

Η δομή συναντά τη λειτουργία: η “Μολυβοτρανσφεράση”

Στέφανος Γιαγτζόγλου

Η σχέση αλληλεξάρτησης δομής-λειτουργίας αποτελεί βασικό θέμα της βιολογίας. Μια σημαντική εφαρμογή αυτής της σχέσης αποτελεί το πώς η τρισδιάστατη δομή των πρωτεϊνών συνδέεται με τους ρόλους που διαδραματίζουν σε επίπεδο κυττάρου. Ωστόσο, σε πολλά σχολικά εγχειρίδια εισαγωγικής προσέγγισης παρατηρείται το φαινόμενο να αντιμετωπίζεται το ζήτημα της πρωτεϊνικής δομής επιφανειακά, καθώς τα εγχειρίδια αυτά εστιάζουν στις σχέσεις μεταξύ πρωτοταγούς, δευτεροταγούς, τριτοταγούς, και τεταρτοταγούς δομής, χωρίς να αποσαφηνίζεται ο τρόπος με τον οποίο τα συγκεκριμένα επίπεδα οργάνωσης συμβάλλουν στη λειτουργικότητα του πρωτεϊνικού μορίου. Ως εκ τούτου, με τη συγκεκριμένη πρακτική δραστηριότητα επιχειρείται η ενίσχυση της σύνδεσης μεταξύ της τελικής τρισδιάστατης διαμόρφωσης ενός πρωτεϊνικού μορίου, και της εξειδικευμένης λειτουργίας που αυτό επιτελεί. Με τη διερεύνηση της δομής και της λειτουργίας μιας υποθετικής πρωτεΐνης, οι μαθητές αναπτύσσουν μια εννοιολογική κατανόηση του τρόπου με τον οποίο συνδέονται τα δύο αυτά σημαντικά στοιχεία στην καθημερινή ζωή (π.χ. οι ρόλοι των πρωτεϊνών *ακτίνη* και *μυοσίνη* στην μυϊκή σύσπαση, των *αντλιών πρωτονίων* στις κυτταρικές μετατροπές ενέργειας, ή των *ανοσοσφαιρινών* στην αντιμετώπιση των ξένων εισβολέων στον οργανισμό) (Chowning et al., 2012).

Ένταξη της πρακτικής δραστηριότητας στη διδασκαλία

Η πρακτική δραστηριότητα με τίτλο *“Η Δομή Συναντά την Λειτουργία: η “Μολυβοτρανσφεράση”*, έρχεται ως συνέχεια αυτής με τίτλο *“Μια επίδειξη της πρωτεϊνικής αναδίπλωσης”*, που παρουσιάστηκε εκτενώς σε προηγούμενο άρθρο αυτού του ηλεκτρονικού περιοδικού (White, 2006; Γιαγτζόγλου, 2016). Με την πρώτη πρακτική δραστηριότητα, οι μαθητές σχημάτισαν μια σαφή εικόνα της διεργασίας αναδίπλωσης του πρωτεϊνικού μορίου, και δεν περιορίστηκαν στο τελικό προϊόν που παρουσιάζουν τα διαγράμματα του σχολικού εγχειριδίου και τα λογισμικά μοριακής απεικόνισης. Υλοποιώντας τη δεύτερη πρακτική δραστηριότητα, οι μαθητές επιδιώκεται να ενισχύσουν τη σύνδεση μεταξύ της τελικής τρισδιάστατης διαμόρφωσης ενός πρωτεϊνικού μορίου και της

εξειδικευμένης λειτουργίας που αυτό επιτελεί. Για το σκοπό αυτό, πραγματοποιούν δραστηριότητες κιναισθητικού τύπου ώστε, αφενός να κατανοήσουν τις θεωρητικές έννοιες των αντίστοιχων υποενοτήτων του σχολικού εγχειριδίου (Καψάλης κ.α., 2012) που τους παρουσιάστηκαν με μετωπική διδασκαλία από τον εκπαιδευτικό, αφετέρου να διορθώσουν τις όποιες εσφαλμένες αντιλήψεις είχαν σχηματίσει είτε κατά τη διάρκεια της διάλεξης είτε από προηγούμενη εμπειρία τους στην πορεία της μαθητικής τους διαδρομής.

