

Πανελλήνιο Συνέδριο Νέων Ερευνητών/τριών στη Διδακτική των Φυσικών Επιστημών και Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση

(2024)

4ο Πανελλήνιο Συνέδριο Νέων Ερευνητών και Ερευνητριών



Τόμος Πρακτικών



**4^ο Πανελλήνιο
Συνέδριο Νέων
Ερευνητών/ριών**

στη Διδακτική των
Φυσικών Επιστημών
& Νέων Τεχνολογιών
στην Εκπαίδευση

16-18 Σεπτεμβρίου
2022

**Σχεδιασμός και Πιλοτική Εφαρμογή Διδακτικής
Μαθησιακής Ακολουθίας για την Εννοιολογική
Κατανόηση της Εντροπίας από Υποψήφιους
Εκπαιδευτικούς μέσω μιας Μικροσκοπικής
Προσέγγισης**

Βάια Μπακάλη, Στέφανος Ασημόπουλος

doi: [10.12681/nrcodiste.5957](https://doi.org/10.12681/nrcodiste.5957)



ΔΗΜΟΚΡΕΙΤΕΙΟ
ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΘΡΑΚΗΣ

DEMOCRITUS
UNIVERSITY
OF THRACE

Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής
Εκπαίδευσης

Εργαστήριο Φυσικών Επιστημών

Σχεδιασμός και Πιλοτική Εφαρμογή Διδακτικής Μαθησιακής Ακολουθίας για την Εννοιολογική Κατανόηση της Εντροπίας από Υποψήφιους Εκπαιδευτικούς μέσω μιας Μικροσκοπικής Προσέγγισης

Βάια Μπακάλη¹, Στέφανος Ασημόπουλος²

¹Υποψήφια Διδάκτορας, ²Επίκουρος Καθηγητής

Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη πραγματεύεται την ανάπτυξη μιας Διδακτικής Μαθησιακής Ακολουθίας για την εννοιολογική κατανόηση της εντροπίας και των εννοιών που εμπλέκονται με αυτή σε μια μικροσκοπική προσέγγιση. Χρησιμοποιώντας ως πλαίσιο το Μοντέλο της Διδακτικής Αναδόμησης για τη συλλογή των δεδομένων εφαρμόστηκε το διδακτικό πείραμα σε ζευγάρια φοιτητριών Παιδαγωγικού τμήματος. Μέσω των αναλύσεων των πορειών μάθησης των φοιτητριών επιδιώκεται η ανάδειξη των σχέσεων που δημιουργούνται μεταξύ των κυρίαρχων εννοιών στη ΔΜΑ και η αποτύπωση του ρόλου των μοντέλων που εφαρμόστηκαν για τη μικροσκοπική προσέγγιση της εντροπίας. Καταγράφονται οι εξελισσόμενες αντιλήψεις των φοιτητριών αναφορικά με τις έννοιες, οι δυσκολίες που αντιμετώπισαν και ο τρόπος συσχέτισής τους με τα εν λόγω μοντέλα.

Abstract

The present study discusses the development of a Teaching Learning Sequence for the conceptual understanding of entropy and the concepts involved in it within a microscopic approach. Using the Model of Educational Reconstruction as a framework for data collection, a teaching experiment was applied to pairs of students of the Department of Pedagogy. Through analyses of the students' learning pathways, we aim to feature the associations being formed among the dominant concepts in TLS, as well as to illustrate the role of the applied models regarding the microscopic approach of entropy. Furthermore, the students' evolving perceptions as for those concepts, along with the difficulties encountered and the way of correlating those two with the forementioned models are being recorded.

Λέξεις κλειδιά: διδακτική μαθησιακή ακολουθία, εντροπία, μικροσκοπικά μοντέλα

Key words: teaching learning sequence, entropy, microscopic models

1. Εισαγωγή

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. 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.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται ο σχεδιασμός και η πιλοτική εφαρμογή μιας Διδακτικής Μαθησιακής Ακολουθίας (Teaching Learning Sequence) (Méheut & Psillos, 2004) που θα διευκολύνει την εννοιολογική κατανόηση της εντροπίας και των εννοιών που

εμπλέκονται με αυτή, από φοιτήτριες Παιδαγωγικού Τμήματος. Τα ερευνητικά ερωτήματα που αναδύονται σε αυτό το πλαίσιο είναι: Α. Ποιες έννοιες αναδεικνύονται κυρίαρχες στην εννοιολογική κατανόηση της εντροπίας σε μια μικροσκοπική προσέγγιση; Με ποιο τρόπο και σε ποια φάση της μαθησιακής πορείας οι έννοιες αυτές εμπλέκονται; Β. Με ποιο τρόπο η εφαρμογή μοντέλων της μικροσκοπικής προσέγγισης διευκολύνουν την εισαγωγή των εννοιών μικροκατάσταση και εντροπία; Με ποιες δυσκολίες έρχονται αντιμέτωπες οι φοιτήτριες κατά την εφαρμογή τους;

