

Μια επίδειξη της αναδίπλωσης των πρωτεϊνών

Στέφανος Γιαγτζόγλου

Η κατανόηση των βασικών αρχών που διέπουν την αναδίπλωση των πρωτεϊνών αποτελεί σημαντικό μέρος των περισσότερων μαθημάτων Βιολογίας και Βιοχημείας εισαγωγικού επιπέδου, κατά την διάρκεια των προπτυχιακών σπουδών. Πιο συγκεκριμένα, οι σπουδαστές πρέπει να κατανοήσουν τρεις βασικές έννοιες: (1) Μια πρωτεΐνη συντίθεται ως γραμμική αλυσίδα αμινοξέων, που στη συνέχεια αναδιπλώνεται σχηματίζοντας μια τρισδιάστατη δομή. (2) Η διεργασία αναδίπλωσης κατευθύνεται τόσο από μη ομοιοπολικές αλληλεπιδράσεις (δεσμοί υδρογόνου, ηλεκτροστατικές αλληλεπιδράσεις, δυνάμεις Van der Waals, και υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις), όσο και από ομοιοπολικές αλληλεπιδράσεις (π.χ. δισουλφιδικοί δεσμοί), που πραγματοποιούνται μεταξύ διαφορετικών τμημάτων της πολυπεπτιδικής αλυσίδας. (3) Το τελικό σχήμα αναδίπλωσης του πρωτεϊνικού μορίου καθορίζεται από την αμινοξική αλληλουχία (White, 2006). Δεδομένου ότι οι παραπάνω έννοιες εμπλέκουν περίπλοκες τρισδιάστατες δομές μορίων, η δισδιάστατη παρουσίασή τους με την χρήση του πίνακα και του σχολικού εγχειριδίου (Καψάλης κ.ά., 2012) δεν είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική. Στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί μια απλή hands-on δραστηριότητα διάρκειας μίας διδακτικής ώρας, στην οποία μαθητές της Β' Λυκείου χρησιμοποιούν ένα κομμάτι σύρματος για την προσομοίωση μιας ολιγοπεπτιδικής αλυσίδας και την διερεύνηση των βασικών αρχών που διέπουν την αναδίπλωσή της.

Ο ρόλος των hands-on δραστηριοτήτων στη διδασκαλία των πρωτεϊνών

Η έρευνα σχετικά με την αποτελεσματικότητα της hands-on μοντελοποίησης των χημικών και βιολογικών δομών έχει δείξει ενθαρρυντικά αποτελέσματα. Σε αρκετές μελέτες (Howe & Durr, 1982; Corpolo & Hounshell, 1995; Barnea & Dori, 1999), η χρησιμοποίηση φυσικών μοντέλων απλών χημικών δομών σε συνδυασμό με άλλες καινοτόμες διδακτικές προσεγγίσεις ενίσχυσε την μαθησιακή διαδικασία, σε σύγκριση με τα συμβατικά αναλυτικά προγράμματα σπουδών. Οι Gabel & Sherwood (1980) έδειξαν ότι ένα αναλυτικό πρόγραμμα Χημείας βασισμένο στην χρησιμοποίηση μοντέλων, διάρκειας ενός έτους, παρουσίασε βελτιωμένα μαθησιακά αποτελέσματα, συγκρινόμενο με την

παραδοσιακή διδασκαλία. Οι Roberts και συν. (2005) έδειξαν πως, όταν φυσικά μοντέλα συνδυαστούν με κάποιο λογισμικό μοριακής οπτικοποίησης, οι σπουδαστές λαμβάνουν σημαντική βοήθεια στην προσπάθειά τους να μάθουν για την δομή των πρωτεϊνών. Στη συγκεκριμένη μελέτη, οι σπουδαστές ανέφεραν ότι η hands-on μοντελοποίηση πλήρως αναδιπλωμένων πρωτεϊνών αποτέλεσε το πιο υποβοηθητικό μέσο για την διδασκαλία αυτών των εννοιών. Τα αποτελέσματα αυτά δείχνουν ότι η χρησιμοποίηση hands-on δραστηριοτήτων κατά την διδασκαλία των πρωτεϊνών θα μπορούσε να είναι ιδιαίτερα εποικοδομητική (White, 2006).

