



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΓΕΩΠΟΝΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Τμήμα Γεωπονίας Φυτικής Παραγωγής & Αγροτικού
Περιβάλλοντος

Εργαστήριο Εντομολογίας και Γεωργικής Ζωολογίας

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

**«Αξιολόγηση της ανάπτυξης, της απόδοσης και της παραγωγής
υπολειμμάτων των προνυμφών του *Tenebrio molitor* σε διαφορετικά
υποστρώματα διατροφής »**



Γιαβάσογλου Σεραφείμ

Επιβλέπων καθηγητής: Αθανασίου Χρήστος, Καθηγητής Εντομολογίας

Βόλος, 2025

«Αξιολόγηση της ανάπτυξης, της απόδοσης και της παραγωγής υπολειμμάτων των
προνυμφών του *Tenebrio molitor* σε διαφορετικά υποστρώματα διατροφής»

“Larval development and frass production in *Tenebrio molitor* larvae reared on different
feeding substrates”

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή

Αθανασίου Χρήστος (Επιβλέπων), Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και
Αγροτικού περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Παπαδόπουλος Νικόλαος (Μέλος), Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής Παραγωγής και
Αγροτικού περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Καρκάνης Ανέστης (Μέλος), Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Γεωπονίας, Φυτικής
Παραγωγής και Αγροτικού περιβάλλοντος, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Το παρόν κείμενο υπογράφεται από το φοιτητή που εκπόνησε την Π.Ε. *«Βεβαιώνω ότι είμαι συγγραφέας αυτής της πτυχιακής εργασίας, η οποία εκπονήθηκε σύμφωνα με τον Κανονισμό Εκπόνησης Πτυχιακής Εργασίας του ΤΓΦΠΑΠ»*

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου διατριβής κ. Αθανασίου Χρήστο που μου έδωσε την ευκαιρία να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς επίσης και την κ. Σουλιώτη Παναγιώτα για την καθοδήγηση και την αμέτρητη βοήθεια που μου πρόσφερε καθ' όλη την διάρκεια εκπόνησης του πειράματος μου.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους καθηγητές κ. Παπαδόπουλο Νικόλαο και τον κ. Καρκάνη Ανέστη για την συμμετοχή τους στην τριμελή συμβουλευτική επιτροπή.

Τέλος, Θέλω να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένεια μου για την αδιάκοπη ψυχολογική στήριξη που μου πρόσφεραν από την αρχή μέχρι και την ολοκλήρωση της πτυχιακής μου διατριβής.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	6
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	7
ABSTRACT.....	8
ΕΙΣΑΓΩΓΗ	9
1.1 Ο ρόλος των πρωτεϊνών στη διατροφή	9
1.1.1 Ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών πηγών πρωτεΐνης	9
1.1.2. Εναλλακτικές πηγές πρωτεΐνης.....	10
1.2 Εδώδιμα έντομα	13
1.2.1 Εγκεκριμένα είδη εντόμων στην Ευρωπαϊκή Ένωση	14
1.2.2 Θρεπτική αξία εδώδιμων εντόμων.....	15
1.2.3 Ασφάλεια κατανάλωσης εδώδιμων εντόμων.....	16
1.3 <i>Tenebrio molitor</i>	17
1.3.1 Κύκλος Ζωής <i>T.molitor</i>	17
1.3.2 Συνθήκες ανάπτυξης και θρεπτικά υποστρώματα	18
1.3.3 Αξιοποίηση του frass ως εδαφοβελτιωτικό	18
1.4 Κυκλική οικονομία και εδώδιμα έντομα	19
1.5 Φυλές του είδους <i>Tenebrio molitor</i>	20
1.6 Σκοπός.....	20
ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ.....	22
2.1 Συνθήκες Εκτροφής <i>Tenebrio molitor</i>	22
2.2 Πείραμα.....	23
2.2.1 Συλλογή Προνυμφών και Σχεδιασμός Πειραμάτων	23
2.2.2 Βιοδοκιμή Ι	25
2.2.3 Βιοδοκιμή ΙΙ.....	25
2.3 Δείκτες αξιοποίησης της τροφής	27
2.4 Στατιστική Ανάλυση	27

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	28
3.1 Βιοδοκιμή I: Εκτίμηση ανάπτυξης προνυμφών σε τέσσερα διαφορετικά υποστρώματα διατροφής.....	28
3.2 Βιοδοκιμή II: Εκτίμηση ανάπτυξης προνυμφών τεσσάρων φυλών στην ίδια δίαιτα	34
ΣΥΖΗΤΗΣΗ	39
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	43

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Ζύγισμα ενηλίκων <i>T. molitor</i>	24
Εικόνα 2: Ενήλικα <i>T. molitor</i> σε δίσκο εκτροφής για ωστοκία.....	24
Εικόνα 3: Κόσκινα 850 και 500 μm	24
Εικόνα 4: Ομογενοποίηση προνυμφών.....	24
Εικόνα 5: Δίσκος εκτροφής με 10000 προνύμφες <i>T. molitor</i> και άγαρ.....	26
Εικόνα 6: Δειγματοληπτικές μετρήσεις προνυμφών <i>T. molitor</i> σε θρεπτικό υπόστρωμα λούπινου.....	26
Εικόνα 7: Ζυγαριά ακριβείας.....	26
Εικόνα 8: Θάλαμος ελεγχόμενων συνθηκών για την εκτροφή του <i>T. molitor</i>	26

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα πτυχιακή εργασία διερευνά την εκτροφή του εδώδιμου εντόμου *Tenebrio molitor* σε συνθήκες μεγάλης κλίμακας, με στόχο την αξιολόγηση της απόδοσης και της παραγωγής υπολειμμάτων (frass) σε διαφορετικά υποστρώματα διατροφής, καθώς και τη σύγκριση φυλών από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Για την αξιολόγηση αυτών των δύο παραμέτρων πραγματοποιήθηκαν δύο ξεχωριστές βιοδοκιμές. Στην πρώτη βιοδοκιμή, αξιολογήθηκε η ανάπτυξη των προνυμφών σε τέσσερις δίαιτες: λούπινο, βρώμη, πίτυρο ρυζιού και πίτυρο σίτου (μάρτυρας), ενώ στη δεύτερη, συγκρίθηκαν τέσσερις φυλές (Ελλάδα, Ιταλία, Γερμανία, Αμερική) εκτρεφόμενες σε πίτυρο σίτου.

Για την υλοποίηση των βιοδοκιμών τοποθετήθηκαν 10.000 προνύμφες σε ειδικούς δίσκους εκτροφής μαζί με το αντίστοιχο διατροφικό υπόστρωμα, ενώ ως πηγή υγρασίας χρησιμοποιήθηκε γέλη άγαρ. Οι μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν ήταν δειγματοληπτικές, λόγω του μεγάλου αριθμού προνυμφών, και επαναλαμβάνονταν κάθε 14 ημέρες μέχρι το 10% των προνυμφών να μεταμφιεστούν σε νύμφες. Για κάθε μεταχείριση υπήρχαν έξι επαναλήψεις, ενώ σε κάθε μέτρηση γίνονταν δύο δειγματοληψίες ανά επανάληψη. Οι παράμετροι που καταγράφηκαν περιλάμβαναν το ατομικό βάρος των προνυμφών, την επιβίωση και την τελική παραγωγή frass. Επιπλέον, υπολογίστηκαν δείκτες αξιολόγησης της μετατρεψιμότητας της τροφής, όπως οι FCR, ECI και SGR.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το πίτυρο ρυζιού οδήγησε σε μεγαλύτερο ατομικό βάρος των προνυμφών και σε αυξημένη παραγωγή frass, ενώ το πίτυρο σίτου παρουσίασε το υψηλότερο ποσοστό επιβίωσης και την καλύτερη αξιοποίηση της τροφής. Τα δύο αυτά υποστρώματα αναδεικνύονται ως ιδιαίτερα υποσχόμενες επιλογές για την εκτροφή του *T. molitor* σε βιομηχανική κλίμακα. Όσον αφορά τη δεύτερη βιοδοκιμή, δεν παρατηρήθηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές ανάμεσα στις φυλές. Παρ' όλα αυτά, οι φυλές από την Ιταλία και την Ελλάδα φαίνεται να αποτελούν πιο αποδοτικές επιλογές για μαζική παραγωγή προνυμφών *T. molitor*. Συμπερασματικά, η επιλογή κατάλληλου υποστρώματος και φυλής επηρεάζει σημαντικά την ανάπτυξη του *T. molitor*, ενώ η αξιοποίηση γεωργικών παραπροϊόντων ως υποστρώματα συμβάλλει στην κυκλική οικονομία και προωθεί βιώσιμες πρακτικές εκτροφής.

Λέξεις κλειδιά: παραπροϊόντα, φυλές *T. molitor*, ανάπτυξη προνυμφών

ABSTRACT

This undergraduate thesis investigates the large-scale rearing of the edible insect *Tenebrio molitor*, aiming to evaluate its performance and frass production on different dietary substrates, as well as to compare strains from various geographical regions. To assess these two parameters, two separate bioassays were conducted. In the first bioassay, larval development was evaluated on four different diets: lupin, oats, rice bran, and wheat bran (used as the control). In the second bioassay, four strains (originating from Greece, Italy, Germany, and the USA) were compared, all reared on wheat bran.

For the implementation of the bioassays, 10,000 larvae were placed in specialized rearing trays along with the respective substrate, while agar gel was used as a moisture source. Due to the large number of larvae, sampling-based measurements were conducted every 14 days until 10% of the larvae pupated. Each treatment included six replications, and two samples were taken per replication during each measurement. The parameters recorded included individual larval weight, survival rate, and final frass production. Additionally, indices related to feed conversion efficiency, such as FCR, ECI, and SGR, were calculated.

The results showed that rice bran led to the highest larval weight and increased frass production, while wheat bran resulted in the highest survival rate and the most efficient feed utilization. These two substrates emerge as particularly promising options for industrial-scale *T. molitor* rearing. Regarding the second bioassay, no statistically significant differences were observed between strains. However, the Italian and Greek strains appeared to be more productive options for mass larval production. In conclusion, the choice of substrate and strain significantly affects *T. molitor* development, while the use of agricultural by-products as rearing substrates supports circular economy principles and promotes sustainable farming practices.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ο ρόλος των πρωτεϊνών στη διατροφή

Η πρωτεΐνη αποτελεί ένα από τα τέσσερα βασικά μακροθρεπτικά συστατικά απαραίτητα για τη λειτουργία του ανθρώπινου οργανισμού, έχοντας καθοριστικό ρόλο στη δομή, τη λειτουργία και τη ρύθμιση των ιστών και των οργάνων (Volpi et al., 2013). Οι δομικές μονάδες των πρωτεϊνών είναι τα αμινοξέα, τα οποία διακρίνονται σε απαραίτητα και μη απαραίτητα. Τα απαραίτητα αμινοξέα δεν μπορούν να παραχθούν από το ανθρώπινο σώμα και, συνεπώς, πρέπει να προσλαμβάνονται μέσω της διατροφής (Wu, 2009). Αντίθετα, τα μη απαραίτητα αμινοξέα μπορούν να συντεθούν από το σώμα μέσω των φυσιολογικών μεταβολικών διαδικασιών, κυρίως με τη διάσπαση των πρωτεϊνών.

Οι διατροφικές απαιτήσεις σε πρωτεΐνη διαφέρουν από άτομο σε άτομο και εξαρτώνται από παράγοντες όπως η ηλικία, το φύλο, η φυσική δραστηριότητα και η γενική κατάσταση υγείας (FAO/WHO/UNU, 2007). Για υγιείς ενήλικες άνω των 19 ετών, η συνιστώμενη ημερήσια πρόσληψη πρωτεΐνης κυμαίνεται μεταξύ 10% και 35% των συνολικών ημερήσιων θερμίδων (U.S. Department of Health and Human Services, 2020). Στις ηλικίες άνω των 75 ετών, οι θερμιδικές ανάγκες μειώνονται λόγω της μειωμένης μυϊκής μάζας και της ελάττωσης της φυσικής δραστηριότητας, καθιστώντας απαραίτητη την επαρκή πρόσληψη πρωτεΐνης (1–1.2 g/kg σωματικού βάρους/ημέρα) (Bauer et al., 2013). Αντίστοιχα, τα παιδιά και οι έφηβοι (0–18 ετών) έχουν αυξημένες ανάγκες σε πρωτεΐνη, λόγω της σωματικής και γνωστικής ανάπτυξης. Η πρωτεΐνη είναι απαραίτητη για τη δημιουργία και ανάπλαση μυϊκών ιστών, την παραγωγή ενζύμων, ορμονών και αντισωμάτων, καθώς και για την ενίσχυση του ανοσοποιητικού συστήματος (Mariotti & Gardner, 2019).

1.1.1 Ανάγκη εύρεσης εναλλακτικών πηγών πρωτεΐνης

Ο σημερινός παγκόσμιος πληθυσμός ανέρχεται περίπου στα 8 δισεκατομμύρια, σύμφωνα με την καταγραφή του Νοεμβρίου 2022, ενώ εκτιμάται ότι θα συνεχίσει να αυξάνεται (United Nations, 2022). Η πληθυσμιακή αυτή αύξηση έχει σαν αποτέλεσμα την εντατικοποίηση της κτηνοτροφίας και της γεωργίας, προκαλώντας σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον, όπως είναι η αποψίλωση των δασών για την εξασφάλιση καλλιεργήσιμης γης, η υπερκατανάλωση υδάτινων πόρων για την κάλυψη των αναγκών ανθρώπων και ζώων και η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (FAO, 2017; Khanashyam et al., 2024). Παράλληλα, η

αυξανόμενη ζήτηση για ζωική πρωτεΐνη συμβάλει στην άνοδο του κόστους της, ενώ επιδεινώνει τη διατροφική ανασφάλεια και εντείνει τους περιβαλλοντικούς προορισμούς. Σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τροφίμων και Γεωργίας (FAO), οι κίνδυνοι που προβλέπεται να αντιμετωπίσει άμεσα ο πλανήτης, λόγω της αύξησης του παγκόσμιου πληθυσμού και των επιπτώσεων αυτής, είναι η πείνα και ο υποσιτισμός (FAO, 2009; Μπούχελος, 2015). Προκειμένου να μετριαστούν οι αρνητικές επιπτώσεις, τα Ηνωμένα Έθνη έθεσαν δεκαεφτά στόχους βιώσιμης ανάπτυξης, συμπεριλαμβανομένων της μείωσης της πείνας, της διασφάλισης της βιώσιμης κατανάλωσης και παραγωγής τροφίμων, καθώς επίσης την προστασία των δασών και της βιοποικιλότητας. Για να επιτευχθούν αυτοί οι στόχοι απαιτείται μετάβαση σε πηγές πρωτεΐνης που επιβαρύνουν λιγότερο το περιβάλλον, είναι πιο ασφαλείς για την υγεία του καταναλωτή και πιο βιώσιμες κοινωνικά και οικονομικά. Ως εκ τούτου η σημασία των εναλλακτικών πηγών πρωτεΐνης αποτελεί μια προσπάθεια αντικατάστασης των κοινών πηγών ζωικής προέλευσης με άλλες πηγές με λιγότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις και πιο υγιεινές για τον άνθρωπο και τα ζώα. (Hadi & Brightwell, 2021).

1.1.2. Εναλλακτικές πηγές πρωτεΐνης

Οι εναλλακτικές πηγές πρωτεΐνης μπορούν να αποτελέσουν έναν πιο βιώσιμο και αποτελεσματικό τρόπο για την καταπολέμηση της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης ζωικών πρωτεϊνών (Jafarzadeh et al.2024). Από τις σημαντικότερες εναλλακτικές πηγές πρωτεΐνης είναι τα όσπρια, τα μικροφύκη, η μυκοπρωτεΐνη και τα έντομα. Παρά το γεγονός ότι είναι λιγότερο δημοφιλής σε σχέση με τα παραδοσιακά ζωικά προϊόντα, η αποδοχή από τους καταναλωτές φαίνεται να αυξάνεται σταθερά μαθαίνοντας τα πολυάριθμα οφέλη τους (Zhong et al.2022)

Πρωτεΐνες φυτικής προέλευσης:

Τα τελευταία χρόνια, οι καταναλωτές έχουν ενσωματώσει στη διατροφή τους πιο εντατικά προϊόντα φυτικής προέλευσης. Αυτό συμβαίνει, τόσο για τις θετικές και ευεργετικές επιδράσεις που προσφέρουν στην υγεία του ανθρώπου όσο και για την προσπάθεια μείωσης κατανάλωσης κρέατος, κυρίως για περιβαλλοντικούς λόγους, αλλά και για λόγους υγείας (Kołodziejczak et al., 2022). Μία από τις σημαντικότερες κατηγορίες φυτικών πρωτεϊνών αποτελούν τα όσπρια της οικογένειας Fabaceae (Rajhi et al., 2021). Τα σημαντικότερα είδη της συγκεκριμένης οικογένειας είναι τα ρεβίθια (*Cicer arietinum*), οι φακές (*Lens culinaris*), τα φασόλια (*Phaseolus vulgaris*), τα λούπινα (*Lupinus spp.*), το μπιζέλι (*Pisum sativum*) και

τα κουκιά (*Vicia faba*), τα οποία καταναλώνονται τόσο από ανθρώπους όσο και από ζώα. Το μπιζέλι, συγκριτικά με τις υπόλοιπες φυτικές πρωτεΐνες, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε φυτικά πρωτεϊνούχα προϊόντα που αντικαθιστούν την πρωτεΐνη κρέατος, όπως είναι για παράδειγμα ο φυτικός κιμάς (Nadathur et al., 2017). Επίσης, το μπιζέλι αποτελεί εξαιρετική πηγή πρωτεΐνης με υψηλή περιεκτικότητα σε λυσίνη και θρεονίνη και σε άλλα απαραίτητα αμινοξέα (Johansson et al., 2021). Οι σπόροι του λούπινου αποτελούν ακόμη μία σημαντική πηγή φυτικής πρωτεΐνης, όπου μεταξύ των υπόλοιπων όσπριων, είναι αυτοί με την υψηλότερη περιεκτικότητα σε πρωτεΐνη, η οποία μπορεί να φτάσει μέχρι και 46%. Σημαντικό, επίσης, είναι το γεγονός ότι διαθέτει τους λιγότερους αντιθρεπτικούς παράγοντες, λόγω της χαμηλής περιεκτικότητας σε φυτικό οξύ, αλκαλοειδή, αναστολείς θρυψίνης, λεκτίνες και σαπωνίνες (Pelgrom et al., 2014; Pereira et al., 2022). Οι αντιθρεπτικοί παράγοντες έχουν αρνητικές επιπτώσεις στους ανθρώπους, καθώς μειώνεται η πεπτικότητα της τροφής προκαλώντας διάφορα προβλήματα (Pihlanto et al. 2017; Janusz, 2017; Fernandez-Orozco et al., 2008). Ακόμη ένα όσπριο που αποτελεί σημαντική πηγή πρωτεΐνης φυτικής προέλευσης είναι το ρεβίθι, όπου η περιεκτικότητα του σε πρωτεΐνη κυμαίνεται από 20.9 έως 25.3%, η οποία αποτελείται από απαραίτητα αλλά και μη απαραίτητα αμινοξέα (Kumar et al., 2019). Σύμφωνα με μελέτες, που διεξήχθησαν από τους Kurek et al. (2022b), τα συστατικά πρωτεΐνης ρεβιθιού εμφανίζουν ισχυρή γαλακτωματοποιητική και αφριστική σταθερότητα, γεγονός που καθιστά το ρεβίθι σημαντικό αντικατάστατο της σόγιας στην παραγωγή υποκατάστατων κρέατος που μοιάζουν με λουκάνικα.

