ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΑΓΩΓΗΣ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Αξιολόγηση της κατανόησης μαθητών/τριών Ε' τάξης του Δημοτικού Σχολείου για τη διάδοση της θερμότητας μέσω πολυτροπικών αναπαραστάσεων

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καραλή Χριστίνα, ΑΕΜ:7829

Επιβλέπων Καθηγητής: Αναστάσιος Ζουπίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ, 2026

ΔΗΜΟΚΡΙΤΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΡΑΚΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΑΓΩΓΗΣ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΤΜΗΜΑ ΔΗΜΟΤΙΚΗΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗΣ

Αξιολόγηση της κατανόησης μαθητών/τριών Ε' τάξης του Δημοτικού Σχολείου για τη διάδοση της θερμότητας μέσω πολυτροπικών αναπαραστάσεων

ΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Καραλή Χριστίνα, ΑΕΜ:7829

Η παρούσα Πτυχιακή Εργασία υποβλήθηκε στο Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης για την απόκτηση του πτυχίου του Τμήματος.

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Επιβλέπων καθηγητής: Αναστάσιος Ζουπίδης, Αναπληρωτής Καθηγητής, Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

2ο Μέλος: Σοφία Χατζηλεοντιάδου, Επίκουρη Καθηγήτρια, Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

3ο Μέλος: Θεοδώρα Μπουμπόναρη, Εργαστηριακό Διδακτικό Προσωπικό, Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης

ΑΛΕΞΑΝΔΡΟΥΠΟΛΗ, 2026

Πνευματικά δικαιώματα

Copyright © Καραλή Χριστίνα, 2026

Η έγκριση της πτυχιακής εργασίας από το Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης δε δηλώνει απαραιτήτως την αποδοχή των απόψεων της συγγραφέα.

Τήρηση ακαδημαϊκών αρχών και δεοντολογίας

Η παρούσα εργασία είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε εξ ολοκλήρου από την φοιτήτρια Καραλή Χριστίνα του Προπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης, υπό την καθοδήγηση του/της επιβλέποντα/επιβλέπουσας.

Η φοιτήτρια βεβαιώνει ότι κατά την εκπόνηση και τη συγγραφή της παρούσας πτυχιακής εργασίας τήρησε τα προβλεπόμενα από τον νόμο, τον εσωτερικό κανονισμό και τον κανονισμό εκπόνησης πτυχιακών εργασιών του Τμήματος, καθώς και ότι σεβάστηκε πλήρως τις Αρχές της Ακαδημαϊκής Ηθικής και του Κώδικα Δεοντολογίας, οι οποίες απαγορεύουν την παραποίηση των ερευνητικών/πειραματικών αποτελεσμάτων, την αναφορά ψευδών στοιχείων, την κατάχρηση της διανοητικής ιδιοκτησίας τρίτων και τη λογοκλοπή.

Η συγγραφέας

Καραλή Χριστίνα

DEMOCRITUS UNIVERSITY OF THRACE
SCHOOL OF EDUCATION
DEPARTMENT OF PRIMARY EDUCATION

Evaluation of fifth-grade students' understanding of heat transfer through multimodal representations

UNDERGRADUATE DISSERTATION

Karali Christina, RN:7829

A dissertation submitted in partial fulfilment of the requirements for the undergraduate degree in Education of the Department of Primary Education, Democritus University of Thrace.

COMMITTEE OF EXAMINERS

Supervisor: Anastasios Zoupidis, Associate Professor, Department of Primary Education, Democritus University of Thrace
Member 2: Sofia Hadjileontiadou, Assistant Professor, Department of Primary Education, Democritus University of Thrace
Member 3: Theodora Boubonari, Laboratory Teaching Staff, Department of Primary Education, Democritus University of Thrace

ALEXANDROUPOLIS, 2026

All rights reserved

Copyright © Karali Christina,2026

The approval of the undergraduate dissertation by the Department of Primary Education, Democritus University of Thrace, does not necessarily indicate the acceptance of the views of the author.

Fulfillment of academic principles and ethics

The present undergraduate dissertation is original and was prepared entirely by the student Karali Christina of the Undergraduate Program of Studies of the Department of Primary Education, under the guidance of the supervisor. The student certifies that during the preparation and writing of this undergraduate dissertation she complied with the provisions of the law and the corresponding internal regulations of the Department, as well as that he/she fully respected the Principles of Academic Ethics and the Code of Ethics, which prohibit falsification of research/experimental results, false reporting, misuse of third-party intellectual property and plagiarism.

The author

Karali Christina

Περίληψη

Η παρούσα πτυχιακή εργασία εντάσσεται στο πεδίο της Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών και επικεντρώνεται στην αξιολόγηση της κατανόησης μαθητών/τριών Ε΄ τάξης του Δημοτικού Σχολείου για τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή και με ρεύματα μεταφοράς, μέσα από την ανάλυση των πολυτροπικών αναπαραστάσεών τους. Σκοπός της ήταν να διερευνηθούν οι ιδέες που εκφράζονται στα μαθητικά σχέδια και οι μεταβολές τους πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την εφαρμογή μιας Διδακτικής-Μαθησιακής Ακολουθίας (ΔΜΑ). Παράλληλα, εξετάστηκαν οι σημειωτικοί πόροι και τα επίπεδα αναπαράστασης που αξιοποίησαν οι μαθητές/τριες.

Η εργασία διαρθρώνεται σε θεωρητικό και εμπειρικό μέρος. Στο θεωρητικό μέρος παρουσιάζονται το επιστημονικό περιεχόμενο της θερμότητας και των μηχανισμών διάδοσής της, οι εναλλακτικές ιδέες των μαθητών/τριών, οι βασικές αρχές της πολυτροπικότητας και της κοινωνιοσημειωτικής προσέγγισης, καθώς και το μαθητικό σχέδιο ως μέσο μάθησης και διερεύνησης της κατανόησης. Στο εμπειρικό μέρος αναλύθηκαν τα σχέδια 18 μαθητών/τριών, τα οποία προήλθαν από τρία έργα ενός γραπτού ερωτηματολογίου: ένα για την αγωγή και δύο για τα ρεύματα μεταφοράς. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν σε πέντε χρονικά σημεία, πριν, κατά τη διάρκεια, αμέσως μετά και δέκα μήνες μετά την ολοκλήρωση της ΔΜΑ.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι αρχικές αναπαραστάσεις βασίζονταν κυρίως σε μακροσκοπικά χαρακτηριστικά και εναλλακτικές ιδέες. Κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τη διδασκαλία εμφανίστηκαν πιο σύνθετες αναπαραστάσεις, με θερμικές και σωματιδιακές διαφοροποιήσεις και συχνότερη απόδοση της κίνησης. Ωστόσο, η πλήρης μικροσκοπική εξήγηση της αγωγής και η ολοκληρωμένη αιτιακή ερμηνεία των ρευμάτων μεταφοράς παρέμειναν δύσκολες, ενώ στη μεταγενέστερη μέτρηση επανεμφανίστηκαν και ορισμένες αρχικές ιδέες. Οι μαθητές/τριες αξιοποίησαν κυρίως το χρώμα, τα βέλη, τις γραμμές, τα σωματιδιακά στοιχεία και τις λεκτικές επισημάνσεις. Μετά την έναρξη της ΔΜΑ εμφανίστηκαν μεικτές αναπαραστάσεις αισθητηριακού και μη ορατού υλικού επιπέδου (SS+US), χωρίς όμως η παρουσία σωματιδίων ή περισσότερων σημειωτικών πόρων να εξασφαλίζει πάντοτε επιστημονικά επαρκή κατανόηση. Κεντρικό εύρημα της εργασίας είναι ότι ο αναπαραστατικός εμπλουτισμός δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με μεγαλύτερη επιστημονική επάρκεια. Συνολικά, τα ευρήματα αναδεικνύουν τη συμβολή των μαθητικών σχεδίων στη διερεύνηση της κατανόησης των θερμικών φαινομένων.

Λέξεις-κλειδιά: Δημοτικό Σχολείο, Διδακτική Φυσικών Επιστημών, διάδοση με αγωγή, διάδοση με ρεύματα μεταφοράς, επίπεδα αναπαράστασης, μαθητικά σχέδια, πολυτροπικές αναπαραστάσεις, σημειωτικοί πόροι.

Abstract

This undergraduate dissertation falls within the field of Science Education and focuses on evaluating fifth-grade primary school students' understanding of heat transfer by conduction and convection through the analysis of their multimodal representations. Its purpose was to investigate the ideas expressed in students' drawings and how these ideas changed before, during, and after the implementation of a Teaching–Learning Sequence (TLS). The semiotic resources and levels of representation used by the students were also examined.

The dissertation consists of a theoretical and an empirical part. The theoretical part presents the scientific content of heat and heat-transfer mechanisms, students' alternative conceptions, the basic principles of multimodality and the social semiotic approach, as well as students' drawings as a means of learning and investigating understanding. In the empirical part, the drawings of 18 students were analysed. These drawings were produced in response to three tasks included in a written questionnaire: one task on conduction and two tasks on convection. Data were collected at five time points: before the TLS, at two points during its implementation, immediately after its completion, and ten months later.

The results showed that the initial representations were mainly based on macroscopic features and alternative conceptions. During and immediately after the instruction, more complex representations emerged, including thermal and particle-level differentiation and more frequent depictions of movement. However, a complete microscopic explanation of conduction and a complete causal explanation of convection remained difficult, while some initial ideas reappeared in the delayed measurement. The students mainly used colour, arrows, lines, particulate elements, and verbal labels. After the beginning of the TLS, mixed representations combining the sensory and unseen substance levels (SS+US) emerged. Nevertheless, the presence of particles or the use of multiple semiotic resources did not always ensure scientifically adequate understanding. A central finding of the study is that representational enrichment does not necessarily correspond to greater scientific adequacy. Overall, the findings highlight the contribution of students' drawings to investigating understanding of thermal phenomena.

Keywords: conduction, convection, multimodal representations, primary school, representation levels, science education, semiotic resources, student drawings

Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των προπτυχιακών μου σπουδών στο Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης του Δημοκρίτειου Πανεπιστημίου Θράκης.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή της πτυχιακής μου εργασίας, κ. Αναστάσιο Ζουπίδη, για την εξαιρετική συνεργασία μας. Η βοήθεια του ήταν πολύτιμη, καθώς με υποστήριζε και με ενθάρρυνε κάθε φορά που ήθελα να τα παρατήσω. Τον ευχαριστώ ιδιαίτερα για τον χρόνο που αφιέρωσε, καθώς και για τις εύστοχες παρατηρήσεις και συμβουλές του, οι οποίες συνέβαλαν ουσιαστικά στην ολοκλήρωση της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να απευθύνω και στην κα. Μαρία-Ελένη Βαλκάνου, διδακτορική φοιτήτρια του Παιδαγωγικού Τμήματος Δημοτικής Εκπαίδευσης του ΔΠΘ, υπό την επίβλεψη του κ. Ζουπίδη. Η οποία ήταν εκεί για κάθε απορία που μου δημιουργούταν και υπήρχε πάντοτε άμεση ανταπόκριση. Ήταν πρόθυμη να με βοηθήσει και να με στηρίξει σε όλη αυτή την προσπάθεια. Η βοήθεια της ήταν πολύτιμη και χωρίς εκείνη δεν θα υπήρχε η συγκεκριμένη εργασία.

Θα ήθελα, επίσης, να ευχαριστήσω ξεχωριστά την οικογένεια μου, η οποία ήταν δίπλα μου σε όλη αυτή την προσπάθεια. Ήταν εκεί να μου δίνει κουράγιο να συνεχίσω μέσα σε αυτή την απαιτητική χρονιά. Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους φίλους μου, οι οποίοι με υποστήριζαν καθημερινά και με βοηθούσαν με τον τρόπο τους.

Πίνακας περιεχομένων

Περίληψη **1**
Abstract **2**
Ευχαριστίες **3**
Εισαγωγή **6**
Μέρος Πρώτο: Θεωρητικό – Βιβλιογραφικό Μέρος **7**
Κεφάλαιο 1ο: Το επιστημονικό περιεχόμενο για την έννοια της θερμότητας και τους μηχανισμούς διάδοσής της **8**
1.1 Ιστορικά στοιχεία για την έννοια της θερμότητας 8
1.2 Επιστημονικό περιεχόμενο για την έννοια της θερμότητας 9
1.3 Επιστημονικό περιεχόμενο για τους τρεις τρόπους διάδοσης της θερμότητας 11
Κεφάλαιο 2ο: Ιδέες μαθητών/τριών για την έννοια της θερμότητας και τους μηχανισμούς διάδοσής της **14**
2.1 Εναλλακτικές ιδέες μαθητών/τριών για την έννοια της θερμότητας 14
2.2 Εναλλακτικές ιδέες μαθητών/τριών για τη διάδοση της θερμότητας 16
2.3 Εναλλακτικές ιδέες μαθητών/τριών για τους καλούς και τους κακούς αγωγούς της θερμότητας 17
2.4 Εναλλακτικές ιδέες για το φαινόμενο των ρευμάτων μεταφοράς 18
Κεφάλαιο 3ο: Πολυτροπικότητα και μαθητικά σχέδια στις Φυσικές Επιστήμες **21**
3.1 Η πολυτροπικότητα στη διδασκαλία και μάθηση των Φυσικών Επιστημών 21
3.2 Βασικές κοινωνικοσημειωτικές έννοιες και προσεγγίσεις 22
3.2.1 Βασικές κοινωνιοσημειωτικές έννοιες 22
3.2.2 Το τριαδικό μοντέλο του Peirce 24
3.3 Το σχέδιο ως μέσο μάθησης και διερεύνησης των μαθητικών ιδεών στις Φυσικές Επιστήμες 25
3.4 Εργαλεία ανάλυσης πολυτροπικών αναπαραστάσεων 25
3.4.1 Το αναλυτικό πλαίσιο των Tang et al. (2019) 26
3.4.2 Το μοντέλο των επιπέδων αναπαράστασης των Park et al. (2020) 27
3.4.3 Το πλαίσιο ανάλυσης των Wanselin et al. (2022) 28
Κεφάλαιο 4ο: Διδακτικές προσεγγίσεις στις Φυσικές Επιστήμες με έμφαση στις πολυτροπικές αναπαραστάσεις **29**
4.1. Αξιοποίηση πολυτροπικών αναπαραστάσεων στη διδασκαλία και τη μάθηση των Φυσικών Επιστημών 29
4.2 Διδακτικές προσεγγίσεις για θερμικά φαινόμενα με αξιοποίηση πολυτροπικών αναπαραστάσεων 31
4.3 Σύνθεση των ευρημάτων και σύνδεση με την παρούσα εργασία 33
Μέρος Δεύτερο: Εμπειρικό μέρος **35**
Κεφάλαιο 5ο: Μεθοδολογία της έρευνας **36**
5.1 Σκοπός της έρευνας και ερευνητικά ερωτήματα 36
5.2 Συνοπτική παρουσίαση της Διδακτικής-Μαθησιακής Ακολουθίας 36
5.2.1 Αναλυτική περιγραφή της 3ης ενότητας της ΔΜΑ: διάδοση της θερμότητας με αγωγή στα μέταλλα 38

5.2.2 Αναλυτική περιγραφή της 5ης ενότητας της ΔΜΑ: διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς στο νερό 43
5.3 Συμμετέχοντες/ουσες και πλαίσιο εφαρμογής 50
5.4 Διαδικασία συλλογής δεδομένων 51
5.4.1 Έργο ΑΓ3 51
5.4.2 Έργο Ρ2 53
5.4.3 Έργο Ρ3 54
5.5 Τρόπος ανάλυσης των δεδομένων 56
5.6 Διαδικασία ελέγχου και ενίσχυσης της αξιοπιστίας της ανάλυσης 60
Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα 62
6.1 Ιδέες μαθητών/τριών και μεταβολές τους μεταξύ των χρονικών σημείων 62
6.1.1 Διάδοση της θερμότητας με αγωγή – έργο ΑΓ3 62
6.1.2 Διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς - έργο Ρ2 67
6.1.3 Διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς - έργο Ρ3 74
6.2 Σημειωτικοί πόροι και επίπεδα αναπαράστασης 80
6.2.1 Σημειωτικοί πόροι 80
6.2.2 Επίπεδα αναπαράστασης 85
6.3 Σύνοψη των αποτελεσμάτων 89
6.3.1 Σύνοψη των ιδεών και των μεταβολών τους μεταξύ των χρονικών σημείων 89
6.3.2 Σύνοψη των σημειωτικών πόρων και των επιπέδων αναπαράστασης 90
Κεφάλαιο 7ο: Συζήτηση – Συμπεράσματα 91
7.1 Συζήτηση των ευρημάτων για τις ιδέες των μαθητών/τριών 91
7.1.1 Διάδοση της θερμότητας με αγωγή 91
7.1.2 Διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς 92
7.1.3 Σύνθεση των μεταβολών των ιδεών 94
7.2 Συζήτηση των ευρημάτων για τους σημειωτικούς πόρους και τα επίπεδα αναπαράστασης 95
7.2.1 Σημειωτικοί πόροι 95
7.2.2 Επίπεδα αναπαράστασης 96
7.3 Συμπεράσματα 98
7.4 Περιορισμοί της έρευνας 99
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 100
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α 105
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β 112

Εισαγωγή

Η εκπαίδευση στις Φυσικές Επιστήμες διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στην ανάπτυξη της επιστημονικής σκέψης και του συλλογισμού των μαθητών/τριών ήδη από τις πρώτες βαθμίδες της εκπαίδευσης. Η αξιοποίηση σύγχρονων διδακτικών προσεγγίσεων μπορεί να ενισχύσει την ενεργό συμμετοχή τους και να συμβάλει στην κατανόηση σύνθετων επιστημονικών εννοιών, όπως η θερμότητα και οι μηχανισμοί διάδοσής της.

Η κατανόηση των θερμικών φαινομένων παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες, καθώς οι μαθητές/τριες συχνά εκφράζουν εναλλακτικές ιδέες και δυσκολεύονται να ερμηνεύσουν τις μη άμεσα παρατηρήσιμες διαδικασίες που σχετίζονται με τη διάδοση της θερμότητας. Τα μαθητικά σχέδια μπορούν να συμβάλουν στη διερεύνηση αυτών των ιδεών, καθώς επιτρέπουν στους/στις μαθητές/τριες να εκφράσουν πτυχές της κατανόησής τους μέσα από διαφορετικούς σημειωτικούς πόρους, όπως το χρώμα, τα βέλη, οι γραμμές, τα σωματιδιακά στοιχεία και οι λεκτικές επισημάνσεις.

Η παρούσα εργασία εξετάζει την κατανόηση μαθητών/τριών Ε΄ τάξης του Δημοτικού Σχολείου για τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή και με ρεύματα μεταφοράς μέσα από την ανάλυση των πολυτροπικών αναπαραστάσεών τους. Ειδικότερα, διερευνώνται οι ιδέες που εκφράζονται στα μαθητικά σχέδια και οι μεταβολές τους πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την εφαρμογή μιας Διδακτικής-Μαθησιακής Ακολουθίας. Παράλληλα, εξετάζονται οι σημειωτικοί πόροι και τα επίπεδα αναπαράστασης που αξιοποιούν οι μαθητές/τριες για την απόδοση και την ερμηνεία των συγκεκριμένων φαινομένων.

Στο θεωρητικό μέρος της εργασίας παρουσιάζονται το επιστημονικό περιεχόμενο σχετικά με τη θερμότητα και τους μηχανισμούς διάδοσής της, οι εναλλακτικές ιδέες των μαθητών/τριών και οι βασικές αρχές της πολυτροπικότητας και της κοινωνιοσημειωτικής προσέγγισης. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στο μαθητικό σχέδιο ως μέσο μάθησης και διερεύνησης της μαθητικής κατανόησης, καθώς και στα αναλυτικά πλαίσια που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη των πολυτροπικών αναπαραστάσεων. Παρουσιάζονται επίσης σχετικές έρευνες και διδακτικές προσεγγίσεις για την αξιοποίηση των αναπαραστάσεων στη διδασκαλία των Φυσικών Επιστημών.

Το εμπειρικό μέρος επικεντρώνεται στην ανάλυση τριών έργων ενός γραπτού ερωτηματολογίου, ενός για τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή και δύο για τα ρεύματα μεταφοράς. Τα δεδομένα προέρχονται από 18 μαθητές/τριες και εξετάζονται σε πέντε χρονικά σημεία. Η ανάλυση αφορά τις ιδέες και την επιστημονική επάρκεια των αναπαραστάσεων, τους σημειωτικούς πόρους και τα επίπεδα αναπαράστασης που εμφανίζονται στα μαθητικά σχέδια. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται και συζητούνται σε αντιστοιχία με τα ερευνητικά ερωτήματα και το θεωρητικό πλαίσιο της εργασίας.

Μέσα από τη συνδυαστική εξέταση του εννοιολογικού περιεχομένου και των αναπαραστατικών επιλογών των μαθητών/τριών, η εργασία επιδιώκει να αναδείξει τη συμβολή των μαθητικών σχεδίων στη διερεύνηση της κατανόησης των θερμικών φαινομένων. Παράλληλα, επιχειρεί να φωτίσει τις μεταβολές που εμφανίζονται στα διαφορετικά χρονικά σημεία, τις ιδέες που διατηρούνται και τα σημεία στα οποία απαιτείται περαιτέρω διδακτική υποστήριξη.

Μέρος Πρώτο: Θεωρητικό – Βιβλιογραφικό Μέρος

Κεφάλαιο 1ο: Το επιστημονικό περιεχόμενο για την έννοια της θερμότητας και τους μηχανισμούς διάδοσής της

Η έννοια της θερμότητας αποτελεί ένα από τα θεμελιώδη και πιο σημαντικά αντικείμενα μελέτης στις Φυσικές Επιστήμες (ΦΕ), καθώς συνδέεται άμεσα με την ενέργεια, τη θερμοκρασία και τους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης της ύλης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το βασικό επιστημονικό περιεχόμενο που είναι απαραίτητο για την κατανόηση των φαινομένων διάδοσης της θερμότητας. Αρχικά γίνεται σύντομη αναφορά στην ιστορική εξέλιξη των εννοιών της θερμότητας και της θερμοκρασίας, ώστε να αναδειχθεί η μετάβαση από παλαιότερες αντιλήψεις για τη θερμότητα ως ουσία στη σύγχρονη επιστημονική θεώρησή της. Στη συνέχεια αποσαφηνίζεται η έννοια της θερμότητας, και παρουσιάζονται οι τρεις μηχανισμοί διάδοσής της: η αγωγή, τα ρεύματα μεταφοράς και η ακτινοβολία. Η αποσαφήνιση αυτή είναι αναγκαία, καθώς το επιστημονικό περιεχόμενο αποτελεί τη βάση για την ερμηνεία των αναπαραστάσεων των μαθητών/τριών που εξετάζονται στην παρούσα εργασία.

1.1 Ιστορικά στοιχεία για την έννοια της θερμότητας

Μέχρι τον **18ο αιώνα**, οι έννοιες της θερμότητας και της θερμοκρασίας δε διακρίνονταν με σαφήνεια. Ωστόσο, οι συστηματικές προσπάθειες των επιστημόνων τα επόμενα χρόνια να αποσαφηνίσουν την έννοια της θερμότητας οδήγησαν σταδιακά στον σαφή προσδιορισμό και τη διάκριση των δύο αυτών εννοιών. Η εξέλιξή τους μπορεί να παρακολουθηθεί μέσα από την ιστορική τους πορεία (Χαλκιά, 2012).

Στην αρχαιότητα, οι Ίωνες φιλόσοφοι (**6ος αιώνας π.Χ.**) αντιλαμβάνονταν το θερμό και το ψυχρό ως ένα ζεύγος αντίθετων φυσικών στοιχείων, το οποίο θεωρούσαν βασικές ουσίες της φύσης. Το θερμό πίστευαν ότι συνυπάρχει με το φως, στη φωτιά και στον φλογισμένο ουρανό, ενώ το ψυχρό ότι συνυπάρχει με το σκοτάδι στον αέρα της γήινης ατμόσφαιρας. Παρόμοια αντίληψη συναντάται και από τον Αριστοτέλη (**5ος αιώνας π.Χ.**), ο οποίος χαρακτήριζε το θερμό και το ψυχρό ιδιότητες των σωμάτων (Χαλκιά, 2012).

Κατά τον **18ο αιώνα**, στην επιστημονική κοινότητα επικράτησε η άποψη ότι η θερμότητα είναι ένα ρευστό, το οποίο ο Antoine Lavoisier ονόμασε calorique. Αυτό το «θερμικό ρευστό» ή «θερμογόνο», όπως ονομαζόταν, θεωρούνταν ένα αόρατο ρευστό που καταλάμβανε τα κενά ανάμεσα στα σωματίδια της ύλης. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή, κατά τη θέρμανση ενός σώματος το «θερμογόνο» εισερχόταν σε αυτό, ενώ κατά την ψύξη του απομακρυνόταν. Η θεωρία αυτή παρουσίαζε, ωστόσο, σημαντικές αδυναμίες. Αρχικά, από πειράματα που πραγματοποιήθηκαν, δεν παρατηρήθηκε καμία μεταβολή στο βάρος των σωμάτων κατά τη θέρμανση ή την ψύξη τους, γεγονός που δημιουργούσε αμφιβολίες για την ύπαρξη ενός ρευστού με μάζα. Επιπλέον, η παραδοχή ότι η ποσότητα του θερμογόνου διατηρείται σε όλα τα θερμικά φαινόμενα αμφισβητήθηκε έντονα από τα πειράματα του Benjamin Thompson. Κατά τη διάτρηση ορειχάλκινων κανονιών στο στρατιωτικό εργαστήριο του Μονάχου, παρατήρησε τη

συνεχή και έντονη παραγωγή θερμότητας, η οποία απαιτούσε συνεχή ψύξη με νερό. Η αδιάκοπη αυτή παραγωγή τον οδήγησε στο συμπέρασμα ότι η θερμότητα δεν είναι κάτι που διατηρείται ως ουσία, αλλά μπορεί να παραχθεί μέσω της τριβής (Χαλκιά, 2012).

Καθοριστική υπήρξε και η συμβολή του χημικού Joseph Black (**18ος αιώνας**) στη διάκριση μεταξύ θερμότητας και θερμοκρασίας. Μέσα από την παρατήρηση ότι το χιόνι λιώνει χωρίς να αυξάνεται η θερμοκρασία του, υποστήριξε ότι η θερμότητα και η θερμοκρασία είναι δύο διαφορετικές έννοιες. Όπως αναφέρει ο Τσελφές (1994), ο Black προχώρησε περαιτέρω, εισάγοντας τις έννοιες της ειδικής θερμότητας και της λανθάνουσας θερμότητας ως χαρακτηριστικές σταθερές των υλικών, γεγονός που ενίσχυσε αποφασιστικά τον εννοιολογικό διαχωρισμό των δύο μεγεθών (Χαλκιά, 2012).

