ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ ΣΕ Η/Υ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΩΝ ΟΝΤΟΤΗΤΩΝ ΚΑΙ Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥΣ ΣΤΗ ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΤΩΝ ΤΥΠΩΝ ΣΥΛΛΟΓΙΣΜΩΝ ΦΟΙΤΗΤΩΝ

Αλέξανδρος Μπάρμπας, Καθηγητής, 15ο Ενιαίο Λύκειο Θεσ/νίκης & υποψήφιος διδάκτωρ, ΠΤΔΕ, ΑΠΘ, albar@eled.auth.gr
Δημήτρης Ψύλλος, Καθηγητής, ΠΤΔΕ, ΑΠΘ, psillos@skiathos.physics.auth.gr

Λέξεις Κλειδιά: αιτιακοί συλλογισμοί, διδασκαλία ηλεκτρισμού, διδακτικές σειρές, ποιοτικές προσομοιώσεις σε η/υ.
Επίπεδο Εκπαίδευσης: Τριτοβάθμια Εκπαίδευση.
Κατηγορία: Εμπειρική-Πειραματική.

Περίληψη

Στο πλαίσιο διδακτικής σειράς που αναπτύξαμε στο Π.Τ.Δ.Ε. του Α.Π.Θ., σχεδιάσαμε σειρά προσομοιώσεων σε η/υ που 'εικονογραφούν' τη συμπεριφορά των μικροσκοπικών οντοτήτων κατά την πόλωση μετάλλου από εξωτερικό φορτίο σε τρία διαδοχικά επίπεδα: στο μικροσκοπικό επίπεδο των μεμονωμένων οντοτήτων, στο μικροσκοπικό ομάδων οντοτήτων και στο μακροσκοπικό. Πριν από τη χρήση των προσομοιώσεων, η πλειονότητα των φοιτητών χρησιμοποιεί αναπαραστάσεις και διαδικασίες κατάλληλες για την πόλωση μονωτών ενώ ελάχιστοι επιχειρούν να ενσωματώσουν την ιδιαίτερη συμπεριφορά των ελευθέρων ηλεκτρονίων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η χρήση τους μπορεί να υποστηρίξει τη διαμόρφωση διακεκριμένων νοητικών μοντέλων για μονωτές και μέταλλα όπως και την εξέλιξη των νοητικών μοντέλων των φοιτητών διευκολύνοντας την ενσωμάτωση στοιχείων κυκλικού (αναδραστικού) αιτιακού συλλογισμού στους μηχανισμούς που χρησιμοποιούν οι φοιτητές για το χειρισμό των στοιχείων των νοητικών μοντέλων τους. Η ανάπτυξη συλλογισμών αυτού του τύπου φαίνεται πως είναι προϋπόθεση για την κατανόηση των διαδικασιών που συμβαίνουν σε ένα απλό ηλεκτρικό κύκλωμα κατά την μεταβολή κάποιων στοιχείων του, όπως για παράδειγμα της αντίστασης κάποιου αντιστάτη.

Summary

In the framework of a teaching sequence which we have developed at the School of Education of A.U.Th., we have designed a sequence of computer simulations which illustrate the behavior of microscopic entities during the polarization of metals by an external charge at three successive levels: at the microscopic of individual entities, at the microscopic of aggregated entities and at the macroscopic level. Before interacting with the simulations, most student-teachers use, for the polarization of metals, representations and procedures originating from the polarization of insulators, whereas very few attempt to take into account the intrinsic behavior of free electrons. Results show that interaction with these simulations may support the differentiation of student-teachers' mental models of insulators and metals as well as their advancement by facilitating the incorporation of elements of circular reasoning into the mechanisms student-teachers use to manipulate the elements of their mental models. The development of circular reasoning seems to be a prerequisite for understanding the processes taking place in a simple electric circuit during the change of the values of its elements, for example of the resistance of a resistor.

1. Εισαγωγή

Η εργασία αναφέρεται (α) στη σχεδίαση σειράς προσομοιώσεων σε η/υ της συμπεριφοράς των μικροσκοπικών οντοτήτων κατά την πόλωση μετάλλου από εξωτερικό φορτίο και (β) στην επίδραση των προσομοιώσεων αυτών στις νοητικές αναπαραστάσεις σπουδαστών για την πόλωση των μετάλλων. Βασίζεται στα ερευνητικά αποτελέσματα από έργα που πραγματοποιήθηκαν σε εργαστηριακό μάθημα διδακτικής σειράς για τον στατικό ηλεκτρισμό και τα απλά ηλεκτρικά κυκλώματα που αναπτύξαμε και διδάξαμε σε φοιτητές του ΠΤΔΕ του ΑΠΘ. Βασικός σκοπός της διδακτικής σειράς είναι να βοηθήσει τους φοιτητές να αναπτύξουν νοητικά μοντέλα και μηχανισμούς χειρισμού αυτών κατάλληλους για την οργάνωση ποιοτικών και ημι-ποσοτικών εξηγήσεων απλών ηλεκτρικών φαινομένων (Barbas & Psillos, 1993). Το θεωρητικό πλαίσιο της διδακτικής σειράς έχει προκύψει από το διδακτικό μετασχηματισμό της θεωρίας της φυσικής και αναπτύσσεται γύρω από σειρά μικροσκοπικών διδακτικών μοντέλων που βασίζονται στην αλληλεπίδραση Coulomb και παρουσιάζονται προοδευτικά μέσα από σειρά μικρών αλληλεπιδραστικών προσομοιώσεων σε η/υ (Barbas, Koumaras, & Psillos, 1994). Τα διδακτικά αυτά μοντέλα σχεδιάστηκαν στη βάση του συνδυασμού μιας μοντελοποίησης των ηλεκτρικών αλληλεπιδράσεων σε τρία επίπεδα (Barbas, Koumaras, & Psillos, 1995) και μιας ιεραρχίας αιτιακών εξηγήσεων με δύο βασικούς στόχους: (α) την σύνδεση της μικροσκοπικής με την μακροσκοπική εξέταση ενός φαινομένου (Eylon & Ganiel, 1990) και (β) την κάλυψη του χάσματος ανάμεσα στους διαφορετικούς τρόπους οργάνωσης των εξηγήσεων που χρησιμοποιούν από τη μια μεριά η φυσική και από την άλλη οι σπουδαστές (Frederiksen & White, 1992).

Τα τρία επίπεδα της μοντελοποίησης των ηλεκτρικών αλληλεπιδράσεων αναφέρονται: το πρώτο στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ μεμονωμένων μικροσκοπικών σωματιδίων, το δεύτερο στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ομάδων μικροσκοπικών σωματιδίων που παρουσιάζουν την ίδια συμπεριφορά και το τρίτο στους νόμους αλληλεπίδρασης που

περιγράφουν τη μακροσκοπική συμπεριφορά του συστήματος που εξετάζεται.

Η ιεραρχία των αιτιακών εξηγήσεων συνίσταται από (Halbwachs, 1971):

(α) *Απλές αιτιακές εξηγήσεις*. Αυτές βασίζονται σε απλούς αιτιακούς συλλογισμούς, οι οποίοι αποκαθιστούν μια αιτιακή σχέση ανάμεσα σε μια αιτία και σε ένα αποτέλεσμα (Α→Β) και προσφέρουν μια στοιχειώδη εξήγηση των φαινομένων.

