

ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΦΙΛΙΚΟΥ ΠΡΟΣ ΤΟΝ ΧΡΗΣΤΗ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ ΣΕ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ EXCEL ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ ΘΕΡΜΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΟΝΣΕΡΒΟΠΟΙΗΜΕΝΩΝ ΤΡΟΦΙΜΩΝ ΜΕ ΤΗ ΜΕΘΟΔΟ ΤΟΥ BALL

Λ. Κατσίνη, Ν. Στοφόρος*

Τμήμα Επιστήμης Τροφίμων και Διατροφής του Ανθρώπου, Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών
(*stoforos@aua.gr)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Μια από τις πλέον χρησιμοποιούμενες μεθόδους για το σχεδιασμό θερμικών διεργασιών τροφίμων είναι η μέθοδος του Ball, η οποία στηρίζεται σε πίνακες και διαγράμματα που συσχετίζουν την τιμή F ή χρόνο θερμικής καταστροφής με τον απαιτούμενο χρόνο θέρμανσης. Για τη διευκόλυνση της εφαρμογής της μεθόδου, έχουν αναπτυχθεί αλγεβρικές εξισώσεις, οι οποίες αντικαθιστούν τους πίνακες και τα διαγράμματα της μεθόδου. Οι υποστηριζόμενες από ηλεκτρονικό υπολογιστή τεχνολογίες παίζουν καθοριστικό ρόλο στον σχεδιασμό θερμικών διεργασιών, καθώς αποτελούν καινοτόμες εναλλακτικές των συμβατικών υπολογισμών με πληθώρα πλεονεκτημάτων. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός, φιλικού προς το χρήστη, υπολογιστικού εργαλείου, σε περιβάλλον MS Excel, για το σχεδιασμό θερμικών διεργασιών με τη μέθοδο του Ball, με χρήση των προαναφερθέντων αλγεβρικών εξισώσεων.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η κονσερβοποίηση αφορά θερμική επεξεργασία (παστερίωση ή εμπορική αποστείρωση) τροφίμων που βρίσκονται σε ερμητικά κλεισμένους περιέκτες, κατά τη διάρκεια της οποίας λαμβάνει χώρα καταστροφή παραγόντων αλλοίωσης του τροφίμου. Βασικό αντικείμενο στον σχεδιασμό μιας θερμικής επεξεργασίας αποτελεί είτε ο προσδιορισμός του χρόνου θέρμανσης σε δεδομένη θερμοκρασία ώστε να επιτευχθεί η επιθυμητή θανάτωση (συνυπολογίζοντας τη θανάτωση κατά τη διάρκεια του κύκλου ψύξης) είτε ο προσδιορισμός της μικροβιακής καταστροφής μιας δεδομένης κατεργασίας. Σε κάθε περίπτωση οι υπολογισμοί που απαιτούνται γίνονται με τη βοήθεια γραφικών μεθόδων (γενική ή γραφική μέθοδος) ή υπολογιστικών μεθόδων (π.χ., μέθοδος του Ball)^[1], οι οποίες ωστόσο είναι χρονοβόρες και επιρρεπείς σε σφάλματα, καθώς απαιτούν υπολογισμούς με το χέρι.

Τις τελευταίες δεκαετίες τεχνολογίες υποστηριζόμενες από ηλεκτρονικό υπολογιστή έχουν αποτελέσει το ιδανικό εργαλείο για την αντιμετώπιση αυτού του είδους των προβλημάτων, με αποτέλεσμα να βρίσκουν ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών^[2]. Διάφορα λογισμικά^[3] με πεδίο εφαρμογής τον σχεδιασμό θερμικών διεργασιών έχουν κατά καιρούς προταθεί, τα οποία όμως απαιτούν ειδικές γνώσεις ή είναι περίπλοκα. Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάπτυξη ενός, φιλικού προς το χρήστη, υπολογιστικού εργαλείου σε περιβάλλον MS Excel για τον σχεδιασμό θερμικών διεργασιών με τη μέθοδο του Ball, μια μέθοδο που αν και αναπτύχθηκε το 1923 αποτελεί ακόμη και σήμερα τη βασική μέθοδο σχεδιασμού θερμικών διεργασιών από τη Βιομηχανία Τροφίμων^[4]. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται απλοποιημένες αλγεβρικές εξισώσεις που έχουν προταθεί για τη χρήση της μεθόδου του Ball^[5].