Σύμφωνα με τους Herman και συν. (2006), η διδασκαλία της δομής των πρωτεϊνών καθίσταται πιο αποτελεσματική, όταν αρχικά οι πρωτεΐνες εισάγονται με την χρησιμοποίηση φυσικών μοντέλων, και ακολουθεί επεξεργασία και γενίκευση της εμπειρίας αυτής με την συνεργιστική χρήση διαδραστικών εικόνων στον υπολογιστή. Οι Goldstone & Son (2005) διερεύνησαν την τεχνική αυτή σε 84 φοιτητές του Πανεπιστημίου της Ιντιάνα. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκε μια δισδιάστατη προσομοίωση με ρεαλιστικές εικόνες. Σε μεταγενέστερη προσομοίωση βασισμένη στις ίδιες αρχές λειτουργίας, οι ρεαλιστικές εικόνες αντικαταστάθηκαν με πιο αφηρημένα γεωμετρικά σχήματα. Οι ερευνητές διαπίστωσαν ότι η εισαγωγή της προσομοίωσης με τον παραπάνω τρόπο (πρώτα οι ρεαλιστικές εικόνες και έπειτα τα αφηρημένα σχήματα), θα μπορούσε να οδηγήσει σε καλύτερη μεταφορά της κατανόησης της διαδικασίας προσομοίωσης σε μια καινούρια κατάσταση. Αυτός ο τύπος μάθησης ξεπέρασε όλες τις άλλες πιθανές παραλλαγές: την συνεπή χρησιμοποίηση μιας ρεαλιστικής εικόνας, την αποκλειστική χρησιμοποίηση μιας αφηρημένης εικόνας, ή την αντίστροφη παρουσίαση των εικόνων (πρώτα την αφηρημένη και έπειτα την ρεαλιστική).

Οι Jiun-Liang Ke και συν. (2005) έγραψαν: «Για κάποιους μελετητές ... οι αισθητηριο-κινητικές εμπειρίες αποτελούν την καρδιά της σκέψης μας» [Αναφ. 6., σ. 1590]. Η δύναμη των αισθητηριο-κινητικών εμπειριών στην κινητοποίηση των σπουδαστών να θέτουν ερωτήματα, καταδείχθηκε από ένα πείραμα που πραγματοποίησαν οι Jones και συν. (2006). Οι σπουδαστές που είχαν την ευκαιρία να «αγγίξουν» ιούς χρησιμοποιώντας ένα ευαίσθητο στην πίεση χειριστήριο παιχνιδιών, ενδιαφέρονταν περισσότερο να βιώσουν την εμπειρία, συγκριτικά με εκείνους που χρησιμοποίησαν ένα συμβατικό ποντίκι για τον σκοπό αυτό. Η πιο αυθεντική εμπειρία αφής παρήγαγε σημαντικά πλουσιότερες περιγραφές των χαρακτηριστικών των ιών, περισσότερες ερωτήσεις σχετικά με τους ιούς, και την χρησιμοποίηση περισσότερων αναλογιών για την περιγραφή τους. Το παραπάνω εύρημα βρίσκεται σε συμφωνία με την διαπίστωση ότι, τα μοντέλα των πρωτεϊνών λειτουργούν ως «εργαλεία σκέψης» που ενθαρρύνουν την συζήτηση, γιατί αφενός το ίδιο το μοντέλο παρέχει ενόραση σε θέματα χώρου, κινητοποιώντας τους συμμετέχοντες να θέσουν ερωτήματα, αφετέρου οι συμμετέχοντες μπορούν να διατυπώσουν με σαφήνεια τις ερωτήσεις τους σε σχέση με το μοντέλο (Herman et al., 2006).

