

Spirulina (Arthrospira): Βιολογία, Ταξινόμηση και Βιοτεχνολογικές εφαρμογές

Βαρδάκα Ελισάβετ*

Τμήμα Τεχνολογίας Αλιείας και Υδατοκαλλιεργειών, Αλεξάνδρειο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Παράρτημα Νέα Μουδανιά, Τ.Θ. 157, 632 00 Νέα Μουδανιά

*email: evardaka@aqua.teithe.gr

Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η καλλιέργεια και χρήση των κυανοβακτηρίων σε ένα ευρύτατο φάσμα εφαρμογών όπως για παράδειγμα στους τομείς των τροφίμων, φαρμάκων, καλλυντικών, παραγωγής βιοαερίων εμφανίζει εντυπωσιακή ανάπτυξη σε παγκόσμιο επίπεδο. Ιδιαίτερα στο χώρο των τροφίμων παρατηρείται μια συνεχής αύξηση της ζήτησης των κυανοβακτηρίων (κυρίως αυτών που ανήκουν στα γένη *Aphanizomenon*, *Arthrospira*, *Spirulina* και *Nostoc*) ως συμπληρώματα υγιεινής διατροφής, αντικατοπτρίζοντας το πρότυπο υγιεινής διατροφής που προβάλλεται πλέον, στις απαιτήσεις του οποίου φαίνεται να ανταποκρίνονται τα διαιτητικά χαρακτηριστικά των κυανοβακτηρίων (π.χ. υψηλή περιεκτικότητα πρωτεϊνών και χαμηλό ενεργειακό περιεχόμενο).

Το πλαίσιο του ανταγωνισμού, στο οποίο δραστηριοποιούνται οι υδατοκαλλιέργειες των κυανοβακτηρίων, επιβάλλει τον έλεγχο και τη διασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων αυτών, με κύριους στόχους: (α) την ικανοποίηση των απαιτήσεων του καταναλωτή (υψηλή και σταθερή ποιότητα) και (β) την προστασία της δημόσιας υγείας. Για το λόγο αυτό απαιτείται η εμπειριστατωμένη και ολοκληρωμένη γνώση αφενός της βιολογίας, της χημικής σύνθεσης και της θρεπτικής αξίας των καλλιεργούμενων ειδών, και αφετέρου των πιθανών βιολογικών κινδύνων που ενέχουν τα κυανοβακτηριακά προϊόντα (π.χ. βιοτοξίνες) καθώς και των μεθόδων ελέγχου αυτών.

Παρόλο που τα κυανοβακτήρια *Arthrospira* και *Spirulina* έχουν αναγνωρισθεί ως διαφορετικά γένη από το 1989, το εμπορικό όνομα «**Spirulina**» χρησιμοποιείται ευρέως

και συχνά ασύνειδα, για να δηλώσει εμπορικά εκμεταλευόμενα είδη και των δύο γενών. Κοινά μορφολογικά, φυσιολογικά και οικολογικά χαρακτηριστικά μεταξύ των *Arthrospira* και *Spirulina* δημιουργούν υψηλό βαθμό δυσκολίας στην αναγνώρισή τους, ενώ η τροποποίηση των χαρακτηριστικών τους (ιδιαίτερα των μορφολογικών) που παρατηρείται σε συνθήκες καλλιέργειας εντείνει περισσότερο το πρόβλημα. Η παραπάνω διαπίστωση εγείρει σημαντικά ερωτήματα σχετικά με την ορθή «ταυτότητα» των ειδών που καλλιεργούνται ή συλλέγονται από φυσικούς βιοτόπους με σκοπό την εμπορική τους εκμετάλευση ως συμπληρώματα υγιεινής διατροφής, ενώ ταυτόχρονα, τίθεται θέμα ποιότητας (π.χ. διαφορετική θρεπτική αξία μεταξύ των ειδών) και ασφάλειας (π.χ. παρουσία βιοτοξινών) των προϊόντων αυτών.