Κάθε ομάδα μαθητών λαμβάνει ένα φύλλο δραστηριοτήτων (ΦΔ) (https://www.dropbox.com/s/7xzuxfjm3buvn19/Pencil_%CE%A4ransferase_odigos_ws.pdf?dl=0)

που περιλαμβάνει: (α) αναλυτικές οδηγίες που αφορούν στο κατασκευαστικό μέρος της εργαστηριακής άσκησης, (β) ερωτήσεις σύντομης ανάπτυξης, και (γ) άσκηση ανακεφαλαίωσης. Το ΦΔ έχει δομηθεί με βάση τη θεωρία της καθοδηγούμενης ανακάλυψης (Hughes & Ellefson, 2013) σε ένα ενεργό, συμμετοχικό και συνεργατικό περιβάλλον μάθησης (Fernández-Santander, 2008). Οι γραπτές οδηγίες, σε συνδυασμό με την καθοδήγηση του εκπαιδευτικού, αρκούν, ώστε να πραγματοποιήσουν οι μαθητές τη δραστηριότητα επιτυχώς.

Τα σύρματα πίπας (pipe cleaners) στη μοντελοποίηση της πρωτεϊνικής δομής

Σύμφωνα με τον Hestenes (1995), τα μοντέλα και οι σχετικές με αυτά διαδικασίες έχουν, μεταξύ άλλων, τη δυνατότητα να βοηθήσουν τους μαθητές στην κατανόηση του φυσικού κόσμου μέσα από την περιγραφή, την ερμηνεία ή την πρόβλεψη των φυσικών φαινομένων. Τα *σύρματα πίπας* (pipe cleaners) χρησιμοποιούνται συχνά στη διδακτική πράξη για την παρουσίαση της δομής των πρωτεϊνών (Nelson & Goetze, 2004). Πρόκειται για ένα υλικό που διατίθεται σε καταστήματα παιχνιδιών ή βιβλιοχαρτοπωλεία σε συσκευασίες πολλών τεμαχίων ενός ή διαφορετικών χρωμάτων, και σε ιδιαίτερα χαμηλό κόστος (π.χ. <http://www.tetragonobookstores.gr/category/scholika/zografiki-chirotechnia/ilika-chirotechnias/sirma-pipas/>).

