνο διπλασιασμού), οι οποίες επιτρέπουν την εις βάθος διερεύνηση της επιβίωσης του είδους καθώς και τα χαρακτηριστικά της θνησιμότητας και της αναπαραγωγής του. Έτσι, η ανάπτυξη από το ωό στο τέλειο άτομο, η θνησιμότητα των τελείων ατόμων και η γονιμότητα των θηλέων αξιολογήθηκαν στους 20, 25, 30 και 32,5 °C σε αλεύρι λευκού μαλακού σίτου. Ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός αυξήθηκε από 0,08 θήλεα/θήλυ στους 20 °C σε 11,77 θήλεα/θήλυ στους 25 °C και 102,07 θήλεα/θήλυ στους 30 °C, ακολουθούμενο από μείωση σε 10,73 θήλεα/θήλυ στους 32,5 °C. Οι χαμηλότερες τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης και του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης παρατηρήθηκαν στους 20 °C (- 0,0105 θήλεα/θήλυ/ημέρα και 0,9895, αντιστοίχως) και οι υψηλότερες στους 30 °C (0,0348 θήλεα/θήλυ/ημέρα και 1,0354, αντιστοίχως). Ενώ η μέση διάρκεια γενεάς δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ των 20 και των 25 °C (249,9 και 225,5 ημέρες, αντιστοίχως), μειώθηκε στις 132,8 και τις 115,1 ημέρες στους 30 και τους 32,5 °C, αντιστοίχως. Η τιμή του χρόνου διπλασιασμού ήταν αρνητική στους 20 °C (- 67,5 ημέρες) ενώ αυξήθηκε σε 19,9, 34,0 και 63,9 ημέρες στους 30, 32,5 και 25 °C, αντιστοίχως. Χρησιμοποιώντας το μη γραμμικό μοντέλο Briere, το κατώτερο θερμοκρασιακό όριο για την αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum* υπολογίστηκε στους 22,2 °C, το ανώτερο όριο στους 33,2 °C και η θερμοκρασία για τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης παρουσιάστηκε στους 30,1 °C. Η ανάλυση επιβίωσης έδειξε ότι η θερμοκρασία επηρέασε επίσης τον κίνδυνο θνησιμότητας του *T. castaneum*. Ο μέσος χρόνος επιβίωσης αυξήθηκε από 112,1 ημέρες στους 20 °C σε 462,4 ημέρες στους 25 °C, ακολουθούμενος από μείωση σε 206,5 και 64,5 ημέρες στους 30 και 32,5 °C, αντιστοίχως.

Στην επόμενη μελέτη διερευνήθηκε η καταλληλότητα του σιμιγδαλιού, του σπασμένου σίτου και του σπασμένου αραβοσίτου ως τροφές για την ανάπτυξη του *T. castaneum*. Το έντομο ολοκλήρωσε την ανάπτυξή του σε όλες τις εξετασθείσες τροφές. Ο χρόνος ανάπτυξης των προνυμφών ήταν χαμηλότερος στο σπασμένο σιτάρι (59,6 ημέρες) και τον σπασμένο αραβόσιτο (54,6 ημέρες) σε σύγκριση με το σιμιγδάλι (72,8 ημέρες). Ο χρόνος ανάπτυξης των νυμφών δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ των εξετασθεισών τροφών, παρουσιάζοντας τιμές που κυμαίνονταν από 6,2 έως 6,6 ημέρες. Η διάρκεια ζωής των θηλέων και των αρρένων ατόμων ήταν 70,9 και 77,1 ημέρες, 92,2 και 77,9 ημέρες και 177,0 και 183,7 ημέρες, όταν το *T. castaneum* εξετράφη με το σιμιγδάλι, τον σπασμένο σιτάρι και τον σπασμένο αραβόσιτο, αντιστοίχως. Η υψηλότερη γονιμότητα (28,7 ωά/θήλυ) καταγράφηκε όταν το *T. castaneum* εξετράφη με το σιμιγδάλι, ακολουθούμενο από τον σπασμένο σιτάρι (2,7 ωά/θήλυ) και τον σπασμένο αραβόσιτο (1,2 ωά/θήλυ). Η παρατεταμένη διάρκεια ζωής των τελείων ατόμων η οποία παρατηρήθηκε στον σπασμένο αραβόσιτο μπορεί να αποδοθεί στην απουσία της επιβάρυνσης της αναπαραγωγής λόγω της χαμηλής γονιμότητας σε τούτο το προϊόν. Οι τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης ήταν 0,014 και -0,021 θήλεα/θήλυ/ημέρα όταν η διατροφή εγένετο με σιμιγδάλι και σπασμένο σιτάρι, αντιστοίχως, ενώ δεν πραγματοποιήθηκε δημογραφική ανάλυση για τον σπασμένο αραβόσιτο λόγω της υψηλής πρώιμης θνησιμότητας των προνυμφών και της χαμηλής γονιμότητας. Ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός και η μέση διάρκεια γενεάς ήταν 6,19 θήλεα/θήλυ και 127,5 ημέρες και 0,16 θήλεα/θήλυ και 91,9 ημέρες, όταν εξετράφησαν με το σιμιγδάλι και το σπασμένο σιτάρι, αντιστοίχως. Με βάση τη δημογραφική ανάλυση, η αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum* ευνοείται μόνο στο σιμιγδάλι. Αναμένεται ότι το σιμιγδάλι θα λειτουργήσει ως κατάλληλο προϊόν για το *T. castaneum*, ενώ το σπασμένο σιτάρι και ο σπασμένος αραβόσιτος επιτρέπουν μόνο την επιβίωσή του ενεργώντας ως εναλλακτικά προϊόντα.

Οι επεμβάσεις με εντομοκτόνα σκευάσματα είναι μια κοινή πρακτική για τον έλεγχο των εχθρών των αποθηκευμένων προϊόντων. Οι περισσότερες μελέτες επικεντρώνονται στις άμεσες επιδράσεις των εντομοκτόνων στα έντομα στόχους ενώ δεν υπάρχουν δεδομένα για τις έμμεσες επιδράσεις στα τέλεια άτομα όσον αφορά την φυσική κατάσταση των απογόνων τους. Κατά συνέπεια, διερευνήθηκε η επίδραση του pirimiphos-methyl σε τέλεια άτομα *T. castaneum* και το κόστος του χρόνου έκθεσής τους στην φυσική κατάσταση των απογόνων τους. Για το σκοπό αυτό, τα θηλυκά τέλεια άτομα του *T. castaneum* εξετέθησαν για 1, 3, 8, 16, 24 και 72 ώρες στο pirimiphos-methyl και υπολογίστηκαν τα ποσοστά γέννησης ή θνησιμότητας των απογόνων τους. Η γονιμότητα και η επιβίωση των απογόνων τους επηρεάστηκε από την έκθεση των μητρικών ατόμων στο εντομοκτόνο. Όταν τα μητρικά άτομα εξετέθησαν επί 1 και 3 ώρες στο pirimiphos-methyl, ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός των απογόνων τους ήταν 4,1 και 4,3 θήλεα/θήλυ, αντιστοίχως ενώ δε διέφεραν σημαντικά σε σχέση με τους απογόνους του μάρτυρα (6,3 θήλεα/θήλυ). Ο περαιτέρω χρόνος έκθεσης στο pirimiphos-methyl επηρέασε σημαντικά τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό των απογόνων όπου η χαμηλότερη τιμή παρατηρήθηκε στο χρόνο έκθεσης των 72 ωρών (0,97 θήλεα/θήλυ). Ο ενδογενής ρυθμός αύξησης και ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ των απογόνων του μάρτυρα (0,029 θήλεα/θήλυ/ημέρα και 1,029, αντιστοίχως) και των απογόνων των εκτεθέντων θηλυκών ατόμων επί 1 ώρα (0,021 θήλεα/θήλυ/ημέρα και 1,021, αντιστοίχως) ή 3 ώρες (0,023 θήλεα/θήλυ/ημέρα και 1,023, αντιστοίχως). Με την αύξηση του χρόνου έκθεσης στο pirimiphos-methyl παρατηρήθηκε επιζήμια επίδραση στην φυσική κατάσταση των απογόνων με βάση τις τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης και του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης. Οι χαμηλότερες τιμές των παραμέτρων παρατηρήθηκαν στο χρόνο έκθεσης των 72

ωρών (0,001 θήλεα/θήλυ/ημέρα και 1,000, αντιστοίχως). Η ίδια τάση παρατηρήθηκε στις τιμές του χρόνου διπλασιασμού. Αντίθετα, η μέση διάρκεια γενεάς δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ του μαρτύρα και όλων των εκθέσεων. Το γεγονός ότι η έκθεση των τελείων θηλυκών ατόμων *T. castaneum* στο pirimiphos-methyl επηρεάζει αρνητικά τις δημογραφικές παραμέτρους της παραγωγής των απογόνων τους θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν όταν εφαρμόζονται στρατηγικές διαχείρισης ενάντια στο *T. castaneum* καθώς θα μπορούσε να μειώσει τις επαναλαμβανόμενες εντομοκτόνες εφαρμογές στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης.

Ομοίως, δεν υπάρχουν δεδομένα για τις επιπτώσεις των εντομοκτόνων στην φυσική κατάσταση του πληθυσμού του *T. castaneum*. Η επίδραση του chlorfenapyr στο *T. castaneum* διερευνήθηκε ως προς το κόστος της έκθεσης των διαφορετικών αναπτυξιακών σταδίων του στην φυσική κατάσταση του πληθυσμού του χρησιμοποιώντας τον πίνακα ζωής και την μέθοδο ανάλυσης επιβίωσης. Για το σκοπό αυτό, τα ωά, οι προνύμφες και τα γονικά τέλεια θηλυκά άτομα του *T. castaneum* εξετέθησαν στο chlorfenapyr με τα ποσοστά των γεννήσεων ή του θανάτου τους να υπολογίζονται καθημερινώς. Η έκθεση των ωών και των προνυμφών στο chlorfenapyr ήταν επιζήμια για το *T. castaneum* και δεν ολοκληρώθηκε η ανάπτυξή τους. Όταν τα θηλυκά τέλεια άτομα εξετέθησαν στο chlorfenapyr, η καμπύλη επιβίωσης των απογόνων τους, τα βιολογικά χαρακτηριστικά τους και οι παράμετροι του πίνακα ζωής δεν διέφεραν σημαντικά σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Έτσι, οι περίοδοι ανάπτυξης των ωών, των προνυμφών και των νυμφών, η διάρκεια της ζωής των θήλεων και των αρρένων για τον μάρτυρα και οι απόγονοι των θηλέων ατόμων τα οποία εξετέθησαν στο chlorfenapyr ήταν 4,66 και 4,76 ημέρες, 25,85 και 25,71 ημέρες, 5,00 και 5,26 ημέρες, 87,33 και 104,22 ημέρες, και 76,87 και 91,87 ημέρες, αντιστοίχως. Επιπλέον, οι μέσες τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού, του ενδογενούς ρυθμού αύξησης, της μέσης διάρκειας γενεάς και του χρόνου διπλασιασμού για τον μάρτυρα και τους απογόνους των θηλυκών τελείων ατόμων, τα οποία εξετέθησαν στο chlorfenapyr, ήταν 14,3 και 9,3 θήλεα/θήλυ, 0,038 και 0,028 θήλεα/θήλυ/ημέρα, 1,039 και 1,029, 70,0 και 76,9 ημέρες και 18,5 και 24,9 ημέρες, αντιστοίχως.

Όπως προαναφέρθηκε, ενώ οι άμεσες επιδράσεις πολλών φυτοφαρμάκων έχουν αξιολογηθεί κατά του *T. castaneum*, λίγα είναι γνωστά για τις έμμεσες επιδράσεις τους όσον αφορά την ικανότητα των απογόνων τους. Συνεπώς διερευνήθηκε η επίδραση του spinosad σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα έκθεσης των θηλυκών τελείων ατόμων *T. castaneum*, υπολογίζοντας τις παραμέτρους του πίνακα ζωής των απογόνων τους. Για το σκοπό αυτό, θηλυκά τέλεια άτομα *T. castaneum* εξετέθησαν επί 5, 10 και 20 λεπτά σε spinosad και υπολογίστηκαν τα ποσοστά γέννησης ή θανάτου των απογόνων τους. Ως μάρτυρας χρησιμοποιήθηκε το ύδωρ. Οι μέσες τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού, του ενδογενούς ρυθμούς αύξησης, του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης, της μέσης διάρκειας γενεάς και του χρόνου διπλασιασμού του μάρτυρα ήταν 6,3 θήλεα/θήλυ, 0,029 θήλεα/θήλυ/ημέρα, 1,029, 63,6 ημέρες και 24,1 ημέρες, αντιστοίχως, που είναι ενδεικτικά της πιθανής πληθυσμιακής αύξησης του *T. castaneum*. Όταν η έκθεση των μητρικών ατόμων στο spinosad ήταν 5, 10 και 20 λεπτά, οι αντίστοιχες τιμές ήταν 0,073, 0,135 και 0,097 θήλεα/θήλυ, -0,045, -0,031 και -0,048 θήλεα/θήλυ/ημέρα, 0,956, 0,970 και 0,953, 60,6, 67,7, και 50,3 ημέρες, -15,9, -23,3 και -14,8 ημέρες, αντιστοίχως, υποδηλώνοντας την μείωση του πληθυσμού του εντόμου. Ωστόσο, με βάση το κριτήριο των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95%, τα διαφορετικά διαστήματα έκθεσης των θηλυκών ατόμων *T. castaneum* στο spinosad δεν επηρέασαν την φυσική κατάσταση των απογόνων τους.

Επιστημονική περιοχή: Δημογραφία του *Tribolium castaneum*

Λέξεις κλειδιά: κόκκινο σκαθάρι των αλεύρων, *Tribolium castaneum*, Tenebrionidae, έντομα αποθηκών, αλεύρι μαλακού σίτου, αμυλώδη προϊόντα, βιολογικά χαρακτηριστικά, ανάπτυξη, γονιμότητα, επιβίωση, θερμοκρασία, καταπολέμηση, δημογραφία, δημογραφικές παράμετροι, μοντέλο Briere, ενδογενής ρυθμός αύξησης, διαχείριση παρασίτων, pirimiphos-methyl, spinosad, chlorfenapyr.

Study of the biology and management of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) through demographic approach

Department of Crop Science
Laboratory of Agricultural Zoology and Entomology

Abstract

The red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) is a serious pest of stored products. The effect of temperature on the development and survival of this species was determined at five constant temperatures (20, 25, 30, 32.5 and 35 °C) in the laboratory. Results showed a temperature dependent development of *T. castaneum*. Data were fitted to the nonlinear Briere model, which for the total immature period estimated the lower threshold at 20.2 °C, the upper developmental threshold at 35.3 °C, and the temperature for maximum developmental rate at 31.2 °C. The Ikemoto and Takai linear model indicated that 659.7 degree-days above a threshold of 16.9 °C were needed to complete immature development from egg to adult emergence. Survival of immature stages varied significantly across temperatures and was well described by an extreme-value function. The model indicated that the highest survival (73.0%) was estimated to occur at 27.4 °C. The curve shows a skewed bell shape, indicating that survival decreases at both ends of the temperature range.

Furthermore, there are no data on comparative demographic parameters (i.e., net reproductive rate, intrinsic rate of increase, finite rate of increase, mean generation time and doubling time) in different temperatures, parameters that allow the in-depth exploration of its survival, mortality and reproduction patterns. Thus, the egg-to-adult development, adult mortality and female fecundity on white soft wheat flour were evaluated at 20, 25, 30 and 32.5 °C. The net reproductive rate increased from 0.08 females/female at 20 °C to 11.77 females/female at 25 °C and 102.07 females/female at 30 °C, followed by a decrease to 10.73 females/female at 32.5 °C. The lowest values of the intrinsic rate of increase and the finite rate of increase were observed at 20 °C (- 0.0105 females/female/day and 0.9895, respectively) and the highest at 30 °C (0.0348 females/female/day and 1.0354, respectively). While the mean generation time did not differ significantly between 20 and 25 °C (249.9 and 225.5 days, respectively), this decreased to 132.8 and 115.1 days at 30 and 32.5 °C, respectively. The value of the doubling time was negative at 20 °C (- 67.5 days), increased to 19.9, 34.0 and 63.9 days at 30, 32.5 and 25 °C, respectively. Using the non-linear Briere model, the lower threshold for *T. castaneum* population increase was estimated to be 22.2 °C, the upper threshold at 33.2 °C, and the temperature for maximum growth rate was 30.1 °C. Survival analysis indicated that temperature also affected the mortality risk of *T. castaneum*. The mean survival time increased from 112.1 days at 20 °C to 462.4 days at 25 °C, followed by a decrease to 206.5 and 64.5 days at 30 and 32.5 °C, respectively.

The suitability of semolina, cracked wheat and cracked maize as feeding commodities of *T. castaneum* was investigated. The pest completed its development on all tested commodities. The developmental time of larvae was lower on cracked wheat (59.6 days) and cracked maize (54.6 days) compared to semolina (72.8 days). The developmental time of pupae did not differ significantly among tested commodities, ranging from 6.2 to 6.6 days. Female and male longevities were 70.9 and 77.1 days, 92.2 and 77.9 days and 177.0 and 183.7 days, when *T. castaneum* was fed on semolina, cracked wheat and cracked maize, respectively. The highest fecundity (28.7 eggs/female) was recorded when *T. castaneum* was fed on semolina, followed by cracked wheat (2.7 eggs/female) and cracked maize (1.2 eggs/female).

The prolonged adult longevity, which was observed on cracked maize, may be attributed to the absence of the cost of reproduction, due to low fecundity on this commodity. The values of the intrinsic rate of increase were 0.014 and -0.021 females/female/day when it was fed on semolina and cracked wheat, respectively, while no demographic analysis was carried out for cracked maize due to high early larval mortality and low fecundity on this commodity. The net reproductive rate and mean generation time were 6.19 females/female and 127.5 days and 0.16 females/female and 91.9 days, when it was fed on semolina and cracked wheat, respectively. Based on demographic analysis, *T. castaneum* population growth is favored only on semolina. We expect semolina to act as a suitable commodity for *T. castaneum*, while cracked wheat and cracked maize allow only its survival by acting as alternative commodities.

Insecticidal treatment is a common practice for the control of stored-product insect pests. Most studies are focused on the direct effects of insecticides on target insects, while there are no data on the indirect effects on adults in terms of progeny fitness. Consequently, it was needed to investigate the effect of pirimiphos-methyl on adults of *T. castaneum* and their exposure time cost to progeny fitness. For this purpose, females of *T. castaneum* were exposed for 1, 3, 8, 16, 24, and 72 h to pirimiphos-methyl and progeny birth or death rates were calculated. The fecundity, as well as the survival of progeny, was affected by the parental exposure to the insecticide. When females were exposed for 1 and 3 h to pirimiphos-methyl, the net reproductive rate of the progeny was 4.1 and 4.3 females/female, respectively, which did not statistically differ with the progeny in control treatment (6.3 females/female). Further exposure time to pirimiphos-methyl affected significantly the progeny net reproductive rate, where the lowest value was observed at the 72-h exposure time (0.97 females/female). The intrinsic rate of increase, as well as the finite rate of increase, did not differ between the progeny of the control treatment (0.029 females/female/day and 1.029, respectively) and the progeny of exposed females at 1 h (0.021 females/female/day and 1.021, respectively) or 3 h (0.023 females/female/day and 1.023, respectively). By increasing the time of exposure to pirimiphos-methyl, a detrimental effect to progeny fitness was revealed based on the values of the intrinsic and finite rate of increase. The lowest values of these parameters were observed at the 72-h exposure time (0.001 females/female/day and 1.000, respectively). The same trend was observed in the values of the doubling time. In contrast, the mean generation time did not statistically differ between control and all insecticide treatments. The fact that the exposure of parental females of *T. castaneum* to pirimiphos-methyl negatively affects the demographic parameters of their offspring production should be taken into account when management strategies are applied against this notorious stored-product insect species, since it could reduce the repeatedly insecticidal applications in storage facilities.

Similarly, there are no data either on the effects of insecticides on the population fitness of *T. castaneum*. The effect of chlorfenapyr on *T. castaneum* was investigated in terms of the cost of exposure at different developmental stages on population performance, by using life table statistics and a survival analysis method. For this purpose, eggs, larvae, and parental adult females of *T. castaneum* were exposed to chlorfenapyr and birth or death rates were calculated daily. The exposure of eggs and larvae to chlorfenapyr was detrimental for *T. castaneum* and they did not complete development. When parental females were exposed to chlorfenapyr, the progeny survival curve, biological features, as well as the life table parameters did not differ significantly compared to the control treatment. Thus, egg hatching, larval and pupal developmental periods, female and male longevities for the control treatment, and the progeny of the females that were exposed to chlorfenapyr were

4.66 and 4.76 days, 25.85 and 25.71 days, 5.00 and 5.26 days, 87.33 and 104.22 days, and 76.87 and 91.87 days, respectively. In addition, the mean values of the net reproductive rate, the intrinsic rate of increase, the mean generation time and the doubling time for the control treatment and the progeny of the parental females, which were exposed to chlorfenapyr, were 14.3 and 9.3 females/female, 0.038 and 0.028 females/female/day, 1.039 and 1.029, 70.0 and 76.9 days, and 18.5 and 24.9 days, respectively.

While the direct effects of several pesticides have been evaluated on *T. castaneum*, little is known on their indirect effects in terms of progeny fitness. In the sixth experimental series of tests, we investigated the cost of different exposure intervals of *T. castaneum* females to spinosad by calculating the life table parameters of its progeny. For this purpose, females of *T. castaneum* were exposed for 5, 10 and 20 min to spinosad and birth or death rates of progeny were estimated. Water was used as a control treatment. The mean values of the net reproductive rate, the intrinsic rate of increase, the finite rate of increase, the mean generation time and the doubling time of the control treatment were 6.3 females/female, 0.029 females/female/day, 1.029, 63.6 days and 24.1 days, respectively, which are indicative of the potential population increase of *T. castaneum*. When female parental time exposure to spinosad was 5, 10 and 20 min, the corresponding values were 0.073, 0.135 and 0.097 females/female; -0.045, -0.031 and -0.048 females/female/day; 0.956, 0.970 and 0.953; 60.6, 67.7; and 50.3 days; -15.9, -23.3 and -14.8 days, respectively, which indicate a population decrease. However, based on the 95% confidence intervals criterion, the different exposure intervals of *T. castaneum* females to spinosad did not affect the fitness of their progeny.

Scientific area: Demography of *Tribolium castaneum*

Keywords: red flour beetle, *Tribolium castaneum*, demography, soft wheat flour, temperature, analysis, biological features, development, fecundity, survival, amylaceous commodities, Briere model, intrinsic rate of increase, pest management, pirimiphos-methyl, spinosad, chlorfenapyr.

Υπάρχει μόνο μία μέθοδος και αυτή είναι η σκληρή δουλειά.

Sydney Smith, 1771-1845

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη.....	3
Abstract.....	8
Ευχαριστίες.....	17
1.ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	18
1.1 Γενικά.....	18
1.2 Έντομα αποθηκών.....	19
1.3 Κατηγορίες εντόμων των αποθηκών.....	20
1.4 Είδη εντόμων των αποθηκών.....	21
1.4.1 Τα συνηθέστερα είδη των πρωτευόντων εντόμων των αποθηκών.....	21
1.4.2 Τα συνηθέστερα είδη των δευτερευόντων εντόμων των αποθηκών.....	21
1.5 Οικογένεια Tenebrionidae.....	22
1.6 Το έντομο <i>Tribolium castaneum</i>	22
1.7 Μορφολογία.....	25
1.8 Το <i>T. castaneum</i> ως πρότυπος οργανισμός.....	26
1.9 Καταπολέμηση.....	27
1.10 Φυσικές πρακτικές καταπολέμησης.....	28
1.11 Χημικές επεμβάσεις.....	28
1.12 Οργανοφωσφορικά.....	29
1.13 Πυρεθρινοειδή.....	30
1.14 Σπινουσίνες.....	30
1.15 Παράγωγα του πυρρολίου.....	31
1.16 Δημογραφία.....	31
1.16.1 Ιστορική ανασκόπηση.....	31
1.16.2 Εξέλιξη.....	32
1.16.3 Ορισμός.....	33
1.16.4 Δημογραφικά πεδία.....	34
1.16.5 Χρονική διάρκεια Δημογραφικών μελετών.....	35

1.16.6 Βασικές έννοιες.....	35
1.16.7 Δημογραφικά πρότυπα.....	37
1.16.8 Βιοδημογραφία.....	37
1.16.9 Η θερμοκρασία ως κύριος παράγοντας των δημογραφικών μελετών.....	40
1.16.10 Στατιστική ανάλυση.....	41
1.16.11 Πίνακες ζωής.....	42
1.17 Εικόνες.....	43
1.18 Βιβλιογραφία.....	46
2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	63
2.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη και την επιβίωση του <i>Tribolium castaneum</i> (Coleoptera: Tenebrionidae).....	64
2.1.1 Εισαγωγή.....	64
2.1.2 Υλικά και μέθοδοι.....	66
2.1.2.α Έντομα και τροφή.....	66
2.1.2.β Βιοδοκιμές.....	67
2.1.3 Στατιστική ανάλυση.....	68
2.1.4 Αποτελέσματα.....	69
2.1.5 Συζήτηση.....	76
2.1.6 Βιβλιογραφία.....	80
2.2 Αξιολόγηση του σιμιγδαλιού, σπασμένου σίτου και αραβοσίτου για την ανάπτυξη του <i>Tribolium castaneum</i> (Herbst, Coleoptera: Tenebrionidae).....	86
2.2.1 Εισαγωγή.....	86
2.2.2 Υλικά και μέθοδοι.....	88
2.2.2.α Έντομα.....	88
2.2.2.β Τροφές.....	88
2.2.3 Πειραματική διαδικασία.....	89
2.2.4 Στατιστική ανάλυση.....	90
2.2.5 Αποτελέσματα.....	91
2.2.6 Συζήτηση.....	97

2.2.7 Βιβλιογραφία.....	102
2.3 Πώς επηρεάζεται η βιωσιμότητα του <i>Tribolium castaneum</i> (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) όταν διαφορετικά αναπτυξιακά στάδιά του εκτίθενται στο chlorfenapyr;	107
2.3.1 Εισαγωγή.....	107
2.3.2. Υλικά και μέθοδοι.....	110
2.3.2.α Έντομα.....	110
2.3.2.β Τροφή και εντομοκτόνο.....	110
2.3.2.γ Έκθεση ωών.....	110
2.3.2.δ Έκθεση προνυμφών.....	112
2.3.2.στ Έκθεση μητρικών τελείων ατόμων.....	112
2.3.3 Στατιστική ανάλυση.....	113
2.3.4 Αποτελέσματα.....	113
2.3.5 Συζήτηση.....	119
2.3.6 Βιβλιογραφία.....	123
2.4 Η έκθεση των θηλυκών ατόμων <i>Tribolium castaneum</i> (Herbst) στο pirimiphos-methyl μεταβάλλει την βιωσιμότητα των απογόνων τους.....	129
2.4.1 Εισαγωγή.....	129
2.4.2 Υλικά και μέθοδοι.....	132
2.4.2.α Τα έντομα.....	132
2.4.2.β Εντομοκτόνο και τροφή.....	132
2.4.2.γ Βιοδοκιμές.....	132
2.4.3 Ανάλυση δεδομένων.....	134
2.4.4 Αποτελέσματα.....	135
2.4.5 Συζήτηση.....	140
2.4.6 Βιβλιογραφία.....	144
2.5 Έκθεση θηλυκών ατόμων <i>Tribolium castaneum</i> (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) στο spinosad: επίδραση στη φυσική κατάσταση των απογόνων τους.....	150
2.5.1 Εισαγωγή.....	150

2.5.2 Υλικά και μέθοδοι.....	151
2.5.3 Αποτελέσματα.....	152
2.5.4 Συζήτηση.....	154
2.5.5 Βιβλιογραφία.....	155
2.6 Δημογραφικές παράμετροι του <i>Tribolium castaneum</i> (Coleoptera: Tenebrionidae) σε σταθερές θερμοκρασίες.....	157
2.6.1 Εισαγωγή.....	157
2.6.2 Υλικά και μέθοδοι.....	159
2.6.2.α Έντομα.....	159
2.6.2.β Τροφή.....	159
2.6.2.γ Βιοδοκιμές.....	160
2.6.3 Στατιστική ανάλυση.....	161
2.6.4 Αποτελέσματα.....	162
2.6.5 Συζήτηση.....	167
2.6.6 Βιβλιογραφία.....	170
2.7 Εικόνες.....	176
3 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	191
3.1 Βιβλιογραφία.....	193

Ευχαριστίες

Η παρούσα διδακτορική διατριβή εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών υπό την επίβλεψη του Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Νικολάου Γ. Καβαλλιεράτου. Ευχαριστώ θερμώς τον επιβλέποντα Καθηγητή για την επιλογή του θέματος και την πολύτιμη καθοδήγησή του σε όλα τα στάδια της διατριβής. Το παράδειγμά του συνιστά πολύτιμο μάθημα ζωής το οποίο ξεπερνάει την παρούσα μελέτη.

Οφείλω ιδιαίτερες ευχαριστίες στα μέλη της τριμελούς συμβουλευτικής επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Γεώργιο Θ. Παπαδούλη και τον Καθηγητή κ. Ιωάννη Γιαννακού για την συμβολή τους στην εκπόνηση και την διόρθωση της διδακτορικής διατριβής.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της επταμελούς επιτροπής Γεώργιο Κολιόπουλο, Επίκουρο Καθηγητή Γ.Π.Α., Αντώνιο Τσαγκαράκη, Επίκουρο Καθηγητή Γ.Π.Α., Χρυσοβαλάντη Μαλέσιο, Επίκουρο Καθηγητή Γ.Π.Α. και Δημήτριο Κωβαίο, Καθηγητή Αριστοτέλειου Πανεπιστημίου Θεσσαλονίκης για την ανάγνωση και την διόρθωση του κειμένου της διδακτορικής διατριβής.

Στην πορεία της διδακτορικής διατριβής μου ήταν σημαντική η συνεργασία μου με τον αείμνηστο Νικόλαο Παπανικολάου σε ζητήματα στατιστικής ανάλυσης, τον οποίο στερήθηκε πρόωρα η επιστημονική κοινότητα.

Καταλυτική υπήρξε η συνδρομή και των συναδέλφων μου Εριφίλης Νίκα και Μαρίας Μπουκουβάλα των οποίων η αφοσίωση στην επιστήμη της εντομολογίας συνέβαλαν στον γόνιμο προσανατολισμό μου πλησίον της έρευνας.

Η παρούσα μελέτη υλοποιήθηκε με υποτροφία του Ιδρύματος Κρατικών Υποτροφιών (ΙΚΥ) η οποία χρηματοδοτήθηκε, κατόπιν διαγωνισμού, από την Πράξη «Ενίσχυση του ανθρωπίνου ερευνητικού δυναμικού μέσω της υλοποίησης Διδακτορικής Έρευνας» από πόρους του ΕΠ «Ανάπτυξη Ανθρώπινου Δυναμικού, Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» (2018-050-0502-11763).

Με την άδειά μου, η παρούσα εργασία ελέγχθηκε από την Εξεταστική Επιτροπή μέσα από λογισμικό ανίχνευσης λογοκλοπής που διαθέτει το ΓΠΑ και διασταυρώθηκε η εγκυρότητα και η πρωτοτυπία της

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Γενικά

Τα έντομα πρωτοεμφανίστηκαν πριν από 400 εκατομμύρια χρόνια περίπου. Θεωρούνται οι πιο προσαρμοστικές μορφές ζωής αφού μπορούν να βρεθούν σε όλους τους βιοτόπους όπως σε έλη, ερήμους, ζούγκλες αλλά και σε πιο αφιλόξενα περιβάλλοντα όπως λίμνες αργού πετρελαίου. Ως αποτέλεσμα, αποτελούν τον μεγαλύτερο αριθμό ειδών (> 70%) σε σχέση με άλλα είδη του ζωικού βασιλείου (Resh and Cardé, 2003; Haug and Haug, 2017).

Τα έντομα, διαδραματίζουν ποικίλους ρόλους τόσο στη φύση όσο και τον άνθρωπο. Υπάρχουν είδη εντόμων ιδιαίτερα χρήσιμα για την προστασία των φυτών ελέγχοντας του πληθυσμούς άλλων οργανισμών όπως τα ωφέλιμα αρπακτικά ή τα παρασιτοειδή, είδη που διασκορπίζουν σπόρους, είδη που υποβοηθούν την επικονίαση ή τη σύνθεση της οργανικής ύλης (σαπροφάγα), είδη βελτιωτικά του εδάφους (Scudder, 2017), για δολώματα, είδη που παράγουν πολύτιμα προϊόντα για τον άνθρωπο όπως το μετάξι, το μέλι ή παράγωγα προϊόντα όπως φάρμακα και καλλυντικά (Huis, 2021), είδη βρώσιμα από τον άνθρωπο (Gałęcki and Sokół, 2019), είδη που χρησιμοποιούνται στην εγκληματολογία (Limsopatham et al., 2021), για τις βιολογικές έρευνες, πτωματοφάγα είδη ή παράσιτα των ανθρώπων και φορείς ασθενειών (Getanjaly, 2015; Lessard, 2021).

Τα έντομα που θεωρούνται επιβλαβή (παράσιτα) των φυτών και των προϊόντων τους αποτελούν λιγότερο από το 0,5 % του συνολικού αριθμού των γνωστών ειδών ενώ πολύ λιγότερα από αυτά μπορεί να βλάψουν σοβαρά τον άνθρωπο. Κάποια επιβλαβή έντομα μπορούν να προκαλέσουν σημαντικές περιβαλλοντικές, υγειονομικές ή οικονομικές ζημιές σε επίπεδο χώρας ή ομάδας εθνών. Τα φυτοφάγα έντομα έχει υπολογιστεί πως καταστρέφουν το ένα πέμπτο των καλλιεργειών παγκοσμίως. Οι μονοκαλλιέργειες ή καλλιέργειες του ίδιου είδους φυτού σε μεγάλη έκταση, η επιλογή ειδών πλούσια σε θρεπτικά συστατικά και οι υψηλές αποδόσεις δημιουργούν ένα περιβάλλον ιδιαίτερα ευνοϊκό για την ανάπτυξη των φυτοφάγων εντόμων (Sallam, 2000; Jankielsohn, 2018) τόσο στον αγρό όσο και μετασυλλεκτικά κατά την αποθήκευση.

1.2 Έντομα αποθηκών

Υπάρχουν αρκετές εκατοντάδες είδη εντόμων τα οποία προσβάλλουν τρόφιμα φυτικής και ζωικής προέλευσης ευρισκόμενα στους αποθηκευτικούς χώρους. Τα έντομα αυτά καλούνται «έντομα αποθηκών» (storage pests) (Suiter et al., 2017; Tyagi et al., 2019). Πενήντα περίπου είδη θεωρούνται ως τα πιο σοβαρά και καταστρεπτικά (Lord., 2008). Τα περισσότερα από τα έντομα αποθηκών έχουν πολλές γενεές τον χρόνο, μπορούν να αυξάνουν τους αριθμούς τους σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα και να προσβάλλουν μεγάλη ποσότητα προϊόντος ανά άτομο (Suiter et al., 2017).

Η αφθονία των διαφόρων ειδών εντόμων αποθηκών μπορεί να διαφέρει από τόπο σε τόπο προκαλώντας ζημιές διαφορετικής σοβαρότητας. Οι προσβολές πολλές φορές ξεκινούν από τον αγρό κατά την ωρίμανση του σπόρου και μεταφέρονται κατά τη συγκομιδή στις αποθήκες. Ωστόσο, ως κύριες πηγές μόλυνσης από τέτοιου είδους έντομα θεωρούνται οι θεριστικές μηχανές και άλλα γεωργικά μηχανήματα, οι παλιές σακούλες, τα παλιά δοχεία ή βαρέλια καθώς και η λανθασμένη ή ελλιπή δομή και κατασκευή της αποθήκης (Tyagi et al., 2019). Τα έντομα αποθηκών θεωρούνται ως η κυριότερη αιτία για την απώλεια του ενός τρίτου με ενός τετάρτου των αποθηκευμένων προϊόντων των καλλιεργειών παγκοσμίως. Ακόμα και οι σπόροι που δεν χάνονται πλήρως υφίστανται σημαντική ποιοτική υποβάθμιση από τις προσβολές των εντόμων των αποθηκών όπως: μείωση του βάρους τους, μειωμένη βλαστητική ικανότητα, αλλοίωση των θρεπτικών συστατικών τους, μόλυνσεις από μικροοργανισμούς και δυσάρεστες οσμές μετατρέποντάς τους ακατάλληλους προς περαιτέρω χρήση. Ως αποτέλεσμα, τα αποθηκευμένα προϊόντα υφίστανται σοβαρές οικονομικές απώλειες λόγω της υποτίμησής τους και την άρνηση της αγοράς τους από τους καταναλωτές (Mason and Obermeyer, 2010; Mason and McDonough, 2012; Sallam, 2000; Tyagi et al., 2019). Για παράδειγμα, το *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: *Bostrychidae*), που αποτελεί έναν σοβαρό εχθρό του αποθηκευμένου αραβοσίτου πριν και μετά τη συγκομιδή (Borgemeister, 1994; Hill et al., 2002; Muatinte et al., 2019), έχει προκαλέσει απώλειες στην παραγωγή της τάξης του 20 με 40 % στην Αφρική, γεγονός ζωτικής σημασίας διότι είναι η βασική τροφή για πολλές περιοχές που μαστίζονται από πείνα (Sallam, 2000; Muatinte et al., 2019).

Τα έντομα αποθηκών, εκτός από ποσοτικές και ποιοτικές απώλειες των προϊόντων των αποθηκών, μπορούν να προκαλέσουν και προβλήματα υγείας στους καταναλωτές. Τα εκδύματα, οι τοξίνες που εκλύουν, τα τμήματά τους όπως οι

σμήριγγες, οι πτέρυγες και οι πόδες προκαλούν αλλεργίες που δημιουργούν κνησμό, ερεθισμό στα μάτια, επιπεφυκίτιδα, ρινίτιδα, βήχα, άσθμα, δυσπεψία, ναυτία, εμετό, διάρροια, δερματίτιδα, έκζεμα, φλύκταινες και σοβαρές ασθένειες όπως πολιομυελίτιδα και καρκινογενέσεις (Lopata, 2000; Lis et al, 2011; Hagstrum et al, 2012).

Τα αποθηκευμένα τρόφιμα τα οποία προσβάλλονται ποικίλουν αναλόγως το είδος του εντόμου. Τέτοια τρόφιμα μπορεί να είναι τα δημητριακά, οι ξηρές σούπες, τα φασόλια, οι ξηροί καρποί, τα αποξηραμένα βότανα και τα μπαχαρικά, οι διάφοροι σπόροι όλων των ειδών των φυτών, τα ζυμαρικά, το γάλα και οι πρωτεΐνες σε σκόνη, τα κράκερς, τα μπισκότα, οι καραμέλες, η σοκολάτα, τα αποξηραμένα φρούτα και τα λαχανικά, μείγματα κέικ, άλευρα όλων των ειδών, αρωματικές ύλες κρέατος, μη βρώσιμα προϊόντα από τον άνθρωπο όπως τα αποξηραμένα λουλούδια, τροφές για πτηνά πουλιών, δολώματα για τρωκτικά, ξηρές τροφές για κατοικίδια ζώα, αποξηραμένα ψάρια και ιχθυάλευρα, καπνός και συναφή προϊόντα καπνού (Hill, 2003; Hagstrum and Subramanyam, 2009; Suiter et al., 2017).

Η μεγαλύτερη ομάδα των εντόμων των αποθηκών αποτελείται από την τάξη των κολεοπτέρων (Coleoptera, κοινώς σκαθάρια) με περίπου 600 είδη να είναι ικανά να προσβάλλουν τα τρόφιμα αποθηκών. Ακολουθεί η τάξη των λεπιδοπτέρων (Lepidoptera, κοινώς πεταλούδες) με περίπου 70 είδη σχετιζόμενα με τις προαναφερθείσες προσβολές, ενώ λιγότερες αλλά όχι αμελητέες ζημιές μπορούν να προκαλέσουν ορισμένα ψωκόπτερα (Psocoptera) (Gwinner et al., 1990; Tyagi et al., 2019). Πολλά από τα είδη αυτά προκαλούν ζημιές τόσο στην αποθήκη όσο και στον αγρό. Τα κολεόπτερα, καταναλώνουν τις τροφές κατά το στάδιο της προνύμφης και του τελείου ατόμου ενώ τα λεπιδόπτερα τρέφονται από αυτές μόνο στο στάδιο της προνύμφης (Sallam, 2000).

1.3 Κατηγορίες εντόμων των αποθηκών

Τα είδη των εντόμων αποθηκών ταξινομούνται σε δυο κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τους πρωτεύοντες εχθρούς. Πρόκειται για είδη εντόμων τα οποία μπορούν να διαρρήξουν και να προσβάλλουν ακεραίους σπόρους. Πολλές φορές οι πρωτεύοντες εχθροί τρέφονται από το εσωτερικό τμήμα των σπόρων δημιουργώντας κρυφές (μη ορατές) προσβολές. Το γεγονός αυτό κρίνεται ιδιαίτερα επικίνδυνο για τα προϊόντα αφού οι προσβολές γίνονται δύσκολα αντιληπτές και καταπολεμώνται

ακόμη δυσκολότερα. Η δεύτερη κατηγορία αφορά τους δευτερεύοντες εχθρούς δηλαδή έντομα τα οποία μπορούν να προσβάλλουν τους ήδη κατεστραμμένους σπόρους (π.χ. από τους πρωτεύοντες εχθρούς), αλεσμένα και σπασμένα προϊόντα ή σπόρους ζιζανίων με υψηλή υγρασία (Hill, 2003; Mason and MacDonough, 2012; Tyagi et al., 2019).

1.4 Είδη εντόμων των αποθηκών

1.4.1 Τα συνηθέστερα είδη των πρωτευόντων εντόμων των αποθηκών.

Στην τάξη των κολεοπτέρων είναι τα: *Sitophilus oryzae* (Linnaeus, 1763) (Curculionidae), *Sitophilus zeamais* (Motschulsky, 1855) (Curculionidae), *Acanthoscelides obtectus* (Say, 1831) (Chrysomelidae), *Sitophilus granarius* (Linnaeus, 1758) (Curculionidae), *Tenebrioides mauritanicus* (Linnaeus, 1758) (Trogossitidae), *Trogoderma granarium* (Everts, 1898) (Dermestidae), *Trogoderma inclusum* (LeConte, 1854) (Dermestidae), *Rhyzopertha dominica* (Fabricius, 1792) (Bostrichidae), *Bruchus pisorum* (Linnaeus, 1758) (Chrysomelidae), *Bruchus lentis* (Linnaeus, 1767) (Chrysomelidae), *Callosobruchus chinensis* (Linnaeus, 1758) (Chrysomelidae), *Caryedon serratus* (Olivier, 1790) (Chrysomelidae), *Lasioderma serricorne* (Fabricius, 1792) (Ptinidae), *Stegobium paniceum* (Linnaeus, 1758) (Ptinidae), *Cylas formicarius* (Fabricius, 1798) (Brentidae), *Callosobruchus maculatus* (Fabricius, 1798) (Chrysomelidae). Στην τάξη των λεπιδοπτέρων είναι: *Phthorimaea operculella* (Zeller, 1873) (Gelechiidae) και *Sitotroga cerealella* (Olivier, 1789) (Gelechiidae). Στην τάξη των διπτέρων είναι τα: *Piophilidae* (Hill, 2003; Kumar, 2017)

1.4.2 Τα συνηθέστερα είδη των δευτερευόντων εντόμων των αποθηκών.

Στην την τάξη των κολεοπτέρων είναι τα: *Tribolium castaneum* (Herbst, 1797) (Tenebrionidae), *Tribolium confusum* (Jacquelin du Val, 1863) (Tenebrionidae), *Latheticus oryzae* (Waterhouse, 1880) (Tenebrionidae) και *Oryzaephilus surinamensis* (Linnaeus, 1758) (Silvanidae). Στην τάξη των λεπιδοπτέρων είναι τα: *Corcyra cephalonica* (Stainton, 1866) (Pyralidae), *Ephestia cautella* (Walker, 1863) (Pyralidae), *Plodia interpunctella* (Hübner, 1813) (*Plodia interpunctella*), *Ephestia elutella* (Hübner, 1796) (Pyralidae) και *Ephestia kuehniella* (Zeller, 1879) (Pyralidae) (Hill, 2003; Burks and Johnson, 2012; Kumar, 2017).

Στην παρούσα μελέτη, εξετάστηκε το κόκκινο σκαθάρι των αλεύρων, rust-red flour beetle (*Tribolium castaneum*, Herbst). Πρόκειται για έντομο το οποίο ανήκει στην οικογένεια Tenebrionidae.

1.5 Οικογένεια Tenebrionidae

Στην οικογένεια Tenebrionidae ανήκουν περισσότερα από 20.000 είδη και 2300 γένη παγκοσμίως γεγονός το οποίο την καθιστά ως μια από τις μεγαλύτερες οικογένειες των εντόμων (Yves et al., 2018). Περίπου 100 είδη σχετίζονται με τα αποθηκευμένα τρόφιμα παγκοσμίως αλλά μόνο μερικά είναι σημαντικά (Hill, 2003). Το μέγεθός τους κυμαίνεται από 1 έως 80 mm. Συνήθως έχουν μαύρο ή σκούρο καστανό χρώμα, παρουσιάζουν μεγάλη ποικιλομορφία και δεν έχουν όλα την ικανότητα της πτήσης. Ένα κοινό χαρακτηριστικό γνώρισμά τους είναι τα τέσσερα άρθρα των ταρσών στους οπίσθιους πόδες τους (Sallam, 2000). Οι προνύμφες έχουν κυλινδρικό σχήμα, συχνά φέρουν ευδιάκριτες λωρίδες και μία ή δύο μυτερές προεξοχές (ουρογόμφοι) στο άκρο τους (Kumar, 2017). Τα περισσότερα είδη είναι φυτοφάγα. Εκτός από παράσιτα των αποθηκών που τρέφονται με σπόρους και γενικώς προϊόντα μακράς αποθήκευσης, τα είδη της οικογένειας τρέφονται με μύκητες, κοπριά ή άλλα έντομα. Οι προσβολές των εντόμων ακολουθούνται από μια χαρακτηριστική μυρωδιά η οποία οφείλεται στην έκκριση των βενζοκινονών, προερχόμενες από τους κοιλιακούς αδένες τους σε μεγάλες ποσότητες (380 μg/τέλειο άτομο) και έχουν σκοπό την άμυνά τους (Murray, 1981). Οι βενζοκινόνες μολύνουν περαιτέρω τα προϊόντα, ιδιαίτερα τα άλευρα, ενώ ευθύνονται για ερεθισμούς στους οφθαλμούς, δερματίτιδες, φλύκταινες, ερυθρήματα ακόμη και καρκινογενέσεις (Lis et al, 2011).

1.6 Το έντομο *Tribolium castaneum*

Το υπό εξέταση έντομο *Tribolium castaneum* (Herbst, 1797) θεωρείται ως ο πιο συνηθισμένος δευτερεύων εχθρός όλων των αποθηκευμένων προϊόντων παγκοσμίως όμως συχνότερα εμφανίζεται σε θερμές και εύκρατες περιοχές. Είναι ένα από τα μακροβιότερα είδη εντόμων αποθηκών (σε ιδανικές συνθήκες μπορεί να ζήσει περισσότερο από τρία χρόνια) ινδο-αυστραλιανής προέλευσης (Robinson, 2005) ανθεκτικό σε χαμηλά ποσοστά σχετικής υγρασίας έως 11 % και μπορεί να αναπτύξει 5 ή έξι γενεές ανά έτος. Το έντομο κατέχει το υψηλότερο ποσοστό αύξησης του πληθυσμού που έχει καταγραφεί ποτέ για οποιονδήποτε από τους εχθρούς των

αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων (Hill, 2003). Διαχειμάζει μέσα στο αλεύρι, σε σπασμένους σπόρους, σε προστατευμένα μέρη ή σε μέρη με θέρμανση όπως ρωγμές και σχισμές της τοιχοποιίας των αποθηκών. Έχει καταγραφεί σε σπίτια, ελαιοτριβεία, σιτοβολώνες, αποθήκες εργοστασίων, ζυμωτήρια, μύλους κ.ά. Προσβάλλει κυρίως σπασμένους ή κατεστραμμένους σπόρους και άλευρα ως προνύμφη και ως τέλειο. Εγκαθίσταται και πολλαπλασιάζεται εύκολα και γρήγορα ιδιαίτερα εάν το προϊόν είναι πλούσιο σε πρωτεΐνες. Μπορεί να επιβιώσει σε ακεραίους σπόρους παρά το γεγονός ότι είναι δευτερεύων εχθρός. (White, 1982; Ridley et al., 2011; Sallam, 2000; Tyagi et al., 2019).

Πίνακας 1: Συστηματική ταξινόμηση του <i>Tribolium castaneum</i> κατά <i>Abdullahi et al, (2019)</i>	
Βασίλειο	Ζώα (Animalia)
Φύλο	Αρθρόποδα (Arthropoda)
Υποφύλο	Εξάποδα (Hexapoda)
Κλάση	Έντομα (Insecta)
Τάξη	Κολεόπτερα (Coleoptera, Beetles)
Υπόταξη	Πολυφάγα (Polyphaga)
Υπεροικογένεια	Tenebrionoidea
Οικογένεια	Tenebrionidae (Darkling Beetles)
Υποοικογένεια	Tenebrioninae
Φυλή	Triboliini
Γένος	<i>Tribolium</i>
Είδος	<i>castaneum</i>
Πλήρες λατινικό όνομα	<i>Tribolium castaneum</i> (Herbst, 1797)

Η παρουσία του έχει καταγραφεί σε περισσότερα από 233 διαφορετικά

προϊόντα (Hagstrum et al., 2013) όμως κυρίως θεωρείται εχθρός των αλεύρων. Κάποια από τα προϊόντα διατροφής του είναι το κριθάρι, το καλαμπόκι, οι ξηροί καρποί όπως τα καρύδια και τα αμύγδαλα, οι σπόροι του κακάο, τα φασόλια, οι ελαιούχοι σπόροι, οι σπόροι του βαμβακιού, τα δημητριακά, τα μπισκότα, η σοκολάτα, το αποξηραμένο γάλα, τα ζυμαρικά, τα μπαχαρικά, τα αποξηραμένα φρούτα, οι ρίζες, οι έτοιμες τροφές δημητριακών (π.χ. νιφάδες καλαμποκιού), το μπέικιν πάουντερ, το κεχρί, το πιπέρι καγιέν, το λινάρι, τα αποξηραμένα λουλούδια, τα βότανα, τα δέρματα ζώων, οι ζωοτροφές και όλων των ειδών τα άλευρα (Baldwin and Fasulo, 2003; Mason, 2018; Tyagi et al., 2019).

Ανιχνεύεται δύσκολα σε χαμηλές πυκνότητες πληθυσμού ενώ είναι περισσότερο ανιχνεύσιμο σε άλευρα λόγω της έντονης κινητικότητας που παρουσιάζουν τα τέλεια άτομα, του χαρακτηριστικού ρόδιου χρώματος που αποκτούν τα άλευρα από τις βενζοκινόνες του εντόμου και σε μεγαλύτερες προσβολές λόγω της μούχλας. Αναλόγως των συνθηκών τα άλευρα συνήθως παρουσιάζουν ζημιές και οσμή από τη δραστηριότητά του 15 με 20 ημέρες μετά την αρχική προσβολή. Οι προσβεβλημένοι σπόροι αποκτούν γκρι απόχρωση (Baldwin and Fasulo, 2003; Tyagi et al., 2019).

Τα τέλεια άτομα είναι ιδιαίτερα ενεργά, κινούνται γρήγορα, είναι εύκολα ορατά και συνήθως είναι το στάδιο κατά το οποίο ανιχνεύονται και αναγνωρίζονται (Tyagi et al., 2019). Αν και παλαιότερα θεωρείτο βαδιστικό έντομο, από έρευνες έχει αποδειχθεί πως μπορεί να διανύσει σημαντικές αποστάσεις κατά την πτήση. Το φως ελκύει το έντομο με αποτέλεσμα την εύκολη εξάπλωσή του από το σημείο της αρχικής προσβολής (Ridley et al., 2011; Suiter et al., 2017) ενώ αν ενοχληθεί κρύβεται (Baldwin and Fasulo, 2003). Ξεκινά την πτήση του από τους 20° C. Τα θηλυκά άτομα μπορούν να γεννήσουν έως 1000 ωά κατά τη διάρκεια της ζωής τους (Tyagi et al., 2019) τα οποία εναποθέτουν απ' ευθείας στο αλεύρι ή στις τροφές τις οποίες προσβάλλουν και στις επιφάνειες των δοχείων που περιέχουν τις τροφές (Mason, 2018).

Ένα ακόμη ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του εντόμου το οποίο αφορά στη συμπεριφορά του είναι η πολυγαμία. Εστιάζοντας το ερευνητικό ενδιαφέρον στα θηλυκά άτομα, το χαρακτηριστικό αφορά στην πολυανδρία. Κατά την πολυανδρία, τα θηλυκά συζευγνύονται με περισσότερα του ενός αρσενικά (Fedina and Lewis, 2007). Μελέτες έχουν δείξει τα άμεσα οφέλη της πολυανδρίας στα θηλυκά άτομα, στα οποία αυξάνεται η γονιμότητα και η πιθανότητα της επιτυχούς γονιμοποίησης (Lewis and Austad, 1994; Pai, Bennett and Yan, 2005). Για παράδειγμα οι Lewis and Austad

(1994) κατέγραψαν σημαντική αύξηση στην παραγωγή των απογόνων για τα θηλυκά *T. castaneum* τα οποία αφέθηκαν να συζευχθούν με πολλά αρσενικά άτομα. Η πολυγαμική συμπεριφορά παρατηρείται κυρίως σε πληθυσμούς μικρής γενετικής ποικιλομορφίας καθώς υπάρχουν πιθανότητες να παρουσιάζεται γενετική ασυμβατότητα στην σύζευξη μεταξύ ατόμων του ίδιου πληθυσμού, οπότε δεν εμφανίζονται απόγονοι. Τα θηλυκά άτομα *T. castaneum* έχουν τη δυνατότητα να αποθηκεύουν το σπέρμα για αρκετό χρονικό διάστημα μετά από κάθε σύζευξη ενώ τα αρσενικά άτομα μπορούν να αφαιρέσουν το σπέρμα που προϋπήρχε και να το αντικαταστήσουν με νέο σε μια προσπάθεια επιτυχούς γονιμοποίησης και εξελικτικού ανταγωνισμού (Lewis and Jutkiewicz, 1998; Tyler and Tregenza, 2013).

1.7 Μορφολογία

Το στάδιο του ωού (εικ. 1.1 και 1.2) έχει την όψη ημιδιαφανούς λευκού λεπτού και μικρού κυλίνδρου. Τα ωά γίνονται ορατά μόνο με στερεοσκοπική εξέταση των προσβεβλημένων προϊόντων. Είναι κολλώδη, γεγονός το οποίο τα βοηθά να προσκολλώνται με ευκολία σε επιφάνειες και/ή να καλύπτονται με αλεύρι. Οι προνύμφες (εικ. 1.3 και 1.4) έχουν σώμα που καλύπτεται από ισχυρά χιτρινισμένη δερμίδα φέρουσα λεπτές σμήριγγες, έχουν μήκος 1 με 5 mm περίπου (μικρή και μεγάλη ηλικία αντιστοίχως), χρώμα λευκό έως κιτρινωπό με ανοιχτόχρωμη καστανή κεφαλή και στο τελευταίο τμήμα του σώματός τους φέρουν δυο αιχμηρές σκούρες προεξοχές (Mahroof and Hagstrum., 2012). Οι νύμφες (εικ. 1.5 και 1.6) είναι ελεύθερες, λευκές αρχικά ενώ στην πορεία κιτρινίζουν, φέρουν σμήριγγες, έχουν ευδιάκριτο φύλο και σχεδόν το ίδιο μέγεθος με τα τέλεια άτομα. Τα τέλεια (εικ. 1.7 και 1.8) έχουν επίμηκες πεπλατυσμένο γυαλιστερό σώμα μήκους 3 με 4,5 mm και κοκκινωπό χρώμα αρχικά το οποίο σκουραίνει στην πορεία σε σκούρο καστανό (Hill, 2003; Tyagi et al., 2019). Έχουν ευδιάκριτη κεφαλή και θώρακα με ελαφρώς καμπυλωτές πλευρές (Baldwin and Fasulo, 2003). Τα έλυτρά τους είναι ραβδωτά κατά μήκος και παρουσιάζουν αραιές οπές ανάμεσα στις ραβδώσεις (Calvin, 2017). Τα στοματικά μέρη τους είναι μασητικού τύπου (Baldwin and Fasulo, 2003)

Το *T. castaneum* συγγέεται συνήθως με το συγγενές είδος *T. confusum*. Η εμφανής διαφορά των δύο ειδών βρίσκεται στις κεραίες. Το *T. castaneum* παρουσιάζει απότομη μεγέθυνση στα τρία τελευταία άρθρα των κεραιών του (ροπαλοειδείς), χαρακτηριστικό το οποίο δεν εμφανίζεται στο *T. confusum* (Hagstrum and Subramanyam, 2006; Mahroof and Hagstrum, 2012). Επίσης, το *T. confusum*

παρουσιάζει βαθύτερες ραβδώσεις στα έλυτρά του σε σχέση με αυτές του *T. castaneum* και οι πλευρές του θώρακά του είναι πιο παράλληλες (Baldwin and Fasulo, 2003; Calvin, 2017).

1.8 Το *T. castaneum* ως πρότυπος οργανισμός.

Στη γενετική, όπου μελετώνται τα γονίδια η κληρονομικότητα και η βιοποικιλότητα των ζωντανών οργανισμών, χρησιμοποιούνται κάποια είδη ως πρότυπα (Field and Johnston, 2005). Οι πρότυποι οργανισμοί δεν παρέχουν περισσότερες πληροφορίες από άλλους ωστόσο μπορούν να μελετηθούν στο εργαστήριο ευκολότερα είτε λόγω του μικρού μεγέθους τους δεδομένου ότι οι εργαστηριακοί χώροι είναι περιορισμένοι είτε διότι αναπαράγονται γρήγορα, συνεπώς μπορούν να δώσουν ερευνητικά δεδομένα σύντομα, είτε διότι είναι διαφανή π.χ. *Caenorhabditis elegans* (Rhabditita: Steinernematidae) συνεπώς μπορούν να φανούν τα αποτελέσματα των επεμβάσεων στα όργανα και τους ιστούς τους με ευκολία. Το *Drosophila melanogaster* (Diptera: Drosophilidae) με μόλις 4 ζεύγη χρωμοσωμάτων (οι άνθρωποι έχουν 23) ξεκίνησε να χρησιμοποιείται στη γενετική ως πρότυπος οργανισμός πριν από 80 χρόνια και θεωρείται σήμερα βασικός θεμελιωτής της κλασικής γενετικής. Επιπροσθέτως, τα γονιδιά της παρουσιάζουν εξαιρετική ομοιότητα με αυτά του ανθρώπου και για τον λόγο αυτό χρησιμοποιείται στη μελέτη της ανθρώπινης ανάπτυξης και των ανθρώπινων ασθενειών (Richards et al., 2008).

Στη λίστα με τους πρότυπους οργανισμούς προστέθηκε τα τελευταία χρόνια το *T. castaneum* το οποίο θεωρείται πλέον το καταλληλότερο πρότυπο εντόμων για τη μελέτη της λειτουργικής γενετικής ανάλυσης και της βιολογικής ανάπτυξης (Kumar et al., 2018). Το 2008 αναλύθηκε πλήρως η αλληλουχία του γονιδιώματός του και συγκρίθηκε με άλλων ειδών όπως της δροσόφιλας. Τα αποτελέσματα έδειξαν πως τα δύο αυτά είδη έχουν περίπου 10.000 με 15.000 κοινά γονίδια ενώ το *T. castaneum* βρέθηκε να έχει μεγαλύτερη γενετική ομολογία με τον άνθρωπο από αυτή που έχει η δροσόφιλα με τον άνθρωπο (Richards et al., 2008; Grünwald, et al., 2013). Επιπροσθέτως, εκτιμήθηκε πως το *T. castaneum* ανταποκρίνεται καλύτερα σε σχέση με τη δροσόφιλα σε πειράματα τα οποία σχετίζονται με την «παρεμβολή RNA ή RNAi» (το RNAi είναι μηχανισμός ρύθμισης της γονιδιακής έκφρασης κατά την οποία καταστέλλεται η έκφραση συμπληρωματικών γονιδίων RNA) (Kumar et al., 2018) σε όλα τα στάδια της ζωής του με την απλή μέθοδο της έκχυσης dsRNA στην κοιλιακή χώρα του ατόμου. Λόγω της απλότητας της πειραματικής διαδικασίας έχει

παρουσιαστεί ιδιαίτερο ενδιαφέρον συμμετοχής της ερευνητικής και εκπαιδευτικής κοινότητας. Κατόπιν τούτου, το *T. castaneum* θεωρείται ιδανικό πρότυπο για εκπαιδευτικούς σκοπούς (Linz, 2014).