Η μοντελοποίηση στην επίδειξη της πρωτεϊνικής αναδίπλωσης

Μέχρι τώρα έχουν αναπτυχθεί αρκετές hands-on δραστηριότητες αναδίπλωσης των πρωτεϊνών. Ο Eric Martz συνιστά την χρήση *Toobers* – σύρματα μεγάλου μήκους τυλιγμένα σε αφρολέξ – για την προσομοίωση της πρωτεϊνικής αναδίπλωσης (<http://www.umass.edu/molvis/toobers/>). Άλλοι ερευνητές έχουν αναπτύξει μια σειρά άκρως ρεαλιστικών δραστηριοτήτων χρησιμοποιώντας *Toobers*, που φέρουν μαγνητικές πλευρικές αλυσίδες (<http://www.3dmoleculardesigns.com/3DMD.htm>). Ωστόσο, το κόστος ενός τέτοιου kit είναι απαγορευτικό, όταν πρέπει να δοθεί σε κάθε μαθητή, προκειμένου να μπορέσει να εργαστεί αποτελεσματικά. Οι Nelson & Goetze (2004) ανέπτυξαν μια κομψή μέθοδο επίδειξης της πρωτεϊνικής αναδίπλωσης, που χρησιμοποιεί *σύρματα πίπας (pipe cleaners)* για την προσομοίωση της πολυπεπτιδικής αλυσίδας. Ωστόσο, η διανομή των υλικών που απαιτούνται για την δραστηριότητα αυτή (σύρματα πίπας, σελοτέιπ, κλιπ), καθώς επίσης και η συναρμολόγηση των συρμάτων πίπας, αποτελεί αρκετά χρονοβόρα διαδικασία. Δεδομένων των παραπάνω περιορισμών, στην παρούσα εργασία θα παρουσιαστεί μια απλή hands-on δραστηριότητα, στην οποία χρησιμοποιείται ένα κομμάτι σύρματος (μονόκλωνο) μήκους 1m και διαμέτρου 0,8mm για την προσομοίωση μιας μικρής πολυπεπτιδικής αλυσίδας. Το σύρμα διατίθεται σε καταστήματα πώλησης ηλεκτρολογικού εξοπλισμού, σε χαμηλό κόστος (περίπου 0,10 ευρώ το μέτρο).

Ένταξη της hands-on δραστηριότητας στη διδασκαλία

Σύμφωνα με τον White (2006), η δραστηριότητα αυτή μπορεί να πραγματοποιηθεί κατά την διάρκεια της πρώτης διάλεξης του εκπαιδευτικού πάνω στην αναδίπλωση των πρωτεϊνών. Πριν από την διάλεξη, ο εκπαιδευτικός έχει παρουσιάσει στοιχεία βασικής χημείας, που αφορούν στις πρωτεΐνες (ομοιοπολικοί και μη ομοιοπολικοί δεσμοί) και τα βιοπολυμερή. Η διάλεξη αρχίζει με την παρουσίαση της δομής των αμινοξέων – σταθερό τμήμα και πλευρική αλυσίδα – και προχωρά με την περιγραφή του πεπτιδικού δεσμού, που οδηγεί σταδιακά στον σχηματισμό της πολυπεπτιδικής αλυσίδας. Ακολουθεί συζήτηση, με παραδείγματα, των διαφορετικών ιδιοτήτων των πλευρικών αλυσίδων των αμινοξέων. Τελικά, ο εκπαιδευτικός παρουσιάζει την τρισδιάστατη δομή της αιμογλοβίνης, χρησιμοποιώντας ένα πρόγραμμα μοριακής οπτικοποίησης (π.χ. Jmol), και εξηγεί ότι οι πρωτεΐνες αναδιπλώνονται αποκτώντας συμπαγή τρισδιάστατα σχήματα. Με τον τρόπο αυτό, έχει τεθεί η βάση για την υλοποίηση της hands-on δραστηριότητας.

Στην παρούσα εργασία, τα παραπάνω θα θεωρηθούν ως γνωστικά προαπαιτούμενα, που αντλήθηκαν μέσα από την εξέταση των υποενοτήτων «Γενικά στοιχεία» και «Πρωτεΐνες: Διαδεδομένες, πολύπλοκες και εύθραυστες» της ενότητας «1.2 Μακρομόρια» του σχολικού εγχειριδίου Βιολογίας της Β' τάξης Γενικού Λυκείου (Καψάλης κ.α., 2012), προκειμένου να υλοποιηθεί η δραστηριότητα. Με τον τρόπο αυτό, στο συγκεκριμένο εργαστηριακό μάθημα διάρκειας μίας διδακτικής ώρας, οι μαθητές πραγματοποιούν δραστηριότητες κιναισθητικού τύπου ώστε, αφενός να κατανοήσουν τις έννοιες που διδάχτηκαν στην πρώτη διάλεξη, αφετέρου να διορθώσουν τις όποιες εσφαλμένες αντιλήψεις είχαν