2. Μεθοδολογία

Σε έρευνα που προηγήθηκε (Μπακάλη κ. ά., 2018) σχεδιάστηκε μια αρχική, μικρής διάρκειας, ΔΜΑ (Méheut & Psillos 2004) με βάση ένα μικροσκοπικό μοντέλο το οποίο προέκυψε τροποποιώντας το μοντέλο των Martin et al. (2013) για την προσέγγιση της έννοιας της εντροπίας. Χρησιμοποιώντας ως πλαίσιο το Μοντέλο της Διδακτικής Αναδόμησης (Komorek & Duit, 2004; Méheut & Psillos, 2004) για τη συλλογή των δεδομένων εφαρμόστηκε το διδακτικό πείραμα. Η ΔΜΑ εφαρμόστηκε σε φοιτήτριες Παιδαγωγικού Τμήματος και χαρτογραφήθηκαν οι πορείες μάθησης αυτών με σκοπό την αποτύπωση της εξέλιξης της εννοιολογικής κατανόησης των εννοιών που μελετήθηκαν, και την αξιολόγηση της ΔΜΑ. Τα ευρήματα που προέκυψαν σε συνδυασμό με τα αποτελέσματα από την ανάλυση της δομής του περιεχομένου και τις εμπειρίες από προηγούμενες μελέτες οδήγησαν σε τροποποίηση της ΔΜΑ (Μπακάλη & Ασημόπουλος, 2023) και στην επέκτασή της σε δυο νέες εφαρμογές. 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 εμπλουτισμένης και διευρυμένης 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 στην εμπλουτισμένη ΔΜΑ διαμορφώθηκαν μικροσκοπικά μοντέλα στα οποία οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις προκύπτουν όχι μόνο και 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 & Jerpsson, 2012).

Η ΔΜΑ εφαρμόστηκε πιλοτικά σε ζευγάρι φοιτητριών και η ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν οδήγησαν σε νέες τροποποιήσεις, στοχεύοντας στην αντιμετώπιση των αντιλήψεων και των μαθησιακών δυσκολιών των φοιτητριών με μεγαλύτερη επάρκεια από ό,τι στον πρώτο κύκλο ανάπτυξης. Η εκ νέου αναθεωρημένη ΔΜΑ εφαρμόστηκε σε τέσσερα ζευγάρια φοιτητριών με τα οποία πραγματοποιήθηκαν έξι δίωρες συναντήσεις. Στην παρούσα φάση που γράφεται η αναθεωρημένη εργασία, η ίδια ΔΜΑ εφαρμόζεται σε δυο ακόμη ζευγάρια φοιτητριών ενώ παράλληλα σε εξέλιξη βρίσκεται και η ανάλυση των δεδομένων της τελικής ΔΜΑ.

Τα δεδομένα προς ανάλυση αποτελούν γραπτά κείμενα προερχόμενα από καταγραφές των διδασκαλιών με κάμερα και απομαγνητοφωνήσεις αυτών και τα σχέδια των φοιτητριών σε κάθε ενότητα της ΔΜΑ.

Ειδικότερα για κάθε διδακτική ενότητα ορίζονται επιμέρους βήματα μάθησης για συγκεκριμένες ενέργειες της ερευνήτριας. Για κάθε βήμα ερμηνεύονται ο λόγος της ερευνήτριας και των δυο συμμετεχόντων και αναλύεται το εννοιολογικό περιεχόμενο που εμπλέκεται καθώς και οι ιδέες που εμφάνισαν οι φοιτήτριες για τις έννοιες. Διαμορφώνονται κωδικοί όπως αυτοί που παρουσιάζονται αναλυτικά στα αποτελέσματα (Πίνακας 3). Στα βήματα όπου οι συμμετέχοντες σχεδιάζουν, ερμηνεύονται τόσο οι οπτικές όσο οι λεκτικές αναπαραστάσεις των νοητικών τους μοντέλων.

Μέσω της λεπτομερούς ανάλυσης των πορειών μάθησης των φοιτητριών επιδιώκεται η ανάδειξη των σχέσεων που δημιουργούνται μεταξύ των κυρίαρχων εννοιών στη ΔΜΑ, η αποτύπωση του ρόλου των μοντέλων που εφαρμόστηκαν για τη μικροσκοπική προσέγγιση της εντροπίας, η καταγραφή των δυσκολιών και των εξελισσόμενων αντιλήψεων των φοιτητριών και ο τρόπος συσχέτισής τους με τα εν λόγω μοντέλα. Πιο αναλυτικά θα διερευνηθεί η ερμηνεία των οπτικών αναπαραστάσεων των μικροσκοπικών μοντέλων και η αποδοχή των παραδοχών των μοντέλων από τις φοιτήτριες καθώς και θα αναζητηθούν τα νοητικά τους μοντέλα μέσα από τις δικές τους οπτικές και λεκτικές αναπαραστάσεις.

