



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΤΟΥ ΑΝΘΡΩΠΟΥ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ
Π.Μ.Σ. «ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΜΑΘΗΣΗΣ
ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΙΔΑΚΤΙΚΟΥ ΥΛΙΚΟΥ»**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Πειραματική διδασκαλία για τις εννοιολογήσεις της
εντροπίας από υποψήφιους δασκάλους»**

ΜΠΑΚΑΛΗ ΒΑΪΑ

ΒΟΛΟΣ 2016

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΙΑΣ

ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΣΥΓΧΡΟΝΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΑ ΜΑΘΗΣΗΣ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΔΙΔΑΚΤΙΚΟΥ
ΥΛΙΚΟΥ»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Πειραματική διδασκαλία για τις εννοιολογήσεις της
εντροπίας από υποψήφιους δασκάλους»**

της

ΜΠΑΚΑΛΗ ΒΑΪΑΣ

Α' Επιβλέπων Καθηγητής: Ασημόπουλος Στέφανος, Επίκουρος Καθηγητής

Β' Επιβλέπων Καθηγητής: Πολίτης Παναγιώτης, Αναπληρωτής Καθηγητής

Γ' Επιβλέπων Καθηγητής: Τριανταφυλλίδης Τριαντάφυλλος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΒΟΛΟΣ, 2016

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	9
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	11
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	13
2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	15
2.1 Εντροπία	15
2.1.1 Εντροπία Clausius, Boltzmann	15
2.1.2 Μακροσκοπική ή μικροσκοπική προσέγγιση;	17
2.1.3 Διερευνώντας τις αντιλήψεις των φοιτητών για την εντροπία	18
2.1.4 Ιστορία και εφαρμογή της «αταξίας» για το χαρακτηρισμό της εντροπίας	20
2.1.5 Η εντροπία ως «αταξία» (disorder)	21
3. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ	23
3.1. Σκοπός και Στόχοι της Έρευνας	23
3.2. Μεθοδολογία	23
3.2.1 Προσέγγιση και τύπος έρευνας	23
3.2.2 Επιλογή συμμετεχόντων	24
3.2.3 Σχεδιασμός της έρευνας	26
3.2.4 Περιγραφή του υλικού	27
3.2.5 Διαδικασία Συλλογής και Ανάλυσης Δεδομένων	31
4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	35
4.1 Σύστημα	35
4.2 Μεταβλητές για την περιγραφή της κατάστασης του συστήματος	36
4.3 Από τις φωτογραφίες στις αναπαραστάσεις	38
4.4 Μοντελοποίηση του μικρόκοσμου	40
4.5 Μικροκατάσταση-Μακροκατάσταση	47

4.5.1 Ερωτηματολόγια	47
4.5.2 Διδασκαλίες	48
4.5.2.1 Εννοιολογήσεις των εννοιών μακροκατάσταση- μικροκατάσταση.....	48
4.5.2.2 Αιτιολόγηση της αύξησης του αριθμού των μικροκαταστάσεων.....	52
4.5.2.3 Γνωστές μόνο οι πιθανές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη μακροκατάσταση	55
4.6 Κατάσταση ισορροπίας.....	56
4.6.1 Ασαφής η εικόνα για την τελική κατάσταση	56
4.6.2 Ρόλος του μοντέλου στη λήψη απόφασης για την τελική κατάσταση	56
4.6.3 Αλλαγή των μικροκαταστάσεων στην κατάσταση ισορροπίας.....	59
4.7 Εντροπία	62
4.7.1 Ανίχνευση ιδεών για την εντροπία	62
4.7.2 Αιτιολόγηση της αύξησης της εντροπίας.....	64
4.7.3 Εντροπία στη μακροκατάσταση ισορροπίας	65
4.8 Δραστηριότητα 1.....	68
4.9 Δραστηριότητα 2.....	69
4.10 Εφαρμογή.....	73
4.10.1 Σύγκριση της εντροπίας στις δυο καταστάσεις.....	73
4.10.2 Επεκτάσεις	77
5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	83
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ	87
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΔΙΔΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ	89
B.1 Πρόβλεψη και εκτέλεση του πειράματος.....	89
B.2 Προβολή φωτογραφιών.....	90
B.3 Μοντέλο-Είσοδος στο μικρόκοσμο	91
B.4 Εισαγωγή των εννοιών μακροκατάσταση-μικροκατάσταση	96

B.5 Εισαγωγή της εντροπίας.....	98
B.6 Δραστηριότητα 1- Μη αντιστρεπτές μεταβολές	99
B.7 Δραστηριότητα 2.....	100
B.8 Εφαρμογή.....	101
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΒΟΛΗΣ ΔΙΑΦΑΝΕΙΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ	103
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΤΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 1	107

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κεντρικότητα της έννοιας της εντροπίας στο πεδίο της Θερμοδυναμικής και της Στατιστικής Φυσικής οφείλεται στη σύνδεσή της με το Δεύτερο Θερμοδυναμικό Νόμο και την υποβάθμιση της ενέργειας. Πρόκειται για έννοια που προσεγγίζεται μακροσκοπικά και μικροσκοπικά και η ερμηνεία της φύσης της αποτελεί αντικείμενο μελέτης πολλών ερευνών. Ταυτόχρονα είναι μια έννοια διαδεδομένη καθώς έχουν γίνει απόπειρες για γενίκευση και εφαρμογή της σε άλλες επιστήμες. Στην παρούσα μελέτη παρουσιάζονται οι πορείες μάθησης που ακολουθούν υποψήφιοι δάσκαλοι για την εννοιολόγηση της εντροπίας. Η έρευνα σχεδιάστηκε κατά τρόπο ώστε να ανιχνευθούν αρχικά οι εναλλακτικές ιδέες των συμμετεχόντων τόσο για έννοιες που σχετίζονται με την εντροπία, όσο και για την ίδια την εντροπία και στη συνέχεια να διερευνηθεί ποιες από αυτές κρίνονται απαραίτητες για τη μικροσκοπική προσέγγιση της. Για τη διερεύνηση των ερωτημάτων της έρευνας επιλέχθηκε ποιοτική προσέγγιση. Συλλέχθηκαν δεδομένα από τρεις πηγές, ερωτηματολόγια και καταγραφές από ένα διδακτικό πείραμα στο οποίο συμμετείχαν ζευγάρια φοιτητών. Η τρίτη πηγή δεδομένων αφορούσε στις γραπτές και προφορικές επισημάνσεις ενός μη συμμετοχικού παρατηρητή. Τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι οι φοιτητές διαγράφουν πορείες μάθησης που οδηγούν στην μικροσκοπική ερμηνεία της εντροπίας καθώς και στην εκτίμηση και αιτιολόγηση της μεταβολής της, μέσω της έννοιας κυρίως του αριθμού των μικροκαταστάσεων. Επιπλέον η εννοιολόγηση της έννοιας μακροκατάσταση και η διάκρισή της από την μικροκατάσταση καθώς και οι εννοιολογήσεις των εννοιών σύστημα και ισορροπία κρίνονται απαραίτητες για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συλλογισμών.

Λέξεις κλειδιά: Εντροπία, μικροκατάσταση, μακροκατάσταση, διδακτικό πείραμα.

ABSTRACT

The concept of entropy in the fields of Thermodynamics and Statistical Physics is central because of its connection with the second Law of Thermodynamics and the degradation of energy. It is a concept that is being studied macroscopically and microscopically and its interpretation has been the object of many researches. It is also a very widespread concept as there have been many efforts to generalize and apply it to other scientific fields. In the present study the learning paths followed by preservice teachers for the conceptualization of entropy are presented. The study initially traces the alternative ideas of the participants for concepts related to entropy as well as entropy itself and then investigates which of these are necessary for its microscopic approach. In order to address the research questions the qualitative approach was chosen. Data were collected from three resources, questionnaires and records from a teaching experiment in which pairs of students participated. The third resource of data concerned written and oral comments of a non participant observer. Results show that students follow learning paths that lead to the microscopic interpretation of entropy as well as to the evaluation and justification of its change, mainly through the concept of the number of microstates. Moreover, the conceptualization of macrostate and its distinction from microstate as well as the conceptualization of system and equilibrium are necessary for the development of complete reasoning.

Keywords: Entropy, microstate, macrostate, teaching experiment.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον κ. Ασημόπουλο Στέφανο, Επίκουρο Καθηγητή του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, για την στήριξη και καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Στη συνέχεια, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Πολίτη Παναγιώτη, Αναπληρωτή Καθηγητή του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, για την πολύτιμη καθοδήγησή του στην υλοποίηση του διδακτικού υλικού της παρούσας εργασίας.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τριανταφυλλίδη Τριαντάφυλλο, Αναπληρωτή Καθηγητή του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης στο Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, για τις καίριες παρεμβάσεις του στην υλοποίηση της παρούσας εργασίας.

Οπωσδήποτε οφείλω να ευχαριστήσω τις φοιτήτριες/-ητές του Π.Τ.Δ.Ε., που δέχτηκαν με προθυμία να συμμετάσχουν στην έρευνα και να εκφράσουν τις απόψεις τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους εκπαιδευτικούς-παρατηρητές για τη συνεισφορά τους στον εμπλουτισμό και την ανάλυση των δεδομένων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στον πυρήνα των πεδίων της Θερμοδυναμικής και της Στατιστικής Φυσικής βρίσκεται η έννοια της εντροπίας. Θεωρείται μια έννοια που προσεγγίζεται μακροσκοπικά και μικροσκοπικά απαιτώντας μεγάλη αφαιρετική ικανότητα, με αποτέλεσμα να γίνεται δύσκολα κατανοητή από όσους τη μελετούν. Επιπλέον η αναφορά της σε πολλές επιστήμες όπως οικονομία, πληροφορική, ανθρωπιστικές επιστήμες, έχει επιφέρει σύγχυση γύρω από την πραγματική σημασία της. Σε κοινωνικοπολιτικές συζητήσεις συνδέεται με την αταξία, την αποδιοργάνωση και το χάος. Κατά τον ίδιο τρόπο και οι ερευνητές προσπαθώντας να ερμηνεύσουν την έννοια, χρησιμοποίησαν εκτενώς τη μεταφορά «η εντροπία είναι αταξία» στη διδασκαλία της Θερμοδυναμικής. Άλλες λέξεις που χρησιμοποιούνται ως μεταφορές για την επιστημονική ποιοτική ερμηνεία της εντροπίας είναι οι «διασπορά ενέργειας» (Lambert 2006, Leff 2007), «πληροφορία» (Ben-Naim 2008), «ελευθερία» (Brissaud 2005) και «πολλαπλότητα» (Martin et al 2013).

Η ασυμμετρία στη φύση που εισάγει ο δεύτερος θερμοδυναμικός νόμος δημιουργεί «το βέλος του χρόνου», (Bowley & Sanchez 1999) μια πιο ποιητική μεταφορά για την εντροπία που συνοδεύει την ερμηνεία των μη αντιστρεπτών μεταβολών (Haglund, J., Jeppsson, F., & Stromdahl, H.). Με τον καθορισμό της έννοιας της εντροπίας μπορούμε να περιγράψουμε για οποιοδήποτε πραγματικό σύστημα τι διεργασίες είναι δυνατό να συμβούν, με τον περιορισμό ότι η εντροπία του συστήματος και του περιβάλλοντος θα αυξηθεί. Επιπλέον μέσω του δεύτερου θερμοδυναμικού νόμου, η εντροπία συσχετίζεται με την καθημερινή μας διαίσθηση για την ενέργεια που «ξοδεύεται» ή «εξαντλείται» και την ανησυχία μας για τη διατήρησή της (Geller B. et al., 2014). Ακόμη και κάτω από ιδανικές συνθήκες (π.χ. σε έναν αντιστρεπτό κύκλο), υπάρχει ένα όριο στο ποσό του ωφέλιμου έργου που μπορεί να αποκτηθεί από ένα δεδομένο ποσό θερμότητας.

Για τη διδασκαλία της Θερμοδυναμικής, ακολουθώντας ιστορικές γραμμές ανάπτυξης, έχει παραδοσιακά υιοθετηθεί μια, κατά κύριο λόγο, μακροσκοπική προσέγγιση. Έτσι βασικές έννοιες, όπως θερμότητα και εντροπία, εισάγονται σε μεγάλο βαθμό βασισμένες σε μακροσκοπικές μελέτες και μόνο κάποιες προσπάθειες έγιναν που να τις συσχετίζουν με μικροσκοπικές διεργασίες. Όμως σύμφωνα με τον

Reif η μακροσκοπική προσέγγιση δεν είναι εύκολη για τους μαθητές, επειδή είναι μάλλον αφηρημένη και παρέχει νοητικά μοντέλα που δεν είναι εύκολα ορατά (Reif F., 1999). Προαπαιτούμενες έννοιες για μια μακροσκοπική προσέγγιση της εντροπίας είναι έννοιες όπως θερμότητα, θερμοκρασία, ενέργεια, για τις οποίες οι φοιτητές έχουν πλήθος εναλλακτικών ιδεών (Driver R., 2000).

Στη διδακτική προσέγγιση που επιλέχτηκε, ένα μακροσκοπικό σύστημα μελετάται από μια μικροσκοπική άποψη ώστε να δοθεί έμφαση στους υποκείμενους μηχανισμούς. Γίνεται προσπάθεια να ερμηνευτεί η έννοια της εντροπίας με τη βοήθεια ενός μικροσκοπικού μοντέλου και της έννοιας του αριθμού των μικροκαταστάσεων. Μελέτες που πραγματοποιήθηκαν για να ιδέες πρωτοετών φοιτητών σχετικά με την εντροπία, την ισορροπία και την αντιστρεπτότητα έδειξαν ότι οι φοιτητές που εισέρχονται στο Πανεπιστήμιο χωρίς να έχουν προηγουμένως διδαχθεί τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο και την εντροπία, έχουν κάποιες διαισθητικές ιδέες για την ισορροπία και τη μη αντιστρεπτότητα (Smith T. I., Christensen W. M., Mountcastle D. B. & Thompson J. R., 2015). Ως εκ τούτου, στο σχεδιασμό της έρευνας κατά την οποία αντλήθηκαν δεδομένα από ερωτηματολόγια και διδακτικό πείραμα, κρίθηκε απαραίτητο να συμπεριληφθούν οι έννοιες σύστημα, μακροσκοπική ισορροπία, μικροκατάσταση, μακροκατάσταση, αντιστρεπτές και μη μεταβολές, σαν προαπαιτούμενες έννοιες για την μικροσκοπική προσέγγιση της εντροπίας.

2. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1 Εντροπία

2.1.1 Εντροπία Clausius, Boltzmann

Η εντροπία είναι αρχαιοελληνική λέξη και συντίθεται από το πρόθεμα «εν», που σημαίνει «μέσα», «εντός», και από το ουσιαστικό «τροπή», που σημαίνει «στροφή», «μεταμόρφωση», «αλλαγή». Επομένως η κυριολεκτική σημασία της εντροπίας είναι η εσωτερική ή ενδογενής ικανότητα για αλλαγή ή μεταμόρφωση. Ο Clausius ερευνώντας τις θερμικές μηχανές και ακολουθώντας τα αποτελέσματα του Carnot εισήγαγε την έννοια το 1865.

Ο Clausius καθώς μελετούσε τη ροή της θερμότητας από τα θερμά στα ψυχρά σώματα συνειδητοποίησε ότι το φαινόμενο αυτό εκφράζει μια ασυμμετρία στη φύση (Atkins, 2010). Ενώ η ροή της θερμότητας από ένα θερμό σε ένα ψυχρό σώμα είναι αυθόρμητη, η αντίστροφη διαδικασία δεν είναι αυθόρμητη. Διατύπωσε έτσι το 1849 το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο:

«η θερμότητα δε ρέει από ένα ψυχρό σε ένα θερμό σώμα χωρίς να συνοδεύεται από κάποια αλλαγή κάπου αλλού (δηλαδή χωρίς τη δαπάνη έργου)».

Ο Clausius έδειξε ότι υπάρχει μια καταστατική μεταβλητή που σχετίζεται με το ποσό της θερμότητας που μεταφέρεται από ένα σώμα υψηλής θερμοκρασίας σε ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας ή με το ποσό της θερμότητας που μετατρέπεται σε έργο (Haglund J., Jeppsson F. & Stromdahl H., 2010). Η μεταβλητή αυτή ονομάστηκε από τον ίδιο εντροπία και έδωσε τη δυνατότητα να διατυπωθεί ο δεύτερος νόμος με μια ανίσωση. Αν ΔQ είναι μία μικρή ποσότητα θερμότητας που αφαιρείται από ($\Delta Q < 0$) ή προσφέρεται σε ένα σώμα ($\Delta Q > 0$) και T η απόλυτη θερμοκρασία του σώματος τότε η εντροπία ορίζεται ως το πηλίκο $\Delta S = \Delta Q/T$ και ο δεύτερος νόμος διατυπώνεται ως εξής:

«η συνολική εντροπία ενός σώματος και του περιβάλλοντός του αυξάνεται σε κάθε αυθόρμητη διεργασία», δηλαδή: $\Sigma \Delta S \geq 0$.

Η ισότητα ισχύει για τις αντιστρεπτές διεργασίες ενώ για τις πραγματικές μη αντιστρεπτές διεργασίες ισχύει η ανισότητα. Βασική συνέπεια του δεύτερου νόμου της Θερμοδυναμικής είναι ότι ένα απομονωμένο σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση ισορροπίας όταν η εντροπία του είναι μέγιστη (Theodoratos N., 2012).

Ιδιαίτερα σημαντική υπήρξε η συνεισφορά στη Θερμοδυναμική των Maxwell και Boltzmann. Η ανάπτυξη από τους ίδιους της Κινητικής Θεωρίας των αερίων, η οποία επικεντρώνεται στις κατανομές των ταχυτήτων και των κινητικών ενεργειών των μορίων ενός αερίου (κατανομές Maxwell-Boltzmann), οδήγησε στην καθιέρωση του κλάδου της Στατιστικής Μηχανικής. Ο Boltzmann απέδειξε ότι ένα αέριο σε ισορροπία υπακούει στην κατανομή Maxwell-Boltzmann ανεξάρτητα από την αρχική κατανομή των ταχυτήτων των μορίων του. Συνέδεσε την κατανομή των ταχυτήτων με την εντροπία και κατέληξε σε νέο ορισμό της εντροπίας. Όρισε την έννοια της μακροκατάστασης, η οποία είναι η κατάσταση ενός συστήματος όπως παρατηρείται μακροσκοπικά και περιγράφεται από μεταβλητές όπως ο όγκος, η πίεση, και η θερμοκρασία, και την έννοια της μικροκατάστασης, η οποία είναι η διάταξη των θέσεων και ταχυτήτων όλων των σωματιδίων ενός συστήματος. Κάθε μακροκατάσταση μπορεί να προκύπτει από τεράστιο πλήθος μικροκαταστάσεων. Επομένως ένα σύστημα μπορεί να βρίσκεται σε μακροσκοπική ισορροπία, αλλά η μικροκατάσταση στην οποία βρίσκεται συνεχώς αλλάζει και δεν είναι προσδιορίσιμη, καθώς πλήθος σωματιδίων συγκρούονται μεταξύ τους, αλλάζουν θέση και ανταλλάσσουν ορμές. Ο Boltzmann υπέθεσε ότι σε κάθε μακροκατάσταση αντιστοιχούν W ισοπίθανες μικροκαταστάσεις και απέδειξε ότι η εντροπία μακροκατάστασης ορίζεται ως $S = k \ln W$, όπου k η σταθερά Boltzmann.

Η εξίσωση $S = k \ln W$ δείχνει ότι η εντροπία ενός συστήματος είναι αύξουσα συνάρτηση του W . Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της εντροπίας κατά τις αυθόρμητες διεργασίες οδηγεί το σύστημα σε μακροκαταστάσεις που μπορούν να επιτευχθούν με περισσότερους τρόπους, ή προκύπτουν από περισσότερες μικροκαταστάσεις. Συνεπώς, δεδομένου ότι η κατάσταση ισορροπίας αντιστοιχεί στην κατάσταση με τη μέγιστη εντροπία, η ισορροπία μπορεί να οριστεί ως η μακροκατάσταση εκείνη που προκύπτει από το μέγιστο αριθμό μικροκαταστάσεων (Theodoratos N., 2012).

2.1.2 Μακροσκοπική ή μικροσκοπική προσέγγιση;

Η θερμοδυναμική προσέγγιση αναφέρεται σε ένα σύστημα ανταλλαγής θερμότητας και έργου με το περιβάλλον αλλά δεν λαμβάνει υπόψη τη μικροσκοπική φύση της ύλης ή την εσωτερική δομή του συστήματος. Ο Clausius αναγνώρισε τη σημασία της διάταξης των μορίων και την τάση να αυξάνεται η αποδόμηση (disaggregation) του συστήματος, ως αποτέλεσμα της προστιθέμενης θερμότητας, στη φυσική ερμηνεία των αποτελεσμάτων του, αλλά δεν επεξεργάστηκε αυτή την ερμηνεία στον φορμαλισμό που χρησιμοποίησε. Η τάση για την αύξηση της εντροπίας αναφέρεται απλά, χωρίς περαιτέρω εξήγηση του μηχανισμού. Η αναφορά της εντροπίας είναι αφηρημένη και δύσκολο να την εντοπίσουμε ρητά, αλλά σχετίζεται με την τάση της ενέργειας να διασκορπίζεται (dissipate) και τη σύνδεση μεταξύ της μετατροπής της θερμότητας σε έργο και της μεταφοράς της θερμότητας από ένα σώμα υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα σώμα χαμηλότερης θερμοκρασίας. Για έναν μαθητή που μελετά το πεδίο της θερμοδυναμικής, είναι δύσκολο να κατανοήσει την έννοια της εντροπίας με τη χρήση μόνο της μακροσκοπικής προσέγγισης. Για μια πιο θεμελιώδη κατανόηση της έννοιας, απαιτείται η στατιστική μηχανική. Οι Maxwell, Boltzmann και Gibbs, δεκαετίες μετά από την εργασία του Clausius εισήγαγαν τη στατιστική συμπεριφορά των μεμονωμένων σωματιδίων στην ανάλυση των συστημάτων, ξεκινώντας από την κινητική θεωρία αερίων, μια τολμηρή κίνηση σε μια εποχή όπου η ύπαρξη των ατόμων δεν είχε επιβεβαιωθεί (Haglund J., Jeppsson F., & Stromdahl H., 2010)

Σχετικά με το ποια από τις παραπάνω προσεγγίσεις θα πρέπει να ακολουθηθεί στη διδασκαλία για την εισαγωγή της εντροπίας ο Baierlein (1994) υποστηρίζει ότι από τη μια μεριά μπορεί να υιοθετηθεί μια ιστορική και μακροσκοπική προσέγγιση που εστιάζει στις ιδιότητες των κυκλικών διαδικασιών, όπου οι έννοιες εντροπία και θερμοκρασία εισάγονται σαν καταστατικές συναρτήσεις. Αυτή παρέχει καλές ευκαιρίες για την επίλυση προβλημάτων στη μηχανική, αλλά περιορίζει την κατανόηση της φύσης των εμπλεκόμενων ποσοτήτων. Από την άλλη μεριά, μια μικροσκοπική προσέγγιση στατιστικής μηχανικής που περιλαμβάνει την εισαγωγή ενός μοντέλου συστήματος-σωματιδίου και της έννοιας των μικροκαταστάσεων, προσφέρει μια βαθύτερη κατανόηση των εμπλεκόμενων ποσοτήτων. Ο Reif (1999) συνηγορεί υπέρ μιας μικροσκοπικής προσέγγισης και τονίζει την ανάγκη της

κατανόησης των υποκείμενων μηχανισμών των φυσικών φαινομένων. Επιπλέον τονίζει τη δυσκολία για τους μαθητές να χτίσουν οπτικοποιημένα νοητικά μοντέλα με μια μακροσκοπική προσέγγιση. (Haglund J., & Jeppsson F., 2012). Εδώ φαίνεται να υπάρχει ένα παράδοξο στο ότι παρόλη την πρακτική της μηχανική προέλευση, είναι δύσκολη η οπτικοποίηση της θερμοδυναμικής έννοιας της εντροπίας. Αυτή η παρατήρηση θα μπορούσε να αποτελεί σημάδι των εξιδανικεύσεων που χρησιμοποιήθηκαν στη μοντελοποίηση των θερμικών μηχανών, ιδέες που είναι μακριά από τις πραγματικές μηχανές των αυτοκινήτων (Haglund J., Jeppsson F., & Stromdahl H., 2010).

2.1.3 Διερευνώντας τις αντιλήψεις των φοιτητών για την εντροπία

Ο Sozbiril (2001) διερεύνησε την εννοιολογική κατανόηση της εντροπίας από φοιτητές στη χημική θερμοδυναμική. Βρήκε ότι λίγοι φοιτητές χρησιμοποιούν την έννοια των μικροκαταστάσεων, χωρίς όμως να την έχουν κατανοήσει επαρκώς, για να εξηγήσουν τις μεταβολές της εντροπίας. Η πλειοψηφία αντιμετωπίζουν την εντροπία ως αταξία και οδηγούνται συχνά σε λάθος συμπεράσματα. (Haglund J. & Jeppsson F., 2013).

Οι Christensen, Meltzer & Ogilvie (2009) πραγματοποίησαν μια εκτενή μελέτη στις αντιλήψεις των φοιτητών για την εντροπία και το δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο. Το κύριο εύρημά τους ήταν ότι η ιδέα ότι η εντροπία του συστήματος και του περιβάλλοντος διατηρείται στις αυθόρμητες διαδικασίες είναι μια από τις πιο συνηθισμένες παρανοήσεις π.χ. κατά την ελεύθερη εκτόνωση όπου στην πραγματικότητα η εντροπία αυξάνεται. Η ιδέα μπορεί να οφείλεται στη σύγχυση μεταξύ εντροπίας και ενέργειας, μιας άλλης εκτατικής ποσότητας που σε αντίθεση με την εντροπία διατηρείται (Amin T. G., Jeppsson F., Haglund J., Stromdahl H., 2012). Ανάμεσα σε εκείνους τους φοιτητές που υποστηρίζουν μια κατεύθυνση στη μεταβολή της εντροπίας ακόμα και όταν δεν υπάρχουν επαρκείς πληροφορίες, το μεγαλύτερο ποσοστό των φοιτητών ισχυρίζονται ότι η εντροπία θα αυξηθεί και όχι ότι θα μειωθεί και για το σύστημα και για το περιβάλλον. Φαίνεται ότι οι περισσότεροι φοιτητές προσπαθούν να συμβιβάσουν δυο δημοφιλείς ιδέες: την κοινή αντίληψη ότι η εντροπία πάντα αυξάνεται και την πεποίθηση ότι η συνολική εντροπία θα πρέπει να διατηρείται όπως η ενέργεια. Οι ερευνητές εφάρμοσαν στρατηγικές ώστε να οδηγήσουν τους φοιτητές σε φυσικές καταστάσεις που θα τους επέτρεπαν να

ενισχύσουν την κατανόηση της διατήρησης της ενέργειας και να αμφισβητήσουν την αντίληψη ότι η εντροπία διατηρείται. (Christensen W. M., Meltzer D. E. & Ogilvie C. A., 2009).

Τα ευρήματα έρευνας των Brosseau & Viard (1992) ήταν ενδεικτικά του πόσο καθιερωμένο είναι το νόημα της λέξης αταξία στα εννοιολογικά πλαίσια των φοιτητών. Συσχετίζοντας την εντροπία με την αταξία, οι φοιτητές υπερτονίζουν τη συνεισφορά της χωρικής διάταξης στην εντροπία και αποτυγχάνουν να λάβουν υπόψη τη κατανομή της ενέργειας, ενισχύοντας την άποψη του Lambert (2002) (Amin T. G., Jeppsson F., Haglund J., Stromdahl H., 2012).

Κατά τη διάρκεια έρευνας οι Haglund J., & Jeppsson F. παρουσίασαν στους φοιτητές περιγραφές δυο θερμικών διαδικασιών: μιας αντιστρεπτής αδιαβατικής εκτόνωσης ιδανικού αερίου και μιας ελεύθερης αδιαβατικής εκτόνωσης ιδανικού αερίου. Ζητήθηκε από τους φοιτητές να σχηματίσουν αναλογίες για τις διαδικασίες με ιδιαίτερη έμφαση στην εντροπία (Haglund J., & Jeppsson F., 2012). Παρόλο που οι φοιτητές στις αναλογίες τους χρησιμοποίησαν τη μεταφορά «η εντροπία είναι αταξία» αναγνώρισαν τη δυσκολία να εφαρμοστεί η συγκεκριμένη μεταφορά σε καταστάσεις επίλυσης προβλημάτων. Επίσης η σταθερή εντροπία φαίνεται να έρχεται σε αντίθεση με τη διαίσθησή τους. Ενώ είχαν διδαχτεί ότι η εντροπία συνδέεται ισχυρά με τις μικροκαταστάσεις, η έμφαση στη χωρική διάταξη δυσκόλευε την κατανόηση αυτής της σύνδεσης. Παρέχοντας οι ερευνητές την πληροφορία ότι οι μικροκαταστάσεις συνδέονται με την κατανομή της ενέργειας σε όλα τα κβαντισμένα επίπεδα, και όχι μόνο με τη χωρική διάταξη, οι φοιτητές άρχισαν να κατανοούν τη σταθερή εντροπία αναγνωρίζοντας ότι η συνεισφορά της αύξησης του όγκου στην εντροπία εξουδετερώνεται από τη μείωση της ενέργειας του συστήματος (Haglund J. & Jeppsson F., 2012).

Οι Leinonen, Asikainen, και Hirvonen επικεντρώθηκαν στο να αξιολογήσουν κατά πόσο οι μαθητές εφαρμόζουν με συνέπεια το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής σε μακροσκοπικό και μικροσκοπικό επίπεδο, στο πλαίσιο των διαδικασιών μεταφοράς θερμότητας. Η πιο συνηθισμένη ασυνέπεια ήταν η τάση των μαθητών να θεωρούν ότι ο αριθμός των πιθανών μικροκαταστάσεων παραμένει σταθερός, ακόμη και όταν δηλώνουν ότι η εντροπία αυξάνεται σε μια παρόμοια διαδικασία. Επιπλέον οι φοιτητές αντιλαμβάνονται την εντροπία ως μια διατηρούμενη ποσότητα ενώ ένα

μικρό ποσοστό θεωρούν ότι η εντροπία δεν θα μπορούσε να μειωθεί ακόμα και σε τοπικό επίπεδο. Προκειμένου να αντιμετωπιστούν οι παρατηρούμενες ασυνέπειες, οι ερευνητές προτείνουν ότι οι διδάσκοντες θα πρέπει να δίνουν εργασίες που να προκαλούν τους μαθητές να αξιολογήσουν φαινόμενα σε μακροσκοπικά και μικροσκοπικά επίπεδα ταυτόχρονα και που θα καθοδηγούν τους μαθητές στην αναζήτηση αντιφάσεων στον τρόπο σκέψης τους (Leinonen R., Asikainen M. & Hirvonen P., 2015).

Οι Smith et al. διερεύνησαν τη δημιουργία ή όχι συνδέσεων από τους μαθητές ανάμεσα στον κύκλο Carnot, τις αντιστρεπτές μεταβολές, και τις μεταβολές της εντροπίας, όπως υπαγορεύονται από το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής. Τα ευρήματα έδειξαν ότι μικρό ποσοστό των μαθητών αναγνώρισε ότι η ύπαρξη θερμικής μηχανής με μεγαλύτερο συντελεστή απόδοσης από ό,τι μια μηχανή Carnot θα παραβίαζε τους νόμους της θερμοδυναμικής προκαλώντας μείωση της συνολικής εντροπίας του σύμπαντος (Smith T. I., Christensen W. M., Mountcastle D. B. & Thompson J. R., 2015).

Ο Loverude διερεύνησε την ανάπτυξη από τους μαθητές, συλλογισμών που σχετίζονται με τη μεταφορά θερμότητας, τη μεγιστοποίηση της εντροπίας, και των στατιστικών εννοιών της πολλαπλότητας και της πιθανότητας σε μακροσκοπικά συστήματα σε θερμική ισορροπία. Η σύνδεση της εντροπίας με την πολλαπλότητα ήταν ασυνήθιστη και κανένας από τους μαθητές δεν επικαλέστηκε ρητά τον αλγόριθμο του Clausius για μακροσκοπικές μεταβολές της εντροπίας, παρά την έμφαση που δόθηκε στα μαθήματα. Αναδύθηκαν συλλογισμοί όπως η διατήρηση της εντροπίας και η εντροπία ως αταξία, παρόλο που δεν είχαν ενθαρρυνθεί από τον εκπαιδευτή. Για κάποιους μαθητές είναι εμφανής μια σύγκρουση μεταξύ της σύνδεσης της εντροπίας και της αταξίας και της σύνδεσης της κατάστασης ισορροπίας με μεγαλύτερη αταξία και (ή) εντροπία (Loverude M., 2015).