Μικροφύκη

Η χρήση των μικροφυκών από τους ανθρώπους συμβαίνει πάνω από 2000 χρόνια, διότι ήταν από τα κύρια αγαθά για την επιβίωση από τον λιμό. Ωστόσο, πλέον υπάρχουν πολλές εμπορικές εφαρμογές, όπως η ενίσχυση της θρεπτικής αξίας των τροφίμων και των ζωοτροφών, η αξιοποίησή τους στην υδατοκαλλιέργεια, καθώς επίσης και η χρήση τους σε καλλυντικά (Spolaore et al., 2006). Επίσης, τα μικροφύκη αποτελούν σημαντική εναλλακτική πηγή πρωτεΐνης, καθώς δεν χρειάζονται πολλές εκτάσεις καλλιεργήσιμης γης, μεγάλες ποσότητες γλυκού νερού, ενώ χαρακτηρίζονται από μεγάλη παραγωγικότητα (Wijffels et al., 2010). Παρόλα τα πλεονεκτήματά τους, τα οικονομικά και περιβαλλοντικά τους οφέλη για την παραγωγή τους είναι ακόμη αμφισβητήσιμα (Smetana et al., 2017). Τα μικροφύκη αποτελούν τους βασικούς παράγοντες για την παραγωγή μονοκυτταρικής πρωτεΐνης (SCP) λόγω της υψηλής περιεκτικότητας που παρουσιάζουν σε πρωτεΐνη (Khan et al., 2022; Khoshnevisan et

al., 2020). Τα σημαντικότερα είδη μικροφυκών παραγωγής μονοκυτταρικής πρωτεΐνης είναι η Σπιρουλίνα (*Arthospira platensis*) και η Χλωρέλλα (*Chlorella vulgaris*) (Becker, 2007). Ο όρος μονοκυτταρική πρωτεΐνη (Single cell protein - SCP) αναφέρεται στην εδώδιμη βιομάζα μονοκύτταρων μικροοργανισμών, όπου μπορεί να αξιοποιηθεί για ζωοτροφή και για ανθρώπινη κατανάλωση (Onyeaka et al., 2022). Η πρωτεΐνη στην βιομάζα των μικροφυκών κυμαίνεται από 23% έως 63%, ενώ η περιεκτικότητά της μπορεί να επηρεαστεί από διάφορους παράγοντες, όπως διάφοροι βιοτικοί και αβιοτικοί παράγοντες καθώς επίσης και το είδος. (Kumar et al., 2022). Σύμφωνα με έρευνες που έχουν γίνει, τα μικροφύκη περιέχουν υψηλότερο ποσοστό πρωτεΐνης συγκριτικά με το αποξηραμένο αποβουτυρωμένο γάλα (36%), το κοτόπουλο (24%) και την πρωτεΐνη του ψαριού (24%) (Becker, 2007; Sui & Vlaeminck, 2020; Abiusi et al., 2022). Παρά την υψηλή περιεκτικότητά τους σε πρωτεΐνη, τα μικροφύκη δεν έχουν ενσωματωθεί πλήρως στη διατροφή του ανθρώπου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην υφή, η οποία έχει τη μορφή σκόνης, στο σκούρο πράσινο χρώμα και στην μυρωδιά και γεύση που κάνει δύσκολη την κατανάλωσή τους. Ακόμη ένας πολύ σημαντικός παράγοντας είναι το υψηλό κόστος παραγωγής των μικροφυκών, με αποτέλεσμα να μην μπορούν να ανταγωνιστούν συμβατικές πηγές πρωτεΐνης (Becker, 2007). Τέλος, όσον αφορά την χρήση των μικροφυκών για ζωοτροφή, έρευνες έδειξαν ότι είναι πλούσια συμπληρώματα διατροφής, αλλά και υποκατάστατα συμβατικών πηγών πρωτεΐνης, ενώ υπολογίζεται ότι περίπου το 30% της παραγωγής μικροφυκών προορίζεται για ζωική κατανάλωση (Becker, 2007).

Μυκοπρωτεΐνες

Οι μυκοπρωτεΐνες είναι μια πηγή πρωτεϊνών που παράγονται από φυσικούς μύκητες, με το κυριότερο είδος να είναι το *Fusarium venenatum* (Finnigan et al., 2019; Hashempour-Baltork et al., 2020). Έχουν υφή που μοιάζει με εκείνη του κρέατος και μπορούν να αποτελέσουν ένα σημαντικό υποκατάστατο του κρέατος (Okeudo-Cogan et al., 2023). Οι πρώτες μελέτες που οδήγησαν στην ανακάλυψη της συγκεκριμένης πηγής πρωτεΐνης έγιναν περίπου πριν πέντε δεκαετίες από βρετανούς επιστήμονες (Finnigan et al., 2017). Κατόπιν εκτενούς έρευνας, δημιουργήθηκε μια θρεπτική πρωτεΐνη από τους μικροοργανισμούς μέσω ζύμωσης, το αποτέλεσμα της οποίας ήταν η πρωτεΐνη να έχει υφή στήθους κοτόπουλου, αλλά και υψηλές συγκεντρώσεις πρωτεΐνης που προσδιορίστηκαν πάνω από 41% (Finnigan et al. 2019). Οι μυκοπρωτεΐνες από το είδος *F. venenatum* αποτελούν μια πλούσια πηγή πρωτεΐνης, βιταμινών, διαιτητικών ινών και μετάλλων (Finnigan et al., 2024). Η ποιότητα της πρωτεΐνης μπορεί να αποδειχθεί μέσω της μεθόδου PDCAAS (protein Digestibility-Corrected Amino Acids Score)

(Edwards & Cummings, 2010). Η μέθοδος PDCAAS αξιολογεί την ποιότητα της πρωτεΐνης των τροφίμων με βάση τις ανθρώπινες απαιτήσεις σε αμινοξέα και την πεπτικότητα της (Xian et al., 2025). Επίσης, η συγκεκριμένη μέθοδος συγκρίνει την ποιότητα της πρωτεΐνης από διαφορετικές πηγές, ενώ έχει δείξει ότι η μυκοπρωτεΐνη αποτελείται από υψηλότερης ποιότητας πρωτεΐνη συγκριτικά με άλλες πηγές, όπως το βοδινό κρέας και τα συμπυκνώματα μπιζελίου (Van Vliet et al., 2015). Στα πλεονεκτήματα των μυκοπρωτεϊνών ως εναλλακτική πηγή πρωτεΐνης συμπεριλαμβάνονται οι χαμηλές εκπομπές αέριων θερμοκηπίου από το πρώτο στάδιο παραγωγής τους, ενώ απαιτεί χαμηλότερη κατανάλωση νερού και περιορισμένη χρήση χώρου, ενώ η αραγωγή της δεν επηρεάζεται από τα καιρικά φαινόμενα, όπως στην περίπτωση των οσπρίων (Graham & Ledesma-Amaro, 2023). Συμπερασματικά οι μυκοπρωτεΐνες είναι μια βιώσιμη, θρεπτική, χωρίς μεγάλες επιβαρύνσεις στο περιβάλλον και προσιτή πηγή πρωτεΐνης, με προοπτικές να αποτελέσει σημαντική εναλλακτική πηγή πρωτεΐνης (Akinsemolu & Onyeaka, 2025).

Πρωτεΐνη εντόμων

Τα τελευταία χρόνια, η χρήση των εντόμων ως τροφή και ζωοτροφή έχει τραβήξει την προσοχή της βιομηχανίας τροφίμων, της επιστημονικής κοινότητας και του ευρύτερου κοινού σε παγκόσμιο επίπεδο, λόγω της υψηλής θρεπτικής αξίας τους και του χαμηλού περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος (Sogari et al., 2022). Σύμφωνα με τον FAO (2009), η πρωτεΐνη των εντόμων συμβάλει σημαντικά στην ανάγκη για εναλλακτικές πηγές πρωτεΐνης, καθώς επίσης και στην αντιμετώπιση παγκόσμιων προβλημάτων, όπως η εξάλειψη της πείνας, η κλιματική αλλαγή, η υπερκατανάλωση νερού και η αύξηση του κόστους των ζωικών πρωτεϊνών.

Τα έντομα αποτελούν σημαντική πηγή πρωτεϊνών, ενώ παράλληλα διαθέτουν και όλα τα απαραίτητα αμινοξέα και αποτελούν πλούσια πηγή λιπαρών οξέων, μετάλλων και ιχνοστοιχείων, όπως ο χαλκός, σίδηρος, μαγγάνιο, μαγνήσιο, σελήνιο, φώσφορο και ψευδάργυρο (Rumpold & Schlüter 2013; Tzompa-Sosa et al., 2014; Zhou et al., 2022). Συμπερασματικά, τα εδώδιμα έντομα αποτελούν μια πλούσια πηγή θρεπτικών στοιχείων για τον άνθρωπο και για τα ζώα.

1.2 Εδώδιμα έντομα

Τα εδώδιμα και συνεπώς εκτρεφόμενα έντομα προσφέρουν σημαντικά οφέλη στην παραγωγή τροφίμων, όπως η μείωση εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου, η μείωση κατανάλωσης νερού

και καλλιεργήσιμων εκτάσεων γης καθώς και η χρήση των εντόμων για βιομετατροπή για την μετατροπή παραπροϊόντων σε προϊόντα υψηλής προστιθέμενης αξίας. Σύμφωνα με τον FAO (2017) τα έντομα ως τροφή αποτελούν έναν κρίσιμο παράγοντα του 21ου αιώνα, λόγω της αύξησης του πληθυσμού, της έντονης αστικοποίησης αλλά και της μεγάλης ζήτησης πρωτεϊνών ζωικής προέλευσης που συνδυάζεται με τις συνεχείς αυξήσεις των τιμών των ζωικών προϊόντων (European Union, 2023). Η κατανάλωση εντόμων από τους ανθρώπους υφίσταται εδώ και αμέτρητους αιώνες ειδικά σε ηπείρους με μεγάλη παράδοση στην εντομοφαγία, όπως η Ασία, η Νότια Αμερική και η Αφρική (Van Itterbeeck & Van Huis, 2012). Η ένταξη των εδώδιμων εντόμων στην διατροφή του ανθρώπου μπορεί να αποτελέσει σημαντική πηγή θρεπτικών συστατικών και να ελαχιστοποιήσει την ανάγκη για πρωτεΐνη ζωικής προέλευσης. Καθώς η γεωργία και τα περιττώματα των ζώων είναι υπεύθυνα για το 98% και το 72% των εκπομπών αμμωνίας παγκοσμίως, αντιστοίχως, τα έντομα αποτελούν μία σημαντική εναλλακτική πηγή πρωτεΐνης, λόγω της μειωμένης εκπομπής αμμωνίας που προκύπτει κατά την εκτροφή τους (Bartkowicz, 2018). Τα εδώδιμα έντομα αποτελούν νέες τροφές και λόγω της υψηλής θρεπτικής αξίας τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν στη διατροφή τόσο του ανθρώπου όσο και στην παραγωγή ζωοτροφών για σκύλους, ψάρια, πουλερικά και χοίρους (Żuk-Golaszewska et.al., 2022).

1.2.1 Εγκεκριμένα είδη εντόμων στην Ευρωπαϊκή Ένωση

Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπάρχουν πάνω από 2000 είδη εντόμων, που μπορούν να καταναλωθούν από τους ανθρώπους, ενώ παράλληλα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε δίαιτες ψαριών, πουλιών και μερικών θηλαστικών, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε πρωτεΐνη (Hubert 2019; Orkusz 2021). Παρότι υπάρχει τόσο μεγάλος αριθμός εδώδιμων ειδών εντόμων, στην Ευρωπαϊκή Ένωση έχουν εγκριθεί για ζωοτροφή μόνο οκτώ είδη, ενώ ο αντίστοιχος αριθμός για ανθρώπινη κατανάλωση είναι μόλις τέσσερα είδη. Σύμφωνα με τον Κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 893/2017 της ΕΕ, τα είδη που έχουν εγκριθεί για ζωοτροφή είναι: η προνύμφη της μύγας μαύρος στρατιώτης (Black soldier fly larvae), η κοινή οικιακή μύγα (*Musca domestica* (Diptera: Muscidae)), ο κίτρινος αλευροσκώληκας (*Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae)), ο οικιακός γρύλος (*Acheta domesticus* L. (Orthoptera: Gryllidae)), ο τροπικός οικιακός γρύλος (*Gryllodes sigillatus* Walker (Orthoptera: Gryllidae)), ο μικρός αλευρώδης σκώληκας (*Alphitobius diaperinus* Panzer (Coleoptera: Tenebrionidae)), ο κοινός μαύρος αγροτικός γρύλος (*Gryllus assimilis* Fabricius (Orthoptera: Gryllidae)) και ο μεταξοσκώληκας *Bombyx mori* L. (Lepidoptera-Bombycidae). Τα συγκεκριμένα έντομα έλαβαν έγκριση από την Ευρωπαϊκή Ένωση λόγω της υψηλής περιεκτικότητας που διαθέτουν

σε πρωτεΐνη, καθώς τα ποσοστά σε πρωτεΐνη κυμαίνονται μεταξύ 35% έως 60% ξηρού βάρους ή 10% έως 25% νωπού βάρους (Bukkens, 1997; Schlüter et al. 2016; Elahi et al. 2022). Τρία από τα έντομα που έχουν εγκριθεί για ζωική κατανάλωση έχουν εγκριθεί και για ανθρώπινη κατανάλωση από την ΕΕ, τα οποία είναι το *T. molitor*, το *A. domesticus* και το *A. domesticus*, ενώ στη λίστα αυτή συμπεριλαμβάνεται και το *Locusta migratoria* Linnaeus (Orthoptera: Acrididae) (European Commission, 2022; 2023).

Πίνακας 1: Εδώδιμα έντομα εγκεκριμένα για ανθρώπινη κατανάλωση εντός της Ευρωπαϊκής Ένωσης

Τάξη	Οικογένεια	Είδος	Κοινό όνομα
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Tenebrio Molitor</i>	Yellow Mealworm
Coleoptera	Tenebrionidae	<i>Alphitobius diaperinus</i>	Lesser mealworm
Orthoptera	Acrididae	<i>Locusta Migratoria</i>	European migratory locust
Orthoptera	Gryllidae	<i>Acheta Domesticus</i>	House Cricket

1.2.2 Θρεπτική αξία εδώδιμων εντόμων

Η θρεπτική αξία των εντόμων μπορεί να επηρεαστεί από ποικίλους παράγοντες, όπως είναι το θρεπτικό υπόστρωμα, το φύλο, το είδος, το στάδιο ανάπτυξης (αυγό, προνύμφη, νύμφη, ενήλικο) και τις συνθήκες εκτροφής (De Castro et al., 2018). Η περιεκτικότητα των εντόμων σε πρωτεΐνη κυμαίνεται από 10% έως 70% του ξηρού βάρους, ενώ είναι γνωστά για την υψηλή τους περιεκτικότητα σε απαραίτητα αμινοξέα όπως βαλίνη, τρυπτοφάνη, λυσίνη, λευκίνη, μεθειονίνη, θρεονίνη, ισολευκίνη, φαινυλαλανίνη και ιστιδίνη, για αυτό τον λόγο μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο των ζωικών πρωτεϊνών (Awobusuyi et al., 2020; Li et al., 2023). Η περιεκτικότητα των εδώδιμων εντόμων σε απαραίτητα αμινοξέα κυμαίνεται από 46% έως 96% της συνολικής ποσότητας των αμινοξέων, ενώ είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η παρουσία του εξωσκελετού των εντόμων επηρεάζει την μεταβλητότητα της πεπτικότητας των πρωτεϊνών, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας των εξωσκελετών σε χιτίνη (Xiaoming et al.

2010; Schlüter et al., 2017). Πέρα από την πρωτεΐνη, τα εδώδιμα έντομα περιέχουν 10%-70% λιπαρά ξηρής ουσίας, η περιεκτικότητα των οποίων είναι υψηλότερη στο στάδιο της προνύμφης και της νύμφης σε σχέση με το στάδιο του ενηλίκου (Kouřimská & Adámková 2016). Επίσης, τα έντομα είναι πλούσια σε μέταλλα, όπως το ασβέστιο, το μαγνήσιο, ο σίδηρος και ο ψευδάργυρος, ενώ σύμφωνα με έρευνες, η περιεκτικότητα των εντόμων σε μέταλλα μπορεί να διαφέρει σημαντικά ανάλογα με το είδος, το στάδιο ζωής και το θρεπτικό τους υπόστρωμα (Lu et al., 2023; Kłobukowski et al., 2025). Τέλος, βιταμίνες, όπως η θειαμίνη (B1), η ριβοφλαβίνη (B2) και η βιταμίνη (B12), περιέχονται σε σημαντικές ποσότητες, ενώ έρευνες έχουν δείξει ότι η περιεκτικότητα σε θειαμίνη κυμαίνεται από 0,1 έως 4mg ανά 100g ξηρής ουσίας και οι συγκεντρώσεις ριβοφλαβίνης κυμαίνονται από 0,11 έως 8,9mg ανά 100g ξηρής ουσίας ανάλογα το είδος του εντόμου (Kouřimská & Adámková 2016).