Γενική περιγραφή της δραστηριότητας

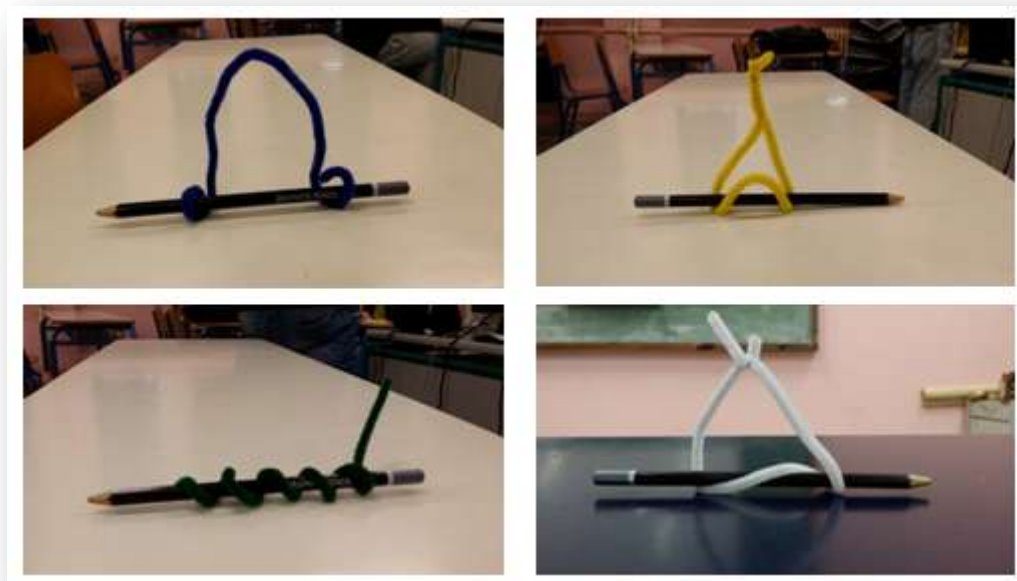
Η δραστηριότητα αυτή έρχεται να προσθέσει τη σημαντική διάσταση της συσχέτισης της δομής με τη λειτουργία της πρωτεΐνης, και παρουσιάζει προαιρετικές επεκτάσεις που αφορούν στη διερεύνηση των δυναμικών επιπτώσεων των μεταλλάξεων επί της δομής, άρα και της λειτουργίας, του πρωτεϊνικού μορίου. Οι μαθητές καλούνται να επιλύσουν το εξής πρόβλημα: χρησιμοποιώντας ένα σύρμα πίπας, πρέπει να μεταφέρουν ένα μολύβι από το θρανίο πάνω στο οποίο βρίσκεται, σε ένα άλλο. Στην προσπάθειά τους αυτή, επιτρέπεται η κάμψη του σύρματος, όπως άλλωστε επιβάλλεται να κάνουν, αλλά δεν μπορούν να αγγίξουν το μολύβι με τα χέρια τους κατά την μεταφορά του μεταξύ των θρανίων. Μετά την επιτυχή μεταφορά του μολυβιού, οι μαθητές θα πρέπει να διατηρήσουν το συγκεκριμένο σχήμα του σύρματος, που τους επέτρεψε να την υλοποιήσουν. Τέλος, οι μαθητές

παρουσιάζουν τις δημιουργίες τους, ώστε να είναι δυνατές οι συγκρίσεις όλων των κατασκευών από την ολομέλεια της τάξης (Chowning et al., 2012).

Αποτελέσματα

Η συγκεκριμένη εργαστηριακή δραστηριότητα διήρκεσε μία διδακτική ώρα και πραγματοποιήθηκε από τέσσερις ομάδες των τεσσάρων μαθητών. Οι ομάδες αξιολογήθηκαν ως προς: (α) την ορθότητα της κατασκευής της ζητούμενης πρωτεϊνικής δομής (60% συμμετοχή στην τελική βαθμολογία), (β) την ορθότητα και την πληρότητα των απαντήσεων στις ερωτήσεις σύντομης ανάπτυξης του ΦΔ (30% συμμετοχή στην τελική βαθμολογία), και (γ) την ορθότητα του προσδιορισμού της πρωτεϊνικής δομής σε συγκεκριμένα παραδείγματα διδακτικών αναλόγων (10% συμμετοχή στην τελική βαθμολογία).

Οι Ερωτήσεις 1,8 – 11 του ΦΔ αφορούσαν στην κατασκευή των πρωτεϊνικών δομών. Ως προς το μέρος αυτό της εργαστηριακής δραστηριότητας, όλες οι ομάδες απέδωσαν ικανοποιητικά. Ακολουθώντας τις γραπτές οδηγίες που τους δόθηκαν, χρησιμοποίησαν σύρματα πίπας για να προσομοιώσουν την μορφή, άρα και λειτουργία ενός υποθετικού ενζύμου, της *μολυβοτρανσφεράσης*, μέσα από δύο διαφορετικές κατασκευές που, στη συνέχεια, απέδωσαν σχηματικά στα αντίστοιχα πεδία της Ερώτησης 1 του ΦΔ (Σχήμα 1).



Σχήμα 1. Παραδείγματα μοντέλων της μολυβοτρανσφεράσης που κατασκεύασαν διαφορετικές ομάδες.