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Τιμή $F_{T_{ref}}^z$ ή απλά τιμή F , δεδομένης διεργασίας ή χρόνος θερμικής καταστροφής ορίζεται ως ο ισοδύναμος χρόνος κατεργασίας σε σταθερή θερμοκρασία αναφοράς T_{ref} μιας υποθετικής ιδανικής θερμικής επεξεργασίας η οποία παράγει το ίδιο καταστρεπτικό αποτέλεσμα σε δεδομένο θερμοευαίσθητο παράγοντα, χαρακτηριζόμενο από σταθερά θερμικής αντίστασης z , με τη δεδομένη θερμική διεργασία. Ουσιαστικά αποτελεί την έκφραση της έντασης μιας διεργασίας από τη μια πλευρά με βιολογικούς όρους (αρχική και τελική συγκέντρωση θερμοευαίσθητου

παράγοντα) και από την άλλη με φυσικομαθηματικούς όρους (χρονοθερμοκρασιακά δεδομένα) επιτρέποντας τη σύγκριση διαφορετικών διεργασιών και μαθηματικά εκφράζεται ως ^[1,6]:

$$F_{T_{ref}}^z = D_{T_{ref}} [\log(C_a) - \log(C_b)] = \int_{t=0}^{t=t_{end}} 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt \quad (1)$$

Τα δεδομένα που απαιτούνται για τον υπολογισμό της τιμής F στις περισσότερες περιπτώσεις αφορούν το κρίσιμο σημείο του προϊόντος, δηλαδή αυτό που υφίσταται τη μικρότερη επίδραση της θερμοκρασίας. Όταν μία κατεργασία δίνει ως αποτέλεσμα εμπορικά αποστειρωμένο προϊόν τότε η τιμή F που τη χαρακτηρίζει καλείται και απαιτούμενη τιμή F ($F_{required}$) και χρησιμοποιείται ως μέτρο σύγκρισης για την επίτευξη εμπορικής αποστείρωσης από κάθε άλλη κατεργασία (θα πρέπει η τιμή F της εν λόγω κατεργασίας να είναι τουλάχιστον ίση με την απαιτούμενη τιμή F) ^[1,6]. Υπολογίζοντας τη θερμική επεξεργασία ξεχωριστά για τον κύκλο θέρμανσης και τον κύκλο ψύξης, η έκφραση της τιμής F συναρτήσει του χρόνου θέρμανσης B (άνω όριο πρώτου ολοκληρώματος) είναι:

$$F_{T_{ref}}^z = \int_{t_h=0}^{t_h=B} 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt_h + \int_{t_c=0}^{t_c=t_{end}} 10^{\frac{T-T_{ref}}{z}} dt_c \quad (2)$$

Για τον υπολογισμό του B αρχικά προτάθηκε η γενική ή γραφική μέθοδος ^[7] και στη συνέχεια διάφορες υπολογιστικές μέθοδοι (formula methods), μια εκ των οποίων είναι η μέθοδος του Ball ^[8]. Η προσέγγιση που ακολούθησε ο Ball βασίζεται στην παρατήρηση πως σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα της θερμοκρασιακής διαφοράς μεταξύ του μέσου θέρμανσης ή ψύξης και του κρίσιμου σημείου του προϊόντος σε συνάρτηση με το χρόνο, ύστερα από αρχική υστέρηση, υπάρχει γραμμική σχέση των δεδομένων με τη μορφή μίας ευθείας γραμμής (straight-line curve) ή, σε ορισμένες περιπτώσεις, περισσοτέρων ευθειών (broken-line curve). Με βάση τα παραπάνω διαγράμματα, γνωστά ως καμπύλες θερμικής διεύθυνσης, ο Ball ανέπτυξε εμπειρικές εξισώσεις που περιγράφουν τη θερμοκρασία του κρίσιμου σημείου συναρτήσει του χρόνου με τη βοήθεια των εμπειρικών παραμέτρων f και j . Επιπλέον εισήγαγε τις παραμέτρους g ή $\log(g)$ και f_h/U , οι οποίες συσχετίζονται η καθεμία με τον χρόνο θέρμανσης B και την τιμή F αντίστοιχα ^[8-9], όπως φαίνεται στις Εξ. (3) και (4):

$$B = f_h (\log(j_h (T_{RT} - T_{IT})) - \log(g)) \quad (3)$$

$$F = \frac{f_h}{(f_h/U) F_i} \quad (4)$$

όπου

$$F_i = 10^{(T_{ref}-T_{RT})/z} \quad (5)$$

Τέλος παρουσίασε διαγράμματα και πίνακες ^[10] για τη συσχέτιση της παραμέτρου f_h/U συναρτήσει του $\log(g)$, επιτρέποντας τον προσδιορισμό του απαιτούμενου χρόνου θέρμανσης, B αλλά και την τιμή F της διεργασίας.