1.2.3 Ασφάλεια κατανάλωσης εδωδιμων εντόμων

Οι λόγοι που αποτρέπουν τους καταναλωτές να εντάξουν στη διατροφή τους τα εδώδιμα έντομα είναι πολλοί. Από τους κυριότερους, όμως, είναι το πόσο ασφαλή είναι από μολυσματικούς μικροοργανισμούς και επιβλαβείς ουσίες. Σύμφωνα με έρευνες, που αφορούν την ασφάλεια χρήσης εντόμων για ανθρώπινη και ζωική κατανάλωση, η Ευρωπαϊκή Αρχή για την Ασφάλεια των Τροφίμων το 2015 αποφάσισε ότι ο κίνδυνος για την υγεία των ανθρώπων και των ζώων εξαρτάται από τους τρόπους εκτροφής και επεξεργασίας των εντόμων, ενώ ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες μόλυνσης των εντόμων είναι το υπόστρωμα στο οποίο εκτρέφονται (Finke et al., 2015; EFSA, 2017; Murefu et al., 2019). Οι εντομοπαθογόνοι ιοί που παρατηρούνται στα εκτρεφόμενα έντομα δεν αποτελούν κίνδυνο για τα σπονδυλωτά ζώα και τον άνθρωπο (Finke et al., 2015). Επίσης οι παθολογικές μορφές πρωτεϊνών (Prions) των θηλαστικών δεν μπορούν να αναπαραχθούν στα έντομα με αποτέλεσμα να μην αποτελούν φορείς και ενισχυτές αυτών των Prions, παρόλα αυτά τα έντομα μπορούν να λειτουργήσουν ως παθητικοί φορείς των prions, με την προϋπόθεση ότι εκτρέφονται σε υποστρώματα στα οποία υπάρχουν τέτοιου είδους μολυσματικά σωματίδια (Finke et al., 2015). Άλλος ένας κίνδυνος είναι η συσσώρευση χημικών ουσιών, όπως τα βαρέα μέταλλα, οι μυκοτοξίνες και τα κτηνιατρικά υπολείμματα (αντιβιοτικά, ανθελμιντικά και ορμόνες ανάπτυξης), καθώς, επίσης, και το είδος του εντόμου. Σημαντικό παράγοντα στην ασφάλεια των εντόμων ως τρόφιμα αποτελεί και η αλλεργιογένεση, όπου έχουν καταγραφεί αλλεργικές αντιδράσεις, κυρίως σε ανθρώπους παρά σε ζώα. Αυτό οφείλεται στην αλλεργική αντίδραση που μπορεί να προκαλέσει η κατανάλωση εντόμων σε ανθρώπους που είναι ήδη αλλεργικοί στα ακάρεα της οικιακής σκόνης ή στα καρκινοειδή (Finke et al., 2015).

1.3 *Tenebrio molitor*

Ένα από τα σημαντικότερα εδώδιμα έντομα και το πρώτο που εγκρίθηκε στην Ευρωπαϊκή Ένωση για ανθρώπινη κατανάλωση είναι το *T. molitor* της οικογένειας Tenebrionidae (Moruzzo et al., 2021). Το *T. molitor* ή γνωστό και ως κίτρινος αλευροσκώληκας είναι ένα ολομετάβολο έντομο, όπου μέχρι την ενηλικίωση του περνάει από τέσσερα στάδια ανάπτυξης, ξεκινώντας από το αυγό. Στη συνέχεια το αυγό εκκολάπτεται σε προνύμφη, η οποία μεταμορφώνεται σε νύμφη και η μεταμόρφωση ολοκληρώνεται με το στάδιο του ενήλικου (Panagiotakopulu, 2000). Το όνομα του στα ελληνικά δόθηκε λόγω του χρώματός του και της ικανότητάς του να προσβάλλει αποθηκευμένα σιτηρά. Οι προνύμφες του συγκεκριμένου είδους είναι πλούσιες σε θρεπτικά στοιχεία, ενώ αποτελούνται από περίπου 50% πρωτεΐνης και σχεδόν 30% λίπος (Van Broekhoven et al., 2015; Hong et al., 2020). Πιο συγκεκριμένα, η περιεκτικότητα του *T. molitor* σε λίπος κυμαίνεται από 14,9% στα ενήλικα έως 43,1% στις προνύμφες (Rumpold & Schlüter 2013), ενώ τα ακόρεστα λιπαρά οξέα αποτελούν το 12,1% στα ενήλικα και το 21,9% στις προνύμφες (Khanal et al., 2023). Τέλος, είναι αξιόλογο να αναφερθεί ότι οι προνύμφες των αλευροσκώληκων έχουν καλή σύνθεση σε μέταλλα και βιταμίνες, όπως χαλκό, σίδηρο, ψευδάργυρο, μαγνήσιο, κάλιο και φώσφορο (Ghosh et al., 2017; Wu et al., 2020).

1.3.1 Κύκλος Ζωής *T.molitor*

Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενη ενότητα, το *T. molitor* είναι ένα ολομετάβολο έντομο, δηλαδή ο κύκλος ζωής του περιλαμβάνει τέσσερα στάδια, τα οποία είναι το αυγό, η προνύμφη, η νύμφη και το ενήλικο (Panagiotakopulu, 2000). Τα θηλυκά έντομα γεννάνε περίπου 500 αυγά το καθένα καθ' όλη την διάρκεια της ζωής τους, ενώ η άριστη θερμοκρασία επώασης είναι 27°C και η εμβρυική ανάπτυξη έχει διάρκεια 4-6 ημέρες (Siemianowska et al., 2013). Το *T. molitor* έχει μεγάλη διάρκεια προνυμφικού σταδίου, η οποία υπολογίζεται περίπου στις 57 ημέρες σε ελεγχόμενες συνθήκες (Weaver & McFarlane, 1990). Καθώς το προνυμφικό στάδιο φτάνει στο τέλος του, οι προνύμφες εισέρχονται σε συγκεκριμένη φάση που ονομάζεται *prerupa*, ουσιαστικά είναι το στάδιο πριν την νύμφωση, όπου οι προνύμφες βρίσκονται σε μια περίοδο λανθάνουσας κατάστασης στην οποία σχηματίζουν σωματικά μία καμπυλότητα σαν το γράμμα «C» προτού μετατραπούν σε *rupa* δηλαδή νύμφη (Ribeiro et al., 2025). Η μέση διάρκεια του σταδίου της νύμφης είναι 5-6 μέρες σε άριστες θερμοκρασίες ανάπτυξης (Siemianowska et al., 2013). Σε αυτό το στάδιο το έντομο δεν μπορεί να τραφεί και σταδιακά δημιουργείται ένας άκαμπτos εξωσκελετός. Το τελικό στάδιο είναι η εμφάνιση των

ενηλίκων με διάρκεια ζωής από 2 έως 3 μήνες (Hong et al., 2020). Τα στάδια ανάπτυξης του είδους *T. molitor* μεταβάλλονται από διάφορους παράγοντες, όπως είναι η θερμοκρασία, το θρεπτικό υπόστρωμα, η υγρασία, η φωτοπερίοδος, το οξυγόνο και τέλος η πυκνότητα του πληθυσμού (Ribeiro et al., 2025).

1.3.2 Συνθήκες ανάπτυξης και θρεπτικά υποστρώματα

Έρευνες έχουν δείξει ότι οι περιβαλλοντικές και διατροφικές συνθήκες, καθώς επίσης και οι τεχνικές εκτροφής (θερμοκρασία, υγρασία, πυκνότητα εκτροφής, θρεπτικό υπόστρωμα, φωτισμός και χρόνος χορήγησης τροφής) αποτελούν βασικούς παράγοντες για να επιτευχθεί η βέλτιστη ανάπτυξη των εδώδιμων εντόμων, αλλά και για να μπορούν να ανταγωνιστούν τις συμβατικές πηγές πρωτεΐνης (Ribeiro et al., 2025). Οι πρώτες έρευνες που αφορούσαν την διατροφή του *T. molitor* έγιναν περίπου το 1950, όπου αποδείχθηκε ότι μία βέλτιστη διατροφή αποτελείται από 80%-85% υδατάνθρακες (Fraenkel, 1950). Μέσω ενός πειράματος αποκαλύφθηκε ότι τα πιο αποτελεσματικά θρεπτικά υποστρώματα για την εκτροφή του *T. molitor* είναι τα πίτουρα, τα άλευρα σιταριού, πίτουρα βρώμης και νιφάδες βρώμης, πίτουρο καλαμποκιού και το αλεύρι ρυζιού και λούπινου (Kröncke & Benning, 2022). Όσον αφορά τις συνθήκες ανάπτυξης, η θερμοκρασία θεωρείται από τους σημαντικότερους αβιοτικούς παράγοντες που μπορούν να καθορίσουν την ανάπτυξη των εντόμων (Cossins, 2011). Η αύξηση της θερμοκρασίας βοηθάει στην ανάπτυξη και την παραγωγή, ωστόσο η υπερβολικά υψηλή θερμοκρασία μπορεί να έχει καταστροφικές επιπτώσεις (Kingsolver et al., 2015). Σύμφωνα με τον Punzo & Mutchmor (1980), οι άριστες θερμοκρασίες για το *T. molitor* κυμαίνονται από 22 °C έως 28 °C. Έρευνες έχουν αποδείξει ότι θερμοκρασίες κάτω των 17 °C αναστέλλουν την εμβρυϊκή ανάπτυξη, ενώ θερμοκρασίες κάτω από 10 °C και πάνω από 35 °C αυξάνουν τα ποσοστά θνησιμότητας (Ludwig, 1956; Punzo & Mutchmor, 1980; Koo et al., 2013). Τέλος, ένας ακόμη σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τον ρυθμό ανάπτυξης των προνυμφών του *T. molitor* είναι η υγρασία, η οποία πρέπει να κυμαίνεται από 60 έως 75 % για τις προνύμφες, με άριστη υγρασία ανάπτυξης το 70% (Petronio et al., 2022).

1.3.3 Αξιοποίηση του frass ως εδαφοβελτιωτικό

Ένα από τα κύρια παραπροϊόντα της εκτροφής εντόμων είναι το frass, όπου αποτελείται από τα περιττώματα των εντόμων και τις εκδύσεις τους που είναι πλούσιες σε χιτίνη. Το frass παρουσιάζει υψηλά επίπεδα θρεπτικών συστατικών, τα οποία διαφέρουν ανάλογα με το είδος του εντόμου και του θρεπτικού υποστρώματος (Poveda, 2021; Beesigamukama et al., 2022). Επίσης, είναι ξηρό, εύθρυπτο και έχει μια ελαφριά μυρωδιά, που συνήθως δεν είναι καθόλου

ενοχλητική (Joosten & Clarke, 2002). Σύμφωνα με τους Joosten & Clarke (2002), παρουσιάζει σημαντικές δυνατότητες αξιοποίησης για χρήση ως οργανικό λίπασμα και χρησιμοποιείται κυρίως σε κηπευτικές καλλιέργειες ως υπόστρωμα, λόγω του σύντομου κύκλου ζωής αυτών των καλλιεργειών. Για παράδειγμα, το frass του *T. molitor* περιέχει περίπου 5% άζωτο (N), 2% φώσφορο (P) και 1,7% κάλιο (K), ενώ παράλληλα έχει ρυθμούς ανοργανοποίησης και αποδοτικότητας που είναι συγκρίσιμες με εκείνων των συμβατικών ανόργανων λιπασμάτων (Houben et al., 2020). Λόγω της ταχείας ανοργανοποίησης που συμβαίνει στο έδαφος προκαλείται μετατροπή των δύσκολα αφομοιώσιμων θρεπτικών στοιχείων σε διαθέσιμες για τα φυτά μορφές. Επίσης, σύμφωνα με τους Houben et al. (2020), το frass έχει την δυνατότητα να αυξήσει την παραγωγή ωφέλιμων μικροοργανισμών που αναπτύσσονται στο έδαφος. Τα θρεπτικά στοιχεία που περιέχει, όπως το άζωτο (N) και ο άνθρακας (C) ενεργοποιούν μικροοργανισμούς, οι οποίοι έχουν βασικό ρόλο σε κύριες διεργασίες του εδάφους, όπως η αμμωνιοποίηση, η νιτροποίηση και η αζωτοδέσμευση (Houben et al., 2020). Σύμφωνα με τους Jin et al., (2005), η αύξηση της δραστηριότητας της χιτινάσης σχετίζεται με την μείωση του νηματώδη *Meloidogyne incognita*, που προσβάλλει τις ρίζες των φυτών και προκαλεί κικήδες, δηλαδή εξογκώματα.

1.4 Κυκλική οικονομία και εδώδιμα έντομα

Ο όρος κυκλική οικονομία τέθηκε από την Ευρωπαϊκή Επιτροπή και τον ορίζει ως «παραγωγή ανανεώσιμων βιολογικών πόρων και την μετατροπή αυτών των πόρων και των ροών αποβλήτων σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας, όπως τρόφιμα, ζωοτροφές, βιολογικά προϊόντα και βιοενέργεια» (European Commission, 2018). Στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας πολλά σαπροφάγα έντομα μπορούν να τραφούν με αποσυντιθέμενη ύλη και οργανική ύλη, ενώ μπορούν, επίσης, να χρησιμοποιηθούν για την ανακύκλωση αποβλήτων από βιομηχανίες αγροδιατροφής για χρήση σε ζωοτροφές (Van Huis & Oonincx, 2017). Πολύ σημαντικό είναι το γεγονός πως η βιομηχανία παραγωγής εντόμων παράγει αμελητέα ποσότητα αποβλήτων, αφού τα έντομα έχουν την δυνατότητα να καταναλώνουν γεωργικά απόβλητα, όπως αχρησιμοποίητους μίσχους φυτών, υπολείμματα τροφίμων και βιομάζα, συμβάλλοντας στην κυκλική οικονομία που προωθεί την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση των πόρων (Li et al., 2023). Επιπλέον τα περιττώματα που παράγονται από τα έντομα μπορούν χρησιμοποιηθούν ως οργανικό λίπασμα για καλλιέργειες, ολοκληρώνοντας την κυκλική αλυσίδα (Li et al., 2023). Συμπερασματικά, η εκτροφή εντόμων για τροφή και ζωοτροφή, λόγω της φυσικής ικανότητας των εντόμων να καταναλώνουν οποιουδήποτε είδους τροφίμων και

οργανικών αποβλήτων, έχει θετικό αντίκτυπο στην ποιότητα και την παραγωγικότητα των ζωοτροφών και τροφίμων. Αυτό το είδος εκτροφής φαίνεται να μπορεί να ελαχιστοποιήσει τη χρήση νερού και άλλων φυσικών πόρων (Madau et al., 2020). Εν ολίγοις, η αξιοποίηση εδώδιμων εντόμων για τη μετατροπή προϊόντων χαμηλής αξίας σε υψηλά προστιθέμενης αξίας προϊόντα, αποτελεί ένα σημαντικό φυσικό παράγοντα για τον σχεδιασμό μιας κυκλικής οικονομίας (Van Huis, 2019).

1.5 Φυλές του είδους *Tenebrio molitor*

Οι διαφορετικές φυλές του είδους *T. molitor* είναι ένα θέμα, όπου βιβλιογραφικά υστερεί σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα που έχουν χρόνια μελετηθεί. Ένα ζήτημα που φαίνεται να έχει παραμεληθεί είναι η σύγκριση των διαφορετικών φυλών στην ανάπτυξη και τις επιδόσεις των προνυμφών του *T. molitor* (Rumbos et al., 2021). Σύμφωνα με τους Eriksson & Picard (2021), διαφορετικές φυλές του ίδιου εντόμου μπορούν να έχουν διαφορετικά βιολογικά χαρακτηριστικά. Οι Urs & Hopkins (1973), διαπίστωσα σημαντικές διαφορές στην αύξηση, την ανάπτυξη και στις συγκεντρώσεις ελεύθερων λιπαρών οξέων των προνυμφών μεταξύ δύο διαφορετικών φυλών *T. molitor*. Επίσης, υπάρχουν αναφορές για μεταβαλλόμενες επιδόσεις κατά την ανάπτυξη προνυμφών σε έξι διαφορετικές φυλές, προερχόμενες από διαφορετικές γεωγραφικές τοποθεσίες ανά τον κόσμο, στις οποίες κατά την εκτροφή δεν χορηγήθηκε κάποιου είδους υγρασία δηλαδή εκτράφηκαν σε ξηρές συνθήκες (Adamaki-Sotiraki et al., 2022). Επιπλέον, είναι αξιόλογο να σημειωθεί μία έρευνα που πραγματοποιήθηκε χρησιμοποιώντας επτά φυλές *T. molitor* από διαφορετικά σημεία του κόσμου, το αποτέλεσμα της οποίας έδειξε ότι υπήρχαν διαφορές στην ανάπτυξη, στην αποδοτικότητα μετατροπής της τροφής αλλά και στην θρεπτική σύνθεση των προνυμφών (Rumbos et al., 2021). Η επίδραση των διαφορετικών φυλών των εντόμων ως προς την απόδοση των προνυμφών και την αντοχή των ενηλίκων μπορεί να αποτελέσει έναν παράγοντα, ο οποίος θα βελτιώσει την μαζική παραγωγή (Adamaki-Sotiraki et al., 2022), προκειμένου ο τομέας των εντόμων να καταφέρει να ανταπεξέλθει αποτελεσματικά στην αυξανόμενη ζήτηση πρωτεϊνών (Urs & Hopkins, 1973; Heckmann et al., 2018; Morales-Ramos et al., 2020; Rumbos et al., 2020; Rumbos et al., 2021)

1.6 Σκοπός

Σκοπός της παρούσας πτυχιακής εργασίας είναι η μελέτη εκτροφής των προνυμφών του είδους *T. molitor* σε συνθήκες μεγάλης κλίμακας. Στην πρώτη βιοδοκιμή αξιολογήθηκε η επίδραση

τεσσάρων διαφορετικών γεωργικών υποπροϊόντων, τα οποία ήταν το πίτουρο σίτου, η βρώμη, το λούπινο και το πίτουρο ρυζιού ως θρεπτικά υποστρώματα στην διαίτα της ελληνικής φυλής. Στη δεύτερη βιοδοκιμή, αξιολογήθηκαν οι διαφορές τεσσάρων φυλών, όπου εκτράφηκαν στην ίδια διαίτα (πίτουρο σίτου).