Σε πρόσφατη έρευνα των Arana and Deera (2020) αναλύθηκε το μικροβίωμα του *T. castaneum* το οποίο προέρχεται από την τροφή την οποία καταναλώνει το έντομο. Το μικροβίωμά του φάνηκε να παρουσιάζει διαφοροποιήσεις που σχετίζονται με το είδος της τροφής και την πυκνότητα της προσβολής. Για παράδειγμα, όταν το έντομο εξετράφη με αλεύρι σίτου ανέπτυξε μικροβίωμα το οποίο προσέδωσε πολλά οφέλη όπως υψηλή γονιμότητα, μεγάλο ποσοστό επιβίωσης των ωών και μεγάλη διάρκεια ζωής ενώ παρατηρήθηκε μείωση του κανιβαλισμού. Μέσα από τέτοιου είδους έρευνες γίνεται περισσότερο κατανοητός ο μηχανισμός λειτουργίας, εξέλιξης και αλληλεπίδρασης του εντόμου με το περιβάλλον του και αυτό μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα για τη διαχείρισή του.

1.9 Καταπολέμηση

Η καταπολέμηση των εντόμων πρέπει να γίνεται κατόπιν αξιολόγησης των παραγόντων που απαρτίζουν το περιβάλλον στο οποίο γίνεται η προσβολή και αναλόγως τόσο του είδους του εντόμου όσο και του μεγέθους της προσβολής. Ειδικότερα για τα έντομα αποθηκών σημαντικό ρόλο προστασίας των προϊόντων παίζει η πρόληψη κατά την οποία θα πρέπει να τηρούνται συγκεκριμένες προδιαγραφές στις εγκαταστάσεις επεξεργασίας και αποθήκευσης. Η πρόληψη μπορεί να περιλαμβάνει τον τρόπο κατασκευής των αποθηκευτικών χώρων (π.χ. ευνοϊκές συνθήκες θερμοκρασίας, υγρασίας και αερισμού), την προετοιμασία του χώρου για την υποδοχή των προϊόντων μέσω απολύμανσης, αερισμού, απομάκρυνσης υπολειμμάτων άλλων προϊόντων, την επιδιόρθωση ρωγμών και τον ψεκασμό με εντομοκτόνα ευρέως φάσματος δράσης (Hagstrum and Subramanyam, 2006; Kumar, 2017). Για την καταπολέμηση των εντόμων των αποθηκών και κατ' επέκταση του *T. castaneum*, εφαρμόζονται διάφορες φυσικές πρακτικές και χημικές επεμβάσεις.

1.10 Φυσική καταπολέμηση

Οι φυσικές πρακτικές αφορούν στην εφαρμογή ελεγχόμενης ατμόσφαιρας κατά την οποία εφαρμόζονται ατμόσφαιρες χαμηλού οξυγόνου και υψηλού διοξειδίου του άνθρακα με σκοπό την ασφυξία των εντόμων, στην ρύθμιση της θέρμανσης στους 50 °C περίπου για 24 ώρες ώστε να προκληθεί θερμικός θάνατος, στην ρύθμιση χαμηλών θερμοκρασιών του χώρου ή των προϊόντων που έχει ως σκοπό την παρεμπόδιση της ανάπτυξής τους (Rajasri and Kavitha, 2015), την αποξήρανση των προϊόντων και των σπόρων σε ποσοστά 10 έως 14 % αναλόγως του είδους των σπόρων, την ακτινοβολία όπως ακτίνες Χ ή μικροκύματα ή τον συνδυασμό των παραπάνω (Rajasri and Kavitha, 2015; Tyagi et al., 2019). Ο μέγιστος ρυθμός της ανάπτυξης και της αναπαραγωγής για τα περισσότερα έντομα των αποθηκευμένων προϊόντων λαμβάνει χώρα μεταξύ των 25 και 35 °C ενώ στα όρια 12 και 40 °C επέρχεται η παύση της ανάπτυξης και ο ενδεχόμενος θάνατός τους (Kumar, 2017).

1.11 Χημικές επεμβάσεις

Η επιλογή του εντομοκτόνου θα πρέπει να γίνεται με κριτήρια όπως η μέθοδος εφαρμογής, η υπολειμματική δράση και η αποτελεσματικότητά του δεδομένου ότι το *T. castaneum* έχει αναπτύξει ανθεκτικότητα σε πολλά εντομοκτόνα σε διάφορα μέρη του κόσμου (Larry, 1991; Rösner et al., 2020; Shamjana and Grace, 2021). Τέτοιου είδους επεμβάσεις απαιτούν ιδιαίτερους χειρισμούς καθ' ότι η υπολειμματική δράση των εντομοκτόνων ουσιών μπορεί εύκολα να υποβαθμίσει την ποιότητα των προϊόντων ή ακόμη και να τα θέσει ακατάλληλα προς κατανάλωση προκαλώντας τροφιμογενείς ασθένειες στους καταναλωτές και καθιστώντας τα επικίνδυνα για τη δημόσια υγεία (Yigit and Velioglu, 2020; Galagarza et al., 2021). Οι εφαρμογές των εντομοκτόνων μπορεί να αφορούν σε επεμβάσεις στον χώρο παραμονής των προϊόντων ή σε απ' ευθείας εφαρμογές επί των προϊόντων και των σπόρων. Τα εντομοκτόνα spinosad και emamectin benzoate έχουν δείξει καλή αποτελεσματικότητα για μεγάλο χρονικό διάστημα. Εφαρμόζονται συνήθως απ' ευθείας στους σπόρους ενώ δεν επηρεάζουν τη βλαστικότητά τους (Rajasri & Kavitha, 2015).

Οι τύποι των εντομοκτόνων που κυκλοφορούν σήμερα στην αγορά είναι τα καπνογόνα και τα εντομοκτόνα επαφής. Τα καπνογόνα έχουν υψηλή τοξικότητα. Σκοτώνουν ακαριαία τα έντομα αποθηκών σε όλα τα στάδια της ανάπτυξής τους ενώ

εφαρμόζονται τόσο στους χώρους στόχους όσο και στα προϊόντα. Το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο καπνογόνο είναι η φωσφίνη (phosphine). Η εφαρμογή της συνοδεύεται από αυστηρό πρωτόκολλο διότι είναι τοξική και δημιουργεί ανθεκτικότητα στα έντομα στόχους (Calvin, 2017; Cassi, 2017). Σημαντικά εντομοκτόνα επαφής, αποτελούν τα οργανοφωσφωρικά και τα πυρεθροειδή.

1.12 Οργανοφωσφορικά

Τα οργανοφωσφορικά εντομοκτόνα είναι μια ομάδα συνθετικών ενώσεων αποτελούμενες από οργανοφωσφορικούς εστέρες, τα οποία ανακαλύφθηκαν κατά τα μέσα του 19^{ου} αιώνα από Γάλλους χημικούς (Masson and Rochu, 2009). Αποτελούν σήμερα το 50 % περίπου των εντομοκτόνων δραστικών ουσιών των φυτοφαρμάκων. Εφαρμόζονται με ψεκασμό απ' ευθείας στους σπόρους ή στους χώρους αποθήκευσης και η δράση τους μπορεί να διαρκέσει για αρκετούς μήνες (Cassi, 2017). Ο τρόπος δράσης τους αφορά στην αναστολή της ακετυλοχολινεστεράσης. Η ακετυλοχολινεστεράση είναι ένα ένζυμο νευροδιαβιβαστής το οποίο είναι απαραίτητο για τη φυσιολογική λειτουργία των εντόμων αλλά και άλλων ζώων συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου (Braitberg, 2019). Η αδρανοποίηση του ενζύμου οδηγεί σε μυϊκή παράλυση, σπασμούς και θάνατο σε σύντομο χρονικό διάστημα (Lockridge and Quinn, 2010; Cassi, 2017). Τα πιο κοινά οργανοφωσφορικά είναι το chlorpyrifos-methyl και το pirimiphos-methyl (Sharma et al., 2010; Cassi, 2017). Στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή εξετάστηκε η επίδραση του οργανοφωσφορικού εντομοκτόνου pirimiphos-methyl εναντίων του *T. castaneum*.

Το pirimiphos methyl έχει χημικό τύπο C₁₁H₂₀N₃O₃PS (εικ. 1.9). Αναμιγνύεται με βοηθητικές ουσίες (π.χ. διαλύτες και σταθεροποιητές) για την δημιουργία εντομοκτόνων σκευασμάτων. Έχει μορφή ομοιογενούς υγρού χωρίς αιωρούμενα σωματίδια ή ιζήματα, είναι διαυγές ή ελαφρώς θολό κοκκινωπού χρώματος (WHO, 2016) μη εκρηκτικό ή οξειδωτικό (Lewis et al., 2016). Η αναλογία της δραστικής ουσίας θα πρέπει να είναι το λιγότερο 880g/kg σκευάσματος. Εφαρμόζεται ως γαλάκτωμα διαλυμένο σε νερό (WHO, 2016). Κυκλοφόρησε για πρώτη φορά το 1977, δέκα χρόνια μετά την ανακάλυψή του. Εφαρμόζεται ως εντομοκτόνο επαφής για την καταπολέμηση πολλών λεπιδοπτέρων και κολεοπτέρων αποθηκών.

1.13 Πυρεθρινοειδή

Πρόκειται για ουσίες που βρίσκονται στα άνθη του φυτού *Tanacetum cinerariaefolium*. Η ανακάλυψη της εντομοκτόνου δράσης τους έγινε σταδιακά ξεκινώντας από την Ιαπωνία τη δεκαετία του 1880. Αρχικά χρησιμοποιούνταν για τον έλεγχο των ψειρών ενώ αργότερα παρασκευάστηκε το «φιδάκι» το οποίο έγινε παγκοσμίως γνωστό για την δράση του στα κουνούπια. Το έντονο ενδιαφέρον για την εντομοκτόνο δράση των πυρεθρινών οδήγησε σε διάφορες τροποποιήσεις των φυσικών πυρεθρινών που έλαβαν χώρα στις αρχές του 20ού αιώνα. Το πρώτο πυρεθρινοειδές εντομοκτόνο παρασκευάστηκε το 1949 με την ονομασία αλλεθρίνη και εμπορευματοποιήθηκε ως οικιακό εντομοκτόνο (Matsuo, 2019). Τα πυρεθρινοειδή εντομοκτόνα είναι τοξικά για είδη μη στόχους όπως έντομα, ασπόνδυλα και ψάρια. Ο τρόπος δράσης τους βασίζεται στην παρεμπόδιση της μεταφοράς του νατρίου στα νευρικά κύτταρα των εντόμων (Haddi et al., 2012). Τα τελευταία χρόνια έχουν εμπορευματοποιηθεί περισσότερες από 30 διαφορετικές δραστικές ουσίες ανάμεσα στις οποίες οι lambda-Cyhalothrin, Deltamethrin, Cypermethrin, Biphenthrin, Permethrin, zeta-Cypermethrin και alpha-Cypermethrin οι οποίες χρησιμοποιούνται και σήμερα (Matsuo, 2019).

1.14 Σπινোসίνες

Οι σπινোসίνες (spinosyns) είναι δευτερογενείς μεταβολίτες που προέρχονται από την αερόβια ζύμωση του βακτηρίου του εδάφους *Saccharopolyspora spinosa* Mertz and Yao (Bacteria: Actinobacteridae) (Kirst, 2010). Οι σπινোসίνες δρουν κατά των εντόμων - στόχων ως αλλοστερικοί αγωνιστές των νικοτινικών υποδοχέων της ακετυλοχολίνης (nAChRs) που λειτουργούν ως νευροδιαβιβαστικές οδοί ιόντων συνδεδεμένες με υποκαταστάτες (Salgado and Sparks, 2005; Sparks, 2012). Οι σπινোসίνες είναι εξαιρετικά αποτελεσματικές έναντι ενός μεγάλου αριθμού επιβλαβών εντόμων με σχετικά χαμηλή τοξικότητα στα ωφέλιμα έντομα (Gilbert and Gill, 2010). Επιπροσθέτως, το ευρύ φάσμα των εντομοκτόνων ιδιοτήτων και η χαμηλή περιβαλλοντική επίδρασή τους καθιστούν τις σπινোসίνες συμβατές με τα ολοκληρωμένα προγράμματα διαχείρισης των επιβλαβών οργανισμών (Geng et al. 2013; Bacci et al., 2016). Το spinosad είναι ένα από τα κύρια εμπορικά διαθέσιμα εντομοκτόνα σκευάσματα που ανήκουν στην ομάδα των σπινোসινών (εικ. 1.10). Περιέχει ένα μείγμα δύο σπινουοειδών, τη σπινουοσίνη A ως κύριο συστατικό και τη σπινουοσίνη D ως δευτερεύον συστατικό (Kirst, 2010) και χρησιμοποιείται κατά των

εντόμων αποθηκών (Kavallieratos et al., 2016). Στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή εξετάστηκε η επίδρασή του εναντίων του *T. castaneum*.

1.15 Παράγωγα του πυρρολίου

- chlorfenapyr

Οι πυρρόλες είναι ετεροκυκλικές αρωματικές οργανικές ενώσεις με χημικό τύπο C_4H_4N (Loudon, 2002). Παρά το γεγονός ότι παρασκευάζονται τεχνητός, πολλά από τα παράγωγά τους βρίσκονται σε ποικιλία συνενζύμων και φυσικών προϊόντων όπως στη χλωροφύλλη (Jusélius and Sundholm, 2000; Zaidi et al., 2006, Lucas et al., 2013). Η δραστική ουσία chlorfenapyr (εικ. 1.11) είναι παράγωγο του πυρρολίου στοχεύοντας τα μιτοχόνδρια των εντόμων με σκοπό τη διατάραξη παραγωγής ATP (τριφωσφορικής αδενοσίνης) και την απώλεια ενέργειας οδηγώντας σε κυτταρική δυσλειτουργία με επακόλουθο τον θάνατο του εντόμου (Raghavendra et al., 2011). Αυτός ο τρόπος δράσης δεν εμφανίζεται στα συνήθη εντομοκτόνα οπότε προτιμάται για την καταπολέμηση εντόμων τα οποία παρουσιάζουν ανθεκτικότητα σε άλλα εντομοκτόνα όπως τα οργανοφωσφορικά, τα καρβαμικά και τα πυρεθρινοειδή (Han et al., 2019; Ngufor et al., 2016). Το chlorfenapyr παρουσιάζει χαμηλή τοξικότητα στα θηλαστικά και σύμφωνα με τον WHO ταξινομείται στα ελαφρώς επικίνδυνα εντομοκτόνα (Raghavendra et al., 2011). Στην παρούσα Διδακτορική Διατριβή εξετάστηκε η επίδρασή του εναντίον του *T. castaneum*.

1.16 Δημογραφία

1.16.1 Ιστορική ανασκόπηση

Η δημογραφία εισήχθη προκειμένου να μελετήσει τους ανθρώπινους πληθυσμούς. Ο όρος «δημογραφία» (démographie) επινοήθηκε από τον Αχιλλέα Γκυλάρ (Achille Guillard, 1799 – 1876) το 1855, ο οποίος συνδύασε τις δύο ελληνικές ρίζες δήμος (demos) που σημαίνει λαός ή κάτοικος ή πληθυσμός και γραφή (graphein), που σημαίνει περιγραφή ή μέτρηση (Carey, 1993; Weeks, 2007). Ο Γκυλάρ χρησιμοποίησε τον όρο της δημογραφίας στον τίτλο του βιβλίου του «Στοιχεία Ανθρώπινης Στατιστικής ή Συγκριτική Δημογραφία», «*Éléments de Statistique Humaine ou Démographie Comparée*» προκειμένου να αποτυπώσει την «κοινωνική και φυσική ιστορία της ανθρωπότητας» (McDonald, 2015; Weeks, 2007). Η δημογραφία ωστόσο, ως αντικείμενο έρευνας, είχε εμφανιστεί πολύ νωρίτερα ακόμη και στους αρχαίους χρόνους από τον Πλάτωνα, ο οποίος μελετούσε τους

πληθυσμούς βάσει αναγνωρισμένων σήμερα δημογραφικών παραμέτρων (Charbit, 2011). Το 1662, πολύ νωρίτερα από την επινοήση του όρου της δημογραφίας, ο John Graunt (1620 – 1674) στο σύγγραμμά του «*Natural and Political Observations*» ανέφερε στατιστικά δεδομένα τα οποία αφορούσαν την ηλικία, την αναλογία φύλου, τις γεννήσεις και τους θανάτους των κατοίκων μιας πόλης τα οποία ανέλυε σε στατιστικούς πίνακες, ενώ μέσα από τις καταγραφές των θανάτων είχε καταφέρει να υπολογίσει και τον συνολικό πληθυσμό των πολιτών του Λονδίνου (Kreager, 1988; Rothman, 1996; Caselli et al., 2006).

1.16.2 Εξέλιξη

Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζεται έντονο ενδιαφέρον για την ανάλυση των πληθυσμών μέσω των δημογραφικών μεθόδων και προτύπων, γεγονός το οποίο προκαλεί τη ραγδαία ανάπτυξη και βελτίωσή τους (Louis and Richard, 2013; Singelmann and Poston, 2020). Σήμερα, η δημογραφία βρίσκει εφαρμογή σχεδόν σε όλους τους κλάδους των επιστημών όπως στον κλάδο της ψυχολογίας (π.χ. Green and Martin, 2017; Erceg et al., 2018; Sharpless, 2021; Kerrison et al., 2022), της κοινωνιολογίας με π.χ. μελέτες που αφορούν τον πολιτισμό (Nikitina, 2017; Milstein, 1971), την εκπαίδευση (Dorbritz, 2015), τη θρησκεία (Wildman et al., 2021), τους μετανάστες (Adelman and Tsao, 2016), τον κλάδο της ιατρικής με μελέτες π.χ. για τη δημόσια υγεία (Pertet et al., 2018) και την επιδημιολογία (Jiménez-Mejías et al., 2015), τον κλάδο των επιχειρήσεων με π.χ. μελέτες της αγοράς (Suh and Chow, 2021), των καταναλωτών (Leonidou et al., 2013) και του marketing (Kohlbacher, 2011), τον κλάδο της οικονομίας διερευνώντας π.χ. τον ρυθμό ανάπτυξης (Cifuentes-Faura, 2021), την αγορά εργασίας (Kuchmaeva, 2021) και τις συντάξεις (Solon'ev, 2013), τον κλάδο της πολιτικής με έρευνες που αφορούν την ασφάλεια (π.χ. Vasilieva et al., 2021) και τα ανθρώπινα δικαιώματα (Carrillo-Flores, 1979; Teitelbaum, 2015; Snacken, 2015) ενώ επεκτείνεται και πέρα από τους ανθρώπινους πληθυσμούς όπως στον κλάδο της δασοκομίας (π.χ. Nagel et al., 2021), της οικολογίας όπως π.χ. βιοποικιλότητα (Mehring et al., 2020), περιβαλλοντική επιβάρυνση (Pereira Barboza et al., 2022) και βιώσιμη ανάπτυξη (Sisaye, 2016), τον κλάδο της αλιείας (π.χ. Santos et al., 2022), της εντομολογίας (π.χ. Qayyum et al., 2018), καθώς και στον σχεδιασμό χώρου π.χ. στην αγροτική ανάπτυξη (Ogryzek et al., 2021) και την αστική ανάπτυξη (Chen et al., 2021). Η πρόοδος της δημογραφίας

οδήγησε στη συλλογή σημαντικών δεδομένων τα οποία μπορούν να αξιοποιηθούν με τα στατιστικά εργαλεία. Επιπλέον, οι στατιστικές μέθοδοι μπορούν να βοηθήσουν στην εξομάλυνση ή τη διόρθωση σφαλμάτων των δεδομένων όταν αυτά είναι ελλιπή ή ακανόνιστα (Bakker and Wicherts, 2011; Michael, 2018).

1.16.3 Ορισμός

Λόγω του γεγονότος ότι η αρχική μορφή της δημογραφίας είχε εφαρμογή σε ανθρώπινους πληθυσμούς, οι ορισμοί οι οποίοι την ακολουθούσαν ήταν σχετικώς περιορισμένοι σε αυτούς. Για παράδειγμα, ο Guillard όρισε την δημογραφία ως «τη φυσική και κοινωνική ιστορία του ανθρώπινου είδους ή τη μαθηματική γνώση των πληθυσμών, των γενικών αλλαγών τους και της φυσικής, αστικής, πνευματικής και ηθικής κατάστασής τους». Απλούστερες εκδοχές ορίζουν τη δημογραφία ως «μία ομάδα ατόμων που συνυπάρχουν σε μια δεδομένη στιγμή» ή «η μελέτη των χαρακτηριστικών των πληθυσμών» (Dodge, 2006) και «απλώς η στατιστική μελέτη ανθρώπινων πληθυσμών». Κάθε επιστημονικός κλάδος έχει δημιουργήσει τον ορισμό του ο οποίος άπτεται καλύτερα στο αντικείμενο το οποίο εξετάζει (Caldwell, 1996; Caselli et al., 2006). Στον κλάδο της βιολογίας, ο οποίος πραγματεύεται τις αλληλεπιδράσεις των οργανισμών και του περιβάλλοντός τους, χρησιμοποιούνται ορισμοί όπως «μία ομάδα ατόμων με μεγάλη πιθανότητα σύζευξης μεταξύ τους σε σύγκριση με την πιθανότητα να συζευχθούν με άτομο άλλου πληθυσμού» και «μία ομάδα διασταυρωμένων οργανισμών οι οποίοι ανήκουν στο ίδιο είδος και καταλαμβάνουν έναν οριοθετημένο χώρο ταυτόχρονα» (Carey, 1993) ενώ πιο αναλυτικά ορίζεται ως η μελέτη του πληθυσμού η οποία τυπικά επικεντρώνεται σε πέντε άξονες: i) το μέγεθος, δηλαδή τον αριθμό των μονάδων του πληθυσμού, ii) τη γεωγραφική κατανομή, iii) τη σύνθεση, όπως π.χ. τα ποσοστά φύλων και ηλικίας, iv) τα στοιχεία της αλλαγής (γεννήσεις, θάνατοι, μετανάστευση) και v) τους καθοριστικούς παράγοντες και τις συνέπειες της αλλαγής του πληθυσμού (Swanson and Stephan, 2004). Στη βιολογία, η δημογραφία αποτελεί ένα εργαλείο που βοηθά στη σύγκριση και την περιγραφή πολλών βιολογικών διεργασιών συμπεριλαμβανομένης της θνησιμότητας και της αναπαραγωγής των ζώντων οργανισμών. Σε κλειστούς πληθυσμούς με σταθερή ηλικιακή κατανομή δύναται να υπολογίσει σημαντικές παραμέτρους όπως τον ενδογενή ρυθμό αύξησης (r), δηλαδή τον βαθμό προσαρμογής του πληθυσμού στο περιβάλλον και τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό (R_0), δηλαδή τον μέσο αριθμό θηλυκών απογόνων που

αποδίδει ένα θηλυκό άτομο στη διάρκεια της ζωής του (MacArthur and Wilson, 1967; Paranikolaou et al., 2019).

Μέσω της δημογραφίας δίνεται η δυνατότητα να κατανοηθεί και να υπολογιστεί όχι μόνο το μέγεθος και η σύνθεση ενός πληθυσμού τη δεδομένη χρονική στιγμή, αλλά αποκαλύπτει και τις κινητήριες δυνάμεις των αλλαγών που συμβαίνουν και προβλέπει το μέγεθος και τη σύνθεση του πληθυσμού σε βάθος χρόνου (Caselli et al., 2006; Dodge, 2006). Για να γίνει όμως αυτό ακολουθείται συγκεκριμένη μεθοδολογία η οποία ξεκινά με τη συλλογή δεδομένων, συνεχίζει με τη δημογραφική ανάλυση και τη μελέτη των δεδομένων και ολοκληρώνεται με την ερμηνεία τους. Εναρκτήριο σημείο αναφοράς βάσει της δημογραφικής ανάλυσης θεωρείται ο «ένας οργανισμός που φέρει δημογραφικά χαρακτηριστικά», δηλαδή το άτομο (Carey, 1993; Sutton and Austin, 2015).

1.16.4 Δημογραφικά πεδία

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω, η δημογραφία καλύπτει ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών. Απόρροια τούτου ήταν η κατηγοριοποίηση του είδους της μελέτης ανάλογα με τον τρόπο της προσέγγισής της. Έτσι, η δημογραφία σήμερα χωρίζεται σε Μαθηματική (Formal Demography), Εφαρμοσμένη (Applied Demography), και Πληθυσμιακής Ανάλυσης ή Δημομετρίας (Population Studies). Η μαθηματική δημογραφία θεωρείται το επίκεντρο των ποσοτικών κοινωνικών επιστημών. Ρόλος της είναι η ανάπτυξη δημογραφικών μεθόδων και τεχνικών. Ως μια πιο αφηρημένη έννοια του όρου, πρωτοεμφανίστηκε σχεδόν παράλληλα με την εμφάνιση των μαθηματικών, ενώ κατά τους ρωμαϊκούς χρόνους εμφανίζονται οι πρώτες πρώιμες γραπτές αναφορές σε αυτήν (Hinde, 1998; Swanson and Pol, 2010; Smith and Keyfitz, 2013). Μεταγενέστερα, πρωτοεμφανίζεται κατά το 1760 στο σύγγραμμα του Leonard Euler, ο οποίος κάνει λόγο για σταθερούς πληθυσμούς, σταθερές ηλικιακές κατανομές και παρουσιάζει πίνακες ζωής (Bacaër, 2011; Vaupel and Villavicencio, 2018).

Αντιθέτως, ο όρος της εφαρμοσμένης δημογραφίας είναι κατά πολύ νεότερος. Έως και τα τέλη του 1970 ήταν ελάχιστα διαδεδομένος ενώ αναγνωρίστηκε ως ξεχωριστό πεδίο της δημογραφίας λίγο πριν το 1990. Ως εφαρμοσμένη δημογραφία θα μπορούσε να περιγραφεί η δημογραφική μελέτη που στοχεύει σε πρακτικές και όχι σε επιστημονικές πληροφορίες, ωστόσο, για ορισμένους τομείς είναι ένα εργαλείο

το οποίο βοηθά στην απόκτηση γνώσης, όπως περί των συνεπειών της δημογραφικής αλλαγής, τη λήψη αποφάσεων, την ανάπτυξη και τον στρατηγικό σχεδιασμό (π.χ. των επιχειρήσεων ή του δημόσιου τομέα) (Morrison, 1988; Swanson et al., 1996; Swanson, 2015; Murdock and Ellis, 2019). Το τρίτο πεδίο, αυτό της Δημομετρίας ή Πληθυσμιακής Ανάλυσης, αφορά την ανάπτυξη της μεθοδολογικής προσέγγισης που έχει σκοπό την εκτίμηση των δημογραφικών μεγεθών (Pflaumer, 2014).

1.16.5 Χρονική διάρκεια των Δημογραφικών μελετών

Παρά το γεγονός ότι το έτος θεωρείται η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μονάδα χρόνου, στη δημογραφία συχνά χρησιμοποιούνται μεγαλύτερες ή μικρότερες χρονικές περίοδοι οι οποίες κυμαίνονται από πολλά έτη έως λεπτά της ώρας ή δευτερόλεπτα, σπανιότερα δε, σε επιστημονικούς τομείς, όπως η ψυχολογία και η αστροφυσική, μπορεί να φτάσουν από τα νανοδευτερόλεπτα έως και το ένα δισεκατομμύριο χρόνια. Ο δημογράφος συχνά δεν μπορεί να γνωρίζει τη χρονική διάρκεια μιας μελέτης, ειδικώς όταν τα στοιχεία της συλλέγονται από άλλους μελετητές (Caselli et al., 2006; Bell, 2015; Riffe et al., 2017).

1.16.6 Βασικές έννοιες

Ως πληθυσμός, ορίζεται μία ομάδα ατόμων του ίδιου είδους τα οποία ζουν σε μια συγκεκριμένη περιοχή με ίδιες ή παρόμοιες περιβαλλοντικές συνθήκες και πόρους την ίδια χρονική περίοδο. Το κυριότερο χαρακτηριστικό του πληθυσμού είναι το μέγεθός του, δηλαδή ο αριθμός των ατόμων που τον αποτελούν (Tarsi and Tuff, 2012). Ιδιαίτερα σημαντική επίσης είναι η σύνθεσή του, δηλαδή τα κύρια στοιχεία του και η συχνότητα αυτών. Ο πληθυσμός είναι έννοια δυναμική, δηλαδή μεταβάλλεται διαρκώς στον χρόνο και τον τόπο (Juliano, 2007). Οι μεταβολές οφείλονται στις γεννήσεις, τους θανάτους ή τη μετανάστευση και οι τιμές που λαμβάνουν καθορίζουν την πορεία του. (Bongaarts, 2009; Roser et al., 2013). Κατά τους Tarsi and Tuff (2012) η βασική μεταβλητή της δημογραφίας είναι το μέγεθος του πληθυσμού σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.

Ανάλογα με τη φύση του, ο πληθυσμός χωρίζεται σε δύο κατηγορίες οι οποίες προσεγγίζονται με διαφορετική μεθοδολογία. Η μία κατηγορία αφορά αλλαγές του

πληθυσμού οι οποίες συμβαίνουν με ενδογενή τρόπο δηλαδή αλλαγές που προέρχονται από εσωτερικά αίτια, χωρίς την επέμβαση εξωτερικών παραγόντων. Η δεύτερη κατηγορία αφορά πληθυσμούς οι οποίοι κατά τη μεταβολή τους ανταλλάσσουν άτομα με άλλους πληθυσμούς. Η ενδογενής διαδικασία βασίζεται στην αναπαραγωγή και τον θάνατο, φυσικές ροές εισόδου και εξόδου, ικανότητα που χαρακτηρίζει τους ζώντες οργανισμούς και βρίσκεται στο επίκεντρο της δημογραφικής ανάλυσης (Caselli et al., 2006; Alho, 2008; Kreager, 2009; Swanson and Tedrow, 2013; Cipriani and Fioroni, 2021). Η διαφορά μεταξύ των τιμών των γεννήσεων και θανάτων καθορίζει το μέγεθος και την πορεία του ρυθμού της ανάπτυξης του πληθυσμού (Carey, 1993; Bongaarts, 2009; Crossman, 2021). Σημαντική μεταβλητή του «ενδογενούς» πληθυσμού είναι η ηλικία των ατόμων του. Ένα άτομο εισέρχεται στον πληθυσμό κατά την ηλικία των 0 ετών όπου ξεκινά ο κύκλος της ζωής του ώσπου να φτάσει σε ηλικία αναπαραγωγής, ακολουθεί το γήρας, το οποίο τουλάχιστον για τα θηλυκά άτομα συνεπάγεται τη διακοπή της δυνατότητας αναπαραγωγής τους, μέχρι να επέλθει ο θάνατος, με εξαίρεση τις περιπτώσεις κατά τις οποίες το τέλος της ζωής επέρχεται νωρίτερα από άλλες αιτίες (Detinova, 1968; Prskawetz et al., 2007; Mohd, et al., 2021).

Ακόμη μια θεμελιώδης μεταβλητή είναι το φύλο καθ' ότι για να είναι επιτυχής η αναπαραγωγή και η δημιουργία ενός τρίτου ατόμου απαιτούνται δύο άτομα αντίθετου φύλου. Η αριθμητική ισορροπία μεταξύ των δύο φύλων έχει αποδειχθεί ως καθοριστικός παράγοντας στην έκφραση της αναπαραγωγικής ικανότητας ενός πληθυσμού (Hesketh and Xing, 2006; Caselli et al., 2006; Ritchie and Roser, 2019). Μέσω της δημογραφίας είναι δυνατόν να καθοριστεί εάν ένας πληθυσμός είναι βιώσιμος ή εάν αργά ή γρήγορα θα εξαλειφθεί δεδομένου ότι ουδείς πληθυσμός μπορεί να επιβιώσει εάν γεννιούνται λιγότεροι απόγονοι σε κάθε γενιά από ότι στην προηγούμενη (White, 2017).

Η συλλογή των δεδομένων περί του πληθυσμού πραγματοποιείται είτε με τη μέθοδο της απογραφής είτε μέσω της έρευνας. Συνήθως, η απογραφή σκιαγραφεί πλήρως τα δεδομένα μιας συγκεκριμένης περιοχής ενώ η έρευνα στοχεύει στην εκτίμηση των χαρακτηριστικών ενός πληθυσμού σε ένα δείγμα (Carey, 1993; Van Dalen and Henkens, 2012; Martínez-Mesa et al., 2016). Η μελέτη σειράς (cohort studies) είναι μια τεχνική στατιστικής ανάλυσης δεδομένων η οποία εισήχθη αρχικά στις κοινωνικές επιστήμες. Αφορά σύνολα ατόμων τα οποία συγκεντρώνουν κοινά χαρακτηριστικά ή βιώνουν το ίδιο σημαντικό γεγονός σε ένα συγκεκριμένο χρονικό

πλαίσιο (Dawei et al., 2016). Θεωρείται σημαντικό εργαλείο για τον σχεδιασμό της έρευνας διότι βασίζεται στην μελέτη της παρατήρησης αντίθετα με την πειραματική μελέτη (Setia, 2016).

1.16.7 Δημογραφικά πρότυπα

Τα δημογραφικά πρότυπα εφαρμόζονται σε δημογραφικές μελέτες ώστε να αναλύσουν τις αλλαγές στους πληθυσμούς με απλούς μαθηματικούς τύπους (Coale and Trussell, 1996; Jean, 2016; Frisman et al., 2021). Πρόκειται για τους πίνακες ζωής ή το πρότυπο μελέτης σειράς τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε μεμονωμένους ή πολλαπλούς πληθυσμούς (Kobayashi, 2019). Τα δημογραφικά πρότυπα, χρησιμοποιούνται επίσης για τον εντοπισμό και τη διόρθωση ελαττωματικών δεδομένων και είναι ιδιαίτερα διαδεδομένα στις λιγότερο ανεπτυγμένες χώρες όπου τα ποιοτικά δεδομένα είναι περιορισμένα (Brass, 1996; Cleland, 1996). Ο Alfred James Lotka (1880 – 1949) ήταν ο πρώτος δημιουργός μαθηματικών προτύπων σε σταθερούς πληθυσμούς αναπτύσσοντας τη θεωρία περί δυναμικής του πληθυσμού (Lotka, A.J., 1989; Veron, 2008; Kingsland, 2015), ενώ λίγο αργότερα, κατά τα μέσα του 20ού αιώνα, ο Jean Bourgeois – Pichat, ασχολούμενος με σταθερούς και ημισταθερούς πληθυσμούς, δημιούργησε το πρότυπο της σχέσης μεταξύ δημογραφικών μεταβλητών (Bourgeois-Pichat, 1971; Véron, 2009). Σήμερα, τα δημογραφικά πρότυπα θεωρούνται αναπόσπαστο κομμάτι της μαθηματικής δημογραφίας και είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με τη στατιστική δημογραφία. Εφαρμόζονται με επιτυχία κυρίως σε έρευνες που αφορούν τη θνησιμότητα, την επιβίωση και τη γονιμότητα (Watts and Holekamp, 2009; Vaupel, et al., 2021). Στην εντομολογία, τα δημογραφικά πρότυπα προσφέρουν χρήσιμες πληροφορίες για τον τρόπο της διαχείρισης των επιβλαβών εντόμων προβλέποντας με ακρίβεια την εμφάνισή τους στο εκάστοτε υποθετικό περιβάλλον με την εξέταση των ειδών υπό διαφορετικές περιβαλλοντικές συνθήκες ή άλλους βιοτικούς ή αβιοτικούς παράγοντες (Jian et al., 2018).

1.16.8 Βιοδημογραφία

Η παρούσα μελέτη έχει τις βάσεις της στη βιοδημογραφία. Η βιοδημογραφία, είναι ένας υποκλάδος της δημογραφίας ιδιαίτερα χρήσιμος για τις βιολογικές

επιστήμες διότι βοηθά στην κατανόηση των λειτουργικών διεργασιών των ζώντων οργανισμών. Οι αναλύσεις που χρησιμοποιούνται μελετούν δεδομένα του πληθυσμού σε συνάρτηση με διαφόρους βιοτικούς ή αβιοτικούς παράγοντες με σκοπό να διερευνήσουν, να επεξηγήσουν, να περιγράψουν και να προβλέψουν τις ποικίλες οικολογικές διεργασίες. Οι πληθυσμοί οι οποίοι εξετάζονται μπορεί να αφορούν ένα, δύο ή και περισσότερα είδη μιας γεωγραφικής περιοχής ή ενός οικοσυστήματος. Για την ανάλυση των πληροφοριών χρησιμοποιούνται διάφορα ειδικά μαθηματικά πρότυπα (Eykhoff, 1974; Carey, 2001; Gertsev and Gertseva, 2004; Pasquali et al., 2022). Τα μαθηματικά πρότυπα απαντούν σε ερωτήματα τα οποία αφορούν το μέγεθος του πληθυσμού (population size), την πυκνότητα του πληθυσμού (population density), τη γονιμότητα (fecundity), την αναλογία φύλου (sex ratio), τη θνησιμότητα (mortality), την επιβίωση (survival), τη δομή της ηλικίας (age structure), τη διάρκεια ζωής (longevity), την ταχύτητα αύξησης του πληθυσμού (population growth) και της ανάπτυξης των ατόμων (growth rate), την αναπαραγωγική ικανότητα (reproductive rate), τον ενδοειδικό ανταγωνισμό (intra-specific competition) ή τον διεϊδικό ανταγωνισμό (interspecific competition) (Carey, 2001; Tarsi and Tuff, 2012; Barretto et al., 2019).

Η βιοδημογραφία όπως και γενικότερα η δημογραφία έχουν αναδειχθεί ως ιδιαίτερα χρήσιμα εργαλεία από την επιστημονική κοινότητα και πολλές επιστήμες βασίζονται το ερευνητικό μέρος τους σε αυτές. Στον κλάδο της εντομολογίας υπάρχουν δεκάδες σχετικές αναφορές. Παρ' όλα αυτά, οι μελέτες αυτές εξετάζουν την επίδραση των παραμέτρων στους υπό εξέταση πληθυσμούς ενώ φαίνεται πως υπάρχει ελάχιστη αναφορά σε μελέτες που πραγματεύονται τις μεταβολές των απογόνων των υπό μελέτη πληθυσμών (Carey, 2001; Ramos Aguila et al., 2020).

Παρακάτω παρουσιάζονται παραδείγματα εντομολογικών μελετών στα οποία είναι διακριτή η σημασία του οφέλους που μπορεί να προσφέρουν οι δημογραφικές μελέτες τόσο στον άνθρωπο όσο και στο περιβάλλον. Οι Fernandes et al. (2019), πρότειναν μια νέα τεχνική εκτροφής του *Tetrastichus giffardianus* Silvestre (Hymenoptera: Eulophidae) στο εργαστήριο, λαμβάνοντας υπ' όψιν τα δημογραφικά στοιχεία του πληθυσμού του εντόμου υπολογίζοντας διάφορες δημογραφικές μεταβλητές μέσω του πίνακα ζωής της γονιμότητας στηριζόμενοι στον Silveira Neto (1976). Συγκεκριμένα, οι μεταβλητές αυτές ήταν i) ο αριθμός των απογόνων (ND) ο οποίος αποκτήθηκε από την προσθήκη των εξερχόντων και μη εξερχόντων παρασιτοειδών, ii) η αναλογία του φύλου (SR) η οποία προσδιορίστηκε

χρησιμοποιώντας την εξίσωση: $SR = (\text{αριθμός θηλυκών}) / (\text{αριθμός θηλυκών} + \text{αριθμός των αρσενικών})$, iii) ο απόλυτος αναπαραγωγικός ρυθμός (m_x) που εκφράζει τον μέσο αριθμό των θηλυκών απογόνων που παράγονται ανά θηλυκό για την επόμενη γενιά, iv) το αθροιστικό ποσοστό επιβίωσης των ατόμων έως την ηλικία X (l_x), v) ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός (R_o), vi) το συνολικό ποσοστό ωτοκίας (TBR), vii) ο ρυθμός αύξησης (r), viii) ο ενδογενής ρυθμός αύξησης (r_m), ix) ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης του πληθυσμού (λ), x) η μέση διάρκεια γενεάς (T) σε ημέρες και xi) ο χρόνος διπλασιασμού του πληθυσμού (DT) σε ημέρες. Οι συγγραφείς στηριζόμενοι στις παραπάνω δημογραφικές παραμέτρους, βρήκαν ότι με την τεχνική εκτροφής που χρησιμοποίησαν, καθίσταται δυνατή η διατήρηση πληθυσμών του *T. giffardianus* και η δυνατότητα του πολλαπλασιασμού του στο εργαστήριο με σκοπό τη χρήση του στην βιολογική αντιμετώπιση του *Ceratitis capitata* (Wiedemann) (Diptera:Tephritidae).

Ορισμένες από τις δημογραφικές μεταβλητές που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη παράγραφο (πχ. λ , T , r_m , m_x) αξιολογήθηκαν για το παρασιτοειδές *Aphidius matricariae* Haliday (Hymenoptera: Braconidae: Aphidiinae) σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες (20, 25 και 30 °C) (Rashki et al., 2020). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το *A. matricariae* είναι ευαίσθητο στους 30 °C, εμφανίζοντας χαμηλή αναπαραγωγή, επιβίωση και σύντομη μακροζωία των τελείων ατόμων. Επιπλέον, φάνηκε να προσαρμόζεται καλά στις θερμοκρασίες κάτω των 30 °C. Συνεπώς, η κατανόηση των βέλτιστων θερμοκρασιών σχετικά με τις βιολογικές παραμέτρους του *A. matricariae* θα μπορούσε να ωθήσει την εξαπόλυση του εντόμου σε διαφορετικές περιοχές και να ενισχύσει τη μαζική παραγωγή του όταν πρόκειται να εφαρμοστεί σε ένα πρόγραμμα ολοκληρωμένης αντιμετώπισης (Integrated Pest Management, IPM) για τον επιτυχή βιολογικό έλεγχο του *Schizaphis graminum* (Rondani) (Hemiptera: Aphididae).

Η δημογραφία προτείνεται για τον προσδιορισμό της τοξικότητας των μακροπρόθεσμων επιπτώσεων ενός εντομοκτόνου δεδομένου ότι αποτυπώνει με ακρίβεια την επίδρασή του (Rahmani and Bandani, 2016). Για παράδειγμα, οι Iftikhar et al. (2020), αξιολόγησαν τις υποθανατηφόρες επιδράσεις του ρυθμιστή ανάπτυξης εντόμων pyriproxyfen στο *Hippodamia convergens* Guérin-Méneville (Coleoptera: Coccinellidae), υπολογίζοντας τις δημογραφικές παραμέτρους μέσω της θεωρίας του πίνακα ζωής για την ηλικία και τα δύο φύλα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το pyriproxyfen επηρεάζει τις παραμέτρους αύξησης του πληθυσμού του *H. convergens*

και ότι μπορεί να μειώσει την αποτελεσματικότητά του ως αρπακτικό κατά την χρήση του στη βιολογική αντιμετώπιση των εντόμων. Ομοίως, σε προηγούμενη μελέτη οι Rahmani and Bandani (2016) εξέτασαν τις υποθανατηφόρες επιδράσεις του καρβαμιδικού εντομοκτόνου pirimicarb κατά των προνυμφών τρίτου σταδίου του ίδιου εντόμου προσδιορίζοντας τις επιπτώσεις του εντομοκτόνου στις δημογραφικές παραμέτρους του *H. convergens* υπό εργαστηριακές συνθήκες. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το pirimicarb δεν επηρέασε τις μεμονωμένες παραμέτρους ζωής [πχ. χρόνος ανάπτυξης της προνύμφης ή της νύμφης, μακροζωία των τελείων, μακροζωία των θηλυκών και των αρσενικών ατόμων, περίοδος πριν την ωοτοκία των τελείων ατόμων (APOP) και συνολική περίοδος πριν την ωοτοκία (TPOP)]. Ωστόσο, επηρέασε τις παραμέτρους του πληθυσμού, όπως τον ενδογενή ρυθμό αύξησης (r), τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό (R_0), τη μέση διάρκεια γενεάς (T) και τον πεπερασμένο ρυθμό αύξησης (λ). Επομένως, το pirimicarb μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα του συγκεκριμένου αρπακτικού ακόμη και σε χαμηλές συγκεντρώσεις. Συνεπώς, θα πρέπει να δίνεται η απαιτούμενη προσοχή όταν τα παραπάνω εντομοκτόνα πρόκειται να χρησιμοποιηθούν σε ένα πρόγραμμα ολοκληρωμένης διαχείρισης επιβλαβών οργανισμών.

1.16.9 Η θερμοκρασία ως κύριος παράγοντας των δημογραφικών μελετών.

Στην επιστήμη της βιολογίας και ιδιαίτερα της εντομολογίας, οι δημογραφικές παράμετροι παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις όταν εξετάζονται σε συνάρτηση με την θερμοκρασία. Τούτο συμβαίνει διότι τα έντομα προσαρμόζουν τη θερμοκρασία του σώματός τους ακολουθώντας τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος στο οποίο βρίσκονται (ποικιλόθερμοι ή ποικιλοθερμικοί οργανισμοί) (Thomas and Blanford, 2003; Guschina and Harwood, 2006; Ji et al., 2021). Τέτοιοι οργανισμοί, εκτός από πολλά ασπόνδυλα ζώα συμπεριλαμβανομένων των εντόμων είναι και ορισμένα σπονδυλωτά π.χ. αμφίβια, ιχθύες, ερπετά και σπανιότερα κάποια θηλαστικά όπως π.χ. το *Heterocephalus glaber* (ο γυμνός τυφλοπόντικας) και οι βραδύποδες του γένους *Bradypus* sp. και *Choloepus* sp. (Britton and Atkinson, 1938; Buffenstein and Yahav, 1991; Daly et al., 1997; Streicher et al., 2011; Cliffe et al., 2018). Τα ποικιλόθερμα ζώα και κατ' επέκταση τα έντομα, επιβιώνουν σε ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών σε σχέση με αυτό των ομοθέρμων ζώων ενώ η ταχύτητα των περισσότερων βιοχημικών αντιδράσεων και του μεταβολισμού τους επηρεάζεται ανάλογα με τη θερμοκρασία. Η θερμοκρασία, έχει τη δυνατότητα να μεταβάλλει

διάφορα άλλα βιολογικά χαρακτηριστικά συμπεριλαμβάνοντας την αναπαραγωγική ικανότητα, την ταχύτητα ανάπτυξης, τη διάρκεια ζωής, τη θνησιμότητα και την πληθυσμιακή αύξηση (Kontodimas et al. 2004; Savage et al., 2004; Nedvěd, 2009; Majdi et al., 2019; Sun et al., 2022). Τα έντομα, όπως άλλα ασπόνδυλα ζώα, χρειάζονται μια ορισμένη ποσότητα θερμότητας για να ολοκληρώσουν έναν κύκλο ζωής - ανάπτυξής τους και να περάσουν στον επόμενο. Η ποσότητα της θερμότητας που απαιτείται για την ολοκλήρωση της ανάπτυξης ενός είδους οργανισμού, είναι πάντα σταθερή και εξαρτάται από τα θερμικά όρια και τον χρόνο. Η τιμή αυτή ορίζει τις βαθμομέρες (degree-days, °D). Η τιμή των βαθμομερών είναι το αποτέλεσμα του υπολογισμού της ανάπτυξης των εντόμων σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι του υπολογισμού τους. Η απλούστερη μέθοδος ονομάζεται μέθοδος του μέσου όρου και υπολογίζεται από τον τύπο [(μέγιστη θερμοκρασία. + ελάχιστη θερμοκρασία.)/2] - αναπτυξιακό όριο = βαθμομέρα (Gabriella and Douglas, 1998). Το σημείο στο οποίο η ανάπτυξη – επιβίωση του εντόμου σταματά λέγεται ανώτερο ή κατώτερο θερμικό όριο (development thresholds). Κατά τα όρια αυτά, η ταχύτητα ανάπτυξης ισούται με το μηδέν. Αντιθέτως, το σημείο της θερμοκρασίας στο οποίο ξεκινά η μείωση του ρυθμού ανάπτυξης ορίζεται ως το ανώτερο όριο ανάπτυξης (Zilahi-Balogh and Pfeiffer, 1998). Το φαινόμενο κέντρισε το επιστημονικό ενδιαφέρον με αποτέλεσμα να δημιουργηθούν ποικίλα μαθηματικά πρότυπα για τον υπολογισμό του (Briere et al., 1999; Kontodimas et al. 2004; Doherty et al., 2018; Santos and Marchioro, 2021; Régnier et al., 2022).

1.16.10 Στατιστική ανάλυση

Εκτός των θερμικών ορίων τα μαθηματικά πρότυπα κέντρισαν το ενδιαφέρον των ερευνητών για τη μελέτη διαφόρων οικολογικών παραμέτρων. Στην παρούσα εργασία για παράδειγμα, εξετάστηκε ο ρυθμός ανάπτυξης, ο ενδογενής ρυθμός αύξησης και τα θερμικά όρια του *T. castaneum* σε συνάρτηση με ένα σταθερό εύρος θερμοκρασιών μέσω του μη γραμμικού μαθηματικού υποδείγματος «Briere» και του γραμμικού προτύπου «Ikemoto and Takai» (Briere et al. 1999, Ikemoto and Takai, 2000) ενώ με το μαθηματικό υπόδειγμα «Kim and Lee» εκφράστηκε η επίδραση της θερμοκρασίας στην επιβίωση για το κάθε στάδιο ανάπτυξης του εντόμου (Kim and Lee, 2003; Son and Lewis, 2005).

Τα αποτελέσματα των μαθηματικών εκτιμήσεων μπορούν να δώσουν ιδιαίτερα χρήσιμες πληροφορίες οι οποίες μπορεί να αφορούν π.χ. την γεωγραφική εξάπλωση ή την διαχείριση του υπό εξέταση είδους. Επιπλέον, δύνανται να δοθούν πληροφορίες για το φαινόμενο της κλιματικής αλλαγής το οποίο φαίνεται τον τελευταίο καιρό να επηρεάζει έντονα την μεταναστευτική τάση των ειδών, γεγονός που χρήζει τη γνώση του βιώσιμου εύρους θερμοκρασιών πολύτιμη (Black et al., 2008; Jaramillo et al., 2009; Rebaudo et al., 2018; Soldatenko et al., 2021; Din et al., 2022).

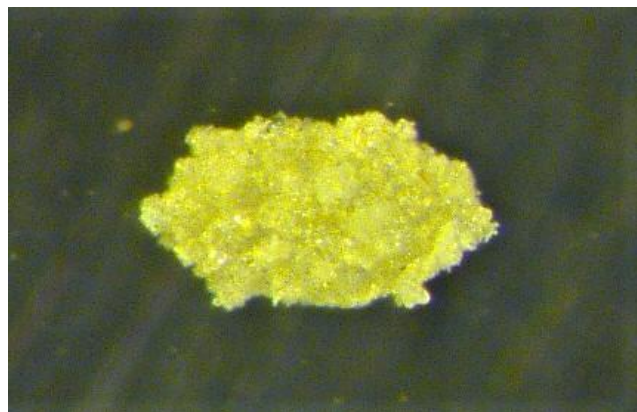
1.16.11 Πίνακες ζωής

Ένα χρήσιμο εργαλείο που χρησιμοποιείται στην ανάλυση των δημογραφικών παραμέτρων είναι οι πίνακες ζωής. Οι πίνακες ζωής χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν και να αναλύσουν τα στατιστικά στοιχεία τα οποία αφορούν έναν κλειστό πληθυσμό σε κάθε ηλικία. Στην εντομολογία, οι πίνακες ζωής αποτυπώνουν τις γεννήσεις και τους θανάτους σε ορισμένο χρόνο και δίνουν πληροφορίες για τις πληθυσμιακές παραμέτρους, όπως η ανάπτυξη, η γονιμότητα, η επιβίωση, η θνησιμότητα, η αναπαραγωγική ικανότητα, η ταχύτητα ανάπτυξης, η προσδοκώμενη διάρκεια ζωής, η αναπαραγωγική αξία, η διάρκεια γενεάς κ.α. (Carey, 1993; Amiri et al., 2010; Pavia et al. 2012; Papanikolaou et al., 2013; Ning et al., 2017; Herrero et al., 2018; Otieno et al., 2019).

1.17 Εικόνες



1.1 Ωο *T. castaneum*
εναποτεθέν σε ελεύθερη
επιφάνεια



1.2 Ωο *T. castaneum*
εναποτιθέν σε αλεύρι



1.3 Ραχιαία όψη
προνύμφης *T. castaneum*
8^{ης} ηλικίας



1.4 Στερνική όψη
προνύμφης *T. castaneum*
8^{ης} ηλικίας



1.5 Ραχιαία όψη νύμφης
T. castaneum



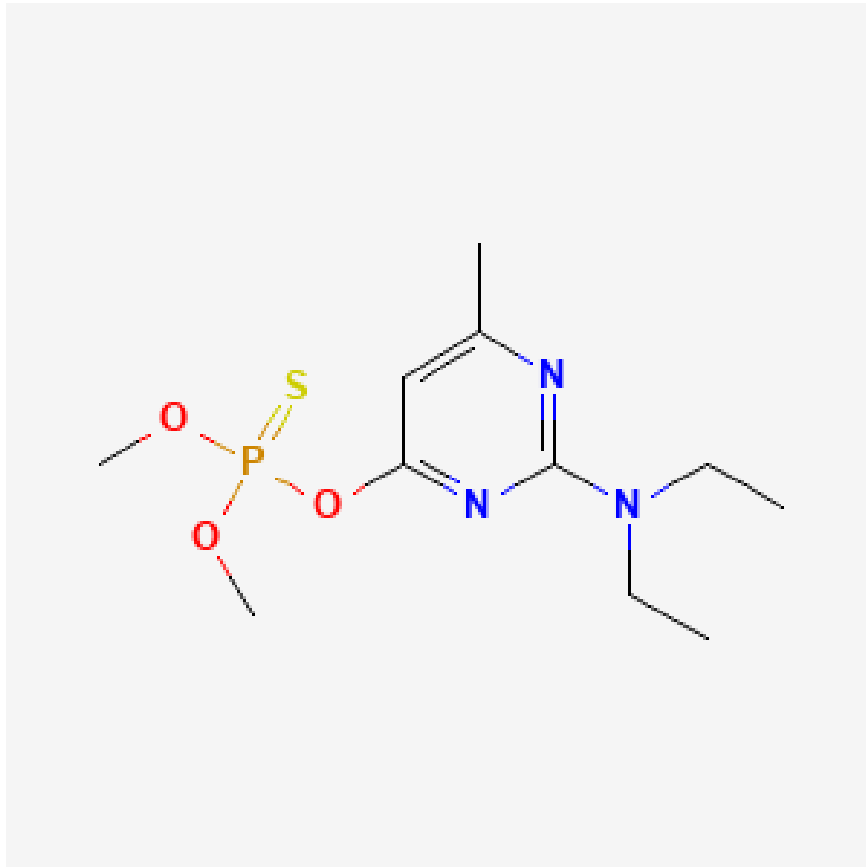
1.6 Στερνική όψη νύμφης
T. castaneum



1.7 Ραχιαία όψη τελείου
T. castaneum

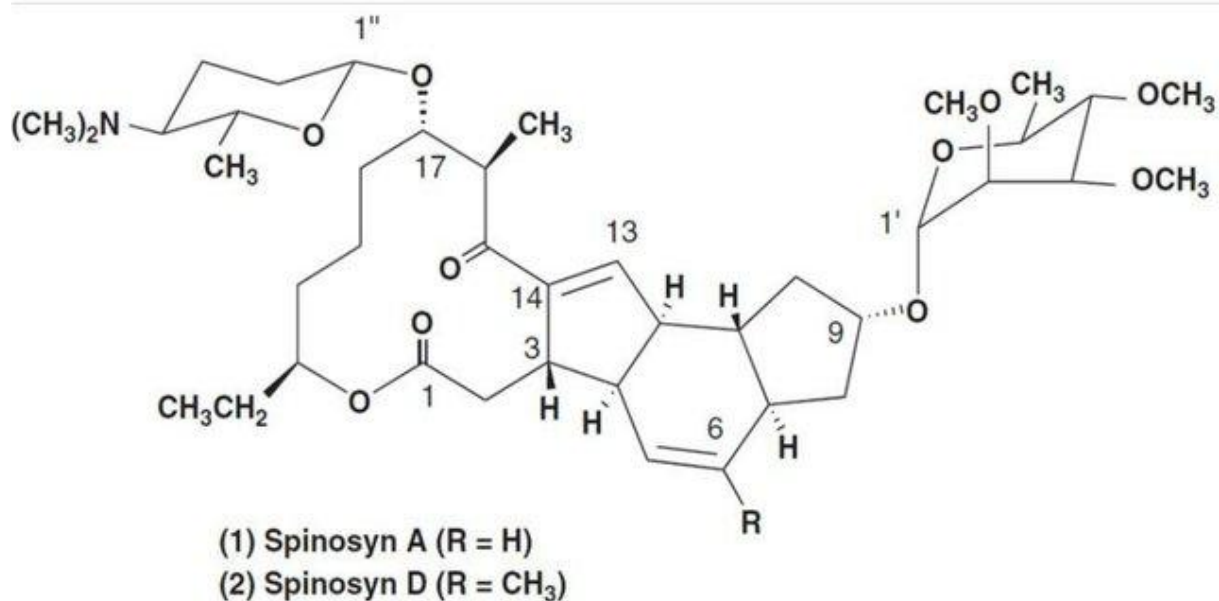


1.8 Στερνική όψη τελείου *T.*
castaneum



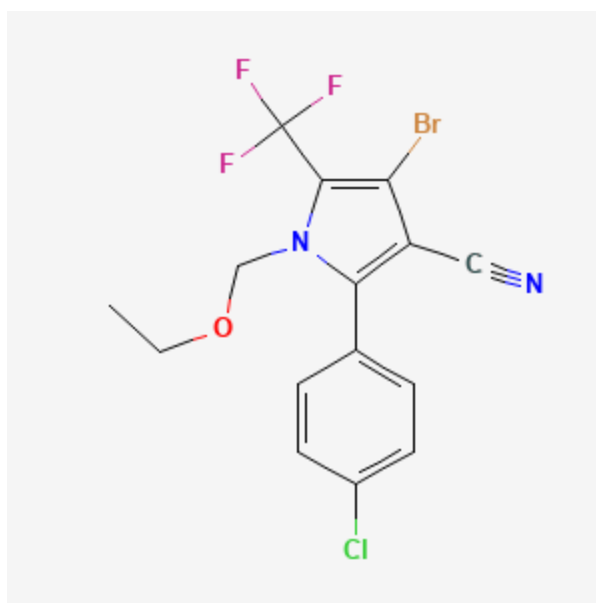
Εικ. 1.9 Συντακτικός τύπος του οργανοφωσφορικού εντομοκτόνου pirimiphos-methyl.

Πηγή: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Pirimiphos-methyl>



Εικ. 1.10. Συντακτικός τύπος του εντομοκτόνου spinosad

Πηγή: Aboul-Enein and Ahmed, (2012)



Εικ. 1.11 Συντακτικός τύπος του εντομοκτόνου chlorfenapyr

Πηγή: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Chlorfenapyr>

1.18 Βιβλιογραφία

- Abdullahi, G., Muhamad, R., Sule, H., (2019). Biology, host range and management of red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae): A review. *Taraba J. Agric. Res.* 7: 48–64.
- Aboul-Enein, A.M., Aboul-Soud, M.A., Said, H.K., Ali, H.F., Ali, Z.Y., Mahdi, A.M., Giesy, J.P., (2012). Hepatoprotective effects of antioxidants against non-target toxicity of the bio-insecticide spinosad in rats. *Afr. J. Pharm. Pharmacol.* 6: 550–559.
- Adelman, R.M., Tsao, H.S., (2016). Deep South demography: New immigrants and racial hierarchies. *Sociol. Spectr.* 36: 337–358.
- Agarwal, A., Agashe, D., (2020). The red flour beetle *Tribolium castaneum*: A model for host-microbiome interactions. *PLoS One* 15: e0239051.
- Alho, J. M., (2008). Migration, fertility, and aging in stable populations. *Demography* 45, 641–650.
- Amiri, A., Talebi, A.A., Zamani, A.A., Kamali, K., (2010). Effect of temperature on demographic parameters of the hawthorn red midget moth, *Phyllonorycter corylifoliella*, on apple. *J. Insect Sci.*10:134.
- Bacaër, N., (2011). Euler and the geometric growth of populations (1748–1761). In: A short history of mathematical population dynamics. London. *Springer* pp. 11–20.
- Bacci, L., Lupi, D., Savoldelli, S., Rossaro, B., (2016). A review of Spinosyns, a derivative of biological acting substances as a class of insecticides with a broad range of action against many insect pests. *J. Entomol. Acarol. Res.* 48: 40–52.
- Bakker, M., Wicherts, J.M., (2011). The (mis)reporting of statistical results in psychology journals. *Behav. Res. Methods* 43: 666–678.
- Baldwin, Rebecca and Fasulo, R. Thomas, (2003). Red flour beetle. Florida department of agriculture and consumer services, University of Florida.
- Barretto, J.W., Cultid-Medina, C.A., Escobar, F., (2019). Annual abundance and population structure of two dung beetle species in a human-modified landscape. *Insects* 10: 2.