Μορφολογία-Ταξινόμηση

Το ταξινομικό όνομα «*Spirulina*» έχει χρησιμοποιηθεί από το 1932 για να δηλώσει κυανοβακτήρια που μορφολογικά εμφανίζονται ως πολυκύτταρα μη διακλαδισμένα τριχώματα με σπειροειδή περιέλιξη. Το γένος *Spirulina* αποτέλεσε για χρόνια σημείο αντιπαράθεσης μεταξύ των ταξινομών οι οποίοι βασιζόμενοι κυρίως σε μορφολογικά διαγνωστικά γνωρίσματα, επανειλημμένα αναθεώρησαν ταξινομικά το γένος. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση της πολυφασικής προσέγγισης στην ταξινόμηση των κυανοβακτηρίων η οποία συνδυάζει μορφολογικά, κυτταρολογικά, οικολογικά, βιοχημικά και φυλογενετικά γνωρίσματα οδήγησε στη ταξινομική τοποθέτηση των κυανοβακτηρίων με τριχώματα σπειροειδώς συνεστραμμένα σε δύο διακριτά γένη, τα *Arthrospira* και *Spirulina*. Για το λόγο αυτό πολλά είδη που ανήκαν στο γένος *Spirulina* όπως για παράδειγμα τα σημαντικά από οικονομικής απόψεως καλλιεργούμενα είδη *Spirulina maxima* και *Spirulina platensis*, ανήκουν με τη νέα ταξινομική προσέγγιση στο γένος *Arthrospira* και τα παραπάνω είδη μετονομάστηκαν σε *Arthrospira maxima* και *Arthrospira platensis*.

Τα κυριότερα διαγνωστικά γνωρίσματα για το διαχωρισμό των γενών *Arthrospira* και *Spirulina* είναι τα ακόλουθα: (1) πλάτος τριχώματος, (2) αρχιτεκτονική των σπειρών του τριχώματος, (3) ορατά (με οπτικό μικροσκόπιο) εγκάρσια τοιχώματα των κυττάρων του τριχώματος, (4) κατανομή των πόρων στα κυτταρικά τοιχώματα, (5) τρόπος κατάτμησης των τριχωμάτων, (6) παρουσία αεροτοπίων, (7) πλαγκτικός ή βενθικός

τρόπος ζωής, (8) μηχανισμός ανοξυγενούς φωτοσύνθεσης, (9) παρουσία γ-λινολενικού οξέος, (10) παρουσία C-φυκοερυθρίνης, (11) διαφορετική αλληλουχία των 16S rRNA γονιδίων. Χαρακτηριστικό είναι ότι ορισμένα από τα παραπάνω διαγνωστικά γνωρίσματα μεταβάλλονται σε συνθήκες καλλιέργειας (π.χ. απώλεια της σπειροειδούς δομής των τριχωμάτων), γεγονός που καθιστά την μοριακή προσέγγιση (αλληλούχιση 16S rRNA γονιδίων) πιο αντικειμενικό κριτήριο για την ορθή αναγνώριση των γενών.

Στοιχεία φυσιολογίας και καλλιέργειας

Τα κυανοβακτήρια *Arthrospira* και *Spirulina* είναι προκαρυωτικοί οργανισμοί που διεξάγουν οξυγενή (δηλ. παράγουν οξυγόνο) φωτοσύνθεση παρόμοια με αυτή των ευκαρυωτικών φυκών και ανώτερων φυτών. Οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν την αύξησή τους είναι η ηλιακή ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η αλατότητα, το pH, και η συγκέντρωση των θρεπτικών αλάτων. Στη φύση απαντώνται συνήθως σε αλκαλικές, εύτροφες και με υψηλή αλατότητα λίμνες. Η αύξησή τους ευνοείται σε υψηλές τιμές θερμοκρασίας.