Η χρήση διαγραμμάτων ή πινάκων είναι χρονοβόρος και συχνά επιφέρει σφάλματα στους υπολογισμούς και για αυτόν τον λόγο και έχουν γίνει διάφορες προτάσεις αντικατάστασής τους με αλγεβρικές εξισώσεις. Η διαίρεση της παραμέτρου g με την παράμετρο z οδηγεί σε αδιάστατες παραμέτρους που με τη σειρά τους μειώνουν τον αριθμό των απαραίτητων για τους υπολογισμούς

πινάκων και διαγραμμάτων. Στην αλγεβρική Εξ. (6) συσχετίζεται η παράμετρος f_h/U [ή $\log(f_h/U)$] με την παράμετρο g/z [ή $\log(g/z)-z/z_c$], η οποία αναπτύχθηκε με βάση την παραπάνω προσέγγιση^[9] και αποτελεί τη βάση των υπολογισμών του υπολογιστικού εργαλείου που αναπτύχθηκε.

$$y = \frac{a_1}{1 + a_2 e^{-a_3 x}} + \frac{a_4}{1 + a_5 e^{-a_6 x}} + a_7 \quad (6)$$

Οι μεταβλητές x και y αντιστοιχούν στις παραμέτρους $\log(f_h/U)$ και $\log(g/z)-z/z_c$ και αντίστροφα, αναλόγως αν υπολογίζεται η παράμετρος f_h/U με δεδομένη τιμή $\log(g)$ ή το αντίστροφο. Στον Πίνακα 1 βρίσκονται οι τιμές των συντελεστών της Εξ. (6).

Για τις ειδικές περιπτώσεις όπου $f_h \neq f_c$, ή όταν αναφερόμαστε σε "σπαστές" καμπύλες θερμικής διείσδυσης, η εφαρμογή της μεθόδου του Ball προϋποθέτει τη γνώση της παραμέτρου ρ (λόγος της τιμής F που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης προς τη συνολική τιμή F). Ο Ball παρουσίασε σε διαγράμματα^[10] την παράμετρο ρ συναρτήσει, του $\log(g)$ και για την αντικατάσταση αυτών των διαγραμμάτων έχει προταθεί η Εξ. (7) με τους συντελεστές της (Πίνακας 2)^[5], η οποία επίσης χρησιμοποιείται στο υπολογιστικό εργαλείο για τους υπολογισμούς που απαιτούνται στις ειδικές αυτές περιπτώσεις.

$$\rho = \frac{b_1}{1 + b_2 e^{-b_3 \log(g)}} + \frac{1}{1 + b_4 e^{-b_5 \log(g)}} + (b_6 g + b_7) z \quad (7)$$

Πίνακας 1. Συντελεστές της Εξ. (6) με βάση τον ορισμό των μεταβλητών x και y .

	$m+g=130^\circ\text{F}$		$m+g=180^\circ\text{F}$	
	$\log(g/z)-z/z_c$	$\log(f_h/U)$	$\log(g/z)-z/z_c$	$\log(f_h/U)$
y				
x	$\log(f_h/U)$	$\log(g/z)-z/z_c$	$\log(f_h/U)$	$\log(g/z)-z/z_c$
a_1	-0.088335831	40.122199	-3.3545727	22.016510
a_2	-0.96375429	38.533071	-0.34453049	21.598294
a_3	0.028257272	2.3715954	0.42100067	2.4586869
a_4	1.0711536	5.3058320	4.0057210	38.202986
a_5	0.19518983	2.8885491	0.13211471	23.706331
a_6	4.5699218	0.63534158	3.2971998	0.49435142
a_7	-	-0.63814873	-	-0.74859566
z_c ($^\circ\text{F}$)	389.10600	405.49832	389.48491	468.11021