(β) *Γραμμικές αιτιακές εξηγήσεις*. Αυτές βασίζονται σε γραμμικούς αιτιακούς συλλογισμούς, που δημιουργούνται από την παράθεση σειράς αιτιακών σχέσεων και σχηματίζουν μια αιτιακή αλυσίδα (Α→Β→Γ…→Ζ) στην οποία κάθε αιτία είναι το αποτέλεσμα μιας προηγούμενης αιτίας και κάθε αποτέλεσμα είναι η αιτία ενός επόμενου αποτελέσματος. Αυτή η γραμμική αιτιότητα προσφέρει μια μερική και περιορισμένη αναπαράσταση της πραγματικότητας αλλά υψηλότερου επιπέδου από αυτήν της απλής αιτιότητας.

(γ) *Κυκλικές αιτιακές εξηγήσεις*. Σε αυτές αποκαθίσταται μια αντιστρεπτή αιτιακή σχέση ανάμεσα σε μια αιτία και σε ένα αποτέλεσμα (Α→Β→Α). Γενικώς μια τέτοια κυκλική διαδικασία μπορεί να λειτουργήσει και σε μια αιτιακή αλυσίδα η οποία μπορεί να επαναληφθεί πολλές φορές. Εξηγήσεις που οργανώνονται στη βάση μιας τέτοιας κυκλικής αιτιότητας αποτελούν το απαραίτητο ενδιάμεσο στάδιο από τις απλές και γραμμικές αιτιακές εξηγήσεις των σπουδαστών προς τις *ομογενείς εξηγήσεις* που κυρίως χρησιμοποιούν οι φυσικές επιστήμες και ιδιαίτερα η φυσική.

(δ) *Ομογενείς εξηγήσεις*. Αυτές μη-αιτιακές και μη-ιστορικές καθώς αναφέρονται μόνον στις σχέσεις μεταξύ μεταβλητών που χαρακτηρίζουν ένα σύστημα οι οποίες είναι αληθείς μόνον κατά τις περιόδους που το σύστημα βρίσκεται σε σταθερή κατάσταση και εκφράζουν μια αμεταβλητότητα κάτω από συγκεκριμένους μετασχηματισμούς.

2. Η σειρά των προσομοιώσεων των μικροσκοπικών οντοτήτων

Η σειρά των προσομοιώσεων αναπτύχθηκε στο περιβάλλον "Toolbook", αρχικά στην έκδοση 1.53 και αργότερα στην έκδοση 5.0. Στη σχεδίαση καθώς και στην κατανομή των προσομοιώσεων στα μαθήματα της διδακτικής σειράς ακολουθήσαμε την παραπάνω τριεπίπεδη δομή. Έτσι, οι προσομοιώσεις του πρώτου μέρους αφορούν στην πόλωση μονωτών, αναπαριστούν τη συμπεριφορά μεμονωμένων φορτίων/ομάδων φορτίων, στο μικροσκοπικό επίπεδο και εστιάζουν στην εξέλιξη των απλών αιτιακών εξηγήσεων των φοιτητών σε εξηγήσεις γραμμικής αιτιότητας. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι προσομοιώσεις αυτές μπορούν να υποστηρίξουν την εξέλιξη αυτή (Μπάρμπας, υπό δημοσίευση). Οι προσομοιώσεις του δεύτερου μέρους αφορούν (α) στην πόλωση μετάλλων και (β) στην κίνηση φορτίων σε αγωγό που συνδέει δύο ίδιες μεταλλικές φορτισμένες σφαίρες, αναπαριστούν τη συμπεριφορά στο μικροσκοπικό επίπεδο μεμονωμένων φορτίων / ομάδων φορτίων και στο μακροσκοπικό του συνολικού φορτίου και εστιάζουν στη δημιουργία των προϋποθέσεων για την ανάπτυξη κυκλικών αιτιακών εξηγήσεων (Vosniadou, 1992). Οι προσομοιώσεις του τρίτου μέρους αφορούν στη λειτουργία απλών κυκλωμάτων με μπαταρία και αντιστάτες, αναπαριστούν τη συμπεριφορά στο μικροσκοπικό επίπεδο ομάδων φορτίων και στο μακροσκοπικό των μεγεθών της έντασης και της διαφοράς δυναμικού και εστιάζουν στην ανάπτυξη και συστηματική χρήση ειδικών τύπων κυκλικών αιτιακών συλλογισμών (Barbas & Psillos, 1997).

Η εργασία μας αναφέρεται σε τρεις προσομοιώσεις της πόλωσης μετάλλου με τις οποίες οι φοιτητές αλληλεπιδρούν σε σειρά έργων του δεύτερου μέρους της διδακτικής σειράς (έργα 2-2, 2-3α, 2-3β και 2-4). Πριν αλληλεπιδράσουν με αυτές, οι φοιτητές έχουν διαπιστώσει πειραματικά (έργο 2-1) ότι μια φούσκα συμπεριφέρεται διαφορετικά από μια άλλη τυλιγμένη σε αλουμινόχαρτο όταν πλησιάσουμε ένα φορτισμένο σώμα, π.χ. τη μεταλλική σφαίρα μιας μηχανής Wimshurst και έχουν αποδώσει τις διαφορές αυτές στην ύπαρξη ελεύθερων ηλεκτρονίων στο μεταλλικό αλουμινόχαρτο.

2.1 Αρχικές αναπαραστάσεις για το μέταλλο και την πόλωσή του (έργο 2-2)

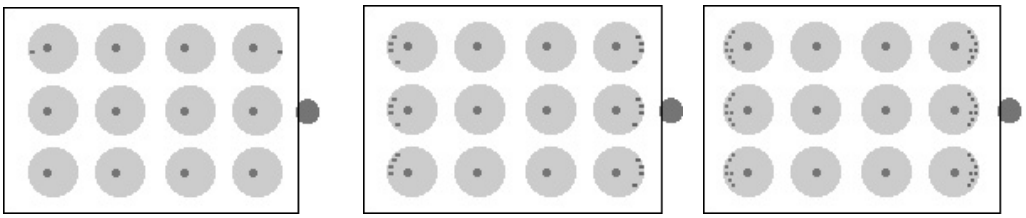
Πρώτα δίνουμε μια σύντομη λεκτική μικροσκοπική περιγραφή ενός μετάλλου (πλέγμα θετικών ιόντων σε θάλασσα ελευθέρων ηλεκτρονίων) και διερευνούμε τη μικροσκοπική εικόνα που οργανώνουν οι φοιτητές για ένα μεταλλικό σώμα πριν τις προσομοιώσεις, ποια σχέση έχει η εικόνα αυτή με την μικροσκοπική εικόνα που έχουν διαμορφώσει για τους μονωτές στα έργα του πρώτου μέρους και με τη λεκτική περιγραφή που τους δόθηκε, ζητώντας να σχεδιάσουν και δίπλα να σχολιάσουν γραπτώς πώς φαντάζονται (α) τη διάταξη των ατόμων του μετάλλου και των ηλεκτρονίων τους στο χώρο όταν δεν επιδρά πάνω του κανένα εξωτερικό φορτίο και (β) τη συμπεριφορά των ατόμων και των ηλεκτρονίων καθώς τα πλησιάζει ένα εξωτερικό φορτίο, θετικό ή αρνητικό.