Τον **19ο αιώνα**, ο Julius Robert Mayer και ο James Joule συνέβαλαν καθοριστικά στην εκτενέστερη κατανόηση του όρου της θερμότητας. Η διαπίστωση ότι η θερμότητα μπορεί να παραχθεί μέσω μηχανικού έργου, αλλά και να μετατραπεί σε έργο, οδήγησε στην αναγνώρισή της ως μορφής ενέργειας. Στο πλαίσιο αυτό, καθιερώθηκε η θερμίδα (cal) ως μονάδα μέτρησης της θερμότητας, οριζόμενη ως το ποσό θερμότητας που απαιτείται για την αύξηση της θερμοκρασίας 1 γραμμαρίου νερού κατά 1 βαθμό Κελσίου. Μέσα από τα πειράματά του, ο Joule έδειξε ότι 1 θερμίδα αντιστοιχεί σε 4,18 J μηχανικής ενέργειας (Χαλκιά, 2012).

Έτσι, η θερμότητα αναγνωρίστηκε ως μορφή ενέργειας, η οποία μπορεί να μετατρέπεται σε άλλες μορφές ενέργειας ή να προκύπτει από αυτές. Αυτό που διατηρείται στις φυσικές διεργασίες είναι η ενέργεια και όχι η θερμότητα, σε αντίθεση με όσα υποστήριζε η θεωρία του θερμογόνου. Την γενική διατύπωση της αρχής διατήρησης της ενέργειας έδωσε ο Hermann Helmholtz (Χαλκιά, 2012).

Τελικά, κατά τον **19ο αιώνα**, το εννοιολογικό περιεχόμενο των εννοιών της θερμότητας και της θερμοκρασίας διαμορφώθηκε στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής (Χαλκιά, 2012).

1.2 Επιστημονικό περιεχόμενο για την έννοια της θερμότητας

Η θερμότητα ορίζεται ως ενέργεια που μεταφέρεται από ένα σώμα ή σύστημα υψηλότερης θερμοκρασίας σε ένα σώμα ή σύστημα χαμηλότερης θερμοκρασίας, λόγω διαφοράς θερμοκρασίας. Η μεταφορά αυτή πραγματοποιείται αυθόρμητα από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα και συνεχίζεται έως ότου επιτευχθεί θερμική ισορροπία, δηλαδή έως ότου οι θερμοκρασίες των σωμάτων εξισωθούν (Χαλκιά, 2012). Η κατεύθυνση της αυθόρμητης μεταφοράς θερμότητας καθορίζεται από τη θερμοκρασία των σωμάτων και όχι από τη συνολική ποσότητα ενέργειας που αυτά περιέχουν. Έτσι, ένα σώμα μπορεί να μεταφέρει θερμότητα σε ένα άλλο ακόμη και αν διαθέτει μικρότερη συνολική ενέργεια, αρκεί η θερμοκρασία του να είναι υψηλότερη (Hewitt, 2018).

Είναι σημαντικό να διευκρινιστεί ότι η θερμότητα δεν αποτελεί ιδιότητα που «περιέχεται» στην ύλη. Τα σώματα δεν αποθηκεύουν θερμότητα· αντίθετα διαθέτουν εσωτερική ενέργεια. Η εσωτερική ενέργεια είναι το σύνολο όλων των μορφών

ενέργειας που υπάρχουν στο εσωτερικό ενός σώματος και περιλαμβάνει τη μεταφορική κινητική ενέργεια των μορίων που κινούνται και συγκρούονται μεταξύ τους, την περιστροφική κινητική ενέργεια των μορίων, καθώς και την ενέργεια που σχετίζεται με τις δονήσεις των ατόμων στο εσωτερικό των μορίων. Επιπλέον, υπάρχει δυναμική ενέργεια που οφείλεται στις δυνάμεις αλληλεπίδρασης μεταξύ των μορίων. Όλες αυτές οι μορφές ενέργειας συνθέτουν την εσωτερική ενέργεια ενός σώματος (Hewitt, 2018).

Κατά τη μεταφορά θερμότητας σε ένα σώμα, η ενέργεια αυτή μπορεί να αυξήσει την κινητική ενέργεια των μορίων του, γεγονός που οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας του. Ωστόσο, κατά την αλλαγή φάσης, η ενέργεια που μεταφέρεται ως θερμότητα αξιοποιείται κυρίως για τη μεταβολή της δυναμικής ενέργειας των σωματιδίων και την υπερνίκηση των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων, χωρίς να μεταβάλλεται η θερμοκρασία. Με τον τρόπο αυτό πραγματοποιείται η αλλαγή φάσης, όπως για παράδειγμα κατά την τήξη ή τον βρασμό, χωρίς να μεταβάλλεται η θερμοκρασία του σώματος. Η ενέργεια που απαιτείται για τη μεταβολή αυτή ονομάζεται λανθάνουσα θερμότητα (Χαλκιά, 2012).

Όταν ένα σώμα απορροφά θερμότητα, η εσωτερική του ενέργεια αυξάνεται, ενώ όταν αποβάλλει θερμότητα, η εσωτερική του ενέργεια μειώνεται. Η ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται ως θερμότητα εξαρτάται, μεταξύ άλλων, από τη μάζα του σώματος, το υλικό από το οποίο αποτελείται και τη μεταβολή της θερμοκρασίας του. Για παράδειγμα, ένα μεγάλο δοχείο ζεστού νερού μπορεί να μεταφέρει μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας σε ένα ψυχρότερο σώμα σε σύγκριση με ένα μικρό φλιτζάνι νερού της ίδιας θερμοκρασίας, επειδή περιέχει μεγαλύτερη συνολική εσωτερική ενέργεια (Hewitt, 2018).

Η θερμότητα, ως ποσότητα ενέργειας που μεταφέρεται λόγω διαφοράς θερμοκρασίας, μετριέται στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων σε τζάουλ (J). Παράλληλα, χρησιμοποιείται συχνά και η μονάδα θερμίδα (cal), η οποία ορίζεται ως η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία ενός γραμμαρίου νερού κατά έναν βαθμό Κελσίου. Στον τομέα της διατροφής χρησιμοποιείται συνήθως η χιλιοθερμίδα (kcal), η οποία αντιστοιχεί σε 1.000 θερμίδες και χρησιμοποιείται για την έκφραση της ενέργειας που παρέχουν τα τρόφιμα στον οργανισμό μέσω μεταβολικών διεργασιών (Hewitt, 2018).

Ένα σημαντικό φυσικό μέγεθος που σχετίζεται με τη θερμική συμπεριφορά των υλικών είναι η ειδική θερμότητα. Η ειδική θερμότητα ενός σώματος ορίζεται ως η ποσότητα θερμότητας που απαιτείται για να αυξηθεί η θερμοκρασία μιας μονάδας μάζας του σώματος κατά έναν βαθμό Κελσίου. Διαφορετικά σώματα παρουσιάζουν διαφορετική μεταβολή θερμοκρασίας όταν μεταφέρεται σε ίσες μάζες τους η ίδια ποσότητα ενέργειας. Για παράδειγμα, το νερό έχει μεγαλύτερη ειδική θερμότητα από τον σίδηρο, γεγονός που σημαίνει ότι απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας για να αυξηθεί η θερμοκρασία του κατά τον ίδιο βαθμό. Για τον λόγο αυτό, για ίσες μάζες και υπό τον ίδιο ρυθμό μεταφοράς ενέργειας, το νερό θερμαίνεται και ψύχεται πιο αργά σε σύγκριση με πολλά στερεά υλικά (Hewitt, 2018). Η ειδική θερμότητα μπορεί να θεωρηθεί ως ένα είδος «θερμικής αδράνειας», δηλαδή ως ένα μέτρο της αντίστασης ενός σώματος στη μεταβολή της θερμοκρασίας του. Όσο μεγαλύτερη είναι η ειδική

θερμότητα ενός σώματος, τόσο μεγαλύτερη ποσότητα θερμότητας απαιτείται για να μεταβληθεί η θερμοκρασία του. Επομένως, σώματα με μεγάλη ειδική θερμότητα μπορούν να αυξάνουν την εσωτερική τους ενέργεια χωρίς να παρουσιάζουν μεγάλες μεταβολές στη θερμοκρασία τους, γεγονός που έχει ιδιαίτερη σημασία τόσο σε φυσικά φαινόμενα όσο και σε πολλές τεχνολογικές εφαρμογές (Hewitt, 2018).

1.3 Επιστημονικό περιεχόμενο για τους τρεις τρόπους διάδοσης της θερμότητας

Τα φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας παρατηρούνται σε μακροσκοπικά συστήματα που δεν έχουν φτάσει σε θερμική ισορροπία. Όταν σώματα ή συστήματα διαφορετικής θερμοκρασίας μπορούν να ανταλλάξουν ενέργεια, πραγματοποιείται αυθόρμητη μεταφορά ενέργειας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο μέσω αγωγής, ρευμάτων μεταφοράς ή με τη μορφή ακτινοβολίας (Βαλκάνου, 2023).

i) Διάδοση με αγωγή

Η αγωγή αποτελεί τρόπο διάδοσης της θερμότητας, κατά τον οποίο η ενέργεια μεταφέρεται από σωματίδια/μόρια με μεγαλύτερη κινητική ενέργεια προς γειτονικά σωματίδια/μόρια με μικρότερη κινητική ενέργεια, λόγω των μεταξύ τους αλληλεπιδράσεων. Η αγωγή μπορεί να πραγματοποιηθεί σε στερεά, υγρά και αέρια (Βαλκάνου, 2023). Στα υγρά και τα αέρια η αγωγή οφείλεται στις συγκρούσεις και τη διάχυση των μορίων κατά την τυχαία κίνησή τους, ενώ στα στερεά η αγωγή πραγματοποιείται μέσω των αλληλεπιδράσεων και των ταλαντώσεων των δομικών σωματιδίων του πλέγματος και, ειδικά στα μέταλλα, συμβάλλουν σημαντικά τα ελεύθερα ηλεκτρόνια. Βασική προϋπόθεση για την αγωγή είναι η ύπαρξη διαφοράς θερμοκρασίας στο σώμα. Όταν κάποια περιοχή έχει υψηλότερη θερμοκρασία, η μεγαλύτερη κινητική ενέργεια των μορίων της μεταφέρεται στα γειτονικά μόρια μέχρι να εξισωθεί η θερμοκρασία σε όλο το σώμα (Βαλκάνου, 2023).

Τα υλικά δεν άγουν τη θερμότητα με την ίδια ευκολία. Ως θερμική αγωγιμότητα ορίζεται η χαρακτηριστική ιδιότητα των υλικών που προσδιορίζει την ευκολία ή τη δυσκολία με την οποία διαδίδεται η θερμότητα στο εσωτερικό τους. Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας, ο οποίος συνήθως συμβολίζεται με k, εκφράζει ποσοτικά τη θερμική αγωγιμότητα κάθε υλικού και είναι χαρακτηριστικός κάθε υλικού. Υλικά με υψηλό συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας, όπως τα μέταλλα, θεωρούνται καλοί αγωγοί, ενώ υλικά με χαμηλό συντελεστή, όπως το ξύλο, το γυαλί ή το πλαστικό, θεωρούνται κακοί αγωγοί (Βαλκάνου, 2023). Η αγωγιμότητα ενός στερεού σώματος εξαρτάται από τη μοριακή ή ατομική του δομή και ειδικά από τον αριθμό των «χαλαρά» συνδεδεμένων ηλεκτρονίων. Τα μέταλλα διαθέτουν πολλά τέτοια ηλεκτρόνια, με αποτέλεσμα η ενέργεια να διαχέεται εύκολα, με τους καλύτερους αγωγούς να είναι ο άργυρος, ο χαλκός, και το αλουμίνιο (Hewitt, 2018). Χαρακτηριστικό παράδειγμα από την καθημερινότητα, αποτελούν τα μεταλλικά μαγειρικά σκεύη, όπως οι κατσαρόλες και τα τηγάνια, τα οποία διαθέτουν πλαστικά ή ξύλινα χερούλια. Κατά τη διάρκεια του μαγειρέματος, το μεταλλικό μέρος του σκεύους θερμαίνεται γρήγορα, επειδή τα

μέταλλα είναι καλοί αγωγοί της θερμότητας. Αντίθετα, στα πλαστικά ή ξύλινα χερούλια η θερμότητα μεταφέρεται με αργότερο ρυθμό, λειτουργώντας πρακτικά ως μονωτικά υλικά και προστατεύοντας έτσι τον χρήστη από εγκαύματα (Καριώτογλου, 2006). Επίσης, το μαλλί, το ξύλο, η πολυστερίνη και το χαρτί είναι κακοί αγωγοί, όπως και τα περισσότερα υγρά και αέρια. Για παράδειγμα, το χιόνι λειτουργεί ως μονωτικό, μειώνοντας τον ρυθμό απώλειας ενέργειας από το έδαφος ή τις κατασκευές προς το ψυχρότερο περιβάλλον (Hewitt, 2018).

ii) Διάδοση με ρεύματα μεταφοράς

Ρεύματα μεταφοράς μπορούν να δημιουργηθούν μόνο στα ρευστά (υγρά και αέρια). Στα υγρά και τα αέρια η θερμότητα διαδίδεται κυρίως μέσω της μακροσκοπικής κίνησης του ίδιου του ρευστού. Όταν μια περιοχή του ρευστού θερμαίνεται, το ρευστό διαστέλλεται και η πυκνότητά του μειώνεται. Το λιγότερο πυκνό θερμό ρευστό ανέρχεται λόγω της άνωσης, ενώ το πυκνότερο ψυχρό ρευστό κατέρχεται, δημιουργώντας κυκλοφορία. Στην ατμόσφαιρα εμφανίζονται επίσης ρεύματα μεταφοράς, τα οποία συμβάλλουν σημαντικά στη διαμόρφωση των καιρικών φαινομένων. Όταν μια μάζα αέρα θερμαίνεται, διαστέλλεται και η πυκνότητά της μειώνεται σε σχέση με τον γύρω αέρα. Έτσι, κινείται προς υψηλότερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Η ανοδική αυτή κίνηση συνεχίζεται μέχρι το σημείο όπου η πυκνότητα του θερμού αέρα εξισωθεί με την πυκνότητα του περιβάλλοντος αέρα, οπότε και σταματά να ανυψώνεται (Βαλκάνου, 2023· Hewitt, 2018). Ρεύματα μεταφοράς παρατηρούνται σε καθημερινά φαινόμενα, όπως η λειτουργία των αερόστατων, ο καπνός από τη φωτιά, η κεντρική θέρμανση και τα ψυγεία. Στα αερόστατα, ο αέρας στο εσωτερικό τους θερμαίνεται, διαστέλλεται και αποκτά μικρότερη πυκνότητα από τον ψυχρότερο εξωτερικό αέρα. Η άνωση που ασκείται στο αερόστατο μπορεί τότε να υπερνικήσει το συνολικό βάρος του, με αποτέλεσμα αυτό να ανέρχεται. Στον καπνό της φωτιάς, ο θερμός αέρας που παράγεται ανυψώνεται και μεταφέρει μαζί του τα σωματίδια του καπνού. Στα συστήματα κεντρικής θέρμανσης, ο θερμός αέρας ανεβαίνει ενώ ο ψυχρός κατεβαίνει, δημιουργώντας κυκλοφορία που θερμαίνει σταδιακά τον χώρο. Αντίστοιχα, στα ψυγεία αναπτύσσονται ρεύματα μεταφοράς λόγω διαφορών θερμοκρασίας, με τον ψυχρό αέρα να κατέρχεται και τον θερμότερο να ανέρχεται, εξασφαλίζοντας την ψύξη του εσωτερικού χώρου (Καριώτογλου, 2006).

iii) Διάδοση με τη μορφή ακτινοβολίας

Η ακτινοβολία είναι η μεταφορά ενέργειας με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων και δεν απαιτεί την ύπαρξη υλικού μέσου για τη διάδοση της ενέργειας. Όλα τα σώματα με θερμοκρασία μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν (0 K) εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία. Η εκπομπή, η απορρόφηση και η ανάκλαση της ακτινοβολίας εξαρτώνται από τη θερμοκρασία, το υλικό, τα χαρακτηριστικά της επιφάνειας και το μήκος κύματος (Βαλκάνου, 2023). Ένα σώμα που βρίσκεται σε ισορροπία με το περιβάλλον διατηρεί σταθερή θερμοκρασία, καθώς η ποσότητα ενέργειας που εκπέμπει ισούται με την ποσότητα που απορροφά. Αντίθετα, όταν εκπέμπει περισσότερη ενέργεια από όση απορροφά, η θερμοκρασία του μειώνεται. Παραδείγματα θερμικής ακτινοβολίας

αποτελούν η ενέργεια που φτάνει στη Γη από τον Ήλιο και η ακτινοβολία που εκπέμπουν θερμά σώματα, όπως οι ηλεκτρικές θερμάστρες. (Καριώτογλου, 2006).

Κεφάλαιο 2ο: Ιδέες μαθητών/τριών για την έννοια της θερμότητας και τους μηχανισμούς διάδοσής της

Το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στις εναλλακτικές ιδέες των μαθητών/τριών σχετικά με τη θερμότητα και τους μηχανισμούς διάδοσής της. Η μελέτη των εναλλακτικών ιδεών των μαθητών/τριών σχετικά με τη θερμότητα έχει αποτελέσει σημαντικό πεδίο έρευνας στη διδακτική των ΦΕ (Wong et al., 2014). Οι ιδέες αυτές προκύπτουν σε μεγάλο βαθμό από τις καθημερινές εμπειρίες, τη γλωσσική χρήση της έννοιας της θερμότητας και πιθανώς από προηγούμενη διδασκαλία (Χαλκιά, 2012). Αρχικά, στο εν λόγω κεφάλαιο γίνεται αναφορά σε γενικές εναλλακτικές ιδέες για την έννοια της θερμότητας και στη συνέχεια σε ιδέες που σχετίζονται ειδικότερα με τη διάδοση της θερμότητας, τους καλούς και κακούς αγωγούς και τα ρεύματα μεταφοράς. Η παρουσίαση αυτή αξιοποιείται ως θεωρητικό υπόβαθρο για την ερμηνεία των μαθητικών αναπαραστάσεων που αναλύονται στην εργασία.

2.1 Εναλλακτικές ιδέες μαθητών/τριών για την έννοια της θερμότητας

Στη βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί πολυάριθμες εναλλακτικές ιδέες μαθητών/τριών σχετικά με την έννοια της θερμότητας και των θερμικών φαινομένων. Κοινό χαρακτηριστικό πολλών από αυτές τις αντιλήψεις είναι ότι η θερμότητα δεν αντιμετωπίζεται ως διαδικασία μεταφοράς ενέργειας, σύμφωνα με την επιστημονική θεώρηση, αλλά ως κάτι που διαθέτει υλική υπόσταση και μπορεί να αποθηκεύεται, να μετακινείται ή να περιέχεται στα σώματα (Καριώτογλου, 2006· Χαλκιά, 2012).

Η Χαλκιά (2012) επισημαίνει ως σημαντικότερες εναλλακτικές αντιλήψεις τις εξής:

1. Η θερμότητα θεωρείται ως μια ρευστή ουσία, παρόμοια με τον αέρα, τον καπνό ή τον ατμό
2. Η θερμότητα ταυτίζεται με ένα θερμό σώμα ή ουσία, και μάλιστα όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος (ποσότητα) του σώματος, τόσο περισσότερη θερμότητα περικλείει
3. Η θερμότητα θεωρείται ότι εκπέμπεται από μια θερμική πηγή, η οποία γίνεται αντιληπτή μέσω της υψηλής θερμοκρασίας της
4. Η θερμότητα και το κρύο αντιμετωπίζονται ως δύο διαφορετικές οντότητες.

Πιο αναλυτικά, μία από τις συχνότερες εναλλακτικές αντιλήψεις των μαθητών/τριών είναι ότι η θερμότητα αντιμετωπίζεται ως μια υλική ή ρευστή ουσία, παρόμοια με τον αέρα, τον καπνό ή τον ατμό (Χαλκιά, 2012). Ήδη από την ηλικία των 2–3 ετών οι όροι “heat” και “hot” φαίνεται να αποτελούν μέρος του λεξιλογίου των παιδιών, ενώ η συστηματικότερη εννοιολογική τους σύνδεση με τη θερμότητα ενός σώματος εμφανίζεται αργότερα, περίπου στην ηλικία των 8–9 ετών (Erickson & Tiberghien, 1985). Στην πρωτοβάθμια εκπαίδευση, κυρίως μεταξύ 6 και 9 ετών, οι μαθητές/τριες συχνά θεωρούν ότι η θερμότητα μπορεί να μετακινείται εύκολα, ακόμη και να επηρεάζεται από τη βαρύτητα. Στην ηλικία των 8-12 ετών, τείνουν να συνδέουν τη θερμότητα με ζωντανά αντικείμενα ή πηγές θερμότητας, όπως ο ήλιος, και

παρατηρούν τις αλλαγές φάσης που συμβαίνουν. Στα 12-16 έτη, περιγράφουν τη θερμότητα ως ένα «ζεστό σώμα» ή υλικό που προκύπτει από επαφή με μια πηγή θερμότητας, χωρίς να αναφέρονται στην ενεργειακή της φύση (Erickson & Tiberghien, 1985). Για τον λόγο αυτό, οι μαθητές/τριες θεωρούν ότι η θερμότητα εισέρχεται στα αντικείμενα όταν αυτά θερμαίνονται ή απομακρύνεται από αυτά όταν ψύχονται. Στο πλαίσιο αυτής της αντίληψης, η θέρμανση ενός σώματος αποδίδεται στη μεταφορά μιας υλικής οντότητας από το θερμότερο προς το ψυχρότερο σώμα (Χαλκιά, 2012).

Μία επιπλέον διαδεδομένη εναλλακτική αντίληψη μαθητών/τριών είναι ότι η θερμότητα και το κρύο αποτελούν δύο διαφορετικές οντότητες. Η αντίληψη αυτή καταγράφεται σε ένα ευρύ ηλικιακό φάσμα (Clough & Driver, 1985· Kesidou & Duit, 1993). Στις μικρότερες ηλικίες, η αντίληψη αυτή εκφράζεται και ως ύπαρξη δύο μορφών θερμότητας, της «ζεστής» και της «κρύας» θερμότητας (Erickson & Tiberghien, 1985). Στο πλαίσιο αυτό, οι μαθητές/τριες θεωρούν ότι κάθε σώμα περιέχει ένα μείγμα «θερμότητας» και «κρύου», του οποίου η αναλογία καθορίζει τη θερμοκρασία του. Έτσι, το «κρύο» δεν αντιμετωπίζεται ως κατάσταση χαμηλής θερμοκρασίας, αλλά ως ξεχωριστή φυσική οντότητα με ιδιότητες παρόμοιες με εκείνες της θερμότητας.

Από επιστημονική σκοπιά, ωστόσο, η θερμότητα δεν αποτελεί ουσία ούτε ιδιότητα που περιέχεται στα σώματα, αλλά ενέργεια που μεταφέρεται λόγω διαφοράς θερμοκρασίας από ένα θερμότερο προς ένα ψυχρότερο σώμα ή σύστημα. Αντίστοιχα, το «κρύο» δεν συνιστά φυσική οντότητα, αλλά δηλώνει κατάσταση χαμηλότερης θερμοκρασίας. Η θερμοκρασία είναι εντατικό μέγεθος, καθώς δεν εξαρτάται από την ποσότητα της ύλης, και σε μικροσκοπικό επίπεδο συνδέεται με την κινητική συμπεριφορά των δομικών σωματιδίων του σώματος (Χαλκιά, 2012).

Σύμφωνα με τους Wong et al. (2014), δεν υπάρχει απόλυτη συμφωνία στη βιβλιογραφία σχετικά με το αν η θερμότητα ορίζεται καταλληλότερα ως «διαδικασία μεταφοράς ενέργειας» ή ως «μορφή ενέργειας». Για παράδειγμα, η IUPAC ορίζει τη θερμότητα ως «ενέργεια που μεταφέρεται από ένα θερμότερο σε ένα ψυχρότερο σώμα λόγω διαφορών θερμοκρασίας». Ωστόσο, ο Romer (2001) προτιμά να μην αντιμετωπίζεται η θερμότητα ως ουσιαστικό. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, είναι προτιμότερο η θερμότητα να περιγράφεται ως διαδικασία μεταφοράς ενέργειας, δηλαδή ως ενέργεια που μεταφέρεται μεταξύ σωμάτων και όχι ως στατική οντότητα, ώστε να περιορίζεται η τάση να νοείται η θερμότητα ως στατική οντότητα ή ως κάτι που περιέχεται στα σώματα (Wong et al., 2014). Αξίζει να αναφερθεί ότι οι διαφορετικές αντιλήψεις σχετικά με τη θερμότητα ταξινομούνται σε πέντε βασικές κατηγορίες: «εντοπισμένη στο αντικείμενο», «οντολογική κατηγορία», «κίνηση», «αιτία και αποτέλεσμα» και «κατάσταση». Η ταξινόμηση αυτή αναδεικνύει ότι οι αντιλήψεις για τη θερμότητα δεν εξαρτώνται μόνο από τις απαντήσεις των μαθητών/τριών, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο οι ερευνητές/τριες ορίζουν και μελετούν την έννοια της θερμότητας (Wong et al., 2014).