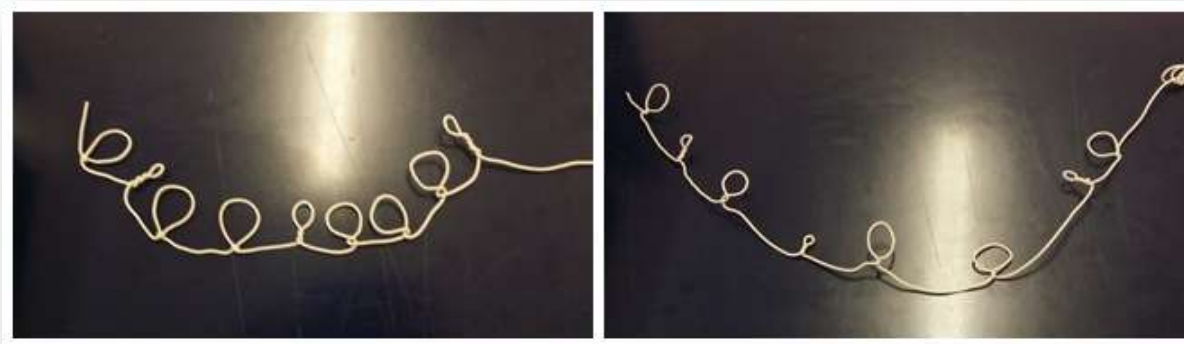
σχηματίζει είτε κατά την διάρκεια της διάλεξης είτε από προηγούμενη εμπειρία τους στην πορεία της μαθητικής τους διαδρομής.

Επίσης, κάθε ομάδα μαθητών λαμβάνει ένα φύλλο οδηγιών (<https://www.dropbox.com/s/rfe3i6s0sjhtxh4/Wire Project odigos ws.pdf?dl=0>, αλλά επίσης διαθέσιμο στο δικτυακό τόπο του περιοδικού ως υποστηρικτικό υλικό), που εξηγεί πώς να χρησιμοποιήσει το σύρμα για να προσομοιώσει την πολυπεπτιδική αλυσίδα. Το φύλλο οδηγιών έχει δομηθεί πάνω στην 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 την δραστηριότητα.

Αποτελέσματα

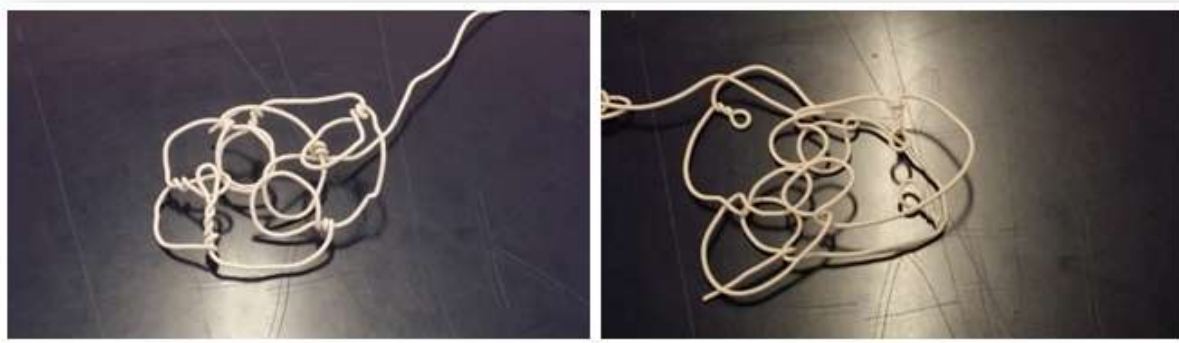
Η συγκεκριμένη εργαστηριακή δραστηριότητα διήρκεσε μία διδακτική ώρα και πραγματοποιήθηκε από τέσσερις ομάδες των τριών/τεσσάρων μαθητών. Οι άξονες στους οποίους βασίστηκε η αξιολόγηση των μαθητών αφορούσε σε τρία μέρη: (α) κατασκευή του ολιγοπεπτιδίου (25% συμμετοχή στην τελική βαθμολογία), (β) αναδίπλωση του ολιγοπεπτιδίου (25% συμμετοχή στην τελική βαθμολογία), και (γ) την ορθή και επαρκή συμπλήρωση του φύλλου δραστηριοτήτων (50% συμμετοχή στην τελική βαθμολογία).

Ως προς το κατασκευαστικό μέρος, όλες οι ομάδες απέδωσαν ικανοποιητικά. Ακολουθώντας τις γραπτές οδηγίες που τους δόθηκαν, κατασκεύασαν χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία ένα ολιγοπεπτίδιο αποτελούμενο από επτά έως εννέα αμινοξέα και των τριών τύπων (υδρόφοβα, θετικά φορτισμένα και αρνητικά φορτισμένα) (Εικόνα 1). Οι ομάδες χρησιμοποίησαν στην κατασκευή τους περισσότερα υδρόφοβα παρά ηλεκτρικά φορτισμένα αμινοξέα. Επιπλέον, με εξαίρεση μία ομάδα, οι υπόλοιπες φρόντισαν ώστε τα ηλεκτρικά φορτισμένα αμινοξέα να μην είναι γειτονικά μεταξύ τους, αλλά να διαχωρίζονται από μερικά υδρόφοβα.