2.2 Προσομοίωση της πόλωσης μετάλλου σε ατομικό επίπεδο (έργο 2-3α)

Στην αρχή οι φοιτητές καθοδηγούνται από το ΦΕ να συλλέξουν πληροφορίες για τα εικονίδια και τις διαδικασίες που θα χρησιμοποιήσουν κατά την προσομοίωση. Στο κέντρο της οθόνης ένα παραλληλόγραμμο περιβάλλει τα διατεταγμένα σε σειρές εικονίδια ατόμων που αναπαρίστανται με μια κόκκινη κουκίδα, για πυρήνα, και έναν πράσινο κύκλο για ηλεκτρονιακό νέφος που περιέχει ίδιο αριθμό φορτίων με τον πυρήνα. Στη συνέχεια οι φοιτητές φέρνουν ένα εξωτερικό φορτίο, θετικό ή αρνητικό, σε διάφορες θέσεις γύρω από το συγκρότημα των ατόμων. Κατά τις διαδικασίες που προσομοιώνονται, στην περίπτωση που το ηλεκτρονιακό νέφος έχει περισσότερα ηλεκτρόνια το πλεόνασμα αναπαρίσταται με έντονα πράσινες μικρές κουκίδες στην περιφέρεια του ηλεκτρονιακού νέφους. Το έλλειμμα ηλεκτρονίων αναπαρίσταται ανάλογα με έντονα κόκκινες μικρές κουκίδες. Η προσομοίωση αναπαριστά τις παρακάτω διαδικασίες (Εικ.1):

Π1.Δ1 Η αρχική μετατόπιση των ηλεκτρονιακών νεφών όλων των ατόμων σιγά-σιγά μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί στο τέλος της διαδικασίας.

Π1.Δ2 Το πλεόνασμα ηλεκτρονίων και το ίσο του έλλειμμα ηλεκτρονίων, αρχικά είναι μικρό ενώ στη συνέχεια σιγά-σιγά μεγαλώνει μέχρι να φθάσει τη μέγιστη τιμή του.



Εικόνα 1: Η εξέλιξη της προσομοίωσης σε σειρά οθονών

Οι δύο διαδικασίες εξελίσσονται παράλληλα αλλά αντίρροπα. Δηλαδή, όσο το πλεόνασμα ηλεκτρονίων, όπως και το ίσο του έλλειμμα ηλεκτρονίων, σιγά-σιγά μεγαλώνει, μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τιμή του στο τέλος της διαδικασίας, τόσο η αρχική μετατόπιση των ηλεκτρονιακών νεφών όλων των ατόμων σιγά-σιγά μειώνεται, μέχρι να μηδενιστεί στο τέλος της διαδικασίας.

Ζητάμε οι φοιτητές (α) να συγκρίνουν τη συμπεριφορά των ατόμων του ηλεκτρικά ουδέτερου μετάλλου, όπως την παρουσιάζουν οι προσομοιώσεις, με τις νοερές τους εικόνες που κατέγραψαν στο προηγούμενο έργο και να εντοπίσουν διαφορές,· (β) να περιγράψουν τη διαδικασία που νομίζουν πως συμβαίνει στο μέταλλο όταν πλησιάζουν ένα εξωτερικό φορτίο,· (γ) να εκτιμήσουν αν θα υπάρχουν ελεύθερα ηλεκτρόνια στο εσωτερικό του μετάλλου όταν τελειώσει η διαδικασία της πόλωσής του ή θα έχουν όλα μεταφερθεί στην επιφάνειά του.

2.3 <u>Προσομοίωση μεταβολών των ασκούμενων δυνάμεων στα ελεύθερα ηλεκτρόνια</u> (έργο 2-3β)

Στην προσομοίωση αυτή, παράλληλα με τα γεγονότα και τις διαδικασίες της προηγούμενης προσομοίωσης, αναπαρίσταται η εξέλιξη των δύο δυνάμεων που ασκούνται σε ένα ηλεκτρόνιο στο μέσο του μετάλλου.·Η μία (**Fεξ**) ασκείται από το εξωτερικό φορτίο ενώ η άλλη (**Fπ**) είναι η συνισταμένη των δυνάμεων που ασκούν τα φορτία που συσσωρεύονται στις δύο απέναντι επιφάνειες του μετάλλου εξαιτίας της πόλωσης. Η **Fεξ** είναι σταθερή ενώ η **Fπ** έχει αντίθετη φορά από την **Fεξ** και δεν είναι σταθερή. Η προσομοίωση αναπαριστά την παρακάτω διαδικασία:

Π2.Δ1 Η **Fπ** αρχικά είναι μικρή και στη συνέχεια σιγά-σιγά μεγαλώνει μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τιμή της που είναι ίση με την τιμή της **Fεξ**.

Οι διαδικασίες **Π1.Δ2** και **Π2.Δ1** εξελίσσονται παράλληλα και ομόρροπα. Δηλαδή, όσο το πλεόνασμα ηλεκτρονίων, όπως και το ίσο του έλλειμμα ηλεκτρονίων, σιγά-σιγά μεγαλώνει τόσο η **Fπ** σιγά-σιγά αυξάνει μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τιμή της στο τέλος της διαδικασίας. Αντιθέτως, οι διαδικασίες **Π2.Δ1** και **Π1.Δ1** εξελίσσονται παράλληλα και αντίρροπα. Δηλαδή, όσο η **Fπ** σιγά-σιγά αυξάνει τόσο η μετατόπιση των ηλεκτρονιακών νεφών όλων των ατόμων σιγά-σιγά μειώνεται μέχρι να μηδενιστεί στο τέλος της διαδικασίας.

Από τους φοιτητές ζητάμε να παρακολουθήσουν πώς αλλάζουν οι δυνάμεις που ασκούνται στα "ελεύθερα" ηλεκτρόνια του μετάλλου και μετά (α) να σχολιάσουν και να συμπληρώσουν τις απαντήσεις τους στο έργο 2.3β και (β) να εξηγήσουν γιατί ένα φορτισμένο σώμα κι ένα ουδέτερο μέταλλο πάντα έλκονται.