Στη βιβλιογραφία παρατηρείται επίσης, εκτεταμένη σύγχυση μεταξύ των εννοιών της θερμότητας και της θερμοκρασίας, οι οποίες συχνά αντιμετωπίζονται ως ταυτόσημες. Η σύγχυση αυτή φαίνεται να σχετίζεται τόσο με τη γλωσσική ομοιότητα

των όρων όσο και με τη δυσκολία κατανόησης του εννοιολογικού τους περιεχομένου (Καρανίκας, 1996· Harrison et al., 1999· Tiberghien, 1980). Ως αποτέλεσμα, οι μαθητές/τριες χρησιμοποιούν τους όρους εναλλακτικά, χωρίς να διακρίνουν τις διαφορές τους. Επιπλέον, πολλοί μαθητές/τριες αντιλαμβάνονται τη θερμοκρασία ως μέτρο της ποσότητας θερμότητας που περιέχει ένα σώμα (Driver et al., 2014· Kesidou & Duit, 1993). Η αντίληψη αυτή συνδέεται με την ιδέα ότι η θερμότητα αποτελεί μια μορφή ουσίας που αποθηκεύεται στα σώματα (Harrison et al., 1999). Στο πλαίσιο αυτό, οι μαθητές/τριες θεωρούν ότι η θερμοκρασία εξαρτάται από το μέγεθος ή τη μάζα του σώματος και ότι μεγαλύτερα σώματα περιέχουν περισσότερη «θερμότητα» ή «κρύο», γεγονός που οδηγεί στην πεποίθηση ότι έχουν και υψηλότερη ή χαμηλότερη θερμοκρασία.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι οι παραπάνω αντιλήψεις των μαθητών παρουσιάζουν σημαντικές ομοιότητες με ιστορικές επιστημονικές θεωρίες, όπως η θεωρία του θερμικού ρευστού ή παλαιότερες φιλοσοφικές προσεγγίσεις που αντιμετώπιζαν το θερμό και το ψυχρό ως αντίθετες ουσίες. Όπως παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο, τον 19ο αιώνα υπήρχαν δύο ανταγωνιστικές θεωρίες για τη θερμότητα: η «θερμιδική θεωρία» και η «κινητική» θεωρία (Chang, 2004). Οι εναλλακτικές ιδέες ότι «η θερμότητα είναι ουσία» και «η θερμότητα είναι μορφή κίνησης» μπορούν να συνδεθούν με αυτές τις ιστορικές θεωρίες (Wong et al., 2014). Το γεγονός αυτό αναδεικνύει τη δυσκολία διάκρισης των εννοιών της θερμότητας και της θερμοκρασίας, καθώς και τη βαθιά ριζωμένη φύση των σχετικών παρανοήσεων (Χαλκιά, 2012).

2.2 Εναλλακτικές ιδέες μαθητών/τριών για τη διάδοση της θερμότητας

Στη βιβλιογραφία έχουν καταγραφεί ποικίλες εναλλακτικές αντιλήψεις σχετικά με τους τρόπους διάδοσης της θερμότητας σε ολόκληρο το φάσμα της εκπαίδευσης, από το Δημοτικό έως και το Λύκειο (Χαλκιά, 2012· Kesidou & Duit, 1993). Συγκεκριμένα, οι μαθητές/τριες αντιλαμβάνονται συχνά τη θερμότητα ως μια υλική, ρευστή ουσία και, υπό αυτό το πρίσμα, περιγράφουν τη διάδοσή της σαν κάτι που «εισέρχεται» ή «εξέρχεται» από τα διάφορα σώματα με διαφορετική ευκολία. Στο ίδιο πλαίσιο, τείνουν να αποδίδουν στα ίδια τα υλικά την ικανότητα να «προσελκύουν» ή να «συγκρατούν» τη θερμότητα, προσπαθώντας μέσα από αυτές τις διαισθητικές παραδοχές να κατανοήσουν τους εμπλεκόμενους φυσικούς μηχανισμούς (Χαλκιά, 2012· Kesidou & Duit, 1993).

Σύμφωνα με την Χαλκιά (2012), εντοπίζονται τρία βασικά νοητικά σχήματα σχετικά με τη διάδοση της θερμότητας:

1. **Η «δύναμη» ή η «αδυναμία» της θερμότητας**

Για παράδειγμα, οι μαθητές/τριες, θεωρούν ότι το ξύλο δεν θερμαίνεται επαρκώς όταν έρθει σε επαφή με μια θερμή πλάκα, επειδή η θερμότητα της πλάκας δεν είναι αρκετά «ισχυρή» ώστε να περάσει μέσα στο ξύλο.

2. **Τα υλικά ως σώματα που «προσελκύουν», «συγκρατούν» ή «αφήνουν» τη θερμότητα να περάσει**

Το δεύτερο νοητικό σχήμα σχετίζεται με τις ιδιότητες των υλικών. Οι μαθητές/τριες πιστεύουν ότι τα μεταλλικά αντικείμενα θερμαίνονται πιο γρήγορα σε σχέση με τα ξύλινα ή πλαστικά, επειδή έχουν την ιδιότητα ως υλικά να προσελκύουν και να διατηρούν τη θερμότητα.

3. **Η διαφορετική «ικανότητα» των σωμάτων να μεταφέρουν θερμότητα**

Το τρίτο μοντέλο αφορά την «ικανότητα» των ίδιων των σωμάτων να προσελκύουν ή να μεταφέρουν θερμότητα, όπως στην αντίληψη ότι το ξύλο δεν έχει τη δυνατότητα να μεταφέρει τη θερμότητα από το σημείο επαφής σε ολόκληρη τη μάζα του (Χαλκιά, 2012).

Επιπλέον, οι μαθητές/τριες φαίνεται επίσης να διαθέτουν μια διαισθητική κατανόηση της διάδοσης της θερμότητας, βασισμένη στις καθημερινές τους εμπειρίες. Για παράδειγμα, στην ερώτηση *«Πώς θερμαίνει ένα καλοριφέρ ένα δωμάτιο;»*, ένας δεκατριάχρονος απάντησε: *«Η θερμότητα βγαίνει από το καλοριφέρ σαν καπνός που γεμίζει όλο το δωμάτιο»* (Tiberghien, 1980). Παρομοίως, σε ερώτηση για το *«Πώς η θερμότητα ταξιδεύει από το ένα μέρος στο άλλο;»* ένας μαθητής περιέγραψε: *«Η περισσότερη θερμότητα μεταφέρεται μέσω ακτίνων, ενώ άλλα είδη θερμότητας, όπως η φωτιά, έχουν διαφορετικό τρόπο μετάδοσης. Το αέριο θερμαίνει το νερό, το οποίο ρέει μέσα από σωλήνες σε ένα δοχείο. Οι ακτίνες που προέρχονται από το ζεστό νερό είναι πολύ ισχυρές γιατί είναι πρόσφατες, ενώ οι ακτίνες του ήλιου έχουν ταξιδέψει πολύ καιρό μέχρι να φτάσουν στη Γη, παρόλο που αρχικά ήταν ισχυρότερες από αυτές του νερού στον λέβητα»* (Gilbert & Watts, 1983). Το παράδειγμα αυτό δείχνει ότι οι μαθητές/τριες αναπτύσσουν διάφορες διαισθητικές αντιλήψεις για τους μηχανισμούς μεταφοράς θερμότητας. Σε κάποιες περιπτώσεις θεωρούν ότι απαιτείται κάποιο ενδιάμεσο μέσο, όπως ο αέρας, για τη μεταφορά της θερμότητας, ενώ σε άλλες πιστεύουν ότι η θερμότητα μπορεί να κινείται απευθείας, όπως στην περιγραφή των «ακτίνων θερμότητας». Τέλος, οι απαντήσεις αυτές δείχνουν ότι οι μαθητές/τριες χρησιμοποιούν καθημερινές εικόνες, όπως ο καπνός, οι ακτίνες ή το «ταξίδι» για την διάδοση της θερμότητας (Χαλκιά, 2012).

Συνολικά, οι έρευνες δείχνουν ότι οι μαθητές/τριες μπορεί να αναγνωρίζουν σε ορισμένες περιπτώσεις την κατεύθυνση της μεταφοράς ενέργειας από θερμότερα προς ψυχρότερα σώματα, αλλά συχνά δυσκολεύονται να εξηγήσουν τους μηχανισμούς μέσω των οποίων πραγματοποιείται αυτή η διαδικασία. (Erickson & Tiberghien, 1985).

2.3 Εναλλακτικές ιδέες μαθητών/τριών για τους καλούς και τους κακούς αγωγούς της θερμότητας

Οι Lewis και Linn (1994), μελετώντας τις αντιλήψεις μαθητών/τριών δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης και ενηλίκων για τις έννοιες της θερμότητας και της θερμοκρασίας, κατέγραψαν ορισμένες εναλλακτικές αντιλήψεις που δεν θεωρούνται αναμενόμενες για μαθητές/τριες αυτών των ηλικιών.

Μία βασική αντίληψη ήταν ότι τα μέταλλα είναι από τη φύση τους «κρύα» και ότι έχουν την ικανότητα να προσελκύουν, να απορροφούν ή να συγκρατούν το κρύο. Η αντίληψη αυτή συνδεόταν με την αίσθηση ψύχους που προκαλεί η επαφή με μεταλλικά αντικείμενα και οδηγούσε τους μαθητές/τριες να θεωρούν ότι τα μέταλλα, και ιδιαίτερα το αλουμινόχαρτο, είναι κατάλληλα για να διατηρούν κρύα τα αντικείμενα. Παράλληλα, απέδιδαν στα μέταλλα την ικανότητα να προσελκύουν ή να συγκρατούν και τη θερμότητα, θεωρώντας ότι μπορούν να διατηρούν τόσο τα θερμά όσο και τα κρύα αντικείμενα στην αρχική τους κατάσταση.

Μία δεύτερη αντίληψη ήταν ότι οι μονωτές άγουν γρήγορα τη θερμότητα ή την απορροφούν και την παγιδεύουν. Οι μαθητές/τριες συνέδεαν συχνά τους αγωγούς με τη διατήρηση των αντικειμένων κρύων και τους μονωτές με τη διατήρησή τους ζεστών, χωρίς να αναγνωρίζουν ότι ένα υλικό με μικρή θερμική αγωγιμότητα περιορίζει τη μεταφορά ενέργειας και προς τις δύο κατευθύνσεις.

Τέλος, αρκετοί/ές μαθητές/τριες απέδιδαν στο μαλλί την ενεργητική ιδιότητα να ζεσταίνει ή να παράγει θερμότητα. Για τον λόγο αυτό το θεωρούσαν κατάλληλο για τη διατήρηση θερμών αντικειμένων, αλλά ακατάλληλο για τη διατήρηση κρύων αντικειμένων. Τα ευρήματα αυτά δείχνουν ότι οι μαθητές/τριες συχνά συγχέουν την αίσθηση που προκαλεί η επαφή με ένα υλικό με τη θερμοκρασία και τη θερμική αγωγιμότητά του και αποδίδουν στα υλικά ενεργητικές ιδιότητες σχετικές με το «ζέσταμα» ή το «κρύωμα» των σωμάτων.

Αξίζει να αναφερθεί ότι οι Lewis και Linn (1994) στη μελέτη τους χρησιμοποιούν τον όρο “θερμικοί μονωτές” για τα υλικά που παρουσιάζουν πολύ μικρή θερμική αγωγιμότητα. Οι ίδιοι διευκρινίζουν ότι όλα τα υλικά επιτρέπουν σε κάποιον βαθμό τη μεταφορά θερμότητας με αγωγή και ότι οι αγωγοί και οι μονωτές εντάσσονται σε ένα συνεχές θερμικής αγωγιμότητας. Οι ασυνεπείς τρόποι με τους οποίους οι μαθητές/τριες χρησιμοποιούσαν τους δύο όρους υποδηλώνουν ότι δεν είχαν κατανοήσει επαρκώς το συνεχές της θερμικής αγωγιμότητας και ότι έτειναν να αντιμετωπίζουν τα υλικά ως δύο διακριτές κατηγορίες: τους αγωγούς και τους μονωτές.

Αντίστοιχα ευρήματα έχουν αναφερθεί και σε άλλες έρευνες. Οι Clough και Driver (1985) επισημαίνουν ότι οι μαθητές/τριες δυσκολεύονται να κατανοήσουν την αγωγιμότητα αγγίζοντας ένα κρύο σώμα. Στην προσπάθειά τους να εξηγήσουν τις διαφορές στην αγωγιμότητα, εστιάζουν σε παρατηρήσιμες ιδιότητες των υλικών, όπως το πάχος ή η σκληρότητα (Kesidou & Duit, 1993). Τέλος, συχνά κρίνουν ένα σώμα ως καλό αγωγό με βάση την ευκολία ή τη δυσκολία με την οποία θερμαίνεται εξωτερικά, σύμφωνα με την καθημερινή τους εμπειρία. Για παράδειγμα, παρατηρούν ότι τα γυάλινα αντικείμενα θερμαίνονται γρήγορα σε όλη την επιφάνειά τους και θεωρούν το γυαλί καλό αγωγό (Βαλκάνου, 2023· Driver et al., 2014).

2.4 Εναλλακτικές ιδέες για το φαινόμενο των ρευμάτων μεταφοράς

Στην έρευνα της Chiou (2013) εξετάστηκαν τα νοητικά μοντέλα τριάντα φοιτητών τμήματος Φυσικής σχετικά με τη διάδοση της θερμότητας μέσω ρευμάτων μεταφοράς. Οι φοιτητές συμμετείχαν σε συνεντεύξεις, στις οποίες κλήθηκαν να εξηγήσουν τον

τρόπο με τον οποίο θερμαίνεται ένα υγρό (νερό) μέσα σε ένα δοχείο όταν αυτό έρχεται σε επαφή με μια πηγή θερμότητας. Από τις απαντήσεις τους προέκυψαν επτά βασικά νοητικά μοντέλα, τα οποία αποτυπώνουν διαφορετικές αντιλήψεις για τον τρόπο με τον οποίο η θερμότητα διαδίδεται στο υγρό, και τα οποία είναι τα εξής:

- Σύμφωνα με το πρώτο μοντέλο, η θερμοκρασία είναι μεγαλύτερη στο τμήμα του υγρού που βρίσκεται πιο κοντά στην πηγή θερμότητας, ενώ μειώνεται προοδευτικά στα σημεία που απέχουν περισσότερο από αυτή.
- Το δεύτερο μοντέλο περιγράφει την αρχική δημιουργία ενός μικρού κυκλικού ρεύματος στον πυθμένα του δοχείου. Αυτό το ρεύμα αυξάνεται σταδιακά και κινείται προς την επιφάνεια του υγρού. Εντός του κυκλικού ρεύματος η θερμοκρασία παραμένει ίδια, ενώ εκτός αυτού η θερμοκρασία δεν μεταβάλλεται.
- Στο τρίτο μοντέλο, τα κυκλικά ρεύματα εμφανίζονται αμέσως μόλις ξεκινήσει η θέρμανση στον πυθμένα του υγρού. Τα ρεύματα λαμβάνουν θερμότητα από την πηγή και στη συνέχεια τη διανέμουν ομοιόμορφα σε ολόκληρο το υγρό, με αποτέλεσμα η θερμοκρασία να είναι ίδια σε όλο το υγρό.
- Το τέταρτο μοντέλο περιγράφει τα ρεύματα να λαμβάνουν θερμότητα από τον πυθμένα και να κινούνται προς τα πάνω, χωρίς να απελευθερώνουν θερμότητα κατά την άνοδό τους. Όταν φτάνουν στην κορυφή, αρχίζουν να βυθίζονται, απελευθερώνοντας θερμότητα καθ' οδόν προς τον πυθμένα. Ως αποτέλεσμα, η θερμοκρασία στην κορυφή του υγρού είναι η υψηλότερη.
- Το πέμπτο μοντέλο ακολουθεί την ίδια λογική με το προηγούμενο, με τη διαφορά ότι καθώς τα ρεύματα ανεβαίνουν προς την κορυφή, η θέρμανση συνεχίζεται στον πυθμένα του υγρού. Αυτό έχει ως συνέπεια το κάτω μέρος του δοχείου να παραμένει το θερμότερο, ενώ η κορυφή να είναι ελαφρώς ψυχρότερη, αλλά με θερμοκρασία υψηλότερη από το υπόλοιπο υγρό.
- Στο έκτο μοντέλο, μόλις ξεκινήσει η θέρμανση στο κάτω μέρος του δοχείου, δημιουργούνται ρεύματα σε αυτή την φάση. Μέσω αυτών, η θερμότητα μεταφέρεται από τον πυθμένα προς την επιφάνεια και έπειτα επιστρέφει προς τα κάτω. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, το κεντρικό τμήμα του υγρού παραμένει αμετάβλητο, καθώς τα ρεύματα επηρεάζουν μόνο την περιοχή γύρω από την κορυφή. Ως αποτέλεσμα, το κάτω μέρος έχει τη μεγαλύτερη θερμοκρασία, η κορυφή την αμέσως χαμηλότερη θερμοκρασία, ενώ το μεσαίο τμήμα παραμένει σταθερό.
- Τέλος, το έβδομο μοντέλο περιγράφει τα κυκλικά ρεύματα να σχηματίζονται με την έναρξη της θέρμανσης στο κάτω μέρος του δοχείου. Τα ρεύματα απορροφούν θερμότητα από την περιοχή αυτή και ανέρχονται προς την κορυφή, απελευθερώνοντας θερμότητα στις περιοχές από τις οποίες περνούν. Όταν φτάσουν στην κορυφή, αρχίζουν να κινούνται προς τη βάση του δοχείου, και κατά την κάθοδο απορροφούν θερμότητα από τα τμήματα που διασχίζουν. Ως συνέπεια, η θερμοκρασία παραμένει υψηλότερη στο κάτω μέρος του δοχείου, ενώ στην επιφάνεια η θερμοκρασία μειώνεται σταδιακά.

Συνολικά, τα νοητικά αυτά μοντέλα δείχνουν ότι οι φοιτητές/τριες διατύπωσαν διαφορετικές αντιλήψεις σχετικά με τη μεταφορά ενέργειας στο υγρό. Ειδικότερα, εντοπίστηκαν διαφορές ως προς την έναρξη και την εξέλιξη των ρευμάτων μεταφοράς, την κίνηση των μαζών του υγρού και τον τρόπο με τον οποίο θεωρούσαν ότι μεταφέρεται η ενέργεια στο εσωτερικό του (Μπελέφτα, 2025· Chiou, 2013)

Κεφάλαιο 3ο: Πολυτροπικότητα και μαθητικά σχέδια στις Φυσικές Επιστήμες

Έχοντας αναλύσει στο προηγούμενο κεφάλαιο το επιστημονικό περιεχόμενο των θερμικών φαινομένων και τις σχετικές εναλλακτικές ιδέες των μαθητών/τριών, κρίνεται απαραίτητο να εξεταστεί ο τρόπος με τον οποίο η επιστημονική γνώση αναπαρίσταται και νοηματοδοτείται μέσα από το πλαίσιο της κοινωνιοσημειωτικής προσέγγισης. Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται αρχικά η πολυτροπική φύση της επιστημονικής γνώσης και της μάθησης στις ΦΕ, αναδεικνύοντας τον ρόλο διαφορετικών σημειωτικών πόρων στη διαμόρφωση και την έκφραση των επιστημονικών εννοιών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη συνέχεια στο μαθητικό σχέδιο ως εργαλείο σκέψης και εξωτερίκευσης των ιδεών των μαθητών/τριών, το οποίο μπορεί να παρέχει ενδείξεις για τα νοητικά μοντέλα που διαμορφώνουν. Η θεωρητική αυτή προσέγγιση παρέχει το πλαίσιο για την ανάλυση των μαθητικών σχεδίων που αναλύθηκαν στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας σχετικά με τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι μαθητές/τριες εκφράζουν και μεταβάλλουν τις ιδέες τους σχετικά με τη διάδοση της θερμότητας.

3.1 Η πολυτροπικότητα στη διδασκαλία και μάθηση των Φυσικών Επιστημών

Η κατανόηση και η επικοινωνία της επιστημονικής γνώσης σε μία τάξη ΦΕ δεν πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω του γραπτού ή του προφορικού λόγου, αλλά μέσω ποικίλων σημειωτικών τρόπων, όπως οι εικόνες, τα διαγράμματα, τα σύμβολα, οι χειρονομίες, οι σωματικές κινήσεις, καθώς και η χρήση υλικών αντικειμένων σε δραστηριότητες που σχετίζονται με πειράματα και διερευνητικές διαδικασίες. Κάθε τρόπος διαθέτει διαφορετικές δυνατότητες νοηματοδότησης, ενώ το επιστημονικό νόημα διαμορφώνεται μέσα από τον συντονισμό, τη σύνδεση και τον μετασχηματισμό διαφορετικών αναπαραστάσεων. Επομένως, η διδασκαλία και η μάθηση στις ΦΕ θεωρούνται εγγενώς πολυτροπικές διαδικασίες (Danielsson et al., 2023· Tang, 2013· Tang et al., 2014· Xu et al., 2021).

Στο πλαίσιο αυτό, η πολυτροπικότητα δεν αφορά απλώς στην παράλληλη παρουσία διαφορετικών μορφών αναπαράστασης, αλλά στον τρόπο με τον οποίο αυτές αλληλεπιδρούν και συνδυάζονται κατά την οικοδόμηση του επιστημονικού νοήματος. Η ανάλυση της μαθησιακής διαδικασίας χρειάζεται, συνεπώς, να λαμβάνει υπόψη τόσο τις επιμέρους δυνατότητες κάθε σημειωτικού τρόπου όσο και τις μεταβάσεις που πραγματοποιούνται μεταξύ διαφορετικών τρόπων και αναπαραστάσεων (Tang, 2013· Tang et al., 2014).

Οι παραπάνω θεωρητικές θέσεις αποσαφηνίζονται τόσο μέσα από εμπειρικές μελέτες της πολυτροπικής νοηματοδότησης στην τάξη όσο και μέσα από αναλυτικά πλαίσια που επιτρέπουν τη συστηματική μελέτη της. Στο πλαίσιο μιας διδακτικής ενότητας επτά μαθημάτων για την έννοια της δύναμης, οι Danielsson et al. (2023) ανέλυσαν τον τρόπο με τον οποίο το επιστημονικό περιεχόμενο αναπαριστάται και

μετασχηματίζεται μέσω διαφορετικών σημειωτικών τρόπων σε μία τάξη Ε΄ Δημοτικού στη Σουηδία, με 27 μαθητές/τριες ηλικίας 10–11 ετών. Η διδακτική ενότητα επικεντρώθηκε στον τρίτο νόμο του Νεύτωνα και στα ζεύγη δυνάμεων δράσης–αντίδρασης και περιλάμβανε δραστηριότητες μέσω των οποίων οι μαθητές/τριες βίωναν σωματικά τα σχετικά φαινόμενα. Σε μία από αυτές προσπάθησαν να ευθυγραμμίσουν ένα σχοινί, στο κέντρο του οποίου είχε αναρτηθεί ένα βαρύ σώμα. Οι ερευνητές συνδύασαν την ανάλυση της συνολικής πορείας της διδακτικής ενότητας με τη λεπτομερή ανάλυση σύντομων επεισοδίων αλληλεπίδρασης. Με τον τρόπο αυτό εξέτασαν πώς η σωματική δράση, ο προφορικός και γραπτός λόγος και το σχέδιο χρησιμοποιήθηκαν και μετασχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια των μαθημάτων. Τα ευρήματα έδειξαν ότι το επιστημονικό περιεχόμενο αναπαρίσταται και μετασχηματίζεται μέσω διαφορετικών τρόπων. Ορισμένες αναπαραστάσεις λειτούργησαν ως ενδιάμεσα βήματα προς περισσότερο επιστημονικές εξηγήσεις, ενώ η πολυτροπική ενορχήστρωση του/της εκπαιδευτικού και οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μαθητών/τριών συνέβαλαν στην ανάπτυξη του συλλογισμού τους. Οι ερευνητές εντόπισαν ενδείξεις μάθησης τόσο ως προς το περιεχόμενο των δυνάμεων όσο και ως προς τους τρόπους έκφρασής του (Danielsson et al., 2023).

Η ανάγκη συστηματικής μελέτης τέτοιων πολυτροπικών διαδικασιών αναδεικνύεται και από τους Xu et al. (2021), οι οποίοι προτείνουν ένα πολυεπίπεδο πλαίσιο για την ανάλυση του πολυτροπικού συλλογισμού των μαθητών/τριών σε μακρο-, μεσο- και μικρο-χρονική κλίμακα. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει να συνδέονται οι λεπτομερείς αλληλεπιδράσεις και οι σημειωτικές επιλογές των μαθητών/τριών με την ευρύτερη εξέλιξη των δραστηριοτήτων και της μαθησιακής διαδικασίας. Κατά συνέπεια, οι αναπαραστάσεις δεν είναι σκόπιμο να εξετάζονται απομονωμένα, αλλά σε σχέση με τον τρόπο με τον οποίο διαφορετικοί σημειωτικοί τρόποι συντονίζονται και αλληλεπιδρούν μέσα στην τάξη.

3.2 Βασικές κοινωνικοσημειωτικές έννοιες και προσεγγίσεις

3.2.1 Βασικές κοινωνιοσημειωτικές έννοιες

Για τη συστηματική ανάλυση των πολυτροπικών αναπαραστάσεων είναι απαραίτητη η αποσαφήνιση ορισμένων βασικών εννοιών της κοινωνιοσημειωτικής προσέγγισης, όπως ο τρόπος, οι σημειωτικοί πόροι, οι δυνατότητες κάθε τρόπου, το πολυτροπικό σύνολο και οι διαδικασίες μετασχηματισμού του νοήματος.

Ο **τρόπος (mode)** αποτελεί ένα κοινωνικά και πολιτισμικά διαμορφωμένο σύστημα νοηματοδότησης και επικοινωνίας. Στην εκπαιδευτική διαδικασία οι τρόποι αυτοί μπορεί να περιλαμβάνουν τον προφορικό και τον γραπτό λόγο, τις εικόνες, τα διαγράμματα, τις χειρονομίες, τη σωματική δράση. Κάθε τρόπος διαθέτει ιδιαίτερες δυνατότητες και περιορισμούς ως προς τα νοήματα που μπορεί να αποδώσει (Kress, 2010). Οι δυνατότητες αυτές, οι οποίες περιγράφονται με τον όρο *modal affordances*, συνδέονται τόσο με τα υλικά χαρακτηριστικά κάθε τρόπου όσο και με τις κοινωνικά

και πολιτισμικά διαμορφωμένες συμβάσεις της χρήσης του (Jewitt et al., 2016· Kress, 2010).

Στενά συνδεδεμένη με την έννοια του τρόπου είναι η έννοια των **σημειωτικών πόρων** (**semiotic resources**). Οι σημειωτικοί πόροι αναφέρονται στις επιμέρους επιλογές που υπάρχουν μέσα σε κάθε τρόπο και αξιοποιούνται για την παραγωγή νοήματος. Για παράδειγμα, σε μια οπτική αναπαράσταση όπως ένα διάγραμμα δυνάμεων, οι μαθητές/τριες μπορούν να χρησιμοποιήσουν βέλη για να δείξουν την κατεύθυνση μιας δύναμης, λέξεις ή ετικέτες για την ονομασία των αντικειμένων και τη χωρική διάταξη των στοιχείων για να αποδώσουν τις μεταξύ τους σχέσεις. Αντίστοιχα, υλικά αντικείμενα, μοντέλα και πειραματικός εξοπλισμός μπορούν να λειτουργούν ως σημειωτικοί πόροι όταν αξιοποιούνται για την αναπαράσταση και την επικοινωνία επιστημονικών νοημάτων. Μέσα από αυτές τις επιλογές οι μαθητές/τριες εκφράζουν και οργανώνουν τις ιδέες τους σχετικά με τα επιστημονικά φαινόμενα (Jewitt et al., 2016).