2.1.4 Ιστορία και εφαρμογή της «αταξίας» για το χαρακτηρισμό της εντροπίας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το 1865 ο Clausius ονόμασε «εντροπία» για μια αντιστρεπτή μεταβολή το πηλίκο της θερμότητας διαιρούμενης με την απόλυτη θερμοκρασία. Αργότερα τον 19ο αιώνα, αλλά ακόμα πριν από την ανάπτυξη της

κβαντομηχανικής, η μεγαλύτερη «αταξία» των μορίων ενός αερίου σε υψηλή θερμοκρασία σε σύγκριση με τη κατανομή των ταχυτήτων των μορίων σε χαμηλότερη θερμοκρασία επιλέχθηκε από τον Boltzmann για να περιγράψει την υψηλότερη εντροπία του (Lambert F., 2002). Στα κείμενά του ο Boltzmann αναφέρει: «. . . πρέπει κανείς να υποθέσει ότι ένα εξαιρετικά πολύπλοκο μηχανικό σύστημα αποτελεί μια καλή εικόνα του κόσμου, και ότι το σύνολο ή τουλάχιστον το μεγαλύτερο μέρος των τμημάτων του που μας περιβάλλει είναι αρχικά σε μια πολύ καλά διατεταγμένη (*ordered*), ως εκ τούτου, πολύ απίθανη κατάσταση. . . όταν δύο ή περισσότερα μικρά μέρη αυτού έρχονται σε αλληλεπίδραση μεταξύ τους, το σύστημα που σχηματίζεται από αυτά τα μέρη είναι επίσης αρχικά σε μια οργανωμένη κατάσταση, και όταν αφεθεί το ίδιο προχωρά με ταχείς ρυθμούς στην άτακτη (*disordered*) πιο πιθανή κατάσταση» (Leff H., 2007). Ωστόσο, η «αταξία» διευκόλυνε την απεικόνιση και όχι τη θεωρητική ερμηνεία για μια υψηλότερη τιμή εντροπίας. Την αναλογία του Boltzmann ακολούθησαν και άλλοι. Ο Helmholtz το 1882 ονομάζει την εντροπία "Unordnung" (αταξία), και ο Gibbs περιγράφει την εντροπία ως "mixed-up-ness", μια φράση που βρέθηκε μετά τον θάνατό του στα γραπτά του και χρησιμοποιήθηκε στη συνέχεια από πολλούς συγγραφείς. Ό, τι και αν εννοούσε ο Boltzmann μ' αυτό, δεν υπάρχει καμία απόδειξη ότι χρησιμοποίησε την αταξία σε οποιαδήποτε έννοια εκτός από την αυστηρή εφαρμογή στην ενέργεια των μορίων (Lambert F., 2002).

2.1.5 Η εντροπία ως «αταξία» (*disorder*)

Ένας τρόπος να εισάγουμε αφηρημένες επιστημονικές έννοιες είναι η χρήση μεταφορών και αναλογιών. Ωστόσο η χρήση της μεταφοράς «η εντροπία είναι αταξία» προκαλεί σύγχυση. Η λέξη «αταξία» στο πεδίο πηγή της μεταφοράς έχει διαφορετικά νοήματα τα οποία συμβάλλουν στην ασάφεια της ερμηνείας της μεταφοράς (Jeppsson F., Haglund J., & Stromdahl H., 2011)

Σύμφωνα με τους Leff, Lambert και Styer αν δεχτούμε την ερμηνεία της λέξης «αταξία» ως έλλειψη τάξης ή τακτικής διάταξης, εστιάζουμε αποκλειστικά στη χωρική διάταξη. Εδώ το πεδίο-πηγή αντιπροσωπεύει ένα μοντέλο ενός συστήματος που περιέχει δυο επίπεδα. Στο μοντέλο αυτό το σύστημα στο ένα επίπεδο περιλαμβάνει σύνολο στοιχείων σε διαφορετικό βαθμό αταξίας σε σχέση με το άλλο. Τυπικό παράδειγμα είναι η αναλογία του ακατάστατου δωματίου που παρουσιάζεται από τον Ekstig (2002) σε ένα βιβλίο για την εκπαίδευση των δασκάλων στη Σουηδία:

«Η εντροπία είναι μέτρο της αταξίας ενός συστήματος. Αν αδειάσω ένα κουτί με κομμάτια Lego στο πάτωμα, υπάρχει αταξία ανάμεσα στα κομμάτια Lego. Αυτά διασκορπίζονται τυχαία στο πάτωμα. Η εντροπία που έχουν τα κομμάτια Lego είναι υψηλότερη όταν αυτά είναι διασκορπισμένα από όταν είναι τακτοποιημένα στο κουτί» (Jeppsson F., Haglund J., & Stromdahl H., 2011).

Ο επιδιωκόμενος στόχος της μεταφοράς είναι η ερμηνεία της εντροπίας από την οπτική της στατιστικής μηχανικής, όπου μια μακροκατάσταση του συστήματος συνδέεται με ένα μεγάλο σύνολο αντίστοιχων μικροκαταστάσεων. Ένα κύριο μειονέκτημα της χρήσης της μεταφοράς της αταξίας στη διδασκαλία της εντροπίας είναι η τάση να δίνεται στο πεδίο-πηγή ένα στιγμιότυπο μιας μόνο μικροκατάστασης. Η δυναμική διακύμανση ανάμεσα σε όλες τις πιθανές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν σε μια μακροκατάσταση στο πεδίο-στόχος είναι δύσκολο να αναδειχθεί με αυτή την προσέγγιση. Η αταξία συνδέεται με οπτικά εμφανείς χωρικές διατάξεις και την «ακαταστασία» η οποία δε λαμβάνει υπόψη την κατανομή της ενέργειας (Jeppsson F., Haglund J., & Stromdahl H., 2011).

Μερικοί μαθητές δημιουργούν απροσδόκητες συσχετίσεις ανάμεσα στην εντροπία και την «τάξη». Σύμφωνα με τα ευρήματα του Loverude η θερμική ισορροπία είναι μια φυσική κατάσταση, και ως εκ τούτου, κατάσταση με τάξη. Ακολουθώντας οι μαθητές αυτό το συλλογισμό, προέβλεψαν ότι η εντροπία ενός συστήματος θα μειωθεί καθώς το σύστημα πλησιάζει τη θερμική ισορροπία (Loverude M., 2015). Ίδια συσχέτιση της τάξης με τη φυσική κατάσταση των πραγμάτων διαπίστωσαν και οι Geller B. et al όταν φοιτητές τους προέβλεψαν ότι κατά την εκτόνωση η τελική κατάσταση του συστήματος είναι σε μεγαλύτερη τάξη και προσδιορίζεται από μεγαλύτερη εντροπία. Με δεδομένο τον ασαφή ορισμό της «αταξίας» και την ποικιλία των νοημάτων που οι μαθητές πιθανόν να συνδέουν με τη λέξη, δεν υπάρχει κανένας προφανής λόγος να αναμένεται από τους μαθητές να συνδέσουν την «αταξία» με ένα ιδιαίτερο νόημα και όχι με άλλα (Geller B. et al., 2014).

3. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

3.1. Σκοπός και Στόχοι της Έρευνας

Γενικότερα ο **σκοπός της παρούσας έρευνας είναι** να διερευνηθούν και να χαρτογραφηθούν οι πορείες μάθησης που ακολουθούν οι συμμετέχοντες για την εννοιολόγηση της έννοιας της εντροπίας.

Πιο αναλυτικά **οι στόχοι της έρευνας είναι:**

- Να ανιχνευθούν οι εναλλακτικές ιδέες των συμμετεχόντων για τις έννοιες σύστημα, μακροκατάσταση, μικροκατάσταση, θερμική ισορροπία, αντιστρεπτή μεταβολή, μη αντιστρεπτή μεταβολή και εντροπία.
- Να διερευνηθεί, ιχνηλατώντας τις πορείες μάθησης των συμμετεχόντων, μέσω του φαινομένου της διάχυσης χρωστικής, ποιες έννοιες κρίνονται απαραίτητες για τη μικροσκοπική προσέγγιση της εντροπίας
- Να διερευνηθεί σε ποια έκταση οι συμμετέχοντες αναπτύσσουν ολοκληρωμένους συλλογισμούς κατά την εφαρμογή της έννοιας της εντροπίας σε νέο πλαίσιο.

3.2. Μεθοδολογία

3.2.1 Προσέγγιση και τύπος έρευνας

Η ανάγκη να μελετηθεί η ίδια η διαδικασία ανάπτυξης της μάθησης και όχι απλά το αποτέλεσμα της συντέλεσε στην επιλογή της ποιοτικής τύπου έρευνας. Σαν εργαλείο συλλογής δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ένα διδακτικό πείραμα. Η μέθοδος του «διδασκτικού πειράματος» εντάσσεται στο ευρύτερο πλαίσιο της ποιοτικής προσέγγισης της εκπαιδευτικής έρευνας ως έκφραση της ανάγκης για συστηματική διερεύνηση και ερμηνεία «πειραματισμών» στο πλαίσιο της διδακτικής πράξης (Χρονάκη, 2010). Ο ερευνητής από εξωτερικός παρατηρητής γίνεται συμμετέχων. Ο ρόλος του δεν περιορίζεται στην κατασκευή νοητικών μοντέλων που αφορούν στις γνωστικές δράσεις του μαθητή, αλλά και στην επιπλέον διδακτικών παρεμβάσεων ώστε να κατανοηθούν βαθύτερα οι δράσεις που παρατηρούνται. Ο ερευνητής κατασκευάζει το μοντέλο της αρχικής γνωστικής συμπεριφοράς του μαθητή όσον αφορά σε μία συγκεκριμένη έννοια - φαινόμενο - διαδικασία και κατόπιν αποφασίζει για τον μαθησιακό στόχο. Κατά την εφαρμογή του διδακτικού

πειράματος, μελετάται το πέρασμα του μαθητή από το μοντέλο της αρχικής γνωστικής συμπεριφοράς στον μαθησιακό στόχο μέσα από την προτεινόμενη διδακτική παρέμβαση. Βασική επιδίωξη είναι η διαμόρφωση και η ανίχνευση ενός «γνωστικού μονοπατιού», το οποίο συνδέει το αρχικό νοητικό σχήμα του μαθητή με το επιθυμητό και ενέχει μία σειρά από σχήματα, επεκτάσεις και μετασχηματισμούς (Steffe, 1991).

Ο ερευνητής-εκπαιδευτικός σε οποιαδήποτε στιγμή θα πρέπει να είναι πρόθυμος να παραμερίσει τις δικές του υποθέσεις και να εξερευνήσει τα σχήματα σύμφωνα με τα οποία οι μαθητές δρουν και δίνουν νόημα στις έννοιες. Ερμηνεύοντας τον λόγο και τις δράσεις των μαθητών θα πρέπει να είναι έτοιμος να λάβει επί τόπου αποφάσεις ώστε να δημιουργήσει καταστάσεις, να απευθύνει κρίσιμες ερωτήσεις και να ενθαρρύνει τη μάθηση (Steffe, 1991).

3.2.2 Επιλογή συμμετεχόντων

Στην έρευνα συμμετείχαν δευτεροετείς φοιτήτριες και φοιτητές του ΠΤΔΕ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας κατά το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016. Η δυνατότητα πρόσβασης στο παραπάνω Τμήμα καθόρισε και την επιλογή του δείγματος. Ως εκ τούτου για την επιλογή του χρησιμοποιήθηκε ευκαιριακή δειγματοληψία (convenience sampling) (Creswell, 2012). Η έρευνα σχεδιάστηκε κατά τρόπο ώστε να πραγματοποιηθεί σε δυο φάσεις, όπως θα αναφερθεί παρακάτω. Το φύλο και η κατεύθυνση σπουδών που είχαν ακολουθήσει στο Λύκειο οι φοιτήτριες/-τές που συμμετείχαν στην πρώτη φάση της έρευνας φαίνονται στον πίνακα 1, ενώ το φύλο και η κατεύθυνση σπουδών των φοιτητριών/-τών που συμμετείχαν στην δεύτερη φάση της έρευνας φαίνονται στον πίνακα 2. Από τις/τους φοιτήτριες/-τές που συμμετείχαν στην πρώτη φάση, οι 14 φοιτήτριες συμμετείχαν και στη δεύτερη φάση. Ο συνολικός αριθμός των φοιτητριών/-τών που συμμετείχαν, σε εθελοντική βάση, ήταν 22 σχηματίζοντας οι ίδιες ζευγάρια τα οποία παρουσιάζονται στον πίνακα 2. Στον πίνακα 2 φαίνεται και η κωδικοποίηση των φοιτητριών/-τών για ατομική αναφορά, δηλαδή στο πρώτο ζευγάρι αντιστοιχούν οι κωδικοί Σ1-Σ2, στο δεύτερο οι κωδικοί Σ3-Σ4 κ.ο.κ. Στο εξής η αναφορά στο σύνολο των φοιτητών που συμμετείχαν στην παρούσα έρευνα γίνεται σε θηλυκό γένος.

Πίνακας 1: Χαρακτηριστικά συμμετεχόντων στο ερωτηματολόγιο

Κατεύθυνση Φύλο	Θεωρητική	Θετική	Τεχνολογική	Αδιευκρίνιστη
Άνδρες	8	0	5	1
Γυναίκες	74	3	7	2
Σύνολο	82	3	12	3

Πίνακας 2: Χαρακτηριστικά και κωδικοί συμμετεχόντων στο διδακτικό πείραμα

A/A	ΦΥΛΟ	ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ	ΚΩΔΙΚΟΣ
1	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ1
2	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ2
3	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ3
4	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ4
5	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ5
6	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ6
7	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ7
8	Γυναίκα	Θετική	Σ8
9	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ9
10	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ10
11	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ11
12	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ12
13	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ13
14	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ14
15	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ15
16	Άνδρας	Θεωρητική	Σ16
17	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ17
18	Γυναίκα	Τεχνολογική	Σ18
19	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ19
20	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ20
21	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ21
22	Γυναίκα	Θεωρητική	Σ22

3.2.3 Σχεδιασμός της έρευνας

Η ανασκόπηση της βιβλιογραφίας που παρουσιάστηκε στο θεωρητικό πλαίσιο της εργασίας, δείχνει ότι υπάρχει πλήθος ενδεικτικών στοιχείων αναφορικά με προβλήματα που αντιμετωπίζουν οι φοιτητές σχετικά με την κατανόηση της έννοιας της εντροπίας. Ορισμένα ευρήματα καταδεικνύουν ότι οι δυσκολίες σχετίζονται όχι μόνο με την έννοια αυτή καθ'αυτή, αλλά και με τις εννοιολογήσεις που δίνουν οι φοιτητές σε άλλες έννοιες σχετικές, όπως σύστημα, μακροκατάσταση, μικροκατάσταση και ισορροπία. Όπως αναφέρθηκε και στην εισαγωγή, επιλέχθηκε η μικροσκοπική προσέγγιση της εντροπίας χωρίς όμως την εφαρμογή του φορμαλισμού του Boltzmann $S = k \ln W$ για τον ποσοτικό υπολογισμό της εντροπίας. Η επιλογή αυτή στηρίζεται σε τρεις παραδοχές. Αρχικά είναι σε συμφωνία με μελέτες που έδειξαν ότι μια μακροσκοπική προσέγγιση εμποδίζει την κατανόηση των υποκείμενων μηχανισμών των φυσικών φαινομένων και την κατασκευή οπτικοποιημένων νοητικών μοντέλων από τους φοιτητές. Ταυτόχρονα υιοθετώντας μια μακροσκοπική προσέγγιση θα έπρεπε να συμπεριληφθούν στο διδακτικό πείραμα έννοιες όπως θερμότητα, θερμοκρασία και ενέργεια για τις οποίες οι φοιτητές εμφανίζουν πληθώρα εναλλακτικών ιδεών. Επιπλέον η έρευνα απευθύνεται σε φοιτητές Παιδαγωγικού τμήματος, το μεγαλύτερο ποσοστό των οποίων προέρχεται από θεωρητική κατεύθυνση, ως εκ τούτου κατά τη φοίτησή τους στο Λύκειο δεν έχουν διδαχτεί Θερμοδυναμική.

Η έρευνα σχεδιάστηκε κατά τρόπο ώστε σε πρώτη φάση να διερευνηθεί πώς εννοιολογούν οι φοιτήτριες τις έννοιες σύστημα, μακροκατάσταση, μικροκατάσταση, θερμική ισορροπία, αντιστρεπτή μεταβολή, μη αντιστρεπτή μεταβολή και εντροπία. Θεωρήθηκε σημαντικό για τους ερευνητές να κατασκευάσουν μια τοπογραφία των αυθόρμητων εννοιολογήσεων των φοιτητριών πριν από τη συμμετοχή τους στο διδακτικό πείραμα. Οι φοιτήτριες κλήθηκαν να συμπληρώσουν ένα ερωτηματολόγιο που αποτελούνταν από δυο ερωτήματα (βλ. παράρτημα Α). Το πρώτο ερώτημα αφορούσε στο φυσικό φαινόμενο της τήξης ενός κομματιού πάγου όταν τοποθετηθεί σε ένα γυάλινο ποτήρι και καλούνταν οι φοιτήτριες να περιγράψουν τις παραπάνω έννοιες για το φαινόμενο. Το δεύτερο ερώτημα ήταν πιο γενικό και απαιτούσε να συσχετίσουν τις προαναφερθείσες έννοιες με άλλα φαινόμενα του φυσικού κόσμου.

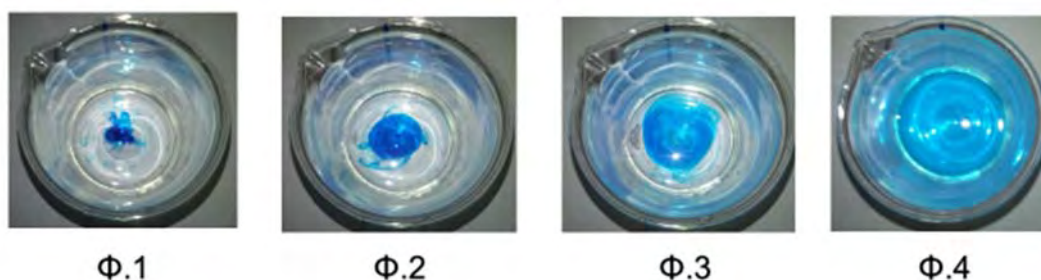
Τα ευρήματα της ανάλυσης που ακολούθησε στα δεδομένα των συμπληρωμένων ερωτηματολογίων και τα ευρήματα προηγούμενων ερευνών αποτέλεσαν τον σκελετό του σχεδιασμού και του προγραμματισμού του διδακτικού πειράματος. Επιλέχθηκε η διδακτική προσέγγιση, λήφθηκαν αποφάσεις για το είδος των δραστηριοτήτων που θα πραγματοποιούνταν, και σχεδιάστηκε περίπου η σειρά και ο τρόπος υλοποίησης καθενός από τους στόχους της διδασκαλίας (βλ. Παράρτημα Β). Ωστόσο, ήταν αναμενόμενο ότι το πνεύμα της διερευνητικής διδασκαλίας θα συνεχιζόταν καθ' όλο το διδακτικό πείραμα συνεπώς μπορεί να προέκυπταν κατά τη διάρκειά του, σχήματα διαφορετικά από εκείνα που εντοπίστηκαν πριν από την έναρξη του διδακτικού πειράματος.

Το διδακτικό πείραμα (στο υπόλοιπο κείμενο αναφέρεται ως διδασκαλία) που σχεδιάστηκε εφαρμόστηκε σε ζευγάρια φοιτητριών. Αρχικά, πραγματοποιήθηκε μια πιλοτική εφαρμογή σε ένα ζευγάρι και από την ανάλυση των δεδομένων που προέκυψαν, εκτός των απαιτούμενων αλλαγών, προστέθηκε και μια επέκταση καθώς εντάχθηκε σ' αυτή μια τελική δραστηριότητα για να υλοποιηθεί από τις φοιτήτριες η εφαρμογή εντροπίας σε νέο πλαίσιο και συγκεκριμένα στη διαδικασία της εκτόνωσης (βλ. Παράρτημα Β).

3.2.4 Περιγραφή του υλικού

Στην ουσία του ορισμού της εντροπίας βρίσκεται η ιδέα του αριθμού των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν σε μια δεδομένη μακροκατάσταση. Οι Martin et al (2013) για να φωτίσουν την ιδέα του αριθμού των μικροκαταστάσεων (πολλαπλότητα) ο οποίος έχει άμεση σχέση με την εντροπία, πρότειναν τη μελέτη ενός μικροσκοπικού συστήματος των μορίων μιας χρωστικής κατά τη διάχυσή της στο νερό. Η παραπάνω πρόταση υιοθετήθηκε και εφαρμόστηκε στο σχεδιασμό του διδακτικού πειράματος. Θεωρήθηκε απαραίτητο να προηγηθεί η πραγματοποίηση του πειράματος της διάχυσης ώστε μέσα από μακροσκοπική μελέτη να εννοιολογηθούν οι έννοιες σύστημα και μακροκατάσταση. Για την πραγματοποίηση του πειράματος χρησιμοποιήθηκε χρωστική ζαχαροπλαστικής και ένα δοχείο ζέσης με νερό. Στη συνέχεια για την οπτικοποίηση των μικροκαταστάσεων δημιουργήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο του μικροσκοπικού συστήματος των μορίων νερού-χρωστικής. Για να γίνει η μετάβαση από το πείραμα επίδειξης, στο οποίο η χρωστική διαχέεται σε όλο τον όγκο του νερού (3 διαστάσεις), στο μοντέλο, όπου γίνεται η

παραδοχή ότι τα μόρια της χρωστικής κινούνται στο επίπεδο (2 διαστάσεις), μεσολαβεί η επίδειξη τεσσάρων φωτογραφιών.



Σχήμα 1: Στιγμιότυπα της διάχυσης της χρωστικής στο νερό

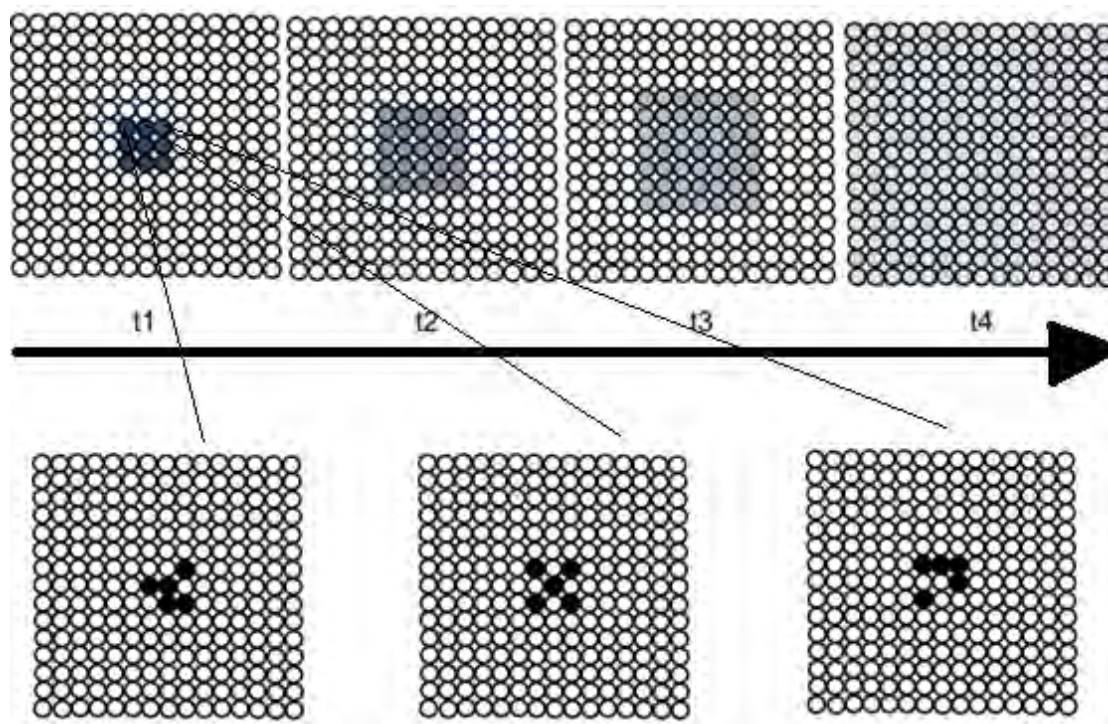
Οι φωτογραφίες απεικονίζουν τέσσερα στιγμιότυπα της διάχυσης της χρωστικής στην επιφάνεια του νερού του ποτηριού (2 διαστάσεις). Η τέταρτη φωτογραφία έχει ληφθεί αρκετό χρόνο μετά την έναρξη του πειράματος, όταν πλέον το μείγμα χρωστικής-νερού έχει ομογενοποιηθεί πλήρως.

Στη χρήση του μοντέλου οδήγησε η ανάγκη προσέγγισης του μικρόκοσμου, αφού η παρατήρηση των μορίων είναι αδύνατη ακόμα και με μικροσκόπιο. Ως μοντέλο στην επιστήμη μπορεί να θεωρηθεί «μια αναπαράσταση ενός φαινομένου που δημιουργήθηκε αρχικά για ένα συγκεκριμένο σκοπό» (Gilbert, Boulter & Elmer, 2000). Τα μοντέλα αποτελούν βασικά εργαλεία μάθησης και διδασκαλίας στα μαθήματα των φυσικών επιστημών. Διευκολύνουν τον εκπαιδευτικό να παρουσιάσει φυσικά φαινόμενα και έννοιες που είναι δύσκολο να προσεγγιστούν άμεσα στην τάξη, λόγω ποικίλων περιορισμών. Με αυτόν τον τρόπο οι μαθητές κατανοούν λειτουργίες που βρίσκονται έξω από την άμεση εμπειρία τους. Είναι σημαντικό να τονιστεί ότι τα μοντέλα είναι εργαλεία σκέψης και ερμηνείας της πραγματικότητας, και όχι η ίδια η πραγματικότητα (Χαλκιά Κ., 2012).

Στο διδακτικό πείραμα που σχεδιάστηκε, όπως ήδη αναφέρθηκε, ως διδακτικό εργαλείο για την οπτικοποίηση των μικροκαταστάσεων χρησιμοποιήθηκε ένα απλοποιημένο μοντέλο του συστήματος νερό-χρωστική (Martin J. S. et al, 2013). (Στο Παράρτημα Γ παρατίθεται το πρόγραμμα προβολής διαφανειών για την παρουσίαση του μοντέλου). Στο μοντέλο αυτό (σχήμα), θεωρήθηκε ότι το σύστημα αποτελείται από 225 σωματίδια εκ των οποίων τα 220 είναι μόρια νερού και τα 5

μάυρα είναι μόρια χρωστικής. Τα 225 μόρια καταλαμβάνουν τις 225 θέσεις ενός πλέγματος. Για την απεικόνιση του συστήματος, έγιναν οι ακόλουθες παραδοχές:

1. Όλα τα μόρια μπορούν να θεωρηθούν απλές σφαίρες.
2. Δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μορίων.
3. Τα μόρια μπορούν να καταλάβουν μόνο διακριτές x, y θέσεις πάνω σε ένα δισδιάστατο Καρτεσιανό επίπεδο.
4. Μόνο ένα μόριο μπορεί να καταλάβει οποιαδήποτε δεδομένη θέση σε μια δεδομένη χρονική στιγμή.
5. Τα μόρια της χρωστικής μπορούν να καταλάβουν μόνο τις θέσεις του πλέγματος που είναι χρωματισμένες μπλε για μια δεδομένη χρονική στιγμή.



Σχήμα 2: Μοντέλο για την οπτικοποίηση του μικρόκοσμου

Τη χρονική στιγμή t_1 που εισάγεται η χρωστική στο νερό, τα μόρια της χρωστικής βρίσκονται κοντά μεταξύ τους. Τα μόρια της χρωστικής καταλαμβάνουν τις πέντε από τις εννέα τυχαίες θέσεις σε ένα μπλε τετράγωνο 3×3 του συστήματος. Υπολογίζεται ότι ο συνολικός αριθμός τρόπων διευθέτησης των πέντε μορίων χρωστικής στις εννέα διαφορετικές θέσεις είναι 126. Οι 126 διαφορετικοί τρόποι διευθέτησης αποτελούν 126 διαφορετικές μικροκαταστάσεις του συστήματος που

αντιστοιχούν στην ίδια μακροκατάσταση. Η πρόσβαση στις διαφορετικές μικροκαταστάσεις επιτυγχάνεται κάνοντας κλικ στα μπλε κυκλάκια στα οποία έχουν εισαχθεί σύνδεσμοι, όπως φαίνεται στο σχήμα.

Στην επόμενη χρονική στιγμή t_2 , τα μόρια της χρωστικής έχουν τη δυνατότητα να έχουν πρόσβαση σε μια μεγαλύτερη περιοχή του πλέγματος εξαιτίας της διάχυσης. Αυτό αυξάνει τον αριθμό των πιθανών θέσεων για τα μόρια της χρωστικής από εννέα σε είκοσι πέντε και οδηγεί σε περισσότερους τρόπους διευθέτησης των μορίων χρωστικής.

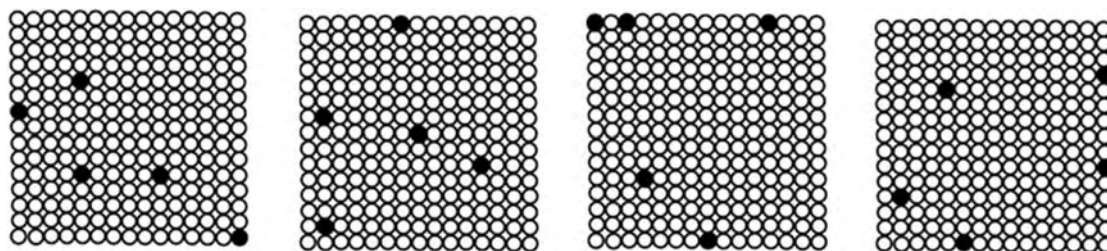
Καθώς περνάει περισσότερος χρόνος, τα μόρια της χρωστικής αποκτούν πρόσβαση σε όλο και περισσότερες θέσεις. Το φαινόμενο ολοκληρώνεται θεωρητικά μετά από άπειρο χρόνο ή πρακτικά μετά από αρκετό χρόνο, τη χρονική στιγμή t_4 όταν τα μόρια της χρωστικής μπορούν να έχουν πλέον πρόσβαση σε όλες τις πιθανές 225 θέσεις του πλέγματος.

Με κάθε αύξηση των πιθανών θέσεων, αυξάνει ο αριθμός των τρόπων διευθέτησης των μορίων της χρωστικής στο πλέγμα, δηλαδή ο αριθμός των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν σε κάθε μακροκατάσταση. Η τελική μακροκατάσταση του συστήματος στην οποία η χρωστική διαχέεται σε όλο το νερό, αποτελείται από μέγιστο πλήθος μικροκαταστάσεων.

Για το σχεδιασμό των μικροκαταστάσεων από τις φοιτήτριες, χρησιμοποιήθηκαν πλέγματα σκόπιμα σχεδιασμένα σε διαφάνειες, στα οποία οι φοιτήτριες χρωμάτιζαν τα μόρια στις θέσεις που υποδείκνυε το μοντέλο. Τοποθετώντας τις διαφάνειες τη μια πάνω στην άλλη, τα πλέγματα επικαλύπτονται ώστε να εμφανίζεται η αναπαράσταση της κάθε φωτογραφίας στην οποία φαίνονται και οι πιθανές θέσεις. Πίσω από αυτή την ενέργεια κρύβεται η ιδέα ότι σε κάθε μακροκατάσταση αντιστοιχεί ένα μεγάλο πλήθος μικροκαταστάσεων.

Για τη δραστηριότητα 1 χρησιμοποιήθηκαν επτά φωτογραφίες (παρατίθενται στο Παράρτημα Δ) που απεικονίζουν τη διάχυση κόκκινης χρωστικής στην επιφάνεια νερού του ποτηριού, από τη στιγμή που έπεσε έως αρκετά πριν να ολοκληρωθεί η διάχυση. Πρόκειται δηλαδή για επτά στιγμιότυπα- μακροκαταστάσεις που έχουν ληφθεί σε κοντινές χρονικές στιγμές. Με τη δραστηριότητα 1 εισάγεται η έννοια των μη αντιστρεπτών μεταβολών και η σύνδεσή τους με την αύξηση της εντροπίας. Για

τη δραστηριότητα 2 χρησιμοποιήθηκαν τέσσερα χαρτάκια με σχεδιασμένα πλέγματα-μικροκαταστάσεις.



Σχήμα 3: Διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στην κατάσταση ισορροπίας

Στόχος της δραστηριότητας 2 είναι η διαπίστωση από τις φοιτήτριες ότι όταν η μακροκατάσταση διατηρείται σταθερή (ισορροπία), ο τρόπος με τον οποίο εξελίσσεται μικροσκοπικά το σύστημα είναι τυχαίος. Επιπλέον μέσω των δυο δραστηριοτήτων αξιολογείται το κατά πόσο οι φοιτήτριες χρησιμοποιούν στις εκφράσεις τους τους όρους εντροπία, μικροκατάσταση και μακροκατάσταση για την περιγραφή της διάχυσης της χρωστικής και αποδίδουν σ' αυτούς την ορθή ερμηνεία τους. Οι δυο δραστηριότητες περιγράφονται αναλυτικά στο σχεδιασμό της διδασκαλίας (βλ. Παράρτημα Β).