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

2.1 Συνθήκες Εκτροφής *Tenebrio molitor*

Η αρχική προέλευση των εντόμων της κάθε φυλής παρουσιάζεται στον **Πίνακας 2**. Από τη στιγμή της απόκτησης των φυλών από τον αντίστοιχο ερευνητικό φορέα, το σύνολο των εντόμων εκτρέφονται στις εγκαταστάσεις του Εργαστηρίου Εντομολογίας και Γεωργικής Ζωολογίας του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών στους $26\pm0.5^{\circ}\text{C}$, $50\pm5\%$ Σχετική Υγρασία και πλήρες σκότος. Όλες οι φυλές εκτρέφονται σε θρεπτικό υπόστρωμα που αποτελείται από 100% πίτυρο σίτου και ως πηγή υγρασίας χρησιμοποιούνται κομμάτια πατάτας, τα οποία προστίθενται τουλάχιστον δύο φορές τη βδομάδα.

Πίνακας 2: Προέλευση φυλών *T. molitor*

Χώρα	Ερευνητικός Φορέας	Χρονολογία συλλογής αποικίας	Θρεπτικό υπόστρωμα εκτροφής
Ελλάδα	Μπενάκειο Φυτοπαθολογικό Ινστιτούτο	2010	Πίτυρο Σίτου
Ιταλία	University of Milan – Università degli Studi di Milano	2017	Πίτυρο Σίτου
Γερμανία	Julius Kühn-Institut, Quedlinburg	1967	Πίτυρο Σίτου
Αμερική	USDA-ARS Stored Product Insect and Engineering Research Unit, Manhattan, Kansas	2015	Πίτυρο Σίτου

2.2 Πείραμα

2.2.1 Συλλογή Προνυμφών και Σχεδιασμός Πειραμάτων

Για τη διεξαγωγή και των δύο βιοδοκιμών της συγκεκριμένης πτυχιακής, ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία συλλογής προνυμφών και προετοιμασίας του πειράματος. Για τη λήψη νεοεκκολαφθεισών προνυμφών, συλλέχθηκαν 250g σεξουαλικά ώριμων ενηλίκων (7–14 ημερών) για κάθε πλαστικό δίσκο εκτροφής (6 δίσκοι), οι οποίοι τοποθετήθηκαν σε δίσκους εκτροφής μαζί με αλεύρι σίτου ως υπόστρωμα διατροφής και φωτοκίας (**Εικόνα 1**). Ανάμεσα στα ενήλικα και στο αλεύρι τοποθετήθηκε σίτα για την αποφυγή κανιβαλισμού των αυγών και προνυμφών, ενώ το αλεύρι σίτου διευκόλυνε τη συλλογή των προνυμφών (**Εικόνα 2**). Ως πηγή υγρασίας χρησιμοποιήθηκαν κύβοι άγαρ, οι οποίοι προστίθονταν δύο φορές τη βδομάδα, ενώ οι δίσκοι εκτροφής διατηρήθηκαν σε θάλαμο ελεγχόμενων συνθηκών σε θερμοκρασία 27°C, 60% σχετική υγρασία και πλήρες σκότος.

Μετά την πάροδο 7 ημερών φωτοκίας, το πλέγμα και τα ενήλικα αφαιρέθηκαν, ενώ το αλεύρι κοσκινίστηκε. Οι προνύμφες που περνούσαν από κόσκινο διαμέτρου 850 μm και παρέμεναν στο 500 μm , ήταν αυτές που χρησιμοποιήθηκαν και στις δύο βιοδοκιμές (**Εικόνα 3**). Κατόπιν, οι προνύμφες ζυγίστηκαν και ομογενοποιήθηκαν απαλά (**Εικόνα 4**). Για τον καθορισμό του αρχικού αριθμού των προνυμφών, πάρθηκαν τουλάχιστον τρία υποδείγματα για να προσδιοριστεί το μέσο βάρος και ο αριθμός τους. Οι εκτιμήσεις των τριών υποδειγμάτων έπρεπε να συγκλίνουν σημαντικά (συντελεστής διακύμανσης (CoV) $> 10\%$ - τυπική απόκλιση/μέσος όρος $\cdot 100$). Σε περίπτωση μεγάλης απόκλισης, γινόταν λήψη νέου υποδείγματος. Κάθε υποδείγμα είχε μέγεθος περίπου 5 ml ή 2 g και περιλάμβανε τουλάχιστον 100 προνύμφες. Όλες οι προνύμφες σε κάθε υποδείγμα καταμετρήθηκαν και ζυγίστηκαν. Στη συνέχεια, εκτιμήθηκε ο μέσος αριθμός προνυμφών πολλαπλασιάζοντας το συνολικό βάρος των προνυμφών με τον αριθμό των προνυμφών του δείγματος και διαιρώντας το αποτέλεσμα με το βάρος των προνυμφών του δείγματος. Για να υπολογιστεί ο μέσος αριθμός των προνυμφών στο σύνολο, υπολογίστηκε ο μέσος όρος των αποτελεσμάτων από τα τρία δείγματα.



Εικόνα 1: Ζύγισμα ενήλικων *T. molitor*



Εικόνα 2: Ενήλικα *T. molitor* σε δίσκο εκτροφής για ωοτοκία



Εικόνα 3: Κόσκινα 850 και 500 µm



Εικόνα 4: Ομογενοποίηση προνυμφών

2.2.2 Βιοδοκιμή I

Για τη διεξαγωγή της πρώτης βιοδοκιμής, χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα υποστρώματα διατροφής: πίτουρο ρυζιού, λούπινο, βρώμη, ενώ το πίτουρο σιταριού χρησιμοποιήθηκε ως μάρτυρας. Οι πειραματικές μονάδες ήταν πλαστικοί δίσκοι εκτροφής (60×40 cm, με εσωτερική επιφάνεια περίπου 2.000 cm²), με έξι επαναλήψεις για κάθε μεταχείριση. Σε κάθε δίσκο εκτροφής τοποθετήθηκαν 10.000 προνύμφες μαζί με 2,1 kg τροφής (Εικόνα 5). Σε περίπτωση που η τροφή καταναλωνόταν πλήρως, προστίθονταν νέα τροφή η οποία ζυγιζόταν και καταγραφόταν.

Ως πηγή υγρασία χρησιμοποιήθηκαν κύβοι από άγαρ, οι οποίοι τοποθετούνταν δύο φορές τη βδομάδα ή και παραπάνω όταν χρειαζόταν, ενώ οι μολυσμένοι κύβοι από μύκητες αντικαθίσταντο. Καθ' όλη τη διάρκεια της διεξαγωγής της βιοδοκιμής, κάθε δίσκος ομογενοποιούνταν πριν τη λήξη δειγμάτων για τη μέτρηση. Από το ομογενοποιημένο υλικό λαμβανόταν δύο υποδείγματα για τον υπολογισμό του μέσου βάρους των προνυμφών (Εικόνα 6). Κάθε υποδείγμα περιλάμβανε τουλάχιστον 100 προνύμφες, οι οποίες καταμετρούνταν, ακόμη κι αν ξεπερνούσαν τον αριθμό αυτό (Εικόνα 7). Οι προνύμφες επέστρεφαν στα κιβώτια μετά τη μέτρηση και γινόταν προσθήκη τροφής ή άγαρ, αν ήταν απαραίτητο, ενώ οι μετρήσεις πραγματοποιούνταν κάθε 14 ημέρες

Η βιοδοκιμή ολοκληρώθηκε όταν πάνω από το 10% των προνυμφών έφτασαν στο στάδιο της νύμφης (Εικόνα 10). Στην τελευταία μέτρηση, ολόκληρο το περιεχόμενο κάθε δίσκου εκτροφής ζυγιζόταν και κοσκινιζόταν με κόσκινο 2 mm για συλλογή προνυμφών και με κόσκινο 500 μm για προσδιορισμό της ποσότητας του frass, τα οποία ζυγίζονταν ξεχωριστά και καταγράφονταν. Στη συνέχεια, το συνολικό βάρος των προνυμφών καταγράφονταν, ενώ παράλληλα υπολογίζονταν ο τελικός αριθμός των προνυμφών με τη διαδικασία της δειγματοληψίας που περιγράφηκε στο Κεφάλαιο 2.2.1.

2.2.3 Βιοδοκιμή II

Κατά τη διεξαγωγή της δεύτερης βιοδοκιμής αξιολογήθηκε η ανάπτυξη των προνυμφών τεσσάρων φυλών *T. molitor* από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές. Συγκεκριμένα, εξετάστηκε η προνυμφική ανάπτυξη φυλών προερχόμενων από την Ελλάδα, την Αμερική, τη Γερμανία και την Ιταλία. Ως υπόστρωμα εκτροφής χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά πίτουρο σιταριού, ενώ η υγρασία εξασφαλιζόταν με την προσθήκη κύβων άγαρ τουλάχιστον τρεις φορές ανά εβδομάδα. Ο πειραματικός σχεδιασμός, η διάταξη των πειραματικών μονάδων και η καταγραφή των δεδομένων για την ανάπτυξη των προνυμφών ακολούθησαν την ίδια

μεθοδολογία με αυτή της Βιοδοκιμής I, διασφαλίζοντας τη συγκρισιμότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ των διαφορετικών φυλών.



Εικόνα 5: Δίσκος εκτροφής με 10000 προνύμφες *T. molitor* και άγαρ



Εικόνα 6: Δειγματοληπτικές μετρήσεις προνυμφών *T. molitor* σε θρεπτικό υπόστρωμα λούπινου



Εικόνα 7: Ζυγαριά ακριβείας



Εικόνα 8: Θάλαμος ελεγχόμενων συνθηκών για την εκτροφή του *T. molitor*

2.3 Δείκτες αξιοποίησης της τροφής

Για την ολοκληρωμένη αξιολόγηση και των δύο βιοδοκιμών υπολογίστηκαν επιπλέον των μετρήσεων τρεις δείκτες αξιοποίησης της τροφής. Οι δύο πρώτοι δείκτες είναι ο FCR (Feed Conversion Ratio) (1) και ο ECI (Efficiency of Conversion of Ingested food) (%) (2). Για τον υπολογισμό των συγκεκριμένων δεικτών, αφαιρέθηκε η τροφή που περίσσεψε σε κάθε επανάληψη της κάθε μεταχείρισης ώστε να υπολογιστή όσο το δυνατόν με μεγαλύτερη ακρίβεια η συνολική τροφή που καταναλώθηκε. Επίσης, υπολογίστηκε ο δείκτης SGR (Specific Growth Rate) (% day⁻¹) (3). Στις εξισώσεις που ακολουθούν φαίνεται ο τρόπος υπολογισμού των τριών δεικτών.

$$FCR = \frac{\text{Συνολική τροφή που προστέθηκε (g)}}{\text{βάρος που κερδίστηκε (g)}} \quad (1)$$

$$ECI = \frac{\text{Βάρος που κερδίστηκε}}{\text{Βάρος τροφής που καταναλώθηκε}} \times 100 \quad (2)$$

$$SGR = \frac{\text{Ln(Τελικό βάρος σώματος)} - \text{Ln(Αρχικό βάρος σώματος)}}{\text{Αριθμός ημερών έως την εμφάνιση της πρώτης νύμφης}} \times 100 \quad (3)$$

2.4 Στατιστική Ανάλυση

Όλες οι μεταβλητές (ατομικό βάρος προνυμφών, επιβίωση προνυμφών, βάρος frass, δείκτες μετατρεψιμότητας της τροφής) και των δύο βιοδοκιμών αναλύθηκαν με τη μέθοδο Ανάλυση της Διασποράς (one-way ANOVA), ενώ οι διαφορές τους συγκρίθηκαν με το Tukey-Kramer HSD test σε επίπεδο σημαντικότητας 0.05.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

3.1 Βιοδοκιμή I: Εκτίμηση ανάπτυξης προνυμφών σε τέσσερα διαφορετικά υποστρώματα διατροφής

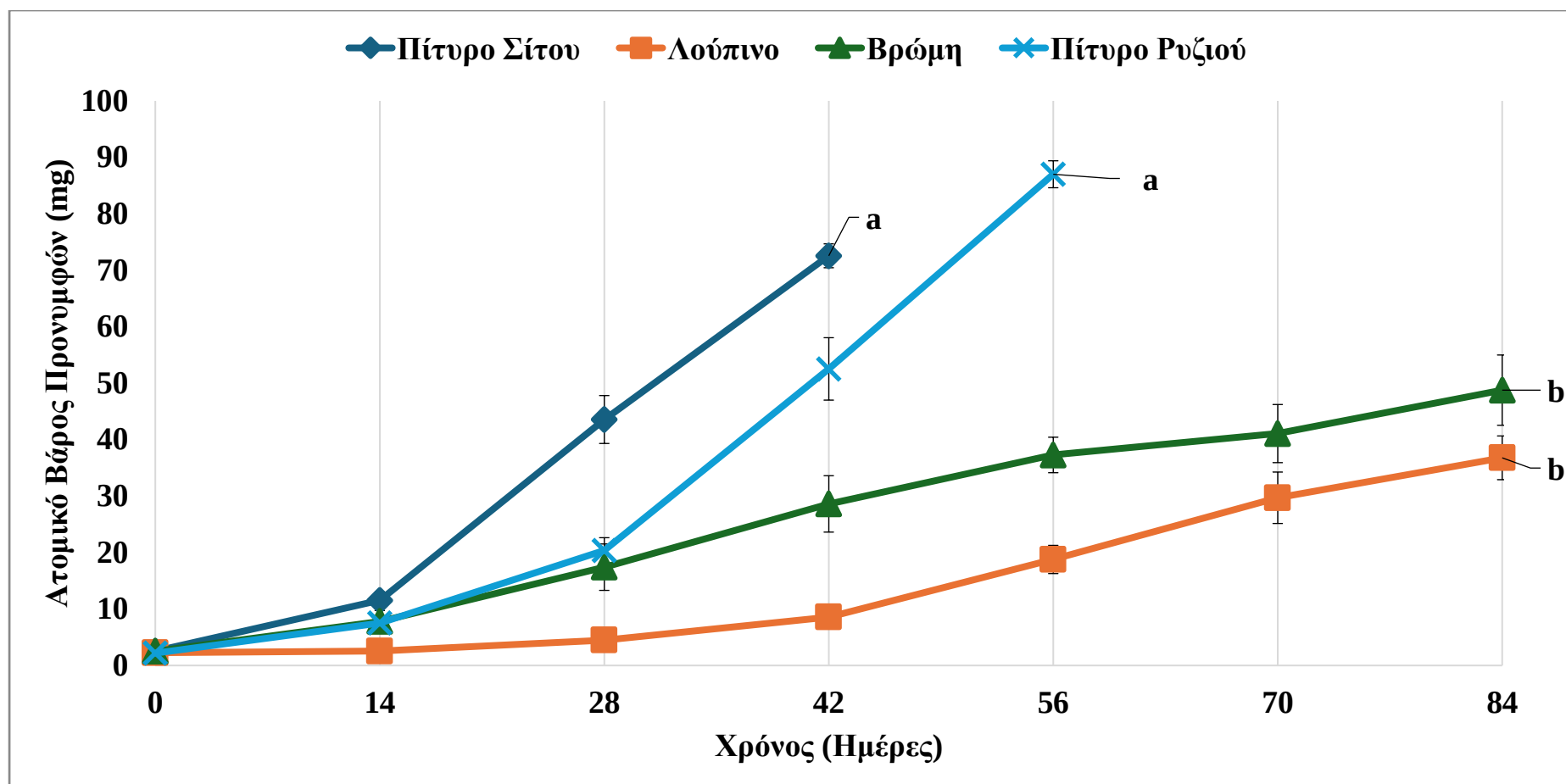
Στη συγκεκριμένη βιοδοκιμή, αξιολογήθηκε σε μεγάλη κλίμακα η ανάπτυξη των προνυμφών της ελληνικής φυλής *T. molitor* σε τέσσερα διαφορετικά υποστρώματα διατροφής. Στο **Διάγραμμα 1 (Πίνακας 3)** παρουσιάζεται το ατομικό βάρος των προνυμφών στα 4 διαφορετικά υποστρώματα. Σύμφωνα με τη στατιστική ανάλυση καταγράφηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές όσον αφορά το ατομικό βάρος των τεσσάρων βιοδοκιμών. Το μεγαλύτερο ατομικό βάρος καταγράφηκε για τη μεταχείριση που περιείχε πίτυρο ρυζιού με τιμή 87.0mg, η οποία δε διέφερε στατιστικά σημαντικά από το πίτυρο σίτου (72.6mg). Ωστόσο, και οι δύο αυτές μεταχειρίσεις διέφεραν στατιστικά σημαντικά από τις μεταχειρίσεις με βρώμη και λούπινο ως θρεπτικά υποστρώματα, όπου καταγράφηκαν οι χαμηλότερες τιμές ατομικού βάρους, οι οποίες ήταν 48.8 και 36.8, αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι παρόλο που για τη μεταχείριση με πίτυρο ρυζιού καταγράφηκε το μεγαλύτερο ατομικό βάρος, οι προνύμφες στη μεταχείριση με πίτυρο σίτου ολοκλήρωσαν την ανάπτυξή τους 14 ημέρες (42 ημέρες) πριν από το πίτυρο ρυζιού (56 ημέρες). Αντίθετα με το πίτυρο σίτου, οι προνύμφες των μεταχειρίσεων με λούπινο και βρώμη χρειάστηκαν 28 ημέρες επιπλέον (84 ημέρες) σε σχέση με το πίτυρο ρυζιού ώστε το 10% των προνυμφών να μεταβούν στο στάδιο της νύμφης.