2.4 <u>Προσομοίωση της πόλωσης μετάλλου σε μίκρο/μάκρο επίπεδο</u> (έργο 2-4)

Στην προσομοίωση αυτή, οι φοιτητές εργάζονται σε μια πιο απλή αναπαράσταση της πόλωσης μετάλλου που 'ξεχνά' τα άτομα στο εσωτερικό των μετάλλων, αφού τελικά αυτά δεν πολώνονται αλλά επανέρχονται στην αρχική τους κατάσταση, και λαμβάνει υπόψη μόνον τα "ελεύθερα" ηλεκτρόνια του μετάλλου και τα θετικά ιόντα του μετάλλου. Οι φοιτητές χρησιμοποιούν την προσομοίωση διαδοχικώς σε τρία διαφορετικά επίπεδα:

Στο πρώτο, η προσομοίωση αναπαριστά τη βαθμιαία δημιουργία πλεονάσματος και ελλείμματος ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του μετάλλου 'θεωρώντας' μόνο τη θέση στην οποία τοποθετείται το εξωτερικό φορτίο. Το πλεόνασμα ηλεκτρονίων στην επιφάνεια της πλευράς του μετάλλου αναπαρίσταται με μια πράσινη ταινία της οποίας το χρώμα γίνεται τόσο πιο σκούρο όσο πιο μεγάλο είναι το πλεόνασμα. Με τον ίδιο τρόπο το έλλειμμα ηλεκτρονίων αναπαρίσταται με μια κόκκινη ταινία. Η διαδικασία που αναπαρίσταται είναι:

Π3.Δ1 Το πλεόνασμα, όπως και το έλλειμμα, ηλεκτρονίων αρχικά είναι μικρό και στη συνέχεια σιγά-σιγά μεγαλώνει μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τιμή του.

Στο δεύτερο επίπεδο, η προσομοίωση αναπαριστά επιπλέον και την εξέλιξη των δυνάμεων που ασκούνται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια του μετάλλου, δηλαδή των Fεξ και Fπ, με τρόπο παρόμοιο με αυτόν της προηγούμενης προσομοίωσης (**Π2.Δ1**). Οι διαδικασίες **Π3.Δ1** και **Π2.Δ1** εξελίσσονται παράλληλα και ομόρροπα. Δηλαδή, όσο το πλεόνασμα και το έλλειμμα ηλεκτρονίων σιγά-σιγά μεγαλώνει τόσο η τιμή της **Fπ** σιγά-σιγά αυξάνει μέχρι να φθάσει στη μέγιστη τιμή της στο τέλος της διαδικασίας.

Τέλος, στο τρίτο επίπεδο, η προσομοίωση αναπαριστά τα γεγονότα και τις διαδικασίες των δύο πρώτων επιπέδων όχι όμως για μια μόνον θέση του εξωτερικού φορτίου, την τελική, αλλά για μια σειρά διαδοχικών θέσεων που παίρνει το εξωτερικό φορτίο καθώς κινείται από την παλιά στη νέα θέση του: Εάν η νέα θέση βρίσκεται στην ίδια πλευρά του μετάλλου και δεν αλλάζει η πολικότητα του φορτίου του το εξωτερικό φορτίο κινείται από την παλιά στη νέα θέση του· διαφορετικά, απομακρύνεται κάθετα προς την επιφάνεια του μετάλλου, εμφανίζεται στην άλλη πλευρά του μετάλλου ή στην ίδια, αν μόνο η πολικότητα του φορτίου έχει αλλάξει, και πλησιάζει μέχρι τη νέα θέση του. Σε όλες τις περιπτώσεις κινείται πάνω στη μεσοκάθετο της πλευράς του μετάλλου. Έτσι, στο τρίτο επίπεδο η προσομοίωση γίνεται

πιο ‘ρεαλιστική’ αφού κατά κάποιον τρόπο ‘θυμάται’ την ιστορία του εξωτερικού φορτίου.

Οι φοιτητές εργάζονται διαδοχικώς στα τρία επίπεδα της προσομοίωσης που περιγράψαμε παραπάνω και εντοπίζουν διαφορές, πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα σε σχέση με τις προσομοιώσεις της προηγούμενης εργασίας.

3. Το ερευνητικό πλαίσιο

Η εργασία μας αναφέρεται σε σειρά τριών προσομοιώσεων πόλωσης μετάλλων του δεύτερου μέρους της διδακτικής σειράς. Πριν αλληλεπιδράσουν με αυτές, οι φοιτητές περιγράφουν με σχήματα και σχόλια πώς φαντάζονται (α) τη διάταξη των ατόμων του μετάλλου και των ηλεκτρονίων τους στο χώρο όταν δεν επιδρά πάνω του κανένα εξωτερικό φορτίο και (β) τη συμπεριφορά των ατόμων και των ηλεκτρονίων καθώς τα πλησιάζει ένα εξωτερικό φορτίο, θετικό ή αρνητικό. Μετά από κάθε προσομοίωση απαντούν γραπτώς σε σειρά ερωτημάτων που περιέχει το φύλλο εργασίας τους. Τα ερευνητικά ερωτήματα αφορούν (α) στις αναπαραστάσεις των φοιτητών πριν την αλληλεπίδραση με τις προσομοιώσεις και ιδιαίτερα ποιες μικροσκοπικές οντότητες, ποιους κανόνες αλληλεπίδρασης μεταξύ των οντοτήτων και ποιους τύπους συλλογισμών χρησιμοποιούν στις περιγραφές τους, (β) στις αλλαγές των παραπάνω στοιχείων των αναπαραστάσεων μετά την αλληλεπίδραση με τις προσομοιώσεις, (γ) στους περιορισμούς που οι αναπαραστάσεις αυτές θέτουν στην αλληλεπίδραση με τις προσομοιώσεις.

Τα δεδομένα που αναλύθηκαν προέρχονται από:

α. Απαντήσεις στα ερωτήματα των έργων στα φύλλα εργασίας τις οποίες γράφει κάθε φοιτητής ξεχωριστά σε συγκεκριμένες στιγμές της διδακτικής διαδικασίας.

β. Μαγνητοφωνήσεις των συζητήσεων στην αίθουσα διδασκαλίας που ακολουθούν την απάντηση των ερωτημάτων και αναφέρονται στις απαντήσεις που έχουν ήδη γράψει.

γ. Ημιδομημένες συνεντεύξεις 1-2 εβδομάδες μετά το τελευταίο έργο οι οποίες εστιάζουν στις απαντήσεις που έχουν ήδη γράψει στα φύλλα εργασίας και φωτίζουν το νόημά τους καθώς και το πλαίσιο μέσα στο οποίο διαμορφώθηκαν.

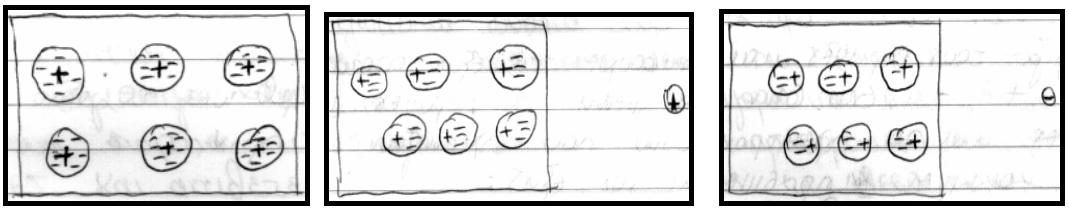
Η μελέτη περίπτωσης αφορούσε σε 32 φοιτητές του 4ου εξαμήνου του ΠΤΔΕ οι οποίοι δεν είχαν παρακολουθήσει στο τμήμα κάποιο μάθημα για τον ηλεκτρισμό. Αναλύσαμε τις γραπτές απαντήσεις 32 φοιτητών στα ερωτήματα των έργων στα φύλλα εργασίας, 20 συνεντεύξεις και τις μαγνητοφωνημένες συζητήσεις. Από τους 32 φοιτητές (22 φοιτήτριες και 10 φοιτητές) είχαν παρακολουθήσει στην Γ΄ Λυκείου: **14** Β δέσμη (10 φοιτήτριες και 4 φοιτητές), **15** Γ δέσμη (10 φοιτήτριες και 5 φοιτητές) και **3** Δ δέσμη (2 φοιτήτριες και 1 φοιτητής).