3.2.5 Διαδικασία Συλλογής και Ανάλυσης Δεδομένων

Όπως προαναφέρθηκε τα δεδομένα που συλλέχθηκαν προέρχονται από τρεις πηγές. Τα γραπτά δεδομένα αφορούν σε ερωτηματολόγια που συμπληρώθηκαν από 100 φοιτήτριες του τμήματος κατά την έναρξη του εαρινού εξαμήνου 2016. Τα προφορικά δεδομένα αφορούν σε 11 διδασκαλίες διάρκειας 2-2,5 ωρών οι οποίες πραγματοποιήθηκαν κατά το χρονικό διάστημα Μαΐου-Ιουνίου 2016, στις οποίες συμμετείχαν ένα ζευγάρι φοιτητριών ανά διδασκαλία, δηλαδή συνολικά 22 φοιτήτριες. Οι διδασκαλίες πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών του ΠΤΔΕ του Πανεπιστημίου Θεσσαλίας. Για την ηχογράφηση των διδασκαλιών χρησιμοποιήθηκε ένα μαγνητόφωνο, ενώ για την καταγραφή αυτών μια ψηφιακή κάμερα. Με τον τρόπο αυτό, κατέστη δυνατή η διερεύνηση όλης της δραστηριότητας που συνέβη κατά τη διάρκεια της διδασκαλίας και η ανίχνευση νέων

στοιχείων ενδιαφέροντος που δεν ήταν γνωστά εκ των προτέρων (Molina M. et al, 2007).

Κατά τη διάρκεια των διδασκαλιών στο εργαστήριο εκτός από τις φοιτήτριες και την ερευνήτρια ήταν παρόν και ένας παρατηρητής, όχι απαραίτητα ο ίδιος κάθε φορά. Έτσι η τρίτη πηγή δεδομένων αφορούσε στις γραπτές και προφορικές επισημάνσεις του μη συμμετοχικού παρατηρητή. Η παρουσία του παρατηρητή σε όλη τη διάρκεια της διδασκαλίας κρίνεται απαραίτητη αφού η εκπαιδευτικός-ερευνήτρια προσπαθώντας να ανταποκριθεί σε ότι είπαν ή έκαναν οι φοιτήτριες πιθανό να μην είχε χρόνο να προβληματιστεί σχετικά με τη συμβολή των φοιτητριών. Στην περίπτωση αυτή ο παρατηρητής μπορεί να συλλάβει σημαντικά στοιχεία των ενεργειών των φοιτητριών που η εκπαιδευτικός-ερευνήτρια έχει χάσει (Steffe L., 1991).

Την αρχική ανάγνωση των ερωτηματολογίων ακολούθησε η κατηγοριοποίηση των ιδεών των φοιτητριών για κάθε μια έννοια ξεχωριστά. Την πρώτη κατηγοριοποίηση ακολούθησε μια δεύτερη ανάγνωση με αποτέλεσμα την ανάδυση νέων κατηγοριών ή την ενοποίηση κάποιων. Στη συνέχεια σχεδιάστηκε η διδασκαλία η οποία εφαρμόστηκε πιλοτικά σε ένα ζευγάρι φοιτητριών που είχε απαντήσει στο ερωτηματολόγιο. Η διδασκαλία πραγματοποιήθηκε πριν τις διακοπές του Πάσχα ώστε να δοθεί χρόνος στην ερευνήτρια κατά τη διάρκεια των διακοπών να προχωρήσει στην ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από την πρώτη διδασκαλία. Από την ανάλυση εξάχθηκαν συμπεράσματα που βοήθησαν στον ανασχεδιασμό της διδασκαλίας. Αναδείχθηκαν σε πρώτη φάση κάποιοι περιορισμοί του μοντέλου ή σημεία που δυσχεραίνουν τη διδακτική πορεία καθώς και σημεία που την ενισχύουν και ωθούν τις φοιτήτριες στη δημιουργία ολοκληρωμένων συλλογισμών. Αναδιατυπώθηκαν κάποιες ερωτήσεις και προστέθηκε η εφαρμογή της εντροπίας σε νέο πλαίσιο έτσι ώστε η σύνδεση της με αυτό να μην είναι αυτονόητη για τις φοιτήτριες. Συνεχίζοντας πραγματοποιήθηκε η διδασκαλία στα υπόλοιπα ζευγάρια. Το διδακτικό πείραμα ολοκληρώθηκε όταν τα νέα δεδομένα δεν παρείχαν καμία πρόσθετη πληροφορία σχετικά με το προς διερεύνηση θέμα. Τότε θεωρήθηκε ότι είχε επέλθει κατάσταση κορεσμού (Σαραφίδου, 2011). Τα δεδομένα απομαγνητοφωνήθηκαν και καταγράφηκαν σε γραπτό κείμενο. Καθώς εξελίσσονταν οι διδασκαλίες, ξεκίνησε και η ανάλυση των δεδομένων που συλλέχθηκαν από τις διδασκαλίες που είχαν ήδη ολοκληρωθεί, αν και η σε βάθος οριστική επεξεργασία

των δεδομένων έγινε μετά την ολοκλήρωση της συλλογής του υλικού. Η διαδικασία της ανάλυσης είναι μια συνεχής διαλεκτική μεταξύ των δεδομένων και των υποθέσεων που έχουν διατυπωθεί. Είναι σημαντικό να τεθεί το ερώτημα με ποιό τρόπο οι προτεινόμενες δραστηριότητες, καθώς και οι συγκεκριμένες παρεμβάσεις του ερευνητή-εκπαιδευτικού συνέβαλαν στις αλλαγές και εξελίξεις που διαπιστώθηκαν (Molina M. et al, 2007).

Για να είναι η ανάλυση ολοκληρωμένη, στα ερευνητικά δεδομένα από την απομαγνητοφώνηση προστέθηκαν και οι σημειώσεις (παρατηρήσεις και σχόλια) του παρατηρητή από την μελέτη στο πεδίο. Αυτές αναφέρονταν στις επιπλέον αντιδράσεις, εκφράσεις και συναισθήματα των συμμετεχόντων και γενικότερα σε κάποια στοιχεία που δεν ήταν δυνατό να καταγράψει η κάμερα. Η συζήτηση ανάμεσα στην ερευνήτρια και στον εκάστοτε παρατηρητή και ο αναστοχασμός μετά από κάθε διδασκαλία οδήγησε σε μεγαλύτερη εμβάθυνση του προς διερεύνηση θέματος και σε εμπλουτισμό των ερωτήσεων της επόμενης συνάντησης, αν και το σχέδιο της διδασκαλίας παρέμεινε το ίδιο μέχρι το τέλος. Η συμμετοχή διαφόρων παρατηρητών έδινε τη δυνατότητα για συνεχείς συζητήσεις σχετικά με το σχεδιασμό της διδασκαλίας, τη συλλογή δεδομένων και τις πιθανές ερμηνείες των δεδομένων, οι οποίες εμπλούτιζαν και ενίσχυαν την ποιότητα της ερευνητικής διαδικασίας. Ο τελικός σκοπός ήταν να οργανωθεί ο μεγάλος όγκος του λεπτομερούς υλικού παρέχοντας μια ολοκληρωμένη εικόνα της πορείας μάθησης κάθε φοιτήτριας. Επιπλέον να παρουσιαστούν οι αλληλοσυσχετίσεις ανάμεσα στις πορείες μάθησης των φοιτητριών σε κάθε ζευγάρι και να αναδειχτούν οι διαφορές στις πορείες στο σύνολο των φοιτητριών.

4. ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από την ανάλυση των απαντήσεων στα ερωτηματολόγια παρουσιάζονται συνοπτικά τα ευρήματα αναφορικά με τις έννοιες σύστημα, μικροκατάσταση, μακροκατάσταση οι οποίες αναγνωρίζονται ως κεντρικές έννοιες για την εννοιολόγηση της εντροπίας. Δεν παρουσιάζονται τα δεδομένα αναφορικά με τις έννοιες της αντιστρεπτής και μη αντιστρεπτής μεταβολής διότι είναι αρκετή μια διαισθητική κατανόηση των εννοιών για την επίτευξη της σύνδεσής τους με την εντροπία. Επίσης δεν παρουσιάζονται τα δεδομένα αναφορικά με την έννοια της θερμικής ισορροπίας τα οποία δεν είχαν ιδιαίτερη σημασία για το σχεδιασμό της διδασκαλίας αφού οι φοιτητές τη συνέδεσαν με τη θερμοκρασία και τη θερμότητα.

4.1 Σύστημα

Από την ανάλυση των απαντήσεων στα ερωτηματολόγια και τις αναλύσεις των καταγραφών του διδακτικού πειράματος, αναφορικά με το τι θεωρείται σύστημα από τους φοιτητές, αναδείχτηκαν οι ακόλουθες ιδέες:

- **Συλλογή αντικειμένων που βρίσκονται σε σχέση αλληλεπίδρασης**

Σ4: *Όλη αυτή η αλληλεπίδραση των δυο στοιχείων που οδήγησαν σε κάποιο αποτέλεσμα.*

Σ9: *Το σύστημα αποτελείται από δομές.*

E: *Ποιες μπορεί να είναι οι δομές εδώ;*

Σ9: *Αυτό που συνδέει τη σταγόνα και το νερό και τον τρόπο που αυτή διαχέεται σ' αυτό.*

.....

Σ9: *Το σύστημα είναι όλο το ποτηράκι με το νερό και τη σταγόνα.*

Σ14: *Αλληλεπίδραση, το χρώμα με το νερό πώς αλληλεπιδρούν, αυτό είναι ένα σύστημα.*

- **Διαδικασίες**

Σ7: *Το ότι πήραμε το ποτηράκι, γεμίσαμε το νερό, μετά ρίξαμε τη χρωστική ουσία και το παρατηρήσαμε πώς έγινε, όλο αυτό που κάναμε.*

.....

Σ7: *Η διαδικασία που ακολουθήσαμε.*

- **Κανόνες-ακολουθούμενη τακτική-τρόπος οργάνωσης ενός έργου**

Σ12: *Εγώ βλέπω το σύστημα ως κάτι ...που υπάρχει και έχει τους δικούς του κανόνες, ρυθμούς κλπ και μπορεί να έρθει κάτι να το αλλάξει και το σύστημα μετά πρέπει να επαναπροσδιοριστεί έτσι ώστε να αφομοιώσει και το ξένο στοιχείο.*

Σ13: *Ότι το χρώμα έχει ένα συγκεκριμένο σύστημα ανάμειξης με το νερό.*

E: *Αν βγάλεις τη λέξη σύστημα, μια συνώνυμη...*

Σ13: *Τρόπο, συγκεκριμένο τρόπο.*

Σ13: *Όσες φορές και να το κάνουμε αυτό με τον ίδιο τρόπο θα γίνει.*

Για τις περισσότερες φοιτήτριες η έννοια σύστημα περιλαμβάνει ένα σύνολο αντικειμένων που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους, δηλαδή περιγράφουν αυτό που ορίζουμε ως σύστημα στις φυσικές επιστήμες. Στην ίδια εννοιολόγηση βασίζονται και οι ερευνητές, με σκοπό τον προσδιορισμό, στη συνέχεια της διδακτικής πορείας, των μεταβλητών που περιγράφουν τις καταστάσεις από τις οποίες περνά το σύστημα.

4.2 Μεταβλητές για την περιγραφή της κατάστασης του συστήματος

Η ανάλυση επεισοδίων των σχετικών με την αναζήτηση μεταβλητών που διαφοροποιούν τις καταστάσεις του συστήματος, αρχικά στο ποτήρι του πειράματος επίδειξης και στη συνέχεια στις φωτογραφίες καταδεικνύει ότι οι φοιτήτριες εύκολα αναγνώρισαν, είτε στο πείραμα επίδειξης, είτε στις φωτογραφίες:

- Αλλαγή του χρώματος του χρωματισμένου νερού, σε σχέση με το αρχικό χρώμα της χρωστικής.
- Εξάπλωση της σταγόνας της χρωστικής.

Όταν, στη συνέχεια τους ζητήθηκε να ονομάσουν μεταβλητές και να αναζητήσουν τρόπους μέτρησής τους, αναδείχτηκαν κάποιες δυσκολίες.

Μεταβλητές που περιγράφουν την αλλαγή του χρώματος

Συγκεκριμένα στην ερώτηση που απευθύνει η ερευνήτρια «*τι είναι αυτό που αλλάζει στο χρώμα;*» συνήθως αναφέρονται σε «*άνοιγμα*» του χρώματος από μπλε σε γαλάζιο ή σε αλλαγή του χρώματος από «*πυκνό*» σε «*αραιό*». Οι μεταβλητές που προτείνουν για τον προσδιορισμό της αλλαγής του χρώματος είναι ο «*τόνος*» του χρώματος ή η «*απόχρωση*» του χρώματος.

Σ13: *Αλλάζει τόνο, από σκούρο μπλε γίνεται ένα τόνο πιο ανοιχτό και ένα τόνο πιο ανοιχτό και ένα τόνο πιο ανοιχτό.*

Σ17: *Και η εξέλιξη του χρώματος. Όσο πάει και ανοίγει. Σε κάθε ποτήρι η απόχρωση του μπλε είναι διαφορετική.*

Η ερευνήτρια εισάγει την πυκνότητα ή την ένταση του χρώματος.

E: *Εσείς έχετε ήδη αναφέρει ότι είναι πιο πυκνό το χρώμα άρα πυκνότητα χρώματος και ότι είναι πιο έντονο και λιγότερο έντονο, ένταση χρώματος;*

Μεταβλητές που περιγράφουν την εξάπλωση της χρωστικής στο ποτήρι

Οι φοιτήτριες αναφέρονται έμμεσα σε αλλαγή του όγκου της σταγόνας, την οποία περιγράφουν με εκφράσεις όπως: «(η σταγόνα) εξαπλώνεται και στο εσωτερικό του νερού, προς τα μέσα», «διαπέρασε όλο το νερό», «έχει καταλάβει περισσότερο χώρο», «αρχίζει περισσότερο να αναμειγνύεται με νερό». Ωστόσο καθώς η χρωστική διαχέεται, δεν υπάρχει πια σταγόνα και η ερευνήτρια προτείνει να αναφέρονται σε όγκο χρωματισμένου νερού. Όμως δεν έχει διευκρινιστεί ακόμα αν αναγνωρίζουν την κίνηση των μορίων της χρωστικής ανάμεσα στα μόρια του νερού ή εμφανίζουν εναλλακτικές ιδέες.

Μεταβλητές που περιγράφουν την εξάπλωση της χρωστικής στις φωτογραφίες

Παρατηρώντας τις φωτογραφίες, αναγνωρίζουν εύκολα σε αυτές, κάποια στιγμιότυπα του πειράματος επίδειξης. Ως χαρακτηριστικά-μεταβλητές που διαφοροποιούν τις φωτογραφίες προτείνουν:



Σ14: *Και ενώ έπεσε με συγκεκριμένο μέγεθος μετά από λίγο έγινε μεγαλύτερο.*

Σ14: *...Μεγάλωσε και έφτασε μέχρι τις άκρες του ποτηριού [διαγράφει κύκλο με το δάχτυλο] και έγινε και πιο ανοιχτόχρωμη.*

Σ14: *...από 1εκ. για παράδειγμα έγινε 4εκ., 3εκ. κάπου εκεί.*

E: *Τι μετράς με τα εκ.;*

Σ14: *...το μπλε στην επιφάνεια είναι περίπου 1εκ. στο πλάτος του.*



Σ22: ... θα πρέπει να μετράμε το κατά πόσο μεγαλώνει η σταγόνα από τη μια άκρη στην άλλη; Δεν ξέρω...

Ε: Μπορούμε να προσεγγίσουμε αυτό το σχηματάκι με κάτι;

Σ22: Με κύκλο.

Σ21: Τη διάμετρο, ναι με κύκλο.

Σ22: Την περίμετρο του κύκλου.

Σε κάποιες περιπτώσεις οι φοιτήτριες φαίνεται να συνδέουν τις δυο μεταβλητές: όγκος-απόχρωση ή ακτίνα-απόχρωση.

Σ7: ...όταν άρχιζε να αλλάζει ο όγκος της χρωστικής ουσίας, το νερό άλλαξε χρώμα, έγινε γαλάζιο... και

Σ19: Όσο μεγαλώνει η ακτίνα του κύκλου, τόσο πιο ανοιχτό γίνεται το χρώμα του χρωματισμένου νερού.

4.3 Από τις φωτογραφίες στις αναπαραστάσεις

Γενικά κατά τη μοντελοποίηση, αγνοούνται ή υποβαθμίζονται εσκεμμένα οι λιγότερο σχετικές λεπτομέρειες του στόχου, και δίνεται έμφαση σε επιλεγμένα χαρακτηριστικά του στα οποία στοχεύουμε να εστιάσουμε την προσοχή των μαθητών (Χαλκιά, 2012). Συνεπώς η ανάδειξη στις αναπαραστάσεις των μεταβλητών που αναδείχτηκαν στις φωτογραφίες και η συνειδητοποίηση των περιορισμών ενός μοντέλου αποτελούν προϋποθέσεις για την κατανόηση του υπό μελέτη φαινομένου.

Τα κοινά σημεία που αναδείχτηκαν ανάμεσα στις φωτογραφίες και τις αναπαραστάσεις είναι:

- Αύξηση της χρωματισμένης επιφάνειας.

Χρησιμοποιούν τα κυκλάκια (ή «τελίτσες» ή «κουκίδες») του πλέγματος ως μονάδες μέτρησης για να μετρήσουν την παραπάνω αύξηση.

Σ6: Όσο προχωράει η κάθε αναπαράσταση περιλαμβάνει και περισσότερα κυκλάκια.

Σε αναλογία με τη μεταβολή της ακτίνας ή της περιμέτρου του κύκλου που σχηματίζει το χρωματισμένο νερό, προτείνουν τη μεταβολή των πλευρών του τετραγώνου και κατά συνέπεια του εμβαδού ή της περιμέτρου του.

- Αλλαγή της έντασης ή της απόχρωσης ή του τόνου του χρώματος.

Οι διαφορές που αναδείχθηκαν ανάμεσα στις φωτογραφίες και τις αναπαραστάσεις είναι:

- Στις αναπαραστάσεις η χρωματισμένη επιφάνεια έχει τετράγωνο σχήμα ενώ στις φωτογραφίες έχει ακανόνιστο σχήμα το οποίο όμως προσεγγίζουν με κύκλο.
- Στις αναπαραστάσεις η χρωματισμένη επιφάνεια απλώνεται ομοιόμορφα ενώ στις φωτογραφίες η χρωστική ξεφεύγει έξω από τον κύκλο.

Σ4: Ότι κάτω γίνεται με πιο δεξιοτεχνή τρόπο γιατί είναι τα κυκλάκια που όσο περνάει η εικόνα μεγαλώνει και η σειρά, ότι το χρώμα πηγαίνει και στην επόμενη σειρά με τα κυκλάκια, ενώ στην πραγματική εικόνα είναι πιο ακαθόριστο το σχήμα.

Σ10: Η σταγόνα δεν εξαπλώνεται ομοιόμορφα, ενώ κάτω είναι απόλυτη συμμετρία, ενώ πάνω βλέπουμε ότι έχει και τις ίνες που κάνει το χρώμα από την κεντρική σταγόνα, εκεί βλέπουμε ότι δεν είναι τέλειος κύκλος, ενώ κάτω είναι το τέλειο τετράγωνο.

Σ9: Είναι οριοθετημένο, περιορισμένο κάπως, πολύ συγκεκριμένο.

- Στο μοντέλο αναπαρίστανται μόνο οι επιφάνειες ενώ στις φωτογραφίες διακρίνεται και βάθος.

Σ5: Στην πρώτη φωτογραφία έχει αφήσει από πάνω τη λίγη χρωστική όταν πέφτει μέσα ενώ στην απεικόνιση δε δείχνει τίποτα.

Σ6: Ναι είναι ένα γράφημα [εννοεί τις αναπαραστάσεις] που μας δείχνει τι γίνεται, όπως είδαμε ενώ ταυτόχρονα έπεφτε στον πάτο και γινότανε τόσο σκούρο υπήρχε στην επιφάνεια ένα πιο ανοιχτό χρώμα, αυτό δεν μπορούμε να το δούμε στην απεικόνιση.

- Στις αναπαραστάσεις η επιφάνεια του πλέγματος είναι τετράγωνη, ενώ στις φωτογραφίες η επιφάνεια του ποτηριού είναι κυκλική.
- Οι επιφάνειες στο μοντέλο αναπαρίστανται από πλέγμα κύκλων.
- Στις αναπαραστάσεις «δεν φαίνεται το περιβάλλον στο οποίο βρίσκεται» η επιφάνεια.
- Στις αναπαραστάσεις η χρωματισμένη επιφάνεια εμφανίζει ομοιομορφία στο χρώμα, ενώ στις φωτογραφίες και ειδικά στην 4η διακρίνονται άσπροι ή γυαλιστεροί κύκλοι.

- Διακρίνεται χρώμα στα τοιχώματα του ποτηριού στις φωτογραφίες.

Αποδοχή-Προτάσεις

- Η Σ13 προτείνει τα τετράγωνα του πλέγματος και της χρωματισμένης επιφάνειας να αντικατασταθούν με κύκλους.

Σ13: *Θα μπορούσε να είναι σε κυκλικό σχήμα, ακριβώς η ίδια διάμετρος του ποτηριού σε κύκλο με κυκλάκια εννοώ δηλαδή αντί για τετράγωνο να ήταν κύκλος, όπως και το μέσα.*

E: *Ωστόσο αναδεικνύονται οι αναλογίες;*

Σ13: *Σχηματικά και χρωματικά καταλαβαίνουμε τι δείχνει, ότι είναι η αναπαράσταση του πειράματος.*

- Οι περισσότερες φοιτήτριες θεωρούν ότι το μοντέλο τους βοηθά να εστιάσουν στις μεταβλητές, ενώ οι περιορισμοί του μοντέλου δεν αποτελούν εμπόδιο στην ανάδειξη των παραπάνω μεταβλητών.

Σ18: *Αυτό που μας ενδιαφέρει, το κάνει. Δείχνει την αναλογία πολύ καλά.*

E: *Τι είναι αυτό που μας ενδιαφέρει;*

Σ18: *Μας ενδιαφέρει να δούμε το χρώμα πόσο μεγαλώνει και πόσο ανοίγει.*

- Οι αναπαραστάσεις προΐδεάζουν ότι η χρωστική εξαπλώνεται «ισοδύναμα», «με τον ίδιο ρυθμό» προς όλες τις κατευθύνσεις με αποτέλεσμα η Σ20 να αναρωτιέται:

Σ20: *Όντως εξαπλώνεται τόσο τέλεια η χρωστική ή είναι κατά προσέγγιση;*

Αναγνωρίζει ότι το μοντέλο δεν μπορεί να αναπαραστήσει απόλυτα την πραγματικότητα:

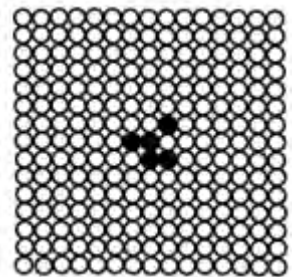
Σ20: *Τώρα η πραγματικότητα πάντα θα έχει, δε θα μπορούμε να τις προσομοιώσουμε τις ατέλειες.*

4.4 Μοντελοποίηση του μικρόκοσμου

Προτού πραγματοποιηθεί η μετάβαση από τις αναπαραστάσεις των φωτογραφιών στο μικρόκοσμο του συστήματος, με την επίδειξη του 1^{ου} πλέγματος, η ερευνήτρια αναφέρεται στο ρόλο του μοντέλου. Συγκεκριμένα επισημαίνει ότι με το μοντέλο επιτυγχάνουμε να απεικονίσουμε τα μόρια, αφού δεν είναι δυνατή η παρατήρησή τους με μικροσκόπιο. Με την εισαγωγή αυτή, επιδιώκει να προΐδεάσει τις φοιτήτριες ότι το πλέγμα που θα παρατηρήσουν στη συνέχεια απεικονίζει μόρια χρωστικής και

μόρια νερού. Ωστόσο οι φοιτήτριες δεν αναγνωρίζουν πάντα μόρια. Οι λόγοι που εμποδίζουν τις φοιτήτριες να αναγνωρίσουν ότι με τα μαύρα κυκλάκια αναπαριστώνται τα μόρια της χρωστικής συνοψίζονται στον παρακάτω πίνακα. Επίσης παρατίθενται επεισόδια ενδεικτικά της επιχειρηματολόγησης των φοιτητριών.

Πίνακας 3: Υποθέσεις των φοιτητριών για το τι απεικονίζει το πλέγμα

	<ul style="list-style-type: none">▪ Αναγνωρίζουν μόρια (Σ15-Σ16)▪ Δεν αναγνωρίζουν μόρια:<ol style="list-style-type: none">1. εξαιτίας του χρώματος με το οποίο απεικονίζονται (Σ5-Σ6)2. εξαιτίας του ακανόνιστου σχήματος (Σ14)3. εξαιτίας της ύπαρξης μεγάλου πλήθους μορίων στην πραγματικότητα (Σ20)
---	---

Σ15-Σ16

Για τον Σ16 το 1^ο πλέγμα που αντιστοιχεί στην 1^η φωτογραφία απεικονίζει

Σ16: *Τα μόρια της σταγόνας όταν πέφτει η σταγόνα στην επιφάνεια,*

ενώ τα διαφορετικά πλέγματα που αντιστοιχούν στην 1^η φωτογραφία δείχνουν σύμφωνα με τη Σ15

Σ15: *Διαφορετικούς συνδυασμούς των μορίων.*

Ερμηνεύοντας η Σ15 τον όρο συνδυασμοί αναφέρει:

Σ15: *Το πώς κατανέμονται, το πώς τοποθετούνται.*

Πριν την επικάλυψη συγκρίνοντας τα πλέγματα που σχεδίασαν, αντιλαμβάνονται πολύ εύκολα ότι υπάρχει συγκεκριμένο πλαίσιο στο οποίο μπορεί να βρίσκονται τα μόρια της χρωστικής.

Ε: *Αν τα συνδυάσουμε μπορούμε να βρούμε πού πιθανό να τοποθετούνται τα μόρια τη στιγμή που έπεσε η σταγόνα;*

Σ15: *Όλα είναι στην 7^η σειρά με 9^η... είναι στο κέντρο τα περισσότερα και πιάνουνε μέχρι 3 σειρές.*

Κάνοντας πρόβλεψη για το μικρόκοσμο της 2^{ης} φωτογραφίας η Σ15 εμφανίζει αρχικά την εναλλακτική ιδέα ότι αυξάνεται ο αριθμός των μορίων της χρωστικής. Σύντομα όμως την τροποποιεί και αποδέχεται την ιδέα ότι ο ίδιος αριθμός μορίων κινείται σε μεγαλύτερη επιφάνεια.

E: Πώς θα ήταν τα μόρια της χρωστικής στη φωτογραφία 2;

Σ15: Δεν θα ήταν 5, θα ήταν περισσότερα.

E: Θα ήταν περισσότερα τα μόρια της χρωστικής; Θα άλλαζαν;

Σ15: Δε θα άλλαζαν, θα ήταν πιο εξαπλωμένα.

E: Το πιο εξαπλωμένα πώς το εννοείς;

Σ15: Θα ήταν σε μεγαλύτερο χώρο, μεγαλύτερη επιφάνεια.

.....

Σ16: Δε θα είχαμε περισσότερα μόρια, θα είχαμε περισσότερο χώρο στον οποίο να εξαπλώνονται τα μόρια.

Ο σχεδιασμός των διαφορετικών πλεγμάτων από τις φοιτήτριες σταθεροποιεί την ιδέα ότι δεν αλλάζει ο αριθμός των μορίων της χρωστικής, αλλά αυξάνεται ο αριθμός των πιθανών θέσεων των μορίων της χρωστικής.

E: Το κάθε ένα κυκλάκι, τι δείχνει;

Σ15: Τα 5 ήταν τα μόρια [χρωστικής] και τα άλλα 20 το νερό.

.....

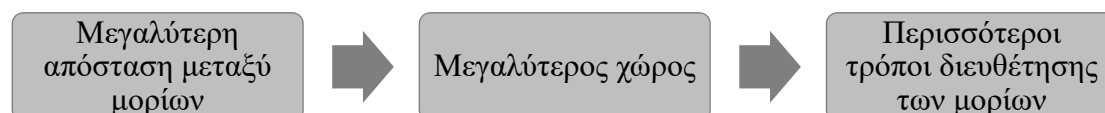
Σ15: Αλλάζουν θέσεις.

E: Άρα τα 25 κυκλάκια που σχηματίστηκαν, τι δείχνουν;

Σ15, Σ16: Τις διαφορετικές θέσεις που μπορούν να πάρουν τα μόρια.

Η αναγνώριση από τις φοιτήτριες ότι τα διαφορετικά πλέγματα απεικονίζουν τους διαφορετικούς τρόπους σύμφωνα με τους οποίους διατάσσονται τα πέντε μόρια της χρωστικής σε συγκεκριμένες θέσεις αποτελεί προαπαιτούμενο για την εισαγωγή της έννοιας της μικροκατάστασης.

Σχετικά με τη μεταβολή του αριθμού των τρόπων διεύθετησης των μορίων αναπτύσσουν τον ακόλουθο συλλογισμό:



E: Αν συγκρίνουμε τον αριθμό των τρόπων τοποθέτησης των μορίων που αντιστοιχούν στο μικρόκοσμο της φωτογραφίας 1 με τους τρόπους τοποθέτησης των μορίων που αντιστοιχούν στο μικρόκοσμο της φωτογραφίας 2, σε τι συμπέρασμα θα οδηγηθούμε;

Σ15: Ότι εδώ είναι πιο εξαπλωμένα, έχουν μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους.

E: Άρα αν συγκρίνουμε τον αριθμό των τρόπων τοποθέτησης των μορίων;

Σ15: Εδώ είναι πιο πολλοί.

E: Γιατί είναι πιο πολλοί οι τρόποι τοποθέτησης;

Σ15: Έχουν περισσότερο χώρο να κινηθούν.

Σ15: Είναι 25 κουτάκια ενώ εκεί ήταν 9.

Σ5-Σ6

Στο παρακάτω επεισόδιο κατά την επίδειξη του 1^{ου} πλέγματος που απεικονίζει το μικρόκοσμο της 1^{ης} φωτογραφίας, η Σ5 εκφράζει την εναλλακτική ιδέα ότι τα μόρια έπρεπε να απεικονίζονται με χρώμα ίδιο με αυτό της χρωστικής. Η ιδέα αυτή εμποδίζει τη φοιτήτρια να αναγνωρίσει μόρια χρωστικής.

Σ5: Τα μπλε τα κυκλάκια είναι η χρωστική.

E: Τώρα εδώ είναι μαύρα.

Σ5: Μαύρα είναι;

E: Τι μπορεί να είναι τα μαύρα κυκλάκια και τι τα άσπρα κυκλάκια;

Σ5: Τα άσπρα λογικά είναι το νερό, τα μόρια του νερού που βρίσκονται μέσα στο ποτήρι, αλλά δεν ξέρω γιατί αλλάξαμε το χρώμα από μπλε σε μαύρο; Μήπως απεικονίζει κάτι άλλο;

E: Μπλε ήταν η χρωστική. Τα μόρια χρώμα δεν έχουν, αλλά δεν έπρεπε κάπως να τα χρωματίσουμε για να τα ξεχωρίζουμε; E δεν τα κάναμε μπλε για να μη δημιουργήσουμε την εντύπωση ότι είναι μπλε όπως η χρωστική.

Σ5: A εντάξει τότε.

Συγκρίνοντας τα διαφορετικά πλέγματα που αντιστοιχούν στην 1^η φωτογραφία υποθέτουν ότι αντιστοιχούν στη διαφορετική μορφή που αποκτά η σταγόνα, ανάλογα με τον τρόπο που τη ρίχνουμε κάθε φορά. Δεν γίνεται αναφορά σε μόρια.

Σ5: E δε μας είπε κανείς ότι ντε και καλά όταν θα πέσει έτσι, θα έχει αυτή τη μορφή.

.....

Σ6: Κάθε φορά δε θα διαλύεται και διαφορετικά; Ανάλογα, δηλ. δε θα έχει πάντα τις ίδιες θέσεις ανάλογα πώς τη ρίχνεις, θα διαλυθεί μια χρωστική.

Παρατηρώντας το μικρόκοσμο της 2^{ης} φωτογραφίας γίνεται αναφορά πρώτα στη χρωστική και μετά σε μόρια.

E: Αν τώρα πάμε στην επόμενη φωτογραφία [2^η] για να δούμε το μικρόκοσμο που αντιστοιχεί στη 2^η, τις θέσεις που βρίσκονται τα μόρια στη 2η. Τι παρατηρούμε τώρα;

Σ6: Ότι προφανώς η χρωστική έχει ανοίξει κι άλλο, εδώ βέβαια μιλάμε για μικρόκοσμο.

.....

Σ6: Ότι τα μόρια απλώνονται στην επιφάνεια πάλι.

Σ5: Εδώ φαίνεται ότι αρχίζουν να απομακρύνονται αυτά τα δυο. [Δείχνει πλέγμα που αντιστοιχεί στη 2^η φωτογραφία].

Η Σ6 υποθέτει ότι αλλάζει ο αριθμός των μορίων καθώς η χρωστική εξαπλώνεται.

