

## ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΠΑΛΜΙΚΩΝ ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΠΕΔΙΩΝ ΣΤΗΝ ΑΠΟΔΟΣΗ ΧΥΜΟΠΟΙΗΣΗΣ ΚΑΙ ΣΤΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΧΥΜΟΥ ΚΑΡΟΤΟΥ

**A. Λημναίος\***, Γ. Δημόπουλος, Γ. Στουκογιώργος, Α. Κατσιμίχας, Π. Ταούκης  
Εργαστήριο Χημείας και Τεχνολογίας Τροφίμων, Σχολή Χημικών Μηχανικών,  
Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Αθήνα, Ελλάδα  
(\*[alimnaios@chemeng.ntua.gr](mailto:alimnaios@chemeng.ntua.gr))

### ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η χυμοποίηση του καρότου πραγματοποιείται βιομηχανικά με διατάξεις, οι οποίες συμπιέζουν θρυμματισμένο καρότο για την εξαγωγή του χυμού. Τα καρότα χαρακτηρίζονται για τη σκληρή, ξυλώδη υφή τους, ειδικά σε ορισμένες περιόδους εσοδείας. Αυτό δυσχεραίνει τον θρυμματισμό τους και οδηγεί σε χαμηλές αποδόσεις χυμοποίησης, προς βελτίωση των οποίων εφαρμόζονται θερμικές μέθοδοι προεπεξεργασίας (ζεμάτισμα), για την μείωση της σκληρότητας των ιστών. Αναπόφευκτα αυτές οδηγούν σε υποβάθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του παραγόμενου χυμού και σε αύξηση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Τα παλμικά ηλεκτρικά πεδία (ΠΗΠ) είναι μια μη θερμική τεχνολογία κυτταρικής διάρρηξης που στηρίζεται στην έκθεση κυττάρων και ιστών σε υψηλής έντασης ηλεκτρικά πεδία, που επηρεάζουν την υφή των φυτικών ιστών και την απόδοση χυμοποίησης. Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν η μελέτη της επίδρασης των ΠΗΠ στη χυμοποίηση και στα ποιοτικά χαρακτηριστικά χυμού καρότου, συγκριτικά με τη συμβατική θερμική προεπεξεργασία.

Ολόκληρα καρότα υποβλήθηκαν σε επεξεργασία με ΠΗΠ (0,5-1,5 kV/cm, 0-6 kJ/kg), με ζεμάτισμα (90 °C, 5 min, 247 kJ/kg) και με κατάψυξη-απόψυξη. Κατόπιν, τα καρότα θρυμματίστηκαν και πραγματοποιήθηκε εξαγωγή του χυμού με χρήση περιστροφικής πρέσας. Προσδιορίστηκε η απόδοση χυμοποίησης για όλες τις μεθόδους προεπεξεργασίας και μελετήθηκαν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των χυμών που προέκυψαν (ολικά καροτενοειδή, ολικά διαλυτά στερεά). Για τις επεξεργασίες με ΠΗΠ, ο βαθμός απόδοσης χυμοποίησης συσχετίστηκε με τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης που προσδιορίστηκε μέσω της ηλεκτρικής αγωγιμότητας των δειγμάτων.

Η απόδοση χυμοποίησης των καρότων εξαρτάται ισχυρά από τον δείκτη κυτταρικής διάρρηξης  $Z$ . Ο βαθμός απόδοσης χυμοποίησης στο ανεπεξέργαστο καρότο ( $Z = 0$ ) ήταν ίσος με 25 %. Η μέγιστη τιμή του  $Z$  που επιτεύχθηκε ήταν ίση με 0,45, με εφαρμογή ΠΗΠ ειδικής ενέργειας 1,7 kJ/kg, με τον αντίστοιχο βαθμό απόδοσης χυμοποίησης να ανέρχεται σε 42 %. Παρόμοιοι βαθμοί απόδοσης επιτεύχθηκαν με ζεμάτισμα για 5 min στους 90 °C, με την εφαρμοζόμενη ειδική ενέργεια να ανέρχεται, όμως, σε 247 kJ/kg, η οποία είναι περίπου 145 φορές μεγαλύτερη από την αντίστοιχη με ΠΗΠ. Επιπλέον, ο χυμός που παραλήφθηκε από τα ζεματισμένα καρότα εμφάνισε σημαντική υποβάθμιση των ολικών καροτενοειδών του. Συμπερασματικά, η προεπεξεργασία των καρότων με ΠΗΠ προσφέρει σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας, καθιστώντας τη διεργασία χυμοποίησης από σκληρά και ξυλώδη προϊόντα αποδοτική και βιώσιμη.

**ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ:** μη θερμικές τεχνολογίες, παλμικά ηλεκτρικά πεδία, ηλεκτροδιάτρηση, καρότα, χυμοποίηση

### ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι βιομηχανίες παραγωγής προϊόντων χυμών φρούτων και λαχανικών αποτελούν έναν από τους σημαντικότερους βιομηχανικούς κλάδους στην Ελλάδα, με την ετήσια κατανάλωση χυμών φρούτων και λαχανικών στην Ελλάδα να ανέρχεται το έτος 2023 σε 94.800.000 L<sup>[1]</sup>. Η παραγωγή τους περιλαμβάνει διάφορα στάδια, όπως αποφλοιώση, χυμοποίηση, συμπύκνωση, παστερίωση κ.λπ.. Τα περισσότερα στάδια απαιτούν υψηλές θερμοκρασίες, οδηγώντας σε υποβάθμιση των ποιοτικών δεικτών των τελικών προϊόντων, αλλά και σημαντική κατανάλωση ενέργειας που αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό κόστους παραγωγής τους<sup>[2]</sup>. Κατά το στάδιο της χυμοποίησης, η

απόδοση σε χυμό διαφοροποιείται ανάλογα με το προϊόν, την ωρίμανσή του, ακόμα και την ποικιλία του προϊόντος<sup>[3]</sup>. Από τα σημαντικότερα λαχανικά που θα ήταν επιθυμητή μια αύξηση της απόδοσης σε χυμό είναι το καρότο, το οποίο είναι μια σημαντική πηγή θρεπτικών συστατικών, όπως φαινολικών<sup>[4]</sup> και καροτενοειδών<sup>[5]</sup>. Είναι πλούσιο σε β-καροτένιο, ασκορβικό οξύ και τοκοφερόλη. Οι αποδόσεις χυμοποίησης του καρότου είναι χαμηλές και κυμαίνονται μεταξύ 15-25 %, ανάλογα με την ωρίμανση. Οι βιομηχανίες αναζητούν τρόπους αύξησης της απόδοσης χυμοποίησης, όπως η θερμική προεπεξεργασία των καρότων. Η καταπόνηση που υφίστανται, όμως, τα προϊόντα είναι σημαντική και οι απαιτήσεις σε ενέργεια αυξημένες, χωρίς το όφελος να είναι σημαντικό (αύξηση απόδοσης περίπου 10 %)<sup>[6]</sup>.

Ο βασικότερος στόχος της παρούσας έρευνας ήταν η αξιολόγηση της εφαρμογής της καινοτόμου τεχνολογίας των παλμικών ηλεκτρικών πεδίων (ΠΗΠ) ως στάδιο προεπεξεργασίας των καρότων, με σκοπό την αύξηση της απόδοσης χυμοποίησης και την παραγωγή χυμού με βελτιωμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά, αλλά και τη μείωση της καταναλισκόμενης ενέργειας. Τα ΠΗΠ είναι μια νέα τεχνολογία που στηρίζεται στην έκθεση υγρών και στερεών τροφίμων σε παλμούς ηλεκτρικού πεδίου υψηλής έντασης (1-40 kV/cm) και μικρής διάρκειας (μs έως ms). Όταν ένα κύτταρο εκτίθεται σε υψηλής έντασης ηλεκτρικό πεδίο δημιουργούνται πόροι στην κυτταρική μεμβράνη του, φαινόμενο που ονομάζεται ηλεκτροδιάτρηση<sup>[7]</sup>. Το ηλεκτρικό πεδίο μπορεί, λοιπόν, να προκαλέσει αύξηση της κυτταρικής διαπερατότητας σε φυτικούς ιστούς<sup>[8]</sup>. Το χαμηλό θερμικό φορτίο που απαιτείται για την επεξεργασία διατηρεί αναλλοίωτα τα θρεπτικά και ποιοτικά χαρακτηριστικά των προϊόντων. Τα ΠΗΠ μπορούν να εφαρμοστούν σαν προεπεξεργασία των φρέσκων φρούτων και λαχανικών πριν τη χυμοποίησή τους για αύξηση της παραγωγής υψηλής ποιότητας τελικού προϊόντος.

## ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

### Πρώτη ύλη & επεξεργασία με παλμικά ηλεκτρικά πεδία (ΠΗΠ)

Καρότα (*Daucus carota*) παραλήφθηκαν από δύο περιόδους συγκομιδής (Φεβρουάριος & Μάιος). Η επεξεργασία των καρότων με ΠΗΠ πραγματοποιήθηκε με χρήση της πιλοτικής κλίμακας διάταξης Elcrack-5kW (DIL, Quakenbrück, Γερμανία), η οποία απαρτίζεται από μια γεννήτρια παλμών και έναν θάλαμο επεξεργασίας διαλείποντος έργου που φέρει δύο παράλληλες χαλύβδινες πλάκες (ηλεκτρόδια) στις δύο πλευρές του, σε απόσταση 80 mm. Η επεξεργασία των καρότων πραγματοποιήθηκε σε αδρώς τεμαχισμένες ρίζες, με εμβάπτισή τους σε νερό βρύσης εντός του θαλάμου. Η διάρκεια ( $t_p$ ) και η συχνότητα ( $f$ ) των παλμών ήταν ίσες με 15 μs και 20 Hz, αντίστοιχα. Η επεξεργασία πραγματοποιήθηκε σε εντάσεις ηλεκτρικού πεδίου ( $E$ ) 0,5 - 2,0 kV/cm με αριθμούς παλμών ( $n_p$ ) από 0 (ανεπεξεργαστο) έως 2000, αντιστοιχώντας σε ειδική ενέργεια ( $W$ ) 0 - 12 kJ/kg.

### Προσδιορισμός του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης ( $Z$ )

Ο προσδιορισμός του  $Z$ , που αντιστοιχεί στο ποσοστό των κυττάρων που έχουν υποστεί κυτταρική διάρρηξη, πραγματοποιήθηκε σε αδρώς τεμαχισμένα καρότα εμβαπτισμένα σε νερό εντός του θαλάμου επεξεργασίας, με τη μέθοδο χαμηλής-υψηλής συχνότητας<sup>[9]</sup>.

### Θερμικές προεπεξεργασίες καρότου

Για να συγκριθεί η αποτελεσματικότητα των ΠΗΠ στην αύξηση της απόδοσης χυμού καρότου με τη συμβατική μέθοδο, πραγματοποιήθηκαν δύο είδη θερμικής επεξεργασίας: ζεμάτισμα και κατάψυξη-απόψυξη. Για το ζεμάτισμα, δίσκοι καρότου πάχους 1 cm τοποθετήθηκαν σε νερό θερμοκρασίας 90 °C για 5 min και έπειτα ψύχθηκαν στους 25 °C. Για την κατάψυξη-απόψυξη, νωπά καρότα καταψύχθηκαν στους -20 °C για 24 h και έπειτα αποψύχθηκαν για 1 h στους 25 °C.

### Προσδιορισμός μηχανικών ιδιοτήτων καρότου

Για την αξιολόγηση της επίδρασης των ΠΗΠ στις μηχανικές ιδιότητες του καρότου, δίσκοι καρότου  $\varnothing 2,5 \text{ cm} \times 0,8 \text{ cm}$  αναλύθηκαν με χρήση αναλυτής υφής TA-XT2i (Stable Micro Systems, UK).

Προσδιορισμός έργου κοπής: Για τον προσδιορισμό του έργου κοπής χρησιμοποιήθηκε στέλεχος με λεπίδα πλάτους 4 cm. Τα τεμάχια συμπίεστηκαν έως η λεπίδα να διεισδύσει κατά 5 mm σε κάθε τεμάχιο. Από το εμβαδόν της καμπύλης δύναμης - χρόνου υπολογίστηκε το έργο κοπής σε N·s.

Προσδιορισμός της σκληρότητας: Για τον προσδιορισμό της σκληρότητας χρησιμοποιήθηκε κυλινδρικό στέλεχος διαμέτρου 6 mm. Τα τεμάχια συμπίεστηκαν σε μέγιστη παραμόρφωση 10 %. Η μέγιστη δύναμη που καταγράφηκε συσχετίζεται με τη σκληρότητα των τεμαχίων και εκφράστηκε σε N. Για λόγους σύγκρισης χρησιμοποιήθηκε η σχετική σκληρότητα  $F/F_0$  ως το κλάσμα της εκάστοτε σκληρότητας προς τη σκληρότητα του ανεπεξέργαστου δείγματος.