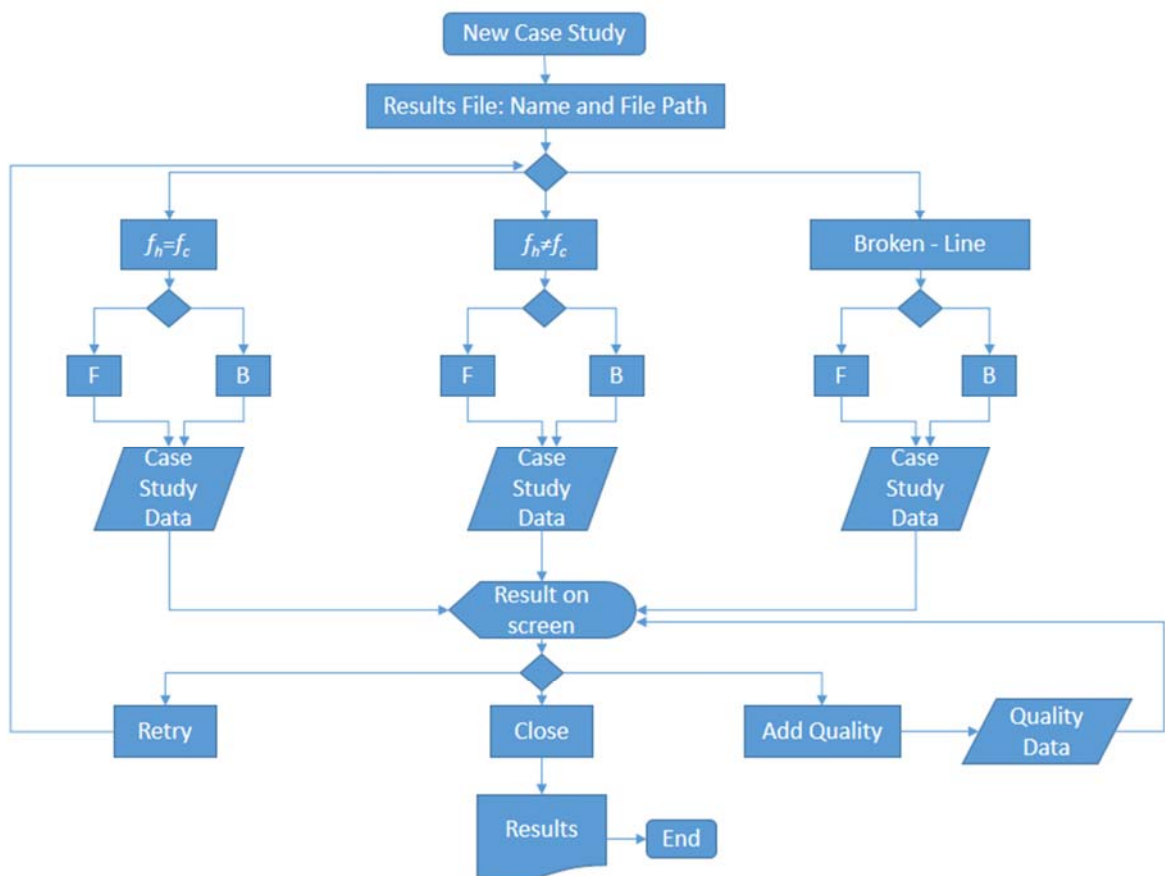
Πίνακας 2. Συντελεστές της Εξ. (7).

	$m+g=130^\circ\text{F}$	$m+g=160^\circ\text{F}$	$m+g=180^\circ\text{F}$
b_1	0.289514	0.0552200	0.00993234
b_2	-4.87991	-1.84861	-1.16901
b_3	0.553369	0.240032	0.0647075
b_4	0.0287250	0.0314127	0.0329320
b_5	-1.89101	-1.79959	-1.72143
b_6	-0.0000302250	-0.0000244004	-0.0000198010
b_7	-0.000814476	-0.000521808	-0.000448516

Το υπολογιστικό εργαλείο αναπτύχθηκε σε περιβάλλον MS Excel σε γλώσσα προγραμματισμού VBA (Visual Basic for Applications) μέσω του Επεξεργαστή Visual Basic (VBA Editor). Η διεπαφή χρήστη αποτελείται από συνδυασμό φορμών χρήστη με στοιχεία ελέγχου φόρμας (πλαίσιο κειμένου, κουμπί εντολής κ.α.).

ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΟΥ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΙΚΟΥ ΕΡΓΑΛΕΙΟΥ

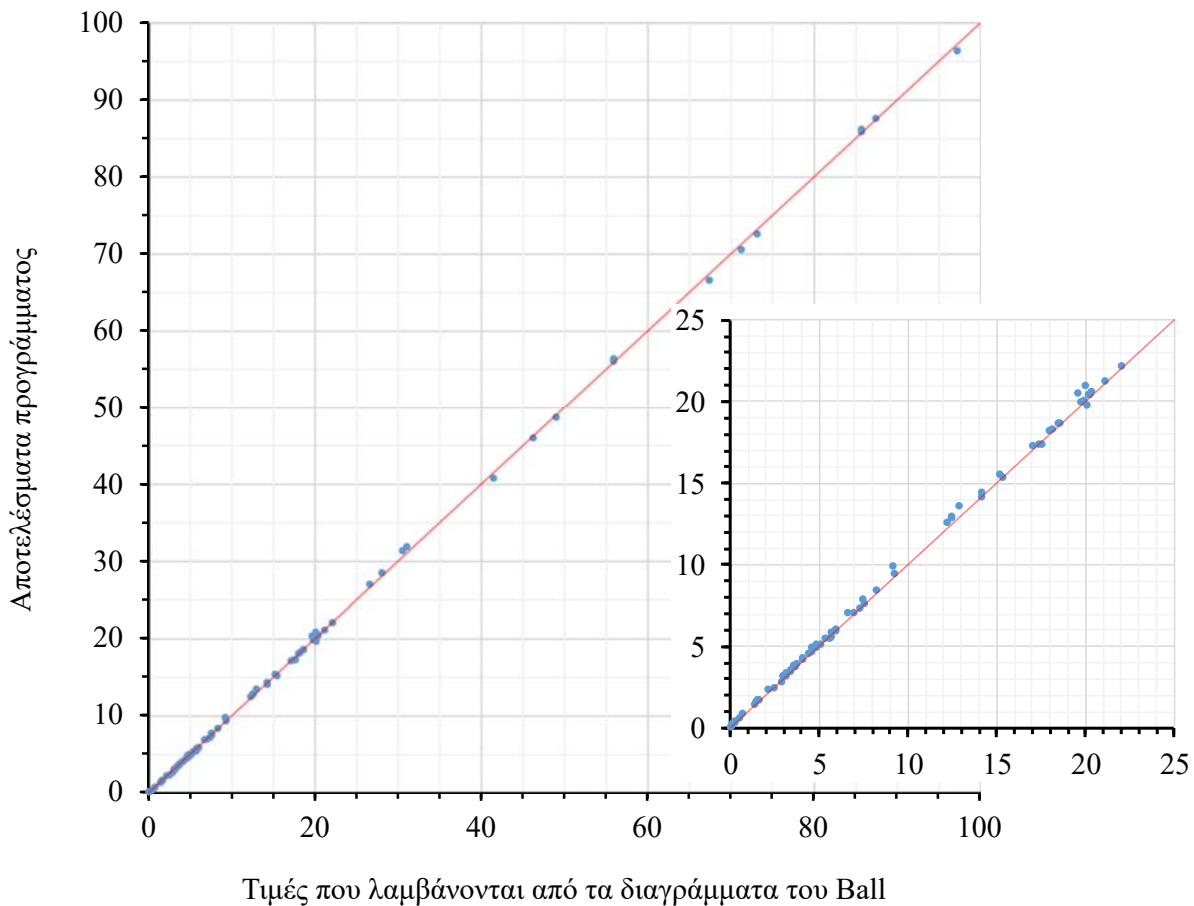
Με το άνοιγμα του αρχείου εμφανίζεται η αρχική οθόνη μέσω της οποίας ο χρήστης ξεκινάει νέα μελέτη περίπτωσης. Στη συνέχεια καλείται να επιλέξει τη θέση αποθήκευσης και να εισάγει ένα όνομα για το νέο αρχείο που θα δημιουργηθεί, το οποίο θα περιέχει συγκεντρωτικά τα δεδομένα και τα αποτελέσματα των υπολογισμών. Ακολουθεί η εμφάνιση της κεντρικής οθόνης του υπολογιστικού εργαλείου μέσω της οποίας ο χρήστης επιλέγει ανάμεσα στην τυπική εφαρμογή της μεθόδου και στις ειδικές περιπτώσεις ($f_h \neq f_c$ ή "σπαστές" καμπύλες θερμικής διεύθυνσης). Στη συνέχεια ο χρήστης επιλέγει τον υπολογισμό της τιμής F ή του απαιτούμενου χρόνου θέρμανσης, B και εισάγει τα απαραίτητα δεδομένα για τη διεξαγωγή των υπολογισμών. Αφού εμφανιστεί το αποτέλεσμα, δίνεται η δυνατότητα στον χρήστη να επιστρέψει στην κεντρική οθόνη προς έναρξη μιας νέας περίπτωσης, να προχωρήσει σε ενδεικτικό υπολογισμό του ποσοστού μείωσης κάποιου παράγοντα ποιότητας για τη περίπτωση που εξετάζεται ή να τερματίσει το υπολογιστικό εργαλείο, γεγονός που επιφέρει το άνοιγμα του αρχείου των δεδομένων και αποτελεσμάτων για περαιτέρω επεξεργασία. Στο Σχήμα 1 παρουσιάζεται σχηματικά η συνοπτική περιγραφή της λειτουργίας του υπολογιστικού εργαλείου που αναπτύχθηκε.