Ε: ...αν πάρουμε το συνολικό αριθμό των τρόπων διευθέτησης των μορίων της χρωστικής που αντιστοιχούν στη φωτογραφία 2 και τον συγκρίνουμε με τον αριθμό των τρόπων διευθέτησης στη φωτογραφία 1 θα είναι ίδιος; Οι συνδυασμοί που θα έχουμε κατά κάποιον τρόπο;

Σ5: Μπορεί να συμπίπτουν μερικοί, αλλά δε θα είναι ίδιοι.

Σ6: Εγώ πιστεύω θα είναι μεγαλύτερος.

Ε: Ποιος θα είναι μεγαλύτερος;

Σ6: Στο πλαίσιο 2, σ' αυτό που φτιάξαμε τώρα, θα είναι μεγαλύτερος ο αριθμός των μορίων.

Σ5: Όχι ο αριθμός των μορίων θα είναι 5, θα είναι οι θέσεις περισσότερες.

Αποτέλεσμα της εναλλακτικής ιδέας που προαναφέρθηκε είναι ότι υποθέτουν ότι στις αναπαραστάσεις τα μπλε κυκλάκια απεικονίζουν μόρια χρωστικής και όχι πιθανές θέσεις. Οι δυο φοιτήτριες εμφάνισαν εξ' αρχής αυτή την εναλλακτική ιδέα την οποία φαίνεται ότι δυσκολεύονται να τροποποιήσουν, παρότι διευκρινίστηκε ότι τα μόρια δεν έχουν χρώμα και ότι τα μαύρα κυκλάκια είναι ένας τρόπος απεικόνισής τους.

Ε: Όλη η αναπαράσταση τι δείχνει, που αντιστοιχεί στην 3^η φωτογραφία;

Σ6: Μόρια νερού, μόρια χρωστικής.

Σ5: Τα μόρια χρωστικής.

Ε: Ποια είναι μόρια νερού, ποια είναι μόρια χρωστικής;

Σ6: Τα άσπρα κυκλάκια είναι μόρια νερού.

Ε: Και μόρια χρωστικής;

Σ6: Τα μπλε.

Ε: Πόσα είναι;

Σ6: 9, 25, στο 3^ο; 7x7.

Η υπόθεση για αύξηση του αριθμού των μορίων της χρωστικής στο μοντέλο από 9 σε 25 και μετά σε 49 θα αποτελέσει εμπόδιο στη πορεία τους προς την προσδοκώμενη γνώση. Οι εναλλακτικές ιδέες και η προσδοκώμενη γνώση φαίνονται συνοπτικά στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 4: Εναλλακτικές ιδέες για τη διάχυση της χρωστικής

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΙΔΕΕΣ	ΠΡΟΣΔΟΚΩΜΕΝΗ ΓΝΩΣΗ
Τα μόρια έχουν ίδιο χρώμα με τη χρωστική.	Τα μαύρα κυκλάκια απεικονίζουν μόρια χρωστικής.
Καθώς εξαπλώνεται η χρωστική, αυξάνεται ο αριθμός των μορίων της χρωστικής.	Καθώς διαχέεται η χρωστική, τα μόρια της χρωστικής κινούνται ανάμεσα στα μόρια του νερού έτσι ώστε να αυξάνεται ο αριθμός των πιθανών θέσεων των μορίων της χρωστικής.
Τα μόρια της χρωστικής απεικονίζονται με μπλε κυκλάκια στις αναπαραστάσεις των φωτογραφιών.	Οι πιθανές θέσεις των μορίων της χρωστικής απεικονίζονται με μπλε κυκλάκια στις αναπαραστάσεις των φωτογραφιών.

Σ14

Κατά την είσοδο στο μικρόκοσμο του συστήματος, αρκετές φοιτήτριες υποθέτουν για το 1ο πλέγμα που παρατηρούν, ότι αναπαριστά τη σταγόνα πλησιάζοντας περισσότερο στην πραγματικότητα εξαιτίας του ακανόνιστου σχήματος.

Σ14: *Δείχνει πάλι τη σταγόνα αλλά δεν την δείχνει αυτή τη φορά σαν ένα τετράγωνο, αλλά τη δείχνει σαν ένα πιο περίεργο σχήμα ίσως για να πλησιάσει περισσότερο το πραγματικό που δεν ήτανε συγκεκριμένο απόλυτο σχήμα.*

.....

Ε: *Δηλαδή είναι σαν να απεικονίσαμε τη σταγόνα.*

Σ14: *Στον πάτο, στο πρώτο στάδιο περίπου, λίγο πιο κοντά από το τετραγωνάκι που ήτανε πριν, το πλησιάζει λίγο περισσότερο αυτό το σχήμα.*

Σ20

Σ20: *Εγώ θεωρώ ότι τα μόρια είναι τόσα πολλά που δε μπορούμε να τα μετρήσουμε αλλά ούτε και να τα απεικονίσουμε.*

Κατά την παρατήρηση των αναπαραστάσεων η Σ20 αναγνωρίζει ότι το μοντέλο δεν μπορεί να αναπαραστήσει απόλυτα την πραγματικότητα και ότι παρουσιάζει περιορισμούς. Ωστόσο κατά την παρατήρηση του μικρόκοσμου χρειάζεται να

παρέμβει η ερευνήτρια η οποία αναφέρεται στο μοντέλο και στις παραδοχές που έγιναν για να ερμηνευτεί η πραγματικότητα.

Σ21-Σ22: Αναγνωρίζουν μόρια με την προϋπόθεση ότι γίνεται αναφορά στο μικρόκοσμο

Το παρακάτω ζευγάρι φοιτητριών παρατηρεί «μαύρες βούλες», και διευκρινίζει ότι αναπαριστούν χρωστική, εκτός εάν γίνεται αναφορά στο μικρόκοσμο οπότε αναπαριστούν μόρια. **Τα μαύρα κυκλάκια αποτελούν σύμβολα τα οποία νοηματοδοτούνται από τους ίδιους τους φοιτητές ανάλογα με το πλαίσιο στο οποίο γίνεται αναφορά.**

Σ22: *Μαύρες βούλες.*

Σ21: *Η ποσότητα της χρωστικής στο νερό.*

Σ22: *Δεν μπορώ να ξέρω...*

Σ22: *Αν μιλάμε για τη χρωστική θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι η ποσότητα της χρωστικής.*

E: *Σε ποια στιγμή;*

Σ22: *Την ώρα που τη ρίχνουμε στο ποτήρι.*

.....

E: *Εσύ Σ22 είπες μαύρες βούλες, αν αναφερόμαστε στο μικρόκοσμο....*

Σ21: *Μόρια.*

E: *Τίνος;*

Σ21: *Της χρωστικής.*

Σ22: *Έτσι όπως είναι φτιαγμένο θυμίζει την 1^η φωτογραφία αλλά όχι σε αντιστοιχία με το μοντέλο με τα τετράγωνα, μοιάζει με τη φωτογραφία την ώρα που τραβήχτηκε και που έπεσε η σταγόνα, που έκανε τις ίνες.*

- **Οι δύο φοιτήτριες που προέρχονται από θετική και τεχνολογική κατεύθυνση** αναφέρονται σε μόρια πριν την επίδειξη του 1^{ου} πλέγματος, διαπίστωση που συμφωνεί και με σχόλια των παρατηρητών. Συγκεκριμένα η Σ8 αναφέρεται σε κίνηση μορίων καθώς περιγράφει την διάχυση της χρωστικής και η Σ18 καθώς εντοπίζει τις διαφορές ανάμεσα στις φωτογραφίες και στις αναπαραστάσεις. Προσπαθώντας να εξηγήσει τι απεικονίζουν τα κυκλάκια της αναπαράστασης, αναρωτιέται: «είναι μόρια;», κάνει λόγο για «προσομοιώματα» μορίων και αιτιολογεί: « το είπα επειδή είναι στρόγγυλα και μήπως είναι αναπαράσταση από μόρια».
- **Η ιδέα του σχεδιασμού των πλεγμάτων σε διαφάνειες** αποδεικνύεται ιδιαίτερα ευρηματική, όπως αναφέρεται και από τους παρατηρητές, αφού όλα

τα ζευγάρια, άλλα αυθόρμητα και άλλα κατόπιν μικρής προτροπής τοποθετούν το ένα πλέγμα πάνω στο άλλο. Από την επικάλυψη των διαφανειών σκιαγραφείται το χρωματισμένο τετράγωνο της αναπαράστασης το οποίο αναγνωρίζουν εύκολα.

Σ13: *Όλες μαζί ας πούμε, τι θα σχηματίσουν... να σχημάτισαν το αρχικό που είχαμε δει μπλε τετράγωνο.*

Σ14: *Απεικονίζει ίσως τη σταγόνα;*

Σ13: *Γραφικά όπως μας το δείξατε πριν.*

4.5 Μικροκατάσταση-Μακροκατάσταση

Στην ουσία του ορισμού της εντροπίας βρίσκεται η ιδέα του αριθμού των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν σε μια δεδομένη μακροκατάσταση. Για αυτό το λόγο κρίθηκαν ιδιαίτερα σημαντικές οι εννοιολογήσεις των φοιτητών αναφορικά με τις έννοιες μικροκατάσταση και μακροκατάσταση. Ακολουθεί παράθεση των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την ανάλυση των ερωτηματολογίων καθώς και κάποια ενδεικτικά αποσπάσματα από τις διδασκαλίες.

4.5.1 Ερωτηματολογία

Από την ανάλυση των ερωτηματολογίων, αναφορικά με το νόημα που αποδίδουν οι φοιτήτριες στις έννοιες μικροκατάσταση και μακροκατάσταση, προέκυψε ότι τις συσχετίζουν με τους όρους μικρο- και μακρο- όπως τους χρησιμοποιούμε στην καθημερινή μας ζωή. Συγκεκριμένα ο όρος μακρο- παραπέμπει σε κάτι πιο μακρινό χωρικά ή χρονικά ή σε κάτι πιο γενικό, ενώ ο όρος μικρο- παραπέμπει σε κάτι πιο κοντινό χωρικά ή χρονικά ή σε κάτι πιο ειδικό, που αυτό το πιο ειδικό κάποιες φορές μπορεί να είναι ο μικρόκοσμος. Έτσι οι ιδέες τους για τις έννοιες μακροκατάσταση και μικροκατάσταση μπορούν να ομαδοποιηθούν και να αντιπαρατεθούν στις παρακάτω κατηγορίες:

Πίνακας 5: Ιδέες των φοιτητριών για τις έννοιες μακροκατάσταση και μικροκατάσταση

ΜΑΚΡΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ	ΜΙΚΡΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ
Κατάσταση που χαρακτηρίζεται από μεγάλη χρονική διάρκεια.	Κατάσταση που χαρακτηρίζεται από μικρή χρονική διάρκεια.
Κατάσταση-αποτέλεσμα που αναμένεται μετά από μεγάλο χρονικό διάστημα (σε βάθος χρόνου).	Κατάσταση-αποτέλεσμα που αναμένεται μετά από μικρό χρονικό διάστημα (άμεσα).
Μελέτη των σωμάτων που απαρτίζουν το σύστημα συνολικά.	Μελέτη των σωμάτων που απαρτίζουν το σύστημα ξεχωριστά.
Γενικότερη μελέτη μιας κατάστασης.	Ειδικότερη μελέτη μιας κατάστασης.
Κατάσταση που δεν περιορίζεται στη μελέτη- περιγραφή του συστήματος αλλά συμπεριλαμβάνει το περιβάλλον-πλαίσιο ή αναφέρεται στο μακρόκοσμο.	Μόρια-Μικρόκοσμος.

4.5.2 Διδασκαλίες

4.5.2.1 Εννοιολογήσεις των εννοιών μακροκατάσταση- μικροκατάσταση

Προχωρώντας στην ανάλυση των διδασκαλιών που αφορούν στη διάχυση της χρωστικής μέσα στο νερό, αναδύθηκαν παρόμοιες ιδέες. Τη μακροκατάσταση φαίνεται να τη συνδέουν με το πείραμα, τις φωτογραφίες, το σύστημα και πώς αυτό αλλάζει. Γενικότερα με ό,τι μπορούμε να παρατηρήσουμε. Από την άλλη, τη μικροκατάσταση τη συνδέουν με το μικρόκοσμο, τα μόρια και τις θέσεις που αυτά μπορούν να πάρουν.

Κάποιες ιδέες περιγράφονται εκτενέστερα με ταυτόχρονη παράθεση επεισοδίων των διδασκαλιών.

Σ7-Σ8

Η Σ8 χαρακτηρίζει μακροκατάσταση εκείνη την κατάσταση του συστήματος, όταν το παρατηρούμε «από μακριά, σαν σύνολο», και «βλέπουμε μια γενικότερη μεταβολή του συστήματος, όπως μεταβολή στην πυκνότητα χρώματος». Η Σ8 φαίνεται να αναγνωρίζει ότι **η μακροκατάσταση είναι εκείνη η κατάσταση του συστήματος**

που μπορούμε να παρατηρήσουμε και που περιγράφεται από μεταβλητές. Ως μικροκατάσταση χαρακτηρίζει την κατάσταση που συνδέεται με τα μόρια της χρωστικής και τις πιθανές θέσεις τους. Παρόμοια για την Σ7 μικροκατάσταση είναι η κατάσταση που συνδέεται με το μικρόκοσμο και τις πιθανές θέσεις των μορίων της χρωστικής, ενώ μακροκατάσταση είναι η κατάσταση που συνδέεται με «αυτό που κάναμε με το πείραμα». Η μακροκατάσταση συνδέεται με κατάσταση που παρατηρούμε «πιο γενικά», ενώ η μικροκατάσταση είναι αποτέλεσμα της «σε βάθος» παρατήρησης των θέσεων και κινήσεων των μορίων.

Σ8: Τη μακροκατάσταση θα τη συνδύαζα με το πείραμα που κάναμε κατευθείαν δηλ. το βλέπουμε από μακριά ενώ μικροκατάσταση είναι αυτό που μετρούσαμε, βρίσκαμε τις πιθανές θέσεις ουσιαστικά κοιτούσαμε τα μόρια της χρωστικής.

.....

Σ8: Όταν κοιτάμε το σύστημα κάτι, το σύνολο.

Σ7: Εμένα μικροκατάσταση μου φέρνει στο μυαλό μου το μικρόκοσμο και όταν κοιτούσαμε αυτά εδώ [πλέγματα στις διαφάνειες] και μακροκατάσταση αυτό που κάναμε με το πείραμα.

Ε: Και οι δυο λέτε μικροκατάσταση είναι όταν παρατηρούμε το μικρόκοσμο και τα μόρια...ενώ μακροκατάσταση όταν παρατηρούμε...

Σ8: Το σύστημα.

Ε: Και όταν παρατηρούμε το σύστημα τι είναι αυτό που βλέπουμε;

Σ8: Μια γενικότερη μεταβολή, βλέπουμε τη μεταβολή του συστήματος όχι απαραίτητα τις πιθανές θέσεις.

.....

Σ8: Μεταβολή στην πυκνότητα του χρώματος.

.....

Σ7: ... εδώ τα παρατηρώ πιο γενικά, την επιφάνεια, εδώ σε βάθος περισσότερο, βλέπουμε τις κινήσεις, τις θέσεις που μπορούν να έχουν.

Σ8: Σ' αυτή την περίπτωση έχουμε τα μόρια της σταγόνας ενώ εκεί [φωτογραφία] έχουμε τη συνολική σταγόνα.

Σ8: Εδώ πέρα [φωτογραφία] δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε τα μόρια.

Σ10-Σ11

Η Σ10 συνδέει τη μακροκατάσταση με παρατήρηση «από μακριά» και τη μικροκατάσταση με πιο «λεπτομερή» παρατήρηση. Ωστόσο διευκρινίζει ότι η μικροκατάσταση αφορά αποκλειστικά στα μόρια και όχι σε οποιαδήποτε κατάσταση μπορούμε να παρατηρήσουμε με μικροσκόπιο.

Σ10: Η μικροκατάσταση σε σχέση με τα μόρια θα έλεγα, ότι αφορά γενικά τις κινήσεις, τις πιθανές θέσεις των μορίων.

Σ10: Είναι οι θέσεις των μορίων και γενικά ότι αφορά τα μόρια και μακροκατάσταση θα λεγα ότι είναι οι φάσεις, οι εικόνες, αυτό που βλέπουμε από μακριά σαν σύνολο.

E: Από μακριά σαν σύνολο.

Σ10: Δηλαδή όταν δεν έχουμε μπει να δούμε τα μόρια, ότι βλέπουμε, τώρα το μπλε το χρώμα μέσα στο νερό αυτό. Δεν έχουμε μπει να το αναλύσουμε.

E: Το μακρο το συνδέεις λίγο με το από μακριά;

Σ10: Ναι κάπως έτσι και το μικρο σε πιο λεπτομερή.

E: Δηλ. αν είχα ένα μικροσκόπιο και μπορούσα να δω περισσότερη λεπτομέρεια, όχι να δω μόρια, είπαμε δε μπορούμε να δούμε τα μόρια, απλά να μεγεθύνω κάπως, οπότε να μπορώ να δω, εκεί που θα δούμε με περισσότερη λεπτομέρεια θα το λέγαμε μικροκατάσταση;

Σ10: Όχι, μόνο στα μόρια αφορά η μικροκατάσταση, ότι αφορά αποκλειστικά μόνο τα μόρια.

E: Δηλ. όταν βλέπω τα μόρια, βλέπω μικροκατάσταση;

Σ10: Ναι.

E: Και όταν παρατηρώ...

Σ10: Σαν χρώμα έτσι όπως το βλέπουμε τώρα, μακροκατάσταση.

Αντίθετη άποψη έχει η Σ9 η οποία θεωρεί **μικροκατάσταση οποιαδήποτε «μελέτη εις βάθος»** όπως φαίνεται στο παρακάτω επεισόδιο:

Σ9: Και μένα αυτή ήταν η σκέψη μου ότι είναι μακροκατάσταση αυτά που έχουμε φωτογραφήσει, έτσι όπως τα βλέπουμε εμείς με γυμνό μάτι. Αν εμβαθύνουμε περισσότερο είναι η μικροκατάσταση.

E: Αν εμβαθύνουμε περισσότερο, και πριν στο παράδειγμα...να πάρουμε ένα μικροσκόπιο να βλέπουμε κύτταρα, είναι μικροκατάσταση;

Σ9: Εγώ θα λεγα είναι, δεν είναι; Η οποιαδήποτε μελέτη εις βάθος μου κάνει μικροκατάσταση.

E: Ενώ μια παρατήρηση έτσι.

Σ9: Έτσι με γυμνό μάτι...μακροκατάσταση.

Σ15-Σ16

Παρακάτω παρατίθενται επεισόδια της ίδιας διδασκαλίας όπου φαίνονται οι πορείες μάθησης των δυο φοιτητών.

Αρχικά δεν κάνουν καμιά συσχέτιση με το μοντέλο. Συσχετίζουν τους όρους με το χρόνο αλλά και με το χώρο. **Καθώς η χρωστική εξαπλώνεται, το σύστημα περνάει από μικροκατάσταση σε μακροκατάσταση. Ως μακροκατάσταση περιγράφουν τη σταθερή κατάσταση στην οποία καταλήγει το σύστημα μετά από χρόνο, όταν έχει εξαπλωθεί πλήρως η χρωστική.**

Σ16: Μικροκατάσταση θα μπορούσαμε να πούμε τη στιγμή που πέφτει η σταγόνα στο νερό μέχρι που αρχίζει να εξαπλώνεται και από τη στιγμή που έχει εξαπλωθεί σ' όλο το νερό, από τότε να το θεωρήσουμε μακροκατάσταση.

E: Δηλαδή με τι συσχετίζεις τη μικροκατάσταση και τη μακροκατάσταση;

Σ15: Με τη σταδιακή εξάπλωση της σταγόνας.

Σ16: Ναι με την εξάπλωση και μετά ότι είναι μια σταθερή κατάσταση αφότου εξαπλωθεί σ' όλο το νερό.

E: Δηλαδή τη σταθερή κατάσταση που δεν αλλάζει μετά τη λες μακροκατάσταση ενώ όσο αλλάζει μικροκατάσταση; Η μικροκατάσταση λες όταν η σταγόνα είναι σχετικά μαζεμένη;

Σ16: Όταν είναι μαζεμένη, στην αρχή, με το που πέσει.

E: Άρα για σένα το μικρο έχει σχέση με το ότι είναι κάπου κοντά στο χώρο, κάτι πιο μαζεμένο ή και με το χρόνο;

Σ16: Και με το χρόνο.

Σ16: Δεν ξέρω, μέχρι την 3^η φωτογραφία μικροκατάσταση και από την 4^η και μετά υπάρχει μακροκατάσταση;

E: Σ15, εσύ;

Σ15: Όσο αυξάνεται η κηλίδα, τόσο πηγαίνουμε στη μάκρο κατάσταση;

Σ15: Ότι όσο μεγαλώνει η επιφάνεια που καταλαμβάνει κάτι πηγαίνουμε σε μακρο.

H E προσπαθεί να στρέψει την προσοχή τους στο μοντέλο

E: Το ότι αυτά μας δείχνουν τον μικρόκοσμο, τις θέσεις των μορίων, πώς τοποθετούνται τα μόρια;

E: Να σκεφτείτε να συνδυάσετε τη μικροκατάσταση με μικρόκοσμο;

Αποφασίζουν ότι ο κάθε ένας τρόπος διευθέτησης των μορίων αποτελεί και μια μικροκατάσταση ενώ η ερευνήτρια εισάγει τον ορισμό της μακροκατάστασης και τη συνδέει με τις μεταβλητές που την περιγράφουν

Πριν την εισαγωγή της εντροπίας οι φοιτητές περιγράφουν πώς έχουν αντιληφθεί τους δυο όρους:

Σ15: Μακροκατάσταση είναι αυτά τα ποτήρια που βλέπαμε, έτσι όπως άλλαξε το νερό και το χρώμα και ο όγκος.

Σ16: Στο μικρόκοσμο, οι θέσεις, όχι οι πιθανές θέσεις, οι πιθανοί συνδυασμοί που μπορούν να πάρουν τα μόρια της χρωστικής.

H Σ15 συνδέει τη μακροκατάσταση με κατάσταση που παρατηρούμε και που περιγράφεται από μεταβλητές και ο Σ16 καταλήγει να ονομάζει μικροκαταστάσεις τους πιθανούς συνδυασμούς που μπορούν να σχηματίσουν τα μόρια της χρωστικής, αλλάζοντας θέσεις.

4.5.2.2 Αιτιολόγηση της αύξησης του αριθμού των μικροκαταστάσεων

Σ7-Σ8

Το επεισόδιο που ακολουθεί είναι ενδεικτικό ότι εύκολα αναγνωρίζουν την **αύξηση του αριθμού των μικροκαταστάσεων κατά την εξέλιξη του φαινομένου από τη μακροκατάσταση 1 στη μακροκατάσταση 4 και τη μεγιστοποίησή του στην μακροκατάσταση 4.**

Ως προς την αιτιολόγηση ακολουθούν την παρακάτω μαθησιακή πορεία:



E: Γενικά το πλήθος των μικροκαταστάσεων πώς μεταβάλλεται από την μακροκατάσταση 1 στην μακροκατάσταση 3;

Σ8: Αυξάνεται.

E: Στην 4^η φωτογραφία ποιες είναι τώρα οι πιθανές θέσεις των μορίων;

Σ8: ...225.

E: Σε σχέση με το πλέγμα είναι;

Σ7: Όλο το πλέγμα.

E: Το σύνολο των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν στην τελευταία μακροκατάσταση συγκριτικά με το σύνολο των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν στις προηγούμενες;

Σ7: Είναι πολύ περισσότερο.

Σ8: Είναι μέγιστο.

E: ... στην 4 πώς θα προκύψουν οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις;

Σ8: Από τις διαφορετικές θέσεις που θα έχουν τα 5 μόρια της χρωστικής.

E: Τα 5 μόρια είπαμε ότι είναι, πόσες είναι οι πιθανές θέσεις;

Σ7: Είναι πολλές και, αυξάνονται.

E: 225, άρα οι τρόποι που θα τοποθετηθούν τα μόρια...

Σ7: Θα είναι πιο μακριά το ένα με το άλλο.

E: Οι τρόποι τοποθέτησης;

Σ8: Αφού αυξάνονται οι θέσεις λογικά δεν θα αυξάνονται και οι τρόποι τοποθέτησης;

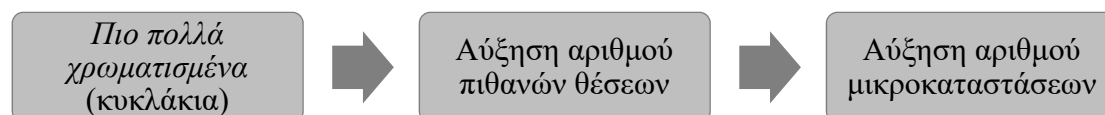
E: Αυτοί οι τρόποι τοποθέτησης είναι οι μικροκαταστάσεις, άρα το πλήθος των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχεί στην τελευταία μακροκατάσταση πώς μεταβάλλεται σε σχέση με τις προηγούμενες;

Σ7: Αυξάνεται.

Σ8: Γίνεται μέγιστο.

Σ13-Σ14

Παρατηρώντας τις αναπαραστάσεις των φωτογραφιών στο μοντέλο, οι φοιτήτριες αναφέρονται έμμεσα σε αύξηση αριθμού πιθανών θέσεων περιγράφοντας αυτό που βλέπουν, περισσότερα κυκλάκια χρωματισμένα. Αιτιολογούν την αύξηση του αριθμού μικροκαταστάσεων ακολουθώντας το συλλογισμό:



E: Σε ποια μακροκατάσταση αντιστοιχεί μεγαλύτερο πλήθος μικροκαταστάσεων;

Σ13: Σε όλες.

Σ14: Στην τελευταία.

E: Γιατί;

Σ14: Βλέπουμε ότι υπάρχει μεγαλύτερη κάλυψη, δεν είναι μόνο το νερό αλλά είναι τα πιο πολλά χρωματισμένα.

E: Αν κοιτάξουμε στην τελευταία αναπαράσταση εκεί ποιες είναι οι πιθανές θέσεις;

Σ14: Όλο το τετράγωνο.

Σ13: Όλο το πλέγμα.

E: ...225 πιθανές θέσεις.

...

Σ14: Γιατί τα μόρια μπορούν να πάρουν περισσότερες θέσεις απ' ότι στις υπόλοιπες.

Σ13: Τις έχουν πάρει όλες τις θέσεις.

Σ5-Σ6

Οι φοιτήτριες συχνά **συγχέουν τις μικροκαταστάσεις με τις πιθανές θέσεις**. Αυτό γίνεται εμφανές όταν τους ζητείται να περιγράψουν τη μεταβολή του αριθμού των μικροκαταστάσεων και ακολούθως τη μεταβολή της εντροπίας. Σε πολλά σημεία των διδασκαλιών κρίνεται απαραίτητος ο **επαναπροσδιορισμός του όρου μικροκατάσταση ως τον τρόπο διευθέτησης των μορίων στις πιθανές θέσεις, ώστε να διευκολυνθεί η ολοκλήρωση των συλλογισμών των φοιτητριών**. Οι φοιτήτριες καθοδηγούνται κατά τρόπο ώστε να αναλογιστούν ότι **οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στην ίδια μακροκατάσταση προκύπτουν καθώς τα πέντε μόρια της χρωστικής διατάσσονται διαφορετικά κάθε φορά σε συγκεκριμένο αριθμό πιθανών θέσεων**.

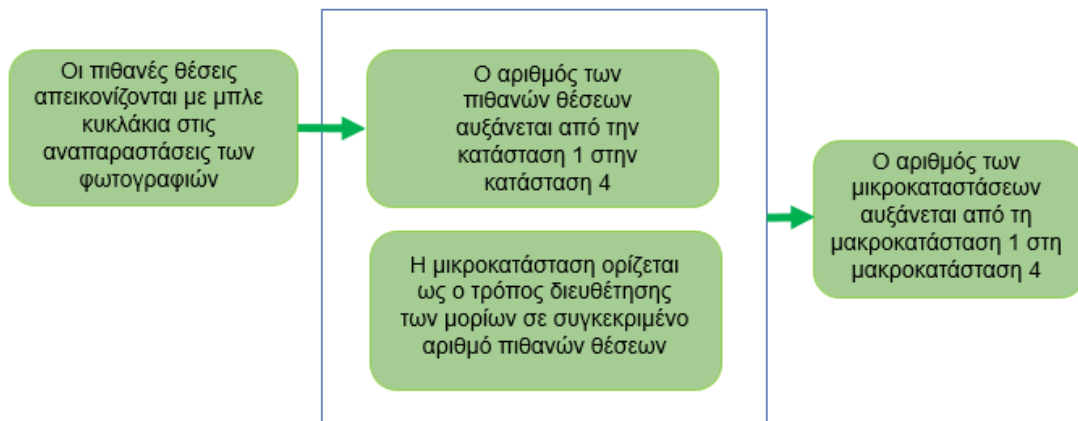
Το παρακάτω επεισόδιο είναι ενδεικτικό της ταύτισης του αριθμού των μικροκαταστάσεων με τον αριθμό των πιθανών θέσεων.

Σ5: Πώς αλλάζει;

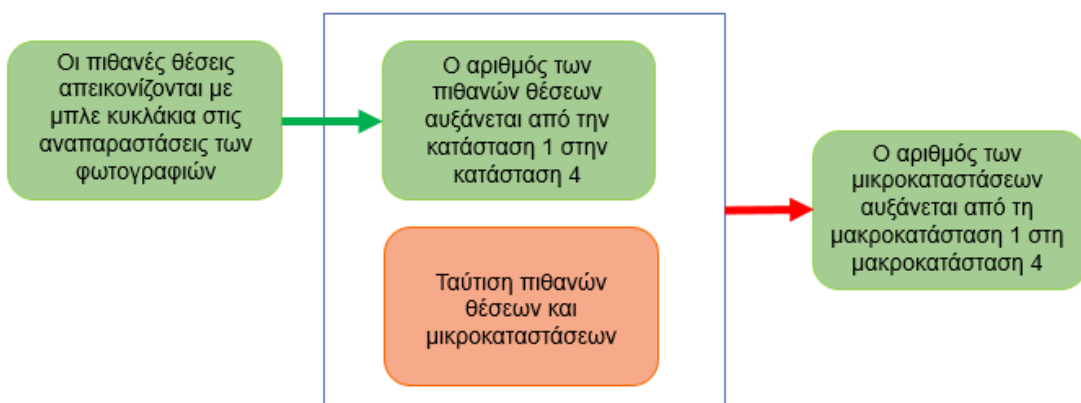
E: Το πλήθος των μικροκαταστάσεων.

Σ5: Αυξάνεται, μεγαλώνει, γιατί από τη στιγμή που έχουμε μεγαλύτερα όρια.
 Σ6: Πλαίσιο.
 Σ5: Πλαίσιο, 3x3, 5x5, αυξάνονται και οι θέσεις οπότε όσες είναι οι θέσεις, τόσες λέμε ότι είναι οι μικροκαταστάσεις. Δηλ. αν αυτό εδώ είναι μια μικροκατάσταση, αν έχουμε 25 τέτοια [κυκλάκια] θα υπάρχουν 25 μικροκαταστάσεις.

 Ε: 25, τι 25 τέτοια, δεν κατάλαβα.
 Σ5: Εδώ πέρα επειδή έχουμε 9, θα έχουμε 9 διαφορετικές θέσεις για τα μόρια.
 Ε: Εδώ είναι 9 πιθανές θέσεις.
 Σ5: 9 πιθανές θέσεις, ναι.
 Ε: 9 πιθανές θέσεις σημαίνει ότι έχουμε 9 μικροκαταστάσεις;
 Σ5: Ναι έτσι το, με την έννοια ότι αυτό που είπα για τη μικροκατάσταση, ότι αν αυτό το θεωρήσουμε ότι αυτό μας δείχνει μια μικροκατάσταση, 9 διαφορετικές θέσεις που θα υπάρχουν θα μας δείχνουν η καθεμιά από μια μικροκατάσταση.



Σχήμα 42: Ολοκληρωμένος συλλογισμός για την αιτιολόγηση της αύξησης του αριθμού των μικροκαταστάσεων



Σχήμα 3: Σύγκριση των μικροκαταστάσεων και των πιθανών θέσεων (παρουσιάζεται με κόκκινο χρώμα)

4.5.2.3 Γνωστές μόνο οι πιθανές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη μακροκατάσταση

Ενώ είναι δυνατή η παρατήρηση της μακροκατάστασης του συστήματος και η περιγραφή της με μεταβλητές, δεν είναι γνωστή η μικροκατάσταση του συστήματος, παρά μόνο οι πιθανές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη μακροκατάσταση. Οι απόψεις των περισσότερων φοιτητριών που συμμετείχαν στις διδασκαλίες συμφωνούν με την επιστημονική, εμφανίζεται όμως και η εναλλακτική ιδέα ότι η μια μικροκατάσταση διαδέχεται την άλλη.