3. Αποτελέσματα

Η αναθεωρημένη και διευρυμένη ΔΜΑ (πιλοτική και τελική) δομείται από τρεις διδακτικές ενότητες, τις οποίες συνδέει η εφαρμογή του Δεύτερου Θερμοδυναμικού Νόμου από την άποψη της μεταβολής της εντροπίας, για την ερμηνεία της εξέλιξης και της κατεύθυνσης των φυσικών διαδικασιών που αναφέρονται στον Πίνακα 1. Για καθεμιά ενότητα ορίζονται πλήρως οι διδακτικοί στόχοι, το περιεχόμενο-δραστηριότητες και τα διδακτικά εργαλεία που εφαρμόζονται.

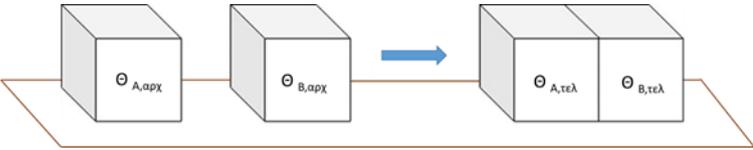
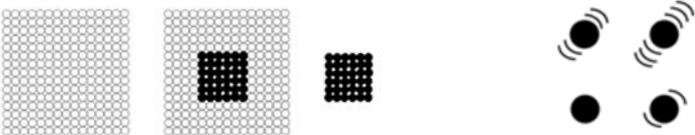
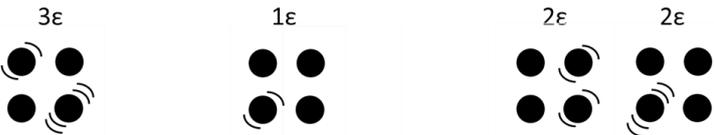
Δεδομένου ότι η εντροπία είναι μια μακροσκοπική μεταβλητή, σημείο αφετηρίας για την προσέγγισή της σε κάθε ενότητα αποτελεί η μακροσκοπική θεώρηση ενός συστήματος και η περιγραφή του μέσω μακροσκοπικών μεταβλητών ενώ στη συνέχεια εφαρμόζεται ένα αντίστοιχο μικροσκοπικό μοντέλο για να οριστεί η εντροπία μέσω της έννοιας του αριθμού των μικροκαταστάσεων. Κατά την επαναφορά τους οι φοιτήτριες από το μικροεπίπεδο στο μακροεπίπεδο, αναμένεται να επικαλεστούν την εμπειρία τους για τη χρονική εξέλιξη των φυσικών διαδικασιών και να τη συνδέσουν με την αύξηση της εντροπίας. Ολοκληρώνοντας, οι φοιτήτριες καλούνται να αναστοχαστούν σχετικά με τις δραστηριότητες και τα μικροσκοπικά μοντέλα, να υποδείξουν σημεία που απαιτούν διευκρινήσεις και να αναφερθούν σε δυσκολίες που αντιμετώπισαν.

Πίνακας 1: Συνοπτική δομή της ΔΜΑ

ΕΝΟΤΗΤΕΣ	ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΟ - ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΕΣ	ΕΝΝΟΙΕΣ (ΠΡΟΚΑΘΟΡΙΣΜΕΝΕΣ)
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 θεώρηση 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

Στην παρούσα εργασία έχει επιλεγεί να παρουσιαστεί αναλυτικά το περιεχόμενο-δραστηριότητες της 2^{ης} ενότητας της ΔΜΑ (Πίνακας 2) που εφαρμόστηκε πιλοτικά σε ζευγάρι φοιτητριών – αναφέρονται στο εξής ως Συμμετέχουσα Πιλοτικής 1 (ΣΠ1) και Συμμετέχουσα Πιλοτικής 2 (ΣΠ2) – καθώς και τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής αναφορικά με τις ιδέες των δυο φοιτητριών για τις κυρίαρχες έννοιες της ΔΜΑ. Η 2^η ενότητα διδάχθηκε κατά την 3^η (Μακροσκοπική θεώρηση και μικροσκοπική θεώρηση I, πίνακας 2) και 4^η (Μικροσκοπική θεώρηση II, πίνακας 2) συνάντηση.