Εικόνα 1. Παραδείγματα μη αναδιπλωμένων ολιγοπεπτιδίων που κατασκεύασαν διαφορετικές ομάδες.

Ως προς το μέρος της δραστηριότητας που αφορούσε στην αναδίπλωση του ολιγοπεπτιδίου, όλες οι ομάδες τα κατάφεραν επίσης αρκετά καλά (Εικόνα 2). Λαμβάνοντας υπόψη τις μη ομοιοπολικές αλληλεπιδράσεις (ιοντικές, υδρόφοβες), κάθε ομάδα δίπλωσε την συρμάτινη κατασκευή της, σχηματίζοντας με τον τρόπο αυτό μια συμπαγή τρισδιάστατη δομή σύρματος με τις υδρόφοβες πλευρικές αλυσίδες να καταλαμβάνουν το εσωτερικό της δομής αυτής και τις αντίθετα ηλεκτρικά φορτισμένες πλευρικές αλυσίδες να προσεγγίζουν η μια την άλλη.



Εικόνα 2: Παραδείγματα αναδιπλωμένων ολιγοπεπτιδίων που κατασκεύασαν διαφορετικές ομάδες.

Η εξέταση των απαντήσεων των ομάδων στα ερωτήματα του φύλλου δραστηριοτήτων οδήγησε σε ορισμένα ενδιαφέροντα ευρήματα. Στην *Ερώτηση 1*, όπου οι ομάδες καλούνταν να ερμηνεύσουν τη διατήρηση του συγκεκριμένου σχήματος του πεπτιδίου που κατασκεύασαν, όλες οι ομάδες αναφέρθηκαν στον ιοντικό δεσμό, αλλά μόνο οι μισές συμπεριέλαβαν στην απάντησή τους και τις υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις. Στην *Ερώτηση 2*, ζητήθηκε από τις ομάδες να αναφέρουν εκείνες τις αλληλεπιδράσεις που θεωρούν ότι δεν λήφθηκαν υπόψη κατά την εκτέλεση της συγκεκριμένης δραστηριότητας. Οι μισές ομάδες δήλωσαν ορθά ως τέτοιες αλληλεπιδράσεις τους δεσμούς υδρογόνου, ενώ οι άλλες μισές δήλωσαν εσφαλμένα τις υδρόφοβες αλληλεπιδράσεις και τους πεπτιδικούς δεσμούς. Ωστόσο, όλες οι ομάδες παρέλειψαν να αναφέρουν τους δισουλφιδικούς δεσμούς. Στην *Ερώτηση 3*, κάθε ομάδα, έχοντας δει το σχήμα του ολιγοπεπτιδίου που κατασκεύασαν οι υπόλοιπες, έπρεπε να ερμηνεύσει την διαφορά του σχήματος της κατασκευής της σε σχέση με το αντίστοιχο των άλλων ομάδων. Τρεις από τις τέσσερις ομάδες αιτιολόγησαν σωστά την διαφορετικότητα της κατασκευής τους επικαλούμενες την διαφορετική πρωτοταγή δομή, ενώ μία ομάδα απάντησε ότι δεν γνώριζε τον λόγο. Στην *Ερώτηση 4*, κάθε ομάδα έπρεπε να επινοήσει και να καταθέσει έναν άλλο τρόπο παρουσίασης της πρωτοταγούς δομής των αμινοξέων. Οι μισές ομάδες χρησιμοποίησαν το διδακτικό ανάλογο του κομπολογιού με τις χάντρες, ενώ οι υπόλοιπες αναφέρθηκαν στην δυνατότητα χρησιμοποίησης κάποιας πολυμεσικής εφαρμογής στο Διαδίκτυο ή σχεδίασης της πρωτοταγούς δομής στο χαρτί.