Στις Ερωτήσεις 8, 9 όλες οι ομάδες προσομοίωσαν τις βασικές δευτεροταγείς δομές (α -έλικα, β -πτυχωτή επιφάνεια), χρησιμοποιώντας κατάλληλα τα επιπλέον σύρματα πίπας που τους δόθηκαν. Συνδυάζοντας τις δευτεροταγείς δομές της α -έλικας και β -πτυχωτής επιφάνειας, όλες οι ομάδες κατόρθωσαν να προσομοιώσουν την *τριτοταγή δομή*, κάνοντας χρήση ενός ξεχωριστού πέμπτου σύρματος πίπας (Ερώτηση 10). Οι ομάδες ζήτησαν επιπλέον σύρματα προκειμένου να

προσομοιώνουν την τεταρτοταγή δομή, που αποτελούσε ζητούμενο της Ερώτησης 11 του ΦΔ (Σχήμα 2).



Σχήμα 2. Παραδείγματα μοντέλων της τεταρτοταγούς δομής που κατασκεύασαν διαφορετικές ομάδες.

Η εξέταση των απαντήσεων των ομάδων στις Ερωτήσεις 2 – 7 του ΦΔ οδήγησε σε ορισμένα ενδιαφέροντα ευρήματα. Στην Ερώτηση 2, όλες οι ομάδες επισήμαναν τη σχετική ομοιότητα των κατασκευών τους, την οποία συσχέτισαν με το λειτουργικό τους ρόλο που αφορούσε στη μεταφορά του μολυβιού από το ένα θρανίο στο άλλο (Ερώτηση 3). Πράγματι, παρατηρήθηκαν παρόμοιες κατασκευές, με μονή, διπλή ή πολλαπλή θηλιά στη μέση, και από μια λαβή σε κάθε άκρο (Σχήμα 1). Επιπλέον, μια ομάδα εξήρε τη σταθερότητα της εν λόγω δομής στην αποτελεσματική επιτέλεση του έργου για το οποίο προοριζόταν, ενώ μια άλλη ομάδα έγραψε χαρακτηριστικά: *“because that’s how it works”*. Είναι ενδιαφέρον το γεγονός ότι όλες οι ομάδες θεώρησαν ότι οι προσομοιώσεις του ενζύμου που κατασκεύασαν ανήκουν στη δευτεροταγή ή τριτοταγή δομή, ανάλογα με το αν η κατασκευή τους φέρει κάποια από τις γνωστές βασικές δευτεροταγείς δομές (α -έλικα, β -πτυχωτή επιφάνεια) ή κάποιο συνδυασμό τους ή, τέλος, κάποιο σχήμα που διαφοροποιείται σε σχέση με τα όσα γνώριζαν για τη δευτεροταγή δομή σύμφωνα με το σχολικό εγχειρίδιο (Ερώτηση 4). Στην Ερώτηση 5, οι ομάδες καλούνταν να προσδιορίσουν την περιοχή ή τις περιοχές εκείνες του ενζύμου, που θεωρούσαν σημαντικές για τη λειτουργία της προσομοίωσης του ενζύμου τους. Όλες οι ομάδες ανέφεραν τις *πρότυπες περιοχές (domains)*, χρησιμοποιώντας όρους, όπως: *θηλιά, λαβές, γατζάκια*, ή εκφράσεις, όπως: *σημεία αλληλεπίδρασης του μολυβιού με το σύρμα, περιοχές του σύρματος που περικλείουν το μολύβι, σημεία της κατασκευής όπου μπαίνει το μολύβι κ.ά.* Μάλιστα, συσχέτισαν τις παραπάνω περιοχές της κατασκευής τους με το ενεργό κέντρο του ενζύμου, υποστηρίζοντας ότι αυτό συνιστά τη λειτουργική περιοχή του πρωτεϊνικού μορίου. Κατονόμασαν παράγοντες, όπως: *μεταλλάξεις, ακραίες τιμές pH ή θερμοκρασίας, αναστολείς*, ως τρόπους με τους οποίους η λειτουργική περιοχή ενός ενζύμου θα μπορούσε να καταστεί μη-λειτουργική (Ερώτηση 6). Συσχέτισαν την απλότητα της κατασκευής τους με την ελάχιστη ενέργεια διατήρησης της εν λόγω δομής, άρα με την αυξημένη πιθανότητα εμφάνισής της στη φύση (Ερώτηση 7).