Πίνακας 2: Διδακτική ενότητα 2: Διδακτική προσέγγιση εννοιών μέσω φαινομένου θερμικής επαφής δυο στερεών κύβων διαφορετικής θερμοκρασίας – Επιμέρους ενέργειες

<p>Μακροσκοπική θεώρηση</p>	<p>Επίδειξη εικόνας δύο στερεών σε θερμική επαφή Μελέτη περιπτώσεων (ζεύγη τιμών θ, σύστημα θερμικά απομονωμένο ή μη) Ερμηνεία φαινομένου - εισαγωγή ενέργειας Χαρακτηρισμός των καταστάσεων (ως M_k) – προσδιορισμός μεταβλητών για απομονωμένο σύστημα</p> 
<p>Μικροσκοπική θεώρηση I</p>	<p>Ανίχνευση (συζήτηση, σχεδιασμός) νοητικών μοντέλων για μικρόκοσμο στερεού και μεταφορά ενέργειας μεταξύ δύο στερεών Επίδειξη μικροσκοπικού μοντέλου στερεού (αναπαράσταση ενεργειακής κατάστασης μορίων)</p> 
<p>Μικροσκοπική θεώρηση II</p>	<p>Επίδειξη μικροσκοπικού μοντέλου απομονωμένου συστήματος δυο στερεών σε θερμική επαφή. Προσδιορισμός τρόπων κατανομής της ενέργειας στα μόρια (μ_k) πριν και μετά την επαφή Υπολογισμός αριθμού μικροκαταστάσεων Προσδιορισμός μεταβολής εντοπίας</p> 

(Απομονωμένο) Σύστημα - Περιβάλλον

Για τις δυο συμμετέχουσες το σύστημα αποτελούν «οι δυο κύβοι». [Συσ] Ωστόσο η ΣΠ2 αιτιολογεί τη θεώρηση των δυο κύβων ως σύστημα, βάσει της μεταξύ τους αποκλειστικής αλληλεπίδρασης: «οι δυο κύβοι αποτελούν σύστημα διότι αλληλεπιδρούν μόνο μεταξύ τους» [Συσ], [ΣυσΑπ], ταυτίζοντας τον ορισμό του συστήματος με τον ορισμό του απομονωμένου συστήματος. Το περιβάλλον ορίζεται από τη ΣΠ1 ως «αυτό που περιβάλλει τους κύβους» [Περ] ενώ η ΣΠ2 αναφέρεται στο περιβάλλον συγκεκριμένα: «έδαφος, αέρας». [Περ] Καθώς η ερευνήτρια σκόπιμα δε διευκρινίζει αν το σύστημα είναι απομονωμένο η ΣΠ2 λαμβάνει υπόψη την επίδραση του περιβάλλοντος: «δεν εξαρτάται και το περιβάλλον τι θερμοκρασία έχει;». [ΣυσΜΑπ] Αιτιολογεί την επίδραση του περιβάλλοντος παραθέτοντας παράδειγμα: «άμα είναι σε ένα δωμάτιο 25C θα έχει αρχικά μια θερμοκρασία 60C αλλά θα αρχίσει αυτή σταδιακά να μειώνεται, να πλησιάζει 25C». [ΣυσΜΑπ] Προτείνει ότι για να είναι πλήρης η ερώτηση θα έπρεπε να τους δοθεί «η θερμοκρασία του περιβάλλοντος»

[ΣυσΜΑπ] ή ότι «δεν υπάρχει αέρας». [ΣυσΑπ] Οι δυο συμμετέχουσες ορίζουν το απομονωμένο σύστημα ως «σύστημα στο οποίο απουσιάζουν (=δεν επηρεάζεται από) ο αέρας ή η θερμοκρασία περιβάλλοντος» [ΣυσΜΑπ] και δεν αναφέρονται στην ενέργεια παρά μόνο μετά από ακολουθία ερωτήσεων από την ερευνήτρια: ΣΠ1: «το τραπέζι δεν προσφέρει καμία ενέργεια. ... δεν κερδίζει το περιβάλλον ενέργεια». [ΣυσΜΑπ], [μεταφΕν]