Το τελευταίο μέρος της δραστηριότητας απαιτούσε από τις ομάδες να πραγματοποιήσουν μια προσομοίωση της θερμικής μετουσίωσης, κρατώντας ένα τμήμα του πεπτιδικού σκελετού της αρχικής τους κατασκευής, και κουνώντας το έντονα. Στην Ερώτηση 5, κάθε ομάδα έπρεπε να εξηγήσει το φαινόμενο που προσομοίωσε με τον παραπάνω τρόπο. Όλες οι ομάδες συσχέτισαν αφενός την έντονη κίνηση με την αύξηση της κινητικής ενέργειας, αφετέρου την αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων του σύρματος με την αύξηση της θερμοκρασίας. Επισημάναν κατάλληλα ότι η υψηλή θερμοκρασία θα μπορούσε να λειτουργήσει ως παράγοντας μετουσίωσης, καθώς προκαλεί διάσπαση των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των πλευρικών αλυσίδων των αμινοξέων, καταστρέφοντας με τον τρόπο αυτό την τρισδιάστατη δομή του πρωτεϊνικού μορίου.

Συμπεράσματα

Τα παραπάνω αποτελέσματα, αν και προερχόμενα από ένα μικρό δείγμα μαθητών, δείχνουν ότι πρόκειται για μια σχετικά επιτυχημένη δραστηριότητα. Οι μαθητές, χωρίς ιδιαίτερη δυσκολία, κατασκεύασαν το συρμάτινο πεπτίδιο τους και το δίπλωσαν κατάλληλα, ακολουθώντας πιστά τις οδηγίες που τους δόθηκαν. Αμέσως μετά την υλοποίηση της δραστηριότητας, η πλειονότητα των ομάδων ήταν σε θέση να αναφέρει μία ή και περισσότερες από τις βασικές αρχές που διέπουν την αναδίπλωση των πρωτεϊνών, γεγονός που αποτυπώνεται στις απαντήσεις που κατέγραψαν στο φύλλο δραστηριοτήτων.

Σε γενικές γραμμές, τα παραπάνω συμπεράσματα συμφωνούν με τα βιβλιογραφικά δεδομένα. Ο White (2006), καθηγητής στο Πανεπιστήμιο της Μασαχουσέτης, επινόησε την δραστηριότητα αυτή και την εφήρμοσε με μεγάλη επιτυχία σε ένα ακροατήριο 200 και πλέον φοιτητών. Περίπου 80% των συρμάτινων καλωδίων που συνέλεξε αποτελούνταν από έξι έως οκτώ αμινοξέα, ενώ τα μισά καλώδια περιείχαν μίγμα υδρόφοβων, θετικών και αρνητικών φορτισμένων αμινοξέων. Επιπλέον, το 80% των καλωδίων είχαν αποδεκτή αναδιπλωμένη μορφή. Στην αξιολόγηση που πραγματοποίησε με τη χρησιμοποίηση σύντομου ανώνυμου ερωτηματολογίου, επισημαίνει ότι το 75-80% των φοιτητών που συμμετείχαν, ανέφερε τουλάχιστον μία από τις βασικές αρχές της αναδίπλωσης των πρωτεϊνών που παρουσιάστηκαν μέσω της συγκεκριμένης δραστηριότητας. Τα αποτελέσματα που λάβαμε από την υλοποίηση της συγκεκριμένης δραστηριότητας αφορούν σε τέσσερις ομάδες των τριών/τεσσάρων μαθητών της Β' Λυκείου στα πλαίσια μίας διδακτικής ώρας. Δεδομένου, λοιπόν, του μικρού δείγματος που χρησιμοποιήθηκε, είναι σημαντικό να υλοποιηθεί η δραστηριότητα σε μεγαλύτερο δείγμα μαθητών, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα που αφορούν στην ακριβή εκτίμηση του βαθμού χρησιμότητας της δραστηριότητας στην επίτευξη των μαθησιακών στόχων σε μαθητές της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης, στόχους τους οποίους ο White (2006) αξιώνει ότι η δραστηριότητα αυτή πραγματώνει.

Ωστόσο, είναι σημαντικό να τονιστεί ότι και οι τέσσερις ομάδες προχώρησαν ένα βήμα παραπέρα ως προς την εξηγητική ερμηνεία της θερμικής μετουσίωσης. Οι μαθητές επηρεασμένοι από την

πρόσφατα αποκτηθείσα γνώση που αφορά στην κινητική θεωρία των αερίων από το μάθημα της Φυσικής (Βλάχος κ.α., 2014), συσχέτισαν την έντονη κίνηση με την αύξηση της κινητικής ενέργειας των μορίων του σύρματος, και την τελευταία με την αύξηση της θερμοκρασίας. Με τον τρόπο αυτό, το εξηγητικό σχήμα που παρείχαν προσέγγιζε το φαινόμενο της μετουσίωσης υπό το πρίσμα διαφορετικών γνωστικών αντικειμένων, αναδεικνύοντας με τον τρόπο αυτό την ανάγκη διεπιστημονικής προσέγγισης των φαινομένων που απασχολούν τις Φυσικές Επιστήμες για την ολοκληρωμένη ερμηνεία τους (Morillo, Bordons, & Gómez, 2003).