Όταν δύο ή περισσότεροι τρόποι και οι αντίστοιχοι σημειωτικοί πόροι συντονίζονται σε μια ενιαία αναπαράσταση ή επικοινωνιακή πράξη, συγκροτούν ένα **πολυτροπικό σύνολο** (*multimodal ensemble*). Για παράδειγμα, ένα μαθητικό σχέδιο που περιλαμβάνει εικόνες, γραπτές επεξηγήσεις, σύμβολα, βέλη και χρώματα δεν αποτελεί αποκλειστικά οπτική αναπαράσταση, αλλά ένα πολυτροπικό σύνολο. Το νόημά του δεν προκύπτει απλώς από την παράθεση των επιμέρους τρόπων, αλλά από τον τρόπο με τον οποίο αυτοί συνδυάζονται και αλληλεπιδρούν (Jewitt et al., 2016· Kress, 2010).

Η κοινωνιοσημειωτική προσέγγιση δίνει επίσης έμφαση στις διαδικασίες μέσω των οποίων το νόημα μετασχηματίζεται κατά τη διάρκεια της μαθησιακής διαδικασίας. Δύο βασικές διαδικασίες είναι ο **μετασχηματισμός εντός του ίδιου τρόπου** (**transformation**) και **η διατροπική μεταφορά του νοήματος** (**transduction**). Ο μετασχηματισμός εντός του ίδιου τρόπου αφορά στη δημιουργία μιας νέας αναπαράστασης με τη διατήρηση του ίδιου τρόπου. Για παράδειγμα, πραγματοποιείται όταν ένας/μία μαθητής/τρια αναθεωρεί ένα αρχικό σχέδιο, τροποποιώντας διάφορα οπτικά στοιχεία του. Αντίθετα, η διατροπική μεταφορά του νοήματος πραγματοποιείται όταν το νόημα αναδιαμορφώνεται από έναν τρόπο σε έναν άλλο, όπως όταν μια προφορική εξήγηση αποδίδεται μέσω ενός σχεδίου. Επειδή οι διαφορετικοί τρόποι δε διαθέτουν τις ίδιες δυνατότητες, κατά τη διαδικασία αυτή ορισμένες πτυχές του νοήματος μπορεί να αναδεικνύονται, να μεταβάλλονται ή να μην αποδίδονται με τον ίδιο τρόπο (Danielsson et al., 2023· Jewitt et al., 2016).

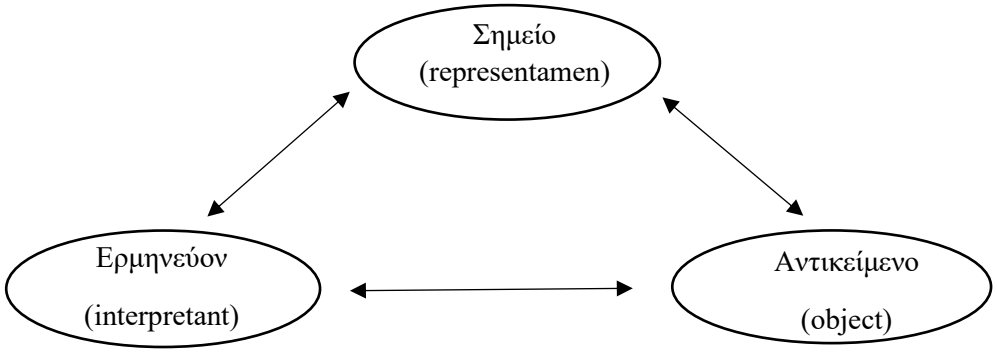
Συνολικά, η πολυτροπική προσέγγιση υποστηρίζει ότι η κατανόηση των επιστημονικών εννοιών δεν προκύπτει αποκλειστικά μέσω της λεκτικής γλώσσας, αλλά μέσα από τον συνδυασμό πολλαπλών τρόπων και σημειωτικών πόρων. Μέσα από την αλληλεπίδραση αυτών των στοιχείων, οι μαθητές/τριες έχουν τη δυνατότητα να δημιουργήσουν πιο ολοκληρωμένες αναπαραστάσεις των επιστημονικών φαινομένων και να αποδίδουν το νόημα που δίνουν στις έννοιες που μελετούν (Danielsson et al., 2023).

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι έννοιες αυτές επιτρέπουν την προσέγγιση των μαθητικών σχεδίων όχι ως απλών ή ουδέτερων απεικονίσεων, αλλά ως αναπαραστάσεων στις οποίες οι μαθητές/τριες επιλέγουν και συντονίζουν διαφορετικούς τρόπους και σημειωτικούς πόρους. Η ανάλυσή τους αφορά, επομένως, τόσο το επιστημονικό περιεχόμενο που αποδίδεται όσο και τον τρόπο με τον οποίο οι εικόνες, τα σύμβολα, τα βέλη, τα χρώματα, η χωρική διάταξη και οι γραπτές επεξηγήσεις συνδυάζονται για την παραγωγή νοήματος.

3.2.2 Το τριαδικό μοντέλο του Peirce

Συμπληρωματικά προς τις κοινωνιοσημειωτικές έννοιες, το τριαδικό μοντέλο του Peirce προσφέρει έναν θεωρητικό φακό για την κατανόηση της διαδικασίας παραγωγής νοήματος μέσω αναπαραστάσεων (Xu et al., 2020).

Σύμφωνα με το συγκεκριμένο μοντέλο (Σχήμα 3.1), κάθε σημειωτική σχέση περιλαμβάνει τρία αλληλένδετα στοιχεία: το σημείο (*representamen)*, δηλαδή τη μορφή μέσω της οποίας κάτι αναπαρίσταται, το αντικείμενο (*object*), δηλαδή το φαινόμενο, την οντότητα ή την έννοια στην οποία αναφέρεται το σημείο, και το ερμηνεύον (*interpretant*), δηλαδή το νόημα ή την κατανόηση που διαμορφώνεται από τη σχέση μεταξύ σημείου και αντικειμένου σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο. Η σχέση αυτή είναι δυναμική, καθώς το ερμηνεύον μπορεί να αποτελέσει αφετηρία για τη δημιουργία και την ερμηνεία νέων σημείων. Η συνεχής αυτή διαδικασία παραγωγής νοήματος περιγράφεται με τον όρο σημείωση (*semiosis*).



Σχήμα 3.1. Το μοντέλο του Peirce (Xu et al., 2020)

Στην περίπτωση ενός μαθητικού σχεδίου, το ίδιο το σχέδιο και τα επιμέρους στοιχεία του, όπως τα βέλη, τα σύμβολα, τα χρώματα και οι γραπτές ετικέτες, μπορούν να λειτουργούν ως σημεία που παραπέμπουν σε επιστημονικές οντότητες, σχέσεις ή διαδικασίες. Ωστόσο, το νόημά τους δεν εμπεριέχεται αυτόματα στα οπτικά στοιχεία, αλλά ερμηνεύεται σε σχέση με το αναπαριστώμενο φαινόμενο και το ευρύτερο πλαίσιο παραγωγής της αναπαράστασης.

Συνολικά, η εφαρμογή του κοινωνικο-σημειωτικού πλαισίου του Peirce υπογραμμίζει ότι η γνώση δεν αναπαράγεται απλώς σε ένα σχέδιο, αλλά ανακαλύπτεται

και οικοδομείται μέσω της συντονισμένης χρήσης πολλαπλών τρόπων και πόρων, γεγονός που ενισχύει την ενεργητική συμμετοχή των μαθητών στην παραγωγή επιστημονικού νοήματος (Xu et al., 2020).

3.3 Το σχέδιο ως μέσο μάθησης και διερεύνησης των μαθητικών ιδεών στις Φυσικές Επιστήμες

Η δημιουργία σχεδίων αποτελεί σημαντικό εργαλείο μάθησης στις ΦΕ, καθώς δεν περιορίζεται στην απεικόνιση μιας ήδη διαμορφωμένης ιδέας, αλλά μπορεί να συμμετέχει ενεργά στην επεξεργασία και την ανάπτυξή της. Όταν οι μαθητές/τριες καλούνται να αναπαραστήσουν ένα επιστημονικό φαινόμενο ή μια διαδικασία, επιλέγουν τα στοιχεία που θεωρούν σημαντικά, εξετάζουν τις μεταξύ τους σχέσεις και οργανώνουν την κατανόησή τους σε μια οπτική μορφή. Με τον τρόπο αυτό, η σχεδίαση μπορεί να υποστηρίζει την επιστημονική συλλογιστική, την οργάνωση της γνώσης και τη σύνδεση νέων πληροφοριών με προϋπάρχουσες ιδέες (Ainsworth et al., 2011).

Παράλληλα, τα μαθητικά σχέδια επιτρέπουν την εξωτερίκευση πτυχών της σκέψης και της κατανόησης των μαθητών/τριών. Η παραγωγή τους μπορεί να συμβάλει στον εντοπισμό στοιχείων που δεν έχουν αποδοθεί επαρκώς, ασυνεπειών ή εναλλακτικών ιδεών, παρέχοντας αφορμές για συζήτηση και αναθεώρηση. Η λειτουργία αυτή ενισχύεται όταν το σχέδιο συνδυάζεται με άλλους σημειωτικούς τρόπους, όπως ο προφορικός και ο γραπτός λόγος, καθώς κάθε τρόπος παρέχει διαφορετικές δυνατότητες έκφρασης του επιστημονικού νοήματος (Ainsworth et al., 2011).

Οι Tytler et al. (2019) εντάσσουν την παραγωγή αναπαραστάσεων σε μια διαδικασία καθοδηγούμενης διερεύνησης, κατά την οποία οι μαθητές/τριες κατασκευάζουν, συγκρίνουν, αξιολογούν και αναθεωρούν τις αναπαραστάσεις τους. Οι αναπαραστάσεις δεν αντιμετωπίζονται ως στατικά τελικά προϊόντα, αλλά ως μέσα για την επεξεργασία και τη σταδιακή βελτίωση των ιδεών των μαθητών/τριών. Η διαδικασία αυτή υποστηρίζεται από την καθοδήγηση του/της εκπαιδευτικού, ο/η οποίος/α ενθαρρύνει τη σύγκριση, την κριτική εξέταση και την αναθεώρησή τους (Tytler et al., 2019).

Εκτός από τη μαθησιακή τους λειτουργία, τα μαθητικά σχέδια μπορούν να αποτελέσουν πηγή ερευνητικών δεδομένων για τη διερεύνηση των νοημάτων που αποδίδουν οι μαθητές/τριες σε επιστημονικές έννοιες και διαδικασίες. Ωστόσο, δεν αποτελούν άμεση ή πλήρη αποτύπωση της σκέψης τους. Η ερμηνεία τους χρειάζεται να λαμβάνει υπόψη το περιεχόμενο και τις απαιτήσεις του έργου, τις σημειωτικές επιλογές του μαθητή και, όπου υπάρχουν, τις συνοδευτικές γραπτές ή προφορικές εξηγήσεις του (Tang et al., 2019).

3.4 Εργαλεία ανάλυσης πολυτροπικών αναπαραστάσεων

Στη βιβλιογραφία της Διδακτικής των ΦΕ έχουν αναπτυχθεί διαφορετικά αναλυτικά πλαίσια για τη μελέτη των μαθητικών αναπαραστάσεων, ανάλογα με το είδος των δεδομένων και τον σκοπό της ανάλυσης. Ορισμένα πλαίσια εστιάζουν στα σημειωτικά

χαρακτηριστικά των μαθητικών σχεδίων, άλλα στα επίπεδα αναπαράστασης του επιστημονικού περιεχομένου και άλλα στη σχέση μεταξύ εικόνας και γραπτού λόγου στα πολυτροπικά κείμενα. Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται τα πλαίσια των Tang et al. (2019), Park et al. (2020) και Wanselin et al. (2022). Τα δύο πρώτα συνδέονται άμεσα με την ανάλυση των μαθητικών σχεδίων της παρούσας εργασίας, ενώ το τρίτο παρέχει ένα ευρύτερο πλαίσιο για τη σχέση μεταξύ οπτικών και γραπτών σημειωτικών πόρων.

3.4.1 Το αναλυτικό πλαίσιο των Tang et al. (2019)

Οι Tang et al. (2019), ανέπτυξαν ένα αναλυτικό πλαίσιο το οποίο επιτρέπει τη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι μαθητές/τριες αποδίδουν επιστημονικές έννοιες και φαινόμενα μέσω οπτικών αναπαραστάσεων. Το πλαίσιο αυτό προσφέρει μια συστηματική προσέγγιση για την εξέταση των μαθητικών σχεδίων και ταυτόχρονα υποστηρίζει την ερμηνεία της σκέψης και της εννοιολογικής κατανόησης των μαθητών σε συγκεκριμένα γνωστικά πεδία. Η ανάπτυξή του βασίστηκε στη διαπίστωση ότι τα προϋπάρχοντα πλαίσια εστίαζαν κυρίως στην ταξινόμηση αναπαραστάσεων, στις εικόνες των σχολικών εγχειριδίων ή στη γενικότερη χρήση πολλαπλών και πολυτροπικών αναπαραστάσεων, χωρίς να προσφέρουν ένα ολοκληρωμένο σύστημα για την ανάλυση των επιμέρους νοημάτων που εκφράζονται στα μαθητικά σχέδια.

Η διαμόρφωση του πλαισίου στηρίχθηκε στην κοινωνιοσημειωτική προσέγγιση και ειδικότερα στη διάκριση του Lemke (1998) μεταξύ παρουσιαστικού ή αναπαραστατικού, προσανατολιστικού και οργανωτικού νοήματος. Συγκεκριμένα, οι ερευνητές προσδιόρισαν **επτά** βασικές κατηγορίες ανάλυσης:

- τη συσχέτιση (association)
- τη χωρική οργάνωση (spatial)
- την κίνηση (movement)
- την προοπτική (perspective)
- την τροπικότητα (modality)
- τη συνδετικότητα (connective)
- την κειμενική πλαισίωση (textual contextualisation)

Οι κατηγορίες αυτές επιτρέπουν τη διερεύνηση τόσο των χαρακτηριστικών των οπτικών αναπαραστάσεων όσο και των τρόπων με τους οποίους οι μαθητές/τριες οργανώνουν, συνδέουν και νηματοδοτούν τις ιδέες τους. Οι κατηγορίες της συσχέτισης, της χωρικής οργάνωσης και της κίνησης αφορούν κυρίως στο περιεχόμενο που αναπαρίσταται. Η προοπτική και η τροπικότητα αφορούν στον τρόπο με τον οποίο ο/η δημιουργός τοποθετείται απέναντι στην αναπαράσταση και αποδίδει, μεταξύ άλλων, διαφορετικό βαθμό ρεαλισμού ή εγκυρότητας. Η συνδετικότητα και η κειμενική πλαισίωση αφορούν στην οργάνωση των στοιχείων και τον τρόπο με τον οποίο βέλη, γραμμές, σύμβολα ή γραπτές επεξηγήσεις συνδέουν και πλαισιώνουν τα εικονιστικά στοιχεία.

Το πλαίσιο δεν αντιμετωπίζει το σχέδιο ως άμεση ή πλήρη αποτύπωση της σκέψης του/της μαθητή/τριας. Επιτρέπει, ωστόσο, τη συστηματική εξέταση των σημειωτικών

επιλογών που είναι εμφανείς στο παραγόμενο σχέδιο και παρέχει ενδείξεις για τα νοήματα και τις ιδέες που αναπαρίστανται. Οι Tang et al. (2019) επισημαίνουν επίσης ότι τα μαθητικά σχέδια δεν είναι σκόπιμο να ερμηνεύονται απομονωμένα από τον συνοδευτικό γραπτό ή προφορικό λόγο, όταν τέτοια δεδομένα είναι διαθέσιμα. Το συγκεκριμένο αναλυτικό πλαίσιο θεωρείται ιδιαίτερα χρήσιμο για τη μελέτη των πολυτροπικών αναπαραστάσεων, καθώς δεν περιορίζεται στην περιγραφή του τελικού σχεδίου, αλλά εξετάζει τις σημειωτικές επιλογές που πραγματοποιούν οι μαθητές/τριες κατά τη διαδικασία δημιουργίας του. Επιπλέον, μπορεί να λειτουργήσει ως πολύτιμο εργαλείο για τους/τις εκπαιδευτικούς, καθώς συμβάλλει στον εντοπισμό παρανοήσεων, εναλλακτικών αντιλήψεων και ιδιαίτερων τρόπων σκέψης των μαθητών. Με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται ο σχεδιασμός κατάλληλων διδακτικών παρεμβάσεων που ανταποκρίνονται στις μαθησιακές ανάγκες των μαθητών. Συνεπώς, το πλαίσιο που προτείνουν οι Tang et al. (2019) αποτελεί μία ολοκληρωμένη και εξειδικευμένη προσέγγιση για την ανάλυση μαθητικών σχεδίων και τη διερεύνηση της κατασκευής νοήματος μέσω πολυτροπικών αναπαραστάσεων στο πεδίο των ΦΕ.

3.4.2 Το μοντέλο των επιπέδων αναπαράστασης των Park et al. (2020)

Οι Park et al. (2020) διερεύνησαν τη διαδικασία μέσω της οποίας μαθητές/τριες Ε΄ και ΣΤ΄ τάξης κατασκεύαζαν επιστημονικές εξηγήσεις σχεδιάζοντας διαγράμματα σχετικά με έννοιες της Μηχανικής. Για την ανάλυση των σχεδίων πρότειναν ένα μοντέλο τριών επιπέδων εικονογραφικής αναπαράστασης, το οποίο διακρίνει τα στοιχεία ενός σχεδίου ανάλογα με το αν αναφέρονται σε άμεσα αισθητές οντότητες, σε μη ορατές υλικές οντότητες ή σε μη ορατές μη υλικές έννοιες και αλληλεπιδράσεις/ διαδικασίες.

Το πρώτο επίπεδο είναι το αισθητηριακό (**Sensory – SS**), το οποίο περιλαμβάνει τις ιδιότητες και οι κινήσεις που μπορούν να γίνουν άμεσα αντιληπτά μέσω των αισθήσεων. Για παράδειγμα, η απεικόνιση ενός δοχείου, μιας μεταλλικής ράβδου ή της παρατηρήσιμης κίνησης ενός αντικειμένου εντάσσεται στο αισθητηριακό επίπεδο.

Το δεύτερο επίπεδο είναι αυτό της μη ορατής ουσίας (**Unseen Substance – US**), το οποίο αφορά υλικές οντότητες που δεν είναι άμεσα ορατές, όπως τα μόρια και τα σωματίδια.

Το τρίτο επίπεδο είναι αυτό της η μη ορατής μη-ουσία (**Unseen Non-substance – UN**), το οποίο περιλαμβάνει μη υλικές έννοιες, σχέσεις και αλληλεπιδράσεις, όπως οι δυνάμεις. Στο επίπεδο αυτό μπορούν να εντάσσονται αναπαραστατικά στοιχεία που αποδίδουν αφηρημένους μηχανισμούς ή σχέσεις οι οποίες δεν αντιστοιχούν σε υλικές οντότητες.

Τα τρία επίπεδα δεν αποτελούν μια απλή ιεραρχική κλίμακα ποιότητας. Ένα επιστημονικά επαρκές σχέδιο μπορεί να συνδυάζει στοιχεία που αντιστοιχούν σε περισσότερα από ένα επίπεδα, ανάλογα με το φαινόμενο και τον σκοπό της αναπαράστασης. Η συμβολή του μοντέλου έγκειται στη δυνατότητα διάκρισης του επιπέδου στο οποίο αναφέρεται κάθε στοιχείο και στη διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο οι μαθητές/τριες συνδέουν το παρατηρήσιμο φαινόμενο με μη ορατές οντότητες ή μηχανισμούς (Park et al., 2020).

3.4.3 Το πλαίσιο ανάλυσης των Wanselin et al. (2022)

Η ανάλυση πολυτροπικών κειμένων στις ΦΕ αποτελεί ένα πεδίο που εξακολουθεί να παρουσιάζει περιορισμένη ερευνητική ανάπτυξη, ιδιαίτερα όταν το ενδιαφέρον εστιάζει στη συνδυασμένη αξιοποίηση εικόνας και γραπτού λόγου από τους μαθητές/τριες για την κατασκευή νοήματος (Kress et al., 2001). Οι περισσότερες προηγούμενες προσεγγίσεις έχουν επικεντρωθεί είτε στη μελέτη των χαρακτηριστικών των μαθητικών σχεδίων (Christidou et al., 2009· Tang et al., 2019), είτε στην ανάλυση περιγραφικών εικονογραφήσεων (Kress et al., 2001), είτε στα επίπεδα αφαίρεσης των αναπαραστάσεων (Park et al., 2020), είτε στη χρήση σχεδίων και γραπτών κειμένων ως μέσων αξιολόγησης της μαθησιακής διαδικασίας (Wilson & Bradbury, 2016). Αντίθετα, περιορισμένος αριθμός μελετών έχει εξετάσει συστηματικά τη σχέση μεταξύ οπτικών και γλωσσικών στοιχείων τόσο στα μαθητικά κείμενα όσο και στο εκπαιδευτικό υλικό (Kress et al., 2001· Unsworth, 2007).

Οι Wanselin et al. (2022) πρότειναν ένα ευρύτερο αναλυτικό πλαίσιο για τη μελέτη πολυτροπικών μαθητικών κειμένων στις ΦΕ. Το πλαίσιο στηρίζεται στη Συστημική Λειτουργική Γλωσσολογία και στην κοινωνιοσημειωτική προσέγγιση της οπτικής επικοινωνίας και επιδιώκει να εξετάσει όχι μόνο το περιεχόμενο κάθε σημειωτικού τρόπου, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο οι διαφορετικοί πόροι συνδυάζονται σε ένα ενιαίο πολυτροπικό κείμενο.

Η ανάλυση οργανώνεται γύρω από τις τρεις βασικές μεταλειτουργίες. **Η κειμενική μεταλειτουργία (textual metafunction)** αφορά στον τρόπο οργάνωσης και συνοχής του κειμένου. **Η ιδεακή μεταλειτουργία (ideational metafunction)** αφορά στο επιστημονικό περιεχόμενο, στις διαδικασίες, στις οντότητες και στις μεταξύ στις σχέσεις. **Η διαπροσωπική μεταλειτουργία (interpersonal metafunction)** αφορά στον τρόπο με τον οποίο ο/η δημιουργός τοποθετείται απέναντι στο περιεχόμενο και διαμορφώνει τη σχέση του/της με τον αποδέκτη.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ οπτικών και γλωσσικών στοιχείων. Σύμφωνα με το πλαίσιο, η σχέση αυτή μπορεί να λάβει διάφορες μορφές, όπως η επανάληψη του ίδιου περιεχομένου από διαφορετικούς τρόπους αναπαράστασης, η συμπληρωματική παροχή πληροφοριών, η επεξήγηση ή εξειδίκευση πληροφοριών από τον έναν τρόπο στον άλλο, καθώς και η αντιπαράθεση ή αντίφαση μεταξύ εικόνας και κειμένου (Danielsson & Selander, 2021· Martinec & Salway, 2005· Unsworth, 2007). Επομένως, το νόημα του πολυτροπικού μαθητικού κειμένου δεν προκύπτει αποκλειστικά από την εικόνα ή από τον γραπτό λόγο, αλλά και από τη μεταξύ τους σχέση.

Η εφαρμογή του πλαισίου σε μαθητικά κείμενα και εκπαιδευτικούς πόρους ανέδειξε τη δυνατότητά του να αποκαλύπτει πτυχές της επιστημονικής γνώσης που δεν γίνονται εύκολα αντιληπτές μέσα από τον γραπτό λόγο μόνο. Επιπλέον, παρέχει στους/στις εκπαιδευτικούς τη δυνατότητα να εντοπίζουν δυσκολίες και προκλήσεις που ενδέχεται να προκύπτουν κατά τη διδασκαλία σύνθετων επιστημονικών φαινομένων (Danielsson & Selander, 2016, 2021).

Κεφάλαιο 4ο: Διδακτικές προσεγγίσεις στις Φυσικές Επιστήμες με έμφαση στις πολυτροπικές αναπαραστάσεις

Μετά τη θεωρητική παρουσίαση της κοινωνιοσημειωτικής προσέγγισης και του ρόλου της πολυτροπικότητας στη μαθησιακή διαδικασία, το παρόν κεφάλαιο εστιάζει στην αξιοποίηση πολυτροπικών αναπαραστάσεων στο σχολικό περιβάλλον. Αρχικά παρουσιάζονται επιλεγμένες εμπειρικές μελέτες από τη διεθνή βιβλιογραφία, με έμφαση στους στόχους, τη μεθοδολογία, τους συμμετέχοντες και τα βασικά ευρήματά τους, ενώ στη συνέχεια συνδέονται με τη διδασκαλία των θερμικών φαινομένων. Η ανασκόπηση αυτή συμβάλλει στην ανάδειξη της σημασίας των διαφορετικών σημειωτικών πόρων, όπως οι αναπαραστάσεις, τα μαθητικά σχέδια, οι χειρονομίες και οι ψηφιακές οπτικοποιήσεις, παρέχοντας το απαραίτητο εμπειρικό υπόβαθρο για την ανάλυση που πραγματοποιείται στην παρούσα εργασία.

4.1. Αξιοποίηση πολυτροπικών αναπαραστάσεων στη διδασκαλία και τη μάθηση των Φυσικών Επιστημών

Οι σύγχρονες προσεγγίσεις στη Διδακτική των ΦΕ αναδεικνύουν τον σημαντικό ρόλο των πολυτροπικών αναπαραστάσεων στη διαδικασία οικοδόμησης της επιστημονικής γνώσης, υποστηρίζοντας ότι η μάθηση δεν περιορίζεται στη γλωσσική διάσταση, αλλά συνιστά μια σύνθετη διαδικασία κατά την οποία οι μαθητές/τριες κατασκευάζουν νόημα μέσω του συντονισμού πολλαπλών σημειωτικών τρόπων.