Η γνώση της φυσιολογίας των κυανοβακτηρίων που καλλιεργούνται είναι απαραίτητη και αποτελεί, ίσως, την καλύτερη εγγύηση για τον επιτυχημένο και αποδοτικότερο σχεδιασμό του συστήματος καλλιέργειάς τους. Δεδομένου ότι τα κυανοβακτήρια πέραν της μορφολογίας τους εμφανίζουν και διαφορές στη θρέψη, στην ικανότητα χρησιμοποίησης της ηλιακής ενέργειας, στην ανεκτικότητα σε συνθήκες καταπόνησης (stress) καθώς και στη χημική σύσταση (η οποία εμφανίζει διακύμανση τόσο μεταξύ ειδών όσο και μέσα στο είδος όταν αυτό αναπτύσσεται σε διαφορετικές συνθήκες περιβάλλοντος), θα πρέπει ένα σύστημα καλλιέργειας να σχεδιάζεται έτσι ώστε να προσαρμόζεται στις απαιτήσεις του εκάστοτε οργανισμού που πρόκειται να καλλιεργηθεί, με στόχο την επίτευξη υψηλής παραγωγής ποιοτικής (από άποψη θρεπτικής αξίας) βιομάζας ενώ ταυτόχρονα να έχει χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας.

Τα κυριότερα εμπορικά είδη κυανοβακτηρίων που προορίζονται ως συμπληρώματα υγιεινής διατροφής είναι τα *Arthrospira maxima* και *Arthrospira platensis*. Σήμερα τα είδη αυτά καλλιεργούνται κυρίως σε υπαίθρια συστήματα αλλά και σε κλειστά συστήματα – φωτοβιοαντιδραστήρες. Ανάλογα με το σύστημα καλλιέργειας που

επιλέγεται υπάρχουν πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα. Το κύριο πλεονέκτημα στην τεχνολογία των υπαίθριων συστημάτων είναι το χαμηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας τους, ωστόσο μειονεκτούν λόγω του κινδύνου επιμόλυνσης της καλλιέργειας από άλλα ανταγωνιστικά κυανοβακτήρια ή άλλους μικροοργανισμούς (π.χ. μικροφύκη, μύκητες, βακτήρια και πρωτόζωα), γεγονός που υποβαθμίζει την ποιότητα της παραγόμενης βιομάζας. Ο φωτοβιοαντιδραστήρας αποτελεί ένα πιο προηγμένο σύστημα καλλιέργειας όπου οι συνθήκες αύξησης ελέγχονται, η παραγωγή βιομάζας είναι πολύ υψηλή, και δεν επιτρέπει ή περιορίζει σημαντικά, την άμεση ανταλλαγή αερίων και μολυσματικών παραγόντων (σκόνη, μικροοργανισμοί, κ.λπ.) μεταξύ της καλλιέργειας και του εξωτερικού περιβάλλοντος. Ως εκ τούτου, στους φωτοβιοαντιδραστήρες διασφαλίζεται η παραγωγή βιομάζας υψηλής θρεπτικής αξίας τόσο από ποιοτικής όσο και ποσοτικής απόψεως. Το κύριο μειονέκτημα αυτού του συστήματος είναι το υψηλό κόστος κατασκευής και λειτουργίας του. Πέραν των συστημάτων καλλιέργειας, συλλογή βιομάζας των *Arthrospira maxima* και *Arthrospira platensis* πραγματοποιείται και από φυσικές λίμνες. Στην περίπτωση αυτή υπάρχει υψηλός κίνδυνος για την ποιότητα των προϊόντων και την ασφάλεια των καταναλωτών διότι σε ένα φυσικό πληθυσμό συνυπάρχουν πολλοί και διαφορετικοί μικροοργανισμοί και ως εκ τούτου απαιτείται συχνή και ενδελεχής παρακολούθηση.

