

ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΗΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΑΣ ΠΑΣΤΕΡΙΩΣΗΣ ΟΛΟΚΛΗΡΟΥ ΑΥΓΟΥ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΗΣ ΡΕΥΣΤΟΔΥΝΑΜΙΚΗΣ

Π.-Α. Σαμπάνης¹, Σ.Μ. Χατζηδάκης¹, Ν.Γ. Στοφόρος^{1,*}

¹Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών, Αθήνα, Ελλάδα

(*stoforos@aua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στην παρούσα εργασία, μελετήθηκε η διαδικασία θερμικής παστερίωσης ολόκληρων αυγών με κέλυφος μέσω Υπολογιστικής Ρευστοδυναμικής. Για αυγά μεγάλου μεγέθους (63-72 g) οι απαιτούμενοι χρόνοι θέρμανσης σε νερό θερμοκρασίας 54, 56, 58 και 60°C, για μείωση κατά 5 λογαριθμικούς κύκλους του πληθυσμού της *Salmonella enteritidis*, δηλαδή για μια τιμή F στόχο των 0,85 min στους 60°C, υπολογίστηκαν ίσοι προς 55,1, 37,2, 29,1 και 24,5 min. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν στο κρίσιμο σημείο του αυγού, δηλαδή το σημείο που δέχεται τη μικρότερη επίδραση της θερμοκρασίας, όσον αφορά στην καταστροφή του μικροοργανισμού, το οποίο σημείο εντοπίστηκε από τον προσδιορισμό, αρχικά, της κατανομής της τιμής F της θερμικής επεξεργασίας. Αντίστοιχοι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν για αυγά μεσαίου (53-62 g) και πολύ μεγάλου μεγέθους (>72 g). Η μικροβιακή καταστροφή που συμβαίνει κατά τον κύκλο ψύξης της διαδικασίας παστερίωσης κυμάνθηκε μεταξύ 13,0 και 72,9% της συνολικής καταστροφικότητας, με την τιμή να αυξάνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του νερού θέρμανσης και το μέγεθος των αυγών. Έτσι, για τα πολύ μεγάλου μεγέθους αυγά, θερμαινόμενα σε νερό στους 60°C το 72,9% της ολικής τιμής F της διεργασίας επιτυγχάνεται κατά τον κύκλο ψύξης τα διεργασίας. Συνεπώς, ο κύκλος ψύξης δεν πρέπει να αγνοείται κατά τον σχεδιασμό της θερμικής διεργασίας. Τέλος, υπολογισμοί ποιοτικής υποβάθμισης αποκάλυψαν ελάχιστες αλλαγές κατά τη θερμική παστερίωση ολόκληρων αυγών με κέλυφος.

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Θερμική επεξεργασία, τιμή F , κρίσιμο σημείο, *Salmonella enteritidis*, CFD

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το αυγό, μαζί με τα παράγωγα προϊόντα του, αποτελεί βασικό μέρος της διατροφής του ανθρώπου, καθώς προσφέρει έναν άριστο συνδυασμό εύπεπτων θρεπτικών συστατικών, ενώ παράλληλα έχει χαμηλό κόστος για τον παραγωγό και καταναλωτή ^[1]. Ωστόσο, το φρέσκο αυγό και τα παράγωγα προϊόντα του έχουν ανακηρυχθεί ως εν δυνάμει επικίνδυνα τρόφιμα, λόγω τροφιμογενών λοιμώξεων, σε περίπτωση μη επαρκούς μαγειρέματος ή θερμικής επεξεργασίας ^[2]. Ο κύριος λόγος είναι πως ο παθογόνος μικροοργανισμός *Salmonella enterica* μπορεί να βρεθεί στον εντερικό σωλήνα της όρνιθας και από εκεί να περάσει στο αυγό, ή και ως αποτέλεσμα διάτρησης του κελύφους από τον μικροοργανισμό μετά την ωοτοκία ^[3]. Ο Αμερικανικός Οργανισμός Τροφίμων και Φαρμάκων έχει συστήσει θερμική επεξεργασία μείωσης 5 λογαρίθμων στα αυγά βάσει της *Salmonella enterica*. Επομένως, η θερμική επεξεργασία από τη βιομηχανία ή μαγείρεμα των προϊόντων αυγού από τον καταναλωτή είναι απαραίτητα πριν την κατανάλωση. Στο ολόκληρο αυγό η διεργασία παστερίωσης γίνεται μόλις στο 1% των αυγών που διατίθενται στην αγορά και συνεπώς θα πρέπει να μαγειρεύονται προσεκτικά πριν την κατανάλωση ^[4]. Επιδημίες λόγω *Salmonella spp.* εξακολουθούν να είναι ένα μεγάλο ζήτημα για τη βιομηχανία τροφίμων, με τα τελευταία κρούσματα ^[5,6] να επηρεάζουν πολλές χώρες και καταναλωτές, θέτοντας την παστερίωση ολόκληρων αυγών απαραίτητη για την διατήρηση της ασφάλειας του τροφίμου.