4. Οι αρχικές νοητικές αναπαραστάσεις

Από τα σχέδια και τα σχόλια των φοιτητών στα ερωτήματα του έργου 2-2 προκύπτει (α) ότι οι περιγραφές όλων των φοιτητών δομούνται με βάση είτε τον απλό είτε τον γραμμικό αιτιακό συλλογισμό. Παραπέρα με βάση την μικροσκοπική εικόνα που έχουν διαμορφώσει για τους μονωτές στα έργα του πρώτου μέρους και την λεκτική περιγραφή που τους δόθηκε διακρίνουμε τρεις ομάδες με τις παρακάτω αρχικές αναπαραστάσεις:

α. Μονωτής

Οι 14 από τους 32 φοιτητές αναπαράγουν στα σχέδιά τους τη μικροσκοπική αναπαράσταση που έχουν διαμορφώσει για τους μονωτές, πολωμένους ή όχι, στα έργα του πρώτου μέρους, αγνοώντας εντελώς τα ελεύθερα ηλεκτρόνια των μετάλλων και τη δυνητικώς διαφορετική συμπεριφορά τους:



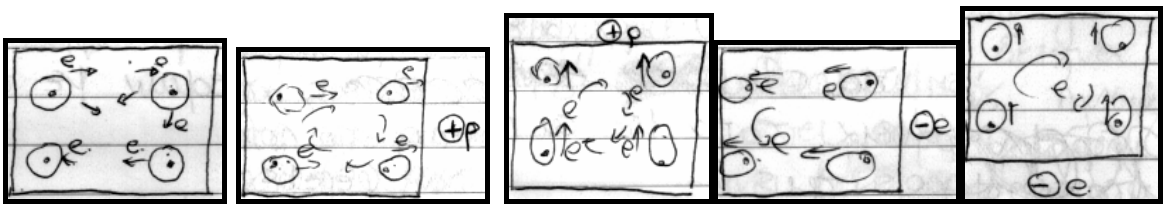
Εικόνα 2: Αναπαράσταση μονωτή [2838]

Στα σχόλιά τους πολλοί αναφέρουν τα ελεύθερα ηλεκτρόνια αλλά τα χειρίζονται ως ‘δεσμευμένα’ (Εικ.2 και απ.1):

απ.1 *Τα άτομα του μετάλλου έχουν τα θετικά ιόντα σχεδόν σταθερά στις θέσεις τους ενώ τα ηλεκτρόνια ελεύθερα.. Όταν πλησιάζουμε θετικό φορτίο τα θετικά ιόντα των ατόμων απομακρύνονται σε αντίθεση με τα ηλεκτρόνια τα οποία έλκονται απ’ το φορτίο. Όταν πλησιάζουμε αρνητικό φορτίο τα θετικά ιόντα των ατόμων πλησιάζουν λόγω έλξης ενώ τα ηλεκτρόνια απωθούνται. [2838]*

β. Μονωτής με ελεύθερα ηλεκτρόνια

Οι 9 από τους 32 φοιτητές αναπαράγουν στα σχέδιά τους για τα μέταλλα τη μικροσκοπική αναπαράσταση που έχουν διαμορφώσει για τους μονωτές αλλά συγχρόνως εξετάζουν και τη διαφορετική συμπεριφορά των ελευθέρων ηλεκτρονίων:



(α) (β) (γ) (δ) (ε)

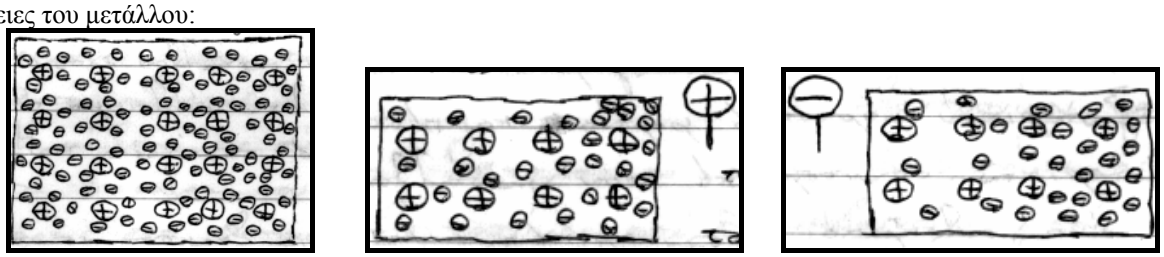
Εικόνα 3: Αναπαράσταση μονωτή με ελεύθερα ηλεκτρόνια [2838]

Όταν δεν επιδρά εξωτερικό φορτίο στο μέταλλο (εικ.3α), τα e των ατόμων του μεταπηδούν από άτομο σε άτομο (τυχαία). Πλησιάζουμε εξωτερικό θετικό φορτίο (εικ.3β και 3γ): Τα ηλεκτρονιακά νέφη των ατόμων μετατοπίζονται δεξιά και ορισμένα ελεύθερα e μπορεί να ξεφεύγουν από το πλέγμα του μετάλλου και έτσι να το φορτίζουν, εδώ, θετικά. Ομοίως στην εικόνα 3γ μετατοπίζονται προς τα πάνω. Η τυχαία κίνηση των e στα άτομα του μετάλλου συνεχίζεται. Πλησιάζουμε εξωτερικό αρνητικό φορτίο (εικ.3δ και εικ.3ε): Το αρνητικό εξωτερικό φορτίο απωθεί τα ηλεκτρονιακά νέφη, στη συγκεκριμένη περίπτωση (εικ.3δ) προς τα αριστερά και στην εικόνα 3ε προς τα πάνω. Τα e μεταπηδούν μεταξύ των ατόμων του μετάλλου. Καθώς όμως τα νέφη απομακρύνονται από την επιφάνεια επιρροής του εξωτερικού e είναι δυνατόν οι πυρήνες (θετικά φορτισμένα) να το συγκρατήσουν στο πλέγμα και έτσι το μέταλλο να μετατραπεί σε αρνητικό ιόν. [2858] **απ.2**

Από τα σχόλιά τους (απ.2) συνάγουμε ότι στην ομάδα αυτή οι φοιτητές εξετάζουν μόνον τις δράσεις του εξωτερικού φορτίου στα άτομα (όχι ιόντα) και στα ελεύθερα ηλεκτρόνια αλλά δεν προχωρούν στη δράση των ελευθέρων ηλεκτρονίων, εξαιτίας της συσσώρευσής τους στις εξωτερικές επιφάνειες του μετάλλου, πάνω στα άτομα.