### Χυμοποίηση καρότου

Για τη χυμοποίηση του καρότου χρησιμοποιήθηκε χειροκίνητη πρέσα, αποτελούμενη από έναν κυλινδρικό κάδο μέγιστης χωρητικότητας 5 L και έναν δίσκο  $\varnothing 20 \text{ cm}$  σε κοχλιωτό άξονα. Περίπου 1000 g καρότου αλέστηκαν σε οικιακό πολυκόπτη και τοποθετήθηκαν στην πρέσα. Η έκθλιψη πραγματοποιήθηκε σε δύο κύκλους διάρκειας 5 min. Η κλίνη του αλεσμένου καρότου συμπίεστηκε στη μέγιστη δυνατή περιστροφή του κοχλία. Η απόδοση σε χυμό προσδιορίστηκε με ζύγιση του χυμού που εκρέει στο κάτω μέρος της πρέσας, ως το ποσοστό του χυμού προς την αρχική μάζα του καρότου που συμπίεστηκε.

### Προσδιορισμός επιλεγμένων φυσικοχημικών χαρακτηριστικών χυμού καρότου

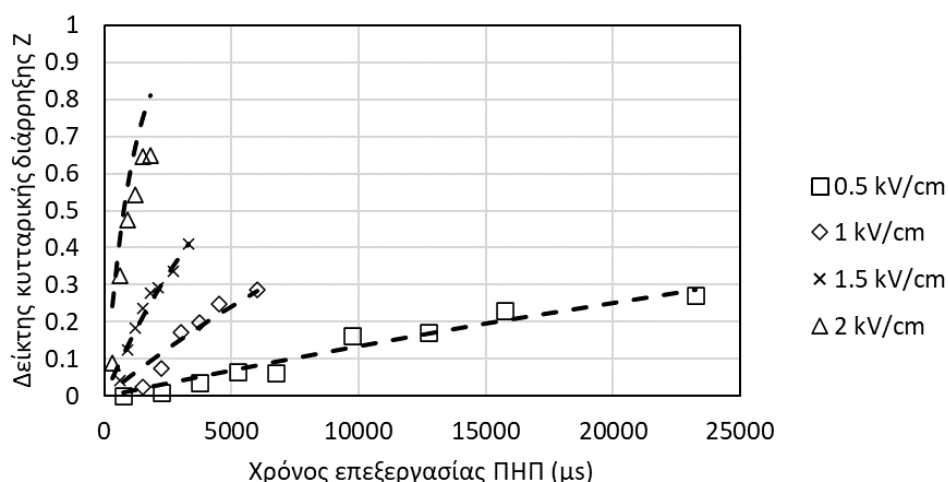
Προσδιορισμός ολικών διαλυτών στερεών: Τα ολικά διαλυτά στερεά προσδιορίστηκαν τοποθετώντας 0,5 mL χυμού σε διαθλασίμετρο Abbe και εκφράστηκαν σε βαθμούς Brix ( $^{\circ}\text{Bx}$ ).

Προσδιορισμός ολικών καροτενοειδών: Για τον προσδιορισμό των καροτενοειδών χρησιμοποιήθηκε η φασματοφωτομετρική μέθοδος των Nagata & Yamashita (1992)<sup>[10]</sup>.

## ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ

### Δείκτης κυτταρικής διάρρηξης (Z)

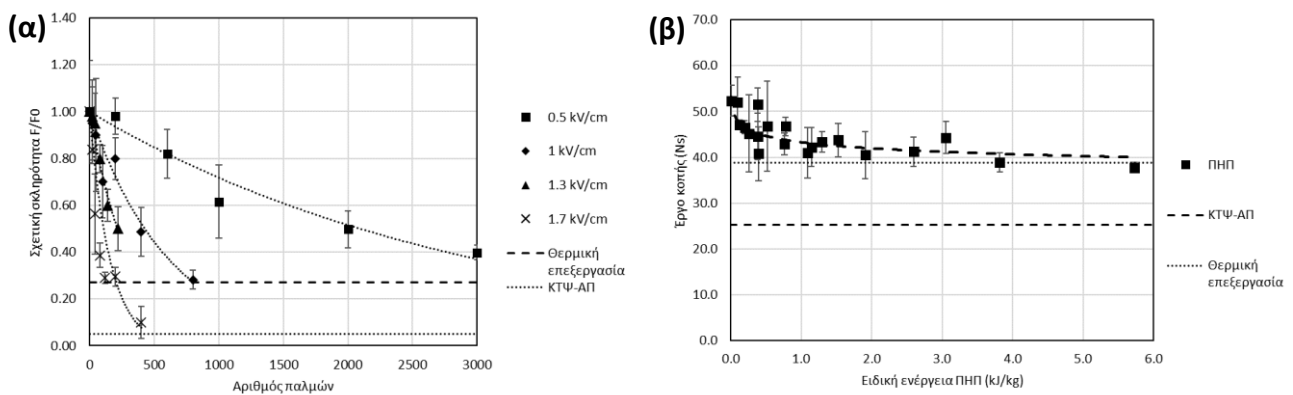
Η εξάρτηση του Z από τον χρόνο επεξεργασίας με ΠΗΠ γίνεται εντονότερη με αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου (Σχήμα 1). Ο δείκτης κυτταρικής διάρρηξης πλησιάζει την τιμή 0,8 με επεξεργασία 1.800  $\mu\text{s}$  στα 2 kV/cm, ενώ χρειάζονται πάνω από 20.000  $\mu\text{s}$  στο 0,5 kV/cm για να ξεπεράσει το 0,25. Ο προσδιορισμός του Z επιτρέπει την επιλογή κατάλληλων συνθηκών επεξεργασίας για επιτυχή ηλεκτροδιάτρηση και συσχέτιση της επεξεργασίας με το ποσοστό των κυττάρων που έχουν καταστεί διαπερατά.



Σχήμα 1. Εξάρτηση του δείκτη κυτταρικής διάρρηξης του καρότου από τον χρόνο επεξεργασίας με ΠΗΠ.

## Επίδραση επεξεργασιών στις μηχανικές ιδιότητες του καρότου

Οι επεξεργασίες που μελετήθηκαν είχαν σημαντική επίδραση στη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων του καρότου. Παρατηρήθηκε ότι η σκληρότητα του καρότου μειώθηκε σημαντικά με κάθε εφαρμοζόμενη επεξεργασία, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.α. Η θερμική επεξεργασία (5 min στους 90 °C) οδήγησε σε μείωση της σκληρότητας του καρότου στο 27 % αυτής του ανεπεξέργαστου, ενώ η κατάψυξη-απόψυξη οδήγησε σε μείωση στο 5 %, καταστρέφοντας πλήρως την κυτταρική δομή του ιστού. Όσον αφορά στις επεξεργασίες με ΠΗΠ, σε ένταση ηλεκτρικού πεδίου 0,5 kV/cm απαιτήθηκαν πάνω από 3.000 παλμοί ώστε η σκληρότητα να φθάσει σε τιμές συγκρίσιμες με αυτή της θερμικής επεξεργασίας. Αντιθέτως, σε ένταση ηλεκτρικού πεδίου 1,7 kV/cm μόλις 400 παλμοί κατάφεραν να μειώσουν τη σκληρότητα του καρότου σε τιμές συγκρίσιμες με αυτές της κατάψυξης-απόψυξης. Οι επεξεργασίες με ΠΗΠ δεν ξεπέρασαν τα 6 kJ/kg σε κατανάλωση ενέργειας, ενώ οι θερμικές προεπεξεργασίες απαιτήσαν 247 - 850 kJ/kg, καταδεικνύοντας τη διεργασία των ΠΗΠ ως πιο ενεργειακά συμφέρουσα για το μαλάκωμα των ξυλωδών καρότων.



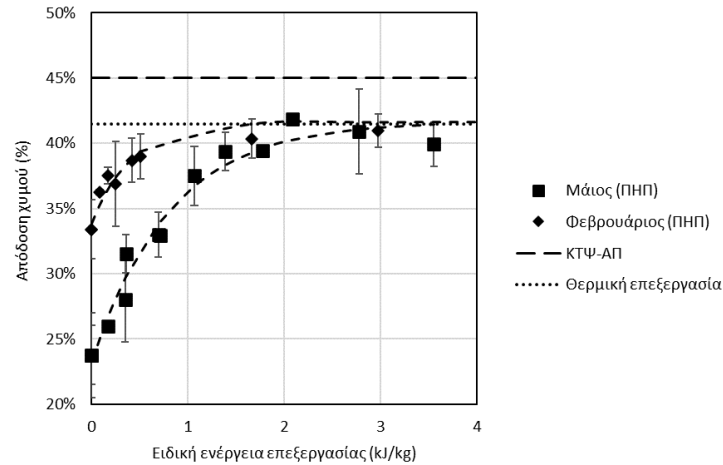
**Σχήμα 2.** Εξάρτηση (α) της σχετικής σκληρότητας τεμαχίων καρότου από τον αριθμό των παλμών για κάθε ένταση ηλεκτρικού πεδίου και (β) του έργου κοπής τεμαχίων καρότου από την ειδική ενέργεια επεξεργασίας με ΠΗΠ. Οι διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές αντιστοιχούν στο θερμικά επεξεργασμένο (90 °C, 5 min) και το κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα.