Η διεργασία της παστερίωσης παραμένει μία από της θεμελιώδεις μεθόδους που εφαρμόζονται από την βιομηχανία και καθιστά το αυγό ασφαλέστερο για τον καταναλωτή. Η *Salmonella enterica* αποτελεί τον πλέον θερμοάντοχο παθογόνο μικροοργανισμό στο αυγό ($D_{60^{\circ}\text{C}}=0.17\text{min}$, $z=4.08^{\circ}\text{C}$)^[7,8]. Για τον λόγο αυτό, παρουσιάζει ενδιαφέρον η μελέτη και βελτιστοποίηση της διεργασίας αυτής στα πλαίσια της διασφάλισης της ασφάλειας του τροφίμου, χωρίς σημαντική ποιοτική υποβάθμιση. Αν και για πολλά χρόνια, η μικροβιακή καταστροφή του μικροοργανισμού *Salmonella enterica* έχει μελετηθεί εκτενώς πειραματικά, μόλις πρόσφατα η ανάπτυξη της τεχνολογίας και η προσβασιμότητα σε προγράμματα προσομοίωσης υπολογιστών έχουν επιτρέψει εκπόνηση μελετών σχετικά με τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας παστερίωσης με τη μελέτη και βελτίωση των συνθηκών μεταφοράς μάζας και θερμότητας^[7, 9-10]. Αυτές οι μελέτες χρησιμοποιούν Υπολογιστική Ρευστοδυναμική (CFD) και εφαρμόζοντας μοντέλα μεταφοράς θερμότητας και μάζας, ήταν σε θέση να προσομοιώσουν το προφίλ θερμοκρασίας στο ολόκληρο αυγό και να προβλέψουν τον απαιτούμενο χρόνο για να επιτευχθεί η απαιτούμενη θνησιμότητα για την *Salmonella enterica*. Χρησιμοποιώντας προσομοίωση CFD αυτές οι μελέτες κατάφεραν να προσδιορίσουν το «κρίσιμο σημείο» μέσα στο αυγό, το πιο αργά θερμαινόμενο σημείο μέσα το αυγό, και σχεδιαστεί η διεργασία με βάση αυτό, ως το πλέον δυσμενές σενάριο για την ασφάλεια των τροφίμων^[7, 9-10]. Το πιο αργά θερμαινόμενο σημείο εντός του ολόκληρου αυγού αναφέρεται πως ήταν περίπου στο γεωμετρικό κέντρο των δειγμάτων αυγών^[8, 9]. Επιπλέον, χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό θέρμανσης με συναγωγή και αγωγή, πρώιμες μελέτες CFD^[9] εξέτασαν τις επίδραση του συντελεστή μεταφοράς θερμότητας στην παστερίωση του αυγού. Μολονότι πολλές μελέτες CFD έχουν εξετάσει διαφορετικούς μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας, μόλις πρόσφατα οι Abbasnezhad et. (2015)^[8] σε μια μελέτη CFD εξέτασαν τη μεταφορά θερμότητας και μάζας κατά την παστερίωση των αυγών και την αποτελεσματικότητα της θερμικής επεξεργασίας όσον αφορά στην απενεργοποίηση της *Salmonella enterica*, χρησιμοποιώντας την πραγματική αναπαράσταση των επιμέρους συστατικών του ολόκληρου αυγού, όπως το πάχος του κελύφους, την αλβουμίνη, τον κρόκο και του αεροθύλακα. Το τρισδιάστατο υπολογιστικό μοντέλο που μελετήθηκε έδειξε την επίδραση του πάχους του κελύφους και του ποσοστού αέρα εντός του αυγού για να επιτευχθεί επαρκής θνησιμότητα. Αν και στην παραπάνω μελέτη^[8] παρουσιάστηκε ένα πιο σύνθετο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας, λαμβάνοντας υπόψιν τα διαφορετικά συστατικά και μεταβλητές του αυγού, εξακολουθεί να υπάρχει κενό στη βιβλιογραφία σχετικά με την αποτελεσματικότητα της παστερίωσης των αυγών και τη διατήρηση των θρεπτικών και οργανοληπτικών χαρακτηριστικών του ολόκληρου αυγού κατά τη διάρκεια της διαδικασίας.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, η παρούσα μελέτη στοχεύει στη διερεύνηση της όλης διαδικασίας παστερίωσης αυγών χρησιμοποιώντας προσομοίωση CFD. Εν κατακλείδι, οι στόχοι της εργασίας αυτής είναι 1) να αναπτυχθεί ένα τρισδιάστατο μοντέλο μεταφοράς θερμότητας της διεργασίας παστερίωσης ολόκληρου αυγού, 2) να προβλεφθεί το προφίλ χρόνου-θερμοκρασίας και η θέση του κρίσιμου σημείου, 3) να γίνει εκτίμηση της απόδοσης παστερίωσης (τιμή F) συμπεριλαμβανομένων όλων των σταδίων της θέρμανσης και της ψύξης (το οποίο ήταν το στάδιο που παρουσιάζει την μεγαλύτερη ανεπιθύμητη υποβάθμιση της ποιότητας), 4) να γίνει εκτίμηση της υποβάθμισης των θρεπτικών συστατικών κατά την παστερίωσης (συμπεριλαμβανομένων όλων των σταδίων της διαδικασίας της διεργασίας) και 5) να γίνει επαλήθευση του θεωρητικού μοντέλου έναντι πειραματικών δεδομένων.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Η θερμική παστερίωση του αυγού προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας ένα πολυδιάστατο μοντέλο υπολογιστικής ρευστοδυναμικής. Η γεωμετρία του αυγού σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας λογισμικό 3D CAD βασισμένο στο ευκλείδειο αυγό του Moss^[11]. Η γεωμετρία του μοντέλου εισήχθη στο Ansys® Academic Research Mesh, Έκδοση 22.1 και διακριτοποιήθηκε σε ένα μη-δομημένο τετραεδρικό πλέγμα. Για τη διακριτοποίηση χρησιμοποιήθηκαν 314029 κελιά, με την