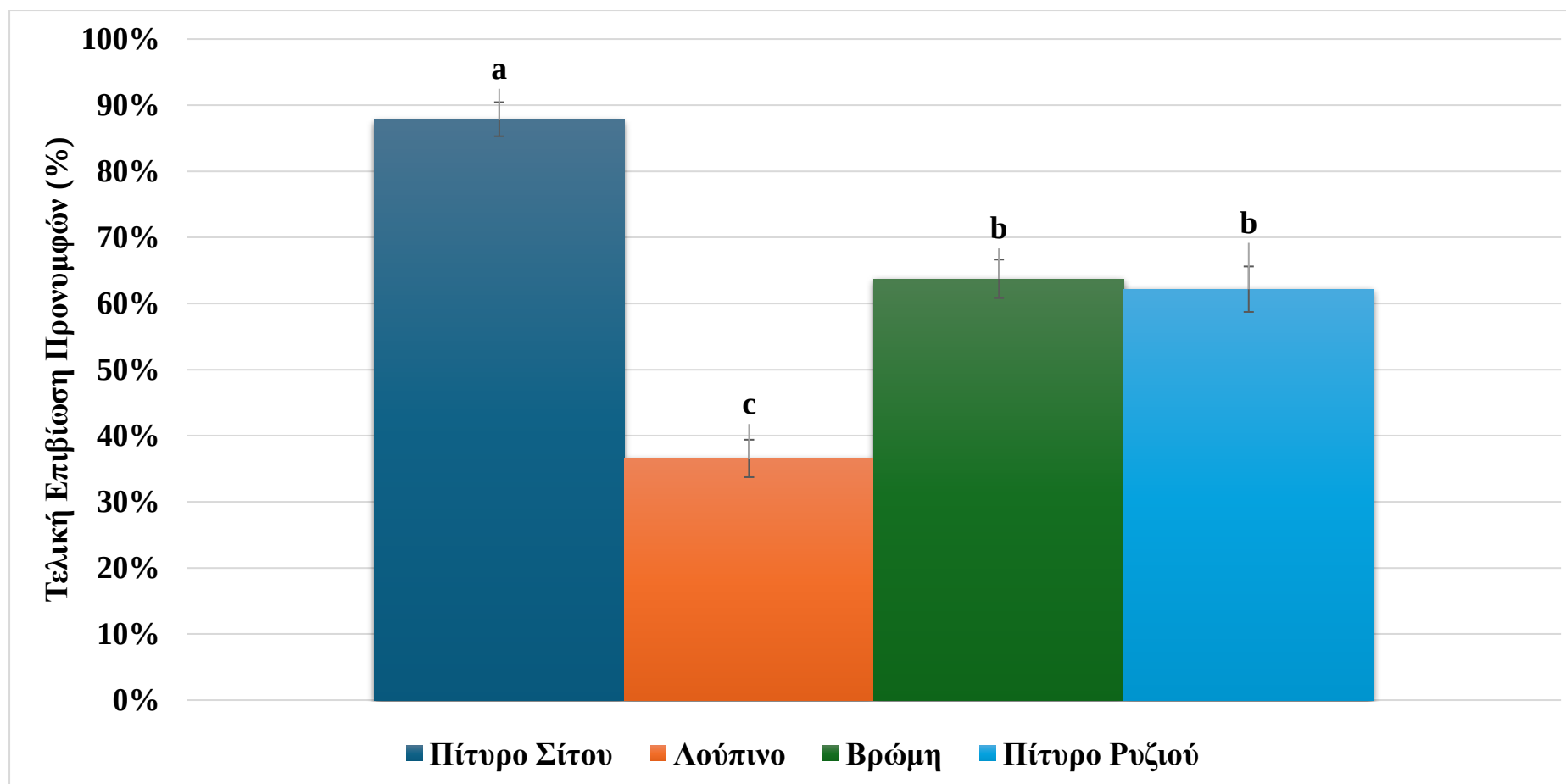
Όσον αφορά τα αποτελέσματα για το τελικό ποσοστό επιβίωσης των προνυμφών, αυτά παρουσιάζονται στο **Διάγραμμα 2 (Πίνακας 3)**. Το μεγαλύτερο ποσοστό επιβίωσης μεταξύ των τεσσάρων μεταχειρίσεων καταγράφηκε για το πίτυρο σίτου (87.9%), το οποίο διέφερε στατιστικά σημαντικά από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Το μικρότερο ποσοστό επιβίωσης σημειώθηκε στη μεταχείριση με λούπινο (36.6%), η οποία, επίσης, διέφερε στατιστικά σημαντικά από τις υπόλοιπες μεταχειρίσεις. Στην περίπτωση της επιβίωσης των προνυμφών, στατιστικά σημαντικές διαφορές δεν καταγράφηκαν μεταξύ των μεταχειρίσεων με βρώμη και πίτυρο ρυζιού για τις οποίες καταγράφηκαν τιμές της τάξεως του 63.7 και 62.2% αντίστοιχα.

Στο **Διάγραμμα 3 (Πίνακας 3)** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από το μέσο όρο του συνολικού βάρους του frass που παράχθηκε κατά τη διάρκεια της βιοδοκιμής για κάθε μεταχείριση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης, το πίτυρο ρυζιού διέφερε σημαντικά από όλες τις μεταχειρίσεις και ήταν αυτό με το μεγαλύτερο βάρος frass

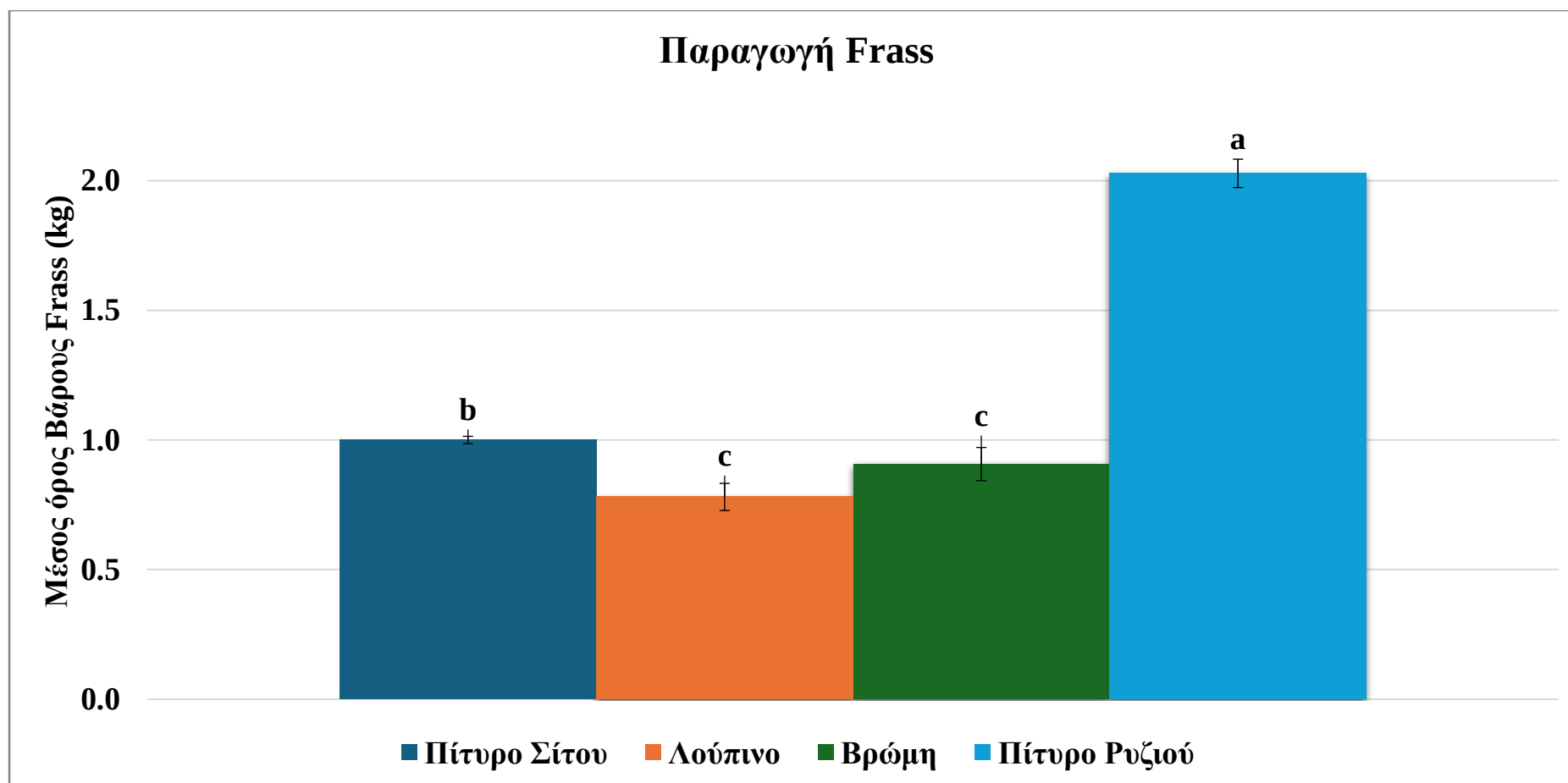
(2.0 kg). Η δεύτερη μεγαλύτερη τιμή καταγράφηκε για τη πίτυρο σίτου με βάρος 1.3 kg, το οποίο διέφερε στατιστικά σημαντικά από τις υπόλοιπες δίαιτες. Ωστόσο, δεν παρουσιάστηκαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων με λούπινο και βρώμη, με τιμές 0.8 και 0.9kg, αντίστοιχα.

Στατιστικά σημαντικές διαφορές παρουσιάστηκαν και στους δείκτες μετατρεψιμότητας της τροφής με τις τρεις από τις τέσσερις μεταχειρίσεις (βρώμη, πίτυρο σίτου και ρυζιού) να αποδεικνύονται στατιστικά καλύτερες δίαιτες για την εκτροφή του *T. molitor* σε σχέση με το λούπινο. Είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι η ανάπτυξη των προνυμφών στη μεταχείριση που χρησιμοποιήθηκε το λούπινο ως θρεπτικό υπόστρωμα δεν ευδοκιμήθηκε με αποτέλεσμα να μην πραγματοποιηθεί συγκομιδή, λόγω σημαντικών δυσκολιών. Οι τελικές μετρήσεις τη συγκεκριμένης μεταχείρισης έγιναν με τρεις δειγματοληψίες ανά επανάληψη με τη διαδικασία που περιγράφεται στην ενότητα «**2.2.1 Συλλογή Προνυμφών και Σχεδιασμός Πειραμάτων**».





Διάγραμμα 2: Μέσοι όροι ποσοστού επιβίωσης (%) *T. molitor* των τεσσάρων μεταχειρίσεων. Οι μέσοι όροι που ακολουθούνται από το ίδιο πεζό γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σύμφωνα με το Tukey HSD test



Διάγραμμα 3: Μέσοι όροι βάρους Frass (kg) των τεσσάρων μεταχειρίσεων. Η καταγραφή του συνολικού βάρους έγινε κατά την συγκομιδή. Οι μέσοι όροι που ακολουθούνται από το ίδιο πεζό γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σύμφωνα με το Tukey HSD test

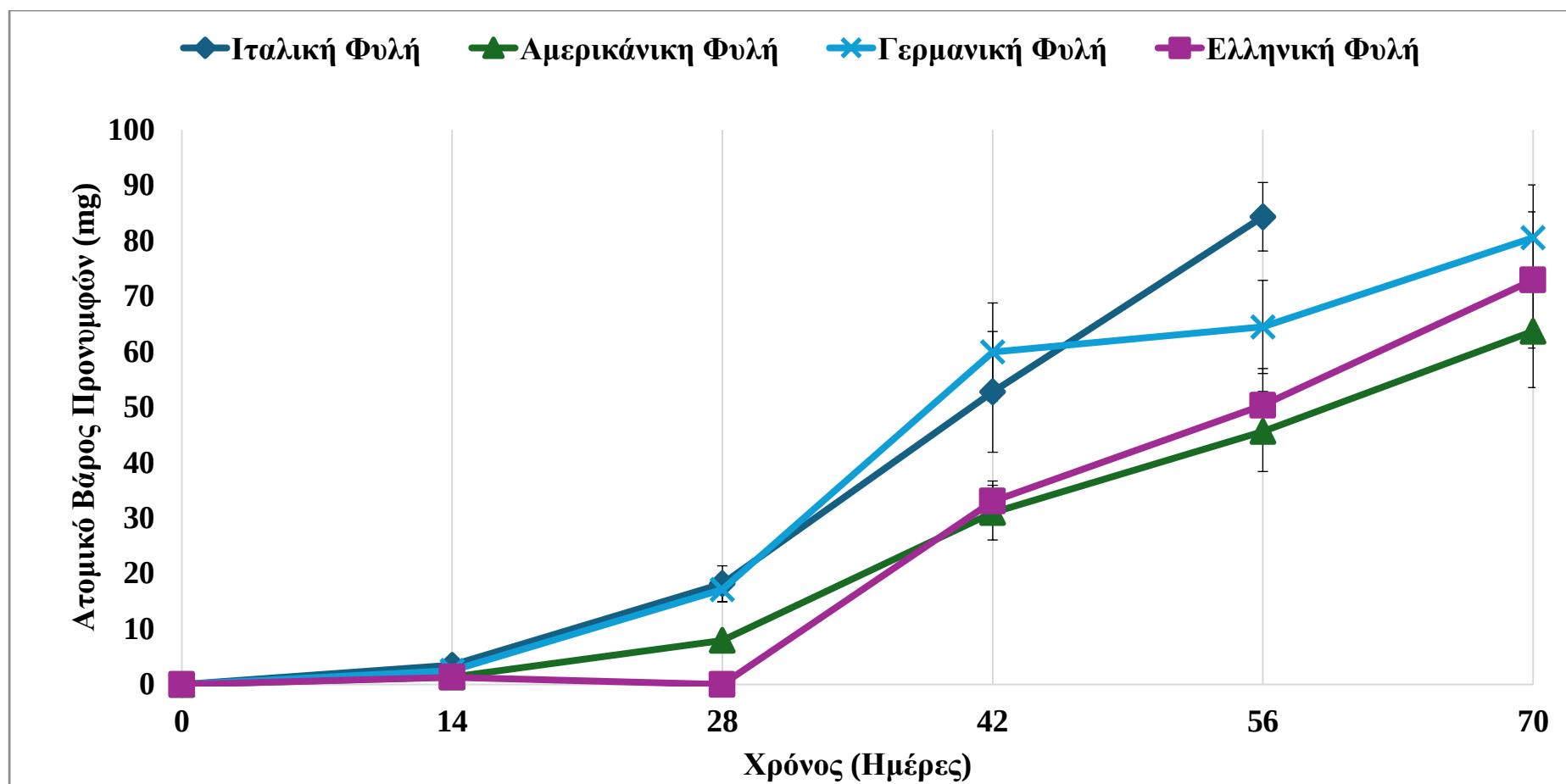
Πίνακας 3: Μέσοι όροι ($\pm$ τυπικό σφάλμα) των δεικτών αξιοποίησης τροφής, της τελικής επιβίωσης (%), του ατομικού βάρους των προνυμφών (mg) και του βάρους του Frass (kg) από τις προνύμφες του είδους *T. molitor* τεσσάρων μεταχειρίσεων. Οι μέσοι όροι που ακολουθούνται από το ίδιο πεζό γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σύμφωνα με το Tukey HSD test

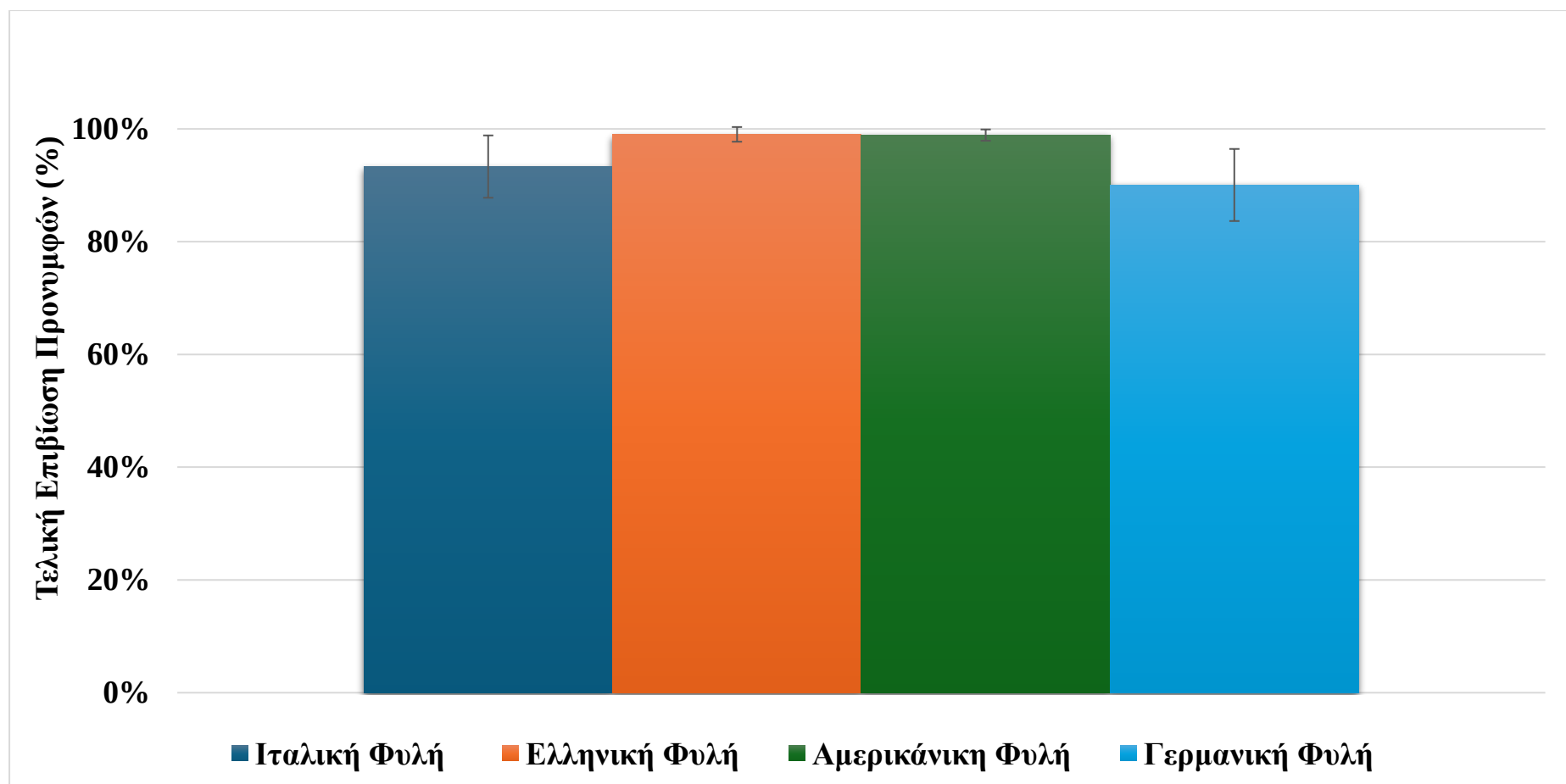
Μεταχειρίσεις	Αριθμός τελικής επιβίωσης (%)	Ατομικό βάρος προνυμφών (mg)	Frass (kg)	FCR	ECI (%)	SGR (%)
Πίτυρο Σίτου	87.9 $\pm$ 0.0 a	72.6 $\pm$ 2.1 a	1.3 $\pm$ 0.0 b	3.2 $\pm$ 0.1 b	32.0 $\pm$ 1.5 a	6.5 $\pm$ 0.0 a
Λούπινο	36.6 $\pm$ 0.0 c	36.8 $\pm$ 3.9 b	0.8 $\pm$ 0.1 c	11.2 $\pm$ 1.7 a	10.2 $\pm$ 1.8 b	2.9 $\pm$ 0.1 c
Βρώμη	63.7 $\pm$ 0.0 b	48.8 $\pm$ 6.2 b	0.9 $\pm$ 0.1 c	4.1 $\pm$ 0.8 b	28.7 $\pm$ 4.6 a	3.8 $\pm$ 0.3 b
Πίτυρο Ρυζιού	62.2 $\pm$ 0.0 b	87.0 $\pm$ 2.4 a	2.0 $\pm$ 0.1 a	3.6 $\pm$ 0.3 b	28.3 $\pm$ 1.8 a	4.4 $\pm$ 0.1 b