Επιπρόσθετα, η μελέτη των Park et al. (2020) εστιάζει στη χρήση του σχεδίου ως εργαλείου οικοδόμησης επιστημονικών εξηγήσεων, διερευνώντας τον τρόπο με τον οποίο οι μαθητές/τριες Ε΄ και ΣΤ΄ τάξης αξιοποιούν τα δικά τους διαγράμματα για να αποδώσουν και να οργανώσουν επιστημονικές έννοιες της Μηχανικής ανέλυσε όχι μόνο τα τελικά σχέδια, αλλά κυρίως τη διαδικασία σχεδίασης και τη διαδοχή των νοητικών βημάτων που ακολουθούν οι μαθητές/τριες κατά την κατασκευή τους. Τα αποτελέσματα ανέδειξαν διαφορετικά διαδοχικά μοτίβα ως προς τη χρήση τριών επιπέδων αναπαράστασης: του αισθητηριακού επιπέδου, το οποίο περιλαμβάνει παρατηρήσιμα αντικείμενα και φαινόμενα, του επιπέδου της μη ορατής ουσίας, το οποίο περιλαμβάνει οντότητες όπως τα μόρια και τα σωματίδια, και του επιπέδου της μη ορατής μη-ουσίας, το οποίο περιλαμβάνει αφηρημένες έννοιες και αλληλεπιδράσεις, όπως οι δυνάμεις. Ορισμένοι μαθητές/τριες περιορίστηκαν στην αναπαράσταση των παρατηρήσιμων στοιχείων, ενώ άλλοι συνέδεσαν διαφορετικά επίπεδα για να κατασκευάσουν αιτιολογικές εξηγήσεις. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, το σχέδιο λειτουργεί ως γνωστικό εργαλείο που επιτρέπει στους/στις μαθητές/τριες να μεταβαίνουν από την περιγραφή ενός φαινομένου, στην ερμηνεία του. Τα ευρήματα αναδεικνύουν ότι η σχεδιαστική δραστηριότητα δεν αποτελεί απλώς αναπαραστατική δεξιότητα, αλλά μια δυναμική διαδικασία νοηματοδότησης, μέσω της οποίας οι μαθητές/τριες συνδέουν διαφορετικά επίπεδα αναπαράστασης για την οικοδόμηση συνεκτικών επιστημονικών εξηγήσεων (Park et al., 2020).

Στο ίδιο ερευνητικό πεδίο, οι Park et al. (2021) μελέτησαν τη συνεργατική σχεδίαση των μαθητών/τριών και τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν οι οπτικοί και οι λεκτικοί τρόποι αναπαράστασης. Από την ανάλυσή τους προέκυψε ένα επαναλαμβανόμενο μοτίβο τριών φάσεων, το Plan–Draw–Evaluate (PDE). Στο πλαίσιο της έρευνας, οι μαθητές/τριες εργάζονται σε ομάδες ακολουθώντας μια δομημένη διαδικασία τριών σταδίων, κατά την οποία αρχικά σχεδιάζουν ένα επιστημονικό φαινόμενο, στη συνέχεια αναπτύσσουν και τροποποιούν το σχέδιό τους και τέλος προβαίνουν σε αξιολόγηση και αναστοχασμό σχετικά με την ακρίβεια και την επάρκειά του. Πιο συγκεκριμένα, κατά τη φάση του σχεδιασμού (*Plan*), οι μαθητές/τριες συζητούσαν και διαπραγματεύονταν τι θα περιλάμβανε η αναπαράστασή τους. Κατά τη φάση της σχεδίασης (*Draw*), παρήγαγαν το σχέδιο συνδυάζοντας τη σχεδιαστική δράση με τον προφορικό λόγο, ενώ κατά τη φάση της αξιολόγησης (*Evaluate*) εξέταζαν την ακρίβεια και την επάρκεια της αναπαράστασής τους και, όπου χρειαζόταν, την αναθεωρούσαν. Τα ευρήματα αναδεικνύουν ότι η εναλλαγή μεταξύ προφορικού λόγου και σχεδίου λειτουργεί ενισχυτικά για τη μάθηση, καθώς οι μαθητές/τριες χρησιμοποιούν το σχέδιο όχι μόνο ως αναπαράσταση, αλλά και ως εργαλείο διαπραγμάτευσης νοήματος μέσα στην ομάδα. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, η γνώση δεν προκύπτει ατομικά, αλλά συνδιαμορφώνεται μέσω της συνεχούς αλληλεπίδρασης μεταξύ λόγου, οπτικής αναπαράστασης και συνεργατικής αξιολόγησης (Park et al., 2021).

Ακόμα, οι Xu et al. (2021) πρότειναν και εφάρμοσαν ένα πολυεπίπεδο πλαίσιο για την ανάλυση του πολυτροπικού συλλογισμού μαθητών/τριών Ε΄ και ΣΤ΄ τάξης κατά τη διάρκεια μιας ανοιχτής διερεύνησης σχετικά με το φαινόμενο της διάλυσης. Το πλαίσιο επέτρεψε την ανάλυση της μαθησιακής διαδικασίας σε μακρο-, μεσο- και μικρο-χρονική κλίμακα και τη σύνδεση της συνολικής πορείας της διερεύνησης με τις επιμέρους δραστηριότητες και τις στιγμιαίες αλληλεπιδράσεις των μαθητών/τριών. Η μελέτη ανέδειξε τη σημασία της εξέτασης του τρόπου με τον οποίο ο προφορικός λόγος, οι χειρονομίες, η δράση, οι εικόνες και άλλοι σημειωτικοί πόροι συντονίζονται κατά τη διάρκεια της διερεύνησης, αντί να αναλύονται απομονωμένα (Xu et al., 2021).

Συνολικά, οι παραπάνω μελέτες συγκλίνουν στην άποψη ότι οι πολυτροπικές αναπαραστάσεις μπορούν να αποτελέσουν σημαντικούς πόρους για τη μάθησηξ στις ΦΕ, καθώς επιτρέπουν την εξωτερικεύση, τη σύγκριση και την αναθεώρηση των ιδεών των μαθητών/τριών. Ιδιαίτερα το μαθητικό σχέδιο αναδεικνύεται ως κρίσιμο γνωστικό και συνεργατικό εργαλείο, μέσω του οποίου οι μαθητές/τριες μπορούν να συνδέουν την περιγραφή παρατηρήσιμων φαινομένων με την κατασκευή επιστημονικών εξηγήσεων και να συμμετέχουν ενεργά σε διαδικασίες διαπραγμάτευσης νοήματος. Η συμβολή των πολυτροπικών αναπαραστάσεων στη μάθηση εξαρτάται, ωστόσο, από τον τρόπο με τον οποίο εντάσσονται σε κατάλληλα σχεδιασμένες διδακτικές δραστηριότητες και από τον βαθμό στον οποίο οι μαθητές/τριες υποστηρίζονται στη σύνδεση, την ερμηνεία και τον μετασχηματισμό των διαφορετικών μορφών αναπαράστασης.

4.2 Διδακτικές προσεγγίσεις για θερμικά φαινόμενα με αξιοποίηση πολυτροπικών αναπαραστάσεων

Οι διδακτικές προσεγγίσεις για τη διδασκαλία των θερμικών φαινομένων υπογραμμίζουν τον σημαντικό ρόλο των πολυτροπικών αναπαραστάσεων, δηλαδή της συντονισμένης χρήσης πολλών σημειωτικών τρόπων για την κατανόηση και επικοινωνία επιστημονικών εννοιών.

Η μελέτη των Mathayas et al. (2021) εξετάζει πώς οι «υποδεικνυόμενες χειρονομίες» (**cued gestures**) μπορούν να υποστηρίξουν μαθητές/τριες (Γυμνασίου) να κατανοήσουν τη θερμική αγωγιμότητα σε μοριακό επίπεδο. Μέσα από μια ψηφιακή προσομοίωση, οι μαθητές/τριες κλήθηκαν να εκτελούν χειρονομίες που αναπαριστούσαν τις κινήσεις και τις συγκρούσεις των μορίων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι χειρονομίες ενεργοποιούσαν τις διαισθητικές αντιλήψεις των μαθητών σχετικά με τη θερμότητα και λειτουργούσαν ως «γέφυρα» ανάμεσα στην αισθητηριακή εμπειρία, την προσομοίωση και την επιστημονική εξήγηση. Πολλοί μαθητές/τριες, που αρχικά θεωρούσαν τη θερμότητα ως μια «ουσία» που μετακινείται, με τη χρήση των χειρονομιών υιοθέτησαν πιο μηχανιστικές εξηγήσεις, αναφερόμενοι στην κίνηση και στις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η σωματική αναπαράσταση προηγούνταν συχνά της λεκτικής διατύπωσης, γεγονός που δείχνει ότι οι χειρονομίες μπορούσαν να λειτουργήσουν ως πόρος για την ανάπτυξη και την έκφραση του συλλογισμού των μαθητών/τριών (Mathayas et al., 2021).

Συμπληρωματικά, οι Anam et al. (2023) σχεδίασαν μια Εποικοδομητική Διδακτική Ακολουθία (Constructivist Teaching Sequence – CTS) για μαθητές/τριες της Ε' Δημοτικού, προκειμένου να διερευνήσουν τις μεταβολές στις οπτικές αναπαραστάσεις τους σχετικά με τα ρεύματα μεταφοράς. Η διδασκαλία επικεντρώθηκε στη διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς στο νερό, με στόχο οι μαθητές/τριες να κατανοήσουν ότι το θερμό νερό, λόγω της μικρότερης πυκνότητάς του, κινείται προς τα επάνω, ενώ το ψυχρότερο προς τα κάτω, δημιουργώντας κυκλική ροή. Η ακολουθία αυτή περιλάμβανε πέντε στάδια: την εισαγωγή και την ενεργοποίηση του ενδιαφέροντος μέσα από παραδείγματα της καθημερινής ζωής, τη διερεύνηση των αρχικών ιδεών των μαθητών μέσω συζήτησης και σχεδίασης, την αναδόμηση των ιδεών μέσω πειραμάτων και συζήτησης, την εφαρμογή της νέας γνώσης σε άλλα παραδείγματα και την αξιολόγηση με αναστοχασμό. Ιδιαίτερη έμφαση δόθηκε στη χρήση πειραμάτων με νερό και χρωστική ουσία, ώστε να γίνουν ορατά τα ρεύματα μεταφοράς, καθώς και στη δημιουργία σχεδίων πριν και μετά τη διδακτική παρέμβαση, με στόχο να αποτυπωθεί η εξέλιξη της κατανόησης των μαθητών/τριών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι οπτικές αναπαραστάσεις των μαθητών/τριών έγιναν περισσότερο επιστημονικά επαρκείς και περιλάμβαναν στοιχεία τόσο του μακροσκοπικού όσο και του υπομικροσκοπικού επιπέδου. Ωστόσο, ορισμένοι μαθητές/τριες συνέχισαν να εμφανίζουν δυσκολίες, κυρίως ως προς την αναπαράσταση και την ερμηνεία του φαινομένου σε μικροσκοπικό επίπεδο (Anam et al., 2023).

Στο πλαίσιο αυτό, η μελέτη των Dolo et al. (2018) η οποία πραγματοποιήθηκε σε δύο σχολεία της Νότιας Αφρικής με μαθητές/τριες ηλικίας 13–14 ετών, ανέδειξε ότι η

αξιοποίηση εργαλείων, όπως οι θερμικές κάμερες, μπορεί να λειτουργήσει ως σημαντικός σημειωτικός πόρος. Ειδικότερα, επιτρέπει την οπτικοποίηση της κατανομής και των μεταβολών της επιφανειακής θερμοκρασίας, δημιουργώντας ευκαιρίες για διερεύνηση και σύγκριση μεταξύ των καθημερινών αντιλήψεων των μαθητών/τριών και των επιστημονικών ερμηνειών. Η έρευνα βασίστηκε σε δραστηριότητες πρόβλεψης–παρατήρησης–εξήγησης (Predict–Observe–Explain), στις οποίες οι μαθητές/τριες καλούνταν αρχικά να διατυπώσουν προβλέψεις σχετικά με τη θερμοκρασία και τις θερμικές ιδιότητες διαφορετικών υλικών, στη συνέχεια να παρατηρήσουν τις θερμικές απεικονίσεις μέσω της κάμερας και, τέλος, να ερμηνεύσουν τα αποτελέσματα σε σχέση με τις αρχικές τους προβλέψεις. Ωστόσο, τα ευρήματα της μελέτης έδειξαν ότι η χρήση της θερμικής κάμερας δεν οδηγεί αυτομάτως σε επιστημονικά επαρκείς ερμηνείες, ιδιαίτερα όταν οι θερμικές απεικονίσεις έρχονται σε αντίθεση με την εμπειρία της αφής. Το στοιχείο αυτό αναδεικνύει την ανάγκη συστηματικής διδακτικής υποστήριξης κατά την ερμηνεία των διαφορετικών αναπαραστάσεων (Dolo et al., 2018).

Συμπληρωματικά, οι Åhman και Jeppsson (2020) διερεύνησαν τον ρόλο του επιστημονικού διαλόγου, της κοινωνικής αλληλεπίδρασης και των πολλαπλών αναπαραστάσεων στην παραγωγή νοήματος γύρω από μη άμεσα ορατά θερμικά φαινόμενα. Πιο συγκεκριμένα, μελέτησαν μια διδακτική ακολουθία τριών μαθημάτων βασισμένη στη στρατηγική Πρόβλεψη – Παρατήρηση - Εξήγηση (Predict–Observe–Explain), η οποία περιλάμβανε έξι πειράματα από την καθημερινή εμπειρία των μαθητών/τριών, όπως το λιώσιμο πάγου σε διαφορετικά υλικά, η θερμική αγωγιμότητα σε λωρίδες χαλκού και χαρτιού, η κατασκευή ενός θερμός και η θερμική ακτινοβολία σε μαύρο και λευκό χαρτί. Στις δραστηριότητες χρησιμοποιήθηκε υπέρυθρη κάμερα ως βασικός σημειωτικός πόρος. Στη μελέτη συμμετείχαν μία εκπαιδευτικός πρωτοβάθμιας εκπαίδευσης και 45 μαθητές/τριες της Στ’ τάξης του Δημοτικού (12–13 ετών), με την ανάλυση να εστιάζει σε δύο ομάδες συνολικά 25 μαθητών. Για τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων αξιοποιήθηκαν σημειώσεις έρευνας πεδίου, καθώς και βιντεοσκοπήσεις και ηχογραφήσεις των αλληλεπιδράσεων μέσα στην τάξη. Τα ευρήματα έδειξαν ότι η χρήση της υπέρυθρης κάμερας παρείχε μια άμεση, κοινή οπτική διεπαφή αναφοράς (shared point of reference) που διευκόλυνε τη μετάβαση από την καθημερινή γλώσσα στην επιστημονική ορολογία και λειτούργησε ως κοινό σημείο εστίασης της προσοχής κατά τον διάλογο μεταξύ του/της εκπαιδευτικού και των μαθητών/τριών. Παράλληλα, υποστήριξε συζητήσεις στις οποίες καθημερινές εκφράσεις συνδέθηκαν σταδιακά με επιστημονικούς όρους και εξηγήσεις, όπως η μεταφορά ενέργειας, η απορρόφηση και η ανάκλαση. Η μελέτη αναδεικνύει, επομένως, τη σημασία του επιστημονικού διαλόγου και της ενεργού διαμεσολάβησης του/της εκπαιδευτικού για τη σύνδεση των οπτικών δεδομένων με τις επιστημονικές έννοιες (Åhman & Jeppsson, 2020).

Συνδυάζοντας τα ευρήματα των παραπάνω μελετών, προκύπτει ότι οι πολυτροπικές αναπαραστάσεις, όπως οι χειρονομίες, τα μαθητικά σχέδια, οι ψηφιακές προσομοιώσεις και οι θερμικές απεικονίσεις μπορούν να υποστηρίξουν τη σύνδεση μεταξύ των αρχικών ιδεών των μαθητών/τριών και των επιστημονικών εννοιών. Η

ενεργός συμμετοχή του σώματος, η χρήση οπτικών αναπαραστάσεων και η καθοδηγούμενη διερεύνηση επιτρέπουν στους μαθητές/τριες να κατανοήσουν τη μεταφορά θερμικής ενέργειας σε διαφορετικά επίπεδα αναπαράστασης, συνδέοντας το μακροσκοπικό με το μικροσκοπικό επίπεδο. Η συμβολή των αναπαραστάσεων αυτών στη μάθηση δεν είναι αυτόματη, αλλά εξαρτάται από την κατάλληλη διδακτική καθοδήγηση και από τις ευκαιρίες που παρέχονται στους μαθητές/τριες να συγκρίνουν, να συντονίζουν και να αναθεωρούν τις αναπαραστάσεις και τις εξηγήσεις τους.

4.3 Σύνθεση των ευρημάτων και σύνδεση με την παρούσα εργασία

Η συνθετική θεώρηση των ερευνητικών δεδομένων που παρουσιάστηκαν στο παρόν κεφάλαιο αναδεικνύει τη σημαντική συμβολή των πολυτροπικών αναπαραστάσεων στη διδασκαλία και τη μάθηση των ΦΕ. Τα βασικά συμπεράσματα που προκύπτουν από τις παραπάνω έρευνες είναι τα εξής:

1. **Η οπτικοποίηση μη άμεσα αντιληπτών φαινομένων και η εξωτερίκευση των ιδεών:** Το μαθητικό σχέδιο, οι σωματικές χειρονομίες και οι σύγχρονες τεχνολογικές οπτικοποιήσεις, (όπως οι υπέρυθρες κάμερες και οι προσομοιώσεις), δεν λειτουργούν απλώς ως εποπτικά βοηθήματα. Μπορούν να αποτελέσουν γνωστικούς και σημειωτικούς πόρους που υποστηρίζουν την αναπαράσταση αφηρημένων ή μη άμεσα αντιληπτών φαινομένων. Μέσω αυτών, οι μαθητές/τριες αποκτούν τη δυνατότητα να εξωτερικεύσουν πτυχές των ιδεών τους, να τις επεξεργάζονται και να συνδέουν την περιγραφή των παρατηρήσιμων φαινομένων με την ερμηνεία των μη ορατών μηχανισμών τους.
2. **Η ανάγκη για διδακτική διαμεσολάβηση και καθοδήγηση:** Τα ευρήματα υπογραμμίζουν ότι η απλή έκθεση των μαθητών σε πολυτροπικά περιβάλλοντα ή η αυθόρμητη παραγωγή αναπαραστάσεων δεν εγγυάται τη μάθηση. Η μετάβαση από τις καθημερινές, διαισθητικές αντιλήψεις προς τις επιστημονικά αποδεκτές έννοιες απαιτεί τη συστηματική καθοδήγηση του/της εκπαιδευτικού, ο οποίος μέσα από τον επιστημονικό διάλογο βοηθά τους μαθητές/τριες να συντονίσουν, να ερμηνεύσουν και να μετασχηματίσουν τους διαφορετικούς σημειωτικούς τρόπους.
3. **Τα μαθητικά σχέδια ως πολυτροπικές αποκρίσεις και η ανάγκη συνδυαστικής ανάλυσής τους:** Τα μαθητικά σχέδια παρέχουν σημαντικές ενδείξεις για τον τρόπο με τον οποίο οι μαθητές/τριες αναπαριστούν επιστημονικές έννοιες και φαινόμενα, αλλά δεν αποτελούν άμεση ή πλήρη αποτύπωση της σκέψης τους. Για τον λόγο αυτό, είναι σημαντικό να εξετάζονται σε συνδυασμό με άλλους διαθέσιμους τρόπους έκφρασης, όπως οι γραπτές απαντήσεις και οι περιγραφές των μαθητών/τριών. Η σύγκριση των αναπαραστάσεων σε διαφορετικά χρονικά σημεία μπορεί επίσης να αναδείξει μεταβολές, σταθερότητες και ασυνέπειες στον τρόπο με τον οποίο αποδίδεται το επιστημονικό περιεχόμενο.

Με βάση, η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση μαθητικών σχεδίων που προέκυψαν στο πλαίσιο μιας ήδη σχεδιασμένης και εφαρμοσμένης ΔΜΑ για τη διάδοση της θερμότητας. Τα μαθητικά σχέδια εξετάζονται σε συνδυασμό με τη σύντομη γραπτή περιγραφή που τα συνοδεύει και, επομένως, προσεγγίζονται ως σύνθετες πολυτροπικές αποκρίσεις. Μέσα από τη σύγκριση των αποκρίσεων σε διαφορετικά χρονικά σημεία διερευνώνται ο τρόπος με τον οποίο οι μαθητές/τριες αναπαριστούν τα υπό μελέτη θερμικά φαινόμενα, τα σημειωτικά μέσα που αξιοποιούν και οι μεταβολές που εμφανίζονται στις αναπαραστάσεις τους.

Μέρος Δεύτερο: Εμπειρικό μέρος

Κεφάλαιο 5ο: Μεθοδολογία της έρευνας

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία της έρευνας. Αρχικά, διατυπώνονται ο σκοπός και τα ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας. Στη συνέχεια, περιγράφεται συνοπτικά η Διδακτική-Μαθησιακή Ακολουθία στο πλαίσιο της οποίας συλλέχθηκαν τα δεδομένα, με έμφαση στις ενότητες που σχετίζονται με τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή και με ρεύματα μεταφοράς. Ακολουθεί η παρουσίαση των συμμετεχόντων/ουσών, του πλαισίου εφαρμογής και του τρόπου συλλογής των δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο αποσαφηνίζεται το ερευνητικό πλαίσιο μέσα στο οποίο αναλύονται οι πολυτροπικές αναπαραστάσεις των μαθητών/τριών.

5.1 Σκοπός της έρευνας και ερευνητικά ερωτήματα

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η αξιολόγηση της κατανόησης μαθητών/τριών Ε' τάξης του Δημοτικού Σχολείου για φαινόμενα μεταφοράς θερμότητας, μέσω πολυτροπικών αναπαραστάσεών τους. Στο πλαίσιο μίας ευρύτερης ερευνητικής εργασίας σχεδιάστηκε, αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μία Διδακτική-Μαθησιακή Ακολουθία (ΔΜΑ) για τη διδασκαλία των τριών τρόπων διάδοσης της θερμότητας (Βαλκάνου & Ζουπίδης, 2026· Valkanou & Zoupidis, 2026). Για την αξιολόγηση της συγκεκριμένης ΔΜΑ χρησιμοποιήθηκε ένα γραπτό ερωτηματολόγιο, το οποίο δόθηκε πριν, ενδιάμεσα και μετά την εφαρμογή της. Σε ορισμένα έργα του ερωτηματολογίου διερευνήθηκαν οι πολυτροπικές αναπαραστάσεις των μαθητών, καθώς τους ζητήθηκε: α) να διατυπώσουν γραπτές εξηγήσεις σχετικά με την κατανόησή τους για τα φαινόμενα που διδάχθηκαν και β) να δημιουργήσουν σχέδια μέσω των οποίων ερμήνευαν αυτά τα φαινόμενα. Η παρούσα πτυχιακή εργασία επικεντρώνεται στην ανάλυση αυτών των έργων του ερωτηματολογίου, τα οποία συνδέονται με τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή και ρεύματα μεταφοράς.

Συγκεκριμένα, τα ερευνητικά ερωτήματα της παρούσας εργασίας ήταν τα ακόλουθα:

- Ποιες ιδέες εκφράζουν μαθητές/τριες Ε' τάξης για τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή και με ρεύματα μεταφοράς μέσα από τα σχέδιά τους και πώς μεταβάλλονται πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την εφαρμογή της ΔΜΑ;
- Ποιοι σημειωτικοί πόροι και ποια επίπεδα αναπαράστασης αξιοποιούνται στα σχέδια μαθητών/τριών Ε' τάξης για την απόδοση και ερμηνεία των φαινομένων της αγωγής και των ρευμάτων μεταφοράς;

5.2 Συνοπτική παρουσίαση της Διδακτικής-Μαθησιακής Ακολουθίας

Η ΔΜΑ σχεδιάστηκε με βασικό σκοπό, αφενός, την αντιμετώπιση της εναλλακτικής ιδέας ότι η θερμότητα αποτελεί ουσία με ιδιότητες ρευστού και, αφετέρου, τη διακριτή διδασκαλία των τριών τρόπων διάδοσης της θερμότητας, δηλαδή της αγωγής, των ρευμάτων μεταφοράς και της διάδοσης με τη μορφή ακτινοβολίας (Valkanou & Zoupidis, 2026). Παράλληλα, η ΔΜΑ ήταν διερευνητικού τύπου, και ενσωματώθηκαν

σε αυτή η διερευνητική πρακτική της Στρατηγικής Ελέγχου Μεταβλητών (ΣΕΜ) και της μοντελοποίησης. Μέσω αυτών των πρακτικών απώτερος στόχος ήταν η ρητή και αναστοχαστική προσέγγιση συγκεκριμένων πτυχών της Φύσης της Επιστημονικής Διερεύνησης (ΦτΕΔ). Ο σχεδιασμός της βασίστηκε στο μοντέλο 5Ε.

Η ΔΜΑ αποτελούνταν από έξι ενότητες διάρκειας 90 λεπτών περίπου η καθεμία. Στον Πίνακα 5.1, παρουσιάζεται το περιεχόμενο των ενοτήτων της ΔΜΑ.

Πίνακας 5.1. Περιεχόμενο των ενοτήτων της ΔΜΑ

Ενότητα	**Περιεχόμενο**
1	Ρητή διδασκαλία σχετικά με τα σφάλματα μέτρησης και την αβεβαιότητα στην πειραματική διαδικασία
2	Σφάλματα πειραματικού σχεδιασμού και ρητή διδασκαλία της Στρατηγικής Ελέγχου Μεταβλητών (ΣΕΜ)
3	Διάδοση της θερμότητας με αγωγή στα μέταλλα και αξιοποίηση της ΣΕΜ
4	Διάδοση της θερμότητας σε διάφορα στερεά σώματα (καλοί και κακοί αγωγοί της θερμότητας) και αξιοποίηση της ΣΕΜ
5	Διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς στο νερό και αξιοποίηση της μοντελοποίησης
6	Διάδοση της θερμότητας με τη μορφή ακτινοβολίας από φωτεινές και μη φωτεινές πηγές

Η παρούσα εργασία δεν εστιάζει στο σύνολο της ΔΜΑ, αλλά σε δύο συγκεκριμένες διδακτικές ενότητες, καθώς οι μαθητικές απαντήσεις στα πολυτροπικά έργα που αποτέλεσαν το υλικό της ανάλυσης συνδέονται με τη μάθηση που οικοδομήθηκε στο πλαίσιο των ενοτήτων αυτών. Η πρώτη από αυτές είναι η **3η ενότητα**, η οποία αφορά στη **διάδοση της θερμότητας με αγωγή στα μέταλλα**. Στην ενότητα αυτή οι μαθητές/τριες εμπλέκονται σε δραστηριότητες που αποσκοπούν στο να αναγνωρίσουν ότι η θερμότητα διαδίδεται στα μέταλλα με τον ίδιο ρυθμό προς όλες τις κατευθύνσεις, ανεξάρτητα από την υψομετρική διαφορά σε σχέση με την εστία θέρμανσης, και να συνδέσουν αυτή τη διαδικασία με τον μηχανισμό της αγωγής. Η δεύτερη είναι η **5η ενότητα**, η οποία αφορά στη **διάδοση της θερμότητας μέσω ρευμάτων μεταφοράς στο νερό.** Στην ενότητα αυτή οι μαθητές/τριες διερευνούν τη θέρμανση του νερού και επιχειρούν να ερμηνεύσουν το φαινόμενο των ρευμάτων μεταφοράς, αναγνωρίζοντας ότι στη συγκεκριμένη περίπτωση η διάδοση της θερμότητας συνδέεται με τη μετακίνηση του ίδιου του ρευστού. Οι δύο αυτές ενότητες επιλέχθηκαν, επειδή συνδέονται άμεσα με τα έργα στα οποία οι μαθητές/τριες κλήθηκαν να αποτυπώσουν τις ιδέες τους μέσω σχεδίου και γραπτού λόγου, και επομένως συγκροτούν το άμεσο διδακτικό πλαίσιο παραγωγής των δεδομένων της παρούσας μελέτης.

