ePublishing
ΕΘΝΙΚΟ ΚΕΝΤΡΟ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗΣ
NATIONAL DOCUMENTATION CENTRE

Πανελλήνιο Συνέδριο της Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών και Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση

Τόμ. 13 (2024)

13ο Πανελλήνιο Συνέδριο Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών και Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση: ΠΡΑΚΤΙΚΑ

Μικροσκοπική προσέγγιση της εντροπίας μέσω του παραδείγματος της τήξης του πάγου

Βάια Μπακάλη, Στέφανος Ασημόπουλος

doi: 10.12681/codiste.6814

https://epublishing.ekt.gr | **e-Εκδότης:** ΕΚΤ | **Πρόσβαση:** 13/12/2025 14:12:53

ΜΙΚΡΟΣΚΟΠΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΤΗΣ ΕΝΤΡΟΠΙΑΣ ΜΕΣΩ ΤΟΥ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΤΗΞΗΣ ΤΟΥ ΠΑΓΟΥ

Βάια Μπακάλη[1], Στέφανος Ασημόπουλος[2]

[1]Υποψ. Διδάκτορας ΠΤΔΕ Παν. Θεσσαλίας, [2] Επίκουρος Καθηγητής ΠΤΔΕ Παν. Θεσσαλίας

vana.bakali@gmail.com

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στοχεύοντας στην εννοιολογική κατανόηση της εντροπίας και των εμπλεκόμενων με αυτή εννοιών σε μια μικροσκοπική προσέγγιση, αναπτύχθηκε μια Διδακτική Μαθησιακή Ακολουθία. Οι εκπαιδευόμενες, φοιτήτριες Παιδαγωγικού τμήματος, με αφετηρία τις έννοιες που έχουν διδαχθεί και τα μοντέλα που χρησιμοποίησαν στις προηγούμενες ενότητες της ΔΜΑ, κλήθηκαν να αιτιολογήσουν τη μεταβολή της εντροπίας στο φαινόμενο της τήξης του πάγου. Αναλύοντας και ερμηνεύοντας τον λόγο και τα προτεινόμενα μοντέλα τους, αναδείχθηκαν οι εξελισσόμενες αντιλήψεις τους αναφορικά με τις έννοιες και οι δυσκολίες που αντιμετώπισαν με τα εν λόγω μοντέλα. Τα δεδομένα αυτά υπέδειξαν αλλαγές που εισάγονται στη σχεδιασμένη ΔΜΑ μετά την πιλοτική εφαρμογή της.

Λέξεις κλειδιά: εντροπία, κατάσταση, μικροσκοπικό μοντέλο

MICROSCOPIC APPROACH TO ENTROPYTHROUGH THE ICE MELTING EXAMPLE

Vaia Bakali[1], Stefanos Asimopoulos[2]

[1] PhD candidate, Department of Primary Education University of Thessaly, [2]Assistant Professor, Department of Primary Education University of Thessaly

vana.bakali@gmail.com

ABSTRACT

Aiming at the conceptual understanding of entropy and the concepts involved in it within a microscopic approach, a Teaching Learning Sequence was developed. Taking as a starting point the concepts taught and the models used in the previous units of TLS, the trainees, students of the Primary Education Department, were asked to justify the change of entropy in the ice melting process. Through analyzing and interpreting their discourse and proposed models, their evolving understanding of the concepts and the difficulties they encountered with these models were emerged. These data indicated changes introduced in the TLS designed after its pilot implementation.