Στο παρακάτω επεισόδιο η Σ5 εκφράζει την επιστημονική άποψη δηλαδή ότι **ενώ όλες οι μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στην ίδια μακροκατάσταση είναι πιθανές, σε μια από αυτές θα βρεθεί το σύστημα αλλά δεν είναι γνωστό σε ποια.** Η Σ6 όμως θεωρεί ότι **η μια μικροκατάσταση διαδέχεται την άλλη και ότι όλες μαζί σχηματίζουν κατά κάποιον τρόπο τη μακροκατάσταση που παρατηρείται.** Η επικάλυψη των διαφανειών «για να σχηματιστεί το πλαίσιο» ενισχύει την εναλλακτική ιδέα.

E: *Οι μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μια μακροκατάσταση είπαμε ότι είναι πολλές, αυτές θα διαδέχονται ή θα συμβεί μια απ' όλες που δεν ξέρουμε ποια θα είναι;*

Σ5: *Μια απ' όλες.*

Σ6: *Η μια θα διαδέχεται τη άλλη, έτσι δε θα είναι για να γίνει το σχήμα.*

E: *Για να γίνει το σχήμα;*

Σ6: *Για να σχηματιστεί το πλαίσιο. όπως εδώ ας πούμε, η μια χρειάζεται και την άλλη μικροκατάσταση και την άλλη και την άλλη. [Δείχνει τις διαφάνειες με τα πλέγματα].*

Σ5: *Εγώ λέω ότι δε θα βλέπουμε όλους αυτούς τους συνδυασμούς διαδοχικά, θα βλέπουμε έναν.*

Σ6: *Μια σταγόνα ας πούμε.*

Σ5: *Άσε τη σταγόνα, για τα μόρια.*

E: *Η σταγόνα είναι αυτό που βλέπουμε μακροσκοπικά. Αυτό που θα βλέπαμε στο μικρόκοσμο θα ήταν μια απ' όλες τις πιθανές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη μακροκατάσταση, αλλά μια που δεν ξέρουμε.*

Σ6: *Δεν θα μπορούσαμε να τις δούμε διαδοχικά όλες.*

E: *Εμείς ξέρουμε τις πιθανές μικροκαταστάσεις, γι' αυτό λέμε πιθανές, δεν ξέρουμε σε ποια απ' όλες θα βρεθούν τα μόρια.*

4.6 Κατάσταση ισορροπίας

4.6.1 Ασαφής η εικόνα για την τελική κατάσταση

Σχετικά με την τελική κατάσταση δεν υπάρχει σαφής εικόνα. Πιο συγκεκριμένα, φαίνεται να επικρατούν τρεις απόψεις:

- Πλήρης διάλυση της χρωστικής στο νερό-ομογενοποίηση.
- Το διάλυμα δε θα γίνει πλήρως ομογενές– δε θα αποκτήσει ενιαίο χρώμα.
- Πιθανότητα ιζήματος → Ανοιχτόχρωμη επιφάνεια - σκουρόχρωμος πυθμένας.

Στην εξαγωγή συμπεράσματος για την τελική κατάσταση εμφανίζονται τα παρακάτω εμπόδια:

- Στη φωτογραφία που αντιστοιχεί στην κατάσταση ισορροπίας διακρίνονται κύκλοι, κάποιοι άσπροι και πιο φωτεινοί και κάποιοι πιο σκουρόχρωμοι, αποτέλεσμα της «αντανάκλασης». Αυτοί δημιουργούν την λανθασμένη εντύπωση της μη ομοιογένειας του διαλύματος.

Σ10: ... *τώρα βασικά γύρω γύρω που δείχνει μπλε είναι βασικά η αντανάκλαση...*

Σ9: *Το ποτήρι λειτουργεί σαν καθρέφτης κατά κάποιο τρόπο.*

- Οι φοιτήτριες θα πρέπει να φανταστούν την τελική κατάσταση αφού κατά τη δίωρη διάρκεια της διδασκαλίας το διάλυμα δεν προλαβαίνει να ομογενοποιηθεί πλήρως.

4.6.2 Ρόλος του μοντέλου στη λήψη απόφασης για την τελική κατάσταση

Σ9-Σ10

Οι φοιτήτριες Σ9 και Σ10 υποστηρίζουν ότι **το μοντέλο συγκρούεται με την πραγματικότητα**. Συγκεκριμένα, στο μοντέλο η τελική κατάσταση, αναπαράσταση της 4^{ης} φωτογραφίας εμφανίζει ομοιομορφία ως προς το χρώμα, υποδηλώνοντας ότι τελικά το διάλυμα θα γίνει ομογενές. Αντίθετα, οι φοιτήτριες υποθέτουν ότι στην πράξη το διάλυμα δε θα γίνει ομογενές.

E: *Και αν το αφήσουμε κι άλλο.... θέλω να αποφασίσουμε πώς θα καταλήξει αυτή η σταγόνα.*

Σ10: *Δε θα διαλυθεί ποτέ εγώ λέω, έτσι θα μείνει.*

Σ9: Κάποια στιγμή θα μείνει σταθερά, μπορεί να ανοίξει λίγο παραπάνω το χρώμα.

Σ10: Δεν πιστεύω ότι ήταν να ανοίξει, άνοιξε.

Σ9: Και αν ανοίξει ελαφρώς, αλλά κατά βάση θα μείνει έτσι.

E: Δηλ. δε θα είναι κάτι ίδιο παντού;

Σ10, Σ9: Όχι.

Ωστόσο, οι αναπαραστάσεις που έπονται της αναπαράστασης της 4^{ης} φωτογραφίας, συντελούν στην αποδοχή από τις φοιτήτριες, μιας σταθερής κατάστασης που χαρακτηρίζεται από την ερευνήτρια μακροκατάσταση ισορροπίας.

Αποδέχονται, όπως καταδεικνύει το παρακάτω επεισόδιο, ότι μετά τη μακροκατάσταση 4:

- δεν υπάρχουν παρατηρήσιμες μεταβολές,
- ο αριθμός των μικροκαταστάσεων παραμένει σταθερός,
- μικροσκοπικά υπάρχουν μεταβολές, τα μόρια αλλάζουν θέσεις.

E: Όμως θα είναι μια κατάσταση η τελική μακροκατάσταση στην οποία θα έχουμε αλλαγές, μεταβολές, θα είναι σταθερή με το χρόνο;

Σ10: Μετά από ένα σημείο.

Σ9: Το τελικό; Το τελικό θα είναι σταθερό. Ναι από ένα σημείο και μετά δε θα αλλάξει.

E: ...ενώ μικροσκοπικά εμείς δε θα βλέπουμε αλλαγή αν μπορούμε να μπούμε στο μικρόκοσμο, εκεί θα έχουμε αλλαγές;

Σ10: Έτσι όπως το βλέπω όχι. Ο αριθμός θα είναι ίδιος. Τώρα τι θέσεις θα πάρουν.

E: Ποιος αριθμός;

Σ10: Ο αριθμός των μικροκαταστάσεων θα είναι σταθερός, δε θα αλλάξει, δε θα αυξηθεί.

E: ...ενώ εμείς θα παρατηρούμε συνεχώς την ίδια μακροκατάσταση, θα έχουμε συνεχώς και την ίδια μικροκατάσταση;

Σ10: E όχι.

Σ9: Μπορεί να αλλάζουν.

Σ10: Ναι.

E: Δηλ. ας πούμε ότι τα μόρια μπορεί να βρεθούν σ' αυτές τις θέσεις.

Σ9: Μπορεί να βρεθούν και σε διαφορετικές.

Σ7-Σ8

Κατά τη δίωρη διάρκεια της διδασκαλίας το μείγμα δεν προλαβαίνει να ομογενοποιηθεί πλήρως. Ως εκ τούτου οι φοιτήτριες θα πρέπει να υποθέσουν για την τελική κατάσταση. Ενώ η Σ7 έχει σταθερή άποψη για την κατάληξη του μείγματος σε ομοιογένεια, η Σ8 φαίνεται να μην έχει ξεκάθαρη άποψη και απευθύνει στην ερευνήτρια ερώτηση σχετικά με την τελική κατάσταση. Ωστόσο **αναγνωρίζει ότι**

είναι μια κατάσταση σταθερή, ανεξάρτητη από το χρόνο στην οποία νερό και χρωστική είναι «σε ισορροπία». Η ερευνήτρια προτείνει να την ονομάσουν κατάσταση ισορροπίας.

E:θα έχουμε αλλαγές;

Σ8: Νομίζω όχι, δεν μπορεί να γίνει κάτι άλλο.

Σ7: Όχι.

E: Ποια τα χαρακτηριστικά αυτής της τελευταίας κατάστασης;

Σ7: Ότι είναι ομοιόμορφο, όλο γαλάζιο.

Σ8: Ότι θα είναι σταθερή, αμετάβλητη.

E: Ανεξάρτητη από το χρόνο, δηλ. συνεχώς θα βλέπουμε το ίδιο πράγμα. Το σύστημα δε θα εμφανίζει μεταβολές. Να χρησιμοποιήσουμε κάποιον όρο;

Σ8: Είναι σε ισορροπία;

E: Να την πούμε κατάσταση ισορροπίας;

Σ11-Σ12

Οι φοιτήτριες Σ11 και Σ12 παρατηρούν τις αναπαραστάσεις που έπονται της αναπαράστασης της 4^{ης} φωτογραφίας. **Αιτιολογούν τη σταθερότητα της μακροκατάστασης λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αριθμός των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη μακροκατάσταση παραμένει σταθερός.**

E: Εδώ τώρα τι βλέπουμε;... αν συνεχίζαμε να φωτογραφίζουμε.

Σ12: Βλέπουμε ότι συνεχίζουν, το ίδιο βλέπουμε.

Σ11: Ότι δεν αλλάζει.

.....

E: Γιατί δεν αλλάζει η μακροκατάσταση;

Σ11: Αφού δεν αλλάζουν οι μικροκαταστάσεις, αφού έχουμε βρει όλους τους πιθανούς συνδυασμούς, όλες τις πιθανές θέσεις, δεν αλλάζει και η μακροκατάσταση.

E: Εσύ λες ότι δεν αλλάζει ο αριθμός των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν στην τελευταία μακροκατάσταση επειδή όλες οι θέσεις είναι πιθανές.

Σ11: Επομένως δε θα αλλάζει και η μακροκατάσταση.

Συνεχίζοντας αιτιολογούν τη σταθερότητα της μακροκατάστασης λαμβάνοντας υπόψη ότι ο αριθμός των πιθανών θέσεων παραμένει σταθερός.

Σ12: Γιατί δεν υπάρχει άλλος αριθμός θέσεων ο οποίος μπορεί να αυξηθεί για να αλλάξουν τα μόρια θέσεις.

Κατόπιν παρέμβασης της ερευνήτριας οι φοιτήτριες αναγνωρίζουν ότι δεν υπάρχουν παρατηρήσιμες μεταβολές και ότι οι μεταβλητές που περιγράφουν την συγκεκριμένη μακροκατάσταση διατηρούνται σταθερές.

E: Στην μακροκατάσταση, τον βλέπουμε τον αριθμό των θέσεων;

Σ12: Όχι.

E: Η μακροκατάσταση έχει σχέση με αυτό που βλέπουμε. Έστω ότι συνέχιζα να φωτογραφίζω την επιφάνεια, θα αλλάξει ή όχι;

Σ12: Όχι δε θα αλλάξει.

E: Γιατί; Τι θα είναι αυτό που θα βλέπω συνέχεια ίδιο; Δε θα βλέπω πιθανές θέσεις.

Σ12: Το χρώμα θα βλέπω.

E: Θα βλέπω ίδιο χρώμα, ίδια απόχρωση, τι άλλο;

Σ12: Τον όγκο του νερού.

E: Είναι όλο χρωματισμένο. Επομένως η μακροκατάσταση είναι αυτό που παρατηρώ. Αφού δεν παρατηρώ αλλαγές δε θα αλλάξει.

Οι αναπαραστάσεις των φωτογραφιών αφενός περιγράφονται από τις ίδιες μεταβλητές που περιγράφουν τις μακροκαταστάσεις-φωτογραφίες, αφετέρου δείχνουν τις πιθανές θέσεις οι οποίες είναι μικρο σε διαστάσεις. Οι παραπάνω φοιτήτριες φαίνεται να αναγνωρίζουν τη σταθερότητα του αριθμού των πιθανών θέσεων πιο εύκολα από ό,τι αναγνωρίζουν τη σταθερότητα των μεταβλητών δηλαδή συνδέουν περισσότερο τις αναπαραστάσεις με μικρο (πιθανές θέσεις) και λιγότερο με μακρο (μεταβλητές).

4.6.3 Αλλαγή των μικροκαταστάσεων στην κατάσταση ισορροπίας

- **Αναγνωρίζουν ότι όσο δεν παρατηρούνται μεταβολές σε μακροεπίπεδο, μικροσκοπικά υπάρχουν μεταβολές.**

E: ... Άρα η μακροκατάσταση από κει και έπειτα είναι σταθερή. Τι πιστεύετε για τις μικροκαταστάσεις; Αν είχα τη δυνατότητα αντίστοιχα να βλέπω το μικρόκοσμο, θα έβλεπα συνεχώς την ίδια μικροκατάσταση;

Σ7: Μπορεί να αλλάζουν οι θέσεις των μορίων, το ίδιο θα βλέπουμε ας πούμε όλα τα κυκλάκια όπως τα βλέπουμε εκεί, απλά μπορεί οι θέσεις των μορίων να είναι διαφορετικές.

E: Αες επομένως ότι οι πιθανές θέσεις είναι ίδιες αλλά

Σ8: Ο τρόπος τοποθέτησης διαφορετικός.

- **Δυσκολεύονται να αναγνωρίσουν ότι ενώ μετά τη μακροκατάσταση 4 δεν υπάρχουν παρατηρήσιμες μεταβολές, μικροσκοπικά υπάρχουν μεταβολές εξαιτίας της εναλλακτικής ιδέας που αναδύθηκε ότι όσο το νερό και η χρωστική ισορροπούν, θα ισορροπούν και τα μόρια.**

E: Όσο δεν παρατηρούμε αλλαγή μακροσκοπικά, στο μικρόκοσμο, στις μικροκαταστάσεις θα παρατηρούμε αλλαγή;

Σ18: Εννοείτε αν με το χρόνο θα αλλάζουνε;

E: Όσο δεν παρατηρούμε αλλαγή σ' αυτό [ποτήρι], θα βλέπαμε συνεχώς μια ίδια μικροκατάσταση;

Σ18: Μήπως θα άλλαζε; Τα μόρια μπορούν να είναι ακίνητα για μεγάλο χρονικό διάστημα; Αν δεν τους ασκήσουμε κάποια δύναμη, ναι [μπορούν να είναι ακίνητα] γιατί όχι, ίδια θα μείνει.

E: Όσο δεν παρατηρούμε αλλαγή σ' αυτό [ποτήρι], τα μόρια δεν θα αλλάζουν θέσεις;

Σ17: Ναι, άμα δεν το κινήσουμε.

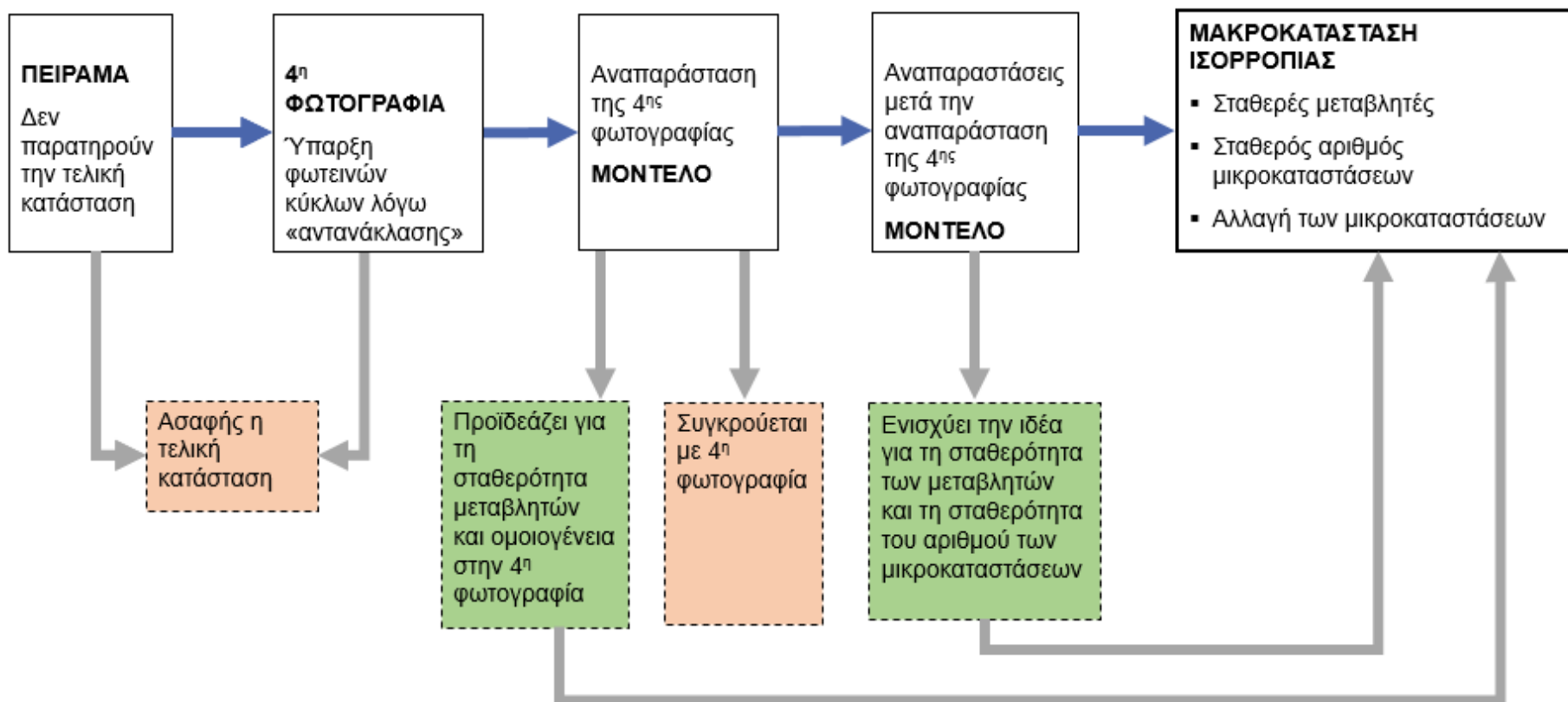
Σ18: Θα αλλάζουνε;

E: Για να κινηθούν δηλ τα μόρια πρέπει να το κουνάμε εμείς;

Σ18: Θα αλλάζουνε [θέσεις].

E: Επομένως οι μικροκαταστάσεις;

Σ17: Θα αλλάζουνε.



Σχήμα 6: Ο ρόλος του πειράματος και του μοντέλου για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών της μακροκατάστασης ισορροπίας

4.7 Εντροπία

4.7.1 Ανίχνευση ιδεών για την εντροπία

Η εντροπία είναι μια άγνωστη έννοια όχι μόνο για τους φοιτητές που ακολούθησαν θεωρητική κατεύθυνση κατά τη φοίτησή τους στο Λύκειο, αλλά και για αυτούς που ακολούθησαν θετική ή τεχνολογική. Η έννοια, ενώ υπάρχει στο κεφάλαιο της θερμοδυναμικής, στο βιβλίο φυσικής θετικής και τεχνολογικής κατεύθυνσης της Β τάξης του Λυκείου, είναι εκτός της διδακτέας ύλης εδώ και πολλά χρόνια.

Ερωτηματολόγια

- Στα ερωτηματολόγια οι περισσότερες φοιτήτριες δεν έδωσαν απάντηση σχετικά με την παραπάνω έννοια. Ελήφθησαν 38 απαντήσεις, οι 24 εκ των οποίων καταδεικνύουν ότι οι φοιτήτριες δεν έχουν ακούσει ξανά για τη συγκεκριμένη έννοια, ενώ οι απαντήσεις των υπολοίπων, οι οποίες είναι καταγεγραμμένες στον παρακάτω πίνακα, ταυτίζονται με τις ήδη γνωστές από τη βιβλιογραφία εναλλακτικές ιδέες της εντροπίας ως αταξία ή της εντροπίας ως ενέργεια.

Πίνακας 6: Εναλλακτικές ιδέες των φοιτητριών για την έννοια της εντροπίας

ΑΠΑΝΤΗΣΕΙΣ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΑΠΑΝΤΗΣΕΩΝ	ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ
αποδιοργάνωση	3	Θεωρητική
σύγχυση	1	Τεχνολογική
αταξία	1	Θεωρητική
θερμοδυναμική ποσότητα	1	Τεχνολογική
σχετίζεται με έμβολα	1	Τεχνολογική
ενέργεια	1	Θεωρητική
ενέργεια που αλλάζει μορφές	1	Θετική
εσωτερική ενέργεια	2	Θεωρητική, Θετική
παύση εξέλιξης μετά την ομογενοποίηση του συστήματος	1	Θετική
διατήρηση ισορροπίας συστήματος-περιβάλλοντος	2	Θετική, Τεχνολογική

Διδασκαλίες

- Σε κάποιες διδασκαλίες γίνεται προσπάθεια για ετυμολογική ανάλυση της εντροπίας και συσχέτισής της με τα προηγούμενα.

Σ13: *Ετυμολογικά καταλαβαίνεις από το εν και το τρέπω.*

Σ13: *Κάτι σε σχέση με την τροπή, την αλλαγή θέσεων.*

- Από τις 22 φοιτήτριες που συμμετείχαν στις διδασκαλίες, μόνο η Σ8, η οποία προέρχονταν από θετική κατεύθυνση, είχε κάποιες εναλλακτικές ιδέες για την εντροπία. Το επεισόδιο που ακολουθεί έχει προηγηθεί της εισαγωγής του ορισμού της εντροπίας από την ερευνήτρια και καταδεικνύει **δυο εναλλακτικές ιδέες, της εντροπίας ως αταξία και της εντροπίας ως αλλαγή μορφής ενέργειας**. Σ' αυτό φαίνεται και η προσπάθεια της Σ8 να εφαρμόσει τη νέα γνώση στο φαινόμενο της τήξης του πάγου, το οποίο διερευνήθηκε στα ερωτηματολόγια, όπου εντοπίζει την αύξηση των πιθανών θέσεων.

Σ8: *Σαν εικόνα στο μυαλό μου, μια εναλλακτική ιδέα ας πούμε το έχω πώς κινούνται τα μόρια στο χώρο, αλλά να κινούνται άτακτα, πώς να το πω, όταν αλλάζουν θέσεις, όταν από τη μια κατάσταση πάμε στην άλλη, όταν αλλάζει μορφή ενέργειας, κάτι τέτοιο σκέφτομαι. Ας πούμε για το παγάκι που μας είχατε δώσει στο 1^ο παράδειγμα τη στιγμή που το αφήσαμε από το παγωμένο, από κάτι παγωμένο στερεό έγινε υγρό, άλλαξε μορφή η ενέργειά του. Όχι;*

E: *Άλλαξε η φυσική κατάσταση από στερεό έγινε υγρό;*

Σ8: *Ας πούμε η συνολική ενέργεια είναι σταθερή. Απλά τώρα τι μορφή πήρε, πολλές εναλλακτικές;*

E: *Και το προηγούμενο; Είπες για τα μόρια.*

Σ8: *Ότι είναι άτακτα στο*

E: *Και αν θέλαμε εκείνο που είπες για το παγάκι να το πάμε σ' αυτό το παράδειγμα.*

Σ8: *Αν υποθέσουμε ότι σε κάποια στερεά μορφή το παγάκι έχει λίγες πιθανές θέσεις. Όταν άρχισε να λιώνει το νερό, οι πιθανές θέσεις του στο χώρο ήταν πολύ περισσότερες.*

E: *Άρα η εντροπία;*

Σ8: *Οι πιθανές θέσεις.*

E: *Άλλαξε η εντροπία ας πούμε;*

Σ8: *Νομίζω όχι.*

- Ο στατιστικός ορισμός της έννοιας δίνεται από την ερευνήτρια, αφού όπως έχει ήδη αναφερθεί η έννοια είναι άγνωστη για τους φοιτητές.

4.7.2 Αιτιολόγηση της αύξησης της εντροπίας

Συλλογισμοί που ακολουθούν οι φοιτήτριες για την αιτιολόγηση της αύξησης της εντροπίας είναι οι εξής:



Ενώ συνδέουν άμεσα την αύξηση της εντροπίας με την αύξηση του αριθμού των μικροκαταστάσεων, ταυτίζουν τον αριθμό των μικροκαταστάσεων με τον αριθμό των πιθανών θέσεων.

E: Καθώς προχωράμε από την 1^η φωτογραφία στην 4^η φωτογραφία η εντροπία αλλάζει; Σ12, Σ11: Ναι.

E: Πώς;

Σ12: στο 1^ο 9, στο 2^ο 25.

Σ11: Ναι μετά 49.

E: Τι ήταν το 9, το 25;

Σ11: Το σύνολο των μικροκαταστάσεων στη συγκεκριμένη μακροκατάσταση.

Σ12: Ο πιθανός συνδυασμός.

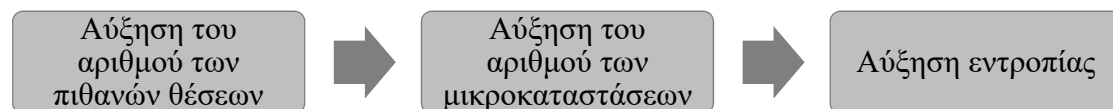
E: Αυτό ήταν το σύνολο των μικροκαταστάσεων;

Σ12: Ο πιθανός συνδυασμός που μπορούν να έχουν τα μόρια.

E: Δηλ. στο 1^ο είναι 9 οι πιθανοί συνδυασμοί και μετά 25; Το 9 και το 25 τι είναι;

Σ12: Οι πιθανές θέσεις....

Μετά από τον επαναπροσδιορισμό των μικροκαταστάσεων και της εντροπίας, ερμηνεύουν την αύξηση της εντροπίας από τη μακροκατάσταση 1 στην 4 ακολουθώντας έναν ολοκληρωμένο συλλογισμό:



E: Έχω 5 μόρια αρχικά στις 9 θέσεις και μετά 5 μόρια στις 25 θέσεις, αυξάνεται ο αριθμός των πιθανών θέσεων. Όμως εμείς την εντροπία την ορίσαμε ως τον αριθμό των πιθανών θέσεων;

Σ11: Των μικροκαταστάσεων.

E: Και τι ορίσαμε ως μικροκατάσταση;

Σ12: Το πλήθος.

Σ11: Τον κάθε ένα συνδυασμό των πιθανών θέσεων, ένα δηλαδή...

Ε: Είναι οι τρόποι τοποθέτησης των μορίων.....Επομένως η εντροπία αυξάνει, όχι γιατί αυξάνουν οι θέσεις, αλλά...

Σ11: Οι μικροκαταστάσεις. Ναι αλλά οι μικροκαταστάσεις δεν αυξάνουν επειδή αυξάνουν οι θέσεις;

Αύξηση του αριθμού των πιθανών θέσεων από 9 σε 25 σε 49



Αύξηση της εντροπίας

Δε συνδέουν την αύξηση της εντροπίας με την αύξηση του αριθμού των μικροκαταστάσεων.

Ε: Αλλάζει η εντροπία στις 4 μακροκαταστάσεις;

Σ15: Ναι.

Ε: Πώς αλλάζει;

Σ15: Γιατί αλλάζει ο αριθμός.

Σ16: Μεγαλώνει ο χώρος, οι πιθανές θέσεις, αυξάνονται οι πιθανές θέσεις που μπορούν να πάρουν και μεγαλώνει και η εντροπία.

Ε: Ξεκίνησες να λες αλλάζει ο αριθμός

Σ15: Αυτό, το 9, 25, 49.

Ε: το 9, 25, 49 είναι ο αριθμός των πιθανών θέσεων. Την εντροπία δεν την ορίσαμε ως τον αριθμό των πιθανών θέσεων, την ορίσαμε ως τον αριθμό των μικροκαταστάσεων.

Συγγέουν τον αριθμό των μικροκαταστάσεων με τον αριθμό πιθανών θέσεων.

Σ15: Οι μικροκαταστάσεις δεν είναι όμως ο αριθμός των πιθανών θέσεων που αλλάζουν τα μόρια;

Σ16: Όχι τα μόρια, οι θέσεις, οι συνδυασμοί;

Ε: Είναι οι συνδυασμοί, οι τρόποι τοποθέτησης των μορίων.....

4.7.3 Εντροπία στη μακροκατάσταση ισορροπίας

Στην μακροκατάσταση ισορροπίας ισχυρίζονται αλλαγή της εντροπίας την οποία αιτιολογούν σύμφωνα με το συλλογισμό:

Αλλαγή των μικροκαταστάσεων



Αλλαγή εντροπίας

Ε: Στην μακροκατάσταση ισορροπίας, η εντροπία;

Σ15: Αν συνεχίζω να φωτογραφίζω ή αν παραμείνω στην 4;

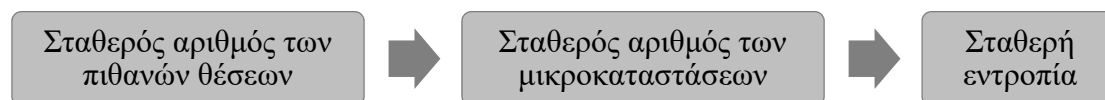
Ε: Αν συνεχίζω να φωτογραφίζω η εντροπία θα αλλάξει μετά;

Σ16: Ναι, γιατί να μην αλλάξει.

Σ15: Ναι, αλλάζουν οι συνδυασμοί.

Πιθανόν οι φοιτήτριες να **αποδίδουν την εντροπία στη μικροκατάσταση και όχι στη μακροκατάσταση.**

Μετά από παρέμβαση της ερευνήτριας αναγνωρίζουν ότι στην μακροκατάσταση ισορροπίας:



E: ... αν συνεχίζω να φωτογραφίζω αλλάζει ο αριθμός των πιθανών θέσεων;

Σ16: Όχι, δεν αλλάζει.

E: Άρα ο αριθμός των μικροκαταστάσεων αλλάζει;

Σ16, Σ15: Όχι.

E: Επομένως η εντροπία;

Σ15: Παραμένει ίδια

E: Και αφού καθώς πήγαινα από την 1 στην 4 η εντροπία μεγάλωνε, και εδώ παραμένει ίδια, άρα στην 4^η φωτογραφία έχω τη μέγιστη εντροπία.

Οι φοιτήτριες Σ9 και Σ10 μετά την εισαγωγή του ορισμού από την ερευνήτρια, αναγνωρίζουν εύκολα τη μεγιστοποίηση της εντροπίας στην μακροκατάσταση ισορροπίας.

E: Και στην τελευταία κατάσταση;

Σ9: Μετά θα μείνει σταθερή η εντροπία.

Σ10: Αν συνεχίσουμε να, πάλι θα μείνει σταθερή αφού είπαμε οι τοποθετήσεις

E: Ο αριθμός των μικροκαταστάσεων.

Σ10: Είναι σταθερός.

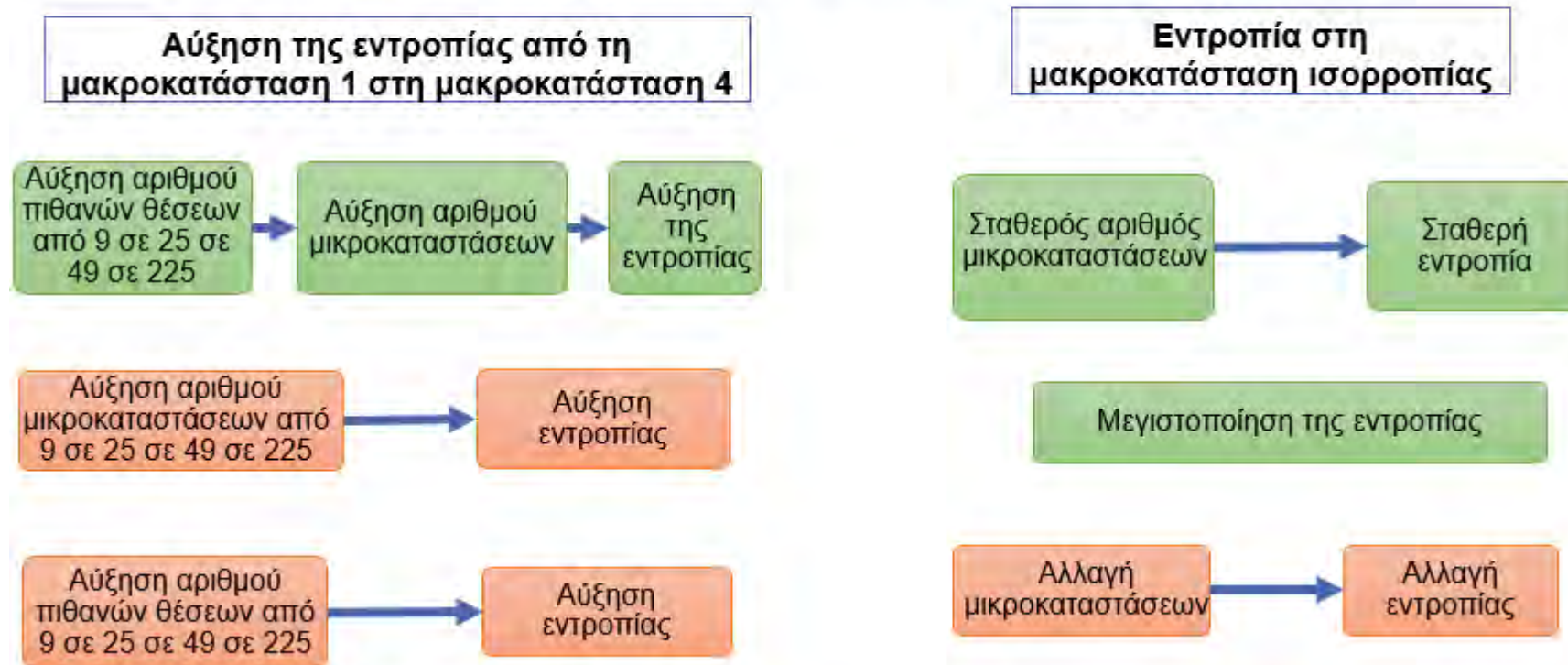
E: Οπότε κάπου η εντροπία.