Ο White (2006) υποστηρίζει πως βασικό πλεονέκτημα της δραστηριότητας αποτελεί το γεγονός ότι μπορεί εύκολα να πραγματοποιηθεί από όλους τους σπουδαστές ενός μεγάλου ακροατηρίου. Με τον τρόπο αυτό, οι σπουδαστές είναι σε θέση να σχηματίσουν μια σαφή εικόνα της διεργασίας αναδίπλωσης του πρωτεϊνικού μορίου, και δεν μένουν στο τελικό προϊόν που παρουσιάζουν τα διαγράμματα του σχολικού εγχειριδίου και τα λογισμικά μοριακής οπτικοποίησης. Επιπλέον, η δραστηριότητα αυτή αποτελεί σημείο αναφοράς για μετέπειτα διαλέξεις. Στο εξής, ο εκπαιδευτικός μπορεί να επικαλείται την επίδειξη της διαδικασίας αναδίπλωσης με τη βοήθεια του σύρματος, κάθε φορά που προτίθεται να μιλήσει για ζητήματα που αφορούν στον πεπτιδικό σκελετό και τις πλευρικές αλυσίδες, για την αναδίπλωση άλλων πρωτεϊνικών μορίων, και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πλευρικών αλυσίδων.

Εντούτοις, πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό το εξαιρετικά απλοποιημένο μοντέλο της πρωτεϊνικής αναδίπλωσης, μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές παρανοήσεις, που θα πρέπει να συζητηθούν με τους μαθητές κατά την διάρκεια του μαθήματος. Οι παρανοήσεις αυτές προκύπτουν από πέντε χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης δραστηριότητας – απλουστεύσεις που συνδέονται με το μοντέλο του σύρματος για την πρωτεϊνική δομή, οι οποίες έχουν σημαντικές επιπτώσεις. *Πρώτον*, κατά την συστροφή του σύρματος, προκειμένου να σχηματιστούν οι πλευρικές αλυσίδες των αμινοξέων, οι μαθητές μπορεί λανθασμένα να θεωρήσουν ότι τα αμινοξέα σχηματίζονται από τον πεπτιδικό σκελετό, ενώ γνωρίζουμε ότι το πολυπεπτίδιο συντίθεται με βαθμιαίο πολυμερισμό αμινοξικών κατάλοιπων, μέσα από διαδοχικές αντιδράσεις συμπύκνωσης. Επιπλέον, από την ίδια την διαδικασία κατασκευής φαίνεται να υπονοείται ότι οι υδρόφοβες πλευρικές αλυσίδες είναι πάντοτε μεγαλύτερου μεγέθους από τις φορτισμένες. *Δεύτερον*, η δραστηριότητα αυτή δεν προσομοιώνει τους δεσμούς υδρογόνου. Ο White (2006) εξηγεί πως θα ήταν εξαιρετικά δύσκολο να επινοήσει πέντε διακριτούς τύπους θηλιών, και, με μόλις επτά αμινοξέα στο πεπτίδιο, θα ήταν δύσκολο να προσομοιώσει τρεις διαφορετικούς τύπους αλληλεπιδράσεων. Με όμοιο τρόπο, η δραστηριότητα αυτή δεν υπολογίζει την επίδραση του σχήματος της πλευρικής αλυσίδας ούτε τους ομοιοπολικούς δεσμούς μεταξύ των πλευρικών αλυσίδων. *Τρίτον*, η δραστηριότητα αυτή αφήνει να εννοηθεί ότι το πρώτο βήμα στην πρωτεϊνική αναδίπλωση είναι πάντοτε ο σχηματισμός του υδρόφοβου πυρήνα του μορίου. *Τέταρτον*, δεδομένου ότι ο πεπτιδικός σκελετός είναι σχετικά «αδρανής», και τα πεπτίδια είναι μικρού μήκους, δεν μπορούμε να δείξουμε την δευτεροταγή δομή. Επιπλέον, τα μικρού μήκους πεπτίδια δεν μπορούν