3.2 Βιοδοκιμή II: Εκτίμηση ανάπτυξης προνυμφών τεσσάρων φυλών στην ίδια διαίτα

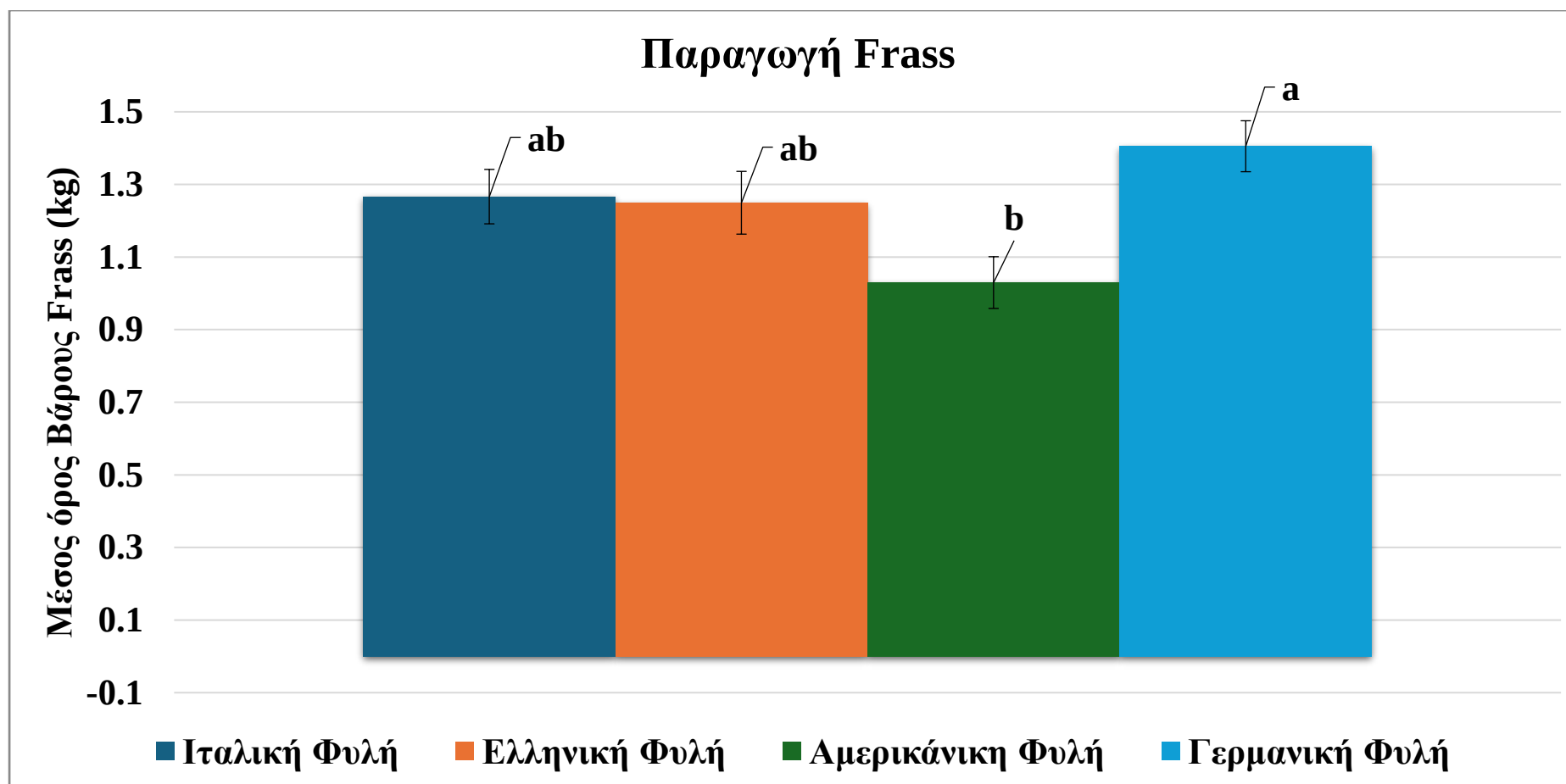
Στη συγκεκριμένη βιοδοκιμή, αξιολογήθηκε η ανάπτυξη των προνυμφών από τέσσερεις φυλές του *T. molitor* από διαφορετικές γεωγραφικές περιοχές (Ελλάδα, Γερμανία, Αμερική και Ιταλία) στο ίδιο υπόστρωμα και συγκεκριμένα σε πίτυρο σίτου. Στο **Διάγραμμα 4** παρουσιάζεται το ατομικό βάρος των προνυμφών των τεσσάρων διαφορετικών φυλών, όπου σύμφωνα με την στατιστική ανάλυση, δεν υπήρξαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των μεταχειρίσεων. Ωστόσο, το μεγαλύτερο βάρος προνυμφών καταγράφηκε για την ελληνική φυλή με τιμή 84.3mg, ενώ ήταν και η μοναδική μεταχείριση, στην οποία οι μετρήσεις ολοκληρώθηκαν 14 ημέρες νωρίτερα. Στατιστικά σημαντικές διαφορές δεν υπήρξαν ούτε στο τελικό ποσοστό επιβίωσης των προνυμφών, καθώς τα ποσοστά ήταν μεγαλύτερα του 90%, ενώ το μεγαλύτερο ποσοστό επιβίωσης καταγράφηκε στην ελληνική φυλή (99%). Όσον αφορά το μέσο βάρος του frass ανά μεταχείριση, η μεγαλύτερη ποσότητα παράχθηκε από τη γερμανική φυλή με τιμή 1.4kg, η οποία διέφερε στατιστικά σημαντικά από την αμερικάνικη φυλή που είχε τη μικρότερη παραγωγή frass (1.0kg). Η παραγωγή του frass από την ιταλική και ελληνική φυλή δε διέφερε στατιστικά σημαντικά, με τις τιμές που καταγράφηκαν να είναι 1.27 και 1.25kg, αντίστοιχα.

Οι δείκτες μετατρεψιμότητας της τροφής FCR και ECI δεν παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των τεσσάρων μεταχειρίσεων. Ωστόσο, ο καλύτερος δείκτης FCR και αντίστοιχα και ο ECI καταγράφηκε για την ιταλική φυλή με τιμές 2.7 και 38.6%, αντιστοίχως, γεγονός που συνάδει με το αποτέλεσμα του ατομικού βάρους, όπου η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε για την ίδια φυλή. Στην περίπτωση του δείκτη μετατρεψιμότητας της τροφής SGR, η υψηλότερη τιμή καταγράφηκε για την ελληνική φυλή (6.9%), η οποία διέφερε στατιστικά σημαντικά από την ιταλική φυλή (5.5%). Οι αντίστοιχες τιμές SGR για την γερμανική και αμερικάνικη φυλή δε διέφεραν στατιστικά σημαντικά, ενώ οι τιμές τους ήταν 6.1 και 6.4%, αντίστοιχα.





Διάγραμμα 5: Μέσοι όροι ποσοστού επιβίωσης (%) *T. molitor* των τεσσάρων μεταχειρίσεων. Οι μέσοι όροι που ακολουθούνται από το ίδιο πεζό γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σύμφωνα με το Tukey HSD test



Διάγραμμα 6: Μέσοι όροι βάρους Frass (kg) των τεσσάρων μεταχειρίσεων. Η καταγραφή του συνολικού βάρους έγινε κατά την συγκομιδή. Οι μέσοι όροι που ακολουθούνται από το ίδιο πεζό γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σύμφωνα με το Tukey HSD test

Πίνακας 4: Μέσοι όροι ($\pm$ τυπικό σφάλμα) των δεικτών αξιοποίησης τροφής, της τελικής επιβίωσης (%), του ατομικού βάρους των προνυμφών (mg) και του βάρους του Frass (kg) από τις προνύμφες του είδους *T.molitor* τεσσάρων μεταχειρίσεων. Οι μέσοι όροι που ακολουθούνται από το ίδιο πεζό γράμμα δεν διαφέρουν στατιστικώς σημαντικά μεταξύ τους σύμφωνα με το Tukey HSD test

Μεταχειρίσεις	Αριθμός τελικής επιβίωσης (%)	Ατομικό βάρος προνυμφών (mg)	Frass (kg)	FCR	ECI (%)	SGR (%)
Ελληνική Φυλή	99.0 $\pm$ 0.1	72.9 $\pm$ 6.2	1.25 $\pm$ 0.1 ab	3.0 $\pm$ 0.3	35.7 $\pm$ 3.3	6.9 $\pm$ 0.2 a
Ιταλική Φυλή	93.3 $\pm$ 0.0	84.3 $\pm$ 12.3	1.27 $\pm$ 0.1 ab	2.7 $\pm$ 0.5	38.6 $\pm$ 5.3	5.5 $\pm$ 0.1 b
Αμερικάνικη Φυλή	98.9 $\pm$ 0.0	63.7 $\pm$ 10.2	1.0 $\pm$ 0.1 b	3.2 $\pm$ 0.4	34.7 $\pm$ 5.6	6.4 $\pm$ 0.3 ab
Γερμανική Φυλή	90.1 $\pm$ 0.1	80.6 $\pm$ 9.5	1.4 $\pm$ 0.1 a	3.0 $\pm$ 0.2	34.3 $\pm$ 2.3	6.1 $\pm$ 0.3 ab

ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Τα αποτελέσματα της Βιοδοκιμή Ι, παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές διαφορές όσον αφορά το ατομικό βάρος προνυμφών, αλλά και στον αριθμό τελικής επιβίωσης των προνυμφών. Στην παρούσα μελέτη όσον αφορά το ατομικό βάρος των προνυμφών που τράφηκαν με το πίτυρο σίτου ήταν 72.6 mg σε διάστημα 42 ημερών. Σε αντίθεση με αυτά τα αποτελέσματα, έρευνα που διεξήχθη από τους Fasce et al. (2022) έδειξε ότι οι προνύμφες του *T. molitor* που τράφηκαν με πίτυρο σίτου στις 48 ημέρες κατέγραψαν βάρος 45.4mg. Αυτό μας υποδεικνύει ότι η παρούσα μελέτη κατέγραψε υψηλότερη ανάπτυξη σε λιγότερο χρονικό διάστημα. Παρόμοια αποτελέσματα με την παρούσα έρευνα καταγράφηκαν από τους Vrontaki et al., (2024), όπου το τελικό ατομικό βάρος των προνυμφών που τράφηκαν με πίτυρο σιταριού άγγιξε τα 98.4 mg σε 56 ημέρες. Τα αποτελέσματα των προαναφερθέντων πειραμάτων, επιβεβαιώνουν την καταλληλότητα του συγκεκριμένου υποστρώματος για τη βέλτιστη ανάπτυξη των προνυμφών του *T. molitor*. Όσον αφορά την τελική επιβίωση των προνυμφών της πρώτης βιοδοκιμής, οι προνύμφες που τράφηκαν με πίτυρο σιταριού κατέγραψαν ποσοστό επιβίωσης 87.9%. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης βιοδοκιμής έρχονται σε αντίθεση με αυτά των López-Gámez et al. (2024), οι οποίοι κατέγραψαν χαμηλότερο ποσοστό επιβίωσης (74%) στην ίδια διαίτα. Τέλος, η μετατροπή της τροφής σε βιομάζα, η οποία μεταφράζεται υπολογίζοντας τον δείκτη FCR, στη διαίτα με πίτυρο σίτου ήταν 3.2, ενώ σε παρόμοια έρευνα των Miroslava Polovinski-Horvatović et al. (2024) ο δείκτης FCR σε έντομα που τράφηκαν με την ίδια τροφή ήταν 2.16, γεγονός που υποδεικνύει ότι οι τιμές μετατροπής διαφέρουν αρκετά μεταξύ τους.

Η μεταχείριση της οποίας το θρεπτικό υπόστρωμα αποτελούνταν από πίτυρο ρυζιού ήταν εκείνη με το υψηλότερο ατομικό βάρος προνυμφών, με τιμή 87.0 mg. Παρόμοια αποτελέσματα καταγράφηκαν και από την έρευνα που διεξήχθη από τους Vrontaki et al. (2024), όπου το ατομικό βάρος των προνυμφών στην αντίστοιχη μεταχείριση με πίτυρο ρυζιού ήταν 90.7mg, τιμή πολύ κοντά στα αποτελέσματα του παρόντος πειράματος. Σε μία άλλη έρευνα, οι Urrutia et al. (2023) σύγκριναν την ανάπτυξη των προνυμφών σε υπόστρωμα πίτυρου σίτου και πίτυρου ρυζιού. Παρόλο που οι προνύμφες είχαν καλύτερη ανάπτυξη στο πίτυρο σίτου, το πίτυρο ρυζιού έδωσε εξίσου ικανοποιητικά αποτελέσματα, ενώ το μέσο ατομικό βάρος των προνυμφών ήταν 75mg. Λαμβάνοντας υπόψιν τα αποτελέσματα των δύο προαναφερθέντων πειραμάτων, καταδεικνύεται πως το πίτυρο ρυζιού αποτελεί ένα εξίσου αποτελεσματικό υπόστρωμα εκτροφής με το πίτυρο σίτου για την ανάπτυξη των προνυμφών *T. molitor*. Παρά τα ικανοποιητικά αποτελέσματα που έδωσε το πίτυρο ρυζιού όσον αφορά το ατομικό βάρος,

στην περίπτωση της επιβίωσης των προνυμφών οι τιμές κυμάνθηκαν σε μικρότερα επίπεδα από αυτά του πίτυρου σίτου. Στη βιοδοκιμή I, το ποσοστό επιβίωσης των προνυμφών στο πίτυρο ρυζιού (62.2%) διέφερε στατιστικά σημαντικά από το πίτυρο σίτου (87.9%), ενώ τα αντίστοιχα ποσοστά στο πείραμα των Urrutia et al. (2023) δε διέφεραν στατιστικά σημαντικά (>97.5%).

Τα αποτελέσματα της πρώτης βιοδοκιμής, έδειξαν ότι η βρώμη δεν αποτελεί τη βέλτιστη επιλογή ως θρεπτικό υπόστρωμα για το *T. molitor*. Σε πείραμα μικρής κλίμακας που αξιολογήθηκε η χρήση διαφορετικών παραπροϊόντων για την εκτροφή του συγκεκριμένου είδους, το τελικό ατομικό βάρος των προνυμφών στη μεταχείριση που περιείχε βρώμη άγγιξε τα 90mg, ενώ το λούπινο ξεπέρασε τα 130mg (Rumbos et al., 2021). Σε αντίθεση με τα αποτελέσματα της παρούσας πτυχιακής διατριβής, οι προνύμφες του *T. molitor* αναπτύχθηκαν εξαιρετικά και στα δύο παραπροϊόντα, με το λούπινο να παρουσιάζει το μεγαλύτερο ατομικό βάρος προνυμφών (Rumbos et al., 2021). Ακόμη το ποσοστό επιβίωσης που καταγράφηκε σε προνύμφες που τράφηκαν με λούπινο έφτασε περίπου 57%, ενώ στην παρούσα μελέτη το ποσοστό που εμφάνισε ήταν αρκετά μικρότερο περίπου 36.6%. Ωστόσο, τα αποτελέσματα αυτά έρχονται σε αντίθεση με τα αποτελέσματα έρευνας που διεξήχθη από τους Vrontaki et al. (2024), όπου το ατομικό βάρος των προνυμφών του συγκεκριμένου είδους άγγιξε τα 80 mg, με τους συγγραφείς να αναφέρουν πως οι προνύμφες που τρέφονταν με βρώμη εμφάνισαν αισθητά μικρότερη ανάπτυξη σε σχέση με το πίτυρο ρυζιού. Είναι αξιόλογο να σημειωθεί πως η έρευνα των Rumbos et al. (2021) πραγματοποιήθηκε σε μικρή κλίμακα, δηλαδή ο πειραματικός σχεδιασμός έγινε σε μικρά κυλινδρικά φιαλίδια, σε αντίθεση με το πείραμα της παρούσας πτυχιακής εργασίας και το πείραμα των Vrontaki et al. (2024), όπου πραγματοποιήθηκαν σε μεγάλη κλίμακα, δηλαδή σε δίσκους εκτροφής εντόμων που χρησιμοποιούνται στη βιομηχανία εντόμων. Το γεγονός αυτό ίσως δικαιολογεί τις μεγάλες αποκλίσεις των δύο πειραμάτων στο ποσοστό επιβίωσης και στο τελικό ατομικό βάρος των προνυμφών. Ακόμη μια παραπλήσια μελέτη που διεξήχθη από τους Kröncke & Benning (2023) διαπίστωσε πως το λούπινο σε συνδυασμό με το πίτυρο σιταριού είχε πολύ καλά αποτελέσματα και στους δύο παράγοντες που προαναφέρθηκαν. Ενδεικτικά το ατομικό βάρος των προνυμφών περίπου 85 με 90 mg και το ποσοστό επιβίωσης άγγιξε το 100%. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των τριών πειραμάτων, φαίνεται πως το λούπινο όταν χρησιμοποιείται μόνο του ως υπόστρωμα εκτροφής σε πείραμα μεγάλης κλίμακας τα αποτελέσματα δεν είναι ικανοποιητικά. Ενώ όταν χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με άλλο παραπροϊόν τα αποτελέσματα του είναι εξαιρετικά και το θέτει κατάλληλο για την ανάπτυξη των προνυμφών.