5.2.1 Αναλυτική περιγραφή της 3ης ενότητας της ΔΜΑ: διάδοση της θερμότητας με αγωγή στα μέταλλα

Κεντρικός διδακτικός στόχος της 3ης ενότητας της ΔΜΑ ήταν η αντιμετώπιση της εναλλακτικής ιδέας των μαθητών/τριών ότι η θερμότητα έχει υλική υπόσταση ή συμπεριφέρεται σαν ρευστό (Erickson & Tiberghien, 1985). Η συγκεκριμένη αντίληψη φαίνεται να επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο οι μαθητές/τριες ερμηνεύουν και άλλα θερμικά φαινόμενα (Paik et al., 2007). Για παράδειγμα, η δυσκολία διάδοσης της θερμότητας στους κακούς αγωγούς μπορεί να ερμηνεύεται από τους μαθητές/τριες ως δυσκολία «κίνησης» της θερμότητας ως οντότητας μέσα στο σώμα, ενώ η άνοδος θερμού ρευστού στα ρεύματα μεταφοράς μπορεί να συνδέεται με την ιδέα ότι η ίδια η θερμότητα είναι κάτι που ρέει ή ανεβαίνει (Chiou, 2013). Επομένως, πριν από τη διδασκαλία των καλών και κακών αγωγών και των ρευμάτων μεταφοράς, θεωρήθηκε σημαντικό να αντιμετωπιστεί η αντίληψη της θερμότητας ως ουσίας.

Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκαν πειράματα θέρμανσης μεταλλικών σωμάτων. Επιλέχθηκαν τα μέταλλα, διότι είναι εφικτό να παρατηρηθεί η ταυτόχρονη διάδοση της θερμότητας προς διαφορετικές κατευθύνσεις από την πηγή θέρμανσης. Συγκεκριμένα, η παρατήρηση ότι η θερμότητα διαδίδεται με παρόμοιο ρυθμό τόσο προς τα πάνω όσο και προς τα κάτω μπορεί να λειτουργήσει ως αντιπαράδειγμα στην ιδέα ότι η θερμότητα συμπεριφέρεται σαν ουσία ή ρευστό που επηρεάζεται από τη βαρύτητα. Με αυτόν τον τρόπο, τα πειράματα της ενότητας σχεδιάστηκαν ώστε να δημιουργήσουν συνθήκες γνωστικής σύγκρουσης και να υποστηρίξουν τη μετάβαση των μαθητών/τριών προς μια περισσότερο επιστημονικά αποδεκτή θεώρηση της θερμότητας ως ενέργειας που μεταφέρεται και όχι ως υλικής οντότητας (Valkanou et al., 2024).

Η υλοποίηση των πειραμάτων οργανώθηκε με τη μορφή διαδραστικής επίδειξης, κυρίως για λόγους ασφάλειας. Ως προς τον βαθμό διερεύνησης, η ενότητα εντάχθηκε στη δομημένη διερεύνηση, αφού το ερευνητικό ερώτημα, τα υλικά και ο βασικός πειραματικός σχεδιασμός δόθηκαν από την εκπαιδευτικό. Ωστόσο, οι μαθητές/τριες συμμετείχαν ενεργά στην παρατήρηση, στην καταγραφή και στην ερμηνεία των δεδομένων, καθώς και στη διατύπωση συμπερασμάτων, με καθοδήγηση από την εκπαιδευτικό.

Η διάρκεια εφαρμογής της εν λόγω ενότητας ήταν δύο διδακτικές ώρες και σε αυτή αξιοποιήθηκε η (ΣΕΜ). Τα αναμενόμενα μαθησιακά αποτελέσματα, σε επίπεδο εννοιολογικής γνώσης, ήταν οι μαθητές/τριες: α) να αναγνωρίζουν ότι η θερμότητα διαδίδεται στα μέταλλα με τον ίδιο ρυθμό προς όλες τις κατευθύνσεις, ανεξάρτητα από την υψομετρική διαφορά σε σχέση με την εστία θέρμανσης (πάνω και κάτω από αυτή), β) να διακρίνουν ότι αυτός ο τρόπος διάδοσης της θερμότητας ονομάζεται διάδοση με αγωγή, και γ) να εξηγούν το φαινόμενο διάδοσης της θερμότητας με αγωγή, αποδίδοντας την ταυτόχρονη διάδοση της θερμότητας προς όλες τις κατευθύνσεις στην κίνηση των μορίων που προκαλείται και διατηρείται από την εστία θέρμανσης. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι φάσεις της ενότητας.

Στη **φάση της εμπλοκής**, οι μαθητές/τριες εισήχθησαν στο θέμα μέσα από ένα υποθετικό σενάριο, στο οποίο κλήθηκαν να προβλέψουν αν, με τη θέρμανση του

κέντρου μιας λοξά τοποθετημένης μεταλλικής ράβδου, θα ανοίξουν ταυτόχρονα δύο κλειδαριές που βρίσκονται στα άκρα της ή αν θα ανοίξει κάποια πρώτη. Ανάμεσα στις δύο πόρτες και κάτω από το κέντρο της κάθε ράβδου, υπήρχε μία εστία θέρμανσης. Το σενάριο αξιοποιήθηκε ώστε να ενεργοποιηθεί το ενδιαφέρον των μαθητών/τριών και, παράλληλα, να αναδειχθούν οι αρχικές τους ιδέες για τη διάδοση της θερμότητας. Αρχικά, οι μαθητές/τριες συζήτησαν το ερώτημα στις ομάδες τους και διαμόρφωσαν μια κοινή απάντηση. Στη συνέχεια, οι εκπρόσωποι των ομάδων παρουσίασαν τις απόψεις τους στην ολομέλεια, ενώ ο/η εκπαιδευτικός τις κατέγραψε στον πίνακα και συντόνισε τη συζήτηση αναφορικά με τις απόψεις που εκφράστηκαν. Μέσα από αυτή τη διαδικασία αναμένεται ορισμένοι/ες μαθητές/τριες να υποστηρίξουν ότι θα θερμανθεί γρηγορότερα η κάτω κλειδαριά, θεωρώντας ότι η θερμότητα επηρεάζεται από τη βαρύτητα, ενώ άλλοι/ες μπορεί να προβλέψουν ότι θα θερμανθεί γρηγορότερα η πάνω κλειδαριά, συνδέοντας τη θερμότητα με τον καπνό ή με τον θερμό αέρα που κινείται προς τα πάνω.

Στην φάση της **εξερεύνησης α΄**, ο/η εκπαιδευτικός πραγματοποίησε το Πείραμα 3.Α (Πίνακας 5.2), με τη μορφή διαδραστικής επίδειξης.

Πίνακας 5.2. Περιγραφή πειράματος 3.Α

Πείραμα 3.Α	
Υλικά	**Βήματα**
• Μία μεταλλική ράβδος, βαθμονομημένη ανά 5 εκ. από το κέντρο της προς τα δύο άκρα της • Κερί • Φλόγιστρο • Αναπτήρας • Χρονόμετρο	1. Στα 10, 15, 20 και 25 εκ. εκατέρωθεν του κέντρου της ράβδου, έχουν τοποθετηθεί 3 σταγόνες πηγμένου κεριού 2. Η ράβδος τοποθετείται με κλίση 10^{o} ως προς το οριζόντιο επίπεδο 3. Η ράβδος θερμαίνεται με το φλόγιστρο ακριβώς στο κέντρο της 4. Με τη βοήθεια του χρονομέτρου, καταγράφονται οι χρονικές στιγμές στις οποίες λιώνουν οι πηγμένες σταγόνες κεριού στη ράβδο

Κατά τη διάρκεια αυτής της φάσης, οι μαθητές/τριες καθοδηγήθηκαν στη διατύπωση του κεντρικού ερευνητικού ερωτήματος που προέκυψε ως φυσική συνέχεια από την προηγούμενη πειραματική διαδικασία. Παράλληλα, μέσα από τον κατάλληλο πίνακα εφαρμογής της (ΣΕΜ) που περιλαμβανόταν στο φύλλο εργασίας τους, επιδιώχθηκε ο προσδιορισμός και ο έλεγχος των εμπλεκόμενων μεταβλητών. Μέσα από αυτή τη διαδικασία, στόχος ήταν οι ίδιοι οι μαθητές/τριες να συνδιαμορφώσουν το ερευνητικό ερώτημα, εστιάζοντας στο πώς η μεταβολή της απόστασης (υψομετρικής διαφοράς) από την πηγή θερμότητας επιδρά στον ρυθμό με τον οποίο διαδίδεται η θερμότητα προς τις δύο αντίθετες κατευθύνσεις (ανοδικά και καθοδικά).

Το πείραμα πραγματοποιήθηκε αρχικά ως διαδραστική επίδειξη από τον/την εκπαιδευτικό στην τάξη (Εικόνα 5.1), ενώ ταυτόχρονα αξιοποιήθηκε η τεχνολογία (προβολή βίντεο) για τη διασφάλιση της ακρίβειας των παρατηρήσεων. Συγκεκριμένα, κάθε μαθητική ομάδα εφοδιάστηκε με ένα tablet και ένα χρονόμετρο, προκειμένου να παρακολουθήσει σε ψηφιακή μορφή το βιντεοσκοπημένο πείραμα. Η επιλογή αυτή έδωσε στους μαθητές/τριες τη δυνατότητα να ελέγξουν επακριβώς, με διαδοχικές παύσεις και επαναλήψεις, τις χρονικές στιγμές κατά τις οποίες έλιωσαν οι στερεοποιημένες σταγόνες κεριού πάνω στη μεταλλική ράβδο. Η προβολή του ίδιου οπτικοακουστικού υλικού σε όλες τις ομάδες εξασφάλισε κοινές συνθήκες παρατήρησης και ενίσχυσε την εγκυρότητα της διαδικασίας.

Εικόνα 5.1. Πείραμα 3.Α

Τα αποτελέσματα κάθε ομάδας ανακοινώθηκαν στην ολομέλεια της τάξης και καταγράφηκαν συγκεντρωτικά στον πίνακα από τον/την εκπαιδευτικό. Στη συνέχεια, οι μαθητές/τριες καθοδηγήθηκαν στην αξιοποίηση του συνόλου των μετρήσεων για τον υπολογισμό του μέσου όρου.

Στη **φάση της εξήγησης α'**, ο/η εκπαιδευτικός καθοδήγησε την ολομέλεια της τάξης στην κριτική εξέταση και αξιολόγηση των εμπειρικών δεδομένων που συγκεντρώθηκαν από το προηγούμενο πείραμα. Στόχος ήταν η μετάβαση από την απλή καταγραφή των μετρήσεων στην εννοιολογική τους ερμηνεία. Μέσα από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, οι μαθητές/τριες αναμένεται να οδηγηθούν στο συμπέρασμα ότι, ο ρυθμός διάδοσης της θερμότητας στα μέταλλα είναι ανεξάρτητος από την υψομετρική διαφορά σε σχέση με την εστία θέρμανσης (πάνω και κάτω από αυτή).

Ωστόσο, προκειμένου οι μαθητές/τριες να ερμηνεύσουν την ταυτόχρονη τήξη των σταγόνων κεριού στη μεταλλική ράβδο, ενδέχεται να αποδώσουν το αποτέλεσμα αυτό στη μικρή κλίση της μεταλλικής ράβδου.

Στη **φάση της εξερεύνησης β'**, ακόμη και αν οι μαθητές/τριες δε συνδέσουν την ταυτόχρονη διάδοση της θερμότητας προς τις δύο κατευθύνσεις της ράβδου με τη μικρή υψομετρική διαφορά μεταξύ των πηγμένων σταγόνων κεριού, ο/η εκπαιδευτικός τούς ζήτησε να προβλέψουν τι θα συμβεί ως προς τη διάδοση της θερμότητας, εάν

αυξηθεί η υψομετρική διαφορά μεταξύ των σταγόνων με τη χρήση διαφορετικής διάταξης, επιδιώκοντας να ενεργοποιήσει έναν δεύτερο κύκλο διερεύνησης.

Για τη διερεύνηση αυτού του ερωτήματος, ο/η εκπαιδευτικός εισήγαγε μια εναλλακτική πειραματική διάταξη και πρότεινε την πραγματοποίηση του Πειράματος 3.Β, (Πίνακας 5.3). Και αυτό το πείραμα πραγματοποιήθηκε με τη μορφή διαδραστικής επίδειξης, για λόγους ασφαλείας.

Πίνακας 5.3. Περιγραφή πειράματος 3.Β

Πείραμα 3.Β	
Υλικά	**Διαδικασίες**
• Μία μεταλλική βελόνα πλεξίματος • Δύο ξύλινες βάσεις • Πινέζες • Κερί • Φλόγιστρο • Αναπτήρας • Χρονόμετρο	1. Δύο οπές ίσης διαμέτρου έχουν δημιουργηθεί στο κέντρο των ξύλινων βάσεων 2. Μία μεταλλική βελόνα έχει τοποθετηθεί διαμέσου των οπών των ξύλινων βάσεων 3. Τα άκρα της μεταλλικής βελόνας έχουν καμφθεί, έτσι ώστε να δημιουργηθούν δύο ισομήκη κατακόρυφα τμήματα, τα οποία ισαπέχουν από το κέντρο της βελόνας και έχουν αντίθετες κατευθύνσεις (προς τα επάνω και κάτω) 4. Με τη βοήθεια ίδιας ποσότητας κεριού, έχει τοποθετηθεί από μία πινέζα στα δύο άκρα της βελόνας 5. Η βελόνα θερμαίνεται με το φλόγιστρο ακριβώς στο κέντρο της 6. Με τη βοήθεια του χρονομέτρου, καταγράφονται οι χρονικές στιγμές κατά τις οποίες ξεκολλούν οι πινέζες από τη βελόνα

Πριν από την πραγματοποίηση του πειράματος, η συζήτηση στην ολομέλεια ήταν σχεδιασμένη με τρόπο που να επέτρεπε την εκ νέου χαρτογράφηση και ανάδειξη των μαθητικών ιδεών. Στο σημείο αυτό, αναμένεται να εκφραστούν δύο απόψεις. Από τη μία πλευρά, ένα μέρος της τάξης εκτιμάται ότι θα υποστήριζε πως ο ρυθμός διάδοσης της θερμότητας παρέμεινε ανεξάρτητος από την υψομετρική διαφορά. Από την άλλη πλευρά, ήταν πολύ πιθανό ορισμένοι/ες μαθητές/τριες να επιμείνουν στην άποψη ότι η αύξηση της υψομετρικής διαφοράς και η διαφορετική γεωμετρία της διάταξης (κάθετα τμήματα) θα διαφοροποιήσουν το αποτέλεσμα. Για αυτούς τους/τις μαθητές/τριες, το προηγούμενο πείραμα ίσως να μην ήταν ικανό να προκαλέσει τη μετατόπισή τους από τις αρχικές εναλλακτικές τους ιδέες.

Αφού πραγματοποιήθηκε το πείραμα από τον/την εκπαιδευτικό με τη μορφή διαδραστικής επίδειξης (Εικόνα 5.2), οι μαθητές/τριες παρακολούθησαν τη

βιντεοσκοπημένη εκδοχή του πειράματος και χρονομέτρησαν τις στιγμές κατά τις οποίες αποκολλήθηκαν οι πινέζες από τη μεταλλική βελόνα. Η διαδικασία ολοκληρώθηκε με τη συγκέντρωση των μετρήσεων όλων των ομάδων στην ολομέλεια και τον υπολογισμό του μέσου όρου.

Εικόνα 5.2. Πείραμα 3.Β

Στη **φάση της εξήγησης β'**, ο/η εκπαιδευτικός ζήτησε από τους/τις μαθητές/τριες να μελετήσουν και να ερμηνεύσουν τα δεδομένα που προέκυψαν από το Πείραμα 3.Β. Αναμένεται να διαπιστώσουν ότι η θερμότητα διαδίδεται με τον ίδιο ρυθμό και προς όλες τις κατευθύνσεις της μεταλλικής βελόνας, ανεξάρτητα από το αν η διάδοση πραγματοποιείται προς τα πάνω ή προς τα κάτω σε σχέση με την εστία θέρμανσης. Στη συνέχεια, κλήθηκαν να γενικεύσουν τη διαπίστωση αυτή και να διατυπώσουν το συμπέρασμα ότι, στα μέταλλα, η θερμότητα διαδίδεται με τον ίδιο ρυθμό προς όλες τις κατευθύνσεις, ανεξάρτητα από την υψομετρική διαφορά από την εστία θέρμανσης. Ωστόσο, αναμενόταν να μη μπορούν να ερμηνεύσουν περαιτέρω το φαινόμενο. Στο σημείο αυτό, ο/η εκπαιδευτικός εξήγησε στους/στις μαθητές/τριες ότι κατά τη διάδοση της θερμότητας μέσα σε κάποιο υλικό, όπως το μέταλλο της ράβδου και της βελόνας, αυτό που μεταφέρεται δεν είναι ύλη (δεν έχει βάρος), γιατί διαφορετικά θα έπρεπε να δούμε τη θερμότητα να διαδίδεται πιο γρήγορα προς τα πάνω ή προς τα κάτω. Αυτό που διαδίδεται μέσα σε αυτά τα υλικά είναι η γρηγορότερη κίνηση κάθε μορίου, η οποία διαδίδεται από μόριο σε μόριο και οφείλεται και διατηρείται από την εστία θέρμανσης. Εάν σβήσουμε την εστία θέρμανσης, τότε τα μόρια, το ένα μετά το άλλο, θα επανέλθουν στην αρχική τους πιο αργή κίνηση. Η μεταφορά αυτής της αύξησης ή

μείωσης στην κίνηση των μορίων γίνεται, επειδή τα μόρια είναι πολύ «σφιχτά πιασμένα» μεταξύ τους και γίνεται με τον ίδιο τρόπο προς όλες τις κατευθύνσεις. Επίσης, ο/η εκπαιδευτικός ανέφερε στους/στις μαθητές/τριες ότι ο τρόπος αυτός διάδοσης της θερμότητας ονομάζεται διάδοση με αγωγή.

Στη **φάση της εμβάθυνσης**, ο/η εκπαιδευτικός εισήγαγε μια ψηφιακή προσομοίωση[1] της κίνησης των μορίων κατά τη θέρμανση στερεών σωμάτων. Έπειτα, αξιοποιώντας αυτή την προσομοίωση, ζήτησε από τους/τις μαθητές/τριες να δημιουργήσουν τα δικά τους σχέδια, με τα οποία θα προσπαθήσουν να εξηγήσουν την ταυτόχρονη διάδοση της θερμότητας στις δύο μεριές της ράβδου και της βελόνας

Κατά τη **φάση της αξιολόγησης–αναστοχασμού**, οι μαθητές/τριες συμμετείχαν σε δραστηριότητα εφαρμογής για την αξιολόγηση της εννοιολογικής τους κατανόησης σχετικά με τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή. Παράλληλα, απάντησαν σε ερωτήσεις αναστοχασμού σχετικά με τη διερευνητική διαδικασία και τα συμπεράσματα στα οποία κατέληξαν.

5.2.2 Αναλυτική περιγραφή της 5ης ενότητας της ΔΜΑ: διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς στο νερό

Οι μαθητές/τριες αναμένεται να μην είναι εξοικειωμένοι/ες με το φαινόμενο των ρευμάτων μεταφοράς. Παράλληλα, βασιζόμενοι/ες στις καθημερινές εμπειρίες τους, είναι πιθανό να θεωρήσουν ότι το νερό αποτελεί καλό αγωγό της θερμότητας. Για τον λόγο αυτό, η συγκεκριμένη ενότητα ακολούθησε τη διδασκαλία των καλών και κακών αγωγών, ώστε οι μαθητές/τριες να γνωρίσουν έναν ακόμη τρόπο διάδοσης της θερμότητας, τα ρεύματα μεταφοράς, και να διαπιστώσουν ότι το νερό είναι κακός αγωγός της θερμότητας.

Στην ενότητα αξιοποιήθηκαν οι έννοιες των καλών και κακών αγωγών, οι οποίες εισήχθησαν στην τέταρτη ενότητα της ΔΜΑ, καθώς και το συμπέρασμα της τρίτης ενότητας ότι, στα μέταλλα, η θερμότητα διαδίδεται με αγωγή με τον ίδιο ρυθμό προς όλες τις κατευθύνσεις. Μέσα από τη σύνδεση αυτών των γνώσεων με τις πειραματικές παρατηρήσεις επιδιώχθηκε οι μαθητές/τριες να διαπιστώσουν ότι η θέρμανση και η συνολική κίνηση του νερού δε μπορούν να ερμηνευθούν αποκλειστικά μέσω της αγωγής. Στη συνέχεια, ο/η εκπαιδευτικός εισήγαγε ρητά τα ρεύματα μεταφοράς ως έναν διαφορετικό τρόπο διάδοσης της θερμότητας και οργάνωσε πειραματικές δραστηριότητες, μέσω των οποίων οι μαθητές/τριες κλήθηκαν να κατασκευάσουν μοντέλα για την ερμηνεία του φαινομένου.

Η σύνδεση των μακροσκοπικών παρατηρήσεων με ερμηνείες σε μικροσκοπικό επίπεδο μπορεί να υποστηρίξει την εννοιολογική κατανόηση των μαθητών/τριών και την επεξεργασία των σχετικών εναλλακτικών ιδεών τους (Anam et al., 2023). Γενικότερα, ο εμπλουτισμός των νοητικών μοντέλων των μαθητών/τριών με σχέσεις μεταξύ του μακροσκοπικού και του μικροσκοπικού επιπέδου μπορεί να συμβάλει στην κατανόηση των αιτιακών σχέσεων που διέπουν τα φυσικά φαινόμενα (Vidak et al.,

[1] https://javalab.org/en/specific_heat_en/

2018). Καθώς στοιχεία του σωματιδιακού μοντέλου είχαν ήδη εισαχθεί στην τρίτη ενότητα, αξιοποιήθηκαν εκ νέου, ώστε να υποστηριχθεί η ερμηνεία των πειραματικών παρατηρήσεων και η κατασκευή επεξηγηματικών μοντέλων για τα ρεύματα μεταφοράς.

Τέλος, η έρευνα της Chiou (2013) αναδεικνύει τη σημασία της διδασκαλίας της πλήρους κυκλικής πορείας των ρευμάτων μεταφοράς. Η εστίαση αποκλειστικά στην ανοδική κίνηση του θερμότερου ρευστού, καθώς και η χρήση αναπαραστάσεων που παρουσιάζουν μόνο αυτή την κίνηση, μπορεί να ενισχύσει την αντίληψη ότι η θερμότητα αποτελεί μια υλική οντότητα που μετακινείται. Εφόσον βασικός στόχος της ΔΜΑ ήταν η επεξεργασία της εναλλακτικής ιδέας ότι η θερμότητα έχει υλική υπόσταση, επιλέχθηκε να διδαχθεί η πλήρης κυκλική κίνηση, η οποία περιλαμβάνει τόσο την άνοδο του θερμότερου όσο και την κάθοδο του ψυχρότερου ρευστού.

Το πρώτο πείραμα της ενότητας πραγματοποιήθηκε με τη μορφή διαδραστικής επίδειξης από τον/την εκπαιδευτικό για λόγους ασφάλειας. Και τα υπόλοιπα πειράματα παρουσιάστηκαν αρχικά με τον ίδιο τρόπο, λόγω των λεπτών χειρισμών που απαιτούνται για να καταστεί δυνατή η σαφής παρατήρηση των ρευμάτων μεταφοράς που δημιουργούνται στο νερό. Στη συνέχεια, τα απαραίτητα υλικά δόθηκαν στις ομάδες, ώστε οι μαθητές/τριες να επαναλάβουν οι ίδιοι/ες τα πειράματα. Η ενότητα οργανώθηκε με τη μορφή δομημένης διερεύνησης, παρέχοντας στους/στις μαθητές/τριες μεγαλύτερο βαθμό αυτονομίας σε σύγκριση με τις προηγούμενες ενότητες. Ειδικότερα, το θέμα, το διερευνητικό ερώτημα, τα υλικά και ο πειραματικός σχεδιασμός καθορίστηκαν από τον/την εκπαιδευτικό, ενώ οι μαθητές/τριες ανέλαβαν ενεργότερο ρόλο στην εκτέλεση των πειραμάτων, στην ανάλυση των δεδομένων και στη διατύπωση των συμπερασμάτων.

Η διάρκεια εφαρμογής της εν λόγω ενότητας ήταν δύο διδακτικές ώρες και σε αυτή αξιοποιήθηκε η διερευνητική πρακτική της μοντελοποίησης. Τα αναμενόμενα μαθησιακά αποτελέσματα, σε επίπεδο εννοιολογικής γνώσης, ήταν οι μαθητές/τριες: α) να αναγνωρίζουν την ύπαρξη ενός δεύτερου τρόπου διάδοσης της θερμότητας, τη διάδοση με ρεύματα μεταφοράς, β) να υποστηρίζουν ότι η θέρμανση του νερού δε μπορεί να οφείλεται σε διάδοση της θερμότητας με αγωγή, γ) να διακρίνουν ότι κατά τη διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς πραγματοποιείται μετακίνηση ύλης, δ) να αξιοποιούν στοιχεία του μικροκοσκοπικού μοντέλου, για να εξηγούν τη μακροσκοπική παρατήρηση ότι οι ζεστές μάζες νερού ανεβαίνουν προς τα επάνω λόγω της μικρότερης πυκνότητάς τους, συγκριτικά με το περιβάλλον νερό, ενώ οι κρύες μάζες νερού κατεβαίνουν προς τα κάτω, λόγω της μεγαλύτερης πυκνότητάς τους σε σχέση με το περιβάλλον νερό, και ε) να αξιοποιούν στοιχεία του μικροκοσκοπικού μοντέλου, για να εξηγούν τη μακροσκοπική παρατήρηση της κυκλικής κίνησης των ρευμάτων μεταφοράς στο νερό, δηλαδή ότι οι ζεστές μάζες νερού ανεβαίνουν, στη συνέχεια μετακινούνται προς το ψυχρότερο μέρος, εκεί κατεβαίνουν και έπειτα μετακινούνται εκ νέου προς το θερμότερο μέρος.

Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά οι φάσεις της ενότητας.

Στη **φάση της εμπλοκής**, ο/η εκπαιδευτικός παρουσίασε σύντομο σενάριο διαφωνίας ανάμεσα σε δύο μαθητές/τριες σχετικά με το αν το νερό και ο αέρας είναι

καλοί ή κακοί αγωγοί της θερμότητας. Στη συνέχεια, ζήτησε από τις ομάδες να διατυπώσουν και να αιτιολογήσουν τις απόψεις τους. Οι απαντήσεις παρουσιάστηκαν στην ολομέλεια, καταγράφηκαν στον πίνακα και συζητήθηκαν. Αναμένεται ότι αρκετοί/ές μαθητές/τριες θα θεωρήσουν το νερό και τον αέρα καλούς αγωγούς, βασιζόμενοι/ες σε καθημερινές εμπειρίες κατά τις οποίες παρατηρούν ότι τα υλικά αυτά θερμαίνονται εύκολα.

Στη **φάση της εξερεύνησης**, ο/η εκπαιδευτικός πρότεινε τη διεξαγωγή του Πειράματος 5.Α (Πίνακας 5.4), ώστε οι μαθητές/τριες να ελέγξουν πειραματικά τις αρχικές τους απόψεις σχετικά με τη διάδοση της θερμότητας στο νερό. Για λόγους ασφάλειας, το πείραμα υλοποιήθηκε με τη μορφή διαδραστικής επίδειξης.

Πίνακας 5.4. Περιγραφή πειράματος 5.Α

Πείραμα 5.Α		
Υλικά		**Διαδικασίες**
• Δύο δοκιμαστικοί σωλήνες • Ένας λύχνος Bunsen • Νερό • Αναπτήρας • Ένα ξύλινο μανταλάκι • Χρονόμετρο	*α' φάση*	1. Τοποθετείται μία ποσότητα νερού στον πρώτο δοκιμαστικό σωλήνα 2. Ο δοκιμαστικός σωλήνας στερεώνεται στο ξύλινο μανταλάκι 3. Ο δοκιμαστικός σωλήνας θερμαίνεται στο κάτω μέρος του 4. Με τη βοήθεια του χρονομέτρου καταγράφεται ο χρόνος στον οποίο βράζει όλη η ποσότητα του νερού
	β' φάση	5. Στο δεύτερο δοκιμαστικό σωλήνα τοποθετείται ίδια ποσότητα νερού, όπως στο βήμα 1 6. Ο δοκιμαστικός σωλήνας στερεώνεται στο ξύλινο μανταλάκι 7. Ο δοκιμαστικός σωλήνας θερμαίνεται στο πάνω μέρος του 8. Με τη βοήθεια του χρονομέτρου ελέγχεται, εάν βράζει όλη η ποσότητα του νερού στον ίδιο χρόνο που έβρασε στο βήμα 4

Αφού παρουσιάστηκε η πειραματική διάταξη, ο/η εκπαιδευτικός ζήτησε από τους/τις μαθητές/τριες να προβλέψουν τι θα συμβεί όταν ο δοκιμαστικός σωλήνας θερμανθεί στο κάτω μέρος του. Αναμένεται να θεωρήσουν ότι το σύνολο του νερού θα φτάσει γρήγορα σε βρασμό, επειδή αντιμετωπίζουν το νερό ως καλό αγωγό της θερμότητας. Κατά την α' φάση του Πειράματος 5.Α (Εικόνα 5.3), οι μαθητές/τριες παρατήρησαν ότι το νερό θερμαίνεται σε όλη του την έκταση και φτάνει σε βρασμό σε σύντομο χρονικό διάστημα.

Στη συνέχεια, κλήθηκαν να προβλέψουν τι θα συμβεί και πόσος χρόνος θα απαιτηθεί, εάν η θέρμανση πραγματοποιηθεί στο πάνω μέρος του δοκιμαστικού σωλήνα (β' φάση). Με βάση την αρχική τους άποψη ότι το νερό είναι καλός αγωγός, αναμένεται να υποστηρίξουν ότι όλη η ποσότητα του νερού θα φτάσει σε βρασμό περίπου στον ίδιο χρόνο. Κατά τη β' φάση του πειράματος (Εικόνα 5.3), διαπίστωσαν ότι, όταν η θέρμανση γίνεται στο πάνω μέρος, το νερό δε θερμαίνεται σε όλη του την έκταση ούτε φτάνει συνολικά σε βρασμό στον ίδιο χρόνο με την α' φάση.

α' φάση β' φάση

Εικόνα 5.2. Πείραμα 5.Α

Κατά την πραγματοποίηση του πειράματος, κάθε ομάδα χρησιμοποίησε χρονόμετρο για να καταγράψει τον χρόνο που απαιτείται στην α' φάση και να εξετάσει αν παρατηρείται αντίστοιχο αποτέλεσμα στη β' φάση. Τα δεδομένα των ομάδων ανακοινώθηκαν στην ολομέλεια και καταγράφονται στον πίνακα.

Στη **φάση της εξήγησης**, ο/η εκπαιδευτικός κάλεσε τους/τις μαθητές/τριες να ερμηνεύσουν τα δεδομένα του πειράματος και να εξετάσουν αν η διαφορετική θέρμανση του νερού στις δύο φάσεις μπορεί να εξηγηθεί αποκλειστικά μέσω της αγωγής. Αναμένεται να διαπιστώσουν ότι η γρήγορη θέρμανση του νερού προς τα επάνω δεν οφείλεται μόνο στην αγωγή, καθώς, όταν η θέρμανση πραγματοποιείται στο πάνω μέρος του δοκιμαστικού σωλήνα, το νερό στο κάτω μέρος θερμαίνεται πολύ πιο αργά.

Στη συνέχεια, ο/η εκπαιδευτικός εισήγαγε τα ρεύματα μεταφοράς ως διαφορετικό μηχανισμό διάδοσης της θερμότητας στα ρευστά και επισήμανε ότι το μοντέλο που χρησιμοποιήθηκε για την ερμηνεία της αγωγής δεν επαρκεί για να εξηγήσει τη μακροσκοπική κίνηση του νερού. Για τον λόγο αυτό, αναδεικνύεται η ανάγκη κατασκευής ενός νέου μοντέλου για την ερμηνεία των ρευμάτων μεταφοράς.

Τέλος, οι μαθητές/τριες επανεξέτασαν την αρχική τους άποψη σχετικά με το αν το νερό είναι καλός ή κακός αγωγός της θερμότητας. Συμπέραναν ότι το νερό είναι κακός

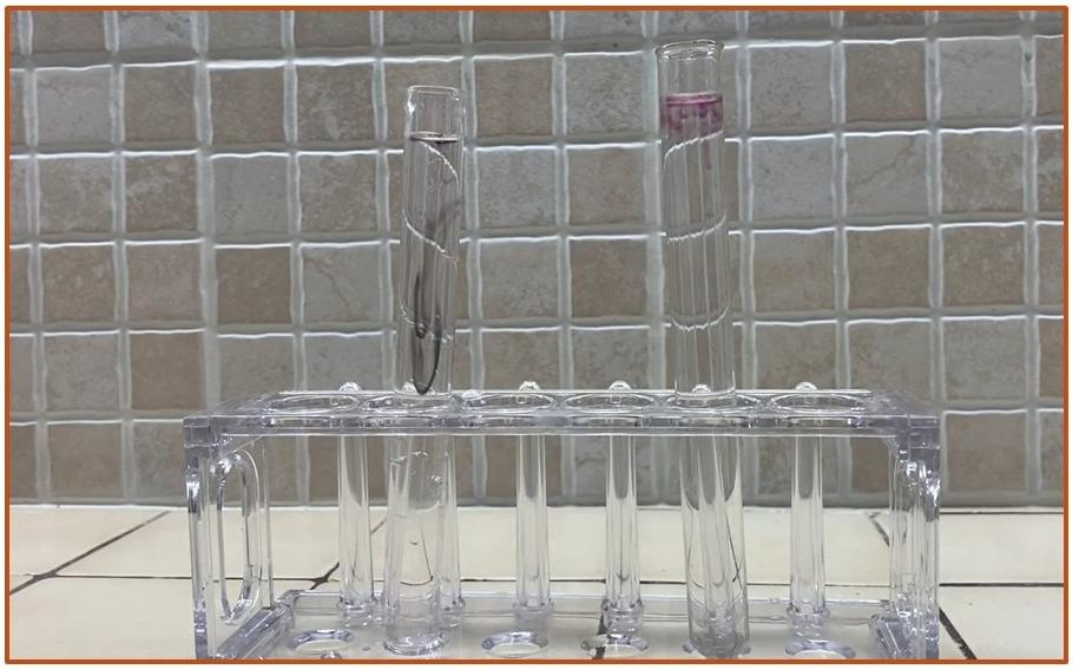
αγωγός, καθώς η διάδοση της θερμότητας με αγωγή πραγματοποιείται αργά, ενώ η γρήγορη θέρμανση προς τα επάνω, όταν το νερό θερμαίνεται από κάτω, οφείλεται κυρίως στα ρεύματα μεταφοράς.

Στη **φάση της εμβάθυνσης**, ο/η εκπαιδευτικός ενημέρωσε τους/τις μαθητές/τριες ότι θα ακολουθήσουν δύο πειραματικές δραστηριότητες, μέσω των οποίων θα διερευνήσουν τα ρεύματα μεταφοράς και θα επιχειρήσουν να διαμορφώσουν ένα μοντέλο για την ερμηνεία του φαινομένου. Αρχικά πραγματοποιήθηκε το Πείραμα 5.Β (Πίνακας 5.5) από τον/την εκπαιδευτικό με τη μορφή διαδραστικής επίδειξης και, στη συνέχεια, επαναλήφθηκε από τις ομάδες των μαθητών/τριών.

Πίνακας 5.5. Περιγραφή πειράματος 5.Β

Πείραμα 5.Β	
Υλικά	Διαδικασίες
• Δύο δοκιμαστικοί σωλήνες • Νερό βρύσης • Νερό παγωμένο • Νερό καυτό • Στατώ δοκιμαστικών σωλήνων • Σταγονόμετρα • Δύο ποτήρια • Χρώμα ζαχαροπλαστικής • Χρονόμετρο	1. Οι δοκιμαστικοί σωλήνες τοποθετούνται στο στατώ 2. Τοποθετείται ίδια ποσότητα νερού στους δοκιμαστικούς σωλήνες 3. Σε ένα ποτήρι τοποθετείται παγωμένο νερό και διαλύεται σε αυτό μικρή ποσότητα χρώματος ζαχαροπλαστικής 4. Σε ένα άλλο ποτήρι τοποθετείται καυτό νερό και διαλύεται σε αυτό μικρή ποσότητα χρώματος ζαχαροπλαστικής 5. Με τη βοήθεια ενός σταγονόμετρου τοποθετείται μία σταγόνα παγωμένου νερού μέσα στον πρώτο δοκιμαστικό σωλήνα 6. Με τη βοήθεια ενός σταγονόμετρου τοποθετείται μία σταγόνα καυτού νερού μέσα στον δεύτερο δοκιμαστικό σωλήνα 7. Παρατηρείται και καταγράφεται η πορεία των χρωματιστών σταγόνων νερού στους δοκιμαστικούς σωλήνες για 30-40’’

Ο/Η εκπαιδευτικός ζήτησε από τους/τις μαθητές/τριες να προβλέψουν την πορεία που θα ακολουθήσουν μία θερμή και μία ψυχρή χρωματισμένη σταγόνα, όταν εισαχθούν στο νερό των δοκιμαστικών σωλήνων. Κατά την πραγματοποίηση του Πειράματος 5.Β (Εικόνα 5.4), οι μαθητές/τριες παρατήρησαν ότι η θερμή σταγόνα κινείται προς την επιφάνεια, ενώ η ψυχρή κατευθύνεται προς το κάτω μέρος του σωλήνα. Στη συνέχεια, κατέγραψαν τις παρατηρήσεις τους στο φύλλο εργασίας και επιχείρησαν να τις ερμηνεύσουν.



Εικόνα 5.3. Πείραμα 5.Β

Αναμένεται να υποστηρίξουν ότι η θερμή σταγόνα είναι «ελαφρύτερη» από το νερό που την περιβάλλει, ενώ η ψυχρή είναι «βαρύτερη», χωρίς όμως να μπορούν απαραίτητα να εξηγήσουν την αιτία αυτής της διαφοράς. Στο σημείο αυτό, ο/η εκπαιδευτικός εξήγησε ότι, στις θερμοκρασίες του πειράματος, στο θερμότερο νερό τα μόρια κινούνται πιο γρήγορα και απομακρύνεται το ένα από το άλλο, και έτσι έχει μικρότερη πυκνότητα από ίσο όγκο του νερού που το περιβάλλει και, επομένως, κινείται προς τα επάνω. Αντίθετα, στο ψυχρότερο νερό, το μόρια κινούνται πιο αργά και είναι το ένα πιο κοντά στο άλλο, και άρα έχει μεγαλύτερη πυκνότητα και κινείται προς τα κάτω. Για την υποστήριξη της εξήγησης παρουσιάστηκε προσομοίωση της θερμικής διαστολής ενός αερίου υπό σταθερή πίεση, η οποία αξιοποιήθηκε ως απλουστευμένη αναλογία για τη σύνδεση της θερμοκρασίας με την κίνηση και την απόσταση των σωματιδίων.

Κατόπιν, κάθε ομάδα κλήθηκε να αξιοποιήσει τις πειραματικές παρατηρήσεις, και την προσομοίωση[2], προκειμένου να κατασκευάσει ένα επεξηγηματικό μοντέλο για την ανοδική κίνηση της θερμής σταγόνας και την καθοδική κίνηση της ψυχρής. Τα μοντέλα παρουσιάστηκαν στην ολομέλεια και ακολουθεί συζήτηση.

Στη συνέχεια, ο/η εκπαιδευτικός πρότεινε τη διεξαγωγή του Πειράματος 5.Γ (Πίνακας 5.6), με σκοπό την περαιτέρω διερεύνηση των ρευμάτων μεταφοράς. Το πείραμα πραγματοποιήθηκε αρχικά με τη μορφή διαδραστικής επίδειξης και έπειτα επαναλήφθηκε από τις ομάδες των μαθητών/τριών.

[2] https://phet.colorado.edu/sims/html/gas-properties/latest/gas-properties_all.html?locale=el

Πίνακας 5.6. Περιγραφή πειράματος 5.Γ

Πείραμα 5.Γ	
Υλικά	**Διαδικασίες**
• Ένα διάφανο ρηχό γυάλινο σκεύος (pyrex) • Νερό βρύσης • Νερό παγωμένο • Νερό καυτό • Δύο ποτήρια • Χρώματα ζαχαροπλαστικής (μαύρο και μωβ)	1. Τοποθετείται νερό βρύσης μέσα στο γυάλινο ρηχό σκεύος 2. Μέσα σε ένα ποτήρι τοποθετείται καυτό νερό 3. Μέσα σε ένα άλλο ποτήρι τοποθετείται παγωμένο νερό 4. Τα δύο ποτήρια τοποθετούνται μέσα στο γυάλινο σκεύος, έτσι ώστε το στόμιο τους να βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του νερού που περιέχεται σε αυτό και σε αρκετή απόσταση μεταξύ τους, όχι όμως κοντά στα τοιχώματα του σκεύους 5. Μία σταγόνα μαύρου χρώματος τοποθετείται μέσα στο νερό του γυάλινου σκεύους, με τέτοιο τρόπο ώστε να ακουμπήσει πάνω στην πλευρά του ποτηριού με το ζεστό νερό, η οποία βρίσκεται ακριβώς απέναντι από το ποτήρι με το παγωμένο νερό 6. Μία σταγόνα μωβ χρώματος τοποθετείται μέσα στο νερό του γυάλινου σκεύους, με τέτοιο τρόπο ώστε να ακουμπήσει πάνω στην πλευρά του ποτηριού με το παγωμένο νερό, η οποία βρίσκεται ακριβώς απέναντι από το ποτήρι με το ζεστό νερό 7. Παρατηρείται και καταγράφεται η κίνηση των χρωματιστών σταγόνων

Πριν την πραγματοποίηση του Πειράματος 5.Γ, ο/η εκπαιδευτικός ζήτησε από τους/τις μαθητές/τριες να προβλέψουν την πορεία της μαύρης και της μωβ σταγόνας, αξιοποιώντας τα μοντέλα που είχαν κατασκευάσει μετά το Πείραμα 5.Β. Αναμένεται να θεωρήσουν ότι η μαύρη σταγόνα, η οποία τοποθετείται κοντά στο ποτήρι με το θερμό νερό, θα παραμείνει στο ανώτερο μέρος του νερού στο δοχείο και θα εξαπλωθεί σε αυτό, ενώ η μωβ, η οποία τοποθετείται κοντά στο ποτήρι με το παγωμένο νερό, θα κινηθεί προς το κάτω μέρος και θα εξαπλωθεί εκεί.

Εικόνα 5.4. Πείραμα 5.Γ

Κατά την πραγματοποίηση του πειράματος (Εικόνα 5.5), παρατηρήθηκε ότι το θερμότερο νερό, το οποίο γίνεται ορατό μέσω του μαύρου χρώματος, κινήθηκε προς τα επάνω και στη συνέχεια προς την περιοχή του ψυχρού νερού. Εκεί ψύχεται και κατεβαίνει, πριν κινηθεί ξανά προς την περιοχή του θερμού νερού. Αντίστοιχα, το ψυχρότερο νερό, το οποίο γίνεται ορατό μέσω του μωβ χρώματος, κινήθηκε προς τα κάτω και έπειτα προς την περιοχή του θερμού νερού, όπου θερμάνθηκε και ανέβηκε. Με αυτόν τον τρόπο σχηματίστηκε μια κυκλική κίνηση του νερού, από την οποία, στο συγκεκριμένο πείραμα, είναι συνήθως δυνατό να παρατηρηθεί ένας πλήρης κύκλος.

Μετά την ολοκλήρωση του πειράματος, οι μαθητές/τριες κλήθηκαν να αναθεωρήσουν τα μοντέλα που είχαν δημιουργήσει μετά το Πείραμα 5.Β, ώστε αυτά να ερμηνεύουν και τις νέες παρατηρήσεις. Αναμένεται να ενσωματώσουν σε αυτά την αλληλεπίδραση του θερμότερου και του ψυχρότερου νερού με το περιβάλλον τους και να αποδώσουν την κυκλική πορεία των ρευμάτων μεταφοράς. Ειδικότερα, κλήθηκαν να εξηγήσουν ότι το θερμότερο νερό ανέρχεται και καταλαμβάνει τη θέση του ψυχρότερου, ενώ το ψυχρότερο κατέρχεται και καταλαμβάνει τη θέση του θερμότερου, αξιοποιώντας παράλληλα στοιχεία του μικροσκοπικού επιπέδου που είχαν προηγουμένως εισαχθεί.

Στη **φάση της αξιολόγησης–αναστοχασμού**, οι μαθητές/τριες συμμετείχαν σε δύο δραστηριότητες αξιολόγησης της εννοιολογικής τους κατανόησης. Στην πρώτη, κλήθηκαν να προβλέψουν και να ερμηνεύσουν την κίνηση θερμού και ψυχρού χρωματισμένου νερού μέσα σε δοκιμαστικούς σωλήνες. Στη δεύτερη, εξέτασαν μια ημιτελή αναπαράσταση του θαλάσσιου ρεύματος του Κόλπου του Μεξικού, αιτιολόγησαν αν αυτή απέδιδε ολοκληρωμένα το φαινόμενο και συμπλήρωσαν σχεδιαστικά την κυκλική πορεία του ρεύματος.

5.3 Συμμετέχοντες/ουσες και πλαίσιο εφαρμογής

Η ΔΜΑ εφαρμόστηκε πιλοτικά, εκτός του πλαισίου της παρούσας πτυχιακής εργασίας, στην ολομέλεια μίας τάξης 18 μαθητών/τριών ενός δημόσιου Δημοτικού σχολείου του

νομού Αττικής. Η διάρκεια της εφαρμογής της ακολουθίας ήταν περίπου ενάμισης μήνας. Οι μαθητές/τριες εργάστηκαν σε ομάδες σε όλες τις φάσεις της διδασκαλίας, για την επεξεργασία των ερωτημάτων που τους τέθηκαν και για τη διατύπωση των συμπερασμάτων τους (Βαλκάνου & Ζουπίδης, 2026· Valkanou & Zoupidis, 2026).

5.4 Διαδικασία συλλογής δεδομένων

Τα δεδομένα συλλέχθηκαν μέσω ενός γραπτού ερωτηματολογίου 19 έργων, το οποίο χορηγήθηκε πριν, κατά τη διάρκεια και μετά τη διδασκαλία. Συγκεκριμένα, το ερωτηματολόγιο χορηγήθηκε μία εβδομάδα πριν από τη διδασκαλία της πρώτης ενότητας της ΔΜΑ (ΠΡΙΝ), τρεις ημέρες μετά τη διδασκαλία της τέταρτης ενότητας (ΕΝΔ1), τρεις ημέρες μετά τη διδασκαλία της πέμπτης ενότητας (ΕΝΔ2), μία εβδομάδα μετά τη διδασκαλία της τελευταίας ενότητας (ΜΕΤΑ) και δέκα μήνες μετά την εφαρμογή της ΔΜΑ (ΜΜΕΤΑ). Στόχος των δύο ενδιάμεσων χορηγήσεων ήταν η διερεύνηση του βαθμού στον οποίο οι μαθητές/τριες διακρίνουν τους τρόπους διάδοσης της θερμότητας, ενώ η χορήγηση ΜΜΕΤΑ αποσκοπούσε στη διερεύνηση της διατήρησης της μάθησης δέκα μήνες μετά την εφαρμογή της ΔΜΑ. Στην παρούσα πτυχιακή εργασία η ανάλυση εστιάζει σε τρία έργα του ερωτηματολογίου και, ειδικότερα, στα υποερωτήματα στα οποία οι μαθητές/τριες παρήγαγαν πολυτροπικές αποκρίσεις. Οι αποκρίσεις αυτές περιλάμβαναν ένα μαθητικό σχέδιο και τη σύντομη γραπτή περιγραφή που το συνόδευε. Για λόγους συνέπειας με την κωδικοποίηση που χρησιμοποιήθηκε στην ευρύτερη έρευνα, τα τρία έργα αναφέρονται εφεξής ως ΑΓ3, Ρ2 και Ρ3. Η ένδειξη ΑΓ παραπέμπει στη διάδοση της θερμότητας με αγωγή, ενώ η ένδειξη Ρ στα ρεύματα μεταφοράς. Οι αριθμοί 3, 2 και 3 αντιστοιχούν στην κωδικοποίηση των συγκεκριμένων έργων στην ευρύτερη έρευνα. Παρακάτω παρουσιάζονται αναλυτικά αυτά τα τρία έργα.

5.4.1 Έργο ΑΓ3

Με το **έργο ΑΓ3** (Valkanou & Zoupidis, 2026) μελετήθηκε η **κατανόηση** των μαθητών/τριών για τη **διάδοση της θερμότητας με αγωγή** και ο βαθμός στον οποίο την αναγνωρίζουν ως έναν τρόπο διάδοσης της θερμότητας.

Στο συγκεκριμένο έργο παρουσιάζεται στους/στις μαθητές/τριες ένα σκίτσο μεταλλικής διάταξης, η οποία αποτελείται από πέντε ισομήκη τμήματα διαφορετικού προσανατολισμού. Ειδικότερα, τα τρία τμήματα είναι παράλληλα προς το οριζόντιο επίπεδο, ενώ τα δύο υπόλοιπα είναι κάθετα σε αυτό. Τα τμήματα είναι ενωμένα μεταξύ τους και τοποθετημένα εναλλάξ, με τη διάταξη να ακολουθεί την εξής σειρά: ένα οριζόντιο τμήμα, ένα κάθετο κ.ό.κ. (βλ. Παράρτημα Α). Η διάταξη θερμαίνεται ακριβώς στο κεντρικό της σημείο και πάνω σε αυτή έχουν επισημανθεί πέντε σημεία: τα σημεία Α και Ε, τα οποία βρίσκονται στα δύο άκρα της διάταξης, τα σημεία Β και Γ, τα οποία τοποθετούνται στα άκρα του μεσαίου τμήματος και βρίσκονται σε ίση απόσταση από την εστία θέρμανσης, καθώς και το σημείο Δ, το οποίο βρίσκεται στο μέσο του κάθετου τμήματος που βρίσκεται πάνω από την εστία θέρμανσης.

Στο υποερώτημα (α), οι μαθητές/τριες καλούνται να επιλέξουν τα σημεία που θεωρούν ότι θα έχουν θερμανθεί μετά την πάροδο ενός σχετικά μεγάλου χρονικού διαστήματος. Στο υποερώτημα (β), ζητείται να αιτιολογήσουν την ή τις επιλογές τους. Στο υποερώτημα (γ), οι μαθητές/τριες καλούνται να καταγράψουν αν θεωρούν ότι ορισμένα σημεία θα θερμανθούν ταχύτερα από άλλα και, σε περίπτωση θετικής απάντησης, να προσδιορίσουν τη σειρά με την οποία εκτιμούν ότι θα θερμανθούν. Τέλος, στο υποερώτημα (δ), ζητείται από τους/τις μαθητές/τριες να αποτυπώσουν σχεδιαστικά τον τρόπο με τον οποίο πιστεύουν ότι θα διαδοθεί η θερμότητα στα διάφορα σημεία της μεταλλικής διάταξης, ενώ στο υποερώτημα (ε) καλούνται να επεξηγήσουν το σχέδιο που δημιούργησαν.