- Bell, M., (2015). Demography, time and space. *J. Popul. Res.* 32: 173–186.
- Bertoin, J., (2016). Mathematical models for population dynamics: Randomness versus determinism. *Hal-01262712v2*
- Black, R., Skeldon, R., Murata, A., Schmidt-Verkerk, K., (2008). Demographics and climate change: Future trends and their policy implications for migration. Development research centre on migration, globalisation and poverty (University of Sussex), Brighton.
- Blum, M.S., (1981). Chemical defenses of arthropods. New York. *Academic press*.
- Bongaarts, J., (2009). Human population growth and the demographic transition. *Philos. Trans. R. Soc. Lond., B, Biol. Sci.* Series B. 364: 2985–2990.
- Borgemeister, C., Adda, C., Djomamou, B., Degbey, P., Agbaka, A., Djossou, F., Meikle, W.G., Markham, R.H., (1994). The effect of maize cob selection and the impact of field infestation on stored maize losses by larger grain borer (*Prostephanus truncatus* (Horn) Coleoptera: Bostrichidae) and associated storage pests. In Highley, E., Wright, E.J., Banks, H.J., Champ, B.R., (eds.); CAB International: Wallingford, In *Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-Product Protection, Canberra, Australia, 17–23 April 1994*; UK, pp. 906–909.
- Bourgeois-Pichat, J., (1971). Stable, semi-stable populations and growth potential. *Popul. Stud.* 25: 235–254.
- Bousquet, Y., Thomas, D.B., Bouchard, P., Smith, A.D., Aalbu, R.L., Johnston, M.A., Steiner, W.E.J., (2018). Catalogue of Tenebrionidae (Coleoptera) of North America. *ZooKeys* 728: 1–455.
- Brass, W. (1996). Demographic data analysis in less developed countries: 1946-1996. *Popul. Stud.*, 50: 451–467.
- Braitberg, G., (2019). Drugs and antidotes in acute intoxication. In: C., Ronco, R., Bellomo, J.A., Kellum, Z., Ricci, (eds.) *Critical care nephrology*. Third ed. *Elsevier*; 574–588.
- Briere, J.F., Pracros, P., Le Roux, A.Y., Pierre, J.S., (1999). A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environ. Entomol.* 28: 22–29.
- Britton, S. W., Atkinson, W. E., (1938). Poikilothermism in the sloth. *J. Mammal.* 19: 94.

- Buffenstein, R., Yahav, S., (1991). Is the naked mole-rat *Hererocephalus glaber* an endothermic yet poikilothermic mammal? *J. Therm. Biol.* 16: 227–232.
- Caldwell, J. C., (1996). Demography and social science. *Popul. Stud.*, 50: 305–333.
- Calvin, Dennis, (2017). Confused flour beetle and red flour beetle. College of Agricultural Sciences. The Pennsylvania State University.
- Carey, J. R., (1993). Applied demography for biologists: With special emphasis on insects. New York. *Oxford University Press*.
- Carey, J. R., (2001). Insect biodemography. *Annu. Rev. Entomol.*, 46: 79–110.
- Carrillo-Flores, A., (1979). Demographic policies, poverty and human rights. *Gac. Med. Mex.* 115: 203–208
- Cassi, S.M., (2017). Approaches for the biological control of stored product pests. *Universitat Autònoma de Barcelona* p. 17.
- Charbit, Y., (2011). The classical foundations of population thought: From plato to Quesnay, Dordrecht. *Springer*.
- Chen, X., Li, F., Li, X., Hu, Y., Hu, P., (2021). Quantifying the demographic distribution characteristics of ecological space quality to achieve urban agglomeration sustainability. *Environ. Res. Lett.* 16: e094025.
- Cifuentes-Faura, J., (2021). COVID-19 mortality rate and its incidence in Latin America: Dependence on demographic and economic variables. *Int. J. Environ. Res. Public Health.*, 18: e6900.
- Cipriani, G., and Fioroni, T., (2021). Endogenous demographic change, retirement, and social security. *Macroecon. Dyn.*, 25: 609–631.
- Cleland, J. (1996). Demographic data collection in less developed countries 1946-1996. *Popul. Stud.*, 50: 433–450.
- Cliffe, R.N., Scantlebury, D.M., Kennedy, S.J., Avey-Arroyo, J., Mindich, D., Wilson, R.P., (2018). The metabolic response of the *Bradypus sloth* to temperature. *PeerJ.* 2018: e5600.
- Coale, A., and Trussell, J., (1996). The Development and use of demographic Models. *Popul. Stud.* 50: 469–484.

- Crossman, A., (2021). What Is the Demographic Transition Model?. *ThoughtCo*,
<https://www.thoughtco.com/demographic-transition-definition-3026248>
- Daly, H.V., Doyen, J.T., Purcell, A.H., (1998). Introduction to insect biology and diversity (2nd ed.). New York. *Oxford University press*.
- Daly, T.J.M., Williams, L.A., Buffenstein, R., (1997). Catecholaminergic innervation of interscapular brown adipose tissue in the naked mole-rat (*Heterocephalus glaber*). *J. Anat.* 190: 321–326.
- David, M.D., (2021). The potential of pro-insecticides for resistance management. *Pest Manag. Sci.* 77: 3631–3636.
- Dawei, J., Qingchao, C., Gang, C., Jagadish, H.V., Beng, C.O., Kian-Lee, T., Anthony, K.H.T., (2016). Cohort Query Processing. *Proc. VLDB Endow.* 10.
- Detinova, T.S., (1968). Age structure of insect populations of medical importance. *Annu. Rev. Entomol.* 13: 427–450.
- Din, A., Khan, F.M., Khan, Z.U., Yusuf, A., Munir, T., (2022). The mathematical study of climate change model under nonlocal fractional derivative. *Partial. Differ. Equ. Appl. Math.* 5. e100204
- Dodge, Y., (2006). The Oxford dictionary of statistical terms. Oxford. *Oxford University Press*.
- Doherty, J.F., Guay, J.F., Cloutier, C., (2018). Novel temperature-dependent development rate models for postdiapause egg eclosion of three important arthropod pests found in commercial Christmas tree plantations of southern Québec, Canada. *Environ. Entomol.* 47: 715–724.
- Dorbritz, J., (2015). Parity distributions according to birth cohorts, family status and education with special attention given to childlessness and large families: Eine demografisch-soziologische analyse. *J. Fam. Res.* 27: 299–321.
- Erceg, N., Galić, Z., Bubić, A., (2018). The psychology of economic attitudes - moral foundations predict economic attitudes beyond socio-demographic variables. *Croat. Econ. Surv.* 20: 37–70.
- Eykhoff, P., (1974). System identification: Parameter and state estimation. London. *John Wiley & Sons*.

- Fernandes, E.C., Souza, M.M., Alves, M.I., Felipe, A.G.N., Araujo, E.L., (2019). Rearing technique and demographic parameters of *Tetrastichus giffardianus* Silvestre (Hymenoptera: Eulophidae). *Semina: Cienc. Agrar.* 40: 2201–2208.
- Fields, S., Johnston, M., (2005). Whither model organism research? *Science* 307: 1885–1886.
- Frisman, E.Y., Zhdanova, O.L., Kulakov, M.P., Neverova, G.P., Revutskaya, O.L., (2021). Mathematical modeling of population dynamics based on recurrent equations: results and prospects. Part I. *Biol. Bull. Russ. Acad. Sci.* 48: 1–15.
- Galagarza, O.A., Ramirez-Hernandez, A., Oliver, H.F., Álvarez Rodríguez, M.V., Valdez Ortiz, M.d.C., Pachari Vera, E., Cereceda, Y., Diaz-Valencia, Y.K., Deering, A.J., (2021). Occurrence of chemical contaminants in peruvian produce: A food-safety perspective. *Foods.* 10: 1461.
- Gałęcki, R., Sokół, R., (2019). A parasitological evaluation of edible insects and their role in the transmission of parasitic diseases to humans and animals. *PLoS One* 14: e0219303.
- Geng, C.X., Watson, G.B., Sparks, T.C., (2013). Nicotinic acetylcholine receptors as spinosyn targets for insect pest management. *Adv. Insect Physiol.* 44: 101–210.
- Gertsev, V.I. V.V., Gertseva, (2004). Classification of mathematical models in ecology. *Ecol. Model.* 178: 329–334.
- Getanjaly, V., Laxmi, R., Preeti, S., Ranjit, K., (2015). Beneficial insects and their value to agriculture. *Int. J. Res. Agric. For. Sci.* 3: 2320–6063.
- Gilbert, L.I. Gill, S.S., (2010). Insect control: biological and synthetic agents. London. *Academic Press.*
- Graziella, C., Vallin, J., Wunsch, G.J., (2006). Demography: analysis and synthesis. Amsterdam. *Elsevier.*
- Green, C.D. Martin, S.M., (2017). Historical impact in psychology differs between demographic groups. *New Ideas Psychol.* 47: 24–32.
- Grünwald, S., Adam, I.V., Gurmai, A. M., Bauer, L., Boll, M., and Wenzel, U., (2013). The red flour beetle *Tribolium castaneum* as a model to monitor food safety and functionality. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 135: 111–122.

- Guschina, I.A., Harwood, J.L., (2006). Mechanisms of temperature adaptation in poikilotherms. *FEBS Lett.* 580: 5477–5483.
- Gwiner, J., Harnisch, R., Mueck, O., (1990). Manual on the prevention of post-harvest grain losses. Deutsche *GTZ*. p. 294.
- Haddi, K., Berger, M., Bielza, P., Cifuentes, D., Field, L. M., Gorman, K., Rapisarda, C., Williamson, M. S., Bass, C., (2012). Identification of mutations associated with pyrethroid resistance in the voltage-gated sodium channel of the tomato leaf miner (*Tuta absoluta*). *Insect Biochem. Mol. Biol.*, 42: 506–513.
- Hagstrum, D.W., Klejdysz, T., Subramanyam, B., Nawrot, J., (2013). Atlas of Stored-Product Insects and Mites. St. Paul. *AACC International*.
- Hagstrum, D.W., and Subramanyam, B., (2006). Fundamentals in stored product entomology. St. Paul. *AACC International* p. 31.
- Hagstrum, D.W., Subramanyam B., (2009). Stored – product insect resource. St. Paul. *AACC International*.
- Han, S.K., Yeom, S.R., Lee, S.H., Park, S.C., Kim, H.B., Cho, Y.M., Park, S.W., (2019). A fatal case of chlorfenapyr poisoning following dermal exposure. *Hong Kong J. Emerg. Med.* 26: 375–378.
- Haug, C., and Haug, J.T., (2017). The presumed oldest flying insect: more likely a myriapod? *PeerJ.* 5: e3402.
- Herrero, M.I., Dami, L.C., Fogliata, S.V., Casmuz, A.S., Sosa Gomez, D.R., Gastaminza, G.A., Murúa, M.G., (2018). Fertility life table, population parameters and biotic potential of *Helicoverpa gelotopoeon* (Dyar) (Lepidoptera: Noctuidae). *An. Acad. Bras. Cienc.* 90: 3831–3838.
- Hesketh, T., Xing, Z.W., (2006). Abnormal sex ratios in human populations: causes and consequences. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 103:13275.
- Hill, D.S., (2003). Pests of stored foodstuffs and their control. New York. Kluwer *Academic Publishers*.
- Hill, M.G., Borgemeister, C., Nansen, C., (2002). Ecological studies on the larger grain borer, *Prostephanus truncates* (Horn) (Coleoptera: Bostrichidae) and their implications for integrated pest management. *Int. Pest Manag. Rev.* 7: 201–221.

- Hinde, A., (1998). Demographic methods (1st edition). London. *Taylor & Francis*.
- Huis A.V., (2021). Cultural aspects of ants, bees and wasps, and their products in sub-Saharan Africa. *Int. J. Trop. Insect Sci.* 41: 2223–2235.
- Jankielsohn, A., (2018). The importance of insects in agricultural ecosystems. *Adv. Entomol.* 6: 62–73.
- Jian, F., Jayas, D.S., Fields, P.G., White, N.D.G., (2018). Modelling of population dynamics of insects in any ecosystem with several distributions of insect development. In: Adler, C.S., Opit, G., Fürstenau, B., Müller-Blenkle, C., Kern, P., Arthur, F.H., Athanassiou, C.G., Bartosik, R., Campbell, J., Carvalho, M.O., Chayaprasert, W., Fields, P., Z. Maier, Li, D. Nayak, M, Nukenine, E., Obeng-Ofori, D., Phillips, T., Riudavets, J., Throne, J., Schöller, M., Stejskal, V., Talwana, H., Timlick, B., Trematerra, P. (eds.). Proceedings of the 12th International Working Conference on Stored Product Protection (IWCSPP) Berlin, Germany, October 7–11, 2018. Pp. 100–107.
- Iftikhar, A., Hafeez, F., Hafeez, M., Farooq, M., Asif Aziz, M., Sohaib, M., Naeem, A. and Lu, Y., (2020). Sublethal effects of a juvenile hormone analog, Pyriproxyfen on demographic parameters of non-target predator, *Hippodamia convergens* Guerin-Meneville (Coleoptera: Coccinellidae). *Ecotoxicology* 29: 1017–1028.
- Ikemoto, T., Takai, K., (2000). A new linearized formula for the low of total effective temperature and the evaluation of line-fitting methods with both variables subject to error. *Environ. Entomol.* 29: 671-682.
- Jaramillo, J., Chabi-Olaye, A., Kamonjo, C., Jaramillo, A., Vega, F.E., Poehling, H.M., and Borgemeister., C., (2009). Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. *PLoS One* 4: e6478
- Ji, Y., Li, G., Zhou, C., Yin, S., (2021). Influence of temperature on the development and reproduction of *Cinara cedri* (Hemiptera: Aphidoidea: Lachninae). *Bull. Entomol. Res.* 1–6.
- Jiménez-Mejías, E., Amezcua-Prieto, C., Martínez-Ruiz, V., Olvera-Porcel, M.C., Jiménez-Moleón, J.J., Lardelli Claret, P., (2015). Medical students' satisfaction and

- academic performance with problem-based learning in practice-based exercises for epidemiology and health demographics. *Innov. Educ. Teach. Int.* 52: 510-521.
- Juliano, S.A., (2007). Population dynamics. *J. Am. Mosq. Control Assoc.*, 23: 265–275.
- Jusélius, J., Sundholm, D., (2000). The aromatic pathways of porphins, chlorins and bacteriochlorins. *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2: 2145–2151.
- Kavallieratos, N.G., Athanassiou, C.G., Barda, M.S., Boukouvala, M.C., (2016). Efficacy of five insecticides for the control of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) larvae on concrete. *J. Stored Prod. Res.* 66: 18–24.
- Kerrison, R.S., Robinson, A., Skrobanski, H., Kayal, G., Kaushal, A., Ide-Walters, C., Todd, A., Husband, A., Lakhani, S., Alter, M., von Wagner, C., MacDonald, L., (2022). Demographic and psychological predictors of community pharmacists' cancer-related conversations with patients: a cross-sectional analysis and survey study. *BMC Health Serv. Res.* 22: 268.
- Kim, D.S., Lee, J.H., (2003). Oviposition model of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae). *Ecol. Model.* 162: 145–153.
- Kingsland, S., (2015). Alfred J. Lotka and the origins of theoretical population ecology. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 112: 9493–9495.
- Kirst, H.A., (2010). The spinosyn family of insecticides: realizing the potential of natural products research. *J. Antibiot.* 63: 101–111.
- Kobayashi, A., (2019). International encyclopedia of human geography. Amsterdam. Elsevier (2nd Edition).
- Kohlbacher, F., (2011). Business implications of demographic change in Japan: Chances and challenges for human resource and marketing management. *J. Int. Comp. Soc.* 25: 269–294.
- Kontodimas, D.C., Eliopoulos, P.A., Stathas, G.J., Economou, L.P., (2004). Comparative temperature-dependent development of *Nephus includens* (Kirsch) and *Nephus bisignatus* (Boheman) (Coleoptera: Coccinellidae) preying on *Planococcus citri* (Risso) (Homoptera: Pseudococcidae): evaluation of a linear and various nonlinear models using specific criteria. *Environ. Entomol.* 33: 1–11.
- Kreager, P., (1988). New light on Graunt. *Popul. Stud.* 42: 129–140.

- Kreager, P., (2009). Darwin and Lotka: Two concepts of population. *Demographic Res.* 21: 469–502.
- Kuchmaeva, O.V., (2021). Specifics and prospects of the Yamal–Nenets Autonomous Okrug labour market in the context of economic and demographic development trends. *J. Popul. Econ.* 5: 49–71.
- Kumar, H., Panigrahi, M., Chhotaray, S., Bhanuprakash, V., Shandilya, R., Sonwane, A., Bhushan, B., (2018). Red flour beetle (*Tribolium castaneum*): From population genetics to functional genomics. *Vet. World* 11: 1043–1046.
- Kumar., R., (2017). Insect pests of stored grain: biology, behavior, and management strategies. Waretown, NJ. *Apple Academic Press*.
- Leonidou, L.C., Kvasova, O., Leonidou, C.N., Chari, S., (2013). Business unethically as an impediment to consumer trust: The moderating role of demographic and cultural characteristics. *J. Bus. Ethics* 112: 397–415.
- Lessard, B.D., Kurucz, N., Rodriguez, J., Carter, J., Hardy, C.M., (2021). Detection of the Japanese encephalitis vector mosquito *Culex tritaeniorhynchus* in Australia using molecular diagnostics and morphology. *Parasites Vectors* 14: 411.
- Lewis, K.A., Tzilivakis, J., Warner, D. Green, A., (2016). An international database for pesticide risk assessments and management. Human and ecological risk assessment: *Int. J. Res.* 22: 1050–1064.
- Lewis, S., and Jutkiewicz, E., (1998). Sperm precedence and sperm storage in multiply mated red flour beetles. *Behav. Ecol. Sociobiol.* 43: 365–369.
- Lewis, S.M., Austad, S.N., (1994). Sexual selection in flour beetles: the relationship between sperm precedence and male olfactory attractiveness. *Behav. Ecol.* 5: 223–224.
- Limsopatham, K., Klong-klaew, T., Fufuang, N., Sanit, S., Sukontason K.L., Sukontason K., Somboon, P., Sontigun, N., (2021). Wing morphometrics of medically and forensically important muscid flies (Diptera: Muscidae). *Acta Trop.* 222: 106062.
- Linz, D.M., Clark-Hachtel, C.M., Borràs-Castells, F., Tomoyasu, Y., (2014). Larval RNA interference in the red flour beetle, *Tribolium castaneum*. *J. Vis. Exp.* 92: 52059.

- Lis, Ł.B., Bakula, T., Baranowski, M., Czarnewicz, A., (2011). The carcinogenic effects of benzoquinones produced by the flour beetle. *Pol. J. Vet. Sci.* 14: 159-164.
- Lockridge, O., Quinn, D.M., (2010). Biotransformation, Esterases. *Elsevier Inc.* pp. 243–273. In McQueen, C.A. (ed.), Amsterdam. *Comprehensive Toxicology*.
- Lopata, A.L., Fenemore, B., Majova, Z., Bali, N., Jeebhay, M., (2000). Insect and storage pests causing occupational allergy. *Curr. Opin. Allergy Clin. Immunol.* 13: 16–19.
- Lord, J.C., (2008). Stored grain and flour insects and their management. pp 3586–3593. In: Capinera J.L. (ed.) *Encyclopedia of Entomology*. Dordrecht. *Springer*.
- Lotka, A.J., (1989). Lotka on population study, ecology, and evolution. *Popul. Dev. Rev.* 15: 539–550.
- Loudon, M.G., (2002). Chemistry of Naphthalene and the Aromatic Heterocycles. *Organic Chemistry* (4th ed.). New York. *Oxford University Press*.
- Lucas, X., Wohlwend, D., Hügler, M., Schmidtkunz Gerhardt, S., Schule, R., Jung, M., Einsle, O., Gunther, S., (2013). 4-Acyl pyrroles: mimicking acetylated lysines in histone code reading. *Angew. Chem.* 52: 14055–14059.
- MacArthur, R.H., and Wilson, E.O., (1967). The Theory of Island Biogeography. Princeton, New Jersey. *Princeton University Press*.
- Mahroof, R.M. and Hagstrum, D.W., (2012). Biology, Behavior, and Ecology of Insects in Processed Commodities, pp. 33-43. In D. W. Hagstrum, T. W., Phillips, G. Cuperus (eds.), Kansas State University, Manhattan, Kansas. *J. Stored Prod. Protection*. 156.
- Majdi, N., Traunspurger, W., Fueser, H., Gansfort, B., Laffaille, P., Maire, A., (2019). Effects of a broad range of experimental temperatures on the population growth and body-size of five species of free-living nematodes. *J. Therm. Biol.* 80: 21–36.
- Mandali, R. Kosnam, K., (2015). Storage pests attacking stored seeds and their management. *Rashtriya Krishi* 10: 1–5.
- Marino, M.J., (2018). Statistical analysis in preclinical biomedical research. In Williams, M., Curtis, M.J., Mullane, K.. Research in the biomedical sciences: transparent and reproducible. London. *Academic Press* 3: 107–144.

- Martínez-Mesa, J., González-Chica, D.A., Duquia, R.P., Bonamigo, R.R., Bastos, J.L., (2016). Sampling: how to select participants in my research study? *An. Bras. Dermatol.*, 91: 326–330.
- Mason, J.L., (2018). Red and confused flour beetles *Tribolium castaneum* (Herbst) and *Tribolium confusum* (Duval). Extension entomology. Purdue University. E–224–W. <https://extension.entm.purdue.edu/publications/E-224/E-224.pdf>
- Mason, L.J., McDonough, M., (2012). Biology, behavior, and ecology of stored grain and legume insects. In: Hagstrum, D.W., Phillips, T.W. and Cuperus, G. (eds.) (2012). Kansas State University, Manhattan. *Stored product protection*. KS. 7–20.
- Mason, J.L., Obermeyer, J., (2010). Stored grain pest management. Purdue University. E–66–W. <https://extension.entm.purdue.edu/publications/E-66.pdf>
- Masson, P., Rochu, D., (2009). Catalytic bioscavengers: the next generation of bioscavenger-based medical countermeasures. In: Gupta, R. (ed.), Handbook of toxicology of chemical warfare agents. London. *Academic Press* 1053–1065.
- Matsuo, N., (2019). Discovery and development of pyrethroid insecticides. *Proc. Jpn. Acad. B: Phys. Biol. Sci.* 95: 378–400.
- McDonald, P., (2015). Demographic change: How, why and consequences. In Bammer, G., Change!. Combining Analytic Approaches with Street Wisdom. Canberra. *ANU Press* 10: 153–161.
- Mehring, M., Mehlhaus, N., Ott, E., Hummel, D.A., (2020). A systematic review of biodiversity and demographic change: A misinterpreted relationship? *Ambio* 49: 1297–1312.
- Merchant, M., (2007). Insects in the city. Recognizing and controlling insect pests of stored products. Texas A&M. *AgriLife Extension*.
<https://citybugs.tamu.edu/factsheets/household/food-fabric/ent-2007/>
- Milstein, O.A., (1971). Attitude of various socio-demographic groups to sports and physical culture as a sociological problem. *Int. Rev. Sport Sociol.* 6: 63–78.
- Mörner, J., Bos, R., Fredrix, M., (2002). Reducing and eliminating the use of persistent organic pesticides: guidance on alternative strategies for sustainable pest and vector management. Geneva. *World Health Organization*.

- Morrison, P.A., (1988). Applied demography: its current scope and future direction in the United States. Santa Monica, CA. *RAND Corporation*.
- Muatinte, B.L., Kavallieratos, N.G., Boukouvala, M.C., García Lara, S., Margarita López Castillo. L.M., Mvumi, B.M., (2019). The threat of the larger grain borer, *Prostephanus truncates* (Coleoptera: Bostrichidae) and practical control options for the pest. *CAB. Rev.* 14: 1–25.
- Murdock, S.H., Ellis, D.R., (2019). Applied demography: An introduction to basic concepts, methods, and data. London. *Routledge*.
- Nagel, T.A., Firm, D., Rozman, A., (2021). Intermediate disturbances are a key driver of long-term tree demography across old-growth temperate forests. *Ecol. Evol.* 11: 16862–16873.
- Nedvěd, O., (2009). Temperature, effects on development and growth. In V. H. Resh and R. T. Cardé (eds.), *Encyclopedia of insects*. Second edition, Amsterdam. *Academic Press*.
- Ngufor, C., Critchley, J., Fagbohoun, J., N'Guessan, R., Tadjinou, D., Rowland, M., (2016). Chlorfenapyr (A Pyrrole Insecticide) applied alone or as a mixture with alpha-cypermethrin for indoor residual spraying against pyrethroid resistant *Anopheles gambiae* sl: An Experimental Hut Study in Cove, Benin. *PLoS One* 11: e0162210.
- Nikitina, O., (2017). “Social Distance” in demographic segments aged 17-22 and 65 and over: Sociology of the problem - A case study of a big city in Russia. *Man India* 97: 41–54.
- Ning, S., Zhang, W., Sun, Y., Feng, J., (2017). Development of insect life tables: Comparison of two demographic methods of *Delia antiqua* (Diptera: Anthomyiidae) on different hosts. *Sci. Rep.* 7: 4821.
- Ogryzek, M., Rząsa, K., Żróbek, R., (2021). Change in the level of agricultural development in the context of public institutions' activities-a case study of the NASC activities in Poland. *Land* 10: 187.
- Otieno, M.H.J., Ayieko, M.A., Niassy, S., Salifu, D., Abdelmutalab, A.G.A., Fathiya, K.M., Subramanian, S., Fiaboe, K.K.M., Roos, N., Ekesi, S., Tanga, C.M., (2019). Integrating temperature-dependent life table data into insect life cycle model for

- predicting the potential distribution of *Scapsipedus icipe* Hugel & Tanga. *PLoS One* 14: e0222941.
- Papanikolaou, N.E., Kavallieratos, N.G., Kondakis, M., Boukouvala, M.C., Nika, E.P., Demiris, N., (2019). Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* combining deterministic and stochastic demography. *PLoS One* 14: e0212182.
- Papanikolaou, N.E., Milonas, P.G., Kontodimas, D.C., Demiris, N., Matsinos, Y.G., (2013). Temperature-dependent development, survival, longevity and fecundity of the aphidophagous ladybird beetle, *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 106: 228–234.
- Pasquali, S., Soresina, C., Marchesini, E., (2022). Mortality estimate driven by population abundance field data in a stage-structured demographic model. The case of *Lobesia botrana*. *Ecol. Modell.* 464: 109842.
- Pavia, J.M., Morillas, F., Lledo, J., (2012). Introducing migratory flows in life table construction. *SORT* 36: 103–114.
- Pereira Barboza, E., Nieuwenhuijsen, M., Ambròs, A., Sá, T.H.D., Mueller, N., (2022). The impact of urban environmental exposures on health: An assessment of the attributable mortality burden in Sao Paulo city, Brazil. *Sci. Total Environ.* 831: 154836.
- Pertet, A.M., Kaseje, D., Otieno-Odawa, C.F., Kirika, L., Wanjala, C., Ochieng, J., Jaoko, M., Otieno, W., Odindo, D., (2018). Under vaccination of children among Maasai nomadic pastoralists in Kenya: Is the issue geographic mobility, social demographics or missed opportunities? *BMC Public Health* 18: 1389.
- Pflaumer, P., (2014). A demometric analysis of Ulpian's table, JSM Proceedings, Social Statistics Section. Alexandria, VA: *American Statistical Association* 405–419.
- Pol, L.G., Thomas, R.K., (2013). The demography of health and healthcare. 3rd ed. 1: 3–10.
- Prskawetz, A., Kögel, T., Sanderson, W.C., Scherbov, S., (2007). The effects of age structure on economic growth: An application of probabilistic forecasting to India. *Int. J. Forecast.* 23: 587–602.

- Qayyum, A., Aziz, M.A., Iftikhar, A., Hafeez, F., Atlihan, R., (2018). Demographic parameters of *Lipaphis erysimi* (Hemiptera: Aphididae) on different cultivars of brassica vegetables. *J. Econ. Entomol.* 111: 1885–1994.
- Raghavendra, K., Barik, T.K., Sharma, P., Bhatt, R.M., Srivastava, H.C., Sreehari, U., Dash, A.P., (2011). Chlorfenapyr: a new insecticide with novel mode of action can control pyrethroid resistant malaria vectors. *Malar. J.* 10: 16.
- Rahmani, S., Bandani, A.R., (2016) Pirimicarb, an aphid selective insecticide, adversely affects demographic parameters of the aphid predator *Hippodamia variegata* (Goeze) (Coleoptera: Coccinellidae). *J. Plant. Prot. Res.* 56: 353–363.
- Rajasri, M., and Kavitha, K., (2015). Storage pests attacking stored seeds and their management. *Rashtriya Krishi* 10: 1–5.
- Ramos Aguila, L.C., Hussain, M., Huang, W., Lei, L., Bamisile, B.S., Wang, F., Chi, H., Wang, L., (2020). Temperature-dependent demography and population projection of *Tamarixia radiata* (Hymenoptera: Eulophidae) reared on *Diaphorina citri* (Hemiptera: Liviidae) *J. Econ. Entomol.* 113: 55–63.
- Rashki, M., Shirvani, A., Hajrahmatollahi, F., (2020). Estimating some demographic parameters of *Aphidius matricariae* (Haliday) (Hymenoptera: Braconidae), the parasitoid of the greenbug aphid, *Schizaphis graminum* (Rondani) (Hemiptera: Aphididae), at different temperatures. *Egypt. J. Biol. Pest Control* 30: 45.
- Rebaudo, F., Struelens, Q., Dangles, O., (2018). Modelling temperature-dependent development rate and phenology in arthropods: The devRate package for r. *Methods Ecol. Evol.* 9: 1144–1150.
- Régnier, B., Legrand, J., Rebaudo, F., (2022). Modeling temperature-dependent development rate in insects and implications of experimental design. *Environ. Entomol.* 51: 132–144.
- Resh, V. and Cardé, R., (2003). Encyclopedia of Insects. 1st Edition. London. *Academic Press*.
- Richards, S., Gibbs, R., Weinstock, G., (2008). *Tribolium* genome sequencing consortium. The genome of the model beetle and pest *Tribolium castaneum*. *Nature* 452: 949–955.

- Ridley, A.W., Hereward, J.P., Daghli, G.J., Raghu, S., Collins, P.J., Walter, G.H., (2011). The spatiotemporal dynamics of *Tribolium castaneum* (Herbst): adult flight and gene flow. *Mol. Ecol.* 20:1635–1646.
- Riffe, T., Schöley, J., Villavicencio, F., (2017). A unified framework of demographic time. *Genus* 73: 7.
- Ritchie, H., Roser, M., (2019). Gender ratio. *University of Oxford*. <https://ourworldindata.org/gender-ratio>
- Robinson, W.H., (2005). Handbook of urban insects and arachnids. Cambridge. *Cambridge University Press*.
- Roser, M., Ritchie, H., Ortiz-Ospina, E., (2013). World population growth. *University of Oxford*. <https://ourworldindata.org/world-population-growth>
- Rösner, J., Wellmeyer, B., Merzendorfer, H., (2020). *Tribolium castaneum*: A model for investigating the mode of action of insecticides and mechanisms of resistance. *Curr. Pharm. Des.* 26: 3554–3568.
- Rothman, K.J., (1996). Lessons from John Graunt. *Lancet.* 347: 37–39.
- Salgado, V.L., Sparks, T.C., (2005). The spinosyns: chemistry, biochemistry, mode of action and resistance. In: Gilbert, L.I., Iatrou, K., Gill, S. (eds.), *Comprehensive Molecular Insect Science*. Oxford. *Elsevier* 6: 137–173.
- Sallam, M. (2000). Insect damage: Damage on p-harvest. Rome. *Food and Agriculture Organization of the United Nations*.
- Santos, H.T.D., Marchioro, C.A., (2021). Selection of models to describe the temperature-dependent development of *Neoleucinodes elegantalis* (Lepidoptera: Crambidae) and its application to predict the species voltinism under future climate conditions. *Bull. Entomol. Res.* 111: 476–484.
- Santos, R., Peixoto, U.I., Medeiros-Leal, W., Sequeira, R.M., Novoa-Pabon, A., Pinho, M., (2022). Demographics and yield–Per–Recruit assessment of the vulnerable spiny lobster *Palinurus elephas* in the azores. Implications for Conservation and Fisheries Management. *Biology* 11: 474.
- Savage, V.M., Gillooly, J.F., Brown, J.H., West, G.B., Charnov, E.L., (2004). Effects of body size and temperature on population growth. *Am. Nat.* 163: 429–441.

- Scudder, G.G.E., (2017). The Importance of Insects. In Footitt R.G. and Adler P.H. (eds). *Insect Biodiversity: Science and society*. Oxford. *Wiley Blackwell* 9–43.
- Setia, M.S., (2016). Methodology series module 1: cohort studies. *Indian J. Dermatol.* 61: 21–25.
- Sharpless, B.A. (2021). Pass rates on the examination for professional practice in psychology (EPPP) according to demographic variables: A partial replication. *Train. Educ. Prof. Psychol.* 15: 18–22.
- Shamjana, U. and Grace, T., (2021). Review of insecticide resistance and Its underlying mechanisms in *Tribolium castaneum*. In Ranz, R.E.R. (ed.), *Insecticides*. London. *IntechOpen* 1–39
- Sharma, D., Nagpal, A., Pakade, Y., Katnoria, J.K., (2010). Analytical methods for estimation of organophosphorus pesticide residues in fruits and vegetables: A review, *Talanta* 82: 1077–1089.
- Silveira Neto, S.; Nakano, O.; Barbin, D.; Villa Nova, N.A., (1976). Manual de ecologia de insetos. São Paulo. *Agronômica Ceres*.
- Singelmann, J., Poston, D., (2020). Developments in demography. In Singelmann, J., Poston, D., *Developments in demography. in the 21st century*. Cham. *Springer* 48: 3–9.
- Sisaye, S., (2016). *Ecology, sustainable development and accounting*. London. *Routledge*.
- Smith, D.P., Keyfitz, N., (2013). *Mathematical demography*. 2nd edition. Heidelberg: *Springer* .
- Snacken, S., (2015). Punishment, legitimate policies and values: Penal moderation, dignity and human rights. *Punishm. Soc.* 17: 397–423.
- Soldatenko, S., Bogomolov, A., Ronzhin, A., (2021). Mathematical modelling of climate change and variability in the context of outdoor ergonomics. *Mathematics*. 9: 2920.
- Solov'ev, A.K., (2013). Demographic threat to the economy: Macroanalysis of Russia's pension system. *Stud. Russ. Econ. Dev.* 24: 179–188.

- Son, Y., Lewis E.E., (2005). Modeling temperature-dependent development and survival of *Otiorhynchus sulcatus* (Coleoptera: Curculionidae). *Agr. Forest Entomol.* 7: 201–209.
- Sparks, T.C., Dripps, J.E., Watson, G.B., Paroonagian, D., (2012). Resistance and cross-resistance to the spinosyns – a review and analysis. *Pestic. Biochem. Physiol.* 102: 1–10.
- Streicher, S., Boyles, J.G., Oosthuizen, M.K., Bennett, N.C., (2011). Body temperature patterns and rhythmicity in free-ranging subterranean damaraland mole-rats, *Fukomys damarensis*. *PLoS One.* 6: e26346.
- Suh, T., Chow, T.E., (2021). Developing a digital marketing tool for ethnic ventures' mixed business model and market-shaping: A design scientific approach of web demographics. *Ind. Mark. Manag.* 93: 10–21.
- Suiter, R.D., Toews D.M., Ames M.L., (2017). Stored product pests. Department of Entomology, University of Georgia.
- <https://extension.uga.edu/publications/detail.html?number=B1378&title=Stored%20Product%20Pests%20in%20the%20Home>
- Sun, J., Tan, X., Li, Q., Francis, F., Chen, J., (2022). Effects of different temperatures on the development and reproduction of *Sitobion miscanthi* from six different regions in China. *Front. Ecol. Evol.* 10: 794495.
- Sutton, J., Austin, Z., (2015). Qualitative Research: Data Collection, Analysis, and Management. *Can. J. Hosp. Pharm.* 68: 226–231.
- Swanson, D.A., (2015). Applied Demography. In Wright, J.D. (ed.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. 2nd Edition. Amsterdam, *Elsevier*. p. 839–844.
- Swanson, D.A. and Terdow, L.M., (2013). Exploring stable population concepts from the perspective of cohort change ratios. *Open Demography J.* 6: 1–17.
- Swanson, D., Stephan G. E., (2004). Glossary and a demography timeline. pp. 751–786. In Seigel J., and Swanson, D., (eds.). *The methods and materials of demography*, 2nd Edition. San Diego, CA: *Elsevier*.

- Swanson, D.A., Burch, T.K., Tedrow, L.M., (1996). What is applied demography? *Popul. Res. Policy Rev.* 15: 403–418.
- Swanson, D.A., Pol, L.G., (2010). Applied demography: Its business and public sector components. *Demography* 1: 321–335.
- Tarsi, K., Tuff, T., (2012) Introduction to population demographics. *Nat. Educ. Knowl.* 3: 3.
- Teitelbaum, M., (2015). Political demography: Powerful trends under-attended by demographic science. *Popul. Stud.* 69: S87–S95.
- Toews, M., Nansen, C., (2012). Trapping and interpreting captures of stored grain insects. In Hagstrum, D.W., Phillips, T.W., Cuperus, G., *J. Stored Prod. Protection.* Kansas State University, Manhattan, Kansas. 243–261.
- Tyagi, S.,K., Guru, P.N., Nimesh, A., Bashir, A.A., Patgiri, P., Mohod, V., Khatkar, A.,B., (2019). Post-harvest stored product insects and their management. Technical Bulletin AICRP PHET 2.
- Tyler, F., Tregenza, T., (2013). Why do so many flour beetle populations fail? *Entomol. Exp. Appl.* 146: 199–206.
- Van Dalen, H.P., Henkens, K., (2012). What is on a demographer's mind? A worldwide survey. *Demogr. Res.* 26: 363–408.
- Vasilieva, E.N., Rostovskaya, T.K., Süleymanly, E., (2021). Demographic threats to national security in the political discourse of the Russian federation (1992-2019). 26: *Sci. J. VolSU. History.* 255–272.
- Vaupel, J.W., Villavicencio, F., (2018). Life lived and left: Estimating age-specific survival in stable populations with unknown ages. *Demog. Res.* 39: 991–1008.
- Vaupel, J.W., Villavicencio, F., Bergeron-Boucher, M.P., (2021). Demographic perspectives on the rise of longevity. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 118: e2019536118.
- Véron, J., (2008). Alfred J. Lotka and the mathematics of population. *J. Electron. Hist. Probab. Stat.* 4: 1.

- Véron, J. (2009). Réception de l'œuvre démographique de Lotka en France. *Population*. 64: 355–376.
- Watts, H.E., Holekamp, K.E., (2009). Ecological determinants of survival and reproduction in the spotted hyena. *J. Mammal*. 90: 461–471.
- Weeks J.R. (2007). Population. An introduction to concepts and issues (10th Edition). Belmont, CA. *Wadsworth Publishing*.
- White, A., (2017). A model-based analysis of the minimum size of demographically-viable hunter-gatherer populations *J. Artif. Soc. Soc. Simul*. 20: 9.
- White, G.G., (1982). The effect of grain damage on development in wheat of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *J. Stored Prod. Res.* 18: 115–119.
- WHO, (2016). WHO Specifications and evaluations for public health pesticides. Pirimiphos-methyl. Geneva. *World Health Organization*.
- Wildman, W.J., Shults, F.L.R., Diallo, S.Y., (2021). Computational demography of religion: A Proposal In Ahrweiler, P., Neumann, M., (eds.) *Advances in social simulation*. Cham. *Springer* p. 169–180.
- Yigit, N. Velioglu, Y.S., (2020). Effects of processing and storage on pesticide residues in foods. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* 60: 3622–3641.
- Zaidi, J.H., Naeem, F., Ambreen, N., Khan, K.M., Pang, Y.P., Cusack, B., Richelson, E., Anwar, A., Voelter, W., (2006). Pyrrole-based partial peptidic mimic of neurotensin (8–13): design and synthesis. *Lett. Org. Chem.* 3: 21–24.
- Zettler, L.J., (1991). Pesticide Resistance in *Tribolium castaneum* and *T. confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae) from Flour Mills in the United States. *J. Econ. Entomol.* 84: 763–767.
- Zilahi-Balogh, G., Pfeiffer, D.G., (1998). Understanding degree-days and using them in pest management decision making. Virginia Polytechnic Institute and State University. https://www.virginiafruit.ento.vt.edu/Understanding_Degree_Days.html

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη και την επιβίωση του *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae)*

2.1.1 Εισαγωγή

Το κόκκινο σκαθάρι των αλεύρων, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) είναι ένα κοσμοπολιτικό είδος των εντόμων των αποθηκών (Hill, 2003; Hagstrum & Subramanyam, 2009). Παρά το γεγονός ότι έχει καταγραφεί σε 246 είδη τροφίμων (Hagstrum & Subramanyam, 2009) τόσο τα τέλεια άτομα όσο και οι προνύμφες προκαλούν εκτεταμένες ζημιές κυρίως στα δημητριακά και τους ελαιούχους σπόρους (Aitken, 1975; Kumar, 2017). Στα προτιμώμενα προϊόντα περιλαμβάνονται επίσης τα άλευρα και οι αμυλώδεις τροφές καθ' ότι το *T. castaneum* είναι δευτερεύων εχθρός των αποθηκευμένων τροφίμων (Hill, 2003). Σε παλαιότερες μελέτες έχει καταγραφεί πως σε σύγκριση με άλλα άλευρα, το αλεύρι μαλακού σίτου ευνοεί την ανάπτυξη του *T. castaneum*. Για παράδειγμα, σε μια σύγκριση ανάπτυξης πληθυσμών του *T. castaneum* σε μαλακό και σκληρό αλεύρι σίτου φάνηκε πως τέλεια άτομα τα οποία τοποθετήθηκαν σε 1 ή 3 ζεύγη παρήγαγαν απογόνους 15,2 και 6,7 φορές περισσότερους σε αλεύρι μαλακού έναντι σκληρού σίτου, αντιστοίχως (Longstaff, 1995). Οι Fabres et al. (2014) ανέφεραν πως οι προνύμφες *T. castaneum* εμφάνισαν υψηλότερες συγκεντρώσεις υδρατανθράκων και τριγλυκεριδίων όταν αναπτύχθηκαν σε αλεύρι μαλακού σίτου σε σχέση με εκείνες οι οποίες εξετράφησαν με αλεύρι αμπελοφάσουλου, *Vigna unguiculata* (L.) και αλεύρι φασολιού, *Phaseolus vulgaris* L.. Επιπλέον, παρατήρησαν πως οι προνύμφες οι οποίες εξετρέφοντο με αλεύρι μαλακού σίτου ήταν μεγαλύτερες σε μέγεθος σε σχέση με τις προνύμφες οι οποίες εξετρέφοντο με αλεύρι από τα αμπελοφάσουλα και τα φασόλια.

***Skourti, A.**, Kavallieratos, N.G., Papanikolaou, N.E., **2019**. Laboratory evaluation of development and survival of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) under constant temperatures. *Journal of Stored Products Research* 83, 305 – 310. **(Impact Factor 2020 = 2,643, 5 year Impact Factor = 2,829)**

Το *T. castaneum*, εκτός από τις καταστροφές που μπορεί να προκαλέσει στα αποθηκευμένα τρόφιμα μπορεί να επιφέρει και δερματίτιδες στον άνθρωπο (Krinsky, 2019). Παρ' όλα αυτά, τα τρόφιμα τα οποία έχουν προσβληθεί από το *T. castaneum* δεν παρουσιάζουν αρνητικές επιδράσεις στην υγεία του ανθρώπου (Stejskal et al., 2018). Η αύξηση του πληθυσμού του εντόμου θεωρείται υψηλή σε σύγκριση με άλλα έντομα αποθηκών δεδομένου ότι κάθε θηλυκό μπορεί να γεννήσει έως 900 με 1000 ωά (Hill, 2003; Rees, 2004) ενώ η ανάπτυξη του πληθυσμού του ευνοείται περισσότερο σε θερμότερα παρά σε εύκρατα και ψυχρά κλίματα (Aitken, 1975; Rees, 2004). Γνωρίζοντας πως το *T. castaneum* είναι εκ φύσεως ανθεκτικό στα εντομοκτόνα (Pimentel et al., 2007; Daglish and Nayak, 2012; Cato et al., 2017; Julio et al., 2017; Athanassiou et al., 2016b, 2019) η στρατηγική διαχείρισής του θεωρείται μείζον ζήτημα.

Το *T. castaneum* είναι το πρώτο είδος της τάξεως των κολεοπτέρων για το οποίο έχει ταυτοποιηθεί ολόκληρη η αλληλουχία του γονιδιώματός του (Tribolium Genome Sequencing Consortium, 2008) ενώ έχει διερευνηθεί εκτενώς η βιολογία, η συμπεριφορά, η βιογεωγραφία και η οικολογία του (Hagstrum and Subramanyam, 2009; Panagiotakopulu and Buckland, 2017; Kumar et al., 2018; Rajan et al., 2018; Boukouvala et al., 2019). Χρησιμοποιείται δε ως πρότυπο είδος περισσότερο από άλλα έντομα αποθηκών στη θεμελιώδη γενετική, τη βιολογία και την εξελικτική ερεύνα τόσο διότι θεωρείται υψίστης σημασίας εχθρός παγκοσμίως όσο διότι η εκτροφή του είναι απλή και εύκολη (Kumar et al., 2018). Ένα σημαντικό αβιοτικό στοιχείο το οποίο ρυθμίζει τον κύκλο ζωής του *T. castaneum* είναι η θερμοκρασία. Πράγματι, η θερμοκρασία επηρεάζει διάφορες πτυχές της βιολογίας του εντόμου. Για παράδειγμα, με την αύξηση της θερμοκρασίας από τους 20 στους 32,5 °C παρουσιάστηκε αύξηση της γονιμότητάς του (Lhaloui et al., 1988) ενώ στους 25 °C τα θηλυκά άτομα μπορούν να γεννήσουν από 150 έως 600 ωά και στους 33 °C μπορούν να γεννήσουν έως 900 ωά (Hill, 2003). Τα τέλεια άτομα *T. castaneum* μετακινούνται προς τις θερμότερες περιοχές (από τους 20 στους 30 °C) οριζοντίως είτε καθέτως στις στήλες αραβοσίτου ή σίτου (Jian et al., 2005). Ωστόσο, δεν μετακινούνται προς τα εσωτερικά τμήματα του χύδην σίτου (> 0,5 cm) αλλά προτιμούν τις περιφερειακές περιοχές όπως κοντά στους τοίχους των αποθηκών (Athanassiou et al., 2005). Η περίοδος της ωοτοκίας μπορεί να διαρκέσει 174 ημέρες στους 21 °C ενώ στους 27 °C μπορεί να μειωθεί στις 148 ημέρες (Robinson, 2005). Η πτήση του εντόμου ξεκινά στους 25 °C με βέλτιστη θερμοκρασία τους 30 °C (Cox et al., 2007). Η

μέση διάρκεια ζωής των τελείων ατόμων κυμαίνεται από 130 έως 198 ημέρες μεταξύ 18 και 29 °C (Mahroof and Hagstrum, 2012).

Ενώ ορισμένες μελέτες έχουν διερευνήσει την επίδραση της θερμοκρασίας σε σχέση με την ανάπτυξη και την επιβίωση του *T. castaneum* (π.χ. Howe, 1965; Fields, 1992), δεν υπάρχουν στοιχεία για την ανάπτυξη και την επιβίωση του εντόμου σε διάφορες θερμοκρασίες σε λευκό μαλακό αλεύρι σίτου. Άξιο αναφοράς είναι πως το λευκό μαλακό αλεύρι σίτου ανήκει στις κυριότερες κατηγορίες παραγωγής και καλλιέργειας σίτου των Ηνωμένων Πολιτειών (Faridi et al., 1994) με παραγωγή η οποία ανήλθε στους 6,5 εκατομμύρια τόνους το 2018 (USW, 2018). Στην παρούσα μελέτη ερευνάται, περιγράφεται και προβλέπεται η σχέση της θερμοκρασίας με την ανάπτυξη και την επιβίωση του εντόμου στο λευκό αλεύρι μαλακού σίτου με τη χρήση μαθηματικών προτύπων, η οποία μπορεί να προσφέρει πολύτιμες γνώσεις περί της ακριβούς διαχείρισής του. Προβλέφθηκαν δε τα θερμικά όρια, δηλαδή οι κατώτερες και οι ανώτερες θερμοκρασιακές τιμές κατά τις οποίες η ανάπτυξη του εντόμου σταματά και το θερμικό άθροισμα, δηλαδή οι βαθμοημέρες πάνω από το κατώτερο θερμοκρασιακό όριο οι οποίες απαιτούνται για την ολοκλήρωση της ανάπτυξης των ατελών σταδίων του. Η παρούσα προσέγγιση απεικονίζεται μέσω της ανάλυσης πολυάριθμων δεδομένων τα οποία ελήφθησαν σε ευρύ θερμοκρασιακό φάσμα από τους 20 έως τους 35 °C υπό εργαστηριακές συνθήκες.

2.1.2 Υλικά και μέθοδοι

2.1.2.α Έντομα και τροφή

Η εκτροφή του *T. castaneum* (εικ. 2.1) πραγματοποιήθηκε σε λευκό μαλακό αλεύρι σίτου (μείγμα ποικιλιών, αποτελούμενο από το ενδοσπέρμιο μόνον) σε θάλαμο «Sanyo MLR-350/350HT» στους 30 °C με σχετική υγρασία (r.h.) 65% υπό διαρκές σκότος. Ο αρχικός πληθυσμός συλλέχθηκε το 2003 από μια επαγγελματική αποθήκη στη νότια Ελλάδα. Η εκτροφή διατηρείται στο Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών. Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε λευκό μαλακό αλεύρι σίτου χωρίς φυτοπροστατευτικά προϊόντα (μείγμα ποικιλιών, αποτελούμενο από το ενδοσπέρμιο μόνον) με τα ακόλουθα χαρακτηριστικά σε περιεκτικότητα ανά 100 g προϊόντος: 1,1 g λίπος, 72,6 g υδατάνθρακες, 1,6 g ίνες, 10,3 g πρωτεΐνη και 0,05 g αλάτι.

2.1.2.β Βιοδοκιμές

Ποσότητες 5 g λευκού κοσκινισμένου μαλακού αλεύρου σίτου τοποθετήθηκαν ξεχωριστά σε κάθε τρυβλίο διαμέτρου 8 cm και ύψους 1,5 cm. (εικ. 2.2). Οι ποσότητες ζυγίστηκαν σε ζυγαριά Precisa XB3200D (Alpha analytical Instruments, Γέρακας, Ελλάδα). Πριν την έναρξη των πειραμάτων, η υγρασία του αλεύρου ρυθμίστηκε στο $13.5 \pm 0.5\%$, όπως εκτιμήθηκε από το υγρασιόμετρο mini GAC plus (Dickey-John Europe S.A.S., Colombes, Γαλλία). Αναλόγως της αρχικής υγρασίας του αλεύρου, είτε αποξηραινόταν σε κλίβανο στους 50 °C (εικ. 2.3) είτε γινόταν προσθήκη απεσταγμένου ύδατος ωσότου φτάσει στο επιθυμητό επίπεδο της σχετικής υγρασίας (Kavallieratos et al., 2012; Athanassiou et al., 2016a). Τα καπάκια των τρυβλίων έφεραν κυκλικό άνοιγμα διαμέτρου 1,50 cm το οποίο καλυπτόταν με μουσελίνα ώστε να επιτρέπεται ο επαρκής αερισμός στο εσωτερικό τους (εικ. 2.4 και 2.5). Το ανώτερο εσωτερικό τοίχωμα του κάθε τρυβλίου καλυπτόταν από πολυτετραφθοροαιθυλένιο (60% κ.β. διάλυμα σε ύδωρ) (Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Taufkirchen, Γερμανία) για την αποφυγή της διαφυγής ατόμων από το τρυβλίο. Για τη συλλογή των ωών, απομονώθηκαν από την εκτροφή 50 τέλεια άτομα τυχαίου φύλου ηλικίας περίπου 7 ημερών και μεταφέρθηκαν σε γυάλινο βάζο όγκου 250 ml το οποίο περιείχε 125 ml κοσκινισμένου λευκού μαλακού αλεύρου σίτου (εικ. 2.6). Μία ημέρα μετά, τα τέλεια άτομα και τα ωά αφαιρέθηκαν από το αλεύρι με ένα κόσκινο No 20 και ένα κόσκινο No 60 (Advantech Manufacturing Inc., New Berlin, WI, USA) (εικ. 2.7). Τα ωά (εικ. 2.8) τα οποία ευρίσκοντο επί των δικτυωτών ανοιγμάτων του κοσκίνου, μεταφέρθηκαν με προσοχή μέσω λεπτού πινέλου (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, London, UK) ξεχωριστά σε τρυβλία χωρίς αλεύρι. Τα τρυβλία μεταφέρθηκαν σε θαλάμους ελεγχόμενων συνθηκών στους 20, 25, 30, 32,5 και 35 °C και 65% r.h. (εικ. 2.9 και 2.10). Καθημερινώς ελεγχόταν η επιβίωση και η εκκόλαψη των προνυμφών μέσω του στερεοσκοπίου (SZX9 Olympus, 57 x συνολική μεγέθυνση, Μπακάκος, Αθήνα) (εικ. 2.11). Νεκρά θεωρούνταν τα ωά τα οποία ήταν μελανά (εικ. 2.12). Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 160, 240, 74, 199 και 160 ωά για τον υπολογισμό της ανάπτυξης και της επιβίωσης από ωά σε τέλεια άτομα στους 20, 25, 30, 32,5 και 35 °C αντιστοίχως. Από τα παραπάνω ωά, τα 40, 182, 36, 85 και 0 έφτασαν στο στάδιο του τελείου ατόμου. Η επιλογή του εύρους των υπό εξέταση θερμοκρασιών βασίστηκε στο γεγονός ότι το *T. castaneum* μπορεί να αναπτυχθεί σε ευρύ φάσμα θερμοκρασιών (>20 °C, <40 °C) (Howe, 1956; Aitken, 1975). Οι

νεοεκκολαφθείσες προνύμφες *T. castaneum* τοποθετούνταν προσεκτικά, ξεχωριστά σε νέα τρυβλία με αλεύρι μέσω λεπτού πινέλου (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, London, UK) (εικ. 2.13). Τα τρυβλία τοποθετούνταν στους θαλάμους ελεγχόμενων συνθηκών των παραπάνω θερμοκρασιών και r.h. κατά τη διάρκεια της πειραματικής περιόδου (εικ. 14). Τα δεδομένα της διάρκειας της ανάπτυξης και της επιβίωσης των προνυμφικών ηλικιών και των νυμφών καταγράφονταν κάθε 24 ώρες (εικ. 2.15) για μια περίοδο 416 ημερών από τη γέννηση μέχρι και την ενηλικίωση τους. Νεκρές θεωρούνταν οι προνύμφες οι οποίες δεν κινούνταν ή ήταν αφυδατωμένες ή το χρώμα ήταν καστανό (εικ. 2.16).

2.1.3 Στατιστική ανάλυση

Τα δεδομένα της διάρκειας των σταδίων του ωού, της προνύμφης, της νύμφης και η συνολική διάρκεια της ανάπτυξης του εντόμου υποβλήθηκαν στην δοκιμασία της κανονικότητας Shapiro-Wilk τα οποία έδειξαν απόκλιση από την κανονική κατανομή. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα αναλύθηκαν με την ανάλυση της διασποράς (ANOVA) κατά Kruskal-Wallis σε επίπεδο σημαντικότητας 0,05. Για τον υπολογισμό των θερμικών ορίων (Dixon et al., 2009) χρησιμοποιήθηκε το μη γραμμικό πρότυπο Briere (Briere et al., 1999) μέσω του τύπου:

$$r(T) = \alpha \times T \times (T - T_0) \times \sqrt{T_L - T}$$

όπου $r(T)$ είναι ο ρυθμός ανάπτυξης, α είναι εμπειρική σταθερά, T είναι η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, T_0 το κατώτερο και T_L το ανώτερο θερμικό όριο. Ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης (T_m) υπολογίστηκε επίσης βάσει του προτύπου Briere (Briere et al., 1999; Dixon et al., 2009; Papanikolaou et al., 2013) από τον τύπο:

$$T_m = \frac{2 \times m \times T_L + (m + 1) \times T_0 + \sqrt{4 \times m^2 \times T_L^2 + (m + 1)^2 \times T_0^2 - 4 \times m^2 \times T_0 \times T_L}}{4 \times m + 2}$$

όπου $m = 2$. Η σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και της ανάπτυξης περιγράφηκε μέσω του γραμμικού προτύπου Ikemoto and Takai (2000) από τον τύπο:

$$(D \times T) = k + T_0 \times D$$

όπου D είναι η διάρκεια της ανάπτυξης και k το θερμικό άθροισμα.

Επιπροσθέτως πραγματοποιήθηκε η δοκιμασία χ^2 για τη σύγκριση της επιβίωσης των σταδίων του ωού, της προνύμφης, της νύμφης και της συνολικής περιόδου των ατελών σταδίων στις διαφορετικές σταθερές θερμοκρασίες. Προκειμένου να αποτυπωθεί η επίδραση της θερμοκρασίας στην επιβίωση του *T. castaneum*, χρησιμοποιήθηκε η κατανομή των ακραίων τιμών (Kim and Lee, 2003; Son and Lewis, 2005; Papanikolaou et al., 2013) μέσω του τύπου:

$$S(T) = k \exp[1 + (T_{\max} - T) / \rho - e^{(T_{\max} - T) / \rho}]$$

όπου $S(T)$ είναι η πιθανότητα επιβίωσης στη θερμοκρασία T , k είναι ο μέγιστος ρυθμός επιβίωσης, T_{\max} είναι η θερμοκρασία στην οποία επιτυγχάνεται η μέγιστη επιβίωση και ρ είναι μια προσαρμοσμένη σταθερά. Τα δεδομένα προσαρμόστηκαν στη μέθοδο των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (Systat Software Inc., 2008).

2.1.4 Αποτελέσματα

Το *T. castaneum* ολοκλήρωσε την ανάπτυξή του από το ωό έως το τέλειο άτομο σε όλες τις υπό εξέταση θερμοκρασίες με εξαίρεση τους 35 °C ενώ παρατηρήθηκε επίδραση της θερμοκρασίας κατά την ανάπτυξή του (Πίνακας 2.1.1). Η μέση χρονική περίοδος της συνολικής ανάπτυξης των ατελών σταδίων μειώθηκε από τις 193,0 ημέρες στους 20 °C, στις 42,0 ημέρες στους 30 °C ενώ ακολούθησε αύξηση σε 58,0 ημέρες στους 32,5 °C. Η χρονική περίοδος για την εκκόλαψη των προνυμφών μειώθηκε από τις 17,0 ημέρες στους 20 °C στις 4,0 ημέρες στους 32,5 °C ακολουθούμενη από αύξηση σε 5,0 ημέρες στους 35 °C. Η ίδια τάση παρατηρήθηκε στην ανάπτυξη των προνυμφών η οποία μειώθηκε από τις 157,0 ημέρες στους 20 °C στις 30,0 ημέρες στους 30 °C ενώ ακολούθησε και πάλι αύξηση στις 50,0 ημέρες στους 32,5 °C. Η μέση χρονική περίοδος της ανάπτυξης των νυμφών μειώθηκε από τις 19,0 ημέρες στους 20 °C στις 5,0 ημέρες στους 32,5 °C.

Τα δεδομένα για την ανάπτυξη του *T. castaneum* προσαρμόστηκαν επιτυχώς στο πρότυπο Briere ($R^2 = 0,75$, Διάγραμμα. 2.1.1). Οι εκτιμήσεις του προτύπου για το κατώτερο και ανώτερο θερμικό όριο τα οποία αφορούν στη συνολική περίοδο της ανάπτυξης των ατελών σταδίων βρέθηκαν στους 20,2 και 35,3 °C αντιστοίχως. Η θερμοκρασία στην οποία παρατηρήθηκε ο μεγαλύτερος ρυθμός ανάπτυξης υπολογίστηκε στους 31,2 °C. Τα δεδομένα εφαρμόστηκαν επιτυχώς και στο πρότυπο Ikemoto and Takai ($R^2 = 0,99$, Διάγραμμα. 2.1.2). Το πρότυπο έδειξε ότι χρειάζονται

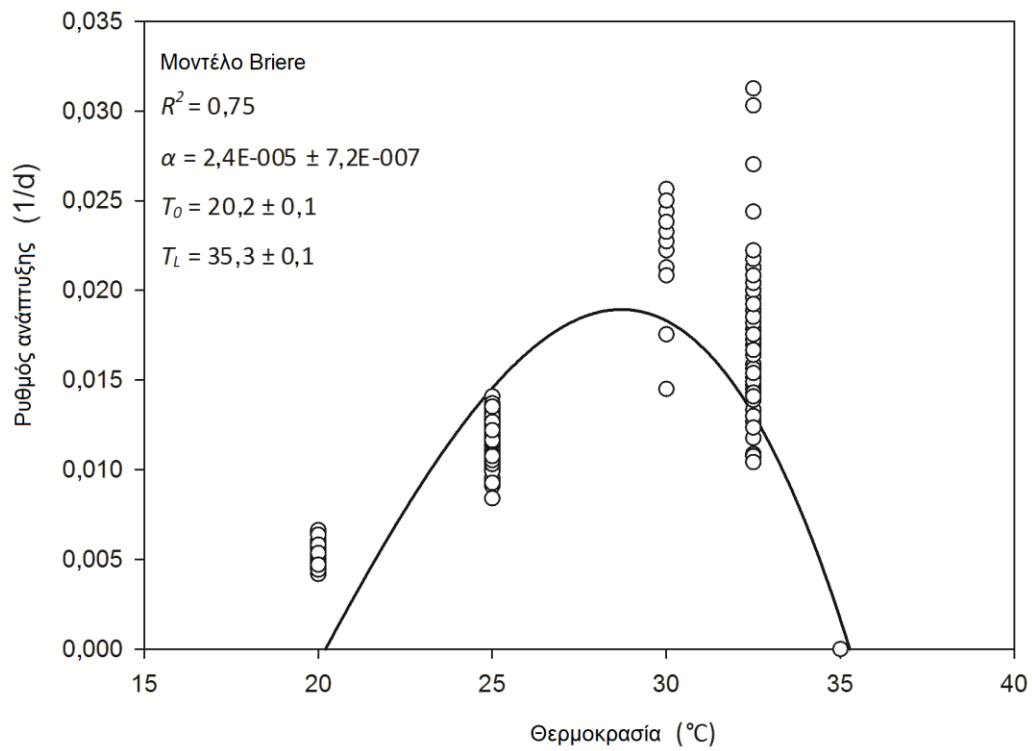
659,7 βαθμοημέρες πάνω από το θερμικό όριο των 16,9 °C ώστε να ολοκληρωθεί η ανάπτυξη του εντόμου από το στάδιο του ωού έως και την εμφάνιση του τελείου ατόμου.