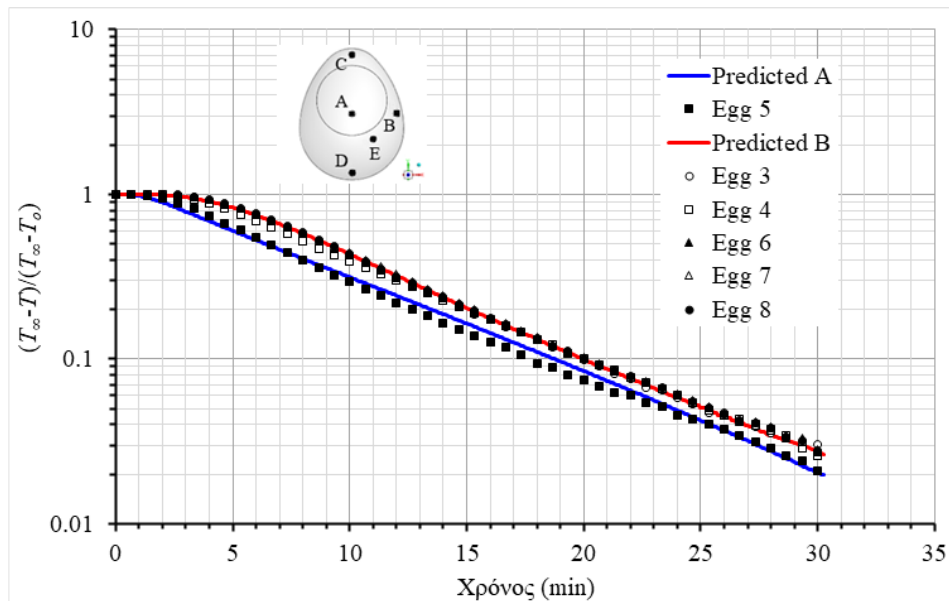
επιλογή του απαιτούμενου αριθμού κελιών να λαμβάνει υπόψη το πεδίο (ρευστό), τη φύση της διαδικασίας και τον υπολογιστικό χρόνο που απαιτείται, μέσω της ανάλυσης ανεξαρτησίας πλέγματος. Το λογισμικό Ansys® Academic Research Fluent, Release 22.1 επιλέχθηκε για την εκτέλεση των απαιτούμενων υπολογισμών. Η εξωτερική επιφάνεια της γεωμετρίας που αντιπροσωπεύει το κέλυφος του αυγού ορίστηκε ως τοίχος. Ο εσωτερικός όγκος του αυγού που αποτελείται από τον κρόκο όσο και το ασπράδι ορίστηκε ως ρευστό. Στα πεδία που ορίστηκαν ο κρόκος και το ασπράδι ο υπολογισμός της μεταφοράς θερμότητας και της ροής ρευστού λόγω φυσικής συναγωγής πραγματοποιήθηκε με αριθμητική επίλυση των γενικευμένων εξισώσεων μεταφοράς^[12]. Η θερμοκρασία που εφαρμόστηκε στην εξωτερική επιφάνεια του αυγού ήταν ομοιόμορφη. Η βαρυτική δύναμη ορίστηκε $g=9,81 \text{ m/s}^2$. Επιλέχθηκε σταθερό χρονικό βήμα 1 s για την επίλυση του μοντέλου. Το κριτήριο σύγκλισης ορίστηκε να είναι μικρότερο από 10^{-6} .