Keywords: entropy, state, microscopic model

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η αφηρημένη φύση της έννοιας της εντροπίας (Carson & Watson, 2002) επάγει δυσχέρεια στην ερμηνεία της και οδηγεί σε προτάσεις και εφαρμογή διαφορετικών προσεγγίσεων είτε σε μακροσκοπικό είτε σε μικροσκοπικό επίπεδο είτε, με τη χρήση μεταφορών και αναλογιών για τη μελέτη της, όπως «energy dispersal» (Lambert, 2006), «spreading» (Leff, 2007), «information» (Brissaud, 2005) και «freedom» (Styer, 2000). Η μικροσκοπική προσέγγισή της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη χρήση μοντέλων της ύλης, προϋποθέτει τη δημιουργία κατάλληλων συνδέσεων ανάμεσα σε δυο επίπεδα περιγραφής, το μακροεπίπεδο και το μικροεπίπεδο και κατανόηση σε αυτά εννοιών όπως σύστημα, μεταβλητή και κατάσταση. Σύμφωνα με τον Reif (1999) η προσέγγιση αυτή διευκολύνει την κατανόηση των υποκείμενων μηχανισμών μακροσκοπικών εννοιών, όπως η εντροπία και την κατασκευή οπτικοποιήσιμων νοητικών μοντέλων από τους φοιτητές.

Για τη διευκόλυνση της εννοιολογικής κατανόησης της εντροπίας και των εννοιών που προαναφέρονται, σχεδιάστηκε και εφαρμόστηκε μια Διδακτική Μαθησιακή Ακολουθία (Teaching Learning Sequence) (Méheut & Psillos, 2004) σε φοιτήτριες Παιδαγωγικού Τμήματος. Στην παρούσα εργασία περιγράφονται οι αλλαγές που εισάγονται στην τρίτη ενότητα της σχεδιασμένης ΔΜΑ που αφορά στο φαινόμενο της τήξης του πάγου μετά την πιλοτική εφαρμογή της και τα δεδομένα που υποδεικνύουν αυτές τις αλλαγές.

ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Χρησιμοποιώντας ως πλαίσιο το Μοντέλο της Διδακτικής Αναδόμησης (Komorek & Duit, 2004˙ Méheut & Psillos, 2004) για τη συλλογή των δεδομένων εφαρμόστηκε το διδακτικό πείραμα σε ζευγάρια φοιτητριών 5ου και 7ου εξαμήνου. Κατά τη διάρκεια των προηγούμενων εξαμήνων οι φοιτήτριες είχαν διδαχθεί βασικές έννοιες, όπως ενέργεια, θερμοκρασία, θερμότητα, και στο μάθημα της Διδακτικής Φυσικών Επιστημών μελέτησαν μοντέλα που αφορούν στην ατομική δομή της ύλης.

Πίνακας 1. Συνοπτική δομή της ΔΜΑ

ΕΝΟΤΗΤΕΣ	ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ - ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ	ΕΝΝΟΙΕΣ
Διδακτική προσέγγιση εννοιών μέσω φαινομένου διάχυσης χρωστικής σε νερό	Μακροσκοπική παρατήρηση – μοντελοποίηση φαινομένου	Μεταβλητές, κατάσταση, σύστημα – περιβάλλον, ισορροπία
	Μικροσκοπική προσέγγιση Μοντελοποίηση μικροκαταστάσεων	Μακροκατάσταση, μικροκατάσταση, μεταβλητές, μακροκατάσταση ισορροπίας, εντροπία
Διδακτική προσέγγιση εννοιών μέσω φαινομένου θερμικής επαφής δυο στερεών κύβων διαφορετικής θερμοκρασίας	Μακροσκοπική περιγραφή φαινομένου Μοντελοποίηση στερεού Κβάντωση ενέργειας	Θερμική ισορροπία, (απομονωμένο) σύστημα – περιβάλλον, μακροκατάσταση, μεταβλητές, ενέργεια
	Μικροσκοπική προσέγγιση Μοντελοποίηση μικροκαταστάσεων	Μακροκατάσταση, μικροκατάσταση, μεταβλητές, ενέργεια, θερμική ισορροπία, εντροπία
Εφαρμογή εννοιών στο φαινόμενο τήξης του πάγου	Μακροσκοπική περιγραφή φαινομένου Μικροσκοπική προσέγγιση Μοντελοποίηση μικροκαταστάσεων	Μακροκατάσταση, μικροκατάσταση, μεταβλητές, ενέργεια, μακροκατάσταση ισορροπίας, εντροπία
Συζήτηση	Εντυπώσεις - προβληματισμοί	Όλες