Η μαζική εκτροφή του *T. molitor* βρίσκεται ακόμη σε αρχικά στάδια ανάπτυξης και απαιτεί νέες στρατηγικές που θα ενισχύσουν την αποδοτικότητα και την παραγωγικότητα. Η μελέτη και αξιολόγηση των διαφορετικών φυλών *T. molitor* αποτελούν βασικό παράγοντα για την κατανόηση των διαφορών στην ανάπτυξη, την επιβίωση και την αναπαραγωγή, καθώς και για την βελτίωση της συνολικής παραγωγικότητας του συγκεκριμένου είδους (Adamaki-Sotiraki et al., 2022). Παρ' όλο που η σύγκριση και αξιολόγηση των διαφορών των διαφορετικών φυλών είναι πολύ σημαντική, δεν υπάρχουν πολλές έρευνες με αυτή την θεματολογία, ενώ ο μεγαλύτερος αριθμός αυτών δεν έχουν αξιολογηθεί σε μεγάλη κλίμακα. Στην παρούσα μελέτη αξιολογήθηκε η ανάπτυξη τεσσάρων διαφορετικών φυλών του *T. molitor* από διαφορετικά γεωγραφικά μέρη, τα οποία ήταν η Γερμανία, η Ελλάδα, η Ιταλία και η Αμερική, τα οποία εκτράφηκαν στο ίδιο υπόστρωμα (πίτυρο σίτου). Σύμφωνα με τα αποτελέσματα της παρούσας πτυχιακή εργασίας, η στατιστική ανάλυση δεν έδειξε σημαντικές διαφορές στο βάρος και στην επιβίωση των προνυμφών με την αμερικάνικη φυλή να έχει τις χαμηλότερες τιμές. Αυτά τα αποτελέσματα έρχονται σε αντίθεση με αυτά των Adamaki-Sotiraki et al. (2021), όπου η σύγκριση εφτά διαφορετικών φυλών, σε μικρής κλίμακας πείραμα, έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές με την ελληνική και ιταλική φυλή να παρουσιάζουν την καλύτερη ανάπτυξη των προνυμφών. Ωστόσο, τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης έρευνας όσον αφορά το ατομικό βάρος των προνυμφών ήταν συγκριτικά μεγαλύτερα σε σχέση με τα αποτελέσματα της δεύτερης βιοδοκιμής, της οποίας οι τιμές στο ατομικό βάρος κυμάνθηκαν από 63.7 mg (αμερικάνικη φυλή) έως 84.3 mg (ιταλική φυλή).

Σε έρευνα που διεξήχθη από τους Adamaki-Sotiraki et al. (2023b) καταγράφηκε ποσοστό επιβίωσης 93% για την ιταλική φυλή και ατομικό βάρος προνυμφών περίπου 185 mg. Στο σύνολο των πειραμάτων που προαναφέρθηκαν αποδείχθηκε ότι η ιταλική φυλή έχει το μεγαλύτερο τελικό ατομικό βάρος των προνυμφών, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από τα αποτελέσματα της παρούσας πτυχιακής εργασίας. Ακόμη μια φυλή που αξιολογήθηκε ήταν η Αμερικάνικη η οποία είχε λιγότερο ικανοποιητικά αποτελέσματα στο ατομικό βάρος των προνυμφών (63.7 mg) σε σχέση με τις υπόλοιπες φυλές. Ωστόσο στην τελική επιβίωση παρουσίασε τιμές μεγαλύτερες του 98%. Σε έρευνα των Adamaki-Sotiraki et al. (2023), η οποία πραγματοποιήθηκε σε μεγάλη κλίμακα η τελική επιβίωση της συγκεκριμένης φυλής ήταν περίπου 65 %, ενώ το ατομικό βάρος των προνυμφών καταγράφηκε στα 91 mg. Στην περίπτωση της γερμανικής φυλής, τόσο το ατομικό βάρος των προνυμφών όσο και το ποσοστό επιβίωσης, ήταν συγκρίσιμα με τις υπόλοιπες φυλές χωρίς να καταγράφονται στατιστικά σημαντικές διαφορές. Παρόμοια αποτελέσματα παρουσιάστηκαν και στην έρευνα των Rumbos

et al. (2021), όπου η γερμανική φυλή είχε το μεγαλύτερο ατομικό βάρος σε σχέση με τις υπόλοιπες φυλές που αξιολογήθηκαν και το υψηλότερο ποσοστό επιβίωσης που άγγιξε το 96%.

Συμπερασματικά, η παρούσα πτυχιακή εργασία ανέδειξε σημαντικά στοιχεία αναφορικά με την επίδραση διαφορετικών υποστρωμάτων και φυλών του *T. molitor* στην ανάπτυξη, την επιβίωση και τη μετατρεψιμότητα τροφής σε βιομάζα. Η χρήση πίτυρου σίτου και ρυζιού ως θρεπτικά υποστρώματα παρουσίασαν υψηλές τιμές ατομικού βάρους και ποσοστά επιβίωσης, επιβεβαιώνοντας την καταλληλότητά τους για μαζική εκτροφή του είδους. Αντιθέτως, η βρώμη και το λούπινο εμφάνισαν περιορισμένη απόδοση, γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν αποτελούν ιδανικά υποστρώματα για τη μαζική εκτροφή του *T. molitor*. Η αξιολόγηση τεσσάρων γεωγραφικά διαφοροποιημένων φυλών του ίδιου είδους δεν κατέδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές στο ατομικό βάρος και την επιβίωση των προνυμφών. Ωστόσο, η αξιολόγηση όλων των παραμέτρων που καταμετρήθηκαν στην παρούσα πτυχιακή ανέδειξαν την ιταλική και ελληνική φυλή ως τις προτιμότερες για μαζική εκτροφή. Τα παραπάνω ευρήματα συνεισφέρουν ουσιαστικά στη βιβλιογραφία και υποδεικνύουν ότι η επιλογή κατάλληλου υποστρώματος, καθώς και η φυλή του εντόμου, αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη βελτιστοποίηση της εκτροφής *T. molitor* σε βιομηχανική κλίμακα.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Μπουχέλος, Κ. Θ. (2015). ΤΑ ENTOMA ΩΣ ΤΡΟΦΗ ΑΝΘΡΩΠΩΝ ΚΑΙ ΖΩΩΝ.
<https://Cleaningnews.gr/Wp-Content/Uploads/2015/10/%CE%A4%CE%91-%CE%95%CE%9D%CE%A4%CE%9F%CE%9C%CE%91-%CE%A9%CE%A3-%CE%A4%CE%A1%CE%9F%CE%A6%CE%97-%CE%91%CE%9D%CE%98%CE%A1%CE%A9%CE%A0%CE%A9%CE%9D-%CE%9A%CE%91%CE%99-%CE%96%CE%A9%CE%A9%CE%9D.pdf>.
- Abiusi, F., Moñino Fernández, P., Canziani, S., Janssen, M., Wijffels, R. H., & Barbosa, M. (2022). Mixotrophic cultivation of *Galdieria sulphuraria* for C-phycocyanin and protein production. *Algal Research*, 61, 102603. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2021.102603>
- Adamaki-Sotiraki, C., Deruytter, D., Rumbos, C. I., & Athanassiou, C. G. (2023). Cross-breeding of *Tenebrio molitor* strains from a large-scale perspective. *Journal of Insects as Food and Feed*, 10(5), 855–864. <https://doi.org/10.1163/23524588-20230116>
- Adamaki-Sotiraki, C., Rumbos, C. I., & Athanassiou, C. G. (2022a). Developmental plasticity among strains of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor* L., under dry conditions. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(3), 281–288. <https://doi.org/10.3920/jiff2021.0087>
- Adamaki-Sotiraki, C., Rumbos, C. I., & Athanassiou, C. G. (2022b). Strain effect on the adult performance of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor* L.. *Journal of Insects as Food and Feed*, 8(12), 1–10. <https://doi.org/10.3920/jiff2021.0207>
- Adamaki-Sotiraki, C., Rumbos, C. I., & Athanassiou, C. G. (2023). Mating compatibility and offspring traits evaluation among different strains of *Tenebrio molitor*. *Environmental Science and Pollution Research International*, 30(43), 97052–97062. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-29116-1>
- Akinsemolu, A. A., & Onyeaka, H. N. (2025). Mycoproteins as sustainable food sources: current applications and future prospects. *Deleted Journal*, 7(3). <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06614-0>
- Aschemann-Witzel, J., Gantriis, R. F., Fraga, P., & Perez-Cueto, F. J. A. (2020). Plant-based Food and Protein Trend from a Business perspective: Markets, consumers, and the Challenges and Opportunities in the Future. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 61(18), 1–10. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1793730>

- Awobusuyi, T. D., Siwela, M., & Pillay, K. (2020). Sorghum–Insect Composites for Healthier Cookies: Nutritional, Functional, and Technological Evaluation. *Foods*, 9(10), 1427. <https://doi.org/10.3390/foods9101427>
- Bartkowicz, J. (2018). Owady jadalne w aspekcie żywieniowym, ekonomicznym i środowiskowym. *Handel Wewnętrzny*, 2 (373), 77–89. <https://cejsh.icm.edu.pl/cejsh/element/bwmeta1.element.desklight-7d796f3f-cf22-417e-ab55-5abaf572cbd1>
- Bauer, J., Biolo, G., Cederholm, T., Cesari, M., Cruz-Jentoft, A. J., Morley, J. E., Phillips, S., Sieber, C., Stehle, P., Teta, D., Visvanathan, R., Volpi, E., & Boirie, Y. (2013). Evidence-Based Recommendations for Optimal Dietary Protein Intake in Older People: a Position Paper from the PROT-AGE Study Group. *Journal of the American Medical Directors Association*, 14(8), 542–559. <https://doi.org/10.1016/j.jamda.2013.05.021>
- Becker, E. W. (2007). Micro-algae as a source of protein. *Biotechnology Advances*, 25(2), 207–210. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2006.11.002>
- Beesigamukama, D., Subramanian, S., & Tanga, C. M. (2022). Nutrient quality and maturity status of frass fertilizer from nine edible insects. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-11336-z>
- Bukkens, S. G. F. (1997). The nutritional value of edible insects. *Ecology of Food and Nutrition*, 36(2-4), 287–319. <https://doi.org/10.1080/03670244.1997.9991521>
- Chang, L., Lan, Y., Bandillo, N., Ohm, J.-B., Chen, B., & Rao, J. (2022). Plant proteins from green pea and chickpea: Extraction, fractionation, structural characterization and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 123, 107165. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.107165>
- Cossins, A. R., & Bowler, K. (1987). *Temperature Biology of Animals*. Springer Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3127-5>
- De Castro, R. J. S., Ohara, A., Aguilar, J. G. dos S., & Domingues, M. A. F. (2018). Nutritional, functional and biological properties of insect proteins: Processes for obtaining, consumption and future challenges. *Trends in Food Science & Technology*, 76, 82–89. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.04.006>
- Durst, P. B., Johnson, D. V., Leslie, R. N., & Shono, K. (2010). *Forest insects as food: humans bite back: proceedings of a workshop on Asia-Pacific resources and their potential for*

development, 19-21 February 2008, Chiang Mai, Thailand. Food And Agriculture Organization of The United Nations, Regional Office for Asia and The Pacific.

- Edwards, D. G., & Cummings, J. H. (2010). The protein quality of mycoprotein. *Proceedings of the Nutrition Society*, 69(OCE4). <https://doi.org/10.1017/s0029665110001400>
- Elahi, U., Xu, C., Wang, J., Lin, J., Wu, S., Zhang, H., & Qi, G. (2022). Insect meal as a feed ingredient for poultry. *Animal Bioscience*, 35(2), 332–346. <https://doi.org/10.5713/ab.21.0435>
- Eriksson, T., & Picard, C. J. (2021). Genetic and genomic selection in insects as food and feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(5), 1–22. <https://doi.org/10.3920/jiff2020.0097>
- FAO. (2009). *How to Feed the World in 2050*. [https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How to Feed the World in 2050.pdf](https://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/expert_paper/How_to_Feed_the_World_in_2050.pdf)
- FAO. (2017). *The future of food and agriculture – Trends and challenges*. FAO. https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/2e90c833-8e84-46f2-a675-ea2d7afa4e24/content?utm_source
- Fasce, B., Ródenas, L., López, M. C., Moya, V. J., Pascual, J. J., & Cambra-López, M. (2022). Nutritive Value of Wheat Bran Diets Supplemented With Fresh Carrots and Wet Brewers' Grains in Yellow Mealworm. *Journal of Insect Science*, 22(3). <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieac022>
- Fernandez-Orozco, R., Frias, J., Muñoz, R., Zielinski, H., Piskula, M. K., Kozłowska, H., & Vidal-Valverde, C. (2008). Effect of fermentation conditions on the antioxidant compounds and antioxidant capacity of *Lupinus angustifolius* cv. zapaton. *European Food Research and Technology*, 227(4), 979–988. <https://doi.org/10.1007/s00217-007-0809-3>
- Finke, M. D., Rojo, S., Roos, N., van Huis, A., & Yen, A. L. (2015). The European Food Safety Authority scientific opinion on a risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. *Journal of Insects as Food and Feed*, 1(4), 245–247. <https://doi.org/10.3920/jiff2015.x006>
- Finnigan, T. J. A., Theobald, H. E., & Bajka, B. (2024). Mycoprotein: A Healthy and Sustainable Source of Alternative Protein-Based Foods. *Annual Review of Food Science and Technology*, 16(1). <https://doi.org/10.1146/annurev-food-111523-121802>

- Finnigan, T. J. A., Wall, B. T., Wilde, P. J., Stephens, F. B., Taylor, S. L., & Freedman, M. R. (2019). Mycoprotein: The Future of Nutritious Nonmeat Protein, a Symposium Review. *Current Developments in Nutrition*, 3(6). <https://doi.org/10.1093/cdn/nzz021>
- Fraenkel, G. (1950). The Nutrition of the Mealworm, *Tenebrio molitor* L. (Tenebrionidae, Coleoptera). *Physiological Zoology*, 23(2), 92–108. <https://doi.org/10.1086/physzool.23.2.30152067>
- Godfray, H. C. J., Aveyard, P., Garnett, T., Hall, J. W., Key, T. J., Lorimer, J., Pierrehumbert, R. T., Scarborough, P., Springmann, M., & Jebb, S. A. (2018). Meat consumption, health, and the environment. *Science*, 361(6399). <https://doi.org/10.1126/science.aam5324>
- Graham, A. E., & Ledesma-Amaro, R. (2023). The microbial food revolution. *Nature Communications*, 14(1), 2231. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-37891-1>
- Hadi, J., & Brightwell, G. (2021). Safety of Alternative Proteins: Technological, Environmental and Regulatory Aspects of Cultured Meat, Plant-Based Meat, Insect Protein and Single-Cell Protein. *Foods*, 10(6), 1226. <https://doi.org/10.3390/foods10061226>
- Hashempour-Baltork, F., Khosravi-Darani, K., Hosseini, H., Farshi, P., & Reihani, S. F. S. (2020). Mycoproteins as safe meat substitutes. *Journal of Cleaner Production*, 253, 119958. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.119958>
- Heckmann, L.-H., Andersen, J. L., Gianotten, N., Calis, M., Fischer, C. H., & Calis, H. (2018). Sustainable Mealworm Production for Feed and Food. *Edible Insects in Sustainable Food Systems*, 321–328. https://doi.org/10.1007/978-3-319-74011-9_19
- Houben, D., Daoulas, G., Faucon, M.-P., & Dulaurent, A.-M. (2020). Potential use of mealworm frass as a fertilizer: Impact on crop growth and soil properties. *Scientific Reports*, 10(1), 4659. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61765-x>
- Hubert, A. (2019). Industrial insects production as an alternative source of animal protein. *Comptes Rendus Biologies*, 342(7-8), 276–277. <https://doi.org/10.1016/j.crv.2019.09.028>
- Jafarzadeh, S., Qazanfarzadeh, Z., Majzoobi, M., Sheiband, S., Oladzadabbasabad, N., Esmaeili, Y., Barrow, C. J., & Timms, W. (2024). Alternative Proteins; A Path to Sustainable Diets and Environment. *Current Research in Food Science*, 9(100882), 100882–100882. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100882>
- Janssen, M., Wijffels, R. H., & Barbosa, M. J. (2022). Microalgae based production of single-cell protein. *Current Opinion in Biotechnology*, 75, 102705. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2022.102705>

- Janusz, P. (2017). White lupin (*Lupinus albus* L.) – nutritional and health values in human nutrition – a review. *Czech Journal of Food Sciences*, 35(No. 2), 95–105. <https://doi.org/10.17221/114/2016-cjfs>
- Jin, R. D., Suh, J. W., Park, R. D., Kim, Y. W., Krishnan, H. B., & Kim, K. Y. (2005). Effect of chitin compost and broth on biological control of *Meloidogyne incognita* on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). *Nematology*, 7(1), 125–132. <https://doi.org/10.1163/1568541054192171>
- Johansson, M., Xanthakis, E., Langton, M., Menzel, C., Vilaplana, F., Johansson, D. P., & Lopez-Sanchez, P. (2021). Mixed legume systems of pea protein and unrefined lentil fraction: Textural properties and microstructure. *LWT*, 144, 111212. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111212>
- Joosten, H., & Clarke, D. (2002). *Wise use of mires and peatlands : background and principles including a framework for decision-making*. Finland] International Mire Conservation Group International Peat Society.
- Khan, M. K. I., Asif, M., Razzaq, Z. U., Nazir, A., & Maan, A. A. (2022). Sustainable food industrial waste management through single cell protein production and characterization of protein enriched bread. *Food Bioscience*, 46, 101406. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101406>
- Khanashyam, A. C., Mundanat, A. S., Babu, K. S., Thorakkattu, P., Krishnan, R., Abdullah, S., Bekhit, A. E. A., McClements, D. J., Santivarangkna, C., & Nirmal, N. P. (2024). Emerging alternative food protein sources: production process, quality parameters, and safety point of view. *Critical Reviews in Biotechnology*, 45(1), 1–22. <https://doi.org/10.1080/07388551.2024.2341902>
- Khoshnevisan, B., Tabatabaei, M., Tsapekos, P., Rafiee, S., Aghbashlo, M., Lindeneg, S., & Angelidaki, I. (2020). Environmental life cycle assessment of different biorefinery platforms valorizing municipal solid waste to bioenergy, microbial protein, lactic and succinic acid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 117, 109493. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109493>
- Kingsolver, J. G., Higgins, J. K., & Augustine, K. E. (2015). Fluctuating temperatures and ectotherm growth: distinguishing non-linear and time-dependent effects. *Journal of Experimental Biology*, 218(14), 2218–2225. <https://doi.org/10.1242/jeb.120733>
- Kłobukowski, F., Śmiechowska, M., & Skotnicka, M. (2025a). Edible Insects from the Perspective of Sustainability—A Review of the Hazards and Benefits. *Foods*, 14(8), 1382. <https://doi.org/10.3390/foods14081382>