Για τον σχεδιασμό της γεωμετρίας των αυγών, αγοράστηκαν φρέσκα, μεγάλου μεγέθους αυγά, 63-72 g. Όλα τα αυγά εξετάστηκαν μακροσκοπικά (ωσοκόπηση), με τη βοήθεια φωτεινής πηγής, για ρωγμές και άλλα ελαττώματα του κελύφους, καθώς και για τον προσδιορισμό της θέσης του κρόκου και του θύλακα αέρα. Παράλληλα, αξιολογήθηκε το σχήμα των αυγών ως προς την αξονική τους συμμετρία. Το βάρος τους (με χρήση ζυγού ακριβείας, MARK 2200, BEL Engineering®, Monza, Ιταλία), ο όγκος (μέσω ογκομετρικού κυλίνδρου 500 mL) και οι διαστάσεις τους (πλάτος και ύψος με μικρόμετρο εύρους 25-75 mm) καθορίστηκαν πριν από την διεργασία. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις σχήματος και συμμετρίας, καθώς και τις μετρήσεις που έγιναν, σχεδιάστηκαν τα αυγά μεγάλου μεγέθους που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις CFD και για την επιβεβαίωση του μοντέλου. Συγκεκριμένα, βάσει του σχεδιασμού του αυγού του Moss, το ύψος του αυγού ήταν 0,05917 m, το πλάτος του αυγού 0,04634 m, η διάμετρος του κρόκου 0,03135 m, η απόσταση του κρόκου από τον πυθμένα του αυγού 0,03559 m και ο όγκος του αυγού $6,4109 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$. Προκειμένου να μελετηθεί η επίδραση του μεγέθους των αυγών, σχεδιάστηκαν δύο επιπλέον μεγέθη αυγών: ένα που αντιστοιχεί σε αυγά μεσαίου μεγέθους (53-62 g) και ένα για εξαιρετικά μεγάλο μέγεθος αυγών (>72 g), όπως ορίζεται από τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 589/2008 — πρότυπα εμπορίας αυγών. Για το μεσαίου μεγέθους αυγό, το ύψος του αυγού ήταν 0,05500 m, το πλάτος του αυγού 0,04594 m, η διάμετρος του κρόκου 0,03035 m, η απόσταση του κρόκου από το κάτω μέρος του αυγού 0,03559 m και ο όγκος του αυγού $5,7009 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$, ενώ για το πολύ μεγάλο αυγό, ύψος ήταν 0,06127 m, πλάτος αυγού 0,04774 m, διάμετρος κρόκου 0,031995 m, απόσταση κρόκου από τον πυθμένα του αυγού 0,03559 m και όγκος αυγού $7,0666 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$. Οι θερμοφυσικές ιδιότητες των διαφόρων συστατικών του αυγού που χρησιμοποιήθηκαν για τις προσομοιώσεις CFD, ορίστηκαν ως σταθερές ή ως συναρτήσεις της θερμοκρασίας. Παράλληλα, οι συντελεστές μεταφοράς θερμότητας κατά τις διεργασίες θέρμανσης και ψύξης που χρησιμοποιήθηκαν στο μοντέλο προσδιορίστηκαν πειραματικά, ώστε να ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Αρχικά, τα προβλεπόμενα αποτελέσματα της προσομοίωσης CFD της διεργασίας παστερίωσης του αυγού συγκρίθηκαν με πειραματικά δεδομένα για την αξιολόγηση του μοντέλου και τον καθορισμό του κρίσιμου σημείου των αυγών που εξετάστηκαν. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε αξιολόγηση της διεργασίας ως προς την ασφάλεια και την ποιότητα, βάσει της τιμής F για τη *Salmonella enteritidis* (0,85 min στους 60°C) και τους ποιοτικούς παράγοντες που προέκυψαν μέσω του CFD. Με βάση πειραματικά δεδομένα θερμοκρασίας, στο κέντρο σφαίρας αλουμινίου, ο συντελεστής μεταφοράς θερμότητας μεταξύ του θερμαντικού μέσου και της επιφάνειας του αυγού βρέθηκε ίσος με $644 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Για τον κύκλο ψύξης, η αντίστοιχη τιμή ήταν ίση με $1289 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$. Αυτές οι τιμές των συντελεστών μεταφοράς θερμότητας χρησιμοποιήθηκαν στη συνέχεια στις δοκιμές CFD. Οι συγκρίσεις μεταξύ των προβλεπόμενων θερμοκρασιών του μοντέλου και πειραματικών δεδομένων πραγματοποιήθηκαν για διαφορετικά αυγά μεγάλου