να χρησιμοποιηθούν για να δείξουν το εύρος των τρισδιάστατων δομών που σχηματίζουν οι πλήρως αναδιπλωμένες πρωτεΐνες. *Πέμπτον*, το σύρμα δεν αποδίδει την πολικότητα του πρωτεϊνικού μορίου, δηλαδή τα χημικώς διαφορετικά άκρα του (αμινοτελικό και καρβοξυτελικό άκρο). Ανάλογα με το επίπεδο κατανόησης που επιδιώκεται από κάθε εκπαιδευτικό, είναι σημαντικό να συζητηθούν είτε όλα είτε μερικά από τα παραπάνω θέματα στο πλαίσιο της περαιτέρω εξέτασης του μηχανισμού της αναδίπλωσης των πρωτεϊνών. Αξίζει να σημειωθεί ότι, μια τέτοια συζήτηση θα μπορούσε να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα αναφορικά με τον ρόλο της μοντελοποίησης στις Φυσικές Επιστήμες, καθώς και των χαρακτηριστικών του μοντέλου που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε παρανοήσεις. Έχοντας κατά νου, λοιπόν, ότι η συγκεκριμένη δραστηριότητα έχει σχεδιαστεί για να δώσει μια πρώτη εικόνα της πρωτεϊνικής αναδίπλωσης, και να αποτελέσει σημείο αναφοράς για περαιτέρω επεξεργασία, και ότι, σε καμία περίπτωση δεν αποτελεί ολοκληρωμένη παρουσίαση της αναδίπλωσης των πρωτεϊνών, μπορεί να αποτελέσει ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την εισαγωγή στην πρωτεϊνική δομή και αναδίπλωση.

Βιβλιογραφία

- Barnea, N., & Dori, Y. (1999). High-school chemistry students' performance and gender differences in a computerized molecular modeling learning environment. *J Sci Educ Technol*, 8, 257-271.
- Copolo, C., & Hounshell, P. (1995). Using three-dimensional models to teach molecular structures in high school chemistry. *J Sci Educ Technol*, 4, 295-305.
- 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.
- Gabel, D., & Sherwood, R. (1980). The effect of student manipulation of molecular models on chemistry achievement according to Piagetian level. *J Res Sci Teach*, 17, 75-81.
- Goldstone, R., & Son, J. (2005). The transfer of scientific principles using concrete and idealized simulations. *J Learn Sci*, 14, 69-110.
- Herman, T., Morris, J., Colton, S., Batiza, A., Patrick, M., Franzen, M., et al. (2006). Tactile teaching: Exploring protein structure/function using physical models. *Biochem Mol Biol Educ*, 34 (4), 247-54.
- Howe, A., & Durr, B. (1982). Using concrete materials and peer interaction to enhance learning in chemistry. *J Res Sci Teach*, 19, 225-232.
- Hughes, P., & Ellefson, M. (2013). Inquiry-based training improves teaching effectiveness of biology teaching assistants. *PLoS ONE*, 8 (10), e78540.
- Jones, M., Minogue, J., Tretter, T., Atsuko, N., & Taylor, R. (2006). Haptic augmentation of science instruction: Does touch matter? *Sci Educ*, 90, 111-123.
- Ke, J.-L., Monk, M., & Duschl, R. (2005). Learning introductory quantum physics: Sensori-motor experiences and mental models. *Int J Sci Educ*, 27, 1571-1594.
- Morillo, F., Bordons, M., & Gómez, I. (2003). Interdisciplinarity in science: A tentative typology of disciplines and research areas. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 54(13), 1237-1249.
- Nelson, A., & Goetze, J. (2004). Modeling protein folding and applying it to a relevant activity. *Am Biol Teach*, 66, 287-289.
- Roberts, J., Hagedorn, E., Dilenburg, P., Patrick, M., & Herman, T. (2005). Physical models enhance molecular three-dimensional literacy in an introductory biochemistry course. *Biochem Mol Biol Educ*, 33 (2), 105-10.
- White, B. (2006). A simple and effective protein folding activity suitable for large lectures. *CBE Life Sci Educ*, 5 (3), 264-9.

- Βλάχος, Ι., Γραμματικάκης, Ι., Καραπαναγιώτης, Β., Περιστερόπουλος, Π., Τιμοθέου, Γ. (2014). *Φυσική Ομάδας Προσανατολισμού Θετικών Σπουδών Β' Γενικού Λυκείου*. Αθήνα: ΙΤΥΕ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ».
- Καψάλης, Α., Μπουρμπουχάκης, Ι., Περάκη, Β., & Σαλαμαστράκης, Σ. (2012). *Βιολογία Β' τάξης Γενικού Λυκείου Γενικής Παιδείας*. Αθήνα: ΙΤΥΕ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ».



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.