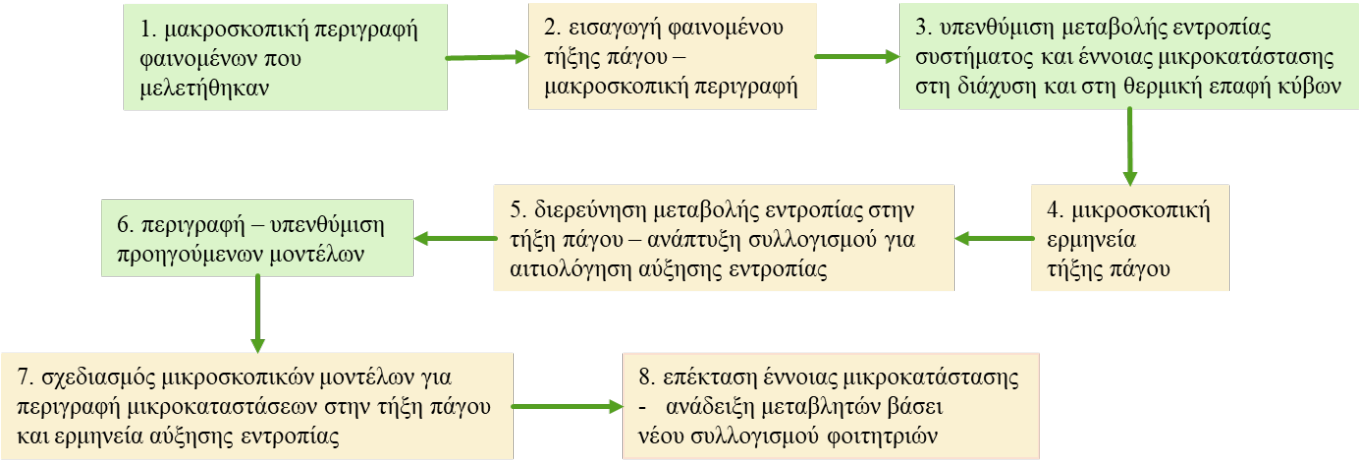
Σύμφωνα με το Μοντέλο της Διδακτικής Αναδόμησης η θεωρία αναλύθηκε τόσο από επιστημονική όσο και από εκπαιδευτική άποψη με αποτέλεσμα τη διαμόρφωση ενός συνόλου «στοιχειωδών» εννοιών και των σχέσεων μεταξύ τους, που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάπτυξη της ΔΜΑ. Στις προαναφερθείσες έννοιες συμπεριλαμβάνονται τόσο έννοιες που είχαν προκαθοριστεί κατά το σχεδιασμό της ΔΜΑ βάσει της ανάλυσης

της θεωρίας, όπως μικροκατάσταση, όσο και έννοιες στενά συνδεδεμένες με τις προηγούμενες, που εμφανίζονται στα δεδομένα της ανάλυσης, όπως μόριο ή θέση μορίου που συνδέονται με την έννοια της μικροκατάστασης. Παράλληλα διαμορφώθηκαν μικροσκοπικά μοντέλα στα οποία οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις προκύπτουν όχι μόνο ως διαφορετικοί τρόποι διάταξης των μορίων στις δυνατές θέσεις (spatial configurations) αλλά και ως διαφορετικοί τρόποι κατανομής της ενέργειας στα μόρια (energy distributions) (Carson & Watson, 2002˙ Haglund & Jeppsson, 2012). Κατά τις πρώτες δύο ενότητες της ΔΜΑ, προσεγγίζονται διδακτικά οι έννοιες μέσω των φαινομένων της διάχυσης χρωστικής σε νερό και της θερμικής επαφής δυο στερεών κύβων διαφορετικής θερμοκρασίας ενώ για την τελική αξιολόγηση της ΔΜΑ, στην τρίτη ενότητα, μελετάται το φαινόμενο της τήξης του πάγου όπου οι φοιτήτριες καλούνται να προτείνουν μοντέλα για την ερμηνεία της μεταβολής της εντροπίας (Πίνακας 1). Η ΔΜΑ εφαρμόστηκε πιλοτικά σε ζευγάρι φοιτητριών (αναφέρονται στην εργασία ως ΣΠ1 και ΣΠ2) και η τρίτη διδακτική ενότητα αναπτύχθηκε κατά την 5η συνάντηση η οποία είχε διάρκεια δυο ώρες.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