Σ10: Θα σταθεροποιηθεί.

E: Αλλά αυτή η σταθερή τιμή θα είναι σε σχέση με τις προηγούμενες τιμές της εντροπίας;

Σ10: Η μεγαλύτερη.

**Εισαγωγή ορισμού της εντροπίας μακροκατάστασης
ως τον αριθμό των μικροκαταστάσεων που
αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη μακροκατάσταση**



Σχήμα 7: Πορείες μάθησης των φοιτητριών για την αιτιολόγηση της αύξησης της εντροπίας από τη μακροκατάσταση 1 στη μακροκατάσταση 4 και τη μεγιστοποίηση της στην μακροκατάσταση ισορροπίας (Οι ολοκληρωμένες πορείες μάθησης παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα ενώ οι ελλιπείς με κόκκινο χρώμα)

4.8 Δραστηριότητα 1

Το σύνολο των φοιτητριών παρατηρούν ότι το φαινόμενο δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί αντίστροφα δηλαδή σύμφωνα με την κατεύθυνση που δείχνουν οι φωτογραφίες όπως έχουν τοποθετηθεί από την ερευνήτρια. Επιπλέον όλες οι φοιτήτριες χαρακτήρισαν τη μεταβολή μη αντιστρεπτή.

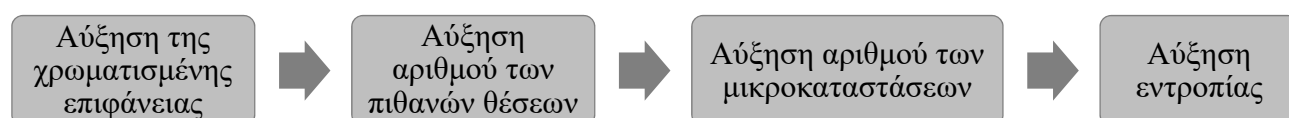
Τα παρακάτω επεισόδια είναι ενδεικτικά της ορθής εφαρμογής όρων όπως εντροπία, μικροκατάσταση, ισορροπία, μεταβλητές μακροκατάστασης.

- Η Σ4 επισημαίνει ότι **αν το φαινόμενο πραγματοποιούνταν αντίστροφα η εντροπία θα μειώνονταν.**

E: ... Θέλω να παρατηρήσετε τις φωτογραφίες από αριστερά προς τα δεξιά [τελευταία → πρώτη] και να τις σχολιάσετε.

Σ4: καλά το προφανές είναι ότι εκεί [πρώτη] η εντροπία είναι μικρότερη ενώ εδώ [τελευταία] είναι μέγιστη.

- Διακρίνεται μια **ανάπτυξη ολοκληρωμένου συλλογισμού για αιτιολόγηση της αύξησης της εντροπίας** όταν οι φωτογραφίες έχουν πλέον τοποθετηθεί κατά την ορθή φορά πραγματοποίησης του φαινομένου.



E: Πώς αλλάζει η εντροπία εδώ;

Σ14: Στην τελευταία έχει μεγαλύτερη, γιατί η χρωστική έχει καλύψει μεγαλύτερη επιφάνεια και τα μόρια μπορούν να πάρουν περισσότερες θέσεις.

E: Και μεγαλύτερη εντροπία είναι όταν έχουμε περισσότερες θέσεις;

Σ14: Όχι περισσότερες μικροκαταστάσεις.

- Ακόμη μια σημαντική επισήμανση είναι ότι **στην τελευταία φωτογραφία η εντροπία έχει τη μεγαλύτερη τιμή από τις προηγούμενες, αλλά δεν είναι μέγιστη, αφού η τελευταία μακροκατάσταση, δεν είναι μακροκατάσταση ισορροπίας.**

Σ18: Στην αρχή υπάρχουν κάποιοι συγκεκριμένοι συνδυασμοί, μικροκαταστάσεις και μετά αυξάνονται σε κάθε βήμα και στο τέλος που θα γίνει τελείως κόκκινο θα μείνει σταθερή.

E: Τώρα εδώ έχουμε μέγιστη εντροπία;

Σ18, Σ17: Όχι.

E: Αν έχουμε μόνο αυτές τις καταστάσεις;

Σ18: Τότε ναι.

E: Αλλά

Σ18: Γίνεται κι άλλο να πάει, να προχωρήσει.

E: Τι εννοείς;

Σ17: Να απλωθεί παντού.

Σ18: Και να αυξηθεί η εντροπία.

- Η Σ8 αναφέρεται σε **μείωση του αριθμού των πιθανών θέσεων από έναν αριθμό που δεν είναι ο μέγιστος, αφού καμιά από τις φωτογραφίες δεν αντιστοιχεί κατάσταση ισορροπίας.**

Σ8: Είναι η αντίστροφη πορεία απ' ότι ακολουθήσαμε στο πείραμα, δηλ. αν υποθέσουμε ότι αυτός, μέγιστος δεν είναι, ο μεγαλύτερος απ' όλες τις εικόνες, περισσότερες πιθανές θέσεις των μορίων, σιγά σιγά οι πιθανές θέσεις μικραίνουν.

- Αναφέρονται σε **αλλαγή μεταβλητών που περιγράφουν το σύστημα**, όταν οι φωτογραφίες είναι τοποθετημένες κατά την αντίστροφη φορά πραγματοποίησης του φαινομένου.

Σ21: Μικραίνει ο όγκος της χρωστικής.

Σ22: Όχι ο όγκος, είπαμε το διάστημα. Η περίμετρος του κύκλου.

E: Πώς αλλάζει η εντροπία;

Σ21, Σ22: Μειώνεται.

4.9 Δραστηριότητα 2

Σ3-Σ4

Αναγνωρίζουν ότι οι τέσσερις μικροκαταστάσεις αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση ισορροπίας και ότι ο τρόπος διαδοχής των μικροκαταστάσεων είναι τυχαίος.

E: Μπορείτε να τις βάλετε σε κάποια σειρά;

Σ4: Ίδια δεν είναι;

E: Ποια είναι ίδια;

Σ4: Είναι όλα το τελευταίο στάδιο.

....

Σ4: Η κατάσταση ισορροπίας.

Ε: Αντιστοιχούν στην κατάσταση ισορροπίας.

Σ4: Στη μέγιστη εντροπία.

Ε: Έχουμε λοιπόν 4 μικροκαταστάσεις. Μπορούμε να τις βάλουμε σε μια σειρά ώστε να φαίνεται μια διαδοχή;

Σ4: Ναι.

Σ3: Ναι.

Σ4: Αν και στην τύχη δεν πηγαίνουν τα μόρια στην κάθε θέση; Παίξει ρόλο δηλ.;

Ε: Θα μπορούσατε να τις βάλετε εσείς σε μια σειρά, έτσι ώστε να έχουμε την αρχική και επόμενη και μεθεπόμενη;

Σ4: Ναι αλλά πρέπει να έχουμε ένα σημείο;

Σ3: Ίσως αυτή εδώ πρώτη; Επειδή είναι τα μόρια στην αρχή; [δείχνει μόρια στην περιφέρεια του πλέγματος].

Ε: Πριν όμως με τις φωτογραφίες που δείχνανε τις μακροκαταστάσεις αυτό μπορούσαμε να το κάνουμε. Τώρα εδώ μπορούμε να πούμε ποια θα είναι η επόμενη μικροκατάσταση;

Σ4, Σ3: Όχι γιατί αυτό συμβαίνει τυχαία.

Σ11-Σ12

Οι παρακάτω φοιτήτριες **ταξινομούν χρονικά**, η καθεμιά χωριστά, **τα τέσσερα πλέγματα**. Σε αναλογία με τις αναπαραστάσεις των φωτογραφιών που έχουν προηγηθεί αναζητούν πλαίσιο μέσα στο οποίο κινούνται τα μόρια. Ταξινομούν τα πλέγματα με την ίδια σειρά αιτιολογώντας:

Σ11: Το πλαίσιο στο οποίο κινούνται τα μόρια μεγαλώνει όσο προχωράμε.

Αναγνωρίζουν σχετικά εύκολα ότι πρόκειται για 4 μικροκαταστάσεις, εκτιμούν όμως ότι η καθεμιά από αυτές αντιστοιχεί σε καθεμιά από τις 4 φωτογραφίες. Κατόπιν παρέμβασης της ερευνήτριας, η Σ11 παρατηρεί ότι στη μικροκατάσταση που αντιστοίχησε στην 1^η φωτογραφία υπάρχουν μόρια τοποθετημένα εκτός των εννέα πιθανών θέσεων. Αναθεωρεί και καταλήγουν σε συμφωνία ότι πρόκειται για 4 διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση ισορροπίας.

Ε: ...τι είναι το καθένα;

Σ12: Δείχνουν τα μόρια της χρωστικής και τους πιθανούς συνδυασμούς

Ε: Πώς τα λέμε;

Σ11: Μικροκαταστάσεις.

Ε: Σε ποια μακροκατάσταση αντιστοιχούν;

Σ12: Το 1^ο στην 1^η φωτογραφία, το 2^ο στη 2^η φωτογραφία.

Ε: Στην 1^η φωτογραφία πόσες και ποιες είναι οι πιθανές θέσεις;

Σ12: 9 είχαμε πει. [Κρατάει το 1^ο πλέγμα].

E: 9 που ορίζουν ένα τετραγωνάκι εκεί στη μέση.

Σ11: Προφανώς είναι διαφορετική μακροκατάσταση απ' ό,τι, εδώ ας πούμε [1^ο πλέγμα] δεν είναι μόνο 9 οι θέσεις.

E: Τι εννοείς επομένως, διαφορετική μακροκατάσταση;

Σ11: Δεν είναι αυτή η 1η μακροκατάσταση.

.....

Σ11: Νομίζω για αυτήν μόνο [4^ο πλέγμα] θα μπορούσαμε να πούμε ότι ταιριάζει στην τελευταία φωτογραφία.

E: Γιατί αντιστοιχεί στην τελευταία;

Σ12: Πιάνει τα άκρα.

Σ11: Καλύπτει μεγαλύτερη επιφάνεια.

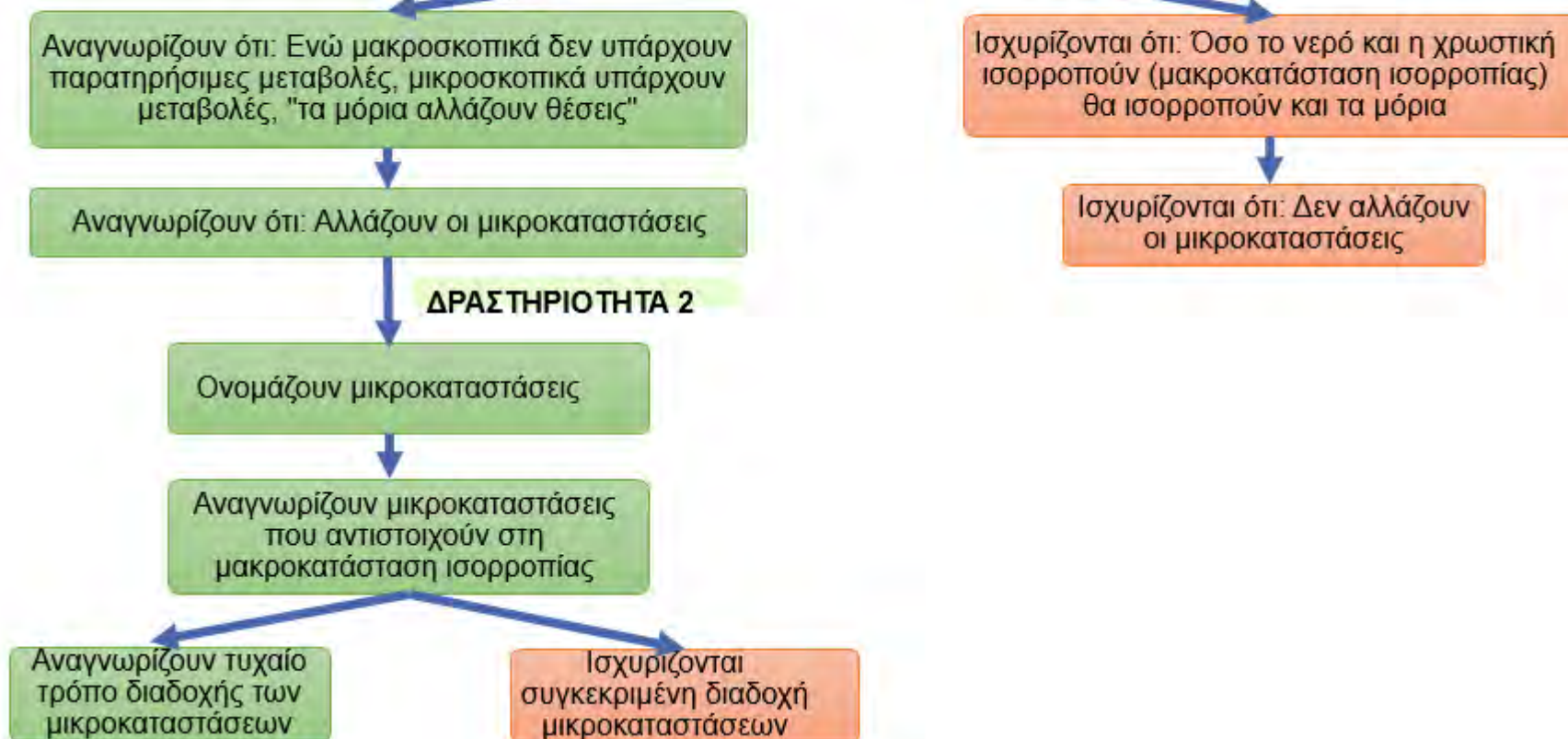
.....

Σ11: Μπορεί να είναι 4 διαφορετικές μικροκαταστάσεις για την ίδια μακροκατάσταση, να αντιστοιχούν στην 4^η μακροκατάσταση.

Ενώ από τη μια αρχίζουν να αμφιβάλουν για το αν μπορούν να τις βάλουν σε χρονική σειρά, από την άλλη όμως προσπαθούν να τις ταξινομήσουν με βάση το πόσα μόρια είναι πιο απομακρυσμένα δηλαδή καταλαμβάνουν εξωτερικές θέσεις. Δεν έχουν αποδεχτεί ότι ο τρόπος διαδοχής των μικροκαταστάσεων είναι τυχαίος.

Είτε μόνες τους είτε κατόπιν παρέμβασης της ερευνήτριας, όλες οι φοιτήτριες αναγνωρίζουν ότι πρόκειται για 4 μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση ισορροπίας. Επιπλέον οι περισσότερες αναγνωρίζουν την τυχαία διαδοχή των μικροκαταστάσεων. Κάποιες όμως, ενώ από τη μια αρχίζουν να αμφιβάλουν για το αν μπορούν να τις τοποθετήσουν σε χρονική σειρά διαδοχής, από την άλλη προσπαθούν να τις ταξινομήσουν με βάση το πόσα μόρια είναι πιο απομακρυσμένα δηλαδή καταλαμβάνουν εξωτερικές θέσεις.

ΜΙΚΡΟΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗ ΜΑΚΡΟΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΙΣΟΡΡΟΠΙΑΣ

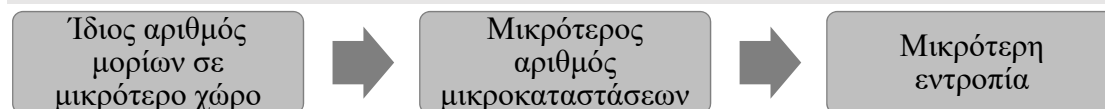


Σχήμα 4: Πορείες μάθησης σχετικές με αλλαγή μικροκαταστάσεων στην μακροκατάσταση ισορροπίας (με κόκκινο χρώμα παρουσιάζονται εναλλακτικές ιδέες των φοιτητριών)

4.10 Εφαρμογή

4.10.1 Σύγκριση της εντροπίας στις δυο καταστάσεις

Σ3-Σ4



Σ4: *Ναι εδώ [δείχνει Β κατάσταση] η εντροπία είναι μεγαλύτερη.*

E: *Γιατί;*

Σ4: *Εδώ [κυκλώνει με το δάχτυλο τα 1000] είναι μαζεμένα τα μόρια, καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο, ενώ εδώ μεγαλύτερο.*

E: *Γιατί στην πρώτη [Α] κατάσταση τα μόρια καταλαμβάνουν λιγότερο χώρο;*

Σ4: *Είναι μικρότερη η μικροκατάσταση.*

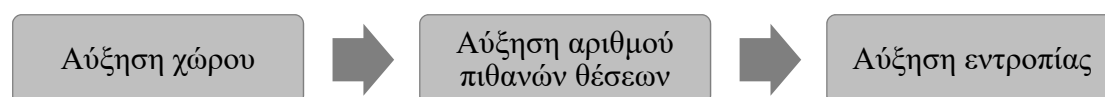
Σ3: *Είναι σα να είμαστε στην 1^η φάση.*

E: *Μικρότερη η μικροκατάσταση;*

Σ4: *Είναι λιγότερες οι μικροκαταστάσεις.*

Σ7-Σ8

Η Σ8 αναπτύσσει το συλλογισμό:



Συνδέει την εντροπία με αύξηση αριθμού μικροκαταστάσεων, κατόπιν παρέμβασης της ερευνήτριας.

Σ8: *Είπαμε ότι η εντροπία αυξάνεται όταν αυξάνονται οι πιθανές θέσεις των μορίων. Στην 1^η περίπτωση*

E: *Πώς ορίσαμε την εντροπία; Ως..*

Σ8: *Το σύνολο*

Σ7: *Κάτι με τη μικροκατάσταση.*

E: *Το πλήθος των μικροκαταστάσεων. Όπου, είχαμε πει, έχουμε περισσότερες πιθανές θέσεις θα έχουμε και περισσότερους δυνατούς συνδυασμούς δηλαδή μικροκαταστάσεις. Το σύνολο των μικροκαταστάσεων είναι η εντροπία. Για να αποφασίσουμε αν έχουμε ίδια ή διαφορετική εντροπία, τι πρέπει να ψάξουμε να βρούμε;*

Σ8: *Το σύνολο των πιθανών, πού θα είναι περισσότερες, άρα στην προκειμένη περίπτωση στη Β γιατί αυξάνεται ο χώρος, δηλ. εδώ αν έχω χ καθορισμένες θέσεις, εδώ θα έχω χ², πολύ περισσότερες. Αυξάνεται η περιοχή*

E: *Εδώ το κάθε μόριο σε ποια περιοχή μπορεί να κινηθεί;*

Σ8: Μέχρι εδώ, στην καθορισμένη.

E: Στη μισή;

Σ8: Στη μισή, ναι.

E: Ενώ εδώ το κάθε μόριο;

Σ8: Σ' ολόκληρο το δοχείο.

E: Ναι, που είναι διπλάσια από αυτή. Επομένως έχω μεγαλύτερο πλήθος μικροκαταστάσεων.

Σ8: Άρα μεγαλύτερη εντροπία.

Σ11-Σ12

Η Σ12 φαίνεται να εμφανίζει την εναλλακτική ιδέα: η αύξηση του αριθμού (ίσως των μικροκαταστάσεων-δε διερευνήθηκε όσο έπρεπε) απαραίτητη προϋπόθεση για να υπάρχει εντροπία και όχι την επιστημονική: η αύξηση του αριθμού των μικροκαταστάσεων οδηγεί σε αύξηση της εντροπίας.

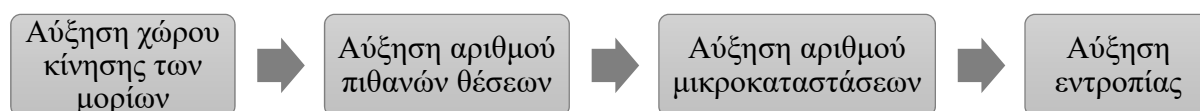
Σ12: Η εντροπία δεν έχει να κάνει και με την εξέλιξη, κατά πόσο αυξάνεται κάτι;

E: Κατά πόσο αυξάνεται ποιο;...για να αυξηθεί η εντροπία τι πρέπει να αυξηθεί;

Σ12: Ο συνδυασμός.

E: Ο συνδυασμός των πιθανών θέσεων, οι μικροκαταστάσεις.

Η Σ11 εφαρμόζει πρότερη γνώση και αναπτύσσει το συλλογισμό:



Σ11: Ναι αλλά εδώ δεν θα υπάρχουν περισσότεροι συνδυασμοί εφόσον καλύπτουν όλο το μέρος.

E: Οι περισσότεροι συνδυασμοί, τι σημαίνει αυτό;

Σ11: Μεγαλύτερη εντροπία.

...

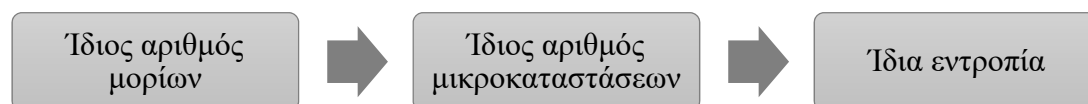
Σ11: Γιατί και εδώ είχαμε μεν τα ίδια μόρια αλλά η εντροπία άλλαξε με τις μικροκαταστάσεις επειδή άλλαζαν οι θέσεις των μορίων.

E: Και επειδή άλλαζαν οι θέσεις;

Σ11: Άρα εδώ επειδή έχουμε μεγαλύτερο αριθμό μικροκαταστάσεων.

Σ19-Σ20

Η Σ19 ακολουθεί το συλλογισμό:

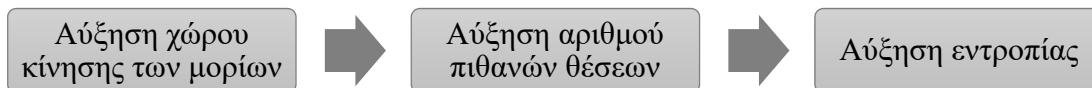


Ε: Ο αριθμός μικροκαταστάσεων προσδιορίζεται από τον αριθμό των μορίων;

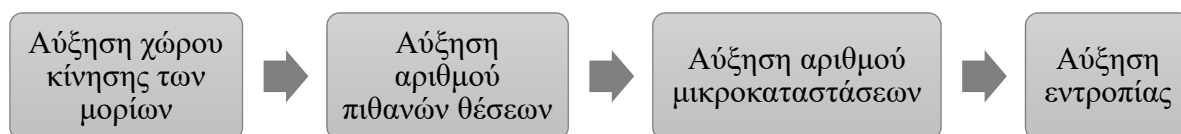
Σ19: Με τις πιθανές θέσεις που μπορεί να πάρει ο αριθμός των μορίων.

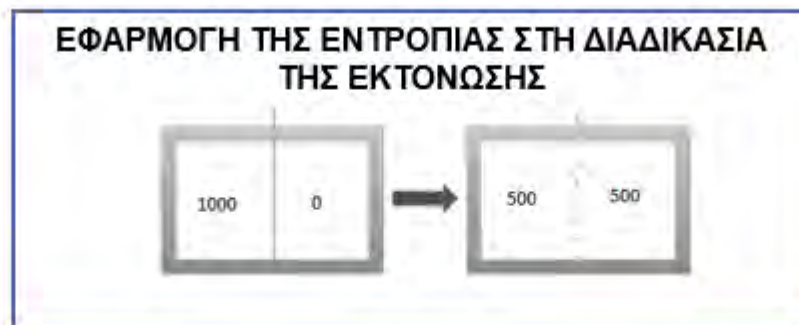
Η Σ19 αναγνωρίζει περισσότερες πιθανές θέσεις στην Β κατάσταση.

Σ19: Γιατί στην 1^η στην δεξιά μεριά δεν μπορεί να πάρει καμία θέση γιατί είναι κενό.



Κάνουν αναφορά σε μικροκαταστάσεις γεφυρώνοντας το άλμα στον προηγούμενο συλλογισμό.





Σχήμα 9: Πορείες μάθησης για την αιτιολόγηση της αύξησης της εντροπίας κατά τη διαδικασία της εκτόνωσης (Οι ολοκληρωμένες πορείες μάθησης παρουσιάζονται με πράσινο χρώμα ενώ οι ελλιπείς με κόκκινο χρώμα)

4.10.2 Επεκτάσεις

- Απαραίτητη προϋπόθεση για να είναι πιθανή η Α κατάσταση είναι η ύπαρξη εμποδίου.

E: Αυτή η κατάσταση θα μπορούσε να συμβεί;

Σ6, Σ5: [Γνέφουν αρνητικά].

E: Δηλ. να είχαμε τα μόρια και να ήταν

Σ5: 1000 και 0

E: Για να μπορούσε να συμβεί τι θα έπρεπε να υπάρχει;

Σ6: Εμπόδιο.

Σ5: Να μην υπάρχει νοητό, να είναι κλειστό εντελώς.

E: Να υπάρχει εμπόδιο. Επομένως πώς από αυτή την κατάσταση περάσαμε σ' αυτή;

Σ5: Διώξαμε το εμπόδιο.

E: Διώξαμε το εμπόδιο, οκ... και κινούνται. Θα μπορούσαμε, χωρίς πλέον να υπάρχει εμπόδιο να ξαναγυρίσουμε σ' αυτή την κατάσταση; Δηλ. μετά από χρόνο πάλι οι μετρητές, πλέον αφού έχουμε διώξει το εμπόδιο να μετρήσουν πάλι αυτό;

Σ5: Νομίζω όχι.

E: Αν θα μπορούσε να συμβεί, η εντροπία τι θα γίνονταν; Πώς θα άλλαζε;

- Αν το σύστημα επανέρχονταν στην αρχική κατάσταση θα μειώνονταν η εντροπία του, γεγονός που δε συμβαίνει, το σύστημα οδηγείται σε κατάσταση μέγιστης εντροπίας.

E: ...δε θα μπορούμε αν δεν υπάρχει εμπόδιο να ξαναγυρίσουμε δηλ. αυτό θα ήταν μια πολύ απίθανη κατάσταση. Αν θα συνέβαινε αυτή η κατάσταση, η εντροπία τι θα γίνονταν σ' αυτή την περίπτωση; Πώς θα άλλαζε; ... Θα ήταν ίδια;

Σ5: Όχι, θα μειώνονταν.

E: Άρα λοιπόν δε γίνεται αυτό να μειώνεται η εντροπία, επομένως πάμε σε καταστάσεις που η εντροπία αυξάνεται και κάπου γίνεται μέγιστη.

Σ5: Και μετά σταθερή.

- Η Σ12 προτείνει ως ενδιάμεση κατάσταση των Α και Β μια κατάσταση με 250 και 250 μόρια. Αυτό γίνεται αφορμή να τεθεί από την ερευνήτρια το ερώτημα:

E: Αν είχαμε λιγότερα μόρια θα άλλαζε ο αριθμός των πιθανών συνδυασμών;

Η Σ11 ισχυρίζεται ότι σ' αυτή την περίπτωση εισάγουμε, εκτός από τον αριθμό των πιθανών θέσεων, μια επιπλέον παράμετρο, τον αριθμό των μορίων και κατά συνέπεια δεν μπορούμε να αποφασίσουμε πώς αλλάζει η εντροπία.

5. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ- ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Στη διδακτική προσέγγιση που επιλέχτηκε, η εντροπία ενός μακροσκοπικού συστήματος μελετάται με τη βοήθεια ενός μικροσκοπικού μοντέλου και της έννοιας του αριθμού των μικροκαταστάσεων (πολλαπλότητα, multiplicity) χωρίς τη χρήση μαθηματικών εργαλείων. Η μετάβαση από το ένα επίπεδο στο άλλο είναι δύσκολη και απαιτεί παραδοχές και προσεγγίσεις για την άρση των δυσκολιών. Στη διδασκαλία που σχεδιάστηκε η μετάβαση από το μακροεπίπεδο (πείραμα και φωτογραφίες) στο μικροεπίπεδο (μόρια) πραγματοποιήθηκε ομαλά μέσω των αναπαραστάσεων των φωτογραφιών. Οι περισσότερες φοιτήτριες θεωρούν ότι το μοντέλο τους βοηθά να εστιάζουν στις μεταβλητές που περιγράφουν τις καταστάσεις του συστήματος, ενώ οι περιορισμοί του μοντέλου δεν αποτελούν εμπόδιο στην ανάδειξη των παραπάνω μεταβλητών, και αναγνωρίζουν ότι το μοντέλο δεν μπορεί να αναπαραστήσει απόλυτα την πραγματικότητα. Κατά τη μετάβαση από τις αναπαραστάσεις στο μικρόκοσμο του συστήματος, η εναλλακτική ιδέα που αναδύθηκε ότι καθώς εξαπλώνεται η χρωστική, αυξάνεται ο αριθμός των μορίων της χρωστικής, εμποδίζει τις φοιτήτριες να αναγνωρίσουν ότι με τα μαύρα κυκλάκια στο μοντέλο απεικονίζονται τα μόρια της χρωστικής. Προτείνεται κατά τη διάρκεια της επίδειξης του πειράματος να συζητιέται ο μηχανισμός της διάχυσης (τί φαντάζονται για τα μόρια της χρωστικής και του νερού όταν η σταγόνα της χρωστικής πέφτει στο νερό του ποτηριού). Αναδεικνύοντας νωρίτερα τις εναλλακτικές ιδέες των φοιτητριών και αποδομώντας τις ώστε να αναγνωρίσουν ότι τα μόρια της χρωστικής κινούνται ανάμεσα στα μόρια του νερού και καταλαμβάνουν τα διάκενα, διευκολύνεται η ομαλή μετάβαση στο μικρόκοσμο.

Ο σχεδιασμός των διαφορετικών πλεγμάτων από τις φοιτήτριες ενισχύει την ιδέα του σταθερού αριθμού των μορίων της χρωστικής και της αύξησης του αριθμού των πιθανών θέσεων των μορίων της χρωστικής. Για να συνειδητοποιήσουν οι φοιτήτριες ότι οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στην ίδια μακροκατάσταση προκύπτουν καθώς τα μόρια της χρωστικής διατάσσονται διαφορετικά κάθε φορά σε συγκεκριμένο αριθμό πιθανών θέσεων προτείνεται ο σχεδιασμός από τις φοιτήτριες μιας οποιασδήποτε μικροκατάστασης δεδομένης της μακροκατάστασης.

Οι έννοιες μακροκατάσταση και μικροκατάσταση αποδεικνύονται έννοιες με ιδιαίτερη βαρύτητα για την εννοιολόγηση της εντροπίας γι' αυτό είναι αναγκαία η μεταξύ τους διάκριση. Οι φοιτήτριες σχετικά εύκολα συνειδητοποιούν την ύπαρξη διαφορετικών «συνδυασμών» καθώς τα μόρια τοποθετούνται σε συγκεκριμένο αριθμό πιθανών θέσεων. Μετά την εννοιολόγηση των εννοιών της μικροκατάστασης και της εντροπίας, αρκετές συγχέουν τον αριθμό των μικροκαταστάσεων με τον αριθμό των πιθανών θέσεων, επειδή ταυτίζουν τις μικροκαταστάσεις με τις πιθανές θέσεις με αποτέλεσμα να απαιτείται να επαναπροσδιοριστεί η έννοια της μικροκατάστασης.

Μέσω του μοντέλου αναδεικνύονται τα χαρακτηριστικά της μακροκατάστασης ισορροπίας, δηλαδή η σταθερότητα των μεταβλητών και η σταθερότητα του αριθμού των μικροκαταστάσεων. Το μοντέλο όμως είναι αδύνατο να προσομοιώσει την αλλαγή των μικροκαταστάσεων σε όλη τη διάρκεια της μακροσκοπικής ισορροπίας, εφόσον αυτές αλλάζουν με ασύλληπτα μεγάλο ρυθμό, με αποτέλεσμα να εμφανίζεται δυσκολία στην αποδοχή αυτής της αλλαγής από τις φοιτήτριες. Ένας ακόμη περιορισμός του μοντέλου είναι ότι οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις προκύπτουν ως διαφορετικοί τρόποι διεύθετησης των μορίων στις πιθανές θέσεις και όχι ως διαφορετικοί τρόποι διεύθετησης των ενεργειών των μορίων σε ενεργειακά επίπεδα (Haglund J. & Jeppsson F., 2012).