Κατά συνέπεια, η επεξεργασία με ΠΗΠ οδήγησε σε μείωση του έργου κοπής τεμαχίων καρότου έως και κατά 30 % σε σχέση με την τιμή του ανεπεξέργαστου δείγματος, όπως φαίνεται στο Σχήμα 2.β. Η θερμική επεξεργασία οδήγησε σε αντίστοιχη τιμή του έργου κοπής με τις επεξεργασίες ΠΗΠ για ειδική ενέργεια πάνω από 2 kJ/kg, οδηγώντας σε εξοικονόμηση ενέργειας έως και 245 kJ/kg. Ωστόσο, καμία από τις δύο επεξεργασίες δεν κατάφερε να μειώσει το έργο κοπής όσο η επεξεργασία με κατάψυξη-απόψυξη (52 %). Παρ' όλα αυτά η επεξεργασία αυτή οδηγεί σε σημαντική υποβάθμιση του ιστού, επηρεάζοντας αρνητικά όλες τις περαιτέρω διεργασίες.

## Επίδραση των επεξεργασιών στην απόδοση χυμοποίησης καρότου

Η επεξεργασία με ΠΗΠ οδήγησε σε σημαντική αύξηση της απόδοσης χυμοποίησης καρότου, η οποία παρουσιάζεται στο Σχήμα 3 συναρτήσει τη ειδικής ενέργειας επεξεργασίας με ΠΗΠ. Έχει παρατηρηθεί στην βιομηχανία ότι στο τέλος της άνοιξης τα καρότα που παραλαμβάνονται για χυμοποίηση εμφανίζουν ξυλώδη υφή και παρουσιάζουν χαμηλές αποδόσεις χυμοποίησης, κάτι που επιβεβαιώθηκε, καθώς τα καρότα στην αρχή της περιόδου συγκομιδής (Φεβρουάριος) εμφάνισαν σημαντικά υψηλότερη απόδοση χυμού (33 %), σε σύγκριση με τα καρότα στο τέλος της περιόδου συγκομιδής (Μάιος, 24 %). Η επεξεργασία με ΠΗΠ οδήγησε σε σημαντική αύξηση της απόδοσης χυμοποίησης με αύξηση της προσφερόμενης ειδικής ενέργειας, έως και στην τιμή 42 %, συγκρίσιμη με την απόδοση της θερμικής επεξεργασίας (90°C, 5 min). Αύξηση της ειδικής ενέργειας επεξεργασίας πάνω από τα 2 kJ/kg δεν οδήγησε σε περαιτέρω αύξηση της απόδοσης χυμοποίησης.

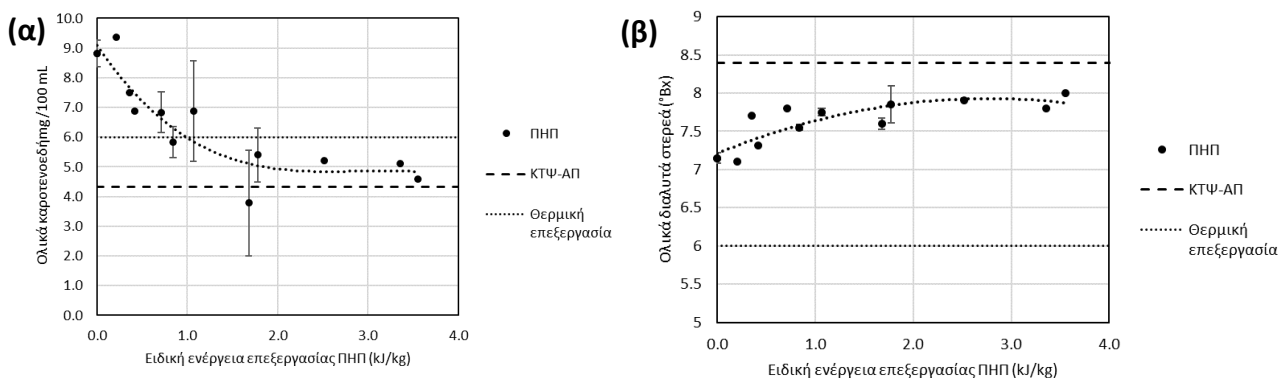
Ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι η αύξηση της απόδοσης στις δύο διαφορετικές περιόδους συγκομιδής φαίνεται να συγκλίνει στην ίδια τιμή, που σημαίνει ότι η διαφορά στις δύο περιόδους δεν έγκειται τόσο στη διαφορετική περιεκτικότητα των καρότων σε χυμό, αλλά στη διαφορετική σκληρότητα που δεν επιτρέπει την εξαγωγή του, όπως επιβεβαιώνεται και από την επεξεργασία με κατάψυξη-απόψυξη, η οποία οδήγησε στη μέγιστη απόδοση χυμού (45 %).