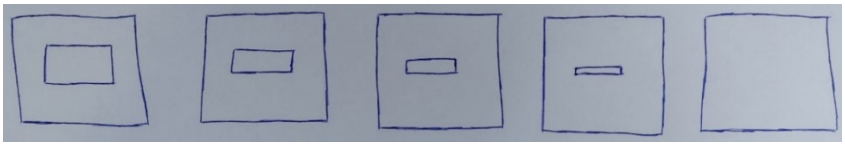
Η ερευνήτρια εισάγει το φαινόμενο (Σχήμα 1, βήμα 2) απευθύνοντας την ερώτηση: *«ας υποθέσουμε ότι έχουμε ένα παγάκι, το βγάζουμε από την κατάψυξη, έστω ότι η αρχική του θερμοκρασία είναι Θ=0 ºC και το τοποθετούμε σε ένα ποτήρι σε ένα χώρο με θερμοκρασία Θ=20 ºC. Τι θα συμβεί; Τι θα παρατηρήσουμε;»* και οι φοιτήτριες περιγράφουν μακροσκοπικά, χωρίς να χρησιμοποιήσουν τον όρο μακροκατάσταση, η οποία έχει εισαχθεί στην 1η ενότητα, ή να προτείνουν μεταβλητές της, όπως θερμοκρασία, όγκος στερεού, όγκος υγρού.

Σχήμα 1. Βήματα που ακολουθήθηκαν για τη μικροσκοπική προσέγγιση της εντροπίας στο φαινόμενο της τήξης του πάγου



Η ίδια δεν επιδεικνύει κάποιες μακροκαταστάσεις ούτε προτρέπει τις φοιτήτριες να σχεδιάσουν μερικές. Ωστόσο όταν μετέπειτα (Σχήμα 1, βήμα 7) κλήθηκαν να αιτιολογήσουν την αύξηση της εντροπίας προτείνοντας μικροσκοπικά μοντέλα, σχεδίασαν μακροκαταστάσεις (Σχήμα 2) αλλά δεν διερευνήθηκε ποιες είναι οι μεταβλητές που παρατηρούν μακροσκοπικά και πώς αυτές συνδέονται με τις μικροκαταστάσεις.

Σχήμα 2. Μακροσκοπική περιγραφή τήξης πάγου από τη φοιτήτρια ΣΠ1



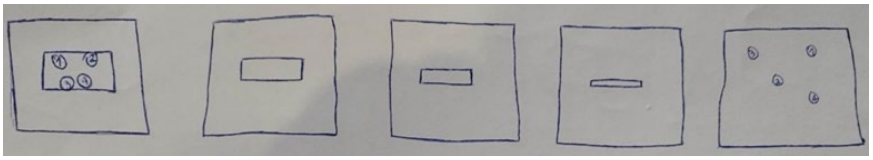
Σχήμα 3. φωτογραφία: πάγος 0 ^{O}C

Στον νέο κύκλο διδασκαλιών επιδεικνύεται στις φοιτήτριες φωτογραφία με μια αρχική μακροκατάσταση του συστήματος (Σχήμα 3) ώστε να σχεδιάσουν οι ίδιες μακροκαταστάσεις που περιγράφουν την εξέλιξη της τήξης, τόσες όσες θεωρούν αναγκαίες για να αναδειχτούν οι μεταβλητές που τις περιγράφουν, εξυπηρετώντας έτσι την ομαλή μετάβαση από το μακροεπίπεδο στο μικροεπίπεδο. Ο σχεδιασμός των μακροκαταστάσεων αρχικά, αλλά και των μικροκαταστάσεων στη συνέχεια, διευκολύνεται χρησιμοποιώντας στη φωτογραφία μια παγοθήκη με σταθερό σχήμα κύβου.