Οφέλη και παρενέργειες από την κατανάλωση κυανοβακτηρίων

Υπάρχει μία πληθώρα ερευνητικών εργασιών που μιλούν για οφέλη που προκύπτουν από την κατανάλωση *Arthrospira* ως συμπλήρωμα υγιεινής διατροφής. Διαιτητικά το κυανοβακτήριο *Arthrospira* χαρακτηρίζεται από υψηλή θρεπτική αξία διότι η περιεκτικότητά του σε πρωτεΐνες είναι υψηλή (έως και 65% της ξηρής βιομάζας), και επιπρόσθετα είναι πλούσιο σε πολυακόρεστα λιπαρά οξέα (π.χ. γ-λινολικό οξύ), φικοβιλιπρωτεΐνες (π.χ. C-φυκοκυανίνη), καροτενοειδή (π.χ. β-καροτένιο), βιταμίνες (κυρίως B₁₂) και μεταλλικά στοιχεία.

Τα τελευταία χρόνια το ενδιαφέρον πολλών ερευνητών εστιάζεται στη βιολογική δράση ορισμένων μεταβολιτών που παράγονται από το *Arthrospira* και από τα κυανοβακτήρια γενικότερα. Ενδεικτικά αναφέρεται η απομόνωση κυανοβακτηριακών βιοδραστικών ενώσεων με σκοπό την παραγωγή φαρμάκων με αντιμικροβιακή, αντική,

και αντινεοπλασματική δράση, καθώς επίσης και η χρήση κυανοβακτηριακών μεταβολιτών στην παραγωγή καλλυντικών.

Έντονη ανησυχία παρουσιάζει η διαπίστωση ότι ένας μεγάλος αριθμός ειδών κυανοβακτηρίων έχει την ικανότητα να παράγει τοξίνες ως προϊόντα του μεταβολισμού του (κυρίως ηπατοτοξίνες και νευροτοξίνες). Η έκθεση στα τοξικά κυανοβακτήρια μέσω της κατανάλωσης προϊόντων υγιεινής διατροφής αποτελεί κύρια ανησυχία για την υγεία του ανθρώπου όσον αφορά τόσο σε οξείες (τοξίνωση, θάνατος) όσο και σε χρόνιες επιπτώσεις (καρκινογένεση). Πρόσφατη έρευνα που έγινε σε κυανοβακτηριακά προϊόντα με το όνομα «Spirulina» που κυκλοφορούσαν στην ασιατική αγορά έδειξε ότι το 94% των σκευασμάτων περιείχαν κυανοβακτηριακές ηπατοτοξίνες, ενώ ένα θανατηφόρο επεισόδιο που έχει αναφερθεί και συνδέεται με την κατανάλωση «Spirulina», συνέβη στην Κρήτη. Ιδιαίτερης ανησυχίας είναι η συνεχής συσσώρευση δεδομένων που υποδεικνύουν ότι βιομάζα *Arthrospira* που παράγεται σε ανοικτά συστήματα ή συλλέγεται από φυσικά συστήματα περιέχει κυανοβακτηριακές τοξίνες. Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στην μόλυνση της καλλιέργειας από άλλα κυανοβακτήρια που παράγουν τοξίνες (π.χ. είδη του γένους *Microcystis*) και όχι στο ίδιο το *Arthrospira*, ωστόσο είδη *Arthrospira* έχουν ενοχοποιηθεί για το θάνατο πτηνών σε φυσικές λίμνες της Αφρικής.