Μακροκατάσταση, διάκριση από μικροκατάσταση, μεταβλητές μακροκατάστασης

Επιδεικνύοντας η ερευνήτρια στην 3^η συνάντηση την αρχική κατάσταση και την κατάσταση θερμικής ισορροπίας του συστήματος των δυο κύβων (Πίνακας 2, μακροσκοπική θεώρηση) καλεί τις φοιτήτριες να τις χαρακτηρίσουν. Η ΣΠ2 χαρακτηρίζει ορθά τις δυο καταστάσεις ως μακροκαταστάσεις: «Ίσως να είναι η αρχική μακροκατάσταση και μετά η άλλη να είναι η τελική μακροκατάσταση». [Μκ] Αντίθετα η ΣΠ1 φαίνεται ότι δεν έχει εννοιολογήσει την μακροκατάσταση καθώς χαρακτηρίζει την αρχική κατάσταση στην οποία οι δύο κύβοι δεν είναι σε επαφή ως μικροκατάσταση και την κατάσταση θερμικής ισορροπίας ως μακροκατάσταση: «Κάθε κύβος αποτελεί μια μικροκατάσταση και όταν θα ενωθούν τότε θα γίνει μακροκατάσταση». [Μκ-μκ] Η ερευνήτρια επανέρχεται στο φαινόμενο της διάχυσης (ενότητα 1), επιδεικνύει τις διαδοχικές μακροκαταστάσεις του αντίστοιχου συστήματος και υπενθυμίζει μέσω συζήτησης τον όρο μακροκατάσταση και μικροκατάσταση. Επιστρέφοντας στο φαινόμενο της θερμικής επαφής των δυο κύβων η ΣΠ2 επισημαίνει για την αρχική κατάσταση και την κατάσταση θερμικής ισορροπίας του συστήματος των δυο κύβων: «είναι όλο μακροκαταστάσεις», «μπορούμε να μελετήσουμε και να πάρουμε πληροφορίες για την μακροκατάσταση που βρίσκεται το σώμα» [Μκ] «μπορούμε να παρατηρήσουμε τη θερμοκρασία» [Μκ-μτβ] και επιδιώκει διάκριση μεταξύ των εννοιών μακροκατάσταση και μικροκατάσταση: «Ενώ τη μικροκατάσταση δεν μπορούμε να την παρατηρήσουμε;». [Μκ-μκ] Η ΣΠ1 επισημαίνει για τις μακροκαταστάσεις στην 4^η συνάντηση ότι «μπορούμε να τις παρατηρήσουμε» [Μκ] και ότι «περιγράφονται από διαφορετικές τιμές θερμοκρασίας και ενέργειας των 2 κύβων». [Μκ-μτβ]

Μικροσκοπικά μοντέλα στερεού

Η ερευνήτρια καλεί να προτείνουν – σχεδιάσουν μοντέλο για τα μόρια (κίνηση, θέσεις) στα στερεά αντλώντας πιθανές ιδέες σχεδιασμού από το μοντέλο που χρησιμοποίησαν στην διάχυση. Σχεδιάζουν η ΣΠ1 κύβο ενώ η ΣΠ2 τετράγωνο γεμάτο με μόρια σε επαφή, σε συγκεκριμένες θέσεις. [Μ-στ], [μόρια] Επιπλέον η ΣΠ2 δείχνει, κουνώντας τη μύτη του μολυβιού, δονήσεις μορίων γύρω από τις θέσεις: «Αν πούμε ότι αυτό είναι το μόριο (μύτη μολυβιού) πολύ μικρές δονήσεις, ίσα ίσα». [Μ-στ], [μόρια] Στην προτροπή της ερευνήτριας να προτείνουν μοντέλο που να ερμηνεύει τη μεταφορά ενέργειας από τον Α κύβο στον Β, η ΣΠ1 αναφέρεται έμμεσα στην ενέργεια μέσω της ταχύτητας περιγράφοντας τι θα συμβεί μόνο στον ένα κύβο: «η αύξηση της θερμοκρασίας θα έχει ως αποτέλεσμα να αυξηθεί η ταχύτητα των μορίων, τα μόρια να κινούνται περισσότερο και να συγκρούονται». [Μ-στ], [μόρια] Η ΣΠ2 περιγράφει τη μεταφορά ενέργειας μεταξύ των δυο κύβων, εισάγοντας τους όρους ταχύτητα και ενέργεια: «Δε θα καταλαβαίναμε ακριβώς πόση ενέργεια χάθηκε και πόση πήρε, αλλά θα βλέπαμε ότι στα μόρια του ενός κουτιού ενώ πήγαιναν πιο γρήγορα απ' ότι πήγαιναν σ' αυτό με τους 20, τελικά θα κινούνταν με την ίδια ταχύτητα, και στον Α κύβο και στον Β». [Μ-στ], [μόρια], [μεταφΕν]

Η ερευνήτρια επιδεικνύει μοντέλο στερεού (Πίνακας 2, μικροσκοπική θεώρηση Ι) επισημαίνοντας ότι: «τα μόρια βρίσκονται σε συγκεκριμένες θέσεις, κάνουν μικρές ταλαντώσεις γύρω από αυτές τις θέσεις». [Μ-στ], [μόρια] Τοποθετεί ένα-ένα μόριο σε σταθερές και συγκεκριμένες θέσεις ενός διοδιάστατου πλέγματος. Αφαιρεί το πλέγμα και απομένουν τα μόρια σε μια συγκεκριμένη διάταξη. [Μ-στ], [πλγ] Αναφέρει παραδοχές (παρατήρηση μόνο μιας επιφάνειας του στερεού, μικρός αριθμός μορίων). Επιδεικνύει όμοιο μοντέλο στερεού που περιορίζεται σε 4 μόρια (Πίνακας 2, μικροσκοπική θεώρηση Ι). Περιγράφει την αναπαράσταση της ενεργειακής κατάστασης κάθε μορίου με ζεύγη αντιδιαμετρικών καμπυλών, καθένα από τα οποία αντιστοιχεί σε μια μονάδα ενέργειας. [Μ-