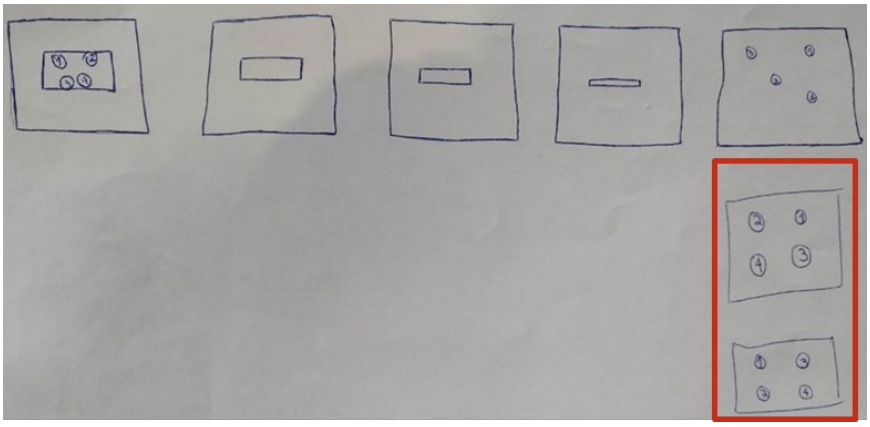
Κατά τη μικροσκοπική περιγραφή της τήξης του πάγου (Σχήμα 1, βήμα 4), οι δύο φοιτήτριες επισημαίνουν αύξηση της ταχύτητας ή της κινητικής ενέργειας των μορίων εξαιτίας της αύξησης της θερμοκρασίας και αναφέρονται σε αλλαγή θέσεων των μορίων. Για την αιτιολόγηση της αύξησης της εντροπίας (Σχήμα 1, βήμα 5) εκφράζουν τον ακόλουθο συλλογισμό: τα μόρια στα υγρά έχουν μεγαλύτερη ελευθερία κίνησης συνεπώς καταλαμβάνουν περισσότερες δυνατές θέσεις με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός δυνατών τρόπων διάταξής τους σε αυτές. Συγκεκριμένα επισημαίνουν, η ΣΠ1: *«η εντροπία θα αυξηθεί αφού όταν ήταν το παγάκι στο ψυγείο ήταν στερεό οπότε τα μόρια είχανε συγκεκριμένες θέσεις οπότε δεν άλλαζε η κατανομή ναι ήταν ακίνητα δηλ. δεν μπορούσαν να πάρουν κάποια άλλη θέση, αλλά μόλις το παγάκι άρχισε να λιώνει τα μόρια κινήθηκαν άρα οι θέσεις τους άλλαξαν άρα δεν υπάρχουν πολλοί δυνατοί τρόποι ώστε να κατανεμηθούν τα μόρια; Άρα υπάρχουν και πολλές μικροκαταστάσεις»* και η ΣΠ2: *«ναι συμφωνώ με αυτό που λέει, πιστεύω ότι όσο ήταν σε στερεή μορφή τα μόρια του νερού είχαν συγκεκριμένες θέσεις αλλά εφόσον μετατράπηκε σε υγρό λόγω της κινητικότητας των μορίων τα μόρια λαμβάνουν διαφορετικές θέσεις οπότε έχουμε περισσότερες μικροκαταστάσεις».* Είναι εμφανές ότι αποδίδουν την αύξηση της εντροπίας στην αύξηση του αριθμού των μικροκαταστάσεων λόγω αύξησης αριθμού δυνατών θέσεων αλλά παραβλέπουν την αύξηση του αριθμού των τρόπων κατανομής ενέργειας στα μόρια. Τα μικροσκοπικά μοντέλα που προτείνουν (Σχήμα 1, βήμα 7), ώστε να δείξουν πώς προκύπτουν οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη μακροκατάσταση, καταδεικνύουν: α. σχεδιασμό των μορίων του υγρού σε διαφορετικές θέσεις αλλά απουσία αναπαράστασης της αύξησης της ταχύτητας- ενέργειας του κάθε μορίου στερεού ή υγρού και β. σχεδιασμό των μορίων του υγρού σε τυχαίες θέσεις σύμφωνα με το σωματιδιακό μοντέλο (deVos & Verdonk 1996) καθιστώντας αδύνατο τον ορισμό συγκεκριμένων μικροκαταστάσεων και την καταμέτρηση αυτών.