- Kołodziejczak, K., Onopiuk, A., Szpicer, A., & Poltorak, A. (2022). Meat Analogues in the Perspective of Recent Scientific Research: A Review. *Foods*, 11(1), 105. <https://doi.org/10.3390/foods11010105>
- Koo, H.-Y., Kim, S.-G., Oh, H.-K., Kim, J.-E., Choi, D.-S., Kim, D.-I., & Kim, I. (2013). Temperature-dependent Development Model of Larvae of Mealworm beetle, *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera: Tenebrionidae). *Korean Journal of Applied Entomology*, 52(4), 387–394. <https://doi.org/10.5656/ksae.2013.11.0.066>
- Kröncke, N., & Benning, R. (2022). Self-Selection of Feeding Substrates by *Tenebrio molitor* Larvae of Different Ages to Determine Optimal Macronutrient Intake and the Influence on Larval Growth and Protein Content. *Insects*, 13(7), 657. <https://doi.org/10.3390/insects13070657>
- Kröncke, N., & Benning, R. (2023). Influence of Dietary Protein Content on the Nutritional Composition of Mealworm Larvae (*Tenebrio molitor* L.). *Insects*, 14(3), 261. <https://doi.org/10.3390/insects14030261>
- Kumar, R., Hegde, A. S., Sharma, K., Parmar, P., & Srivatsan, V. (2022). Microalgae as a sustainable source of edible proteins and bioactive peptides – Current trends and future prospects. *Food Research International*, 157, 111338. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.111338>
- Kumar, V., Sharma, A., Kohli, S. K., Yadav, P., Bali, S., Bakshi, P., Parihar, R. D., Yuan, H., Yan, D., He, Y., Wang, J., Yang, Y., Bhardwaj, R., Thukral, A. K., & Zheng, B. (2019). Amino acids distribution in economical important plants: a review. *Biotechnology Research and Innovation*, 3(2), 197–207. <https://doi.org/10.1016/j.biori.2019.06.004>
- Kurek, M. A., Onopiuk, A., Pogorzelska-Nowicka, E., Szpicer, A., Zalewska, M., & Półtorak, A. (2022). Novel Protein Sources for Applications in Meat-Alternative Products—Insight and Challenges. *Foods*, 11(7), 957. <https://doi.org/10.3390/foods11070957>
- Kyriakopoulou, K., Keppler, J. K., & Goot, A. J. Van Der. (2021). Functionality of Ingredients and Additives in Plant-Based Meat Analogues. *Foods*, 10(3), 600. <https://doi.org/10.3390/foods10030600>
- Langston, K., Selaledi, L., & Yusuf, A. (2023). Evaluation of alternative substrates for rearing the yellow mealworm *Tenebrio molitor* (L). *International Journal of Tropical Insect Science*, 43(5), 1523–1530. <https://doi.org/10.1007/s42690-023-01061-z>

- Li, M., Mao, C., Li, X., Jiang, L., Zhang, W., Li, M., Liu, H., Fang, Y., Liu, S., Yang, G., & Hou, X. (2023). Edible Insects: A New Sustainable Nutritional Resource Worth Promoting. *Foods*, 12(22), 4073. <https://doi.org/10.3390/foods12224073>
- López-Gámez, G., Pino-García, R. Del, López-Bascón, M. A., & Verardo, V. (2024). Improving *Tenebrio molitor* Growth and Nutritional Value through Vegetable Waste Supplementation. *Foods*, 13(4), 594–594. <https://doi.org/10.3390/foods13040594>
- Lu, M.-X., Zhu, C.-X., Smetana, S., Zhao, M., Zhang, H.-B., Zhang, F., & Du, Y.-Z. (2023). Minerals in edible insects: review of content and potential for sustainable sourcing. *Food Science and Human Wellness*, 13(1), 65–74. <https://doi.org/10.26599/fshw.2022.9250005>
- Ludwig, D. (1956). Effects of Temperature and Parental Age on the Life Cycle of the Mealworm, *Tenebrio Molitor* Linnaeus (Coleoptera, Tenebrionidae). *Annals of the Entomological Society of America*, 49(1), 12–15. <https://doi.org/10.1093/aesa/49.1.12>
- Madau, F. A., Arru, B., Furesi, R., & Pulina, P. (2020). Insect Farming for Feed and Food Production from a Circular Business Model Perspective. *Sustainability*, 12(13), 5418. <https://doi.org/10.3390/su12135418>
- Mariotti, F., & Gardner, C. D. (2019). Dietary protein and amino acids in vegetarian diets-a review. *Nutrients*, 11(11), E2661. <https://doi.org/10.3390/nu11112661>
- Mohamad, A., Tan, C. K., Shah, N. N. A. K., Nayan, N., Ibrahim, A., Abdi, G., & Aadil, R. M. (2025). Insect protein: A pathway to sustainable protein supply chains, challenges, and prospects. *Journal of Agriculture and Food Research*, 19, 101678. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2025.101678>
- Morales-Ramos, J. A., Rojas, M. G., Dossey, A. T., & Berhow, M. (2020). Self-selection of food ingredients and agricultural by-products by the house cricket, *Acheta domesticus* (Orthoptera: Gryllidae): A holistic approach to develop optimized diets. *PLOS ONE*, 15(1), e0227400. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0227400>
- Murefu, T. R., Macheke, L., Musundire, R., & Manditsera, F. A. (2019). Safety of wild harvested and reared edible insects: A review. *Food Control*, 101, 209–224. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2019.03.003>
- Nadathur, S. R., Wanasundara, J. P. D., & Scanlin, L. (2017). *Sustainable protein sources*. London Academic Press.

- Okeudo-Cogan, M. C., Murray, B. S., Ettelaie, R., Connell, S. D., Radford, S. J., Micklethwaite, S., & Sarkar, A. (2023). Understanding the microstructure of a functional meat analogue: Demystifying interactions between fungal hyphae and egg white protein. *Food Hydrocolloids*, 140, 108606. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108606>
- Onyeaka, H., Anumudu, C. K., Okpe, C., Okafor, A., Ihenetu, F., Miri, T., Odeyemi, O. A., & Anyogu, A. (2022). Single Cell Protein for Foods and Feeds: A Review of Trends. *The Open Microbiology Journal*, 16(1). <https://doi.org/10.2174/18742858-v16-e2206160>
- Orkusz, A. (2021). Edible Insects versus Meat—Nutritional Comparison: Knowledge of Their Composition Is the Key to Good Health. *Nutrients*, 13(4), 1207. <https://doi.org/10.3390/nu13041207>
- Patil, N. D., Bains, A., Sridhar, K., Bhaswant, M., Kaur, S., Tripathi, M., Lanterbecq, D., Chawla, P., & Sharma, M. (2024). Extraction, Modification, Biofunctionality, and Food Applications of Chickpea (*Cicer arietinum*) Protein: An Up-to-Date Review. *Foods*, 13(9), 1398–1398. <https://doi.org/10.3390/foods13091398>
- Pelgrom, P. J. M., Berghout, J. A. M., van der Goot, A. J., Boom, R. M., & Schutyser, M. A. I. (2014). Preparation of functional lupine protein fractions by dry separation. *LWT - Food Science and Technology*, 59(2, Part 1), 680–688. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.06.007>
- Pereira, A., Ramos, F., & Sanches Silva, A. (2022). Lupin (*Lupinus albus* L.) Seeds: Balancing the Good and the Bad and Addressing Future Challenges. *Molecules*, 27(23), 8557. <https://doi.org/10.3390/molecules27238557>
- Petronio, G. P., Pietrangelo, L., Cutuli, M. A., Magnifico, I., Venditti, N., Guarnieri, A., Abate, G. A., Yewhalaw, D., Davinelli, S., & Di Marco, R. (2022). Emerging Evidence on *Tenebrio molitor* Immunity: A Focus on Gene Expression Involved in Microbial Infection for Host-Pathogen Interaction Studies. *Microorganisms*, 10(10), 1983–1983. <https://doi.org/10.3390/microorganisms10101983>
- Pihlanto, A., Mattila, P., Mäkinen, S., & Pajari, A.-M. . (2017). Bioactivities of alternative protein sources and their potential health benefits. *Food & Function*, 8(10), 3443–3458. <https://doi.org/10.1039/c7fo00302a>
- Polovinski-Horvatović, M., Jajić, I., Krstović, S., Beuković, D., Vukadinović, M., Popović, A., Petrović, M., & Laćarac, N. (2024). The growth performance and digestibility of *Tenebrio*

- molitor* fed with two different diets. *Food and Feed Research*, 52(1), 1–9. <https://doi.org/10.5937/ffr0-51937>
- Poveda, J. (2021). Insect frass in the development of sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(1). <https://doi.org/10.1007/s13593-020-00656-x>
- Punzo, F., & Mutchmor, J. A. (2022). Effects of Temperature, Relative Humidity and Period of Exposure on the Survival Capacity of *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae) on JSTOR. *Jstor.org*, 53(2), 260–270. <https://www.jstor.org/stable/25084029>
- Quilliam, R. S., Nuku-Adeku, C., Maquart, P., Little, D., Newton, R., & Murray, F. (2020). Integrating insect frass biofertilisers into sustainable peri-urban agro-food systems. *Journal of Insects as Food and Feed*, 2352-4588, 315–322. <https://doi.org/10.3920/jiff2019.0049>
- Rajhi, I., Baccouri, B., Rajhi, F., Mhadhbi, H., & Flamini, G. (2021). Monitoring the volatile compounds status of whole seeds and flours of legume cultivars. *Food Bioscience*, 41, 101105. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2021.101105>
- Ribeiro, N., Abelho, M., & Costa, R. (2018). A Review of the Scientific Literature for Optimal Conditions for Mass Rearing *Tenebrio molitor* (Coleoptera: Tenebrionidae). *Journal of Entomological Science*, 53(4), 434–454. <https://doi.org/10.18474/jes17-67.1>
- Rumbos, C. I., Adamaki-Sotiraki, C., Gourgouta, M., Karapanagiotidis, I. T., Asimaki, A., Mente, E., & Athanassiou, C. G. (2021). Strain matters: strain effect on the larval growth and performance of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor* L. *Journal of Insects as Food and Feed*, 7(8), 1195–1205. <https://doi.org/10.3920/jiff2021.0035>
- Rumbos, C. I., & Athanassiou, C. G. (2021). “Insects as Food and Feed: If You Can’t Beat Them, Eat Them!”—To the Magnificent Seven and Beyond. *Journal of Insect Science*, 21(2). <https://doi.org/10.1093/jisesa/ieab019>
- Rumbos, C. I., Karapanagiotidis, I. T., Mente, E., Psoufakis, P., & Athanassiou, C. G. (2020). Evaluation of various commodities for the development of the yellow mealworm, *Tenebrio molitor*. *Scientific Reports*, 10(1), 11224. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67363-1>
- Rumpold, B. A., & Schlüter, O. K. (2013). Nutritional composition and safety aspects of edible insects. *Molecular Nutrition & Food Research*, 57(5), 802–823. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201200735>
- Schlüter, O., Rumpold, B., Holzhauser, T., Roth, A., Vogel, R. F., Quasigroch, W., Vogel, S., Heinz, V., Jäger, H., Bandick, N., Kulling, S., Knorr, D., Steinberg, P., & Engel, K.-H. (2016). Safety

- aspects of the production of foods and food ingredients from insects. *Molecular Nutrition & Food Research*, 61(6), 1600520. <https://doi.org/10.1002/mnfr.201600520>
- Smetana, S., Sandmann, M., Rohn, S., Pleissner, D., & Heinz, V. (2017). Autotrophic and heterotrophic microalgae and cyanobacteria cultivation for food and feed: life cycle assessment. *Bioresource Technology*, 245, 162–170. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.113>
- Sogari, G., Dagevos, H., Amato, M., & Taufik, D. (2022). Consumer Perceptions and Acceptance of Insects As Feed and Food: Current Findings and Future Outlook. *Novel Foods and Edible Insects in the European Union*, 147–169. https://doi.org/10.1007/978-3-031-13494-4_8
- Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E., & Isambert, A. (2006). Commercial applications of microalgae. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 101(2), 87–96. <https://doi.org/10.1263/jbb.101.87>
- Sui, Y., & Vlaeminck, S. E. (2020). Dunaliella Microalgae for Nutritional Protein: An Undervalued Asset. *Trends in Biotechnology*, 38(1), 10–12. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2019.07.011>
- Tzompa-Sosa, D. A., Yi, L., Van Valenberg, H. J. F., Boekel, van, & Lakemond, C. M. M. (2014). Insect lipid profile: aqueous versus organic solvent-based extraction methods. *Food Research International*, 62, 1087–1094. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2014.05.052>
- United Nations. (2016). *Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development*. Republic of Mozambique, Ministry of Economy and Finance, National Directorate Of Planning And Budget.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. ESA/P/WP/248. https://desapublications.un.org/publications/world-population-prospects-2017-revision?utm_source
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). *World population prospects 2022: summary of results*. United Nations.
- United States Department of Agriculture. (2020). *Dietary guidelines for americans 2020-2025* . USDA. https://www.dietaryguidelines.gov/sites/default/files/2020-12/Dietary_Guidelines_for_Americans_2020-2025.pdf

- Urs, K. C. D., & Hopkins, T. L. (1973). Effect of moisture on growth rate and development of two strains of *Tenebrio molitor* L. (Coleoptera, Tenebrionidae). *Journal of Stored Products Research*, 8(4), 291–297. [https://doi.org/10.1016/0022-474x\(73\)90045-3](https://doi.org/10.1016/0022-474x(73)90045-3)
- Van Huis, A. (2019). Edible Insects. *Handbook of Eating and Drinking*, 1–16. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75388-1_123-1
- van Huis, A., & Oonincx, D. G. A. B. (2017). The environmental sustainability of insects as food and feed. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 37(5). <https://doi.org/10.1007/s13593-017-0452-8>
- Van Itterbeeck, J., & Van Huis, A. (2012). Environmental manipulation for edible insect procurement: a historical perspective. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 8(1), 3. <https://doi.org/10.1186/1746-4269-8-3>
- Van Vliet, S., Burd, N. A., & van Loon, L. J. (2015). The Skeletal Muscle Anabolic Response to Plant-versus Animal-Based Protein Consumption. *The Journal of Nutrition*, 145(9), 1981–1991. <https://doi.org/10.3945/jn.114.204305>
- Volpi, E., Campbell, W. W., Dwyer, J. T., Johnson, M. A., Jensen, G. L., Morley, J. E., & Wolfe, R. R. (2012). Is the Optimal Level of Protein Intake for Older Adults Greater Than the Recommended Dietary Allowance? *The Journals of Gerontology Series A: Biological Sciences and Medical Sciences*, 68(6), 677–681. <https://doi.org/10.1093/gerona/gls229>
- Vrontaki, M., Adamaki-Sotiraki, C., Rumbos, C. I., Anastasiadis, A., & Athanassiou, C. G. (2024a). Bridging the Gap: Scaling Up the Sustainable Production of the Yellow Mealworm with Agricultural By-Products—Insights into Larval Growth and Body Composition. *Agriculture*, 14(4), 520. <https://doi.org/10.3390/agriculture14040520>
- Vrontaki, M., Adamaki-Sotiraki, C., Rumbos, C. I., Anastasiadis, A., & Athanassiou, C. G. (2024b). Valorization of local agricultural by-products as nutritional substrates for *Tenebrio molitor* larvae: A sustainable approach to alternative protein production. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(24), 35760–35768. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-33564-8>
- WHO/FAO/UNU. (2007). *Protein and Amino Acid Requirements in Human Nutrition*. https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/43411/WHO_TRS_935_eng.pdf
- Wijffels, R. H., Barbosa, M. J., & Eppink, M. H. M. (2010). Microalgae for the production of bulk chemicals and biofuels. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4(3), 287–295. <https://doi.org/10.1002/bbb.215>

- Wu, G. (2009). Amino acids: metabolism, functions, and Nutrition. *Amino Acids*, 37(1), 1–17. <https://doi.org/10.1007/s00726-009-0269-0>
- Xian, Y., Yin, L., Wu, Z., Chen, D., Sun, Z., Jiang, X., & Tian, L. (2025). Characterization and preliminary safety evaluation of mycoprotein from *Fusarium compactum* MM-135. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 9. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1583642>
- Zhong, L., Liu, A. H., Blekkenhorst, L. C., Bondonno, N. P., Sim, M., Woodman, R. J., Croft, K. D., Lewis, J. R., Hodgson, J. M., & Bondonno, C. P. (2022). Development of a Food Composition Database for Assessing Nitrate and Nitrite Intake from Animal-based Foods. *Molecular Nutrition & Food Research*, 66(1), e2100272. <https://doi.org/10.1002/mnfr.202100272>
- Zhou, Y., Wang, D., Zhou, S., Duan, H., Guo, J., & Yan, W. (2022). Nutritional Composition, Health Benefits, and Application Value of Edible Insects: A Review. *Foods*, 11(24), 3961. <https://doi.org/10.3390/foods11243961>
- Żuk-Gołaszewska, K., Gałęcki, R., Obremski, K., Smetana, S., Figiel, S., & Gołaszewski, J. (2022). Edible Insect Farming in the Context of the EU Regulations and Marketing—An Overview. *Insects*, 13(5), 446. <https://doi.org/10.3390/insects13050446>