γ. Ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια

Οι 7 από τους 32 φοιτητές δε χρησιμοποιούν καθόλου τη μικροσκοπική αναπαράσταση που έχουν για τους μονωτές, αλλά καταφεύγουν στην πιο εύχρηστη αναπαράσταση των ιόντων που είναι ακίνητα στο πλέγμα του μετάλλου με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να δέχονται μόνα αυτά τη δράση του εξωτερικού φορτίου. 2-3 από αυτούς, είτε στα σχέδια είτε στα σχόλιά τους, επισημαίνουν την εμφάνιση ελλείμματος/περίσσειας ηλεκτρονίων στις δύο απέναντι επιφάνειες του μετάλλου:



(α) (β) (γ)

Εικόνα 4: Αναπαράσταση με ιόντα και ελεύθερα ηλεκτρόνια [2739]

Τα ηλεκτρόνια μετακινούνται από το ένα άτομο του μετάλλου στο άλλο κατά τέτοιο τρόπο ώστε να διατηρείται η ισορροπία φορτίου σε καθένα από αυτά και συνολικά στο εσωτερικό του μετάλλου (εικ.4α). Στην πρώτη περίπτωση (εικ.4β) το θετικό φορτίο εξαναγκάζει τα ελεύθερα ηλεκτρόνια να πλησιάσουν στην πλευρά του. Έτσι δημιουργείται έλλειμμα-περίσσεια ηλεκτρονίων στην επιφάνεια του μετάλλου. Στη δεύτερη περίπτωση (εικ.4γ) το αρνητικό φορτίο προκαλεί άπωση των ηλεκτρονίων προς την αντίθετη πλευρά. [2739] **απ.3**

Οι περιγραφές των περισσοτέρων φοιτητών είναι οργανωμένες στη βάση του απλού αιτιακού συλλογισμού (απ.1 και 3). Σε ελάχιστες περιπτώσεις συναντάμε υπέρθεση απλών αιτιακών συλλογισμών (απ.2). Επίσης, σε καμιά περιγραφή δεν αναγνωρίζουμε 'ενόραση' κάποιας μεταβατικής κατάστασης.

5. Η αλληλεπίδραση με τις προσομοιώσεις

Από τις περιγραφές των φοιτητών για τις διαδικασίες που παρακολούθησαν στις προσομοιώσεις της πόλωσης μετάλλου σε ατομικό επίπεδο και τα σχόλιά τους για τις βασικές διαφορές ανάμεσα στα σχέδιά τους και στις προσομοιώσεις (έργο 2-3α) προκύπτουν οι παρακάτω διαπιστώσεις:

α. Σχεδόν όλοι οι φοιτητές (27 από τους 32 φοιτητές) αναγνωρίζουν ότι δεν σκέφτηκαν καθόλου τη συσσώρευση αντίθετων φορτίων στις δύο πλευρικές επιφάνειες του μετάλλου (απ.4).

Εγώ θεώρησα ότι κινείται το ηλεκτρονιακό νέφος, ενώ στην προσομοίωση κινούνται μόνο τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Επίσης στην προσομοίωση γίνεται λόγος για έλλειμμα ηλεκτρονίων, κάτι που δεν ανέφερα εγώ. Το σημαντικότερο όμως λάθος είναι ότι εγώ **απ.4**

νόμισα ότι κινείται όλο το νέφος των ηλεκτρονίων, ενώ στην προσομοίωση κινούνται μόνο λίγα ηλεκτρόνια δημιουργώντας από εκεί που φεύγουν έλλειμμα. [2761]

β. Σχεδόν όλοι οι φοιτητές που είχαν για τα μέταλλα την αναπαράσταση μονωτή με ελεύθερα ηλεκτρόνια παρατηρούν ότι στις προσομοιώσεις δεν μετατοπίζονται τα ηλεκτρονιακά νέφη των 'ατόμων' στο εσωτερικό του μετάλλου.

Παρατηρώ ακόμη ότι τα νέφη των ηλεκτρονίων (πράσινες σφαίρες) παραμένουν **απ.5** σταθερά όταν πλησιάζω τα φορτία, σε αντίθεση με το δικό μου σχήμα. [2756]

γ. Αντίθετα μόνον 5 φοιτητές εντοπίζουν την αρχική πόλωση των 'ατόμων' στο εσωτερικό του μετάλλου και περιγράφουν τη βαθμιαία επαναφορά των ηλεκτρονιακών νεφών.

Όταν πλησιάσουμε φορτίο εξωτερικό, αν είναι θετικό έλκει τα e στην επιφάνεια του **απ.6** μετάλλου αρχικά και από την "άλλη" τα θετικά έτσι ώστε να τα πολώνει. Το αντίθετο σε περίπτωση που φέρουμε αρνητικό εξωτερικό φορτίο. Τα νέφη που αρχικά έλκονται ή απωθούνται ανάλογα με το είδος του εξωτερικού φορτίου επανέρχονται σύμφωνα με την προσομοίωση στην αρχική τους θέση. [2858]

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης των μεταβολών των δυνάμεων που ασκούνται στα ελεύθερα ηλεκτρόνια (έργο 2-3β):

α. Επιπλέον 5 φοιτητές εντοπίζουν την βαθμιαία επαναφορά των ηλεκτρονιακών νεφών και την συνδέουν με την εξίσωση των δυνάμεων:

Βλέπουμε στην προσομοίωση ότι όταν φέρνουμε εξωτερικά ένα θετικό φορτίο η **απ.7** δύναμη που ασκεί το εξωτερικό φορτίο έλκει τα αρνητικά φορτία και τα ηλεκτρονιακά νέφη, στη συνέχεια όμως τα επιφανειακά θετικά φορτία που απωθούν ασκούν μια δύναμη που επαναφέρει τα νέφη στην πρότερή τους θέση, δηλ. εξισορροπούνται οι δυνάμεις που ασκούνται τόσο από το εξωτερικό φορτίο όσο και από τα επιφανειακά φορτία. [2733]

β. 19 φοιτητές επισημαίνουν την τελική εξίσωση των δυνάμεων που ασκούνται (απ.8), 8 δε από αυτούς θεωρούν ρητά τη διαδικασία βαθμιαία (απ.9 και 10):

Πρώτα ασκείται δύναμη από εξωτερικό φορτίο και ύστερα από τα επιφανειακά **απ.8** φορτία, η οποία δύναμη γίνεται ίση και αντίθετη με τη δύναμη του εξωτερικού φορτίου. [2814]

Πρώτα εμφανίζονται οι δυνάμεις που ασκεί το εξωτερικό φορτίο και σταδιακά **απ.9** αναπτύσσονται οι δυνάμεις των επιφανειακών φορτίων οι οποίες μεγαλώνουν ανάλογα με την συγκέντρωσή τους. [2854]

Στην προσομοίωση η πόλωση εξηγείται διαφορετικά: Όταν έχουμε θετικό **απ.10** εξωτερικό φορτίο, τότε αρχικά η δύναμη που ασκείται από αυτό είναι μεγαλύτερη. Σιγά-σιγά όμως, αναπτύσσεται μια αντίθετη δύναμη (την οποία ασκούν τα επιφανειακά φορτία), η οποία σταδιακά μεγαλώνει και τελικά γίνεται ίση με τη δύναμη του εξωτερικού φορτίου. Στην περίπτωση που έχουμε αρνητικό εξωτερικό φορτίο, τα θετικά φορτία έλκονται και τα αρνητικά απωθούνται. Έτσι, αναπτύσσεται αρχικά η δύναμη του εξωτερικού φορτίου με αντίθετη φορά από αυτή του εξωτερικού φορτίου. Σταδιακά εμφανίζεται και η αντίθετη δύναμη που ασκείται από τα επιφανειακά φορτία, η οποία τελικά γίνεται ίση. Μ' αυτόν τον τρόπο δίνεται η πόλωση. [1728]

Μετά την ολοκλήρωση της προσομοίωσης της πόλωσης μετάλλου σε μίκρο/μάκρο επίπεδο, από την συνεξέταση όλων των απαντήσεων και των σχολίων των φοιτητών μετά τις προσομοιώσεις προκύπτει ότι:

α. Όλοι σχεδόν οι φοιτητές αναγνωρίζουν, είτε θετικά είτε αρνητικά, είτε άμεσα (απ.13) είτε έμμεσα (απ.11, 12 και 14), τη διαφορετική σκοπιά μικροσκοπικής και μακροσκοπικής εξέτασης.