**Σχήμα 3.** Εξάρτηση της απόδοσης χυμοποίησης καρότου από την ειδική ενέργεια επεξεργασίας με ΠΗΠ από δύο περιόδους συγκομιδής καρότου (Μάιος & Φεβρουάριος). Οι οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στο θερμικά επεξεργασμένο (90°C, 5 min) και το κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα.

#### Επίδραση των επεξεργασιών σε επιλεγμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού καρότου

Η θερμική προεπεξεργασία του καρότου πριν τη χυμοποίηση οδήγησε σε μεταβολές στα ποιοτικά χαρακτηριστικά του παραγόμενου χυμού. Η προεπεξεργασία με ζεμάτισμα (90 °C, 5 min) οδήγησε σε μείωση των ολικών καροτενοειδών από 9 σε 6 mg/100 mL, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.α. Αρχικά, η μείωση αυτή φαίνεται να αποδίδεται σε υποβάθμιση των καροτενοειδών εξαιτίας της έκθεσής τους σε υψηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, εξετάζοντας την τιμή της συγκέντρωσης καροτενοειδών που μετρήθηκε στο δείγμα που υπέστη κατάψυξη-απόψυξη (4,3 mg/100 mL), φαίνεται ότι η μείωση είναι σημαντικά μεγαλύτερη, παρόλο που το δείγμα αυτό δεν εκτέθηκε σε υψηλές θερμοκρασίες, μαρτυρώντας ότι η μεταβολή αυτή οφείλεται πιθανώς σε αυξημένη εκροή νερού και υδατοδιαλυτών συστατικών από τα κύτταρα.



**Σχήμα 4.** Εξάρτηση της συγκέντρωσης (α) ολικών καροτενοειδών και (β) ολικών διαλυτών στερεών χυμού καρότου από την ειδική ενέργεια επεξεργασίας με ΠΗΠ. Οι διακεκομμένες οριζόντιες γραμμές αντιστοιχούν στα δείγματα που υπέστησαν κατάψυξη-απόψυξη και θερμική επεξεργασία (90°C, 5 min).

Αντίστοιχη μείωση στα ολικά καροτενοειδή του χυμού καρότου παρατηρήθηκε με προεπεξεργασία με ΠΗΠ, με αύξηση της προσφερόμενης ειδικής ενέργειας. Η μείωση των ολικών καροτενοειδών

στον χυμό εξελίσσεται για ειδική ενέργεια επεξεργασίας μέχρι και 2 kJ/kg, ενώ για εντονότερες συνθήκες επεξεργασίας δεν παρατηρείται περαιτέρω μείωση. Καθώς η τάση αυτή ακολουθεί την αύξηση της απόδοσης, η μείωση των καροτενοειδών αποδίδεται σε αραίωση του χυμού από το επιπλέον εξερχόμενο νερό μετά την επεξεργασία. Εάν επρόκειτο για υποβάθμιση λόγω οξείδωσης από την έκθεση του ιστού στο ηλεκτρικό πεδίο, η μείωση θα ήταν εντονότερη σε υψηλότερες τιμές ειδικής ενέργειας (εντονότερη επεξεργασία).