Σχήμα 4. Μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν σε αρχική και τελική μακροκατάσταση

α) μόρια υγρού σε τυχαίες θέσεις



β) μόρια υγρού διατεταγμένα (σαν σε πλέγμα θέσεων)

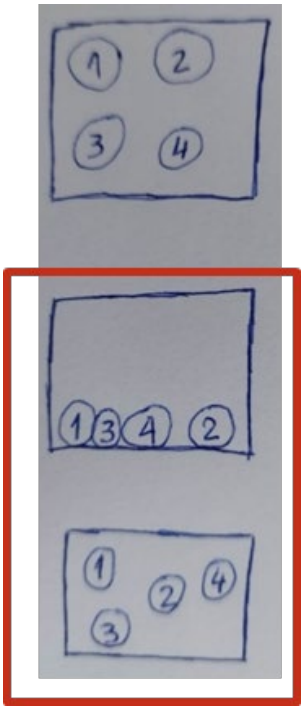


Συγκεκριμένα η ΣΠ1 συμπληρώνει την αρχική και τελική κατάσταση με μόρια (Σχήμα 4α) περιγράφοντας: *«αν βάλουμε 4 μόρια, κανονικά θα έπρεπε να είναι κολλημένα ώστε να αποτελούν το στερεό, οπότε μετά (υγρό) μπορούσαμε να τα αλλάξουμε θέση αλλά για να φανεί αυτό να βάζαμε χρώμα…αριθμούς».* Μετά από την παρέμβαση της ερευνήτριας, προσθέτει 2 επιπλέον μικροκαταστάσεις (κόκκινο πλαίσιο σχήματος 4β) που αντιστοιχούν στην τελική μακροκατάσταση με τα μόρια του νερού σε διαφορετικές θέσεις αλλά διατεταγμένα, σαν να υπάρχει ένα νοητό πλέγμα θέσεων.

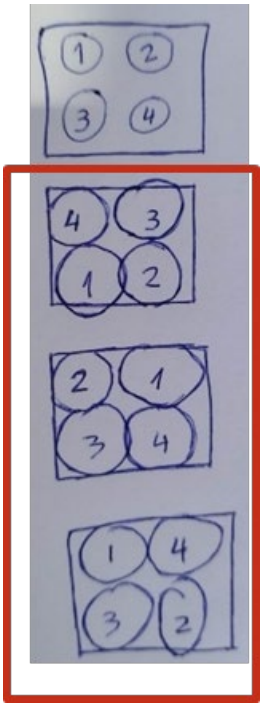
Η ΣΠ2 για την αναπαράσταση των μορίων στον πάγο και στο νερό (υγρό) προτείνει *«αν κάνουμε τα μπαλάκια σκόρπια (στο υγρό) ενώ στο στερεό σε σχήμα κύβου;»* και εξηγεί: *«(στο υγρό) τα μόρια αλλάζουν θέσεις… περισσότερες μικροκαταστάσεις».* Παράλληλα σχεδιάζει τα μόρια του υγρού σε τυχαίες θέσεις (Σχήμα 5α) και μετά από την παρέμβαση της ερευνήτριας αντικαθιστά τις δυο μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στην τελική μακροκατάσταση (Σχήμα 5α, κόκκινο πλαίσιο) με τρεις μικροκαταστάσεις (Σχήμα 5β, κόκκινο πλαίσιο) με τα μόρια του υγρού να αλλάζουν θέσεις αλλά να είναι διατεταγμένα σαν σε πλέγμα θέσεων.