Είναι γνωστό ότι σε ένα πληθυσμό κυανοβακτηρίων (είτε αυτός αναπτύσσεται σε ένα φυσικό σύστημα είτε καλλιεργείται σε συνθήκες καλλιέργειας) μπορεί να συνυπάρχουν τοξικά και μη τοξικά στελέχη και κάτω από ορισμένες συνθήκες να μεταβάλλεται η σύνθεση των τοξικών και μη τοξικών στελεχών μέσα στον πληθυσμό ή και να μεταβάλλεται η συγκέντρωση των τοξινών εντός του κυττάρου. Επίσης ένα κυανοβακτήριο μπορεί να παράγει ή όχι τοξίνες κάτω από ορισμένες συνθήκες. Η διάκριση ενός τοξικού από ένα μη τοξικό κυανοβακτήριο δεν μπορεί να γίνει με μικροσκοπική παρατήρηση αλλά μονάχα μετά από απομόνωσή του σε μονοκαλλιέργεια και την επακόλουθη χημική ή με βιοδοκιμές ανίχνευση της τοξίνης ή των τοξινών του. Ωστόσο, η επιβεβαίωση της «αθωότητας» ενός κυανοβακτηρίου αναφορικά με την παραγωγή τοξινών επέρχεται μόνον μετά από μοριακή ανάλυση και επιβεβαίωση της απουσίας των γονιδίων υπεύθυνων για την παραγωγή τοξινών. Οι παραπάνω διαπιστώσεις εγείρουν σημαντικά ερωτήματα σχετικά με την ποιότητα και ασφάλεια των

κυανοβακτηριακών προϊόντων και για το λόγο αυτό πολλές χώρες έχουν ήδη προχωρήσει στον τακτικό έλεγχο των κυανοτοξινών σε κυανοβακτηριακά προϊόντα υγιεινής διατροφής και έχουν υιοθετήσει ανώτατα όρια συγκέντρωσης για την ασφαλή κατανάλωσή τους.

Βιβλιογραφικές πηγές

- Ballot A, Krienitz L, Kotut K, Wiegand C and Metcalf JS (2004). Cyanobacteria and cyanobacterial toxins in three alkaline Rift Valley lakes of Kenya—Lakes Bogoria, Nakuru and Elmenteita. – *J. Plankton Res* 26: 925–935
- Becker EW (2003). *Microalgae. Biotechnology and Microbiology.* – Cambridge University Press.
- Castenholz RW (1989). Subsection III, Order Oscillatoriales. In: Staley JT, Bryant MP, Pfennig N and Holt JG (eds) *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Vol. 3. – Williams and Wilkins Co, Baltimore.
- Chorus I and Bartram J (1999). *Toxic Cyanobacteria in Water.* E. & F.N. Spon, London
- Cresswell RC, Rees TAV and Shah N (eds), (1989). *Algal and cyanobacterial biotechnology* – Longamn Scientific & Technical, England.
- Gantar M and Svircev Z (2008). Microalgae and cyanobacteria: Food for thought. – *J. Phycol.* 44: 260-268.
- Jiang Y, Xie P, Chen J and Liang G (2008). Detection of the hepatotoxic microcystins in 36 kinds of cyanobacteria *Spirulina* food products in China. – *Food Additives and Contaminants* 25: 885-894.
- Komárek J and Anagnostidis K (2005). Cyanoprocaryota. 2.Teil: Oscillatoriales. In: Budel B, Gartner G, Krienitz L. And Schagerl M. (eds). - Elsevier, Munchen.
- Lugomela C, Pratap HB and Mgay YD (2006). Cyanobacteria blooms—A possible cause of mass mortality of Lesser Flamingos in Lake Manyara and Lake Big Momela, Tanzania – *Harmful Algae* 5: 534–541
- Mazokopakis EE, Karefilakis, CM, Tsartsalis, AN, Milkas, AN and Ganotakis, ES (2008). Acute rhabdomyolysis caused by *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) – *Phytomedicine* 15: 525-527.
- Pulz O (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. – *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 57: 287-293.
- Richmond A (eds), (2004). *Handbook of microalgal culture. Biotechnology and applied phycology* – Blackwell Science.
- Whitton BA and Potts M (eds) (2000). *The ecology of Cyanobacteria. Their diversity in time and Space* – Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, London, Boston.