Η Ερώτηση 12 λειτούργησε ανακεφαλαιωτικά, καλώντας τους μαθητές να προσδιορίσουν τα επίπεδα οργάνωσης των πρωτεϊνικών μορίων που προσομοιώνονται από συγκεκριμένα διδακτικά ανάλογα που τους δίνονται ως παραδείγματα (π.χ. παράδειγμα: αμορτισέρ αυτοκινήτου / δομή: α-έλικα, δευτεροταγής). Και σε αυτήν την περίπτωση η πλειοψηφία των ομάδων ανταποκρίθηκε ικανοποιητικά, αναγνωρίζοντας τα επίπεδα οργάνωσης των πρωτεϊνών. Μια ομάδα δυσκολεύτηκε να το κάνει αυτό στο παράδειγμα που αφορούσε στους σχηματισμούς κορδέλας κατά την εκτέλεση κινήσεων από αθλήτρια της ενόργανης γυμναστικής, ενώ όλες οι άλλες θεώρησαν ότι επρόκειτο για περίπτωση προσομοίωσης της τριτοταγούς δομής.

Συμπεράσματα

Η συγκεκριμένη πρακτική δραστηριότητα, έρχεται ως συνέχεια αυτής με τίτλο *“Μια επίδειξη της πρωτεϊνικής αναδίπλωσης”*, που παρουσιάστηκε εκτενώς σε προηγούμενο άρθρο αυτού του ηλεκτρονικού περιοδικού (White, 2006; Γιαγτζόγλου, 2016). Ο White (2006), καθηγητής στο Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης και δημιουργός της δραστηριότητας, ζήτησε από ένα ακροατήριο 200 και πλέον φοιτητών να χρησιμοποιήσουν ένα κομμάτι σύρματος για την προσομοίωση μιας μικρής πολυπεπτιδικής αλυσίδας, επιδιώκοντας να παρουσιάσει τις βασικές αρχές που αφορούν στην αναδίπλωση των πρωτεϊνών. Με τον τρόπο αυτό, η δεύτερη πρακτική δραστηριότητα έρχεται να ενισχύσει την σύνδεση μεταξύ της τελικής τρισδιάστατης διαμόρφωσης ενός πρωτεϊνικού μορίου και της εξειδικευμένης λειτουργίας που αυτό επιτελεί.

Σε γενικές γραμμές, τα παραπάνω αποτελέσματα φαίνεται να συμφωνούν με τα βιβλιογραφικά δεδομένα. Οι Chowning et al. (2012) χρησιμοποίησαν τη δραστηριότητα αυτή ως εισαγωγική προσέγγιση για την παρουσίαση κάποιου λογισμικού μοριακής οπτικοποίησης, που συνιστά χρήσιμο εργαλείο της βιοπληροφορικής στη μελέτη και βαθύτερη κατανόηση της τρισδιάστατης δομής των πρωτεϊνών. Το μοντέλο φάνηκε να ενισχύει την άποψη των μαθητών πως το σχήμα της πρωτεΐνης είναι άρρηκτα συνδεδεμένο με την κυτταρική της λειτουργία. Ρωτώντας τους μαθητές: *«Γιατί πιστεύετε ότι αρκετές από τις κατασκευές που φτιάξατε έχουν παρόμοια σχήματα;»*, οι μαθητές αναγνώρισαν ότι το σχήμα της πρωτεΐνης ανταποκρίνεται στην λειτουργία που αυτή επιτελεί (Σχήμα 3).

Τα παραπάνω αποτελέσματα, αν και προερχόμενα από ένα μικρό δείγμα μαθητών, δείχνουν ότι πρόκειται για μια σχετικά επιτυχημένη δραστηριότητα. Στην πλειοψηφία τους, οι μαθητές κατασκεύασαν μια πρωτεΐνη, τη *μολυβοτρανσφεράση* – ένα ένζυμο, του οποίου η λειτουργία είναι να μεταφέρει ένα μολύβι. Η ποικιλία των λύσεων στο συγκεκριμένο πρόβλημα αποκάλυψε κάποιες σταθερές λειτουργικές περιοχές. Για παράδειγμα, οι μαθητές παρατήρησαν ότι κάθε πρωτεΐνη διαθέτει μια “περιοχή πρόσδεσης” (συνήθως μία ή περισσότερες θηλιές) του μολυβιού. Η παρατήρηση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εισαχθεί η έννοια της “πρότυπης περιοχής” (domain): οι πρότυπες περιοχές μιας πρωτεΐνης αναγνωρίζονται από τις ιδιότητες αναδίπλωσής τους, τη συμπαγή