μεγέθους, σε διαφορετικές θέσεις εντός των αυγών (Σχήμα 1). Η συμφωνία μεταξύ των προβλεπόμενων και των πειραματικών δεδομένων ήταν ικανοποιητική, επιτρέποντας περαιτέρω υπολογισμούς με τον κώδικα CFD που αναπτύχθηκε, με την επιλεγμένη γεωμετρία αυγού, ποιότητα πλέγματος, θερμοφυσικές ιδιότητες και συντελεστές μεταφοράς θερμότητας.

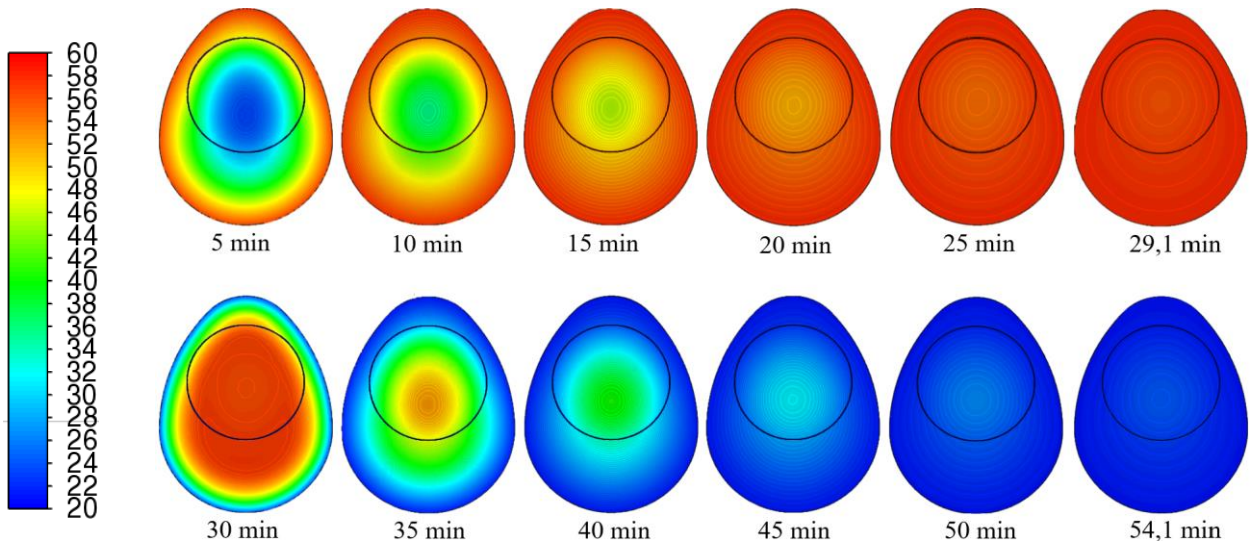


Σχήμα 1. Σύγκριση μεταξύ πειραματικών και προβλεπόμενων αδιάστατων και κανονικοποιημένων θερμοκρασιών σε διαφορετικά σημεία (A και B) ολόκληρων μεγάλων αυγών κατά τη διάρκεια της θέρμανσής τους (T : θερμοκρασία αυγού, T_0 : αρχική θερμοκρασία αυγού, T_∞ : θερμοκρασία νερού θέρμανσης).

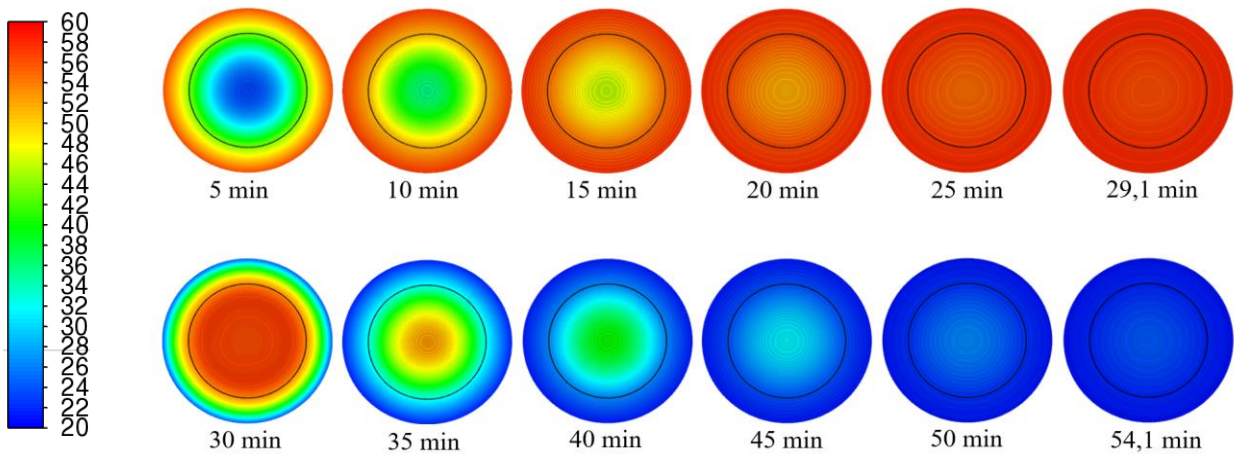
Μια τυπική εξέλιξη της κατανομής θερμοκρασίας σε κάθετη και οριζόντια διατομή παρουσιάζεται στα Σχήματα 2 και 3, αντίστοιχα, για αυγό μεγάλου μεγέθους, κατά τη διάρκεια 29,1 min θέρμανσης στους 58°C και 25,0 min ψύξης στους 20°C. Η αντίστοιχη εξέλιξη της κατανομής της τιμής F που προέκυψε παρουσιάζεται στο Σχήμα 4. Βάσει της κατανομής της τιμής F , στο τέλος της διεργασίας, προσδιορίστηκε το κρίσιμο σημείο για κάθε θερμοκρασία θέρμανσης και για όλα τα μεγέθη αυγών που εξετάστηκαν. Για τον ίδιο στόχο τιμής F (των 0,85 min για $T_{ref}=60^\circ\text{C}$, $z=4.1^\circ\text{C}$), το κρίσιμο σημείο μετατοπίστηκε ελαφρώς προς τα πάνω με την αύξηση της θερμοκρασίας θέρμανσης, πιθανώς ως αποτέλεσμα του κύκλου ψύξης.