στ], [αναπΕν] Εισάγει την κβάντωση της ενέργειας: «κάθε μόριο μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές ενέργειας». [Εν/μόριο] Δηλώνει ρητά την τυχαία κατανομή μονάδων ενέργειας, στοιχείο προαπαιτούμενο για εννοιολόγηση της μικροκατάστασης: «κάθε φορά ... προσθέτω και μια μονάδα ενέργειας η οποία κατανέμεται τυχαία δηλ. αυξάνει την κινητική ενέργεια ενός οποιουδήποτε από αυτά τα 4 μόρια». [Μ-στ], [κατανΕν], [Εν/μόριο] Στην 4^η συνάντηση η ΣΠ1 περιγράφει το μοντέλο στερεού που είχε επιδείξει η ερευνήτρια: «με δυο παρενθέσεις ... τις μονάδες ενέργειας (ε)», «1ε έχει μικρή κίνηση, σχετικά με αυτά που δεν κινούνται». [Μ-στ], [αναπΕν], [Εν/μόριο] Η ΣΠ2 σε ερώτηση της ερευνήτριας για την κατανομή της ενέργειας: «... προσφέρω ακόμη μια μονάδα ενέργειας. ... από ποιο μόριο θα χρησιμοποιηθεί;» απαντά «σε τυχαία θέση δεν πάει; Δεν κατανέμεται τυχαία;». [Μ-στ], [κατανΕν], [Εν/μόριο] Η απάντηση καταδεικνύει αποδοχή από τη ΣΠ2 της τυχειότητας στην κατανομή της ενέργειας στα μόρια σε αναλογία με την τυχειότητα των θέσεων των μορίων της χρωστικής στο φαινόμενο της διάχυσης.

Μικροκατάσταση – μεταβλητές μικροκατάστασης

Σχεδιάζουν όλες τις δυνατές περιπτώσεις κατανομής 3 μονάδων ενέργειας (ε) στα 4 μόρια του Α κύβου (Πίνακας 2, μικροσκοπική θεώρηση II) και τις χαρακτηρίζουν, η ΣΠ2 ως «εκδοχές, πιθανότητες, που μπορούν να πάνε τα 3ε ενέργειας» [μκ] και η ΣΠ1 «που (σε ποια μόρια) κατανέμονται οι μονάδες ενέργειας, διαφορετικοί τρόποι κατανομής σε ένα στερεό των 4 μορίων». [μκ] Επανέρχονται στη διάχυση για υπενθύμιση του όρου μικροκατάσταση και των μεταβλητών που την περιγράφουν. Σε αναλογία ορίζουν ως μικροκαταστάσεις στο φαινόμενο της θερμικής επαφής των δυο κύβων τους διαφορετικούς τρόπους κατανομής της ενέργειας στα μόρια. Συγκεκριμένα η ΣΠ1 περιγράφει ως μικροκατάσταση: «τους δυνατούς τρόπους κατανομής των ενεργειών» [μκ] και η ΣΠ2: «τη θέση των 3ε, που μπορούν αυτά να κατανεμηθούν». [μκ] Προτείνουν ως μεταβλητές μικροκατάστασης, η ΣΠ1 «τη μονάδα ενέργειας», «τα μόρια δεν αλλάζουν θέση, ταλαντώνονται ανάλογα με το πόση ενέργεια έχει το καθένα» και η ΣΠ2 «τις θέσεις των ενεργειών». [μκ-μτβ], [Εν/μόριο]