δομή, την εξελικτική προέλευση, και/ή την λειτουργία τους (Karlson et al., 1998; Μαρμάρας, 2005). Στη δραστηριότητα αυτή, έμφαση δόθηκε στο λειτουργικό ορισμό της πρότυπης περιοχής. Επομένως, η περιοχή της θηλιάς μπορεί να αναφέρεται ως “περιοχή πρόσδεσης του μολυβιού” (pencil binding domain), ενώ η περιοχή(-ές) του σύρματος πίπας που κρατάει με τα χέρια του ο μαθητής (με την οποία(-ες) η πρωτεΐνη «συνδέεται» στα χέρια του μαθητή) μπορεί να αναφέρεται ως “περιοχή(-ές) λαβής” (handle domain(s)). Οι μαθητές προσδιόρισαν το πλήθος των πρωτεϊνών που παρουσιάζουν καμία, μία, δύο ή περισσότερες περιοχές πρόσδεσης του μολυβιού ή περιοχές λαβής, που παρατηρήθηκαν σε όλες τις πρωτεΐνες που κατασκεύασαν (Chowning et al., 2012).

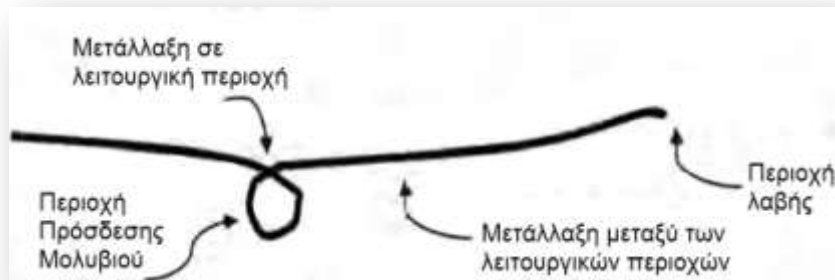


Σχήμα 3. Παραδείγματα μοντέλων του ενζύμου μολυβοτρανσφεράση (Chowning et al, 2012).

Οι Chowning et al. (2012) υποστηρίζουν ότι το παραπάνω μοντέλο προσφέρει στον εκπαιδευτικό πολλές ευκαιρίες για να συζητήσει με τους μαθητές συγκεκριμένες πτυχές της πρωτεϊνικής δομής, όπως είναι ο τρόπος με τον οποίο η αλληλεπίδραση απομακρυσμένων τμημάτων της γραμμικής αμινοξικής αλληλουχίας, ή αλλιώς της *πρωτοταγούς δομής* (που αντιπροσωπεύεται από το ισιωμένο σύρμα πίπας) οδηγεί στο σχηματισμό λειτουργικών περιοχών της πρωτεΐνης. Μερικοί μαθητές θα μπορούσαν να δημιουργήσουν περιοχές πρόσδεσης του μολυβιού με πολλές θηλιές – κάτι που θα μπορούσε να θεωρηθεί ως ανάλογο της *δευτεροταγούς δομής* της *α-έλικας* (Σχήμα 1, κάτω αριστερά). Η συνολική κατασκευή (συμπεριλαμβανομένων τόσο των περιοχών πρόσδεσης του μολυβιού όσο και των περιοχών λαβής) μπορεί να θεωρηθεί ως ανάλογο της *τριτοταγούς δομής* (Σχήμα 1, πάνω δεξιά). Προκειμένου να μοντελοποιήσουμε την *τεταρτοταγή δομή*, μπορούμε να ενώσουμε πολλές μολυβοτρανσφεράσες για να δείξουμε τον τύπο της πρωτεΐνης, που αποτελείται από πολλές πολυπεπτιδικές αλυσίδες, της οποίας η λειτουργία είναι να προσδένει και να μεταφέρει πολλά μολύβια (Σχήμα 2).