Η αύξηση της απόδοσης του χυμού αλλά και της μείωσης της ολικής συγκέντρωσης καροτενοειδών συνοδεύεται από αύξηση των ολικών διαλυτών στερεών του χυμού, όπως παρατηρείται στο Σχήμα 4.β. Αύξηση της ειδικής ενέργειας επεξεργασίας έως και 2 kJ/kg συνοδεύεται από αύξηση των ολικών διαλυτών στερεών έως και κατά 1 °Bx. Η αύξηση αυτή οφείλεται πιθανώς στην ευκολότερη εκροή υδατοδιαλυτών στερεών από τα κύτταρα ως μέρος του χυμού, αποτέλεσμα της ηλεκτροδιάτρησης των κυττάρων του ιστού. Η μεγιστοποίηση της αύξησης αυτής (1.5 °Bx) παρατηρείται για το κατεψυγμένο-αποψυγμένο δείγμα, που εμφανίζει τον μέγιστο Z.

Συμπερασματικά, η επεξεργασία με ΠΗΠ οδήγησε σε σημαντική αύξηση της απόδοσης χυμού καρότου όταν εφαρμόστηκε ως προεπεξεργασία σε ολόκληρα καρότα πριν τη χυμοποίηση. Προσφορά ειδικής ενέργειας ίση με 2 kJ/kg ήταν αρκετή ώστε να αυξήσει την απόδοση από 24 σε 42 %, διατηρώντας τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του χυμού εντός των αποδεκτών ορίων. Η επεξεργασία με ΠΗΠ οδηγεί σε σημαντική εξοικονόμηση ενέργειας κατά την επεξεργασία του καρότου, καθώς οι συμβατικές θερμικές επεξεργασίες απαιτούν σημαντικά υψηλότερη κατανάλωση ενέργειας (250-800 kJ/kg). Σημαντικά οφέλη της προεπεξεργασίας με ΠΗΠ αποτελούν ακόμα το μαλάκωμα που επιφέρει η ηλεκτροδιάτρηση, οδηγώντας στη μείωση του απαιτούμενου μηχανικού έργου για τον τεμαχισμό πριν τη χυμοποίηση των καρότων, υποκαθιστώντας τις συμβατικές τεχνικές θερμικής επεξεργασίας (ζεμάτισμα).

## ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα εργασία υλοποιήθηκε στα πλαίσια του ερευνητικού έργου με κωδικό ΤΑΕΔΚ-06176 και ακρωνύμιο FRUIVEF που υλοποιείται στο πλαίσιο του Εθνικού Σχεδίου Ανάκαμψης και Ανθεκτικότητας «Ελλάδα 2.0» με τη χρηματοδότηση της Ευρωπαϊκής Ένωσης – NextGenerationEU.

## ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Statista Market Insights, "Juices - Greece," 2024. Accessed: Apr. 30, 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/outlook/cmo/non-alcoholic-drinks/juices/greece>
- [2] W. A. Gould, *Tomato Production, Processing & Technology*, 3rd Edition. 1992.
- [3] D. S. Smith, *Processing Vegetables*, 1st ed. Routledge, 1997.
- [4] I. Babic, M. J. Amiot, C. Nguyen-The, and S. Aubert, "Changes in Phenolic Content in Fresh Ready-to-use Shredded Carrots during Storage," *J Food Sci*, vol. 58, no. 2, pp. 351–356, 1993.
- [5] G. Block, "A BRIEF ORIGINAL CONTRIBUTION Nutrient Sources of Provitamin A Carotenoids in the American Diet," 1994.
- [6] J. Chaïb *et al.*, "Physiological relationships among physical, sensory, and morphological attributes of texture in tomato fruits," *J Exp Bot*, vol. 58, no. 8, pp. 1915–1925, 2007.
- [7] J. Teissié *et al.*, "Recent biotechnological developments of electropulsation. A prospective review," *Bioelectrochemistry*, vol. 55, pp. 107–112, 2002.
- [8] B. I. O. Ade-Omowaye, A. Angersbach, N. M. Eshtiaghi, and D. Knorr, "Impact of high intensity electric field pulses on cell permeabilisation and as pre-processing step in coconut processing," 2001.
- [9] V. Andreou, G. Dimopoulos, E. Dermesonlouoglou, and P. Taoukis, "Application of pulsed electric fields to improve product yield and waste valorization in industrial tomato processing," *J Food Eng*, vol. 270, 2020.
- [10] M. Nagata and I. Yamashita, "Simple Method for Simultaneous Determination of Chlorophyll and Carotenoids in Tomato Fruit," *Nippon Shokuhin Kogyo Gakkaishi*, vol. 39, no. 10, pp. 925–928, 1992.