Η θερμοκρασία επηρέασε την επιβίωση σε όλα τα αναπτυξιακά στάδια (εξαιρούμενο το στάδιο της νύμφης) και το σύνολο της περιόδου της ανάπτυξης των ατελών σταδίων (Πίνακας 2.1.2). Οι δείκτες επιβίωσης για το στάδιο του ωού ήταν 0,54, 0,88, 0,49, 0,84 και 0,09 ενώ για το προνυμφικό στάδιο ήταν 0,25, 0,76, 0,49, 0,43 και 0,00 στους 20, 25, 30, 32,5 και 35 °C αντιστοίχως. Στο στάδιο της νύμφης, δεν παρατηρήθηκε θνησιμότητα. Για το σύνολο της περιόδου της ανάπτυξης, οι δείκτες επιβίωσης ήταν 0,25, 0,76, 0,49, 0,43 και 0,00 στους 20, 25, 30, 32,5 και 35 °C αντιστοίχως.

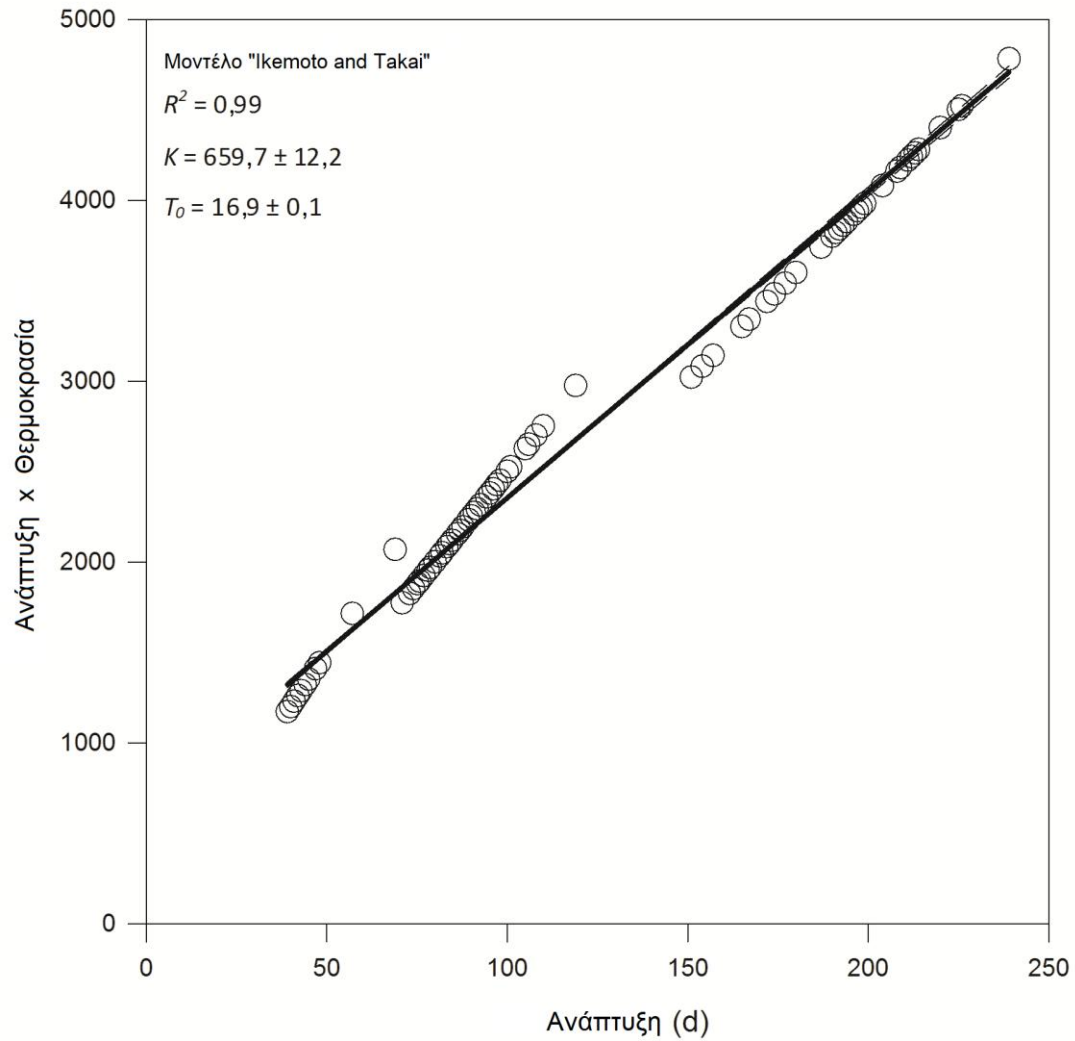
Η επίδραση της θερμοκρασίας στην επιβίωση του *T. castaneum* από ωό στο τέλειο στάδιο περιγράφηκε επιτυχώς από τη συνάρτηση των ακραίων τιμών ($R^2 = 0,84$, Διάγραμμα. 2.1.3). Το πρότυπο έδειξε πως η υψηλότερη επιβίωση (73,0%) σημειώθηκε στους 27,4 °C. Η λοξή κωδωνοειδής καμπύλη υποδεικνύει πως η επιβίωση μειώνεται και στα δύο άκρα του θερμοκρασιακού εύρους.

Πίνακας 2.1.1. Διάρκεια ανάπτυξης των ατελών σταδίων και της συνολικής ατελούς ανάπτυξης σε ημέρες (μέσος όρος \pm SE, διάμεσος) του *T. castaneum* σε διαφορετικές σταθερές θερμοκρασίες. Οι διάμεσοι μέσα στις στήλες που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δε διαφέρουν σημαντικά, μη παραμετρική ANOVA Kruskal-Wallis, δοκιμή Dunn σε $P = 0,05$. Όπου υπάρχουν παύλες, δεν καταγράφηκαν τιμές.

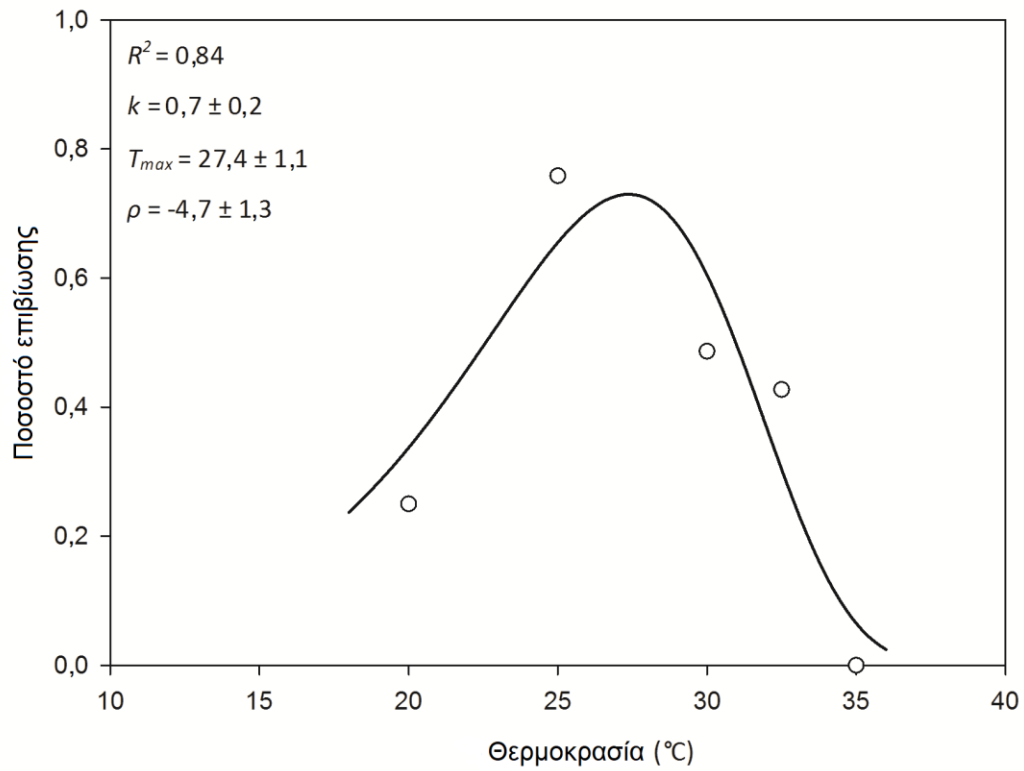
Θερμοκρασία	Στάδιο ανάπτυξης			Συνολική περίοδος ανάπτυξης ατελών σταδίων
	Ωο	Προνύμφη	Νύμφη	
20 °C	17,4 \pm 0,11, 17,0 ^a	157,1 \pm 3,23, 157,0 ^a	19,2 \pm 0,17, 19,0 ^a	193,4 \pm 3,13, 193,0 ^a
25 °C	8,3 \pm 0,03, 8,0 ^b	67,0 \pm 0,58, 66,0 ^b	10,7 \pm 0,04, 11,0 ^b	86,0 \pm 0,58, 85,0 ^b
30 °C	5,1 \pm 0,05, 5,0 ^c	31,3 \pm 0,87, 30,0 ^c	7,0 \pm 0,07, 7,0 ^c	43,3 \pm 0,92, 42,0 ^c
32,5 °C	3,6 \pm 0,04, 4,0 ^d	51,3 \pm 1,43, 50,0 ^d	5,2 \pm 0,06, 5,0 ^d	60,2 \pm 1,42, 58,0 ^d
35 °C	4,6 \pm 0,13, 5,0 ^{cd}	-	-	-
<i>H</i>	474,77	229,74	300,19	256,74
<i>df</i>	4	3	3	3
<i>P</i>	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$	$\leq 0,001$



Διάγραμμα 2.1.1 Προσαρμογή του προτύπου Briere στα παρατηρούμενα δεδομένα της ανάπτυξης στο σύνολο της περιόδου της ανάπτυξης του *T. castaneum*.



Διάγραμμα 2.1.2. Προσαρμογή του προτύπου Ikemoto and Takai στα παρατηρούμενα δεδομένα της ανάπτυξης στο σύνολο της περιόδου της ανάπτυξης του *T. castaneum*.



Διάγραμμα 2.1.3. Πρότυπο του ποσοστού επιβίωσης σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία για το σύνολο της περιόδου της ανάπτυξης του *T. castaneum*.

Πίνακας 2.1.2.

Δείκτες επιβίωσης των ατελών σταδίων και της συνολικής περιόδου (από το ωό στο τέλειο άτομο) του *T. castaneum* σε διαφορετικές σταθερές θερμοκρασίες. Όπου υπάρχουν παύλες δεν καταγράφηκαν τιμές ή δεν πραγματοποιήθηκε στατιστική ανάλυση.

Θερμοκρασία	Ωό	Προνύμφη	Νύμφη	Συνολική περίοδος ανάπτυξης ατελών σταδίων
20 °C	0,54	0,47	1,000	0,25
25 °C	0,88	0,87	1,000	0,76
30 °C	0,49	1,00	1,000	0,49
32,5 °C	0,84	0,48	1,000	0,43
35 °C	0,09	0,00	-	0,00
χ^2	326,6	153,3	-	265,8
df	4	4	-	4
<i>P</i>	≤ 0,001	≤ 0,001	-	≤ 0,001

2.1.5 Συζήτηση

Η θερμοκρασία είναι ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος καθορίζει την εξάπλωση των ειδών (Portner, 2001). Θεωρείται δε ως ο κύριος αβιοτικός παράγοντας που επηρεάζει την δραστηριότητα των εντόμων (Messenger, 1959). Συγκεκριμένα, η επίδραση της θερμοκρασίας στην ανάπτυξη και την επιβίωση των εντόμων αποτελεί κρίσιμη πτυχή στην ιστορία της ζωής τους επηρεάζοντας την αφθονία τους στον χρόνο και τον χώρο (Kontodimas et al., 2007; Papanikolaou et al., 2013, 2014; Son and Lewis, 2005). Τούτα τα βιολογικά χαρακτηριστικά μελετώνται συχνά μεταξύ των εντόμων λόγω της επίδρασής τους στις στρατηγικές της διαχείρισής τους. Η σχέση μεταξύ της ανάπτυξης των εντόμων και της θερμοκρασίας τυπικά χαρακτηρίζεται από μια μη γραμμική καμπύλη η οποία προσδιορίζεται από τα θερμικά όρια (Jalali et al., 2010; Azrag et al., 2017). Επίσης, το θερμικό άθροισμα συνοψίζει την ποσότητα της ενέργειας η οποία απαιτείται ώστε να ολοκληρωθεί η αναπτυξιακή διαδικασία η οποία συχνά εκτιμάται σε βαθμοημέρες (Honěk and Kocourek, 1988; Honěk, 1996).

Σε συνδυασμό με τα ποσοστά επιβίωσης, η γνώση αυτών των βιολογικών χαρακτηριστικών είναι σημαντική για την πρόβλεψη της φαινολογίας και της δυναμικής των εντόμων. Στην παρούσα εργασία, η μελέτη παρέχει δεδομένα σχετικά με την επίδραση της θερμοκρασίας στα χαρακτηριστικά της ζωής του *T. castaneum*, τα οποία είναι κρίσιμα για τη βαθύτερη κατανόηση της βιολογίας του εντόμου. Η μελέτη δείχνει πως η περίοδος της ανάπτυξης μειώνεται καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία από τους 20 στους 30 °C. Ωστόσο, παρατηρείται αύξηση μέχρι τους 32,5 °C, ενώ δεν σημειώνεται ανάπτυξη στους 35 °C. Αυτή η τάση απεικονίζεται επιτυχώς μέσω του προτύπου Briere καταδεικνύοντας ότι η καμπύλη του ρυθμού της ανάπτυξης του *T. castaneum*, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία είναι χαρακτηριστικό γνώρισμα της ανάπτυξής του (Papanikolaou et al., 2013). Ωστόσο, σύμφωνα με τον συντελεστή προσδιορισμού, το πρότυπο Ikemoto and Takai έδειξε καλύτερη προσαρμογή στα δεδομένα σε σύγκριση με το πρότυπο Briere. Στην παρούσα μελέτη υποστηρίζεται ότι το κατώτερο αναπτυξιακό όριο για το *T. castaneum* εντοπίζεται στους 16,9 °C.

Η ανάπτυξη και η εξέλιξη των ειδών των εντόμων σχετίζονται έντονα με το θερμικό άθροισμα και τα θερμικά όρια (Honěk and Kocourek, 1988; Papanikolaou et al., 2013). Σε θερμοκρασίες πάνω από το κατώτερο αναπτυξιακό όριο, το *T. castaneum* χρειάζεται λιγότερο χρόνο για την ολοκλήρωση συγκεκριμένων

αναπτυξιακών απαιτήσεων. Αυτή η χρονική περίοδος φτάνει σε μια ελάχιστη τιμή στους 31,2 °C. Η γρήγορη ανάπτυξη των απογόνων οδηγεί σε πρόσθετη αύξηση του πληθυσμού μέχρι η αύξηση της θερμοκρασίας να προκαλέσει σημαντική θνησιμότητα. Επομένως, η γνώση του θερμοκικού αθροίσματος είναι χρήσιμη για την πρόβλεψη της φαινολογίας του *T. castaneum*.

Η συνεχής έκθεση σε υψηλές θερμοκρασίες ήταν επιζήμια για την επιβίωση του *T. castaneum*. Αναμένεται ότι η θνησιμότητα σε αυτές τις θερμοκρασίες θα μειώσει την αφθονία του εντόμου. Γενικώς, η επιβίωση των εντόμων επηρεάζεται αρνητικά από τις υψηλές θερμοκρασίες (Xia et al., 1999; Grafton Cardwell et al., 2005; Jalali et al., 2010; Papanikolaou et al., 2013). Μέσω του προτύπου της επιβίωσης περιγράφηκε επαρκώς η σχέση μεταξύ της σταθερής θερμοκρασίας και της επιβίωσης για τη συνολική περίοδο της ανάπτυξης. Η αρνητική τιμή της παραμέτρου ρ καταδεικνύει ότι το *T. castaneum* έχει περιορισμένες δυνατότητες επιβίωσης σε υψηλά επίπεδα θερμοκρασιών.

Έχουν γίνει πολλές μελέτες, οι οποίες σχετίζονται με την αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum* σε διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας και οι οποίες οδηγούν σε αντικρουόμενα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, ο Howe (1956) διαπίστωσε ότι η χαμηλότερη περίοδος μεταξύ της ωοτοκίας μέχρι την εκκόλαψη των προνυμφών ήταν 2,6 ημέρες στους 32,5 °C σε σπασμένο σιτάρι, ενώ η μικρότερη διάρκεια του σταδίου της προνύμφης και της νύμφης ήταν 12,9 ημέρες στους 35 °C και 3,9 ημέρες στους 37,5 °C σε σπασμένο σιτάρι αντιστοίχως. Οι Roorda et al. (1982) έδειξαν ότι οι ταχύτερες περίοδοι ανάπτυξης από το ωό σε τέλειο αρσενικό άτομο και από το ωό σε τέλειο θηλυκό άτομο ήταν 20,82 και 21,36 ημέρες στους 35 °C σε κεχρί. Ο White (1987) προέβλεψε ότι οι θερμοκρασίες, οι οποίες κυμαίνονται μεταξύ 30 και 35 °C, θα αύξαναν τους πληθυσμούς του *T. castaneum* σε σιτάρι κατά 8 με 20 φορές τον μήνα. Επιπλέον, η περίοδος της ανάπτυξης από το ωό στο τέλειο άτομο ευνοήθηκε στους 35 °C (19,1 ημέρες) για το *T. castaneum* σε αλεύρι σόργου σε σχέση με τους 25 °C (45,6 ημέρες) ή τους 30 °C (26, 5 ημέρες) (Abdelsamad et al., 1988). Οι Hagstrum και Subramanyam (2006) ανέφεραν ότι η συντομότερη περίοδος από το ωό στο τέλειο άτομο θα ήταν 21,7 ημέρες στους 37,5 °C χρησιμοποιώντας κατάλληλες εξισώσεις και αναλύοντας ενδελεχώς δεδομένα προηγούμενων μελετών σε διαφορετικές δίαιτες. Ομοίως, οι Arthur et al. (2019) βρήκαν ότι οι νεοεκκολαυθείσες προνύμφες *T. castaneum* χρειάστηκαν 19,2, 21, 0, 21,4, 25,9 και 26,5 ημέρες για να φτάσουν στο στάδιο του τελείου ατόμου, όταν

εξετράφησαν με πίτουρο ρυζιού, ρύζι, αλεσμένο σπασμένο ρύζι, αλεσμένο ακέραιο ρύζι και ρυζάλευρο αντιστοίχως στους 37 °C. Στην παρούσα μελέτη δεν καταγράφηκε επιβίωση των προνυμφών στους 35 °C. Οι διαφορές με τις τιμές των προαναφερθέντων μελετών πιθανώς οφείλονται στην διαφορετική δίαιτα που χρησιμοποιήθηκε κατά τη διάρκεια του πειράματος. Οι Lhaloui et al. (1988) επισήμαναν ότι η διαφορετική τροφή επηρεάζει τα χαρακτηριστικά της ζωής του *T. castaneum*, δεδομένου ότι η επιβίωση και η αναπαραγωγή του εντόμου ήταν υψηλότερη στο αλεύρι σίτου σε σύγκριση με τον ακέραιο σίτο. Ομοίως, οι Xue et al. (2010) ανέφεραν ότι οι προνύμφες *T. castaneum* εμφάνισαν σημαντικές διαφορές ως προς το μήκος, το πλάτος, τη μορφολογία και την επιβίωσή τους, όταν εξετράφησαν σε διαφορετικά αμυλώδη προϊόντα. Οι συγγραφείς ανέφεραν πως οι διαφορές θα μπορούσαν να αποδοθούν στα θρεπτικά συστατικά, όπως π.χ. στις πρωτεΐνες που περιείχαν τα υπό εξέταση αμυλώδη προϊόντα. Για να διευκρινιστεί το εν λόγω ζήτημα χρειάζεται περαιτέρω πειραματισμός.

Ένα από τα πιο ενδιαφέροντα ευρήματα της παρούσας μελέτης είναι το χαμηλό ποσοστό επιβίωσης των ωών σε σχέση με τις προνύμφες στους 30 °C σε αντίθεση με τους 20, 25, 32,5 και 35 °C, παρατήρηση η οποία υποδηλώνει πως το ωό είναι το πιο ευάλωτο στάδιο ανάπτυξης του *T. castaneum* σε αυτό το επίπεδο θερμοκρασίας. Οι Ciesla και Ducom (2010) πρότειναν τον υποκαπνισμό με sulfuryl floride μέσα σε αλευρόμυλους οι οποίοι προηγουμένως είχαν θερμανθεί στους 30 °C για να σκοτωθεί το 100 % των ωών *T. castaneum*. Η παρούσα μελέτη δείχνει επίσης πως στους 30 °C η ανάπτυξη του *T. castaneum* επιταχύνεται σημαντικά οδηγώντας γρηγορότερα στην εμφάνιση των προνυμφών και των νυμφών σε σύγκριση με τους 20 και 25 °C. Δεδομένου ότι οι προνύμφες και ιδιαίτερα οι νύμφες του *T. castaneum* παρουσιάζουν αυξημένη ανοχή στον υποκαπνισμό (Navarro et al, 2004) προτείνεται η συχνή δειγματοληψία του αλεύρου όταν η θερμοκρασία φτάνει περίπου τους 30 °C στους αποθηκευτικούς χώρους. Η έγκαιρη ανίχνευση των ωών σημαίνει ότι πρέπει να ληφθούν μέτρα πριν τη γρήγορη ανάπτυξη του *T. castaneum* σε ανθεκτικότερα αναπτυξιακά στάδια (προνύμφες και νύμφες). Επομένως, οι 30 °C μπορεί να είναι η θερμοκρασία στην οποία θα μεγιστοποιηθεί η επίδραση των εντομοκτόνων επεμβάσεων στις πυκνότητες πληθυσμού του *T. castaneum*. Αυτό είναι ένα ζήτημα το οποίο χρειάζεται να λαμβάνεται σοβαρά υπ' όψιν κατά τον σχεδιασμό της στρατηγικής ενάντια στο *T. castaneum*.

Συμπερασματικά, αναμένεται ότι τα αποτελέσματα της παρούσας εργασίας θα μπορούσαν να φανούν χρήσιμα στη διαχείριση του *T. castaneum* και να ενσωματωθούν σε μαθηματικά πρότυπα, έτσι ώστε να προβλεφθεί η δυναμική του πληθυσμού και η πιθανή εξάπλωση του εντόμου υπό διάφορα βιοτικά και αβιοτικά πειραματικά σενάρια (Kriticos et. al., 2013; Douma et al., 2016; Papanikolaou et al., 2019). Περαιτέρω μελέτες, οι οποίες θα περιλαμβάνουν τη θερμοκρασία στην βιολογία και την οικολογία των εχθρών των αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων, είναι απαραίτητες ως πρόσθετα συστατικά προτύπων που συνδέουν την διασπορά των εντόμων μέσω του διεθνούς εμπορίου.

2.1.6 Βιβλιογραφία

- Douma, J.C., Pautasso, M., Venette, R.C., Pobinet, C., Hemerik, L., Mourits, M.C.M., Schans, J., Van der Werf, W., 2016. Pathway models for analysing and managing the introduction of alien plant pests - an overview and categorization. *Ecol. Model.* 339, 58e67
- Kriticos, D.J., Venette, R.C., Baker, R.H.A., Brunel, S., Koch, H., Rafoss, T., Van der Werf, W., Worner, S.P., 2013. Invasive alien species in the food chain : advancing risk assessment models to address climate change, economics and uncertainty. *NeoBiota* 7, 1e7
- Papanikolaou, N.E., Kavallieratos, N.G., Kondakis, M., Boukouvala, M.C., Nika, E.P., Demiris, N., 2019. Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* combining deterministic and stochastic demography. *PLoS One* 14 (2), e0212182.
- Abdelsamad, R.M., Elhag, E.A., Eltayeb, Y.M., 1988. Studies on the phenology of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) in the Sudan Gezira. *J. Stored Prod. Res.* 24, 101e105.
- Aitken, A.D., 1975. *Insect Travelers, 1: Coleoptera*. HMSO, London. Technical Bulletin 31.
- Arthur, F.H., Hale, B.A., Starkus, L.A., Gerken, A.R., Campbell, J.F., McKay, T., 2019. Development of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) on rice milling components and by-products: effects of diet and temperature. *J. Stored Prod. Res.* 80, 85e92.
- Athanassiou, C.G., Kavallieratos, N.G., Palyvos, N.E., Sciarretta, A., Trematerra, P., 2005. Spatio-temporal distribution of insects and mites in horizontally-stored wheat. *J. Econ. Entomol.* 98, 1058e1069.
- Athanassiou, C.G., Kavallieratos, N.G., Boukouvala, M.C., 2016a. Population growth of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on different commodities. *J. Stored Prod. Res.* 69, 72e77.
- Athanassiou, C.G., Kavallieratos, N.G., Chiriloaie, A., Vassilakos, T.N., Fatu, V., Drosu, S., Ciobanu, M., Dudoiu, R., 2016b. Insecticidal efficacy of natural

- diatomaceous earth deposits from Greece and Romania against four stored grain beetles: the effect of temperature and relative humidity. *Bull. Insectol.* 69, 25e34.
- Athanassiou, G.G., Kavallieratos, N.G., Brabec, D.L., Oppert, B., Guedes, R.N.C., Campbell, J.F., 2019. From immobilization to recovery: towards the development of a rapid diagnostic indicator for phosphine resistance. *J. Stored Prod. Res.* 80, 28e33.
- Azrag, A.G.A., Murungi, L.K., Tonnang, H.E.Z., 2017. Temperature-dependent models of development and survival of an insect pest of African tropical highlands, the coffee antestia bug *Antestiopsis thunbergii* (Hemiptera: Pentatomidae). *J. Therm. Biol.* 70, 27e36.
- Boukouvala, M.C., Romano, D., Kavallieratos, N.G., Athanassiou, C.G., Stefanini, C., Canale, A., Benelli, G., 2019. Asymmetric boosts male mating success in the red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *J. Stored Prod. Res.* 81, 1e6.
- Briere, J.F., Pracros, P., Le Roux, A.Y., Pierre, J.S., 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environ. Entomol.* 28, 22e29.
- Cato, A.J., Elliott, B., Nayak, M.K., Phillips, T.W., 2017. Geographic variation in phosphine resistance among North American populations of the red flour beetle (Coleoptera: Tenebrionidae). *J. Econ. Entomol.* 110, 1359e1365.
- Ciesla, Y., Ducom, P., 2010. Efficacy against eggs of *Tribolium castaneum* after fumigations with sulfuryl fluoride (ProFume®) in flour mills. In: Proceedings of the International Symposium on Stored Product Protection "Stress on Chemical Products", 25e26 May 2009. Berlin, Germany. Julius Kühn-Institut, Berlin, Germany, pp. 48e51.
- Cox, P.D., Wakefield, M.E., Jacob, T.A., 2007. The effects of temperature on flight initiation in a range of moths, beetles and parasitoids associated with stored products. *J. Stored Prod. Res.* 43, 111e117.
- Daglish, G.J., Nayak, M., 2012. Potential of the neonicotinoid imidacloprid and the oxadiazine indoxacarb for controlling five coleopteran pests of stored grain. *Insect Sci.* 19, 96e101.

- Dixon, A.F.G., Honěk, A., Keil, P., Kotela, M.A.A., Sizing, A.L., Jaroš, V., 2009. Relationship between the minimum and maximum temperature thresholds for development in insects. *Funct. Ecol.* 23, 257e264.
- Douma, J.C., Pautasso, M., Venette, R.C., Pobinet, C., Hemerik, L., Mourits, M.C.M., Schans, J., Van der Werf, W., 2016. Pathway models for analysing and managing the introduction of alien plant pests - an overview and categorization. *Ecol. Model.* 339, 58e67.
- Fabres, A., de Campos Macedo da Silva, J., Fernandes, K.V.S., Xavier Filho, J., Rezende, G.L., Oliveira, A.E.A., 2014. Comparative performance of the red flour *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) on different plant diets. *J. Pest. Sci.* 87, 495e506.
- Faridi, H., Gaines, C., Finney, P., 1994. Soft wheat quality in production of cookies and crackers. In: Bushuk, W., Rasper, V.F. (Eds.), *Wheat Production, Properties and Quality*. Chapman and Hall, London, pp. 154e168.
- Fields, P.G., 1992. The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures. *J. Stored Prod. Res.* 28, 89e118.
- Grafton Cardwell, E.E., Gu, P., Montez, G., 2005. Effects of temperature on development of vedalia beetle, *Rodolia cardinalis* (Mulsant). *Biol. Control* 32, 473e478.
- Hagstrum, D.W., Subramanyam, B., 2006. *Fundamentals of Stored-Product Entomology*. AACC International, St. Paul, MN.
- Hagstrum, D.W., Subramanyam, B., 2009. *Stored-product Insect Resource*. AACC International, St. Paul, MN.
- Hill, D.S., 2003. *Pests of Storage Foodstuffs and Their Control*. Kluwer Academic Publishers, New York.
- Honěk, A., 1996. Geographical variation in thermal requirements for insect development. *Eur. J. Entomol.* 93, 303e312.
- Honěk, A., Kocourek, F., 1988. Thermal requirements for development for aphidophagous Coccinellidae (Coleoptera), Chrysopidae, Hemerobiidae (Neuroptera), and Syrphidae (Diptera): some general trends. *Oecologia* 76, 455e460.

- Howe, R.W., 1956. The effect of temperature and humidity on the rate of development and mortality of *Tribolium castaneum* (Hebst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Ann. Appl. Entomol.* 44, 356e368.
- Howe, R.W., 1965. A summary of estimates of optimal and minimal conditions for population increase of some stored products insects. *J. Stored Prod. Res.* 1, 177e184.
- Ikemoto, T., Takai, K., 2000. A new linearized formula for the low of total effective temperature and the evaluation of line-fitting methods with both variables subject to error. *Environ. Entomol.* 29, 671e682.
- Jalali, M.A., Tirry, L., Arbab, A., De Clercq, P., 2010. Temperature-dependent development of the two-spotted ladybeetle, *Adalia bipunctata*, on the green peach aphid, *Myzus persicae*, and a factitious food under constant temperatures. *J. Insect Sci.* 10, 124.
- Jian, F., Jayas, D.S., White, N.D.G., 2005. Movement of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) adults in response to temperature gradients in vertical and horizontal wheat and corn columns. *J. Econ. Entomol.* 98, 1413e1419.
- Julio, A.H.F., Gigliolli, A.A.S., Cardoso, K.A.K., Drosdoski, S.D., Kulza, R.A., Seixas, F.A.V., Ruvolo Takasusuki, M.C.C., de Souza, C.G.M., Lapenta, A.S., 2017. Multiple resistance to pirimiphos-methyl and bifenthrin in *Tribolium castaneum* involves the activity of lipases, esterases, and laccase2. *Comp. Biochem. Physiol. C Toxicol. Pharmacol.* 195, 27e43.
- Kavallieratos, N.G., Athanassiou, C.G., Arthur, F.H., Throne, J.E., 2012. Lesser grain borers, *Rhyzopertha dominica*, select rough rice kernels with cracked hulls for reproduction. *J. Insect Sci.* 12, 38.
- Kim, D.S., Lee, J.H., 2003. Oviposition model of *Carposina sasakii* (Lepidoptera: Carposinidae). *Ecol. Model.* 162, 145e153.
- Kontodimas, D.C., Milonas, P.G., Stathas, G.J., Economou, L.P., Kavallieratos, N.G., 2007. Life table parameters of the pseudococcid predators Comparative temperature-dependent development of *Nephus includens* and *Nephus bisignatus*. *Eur. J. Entomol.* 104, 407e415.

- Krinsky, W., 2019. Beetles (Coleoptera). In: Mullen, G., Durden, L. (Eds.), *Medical and Veterinary Entomology*, third ed. Academic Press, Amsterdam, pp. 129e143.
- Kriticos, D.J., Venette, R.C., Baker, R.H.A., Brunel, S., Koch, H., Rafoss, T., Van dererf, W., Worner, S.P., 2013. Invasive alien species in the food chain : advancing risk assessment models to address climate change, economics and uncertainty. *NeoBiota* 7, 1e7.
- Kumar, R., 2017. *Insect Pests on Stored Grain. Biology, Behavior, and Management Strategies*. Apple Academic Press, Waretown, NJ.
- Kumar, H., Panigrahi, M., Chhotaray, S., Bhanuprakash, V., Shandilya, R., Sonwane, A., Bhushan, B., 2018. Red flour beetle (*Tribolium castaneum*): from population genetics to functional genomics. *Vet. World* 11, 1043e1046.
- Lhaloui, S., Hagstrum, D.W., Keith, D.L., Holtzer, T.O., Ball, H.J., 1988. Combined influence of temperature and moisture on red flour beetle (Coleoptera: Tenebrionidae) reproduction on whole grain wheat. *J. Econ. Entomol.* 81, 488e489.
- Longstaff, B.C., 1995. An experimental study of the influence of food quality and population density on the demographic performance of *Tribolium castaneum* (Hebst.). *J. Stored Prod. Res.* 31, 123e129.
- Mahroof, R.M., Hagstrum, D.W., 2012. Biology, behavior, and ecology of insects in processed commodities. In: Hagstrum, D.W., Phillips, T.W., Cuperus, G. (Eds.), *Stored Product Protection*. Kansas State University, Manhattan, KS, pp. 33e44.
- Messenger, P.S., 1959. Bioclimatic studies with insects. *Annu. Rev. Entomol.* 4, 183e206.
- Navarro, S., Isikber, A.A., Finkelman, S., Rindner, M., Azrieli, A., Dias, R., 2004. Effectiveness of short exposures of propylene oxide alone and in combination with low pressure or carbon dioxide against *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *J. Stored Prod. Res.* 40, 197e205.
- Panagiotakopulu, E., Buckland, P.C., 2017. A thousand bites - insect introduction and late Holocene environments. *Quat. Sci. Rev.* 156, 23e35.
- Papanikolaou, N.E., Milonas, P.G., Kontodimas, D.C., Demiris, N., Matsinos, Y.G., 2013. Temperature-dependent development, survival, longevity and fecundity of the

- aphidophagous ladybird beetle, *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 106, 228e234.
- Papanikolaou, N.E., Milonas, P.G., Kontodimas, D.C., Demiris, N., Matsinos, Y.G., 2014. Life table analysis of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) at constant temperatures. Ann. Entomol. Soc. Am. 107, 158e162.
- Papanikolaou, N.E., Kavallieratos, N.G., Kondakis, M., Boukouvala, M.C., Nika, E.P., Demiris, N., 2019. Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* combining deterministic and stochastic demography. PLoS One 14 (2), e0212182.
- Pimentel, M.A.G., Faroni, L.R.D.'A., Totola, M.R., Guedes, R.N.C., 2007. Phosphine resistance, respiration rate and fitness consequences in stored-product insects. Pest Manag. Sci. 63, 876e881.
- Portner, H.O., 2001. Climate change and temperature-dependent biogeography: oxygen limitation of thermal tolerance in animals. Naturwissenschaften 88, 137e146.
- Rajan, T.S., Muralitharan, Daglish, G.J., Mohankumar, S., Rafter, M.A., Chandrasekaran, S., Mohan, S., Vimal, D., Srivastava, C., Lohanathan, M., 2018. Flight of three major insect pests of stored grain in the monsoonal tropics of India, by latitude, season and habitat. J. Stored Prod. Res. 76, 43e50.
- Rees, D., 2004. Insects of Stored Products. CSIRO Publishing, Collinwood.
- Robinson, W.H., 2005. Urban Insects and Arachnids. A Handbook of Urban Entomology. Cambridge University Press, Cambridge.
- Roorda, F.A., Schulten, G.G.M., Andriessen, E.A.M., 1982. Laboratory observations on the development of *Tribolium castaneum* Herbst (Coleoptera: Tenebrionidae) on millet at different temperature and relative humidities. Z. Angew. Entomol. 93, 446e452.
- Son, Y., Lewis, E.E., 2005. Modelling temperature-dependent development and survival of *Otiorhynchus sulcatus* (Coleoptera: Curculionidae). Agric. For. Entomol. 7, 201e209.
- Stejskal, V., Hubert, J., Li, Z., 2018. Human health problems and accidents associated with occurrence and control of storage arthropods and rodents. In: Athanassiou,

- C.G., Arthur, F.H. (Eds.), Recent Advances in Stored Product Protection. Springer Nature, Berlin, pp. 19e43.
- Systat Software Inc., 2008. SigmaPlot for Windows 11.0. San Jose, CA.
- Tribolium* Genome Sequencing Consortium, 2008. The genome of the model beetle and pest *Tribolium castaneum*. Nature 452, 949e955.
- USW (U.S. Wheat Associates), 2018. 2018 Crop Quality Report. U.S. Wheat Associates, Arlington, VA.
- White, G.G., 1987. Effects of temperature and humidity on the rust-red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae), in wheat grain. Aust. J. Entomol. 35, 43e59.
- Xia, J.Y., Van Der Werf, W., Rabbinge, R., 1999. Temperature and prey density on bionomics of *Coccinella septempunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) feeding on *Aphis gossypii* (Homoptera: Aphididae) on cotton. Environ. Entomol. 28, 307e314.
- Xue, M., Subramanyam, Bh, Shi, Y.C., Campbell, J., Hartzler, M., 2010. Development, relative retention, and fecundity of *Tribolium castaneum* (Herbst) on different starches. In: Carvalho, M.O., Fields, P.G., Adler, C.S., Arthur, F.H., Athanassiou, C.G., Campbell, J.F., Fleurat-Lessard, F., Flinn, P.W., Hodges, R.J., Isikber, A.A., Navarro, S., Noyes, R.T., Riudavets, J., Sinha, K.K., Thorpe, G.R., Timlick, B.H., Trematerra, P., White, N.D.G. (Eds.), Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection, 27 June e 2 July 2010, Estoril, Portugal. Julius Kühn-Institut, Berlin, Germany, pp. 207e211.

2.2 Αξιολόγηση του σιμιγδαλιού, σπασμένου σίτου και αραβοσίτου για την ανάπτυξη του *Tribolium castaneum* (Herbst, Coleoptera: Tenebrionidae)*

2.2.1 Εισαγωγή

Η ποιότητα και η ποσότητα των αποθηκευμένων προϊόντων συχνά συνδέεται με την παρουσία των αρθροπόδων οργανισμών (Hubert, 2012; Muatinte et al., 2019). Αρκετά έντομα τα οποία ανήκουν κυρίως στις τάξεις των κολεοπτέρων και των λεπιδοπτέρων είναι σοβαροί εχθροί των αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων (Hill, 2003). Το κόκκινο σκαθάρι των αλεύρων, *Tribolium castaneum* (Herbst, Coleoptera: Tenebrionidae), παρά το γεγονός ότι είναι ιθαγενές ινδο-αυστραλιανό είδος, θεωρείται σημαντικός εχθρός των αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων παγκοσμίως προκαλώντας σημαντικές οικονομικές απώλειες (Ridley et al., 2011; Abdullahi et al., 2017; Kumar, 2017; Kumar et al., 2018). Ενώ δύναται να προκαλέσει ζημιές σε τρόφιμα όπως σε ελαιούχους σπόρους, ξηρούς καρπούς, μπαχαρικά, αποξηραμένα φρούτα, όσπρια, καφέ ή κακάο, προτιμά κυρίως δημητριακά και τα παράγωγά τους (Rees, 2004; Hagstrum and Subramanyam, 2009; Mahroof and Hagstrum, 2012). Ως δευτερεύων εχθρός, το *T. castaneum* τρέφεται συνήθως με κατεστραμμένους σπόρους σιτηρών, το έμβρυο των σπόρων και τα άλευρα (Arbogast, 1991; Kumar et al., 2018; Skourti et al., 2019). Το έντομο είναι άφθονο στους αλευρόμυλους και η παρουσία του ποικίλει αναλόγως της τοποθεσίας εντός των μύλων και τον τύπο της εγκατάστασης (Campbell et al., 2010a; Campbell et al., 2010b). Το *T. castaneum* είναι επίσης ικανό να προσβάλει τα δημητριακά και πριν τη συγκομιδή τους. Για παράδειγμα, ο Giles (1964) εντόπισε προσβολή από αρκετούς εχθρούς των αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων της τάξης των κολεοπτέρων, συμπεριλαμβανομένου του *T. castaneum*, σε αγρό με καλλιέργεια σόργου στην Βόρειας Νιγηρία.

***Skourti, A., N. G. Kavallieratos and N. E. Papanikolaou 2020.** Suitability of semolina, cracked wheat and cracked maize as feeding commodities for *Tribolium castaneum* (Herbst; Coleoptera: Tenebrionidae). *Insects* 11: 99. **(Impact factor 2020 = 2,769.)**

Η αποτελεσματική διαχείριση των εντόμων σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης είναι ένα ζήτημα το οποίο καλούνται συχνά να λύσουν οι εξειδικευμένοι επιστήμονες της εφαρμοσμένης εντομολογίας. Η γνώση της βιολογίας των εντόμων είναι σημαντική καθώς παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργικότητά τους και ως εκ τούτου συμβάλλει στη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη διαχείρισή τους (Kavallieratos et al., 2019; Skourti et al., 2019). Η αξιολόγηση των θεμελιωδών βιολογικών παραμέτρων των εντόμων (ανάπτυξη, επιβίωση και αναπαραγωγή), οι οποίες επηρεάζονται από την κατανάλωση της τροφής (Dethier, 1954; Kalushkon and Hodek, 2004; Papachristos et al., 2015), επιτρέπει την αξιολόγηση της απόδοσής τους σε διαφορετικούς οικοτόπους (Dethier, 1954; Kalushkon and Hodek, 2004; Papanikolaou et al., 2013; Papachristos et al., 2015; Kavallieratos et al., 2019). Η θρεπτική αξία της τροφής των εντόμων μπορεί να εκτιμηθεί από τις προαναφερθείσες παραμέτρους και την αύξηση του πληθυσμού τους (Dethier, 1954). Για παράδειγμα, η επιβίωση των ατελών σταδίων των εντόμων, η γονιμότητα των θηλέων και η αύξηση του πληθυσμού μπορεί να επηρεαστούν αρνητικά από τρόφιμα χαμηλής θρεπτικής αξίας (Kavallieratos et al., 2019).

Η δημογραφία συμβάλλει στην κατανόηση της πιθανής αύξησης του πληθυσμού των ζωντανών οργανισμών (Carey, 1993). Μελετώντας τη «μελέτη σειράς» των εντόμων από τη γέννηση έως το θάνατο, μπορούν να εξαχθούν χρήσιμα συμπεράσματα για τη βιολογία τους μέσω της κατασκευής των πινάκων ζωής και του υπολογισμού διαφόρων πληθυσμιακών παραμέτρων (Carey, 1993; Gutierrez, 1996; Kontodimas et al., 2008; Papanikolaou et al., 2014; Zeki et al., 2015; Kavallieratos et al., 2019). Για παράδειγμα, η γνώση του ενδογενούς ρυθμού αύξησης είναι ένας δείκτης της μελλοντικής αύξησης ή της μείωσης του πληθυσμού των εντόμων, γεγονός το οποίο έχει διάφορες πρακτικές εφαρμογές (π.χ. πρόβλεψη επιπέδου πληθυσμού σε μια δεδομένη στιγμή, σύγκριση πληθυσμών διαφορετικών ειδών εντόμων) (Papanikolaou et al., 2019).

Παρά το γεγονός ότι ορισμένα βιολογικά χαρακτηριστικά του *T. castaneum* όπως η ανάπτυξη, η αναπαραγωγή και η θνησιμότητα υπό ποικίλες βιοτικές και αβιοτικές συνθήκες έχουν μελετηθεί προηγουμένως (π.χ. Lhaloui et al., 1988; LeCato and Flaherty, 1991; Xue et al., 2010; Abdullahi et al., 2017; Arthur et al., 2019a,b; Skourti et al., 2019) υπάρχει έλλειψη γνώσης σχετικά με την επίδραση των διαφόρων τροφίμων σε πληθυσμιακό επίπεδο με τον υπολογισμό των δημογραφικών παραμέτρων του. Για παράδειγμα, οι Li και Arbogast (1991) εξέτασαν

πώς η κατάσταση του σπόρου (σπασμένος έναντι ακεραίου) του αποθηκευμένου αραβοσίτου επηρεάζει τη δημογραφία του *T. castaneum*. Μια πρόσφατη έρευνα σχετικά με τη δημογραφία του *T. castaneum*, το οποίο προσέβαλε δέκα ποικιλίες κριθαριού, αποκάλυψε ότι δύο από τις δέκα ήταν ακατάλληλες για την αύξηση του πληθυσμού του εντόμου (Rahimi Namin et al., 2018). Ως εκ τούτου, ο στόχος της παρούσας μελέτης είναι να συμπληρωθεί η υφισταμένη γνώση της βιολογίας του *T. castaneum* μελετώντας την καταλληλότητα του σιμιγδαλιού, του σπασμένου σίτου και του σπασμένου αραβοσίτου ως τροφών για την ανάπτυξη του πληθυσμού του εντόμου. Η προσέγγιση της παρούσας έρευνας απεικονίζεται μέσω της συγκριτικής μελέτης της ανάπτυξης, της επιβίωσης και της αναπαραγωγής του *T. castaneum* στις προαναφερθείσες τροφές και στην κατασκευή του πίνακα ζωής του.

2.2.2 Υλικά και μέθοδοι

2.2.2.α Έντομα

Οι αποικίες *T. castaneum* (εικ. 2.1) εξετρέφοντο σε λευκό αλεύρι μαλακού σίτου (μείγμα ποικιλιών, αποτελούμενο από το ενδοσπέρμιο μόνον) στους 30 °C, σχετική υγρασία 65% υπό συνεχή σκότος. Τα άτομα *T. castaneum* από τα οποία εγκαταστάθηκε η εκτροφή συλλέχθηκαν από μια ελληνική αποθήκη (νότια Ελλάδα) το 2003. Η εκτροφή του εντόμου έκτοτε συντηρείται στο Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

2.2.2.β Τροφές

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκαν καθαρό και απαλλαγμένο από προσβολές και φυτοφάρμακα σιμιγδάλι (μίγμα ποικιλίας σκληρού σίτου), σπασμένος σίτος (var. Claudio) και σπασμένος αραβόσιτος (var. Dias). Πριν από την έναρξη των πειραμάτων, η υγρασία των τροφών ρυθμίστηκε στο 13,5% με θέρμανση σε φούρνο στους 50 °C (Athanassiou et al., 2016; Athanassiou et al., 2017) (εικ. 2.3). Η υγρασία υπολογίστηκε με βαθμονομημένο υγρασιόμετρο (mini GAC plus, Dickey-John Europe S.A.S., Colombes, Γαλλία).

2.2.3 Πειραματική διαδικασία

Οι σπόροι του σιταριού και του αραβοσίτου σπάστηκαν με τη χρήση χειρόμυλου. Στη συνέχεια, κάθε σπασμένη τροφή κοσκινίστηκε με δύο διαφορετικά κόσκινα (εικ. 2.17): No 30 (διάμετρος οπών 2,36 mm) (Advantech Manufacturing, Inc., New Berlin, WI, USA) και No 10 (διάμετρος οπών 2,00 mm) (Retsch GmbH, Haan, Γερμανία). Οι σπόροι οι οποίοι παρέμειναν στο κόσκινο No 10 χρησιμοποιήθηκαν στις δοκιμές. Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε τρυβλία Petri (διάμετρος 8 cm, ύψος 1 cm). Η εσωτερική κάθετη επιφάνεια κάθε τρυβλίου καλύφθηκε με πολυτετραφθοροαιθυλένιο (60% κ.β. διάλυμα σε ύδωρ) (Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Taufkirchen, Γερμανία) ώστε να καταστεί αδύνατη η διαφυγή των εντόμων. Το καπάκι κάθε τρυβλίου είχε ένα κεντρικό κυκλικό άνοιγμα (διαμέτρου 1,50 cm) (εικ. 2.4 και 2.5) το οποίο καλυπτόταν με μουσελίνα ώστε να επιτρέπει τον επαρκή αερισμό στον εσωτερικό χώρο των τρυβλίων. Στη συνέχεια, τοποθετήθηκε χωριστά σε κάθε τρυβλίο ποσότητα 5 g κάθε μίας από τις εξετασθείσες τροφές. Όλες οι ποσότητες των 5 g ζυγίστηκαν με ζυγαριά Precisa XB3200D (Alpha Analytical Instruments, Γέρακας, Ελλάς). Για τη συλλογή των ωών, μεταφέρθηκαν 50 τέλεια άτομα *T. castaneum* ηλικίας 7 ημερών περίπου, χωρίς τον έλεγχο του φύλου τους, από την εκτροφή σε γυάλινο δοχείο όγκου 250 ml (εικ. 2.6), το οποίο περιείχε 125 ml προ-κοσκινισμένο λευκό μαλακό αλεύρι σίτου, για 24 ώρες στους 30 °C, 65% σχετική υγρασία υπό συνεχή σκότος. Την επόμενη ημέρα, αφαιρέθηκαν τα τέλεια άτομα από το αλεύρι με κόσκινο No 20 (Advantech Manufacturing, Inc., New Berlin, WI, USA), ενώ τα ωά διαχωρίστηκαν από το αλεύρι με κόσκινο No 60 (Advantech Manufacturing, Inc., New Berlin, WI, USA) (εικ. 2.7) καθώς παρέμειναν στα δικτυωτά ανοίγματα του κοσκίνου. Τα ωά (εικ. 8) τοποθετήθηκαν πολύ προσεκτικά με λεπτό πινέλο (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, Λονδίνο, UK) ένα σε κάθε τρυβλίο χωρίς αλεύρι. Τα τρυβλία τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους 30 °C, σχετική υγρασία 65% υπό συνεχή σκότος (εικ. 2.14) και ελέγχονταν καθημερινά σε στερεοσκόπιο SZX9 Olympus (ολική μεγέθυνση 57x) (Bacacos S.A., Αθήνα, Ελλάς) (εικ. 2.11) για την εμφάνιση των προνυμφών. Συνολικά, 143, 161 και 146 ωά χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη από το ωό στο τέλειο άτομο σε σιμιγδάλι, σπασμένο σιτάρι και σπασμένο αραβόσιτο, αντίστοιχα. Οι νεοεκκολαφθείσες προνύμφες *T. castaneum* μεταφέρθηκαν χωριστά και πολύ προσεκτικά με λεπτό πινέλο (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, Λονδίνο, UK) σε τρυβλία τα οποία είχαν προετοιμαστεί προηγουμένως όπως περιγράφεται παραπάνω. Για κάθε τροφή χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά πινέλα. Κατόπιν, τα

τρυβλία τα οποία περιείχαν προνύμφες τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους 30 °C, σχετική υγρασία 65% υπό συνεχές σκότος. Τα τρυβλία παρέμειναν σε αυτές τις συνθήκες για όλη την πειραματική περίοδο (εικ. 2.25 και 2.26). Η διάρκεια και η επιβίωση των προνυμφών και των νυμφών καταγράφονταν καθημερινά για μια περίοδο 113 ημερών από τη γέννησή τους (εικ. 2.15). Οι προνύμφες οι οποίες δεν κινούνταν ή είχαν αφυδατωθεί ή το χρώμα τους ήταν καστανό σημειώθηκαν ως νεκρές (εικ. 2.16). Όταν τα έντομα έφτασαν στο στάδιο της τελείου ατόμου, τοποθετήθηκαν ανά ζεύγη προς σύζευξη (εικ. 2.18) και διατηρήθηκαν χωριστά στα τρυβλία. Η διάρκεια ζωής των τελείων ατόμων και η γονιμότητα των θηλέων ατόμων εξετάζονταν κάθε 24 ώρες για μια περίοδο 470 ημερών από τη γέννησή τους. Το φύλο του *T. castaneum* προσδιορίστηκε στο στάδιο του τελείου ατόμου ακολουθώντας την περιγραφή του Halstead (1963).

2.2.4 Στατιστική ανάλυση

Για να προσδιοριστεί η επίδραση του σιμιγδαλιού, του σπασμένου σιταριού και του σπασμένου αραβοσίτου στον χρόνο ανάπτυξης της προνύμφης και της νύμφης, την διάρκεια ζωής των τελείων ατόμων και τη γονιμότητα των θηλαίων, τα δεδομένα υποβλήθηκαν σε ανάλυση διασποράς Kruskal-Wallis (δοκιμή Dunn σε $\alpha = 0,05$), καθώς η δοκιμή Shapiro-Wilk έδειξε απόκλιση από την κανονική κατανομή. Η μέθοδος Kaplan-Meier χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των καμπυλών επιβίωσης του *T. castaneum* σε κάθε μία από τις εξετασθείσες τροφές. Επιπλέον, η δοκιμή Kaplan-Meier χρησιμοποιήθηκε για να προσδιοριστούν οι μέσοι χρόνοι επιβίωσης και τα διάστημα εμπιστοσύνης 95%. Οι αναλύσεις διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό SigmaPlot (Systat Software, 2008).

Από τα δεδομένα για την ανάπτυξη, την επιβίωση, τη γονιμότητα και τη διάρκεια ζωής του *T. castaneum*, υπολογίστηκε ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός:

$R_0 = \sum (l_x \times m_x)$ δηλ. το κατ' άτομο ποσοστό παραγωγής απογόνων σε μια χρονική περίοδο ίση με την περίοδο μελέτης σειράς (το l_x αντιστοιχεί στην επιβίωση της μελέτης σειράς στην ηλικία x και m_x στη γονιμότητα για την ηλικία), τον ενδογενή ρυθμό αύξησης (r_m) $\sum (e^{r_m \times x} \times l_x \times m_x) = 1$ δηλαδή τον ρυθμό φυσικής αύξησης σε έναν κλειστό πληθυσμό (όπου η διαδικασία προσαρμόζεται ανάλογα με την ηλικία για μεγάλο χρονικό διάστημα για τον υπολογισμό της γονιμότητας και θνησιμότητας), ο

πεπερασμένος ρυθμός αύξησης, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο θα αυξάνεται ο πληθυσμός σε κάθε χρονικό βήμα και ο μέσος χρόνος γενιάς $T = \frac{\ln R_0}{r_m}$ δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί ο πληθυσμός με έναν συντελεστή ίσο με τον καθαρό ρυθμό αναπαραγωγής. Οι σημαντικές διαφορές μεταξύ των παραμέτρων σε κάθε εξετασθείσα τροφή δοκιμάστηκαν σε διαστήματα εμπιστοσύνης 95% τα οποία προέκυψαν με bootstrapping σε λογισμικό R (R Development Core Team, 2019).

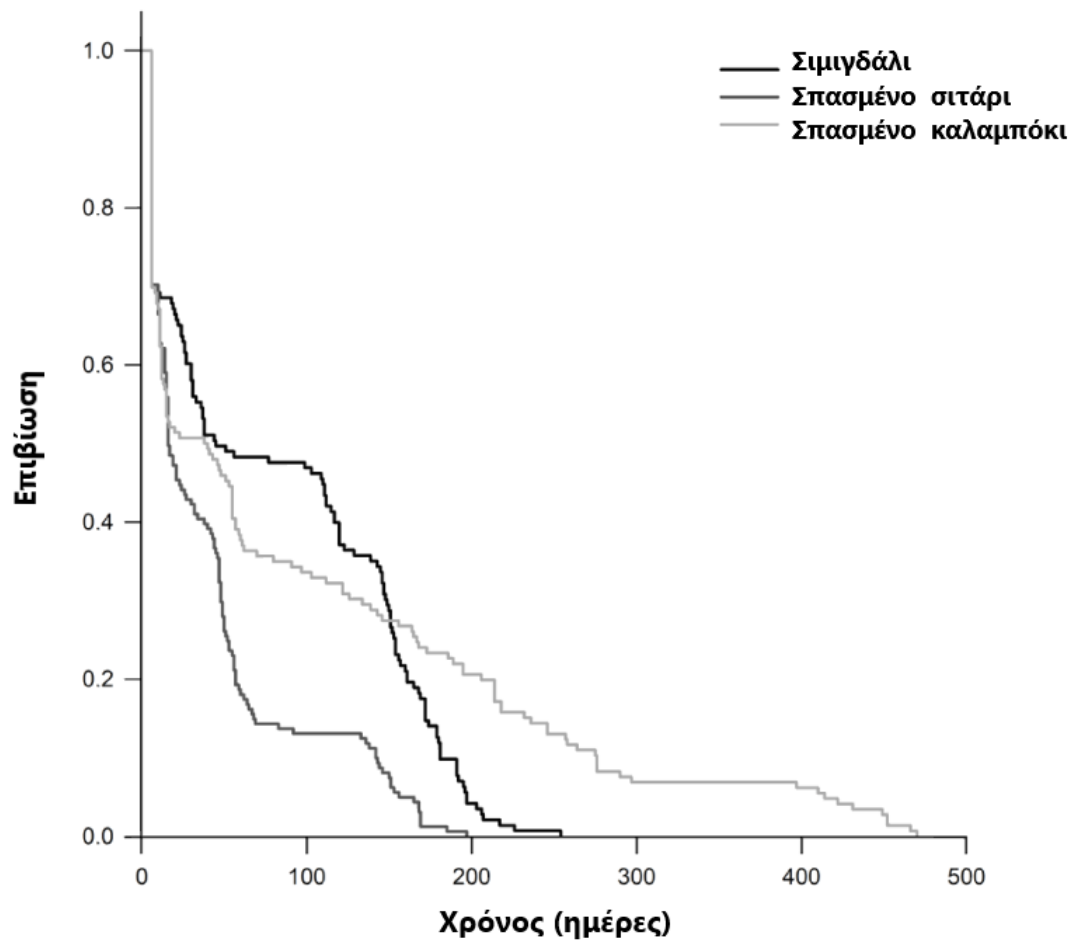
2.2.5 Αποτελέσματα

Οι τροφές οι οποίες εξετάστηκαν επηρέασαν την βιολογία του *T. castaneum* (Πίνακας 2.2.1). Η διάρκεια ανάπτυξης των προνυμφών ήταν σημαντικά μεγαλύτερη στο σιμιγδάλι (72,81 ημέρες) σε σύγκριση με το σπασμένο σιτάρι (59,62 ημέρες) και τον σπασμένο αραβόσιτο (54,57 ημέρες). Ωστόσο, η ανάπτυξη των νεοεκκολαφθεισών προνυμφών δεν επηρεάστηκε από τις τροφές, κυμαινόμενη από 6,24 έως 6,60 ημέρες. Η διάρκεια της ζωής του θηλυκού και του αρσενικού ήταν 70,90 και 77,14 ημέρες, 92,20 και 77,91 ημέρες, 177,00 και 183,67 ημέρες, όταν το *T. castaneum* εξετράφη με σιμιγδάλι, σπασμένο σιτάρι και σπασμένο αραβόσιτο, αντίστοιχα. Η υψηλότερη γονιμότητα (28,71 ωά/θήλυ) καταγράφηκε όταν το *T. castaneum* εξετράφη με σιμιγδάλι, σε σύγκριση με το σπασμένο σιτάρι (2,7 ωά/θήλυ) και τον σπασμένο αραβόσιτο (1,17 ωά/θήλυ).

Οι τροφές επηρέασαν επίσης την πιθανότητα της θνησιμότητας του *T. castaneum*. (χ^2 [Log rank] = 41,633, DF = 2, $p < 0,001$, Εικόνα 1). Επιπλέον, ο μέσος χρόνος επιβίωσης του *T. castaneum* ήταν χαμηλότερος στο σπασμένο σιτάρι (41,8 ημέρες) σε σύγκριση με το σιμιγδάλι (83,9 ημέρες) και τον σπασμένο αραβόσιτο (97,6 ημέρες) (Πίνακας 2).

Πίνακας 2.2.1. Διάρκεια ανάπτυξης ατελών σταδίων, διάρκεια ζωής θηλυκών και αρσενικών ατόμων σε ημέρες (μέσος όρος \pm SE, διάμεσος) και γονιμότητα των θηλυκών ατόμων (ωά /θήλυ) του *Tribolium castaneum* σε τρεις τροφές. Οι διάμεσοι στις στήλες που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά (ανάλυση διασποράς Kruskal-Wallis, δοκιμασία Dunn στο $\alpha = 0,05$). Οι αριθμοί στις παρενθέσεις αντιστοιχούν στο n (αριθμό επαναλήψεων).

Τροφές	Προνύμφες	Νύμφες	Θήλυ	Άρρεν	Γονιμότητα
	72,81 \pm 0,89	6,34 \pm 0,06	70,90 \pm 4,93	77,14 \pm 6,01	28,71 \pm 4,66
Σιμιγδάλι	71,0 ^a (67)	6,0 ^a (67)	69,0 ^a (31)	78,0 ^a (36)	22,0 ^a (31)
	59,62 \pm 4,14	6,24 \pm 0,10	92,20 \pm 8,35	77,91 \pm 5,90	2,70 \pm 1,34
Σπασμένο σιτάρι	60,0 ^b (21)	6,0 ^a (21)	87,5 ^{ab} (10)	81,0 ^{ab} (11)	1,5 ^b (10)
	54,57 \pm 2,53	6,60 \pm 0,26	177,00 \pm 23,81	183,67 \pm 24,30	1,17 \pm 0,43
Σπασμένος αραβόσιπος	52,0 ^b (47)	6,0 ^a (47)	161,0 ^b (23)	187,5 ^b (24)	0,0 ^b (23)
<i>H</i>	30,884	0,829	18,451	12,591	23,878
<i>DF</i>	2	2	2	2	2
<i>P</i>	$\leq 0,001$	0,661	$\leq 0,001$	0,002	$\leq 0,001$



Σχήμα 1. Καμπύλες επιβίωσης του *Tribolium castaneum* κατά την έκθεσή του σε τρεις διαφορετικές τροφές.