Σε αντίθεση με δεδομένα άλλων ερευνών, οι φοιτήτριες σχεδόν στο σύνολο τους- οι ελάχιστες εξαιρέσεις παρουσιάζονται στον πίνακα 6- δεν είχαν ιδέες αναφορικά με την έννοια της εντροπίας. Έτσι κατά τη διάρκεια του διδακτικού πειράματος δε χρειάστηκε να αποδομηθούν εναλλακτικές ιδέες και ούτε σχεδιάστηκε το διδακτικό πείραμα έτσι ώστε να εξυπηρετήσει τέτοιο σκοπό. Ως εκ τούτου ο στατιστικός ορισμός της έννοιας δόθηκε από την ερευνήτρια. Οι πορείες μάθησης που διέγραψαν οι φοιτήτριες για την αιτιολόγηση της αύξησης της εντροπίας και η σταθεροποίησή της σε μια μέγιστη τιμή στη μακροκατάσταση ισορροπίας δείχνουν και πάλι ότι η εννοιολόγηση της εντροπίας προϋποθέτει μια στέρεη γνώση της έννοιας της μικροκατάστασης.

Από τις δυο δραστηριότητες προκύπτει ότι οι φοιτήτριες αναγνωρίζουν και ονομάζουν τις μακροκαταστάσεις και τις μεταβλητές που τις περιγράφουν, τη μακροκατάσταση ισορροπίας καθώς και τις μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν σε διαφορετικές μακροκαταστάσεις. Προτείνεται να δίνεται έμφαση στο ότι η εντροπία ορίζεται για μακροκατάσταση. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί ζητώντας από τις

φοιτήτριες να αποφασίσουν αν μεταβάλλεται η εντροπία μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν στην ίδια μακροκατάσταση. Έτσι θα διευκρινιστεί ότι δεν υπάρχει εντροπία μικροκατάστασης και ότι όλες οι μικροκαταστάσεις αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη μακροκατάσταση που χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένη τιμή εντροπίας.

Στην εφαρμογή οι περισσότερες φοιτήτριες παραλληλίζουν τη διαδικασία της εκτόνωσης συγκεκριμένου αριθμού μορίων με το φαινόμενο της διάχυσης, με αποτέλεσμα να κάνουν συλλογισμούς, αρκετές φορές ολοκληρωμένους, σχετικά με τη μεταβολή της εντροπίας. Από την ανάλυση των δεδομένων φαίνεται ότι η εκτίμηση και αιτιολόγηση από τις φοιτήτριες της μεταβολής της εντροπίας σε διαφορετικά πλαίσια βοηθάει ώστε να κατανοηθεί βαθύτερα η έννοια. Προτείνεται λοιπόν η επέκταση σε εφαρμογές όπου παρατηρείται μείωση της εντροπίας μερών ενός συστήματος αλλά όχι βέβαια του συστήματος συνολικά.

Ο σχεδιασμός ενός μοντέλου στο οποίο οι διαφορετικές μικροκαταστάσεις προκύπτουν ως διαφορετικοί τρόποι διεύθετης των ενεργειών των μορίων σε ενεργειακά επίπεδα και η εφαρμογή του σε διαφορετικά φυσικά φαινόμενα, θα μπορούσε να αποτελέσει συνέχεια της παραπάνω έρευνας. Στο προτεινόμενο μοντέλο στην αύξηση της εντροπίας θα συνεισφέρει εκτός από την αύξηση του αριθμού των πιθανών θέσεων των μορίων και η αύξηση του αριθμού των πιθανών διευθετήσεων των μοριακών ενεργειών (μορίων) στα επίπεδα ενέργειας τους (Lambert, 2002).

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ξενόγλωσση

- Atkins, P. (2010). *The laws of thermodynamics: A very short introduction*, 103 pages, Oxford University Press, New York.
- Amin T. G., Jeppsson F, Haglund J., Stromdahl H. (2012). “Arrow of Time: Metaphorical Construals of Entropy and the Second Law of Thermodynamics”, *Science Education*, 96,818-848.
- Ben-Naim, A. (2008). *Statistical Thermodynamics Based on Information. A Farewell to Entropy*, 384 pages, World Scientific Publishing, Singapore.
- Bowley, R., & Sanchez, M. (1999). *Introductory statistical mechanics* (2nd ed.). Oxford, England: Clarendon Press.
- Brissaud J.B. (2005). “The meanings of entropy” *Entropy* 68-96.
- Christensen W. M., Meltzer D. E. & Ogilvie C. A. (2009). “Student ideas regarding entropy and the second law of thermodynamics in an introductory Physics course”, *American Journal of Physics*, 77(10), 907-917.
- Creswell J. W. (2012). *Educational Research. Planning, Conducting, and Evaluating Quantitative and Qualitative Research*. 4th edition, Pearson Education.
- Gilbert, J., Boulter, C. J., & Elmer, R., (2000). Positioning models in science education and in design and technology education. *In J. Gilbert & C. J. Boulter (Eds.), Developing models in science education (pp. 3-17). Dordrecht: the Netherlands: Kluwer.*
- Geller B. D., Dreyfus B. W., Gouvea J, Sawtelle V, Turpen C, and Redish E. F. (2014). “Entropy and spontaneity in an introductory physics course for life science students” *American Journal of Physics*, 82(5), 394.
- Haglund J., Jeppsson F. & Stromdahl H. (2010). “Different senses of entropy”, *Implications for education Entropy*, 12(3), 490 – 515.
- Haglund J. & Jeppsson F. (2012). “Using self-generated analogies in teaching of thermodynamics”, *Journal of Research in Science Teaching*, 49(7), 898-921.

- Haglund J. & Jeppsson F. (2013). “Confronting Conceptual Challenges in Thermodynamics by Use of Self-Generated Analogies”, *Science & Education*, 1505-1529.
- Jeppsson F., Haglund J., & Stromdahl H. (2011). “Exploiting language in teaching of entropy”, *Journal of Baltic Science Education*, 10(1), 27-35.
- Lambert F. (2002). “Disorder-A Cracked Crutch for Supporting Entropy Discussions”, *Journal of Chemical Education*, 79(2), 187-192.
- Lambert F. (2002). “Entropy Is Simple, Qualitatively”, *Journal of Chemical Education*, 79(10), 1241-1246.
- 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.
- Leinonen R., Asikainen M. & Hirvonen P. (2015). “Grasping the second law of thermodynamics at university: The consistency of macroscopic and microscopic explanations” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 11, 020122, 11-12.
- Loverude M. (2015). “Identifying student resources in reasoning about entropy and the approach to thermal equilibrium” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 11, 020118.
- 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.
- Molina M., Castro E. & Castro E. (2007). “Teaching Experiments within Design Research” *The International Journal of Interdisciplinary Social Sciences*, 2(4), 435-440.
- 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.
- Smith T. I., Christensen W. M., Mountcastle D. B. & Thompson J. R. (2015). “Identifying student difficulties with entropy, heat engines, and the Carnot cycle” *Phys. Rev. ST Phys. Educ. Res.* 11, 020116, 12.

- Steffe, L. (1991). “The Constructivist Teaching Experiment: Illustrations and Implications”. In E. von Glasersfeld (Ed.), *Radical Constructivism in Mathematics Education* (pp. 177-195) Dordrecht: Kluwer Academic Press.
- Theodoratos N. (2012). Entropy Uncertainty in Hydrology and Nature, Post-Graduate Thesis for the programme Water Resources Science and Technology, National Technical University of Athens.

Ελληνική

- Driver R., Squires A., Rushworth P. & Wood-Robinson V. (2000). *Οικοδομώντας τις έννοιες των φυσικών επιστημών – Μια παγκόσμια σύνοψη των Ιδεών των Μαθητών* (μετάφραση: Μ. Χατζή, επιμέλεια: Π. Κόκκοτας). Εκδόσεις Τυπωθήτω.
- Σαραφίδου, Γ. (2011). *Συνάρθρωση ποσοτικών και ποιοτικών προσεγγίσεων*. Εκδόσεις Gutenberg.
- Χαλκιά Κ. (2012). *Διδάσκοντας φυσικές επιστήμες: Θεωρητικά ζητήματα, προβληματισμοί, προτάσεις (α τόμος)*. Αθήνα, Εκδόσεις Πατάκη.
- Χρονάκη, Α. (2010). *Το Διδακτικό Πείραμα: Η ποιοτική μελέτη της μαθησιακής διαδικασίας στο πλαίσιο της διδακτικής πράξης*. Στο Μ. Πουρκός και Μ. Δαφέρμος (επιμ.) Ποιοτική Έρευνα στην Ψυχολογία και στην Εκπαίδευση: Επιστημολογικά, μεθοδολογικά και ηθικά ζητήματα. Αθήνα. Τόπος, σελ. 605-628.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α: ΕΡΩΤΗΜΑΤΟΛΟΓΙΟ

Όνοματεπώνυμο:

Κατεύθυνση:

Φανταστείτε ότι βγάξετε ένα παγάκι από την κατάψυξη και το βάζετε μέσα σε ένα άδειο γυάλινο ποτήρι πάνω στο τραπέζι.

Προσπαθήστε να περιγράψετε τις παρακάτω έννοιες γι αυτή την φανταστική κατάσταση (αν σημαίνουν κάτι για σας).

Σύστημα

Μακροκατάσταση

Μικροκατάσταση

Θερμική ισορροπία

Αντιστρεπτή μεταβολή

Μη αντιστρεπτή μεταβολή

Εντροπία

Συσχετίζετε κάποιες από τις έννοιες της προηγούμενης σελίδας με άλλα φαινόμενα του φυσικού κόσμου; Αν ναι, μπορείτε να περιγράψετε τι περίπου σκέφτεστε.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β: ΔΙΔΑΚΤΙΚΟ ΣΕΝΑΡΙΟ

B.1 Πρόβλεψη και εκτέλεση του πειράματος

Διδακτικοί στόχοι:

1. Να αναγνωρίσουν τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν τις διαδοχικές καταστάσεις του συστήματος νερό-χρωστική και να προσδιορίσουν πιθανές μεταβλητές που τις περιγράφουν.
2. Να χαρακτηρίσουν ως σύστημα στις φυσικές επιστήμες το σύνολο των αντικειμένων που μελετάμε και τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση και να το διακρίνουν από το περιβάλλον.

Έχουμε στη διάθεσή μας ένα ποτήρι με νερό και ένα μπουκαλάκι με μια χρωστική ουσία. Καλούμε τους φοιτητές να προβλέψουν τι θα συμβεί αν ρίξουμε μια σταγόνα χρωστικής στο νερό του ποτηριού καθώς και να περιγράψουν τι φαντάζονται για την τελική κατάσταση. Πραγματοποιούμε το πείραμα και τους καλούμε να παρατηρήσουν και να περιγράψουν αναλυτικά την εξέλιξη του φαινομένου. Προβληματίζουμε τους φοιτητές θέτοντας ερωτήματα όπως:

«Ποια είναι τα χαρακτηριστικά που μας επιτρέπουν να αποφασίσουμε ότι τα στάδια από τα οποία περνά το νερό με τη χρωστική είναι διαφορετικά;»

«Εξακολουθεί η χρωστική να παραμένει συγκεντρωμένη στο αρχικό σημείο ή απλώνεται;»

«Πώς αλλάζει το χρώμα της χρωστικής καθώς αυτή διαχέεται στο νερό;»

Αναμένουμε να απαντήσουν ότι αρχικά η χρωστική είναι συγκεντρωμένη σε ένα μόνο σημείο και σταδιακά απλώνεται στο νερό καταλαμβάνοντας όλο και μεγαλύτερο χώρο. Ταυτόχρονα το χρώμα της χρωστικής γίνεται όλο και πιο ανοιχτό. Τους καλούμε να αναζητήσουν μεταβλητές που να περιγράφουν τις καταστάσεις από τις οποίες περνάει το νερό και η χρωστική. Ορίζουμε ως τέτοιες τον όγκο που καταλαμβάνει το χρωματισμένο νερό και την πυκνότητα ή την ένταση του χρώματος.

Συνεχίζοντας εισάγουμε την έννοια σύστημα και τους ζητάμε να τη συνδέσουν με το πείραμα που επιδείξαμε. Σκοπός μας είναι αφενός να αναδειχτούν όλες οι

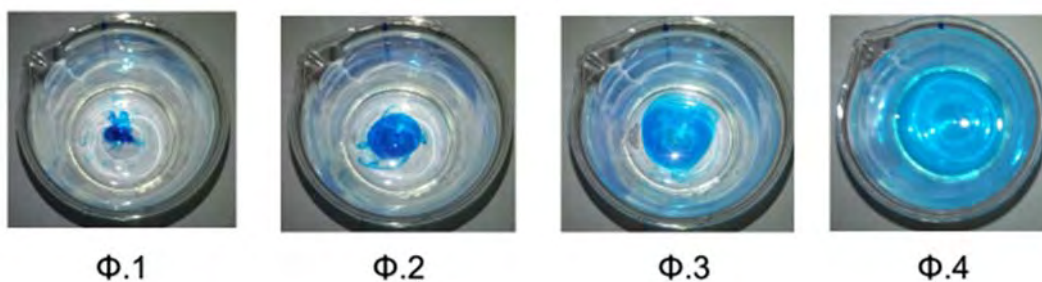
εναλλακτικές ιδέες των φοιτητών αναφορικά με την έννοια, αφετέρου να αποδεχθούν αυτό που ορίζουμε ως σύστημα στις φυσικές επιστήμες, δηλαδή το σύνολο των αντικειμένων που μελετάμε και τη μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Ακόμη προβληματίζουμε τους φοιτητές για το αν θα πρέπει να συμπεριλάβουμε και το ποτήρι στο σύστημα και για το ποιος είναι ο ρόλος του ποτηριού. Καταλήγουμε σε συμφωνία ότι **το σύστημα που μελετάμε είναι η χρωστική και το νερό, τα οποία βρίσκονται σε συνεχή αλληλεπίδραση. Το ποτήρι δεν αποτελεί συστατικό του συστήματος αλλά οριοθετεί το σύστημα διαχωρίζοντάς το από το περιβάλλον.** Επιπλέον για να περιγράψουμε τις καταστάσεις από τις οποίες περνάει το σύστημα είναι απαραίτητος ο ορισμός μεταβλητών, συγκεκριμένα ο όγκος του χρωματισμένου νερού και η πυκνότητα ή η ένταση του χρώματος.

B.2 Προβολή φωτογραφιών

Διδακτικοί στόχοι:

- 3. Να προσδιορίσουν πιθανές μεταβλητές για να διακρίνουν τα στιγμιότυπα που απεικονίζονται στις φωτογραφίες και να προτείνουν τρόπους ώστε να γίνουν οι μεταβλητές μετρήσιμες.**
- 4. Να εντοπίσουν τα χαρακτηριστικά που διαφοροποιούν την τελική κατάσταση από τις προηγούμενες και να τη χαρακτηρίσουν κατάσταση ισορροπίας.**

Εκκινούμε το PowerPoint και προβάλλουμε την 1^η διαφάνεια. Οι φωτογραφίες 1, 2, 3 και 4 απεικονίζουν τέσσερα διαφορετικά στιγμιότυπα της διάχυσης της χρωστικής μέσα στο νερό, τα οποία έχουν ληφθεί σε τέσσερις διαφορετικές χρονικές στιγμές. Για απλοποίηση του φαινομένου μελετάμε την κίνηση της χρωστικής στην επιφάνεια του νερού και όχι σε όλο τον όγκο του νερού.



Σχήμα B5: Στιγμιότυπα της διάχυσης της χρωστικής στο νερό

Καλούμε τους φοιτητές να περιγράψουν τις καταστάσεις του συστήματος που απεικονίζουν οι φωτογραφίες και να εντοπίσουν και εδώ μεταβλητές για να διακρίνουν τις καταστάσεις μεταξύ τους. Η μια μεταβλητή παραμένει ίδια με πριν, είναι η πυκνότητα του χρώματος. Για να εντοπίσουν τη δεύτερη μεταβλητή, τους προτρέπουμε να παρατηρήσουν ότι ενώ στο ποτήρι η χρωστική εξαπλώνεται στο χώρο, στις φωτογραφίες βλέπουμε την εξάπλωση της στην επιφάνεια και επομένως εισάγουμε ως μεταβλητή το εμβαδό. Εμβαθύνουμε απευθύνοντας ερωτήματα όπως:

«Με ποιο τρόπο θα μπορούσε να γίνει η μεταβλητή εμβαδό χρωστικής μετρήσιμη; Θα μπορούσαμε να προσεγγίσουμε το εμβαδό της χρωστικής με εμβαδό κύκλου και επομένως να μετρήσουμε τη διάμετρο του κύκλου;»

«Δίνοντάς σας την τιμή της διαμέτρου του κύκλου της χρωστικής θα μπορούσατε να προσδιορίσετε ποια κατάσταση περιγράφει αυτή;»

Έμφαση δίνουμε στην περιγραφή των χαρακτηριστικών της κατάστασης του συστήματος όπως φαίνεται στη 4^η φωτογραφία. Συγκεκριμένα ζητάμε να εντοπίσουν:

«Τι είναι αυτό που διαφοροποιεί την τελευταία κατάσταση από τις προηγούμενες;»

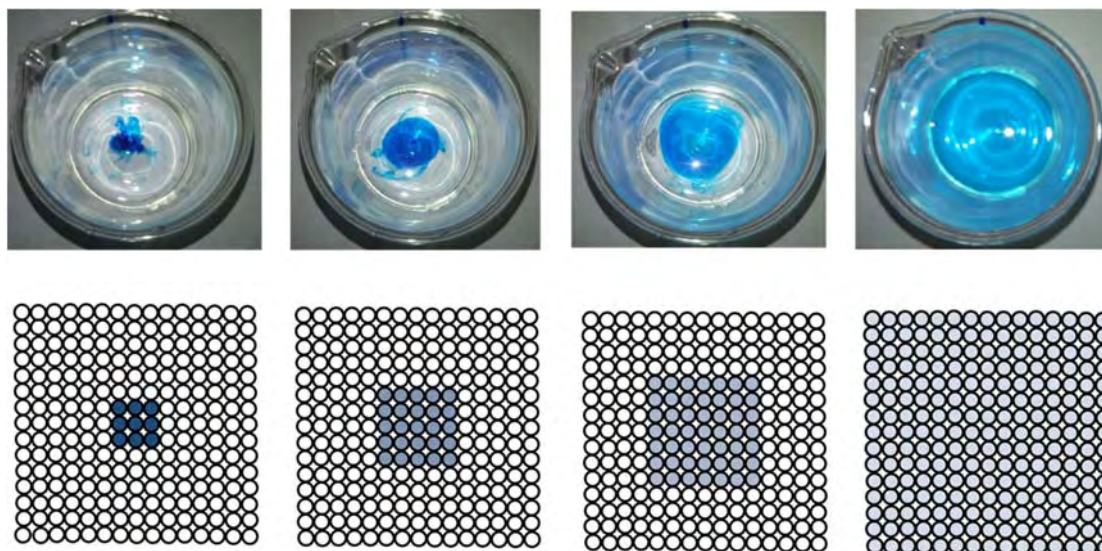
Τους καλούμε να αποφασίσουν αν αυτή αντιστοιχεί στην τελική κατάσταση ή όχι και να τεκμηριώσουν την απόφασή τους. Αναμένουμε από τους φοιτητές να αναγνωρίσουν ότι **το σύστημα δε θα εμφανίζει μακροσκοπικά παρατηρήσιμες μεταβολές. Η τελευταία κατάσταση του συστήματος παραμένει σταθερή, ανεξάρτητη από το χρόνο και τη χαρακτηρίζουμε κατάσταση ισορροπίας.**

B.3 Μοντέλο-Είσοδος στο μικρόκοσμο

Διδακτικοί στόχοι:

- 5. Να αναγνωρίσουν στις αναπαραστάσεις των φωτογραφιών, τις μεταβλητές που αναδείχτηκαν στις φωτογραφίες.**
- 6. Να αντιπαραβάλουν τις φωτογραφίες με τις αναπαραστάσεις ώστε να αναδειχτούν οι περιορισμοί του μοντέλου.**
- 7. Να αναγνωρίσουν ότι υπάρχουν πολλοί πιθανοί τρόποι διευθέτησης των μορίων στις πιθανές θέσεις και να τους αναπαριστούν.**

8. Να οδηγηθούν στη διαπίστωση ότι ο αριθμός των τρόπων διευθέτησης των μορίων αυξάνεται και μεγιστοποιείται στην κατάσταση ισορροπίας, ως αποτέλεσμα της αύξησης του αριθμού των πιθανών θέσεων.
9. Να αποδεχθούν ότι στις αναπαραστάσεις των φωτογραφιών τα χρωματισμένα τετράγωνα αφενός αναπαριστούν τη χρωστική και αφετέρου δείχνουν τον αριθμό των πιθανών θέσεων.



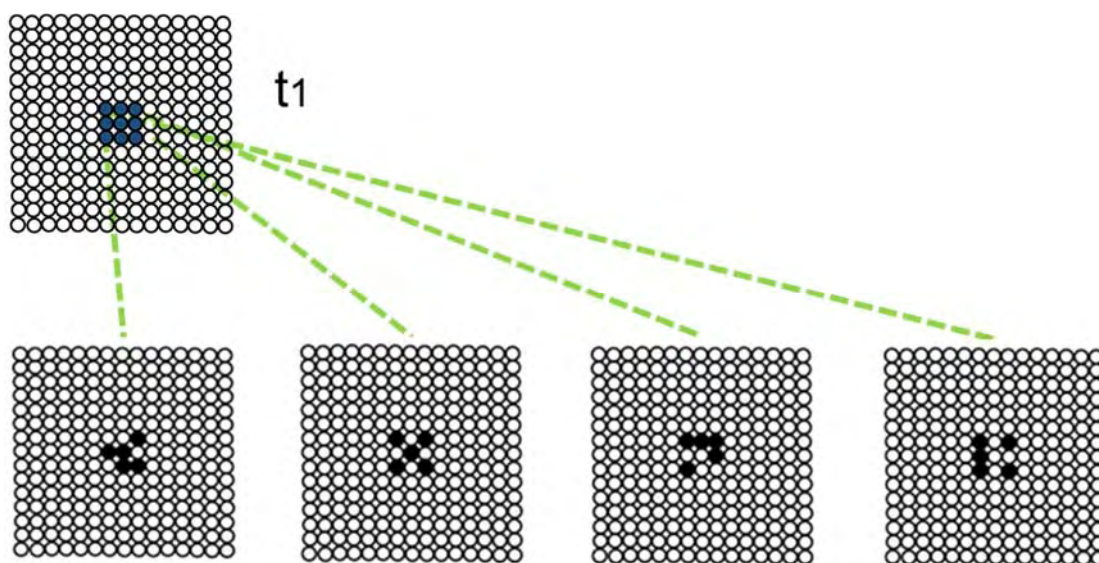
Σχήμα Β6: Φωτογραφίες και αναπαραστάσεις των φωτογραφιών

Προβάλουμε τη 2^η διαφάνεια στη οποία παρουσιάζουμε εκτός από τις προηγούμενες φωτογραφίες, τέσσερις αναπαραστάσεις των φωτογραφιών. **Οι αναπαραστάσεις των φωτογραφιών αποτελούν γέφυρα ανάμεσα στη μακροσκοπική παρατήρηση της διάχυσης της χρωστικής και στην παρατήρηση του μικρόκοσμου, δηλαδή των μορίων της χρωστικής και του νερού. Τα τέσσερα πλέγματα αφενός αναπαριστούν την εξάπλωση της χρωστικής στην επιφάνεια του νερού και αφετέρου δείχνουν τις πιθανές θέσεις των μορίων της χρωστικής.** Προτρέπουμε τους φοιτητές να αναζητήσουν κοινά σημεία ανάμεσα στις τέσσερις φωτογραφίες και τις αναπαραστάσεις τους και να εντοπίσουν τα σημεία στα οποία οι αναπαραστάσεις δεν ταιριάζουν με τις φωτογραφίες. Στόχος μας είναι να αναδειχτούν και στις αναπαραστάσεις οι μεταβλητές πυκνότητα χρώματος και εμβαδό της χρωματισμένης επιφάνειας, με τη διαφορά ότι στις αναπαραστάσεις η χρωματισμένη επιφάνεια προσεγγίζεται με τετράγωνο. **Η αποδοχή του μοντέλου, παρά τις διαφορές μοντέλου-πραγματικότητας, είναι προϋπόθεση για να εισέρθουμε στο**

μικρόκοσμο, τον οποίο είναι αδύνατο να τον δούμε, μπορούμε μόνο να τον αναπαραστήσουμε.

Επισημαίνοντας ότι το μοντέλο μας δίνει τη δυνατότητα να απεικονίσουμε τα μόρια, και ότι είναι αδύνατη η παρατήρησή τους με μικροσκόπιο επιδιώκουμε να προϊδεάσουμε τους φοιτητές ότι το πλέγμα που βλέπουν απεικονίζει μόρια χρωστικής και μόρια νερού.

Κάνουμε κλικ στην 1^η εικόνα-αναπαράσταση της 1^{ης} φωτογραφίας (διαφάνεια 3) και εμφανίζονται τα διαφορετικά πλέγματα του σχήματος (διαφάνειες 5, 6, 7, 8 και 9).



Σχήμα Β7: Διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση 1

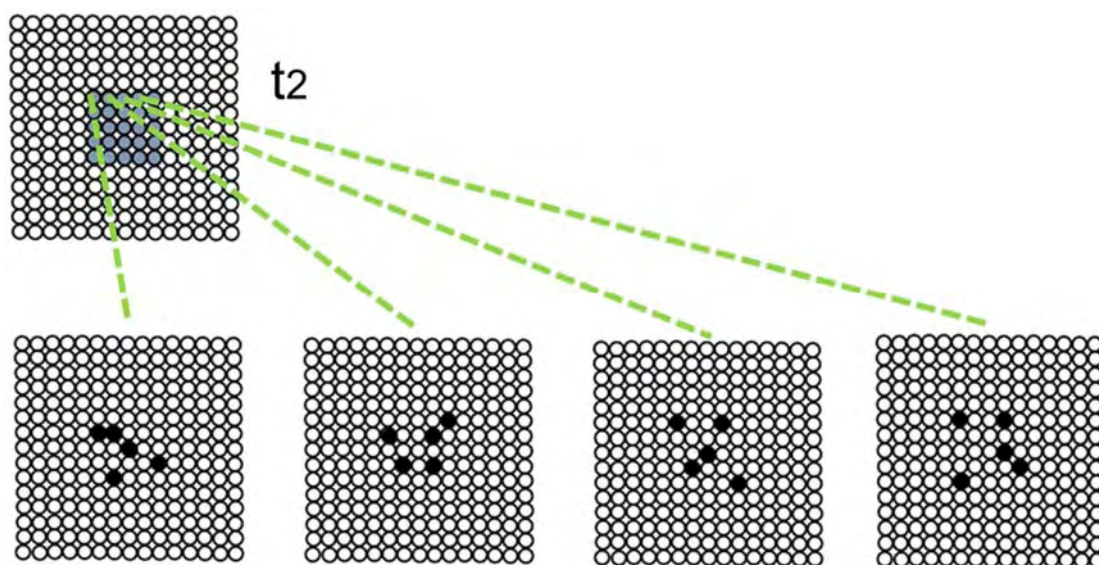
Καλούμε τους φοιτητές να αναρωτηθούν τι απεικονίζουν στα πλέγματα τα λευκά και μαύρα κυκλάκια. Αυτό που αναμένουμε ως απάντηση είναι ότι τα 5 μαύρα κυκλάκια είναι μόρια χρωστικής και τα υπόλοιπα 220 είναι μόρια νερού. Συζητάμε μαζί τους για τις παραδοχές που κάναμε για το σύστημα, στο μοντέλο που κατασκευάσαμε. Επιπλέον τους προτρέπουμε να συγκρίνουν τα πλέγματα και να εξάγουν συμπεράσματα για τις αλλαγές που παρατηρούν από πλέγμα σε πλέγμα. Δίνουμε στους φοιτητές διαφάνειες με πλέγματα και ζητάμε να σχεδιάσουν οι ίδιοι σ' αυτά, τα πέντε μόρια της χρωστικής στις συγκεκριμένες θέσεις. Τους προτρέπουμε να κάνουν υποθέσεις για τις πιθανές θέσεις των 5 μορίων χρησιμοποιώντας τις διαφάνειες που σχεδίασαν. Αυτό που θέλουμε να πετύχουμε είναι να τοποθετήσουν τις τέσσερις διαφάνειες τη μια πάνω στην άλλη για να σχηματιστεί το τετράγωνο 3x3 της

αναπαράστασης της 1^{ης} φωτογραφίας. Αναμένουμε να αναγνωρίσουν ότι τα 9 χρωματισμένα κυκλάκια είναι οι πιθανές θέσεις των μορίων της χρωστικής που αντιστοιχούν στην 1η φωτογραφία. Καταλήγουμε σε συμφωνία ότι το κάθε πλέγμα απεικονίζει ένα τρόπο διεύθετησης των 5 μορίων στις 9 πιθανές θέσεις.

Καλούμε τους φοιτητές να προβλέψουν τι συμβαίνει στο μικρόκοσμο του συστήματος καθώς η χρωστική αρχίζει να απλώνεται και το σύστημα περνάει στην κατάσταση που περιγράφει η 2^η φωτογραφία. Μια ενδεικτική ερώτηση που τους απευθύνουμε είναι:

«Τι παρατηρείτε; Τα μόρια της χρωστικής έχουν πρόσβαση στην ίδια ή σε μεγαλύτερη περιοχή του πλέγματος;»

Επανερχόμαστε πάλι στη διαφάνεια 3 αλλά αυτή τη φορά κάνουμε κλικ στην εικόνα 2- αναπαράσταση της 2^{ης} φωτογραφίας. Εισερχόμαστε εκ νέου στο μικρόκοσμο και εμφανίζονται τα διαφορετικά πλέγματα του σχήματος (διαφάνειες 10, 11, 12, 13 και 14).



Σχήμα Β8: Διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση 2

Οι φοιτητές σχεδιάζουν σε πλέγματα τους νέους τρόπους διεύθετησης των μορίων. Επικαλύπτουν ξανά τις νέες διαφάνειες που σχεδίασαν.

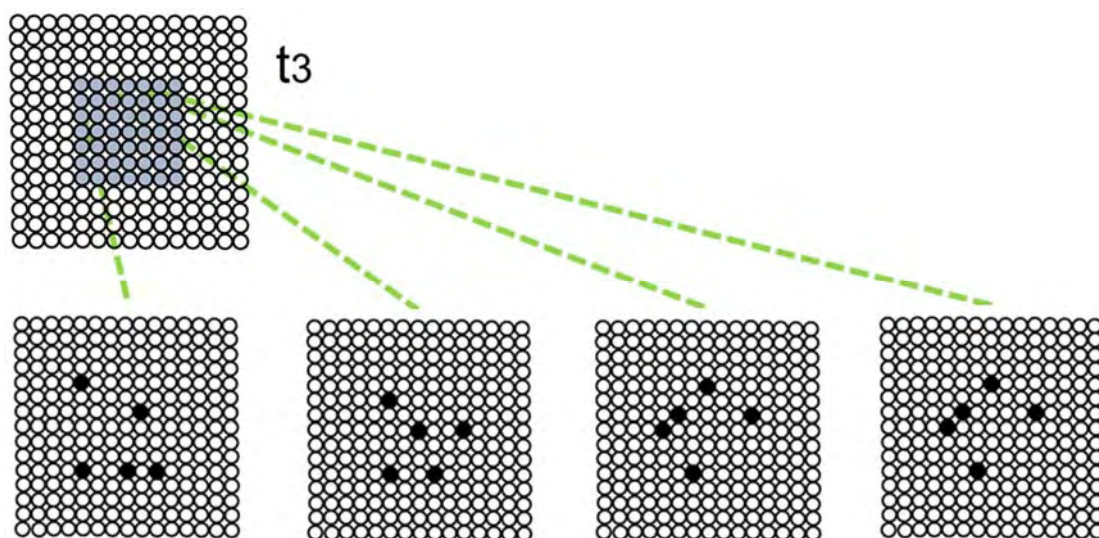
«Πόσες και ποιες είναι τώρα οι δυνατές θέσεις των μορίων της χρωστικής;»

Συζητάμε και καταλήγουμε στο ότι τα μόρια της χρωστικής καταλαμβάνουν τις 5 από τις 25 θέσεις σε ένα τετράγωνο 5x5.