Σχήμα 5. Μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στην τελική μακροκατάσταση

α μόρια υγρού σε τυχαίες θέσεις

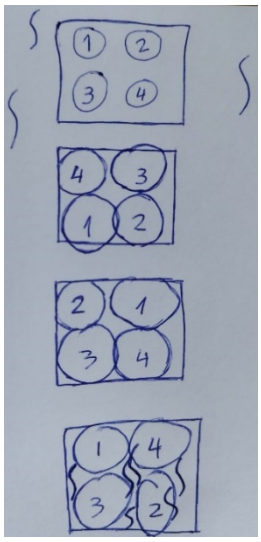


β μόρια υγρού διατεταγμένα (σαν σε πλέγμα θέσεων)



Παρόλο που έχει γίνει προεργασία για να εισάγουν και την ενέργεια στην ερμηνεία της αύξησης της εντροπίας, αυτό δε γίνεται εξαρχής. Οι φοιτήτριες φαίνεται να έχουν εστιάσει στην μεταφορική κίνηση - τα μόρια στο υγρό κινούνται, στο στερεό δεν κινούνται - και δε λαμβάνουν υπόψη την ενέργεια των μορίων στο στερεό εξαιτίας της ταλάντωσής τους. Μόνο όταν η ερευνήτρια υπενθυμίζει την απορρόφηση ενέργειας του πάγου από το περιβάλλον (Σχήμα 1, βήμα 8) η ΣΠ2, σε αναλογία με την αναπαράσταση της ενέργειας με ζεύγος καμπυλών στη θερμική επαφή των κύβων, προτείνει *«αν βάζαμε εξωτερικά γραμμούλες και μετά τις γραμμούλες τις βάζαμε μέσα;»* και προσθέτει στο σχέδιό της (Σχήμα 6) γραμμούλες, για να αναπαραστήσει την απορρόφηση ενέργειας από το παγάκι. Παράλληλα για την αύξηση του αριθμού των μικροκαταστάσεων επισημαίνει: «*η ενέργεια μπορεί να κατανεμηθεί με διάφορους τρόπους … στην αρχή μπορεί να μην είχε, είχε πολύ λιγότερη ενέργεια άρα λιγότερες μικροκαταστάσεις.*

Σχήμα 6. Προσθήκη αναπαράστασης ενέργειας στις μικροκαταστάσεις



Στον νέο κύκλο διδασκαλιών οι φοιτήτριες καλούνται να προτείνουν οι ίδιες τρόπους αναπαράστασης της κίνησης των μορίων στο στερεό, ήδη από τη δεύτερη ενότητα, της θερμικής επαφής των δυο κύβων, ώστε από εκεί να γίνει η σύνδεση της κίνησης με την ενέργεια. Επιδεικνύοντας στη συνέχεια το μοντέλο του στερεού που προτάθηκε στη θερμική επαφή των κύβων, καθοδηγούνται σε μια νέα νοητική αναπαράσταση όπου δίνεται έμφαση στην ταλάντωση των μορίων του στερεού η οποία υποδηλώνεται με τη χρήση αντιδιαμετρικών καμπυλών. Διευκολύνεται με αυτόν τον τρόπο η μετάβαση στο μοντέλο ενός υγρού που τα μόριά του θα αλλάζουν θέσεις σε ένα πλέγμα και ταυτόχρονα αντιστοιχεί σ΄ αυτό ένα ποσό ενέργειας που κατανέμεται με διαφορετικό τρόπο στα μόρια. Ως εκ τούτου οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις προκύπτουν όχι μόνο ως διαφορετικοί τρόποι διάταξης των μορίων στις δυνατές θέσεις (spatial configurations) αλλά και ως διαφορετικοί τρόποι κατανομής της ενέργειας στα μόρια (energy distributions) (Carson & Watson, 2002˙ Haglund & Jeppsson, 2012).