Πίνακας 2.2.2. Χρόνος επιβίωσης σε ημέρες (μέσος όρος, 95% C.I.) του *Tribolium castaneum* (άρρυνα, θήλεα και τέλεια άτομα) κατά την έκθεσή του σε τρεις διαφορετικές τροφές. Οι μέσοι όροι που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά με βάση το 95% C.I. κριτήριο.

Τροφές	Μέσος όρος	95% C.I.
Σιμιγδάλι	83,9 ^a	71,6–96,2
Σπασμένο σιτάρι	41,8 ^b	34,2–49,3
Σπασμένος αραβόσιτος	97,6 ^a	77,2–118,1

Όταν το *T. castaneum* εξειτράφη με σπασμένο αραβόσιτο, παρατηρήθηκε υψηλή πρώιμη θνησιμότητα (Διάγραμμα 2.2.1) και χαμηλή γονιμότητα (Πίνακας 2.2.2), οπότε τα δεδομένα δεν ήταν επαρκή ώστε να καταστεί δυνατή η δημογραφική ανάλυση. Η καθαρή αναπαραγωγική αξία, ο ενδογενής ρυθμός αύξησης, ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης και ο μέσος χρόνος διπλασιασμού του *T. castaneum* στο σιμιγδάλι ήταν 6,19 θήλεα/θήλυ, 0,014 θήλεα/θήλυ/ημέρα, 1,014 και 127,5 ημέρες, αντίστοιχα (Πίνακας 2.2.3). Αντίθετα, η τιμή του ενδογενούς ρυθμού αύξησης ήταν αρνητική στο σπασμένο σιτάρι (-0,049 θήλεα/θήλυ/ημέρα) και οι τιμές του καθαρού ρυθμού αναπαραγωγής και του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης < 1 (0,05 θήλεα/θήλυ και 0,307, αντίστοιχα).

Πίνακας 2.2.3. Καθαρός ρυθμός αναπαραγωγής (R_0), ενδογενής ρυθμός αύξησης (r_m), πεπερασμένος ρυθμός αύξησης (λ) και χρόνος διπλασιασμού (T) του *Tribolium castaneum* (μέσος όρος, 95% C.I.) κατά την έκθεσή του σε τρεις διαφορετικές τροφές. Όπου υπάρχουν παύλες δεν υπολογίστηκαν δημογραφικές παράμετροι.

Τροφές	Καθαρός ρυθμός αναπαραγωγής (θήλεα/θήλυ)		Ενδογενής ρυθμός αύξησης (θήλεα/θήλυ/ημέρα)		Πεπερασμένος ρυθμός αύξησης		Χρόνος διπλασιασμού (ημέρες)	
	$R_0 = \sum (l_x \times m_x)$		$\sum (e^{r_m \times x} \times l_x \times m_x) = 1$		$\lambda = e^{r_m}$		$T = \frac{\ln R_0}{r_m}$	
	Μέσος ός όρος	95% C.I.	Μέσος όςρος	95% C.I.	Μέσος όςρος	95% C.I.	Μέσος όςρος	95% C.I.
Σιμιγδάλι	6,19	4,05–8,68	0,014	0,011–0,017	1,014	1,011–1,017	127,5	125,9–128,9
Σπασμένο σιτάρι	0,05	0,00–0,27	-0,049	-0,030–0,000	0,307	0,000–0,985	29,0	0,0–101,7
Σπασμένος αραβόσιτος	-	-	-	-	-	-	-	-

2.2.6 Συζήτηση

Η παρούσα μελέτη έφερε στο φως σαφή ευρήματα σχετικά με τη βιολογία του *T. castaneum* όταν εξετράφη με σιμιγδάλι, σπασμένο σιτάρι και σπασμένο αραβόσιτο. Το έντομο ολοκλήρωσε την ανάπτυξή του και παρήγαγε ωά σε όλες τις εξετασθείσες τροφές. Ωστόσο, με βάση τις τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης, πεπερασμένου ρυθμού αύξησης και της αναπαραγωγικής αξίας, το *T. castaneum* μπορεί να αυξήσει τον πληθυσμό του μόνο στο σιμιγδάλι. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς το σιμιγδάλι αποθηκεύεται σε μεγάλη κλίμακα (Trematerra et al., 2011). Ως εκ τούτου, αναμένεται η υποβάθμιση τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά του προϊόντος, αφού μπορεί να χαρακτηριστεί κατάλληλο για την ανάπτυξη του εντόμου. Οι υπολογισθείσες τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης και του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης είναι χαμηλότερες από τις αντίστοιχες άλλων εντόμων αποθηκών, υποδεικνύοντας ότι το *T. castaneum* έχει χαμηλότερο δυναμικό αύξησης του πληθυσμού του ακόμη και στο σιμιγδάλι. Για παράδειγμα, το *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) εμφάνισε 2,50–4,21, 2,79–5,51 ή 3,36–4,71 φορές υψηλότερες τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης και 1,02–1,05, 1,03–1,07 ή 1,04–1,05 όταν εξετράφη με διαφορετικές ποικιλίες κριθαριού, υβρίδια αραβοσίτου ή είδη σιτηρών, αντίστοιχα (Golizadeh & Abedi, 2017; Majd Marani et al., 2017; Kavallieratos et al., 2019). Εμφανείς είναι επίσης οι διαφορές στις τιμές των διαφόρων δημογραφικών παραμέτρων του *T. castaneum*. Οι Rahimi Namin et al. (2018) ανέφεραν μικρότερη διάρκεια ανάπτυξης των προνυμφών, μικρότερη διάρκεια της ζωής των θηλυκών ή αρσενικών τελείων ατόμων και υψηλότερες τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης ή πεπερασμένου ρυθμού αύξησης όταν το *T. castaneum* εξετράφετο με διαφορετικές ποικιλίες κριθαριού από τις παρατηρούμενες αντίστοιχες τιμές της τρέχουσας μελέτης για το σιμιγδάλι. Αν και τα πειράματα των Rahimi Namin et al. (2018) διεξήχθησαν στην ίδια θερμοκρασία όπως στην παρούσα μελέτη, η σχετική υγρασία ήταν υψηλότερη ($75 \pm 5\%$). Ο Howe (1956) ανέφερε ότι οι τιμές της σχετικής υγρασίας $> 70\%$ επιταχύνουν την ανάπτυξη του *T. castaneum* από ωό σε τέλειο άτομο σε κοσκινισμένη και αλεσμένη δίαιτα σίτου. Ως εκ τούτου, τα έντομα αποθηκών τα οποία ανήκουν στο ίδιο ή διαφορετικό είδος παρουσιάζουν διαφορετικά επίπεδα καταλληλότητας σε ορισμένα προϊόντα υπό διαφορετικές αβιοτικές συνθήκες.

Από την άλλη πλευρά, ο πληθυσμός του *T. castaneum* μειώθηκε όταν εξετράφη με σπασμένο σιτάρι και σπασμένο αραβόσιτο. Οι LeCato και Flaherty

(1991) αναφέρουν ότι η προσθήκη ωών ή τελείων ατόμων *Plodia interpunctella* (Hübner) (Lepidoptera: Pyralidae) σε σπασμένο αραβόσιτο οδήγησε σε αύξηση του πληθυσμού *T. castaneum*. Αυτό συμβαίνει επειδή ο σπασμένος αραβόσιτος δεν εμπίπτει στις διατροφικές προτιμήσεις του *T. castaneum*, γεγονός το οποίο το έστρεψε στη θήρευση του *P. interpunctella* με ταυτόχρονη αύξηση του πληθυσμού του. Με βάση τα ευρήματα της παρούσας μελέτης, η διάρκεια της ανάπτυξης των προνυμφών επιμηκύνθηκε σημαντικώς όταν εξετράφησαν με το σιμιγδάλι, το οποίο απαιτέλεσε καταλληλότερη τροφή σε σχέση με τον σπασμένο σίτο και τον σπασμένο αραβόσιτο. Αντιθέτως, η διάρκεια της ανάπτυξης των προνυμφών *T. granarium* ήταν σημαντικώς μικρότερη όταν εξετράφησαν με σπασμένο κριθάρι παρά το γεγονός ότι αποτελεί καταλληλότερη τροφή σε σχέση με την σπασμένη βρώμη και σπασμένο τριτικάλε (Kavallieratos et al. 2019). Συνεπώς, το διάστημα το οποίο διανύουν τα έντομα ως προνύμφες στις κατάλληλες τροφές είναι συνδυασμός του είδους και της τροφής. Η χαμηλή απόδοση του *T. castaneum* όταν εξετράφη με σπασμένο σιτάρι και αραβόσιτο θα μπορούσε να αποδοθεί στην παρουσία των αναστολέων της αμυλάσης, καθώς επηρεάζουν αρνητικά τη γονιμότητα, την επιβίωση και την αύξηση του πληθυσμού των εντόμων (Li & Arbogast, 1991; Wisessing & Choowongkamon, 2012; Naseri et al., 2017). Αντίθετα, οι Li και Arbogast (1991) ανέφεραν ότι το *T. castaneum* είναι ικανό να αναπτυχθεί υπό διαφορετικά ποσοστά σπασμένου/ αμιγούς αραβόσιτου. Το γεγονός ότι οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν διαφορετικό τύπο αραβόσιτου (υβρίδιο «Pioneer 3320») από αυτόν ο οποίος χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα της παρούσας μελέτης, θα μπορούσε να είναι λόγος για την πτωχή ανάπτυξη του *T. castaneum* που παρατηρήθηκε. Για παράδειγμα, οι Rahimi Namin et al. (2018) αναφέρουν ότι ο χρόνος ανάπτυξης και το ποσοστό της επιβίωσης των προνυμφών και των νυμφών *T. castaneum*, η μακροβιότητα των τελείων θηλυκών και αρσενικών ατόμων και η γονιμότητα διέφερε σημαντικώς μεταξύ δέκα ποικιλιών κριθαριού (Rahimi Namin et al., 2018). Όσον αφορά Προηγούμενες μελέτες έχουν τεκμηριώσει ότι η παραγωγή απογόνων *T. castaneum* ήταν χαμηλότερη στο σπασμένο σιτάρι σε σχέση με το αλεύρι σίτου και το πίτουρο σίτου (Đukić et al., 2016) ή το κριθάρι και τη βρώμη (Sinha, 1969). Οι Đukić et al. (2016) παρατήρησαν ότι το μέγεθος των σωματιδίων (< 0,425 mm) του σπασμένου σίτου το οποίο δοκιμάστηκε ήταν μεγαλύτερο από εκείνο του πίτουρου και του αλεύρου σίτου. Τα αποτελέσματα αυτά είναι σε συμφωνία με την παρούσα μελέτη στην οποία χρησιμοποιήθηκε σπασμένο σιτάρι με μεγέθη σωματιδίων > 2,00 και < 2,36 mm. Η τιμή του ενδογενούς ρυθμού αύξησης είναι αρνητική όταν το *T. castaneum* τρέφεται

με σπασμένο σιτάρι, γεγονός το οποίο σημαίνει ότι ο πληθυσμός του μειώνεται. Οι ποικιλίες του σπασμένου σίτου και του σπασμένου αραβοσίτου οι οποίες δοκιμάστηκαν, μπορεί να λειτουργήσουν ως εναλλακτικές τροφές για το *T. castaneum*, ευνοώντας την επιβίωσή του όταν δεν υπάρχει κατάλληλη τροφή στην εγκατάσταση αποθήκευσης. Προηγούμενες εργασίες έχουν τεκμηριώσει ότι σε αρκετούς τύπους τροφών τα έντομα αποθηκών παραμένουν ζωντανά αλλά σε πολύ χαμηλούς αριθμούς μέχρι να βρεθούν οι διαθέσιμες προτιμώμενες τροφές (Athanassiou et al., 2016; Athanassiou et al., 2017; Kavallieratos et al., 2019). Απαιτείται περαιτέρω πειραματισμός ώστε να διευκρινιστεί τούτο το ζήτημα.

Η ανάπτυξη των νυμφών δεν διέφερε μεταξύ των τροφών οι οποίες εξετάστηκαν υποδεικνύοντας ότι παραμένουν ανεπηρέαστες από τη διατροφή των εντόμων. Το ίδιο γεγονός έχει παρατηρηθεί για το *T. granarium* (Kavallieratos et al., 2019). Ωστόσο, οι Rahimi Namin et al. (2018) διαπίστωσαν ότι υπήρχαν σημαντικές διαφορές στην ανάπτυξη θηλυκών και αρσενικών νυμφών *T. castaneum* μεταξύ διαφόρων ποικιλιών κριθαριού. Δεδομένου ότι οι διαφορές δεν ήταν σταθερές για τα δύο φύλα του εντόμου μεταξύ των ελεγχόμενων ποικιλιών, μπορεί να συναχθεί το συμπέρασμα ότι η έλλειψη διαφορών στην ανάπτυξη των νυμφών, η οποία παρατηρήθηκε στην παρούσα μελέτη και στη μελέτη των Kavallieratos et al. (2019) οφείλεται στο γεγονός ότι αναλύθηκε ο συνολικός πληθυσμός θηλυκών και αρσενικών νυμφών.

Η μικρότερη διάρκεια ζωής των τελείων ατόμων *T. castaneum* παρατηρήθηκε στο σιμιγδάλι και η υψηλότερη στον σπασμένο αραβόσιτο. Το γεγονός αυτό μπορεί να είναι αποτέλεσμα του κόστους της αναπαραγωγής, η οποία αναφέρεται στην αυξημένη αναπαραγωγική δραστηριότητα του εντόμου που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη μελλοντική επιβίωσή του ή τη μελλοντική παραγωγή απογόνων (Stearns, 1992; Harshman and Zera, 2007). Λαμβάνοντας υπ' όψιν ότι η υψηλότερη γονιμότητα του *T. castaneum* εντοπίστηκε στο σιμιγδάλι, διατυπώνεται η υπόθεση ότι η αναπαραγωγική δραστηριότητα του *T. castaneum* μείωσε τη διάρκεια της ζωής των τελείων ατόμων. Από την άλλη πλευρά, η χαμηλή γονιμότητα του *T. castaneum* στο σπασμένο αραβόσιτο είχε ως αποτέλεσμα την παρατεταμένη διάρκεια ζωής των τελείων ατόμων του εντόμου. Αντίθετα, αν και η γονιμότητα του *T. castaneum* ήταν χαμηλή στο σπασμένο σιτάρι, η διάρκεια ζωής των τελείων ατόμων δεν παρατάθηκε. Το γεγονός αυτό μπορεί να είναι αποτέλεσμα της χαμηλής θρεπτικής αξίας του

σπασμένου σίτου και της αρνητικής επίδρασής του στην ιστορία ζωής του *T. castaneum*.

Η επιλογή της τροφής είναι ζωτικής σημασίας για τα έντομα όπως και για όλους τους ζωντανούς οργανισμούς (Hughes, 1993; Paranikolaou et al., 2014). Οι καταναλωτές, συμπεριλαμβανομένων των εντόμων, είναι γνωστό ότι μεγιστοποιούν τον μέσο ρυθμό της πρόσληψης ενέργειας βελτιστοποιώντας την αναλογία της μεταβολίσιμης ενέργειας από τα τρόφιμα προς τον απαιτούμενο χρόνο κατανάλωσης (Van Gils et al., 2005). Συνεπώς, σκοπός των εντόμων είναι να επιτύχουν το μικρότερο χρονικό διάστημα κατά τη επιλογή της τροφής τους. Στην περίπτωση του *T. castaneum*, αυτή η αναλογία έχει υψηλότερη τιμή στο σιμιγδάλι από ό,τι στο σπασμένο σιτάρι και τον σπασμένο αραβόσιτο. Επιπλέον, η ποσότητα του δύσπεπτου τμήματος της τροφής μπορεί να επηρεάσει τη συμπεριφορά του *T. castaneum*, οδηγώντας στην απόρριψη των τροφίμων χαμηλής θρεπτικής αξίας από τη διατροφή του (Paranikolaou et al., 2014). Επομένως, το σπασμένο σιτάρι και ο σπασμένος αραβόσιτος μπορεί να παρουσιάζουν χαμηλή θρεπτική αξία για το *T. castaneum* παρά το γεγονός ότι ευνοούν την επιβίωσή του. Επιπλέον, δραστηριότητες όπως η σύζευξη και η ωτοκία οι οποίες είναι ωφέλιμες για το έντομο, μπορεί να προκύψουν από την πτωχή διαδικασία της πέψης (Paranikolaou et al., 2014), και είναι ενδεικτικές της υψηλής θρεπτικής αξίας του σιμιγδαλιού.

Υπό το φως των ευρημάτων της παρούσας μελέτης, το είδος της τροφής και η μορφή της ήταν καθοριστικά για τη συνολική βιολογική απόδοση του *T. castaneum*. Η δημογραφική προσέγγιση επέτρεψε την αποτελεσματική αξιολόγηση της καταλληλότητας του σιμιγδαλιού, του σπασμένου σίτου και του σπασμένου αραβόσιτου ως τροφών για το *T. castaneum* αποσαφηνίζοντας την καταλληλότητά τους. Απαιτούνται περαιτέρω δημογραφικές μελέτες με τη δοκιμή φυσικών ή/και εργαστηριακών πληθυσμών *T. castaneum*, συνδυασμών του *T. castaneum* με άλλα έντομα αποθηκών και ποικιλιών/υβριδίων που χρησιμοποιούνται στις γεωργικές πρακτικές σε διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, προκειμένου να φωτίσουν το σύνθετο ζήτημα της ανάπτυξης του εντόμου. Τα προϊόντα τα οποία ενισχύουν την πληθυσμιακή αύξηση του *T. castaneum* θα πρέπει να αντιμετωπίζονται λίαν προσεκτικώς μετά τη συγκομιδή ώστε να αποφευχθεί ο γρήγορος αποικισμός και η περαιτέρω διασπορά του εντόμου με τις συνακόλουθες απώλειές τους. Παρόμοια προσοχή θα χρειαστεί να δοθεί στα γεωργικά προϊόντα τα

οποία είναι ανθεκτικά στις προσβολές από το *T. castaneum* καθώς μπορούν να προσβληθούν σοβαρά από άλλα είδη εντόμων αποθηκών.

2.2.7 Βιβλιογραφία

- Abdullahi, G.; Muhamad, R.; Dzolkhifli, O.; Sinniah, U.R. Damage potential of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) on cocoa beans: effect of initial adult population density and post infestation storage time. *J. Stored Prod. Res.* 2017, 75, 1–9.
- Arbogast, R.T. Beetles: Coleoptera. In *Ecology and management of food-industry pests*; Gorham, J.R. Ed.; Association of Official Analytical Chemists: Arlington, VA, USA, 1991; pp. 131–150.
- Arthur, F.H.; Hale, B.A.; Starkus, L.A.; Gerken, A.R.; Campbell, J.F.; McKay, T. Development of *Tribolium castaneum* (Herbst) on rice milling components and by-products: effects of diet and temperature. *J. Stored Prod. Res.* 2019, 80, 85–92.
- Arthur, F.H.; Starkus, L.A.; Gerken, A.R.; Campbell, J.F. Growth and development of *Tribolium castaneum* (Herbst) on rice flour and brown rice as affected by time and temperature. *J. Stored Prod. Res.* 2019, 83, 73–77.
- Athanassiou, C.G.; Kavallieratos, N.G.; Boukouvala, M.C. Population growth of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on different commodities. *J. Stored Prod. Res.* 2016, 69, 72–77.
- Athanassiou, C.G.; Kavallieratos, N.G.; Boukouvala, M.C.; Nika, E.P. Influence of commodity on the population growth of the larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrychidae). *J. Stored Prod. Res.* 2017, 73, 129–134.
- Campbell, J.F.; Toews, M.D.; Arthur, F.H.; Arbogast, R.T. Long-term monitoring of *Tribolium castaneum* in two flour mills seasonal and impact of fumigation. *J. Econ. Entomol.* 2010, 103, 991–1001.
- Campbell, J.F.; Toews, M.D.; Arthur, F.H.; Arbogast, R.T. Long-term monitoring of *Tribolium castaneum* populations in two flour mills: rebound after fumigation. *J. Econ. Entomol.* 2010, 103, 1002–1011.
- Carey, J.R. *Applied demography for biologists with special emphasis on insects*; Oxford University Press: New York, NY, USA, 1993.

- Carey, J.R. Insect biodemography. *Annu. Rev. Entomol.* 2001, 46, 79–110.
- Dethier, V.G. Evolution of feeding preferences in phytophagous insects. *Evolution* 1954, 8, 33–54.
- Đukić, N.; Radonjić, A.; Lević, J.; Spasić, R.; Kljajić, P.; Andrić, G. The effects of population densities and diet on *Tribolium castaneum* (Herbst) life parameters. *J. Stored Prod. Res.* 2016, 69, 73–13.
- Giles, P.H. The insect infestation of sorghum stored in granaries in northern Niger. *Bull. Entomol. Res.* 1964, 55, 373–388.
- Golizadeh, A.; Abedi, Z. Feeding performance and life table parameters of khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on various barley cultivars. *Bull. Entomol. Res.* 2017, 107, 689–698.
- Gutierrez, A.P. *Applied population ecology: a supply-demand approach*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1996.
- Hagstrum, D.W.; Subramanyam, B. *Stored-product insect resource*; AACC international: St. Paul, MN, USA, 2009.
- Halstead, D.G. External sex differences in stored-products Coleoptera. *Bull. Entomol. Res.* 1963, 54, 119–134.
- Harshman, L.G.; Zera, A.J. The cost of reproduction: the devil in details. *Trends Ecol. Evol.* 2007, 22, 80–86.
- Hill, D.S. *Pests of storage foodstuffs and their control*; Kluwer Academic Publishers: New York, NY, USA, 2003.
- Howe, R.W. The effect of temperature and humidity on the rate of development and mortality of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Ann. Appl. Entomol.* 1956, 44, 356–368.
- Hubert, J. *The pest importance of stored product mites (Acari: Acaridida)*; Nova Science Publishers Inc.: New York, NY, USA, 2012.
- Hughes, R.N. *Diet selection. An interdisciplinary approach to foraging behavior*; Blackwell Scientific Publications: Oxford, UK, 1993.

- Kalushkov, P.; Hodek, I. The effects of thirteen species of aphids on some life history parameters of the ladybird *Coccinella septempunctata*. *BioControl* 2004, 49, 21–32.
- Kavallieratos, N.G.; Athanassiou, C.G.; Boukouvala, M.C.; Tsekos, G.T. Influence of different non-grain commodities on the population growth of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae). *J. Stored Prod. Res.* 2019, 81, 31–39.
- Kavallieratos, N.G.; Karagianni, E.S.; Papanikolaou, N.E. *Life history of Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on peeled barley, peeled oats and triticale. *J. Stored Prod. Res.* 2019, 84, 101515.
- Kontodimas, D.C.; Milonas, P.G.; Stathas, G.J.; Papanikolaou, N.E.; Skourti, A.; Matsinos, Y.G. Life table parameters of the aphid predators *Coccinella septempunctata*, *Ceratomegilla undecimnotata* and *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Eur. J. Entomol.* 2008, 105, 427–430.
- Kumar, H.; Panigrahi, M.; Chhotaray, S.; Bhanuprakash, V.; Shandilya, R.; Sonwane, A.; Bhushan, B. Red flour beetle (*Tribolium castaneum*): from population genetics to functional genomics. *Vet. World* 2018, 11, 1043–1046.
- Kumar, R. *Insect pests on stored grain. Biology, behavior, and management strategies*; Apple Academic Press: Waretown, NJ, USA, 2017.
- LeCato, G.L.; Flaherty, B.R. *Tribolium castaneum* progeny production and development on diets supplemented with eggs or adults of *Plodia interpunctella*. *J. Stored Prod. Res.* 1991, 9, 199–203.
- Lhaloui, S.; Hagstrum, D.W.; Keith, D.L.; Holtzer, T.O.; Ball, H.J. Combined influence of temperature and moisture on red flour beetle (Coleoptera: Tenebrionidae) reproduction on whole grain wheat. *J. Econ. Entomol.* 1988, 81, 488–489.
- Li, L.; Arbogast, R.T. The effect of grain breakage on fecundity, development, survival, and population increase in maize of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *J. Stored Prod. Res.* 1991, 27, 87–94.
- Mahroof, R.M.; Hagstrum, D.W. *Biology, behavior, and ecology of insects in processed commodities*. In *Stored product protection*; Hagstrum, D.W., Phillips, T.W., Cuperus, G., Eds.; Kansas State University: Manhattan, KS, USA, 2012; pp. 33–44.

- Majd Marani, S.; Nouri Ganbalani, G.; Borzoui, E. The effect of maize hybrid on biology and life table parameters of the *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae). J. Econ. Entomol. 2017, 110, 1916–1922.
- Muatinte, B.L.; Kavallieratos, N.G.; Boukouvala, M.C.; García Lara, S.; López Castillo, L.M.; Mvumi, B.M. The threat of the larger grain borer, *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrichidae) and practical control options for the pest. CAB Reviews 2019, 14, 41.
- Naseri, B., Borzoui, E., Majd, S.; Mansouri, S.M. Influence of different food commodities on life history, feeding efficiency, and digestive enzymatic activity of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Econ. Entomol. 2017, 110, 2263–2268.
- Papachristos, D.P.; Katsarou, I.; Michaelakis, A.; Papanikolaou, N.E. Influence of different species of aphid prey on the immature survival and development of four species of aphidophagous coccinellids (Coleoptera: Coccinellidae). Eur. J. Entomol. 2015, 112, 440–445.
- Papanikolaou, N.E.; Kavallieratos, N.G.; Kondakis, N.; Boukouvala, M.C.; Nika E.P.; Demiris, N. Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) at constant temperatures, combining deterministic and stochastic demography. Plos One 2019, 14(2), e0212182.
- Papanikolaou, N.E.; Milonas, P.G.; Kontodimas, D.C.; Demiris, N.; Matsinos, Y.G. Life table analysis of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) at constant temperatures. Ann. Entomol. Soc. Am. 2014, 107, 158–162.
- Papanikolaou, N.E.; Milonas, P.G.; Demiris, N.; Papachristos, D.P.; Matsinos, Y.G. Digestion limits the functional response of an aphidophagous coccinellid (Coleoptera: Coccinellidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 2014, 107, 468–474.
- Papanikolaou, N.E.; Milonas, P.G.; Kontodimas, D.C.; Demiris, N.; Matsinos, Y.G. Temperature-dependent development, survival, longevity, and fecundity of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 2013, 106, 228–234.

- R Development Core Team. R: a language and environment for statistical computing. R foundation for statistical computing. Available online: <http://www.Rproject.org> (accessed on 20 December 2019).
- Rahimi Namin, F.; Naseri, B.; Nouri Ganbalani G.; Razmjou, J. Demographic studies of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) on various cultivars. J. Stored Prod. Res. 2018, 79, 60–65.
- Rees, D. Insects of stored products; Manson Publishing: London, UK, 2004.
- Ridley, A.W.; Hereward, J.P.; Daglish, G.J.; Raghu, S.; Collins, P.J.; Walters, G.H. The spatiotemporal dynamics of *Tribolium castaneum* (Herbst): adult flight and gene flow. Mol. Ecol. 2011, 20, 1635–1646.
- Sinha, R.N. Reproduction of stored-grain insects on varieties of wheat, oats, and barley. J. Econ. Entomol. 1969, 62, 1011–1015.
- Skourti, A.; Kavallieratos, N.G.; Papanikolaou, N.E. Laboratory evaluation of development and survival of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) under constant temperatures. J. Stored Prod. Res. 2019, 83, 305–310.
- Stearns, S.C. The evolution of life histories; Oxford University Press: London, UK, 1992.
- Systat Software. SigmaPlot for windows version 11.0; Systat Software: Chicago, IL, USA, 2008.
- Trematerra, P.; Stejskal, V.; Hubert, J. The monitoring of semolina contamination by insect fragments using the light filth method in an Italian mill. Food Control 2011, 22, 1021–1026.
- Van Gils, J.A.; De Rooil S.R.; Belle J.V.; Van Der Meer, J.; Dekinga, A.; Piersma, T.; Drent P. Digestive bottleneck affects foraging decisions in red knots *Calidris canutus*. I. Prey choice. J. Anim. Ecol. 2005, 74, 105–119.
- Wisessing, A.; Choowongkamon, K. Amylase inhibitors in plants: structures, functions and applications. Funct. Plant Sci. Biotechnol. 2012, 6, 31–41.
- Xue, M.; Subramanyam, Bh.; Shi, Y.C.; Campbell, J.; Hartzler, M. Development, relative retention, and fecundity of *Tribolium castaneum* (Herbst) on different starches. In Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product

Protection, Estoril, Portugal, 27 June–2 July 2010; Carvalho, M.O., Fields, P.G., Adler, C.S., Arthur, F.H., Athanassiou, C.G., Campbell, J.F., Fleurat-Lessard, F., Flinn, P.W., Hodges, R.J., Isikber, A.A., Navarro, S., Noyes, R.T., Riudavets, J., Sinha, K.K., Thorpe, G.R., Timlick, B.H., Trematerra, P., White, N.D.G. Eds.; Julius Kühn-Institut: Berlin, Germany, 2010; pp. 207–211.

Zeki, E.; Papanikolaou, N.E.; Demiris, N.; Kontodimas, D.C. Comparison of the demographic parameters and survival of two phenotypes of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Eur. J. Entomol.* 2015, 112, 193–196.

2.3 Πώς επηρεάζεται η βιωσιμότητα του *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) όταν διαφορετικά αναπτυξιακά στάδιά του εκτίθενται στο chlorfenapyr;*

2.3.1 Εισαγωγή

Η πιθανότητα αύξησης του πληθυσμού ενός είδους εντόμου στο χρόνο και στο χώρο σχετίζεται στενά με ορισμένα χαρακτηριστικά της ιστορίας της ζωής του, όπως η επιβίωση, η ανάπτυξη και η γονιμότητα (Jalali et al., 2010; Papanikolaou et al., 2013; Parachristos et al., 2015; Papanikolaou et al., 2019). Γενικά, το υψηλό ποσοστό επιβίωσης και η γονιμότητα μαζί με τη σύντομη αναπτυξιακή διάρκεια είναι τα κύρια χαρακτηριστικά τα οποία ευνοούν την απόδοση των εντόμων (Kavallieratos et al., 2019; Skourti et al., 2019; Nika et al., 2020). Η κατανόηση και η πρόβλεψη των επιδράσεων των αβιοτικών και βιοτικών παραγόντων (π.χ. θερμοκρασία, σχετική υγρασία, καταπολέμηση με εντομοκτόνα και ανταγωνισμός) επί της βιωσιμότητας των εντόμων είναι εφικτή μέσω της διερεύνησης των χαρακτηριστικών της ιστορίας της ζωής τους (Papanikolaou et al., 2013, 2019).

Οι στατιστικές προσεγγίσεις που σχετίζονται με τους πίνακες ζωής αποτελούν σημαντικά εργαλεία για την αξιολόγηση της πιθανής αύξησης του πληθυσμού των εντόμων (Carey, 1993; Carey, 2001; Kontodimas et al., 2008; Papanikolaou et al., 2014; Zeki et al., 2015; Papanikolaou et al., 2019). Η καταγραφή και η ταξινόμηση της επιβίωσης και της αναπαραγωγής των ατόμων από τη γέννηση έως το θάνατό τους είναι θεμελιώδεις για την κατασκευή των πινάκων ζωής τους (Carey, 1993). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τον υπολογισμό πολλών δημογραφικών παραμέτρων οι οποίες είναι ενδεικτικές της πιθανής αύξησης ενός πληθυσμού. Για παράδειγμα, η παράμετρος Malthusian, δηλαδή ο ενδογενής ρυθμός αύξησης και ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης είναι βασικές δημογραφικές παράμετροι οι οποίες βοηθούν στην αξιολόγηση της βιωσιμότητας του πληθυσμού και την κατανόηση των πληθυσμιακών προτύπων των εντόμων (Carey, 2001; Gutierrez, 1996; Wang et al., 2008; Jalali et al., 2009).

***Skourti, A., N. G. Kavallieratos, N. E. Papanikolaou 2020.** How is fitness of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) affected when different developmental stages are exposed to chlorfenapyr? *Insects* 11, 542. **(Impact factor 2020 = 2,769)**

Επιπλέον, ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός και ο χρόνος διπλασιασμού είναι επίσης δείκτες της μελλοντικής πληθυσμιακής ανάπτυξης των εντόμων (Kavallieratos et al., 2019; Nika et al., 2020).

Το κόκκινο σκαθάρι των αλεύρων, *Tribolium castaneum* (Herbst) είναι ένας σοβαρός εχθρός μεγάλου φάσματος αποθηκευμένων προϊόντων. Παρά το γεγονός ότι το έντομο προτιμά άλευρα και αλεσμένα προϊόντα, έχει καταγραφεί σε ευρεία ποικιλία δημητριακών και άλλων ακατέργαστων προϊόντων, όπως τα όσπρια, οι ξηροί καρποί, τα μπαχαρικά, τα δημητριακά, οι ελαιούχοι σπόροι, ο βαμβακόσπορος, τα αποξηραμένα φρούτα, οι σπόροι του κακάο και τα τυποποιημένα τρόφιμα (Aitken, 1975; Johnson, 2013; Abdullahi et al., 2018). Το *T. castaneum* προκαλεί σοβαρές ποσοτικές και ποιοτικές απώλειες στα αποθηκευμένα προϊόντα σε όλο τον κόσμο (Hill, 2003; Rees, 2004; Mahroof & Hagstrum, 2012). Τα τέλεια άτομα μπορεί να προκαλέσουν αλλεργικές αντιδράσεις μέσω της απελευθέρωσης κινονών σε μολυσμένα προϊόντα τα οποία καθιστούν ακατάλληλα προς κατανάλωση (Lu et al., 2010; Velki et al., 2014).

Οι συνεχείς επεμβάσεις με εντομοκτόνα στις αποθηκευτικές εγκαταστάσεις και τα αποθηκευμένα τρόφιμα στοχεύουν στη μείωση των προσβολών από έντομα αλλά οδηγούν στην ανάπτυξη φαινομένων ανθεκτικότητας στους οργανισμούς στόχους (Attia et al., 2020). Το *T. castaneum* περιλαμβάνεται μεταξύ των εντόμων αποθηκών τα οποία έχουν παρουσιάσει παγκοσμίως ανθεκτικότητα στα εντομοκτόνα επαφής από τις προηγούμενες δεκαετίες (Attia et al., 2020; Halliday et al., 1988; Arthur, 1996; Stadler et al., 2003; Rossi et al., 2010). Έτσι, οι συνεχείς ερευνητικές προσπάθειες επικεντρώνονται στην ανάπτυξη και την αξιολόγηση νέων δραστικών ουσιών με αυξημένες εντομοκτόνες ιδιότητες (Boukouvala et al., 2016a; Boukouvala et al., 2016b; Boukouvala et al., 2017; Boukouvala et al., 2019). Το παράγωγο του πυρρολίου 4-βρωμο-2-(4-χλωροφαινυλ)-1-αιθοξυμεθυλ-5-(τριφθορομεθυλ)πυρρολο-3-καρβονιτρίλιο (chlorfenapyr) είναι μια μη νευροτοξική ουσία η οποία επιδρά στην οξειδωτική φωσφορυλίωση στα μιτοχόνδρια και διαταράσσει την σύνθεση της τριφωσφορικής αδενοσίνης (ATP). Το chlorfenapyr παρουσιάζει χαμηλή τοξικότητα στα θηλαστικά και αποτελεί το μόνο εμπορευματοποιημένο παράγωγο του πυρρολίου (Hunt, 1996; Tomlin, 2000; McLeod et al., 2002; Zhao et al., 2008; Raghavendra et al., 2011; Boukouvala et al., 2019). Έως τώρα, είναι εγκεκριμένο στις ΗΠΑ για ψεκασμό των ρωγμών και σχισμών όπου μπορούν να καταφύγουν οι ζωικοί εχθροί υγειονομικής σημασίας και τα έντομα αποθηκών (Arthur, 2013;

Athanassiou et al., 2014; Boukouvala et al., 2019). Προηγούμενες μελέτες έχουν τεκμηριώσει ότι το chlorfenapyr είναι ένα αποτελεσματικό εντομοκτόνο κατά των τελείων ατόμων και/ή των ατελών σταδίων πολλών εντόμων των αποθηκών σε διάφορους τύπους επιφανειών, συμπεριλαμβανομένων των σάκκων αποθήκευσης, όπως τα *Liposcelis bostrychophila* Badonnel, *Liposcelis entomophila* (Enderlein), *Liposcelis decolor* (Pearman) (Psocoptera: Liposcelididae), *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrychidae), *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae), *Sitophilus oryzae* (L.) (Coleoptera: Curculionidae), *T. castaneum*, *Tribolium confusum* Jaquelin du Val (Coleoptera: Tenebrionidae) και το *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) (Arthur, 2008, 2009, 2013; Athanassiou et al., 2014; Kavallieratos et al., 2016; Kavallieratos & Boukouvala 2018; Boukouvala & Kavallieratos, 2020). Το chlorfenapyr έχει επίσης αξιολογηθεί ως προστατευτική δραστική ουσία των σπόρων σιτηρών προκαλώντας θνησιμότητα $\geq 90,0\%$ στα τέλεια άτομα *P. truncatus* στον αραβόσιτο σε συγκέντρωση 1 ppm, ενώ θανάτωσε όλα τα τέλεια άτομα *S. oryzae* σε συγκέντρωση 5 ppm στο σιτάρι (Kavallieratos et al., 2011).

Λαμβάνοντας υπ' όψιν την υψηλή οικονομική σημασία του *T. castaneum*, διεξήχθη η παρούσα μελέτη προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση του chlorfenapyr επί του εντόμου. Σε αντίθεση με τις προηγούμενες δημοσιευμένες προσεγγίσεις, οι οποίες διερεύνησαν την άμεση ή/και την καθυστερημένη θνησιμότητα που προκαλείται από εντομοκτόνα επαφής (Arthur, 2012, 2013; Kavallieratos et al., 2016; Kavallieratos and Boukouvala 2018; Boukouvala and Kavallieratos, 2020), επιχειρείται η εστίαση επί των γεγονότων του κύκλου ζωής τα οποία σχετίζονται με την επιβίωση και την αναπαραγωγή. Πρόσφατα, οι Stark και Banks (2016) χρησιμοποίησαν την ανάλυση του πίνακα ζωής ώστε να αξιολογήσουν τα δεδομένα της τοξικότητας και συμπέραναν ότι οι χρονικά μεταβαλλόμενες δημογραφικές διαδικασίες είναι βασικά εργαλεία για την αξιολόγηση της επιτυχίας ή της αποτυχίας των επεμβάσεων με εντομοκτόνα. Στην παρούσα μελέτη εξετάθησαν μελέτες σειράς ωών, προνυμφών και μητρικών θηλυκών ατόμων *T. castaneum* σε επιφάνειες από σκυρόδεμα στις οποίες είχε εφαρμοστεί το chlorfenapyr με ψεκασμό. Με την κατασκευή του πίνακα ζωής και την μέθοδο της ανάλυσης επιβίωσης διερευνήθηκαν οι πιθανές επιπτώσεις του chlorfenapyr στην φυσική κατάσταση του πληθυσμού του εντόμου. Πρόκειται για την πρώτη μελέτη η οποία υιοθετεί την δημογραφική ανάλυση και την ανάλυση επιβίωσης για τη διερεύνηση της αποτελεσματικότητας του chlorfenapyr σε εντομολογικούς εχθρούς.

2.3.2. Υλικά και μέθοδοι

2.3.2.α Έντομα

Οι εκτροφές του *T. castaneum* (εικ. 2.1) συντηρούνταν στο Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών σε αλεύρι λευκού μαλακού σίτου (μείγμα ποικιλιών, αποτελούμενο από το ενδοσπέρμιο μόνον) στους 30 °C, σχετική υγρασία 65% και συνεχές σκότος. Το έντομο συλλέχθηκε από τη νότια Ελλάδα το 2003.

2.3.2.β. Τροφή και εντομοκτόνο

Κατά τη διάρκεια της πειραματικής διαδικασίας χρησιμοποιήθηκε προ-κοσκινισμένο αλεύρι από λευκό μαλακό σίτο (μείγμα ποικιλιών, αποτελούμενο από το ενδοσπέρμιο μόνον) το οποίο δεν είχε προσβληθεί από εχθρούς και δεν είχε υποστεί εφαρμογή με φυτοφάρμακα. Τα θρεπτικά συστατικά ανά 100 g αλεύρου όπως παρατίθενται στην ετικέτα του προϊόντος έχουν ως ακολούθως: 72,6 g υδατάνθρακες, 10,3 g πρωτεΐνες, 1,6 g φυτικές ίνες, 1,1 g λίπος και 0,05 g αλάτι. Το αλεύρι θερμάνθηκε στους 50 °C (εικ. 2.3) ή ενυδατώθηκε με απεσταγμένο ύδωρ ώστε να ρυθμιστεί η περιεκτικότητά του σε υγρασία στο 13,5% όπως εκτιμήθηκε από βαθμονομημένο υγρασιόμετρο (mini GAC plus, Dickey-John Europe S.A.S., Colombes, Γαλλία) (Skourti et al., 2019; Nika et al., 2020).

Το εντομοκτόνο σκεύασμα το οποίο χρησιμοποιήθηκε στα πειράματα ήταν το Phantom EC που περιέχει 21,45% της δραστικής ουσίας chlorfenapyr (a.i.) (BASF Hellas, Amaroussion, Ελλάς).

2.3.2.γ Έκθεση ωών

Οι δοκιμές διεξήχθησαν σε τρυβλία Petri (διάμετρος 8 cm επί 1,5 cm ύψος) με εμβαδόν επιφάνειας 50,27 cm² έκαστο. Οι πυθμένες των τρυβλίων καλύφθηκαν με σκυρόδεμα CEM I 52,5 N (Durostick, Ασπρόπυργος, Ελλάδα) (εικ. 2.19 και 2.20) 24 ώρες πριν από την έναρξη του πειραματισμού καθότι το υλικό αυτό απαντάται συχνά στους αποθηκευτικούς χώρους. Οι κατακόρυφες εσωτερικές πλευρές των πιάτων καλύφθηκαν με πολυτετραφθοροαιθυλένιο (60% κ.β. διάλυμα σε ύδωρ) (Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Taufkirchen, Γερμανία) προκειμένου να εμποδιστούν οι

προσπάθειες διαφυγής των εντόμων. Το chlorfenapyr εφαρμόστηκε στη εγκεκριμένη δόση των 0,11 mg a.i./cm² για τις επεμβάσεις επιφανειών (Boukounala and Kavallieratos, 2020). Για το σκοπό αυτό, 1 mL του υδατικού διαλύματος (εικ. 2.21), που περιείχε τον κατάλληλο όγκο chlorfenapyr, ψεκάστηκε (εικ. 2.22, 2.23, 2.28, 2.29, 2.30) στις επιφάνειες του σκυροδέματος ως λεπτό νέφος χρησιμοποιώντας τον αερογράφο AG-4 (Mecafer S.A., Valence, Γαλλία). Οι μάρτυρες ψεκάστηκαν με απεσταγμένο ύδωρ με διαφορετικό αερογράφο ίδιου τύπου, ο οποίος είχε αποκλειστική χρήση για τους ψεκασμούς των μαρτύρων (εικ. 2.24).

Για να ληφθούν τα ωά, 100 θηλυκά τέλεια άτομα *T. castaneum*, ηλικίας 7 ημερών, ελήφθησαν από την αποικία και τοποθετήθηκαν σε γυάλινο βάζο 1 L, το οποίο περιείχε 500 mL αλεύρι (εικ. 2.6), επί μία ημέρα στους 30 °C, σχετική υγρασία 65% και συνεχές σκότος. Ο προσδιορισμός του φύλου διεξήχθη με βάση τα μορφολογικά χαρακτηριστικά των τελείων ατόμων όπως προτάθηκε από τον Halstead (1963). Είκοσι τέσσερις ώρες αργότερα, τα τέλεια άτομα και τα ωά απομονώθηκαν από το αλεύρι με κόσκινα δοκιμών No 20 (0,85 mm οπή) και No 60 (0,25 mm οπή) (Advantech Manufacturing Inc., New Berlin, WI, USA) αντίστοιχα (εικ. 2.7).

Για τη λήψη των ωών χρησιμοποιήθηκε λεπτό πινέλο (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, London, UK). Για τον μάρτυρα χρησιμοποιήθηκαν 116 τρυβλία τα οποία περιείχαν έκαστο 0,5 g αλεύρι διασκορπισμένο στην επιφάνεια του σκυροδέματος και στα οποία μεταφέρθηκε από ένα ωό. Το καπάκι κάθε τρυβλίου είχε ένα κεντρικό κυκλικό άνοιγμα 1,5 cm καλυμμένο με μουσελίνα το οποίο επέτρεπε τον αερισμό των εσωτερικών τους χώρων (εικ. 2.4 και 2.5).

Συνολικά 160 ωά τοποθετήθηκαν πολύ προσεκτικά σε 160 ψεκασμένα τρυβλία όπως προαναφέρθηκε με διαφορετικό λεπτό πινέλο (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, Λονδίνο, UK). Στη συνέχεια, τα τρυβλία τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους 32,5 °C, σχετική υγρασία 65% και συνεχές σκότος για όλη την πειραματική περίοδο και ελέγχονταν καθημερινά για μια περίοδο 7 ημερών από τη γέννησή τους στο στερεοσκόπιο Olympus SZX9 (ολική μεγέθυνση 57×) (Bacacos SA, Αθήνα, Ελλάδα) για την εκτίμηση της εκκόλαψης των προνυμφών, της ανάπτυξης και της επιβίωσής τους. Ο αερισμός των τρυβλίων πραγματοποιήθηκε όπως περιγράφεται παραπάνω.

2.3.2.δ Έκθεση προνυμφών

Τα ωά ελήφθησαν όπως προαναφέρθηκε. Ένας συνολικός αριθμός 160 ωών μεταφέρθηκε πολύ προσεκτικά σε 160 τρυβλία μάρτυρες με λεπτό πινέλο (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, Λονδίνο, UK). Έκαστο τρυβλίο περιείχε 0,5 g αλεύρου διασκορπισμένο στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Στη συνέχεια, τα τρυβλία τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους 32,5 °C, σχετική υγρασία 65% υπό συνεχές σκότος και ελέγχονταν καθημερινά για μια περίοδο 7 ημερών από τη γέννησή των ωών στο στερεοσκόπιο Olympus SZX9 (ολική μεγέθυνση 57×) (Bacacos SA, Αθήνα, Ελλάδα) για την εκκόλαψη των προνυμφών. Οι νεοεκκολαφθείσες προνύμφες μεταφέρθηκαν πολύ προσεκτικά, ξεχωριστά με νέο λεπτό πινέλο (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, Λονδίνο, Η.Β.) σε ψεκασμένα τρυβλία τα οποία περιείχαν 0,5 g αλεύρου όπως προαναφέρθηκε. Τα τρυβλία τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους 32,5 °C, σχετική υγρασία 65% υπό συνεχές σκότος για ολόκληρη την πειραματική περίοδο. Η ανάπτυξη και η επιβίωση των προνυμφών εκτιμούνταν καθημερινά για μια περίοδο 11 ημερών από τη γέννησή τους. Όλα τα τρυβλία αερίζονταν όπως προαναφέρθηκε.

2.3.2.στ Έκθεση μητρικών τελείων ατόμων

Στην παρούσα δοκιμή, 100 τέλεια θηλυκά άτομα, ηλικίας 7 ημερών, ελήφθησαν από μια αποικία και απελευθερώθηκαν επί τρεις ημέρες σε τρυβλία των οποίων οι πυθμένες είχαν καλυφθεί με σκυρόδεμα και ψεκαστεί με chlorfenapyr. Τα τρυβλία δεν περιείχαν τροφή (εικ. 2.25). Ακολούθως, τα άτομα μεταφέρθηκαν σε γυάλινα βάζα του 1 L τα οποία περιείχαν 500 mL αλεύρι στους 30 °C, 65% σχετική υγρασία υπό συνεχές σκότος και αφέθηκαν επί 24 ώρες. Την επόμενη ημέρα, τα τέλεια άτομα και τα ωά διαχωρίστηκαν με κόσκινα όπως περιγράφεται παραπάνω. Συνολικά, 164 ωά αφέθηκαν πολύ προσεκτικά σε 164 τρυβλία με σκυρόδεμα στο οποίο δεν είχε εφαρμοστεί το εντομοκτόνο και υπήρχε 0,5 g αλεύρι, όπως περιγράφεται παραπάνω. Στη συνέχεια, τα τρυβλία τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους 32,5 °C, σχετική υγρασία 65% υπό συνεχές σκότος και παρακολουθούνταν καθημερινά για μια περίοδο 51 ημερών από τη γέννησή τους στο στερεοσκόπιο Olympus SZX9 (ολική μεγέθυνση 57×) (Bacacos SA, Αθήνα, Ελλάδα) για την εκκόλαψη των προνυμφών, την ανάπτυξη, τη διάρκεια και την επιβίωση των προνυμφών και των νυμφών. Όλα τα τρυβλία αερίζονταν όπως

προαναφέρθηκε. Όταν τα έντομα έγιναν τέλεια άτομα, τοποθετήθηκαν ανά ζεύγη στα τρυβλία. Η διάρκεια της ζωής των τελείων ατόμων καταγραφόταν κάθε 24 ώρες για μια περίοδο 219 ημερών από τη γέννησή τους. Η γονιμότητα αξιολογήθηκε με τον υπολογισμό του αριθμού των ωών που γεννήθηκαν ανά θηλυκό ανά ημέρα.

2.3.3 Στατιστική ανάλυση

Τα δεδομένα σχετικά με την εκκόλαψη των προνυμφών, την ανάπτυξη των προνυμφών και των νυμφών, καθώς και τη διάρκεια ζωής των τελείων ατόμων υποβλήθηκαν στη δοκιμή κανονικότητας Shapiro-Wilk, η οποία έδειξε ότι δεν ακολουθούσαν την κανονική κατανομή. Ως εκ τούτου, τα δεδομένα αναλύθηκαν με ανάλυση της διασποράς κατά Kruskal–Wallis (δοκιμή Dunn σε $\alpha = 0,05$). Η μέθοδος Kaplan–Meier (1958) χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των καμπυλών επιβίωσης του *T. castaneum* σε κάθε μία από τις εξετασθείσες επεμβάσεις. Καθώς η δοκιμή log rank έδειξε ότι οι καμπύλες επιβίωσης διέφεραν σημαντικά, χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή Holm–Sidak ώστε να προσδιοριστούν ποια ζεύγη καμπυλών ήταν διαφορετικά. Όλες οι αναλύσεις επιβίωσης διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας το SigmaPlot 14.0 (2017).

Ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός $R_0 = \sum (l_x \times m_x)$ (το l_x αντιστοιχεί στην επιβίωση της μελέτης σειράς στην ηλικία x και m_x στη γονιμότητα που σχετίζεται με την ηλικία), ο ενδογενής ρυθμός αύξησης (r_m) $\sum (e^{r_m \times x} \times l_x \times m_x) = 1$, ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης $\lambda = e^{r_m}$, η μέση διάρκεια γενεάς $T = \frac{\ln R_0}{r_m}$ και ο χρόνος

διπλασιασμού $DT = \frac{\ln 2}{r_m}$ υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον Carey (1993). Σημαντικές

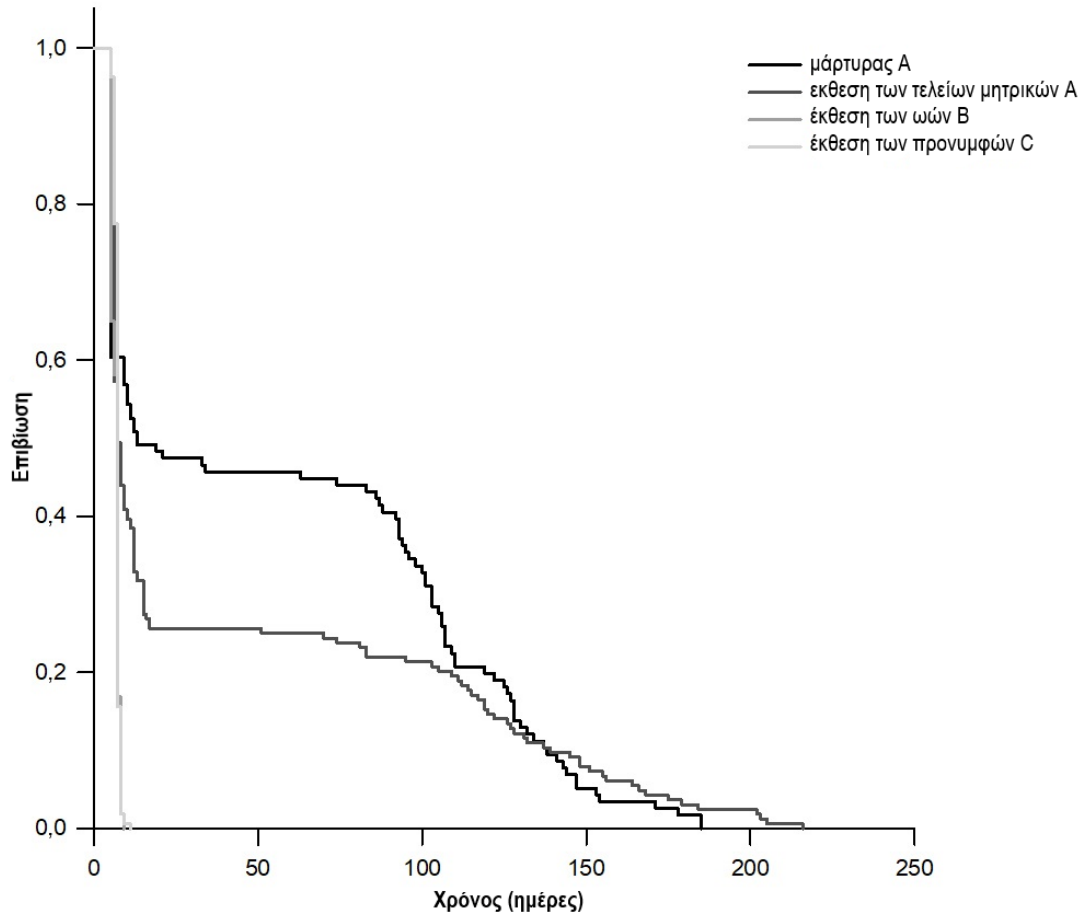
διαφορές μεταξύ των δημογραφικών παραμέτρων σε κάθε μία από τις επεμβάσεις δοκιμάστηκαν σε διαστήματα εμπιστοσύνης 95% (δοκιμή Wald), τα οποία ελήφθησαν με bootstrapping σε λογισμικό R (R Development Core Team, 2020). Συγκεκριμένα, για κάθε επέμβαση εφαρμόστηκε δείγμα δέκα χιλιάδων ατόμων προκειμένου να εξαχθεί το 95% C.I.

2.3.4 Αποτελέσματα

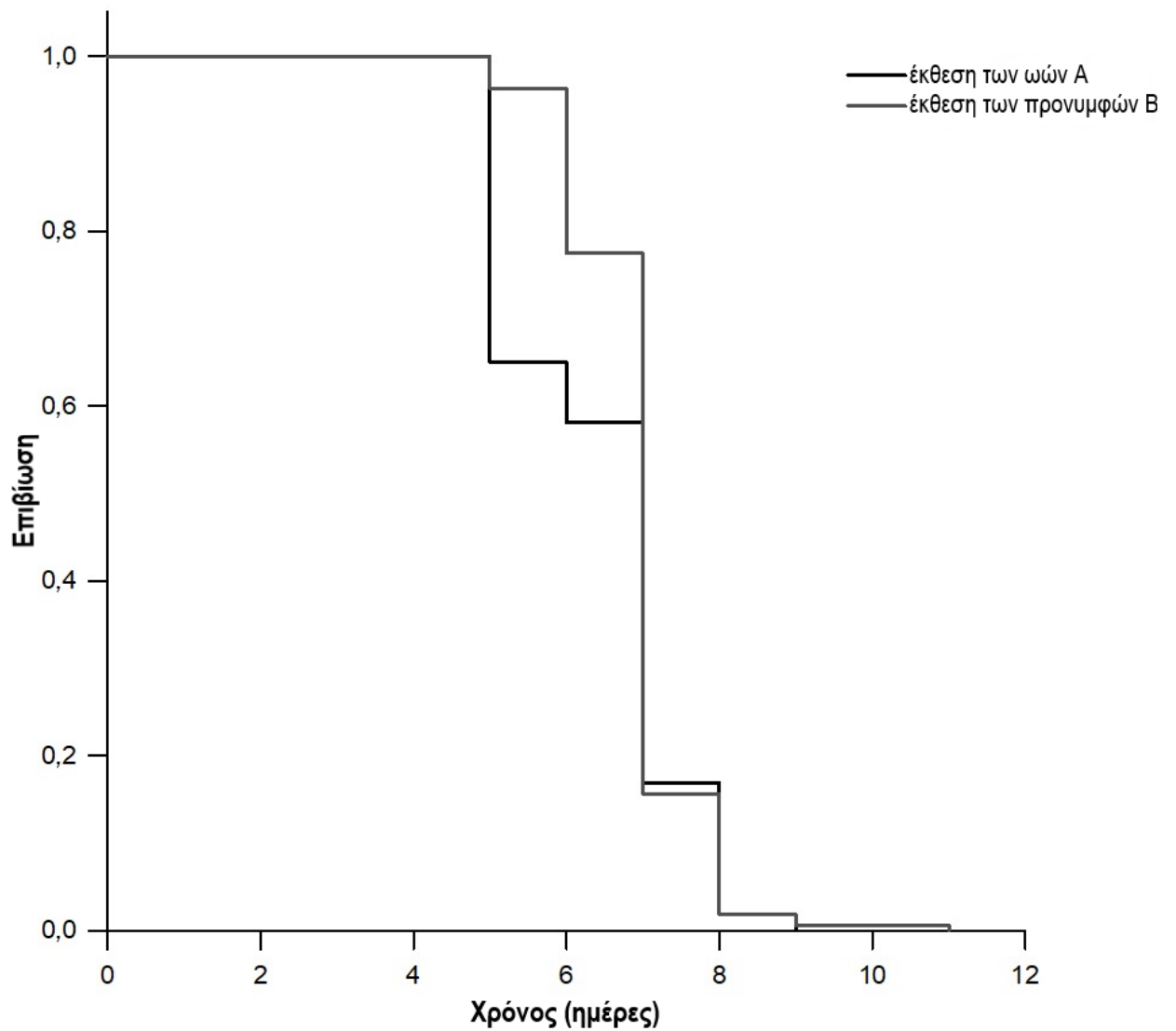
Η έκθεση των ωών και των προνυμφών *T. castaneum* στο chlorfenapyr ήταν επιζήμια. Όταν τα ωά εξετέθησαν στο chlorfenapyr, εκκολάφθηκε το 65,0% των προνυμφών ενώ ένα μικρό ποσοστό (14,4%) των προνυμφών L1 αναπτύχθηκε έως το στάδιο L2. Όταν οι νεοεκκολαφθείσες προνύμφες εξετέθησαν στο chlorfenapyr, το 21,9% αναπτύχθηκε έως το στάδιο L2 ενώ μόνο λίγες προνύμφες (6%) έφθασαν στο στάδιο L3. Η ανάλυση επιβίωσης έδειξε ότι η έκθεση διαφορετικών σταδίων ανάπτυξης του *T. castaneum* στο chlorfenapyr επηρέασε την πιθανότητα επιβίωσης μεταξύ των επεμβάσεων (χ^2 (Log rank) = 102,922, DF = 3, $p < 0,001$, Διαγράμματα 2.3.1 και 2.3.2), τον μέσο χρόνο επιβίωσης και τη γονιμότητα των απογόνων (όταν τα τέλεια θηλυκά εξετέθησαν στο chlorfenapyr—βλέπε υλικά και μέθοδοι) (Πίνακας 2.3.1). Ο μέσος χρόνος επιβίωσης ήταν σημαντικά χαμηλότερος όταν τα ωά ή οι προνύμφες εξετέθησαν στο chlorfenapyr (6,4 και 6,9 ημέρες, αντίστοιχα) σε σύγκριση με τον μάρτυρα (67,8 ημέρες) και τους απογόνους των θηλυκών ατόμων τα οποία είχαν στο chlorfenapyr (82,2 ημέρες). Επιπλέον, η μέση γονιμότητα δεν διέφερε μεταξύ του μάρτυρα (67,8 θήλεα/θήλυ) και των θηλυκών απογόνων (82,2 θήλεα/θήλυ).

Όταν τα τέλεια θηλυκά άτομα εξετέθησαν στο chlorfenapyr, τα βιολογικά χαρακτηριστικά των απογόνων τους δεν διέφεραν σημαντικά σε σύγκριση με τον μάρτυρα (Πίνακας 2.3.2). Ως εκ τούτου, η χρονική περίοδος για την εκκόλαψη των προνυμφών, οι περίοδοι ανάπτυξης προνυμφών και νυμφών, η διάρκεια ζωής των θηλυκών και των αρσενικών ατόμων στους μάρτυρες και οι απόγονοι των θηλυκών ατόμων, τα οποία είχαν εκτεθεί στο chlorfenapyr, ήταν 4,66 και 4,76 ημέρες, 25,85 και 25,71 ημέρες, 5,00 και 5,26 ημέρες, 87,33 και 104,22 ημέρες, και 76,87 και 91,87 ημέρες, αντίστοιχα.