Εντροπία

Επανέρχονται στη διάχυση για υπενθύμιση ορισμού της εντροπίας και της μεταβολής της. Καθώς επιδιώκεται ο προσδιορισμός της εντροπίας στο φαινόμενο της θερμικής επαφής των δυο κύβων εντοπίζονται δυο σημεία που χρήζουν προσοχής. Το πρώτο είναι ότι ο αριθμός μικροκαταστάσεων του κύβου Α μειώνεται και το δεύτερο ότι ο αριθμός μικροκαταστάσεων του συστήματος δεν προκύπτει αθροιστικά. Αναφορικά με το πρώτο, η ΣΠ2 συμπεραίνει εύκολα μείωση της εντροπίας του Α κύβου και αύξηση της εντροπίας του Β ως αποτέλεσμα της μείωσης και της αύξησης αντίστοιχα του αριθμού δυνατών μκ. [ΔSA], [ΔSB], [μετ. αρ. δυνμκ] Αναφορικά με τον υπολογισμό του αριθμού μικροκαταστάσεων του συστήματος η ΣΠ2 προτείνει να προστεθεί ο αριθμός των μικροκαταστάσεων των σωμάτων που αποτελούν το σύστημα συμπεραίνοντας έτσι ότι η εντροπία του συστήματος μειώνεται: «Ότι η εντροπία η συνολική μειώνεται. ... Γιατί συνολικά πριν ενωθούν τα δύο σώματα είχαμε 24(20+4) μικροκαταστάσεις και μετά αφού ενώθηκαν είχαμε 20(10+10) μικροκαταστάσεις». [αρ. δυνμκ], [ΔSΣυσ] Η ερευνήτρια επιδιώκοντας να καθοδηγήσει τη ΣΠ2 ώστε να αναθεωρήσει την πρότασή της, αναφέρεται σε «συνδυασμούς». Η ΣΠ2 αναθεωρεί και υπολογίζει τον αριθμό μικροκαταστάσεων για την αρχική μακροκατάσταση συστήματος: «(οι μικροκαταστάσεις του Α με τις μικροκαταστάσεις του Β) είναι σα να αλληλοϋπάρχουν, όταν συμβαίνουν αυτά, συμβαίνουν κι αυτά παράλληλα. Άρα δεν έχουμε συνολικά 24 ... για κάθε κατανομή του Α, το Β θα έχει παράλληλα μια από τις 4...συνολικά 80(20x4) μικροκαταστάσεις». [αρ. δυνμκ] Υιοθετώντας το συλλογισμό της ΣΠ2, η ΣΠ1 υπολογίζει τον αριθμό μικροκαταστάσεων για τη μακροκατάσταση ισορροπίας του συστήματος: «θα έχουμε 100 συνδυασμούς. ... γιατί η μια μικροκατάσταση μπορεί να πάει με μια από τις άλλες 10. ... Αλλά έχουμε 10 μικροκαταστάσεις. Η καθεμιά να πάει μια με την πρώτη, με τη δεύτερη κλπ. Άρα 10x10=100». [αρ. δυνμκ], [ΜκΙσ] Με ευχέρεια εξάγουν ως συμπέρασμα την αύξηση του αριθμού μικροκαταστάσεων και της εντροπίας του συστήματος

και τη σταθεροποίησή τους στη μακροκατάσταση ισορροπίας. [μετ. αρ. δυνμκ], [ΔΣυσσ], [ΜκΙσ]

Πίνακας 3: Κωδικοί και σημασία κωδικών

ΚΩΔΙΚΟΙ	ΣΗΜΑΣΙΑ
Συσσ	Σύστημα
Περ	Περιβάλλον
ΣυσΜΑπ	Μη απομονωμένο σύστημα
ΣυσΑπ	Απομονωμένο σύστημα
Μκ	Μακροκατάσταση
Μκ-μτβ	Μεταβλητές μακροκατάστασης: θερμοκρασία και ενέργεια κάθε στερεού
ΜκΙσ	Μακροκατάσταση ισορροπίας
μκ	Μικροκατάσταση
Μκ-μτβ	Μικροκατάσταση-μεταβλητές: ενέργεια κάθε μορίου
Μκ-μκ	Σύγχυση ή επιδίωξη διάκρισης μακροκατάστασης και μικροκατάστασης
αναπΕν	Αναπαράσταση της ενεργειακής ή κινητικής κατάστασης μορίων
κατανΕν	Κατανομή ενέργειας στα μόρια (τυχαία-δε γνωρίζουμε σε ποιο μόριο)
μεταφΕν	Μεταφορά ενέργειας α) μεταξύ δυο στερεών, β) μεταξύ συστήματος – περιβάλλοντος
Εν/μόριο	Ενέργεια ανά μόριο
Μ-στ	Μοντέλο στερεού προτεινόμενο είτε από την ερευνήτρια είτε από τις φοιτήτριες
πλγ	Χρήση πλέγματος θέσεων
μόρια	Κίνηση, ταχύτητα, συγκρούσεις μορίων
αρ. δυνμκ	Αριθμός δυνατών μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν σε μια μακροκατάσταση
μετ. αρ. δυνμκ	Μεταβολή αριθμού δυνατών μικροκαταστάσεων
ΔSA	Μεταβολή εντροπίας στερεού A
ΔSB	Μεταβολή εντροπίας στερεού B
ΔΣΣυσσ	Μεταβολή εντροπίας συστήματος

4. Συμπεράσματα

Η ανάλυση της πλοτικής εφαρμογής της ΔΜΑ κατέδειξε ότι:

Η λεκτική περιγραφή της έννοιας της μακροκατάστασης από τις φοιτήτριες δεν είναι αρκετή για την εννοιολόγηση της και τη διάκρισή της από τη μικροκατάσταση, και ως εκ τούτου προτείνεται παράλληλα και η αξιολόγηση σχεδίων (Clement, 2000) των φοιτητριών στα οποία αναπαρίστανται κάποιες μακροκαταστάσεις του συστήματος με τις αντίστοιχες τιμές των μεταβλητών θερμοκρασία και ενέργεια κάθε κύβου.