Επιπλέον, το μοντέλο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να ερμηνεύσει τη διαφορική επίδραση των μεταλλάξεων σε περιοχές της πρωτεΐνης, που είναι καθοριστικής σημασίας για τη λειτουργία της

(περιοχές πρόσδεσης) έναντι άλλων περιοχών. Για παράδειγμα, μια μετάλλαξη υποκατάστασης (στην οποία ένα αμινοξύ αντικαθίσταται από ένα άλλο) μπορεί να μην έχει βλαπτική επίδραση, εάν δεν επιφέρει αλλαγές στην αμινοξική αλληλουχία, εάν αντικαθιστά ένα αμινοξύ με κάποιο άλλο που έχει παρόμοιες με το προηγούμενο χημικές ιδιότητες, ή εάν συμβαίνει μεταξύ των λειτουργικών περιοχών του πρωτεϊνικού μορίου (Chowning et al., 2012) (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Το μοντέλο της μολυβοτρανσφεράσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να δείξει τις επιπτώσεις των μεταλλάξεων στην πρωτεϊνική δομή (Chowning et al., 2012).

Ωστόσο, μια μετάλλαξη υποκατάστασης σε ένα σημείο καθοριστικής σημασίας στη λειτουργική περιοχή, όπως εκεί όπου τα αμινοξέα συνδέονται για να σχηματίσουν τη θηλιά πρόσδεσης, μπορεί να καταστρέψει την τρισδιάστατη δομή της πρωτεΐνης, με αποτέλεσμα την απώλεια της λειτουργικότητάς της. Μια μετάλλαξη προσθήκης ή έλλειψης θα μπορούσε να έχει εξίσου δραματικές επιπτώσεις, ακόμη και αν συνέβαινε σε ένα σημείο που βρίσκεται μακριά από τη λειτουργική περιοχή, ιδιαίτερα εάν η προσθήκη ή η έλλειψη οδηγεί σε αλλαγή του πλαισίου ανάγνωσης του γονιδίου κατά τη μετάφραση, εξέλιξη που μπορεί επίσης να καταστρέψει την δομή του πρωτεϊνικού μορίου (Chowning et al., 2012).

Τόσο η πρώτη (White, 2006; Γιαγτζόγλου, 2016) όσο και η δεύτερη πρακτική δραστηριότητα (Chowning et al., 2012) παρουσιάζουν ως βασικό πλεονέκτημα το γεγονός ότι μπορούν εύκολα να πραγματοποιηθούν από όλους τους σπουδαστές ενός μεγάλου ακροατηρίου, πολλώ δε μάλλον από το πεπερασμένο πλήθος των μαθητών μιας τάξης. Με τον τρόπο αυτό, οι τελευταίοι είναι σε θέση να σχηματίσουν μια σαφή εικόνα της διεργασίας αναδίπλωσης του πρωτεϊνικού μορίου, και δεν στηρίζονται στο τελικό προϊόν που παρουσιάζουν τα διαγράμματα του σχολικού εγχειριδίου και τα λογισμικά μοριακής οπτικοποίησης. Επιπλέον, και οι δύο δραστηριότητες αποτελούν σημείο αναφοράς για μετέπειτα διαλέξεις. Στο εξής, ο εκπαιδευτικός μπορεί να επικαλείται τα μοντέλα της πρωτεϊνικής δομής με τη βοήθεια του σύρματος πίπας, κάθε φορά που προτίθεται να μιλήσει για ζητήματα που αφορούν στα επίπεδα οργάνωσης των πρωτεϊνικών μορίων.