Οι υπολογισθείσες δημογραφικές παράμετροι δεν διέφεραν σημαντικά μεταξύ του μάρτυρα και των απογόνων των θηλυκών ατόμων τα οποία είχαν εκτεθεί στο chlorfenapyr (Πίνακας 2.3.3). Οι μέσες τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού, της ενδογενούς ταχύτητας αύξησης, της μέσης διάρκειας γενεάς και του χρόνου διπλασιασμού του μάρτυρα και των απογόνων των τελείων μητρικών θηλυκών ατόμων, τα οποία είχαν εκτεθεί στο chlorfenapyr, ήταν 14,3 και 9,3 θήλεα/θήλυ, 0,038 και 0,028 θήλεα/θήλυ/ημέρα, 1,039 και 1,029, 70,0 και 76,9 ημέρες και 18,5 και 24,9 ημέρες, αντίστοιχα.



Διάγραμμα 2.3.1. Καμπύλες επιβίωσης μελέτης σειράς ωών *Tribolium castaneum*, προνυμφών και απογόνων τελείων μητρικών ατόμων τα οποία εξετέθησαν σε σκυρόδεμα ψεκασμένο με chlorfenapyr. Οι καμπύλες επιβίωσης των επεμβάσεων που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά.



Διάγραμμα 2.3.2. Μεγέθυνση των καμπυλών επιβίωσης μελέτης σειράς των ωών *Tribolium castaneum* και προνυμφών που εξετέθησαν σε σκυρόδεμα ψεκάσμένο με chlorfenapyr. Διαφορετικά γράμματα δείχνουν ότι οι καμπύλες διαφέρουν στατιστικά.

Πίνακας 2.3.1. Μέσος χρόνος επιβίωσης και γονιμότητας (95% C.I.) του *Tribolium castaneum*.

Επεμβάσεις	Χρόνος επιβίωσης (ημέρες)	95% C.I.	Γονιμότητα (Θήλεα/Θήλυ)	95% C.I.
Μάρτυρας	57,8 ^A	47,2–68,5	67,8 ^A	38,2–97,4
Έκθεση των ωών	6,4 ^B	6,2–6,6	-	-
Έκθεση των προνυμφών	6,9 ^C	6,8–7,0	-	-
Έκθεση των τελείων μητρικών ατόμων	39,7 ^A	30,8–48,6	82,2 ^A	45,4–119,0

Οι μέσες τιμές των στηλών που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά. Όπου υπάρχουν παύλες, δεν παρατηρήθηκε γονιμότητα.

Πίνακας 2.3.2. Διάρκεια των αναπτυξιακών σταδίων και διάρκεια ζωής των τελείων ατόμων σε ημέρες (μέσος όρος ± SE, διάμεσος) του *Tribolium castaneum* όταν τα τέλεια μητρικά άτομα εξετέθησαν στο chlorfenapyr.

Επέμβαση	Ωά	Προνύμφες	Νύμφες	Θηλυκά	Αρσενικά
Μάρτυρας	4,66 ± 0,08 5,0 A	25,85 ± 0,30 25,0 A	5,00 ± 0,07 5,0 A	87,33 ± 5,45 90,0 A	76,87 ± 4,69 71,0 A
Έκθεση των τελείων μητρικών ατόμων	4,76 ± 0,07 5,0 A	25,71 ± 0,51 25,0 A	5,26 ± 0,10 5,0 A	104,22 ± 7,68 98,0 A	91,88 ± 8,88 82,0 A
<i>H</i>	1,163	0,985	3,474	522,500	1,770
<i>DF</i>	1	1	1	1	1
<i>P</i>	0,281	0,321	0,062	0,084	0,183

Οι διάμεσοι των στηλών που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά (ανάλυση διασποράς Kruskal–Wallis, δοκιμή Dunn στο $\alpha = 0,05$).

Πίνακας 2.3.3. Ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός (R_0), ο ενδογενής ρυθμός αύξησης (r_m), ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης (λ), η μέση διάρκεια γενεάς (T) και ο χρόνος διπλασιασμού (DT) του *Tribolium castaneum* (μέσος όρος, 95% CI) όταν τα τέλεια θηλυκά άτομα εξετέθησαν στο chlorfenapyr.

Επέμβαση	Καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός (θήλεα/θήλυ)		Ενδογενής ρυθμός αύξησης (θήλεα/θήλυ/ημ.)		Πεπερασμένος ρυθμός αύξησης		Μέση διάρκεια γενεάς (ημέρες)		Χρόνος διπλασιασμού (ημέρες)	
	Mean	95% C.I.	Mean	95% C.I.	Mean	95% C.I.	Mean	95% C.I.	Mean	95% C.I.
Μάρτυρας	14,3 ^A	9,7–18,7	0,038 ^A	0,032–0,043	1,039 ^A	1,032–1,044	70,0 ^A	65,7–74,3	18,5 ^A	16,1–22,0
Έκθεση των τελείων μητρικών ατόμων	9,3 ^A	4,6–14,4	0,028 ^A	0,020–0,035	1,029 ^A	1,020–1,036	76,9 ^A	69,1–88,0	24,9 ^A	19,8–34,7

Οι μέσοι όροι των στηλών που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά.

2.3.5 Συζήτηση

Η παρούσα μελέτη παρέχει μια ολοκληρωμένη περιγραφή της επιβίωσης και αναπαραγωγής του *T. castaneum* όταν διαφορετικά στάδια του εντόμου εκτίθενται στο chlorfenapyr. Η γνώση της αναπτυξιακής βιολογίας και των παραμέτρων του πίνακα ζωής του *T. castaneum* διευκολύνει την εκτίμηση της πληθυσμιακής αύξησής του με την πάροδο του χρόνου και συνεπώς της πιθανής πληθυσμιακής έξαρσής του (Papanikolaou et al., 2014; Kavallieratos et al., 2019; Papanikolaou et al., 2019; Skourti et al., 2019). Όλα τα σενάρια που δοκιμάστηκαν είναι βάσιμα, καθώς τα έντομα και τα ωά τους μπορούν να μεταφερθούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας καθαρισμού των αποθηκευτικών εγκαταστάσεων (Ghimire et al., 2017), π.χ., από τα σημεία στα οποία έχουν γίνει επεμβάσεις με εντομοκτόνα σε σημεία που δεν έχουν γίνει επεμβάσεις ή μεταξύ σημείων που έχουν υποστεί επεμβάσεις ή μεταξύ περιοχών στα οποία δεν έχουν γίνει επεμβάσεις. Τα αποτελέσματα παρέχουν στοιχεία που δείχνουν πως η έκθεση των διαφορετικών αναπτυξιακών σταδίων στο chlorfenapyr ευθύνεται για τις διαφορές οι οποίες παρουσιάστηκαν στην βιωσιμότητα του *T. castaneum*. Από τις υπολογισθείσες τιμές της επιβίωσης και της γονιμότητας των ατόμων από τη γέννησή τους έως το θάνατό τους, φάνηκε ότι το *T. castaneum* δεν ολοκλήρωσε την ανάπτυξή του όταν τα ωά ή οι νεοεκκολαφθείσες προνύμφες εξετέθησαν στο chlorfenapyr. Διαπιστώθηκε επίσης ότι η έκθεση των ωών και των νεοεκκολαφθεισών προνυμφών στο εντομοκτόνο ήταν επιβλαβής για την εξέλιξη του πληθυσμού, καθώς ο συνολικός πληθυσμός που εμφανίστηκε αποδεκατίστηκε σε 9 (έκθεση των ωών) ή 11 ημέρες (έκθεση των νεοεκκολαφθεισών προνυμφών). Επιπλέον, ο μέσος χρόνος επιβίωσης και οι καμπύλες επιβίωσης της μελέτης σειράς της οποίας τα ωά εξετέθησαν στο εντομοκτόνο, διέφεραν σημαντικά σε σύγκριση με αυτόν της έκθεσης των προνυμφών. Μια πιο προσεκτική παρατήρηση των καμπυλών επιβίωσης αποκαλύπτει τη φύση αυτής της ανισότητας. Συγκεκριμένα, γίνεται ευθέως αντιληπτό ότι οι δύο καμπύλες είναι ουσιαστικά πανομοιότυπες για το αρχικό μισό της πορείας τους. Μετά από πέντε ημέρες περίπου, επέζησαν περισσότερες προνύμφες που εξετέθησαν σε μελέτη σειράς με chlorfenapyr, συμπεράσμα το οποίο εξηγεί με σαφήνεια τις διαφορές της δοκιμασίας log-rank.

Η διαπίστωση ότι η πρώιμη έκθεση των ωών και των νεοεκκολαφθεισών προνυμφών *T. castaneum* σε επιφάνειες σκυροδέματος ψεκασμένες με chlorfenapyr δεν επέτρεψε την ολοκλήρωση του βιολογικού κύκλου του εντόμου είναι σημαντική για την αξιολόγηση του chlorfenapyr έναντι των εχθρών των αποθηκευμένων

γεωργικών προϊόντων καθώς μπορεί να συνυπολογιστεί στις επιπτώσεις που επιφέρει σε επίπεδο πληθυσμού στα έντομα στόχους. Υπογραμμίζεται ότι η έκθεση πραγματοποιήθηκε με την παρουσία αλεύρου ως πηγή τροφής. Τα τρόφιμα μπορούν να απορροφήσουν μέρος του chlorfenapyr οδηγώντας σε μείωση της αποτελεσματικότητάς του (Arthur, 2015). Αντιθέτως, όταν προνύμφες *T. castaneum* ηλικίας τεσσάρων εβδομάδων εξετέθησαν σε επιφάνειες στις οποίες είχε εφαρμοστεί μερικώς το chlorfenapyr, ορισμένες αναπτύχθηκαν σε τέλεια άτομα, από τα οποία αρκετά απεβίωσαν αμέσως μετά την εμφάνισή τους (Arthur, 2012). Τούτη η διαφορά θα μπορούσε να εξηγηθεί από το γεγονός ότι οι μεγαλύτερες προνύμφες έχουν τη δυνατότητα να συνεχίσουν την ανάπτυξή τους σε σχέση με τις μικρότερες. Για παράδειγμα, για το ίδιο είδος, οι Sağlam et al. (2013) διαπίστωσαν ότι οι μεγαλύτερες προνύμφες (4-7 ημερών) ήταν πιο ανθεκτικές από τις πιο νεαρότερες (1-3 ημερών) σε σκυρόδεμα στο οποίο είχε εφαρμοστεί chlorantraniliprole, thiamethoxam ή imidacloprid, υπό διαφορετικούς συνδυασμούς βιοτικών και αβιοτικών συνθηκών, καθώς υπήρχαν άτομα τα οποία επιβίωσαν μετά από 14 ημέρες έκθεσης. Μια παρόμοια τάση έχει υποστηριχθεί για γηραιότερες, έναντι νεαρότερων προνυμφών, άλλων εντόμων αποθηκών τα οποία εκτέθηκαν στο chlorfenapyr, π.χ., *T. granarium* (Kavallieratos et al., 2016) και *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae) (Kavallieratos et al., 2019). Σε μια πρόσφατη μελέτη, οι Thorat et al. (2017) ανέφεραν ότι η εφαρμογή υποθανάτιων δόσεων chlorfenapyr σε μείγμα αλεύρου ολικής αλέσεως με 5% ζυθοζύμης επέτρεψε την ανάπτυξη εκτεθέντων ωών *T. castaneum* σε τέλεια άτομα και κατά συνέπεια τη συνέχιση της προσβολής αλεύρου. Η παρούσα μελέτη εστιάζει στην ωοκτόνο δράση του chlorfenapyr το οποίο είναι ένα κρίσιμο ζήτημα για τη διαχείριση του *T. castaneum*. Οι Thorat et al. (2017) ανέφεραν επίσης ότι το chlorfenapyr επηρεάζει αρνητικά τη βιωσιμότητα των ωών *T. castaneum* ανάλογα με την εφαρμοζόμενη υποθανάτια δόση. Πρακτικώς, η εφαρμογή του chlorfenapyr σε επιφάνειες δεν θα επηρεάσει μόνο τα ωά *T. castaneum* καθώς είναι ικανό να σκοτώσει ωά άλλων εντόμων αποθηκών. Για παράδειγμα, σε μια πρόσφατη μελέτη, οι Boukounala και Kavallieratos (2020) διαπίστωσαν ότι η έκθεση των ωών *T. granarium* σε σκυρόδεμα ψεκασμένο με chlorfenapyr είχε ως αποτέλεσμα το μέγιστο της εκκόλαψης των προνυμφών να ανέλθει στο 87 και το 76,7% υπό την παρουσία τροφής ή όχι, αντίστοιχα. Στις δύο περιπτώσεις, οι προνύμφες οι οποίες εκκολάφθηκαν δεν ολοκλήρωσαν την ανάπτυξή τους, όπως τεκμηριώνεται από τα ευρήματα της τρέχουσας μελέτης, αν και δεν εξετάστηκε η έκθεση των ωών χωρίς την παρουσία του αλεύρου. Η προσθήκη αλεύρου επέκτεινε την περίοδο της

επιβίωσης των προνυμφών *T. granarium* στο ψεκασμένο σκυρόδεμα με chlorfenapyr δεδομένου ότι παρατηρήθηκε 100% θνησιμότητα οκτώ ημέρες μετά την επέμβαση η οποία περιελάμβανε αλεύρι έναντι πέντε ημερών άνευ αλεύρου (Boukounala and Kavallieratos, 2020). Ένας σημαντικός παράγοντας ο οποίος ρυθμίζει την επιβίωση των εκτεθέντων εντόμων είναι η χορηγούμενη δόση του εντομοκτόνου. Σε προγενέστερη μελέτη ο Arthur (2009) διαπίστωσε ότι η απουσία τροφής μείωσε την επιβίωση των τελείων ατόμων *T. castaneum* σε σκυρόδεμα ψεκασμένο με chlorfenapyr σε εύρος δόσεων 0,0275–0,0825 mg ai/cm². Εάν οι προνύμφες *T. castaneum* έχουν παρόμοια απόδοση κατά την απουσία τροφής, σύμφωνα με την πειραματική προσέγγιση της μελέτης, χρήζει περαιτέρω έρευνας.

Στην παρούσα έρευνα διαπιστώθηκε ότι η έκθεση των τελείων μητρικών ατόμων του εντόμου σε chlorfenapyr δεν επηρέασε την αναπτυξιακή βιολογία των απογόνων τους. Έτσι, η εκκόλαψη των προνυμφών, η διάρκεια της ανάπτυξης των προνυμφών και των νυμφών, η διάρκεια ζωής των θηλυκών και αρσενικών ατόμων και η γονιμότητα, δεν διέφεραν σημαντικά σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Επιπλέον, η ανάλυση της επιβίωσης έδειξε ότι δεν υπήρχαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των καμπυλών επιβίωσης και των μέσων χρόνων επιβίωσης των επεμβάσεων. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται επίσης στις τιμές των παραμέτρων του πίνακα της εκτιμώμενης διάρκειας ζωής. Ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός, ο ενδογενής ρυθμός αύξησης και πεπερασμένος ρυθμός αύξησης, η μέση διάρκεια γενεάς και ο χρόνος διπλασιασμού μεταξύ του μάρτυρα και των απογόνων των τελείων μητρικών ατόμων τα οποία εξετάθησαν στο chlorfenapyr, δεν διέφεραν σημαντικά. Τα αποτελέσματα είναι βιολογικά ερμηνεύσιμα, καθώς οι παράμετροι του πίνακα ζωής εξαρτώνται από την επιβίωση, την ανάπτυξη και τη γονιμότητα της μελέτης σειράς (Papanikolaou et al., 2019). Επομένως, δεν υπάρχει επίδραση στην αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum* όταν τα μητρικά τέλεια άτομα εκτίθενται στο chlorfenapyr. Αξίζει να σημειωθεί ότι τα στατιστικά δεδομένα του πίνακα ζωής βασίζονται σε διάφορες υποθέσεις (Papanikolaou et al., 2014; Stark and Banks, 2016). Για παράδειγμα, ο υπολογισμός των παραμέτρων του πίνακα ζωής προϋποθέτει ότι ο πληθυσμός που μελετήθηκε είναι κλειστός, εμφανίζοντας σταθερά ποσοστά γεννήσεων και θανάτων και εκθετική αύξηση πληθυσμού (Papanikolaou et al., 2014). Αν και αυτές οι καταστάσεις σπάνια συναντώνται στη φύση, αναμένεται ότι οι υπολογισθείσες παράμετροι του πίνακα ζωής είναι ενδεικτικές της δυνητικής αύξησης του πληθυσμού του *T. castaneum*.

Το *Tribolium castaneum* είναι είδος με ικανότητα πτήσης (Hill, 2003; Perez Mendoza et al, 2011; Perez Mendoza et al., 2011) το οποίο αποικίζει τις διαθέσιμες πηγές τροφής βαδίζοντας ή/και πετώντας (Perez Mendoza et al, 2011a; Perez Mendoza et al., 2011b). Επίσης, παρουσιάζει υψηλή τάση διασποράς κατά τη διάρκεια του τελείου σταδίου μέσω της πτήσης (Perez Mendoza et al, 2011a; Perez Mendoza et al., 2011b). Αυτό σημαίνει ότι η παρουσία των τελείων ατόμων θα πρέπει να ενεργοποιεί σχολαστικές τακτικές διαχείρισης συμπεριλαμβανομένων των εφαρμογών με το chlorfenapyr σε επιφάνειες στους αποθηκευτικούς χώρους. Η παραγωγή των απογόνων θα προάγει την κανονική ανάπτυξή τους στην επόμενη γενιά, ακόμη και αν τα τέλεια μητρικά άτομα έρθουν σε επαφή με τις ψεκασμένες επιφάνειες και στην συνέχεια απομακρυνθούν από αυτές, όπως εξετάστηκε στην παρούσα μελέτη. Εκτός από τα αποθηκευμένα προϊόντα, το *T. castaneum* βρίσκεται σε ρωγμές και σχισμές οι οποίες περιέχουν υπολείμματα τροφών (Rustamani et al., 2014; Day, 2016) όπου, αν και λιγότερο πιθανό, μπορεί να ωτοκεί (Mahroof and Hagstrum, 2012) Συνεπώς, οι εφαρμογές των εντομοκτόνων θα πρέπει να εφαρμόζονται σε συνδυασμό με διεξοδικές διαδικασίες υγιεινής για τη μεγιστοποίηση των προσπαθειών καταπολέμησης του *T. castaneum* (Systat Software, 2017).

Υπό το φως των πειραμάτων της μελέτης, αναμένεται ότι τα αποτελέσματα θα ληφθούν υπ' όψιν στη διαχείριση του *T. castaneum* καθώς αποκαλύπτουν την κατάστασή του μετά από τις επεμβάσεις με το chlorfenapyr. Αποδείχθηκε ότι η έκθεση των διαφορετικών σταδίων ανάπτυξης του εντόμου σε τούτο το εντομοκτόνο σχετίζεται με τις διαφορές οι οποίες εντοπίζονται στην φυσική κατάστασή του. Επιπλέον, τα βιολογικά χαρακτηριστικά και οι δημογραφικές παράμετροι του *T. castaneum* μπορούν να ενσωματωθούν σε πληθυσμιακά πρότυπα τα οποία αξιολογούν τη δυναμική του πληθυσμού του εντόμου και σε πρότυπα μαζικής εκτροφής που επιτρέπουν την αποτελεσματική αναπαραγωγή του εντόμου (Carey and Vargas, 1985; Papanikolaou et al., 2014). Τα ωά και οι νεοεκκολαφθείσες προνύμφες αποτελούν τα στάδια για την αποτελεσματική διαχείριση του *T. castaneum*. Δεδομένου ότι το chlorfenapyr είναι επί του παρόντος εγκεκριμένο για εφαρμογές επί των επιφανειών στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης, αναμένεται ότι περαιτέρω μελέτες θα λάβουν υπ' όψιν την προσέγγιση της παρούσας μελέτης για την αξιολόγηση επιπλέον εγκεκριμένων ή καινοτόμων εντομοκτόνων προστατευτικών των δημητριακών έναντι του *T. castaneum* και άλλων ειδών εντόμων αποθηκών.

2.3.6 Βιβλιογραφία

- Carey, J.R.; Vargas, R., 1985. Demographic analysis of insect mass rearing: Case study of three tephritids. *J. Econ. Entomol.*, 78, 523–527.
- Papanikolaou, N.E.; Milonas, P.G.; Demiris, N.; Papachristos, D.P.; Matsinos, Y.G., 2014. Digestion limits the functional response of an aphidophagous coccinellid (Coleoptera: Coccinellidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.*, 107, 468–474.
- Abdullahi, G.; Muhamad, R.; Dzolkifli, O.; Sinniah, U.R. Damage potential of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) on cocoa beans: Effect of initial adult population density and post infestation storage time. *J. Stored Prod. Res.* 2018, 75, 1–9.
- Aitken, A.D. Insect Travelers, I: Coleoptera. Technical Bulletin 31; HMSO: London, UK, 1975.
- Arthur, F.H. Dosage rate, temperature, and food source provisioning affect susceptibility of *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* to chlorfenapyr. *J. Pest Sci.* 2013, 86, 507–513.
- Arthur, F.H. Efficacy of chlorfenapyr against adult *Tribolium castaneum* exposed on concrete: Effects of exposure interval, concentration, and the presence of a food source after exposure. *Insect Sci.* 2009, 16, 157–163.
- Arthur, F.H. Efficacy of chlorfenapyr against *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae) adults exposed on concrete, vinyl tile, and plywood surfaces. *J. Stored Prod. Res.* 2008, 44, 145–151.
- Arthur, F.H.; Fontenot, E.A. Food source provisioning and susceptibility of immature and adult *Tribolium castaneum* on concrete partially treated with chlorfenapyr (Phantom®). *J. Pest Sci.* 2012, 85, 277–282.
- Arthur, F.H. Food source effect and residual efficacy of chlorfenapyr as a surface treatment on sealed and unsealed concrete. *J. Stored Prod. Res.* 2015, 64, 65–71.
- Arthur, F.H. Grain protectants: Current status and prospects for the future. *J. Stored Prod. Res.* 1996, 32, 239–302.

- Athanassiou, C.G.; Arthur, F.H.; Kavallieratos, N.G.; Throne, J.E. Residual efficacy of chlorfenapyr for control of stored-product psocids (Psocoptera). *J. Econ. Entomol.* 2014, 107, 854–859.
- Attia, M.A.; Wahba, T.F.; Shaarawy, N.; Moustafa, F.I.; Guedes, R.N.C.; Dewar, Y. Stored grain pest prevalence and insecticide resistance in Egyptian populations of the red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) and the rice weevil *Sitophilus oryzae* (L.). *J. Stored Prod. Res.* 2020, 87, 101611.
- Boukouvala, M.C.; Kavallieratos, N.G.; Athanassiou, C.G.; Hadjiarapoglou, L.P. Biological activity of two new pyrrole derivatives against stored-product species: Influence of temperature and relative humidity. *Bull. Entomol. Res.* 2016, 106, 446–456.
- Boukouvala, M.C.; Kavallieratos, N.G.; Athanassiou, C.G.; Benelli, G.; Hadjiarapoglou, L.P. Insecticidal efficacy of six new pyrrole derivatives against four stored-product pests. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2019, 26, 29845–29856.
- Boukouvala, M.C.; Kavallieratos, N.G.; Athanassiou, C.G.; Hadjiarapoglou, L.P. Insecticidal effect of two novel pyrrole derivatives against two major stored product insect species. *Crop Prot.* 2016, 84, 1–7.
- Boukouvala, M.C.; Kavallieratos, N.G.; Athanassiou, C.G.; Losic, D.; Hadjiarapoglou, L.P.; Elemes, Y. Laboratory evaluation of five novel pyrrole derivatives as grain protectants against *Tribolium confusum* and *Ephestia kuehniella* larvae. *J. Pest Sci.* 2017, 90, 569–585.
- Boukouvala, M.C.; Kavallieratos, N.G. Effect of six insecticides on egg hatching and larval mortality of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae). *Insects* 2020, 11, 263.
- Carey, J.R. *Applied Demography for Biologists with Special Emphasis on Insects*; Oxford University Press: New York, NY, USA, 1993.
- Carey, J.R. Insect biodemography. *Annu. Rev. Entomol.* 2001, 46, 79–110.
- Day, E. *Flour and Grain Beetles*. 3104-1577 (ENTO-192NP); Virginia Cooperative Extension, Virginia Tech, Virginia State University: Petersburg, VA, USA, 2016.

- Ghimire, M.N.; Myers, S.W.; Arthur, F.H.; Phillips, T.W. Susceptibility of *Trogoderma granarium* Everts and *Trogoderma inclusum* LeConte (Coleoptera: Dermestidae) to residual contact insecticides. *J. Stored Prod. Res.* 2017, 72, 75–82.
- Gutierrez, A.P. *Applied Population Ecology: A Supply-Demand Approach*; John Wiley & Sons: New York, NY, USA, 1996.
- Halliday, W.R.; Arthur, E.H.; Zettler, J.L. Resistance status of red flour beetle (Coleoptera: Tenebrionidae) infesting stored peanuts in the southeastern United States. *J. Econ. Entomol.* 1988, 76, 717–722.
- Halstead, D.G. External sex differences in stored-products Coleoptera. *Bull. Entomol. Res.* 1963, 54, 119–134.
- Hill, D.S. *Pests of Storage Foodstuffs and Their Control*; Kluwer Academic Publishers: New York, NY, USA, 2003.
- Hunt, D.A. 2-Arylpyrroles: A new class of insecticide. Structure, activity, and mode of action. *Pestic. Sci.* 1996, 47, 201–202.
- Jalali, M.A.; Tirry, L.; De Clercq, P. Effects of food and temperature on development, fecundity and life-table parameters of *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *J. Appl. Entomol.* 2009, 133, 615–625.
- Jalali, M.A.; Tirry, L.; Clercq, P.D. Temperature-dependent development of the two-spotted ladybeetle, *Adalia bipunctata* on the green peach aphid, *Myzus persicae*, and a factitious food under constant temperatures. *J. Insect Sci.* 2010, 10, 124.
- Johnson, J. Pest control in postharvest nuts. In *Improving the Safety and Quality of Nuts*; Harris, L.J., Ed.; Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2013; pp. 56–87.
- Kaplan, E.L.; Meier, P. Nonparametric estimation from incomplete observations. *J. Am. Stat. Assoc.* 1958, 53, 457–481.
- Kavallieratos, N.G.; Athanassiou, C.G.; Barda, M.S.; Boukouvala, M.C. Efficacy of five insecticides for the control of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) larvae on concrete. *J. Stored Prod. Res.* 2016, 66, 18–24.
- Kavallieratos, N.G.; Athanassiou, C.G.; Hatzikonstantinou, A.N.; Kavallieratou, H.N. Abiotic and biotic factors affect efficacy of chlorfenapyr for control of stored-product insect pests. *J. Food Prot.* 2011, 74, 1288–1299.

- Kavallieratos, N.G.; Boukouvala, M.C. Efficacy of four insecticides on different types of storage bags for the management of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) adults and larvae. *J. Stored Prod. Res.* 2018, 78, 50–58.
- Kavallieratos, N.G.; Karagianni, E.S.; Papanikolaou, N.E. Life history of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on peeled barley, peeled oats and triticale. *J. Stored Prod. Res.* 2019, 84, 101515.
- Kavallieratos, N.G.; Michail, E.J.; Boukouvala, M.C.; Nika, E.P.; Skourti, A. Efficacy of pirimiphos-methyl, deltamethrin, spinosad and silicoSec against adults and larvae of *Tenebrio molitor* L. on wheat, barley and maize. *J. Stored Prod. Res.* 2019, 83, 161–167.
- Kontodimas, D.C.; Milonas, P.G.; Stathas, G.J.; Papanikolaou, N.E.; Skourti, A.; Matsinos, Y.G. Life table parameters of the aphid predators *Coccinella septempunctata*, *Ceratomegilla undecimnotata* and *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Eur. J. Entomol.* 2008, 105, 427–430.
- Lu, H.; Zhou, J.; Xiong, S.; Zhao, S. Effects of low-intensity microwave radiation on *Tribolium castaneum* physiological and biochemical characteristics and survival. *J. Insect Physiol.* 2010, 56, 1356–1361.
- Mahroof, R.M.; Hagstrum, D.W. Biology, behavior, and ecology of insects in processed commodities. In *Stored Product Protection*; Hagstrum, D.W., Phillips, T.W., Cuperus, G., Eds.; Kansas State University: Manhattan, KS, USA, 2012; pp. 33–44.
- McLeod, P.; Diaz, F.J.; Johnson, D.T. Toxicity, persistence, and efficacy of spinosad, chlorfenapyr, and thiamethoxam on eggplant when applied against the eggplant flea beetle (Coleoptera: Chrysomelidae). *J. Econ. Entomol.* 2002, 95, 331–335.
- Nika, E.P.; Kavallieratos, N.G.; Papanikolaou, N.E. Developmental and reproductive biology of *Oryzaephilus surinamensis* (L.) (Coleoptera: Silvanidae) on seven commodities. *J. Stored Prod. Res.* 2020, 87, 101612.
- Papachristos, D.P.; Katsarou, I.; Michaelakis, A.; Papanikolaou, N.E. Influence of different species of aphid prey on the immature survival and development of four species of aphidophagous coccinellids (Coleoptera: Coccinellidae). *Eur. J. Entomol.* 2015, 112, 440–445.

- Papanikolaou, N.E.; Kavallieratos, N.G.; Kondakis, N.; Boukouvala, M.C.; Nika, E.P.; Demiris, N. Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) at constant temperatures, combining deterministic and stochastic demography. PLoS ONE 2019, 14, e0212182.
- Papanikolaou, N.E.; Milonas, P.G.; Demiris, N.; Papachristos, D.P.; Matsinos, Y.G. Digestion limits the functional response of an aphidophagous coccinellid (Coleoptera: Coccinellidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 2014, 107, 468–474.
- Papanikolaou, N.E.; Milonas, P.G.; Kontodimas, D.C.; Demiris, N.; Matsinos, Y.G. Temperature-dependent development, survival, longevity, and fecundity of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). Ann. Entomol. Soc. Am. 2013, 106, 228–234.
- Perez Mendoza, J.; Campbell, J.F.; Throne, J.E. Effects of rearing density, age, sex, and food deprivation on flight initiation of the red flour beetle (Coleoptera: Tenebrionidae). J. Econ. Entomol. 2011, 104, 443–451.
- Perez Mendoza, J.; Campbell, J.F.; Throne, J.E. Influence of age, mating status, sex, quantity of food, and long-term food deprivation on red flour beetle (Coleoptera: Tenebrionidae) flight initiation. J. Econ. Entomol. 2011, 104, 2078–2086.
- R Development Core Team. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing. Available online: <http://www.Rproject.org> (accessed on 20 May 2020).
- Raghavendra, K.; Barik, T.K.; Sharma, P.; Bhatt, R.M.; Srivastava, H.C.; Sreehari, U.; Dash, A.P. Chlorfenapyr: A new insecticide with novel mode of action can control pyrethroid resistant malaria vectors. Malar. J. 2011, 10, 16.
- Rees, D. Insects of Stored Products; Manson Publishing: London, UK, 2004.
- Rossi, E.; Cosimi, S.; Loni, A. Insecticide resistance in Italian populations of Tribolium flour beetles. Bull. Insectol. 2010, 63, 251–258.
- Rustamani, M.A.; Khatri, I.; Sultana, R.; Laghari, M.H. Population fluctuation of red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) on different cereal foods in laboratory. Pak. J. Zool. 2014, 46, 1511–1514.

- Sařglam, O.; Athanassiou, C.G.; Vassilakos, T.N. Comparison of spinetoram, imidacloprid, thiamethoxam and chlorantraniliprole against life stages of *Tribolium confusum* Jacquelin du Val (Coleoptera: Tenebrionidae) on concrete. *Crop Prot.* 2013, 53, 85–95.
- Skourti, A.; Kavallieratos, N.G.; Papanikolaou, N.E. Laboratory evaluation of development and survival of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) under constant temperatures. *J. Stored Prod. Res.* 2019, 83, 305–310.
- Stadler, T.; Subramanyam, B.; Ferrero, A.A. Monitoring for insecticide resistance in major stored product pests in Argentina: A review. *Agriscientia* 2003, 20, 99–110.
- Stark, J.D.; Banks, J.E. Developing demographic toxicity data: Optimizing effort for predicting population outcomes. *PeerJ* 2016, 4, e2067.
- Systat Software. SigmaPlot for Windows Version 14.0; Systat Software: Chicago, IL, USA, 2017.
- Thorat, G.; Salokhe, S.G.; Deshpande, S.G. Effect of chlorfenapyr (sub-lethal concentration) on development, growth and reproductive performance of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *Int. J. Sci. Res. Publ.* 2017, 7, 71–85.
- Tomlin, C.D.S. *The Pesticide Manual*; BCPC Publications: London, UK, 2000.
- Velki, M.; Plavřin, I.; Dragojević, J.; Hackenberger, B.K. Toxicity and repellency of dimethoate, pirimiphos-methyl and deltamethrin against *Tribolium castaneum* (Herbst) using different exposure methods. *J. Stored Prod. Res.* 2014, 59, 36–41.
- Wang, K.Y.; Zhang, Y.; Wang, H.Y.; Xia, X.M.; Liu, T.X. Biology and life table studies of the oriental tobacco budworm, *Helicoverpa assulta* (Lepidoptera: Noctuidae), influenced by different larval diets. *Insect Sci.* 2008, 15, 569–576.
- Zeki, E.; Papanikolaou, N.E.; Demiris, N.; Kontodimas, D.C. Comparison of the demographic parameters and survival of two phenotypes of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Eur. J. Entomol.* 2015, 112, 193–196.

Zhao, Y.; Li, Y.; Ou, X.; Zhang, P.; Huang, Z.; Bi, F.; Huang, R.; Wang, Q. Synthesis, insecticidal, and acaricidal activities of novel 2-aryl-pyrrole derivatives containing ester groups. *J. Agric. Food Chem.* 2008, 56, 10176–10182.

2.4 Η έκθεση των θηλυκών ατόμων *Tribolium castaneum* (Herbst) στο pirimiphos-methyl μεταβάλλει την βιωσιμότητα των απογόνων τους*

2.4.1 Εισαγωγή

Το κόκκινο σκαθάρι των αλεύρων, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) είναι ένας ασιατικής προέλευσης εχθρός των αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων, παγκοσμίως εξαπλωμένος, ο οποίος συχνά συνδέεται με μεγάλες ζημιές που παρατηρούνται σε αποθηκευτικές εγκαταστάσεις, σπίτια, μύλους, παντοπωλεία, καταστήματα λιανικής και εμπορευματοκιβώτια (Hill, 2003; Rees, 2004; Arthur, 2008; Mahroof and Hagstrum, 2012; Hagstrum et al., 2013). Πρόκειται για έντομο ευρέως γνωστό ως εχθρός των δημητριακών και των προϊόντων τους (άλευρα και αλεσμένα δημητριακά), ωστόσο τρέφεται και με ξηρούς καρπούς, μπαχαρικά, σοκολάτα, κακάο, αποξηραμένα φρούτα, όσπρια, ελαιούχους σπόρους, ζωικά προϊόντα κ.α. (Aitken, 1975; Robinson, 2005). Οι Hagstrum et al. (2013) ανέφεραν ότι το *T. castaneum* προσβάλλει τον αξιοσημείωτο αριθμό των 233 διαφορετικών τροφών. Αν και τρέφεται με σπασμένους σπόρους ως δευτερεύων εχθρός (Aitken, 1975), προσβάλλει τους ακεραίους σπόρους όταν η περιεκτικότητά τους σε υγρασία είναι $\geq 12\%$ (Wilbur, 1971). Καθώς είναι εύκολο να εκτραφεί υπό εργαστηριακές συνθήκες και να αναπαραχθεί γρήγορα, χρησιμοποιείται ευρέως ως ζωικό πρότυπο σε βιολογικές, βιοϊατρικές, περιβαλλοντικές, οικολογικές, γενετικές και μοριακές μελέτες (Wang et al., 2007; Brown et al., 2009; Denell, 2008; Adamski et al., 2019). Ένα ακόμη σημαντικό θέμα αφορά τη διαχείριση του *T. castaneum*. Προηγούμενες μελέτες έχουν δείξει ότι αυτό το έντομο είναι ανεκτικό σε διάφορες δραστικές ουσίες οι οποίες χρησιμοποιούνται ως εντομοκτόνα επαφής (π.χ. β -cyfluthrin, cyfluthrin, chlorfenapyr, deltamethrin) ή φυσικά εντομοκτόνα (π.χ. γη διατόμων) έναντι άλλων σημαντικών ειδών εχθρών των αποθηκών, όπως το *Prostephanus truncatus* (Horn) (Coleoptera: Bostrychidae), το *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae), το *Tribolium confusum* Jacquelin du Val (Coleoptera: Tenebrionidae) και το *Trogoderma variabile* (Ballion) (Coleoptera:

*Skourti, A., N. G. Kavallieratos and N. E. Papanikolaou 2020. Exposure of *Tribolium castaneum* (Herbst) females to pirimiphos-methyl alters the fitness of their progeny. Environmental Science and Pollution Research 28: 7893-7900. (Impact Factor 2020 = 4,223)

Dermestidae) σε ψεκασμένες ή εμποτισμένες επιφάνειες με εντομοκτόνα (Arthur, 1998a, b; Arthur, 2008; Sehgal et al., 2013; Kavallieratos et al., 2017).

Η ικανότητα ενός πληθυσμού εντόμων να επιβιώνει και να αναπαράγεται σε ένα συγκεκριμένο περιβάλλον καθορίζει την βιωσιμότητά του σε βάθος χρόνου (Orr, 2009; Papanikolaou et al., 2019). Τα ποσοστά γεννήσεων και θανάτων προσδιορίζουν την ευρωστία των εντόμων, επομένως γίνονται τα βασικά συστατικά τα οποία ρυθμίζουν την πιθανή αύξηση του πληθυσμού τους μέσω του χρόνου και του χώρου (Carey, 2001; Huey and Berrigan, 2001; Papanikolaou et al., 2014; Zeki et al., 2015). Η επιλογή της τροφής, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας, η θήρευση, οι ενδο-ειδικές αλληλεπιδράσεις και η εντομοκτόνος δράση είναι παράγοντες που μπορεί να επηρεάσουν τη φυσική κατάσταση των εντόμων (Gilchrist, 1995; Abrams, 2000; Hunter et al., 2010; Papanikolaou et al., 2013; Papachristos et al., 2013; Papachristos et al., 2015; Kalaitzaki et al., 2015; Papanikolaou et al., 2016; Kavallieratos et al., 2017). Η ανάλυση του πίνακα ζωής χρησιμεύει, με τη σειρά της, ως αποτελεσματικό εργαλείο προκειμένου να ομαδοποιηθούν τα ποσοστά γεννήσεων και θανάτων (Carey, 1993). Οι δημογραφικές παράμετροι που προκύπτουν επιτρέπουν τη διερεύνηση του ρυθμού αύξησης, της επιβίωσης και της αναπαραγωγής ενός πληθυσμού (Carey, 1993, 2001; Papanikolaou et al., 2019). Για παράδειγμα, η παράμετρος Malthusian, δηλαδή ο ενδογενής ρυθμός αύξησης, είναι μια κοινή δημογραφική παράμετρος η οποία εκτιμά την ευρωστία των εντόμων, καθώς αποκαλύπτει την ικανότητα του πληθυσμού να αυξάνεται σε ένα δεδομένο χρονικό διάστημα (Carey, 2001; Papanikolaou et al., 2014, 2019; Kavallieratos et al., 2019a) και αποτελεί βασικό συστατικό των πληθυσμιακών προτύπων (Gutierrez, 1996). Άλλες δημογραφικές παράμετροι, όπως ο χρόνος διπλασιασμού, ο καθαρός ρυθμός αναπαραγωγής και η μέση διάρκεια γενεάς είναι επίσης δείκτες της δυναμικής αύξησης του πληθυσμού των εντόμων, διευκρινίζοντας με αυτόν τον τρόπο τα στοιχεία της φυσικής κατάστασής τους (Carey, 1993; Papanikolaou et al., 2014, 2019; Kavallieratos et al., 2019a).

Πρόσφατα ευρήματα σχετικά με τη βιολογία και τη δημογραφία του *T. castaneum* αποκάλυψαν ότι οι βιοτικοί και αβιοτικοί παράγοντες είναι κρίσιμοι για την ανάπτυξη και την επιβίωση του *T. castaneum* (Rahimi Namin et al., 2018; Skourti et al., 2019, 2020). Για παράδειγμα, οι Rahimi Namin et al. (2018) διαπίστωσαν διαφορές στην ανάπτυξη των προνυμφών, τη διάρκεια ζωής των θηλυκών ή των αρσενικών ατόμων και τις μεταβλητές τιμές του ενδογενούς ή πεπερασμένου ρυθμού

αύξησης όταν το *T. castaneum* τρεφόταν με δέκα ποικιλίες κριθαριού. Η Skourti et al. (2019) ανέφερε ότι το κατώτερο και το ανώτερο θερμοκρασιακό όριο για τη συνολική περίοδο των ατελών σταδίων του *T. castaneum* ήταν 20,2 και 35,3 °C αντίστοιχα, ενώ ο μέγιστος ρυθμός ανάπτυξης του πληθυσμού και η επιβίωση του εντόμου παρατηρήθηκαν στους 31,2 και 27,4 °C αντίστοιχα. Μέσω της δημογραφίας, οι Skourti et al (2020) τεκμηρίωσαν την καταλληλότητα του σιμιγδαλιού ως ζωοτροφής για την ανάπτυξη του *T. castaneum* έναντι του σπασμένου σίτου και του σπασμένου αραβοσίτου το οποίο εμπόδιζε ελάχιστα την ανάπτυξή του.

Ακρογωνιαίος λίθος για τις περισσότερες μελέτες που ασχολούνται με τη διαχείριση των εντομολογικών εχθρών είναι η κατανόηση της σημασίας που έχει η καταστολή τους (π.χ. Kavallieratos et al., 2015; Athanassiou et al., 2015; Papanikolaou et al., 2018; Deligeorgidis et al., Boukouvala and Kavallieratos, 2020; Kavallieratos et al., 2020). Ωστόσο, η πλειονότητα των υφισταμένων μελετών επικεντρώνεται στην άμεση θνησιμότητα των εντόμων υπό την δράση των εντομοκτόνων επεμβάσεων. Πρόσφατα, οι Stark and Banks (2016) πρότειναν τη δημογραφία ως αποτελεσματικό εργαλείο για την ανάλυση δεδομένων άμεσης τοξικότητας προκειμένου να βελτιστοποιηθούν οι προσπάθειες για την πρόβλεψη της πορείας των πληθυσμών. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει τη διερεύνηση διαφόρων ζητημάτων, όπως οι έμμεσες επιδράσεις και οι χρονικά μεταβαλλόμενες δημογραφικές διεργασίες, οι οποίες μπορούν να παρέχουν χρήσιμες πληροφορίες για την αύξηση του πληθυσμού ενός είδους εντόμου, προβλέποντας την πιθανή χρονική αύξησή του.

Λαμβάνοντας υπ' όψιν τη σημασία του *T. castaneum* ως σοβαρό εχθρό των αποθηκευμένων προϊόντων και τις δυσκολίες, όπως αναφέρθηκε, που αντιμετωπίζονται όταν ακολουθούνται επεμβάσεις με εντομοκτόνα για τον έλεγχό του, πραγματοποιήθηκε η παρούσα μελέτη περί της διερεύνησης των πιθανών έμμεσων επιδράσεων του pirimiphos-methyl στο *T. castaneum*. Συγκεκριμένα, διερευνήθηκε η επίδραση που είχε στους απογόνους η έκθεση των μητρικών θηλυκών ατόμων στο pirimiphos-methyl κατόπιν της εφαρμογής του σε επιφάνεια σκυροδέματος, υιοθετώντας τη μέθοδο που προτείνεται από τους Stark και Banks (2016) σε συνδυασμό με την ανάλυση επιβίωσης των απογόνων. Η επισκόπηση της διεθνούς βιβλιογραφίας έδειξε ότι η παρούσα μελέτη είναι η πρώτη η οποία υιοθετεί την δημογραφική προσέγγιση για τη διερεύνηση των επιπτώσεων της εφαρμογής εντομοκτόνου στην βιωσιμότητα των απογόνων.

2.4.2 Υλικά και μέθοδοι

2.4.2.α Τα έντομα

Τα άτομα *Tribolium castaneum* εξετράφησαν σε γυάλινα βάζα 1 L (εικ. 2.1) στο Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών, σε αλεύρι λευκού μαλακού σίτου (μείγμα ποικιλιών, αποτελούμενο από το ενδοσπέρμιο μόνον) στους 30 °C, 65% σχετική υγρασία (RH) και υπό συνεχές σκότος. Ο αρχικός πληθυσμός του εντόμου συλλέχθηκε από ελληνική αποθήκη στην νότιο Ελλάδα το 2003.

2.4.2.β Εντομοκτόνο και τροφή

Στα πειράματα χρησιμοποιήθηκε το εγκεκριμένο εντομοκτόνο σκεύασμα Actellic EC το οποίο περιέχει 50% pirimiphos-methyl (a.i.) (Syngenta, Anthousa, Ελλάς). Στις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε προ-κοσκινισμένο λευκό αλεύρι μαλακού σίτου (μείγμα ποικιλιών, αποτελούμενο από το ενδοσπέρμιο μόνον), το οποίο δεν είχε υποβληθεί σε εντομοκτόνες επεμβάσεις. Σύμφωνα με την ετικέτα, το αλεύρι είχε τα ακόλουθα θρεπτικά συστατικά ανά 100 g: 72,6 g υδατάνθρακες, 10,3 g πρωτεΐνες, 1,6 g φυτικές ίνες, 1,1 g λίπος και 0,05 g αλάτι. Πριν από την πειραματική διαδικασία, η περιεκτικότητα του αλεύρου σε υγρασία ρυθμίστηκε στο $13,5 \pm 0,5\%$, όπως προσδιορίστηκε από βαθμονομημένο υγρασιόμετρο (mini GAC plus, Dickey-John Europe S.A.S., Colombes, Γαλλία). Με βάση την αρχική περιεκτικότητά του αλεύρου σε υγρασία, είτε πραγματοποιήθηκε αποξήρανση σε φούρνο στους 50 °C (εικ. 2.3) είτε προσετέθη απεσταγμένο ύδωρ (Skourti et al. 2019).

2.4.2.γ Βιοδοκιμές

Το εντομοκτόνο δοκιμάστηκε στην συνιστώμενη δόση για επιφάνειες (0,05 mg a.i./cm²). Για το σκοπό αυτό, χρησιμοποιήθηκαν τρυβλία Petri (διάμετρος 8 cm επί 1,5 cm ύψος, επιφάνεια 50,27 cm²). Είκοσι τέσσερις ώρες πριν από τα πειράματα, οι πυθμένες επτά τρυβλίων καλύφθηκαν με σκυρόδεμα CEM I 52,5 N (Durostick, Ασπρόπυργος, Ελλάς) (εικ. 2.19 και 2.20). Προκειμένου να αποτραπεί η απόδραση των εκτεθέντων ατόμων από τα τρυβλία, τα εσωτερικά κατακόρυφα μέρη τους καλύφθηκαν με πολυτετραφθοροαιθυλένιο (60% κ.β. διάλυμα σε ύδωρ) (Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Taufkirchen, Γερμανία). Η επιφάνεια καθ' ενός από τα έξι τρυβλία ψεκάστηκε με 1 ml υδατικού διαλύματος (Εικ. 2.21 έως 2.23 και 2.28 έως 2.30), υπό μορφή νέφους, το οποίο περιείχε τον κατάλληλο όγκο της a.i. που

αντιστοιχεί στην συνιστώμενη δόση (εικ. 2.18). Ο ψεκασμός πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τον αερογράφο AG-4 (Mecafer S.A., Valence, Γαλλία). Ένα τρυβλίο χρησίμευσε ως μάρτυρας αφού ψεκάστηκε με απεσταγμένο ύδωρ χρησιμοποιώντας αερογράφο ιδίου τύπου, με αποκλειστική χρήση για τους ψεκασμούς των μαρτύρων (εικ. 2.24).

Στη συνέχεια, 700 θηλυκά τέλεια άτομα *T. castaneum*, ηλικίας 7 ημερών, ελήφθησαν από την εκτροφή και απελευθερώθηκαν ανά 100 σε κάθε τρυβλίο για 0 (μάρτυρας), 1, 3, 8, 16, 24 και 72 ώρες (εικ. 2.25). Ο προσδιορισμός του φύλου βασίστηκε στους μορφολογικούς χαρακτήρες που παρέχει ο Halstead (1963). Στη συνέχεια, μεταφέρθηκαν σε 1 L γυάλινα βάζα τα οποία περιείχαν 500 ml αλεύρι λευκού μαλακού σίτου για 24 ώρες στους 30 °C, 65% RH υπό συνεχές σκότος. Κατόπιν, τα τέλεια άτομα και τα ωά αφαιρέθηκαν από το αλεύρι με No 20 (0,85 mm οπές) και No 60 (0,25 mm οπές) US standard testing sieves (Advantech Manufacturing, Inc., New Berlin, WI). Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά κόσκινα ανά επέμβαση (εικ. 17). Τα ωά αφέθηκαν με λεπτό πινέλο, ξεχωριστά και πολύ προσεκτικά, σε τρυβλία (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, Λονδίνο, UK) των οποίων οι πυθμένες είχαν καλυφθεί με σκυρόδεμα όπως προαναφέρθηκε, χωρίς να περιέχουν αλεύρι. Τα καπάκια των τρυβλίων έφεραν κυκλικό άνοιγμα διαμέτρου 1,50 cm το οποίο καλύπτονταν με γάζα μουσελίνας ώστε να επιτρέπεται ο αερισμός στο εσωτερικό τους (εικ. 2.4 και 2.5). Χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά πινέλα ανά επέμβαση. Τα τρυβλία τοποθετήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους 32,5 °C, 65% RH υπό συνεχές σκότος (εικ. 2.9, 2.10, 2.14, 2.15 και 2.16) και παρακολουθούνταν καθημερινά για μια περίοδο 7 ημερών από τη γέννησή τους στο στερεομικροσκόπιο SZX9 Olympus (ολική μεγέθυνση 57x) (Bacacos S.A., Αθήνα, Ελλάς) για τις εμφανίσεις των προνυμφών (εικ. 2.11). Συνολικά, 80 ωά χρησιμοποιήθηκαν στον μάρτυρα, ενώ 150 ωά χρησιμοποιήθηκαν ανά εντομοκτόνο επέμβαση ώστε να επιτευχθεί η ανάπτυξη και η επιβίωση από το ωό στο τέλειο άτομο. Ο μεγαλύτερος αριθμός των ωών που χρησιμοποιήθηκαν στις εντομοκτόνες επεμβάσεις σε σχέση με τον μάρτυρα, οφείλετο στις υψηλότερες πιθανότητες θνησιμότητας. Οι νεοεκκολαφθείσες προνύμφες *T. castaneum* μεταφέρθηκαν πολύ προσεκτικά με λεπτό πινέλο (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, Λονδίνο, UK) και τοποθετήθηκαν ξεχωριστά σε τρυβλία που ήταν καλυμμένα με σκυρόδεμα, όπως περιγράφεται παραπάνω. Το κάθε τρυβλίο περιείχε 5 g λευκό μαλακό αλεύρι σίτου. Όπως προαναφέρθηκε, τα καπάκια έφεραν ανοίγματα για επαρκή αερισμό. Για κάθε επέμβαση χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικά πινέλα. Τα τρυβλία με τις προνύμφες

μεταφέρθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους 30 °C, 65% RH υπό συνεχές σκότος για όλη την πειραματική περίοδο. Η επιβίωση των προνυμφών και των νυμφών καταγράφονταν καθημερινά. Οι προνύμφες οι οποίες δεν κινούνταν, ήταν αφυδατωμένες ή το χρώμα τους ήταν καστανό θεωρήθηκαν νεκρές (Skourti et al., 2020) (εικ. 2.16). Μόλις τα έντομα έφθαναν στο στάδιο του τελείου ατόμου, τοποθετούνταν ανά ζεύγη σε τρυβλία. Η γονιμότητα των θηλυκών εξετάστηκε με τον υπολογισμό του αριθμού των ωών ανά θηλυκό άτομο κάθε 24 ώρες για μια περίοδο 161 ημερών από τη γέννησή τους.

2.4.3 Ανάλυση δεδομένων

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα για την ανάπτυξη, την επιβίωση, τη γονιμότητα και τη διάρκεια ζωής του *T. castaneum*, υπολογίστηκαν οι ακόλουθες παράμετροι ακολουθώντας τη μέθοδο του Carey (1993, 2001): ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός $R_0 = \sum (l_x \times m_x)$, όπου το l_x υποδηλώνει την επιβίωση για την ηλικία και το m_x την ειδική για την ηλικία γονιμότητα, δηλαδή το κατά κεφαλήν ρυθμό παραγωγής απογόνων σε διάστημα ίσο με το διάστημα μελέτης της μελέτης σειράς. Ο ενδογενής ρυθμός αύξησης (r_m) $\sum (e^{r_m \times x} \times l_x \times m_x) = 1$, δηλαδή ο ρυθμός της φυσικής αύξησης σε έναν κλειστό πληθυσμό (υπόκειται σε σταθερά βήματα γονιμότητας και θνησιμότητας ανάλογα με την ηλικία για μεγάλο χρονικό διάστημα). Ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης $\lambda = e^{r_m}$, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται ο πληθυσμός σε κάθε χρονικό βήμα. Η μέση διάρκεια γενεάς $T = \frac{\ln R_0}{r_m}$, δηλαδή ο χρόνος ο οποίος απαιτείται για να αυξηθεί ο πληθυσμός κατά συντελεστή ίσο με τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό και ο χρόνος διπλασιασμού $DT = \frac{\ln 2}{r_m}$, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να διπλασιαστεί ο πληθυσμός.

Οι σημαντικές διαφορές μεταξύ των παραμέτρων στον πίνακα ζωής σε καθεμία από τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες δοκιμάστηκαν σε διαστήματα εμπιστοσύνης 95% (δοκιμή Wald), τα οποία προέκυψαν με bootstrapping σε λογισμικό R (R Core Team 2020). Τα δεδομένα της γονιμότητας αναλύθηκαν χρησιμοποιώντας το κριτήριο των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95%.

Η μέθοδος Kaplan-Meier (Kaplan and Meier, 1958) χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των καμπυλών επιβίωσης στο σύνολο των ατελών σταδίων και των θηλυκών ατόμων για κάθε μία από τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες. Καθώς η δοκιμή log rank έδειξε ότι οι καμπύλες επιβίωσης διέφεραν σημαντικά, χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή Holm-Sidak ώστε να προσδιοριστεί ποια ζεύγη καμπυλών διέφεραν σημαντικά. Η εκτίμηση Kaplan-Meier χρησιμοποιήθηκε ώστε να υπολογιστούν οι μέσοι χρόνοι επιβίωσης και τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95%. Όλες οι αναλύσεις επιβίωσης διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας το SigmaPlot 14.0 (Systat Software, 2017).

2.4.4 Αποτελέσματα

Οι υπολογισθείσες δημογραφικές παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.4.1. Οι τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού, του ενδογενούς ρυθμού αύξησης, του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης, της μέσης διάρκειας γενεάς και του χρόνου διπλασιασμού του μάρτυρα ήταν 6,3 θήλεα/θήλυ, 0,029 θήλεα/θήλυ/ημέρα, 1,029, 63,6 ημέρες και 24,1 ημέρες, αντίστοιχα. Όταν η έκθεση των μητρικών ατόμων στο pirimiphos-methyl ήταν 1 και 3 ώρες, οι αντίστοιχες τιμές ήταν 4,1 και 4,3 θήλεα/θήλυ, 0,021 και 0,023 θήλεα/θήλυ/ημέρα, 1,021 και 1,023, 66,9 και 63,3 ημέρες, και 63,0 ημέρες, αντίστοιχα, τιμές οι οποίες δεν διέφεραν σημαντικά σε σύγκριση με τις τιμές του μάρτυρα, με βάση το κριτήριο των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95%. Αυξάνοντας την έκθεση των μητρικών ατόμων στο pirimiphos-methyl, καταγράφηκε επιζήμια επίδραση στη φυσική κατάσταση των απογόνων σύμφωνα με τις τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού, του ενδογενούς και πεπερασμένου ρυθμού αύξησης, καθώς και του χρόνου διπλασιασμού. Οι χαμηλότερες τιμές αυτών των παραμέτρων παρατηρήθηκαν σε χρόνο έκθεσης 72 ωρών, με βάση το κριτήριο των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95%. Οι τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού, του ενδογενούς ρυθμού αύξησης, του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης και του χρόνου διπλασιασμού ήταν 0,97 θήλεα/θήλυ, 0,001 θήλεα/θήλυ /ημέρα, 1,000 και -244,8 ημέρες, αντίστοιχα, όταν ο χρόνος έκθεσης των τελείων θηλυκών ατόμων στο pirimiphos-methyl ήταν 72 ώρες. Αντίθετα, η μέση διάρκεια γενεάς δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ του μάρτυρα και όλων των επεμβάσεων με το εντομοκτόνο.

Η ανάλυση επιβίωσης έδειξε ότι η διάρκεια έκθεσης στο pirimiphos-methyl επηρέασε την πιθανότητα επιβίωσης μεταξύ των επεμβάσεων ($W = 40,048$, $df = 6$, $P < 0,001$, Διάγραμμα. 2.4.1). Επιπλέον, η έκθεση των μητρικών θηλυκών ατόμων στο pirimiphos-methyl επηρέασε σημαντικά τη μέση διάρκεια επιβίωσης και τη γονιμότητα των απογόνων (Πίνακας 2.4.2). Η μέση διάρκεια επιβίωσης ήταν χαμηλότερη στις 16, 24 και 72 ώρες έκθεσης (54,6, 55,3 και 42,3 ημέρες, αντίστοιχα) σε σύγκριση με αυτή του μάρτυρα (76,1 ημέρες). Η μέση γονιμότητα δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ του μάρτυρα (17,0 θήλεα/θήλυ) και της έκθεσης των απογόνων για 1 και 3 ώρες στο pirimiphos-methyl (12,6 και 12,2 θήλεα/θήλυ, αντίστοιχα). Ωστόσο, όταν η έκθεση των απογόνων ήταν 8, 16, 24 και 72 ώρες, η γονιμότητα των θηλυκών ήταν σημαντικά χαμηλότερη (8,3, 6,9, 4,5 και 4,8 θήλεα/θήλυ, αντίστοιχα) σε σύγκριση με τον μάρτυρα.