Ο απαιτούμενος χρόνος θέρμανσης για την επίτευξη της απαιτούμενης τιμής F των 0,85 min, προσδιορίστηκε μέσω μιας διαδικασίας δοκιμής και σφάλματος για κάθε θερμοκρασία θέρμανσης που εξετάστηκε (Πίνακας 1). Στον Πίνακα 1 παρουσιάζεται και η επιμέρους συνεισφορά των κύκλων θέρμανσης ($F_{heating}$) και ψύξης ($F_{cooling}$) στη συνολική τιμή F της διεργασίας (F_{Total}). Οι αντίστοιχες τιμές προσδιορίστηκαν επίσης για τα αυγά μεσαίου και πολύ μεγάλου μεγέθους (Πίνακας 1). Για τα αυγά μεγάλου μεγέθους, οι χρόνοι θέρμανσης κυμαίνονταν από 24,5, 29,1, 37,2 και 55,1 λεπτά για θερμοκρασίες θέρμανσης 60°C, 58°C, 56°C και 54°C, αντίστοιχα. Σημειώνεται ότι, όσο αυξάνεται η θερμοκρασία του μέσου θέρμανσης και όσο αυξάνεται το μέγεθος του αυγού η συμβολή της ψύξης στη συνολική θνησιμότητα αυξάνεται (Πίνακας 1). Όσον αφορά στην ποιότητα, οι τιμές διατήρησης κυμαίνονταν μεταξύ 94,22 και 100,00% που σημαίνει ότι η θερμική παστερίωση δεν προκαλεί πραγματικά προβλήματα ποιότητας, τουλάχιστον για τα τυπικά χρησιμοποιούμενες κινητικές παραμέτρους.

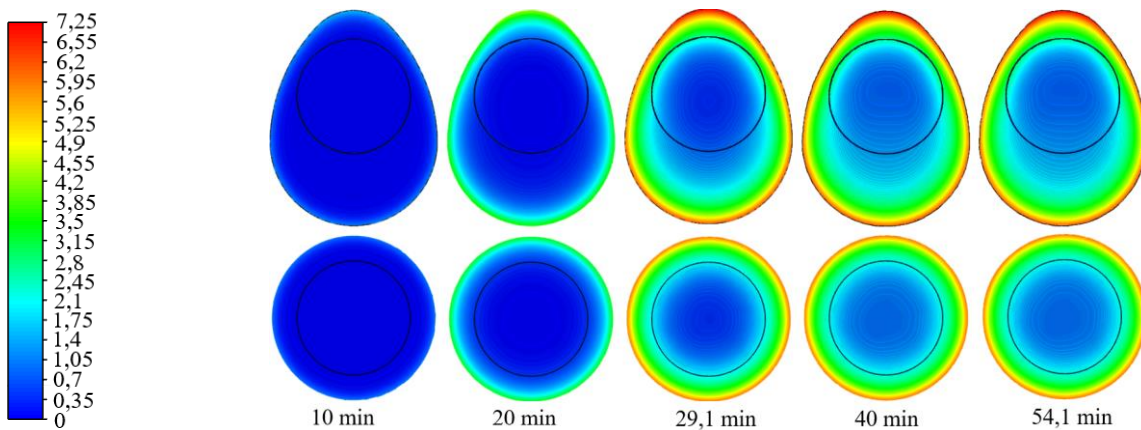
Συγκεκριλώνοντας, υπολογίστηκαν οι απαιτούμενοι χρόνοι θέρμανσης σε διάφορες θερμοκρασίες του μέσου θέρμανσης για μείωση κατά 5 log του πληθυσμού της *Salmonella enteritidis*. Για τις συνθήκες που διερευνήθηκαν, η μικροβιακή καταστροφή που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης της διαδικασίας παστερίωσης κυμάνθηκε μεταξύ 13 και



Σχήμα 2. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας για θερμοκρασία νερού θέρμανσης 58°C και χρόνο θέρμανσης 29.1 min, στην κατακόρυφη τομή του αυγού



Σχήμα 3. Εξέλιξη της κατανομής της θερμοκρασίας για θερμοκρασία νερού θέρμανσης 58°C και χρόνο θέρμανσης 29.1 min, στην κατακόρυφη τομή του αυγού.



Σχήμα 4. Εξέλιξη της κατανομής της τιμής $F_{60°C}^{4,1°C}$ για θερμοκρασία νερού θέρμανσης 58°C και χρόνο θέρμανσης 29.1 min, στην κατακόρυφη (πάνω) και οριζόντια (κάτω) τομή του αυγού.

Πίνακας 1. Απαιτούμενοι χρόνοι θέρμανσης για επίτευξη τιμής $F_{required}=0,85 \text{ min}$ ($T_{ref}=60^{\circ}\text{C}$, $z=4.1^{\circ}\text{C}$) και επιμερισμός της συνεισφοράς των κύκλων θέρμανσης και ψύξης της διεργασίας παστερίωσης.