Ωστόσο, λόγω του μικρού δείγματος που χρησιμοποιήθηκε, είναι σημαντικό να υλοποιηθεί η δραστηριότητα σε μεγαλύτερο δείγμα μαθητών, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα που

αφορούν στην ακριβή αποτίμηση του παιδαγωγικού-διδακτικού οφέλους της δραστηριότητας στην επίτευξη των μαθησιακών στόχων σε μαθητές της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, στόχους τους οποίους οι Chowning et al. (2012) αξιώνουν ότι η δραστηριότητα αυτή πραγματώνει.

Ολοκληρώνοντας, τόσο ο εκπαιδευτικός όσο και ο μαθητής πρέπει να έχουν διαρκώς κατά νου αφενός ότι η συγκεκριμένη δραστηριότητα σχεδιάστηκε προκειμένου να απεικονίσει προσεγγιστικά τα επίπεδα οργάνωσης των πρωτεϊνών, αποτελώντας σημείο αναφοράς για περαιτέρω επεξεργασία, αφετέρου ότι, σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί ολοκληρωμένη παρουσίαση της πρωτεϊνικής δομής. Με τα προηγούμενα υπόψη, η εν λόγω δραστηριότητα μπορεί να λειτουργήσει ως αποτελεσματικό εργαλείο για την εισαγωγή στην πρωτεϊνική αναδίπλωση και τη σχέση δομής-λειτουργίας στα πρωτεϊνικά μόρια.

Αναφορές

- Chowning, J., Kovarik, D., & Griswold, J. (2012). Modeling Protein Structure & Function: Pencil Transferase. *The American Biology Teacher*, 74 (8), 581-582.
- Fernández-Santander, A. (2008). Cooperative learning combined with short periods of lecturing: A good alternative in teaching biochemistry. *Biochem Mol Biol Educ*, 36 (1), 34-8.
- Hestenes, D. (1995). Modelling software for learning and doing physics. In C. Bernardini, *Thinking physics for teaching*. New York: Plenum Press.
- Hughes, P., & Ellefson, M. (2013). Inquiry-based training improves teaching effectiveness of biology teaching assistants. *PLoS ONE*, 8 (10), p. e78540.
- Karlson, P., Doenecke, D., & Koolman, J. (1998). Αμινοξέα-Πεπτίδια-Πρωτεΐνες. Στο *Βιοχημεία* (14η ed., 23-58). Αθήνα: Ιατρικές εκδόσεις Λίτσας.
- Nelson, A., & Goetze, J. (2004). Modeling protein folding and applying it to a relevant activity. *Am Biol Teach*, 66, 287-289.
- White, B. (2006). A simple and effective protein folding activity suitable for large lectures. *CBE Life Sci Educ*, 5 (3), 264-9.
- Γιαγτζόγλου, Σ. (2016). Μια επίδειξη της αναδίπλωσης των πρωτεϊνών. *Διδάσκοντας Φυσικές Επιστήμες*, 11, 65-73 <http://physcool.web.auth.gr/>
- Καψάλης, Α., Μπουρμπουχάκης, Ι., Περάκη, Β., & Σαλαμαστράκης, Σ. (2012). *Βιολογία Β' τάξης Γενικού Λυκείου Γενικής Παιδείας*. Αθήνα: ΙΤΥΕ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ».
- Μαρμάρας, Β. (2005). *Πρωτεΐνες*. Πάτρα: Εκδόσεις ΕΑΠ.



Ο Στέφανος Γιαγτζόγλου έχει σπουδάσει Βιολογία στο Πανεπιστήμιο Αθηνών και ολοκληρώνει φέτος τις σπουδές του στο πρόγραμμα «Μεταπτυχιακής Ειδίκευσης Καθηγητών των Φυσικών Επιστημών» του ΕΑΠ. Από το 2007 εργάζεται στη Μέση Εκπαίδευση και από το 2012 είναι εκπαιδευτικός στο ΓΕΛ Ν. Χαλκηδόνας. Τα ερευνητικά του ενδιαφέροντα σχετίζονται με την διεπιστημονική προσέγγιση φαινομένων των Φυσικών Επιστημών και την διδασκαλία εννοιών των βιοεπιστημών μέσα από την συνδυασμένη χρήση καινοτόμων παιδαγωγικών προσεγγίσεων και ψηφιακών εργαλείων.