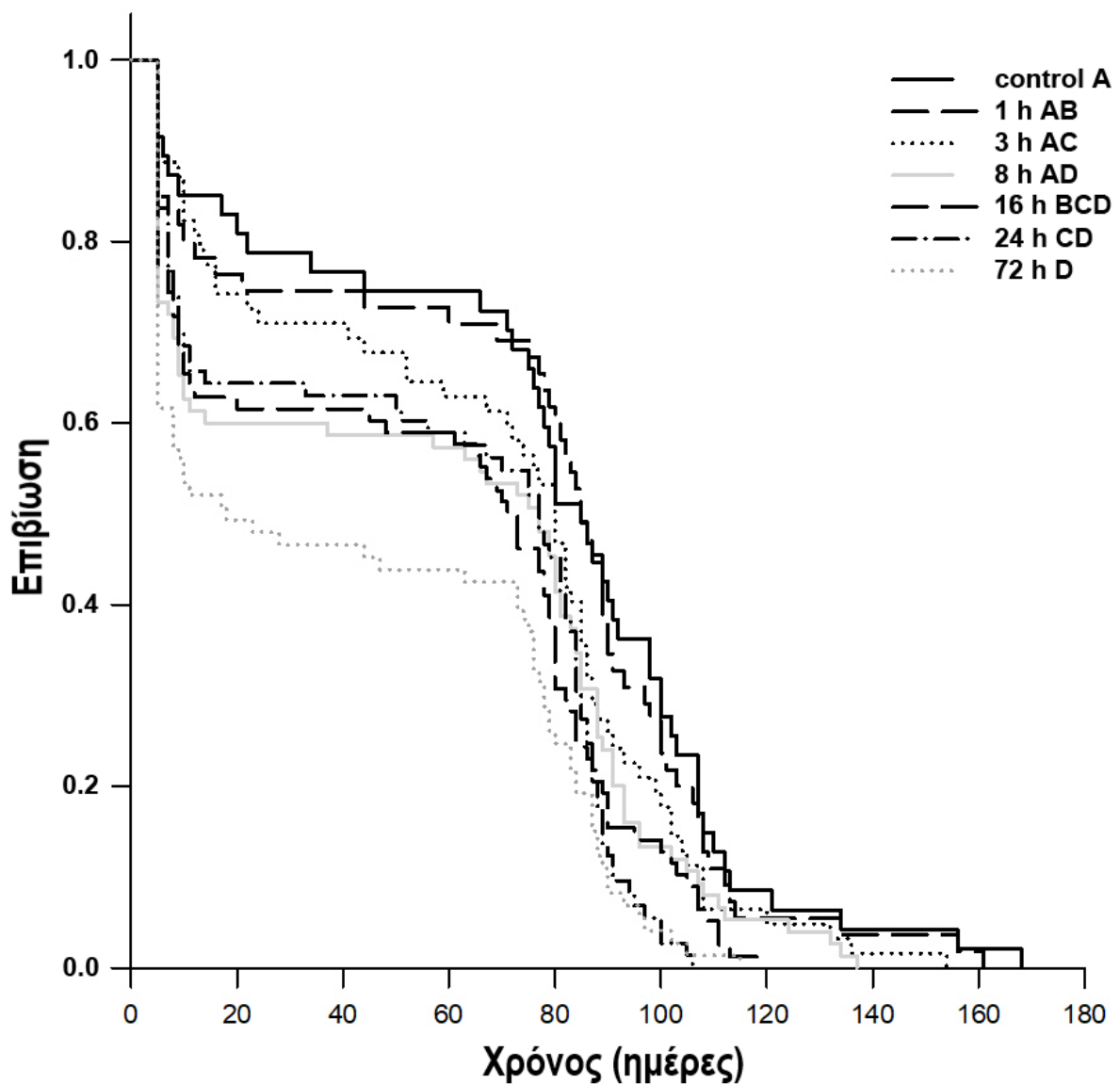
Πίνακας 2.4.1. Τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού (R_0), του ενδογενούς ρυθμού αύξησης (r_m), του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης (λ), της μέσης διάρκειας γενεάς (T) και του χρόνου διπλασιασμού (DT) του *T. castaneum* (μέσοι όροι, 95% διάστημα εμπιστοσύνης (CI)) σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης των μητρικών θηλυκών ατόμων στο pirimiphos-methyl

Έκθεση (ώρες)	Καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός (θήλεα/θήλυ) $R_0 = \sum (l_x \times m_x)$		Ενδογενής ρυθμός αύξησης (θήλεα/θήλυ /ημέρα) $\sum (e^{r_m \times x} \times l_x \times m_x) = 1$		Πεπερασμένος ρυθμός αύξησης $\lambda = e^{r_m}$		Μέση διάρκεια γενεάς (ημέρες) $T = \frac{\ln R_0}{r_m}$		Χρόνος διπλασιασμού (ημέρες) $DT = \frac{\ln 2}{r_m}$	
	M.O.	95% C.I.	M.O.	95% C.I.	M.O.	95% C.I.	M.O.	95% C.I.	M.O.	95% C.I.
0	6,3	4,8 – 8,1	0,029	0,024 – 0,033	1,029	1,024 – 1,034	63,6	61,7 – 66,0	24,1	20,9 – 28,8
1	4,1	3,0 – 5,4	0,021	0,017 – 0,025	1,021	1,017 – 1,026	66,9	62,7 – 71,7	33,2	27,4 – 42,0
3	4,3	3,3 – 5,4	0,023	0,019 – 0,027	1,023	1,019 – 1,003	63,0	60,5 – 65,5	30,3	26,1 – 36,1
8	2,5	1,8 – 3,3	0,012	0,008 – 0,016	1,012	1,008 – 1,016	74,6	69,8 – 80,3	58,5	42,8 – 89,6
16	2,1	1,5 – 2,8	0,012	0,006 – 0,016	1,012	1,006 – 1,016	63,7	62,1 – 65,4	63,5	42,5 – 110,7
24	1,4	1,0 – 1,7	0,005	$-3,0 \times 10^{-7} - 8,5 \times 10^{-3}$	1,005	1,000 – 1,009	64,2	59,3 – 70,5	506,0	57,8 – 1,031,4
72	0,97	0,62 – 1,4	0,001	-0,006 – 0,005	1,000	0,993 – 1,005	68,5	65,8 – 71,4	-244,8	-5,374,1 – 4,311,9

Πίνακας 2.4.2. Μέσος χρόνος επιβίωσης και γονιμότητας (95% διάστημα εμπιστοσύνης (C.I.)) του *T. castaneum* σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης των μητρικών θηλυκών στο pirimiphos-methyl

Έκθεση (ώρες)	Διάρκεια επιβίωσης (ημέρες)	95% C.I.	Γονιμότητα (θήλεα/θήλυ)	95% C.I.
0	76,1 ^A	64,2 – 88,0	17,0 A	11,7 – 22,3
1	72,6 ^{AB}	61,4 – 83,9	12,6 AB	9,3 – 15,9
3	65,5 ^{AB}	55,5 – 75,5	12,2 AB	9,0 – 15,4
8	56,1 ^{ABC}	46,3 – 66,0	8,3 BC	4,8 – 11,7
16	54,6 ^{BC}	45,7 – 63,5	6,9 BC	4,4 – 9,5
24	55,3 ^{BC}	46,7 – 64,0	4,5 C	2,7 – 6,3
72	42,3 ^C	33,3 – 51,2	4,8 C	2,4 – 7,1

Οι μέσοι όροι των στηλών που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά



Διάγραμμα 2.4.1. Καμπύλη επιβίωσης των απογόνων *T. castaneum* σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης των μητρικών ατόμων σε σκυρόδεμα στο οποίο είχε εφαρμοστεί pirimiphos-methyl. Οι καμπύλες επιβίωσης των επεμβάσεων που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά.

2.4.5 Συζήτηση

Η συνολική γνώση σχετικά με τις επιδράσεις του pirimiphos-methyl επί του *T. castaneum* είναι περιορισμένη στις άμεσες επιδράσεις του εντομοκτόνου ως προστατευτικό σπόρων ή επιφανειών. Για παράδειγμα, οι Thomas et al. (1987) ανακάλυψαν ότι όλα τα τέλεια άτομα *T. castaneum* ενός ευαίσθητου βιοτύπου του εντόμου πέθαναν εντός 2 ημερών από την έκθεσή τους σε σιτάρι το οποίο είχε εφαρμοστεί το pirimiphos-methyl στα 4,2 mg σκευάσματος/kg για μια περίοδο 36 εβδομάδων. Παρομοίως, οι Huang και Subramanyam (2005) έδειξαν ότι τα 4, 6 και 8 mg pirimiphos-methyl/kg σίτου σκότωσαν όλα τα άτομα *T. castaneum* 7 ημέρες μετά την έκθεσή τους, ενώ δεν καταγράφηκε παραγωγή απογόνων μετά από 49 ημέρες. Ακολουθώντας διαφορετικά σενάρια διαστήματος έκθεσης, οι Lagisz et al. (2010) υπέθεσαν ότι το pirimiphos-methyl ήταν αποτελεσματικό, κατόπιν επέμβασης σε πλαστικές επιφάνειες σε δόση 0,0047 g/m², έναντι των τελείων ατόμων *T. castaneum*. Αργότερα, οι Mujeeb και Shakoori (2012) διαπίστωσαν ότι το υψηλό επίπεδο αναστολής των εστερασών, που προκλήθηκε σε προνύμφες τετάρτου σταδίου ενός βιοτύπου από το Πακιστάν όταν το pirimiphos-methyl εφαρμόστηκε σε τρυβλία, συνδέεται με τον ευκολότερο έλεγχο του σταδίου σε σύγκριση με τις προνύμφες έκτου σταδίου ή των τελείων ατόμων. Επιπροσθέτως, η παρουσία αλεύρου μείωσε την τοξικότητα του pirimiphos-methyl, κατόπιν της εφαρμογής του εντομοκτόνου στην μάζα του αλεύρου ή στην επιφάνεια του τρυβλίου, σε σύγκριση με την απουσία αλεύρου, 24 ή 48 ώρες μετά την έκθεση των τελείων ατόμων *T. castaneum* (Velki et al., 2014).

Η παρούσα μελέτη αποκάλυψε ότι ο χρόνος έκθεσης των τελείων θηλυκών ατόμων *T. castaneum* στο pirimiphos-methyl επηρεάζει την ικανότητα της παραγωγής των απογόνων τους. Σύμφωνα με τις τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού αύξησης, του ενδογενούς ρυθμού αύξησης και του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης, αναμένεται ότι η έκθεση των μητρικών τελείων ατόμων στο pirimiphos-methyl επί 8 ώρες ή περισσότερο θα έχει επιζήμια επίδραση στην ευρωστία των απογόνων τους. Σε χρόνους έκθεσης 24 και 72 ωρών, ο πληθυσμός των απογόνων μπορεί να μειωθεί καθώς τα διαστήματα εμπιστοσύνης (95%) περιλαμβάνουν αρνητικές τιμές της παραμέτρου του ενδογενούς ρυθμού αύξησης. Αυτές οι παράμετροι προκύπτουν από το συνδυασμό της επιβίωσης και της αναπαραγωγής της μελέτης σειράς των εντόμων. Οι σημαντικά χαμηλότερες τιμές που καταγράφηκαν, σε σύγκριση με τον μάρτυρα, του ενδογενούς ρυθμού αύξησης

και του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης των απογόνων, όταν τα μητρικά άτομα εξετέθησαν στο pirimiphos-methyl για 8 ώρες ή περισσότερο, δείχνουν ότι η δυνατότητα εξάπλωσής τους μειώνεται δραματικά. Αυτό είναι ένα σημαντικό εύρημα, καθώς υπό πραγματικές συνθήκες, τα έντομα μπορούν να παραμείνουν μόνο για μικρά διαστήματα στις επιφάνειες που έχουν υποστεί επεξεργασία (Arthur and Fontenot, 2012). Ωστόσο, ο χρόνος έκθεσης δεν θα πρέπει να είναι μικρότερος από 8 ώρες συνεχούς επαφής σε επιφάνεια σκυροδέματος στην οποία έχει εφαρμοστεί το pirimiphos-methyl. Έτσι, καθίσταται προφανές ότι η γνώση των δημογραφικών παραμέτρων είναι πολύτιμη αφού καθορίζουν την αύξηση του πληθυσμού των εντόμων (Carey, 2001; Papanikolaou et al., 2014; Zeki et al., 2015; Skourti et al., 2020). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της μελέτης, τόσο η επιβίωση όσο και η αναπαραγωγή επηρεάζονται αρνητικά όταν η έκθεση των μητρικών ατόμων στο pirimiphos-methyl είναι 8 ώρες ή περισσότερο. Ωστόσο, η επέμβαση με εντομοκτόνα στα μητρικά άτομα δεν επηρέασε τον μέσο χρόνο δημιουργίας των απογόνων. Αυτή η παράμετρος αντικατοπτρίζει τον μέσο χρόνο αύξησης ενός πληθυσμού κατά παράγοντα ίσο με τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό (Borges et al., 2013) και επομένως, είναι εφικτό να μην διαφέρει μεταξύ των επεμβάσεων.

Οι Skourti et al. (2019) διαπίστωσαν ότι οι 30 °C μειώνουν την επιβίωση των ωών του *T. castaneum* σε σύγκριση με τους 20, 25, 32,5 ή 35 °C, καταλήγοντας στο συμπέρασμα ότι τα εντομοκτόνα θα είχαν καλή απόδοση σε αυτό το επίπεδο θερμοκρασίας. Επίσης, οι Skourti et al. (2020) υπέθεσαν ότι το σπασμένο σιτάρι δεν ευνόησε την αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum* καθώς εμφάνισε αρνητική τιμή στον ενδογενή ρυθμό αύξησης ($- 0,021$ θήλεα/θήλυ/ημέρα, τείνοντας προς το 0), ενώ η τιμή του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης ήταν 0,979, τείνοντας προς στο 1. Επομένως, ο συνδυασμός της εφαρμογής του pirimiphos-methyl σε επιφάνειες, η ρύθμιση της θερμοκρασίας και η επιλογή των κατάλληλων προϊόντων στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης θα μπορούσε να μειώσει τις συνεχείς εντομοκτόνες εφαρμογές και να δράσει περαιτέρω προς τη βελτιστοποίηση των στρατηγικών διαχείρισης κατά του *T. castaneum*. Απαιτείται περαιτέρω πειραματισμός επί του ζητήματος.

Οι επεμβάσεις με εντομοκτόνα είναι συνήθεις πρακτικές κατά των εντομολογικών εχθρών, συνεπώς αποτελούν σημαντικό θέμα έρευνας (π.χ. Kalaitzaki et al., 2015; Kavallieratos et al., 2015a; Athanassiou et al., 2018; Papanikolaou et al., 2018). Για τη εκτίμηση της πιθανής αποτελεσματικότητας των

εντομοκτόνων έναντι των εχθρών των αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων, οι μελέτες επικεντρώνονται συνήθως στην εκτίμηση της άμεσης ή της καθυστερημένης θνησιμότητας επί του εκτεθέντος πληθυσμού των εντόμων (π.χ. Athanassiou et al., 2015; Kavallieratos et al., 2015b; Arthur, 2018; Arthur et al., 2018; Kavallieratos et al., 2019b; Kavallieratos and Boukouvala, 2019) ή/και την αριθμητική αξιολόγηση της παραγωγής των απογόνων τους (Arthur, 1999; Vardeman et al., 2006; Wijayarathne et al. 2012, Kavallieratos et al. 2015a, Arthur and Morrison 2020). Η προσέγγιση της παρούσας μελέτης επιτρέπει την βαθύτερη έρευνα σχετικά με τις έμμεσες επιδράσεις του pirimiphos-methyl στην ικανότητα παραγωγής των απογόνων, εκτιμώντας τα ποσοστά των γεννήσεων και των θανάτων. Παρά το γεγονός ότι η συλλογή των δεδομένων είναι χρονοβόρα (Stark and Banks, 2016), η προτεινόμενη δημογραφική προσέγγιση είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάδειξη της αποτελεσματικότητας των εντομοκτόνων λαμβάνοντας υπ' όψιν την συνολική εξέλιξη του πληθυσμού (Stark and Banks, 2016).

Αξίζει να σημειωθεί ότι η ανάλυση του πίνακα ζωής βασίζεται στις υποθέσεις ότι ο πληθυσμός της μελέτης είναι κλειστός, χαρακτηρίζεται από σταθερά ποσοστά γεννήσεων και θανάτων (δηλαδή δεν υπάρχει μετανάστευση) και παρουσιάζει εκθετική αύξηση (Carey, 1993, Papanikolaou et al., 2014, Stark and Banks, 2016). Τούτες οι συνθήκες είναι σπάνιες στη φύση καθώς η περιβαλλοντική στοχαστικότητα οδηγεί σε πληθυσμιακές διακυμάνσεις (Papanikolaou et al., 2014). Ωστόσο, οι δημογραφικές παράμετροι που προέκυψαν είναι ενδεικτικές της επίδρασης του pirimiphos-methyl στην πιθανή αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum*, επιτρέποντας την συγκριτική περιγραφή της καταλληλότητάς του υπό διαφορετικές επεμβάσεις. Η έκθεση γονέων εντόμων αποθηκών στο pirimiphos-methyl επηρεάζει επίσης τη μορφολογία των τελείων απογόνων τους. Για παράδειγμα, για το *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae), οι Lazarević et al. (2019) διαπίστωσαν ότι τόσο τα έλυτρα όσο και τα οπίσθιες πτέρυγες των θηλυκών απογόνων, που προέρχονται από τέλεια θηλυκά άτομα τα οποία είχαν εκτεθεί > 5 ώρες σε σκυρόδεμα ψεκασμένο με pirimiphos-methyl, παρουσίασαν παραμορφώσεις σε σύγκριση με τον μάρτυρα. Σε αντίθεση με το *T. granarium*, το *T. castaneum* είναι ιπτάμενο έντομο (Hill, 2003, Perez Mendoza et al., 2011) και χρησιμοποιεί τόσο το βάδην όσο και την πτήση προκειμένου να αποικίσει τις πηγές της τροφής του (Perez Mendoza et al., 2011). Το κατά πόσον παρόμοιες παραμορφώσεις, με αυτές που τεκμηριώθηκαν για το *T. granarium*, υφίστανται στην περίπτωση του *T. castaneum*

και εάν αναχαιτίζουν την πτητική δραστηριότητά του αποτελούν ζητήματα τα οποία χρήζουν περαιτέρω έρευνα.

Συμπερασματικώς, στην παρούσα μελέτη δοκιμάστηκε η υπόθεση ότι η γονική έκθεση στο pirimiphos-methyl επηρεάζει την απόδοση των απογόνων του *T. castaneum* χρησιμοποιώντας δημογραφική προσέγγιση. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για την εκτίμηση χρονικώς μεταβαλλόμενων διαδικασιών, όπως η επιβίωση και η αναπαραγωγή των εντόμων. Επιπλέον, η δημογραφική ανάλυση η οποία ακολουθήθηκε επέτρεψε τον υπολογισμό των διαφόρων παραμέτρων του πίνακα ζωής του εντόμου προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή αύξηση του πληθυσμού του υπό την εφαρμογή του pirimiphos-methyl. Ακόμα κι αν το εντομοκτόνο δεν θανατώσει τον εκτεθέντα γονικό πληθυσμό του *T. castaneum* ως συνέπεια της άμεσης θνησιμότητας, ή αργότερα λόγω της καθυστερημένης θνησιμότητας (Lagisz et al., 2010), φάνηκε ότι η παραγωγή των απογόνων του εντόμου θα έχει υποστεί επιβλαβείς επιπτώσεις οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην κατάρρευση των αποικιών του. Αναμένεται ότι μελλοντικές μελέτες θα διερευνήσουν τις έμμεσες επιδράσεις των εντομοκτόνων επί των εντόμων εχθρών των αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων, προκειμένου να συγκεντρωθούν περισσότερες πληροφορίες ως προς την αποτελεσματικότητά τους και την καλύτερη κατανόηση της τοξικότητάς τους.

2.4.6 Βιβλιογραφία

- Lagisz, M., Wolff, K., Port, G., (2010). Time matters: delayed toxicity of pirimiphos-methyl on *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) and its effects on efficacy estimation of residual treatments. *J Stored Prod Res* 46:161–165.
- Abrams PA (2000). The evolution of predator-prey interactions. *Annu Rev Ecol Syst* 31:79–105
- Adamski Z, Bufo SA, Chowański S, Falabella P, Lubawy J, Marciniak P, Pacholska Bogalska J, Salvia R, Scrano L, Słocińska M, Spochacz M, Szymczak M, Urbański A, Wałkowiak Nowicka K, Rosiński G (2019). Beetles as model organisms in physiological, biomedical and environmental sciences - a review. *Front Physiol* 10:319
- Aitken AD (1975). Insect travelers. I: Coleoptera. Technical Bulletin 31, HMSO, London
- Arthur FH (1998a). Residual toxicity of cyfluthrin wettable powder against *Tribolium confusum* exposed for short time intervals on treated concrete. *J Stored Prod Res* 34:19–25
- Arthur FH (1998b). Residual studies with cyfluthrin wettable powder: toxicity towards red flour beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) exposed for short time intervals on treated concrete. *J Econ Entomol* 91:309–319
- Arthur FH (1999). Knockdown, mortality, and progeny production of lesser grain borers (Coleoptera: Bostrichidae) and rice weevils (Coleoptera: Curculionidae) exposed for short intervals on wheat treated with cyfluthrin. *J Econ Entomol* 92:1198–1205
- Arthur FH (2008). Efficacy of chlorfenapyr against *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae) adults exposed on concrete, vinyltile, and plywood surfaces. *J Stored Prod Res* 44:145–151
- Arthur FH (2018). Residual efficacy of deltamethrin as assessed by rapidity of knockdown of *Tribolium castaneum* on a treated surface: temperature and seasonal effects in field and laboratory settings. *J Stored Prod Res* 76:151–160
- Arthur FH, Fontenot EA (2012). Food source provisioning and susceptibility of immature and adult *Tribolium castaneum* on concrete partially treated with chlorfenapyr (Phantom®). *J Pest Sci* 85:277–282

- Arthur FH, Morrison WR III (2020) Methodology for assessing progeny production and grain damage on commodities treated with insecticides. *Agronomy* 10:804
- Arthur FH, Ghimire MN, Myers SW, Phillips TW (2018) Evaluation of pyrethroid insecticides and insect growth regulators applied to different surfaces for control of *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae) the Khapra beetle. *J Econ Entomol* 111: 612–619
- Athanassiou CG, Kavallieratos NG, Boukouvala MC, Mavroforos ME, Kontodimas DC (2015). Efficacy of alpha-cypermethrin and thiamethoxam against *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) and *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae) on concrete. *J Stored Prod Res* 62:101–107
- Athanassiou CG, Kavallieratos NG, Benelli G, Losic D, Usha Rani P, Desneux N (2018). Nanoparticles for pest control: current status and future perspectives. *J Pest Sci* 91:1–15
- Borges I, Hemptinne JL, Soares AO (2013). Contrasting population growth parameters of the aphidophagous *Scymnus nubilus* and the coccidophagous *Nephus reunioni*. *BioControl* 58:351–357
- Boukouvala MC, Kavallieratos NG (2020). Effect of six insecticides on egg hatching and larval mortality of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae). *Insects* 11:263
- Brown SJ, Shippy TD, Miller S, Bolognesi R, Beeman RW, Lorenzen MD, Bucher G, Wimmer EA, Klinger M (2009). The red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Coleoptera): a model for studies of development and pest biology. *Cold Spring Harb Protoc.*
- Carey JR (1993). *Applied demography for biologists with special emphasis on insects.* Oxford University Press, New York
- Carey JR (2001). Insect biodemography. *Annu Rev Entomol* 46:79–110
- Deligeorgidis NP, Kavallieratos NG, Malesios C, Sidiropoulos G, Deligeorgidis PN, Benelli G, Papanikolaou NE (2019). Evaluation of combined treatment with mineral oil, fenoxycarb and chlorpyrifos against *Cydia pomonella*, *Phyllonorycter blancardella* and *Synanthedon myopaeformis* in apple orchards. *Entomol Gen* 39: 117–126

- Denell R (2008). Establishment of *Tribolium* as a genetic model system and its early contributions to evo-devo. *Genetics* 180:1779–1786
- Gilchrist GW (1995). Specialists and generalists in changing environments: 1. Fitness landscapes of thermal sensitivity. *Am Nat* 146: 252–270
- Gutierrez AP (1996). *Applied population ecology: a supply-demand approach*. Wiley, New York
- Halstead DG (1963). External sex differences in stored-products Coleoptera. *Bull Entomol Res* 54:119–134
- Hagstrum DW, Klejdysz T, Subramanyam B, Nawrot J (2013). *Atlas of stored-product insects and mites*. AACC International, St Paul
- Hill DS (2003). *Pests of storage foodstuffs and their control*. Kluwer Academic Publishers, New York
- Huang F, Subramanyam B (2005). Management of five stored-product insects in wheat with pirimiphos-methyl and pirimiphos-methyl plus synergized pyrethrins. *Pest Manag Sci* 61:356–362
- Huey RB, Berrigan D (2001). Temperature, demography and ectotherm fitness. *Am Nat* 158:204–210
- Hunter CM, Caswell H, Runge MC, Regehr EV, Amstrup SC, Stirling I (2010). Climate change threatens polar bear populations: a stochastic demographic analysis. *Ecology* 91:2883–2897
- Kalaitzaki A, Papanikolaou NE, Karamaouna F, Dourtoglou V, Xenakis A, Papadimitriou V (2015). Biocompatible colloidal dispersions as potential formulations of natural pyrethrins: a structural and efficacy study. *Langmuir* 31:5722–5730
- Kaplan EL, Meier P (1958). Nonparametric estimation from incomplete observations. *J Am Stat Assoc* 53:457–481
- Kavallieratos NG, Boukouvala MC (2019). Efficacy of d-tetramethrin and acetamiprid for control of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) adults and larvae on concrete. *J Stored Prod Res* 80:79–84

- Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Arthur FA (2015a) Efficacy of deltamethrin against stored-product beetles at short exposure intervals or on a partially treated rice mass. *J Econ Entomol* 3:1416–1421
- Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Korunic Z, Mikeli NH (2015b). Evaluation of three novel diatomaceous earths against three stored grain beetle species on wheat and maize. *Crop Prot* 75:132–138
- Kavallieratos NG, Athanassiou CG, Arthur FH (2017). Effectiveness of insecticide-incorporated bags to control stored-product beetles. *J Stored Prod Res* 70:18–24
- Kavallieratos NG, Karagianni ES, Papanikolaou NE (2019a). Life history of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on peeled barley, peeled oats and triticale. *J Stored Prod Res* 84:101515
- Kavallieratos NG, Michail EJ, Boukouvala EC, Nika EP, Skourti A (2019b). Efficacy of pirimiphos-methyl, deltamethrin, spinosad and silicoSec against adults and larvae of *Tenebrio molitor* L. on wheat, barley and maize. *J Stored Prod Res* 83:161–167
- Kavallieratos NG, Boukouvala MC, Ntalli N, Kontodimas DC, Cappellacci L, Petrelli R, Ricciutelli M, Benelli G, Maggi F (2020). Efficacy of the furanosesquiterpene isofuranodiene against the stored-product insects *Prostephanus truncatus* (Coleoptera: Bostrychidae) and *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae). *J Stored Prod Res* 86:101553
- Lagisz M, Wolff K, Port G (2010). Time matters: delayed toxicity of pirimiphos-methyl on *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) and its effects on efficacy estimation of residual treatments. *J Stored Prod Res* 46:161–165
- Lazarević M, Kavallieratos NG, Nika EP, Boukouvala MC, Skourti A, Žikić V, Papanikolaou NE (2019). Does the exposure of parental female adults of the invasive *Trogoderma granarium* Everts to pirimiphos-methyl on concrete affect the morphology of their adult progeny? A geometric morphometrics approach. *Environ Sci Pollut Res* 26:35061–35070
- Mahroof RM, Hagstrum DW (2012). Biology, behavior, and ecology of insects in processed commodities. In: Hagstrum DW, Phillips TW, Cuperus G (eds) *Stored product protection*. Kansas State University, Manhattan, pp 33–41

- Mujeeb KA, Shakoory AR (2012). Effect of an organophosphate, pirimiphos-methyl, on esterases of different developmental stages of stored grain pest red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst.) - spectrophotometric analysis. Pak J Zool 44:301–312
- Orr HA (2009). Fitness and its role in evolutionary genetics. Nat Rev Genet 10:531–539
- Papachristos DP, Katsarou I, Michaelakis A, Papanikolaou NE (2015). Influence of different species of aphid prey on the immature survival and development of four species of aphidophagous coccinellids (Coleoptera: Coccinellidae). Eur J Entomol 112:440–445
- Papanikolaou NE, Milonas PG, Kontodimas DC, Demiris N, Matsinos YG (2013). Temperature-dependent development, survival, longevity and fecundity of the aphidophagous ladybird beetle, *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). Ann Entomol Soc Am 106:228–234
- Papanikolaou NE, Milonas PG, Kontodimas DC, Demiris N, Matsinos YG (2014). Life table analysis of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) at constant temperatures. Ann Entomol Soc Am 10:158–162
- Papanikolaou NE, Demiris N, Milonas PG, Preston S, Kypraios T (2016). Does mutual interference affect the feeding rate of aphidophagous coccinellids? A modeling perspective. PLoS One 11(1):e0146168
- Papanikolaou NE, Kalaitzaki A, Karamaouna F, Michaelakis A, Papadimitriou V, Dourtogou V, Papachristos DP (2018). Nanoformulation enhances insecticidal activity against natural pyrethrins against *Aphis gossypii* (Hemiptera: Aphididae) and retains their harmless effect to non-target arthropods. Environ Sci Pollut Res 25:10243–10249
- Papanikolaou NE, Kavallieratos NG, Kondakis N, Boukouvala MC, Nika EP, Demiris N (2019). Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) at constant temperatures, combining deterministic and stochastic demography. PLoS One 14(2):e0212182
- Perez Mendoza J, Campbell JF, Throne JE (2011). Effects of rearing density, age, sex, and food deprivation on flight initiation of the red flour beetle (Coleoptera: Tenebrionidae). J Econ Entomol 104: 443–451

- R Core Team (2020). R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for statistical computing, Vienna [http:// www.r-project.org](http://www.r-project.org). Accessed 10 April 2020
- Rahimi Namin F, Naseri B, Nouri Ganbalani G, Razmjou J (2018). Demographic studies of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) on various cultivars. *J Stored Prod Res* 79:60–65
- Rees D (2004). *Insects of stored products*. Manson Publishing, London
- Robinson WH (2005). *Urban insects and arachnids*. Cambridge University Press, Cambridge
- Sehgal B, Subramanyam B, Arthur FH, Gill BS (2013). Variation in susceptibility of laboratory and field strains of three stored-grain insect species to β -cyfluthrin and chlorpyrifos-methyl plus deltamethrin applied to concrete surfaces. *Pest Manag Sci* 70:576–587
- Skourti A, Kavallieratos NG, Papanikolaou NE (2019). Laboratory evaluation of development and survival of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) under constant temperatures. *J Stored Prod Res* 83:305–310
- Skourti A, Kavallieratos NG, Papanikolaou NE (2020). Suitability of semolina, cracked wheat and cracked maize as feeding commodities for *Tribolium castaneum* (Herbst; Coleoptera: Tenebrionidae). *Insects* 11:99
- Stark JD, Banks JE (2016). Developing demographic toxicity data: optimizing effort for predicting population outcomes. *PeerJ* 4:e2067
- Systat Software (2017). *SigmaPlot for windows 14.0*. Systat Software, Chicago
- Thomas KP, Pinniger DB, Wilkin DR (1987). An assessment of chlorpyrifos-methyl, etrimfos, fenitrothion and pirimiphos-methyl as grain protectants. *Pestic Sci* 21:57–72
- Vardeman EA, Arthur FH, Nechols JR, Campbell JF (2006). Effect of temperature, exposure interval, and depth of diatomaceous earth treatment on distribution, mortality, and progeny production of lesser grain borer (Coleoptera: Bostrichidae) in stored wheat. *J Econ Entomol* 99:1017–1024

- Velki M, Plavšin I, Dragojević J, Hackenberger BK (2014). Toxicity and repellency of dimethoate, pirimiphos-methyl and deltamethrin against *Tribolium castaneum* (Herbst) using different exposure methods. *J Stored Prod Res* 59:36–41
- Wang L, Wang S, Li Y, Paradesi MSR, Brown SJ (2007). BeetleBase: the model organism database for *Tribolium castaneum*. *Nucleic Acids Res* 35:D476–D479
- Wijayarathne LKW, Fields PG, Arthur FH (2012). Effect of methoprene on the progeny production of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Pest Manag Sci* 68:217–224
- Wilbur DA (1971). Stored grain insects. In: Pfadt RE (ed) *Fundamentals of applied entomology*. Macmillan Publishing Co. Inc, New York
- Zeki E, Papanikolaou NE, Demiris N, Kontodimas DC (2015). Comparison of the demographic parameters and survival of two phenotypes of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Eur J Entomol* 112:193–196

2.5 Έκθεση θηλυκών ατόμων *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) στο spinosad: επίδραση στη φυσική κατάσταση των απογόνων τους*

2.5.1 Εισαγωγή

Το κόκκινο σκαθάρι των αλεύρων, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) είναι σοβαρός εχθρός των αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων ο οποίος απαντάται σε παγκόσμια κλίμακα (Rees, 2004). Το έντομο προσβάλλει πολλά είδη αποθηκευμένων προϊόντων όπως δημητριακά, ξηρούς καρπούς, μπαχαρικά, σοκολάτα, κακάο, αποξηραμένα φρούτα και προϊόντα ζωικής προέλευσης (Hagstrum et al., 2013). Μια κοινή μέθοδος μείωσης των προσβολών του *T. castaneum* στα αποθηκευμένα τρόφιμα είναι μέσω της επέμβασης με εντομοκτόνα (Skourti et al., 2020a; Kavallieratos et al., 2021; Skourti et al., 2021). Ωστόσο η οικονομική σημασία αυτού του εντόμου καθώς και η αντοχή του σε πολλά εντομοκτόνα (Skourti et al., 2021), καθιστά επιτακτική ανάγκη της ακριβούς αξιολόγησης των στρατηγικών διαχείρισης περί του ελέγχου του.

Η δημογραφία είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την αποσαφήνιση των στοιχείων της φυσικής κατάστασης των εντόμων. Πινακοποιώντας τα ποσοστά γεννήσεων και θανάτων, μπορούν να υπολογιστούν διάφορες παράμετροι οι οποίες είναι ενδεικτικές της πιθανής πληθυσμιακής αύξησης των εντόμων. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για την εκτίμηση των χρονικά μεταβαλλόμενων διαδικασιών, όπως η επιβίωση και η αναπαραγωγή των εντόμων με την πάροδο του χρόνου (Skourti et al., 2021) και έχει χρησιμοποιηθεί ευρέως για την αξιολόγηση της πιθανής αύξησης του πληθυσμού των εντόμων (Kavallieratos et al., 2019; Papanikolaou et al., 2019; Kavallieratos et al., 2020; Skourti et al., 2020b). Ωστόσο, σπάνια εφαρμόζεται για την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας των εντομοκτόνων (Stark & Banks, 2016; Skourti et al., 2020a; Skourti et al., 2021).

*Skourti, A., N. G. Kavallieratos, N. E. Papanikolaou 2021. Exposure of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) females to spinosad: effect on the fitness of their progeny, in **Proceedings of the 1st International Electronic Conference on Entomology**, 1–15 July 2021, Insects, MDPI, doi:10.3390/IECE 10396

Ως εκ τούτου, στόχος της παρούσας μελέτης είναι να διερευνήσει τις πιθανές έμμεσες επιδράσεις του spinosad επί του *T. castaneum*. Για το σκοπό αυτό, διερευνήθηκε η επίδραση του spinosad στους απογόνους του εντόμου όταν τέλεια θηλυκά άτομα *T. castaneum* εξετέθησαν σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης στο εντομοκτόνο, μέσω μίας προσφάτως προτεινόμενης δημογραφικής προσέγγισης, κατάλληλης για τη διερεύνηση των έμμεσων επιπτώσεων των εντομοκτόνων (Stark and Banks, 2016).

2.5.2 Υλικά και μέθοδοι

Τα τέλεια θηλυκά άτομα *T. castaneum* εξετέθησαν για 5, 10 και 20 min. σε spinosad, ενώ για τον μάρτυρα χρησιμοποιήθηκε ύδωρ (εικ. 2.21 έως 2.24 και 2.28 έως 2.30). Οι ομάδες των ωών οι οποίες παρήχθησαν από τα θηλυκά άτομα (150 ωά ανά χρόνο έκθεσης στο spinosad και 80 για τον μάρτυρα) (εικ. 2.8) τοποθετήθηκαν χωριστά σε τρυβλία Petri άνευ τροφής. Στη συνέχεια, μεταφέρθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους 30 C, σχετική υγρασία 65% υπό συνεχές σκότος (εικ. 2.9, 2.10 και 2.14). Τα τρυβλία ελέγχονταν καθημερινώς προκειμένου να παρατηρηθεί η εμφάνιση των προνυμφών (εικ. 2.22). Μόλις οι προνύμφες εμφανίζονταν, μεταφέρονταν χωριστά σε νέα τρυβλία με αλεύρι μαλακού σίτου. Τα καπάκια των τρυβλίων είχαν κεντρικό κυκλικό άνοιγμα (καλυμμένο με ύφασμα μουσελίνας) ώστε να επιτρέπεται ο αερισμός του περιεχομένου τους (εικ. 2.4 και 2.5). Η θνησιμότητα των ατελών σταδίων ελέγχονταν καθημερινά. Μόλις τα άτομα έφθαναν στο στάδιο του τελείου ατόμου, τοποθετούνταν ανά ζεύγη σε νέα τρυβλία με αλεύρι μαλακού σίτου. Η θνησιμότητα των τελείων ατόμων και η γονιμότητα των θηλυκών ατόμων καταγράφονταν κάθε 24 ώρες για μια περίοδο 130 ημερών από τη γέννησή τους έως ότου όλα τα άτομα να πεθάνουν (εικ. 2.15).

Χρησιμοποιώντας τα παραπάνω δεδομένα, υπολογίστηκαν οι ακόλουθες δημογραφικές παράμετροι (Carey, 1993): ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός $R_0 = \sum (l_x \times m_x)$, όπου το l_x υποδηλώνει την επιβίωση για την ηλικία και το m_x την ειδική για την ηλικία γονιμότητα δηλαδή το κατά κεφαλήν ρυθμό παραγωγής απογόνων σε διάστημα ίσο με το διάστημα μελέτης σειράς. Ο ενδογενής ρυθμός αύξησης (r_m) $\sum (e^{r_m \times x} \times l_x \times m_x) = 1$, δηλαδή ο ρυθμός φυσικής αύξησης σε έναν κλειστό πληθυσμό (υπόκειται σε σταθερή διαδικασία γονιμότητας και θνησιμότητας

ανάλογα με την ηλικία για μεγάλο χρονικό διάστημα), ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης $\lambda = e^{r_m}$, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται ο πληθυσμός σε κάθε χρονικό βήμα, η μέση διάρκεια γενεάς $T = \frac{\ln R_0}{r_m}$, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε να αυξηθεί ο πληθυσμός κατά συντελεστή ίσο με τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό και ο χρόνος διπλασιασμού $DT = \frac{\ln 2}{r_m}$ δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται ώστε να διπλασιαστεί ο πληθυσμός. Επιπλέον, τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95% όλων των υπολογισθεισών παραμέτρων ελήφθησαν με την μέθοδο bootstrapping στο λογισμικό R (R Core Team, 2020).

2.5.3 Αποτελέσματα

Οι εκτιμώμενες δημογραφικές παράμετροι παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.5.1. Οι τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού αύξησης, του ενδογενούς ρυθμού αύξησης, του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης, της μέσης διάρκειας γενεάς και του χρόνου διπλασιασμού του μάρτυρα ήταν 6,3 θήλεα/θήλυ, 0,029 θήλεα/θήλυ/ημέρα, 1,029, 63,6 ημέρες και 24,1 ημέρες, αντιστοίχως. Όταν τα γονικά θηλυκά άτομα εξετέθησαν επί 5 min στο spinosad, οι τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού αύξησης, του ενδογενούς ρυθμού αύξησης, του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης και του χρόνου διπλασιασμού ήταν σημαντικά χαμηλότερες, δηλαδή 0,073 θήλεα/θήλυ, -0,045 θήλεα/θήλυ/ημέρα, 0,956 και -15,9 ημέρες, αντίστοιχα, ενώ η μέση διάρκεια γενεάς δεν διέφερε σημαντικά (60,6 ημέρες) σε σχέση με τον μάρτυρα. Η αύξηση του χρόνου της έκθεσης των τελείων θηλυκών ατόμων δεν επηρέασε τις δημογραφικές παραμέτρους του *T. castaneum* περαιτέρω. Συνεπώς, ο εκτιμώμενος καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός αύξησης ήταν 0,135 και 0,097 θήλεα/θήλυ, ο ενδογενής ρυθμός αύξησης -0,031 και -0,048 θήλεα/θήλυ/ημέρα, ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης 0,970 και 0,953, ο μέσος χρόνος παραγωγής 67,7 και 50,3 ημέρες και ο χρόνος διπλασιασμού -23,3 και -14,8 ημέρες όταν τα τέλεια θηλυκά άτομα εξετέθησαν επί 10 και 20 min στο spinosad, αντιστοίχως.

Πίνακας 2.5.1. Οι τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού (R_0), του ενδογενούς ρυθμού αύξησης (r_m), του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης (λ), της μέσης διάρκειας γενεάς (T) και του χρόνου διπλασιασμού (DT) του *T. castaneum* (μέσοι όροι, 95% διάστημα εμπιστοσύνης) σε διαφορετικούς χρόνους έκθεσης των μητρικών ατόμων στο spinosad.

Έκθεση (λεπτά)	R_0 (θήλεα/θήλυ)	r_m (θήλεα/θήλυ/ημέρα)	λ	T (ημέρες)	DT (ημέρες)
0	6,3 ^a (4,8–8,1)	0,029 ^a (0,024–0,033)	1,029 ^a (1,024–1,034)	63,6 ^a (61,7–66,0)	24,1 ^a (20,9–28,8)
5	0,073 ^b (0,027–0,127)	-0,045 ^b (-0,063–0,033)	0,956 ^b (0,939–0,968)	60,6 ^{ab} (53,2–67,5)	-15,9 ^b (-21,0–11,1)
10	0,135 ^b (0,043–0,241)	-0,031 ^b (-0,046–0,021)	0,970 ^b (0,955–0,979)	67,7 ^{ab} (55,8–77,7)	-23,3 ^b (-32,4–15,1)
20	0,097 ^b (0,028–0,197)	-0,048 ^b (-0,068–0,034)	0,953 ^b (0,935–0,966)	50,3 ^b (45,0–55,8)	-14,8 ^b (-20,2–10,2)

Οι μέσοι όροι των στηλών που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά

2.5.4 Συζήτηση

Η παρούσα μελέτη καταδεικνύει ότι όλα τα πειραματικά διαστήματα έκθεσης των τελείων θηλυκών ατόμων *T. castaneum* στο spinosad ήταν ζημιογόνα στους απογόνους του εντόμου. Αυτό οφείλεται στις αρνητικές τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης και του χρόνου διπλασιασμού όπως και στις χαμηλές τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού αύξησης και του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης (< 1) οι οποίες υποδηλώνουν τη συνεχή μείωση του πληθυσμού του εντόμου σε όλες τις περιπτώσεις. Συνεπώς, το spinosad είναι εξαιρετικά αποτελεσματικό έναντι του *T. castaneum* όσον αφορά την επιβίωση και την αναπαραγωγή των απογόνων σε όλες τις επεμβάσεις. Παρά το γεγονός ότι το εντομοκτόνο δεν είχε άμεση επίδραση στον γονικό πληθυσμό του *T. castaneum*, ως συνέπεια της άμεσης τοξικότητας ή λόγω καθυστερημένης θνησιμότητας, αποδείχτηκε ότι η παραγωγή των απογόνων του θα υποστεί σοβαρές επιπτώσεις οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην δραστική μείωση του πληθυσμού του. Η αποκτηθείσα γνώση είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη διαχείριση του εντόμου και συνιστάται να λαμβάνεται υπ' όψιν καθώς θα μπορούσε να μειώσει τις εφαρμογές των εντομοκτόνων. Παρόμοια αποτελέσματα έχουν αναφερθεί από τους Skourti et al. (2021), καθώς ανέφεραν ότι η φυσική κατάσταση των απογόνων του *T. castaneum* επηρεάζεται σοβαρά όταν τα τέλεια θηλυκά άτομα εξετέθησαν στο οργανοφωσφορικό εντομοκτόνο pirimiphos-methyl.

Η δημογραφική προσέγγιση η οποία ακολουθήθηκε επέτρεψε τη διερεύνηση των έμμεσων επιδράσεων του spinosad με την αποτύπωση των γεννήσεων και των θανάτων των απογόνων των εκτεθέντων στο εντομοκτόνο τελείων θηλυκών ατόμων *T. castaneum*. Η μεθοδολογία είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την ανάδειξη της αποτελεσματικότητας των εντομοκτόνων, λαμβάνοντας υπ' όψιν τις χρονικώς μεταβαλλόμενες διαδικασίες της επιβίωσης και της αναπαραγωγής. Αναμένεται πως μελλοντικές μελέτες θα φωτίσουν τις έμμεσες επιδράσεις των εντομοκτόνων στα έντομα αποθηκών αξιοποιώντας τη ακολουθήσασα προσέγγιση αυτή, προκειμένου να συγκεντρωθούν περισσότερες πληροφορίες περί της αποτελεσματικότητά τους.

2.5.5 Βιβλιογραφία

- Carey, J.R. *Applied demography for biologists with special emphasis on insects*. Oxford University Press, New York, NY, 1993.
- Hagstrum, D.W.; Klejdysz, T.; Subramanyam, Bh.; Nawrot, J. *Atlas of stored-product insects and mites*. AACC International, St Paul, MN, 2013.
- Kavallieratos, N.G.; Andrić, G.; Pražić Golić, M.; Nika, E.P.; Skourti, A.; Kljajić, P.; Papanikolaou, N.E. Biological features and population growth of two Southeastern European *Tribolium confusum* Jacquelin du Val (Coleoptera: Tenebrionidae) strains. *Insects* 2020, *11*, 218.
- Kavallieratos, N.G.; Karagianni, E.S.; Papanikolaou, N.E. Life history of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on peeled barley, peeled oats and triticale. *J. Stored Prod. Res.* 2019, *84*, 101515.
- Kavallieratos, N.G.; Nika, E.P.; Skourti, A.; Ntalli, N.; Boukouvala, M.C.; Ntalaka, C.T.; Maggi, F.; Rakotosaona, R.; Cespi, M.; Perinelli, D.R.; Canale, A.; Bonacucina, G.; Benelli, G. Developing a *Hazomalania voyronii* essential oil nanoemulsion for the eco-friendly management of *Tribolium confusum*, *Tribolium castaneum* and *Tenebrio molitor* larvae and adults on stored wheat. *Molecules* 2021, *26*, 1812.
- Papanikolaou, N.E.; Kavallieratos, N.G.; Kondakis, M.; Boukouvala, M.C.; Nika, E.P.; Demiris, N. Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* combining deterministic and stochastic demography. *PLoS ONE* 2019, *14*, e0212182
- R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for statistical computing, 2020, Vienna.
- Rees, D. *Insects of stored products*. Manson Publishing, London, 2004.
- Skourti, A.; Kavallieratos, N.G.; Papanikolaou, N.E. Exposure of *Tribolium castaneum* (Herbst) females to pirimiphos-methyl alters the fitness of their progeny. *Env. Sci. Poll. Res.*, 2021, *28*, 7893–7900.

Skourti, A.; Kavallieratos, N.G.; Papanikolaou, N.E. How is fitness of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) affected when different developmental stages are exposed to chlorfenapyr? *Insects* 2020, *11*, 542.

Skourti, A.; Kavallieratos, N.G.; Papanikolaou, N.E. Suitability of semolina, cracked wheat and cracked maize as feeding commodities for *Tribolium castaneum* (Herbst; Coleoptera: Tenebrionidae). *Insects* 2020, *11*, 99.

Stark, J.D., Banks, J.E. Developing demographic toxicity data: optimizing effort for predicting population outcomes. *PeerJ*, 2016, *4*, e2067

2.6 Δημογραφικές παράμετροι του *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) σε σταθερές θερμοκρασίες

2.6.1 Εισαγωγή

Το κόκκινο σκαθάρι των αλεύρων, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) είναι ένας από τους πιο σοβαρούς εχθρούς των αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων παγκοσμίως. Έχει καταγραφεί επί 246 διαφορετικών προϊόντων όπως το κριθάρι, ο αραβόσιπος, τα αμύγδαλα, τα καρύδια, τα φασόλια, οι σπόροι του κακάο, οι σπόροι του βάμβακος, το κεχρί, το μπέηκιν πάουντερ, τα αποξηραμένα φρούτα, οι ξηροί καρποί, το πιπέρι καγιέν, το τζίντζερ, τα μπαχαρικά, το λινάρι και τα συσκευασμένα δημητριακά (Rees, 2004; Hagstrum and Subramanyam, 2006, 2009). Το έντομο δεν μπορεί να αναπτυχθεί σε ακεραίους σπόρους δημητριακών, ως εκ τούτου θεωρείται δευτερεύον εχθρός (Kumar, 2017). Επιπλέον, το *T. castaneum* μπορεί να είναι επιβλαβές για τον άνθρωπο επειδή απελευθερώνει τοξικές οργανικές ενώσεις (βενζοκινόνες) οι οποίες προσδίδουν στους σπόρους δυσάρεστη οσμή και αλλάζουν το χρώμα τους σε ρόδινο (Sayed et al., 2020; Cui et al., 2021).

Προηγούμενες μελέτες αναφέρονται στις πρακτικές διαχείρισης του *T. castaneum*, καθώς είναι ανεκτικό σε διάφορα εντομοκτόνα όπως το β -cyfluthrin, το cyfluthrin, το chlorfenapyr, το deltamethrin και η γη διατόμων (Arthur, 1998a, 1998b, 2008, 2009; Sehgal et al., 2013; Kavallieratos et al., 2017a). Εκτός από τα εντομοκτόνα, υπάρχουν άλλοι παράγοντες οι οποίοι επηρεάζουν την αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum*. Ένας σημαντικός αβιοτικός παράγοντας είναι η θερμοκρασία. Σύμφωνα με τον Howe (1956), το *T. castaneum* χρειάζεται 2,6 ημέρες στους 32,5 °C για τη συντομότερη εκκόλαψη των προνυμφών του, 12,9 ημέρες στους 35 °C για τη συντομότερη παραμονή στο στάδιο της προνύμφης και 3,9 ημέρες στους 37,5 °C για τη συντομότερη παραμονή στο στάδιο της νύμφης όταν εκτρέφεται με σπασμένο σιτάρι.

***Skourti, A., Kavallieratos, N.G., Papanikolaou, N.E. 2022.** Demographic responses of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) to different temperatures in soft wheat flour. *Journal of Thermal Biology* 103, 103162. **(Impact Factor 2022 = 2,902)**

Οι Roorda et al. (1982) παρατήρησαν ότι η ανάπτυξη του *T. castaneum* ήταν ταχύτερη στους 35 – 38 °C σε 70% σχετική υγρασία (RH) όταν εξετράφη με σιτάρι, όμως όσο μειωνόταν η RH αυξανόταν η θνησιμότητα. Ο White (1987) προσδιόρισε τα όρια επιβίωσης των προνυμφών στους 40 °C ως το ανώτερο όριο και στους 20 – 22 °C ως το κατώτερο, όταν εξετρέφοντο με ένα μείγμα από ολόκληρους και σπασμένους σπόρους σιταριού σε 35% RH. Οι Lhaloui et al. (1988) ανέφεραν ότι τα υψηλά επίπεδα περιεκτικότητας σε υγρασία (16%) και τα χαμηλά επίπεδα θερμοκρασίας (πάνω από 20°C) ευνόησαν την επιβίωση των πληθυσμών *T. castaneum*. Οι ιδανικές συνθήκες αναπαραγωγής βρίσκονται στους 27 °C και 16% περιεκτικότητα σε υγρασία (MC). Σε πρόσφατη μελέτη, οι Skourti et al. (2019) έδειξαν ότι η ανάπτυξη και η επιβίωση των ωών, των προνυμφών και των νυμφών *T. castaneum* σχετίζονται με τη θερμοκρασία (όταν κυμάνθηκε μεταξύ 20 έως 35 °C) σε αλεύρι μαλακού σίτου. Η υψηλότερη επιβίωση ωών και προνυμφών παρατηρήθηκε στους 25 °C και 30 °C, αντιστοίχως, ενώ επιβίωσαν ισοδυνάμως σε οποιαδήποτε άλλη εξετασθείσα θερμοκρασία.

Πρόσθετες μελέτες έχουν αποκαλύψει διαφορές στην ανάπτυξη, τη γονιμότητα, τη διάρκεια ζωής και την επιβίωση του *T. castaneum*, ζητήματα τα οποία θα μπορούσαν να αποδοθούν στις διάφορες δίαιτες που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των πειραματικών πρωτοκόλλων. Για παράδειγμα, οι Xue et al. (2010) ανέφεραν ότι το *T. castaneum* ολοκλήρωσε την ανάπτυξή του από ωό σε τέλειο άτομο όταν εξετράφη με αλεύρι. Ωστόσο, όταν το έντομο εξετράφη με άμυλο, οι προνύμφες έφθαναν μέχρι το τρίτο στάδιο. Επίσης, τα τέλεια θηλυκά άτομα μπορούσαν να γεννήσουν περίπου 97 ωά/θήλυ στο αλεύρι σε αντίθεση με τα 3 ωά/θήλυ που γεννούσαν όταν εξετρέφοντο με άμυλο μετά από μια περίοδο 15 ημερών. Αργότερα, οι Arthur et al. (2019) υπολόγισαν τις ημέρες τις οποίες χρειαζόταν το *T. castaneum* προκειμένου να φθάσει στο στάδιο του τελείου ατόμου όταν εξετρέφοντο με διαφορετικά προϊόντα ρυζιού, όπως το ακατέργαστο ρύζι, το αναποφλοίωτο ρύζι, το καστανό ρύζι και το ρυζάλευρο, και σχετικά υποπροϊόντα (π.χ. φλοιοί σπόρων, πίτουρο, σπασμένοι σπόροι και αλεσμένοι ακέραιοι σπόροι). Οι συγγραφείς διαπίστωσαν ότι το ρυζάλευρο, το καστανό ρύζι, το πίτουρο, οι σπασμένοι σπόροι και οι αλεσμένοι ακέραιοι σπόροι ευνόησαν την αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum*.

Η δημογραφία αποτελεί βασικό εργαλείο το οποίο χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των στοιχείων της φυσικής κατάστασης των ζωντανών οργανισμών

καθώς επιτρέπει τη λεπτομερή περιγραφή των βιολογικών διεργασιών, της αναπαραγωγής και της θνησιμότητάς τους (Carey, 2001). Η έρευνα περί της δημογραφίας του *T. castaneum* έχει μελετηθεί ελάχιστα. Για παράδειγμα, εξετάζοντας τον ενδογενή ρυθμό αύξησης του πληθυσμού του *T. castaneum* οι Li και Arbogast (1991) βρήκαν ότι τα θηλυκά γεννούν περισσότερα ωά στο αλεύρι αραβοσίτου, λιγότερα στον σπασμένο σπόρο αραβοσίτου και ακόμη λιγότερα στον ολόκληρο σπόρο αραβοσίτου στους 30 °C και 75% RH. Επίσης, το αλεύρι αραβοσίτου καταγράφηκε ως το καλύτερο μέσο για την ανάπτυξη και την επιβίωση αυτού του εντόμου (Li and Arbogast, 1991). Μέσω της δημογραφίας, οι Rahimi Namin et al. (2018) διαπίστωσαν ότι το *T. castaneum* δεν είναι σε θέση να αναπτυχθεί στις ποικιλίες κριθαριού Makuyi και Fajr30 στους 30 °C. Με βάση τον προσδιορισμό των δημογραφικών παραμέτρων του *T. castaneum*, οι Skourti et al. (2020) έδειξαν ότι μόνο το σιμιγδάλι, σε αντίθεση με το σπασμένο σιτάρι και τον σπασμένο αραβόσιτο, ενίσχυσε την πληθυσμιακή αύξηση του εντόμου. Ωστόσο, δεν υπάρχουν δεδομένα για τις δημογραφικές παραμέτρους του *T. castaneum*, συγκριτικώς σε διαφορετικές θερμοκρασίες, γεγονός το οποίο επιτρέπει την εις βάθος διερεύνηση της επιβίωσης, της θνησιμότητας και της αναπαραγωγής του εντόμου. Ως εκ τούτου, οι στόχοι της παρούσας μελέτης ήταν να εξεταστούν ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός αύξησης, ο ενδογενής ρυθμός αύξησης, ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης και η μέση διάρκεια γενεάς σε τέσσερις διαφορετικές σταθερές θερμοκρασίες, 20, 25, 30 και 32,5 °C, στο αλεύρι μαλακού σίτου.

2.6.2 Υλικά και μέθοδοι

2.6.2.α Έντομα

Η αρχική συλλογή των τελείων ατόμων *T. castaneum* πραγματοποιήθηκε σε αποθηκευτικές εγκαταστάσεις στη νότια Ελλάδα το 2003. Το *T. castaneum* εξετράφη σε αλεύρι λευκού μαλακού σίτου (εικ. 2.1) το οποίο παρασκευάστηκε μόνο από ενδοσπέρμιο (μείγμα ποικιλιών) στους 30 °C, 65% RH υπό συνεχές σκότος στο Εργαστήριο Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών.

2.6.2.β Τροφή

Για τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε προκοσκινισμένο αλεύρι λευκού μαλακού σίτου χωρίς να έχει δεχτεί εντομοκτόνες επεμβάσεις. Η περιεκτικότητα του αλεύρου σε υγρασία ήταν 12,3%, η οποία υπολογίστηκε από βαθμονομημένο υγρασιόμετρο (mini GAC plus, Dickey-John Europe S.A.S., Colombes, Γαλλία).

2.6.2.γ Βιοδοκιμές

Προκειμένου να ληφθούν τα ωά για την διεξαγωγή του πειραματισμού, 500 τέλεια άτομα *T. castaneum* ηλικίας 7 ημερών, χωρίς να ελεγχθεί το φύλο τους, μεταφέρθηκαν σε γυάλινα βάζα των 250 ml τα οποία περιείχαν 125 ml λευκού αλεύρου μαλακού σίτου (εικ. 2.6). Την επόμενη μέρα, τα τέλεια άτομα και τα ωά τους διαχωρίστηκαν από το αλεύρι χρησιμοποιώντας το No 20 (διάμετρος οπής 0,85 mm) και No 60 (διάμετρος οπής 0,25 mm) (Advantech Manufacturing Inc., New Berlin, WI), αντιστοίχως (εικ. 2.7). Τέσσερις ομάδες ωών, δηλαδή 236, 234, 96 και 220, τοποθετήθηκαν πολύ προσεκτικά με λεπτό πινέλο (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, London, UK) σε τρυβλία Petri, χωριστά, άνευ αλεύρου, και στη συνέχεια μεταφέρθηκαν σε τέσσερις θαλάμους ελεγχόμενων συνθηκών, οι οποίοι ρυθμίστηκαν στους 20, 25, 30, 32,5 °C / 65% RH υπό συνεχή σκότος αντιστοίχως (εικ. 2.10, 2.11, 2.14, 2.16 και 2.17). Τα τρυβλία ελέγχονταν καθημερινώς για την εμφάνιση των προνυμφών σε στερεοσκόπιο SZX9 Olympus (ολική μεγέθυνση 57x) (Bacacos S.A., Αθήνα) (εικ. 2.11). Μόλις οι προνύμφες εμφανίζονταν, μεταφέρονταν ξεχωριστά και πολύ προσεκτικά, μέσω λεπτού πινέλου (Cotman 111 No 000, Winsor and Newton, Λονδίνο, UK), σε νέα τρυβλία (διάμετρος 8 cm και ύψος 1,5 cm) περιέχοντα 5 g λευκού αλεύρου μαλακού σίτου) (Skourti et al., 2019) (εικ. 2.2). Η ζύγιση του αλεύρου πραγματοποιούταν με ζυγαριά ακριβείας Precisa XB3200D (Alpha Analytical Instruments, Γέρακας, Ελλάς). Τα καπάκια των τρυβλίων είχαν κυκλική οπή (διαμέτρου 1,50 cm). Οι οπές καλύφθηκαν με ύφασμα μουσελίνας ώστε να επιτρέπεται ο αερισμός των τρυβλίων. Τα ανώτερα εσωτερικά τοιχώματα των τρυβλίων καλύφθηκαν με πολυτετραφθοροαιθυλένιο (60% κ.β. διάλυμα σε ύδωρ) (Sigma-Aldrich Chemie GmbH, Taufkirchen, Γερμανία) για να εμποδίζουν τη διαφυγή των εντόμων. Η θνησιμότητα των εντόμων ελεγχόταν καθημερινώς. Κατά το στάδιο της νύμφης καταγραφόταν το φύλο του ατόμου σύμφωνα με τους Shukla and Palli (2012). Τα εμφανιζόμενα τέλεια άτομα τοποθετούνταν ανά ζεύγη, μεταφέρονταν σε νέα τρυβλία τα οποία περιείχαν 5 g αλεύρου σίτου και τοποθετούνταν ξανά στους θαλάμους ελεγχόμενων συνθηκών. Μέχρι να πεθάνουν όλα τα ζεύγη, ελέγχονταν καθημερινώς για τη θνησιμότητα τους για μια περίοδο 1176 ημερών από τη γέννησή

τους, μέσω του προαναφερθέντος στερεοσκοπίου και τη βοήθεια λεπτού πινέλου (εικ. 2.15). Η γονιμότητα των θηλέων καταγραφόταν κάθε 24 ώρες με την καταμέτρηση των ωών μέσω της διαδικασίας του κοσκινίσματος του αλεύρου των τρυβλίων. Τα ωά μεταφέρονταν χωριστά σε νέα τρυβλία τα οποία περιείχαν 5 g αλεύρι μαλακού σίτου, επανατοποθετούνταν στους θαλάμους και ελέγχονταν καθημερινώς μέχρι την εμφάνιση των νυμφών. Η αναλογία του φύλου των απογόνων υπολογίστηκε επιλέγοντας τυχαία 100 νύμφες από κάθε θερμοκρασία.

2.6.3 Στατιστική ανάλυση

Τα ποσοστά των γεννήσεων και της θνησιμότητας του *T. castaneum* καταγράφηκαν σύμφωνα με τον Carey (1993). Οι ακόλουθες παράμετροι υπολογίστηκαν στους 20, 25, 30 και 32,5 °C: Η επιβίωση της μελέτης σειράς έως την ηλικία x : (l_x), δηλαδή η αναλογία της μελέτης σειράς που επιβίωσε από τη γέννηση έως την ηλικία x . Η γονιμότητα αναλόγως της ηλικίας (m_x) όπου πολλαπλασιάζεται ο μέσος αριθμός ωών με την αναλογία $\frac{\text{♀}}{\text{♀}+\text{♂}}$, που αντιπροσωπεύει τον μέσο αριθμό απογόνων τα οποία παράγονται από τα θήλεα άτομα κατά την ηλικία x . Ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός: $R_0 = \sum (l_x \times m_x)$, δηλαδή ο κατά κεφαλήν ρυθμός παραγωγής απογόνων σε διάστημα ίσο με το διάστημα μελέτης σειράς. Ο ενδογενής ρυθμός αύξησης (r_m): $\sum (e^{r_m \times x} \times l_x \times m_x) = 1$, δηλαδή ο ρυθμός φυσικής αύξησης σε έναν κλειστό πληθυσμό που υπόκειται σε σταθερά βήματα γονιμότητας και θνησιμότητας ανάλογα με την ηλικία για μεγάλο χρονικό διάστημα. Ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης λ : $\lambda = e^{r_m}$, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται ο πληθυσμός σε κάθε χρονικό βήμα. Η μέση διάρκεια γενεάς $T = \frac{\ln R_0}{r_m}$, δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να αυξηθεί ο πληθυσμός κατά συντελεστή ίσο με τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό. Ο χρόνος διπλασιασμού $DT = \frac{\ln 2}{r_m}$ δηλαδή ο χρόνος που απαιτείται για να διπλασιαστεί ο πληθυσμός.

Οι σημαντικές διαφορές μεταξύ των παραμέτρων του πίνακα ζωής, σε καθεμία από τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες, εκτιμήθηκαν με την προσθήκη διαστημάτων εμπιστοσύνης 95%, τα οποία προέκυψαν με bootstrapping σε λογισμικό R (R Core Team, 2019).