Σχήμα 1. Διάγραμμα συνοπτικής λειτουργίας του υπολογιστικού εργαλείου.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Με την ολοκλήρωση της ανάπτυξης του υπολογιστικού εργαλείου έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων που λαμβάνονται από αυτό με τις τιμές που προκύπτουν από τους πίνακες ή διαγράμματα του Ball, τόσο για την τυπική εφαρμογή της, όσο και για τις ειδικές περιπτώσεις, ενώ τα αποτελέσματα της σύγκρισης παρουσιάζονται στο Σχήμα 2. Η συμφωνία των τιμών μεταξύ των δύο διαφορετικών υπολογισμών ήταν πολύ ικανοποιητική.



Σχήμα 2. Σύγκριση αποτελεσμάτων του προγράμματος (χρόνοι θέρμανσης, B) με τις τιμές που προκύπτουν από τα διαγράμματα του Ball.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο υπολογιστικό εργαλείο που δημιουργήθηκε υπάρχει η δυνατότητα υπολογισμού είτε της τιμής F μιας δεδομένης θερμικής επεξεργασίας, είτε του απαιτούμενου χρόνου θέρμανσης για την επίτευξη της απαιτούμενης τιμής F . Επιπλέον υπάρχει η δυνατότητα διεξαγωγής υπολογισμών τόσο για σπαστές καμπύλες θερμικής διείδυσης όσο και για τις περιπτώσεις όπου $f_h \neq f_c$ και εμφάνιση ενδεικτικών αποτελεσμάτων υπολογισμών ποιοτικής υποβάθμισης. Τα καταχωρημένα δεδομένα και τα αποτελέσματα κάθε υπολογισμού αποθηκεύονται και εμφανίζονται σε τελικό συγκεντρωτικό αρχείο προς διευκόλυνση του χρήστη για περαιτέρω επεξεργασία και ανάλυση. Τα αποτελέσματα που λαμβάνονται με τη χρήση του προτεινόμενου υπολογιστικού εργαλείου είναι σε συμφωνία με αυτά που προκύπτουν από τους πίνακες ή τα διαγράμματα του Ball. Να σημειωθεί ότι κατά την εφαρμογή της μεθόδου του Ball, όπως και κάθε μεθόδου, είναι απαραίτητο να συνυπολογίζονται τόσο οι παραδοχές όσο και οι περιορισμοί της και να γίνεται αξιολόγηση και προσεκτική εκτίμηση των αποτελεσμάτων, κάτι που έχει ληφθεί υπόψη στη δημιουργία του υπολογιστικού εργαλείου ώστε να προστατεύεται, κατά το δυνατόν, ο χρήστης.

ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ

$a_1 \dots a_7$ συντελεστές της Εξ. (6) που ορίζονται στον Πίνακα 1

$b_1 \dots b_7$ συντελεστές της Εξ. (7) που ορίζονται στον Πίνακα 2

C συγκέντρωση θερμοευαίσθητου παράγοντα, CFU/mL ή οποιαδήποτε άλλη κατάλληλη μονάδα μέτρησης

B χρόνος θέρμανσης (από άνοιγμα έως κλείσιμο της παροχής ατμού), min

D_T	χρόνος υποδεκαπλασιασμού, ο χρόνος, σε σταθερή θερμοκρασία, T , που απαιτείται για να υποδεκαπλασιαστεί η συγκέντρωση θερμικά ευαίσθητου παράγοντα, min
F_T^z	(ή απλώς τιμή F) ισοδύναμος χρόνος μιας υποθετικής διεργασίας, σε σταθερή θερμοκρασία, T , που επιφέρει το ίδιο αποτέλεσμα, όσον αφορά στην καταστροφή ενός θερμικά ευαίσθητου παράγοντα, με την υπό εξέταση θερμική διεργασία, min
F_i	παράμετρος που ορίζεται από την Εξ. (5), αδιάστατος αριθμός
f	χρόνος που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί (ή να υποδεκαπλασιαστεί) η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτοκλείστου και κρίσιμου σημείου προϊόντος, min
f_2	η τιμή της παραμέτρου f μετά το σημείο "σπασίματος" μιας σπαστής καμπύλης θέρμανσης, min
g	διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ αυτοκλείστου και κρίσιμου σημείου προϊόντος σε χρόνο θέρμανσης B , °F
j	παράγοντας υστέρησης, παράμετρος για την περιγραφή (μαζί με την παράμετρο f) του ευθύγραμμου τμήματος της καμπύλης θερμικής διεξόδου, αδιάστατος αριθμός
$m+g$	παράμετρος που ορίζεται ως $m+g=T_{RT}-T_{CW}$, °F
ρ	λόγος της τιμής F που επιτυγχάνεται κατά τη διάρκεια του κύκλου θέρμανσης προς τη συνολική τιμή F της διεργασίας, αδιάστατος αριθμός
T	θερμοκρασία (κρίσιμο σημείο προϊόντος), °F
T_{CW}	θερμοκρασία περιβάλλοντος (νερού) ψύξης, °F
T_{IT}	αρχική θερμοκρασία κρίσιμου σημείου προϊόντος, °F
T_{RT}	θερμοκρασία αυτοκλείστου κατεργασίας, °F
t	χρόνος, min
U	παράμετρος για το σχεδιασμό θερμικών διεργασιών που ορίζεται ως $U=FF_i$, min
x, y	μεταβλητές στην Εξ. (6) που ορίζονται στον Πίνακα 1
z	διαφορά θερμοκρασίας που απαιτείται για να δεκαπλασιαστεί ο χρόνος υποδεκαπλασιασμού του μικροβιακού φορτίου ή άλλης θερμικά ευαίσθητης ουσίας, °F
z_c	διορθωτικός παράγοντας διαφοράς θερμοκρασίας στην Εξ. (6), °F

Δείκτες

a	αναφερόμενος σε αρχική συνθήκη
b	αναφερόμενος σε τελική συνθήκη
bh	αναφερόμενος στον χρόνο του «σπασίματος», δηλαδή της αλλαγής της κλίσης στις καμπύλες θερμικής διεξόδου
c	αναφερόμενος στη φάση της ψύξης
h	αναφερόμενος στη φάση της θέρμανσης
end	αναφερόμενος στο τέλος της διεργασίας
ref	συνθήκη αναφοράς

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] N. G. Stoforos. Food Control 6(2) (1995) 81-94.
- [2] A. K. Datta. Food Technol. 52(10) (1998) 44-52.
- [3] C.R. Chen, H.S. Ramaswamy. Chem. Eng. Process. 46(7) (2007) 603-613.
- [4] N.G. Stoforos. In: T. Varzakas, C. Tzia (Eds), Taylor & Francis Group, Boca Raton, FL, USA (2015) 27-56.
- [5] N.G. Stoforos. Food Eng. Rev. 2(1) (2010) 1-16.
- [6] N.G. Stoforos, J. Noronha, M. Hendrickx, P. Tobback. Crit. Rev. Food. Sci. 37 (5) (1997) 411-441.
- [7] W.D. Bigelow, G.S. Bohart, A.C. Richardson, C.O. Ball. Bull. No.16-L, Res. Lab. Natl. Canners Assoc., Washington, DC (1920).
- [8] C.O. Ball. Bull. Natl. Res. Council 7 (1923) 9-76.
- [9] N.G. Stoforos. J. Food Proc. Eng. 13(4) (1991) 255-268.
- [10] NCA. Natl. Canners Assoc. Res. Labs The Avi Pub. Co., Inc., Westport, CT (1968).