Egg size	Heating medium $T (^{\circ}\text{C})$	Heating time (min)	F_{total}	$F_{heating}$	$F_{cooling}$	% contribution of cooling lethality
Medium	54	53.1	0.85	0.75	0.10	11.8%
	56	35.5	0.85	0.62	0.23	27.1%
	58	27.8	0.86	0.49	0.37	43.5%
	60	23.4	0.86	0.41	0.45	52.9%
Large	54	55.1	0.85	0.74	0.11	13.0%
	56	37.2	0.86	0.6	0.26	29.9%
	58	29.1	0.86	0.46	0.40	46.2%
	60	24.5	0.86	0.32	0.53	62.3%
Extra Large	54	56.8	0.85	0.71	0.14	16.5%
	56	38.8	0.86	0.54	0.32	37.6%
	58	30.5	0.86	0.37	0.49	57.6%
	60	25.8	0.87	0.25	0.62	72.9%

62,3% της ολικής καταστροφής Όσο υψηλότερη ήταν η θερμοκρασία του θερμαντικού μέσου, τόσο μεγαλύτερη είναι η συμβολή του κύκλου ψύξης στη συνολική θνησιμότητα. Έτσι, αγνοώντας τη μικροβιακή καταστροφή κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης μπορεί να οδηγήσει σε άσκοπα μεγάλους χρόνους θέρμανσης. Τέλος, η ποιοτική υποβάθμιση κατά τη διάρκεια της θερμικής παστερίωσης ήταν ελάχιστη.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Rehaut-Godbert, S., Guyot, N., Nys, Y. (2019). The golden egg: Nutritional value, bioactivities, and emerging benefits for human health. *Nutrients*, 11(3), 684.
- [2] FDA (2009). 21 CFR Parts 16 and 118. Prevention of *Salmonella Enteritidis* in Shell Eggs During Production, Storage, and Transportation. Federal Register 74(130):33030–33101. United States Government Publishing Office.
- [3] Gantois, I., Ducatelle, R., Pasmans, F., Haesebrouck, F., Gast, R., Humphrey, T. J., Van Immerseel, F. (2009). Mechanisms of egg contamination by *Salmonella enteritidis*. *EMS Micro. Reviews*, 33(4), Q718–738.
- [4] Keener, K. (2017). Shell egg pasteurization. In P. Y. Hester (Ed.), *Egg Innovations and Strategies for Improvements* (pp. 165–175). Elsevier, Academic Press.
- [5] EFSA (2022). European Centre for Disease Prevention and Control, European Food Safety Authority, 2022. Multi-country outbreak of *Salmonella Enteritidis* sequence type (ST)₁₁ infections linked to eggs and egg products. <https://www.ecdc.europa.eu/en/publications-data/multi-country-outbreak-salmonella-enteritidis-sequence-type-st11-infections>, accessed on 24 January 2023.
- [6] FSN (2023). Food Safety News: *Salmonella* outbreak in Sweden linked to eggs. <https://www.foodsafetynews.com/2023/01/salmonella-outbreak-in-sweden-linked-to-eggs/>, accessed on 24/01/23.
- [7] Abbasnezhad, B., Hamdami, N., Shahedi, M., Vatankhah, H. (2014). Thermophysical and rheological properties of liquid egg white and yolk during thermal pasteurization of intact eggs. *J. Food Meas. Charact.*, 8(4), 259-269.
- [8] Abbasnezhad, B., Hamdami, N., Monteau, J.Y., Vatankhah, H. (2015). Numerical modeling of heat transfer and pasteurizing value during thermal processing of intact egg. *J. Food Sci. Nutr.*, 4(1):42-49.
- [9] Denys, S., Pieters, J. G., Dewettinck, K. (2004). Computational fluid dynamics analysis of combined conductive and convective heat transfer in model eggs. *J. Food Eng.*, 63(3), 281-290.
- [10] Denys, S., Pieters, J. G., Dewettinck, K. (2005). Computational fluid dynamics analysis for process impact assessment during thermal pasteurization of intact eggs. *J. Food Prot.*, 68(2), 366-374.
- [11] Dixon, R. (1991). *Mathographics*. Dover Publications.
- [12] Sun, D.W. (2007). *Computational Fluid Dynamics in Food Processing*. CRC Press, Taylor Francis Group.