Το μη γραμμικό πρότυπο Briere (Briere et al., 1999) χρησιμοποιήθηκε για να περιγράψει τη σχέση μεταξύ της θερμοκρασίας και του ενδογενούς ρυθμού αύξησης, καθώς θεωρείται ότι κινείται ισορροπημένα μεταξύ των μαθηματικών χειρισμών και της βιολογίας (Paranikolaou et al., 2019). Το πρότυπο Briere περιγράφεται από την ακόλουθη εξίσωση: $r(T) = \alpha \times T \times (T - T_0) \times \sqrt{T_L - T}$

όπου $r(T)$ είναι ο ενδογενής ρυθμός αύξησης και T είναι η θερμοκρασία περιβάλλοντος. Το T_0 είναι η χαμηλότερη θερμοκρασία και η T_L είναι η υψηλότερη θερμοκρασία στην οποία ο ενδογενής ρυθμός αύξησης είναι ίσος με μηδέν. Το α είναι μια εμπειρική σταθερά. Η θερμοκρασία στην οποία ο ενδογενής ρυθμός αύξησης (T_m) φτάνει τη μέγιστη τιμή του, υπολογίστηκε αναλυτικά από το πρότυπο Briere (Dixon et al., 2009; Briere et al., 1999) ως:

$$T_m = \frac{2 \times m \times T_L + (m+1) \times T_0 + \sqrt{4 \times m^2 \times T_L^2 + (m+1)^2 \times T_0^2 - 4 \times m^2 \times T_0 \times T_L}}{4 \times m + 2}$$

για $m = 2$. Η προσαρμογή πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας τη διαδικασία των μη γραμμικών ελαχίστων τετραγώνων (Systat Software, 2017).

Η μέθοδος Kaplan-Meier χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των καμπυλών επιβίωσης από το ωό έως τον θάνατο σε κάθε μία από τις εξεταζόμενες θερμοκρασίες. Καθώς η δοκιμή λογαριθμικής κατάταξης έδειξε ότι οι καμπύλες επιβίωσης διέφεραν σημαντικά, χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή Holm-Sidak ώστε να προσδιοριστεί ποια ζεύγη καμπυλών ήταν διαφορετικά. Η εκτίμηση Kaplan-Meier χρησιμοποιήθηκε για να ληφθούν οι μέσοι χρόνοι επιβίωσης και τα διαστήματα εμπιστοσύνης 95%. Όλες οι αναλύσεις επιβίωσης διεξήχθησαν χρησιμοποιώντας το λογισμικό SigmaPlot 14.0 (Systat Software, 2017).

2.6.4 Αποτελέσματα

Οι εκτιμώμενες δημογραφικές παράμετροι του *T. castaneum* στους 20, 25, 30 και 32,5 °C παρουσιάζονται στον Πίνακα 2.6.1. Με βάση την προσθήκη του κριτηρίου των διαστημάτων εμπιστοσύνης 95%, όλες οι υπολογιζόμενες παράμετροι έδειξαν μια διακύμανση μεταξύ των εξετασθεισών επιπέδων θερμοκρασίας. Ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός αυξήθηκε σημαντικά από 0,08 θήλεα/θήλυ στους 20 °C σε 11,77 και 102,07 θήλεα/θήλυ στους 25 και 30 °C, ακολουθούμενος από μείωση σε

10,73 θήλεα/θήλυ στους 32,5 °C. Οι χαμηλότερες τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης και του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης παρατηρήθηκαν στους 20 °C (-0,0105 θήλεα/θήλυ/ημέρα και 0,9895, αντιστοίχως) και οι υψηλότερες στους 30 °C (0,0348 θήλεα/θήλυ/ημέρα και 1,0354, αντιστοίχως). Ενώ η μέση διάρκεια γενεάς δεν διέφερε σημαντικά μεταξύ των 20 και 25 °C (249,9 και 225,5 ημέρες, αντιστοίχως), στους 30 και 32,5 °C μειώθηκε στις 132,8 και 115,1 ημέρες αντιστοίχως. Ο χρόνος διπλασιασμού ήταν αρνητικός στους 20 °C (-67,5 ημέρες) αλλά αυξήθηκε στις 19,9, 34,0 και 63,9 ημέρες στους 30, 32,5 και 25 °C, αντιστοίχως.

Το μη γραμμικό μοντέλο Briere προσάρμοσε επιτυχώς τα δεδομένα του ενδογενούς ρυθμού αύξησης ($R^2 = 0,97$, Διάγραμμα. 2.6.1). Το κατώτερο όριο για την αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum* εκτιμήθηκε στους 22,2 °C, το ανώτερο όριο στους 33,2 °C και η θερμοκρασία για τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης στους 30,1 °C. Επίσης, η ανάλυση επιβίωσης έδειξε ότι η θερμοκρασία επηρέασε τον κίνδυνο θανάτου του *T. castaneum* (χ^2 [Log rank] = 350,136; df = 3; $P < 0,001$; Διάγραμμα. 2.6.2). Ο μέσος χρόνος επιβίωσης αυξήθηκε από τις 112,1 ημέρες στους 20 °C στις 462,4 ημέρες στους 25 °C, ακολουθούμενος από μείωση στις 206,5 και 64,5 ημέρες στους 30 και 32,5 °C, αντιστοίχως (Πίνακας 2.6.2).

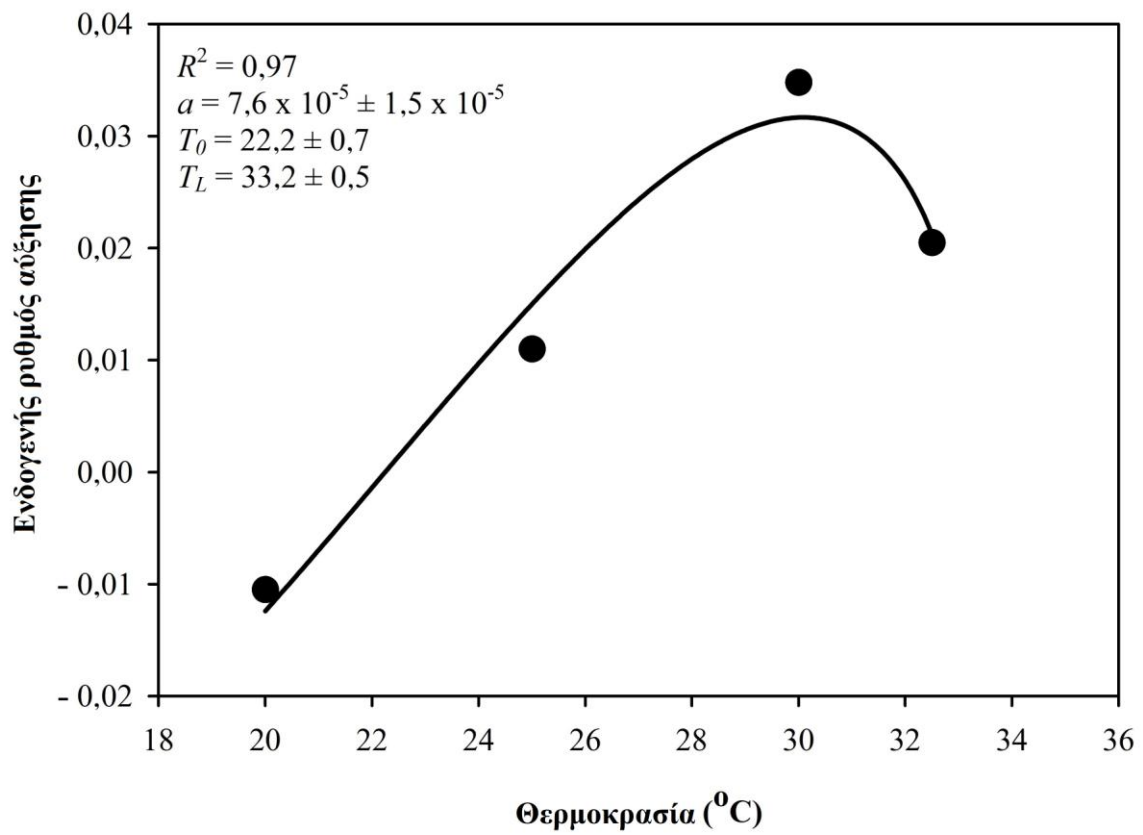
Πίνακας 2.6.1. Δημογραφικές παράμετροι του *T. castaneum* (μέσος όρος, 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης = C.I.) σε διαφορετικές σταθερές θερμοκρασίες.

Θερμοκρασίες	Καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός (θήλεα/θήλυ) $R_0 = \sum (l_x \times m_x)$	Ενδογενής ρυθμός αύξησης (θήλεα/θήλυ /ημέρα) $\sum (e^{r_m \times x} \times l_x \times m_x) = 1$	Πεπερασμένος ρυθμός αύξησης $\lambda = e^{r_m}$	Μέση διάρκεια γενεάς (ημέρες) $T = \frac{\ln R_0}{r_m}$	Χρόνος διπλασιασμού (ημέρες) $DT = \frac{\ln 2}{r_m}$
	M.O. (95% C.I.)	M.O. (95% C.I.)	M.O. (95% C.I.)	M.O. (95% C.I.)	M.O. (95% C.I.)
20 °C	0,0784 ^a (0,0270 – 0,1398)	-0,0105 ^a (-0,0138 – -0,007)	0,9895 ^a (0,9863 – 0,9921)	249,9 ^a (228,4 – 272,7)	-67,5 ^a (-87,4 – -50,2)
25 °C	11,7665 ^b (9,1185 – 14,6953)	0,0110 ^b (0,0089 – 0,0130)	1,0110 ^b (1,0090 – 1,0130)	225,5 ^a (201,4 – 254,3)	63,9 ^b (53,5 – 78,2)
30 °C	102,0678 ^c (81,1649 – 125,2357)	0,0348 ^c (0,0317 – 0,0378)	1,0354 ^c (1,0322 – 1,0385)	132,8 ^b (125,0 – 142,6)	19,9 ^c (18,4 – 21,9)
32,5 °C	10,7310 ^b (7,0124 – - 14,6619)	0,0205 ^d (0,0173 – 0,0232)	1,0207 ^d (1,0175 – 1,0235)	115,1 ^c (109,9 – 120,2)	34,0 ^d (29,8 – 40,0)

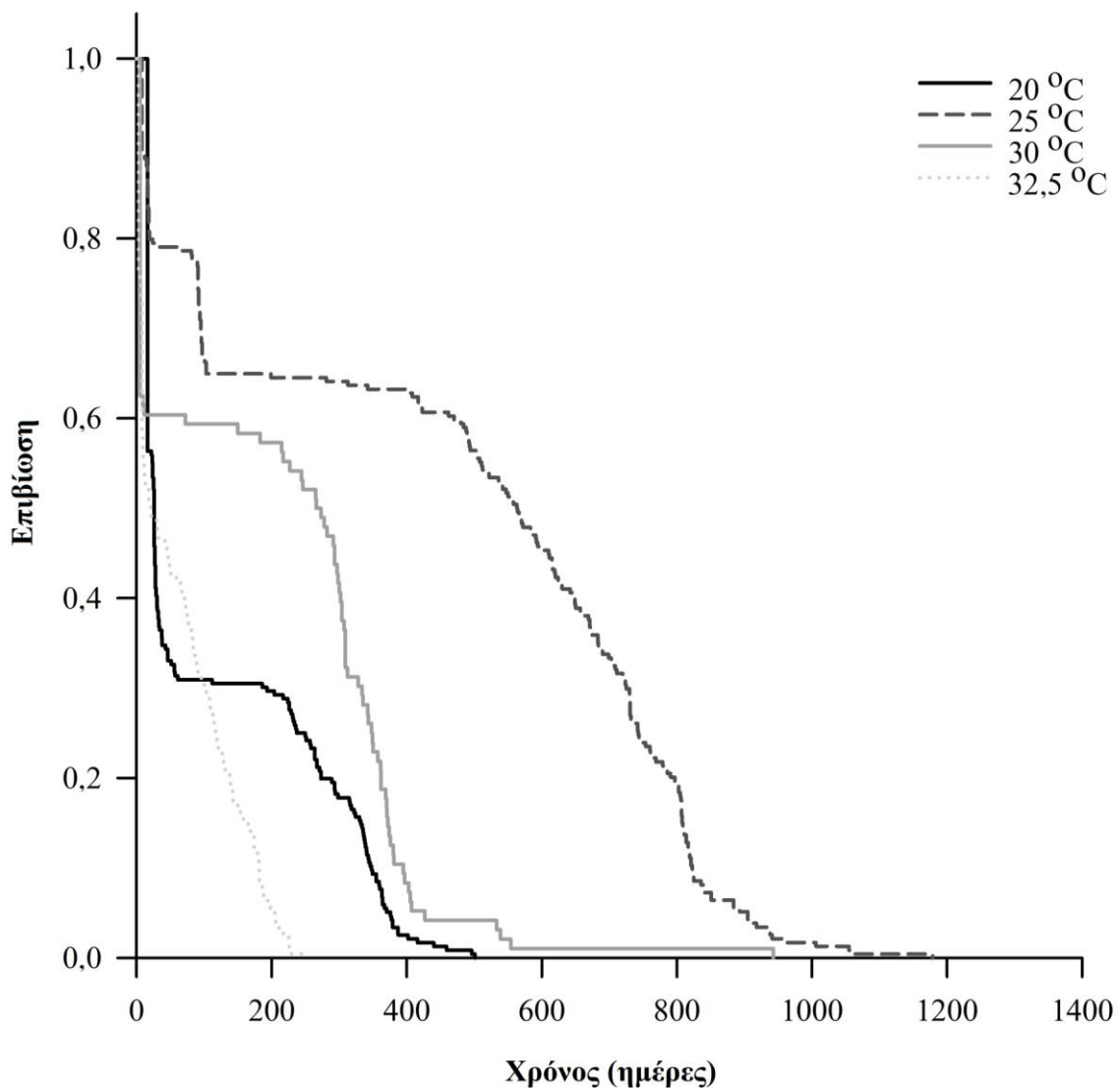
Οι μέσοι όροι των στηλών που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικά

Πίνακας 2.6.2. Χρόνος επιβίωσης σε ημέρες (μέσος όρος, 95% Διάστημα Εμπιστοσύνης = C.I.) του *T. castaneum* υπό διαφορετικές σταθερές θερμοκρασίες. Οι μέσοι όροι που ακολουθούνται από το ίδιο γράμμα εντός της ίδιας στήλης δεν διαφέρουν στατιστικά

Θερμοκρασία	Μέγεθος		
	του δείγματος	M.O.	95% C.I.
20 °C	236	112,1 ^a	94,1 – 130,1
25 °C	234	462,4 ^b	419,5 – 505,2
30 °C	96	206,5 ^c	169,1 – 243,8
32,5 °C	220	64,5 ^d	55,0 – 73,9



Διάγραμμα. 2.6.1. Εκτιμώμενες παράμετροι και προσαρμογή του προτύπου Briere στα δεδομένα του ενδογενούς ρυθμού αύξησης του *T. castaneum*



Διάγραμμα 2.6.2. Καμπύλες επιβίωσης του *T. castaneum* υπό σταθερές θερμοκρασίες.

2.6.5 Συζήτηση

Η θερμοκρασία είναι γνωστή ως κύριος αβιοτικός παράγοντας που επηρεάζει σημαντικά την επιβίωση των εντόμων, την παραγωγή απογόνων τους (π.χ. Messenger, 1959; Neranjo et al., 1990; Frazier et al., 2006; Papanikolaou et al., 2013) και κατά συνέπεια τη δημογραφία τους (π.χ. Kontodimas et al., 2007; Jalali et al., 2009; Peng et al., 2016; Ma et al., 2017). Η παρούσα μελέτη καταδεικνύει την επίδραση των σταθερών θερμοκρασιών στις δημογραφικές παραμέτρους του *T. castaneum*. Ο καθαρός αναπαραγωγικός ρυθμός και ο πεπερασμένος ρυθμός αύξησης στους 20 °C ήταν σημαντικά χαμηλότεροι από το 1 και οι τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης και του χρόνου διπλασιασμού ήταν σημαντικά χαμηλότερες από το μηδέν υποδηλώνοντας ότι οι 20 °C είναι ακατάλληλη

θερμοκρασία για την αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum*. Επομένως, οι πληθυσμοί του εντόμου μπορεί να πεθάνουν σε ενδαιτήματα όπου η θερμοκρασία είναι κοντά ή χαμηλότερη από 20 °C. Τούτο το εύρημα είναι ιδιαίτερα σημαντικό αφού υποδεικνύει ότι οι επεμβάσεις με φυτοφάρμακα κατά του *T. castaneum* δεν είναι απαραίτητες σε εγκαταστάσεις αποθήκευσης όταν οι θερμοκρασίες είναι ≤ 20 °C. Επίσης, η συγκριτική ανάλυση επιβίωσης μεταξύ των εξετασθεισών επιπέδων θερμοκρασίας, αποκάλυψε ότι το *T. castaneum* έδειξε χαμηλό μέσο χρόνο επιβίωσης στους 20 °C, λόγω της υψηλής πρώιμης θνησιμότητας του εντόμου. Το εύρημα είναι σύμφωνο με τους Skourti et al. (2019), οι οποίοι υποστηρίζουν ότι οι θερμοκρασίες περί τους 20 °C είναι επιζήμιες για την ανάπτυξη των ατελών σταδίων του *T. castaneum*. Αντίθετα, τα αποτελέσματα της παρούσης έρευνας έδειξαν ότι οι θερμοκρασίες πλησίον των 30 °C ευνοούν την πληθυσμιακή αύξηση του *T. castaneum*. Πράγματι, το *T. castaneum* έδειξε τις υψηλότερες τιμές του ενδογενούς ρυθμού αύξησης και του πεπερασμένου ρυθμού αύξησης και τη χαμηλότερη τιμή του χρόνου διπλασιασμού στους 30 °C. Τούτο συμβαίνει λόγω της σημαντικά υψηλότερης καθαρής αναπαραγωγικής αξίας που παρουσίασε το έντομο στους 30 °C, αν και ανιχνεύεται μια αρχική θνησιμότητα σύμφωνα με την ανάλυση επιβίωσης. Κατά συνέπεια, υπάρχει κίνδυνος ταχείας αύξησης του πληθυσμού του *T. castaneum* και αυξημένο δυναμικό βλάβης των προσβεβληθέντων αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων, ζητήματα τα οποία καταδεικνύουν την εφαρμογή πρώιμων μέτρων διαχείρισης για την αποφυγή ανεπιθύμητης πληθυσμιακής εξάπλωσης του εντόμου.

Το πρότυπο Briere επέτρεψε μια λεπτομερή περιγραφή του ενδογενούς ρυθμού αύξησης του *T. castaneum* σε σχέση με τη θερμοκρασία. Παρουσιάζεται μια ανοδική τάση μέχρι τους 30,1 °C, όπου φτάνει στη μέγιστη τιμή του, ακολουθούμενος από μείωση, αποκαλύπτοντας την εξάρτηση της παραμέτρου από τη θερμοκρασία. Η αρχική αύξηση οφείλεται στις υψηλότερες τιμές του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού στους 25 και τους 30 °C σε σύγκριση με τους 20 °C και η ακόλουθη μείωση οφείλεται στη χαμηλότερη τιμή του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού στους 32,5 °C σε σύγκριση με τους 30 °C. Οι ελάχιστες και οι μέγιστες θερμοκρασίες για την αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum* υπολογίστηκαν στους 22,2 και 33,2 °C αντιστοίχως, υποδεικνύοντας ότι στο συγκεκριμένο εύρος θερμοκρασιών το έντομο μπορεί να αναπτυχθεί και να αναπαραχθεί επιτρέποντας την αύξηση του πληθυσμού. Αναμένεται ότι το *T. castaneum* μπορεί να προσβάλλει σοβαρά τα αποθηκευμένα προϊόντα στα υπολογισθέντα θερμικά όρια. Επιπροσθέτως, οι θερμοκρασίες περί τους 30 °C είναι βέλτιστες για την αύξηση του πληθυσμού του *T. castaneum*. Τα

αποτελέσματα είναι σύμφωνα με τις θερμικές απαιτήσεις για την ανάπτυξη εντόμου. Χρησιμοποιώντας το πρότυπο Briere, οι Skourti et al. (2019) υπολόγισαν το χαμηλότερο όριο για τη συνολική ανάπτυξη των ατελών σταδίων του *T. castaneum* στους 20,2 °C, το υψηλότερο αναπτυξιακό όριο στους 35,3 °C και τη θερμοκρασία για τον μέγιστο ρυθμό ανάπτυξης στους 31,2 °C. Σε προηγούμενη μελέτη, οι Papanikolaou et al. (2019) ανέφεραν ότι ένα άλλο σημαντικό έντομο αποθηκευμένων προϊόντων, το *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) φτάνει στη μέγιστη τιμή του ενδογενούς ρυθμού αύξησης σε υψηλότερη θερμοκρασία, δηλαδή στους 34,5 °C. Η διαφορά μπορεί να αποδοθεί στις διαφορετικές θερμικές απαιτήσεις ή/και στη διαφορετική θερμική προσαρμογή μεταξύ των δύο ειδών (Kavallieratos et al., 2017b; Papanikolaou et al., 2019; Skourti et al., 2019). Αξίζει να σημειωθεί ότι παρόμοιες διαφορές μπορούν να συμβούν όχι μόνο σε διαειδικό (π.χ. Obrycki and Tauber, 1981), αλλά και σε ενδοειδικό επίπεδο (π.χ. Obrycki et al., 1993; Kavallieratos et al., 2020).

Η μέση διάρκεια γενεάς αντιπροσωπεύει τον μέσο χρόνο αύξησης ενός πληθυσμού κατά παράγοντα ίσο με τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό (Borges et al., 2013; Papanikolaou et al., 2019). Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι δεν υπάρχει σημαντική διαφορά της μέσης διάρκειας γενεάς μεταξύ των 20 και των 25 °C, σε αντίθεση με τον ενδογενή ρυθμό αύξησης, τον πεπερασμένο ρυθμό αύξησης, τον χρόνο διπλασιασμού και τον καθαρό αναπαραγωγικό ρυθμό. Αυτό οφείλεται στην υψηλότερη θνησιμότητα του *T. castaneum* στους 20 °C σε σύγκριση με τους 25 °C και την αξιοσημείωτα χαμηλή τιμή του καθαρού αναπαραγωγικού ρυθμού στους 20 °C. Επιπλέον, η μείωση της τιμής της μέσης διάρκειας γενεάς, καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία, αποδίδεται στην ταχύτερη ανάπτυξη των ατελών σταδίων του *T. castaneum* στους 30 και 32,5 °C σε σύγκριση με τους 20 και 25 °C (Skourti et al., 2019).

Η παρούσα μελέτη παρέχει την πλήρη εργαστηριακή αποτύπωση των διαδικασιών της επιβίωσης και της αναπαραγωγής του *T. castaneum*. Ενισχύει περαιτέρω δε τη γνώση για τον ρυθμό ανάπτυξης του εντόμου, επιτρέποντας τη στοχευμένη εφαρμογή πρακτικών διαχείρισής του (Skourti et al., 2021). Γενικά, η δημογραφία χρησιμεύει ως αποτελεσματικό εργαλείο για την αξιολόγηση της πιθανής αύξησης του πληθυσμού των εντόμων και των φυσικών εχθρών τους στα αγροοικοσυστήματα (π.χ. Kontodimas et al., 2007; Wang et al., 2008; Jalali et al., 2009; Borges et al., 2013; Papanikolaou et al., 2014, 2019; Zeki et al., 2015; Peng et

al., 2016; Ma et al., 2017; Kavallieratos et al., 2019, 2020; Nika et al., 2020). Τα αποτελέσματα της μελέτης δείχνουν ότι η πληθυσμιακή αύξηση του *T. castaneum* επηρεάζεται έντονα από τη θερμοκρασία. Λόγω της οικονομικής σημασίας του *T. castaneum* (Hill, 2003; Rees, 2004; Hagstrum and Subramanyam, 2006, 2009) αναμένεται πως η παρούσα μελέτη θα βελτιώσει τη γνώση περί της βιοοικολογίας του *T. castaneum*. Περαιτέρω μελέτες σχετικές με τη δημογραφία των εντόμων αποθηκών σε διάφορα προϊόντα και επίπεδα θερμοκρασίας αναμένεται να παράσχουν περισσότερες πληροφορίες σχετικές με τη συγκριτική βιολογία τους και τις δυνητικές ζημίες επί των προσβεβλημένων αποθηκευμένων γεωργικών προϊόντων.

2.6.6 Βιβλιογραφία

- Borges, I., Hemptinne, J.L., Soares, A.O., 2013. Contrasting population growth parameters of the aphidophagous *Scymnus nubilus* and the coccidophagous *Nephus reunioni*. *BioControl* 58, 351–357.
- Briere, J.F., Pracros, P., Le Roux, A.Y., Pierre, J.S., 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environ. Entomol.* 28, 22–29.
- Hagstrum, D.W., Subramanyam, Bh., 2006. Fundamentals of Stored-Product Entomology. AACC International, St. Paul, MN. Hagstrum, D.W., Subramanyam, Bh., 2009. Stored-product Insect Resource. AACC International, St. Paul, MN.
- Hill, D.S., 2003. Pests of Storage Foodstuffs and Their Control. Kluwer Academic Publishers, New York, NY.
- Jalali, M.A., Tirry, L., De Clercq, P., 2009. Effects of food and temperature on development, fecundity and life-table parameters of *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *J. Appl. Entomol.* 133, 615–625.
- Kavallieratos, N.G., Karagianni, E.S., Papanikolaou, N.E., 2019. Life history of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on peeled barley, peeled oats and triticale. *J. Stored Prod. Res.* 84, 101515.
- Kavallieratos, N.G., Andrić, G., Golić, M.P., Nika, E.P., Skourti, A., Kljajić, P., Papanikolaou, N.E., 2020. Biological features and population growth of two Southeastern European *Tribolium confusum* Jacquelin du Val (Coleoptera: Tenebrionidae) strains. *Insects* 11, 208.
- Kontodimas, D.C., Milonas, P.G., Stathas, G.J., Economou, L.P., Kavallieratos, N.G., 2007. Life table parameters of the pseudococcid predators *Nephus includens* and *Nephus bisignatus* (Coleoptera: Coccinellidae). *Eur. J. Entomol.* 104, 407–415.
- Ma, L., Wang, X., Liu, Y., Su, M.Z., Huang, G.-H., 2017. Temperature effects on development and fecundity of *Brachmia macroscopa* (Lepidoptera: Gelechiidae). *PLoS One* 12, e0173065.

- Nika, E.P., Kavallieratos, N.G., Papanikolaou, N.E., 2020. Linear and non linear models to explain influence of temperature on life history traits of *Oryzaephilus surinamensis* (L.). Entomol. Gen. 41, 157–167.
- Papanikolaou, N.E., Kavallieratos, N.G., Kondakis, M., Boukouvala, M.C., Nika, E.P., Demiris, N., 2019. Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) at constant temperatures, combining deterministic and stochastic demography. PLoS One 14, e0212182.
- Papanikolaou, N.E., Milonas, P.G., Kontodimas, D.C., Demiris, N., Matsinos, Y.G., 2014. Life table analysis of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) at constant temperatures. Ann. Entomol. Soc. Am. 107, 158–162.
- Peng, L., Miao, Y., Hou, Y., 2016. Demographic comparison and population projection of *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae) reared on sugarcane at different temperatures. Sci. Rep. 6, 31659.
- Rees, D., 2004. Insects of Stored Products. CSIRO Publishing, Collingwood. Skourti, A., Kavallieratos, N.G., Papanikolaou, N.E., 2021. Exposure of *Tribolium castaneum* (Herbst) females to pirimiphos-methyl alters the fitness of their progeny. Environ. Sci. Pollut. Res. 28, 7893–7900.
- Wang, K.Y., Zhang, Y., Wang, H.Y., Xia, X.M., Liu, T.X., 2008. Biology and life table studies of the oriental tobacco budworm, *Helicoverpa assulta* (Lepidoptera: Noctuidae), influenced by different larval diets. Insect Sci. 15, 569–576. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7917.2008.00247.x>. D Product Protection, 27 June – 2 July 2010. Estoril, Portugal, pp. 207–211.
- Zeki, E., Papanikolaou, N.E., Demiris, N., Kontodimas, D.C., 2015. Comparison of the demographic parameters and survival of two phenotypes of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). Eur. J. Entomol. 112, 193–196.
- Arthur, F.H., 1998a. Residual toxicity of cyfluthrin wettable powder against *Tribolium confusum* exposed for short time intervals on treated concrete. J. Stored Prod. Res. 34, 19–25.
- Arthur, F.H., 1998b. Residual studies with cyfluthrin wettable powder: toxicity towards red flour beetles (Coleoptera: Tenebrionidae) exposed for short time intervals on treated concrete. J. Econ. Entomol. 91, 309–319.

- Arthur, F.H., 2008. Efficacy of chlorfenapyr against *Tribolium castaneum* and *Tribolium confusum* (Coleoptera: Tenebrionidae) adults exposed on concrete, vinyl tile, and plywood surfaces. *J. Stored Prod. Res.* 44, 145–151.
- Arthur, F.H., 2009. Efficacy of chlorfenapyr against adult *Tribolium castaneum* exposed on concrete: effects of exposure interval, concentration, and the presence of a food source after exposure. *Insect Sci.*, 16, 157–163.
- Arthur, F.H., Hale, B.A., Starkus, L.A., Gerken, A.R., Campbell, J.F., McKay, T., 2019. Development of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) on rice milling components and by-products: effects of diet and temperature. *J. Stored Prod. Res.* 80, 85–92.
- Borges, I., Hemptinne, J.L., Soares, A.O., 2013. Contrasting population growth parameters of the aphidophagous *Scymnus nubilus* and the coccidophagous *Nephus reunioni*. *BioControl* 58, 351–357.
- Briere, J.F., Pracros, P., Le Roux, A.Y., Pierre, J.S., 1999. A novel rate model of temperature-dependent development for arthropods. *Environ. Entomol.* 28, 22–29.
- Carey, J.R., 1993. *Applied demography for biologists with special emphasis on insects.* Oxford University Press, New York, NY.
- Carey, J.R. 2001 Insect biodemography. *Annu. Rev. Entomol.* 2001, 46, 79–110.
- Cui, K., Zhang, L, He., L., Zhang, Z., Zhang, T., Mu, W., Lin, J., Liu, 2021. Toxicological effects of the fungal volatile compound 1-octen-3-ol against the red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst). *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 208, 111597.
- Dixon, A.F.G., Honěk, A., Keil, P., Kotela, M.A.A., Šizling, A.L., Jarošik, V., 2009. Relationship between the minimum and maximum temperature thresholds for development in insects. *Funct. Ecol.* 23, 257–264.
- Frazier, M.R., Huey, R.B., Berrigan, D., 2006. Thermodynamics Constrains the Evolution of Insect Population Growth Rates: “Warmer Is Better”. *Am. Nat.* 168, 512–520.
- Hagstrum, D.W., Subramanyam, Bh., 2006. *Funtamentals of stored-product entomology.* AACC International, St. Paul, MN.

- Hagstrum, D.W., Subramanyam, Bh., 2009. Stored-product insect resource. AACC International, St. Paul, MN.
- Hill, D.S., 2003. Pests of storage foodstuffs and their control. Kluwer Academic Publishers, New York, NY.
- Howe, R.W., 1956. The effect of temperature and humidity on the rate of development and mortality of *Tribolium castaneum* (Hebst) (Coleoptera: Tenebrionidae). Ann. Appl. Entomol. 44, 356–368.
- Jalali, M.A., Tirry, L, De Clercq, P., 2009. Effects of food and temperature on development, fecundity and life-table parameters of *Adalia bipunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). J. Appl. Entomol. 133, 615–625.
- Kavallieratos, N.G., Athanassiou, C.G., Arthur, F.H., 2017a. Effectiveness of insecticide-incorporated bags to control stored-product beetles. J. Stored Prod. Res. 70, 18–24.
- Kavallieratos, N. G., Athanassiou, C. G., Guedes, R. N. C., Drempela, J. D., & Boukouvala, M. C., 2017b. Invader competition with local competitors: Displacement or co-existence among the invasive khapra beetle, *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae), and two other major storedgrain beetles? Front. Plant Sci. 8, 1837.
- Kavallieratos, N.G., Karagianni, E.S., Papanikolaou, N.E., 2019. Life history of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on peeled barley, peeled oats and triticale. J. Stored Prod. Res. 84, 101515.
- Kavallieratos, N.G., Andrić, G., Golić, M.P., Nika, E.P., Skourti, A., Kljajić, P., Papanikolaou, N.E., 2020. Biological features and population growth of two Southeastern European *Tribolium confusum* Jacquelin du Val (Coleoptera: Tenebrionidae) strains. Insects 11, 208.
- Kontodimas, D.C., Milonas, P.G., Stathas, G.J., Economou, L.P., Kavallieratos, N.G., 2007. Life table parameters of the pseudococcid predators *Nephus includens* and *Nephus bisignatus* (Coleoptera: Coccinellidae). Eur. J. Entomol. 104, 407–415.
- Kumar, R., 2017. Insect pests of stored grain. Biology, behavior, and management strategies. Apple Academic Press, Waretown, NJ.

- Lhaloui, S., Hagstrum, D.W., Keith, D.L., Holtzer, T.O., Ball, H.J., 1988. Combined influence of temperature and moisture on red flour beetle (Coleoptera: Tenebrionidae) reproduction on whole grain wheat. *J. Econ. Entomol.* 81, 488–489.
- Li, L., Arbogast, R.T., 1991. The effect of grain breakage on fecundity, development, survival, and population increase in maize of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae). *J. Stored Prod. Res.* 27, 87–94.
- Ma, L., Wang, X., Liu, Y., Su, M.Z., Huang, G-H., 2017. Temperature effects on development and fecundity of *Brachmia macroscopa* (Lepidoptera: Gelechiidae). *PLoS ONE* 12, e0173065.
- Messenger, P.S., 1959. Bioclimatic studies with insects. *Annu. Rev. Entomol.* 4, 183–206.
- Neranjo, S.E., Gibson, R.L., Walgenbach, D.D., 1990. Development, survival, and reproduction of *Scymnus frontalis* (Coleoptera: Coccinellidae), an imported predator of russian wheat aphid, at four fluctuating temperatures. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 83: 527–531.
- Nika, E.P., Kavallieratos, N.G., Papanikolaou, N.E., 2020. Linear and non-linear models to explain influence of temperature on life history traits of *Oryzaephilus surinamensis* (L.). *Entomol. Gen.* 41, 157–167.
- Obrycki, J.J., Tauber, M.J., 1981. Phenology of three coccinellid species: thermal requirements for development. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 74, 31–36.
- Obrycki, J.J., Orr, D.B., Orr, C.J., Wallendorf, M., Flanders, R.V., 1993. Comparative developmental and reproductive biology of three populations of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Biol. Control* 3, 27–33.
- Papanikolaou, N.E., Kavallieratos, N.G., Kondakis, M., Boukouvala, M.C., Nika, E.P., Demiris, N., 2019. Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) at constant temperatures, combining deterministic and stochastic demography. *PLoS One* 14, e0212182.
- Papanikolaou, N.E., Milonas, P.G., Kontodimas, D.C., Demiris, N., Matsinos, Y.G., 2014. Life table analysis of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae) at constant temperatures. *Ann. Entomol. Soc. Am.* 107, 158–162.

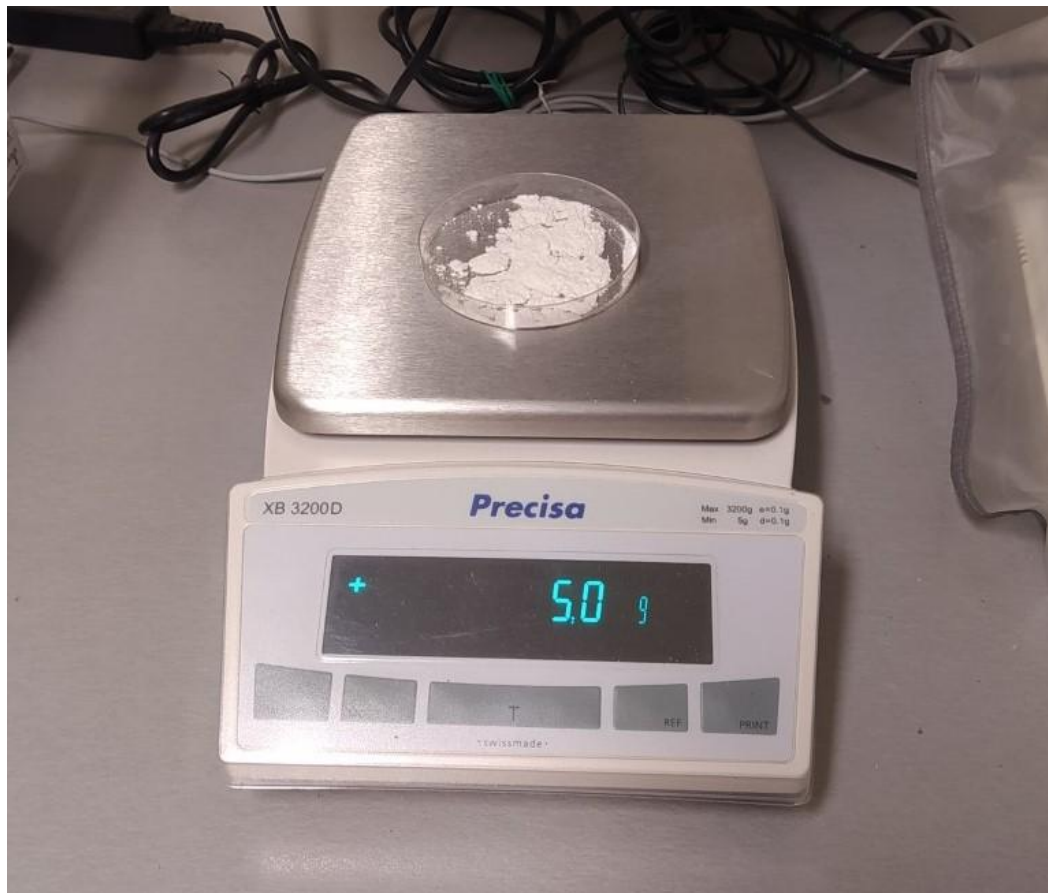
- Papanikolaou, N.E., Milonas, P.G., Kontodimas, D.C., Demiris, N., Matsinos, Y.G., 2013. Temperature-dependent development, survival, longevity, and fecundity of *Propylea quatuordecimpunctata* (Coleoptera: Coccinellidae). *Ann. Entomol. Soc. Am.* 106, 228–234.
- Peng, L., Miao, Y., Hou, Y., 2016. Demographic comparison and population projection of *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae) reared on sugarcane at different temperatures. *Sci. Rep.* 6, 31659.
- R Core Team, 2019. R: a language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <http://www.r-project.org/index.html/> (accessed 06 March 2021).
- Rahimi Namin, F., Naseri, B., Nouri Ganbalani, G., Razmjou, J., 2018. Demographic studies of *Tribolium castaneum* (Coleoptera: Tenebrionidae) on various barley cultivars. *J. Stored Prod. Res.* 79, 60–65.
- Rees, D., 2004. *Insects of stored products*. CSIRO Publishing, Collingwood.
- Roorda, F.A., Schulten, G.G.M., Andriessen, E.A.M., 1982. Laboratory observations on the development of *Tribolium castaneum* Herbst (Col.: Tenebrionidae) on millet at different temperatures and relative humidities. *Z. Angew. Entomol.* 93, 446–452.
- Sayed, R. M., Abdalla, R.S., Ibrahim S.I., Rizk S.A., El Sayed T.S., 2020. Effect of feeding rats on gamma irradiated flour infected with *Tribolium confusum*. *Int. J. Radiat. Res.* 18, 663–672.
- Sehgal, B., Subramanyam, B., Arthur, F.H., Gill, B.S., 2013. Variation in susceptibility of laboratory and field strains of three stored-grain insect species to β -cyfluthrin and chlorpyrifos-methyl plus deltamethrin applied to concrete surfaces. *Pest Manag. Sci.* 70, 576–587.
- Shukla, J.N., Palli, S.R., 2012, Sex determination in beetles: production of all male progeny by parental RNAi knockdown of transformer. *PLoS One* 2, 602.
- Skourti, A., Kavallieratos, N.G., Papanikolaou, N.E., 2019. Laboratory evaluation of development and survival of *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) under constant temperatures. *J. Stored Prod. Res.* 83, 305–310.

- Skourti, A., Kavallieratos, N.G., Papanikolaou, N.E., 2020. Suitability of semolina, cracked wheat and cracked maize as feeding commodities for *Tribolium castaneum* (Herbst; Coleoptera: Tenebrionidae). *Insects* 11, 99.
- Skourti, A., Kavallieratos, N.G., Papanikolaou, N.E., 2021. Exposure of *Tribolium castaneum* (Herbst) females to pirimiphos-methyl alters the fitness of their progeny. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 28, 7893–7900.
- Systat Software, 2017. SigmaPlot for windows 14.0. Systat Software, Chicago, IL.
- Wang, K.Y., Zhang, Y, Wang, H.Y., Xia, X.M., Liu, T.X., 2008. Biology and life table studies of the oriental tobacco budworm, *Helicoverpa assulta* (Lepidoptera: Noctuidae), influenced by different larval diets. *Insect Sci.* 15: 569–576.
- White, G.G., 1987. Effects of temperature and humidity on the rust-red flour beetle, *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae), in wheat-grain. *Aust. J. Zool.* 35, 43–59.
- Xue, M., Subramanyam, Bh, Shi, Y.C., Campbell, J., Hartzler, M., 2010. Development, relative retention, and fecundity of *Tribolium castaneum* (Herbst) on different starches. In: *Proceedings of the 10th International Working Conference on Stored Product Protection*, 27 June – 2 July 2010. Estoril, Portugal, pp. 207–211.
- Zeki, E., Papanikolaou, N. E., Demiris, N., Kontodimas, D. C., 2015. Comparison of the demographic parameters and survival of two phenotypes of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Eur. J. Entomol.* 112, 193–196.

2.7 Εικόνες



Εικ. 2.1 Εκτροφή του *T. castaneum* στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Γεωργικής Ζωολογίας και Εντομολογίας του Γεωπονικού Πανεπιστημίου Αθηνών



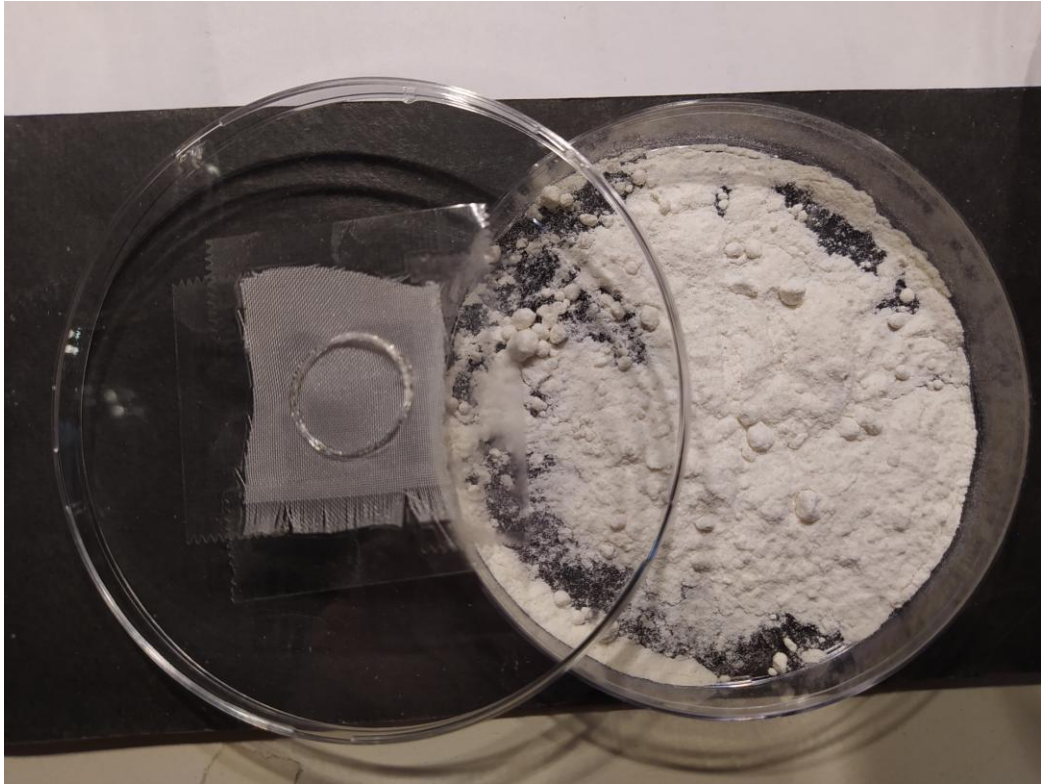
Εικ. 2.2 Τρυβλίο Petri διαμέτρου 8 cm, ύψους 1 cm, με προσθήκη 5 gr αλεύρου



2.3 Αποξήρανση αλεύρου σε κλίβανο



2.4 Δημιουργία σπής κατακιών προς αερισμό των τρυβλίων



Εικ. 2.5 Τρυβλίο Petri με καπάκι το οποίο φέρει κεντρικό κυκλικό άνοιγμα διαμέτρου 1,50 cm



Εικ. 2.6 Γυάλινο βάζο με κοσκινισμένο αλεύρι και τέλεια άτομα *T. castaneum* για παραγωγή και απομόνωση ωών



Εικ. 2.7 Διπλό κόσκινο για τον διαχωρισμό των ωών *T. castaneum*



Εικ. 2.8 Απομονωμένα ωά *T. castaneum*



Εικ. 2.9 Θάλαμοι ελεγχόμενων συνθηκών, κλίβανος, καταψύκτης



Εικ. 2.10 Θάλαμοι ελεγχόμενων συνθηκών και κλίβανος



Εικ. 2.11 Καθημερινός έλεγχος μέσω στερεοσκοπίου



Εικ. 2.12 Νεκρά ωά *T. castaneum*



Εικ. 2.13 Παρατήρηση προνύμφης *T.castaneum*



Εικ. 2.14 Εισαγωγή τρυβλίων εντός θαλάμου ελεγχόμενων συνθηκών



Εικ. 2.15 Καθημερινές καταγραφές των πειραματικών δεδομένων



Εικ. 2.16 Νεκρή προνύμφη *T. castaneum*



Εικ. 2.17 Κόσκινα για τον σκοπό των πειραμάτων



Εικ. 2.18 Ζεύγος τελείων απόμων *T. castaneum* με τροφή σπασμένο σιτάρι



Εικ 2.19 Προσθήκη σκυροδέματος στα τρυβλία



Εικ. 2.20 Τρυβλίο με σκυρόδεμα



Εικ. 2.21 Παρασκευή εντομοκτόνου υδατικού διαλύματος προς εφαρμογή



2.22 Ψεκασμός τρυβλίων με εντομοκτόνες ουσίες



Εικ. 2.23 Πάγκος και εργαλεία ψεκασμού



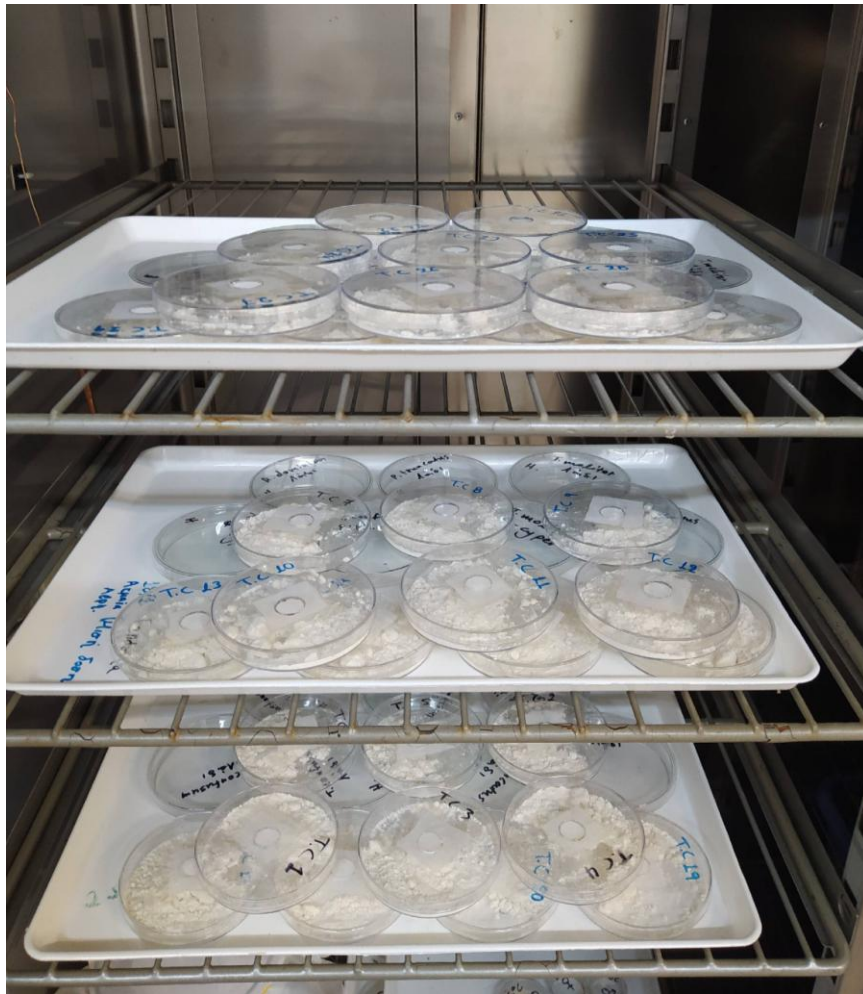
Εικ. 2.24 Αερογράφοι για κάθε ομάδα εντομοκτόνων και τον μάρτυρα



Εικ. 2.25 Τέλεια άτομα *T. castaneum* επί ψεκασμένου σκυροδέματος



2.26 Τρυβλία πειραματικής διαδικασίας σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών



Εικ. 2.27 Πειραματικά τρυβλία σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών



2.28 Πάγκος ψεκασμού



2.29 Ψεκασμένα τρυβλία έτοιμα προς εισαγωγή τους σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών



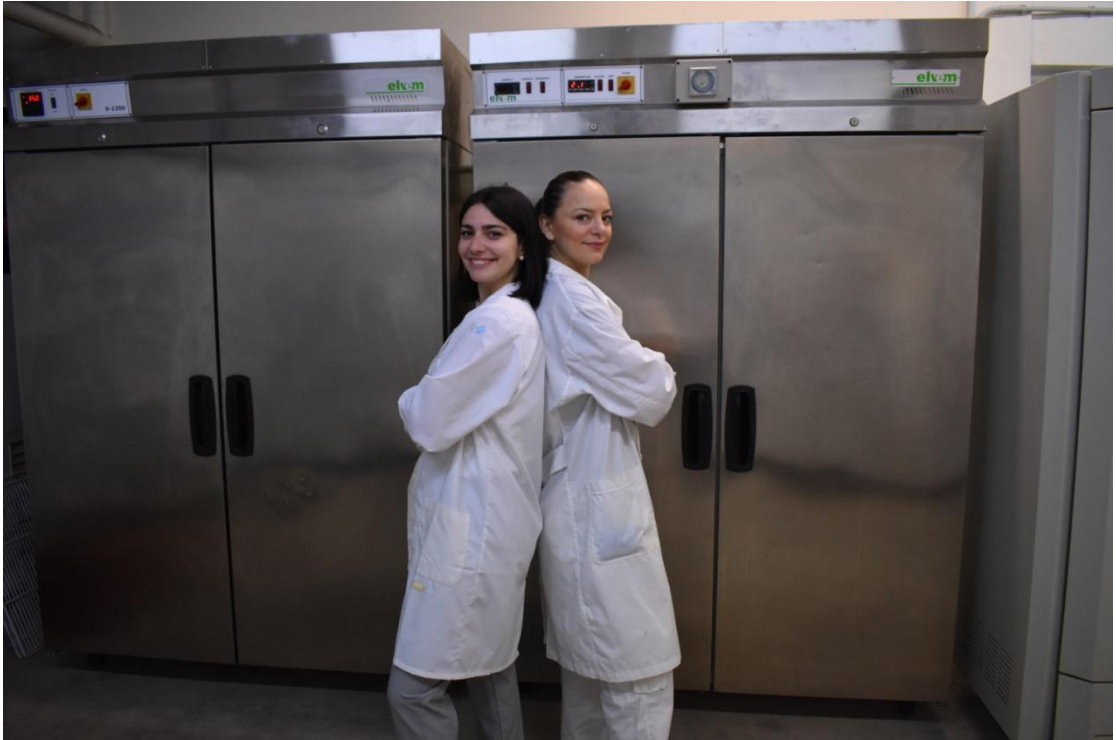
2.30 Είδη ατομικής προστασίας για τους ψεκασμούς



2.31 Εντομοτροφείο



2.32 Συντήρηση εκτροφών στον χώρο του εντομοτροφείου



2.32 Ανθρώπινο δυναμικό εργαστηρίου

3. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η μελέτη παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη βιοοικολογία και την διαχείριση του *Tribolium castaneum*. Σύμφωνα με τα ευρήματά της, τόσο η θερμοκρασία όσο και το είδος της τροφής ήταν καθοριστικά για τη αύξηση του πληθυσμού και τη συνολική βιολογική κατάσταση του *T. castaneum*. Μέσω της δημογραφικής προσέγγισης κατέστη δυνατή η αποτελεσματική αξιολόγηση της καταλληλότητας του σιμιγδαλιού, του σπασμένου σιταριού και του σπασμένου αραβοσίτου ως τροφών για την ανάπτυξη του *T. castaneum*. Ωστόσο, απαιτούνται περαιτέρω δημογραφικές μελέτες με τη δοκιμή φυσικών και εργαστηριακών πληθυσμών του *T. castaneum*, συνδυασμών του με άλλα έντομα αποθηκών επί ποικιλιών/υβριδίων δημητριακών σε διαφορετικά επίπεδα θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας, προκειμένου να έρθει στο φως στο σύνθετο ζήτημα της ανάπτυξης του εντόμου (Kriticos et al., 2013; Zeki et al., 2015; Douma et al., 2016; Peng et al., 2016; Ma et al., 2017; Papanikolaou et al., 2019; Kavallieratos et al., 2019, 2020; Nika et al., 2020). Τα προϊόντα τα οποία ενισχύουν την πληθυσμιακή αύξηση του *T. castaneum* θα πρέπει να ελέγχονται πολύ προσεκτικά στο στάδιο μετά τη συγκομιδή και κατά την αποθήκευση ώστε να αποφευχθεί ο γρήγορος αποικισμός, η περαιτέρω διασπορά του εντόμου και οι συνακόλουθες απώλειες της τροφής. Παρόμοια προσοχή θα πρέπει να δοθεί στα γεωργικά προϊόντα τα οποία δεν ευνοούν την προσβολή από το *T. castaneum*, καθώς μπορούν να αποτελέσουν μέσα επιβίωσης και διασποράς του εντόμου ή να προσβληθούν σοβαρά από άλλα είδη εντόμων αποθηκών. Τα βιολογικά χαρακτηριστικά και οι δημογραφικές παράμετροι του *T. castaneum* μπορούν να ενσωματωθούν ως ακόλουθο βήμα σε πρότυπα τα οποία αξιολογούν τη δυναμική του πληθυσμού και την αποτελεσματική αναπαραγωγή του εντόμου.

Επιπλέον πληροφορίες παρήχθησαν όταν το *T. castaneum* εξετέθη σε διάφορες εντομοκτόνες δραστικές ουσίες όπως το pirimiphos-methyl, το chlorfenapyr και το spinosad. Αρχικά, δοκιμάστηκε η υπόθεση αν η γονική έκθεση στο pirimiphos-methyl επηρεάζει την ικανότητα των απογόνων χρησιμοποιώντας τη δημογραφική ανάλυση. Η μέθοδος είναι κατάλληλη για την εκτίμηση της επιβίωσης και της αναπαραγωγής των εντόμων με την πάροδο του χρόνου. Επίσης, τούτη η προσέγγιση επέτρεψε να υπολογιστούν διάφορες παράμετροι προκειμένου να διερευνηθεί η πιθανή αύξηση του πληθυσμού υπό την επίδραση του pirimiphos-methyl. Ακόμα κι αν το εντομοκτόνο δεν σκοτώσει τον εκτεθέντα γονικό πληθυσμό *T. castaneum*, ως συνέπεια της άμεσης τοξικότητας ή αργότερα λόγω της καθυστερημένης θνησιμότητας (Lagisz et al., 2010), φάνηκε ότι η παραγωγή των

απογόνων του εντόμου θα υποστεί σοβαρές επιπτώσεις οι οποίες θα μπορούσαν να οδηγήσουν στην κατάρρευση των αποικιών του. Η έκθεση των ωών και των νεοεκκολαφθεισών προνυμφών *T. castaneum* στο chlorfenapyr είχε ως αποτέλεσμα να μην ολοκληρώσουν την ανάπτυξή τους καθιστώντας τα ως ευάλωτα στάδια για την αποτελεσματική διαχείριση του εντόμου. Όταν εξετέθησαν τα τέλεια θηλυκά άτομα *T. castaneum* στο chlorfenapyr, η καμπύλη επιβίωσης, τα βιολογικά χαρακτηριστικά και οι παράμετροι του πίνακα ζωής του εντόμου δεν διέφεραν σημαντικά εν συγκρίσει με τον μάρτυρα. Η δημογραφική προσέγγιση έδωσε επίσης πληροφορίες για τις έμμεσες επιδράσεις του spinosad στους απογόνους των τελείων θηλυκών ατόμων *T. castaneum* βάσει των ποσοστών των γεννήσεων και θανάτων τους. Βρέθηκε ότι η έκθεσή τους δεν επηρέασε τη φυσική κατάσταση των απογόνων τους παρά το γεγονός ότι μειώθηκε ο πληθυσμός τους σε σχέση με τους απογόνους των οποίων τα τέλεια θηλυκά άτομα δεν είχαν υποστεί την εφαρμογή του chlorfenapyr. Δεδομένου ότι το pirimiphos-methyl, το chlorfenapyr και το spinosad είναι εγκεκριμένα εντομοκτόνα για την εφαρμογή τους στις εγκαταστάσεις αποθηκείωσης των γεωργικών προϊόντων αναμένεται ότι περαιτέρω μελέτες θα λάβουν υπ' όψιν την ακολουθήσασα δημογραφική προσέγγιση για την διερεύνηση της άμεσης και της έμμεσης δράσης επιπλέον εγκεκριμένων ή νέων εντομοκτόνων έναντι του *T. castaneum* και άλλων ειδών των αποθηκευμένων προϊόντων.

3.1 Βιβλιογραφία

- Kavallieratos, N.G., Karagianni, E.S., Papanikolaou, N.E., (2019). Life history of *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae) on peeled barley, peeled oats and triticale. *J. Stored Prod. Res.* 84: 101515.
- Kavallieratos, N.G., Andrić, G., Golić, M.P., Nika, E.P., Skourti, A., Kljajić, P., Papanikolaou, N.E., (2020). Biological features and population growth of two Southeastern European *Tribolium confusum* Jacquelin du Val (Coleoptera: Tenebrionidae) strains. *Insects* 11: 208.
- Kriticos, D.J., Venette, R.C., Baker, R.H.A., Brunel, S., Koch, H., Rafoss, T., Van der Werf, W., Worner, S.P., (2013). Invasive alien species in the food chain : advancing risk assessment models to address climate change, economics and uncertainty. *NeoBiota* 7: 1e7.
- Lagisz, M., Wolff, K., Port, G., (2010). Time matters: delayed toxicity of pirimiphos-methyl on *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera: Tenebrionidae) and its effects on efficacy estimation of residual treatments. *J Stored Prod Res* 46:161–165.
- Ma, L., Wang, X., Liu, Y., Su, M.Z., Huang, G.H., (2017). Temperature effects on development and fecundity of *Brachmia macroscopa* (Lepidoptera: Gelechiidae). *PLoS One* 12: e0173065.
- Nika, E.P.; Kavallieratos, N.G.; Papanikolaou, N.E., (2020). Developmental and reproductive biology of *Oryzaephilus surinamensis* (L.) (Coleoptera: Silvanidae) on seven commodities. *J. Stored Prod. Res.*, 87: 101612.
- Peng, L., Miao, Y., Hou, Y., (2016). Demographic comparison and population projection of *Rhynchophorus ferrugineus* (Coleoptera: Curculionidae) reared on sugarcane at different temperatures. *Sci. Rep.* 6: 31659.
- Douma, J.C., Pautasso, M., Venette, R.C., Pobinet, C., Hemerik, L., Mourits, M.C.M., Schans, J., Van der Werf, W., (2016). Pathway models for analysing and managing the introduction of alien plant pests - an overview and categorization. *Ecol. Model.* 339: 58e67.

Papanikolaou, N.E., Kavallieratos, N.G., Kondakis, M., Boukouvala, M.C., Nika, E.P., Demiris, N., (2019). Elucidating fitness components of the invasive dermestid beetle *Trogoderma granarium* combining deterministic and stochastic demography. *PLoS One* 14: e0212182.

Zeki, E.; Papanikolaou, N.E.; Demiris, N.; Kontodimas, D.C., (2015). Comparison of the demographic parameters and survival of two phenotypes of *Harmonia axyridis* (Coleoptera: Coccinellidae). *Eur. J. Entomol.* 112: 193–196.



**ΓΕΩΠΟΝΙΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΣΧΟΛΗ ΑΓΡΟΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΥΠΟΔΟΜΩΝ & ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ
ΤΜΗΜΑ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ ΦΥΤΙΚΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΓΕΩΡΓΙΚΗΣ ΖΩΟΛΟΓΙΑΣ & ΕΝΤΟΜΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΑΘΗΝΑ
2022**