Η επαναφορά στη διάχυση, κρίνεται αναγκαία αφενός για την επέκταση της έννοιας της μικροκατάστασης και αφετέρου για υπενθύμιση του ορισμού της έννοιας της εντροπίας. Έτσι με τη μελέτη των δυο φαινομένων επισημαίνεται ότι οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις προκύπτουν όχι μόνο ως διαφορετικοί τρόποι διάταξης των μορίων στις δυνατές θέσεις αλλά και ως διαφορετικοί τρόποι κατανομής της ενέργειας στα μόρια. Παράλληλα, καθώς η εντροπία είναι ένας νέος όρος που συνδέεται με έναν ακόμα νέο όρο, την μικροκατάσταση, για να χρησιμοποιηθεί με συνέπεια από τις φοιτήτριες απαιτείται υπενθύμιση και επανάληψη, τακτικές που φαίνεται να λειτουργούν ενισχυτικά.

Η αναμόρφωση των οπτικών αναπαραστάσεων του μικροσκοπικού μοντέλου σε συνδυασμό με τον λεκτικό τρόπο αναπαράστασης του, κρίνονται αναγκαίες για την επιδιωκόμενη ερμηνεία του από τις φοιτήτριες. Προτείνεται ωστόσο αντί της ρητής

αναφοράς των παραδοχών του μοντέλου από την ερευνήτρια, η εκμείωση της περιγραφής και των παραδοχών του από τις φοιτήτριες δεδομένου ότι οι φοιτήτριες έχουν ήδη εξοικειωθεί με παρόμοια μοντέλα στο φαινόμενο της διάχυσης.

5. Βιβλιογραφία

- Μπακάλη, Β., Μπαμπάτσικου, Γ., & Ασημόπουλος Σ. (2018). Ερμηνεία της έννοιας της εντροπίας μέσω ενός μικροσκοπικού μοντέλου και της έννοιας του αριθμού των μικροκαταστάσεων. Στο Δ. Σταύρου, Α. Μιχαηλίδη & Α. Κοκολάκη (Επιμ.), *Πρακτικά 10^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών και Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση: Γεφυρώνοντας το Χάσμα μεταξύ Φυσικών Επιστημών, Κοινωνίας και Εκπαιδευτικής Πράξης*, σελ. 784-792. Εργαστήριο Διδακτικής Θετικών Επιστημών, ΠΤΔΕ, Πανεπιστήμιο Κρήτης. Ανακτήθηκε στις 20/04/2022 από: http://synedrio2017.enepnet.gr/images/Praktika-10ou-Synedriou_Teliko.pdf
- Μπακάλη, Β., & Ασημόπουλος Σ. (2023). Αναδόμηση ενός εκπαιδευτικού μοντέλου μικροσκοπικής προσέγγισης της εντροπίας μέσω του παραδείγματος της διάχυσης. Στο Κ. Σκορδούλης, Κ. Στεφανίδου, Α. Μανδρίκας & Η. Μπόικος (Επιμ.). *Πρακτικά 12^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών και Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση: Ο Ρόλος της Εκπαίδευσης στις Φυσικές Επιστήμες στην κοινωνία του 21^{ου} αιώνα*. 273-281. Εκδόσεις ΕΚΠΑ, Αθήνα 2023. Ανακτήθηκε στις 20/04/2024 από: http://synedrio2021.enepnet.gr/wp-content/uploads/2023/07/ΠΡΑΚΤΙΚΑ_12ου_ΠΑΝΕΛΛΗΝΙΟΥ_ΣΥΝΕΔΡΙΟΥ_ΕΝΕΦΕΤ_compressed.pdf
- Carson, E. M., & Watson, J. R. (2002). Undergraduate students' understandings of entropy and Gibbs' free energy. *University Chemistry Education*, 6(1), 4–12. Ανακτήθηκε στις 20/04/2022 από: https://www.perplex.ethz.ch/thermo_course/various_thermodynamics_texts/p2_carson.pdf
- Clement, J. (2000). Model based learning as a key research area for science education. *International Journal of Science Education*, 22(9), 1041-1053. <https://doi.org/10.1080/095006900416901>
- 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>
- Martin J. S., Smith N. A., & Francis C. D. (2013). Removing the entropy from the definition of entropy: clarifying the relationship between evolution, entropy, and the second law of thermodynamics. *Evolution: Education and Outreach*, 1-9. <https://doi.org/10.1186/1936-6434-6-30>
- 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>