Στην πρώτη προσομοίωση απεικονίζονται και τα άτομα στο εσωτερικό του **απ.11** μετάλλου, δηλαδή στην πρώτη προσομοίωση απεικονίζονται οι πυρήνες και τα ηλεκτρονιακά νέφη των ατόμων. Αυτά δεν απεικονίζονται στη δεύτερη προσομοίωση. Η δεύτερη προσομοίωση απεικονίζει επίσης πώς μεταβάλλονται σταδιακά οι δυνάμεις με τη μεταβολή της απόστασης του εξωτερικού φορτίου. Θεωρώ τη δεύτερη προσομοίωση πιο καλή από την πρώτη. [2861]

Θετικά της τελευταίας προσομοίωσης είναι η παρουσία των δυνάμεων και η κίνηση **απ.12** του εξωτερικού φορτίου. Στις προσομοιώσεις τις παλαιότερες θεωρώ πως ήταν καλύτερα παριστάμενη η συμπεριφορά κυρίως των ηλεκτρονίων. [2924]

Η διαφορά είναι πως εδώ είναι πιο σαφής η σχηματοποίηση της πόλωσης, είναι μια **απ.13** άποψη περισσότερο μακροσκοπική θα λέγαμε αλλά μας δίνει και την μικροσκοπική διάσταση, και μας δείχνει την εξέλιξη του φαινομένου, υπάρχει δηλαδή επιπλέον το στοιχείο της κίνησης και φαίνεται καλύτερα η διαδοχή των φαινομένων, η ισχύς του νόμου του Coulomb. Υστερεί βέβαια ως προς την μικροσκοπική προσέγγιση του θέματος σε σχέση με προηγουμένως. [2867]

Ο δεύτερος τρόπος προσομοίωσης είναι πολύ γενικότερος από τον πρώτο και πιο **απ.14** απλός. Γίνεται πιο εύκολα κατανοητός και πιστεύω ένα μεγάλο πλεονέκτημά του είναι ότι φαίνεται τι συμβαίνει στο εσωτερικό των μετάλλων (δηλ. στα άκρα πόλωση και στη μέση ουδέτερο). Βέβαια η πρώτη προσομοίωση είναι πιο ειδική σε επίπεδο ατόμων. Εξαρτάται από ποια πλευρά θέλει να προσεγγίσει το θέμα ώστε να προτιμήσει έναν από τους δύο τύπους. [2854]

β. Οι περισσότεροι φοιτητές αναγνωρίζουν ότι η πόλωση δεν συμβαίνει ακαριαία αλλά εξελίσσεται στο χρόνο και στο χώρο με κάποια μεγέθη να αλλάζουν τιμές (απ.11 και 13). Επομένως, οι περισσότεροι φοιτητές, άλλος σε μεγαλύτερο και άλλος σε μικρότερο βαθμό, φθάνουν μετά τις προσομοιώσεις στην 'κατασκευή' μιας μεταβατικής κατάστασης ανάμεσα στην αρχή και το τέλος του φαινομένου.

γ. Αρκετοί φοιτητές αναγνωρίζουν ότι υπάρχει αιτιώδης αλληλεξάρτηση μεταξύ μεγεθών, κατά τη διάρκεια της μεταβατικής κατάστασης, των οποίων οι τιμές αλλάζουν παράλληλα, όμως οι περισσότεροι εστιάζουν το ενδιαφέρον τους στην εξέλιξη του ενός από τα δύο μεγέθη (επιφανειακά φορτία και μετατόπιση του ηλεκτρονιακού νέφους στις απ.7, 9 και 10). Άλλοι πάλι εστιάζουν στην αλληλεξάρτηση αυτή μόνον κατά τη χρονική στιγμή της αρχής και του τέλους της μεταβατικής κατάστασης (απ.7 και 8).

6. Σύνοψη αποτελεσμάτων - Συζήτηση

Συνοψίζοντας τα στοιχεία για τις αρχικές αναπαραστάσεις των φοιτητών πριν την αλληλεπίδρασή τους με τις προσομοιώσεις μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι:

23 από τους 32 φοιτητές (~72%) χρησιμοποιούν και για τα μέταλλα τις μικροσκοπικές αναπαραστάσεις που προσέφεραν οι προσομοιώσεις των προηγούμενων έργων για τους μονωτές. Μόνον 9 από αυτούς τους φοιτητές επιχειρούν να πάρουν υπόψη τους και τη συμπεριφορά των ελεύθερων ηλεκτρονίων. Όμως η επιτυχία τους σε αυτό το εγχείρημα είναι μερική γιατί εξετάζουν βέβαια τη δράση του εξωτερικού φορτίου πάνω στα άτομα του εσωτερικού του μετάλλου και πάνω στα ελεύθερα ηλεκτρόνια αλλά δεν συνάγουν την συσσώρευση των αντίθετων φορτίων στις αντίθετες πλευρές του μετάλλου ούτε επομένως φθάνουν στην εξέταση της δράσης αυτών των συσσωρεύσεων πάνω στα άτομα στο εσωτερικό του μετάλλου.

7 από τους 32 φοιτητές (~22%) καταφεύγουν στην αναπαράσταση που τους προσφέρει η λεκτική περιγραφή του έργου για τα μέταλλα (σταθερά θετικά ιόντα και ευκίνητα ελεύθερα ηλεκτρόνια) η οποία είναι πιο εύχρηστη και ταυτόσημη με αυτήν που έχει προσφερθεί στο σχολείο. Καθώς οι περισσότεροι από αυτούς προέρχονται από τη Β δέσμη της Γ΄ Λυκείου μπορούμε να υποθέσουμε ότι η σχολική αυτή αναπαράσταση είναι ενεργή στους φοιτητές που έχουν ισχυρότερες βάσεις στις θετικές επιστήμες από τη σχολική τους εκπαίδευση και καταφεύγουν σε αυτήν όταν συναντούν τις δυσκολίες που περιγράψαμε στην προηγούμενη παρατήρηση.