Αξιοποιώντας το δεύτερο συμπέρασμα που προκύπτει από τα προτεινόμενα από τις φοιτήτριες μοντέλα, στον νέο κύκλο διδασκαλιών επιδεικνύονται τα μοντέλα των προηγούμενων δραστηριοτήτων και υπενθυμίζεται η χρήση του πλέγματος με σκοπό την ανάπτυξη συζήτησης ότι οι θέσεις των μορίων στο στερεό είναι διατεταγμένες και σταθερές ενώ στο υγρό τα μόρια βρίσκονται σε οποιεσδήποτε θέσεις ενός πλέγματος εκτός από αυτές στις οποίες βρίσκονται τα μόρια του στερεού. Για το σχεδιασμό των προτεινόμενων μοντέλων από τις φοιτήτριες παρέχεται φύλλο με πλέγμα θέσεων.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Για την ερμηνεία των εννοιών της μικροκατάστασης και της εντροπίας στο νέο φαινόμενο καταδεικνύονται σημαντικά αφενός ο σχεδιασμός των μακροκαταστάσεων ώστε η μετάβαση στο μικρόκοσμο και ο σχεδιασμός μικροκαταστάσεων να έρθουν ως φυσική συνέχεια και αφετέρου να προηγηθεί της υπενθύμισης των μοντέλων που εφαρμόστηκαν στις προηγούμενες δραστηριότητες, η διερεύνηση των νοητικών μοντέλων των φοιτητριών για το υγρό και το στερεό. Τα σχέδιά τους και οι ερωτήσεις που θα τους απευθύνουμε θα αποτελέσουν μέσο για τη διαμόρφωση και εξωτερίκευση των μοντέλων αυτών για να προχωρήσουμε στην αναζήτηση απάντησης στο ερώτημα πώς αυτά εξυπηρετούν στην ερμηνεία της αύξησης της εντροπίας στο φαινόμενο της τήξης του πάγου.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Brissaud, J.B. (2005). The meanings of entropy, *Entropy* 68-96. https://doi.org/10.3390/e7010068

Carson, E. M., & Watson, J. R. (2002). Undergraduate students' understandings of entropy and Gibbs' free energy. *Univ. Chem. Educ.*, *6*(1), 4–12. https://www.perplex.ethz.ch/thermo_course/various_thermodynamics_texts/p2_carson.pdf

deVos, W., & Verdonk, A. H. (1996). The particulate nature of matter in science education and in science. *Journal of Research in Science Teaching*, *33,* 557–664. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199608)33:6%3C657::AID-TEA4%3E3.0.CO;2-N

Haglund, J., & Jeppsson, F. (2012). Using self-generated analogies in teaching of thermodynamics. *Journal of Research in Science Teaching*, *49*(7), 898-921. http://dx.doi.org/10.1002/tea.21025

Komorek, M., & Duit, R. (2004). The teaching experiment as a powerful method to develop and evaluate teaching and learning sequences in the domain of non-linear systems. *International Journal of Science Education*, *26(5),* 619–633. https://doi.org/10.1080/09500690310001614717

Lambert, F. (2006). A modern view of entropy. *Chemistry, 15,* 13-21.

Leff, H. S. (2007). Entropy, Its Language, and Interpretation, *Foundation of Physics*, *37*(12), 1744-1766. http://dx.doi.org/10.1007/s10701-007-9163-3

Méheut, M., & Psillos, D. (2004). Teaching–learning sequences: aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education*, *26*(5), 515-535. https://doi.org/10.1080/09500690310001614762

Reif, F. (1999). Thermal physics in the introductory physics course: Why and how to teach it from a unified atomic perspective. *American Journal of Physics*, *67*(12), 1051–1062. https://doi.org/10.1119/1.19181

Styer, D. F. (2000). Insight into entropy *American Journal of Physics, 68*(12) https://doi.org/10.1119/1.1287353