«Αλλάζει ο αριθμός των πιθανών τρόπων διευθέτησης των 5 μορίων χρωστικής σε σχέση με τον αριθμό που αντιστοιχεί στην κατάσταση που περιγράφει η 1^η φωτογραφία;»

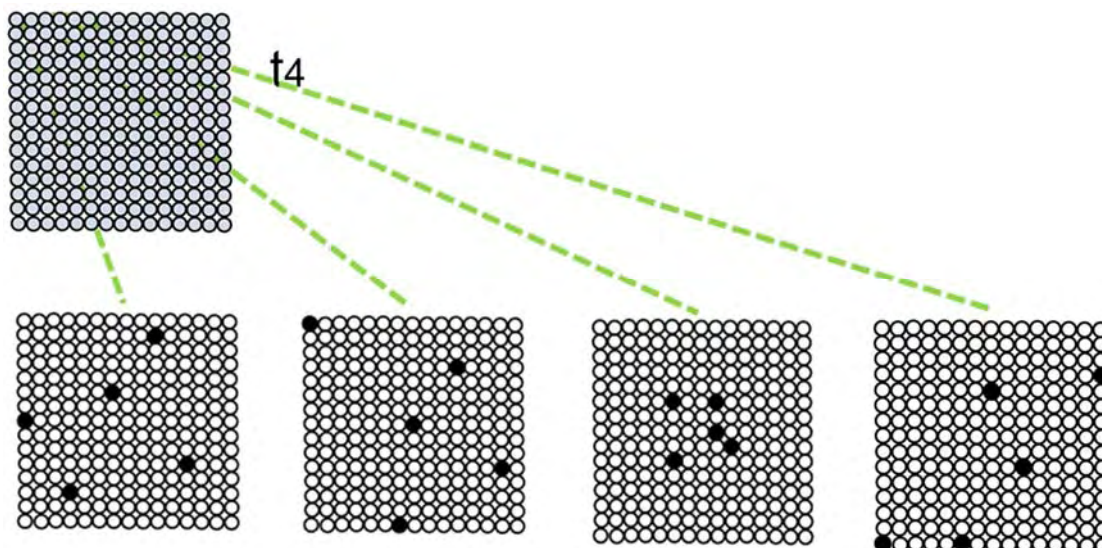
Οδηγούνται στο συμπέρασμα ότι οι πιθανές θέσεις αυξάνονται από 9 σε 25 με αποτέλεσμα να αυξάνεται ο αριθμός των τρόπων διευθέτησης των 5 μορίων.

Επανερχόμαστε στη διαφάνεια 3 και τους προτρέπουμε να εφαρμόσουν τα συμπεράσματά τους σχετικά με το τι αναπαριστά το χρωματισμένο τετράγωνο της εικόνας 3. Αναμένουμε να μας απαντήσουν ότι αυτό αναπαριστά τη χρωστική όπως φαίνεται να έχει απλωθεί στην 3^η φωτογραφία και ταυτόχρονα ότι ορίζεται από 49 πιθανές θέσεις. Συζητάμε για τη νέα αύξηση του αριθμού των τρόπων διευθέτησης των 5 μορίων της χρωστικής στις 49 πιθανές θέσεις και προβάλλουμε κάποιους από αυτούς (διαφάνειες 15, 16, 17) κάνοντας κλικ στην εικόνα 3 της 3^{ης} διαφάνειας.



Σχήμα B9: Διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση 3

Καταλήγοντας στην αναπαράσταση της 4^{ης} φωτογραφίας οι φοιτητές αναγνωρίζουν ότι όλες οι θέσεις του πλέγματος είναι πιθανές και ότι ο αριθμός των τρόπων διευθέτησης των 5 μορίων στις 225 θέσεις είναι ο μέγιστος. Κάνοντας κλικ στην 4^η εικόνα προβάλλουμε πάλι μερικούς από αυτούς (διαφάνειες 18, 19, 20)



Σχήμα Β10: Διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση 4

B.4 Εισαγωγή των εννοιών μακροκατάσταση-μικροκατάσταση

Διδακτικοί στόχοι:

10. Να αναγνωρίζουν ως μακροκαταστάσεις του συστήματος τις καταστάσεις που παρατηρούνται μακροσκοπικά και που ορίζονται από συγκεκριμένες μακροσκοπικές μεταβλητές.
11. Να αναγνωρίσουν και να αναπαραστήσουν τις μικροκαταστάσεις ως τους τρόπους διευθέτησης των μορίων στις πιθανές θέσεις και να κατανοήσουν ότι κάθε μακροκατάσταση μπορεί να προκύπτει από τεράστιο πλήθος μικροκαταστάσεων.
12. Να αντιληφθούν ότι ενώ η μακροκατάσταση στην οποία βρίσκεται ένα σύστημα παραμένει σταθερή, οι μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν σε αυτή συνεχώς μεταβάλλονται.

Αναφέρουμε στους φοιτητές τους όρους μικροκατάσταση και μακροκατάσταση και τους καλούμε να παρουσιάσουν τις σκέψεις τους για αυτούς. Για να τους βοηθήσουμε να τους συνδέσουν με ότι προηγήθηκε απευθύνουμε ερωτήσεις όπως:

«Έχοντας παρατηρήσει τις καταστάσεις από τις οποίες περνάει το σύστημα, είτε κατά την επίδειξη, είτε στις φωτογραφίες και έχοντας σχεδιάσει τους τρόπους διευθέτησης

των 5 μορίων στα πλέγματα, σας ταιριάζει να χαρακτηρίσετε κάτι από αυτά ως μικροκατάσταση και μακροκατάσταση;»

Μέσα από συζήτηση αναμένουμε να συμπεράνουν ότι η φωτογραφία 1 απεικονίζει μια μακροκατάσταση, ενώ τα πλέγματα που σχεδίασαν περιγράφουν μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη συγκεκριμένη μακροκατάσταση. Γενικεύουμε και ονομάζουμε **μακροκαταστάσεις, τις καταστάσεις του συστήματος που παρατηρούμε μακροσκοπικά και που ορίζονται από συγκεκριμένες μακροσκοπικές μεταβλητές. Επίσης σε κάθε μακροκατάσταση αντιστοιχεί ένας αριθμός μικροκαταστάσεων. Ο αριθμός αυτός υποδεικνύει όλους τους δυνατούς τρόπους σύμφωνα με τους οποίους μπορούν να διευθετηθούν τα 5 μόρια σε συγκεκριμένο αριθμό πιθανών θέσεων.**

Έχοντας πλέον ορίσει τις δυο έννοιες, καλούμε τους φοιτητές να αποφασίσουν για το πώς αλλάζει ο αριθμός των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν σε κάθε μακροκατάσταση κατά την εξέλιξη της διάχυσης και να επιχειρηματολογήσουν πάνω σ' αυτό. Έμφαση δίνουμε στην τελική μακροκατάσταση, τη μακροκατάσταση ισορροπίας για την οποία θέτουμε ερωτήματα όπως:

«Τι αλλάζει σε σχέση με το πλήθος των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση ισορροπίας; Γιατί συμβαίνει αυτό;»

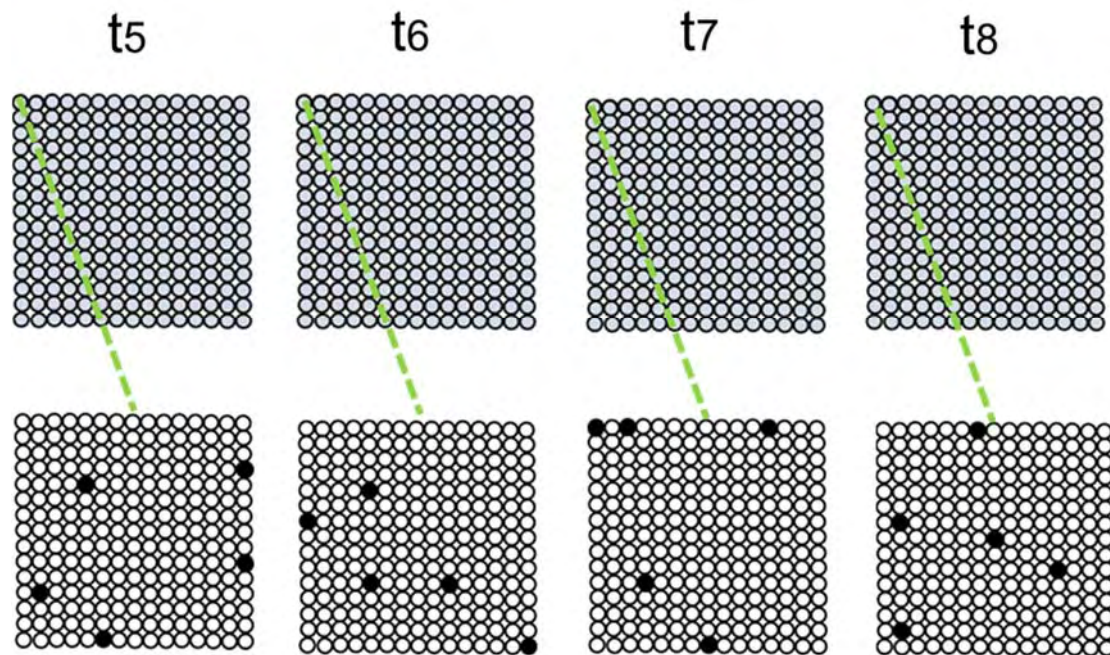
Αναμένουμε από τους φοιτητές να καταλήξουν στη διαπίστωση ότι **με κάθε αύξηση των πιθανών θέσεων, αυξάνει ο αριθμός των τρόπων διευθέτησης των μορίων της χρωστικής στο πλέγμα, δηλαδή ο αριθμός των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν σε κάθε μακροκατάσταση. Η μακροκατάσταση ισορροπίας του συστήματος στην οποία η χρωστική διαχέεται σε όλο το νερό, αποτελείται από μέγιστο πλήθος μικροκαταστάσεων.**

Συνεχίζοντας καλούμε να τους φοιτητές να προβληματιστούν για το αν αλλάζουν οι μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στην μακροκατάσταση ισορροπίας. Υποστηρικτικά προβάλλουμε την 4^η διαφάνεια και τους προτρέπουμε να περιγράψουν τα πλέγματα που παρατηρούν. Κάνουμε κλικ σε κάθε εικόνα που αντιστοιχεί στις χρονικές στιγμές από t_5 έως t_8 και βλέπουμε αντίστοιχες πιθανές μικροκαταστάσεις (διαφάνειες 21-32). Για να τους βοηθήσουμε στη λήψη απόφασης ρωτάμε:

«Ενώ μακροσκοπικά δεν γίνονται αντιληπτές μεταβολές (t_5-t_8), ισχύει το ίδιο σε μικροσκοπική κλίμακα;»

«Οι μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση ισορροπίας παραμένουν σταθερές ή αλλάζουν συνεχώς;»

Μετά από συζήτηση, αναμένουμε να εξαχθούν τα ακόλουθα συμπεράσματα: Η μακροκατάσταση ενός συστήματος παραμένει σταθερή και καθορισμένη όσο παραμένουν σταθερές οι μεταβλητές που την περιγράφουν. Τότε το σύστημα βρίσκεται σε ισορροπία. Ωστόσο αλλάζοντας ο τρόπος διεύθυνσης των 5 μορίων στις 225 πιθανές θέσεις, προκύπτει κάθε φορά μια νέα μικροκατάσταση διαφορετική από την προηγούμενη που όμως όλες αντιστοιχούν στην ίδια μακροκατάσταση. Το σύστημα εξακολουθεί να παραμένει σε ισορροπία.



Σχήμα Β11: Διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση ισορροπίας

B.5 Εισαγωγή της εντροπίας

Διδακτικοί στόχοι:

13. Να συνδέσουν το πλήθος των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν στην ίδια μακροκατάσταση με την έννοια της εντροπίας.

14. Να συμπεραίνουν ότι η μεγιστοποίηση του πλήθους των μικροκαταστάσεων συνεπάγεται μεγιστοποίηση της εντροπίας και να τη συνδέσουν με την κατάσταση ισορροπίας του συστήματος.

Η κατανόηση από τους φοιτητές ότι κάθε μακροκατάσταση μπορεί να προκύπτει από τεράστιο πλήθος μικροκαταστάσεων αποτελεί σημαντικό βήμα για την προσέγγιση της έννοιας της εντροπίας. Πριν την εισαγωγή της έννοιας ανιχνεύουμε εναλλακτικές ιδέες που τυχόν υπάρχουν. Εισάγουμε την έννοια της εντροπίας ως τον αριθμό των πιθανών μικροκαταστάσεων στις οποίες μπορεί να βρίσκεται ένα σύστημα και οι οποίες αντιστοιχούν σε μια μακροκατάσταση του συστήματος. Προτρέπουμε τους φοιτητές να ανακαλέσουν στη μνήμη τους τα συμπεράσματα σχετικά με την αλλαγή του αριθμού των τρόπων διευθέτησης των μορίων στις πιθανές θέσεις δηλαδή των μικροκαταστάσεων ώστε να απαντήσουν σε ερωτήματα όπως τα ακόλουθα:

«Εφόσον η εντροπία ορίζεται ως το πλήθος των μικροκαταστάσεων, πώς μεταβλήθηκε η εντροπία της μακροκατάστασης που απεικονίζει η φωτογραφία 2 σε σχέση με αυτή της 1;»

«Πώς μεταβάλλεται η εντροπία κατά την εξέλιξη του φαινομένου;»

«Σε ποιο συμπέρασμα οδηγούμαστε σχετικά με την εντροπία του συστήματος στην κατάσταση ισορροπίας;»

Το συμπέρασμα που αναμένεται να εξαχθεί είναι ότι η αύξηση του αριθμού των πιθανών μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν σε κάθε μακροκατάσταση έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της εντροπίας, ενώ η μεγιστοποίηση του πλήθους των μικροκαταστάσεων συνεπάγεται μεγιστοποίηση της εντροπίας. Επομένως η μακροκατάσταση ισορροπίας του συστήματος στην οποία η χρωστική διαχέεται σε όλο το νερό, είναι εκείνη η μακροκατάσταση του συστήματος με τη μέγιστη εντροπία.

B.6 Δραστηριότητα 1- Μη αντιστρεπτές μεταβολές

Διδακτικοί στόχοι:

Να συνδέσουν την εξέλιξη των μη αντιστρεπτών μεταβολών με αύξηση της εντροπίας.

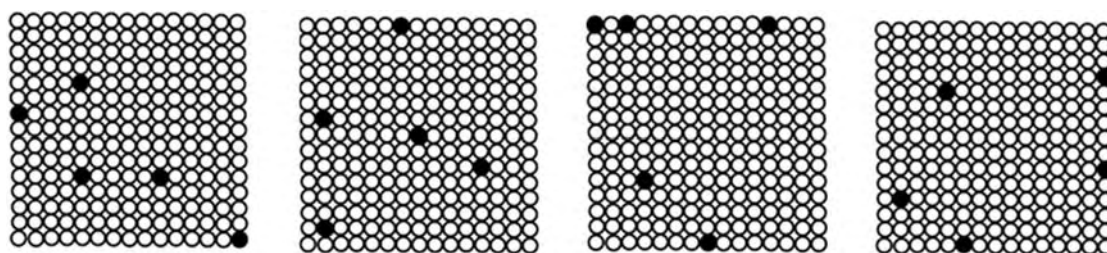
Απλώνουμε μπροστά στους φοιτητές κάποιες φωτογραφίες (παράρτημα Γ) της διάχυσης του συστήματος νερό- χρωστική, τοποθετημένες αντίστροφα από την κατεύθυνση πραγματοποίησης της και τους καλούμε να σχολιάσουν αυτό που παρατηρούν. Αναμένουμε από τους φοιτητές να αντιδράσουν, λέγοντας ότι δεν έχει παρατηρηθεί να εξελίσσεται το φαινόμενο κατά αυτή την κατεύθυνση, δηλαδή το σύστημα να επανέρχεται στην αρχική του κατάσταση. Τους καλούμε να τοποθετήσουν τις φωτογραφίες κατά τη φορά πραγματοποίησης της μεταβολής. Αυτό αποτελεί αφετηρία συζήτησης για την **κατεύθυνση των αυθόρμητων διαδικασιών, η οποία οδηγεί σε μια αίσθηση της κατεύθυνσης του χρόνου, παρέχοντας το βέλος του χρόνου, μεταφοράς που συνοδεύει την ερμηνεία των μη αντιστρεπτών μεταβολών.**

B.7 Δραστηριότητα 2

Διδακτικοί στόχοι:

Να οδηγηθούν στο συμπέρασμα ότι όταν η μακροκατάσταση διατηρείται σταθερή (ισορροπία), ο τρόπος με τον οποίο εξελίσσεται μικροσκοπικά το σύστημα είναι τυχαίος.

Στη δεύτερη δραστηριότητα απλώνουμε μπροστά τους τα 4 πλέγματα του σχήματος και τους προτρέπουμε να τα τοποθετήσουν ακολουθώντας μια σειρά διαδοχής, να ενεργήσουν δηλαδή παρόμοια με τις φωτογραφίες.



Σχήμα B12: Διαφορετικές μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στην κατάσταση ισορροπίας

Για να τους βοηθήσουμε στην απόφασή τους, τους καλούμε αρχικά να ονομάσουν τα πλέγματα και στη συνέχεια απευθύνουμε ερωτήσεις όπως:

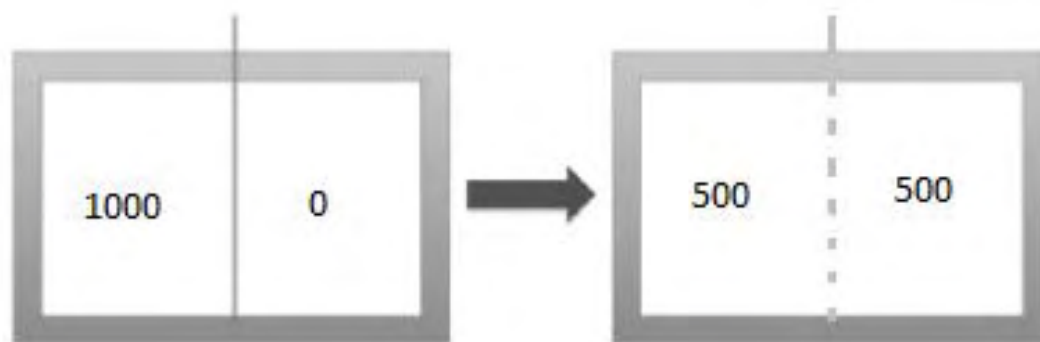
«Υπάρχει συγκεκριμένη μικροκατάσταση που θα διαδεχτεί την προηγούμενη ή η διαδοχή γίνεται τυχαία;»

Αναμένουμε να αναγνωρίσουν ότι πρόκειται για 4 μικροκαταστάσεις που αντιστοιχούν στη μακροκατάσταση ισορροπίας και να συμπεράνουν ότι **όταν η μακροκατάσταση διατηρείται σταθερή (ισορροπία), ο τρόπος με τον οποίο εξελίσσεται μικροσκοπικά το σύστημα είναι τυχαίος, αφού η διαδοχή των μικροκαταστάσεων που αντιστοιχούν στην μακροκατάσταση ισορροπίας είναι τυχαία.**

B.8 Εφαρμογή

Διδακτικοί στόχοι:

Να εφαρμόσουν την πρότερη γνώση για να ερμηνεύσουν την αύξηση της εντροπίας σε μια διαδικασία εκτόνωσης.



Σχήμα B13: Δυο διαφορετικές μακροκαταστάσεις συστήματος 1000 μορίων

Παρουσιάζουμε στους φοιτητές ένα νέο πλαίσιο, συγκεκριμένα μια διαδικασία εκτόνωσης. Σχεδιάζουμε ένα κυλινδρικό δοχείο, το οποίο χωρίζεται νοητά σε δυο μέρη και στο κάθε ένα από αυτά υπάρχει από ένας μετρητής που καταγράφει μόρια. Αρχικά στο ένα μέρος του δοχείου (αριστερό), ο μετρητής καταγράφει 1000 μόρια ενώ στο άλλο υπάρχει κενό και συνεπώς ο δεύτερος μετρητής καταγράφει 0 μόρια (κατάσταση A). Μετά από χρόνο οι δυο μετρητές καταγράφουν στα δυο μέρη του δοχείου 500 και 500 μόρια (κατάσταση B). Καλούμε τους φοιτητές να εφαρμόσουν όσα έχουν προηγηθεί κατά τη διδασκαλία ώστε να επιχειρηματολογήσουν για το αν η εντροπία στις δυο καταστάσεις A και B είναι ίδια ή διαφορετική. Αναμένουμε να απαντήσουν ότι στη B κατάσταση η εντροπία είναι μεγαλύτερη. Ενδεικτική αιτιολόγηση είναι ότι **εφόσον στη B κατάσταση τα 1000 μόρια μπορούν να**

κινούνται σε μεγαλύτερο όγκο, θα είναι διαθέσιμες περισσότερες πιθανές θέσεις για αυτά και ως εκ τούτου θα υπάρχουν περισσότερες πιθανές μικροκαταστάσεις.

Επεκτείνουμε τη συζήτηση απευθύνοντας ερωτήματα όπως τα ακόλουθα:

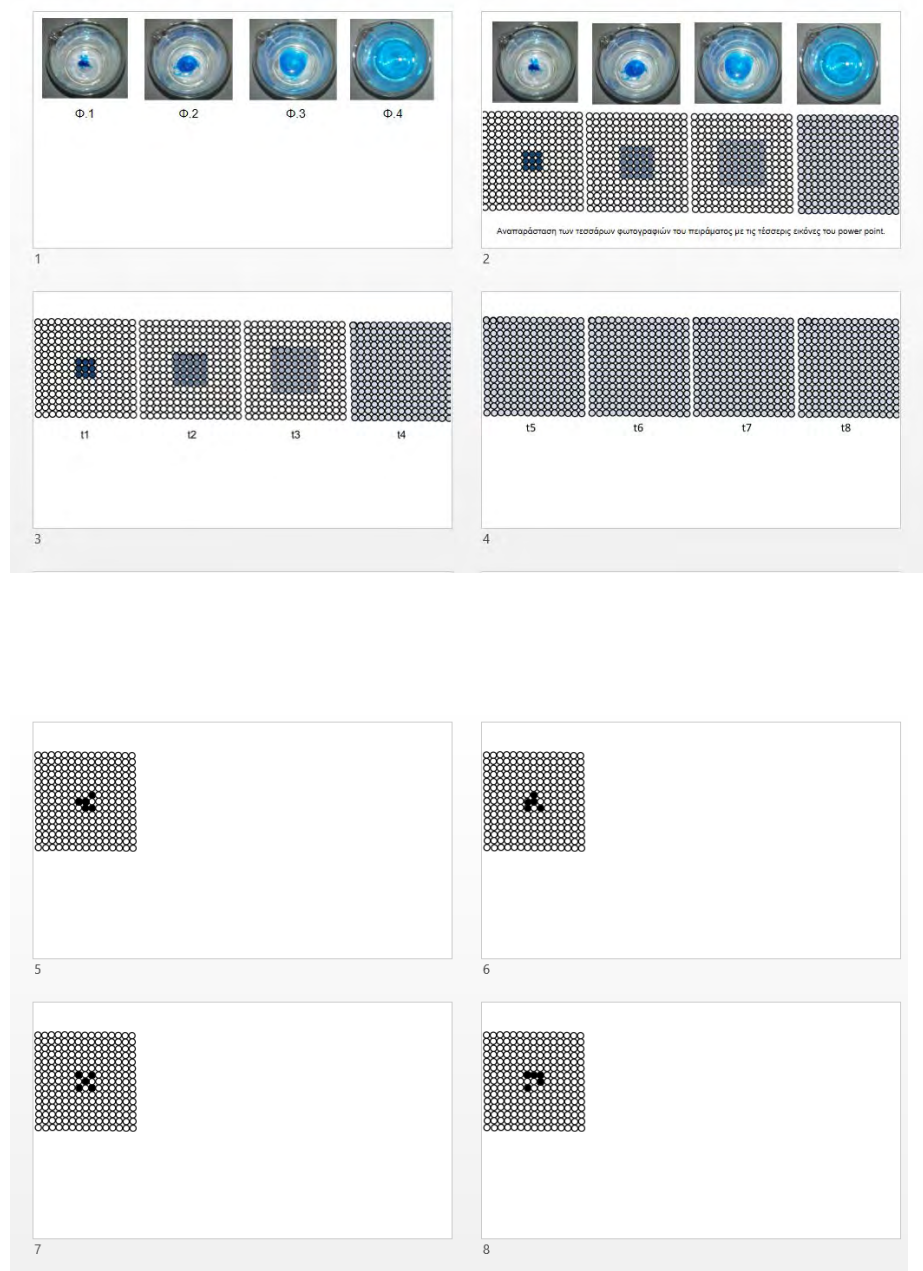
«Πώς μπορούμε πρακτικά να περάσουμε από την A κατάσταση στη B; Τι θα μπορούσε να είναι το νοητό χάρισμα;»

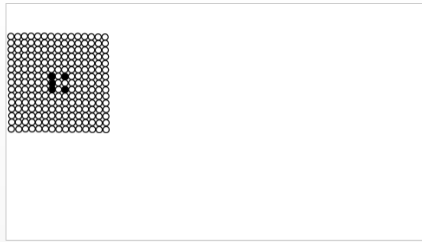
«Μπορεί το σύστημα από τη B κατάσταση να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση (κατάσταση A), δηλαδή να περιοριστούν τα μόρια στο αριστερό μόνο μέρος του δοχείου;»

«Η μεταβολή του συστήματος από την A κατάσταση στη B χαρακτηρίζεται αντιστρεπτή ή μη αντιστρεπτή;»

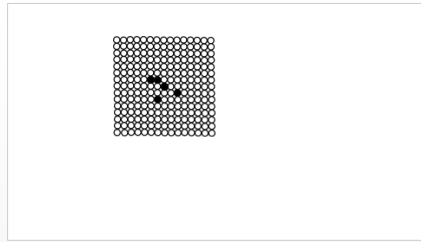
Αναμένουμε από τους φοιτητές να απαντήσουν ότι πιθανόν να υπάρχει ένα διάφραγμα που χωρίζει το δοχείο στα δυο μέρη και αφαιρώντας το διάφραγμα τα μόρια μετακινούνται ώστε να κατανεμηθούν και στους δυο χώρους. Πρόκειται για διαδικασία μη αντιστρεπτή, αφού δεν μπορεί το σύστημα αυθόρμητα να επανέλθει στην αρχική του κατάσταση.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Γ: ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΠΡΟΒΟΛΗΣ ΔΙΑΦΑΝΕΙΩΝ ΓΙΑ ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΤΟΥ ΜΟΝΤΕΛΟΥ

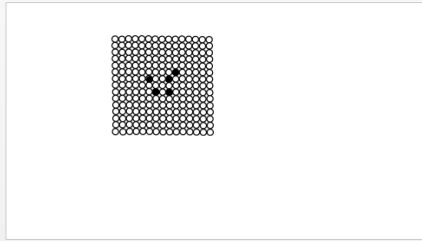




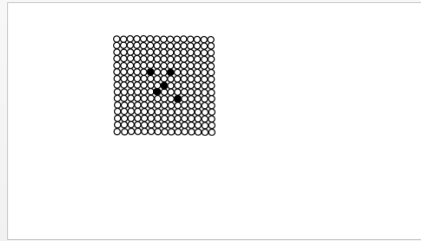
9



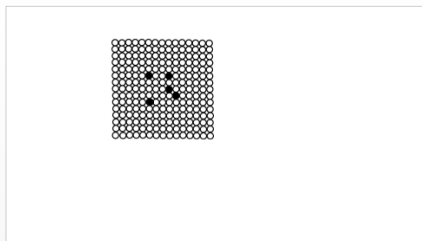
10



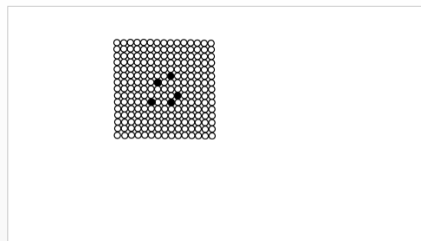
11



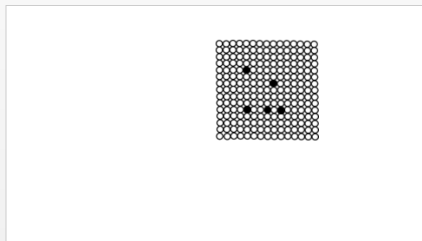
12



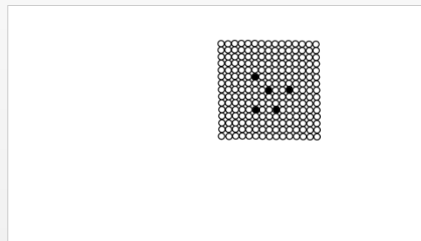
13



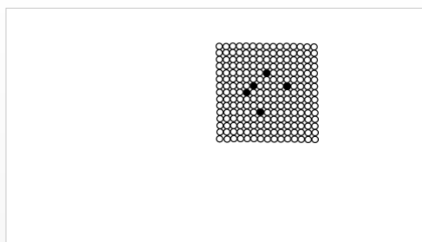
14



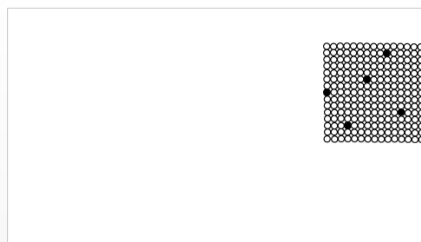
15



16



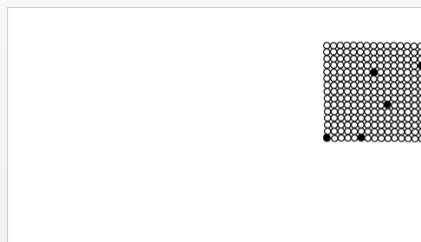
17



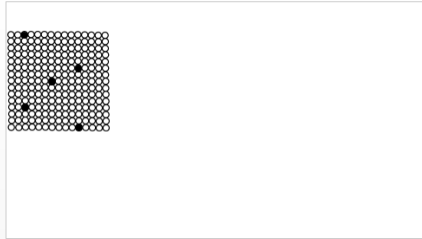
18



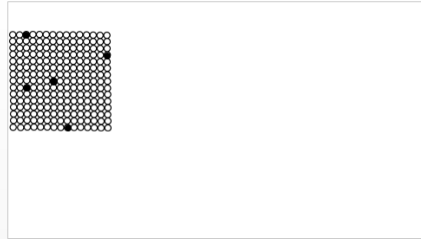
19



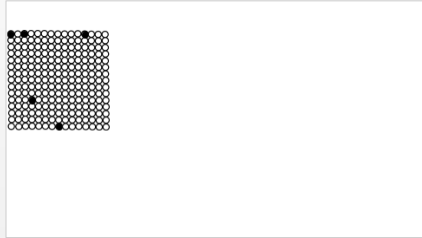
20



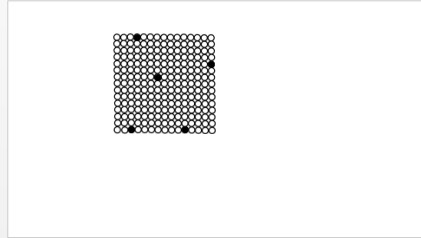
21



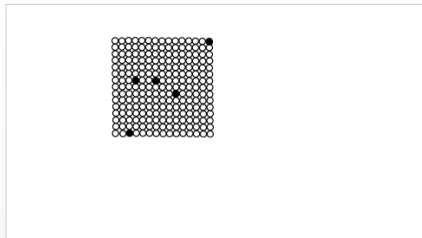
22



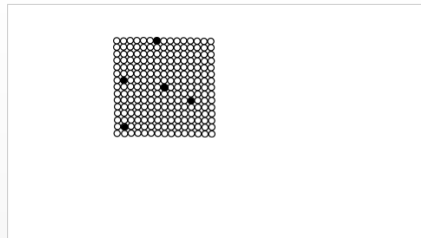
23



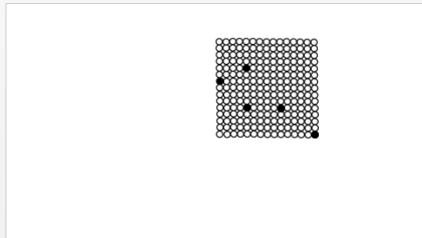
24



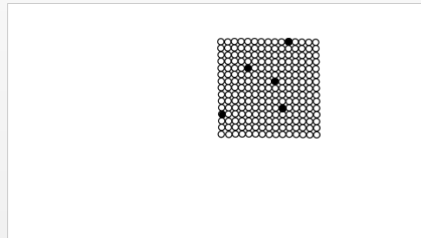
25



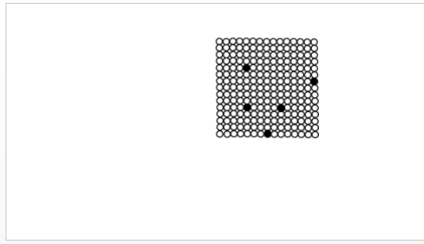
26



27



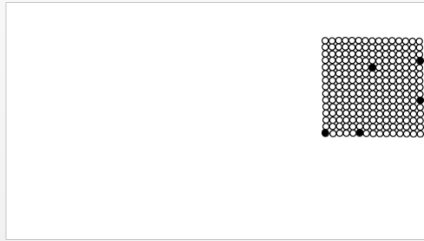
28



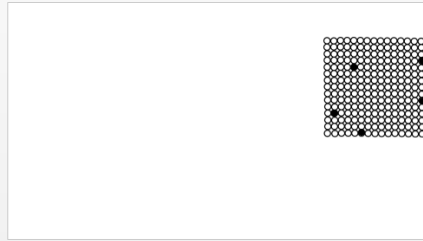
29



30



31



32

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Δ: ΦΩΤΟΓΡΑΦΙΕΣ ΤΗΣ ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑΣ 1