Σε καμιά περιγραφή δεν αναγνωρίζουμε 'ενόραση' κάποιας μεταβατικής κατάστασης που θα αναδείκνυε την ακαταλληλότητα του απλού αιτιακού συλλογισμού ως βάση για την περιγραφή της και την αναγκαιότητα ανάπτυξης ενός άλλου τύπου αιτιακού συλλογισμού που θα έδινε αυτή τη δυνατότητα. Έτσι, οι περιγραφές όλων των φοιτητών δομούνται με βάση τον απλό αιτιακό συλλογισμό.

Σχεδόν όλοι οι φοιτητές δεν έχουν πλήρη την κλασική αναπαράσταση του πολωμένου μετάλλου με τις δύο απέναντι πλευρές του επιφανειακά φορτισμένες.

Συνοψίζοντας τα στοιχεία για την εξέλιξη των αναπαραστάσεων των φοιτητών κατά την αλληλεπίδρασή τους με τις προσομοιώσεις μπορούμε να παρατηρήσουμε:

Όταν οι προσομοιώσεις αναφέρονται μόνο στην συμπεριφορά των μικροσκοπικών οντοτήτων (έργο 2-3α) μικρό ποσοστό (16%) αναγνωρίζει την 'ύπαρξη' μεταβατικής κατάστασης μέσα από τη βαθμιαία εξέλιξη της συμπεριφοράς των μικροσκοπικών οντοτήτων. Όταν όμως οι προσομοιώσεις αναφέρονται και στην εξέλιξη του αιτίου της συμπεριφοράς (έργο 2-3β) το ποσοστό αυτό αυξάνει σημαντικά (60%) και οι μισοί περίπου από αυτούς (42%) συνδέουν την εξέλιξη του αιτίου με την εξέλιξη της συμπεριφοράς των μικροσκοπικών οντοτήτων που προκαλεί.

Η παραπάνω παρατήρηση συμφωνεί με την υπόθεση που έχουμε διατυπώσει σε προηγούμενη εργασία μας για την επίδραση των προσομοιώσεων (Μπάρμπας, υπό δημοσίευση): Μια προσομοιούμενη συμπεριφορά ενός μικροσκοπικού φυσικού συστήματος εντοπίζεται και παρατηρείται ευκολότερα όταν είναι γνωστή η αιτιότητα στην οποία βασίζεται η περιγραφή-εξήγησή της. Όταν όμως δεν είναι γνωστή τότε τις μεγαλύτερες δυσκολίες τις συναντούν οι φοιτητές με τις λιγότερο επεξεργασμένες αναπαραστάσεις μικροσκοπικών διαδικασιών.

Τέλος, ως προς το ρόλο των προσομοιώσεων και την επίδρασή τους στις αναπαραστάσεις των φοιτητών, από τη σύγκριση των αναπαραστάσεων των φοιτητών πριν και μετά την αλληλεπίδρασή τους με τις προσομοιώσεις μπορούμε να συμπεράνουμε ότι:

Ο σχεδιασμός και η διαδοχή της σειράς των τριών απλών προσομοιώσεων φαίνεται ότι υποστηρίζουν την πορεία των φοιτητών προς την ανάπτυξη κυκλικών αιτιακών συλλογισμών (Barbas, Koumaras, & Psillos, 1995) αφού διευκολύνουν (α) την αναγνώριση των δύο διαφορετικών επιπέδων εξέτασης του φαινομένου, του μικροσκοπικού και του μακροσκοπικού, (β) τη 'νοητική κατασκευή' μεταβατικής κατάστασης ανάμεσα στην αρχή και στο τέλος του φαινομένου, (γ) την αναγνώριση της παράλληλης αιτιώδους συμμεταβολής διαφορετικών μεγεθών, μέσα στην κατασκευασμένη μεταβατική κατάσταση. Έτσι, η αλληλεπίδραση με τις τρεις προσομοιώσεις είναι αναγκαία ώστε να διαμορφωθούν οι προϋποθέσεις για την εξελικτική αυτή πορεία των φοιτητών. Όμως, δεν φαίνεται να είναι από μόνη

της ικανή για την ολοκλήρωση αυτής της πορείας όπως δείχνουν οι απόπειρες περιγραφής της αιτιώδους αλληλεξάρτησης μεταξύ μεγεθών, κατά την μεταβατική κατάσταση, κατά τις οποίες, όπως ήδη σημειώσαμε, οι φοιτητές εστιάζουν το ενδιαφέρον τους είτε στην εξέλιξη του ενός μεγέθους είτε στην αλληλεξάρτηση μόνον κατά την αρχή και το τέλος της μεταβατικής κατάστασης. Αυτό το γεγονός οριοθετεί και τη σημασία των τριών προσομοιώσεων στην κατανόηση των αλληλεπιδράσεων μικροσκοπικών οντοτήτων.

Βιβλιογραφία

Barbas, A., & Psillos, D. (1993). Designing a computer-based course on basic electricity for prospective primary school teachers. Στο P. L. Lijnse (επιμ.), *European Research in Science Education. Proceedings of the first Ph.D. Summerschool*. Utrecht: Cd-ß Press.

Barbas, A., Koumaras, P., & Psillos, D. (1994): Integrating computer software tools in learning environments for meaningful learning. Στο Στ. Βοσνιάδου (επιμ.), *Psychological and Educational Foundations of Technology-Based Learning Environments*, NATO ASI series F, Vol.137. Berlin: Springer-Verlag.

Barbas, A., Koumaras, P., & Psillos, D. (1995, April). *A causal approach for relating equilibrium to change in electrical circuits*. Paper presented at the European Conference on Research in Science Education, Leeds, UK.

Barbas, A., & Psillos, D. (1997). Causal reasoning as a base for advancing a systemic approach to simple electrical circuits. *Research in Science Education 27*(3), 445-459.

Eylon, B.-S., & Ganiel, U. (1990). Macro-micro relationships: The missing link between electrostatics and electrodynamics in students' reasoning. *International Journal of Science Education*, *12*(1), 79-94.

Frederiksen, J. R., & White, B.Y. (1992*).* Mental models and understanding: A problem for science education. Στο E. Scanlon & T. O'Shea (επιμ.). *New Directions in Educational Technology*, NATO ASI Series F: Computer and Systems Sciences, Vol. 96. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Halbwachs, F. (1971). Causalité linéaire et causalité circulaire en physique. Στο M. Bunge, F. Halbwachs, Th. S. Kuhn, J. Piaget, & L. Rosenfeld (επιμ.), *Les Théories de la Causalité*. Paris: Presses Universitaires de France.

Vosniadou, S. (1992). Fostering conceptual change: The role of computer-based environments. Στο E. DeCorte., M. C. Linn, H. Mandl, & L. Verschaffel (επιμ.), *Computer-based learning environments and problem solving*, NATO ASI Series F: Computer and Systems Sciences, Vol. 84. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag.

Μπάρμπας, Α. (υπό δημοσίευση): Η επίδραση προσομοιώσεων μικροσκοπικών αλληλεπιδράσεων στη διαμόρφωση νοητικών αναπαραστάσεων κατάλληλων για ποιοτικές ή/ και ημι-ποσοτικές ε-ξηγήσεις στον στατικό ηλεκτρισμό. *Πρακτικά 1ου Πανελληνίου Συνεδρίου «Διδακτική των Φυσικών Επιστημών και Εφαρμογή των Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση»*. Θεσσαλονίκη, 29-31/5, 1998.