Πριν από τη διδασκαλία της διάδοσης της θερμότητας με αγωγή, αναμένεται οι μαθητές/τριες να διατυπώνουν απαντήσεις επηρεασμένες από τις εναλλακτικές τους αντιλήψεις, σύμφωνα με τις οποίες η θερμότητα αποδίδεται με χαρακτηριστικά ρευστού. Ειδικότερα, στα υποερωτήματα (α) και (β), ορισμένοι/ες μαθητές/τριες αναμένεται να επιλέξουν μόνο τα σημεία της διάταξης που βρίσκονται πάνω από την εστία θέρμανσης, θεωρώντας ότι η θερμότητα ταυτίζεται με τον θερμό αέρα και, ως εκ τούτου, κινείται ευκολότερα προς τα επάνω. Οι ίδιοι μαθητές/τριες, στο υποερώτημα (γ), αναμένεται να υποστηρίξουν ότι τα συγκεκριμένα σημεία θα θερμανθούν πρώτα. Αντίστοιχα, άλλοι/ες μαθητές/τριες ενδέχεται να επιλέξουν στα υποερωτήματα (α) και (β) μόνο τα σημεία της διάταξης που βρίσκονται κάτω από την εστία θέρμανσης, θεωρώντας ότι η θερμότητα επηρεάζεται από τη βαρύτητα. Στην περίπτωση αυτή, αναμένεται να θεωρήσουν, στο υποερώτημα (γ), ότι τα σημεία αυτά θα θερμανθούν πρώτα. Παράλληλα, είναι πιθανό κάποιοι/ες μαθητές/τριες να επιλέξουν ότι θα θερμανθούν όλα τα σημεία της διάταξης, διευκρινίζοντας όμως στο υποερώτημα (γ) ότι η θέρμανση θα πραγματοποιηθεί ταχύτερα είτε στα επάνω σημεία, λόγω της σύνδεσης της θερμότητας με τον θερμό αέρα, είτε στα κάτω, λόγω της επίδρασης της βαρύτητας. Στα υποερωτήματα (δ) και (ε), αναμένεται μέσα από τα σχέδια και τις επεξηγήσεις τους να αποδίδουν υλικό χαρακτήρα στην έννοια της θερμότητας και να αναπαριστούν τη διάδοσή της σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Μετά τη διδασκαλία της διάδοσης της θερμότητας με αγωγή, στα υποερωτήματα (α), (β) και (γ), οι μαθητές/τριες αναμένεται να θεωρήσουν ότι θα θερμανθούν όλα τα σημεία της διάταξης, καθώς η διάδοση της θερμότητας είναι ανεξάρτητη από τη θέση ως προς την εστία θέρμανσης, είτε αυτή βρίσκεται πάνω είτε κάτω από αυτή. Επιπλέον, αναμένεται να υποστηρίξουν ότι η θερμότητα θα διαδοθεί αρχικά στα σημεία που βρίσκονται πλησιέστερα στην εστία θέρμανσης και στη συνέχεια σε εκείνα που βρίσκονται σε μεγαλύτερη απόσταση, ενώ τα σημεία που ισαπέχουν από την εστία θα θερμανθούν ταυτόχρονα. Τέλος, στα υποερωτήματα (δ) και (ε), αναμένεται να δημιουργήσουν σχέδια στα οποία θα αξιοποιούν στοιχεία του μικρόκοσμου, προκειμένου να ερμηνεύσουν τη διάδοση της θερμότητας στη μεταλλική διάταξη.

5.4.2 Έργο P2

Με το **έργο P2** (Valkanou & Zoupidis, 2026) μελετήθηκε η κατανόηση των μαθητών/τριών για τη **διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς** και ο βαθμός στον οποίο μπορούν **να διακρίνουν αυτόν τον τρόπο διάδοσης της θερμότητας από τη διάδοση με αγωγή**.

Στο συγκεκριμένο έργο παρουσιάζεται στους/στις μαθητές/τριες ένας γυάλινος δοκιμαστικός σωλήνας γεμάτος με νερό, ο οποίος θερμαίνεται στο κεντρικό του σημείο με τη βοήθεια ενός φλόγιστρου. Στο υποερώτημα (α), οι μαθητές/τριες καλούνται να διατυπώσουν και να αιτιολογήσουν τις απόψεις τους σχετικά με το αν, μετά από σύντομο χρονικό διάστημα θέρμανσης, το πάνω μέρος του σωλήνα θα έχει την ίδια θερμοκρασία με το κάτω μέρος. Στο υποερώτημα (β), ζητείται να αποτυπώσουν σχεδιαστικά τον τρόπο με τον οποίο θεωρούν ότι θα διαδοθεί η θερμότητα στο νερό του δοκιμαστικού σωλήνα, ενώ στο υποερώτημα (γ) καλούνται να περιγράψουν και να ερμηνεύσουν το σχέδιο που δημιούργησαν.

Πριν από τη διδασκαλία της διάδοσης της θερμότητας με αγωγή, αναμένεται κάποιοι/ες μαθητές/τριες, στο υποερώτημα (α), να θεωρήσουν ότι θα θερμανθεί μόνο ή ευκολότερα το πάνω μέρος του σωλήνα, ταυτίζοντας τη θερμότητα με τον θερμό αέρα και θεωρώντας ότι αυτή «κινείται» με μεγαλύτερη ευκολία προς τα επάνω. Αντίστοιχα, άλλοι/ες μαθητές/τριες ενδέχεται να υποστηρίξουν ότι θα θερμανθεί μόνο ή ευκολότερα το κάτω μέρος του σωλήνα, θεωρώντας ότι η θερμότητα επηρεάζεται από τη βαρύτητα και, συνεπώς, «κινείται» προς τα κάτω. Παράλληλα, είναι πιθανό κάποιοι/ες μαθητές/τριες να εκφράσουν την άποψη ότι θα θερμανθεί όλη η ποσότητα του νερού, βασιζόμενοι κυρίως στις αισθητηριακές τους εμπειρίες, χωρίς ωστόσο να προσδιορίζουν συγκεκριμένο μηχανισμό διάδοσης της θερμότητας. Στο υποερώτημα (β), αναμένεται οι μαθητές/τριες, μέσα από τα σχέδιά τους, να αποδίδουν υλικό χαρακτήρα στην έννοια της θερμότητας και να αναπαριστούν τη διάδοσή της σε μακροσκοπικό επίπεδο.

Μετά τη διδασκαλία της διάδοσης της θερμότητας με αγωγή, αναμένεται οι μαθητές/τριες, στο υποερώτημα (α), να θεωρήσουν ότι το πάνω και το κάτω μέρος του σωλήνα θα είναι το ίδιο ζεστά, καθώς το νερό θα θερμανθεί μέσω αγωγής. Πιο συγκεκριμένα, αναμένεται να αιτιολογήσουν ότι τα δύο μέρη ισαπέχουν από την εστία θέρμανσης και, δεδομένου ότι κατά την αγωγή η θερμότητα διαδίδεται με τον ίδιο ρυθμό προς όλες τις κατευθύνσεις, θα παρουσιάζουν την ίδια θερμοκρασία. Στο υποερώτημα (β), αναμένεται να αξιοποιούν στοιχεία του μικρόκοσμου, προκειμένου να υποστηρίξουν την άποψη ότι η θερμότητα διαδίδεται εξίσου γρήγορα προς τα πάνω και προς τα κάτω. **Μετά τη διδασκαλία της διάδοσης της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς,** αναμένεται οι μαθητές/τριες να αναθεωρήσουν την προηγούμενη άποψή τους και να θεωρήσουν ότι το πάνω μέρος του σωλήνα θα είναι θερμότερο από το κάτω. Η αιτιολόγηση αναμένεται να βασίζεται στο ότι το νερό αποτελεί κακό αγωγό της θερμότητας και ότι η θέρμανσή του πραγματοποιείται κυρίως μέσω ρευμάτων μεταφοράς και όχι μέσω αγωγής. Ειδικότερα, αναμένεται να εξηγούν ότι οι θερμές μάζες νερού κινούνται προς τα επάνω, επειδή παρουσιάζουν μικρότερη πυκνότητα,

καθώς τα μόριά τους απομακρύνονται μεταξύ τους και καταλαμβάνουν μεγαλύτερο όγκο. Στο υποερώτημα (β), αναμένεται να χρησιμοποιούν στοιχεία του μικρόκοσμου για να ερμηνεύσουν την ταχύτερη θέρμανση του νερού στο πάνω μέρος του σωλήνα.

5.4.3 Έργο P3

Με το **έργο P3** (Anam et al., 2023· Valkanou & Zoupidis, 2026) μελετήθηκε η κατανόηση των μαθητών/τριών για τη **διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς** και ο βαθμός στον οποίο μπορούν **να διακρίνουν αυτόν τον τρόπο διάδοσης της θερμότητας από τη διάδοση με αγωγή**.

Στο συγκεκριμένο έργο παρουσιάζεται στους/στις μαθητές/τριες ένα γυάλινο δοχείο που περιέχει νερό, στο κάτω μέρος του οποίου έχουν τοποθετηθεί ροκανίδια ξύλου. Το δοχείο θερμαίνεται στο κάτω μέρος του από μία εστία θέρμανσης. Στο υποερώτημα (α) διερευνάται η κατανόηση των μαθητών/τριών σχετικά με τα ρεύματα μεταφοράς σε μακροσκοπικό επίπεδο. Οι μαθητές/τριες καλούνται να επιλέξουν μία από τις τέσσερις διαθέσιμες επιλογές, προκειμένου να προβλέψουν τι αναμένεται να συμβεί κατά την πραγματοποίηση του πειράματος. Η **επιλογή 1** *(το ζεστό νερό θα κινηθεί προς τα επάνω και θα σπρώχνει το νερό που βρίσκεται από πάνω του)* αντανακλά την εναλλακτική αντίληψη ότι η θερμότητα «ανεβαίνει» προς τα επάνω (Erickson & Tiberghien, 1985). Η **επιλογή 3** (*το νερό, κατά τη θέρμανσή του, δε θα κινηθεί καθόλου*) αποτυπώνει την εναλλακτική αντίληψη ότι η θέρμανση του νερού πραγματοποιείται χωρίς μακροσκοπική κίνηση του υγρού (Chiou, 2013). Και οι δύο αυτές επιλογές υποδηλώνουν εναλλακτικές αντιλήψεις ως προς την ερμηνεία του φαινομένου σε μακροσκοπικό επίπεδο. Αντίθετα, η **επιλογή 2** *(οι θερμές μάζες νερού θα ανέβουν προς τα επάνω και θα ανταλλάσσουν θέσεις με τις ψυχρότερες μάζες, δημιουργώντας έναν κύκλο)* αντιστοιχεί στην επιστημονικά αποδεκτή άποψη. Στην **επιλογή 4**, οι μαθητές/τριες έχουν τη δυνατότητα να διατυπώσουν τη δική τους πρόβλεψη και να την αιτιολογήσουν.

Στο υποερώτημα (β) εξετάζεται η κατανόηση των μαθητών/τριών για τα ρεύματα μεταφοράς σε μικροσκοπικό επίπεδο. Και σε αυτή την περίπτωση, οι μαθητές/τριες καλούνται να επιλέξουν μία από τις τέσσερις προτεινόμενες απαντήσεις. Οι **επιλογές 1 και 2** αντανακλούν εναλλακτικές αντιλήψεις για την ερμηνεία του φαινομένου σε μικροσκοπικό επίπεδο. Ειδικότερα, η **επιλογή 1** *(τα μόρια του θερμού και του ψυχρού νερού είναι το ίδιο κοντά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα το νερό να μη μετακινείται κατά τη θέρμανση)* και η **επιλογή 2** *(τα μόρια του θερμού νερού είναι κοντά μεταξύ τους, άρα είναι βαρύτερο από το περιβάλλον νερό και μετακινείται προς τα κάτω, ενώ το ψυχρό προς τα επάνω, δημιουργώντας έναν κύκλο)* δείχνουν ότι οι μαθητές/τριες τείνουν να μεταφέρουν μακροσκοπικές συμπεριφορές στο μικροσκοπικό επίπεδο (Anam et al., 2023· Chiou, 2013). Αντίθετα, η **επιλογή 3** *(τα μόρια της θερμής μάζας νερού βρίσκονται πιο μακριά μεταξύ τους, με αποτέλεσμα αυτή να είναι ελαφρύτερη από την ψυχρή, άρα να κινείται προς τα επάνω, ενώ η ψυχρή προς τα κάτω, δημιουργώντας έναν κύκλο)* αντιστοιχεί στην επιστημονικά αποδεκτή ερμηνεία του φαινομένου σε

μικροσκοπικό επίπεδο. Στην **επιλογή 4**, δίνεται εκ νέου η δυνατότητα στους/στις μαθητές/τριες να διατυπώσουν τη δική τους πρόβλεψη και αιτιολόγηση.

Στο υποερώτημα (γ), οι μαθητές/τριες καλούνται να αποτυπώσουν σχεδιαστικά τι θεωρούν ότι θα συμβεί κατά την πραγματοποίηση του πειράματος, ενώ στο υποερώτημα (δ) να περιγράψουν και να εξηγήσουν το σχέδιο που δημιούργησαν.

Αξίζει να αναφερθεί ότι στο εν λόγω έργο, το οποίο προέρχεται από την έρευνα των Anam et al (2023), οι Valkanou & Zoupidis (2026) πραγματοποίησαν τροποποίηση στην έκφραση των επιλογών 2 (υποερώτημα α) και 2, 3 (υποερώτημα β), έτσι ώστε να περιλαμβάνουν την έκφραση *«δημιουργώντας έναν κύκλο»*, για να υπάρχει συνοχή με τους μαθησιακούς στόχους της ΔΜΑ που σχεδίασαν.

Πριν από τη διδασκαλία της διάδοσης της θερμότητας με αγωγή, στο υποερώτημα (α), αναμένεται οι μαθητές/τριες να θεωρήσουν ότι το θερμό νερό θα κινηθεί προς τα επάνω (επιλογή 1 ή 4), καθώς είναι πιθανό να αντιλαμβάνονται γενικότερα το θερμό ως ένα είδος ρευστού που «κινείται» ευκολότερα προς τα πάνω. Παράλληλα, κάποιοι/ες μαθητές/τριες ενδέχεται να θεωρήσουν ότι το νερό δεν θα κινηθεί καθόλου (επιλογή 3). Στο υποερώτημα (β), αναμένεται να μην είναι σε θέση να ερμηνεύσουν το φαινόμενο σε μικροσκοπικό επίπεδο και, ως εκ τούτου, να επιλέξουν κάποια απάντηση που αντανακλά εναλλακτική αντίληψη (επιλογή 1, 2 ή 4). Στα υποερωτήματα (γ) και (δ), αναμένεται οι μαθητές/τριες να αποτυπώνουν τη διάδοση της θερμότητας χρησιμοποιώντας σύμβολα ή αναπαραστάσεις που αποδίδουν υλικό χαρακτήρα στην έννοια της θερμότητας. Επιπλέον, αναμένεται η ερμηνεία της να περιορίζεται αποκλειστικά στο μακροσκοπικό επίπεδο.

Μετά τη διδασκαλία της διάδοσης της θερμότητας με αγωγή, στο υποερώτημα (α), αναμένεται κάποιοι/ες μαθητές/τριες να διατηρήσουν τις αρχικές τους απόψεις, οι οποίες περιεγράφηκαν προηγουμένως, ενώ άλλοι να θεωρήσουν ότι η θερμότητα θα διαδοθεί μέσω αγωγής και, συνεπώς, θα μεταφερθεί σε ολόκληρο το γυάλινο δοχείο (επιλογή 4). Στο υποερώτημα (β), αναμένεται κάποιοι/ες μαθητές/τριες να εξακολουθούν να δυσκολεύονται να ερμηνεύσουν το φαινόμενο σε μικροσκοπικό επίπεδο, επιλέγοντας απαντήσεις που υποδηλώνουν εναλλακτικές αντιλήψεις (επιλογή 1 ή 2), ενώ άλλοι αναμένεται να αξιοποιούν στοιχεία του μικρόκοσμου, προκειμένου να ερμηνεύσουν τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή στο γυάλινο δοχείο (επιλογή 4). Αντίστοιχα, στα υποερωτήματα (γ) και (δ), αναμένεται ορισμένοι/ες μαθητές/τριες να συνεχίσουν να αναπαριστούν τη διάδοση της θερμότητας αποκλειστικά σε μακροσκοπικό επίπεδο, ενώ άλλοι να ενσωματώνουν στοιχεία του μικρόκοσμου, προκειμένου να ερμηνεύσουν τη διάδοση της θερμότητας στο νερό μέσω αγωγής.

Μετά τη διδασκαλία της διάδοσης της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς, αναμένεται οι μαθητές/τριες να διακρίνουν ότι η θερμότητα στο νερό του δοχείου διαδίδεται με διαφορετικό μηχανισμό από αυτόν της αγωγής. Συνεπώς, στο υποερώτημα (α), αναμένεται να επιλέγουν την επιστημονικά αποδεκτή άποψη σε μακροσκοπικό επίπεδο (επιλογή 2), ενώ στο υποερώτημα (β) την επιστημονικά αποδεκτή άποψη σε μικροσκοπικό επίπεδο (επιλογή 3). Τέλος, στα υποερωτήματα (γ) και (δ), αναμένεται να αξιοποιούν στοιχεία του μικρόκοσμου, προκειμένου να ερμηνεύσουν την κυκλική πορεία των ρευμάτων μεταφοράς.

5.5 Τρόπος ανάλυσης των δεδομένων

Η ανάλυση των μαθητικών σχεδίων ακολούθησε ποιοτική ερμηνευτική προσέγγιση. Για τη συστηματική εξέταση των οπτικών και αναπαραστατικών χαρακτηριστικών τους αξιοποιήθηκε κοινωνικοσημειωτικός προσανατολισμός και ειδικότερα αναλυτικά πλαίσια, ενώ για τη διερεύνηση των ιδεών των μαθητών/τριών αναπτύχθηκε σύστημα εννοιολογικών κατηγοριών με συνδυασμό παραγωγικών και επαγωγικών διαδικασιών.

Η ανάλυση αφορούσε σε μαθητικά σχέδια που συλλέχθηκαν σε πέντε χρονικά σημεία: ΠΡΙΝ την εφαρμογή της ΔΜΑ, κατά τη διάρκειά της (ΕΝΔ1, ΕΝΔ2), αμέσως ΜΕΤΑ την ολοκλήρωσή της, καθώς και δέκα μήνες μετά (ΜΜΕΤΑ). Βασική μονάδα ανάλυσης αποτέλεσε το σχέδιο κάθε μαθητή/τριας μαζί με τη σύντομη γραπτή περιγραφή που το συνόδευε. Η γραπτή περιγραφή συνεξετάστηκε μαζί με το σχέδιο, προκειμένου να διασαφηνιστεί το νόημα των σημειωτικών πόρων και δεν αναλύθηκε ανεξάρτητα.

Συνολικά αναλύθηκαν **270 μαθητικά σχέδια**, τα οποία προέκυψαν από τη συμμετοχή 18 μαθητών/τριών σε τρία έργα (ΑΓ3, Ρ2 και Ρ3) και σε πέντε χρονικά σημεία (18 μαθητές/τριες × 3 έργα × 5 χρονικά σημεία). Η ποιοτική ανάλυση υποστηρίχθηκε από περιγραφικές ποσοτικοποιήσεις, μέσω του υπολογισμού των συχνοτήτων εμφάνισης των κύριων κατηγοριών, υποκατηγοριών, σημειωτικών πόρων και επιπέδων αναπαράστασης, ανά χρονικό σημείο. Η διαδικασία της ανάλυσης υλοποιήθηκε σε **πέντε** (5) διαδοχικά στάδια:

1. **Ανάλυση με βάση τις διαστάσεις Tang et al. (2019)**

Κάθε σχέδιο αναλύθηκε ως προς τρεις βασικές διαστάσεις:

- **Βασικά οπτικά στοιχεία:** καταγράφηκαν στοιχεία, όπως η πειραματική διάταξη, τα χρώματα, τα βέλη, οι γραμμές/ διαδρομές, τα σωματιδιακά στοιχεία, οι αριθμοί, τα σύμβολα και οι λεκτικές επισημάνσεις.
- **Χωρική οργάνωση:** εξετάστηκε η θέση των οπτικών στοιχείων σε σχέση με την πηγή θέρμανσης, η κατανομή τους στο υλικό και η γραμμική, κυκλική ή συμμετρική οργάνωσή τους.
- **Απόδοση κίνησης, διαδικασίας ή σχέσεων:** εξετάστηκε η οπτική απόδοση της κατεύθυνσης, της διάδοσης, της ανόδου, της καθόδου και της κυκλοφορίας.

Στο στάδιο αυτό, η ανάλυση επικεντρώθηκε στο τι απεικονίζεται και πώς οργανώνεται στο σχέδιο, χωρίς να αξιολογείται ακόμη η επιστημονική επάρκεια της αναπαράστασης.

2. **Κατάταξη με βάση το πλαίσιο των Park et al. (2020)**

Στη συνέχεια εξετάστηκαν τα επίπεδα εικονογραφικής αναπαράστασης με βάση το πλαίσιο των Park et al. (2020). Οι συγγραφείς διακρίνουν τρία επίπεδα:

- **Sensory (SS):** περιλαμβάνει άμεσα παρατηρήσιμες οντότητες και κινήσεις, δηλαδή στοιχεία του φαινομένου που μπορούν να γίνουν αντιληπτά μέσω των αισθήσεων

- **Unseen Substance (US):** περιλαμβάνει μη άμεσα ορατές υλικές οντότητες, όπως μόρια ή άλλα σωματίδια, καθώς και την κίνησή τους
- **Unseen Non-substance (UN):** περιλαμβάνει μη υλικές έννοιες, σχέσεις ή αλληλεπιδράσεις που δεν είναι άμεσα παρατηρήσιμες

Στα δεδομένα της παρούσας έρευνας εντοπίστηκαν αναπαραστάσεις που περιορίζονταν στο επίπεδο SS και αναπαραστάσεις στις οποίες συνυπήρχαν στοιχεία των επιπέδων SS και US. Οι τελευταίες κωδικοποιήθηκαν ως SS+US, ώστε να αποδοθεί η συνύπαρξη μακροσκοπικών/παρατηρήσιμων στοιχείων και μη ορατών σωματιδιακών οντοτήτων στο ίδιο σχέδιο. Η σημειογραφία SS+US χρησιμοποιείται ως προσαρμογή του πλαισίου των Park et al. (2020) στην ανάλυση των τελικών μαθητικών σχεδίων και δεν υποδηλώνει χρονική ακολουθία κατασκευής τους. Αμιγείς αναπαραστάσεις US ή αναπαραστάσεις επιπέδου UN δεν εντοπίστηκαν στα δεδομένα. Τέλος, η παρουσία σωματιδιακών στοιχείων δε θεωρήθηκε αυτομάτως ένδειξη επιστημονικά επαρκούς εξήγησης, καθώς η επιστημονική επάρκεια εξετάστηκε χωριστά με βάση το εννοιολογικό περιεχόμενο κάθε αναπαράστασης.

3. Συνοπτική συνθετική σημείωση για το νόημα της αναπαράστασης

Με βάση τη συνδυαστική εξέταση των οπτικών στοιχείων, της χωρικής οργάνωσης, της διαδικασίας που αποδιδόταν και της συνοδευτικής γραπτής περιγραφής για κάθε σχέδιο διατυπώθηκε μία σύντομη ερμηνευτική σημείωση. Η σημείωση συνόψιζε την ιδέα που εκφραζόταν στην αναπαράσταση, όπως τι θεωρούνταν ότι κινείται ή διαδίδεται, ποια διαδικασία αποδιδόταν και ποια βασικά στοιχεία του επιστημονικού μηχανισμού περιλαμβάνονταν ή απουσίαζαν. Η συνοδευτική γραπτή περιγραφή δεν αναλύθηκε ως ανεξάρτητη απάντηση ούτε συγκρίθηκε συστηματικά με το σχέδιο, αλλά αξιοποιήθηκε υποστηρικτικά για την αποσαφήνιση του νοήματος αμφίσημων σημειωτικών πόρων.

4. Διαμόρφωση εννοιολογικών κατηγοριών ανά έργο

Για την ανάλυση των ιδεών των μαθητών/τριών αναπτύχθηκε ένα ιεραρχικό σύστημα κωδικοποίησης δύο επιπέδων. Το **πρώτο επίπεδο** αφορούσε στη συγκεκριμένη ιδέα ή τον τύπο εξήγησης που εκφραζόταν στο σχέδιο, ενώ το **δεύτερο** αφορούσε στον βαθμό επιστημονικής επάρκειας της αναπαράστασης.

Για την αποτίμηση της επιστημονικής επάρκειας των αναπαραστάσεων αξιοποιήθηκε το τετραβάθμιο σύστημα κατηγοριοποίησης που είχε ήδη διαμορφωθεί στο πλαίσιο της ευρύτερης έρευνας, μέρος της οποίας αποτελεί και η παρούσα μελέτη, και είχε εφαρμοστεί στην ανάλυση των υπόλοιπων έργων του ερωτηματολογίου (Valkanou & Zoupidis, 2026). Οι τέσσερις κατηγορίες και η βασική λειτουργική τους περιγραφή παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.7.

Η ανάπτυξη του συστήματος κατηγοριοποίησης ακολούθησε συνδυαστική παραγωγική (top-down) και επαγωγική (bottom-up) ανάλυση. Οι γενικές κατηγορίες επιστημονικής επάρκειας προσδιορίστηκαν παραγωγικά με βάση το επιστημονικό περιεχόμενο, τους στόχους της ΔΜΑ, τη σχετική βιβλιογραφία για τις εναλλακτικές αντιλήψεις των μαθητών/τριών και το υφιστάμενο σύστημα κατηγοριοποίησης που

είχε ήδη χρησιμοποιηθεί στα υπόλοιπα έργα του ερωτηματολογίου (Valkanou & Zoupidis, 2026). Παράλληλα, για κάθε έργο διαμορφώθηκαν ειδικότερες υποκατηγορίες, οι οποίες προέκυψαν τόσο από τα παραπάνω θεωρητικά κριτήρια όσο και επαγωγικά από επαναλαμβανόμενες ιδέες και τύπους εξήγησης που εντοπίστηκαν στα δεδομένα.

Πίνακας 5.7. Γενικές κατηγορίες επιστημονικής επάρκειας των αναπαραστάσεων

Κωδικός	Κατηγορία	Περιγραφή
3	Επαρκής/ επιστημονικά αποδεκτή	Η αναπαράσταση περιλαμβάνει τα βασικά επιστημονικά στοιχεία που απαιτούνται για την επαρκή ερμηνεία του φαινομένου
2	Ενδιάμεση/ μερικώς επιστημονικά αποδεκτή	Η αναπαράσταση περιλαμβάνει επιστημονικά αποδεκτά στοιχεία, αλλά η εξήγηση είναι ελλιπής ή δεν αποδίδει πλήρως τον επιστημονικό μηχανισμό
1	Ανεπαρκής/ εναλλακτική αντίληψη	Η αναπαράσταση αποδίδει το φαινόμενο με τρόπο που δεν είναι επιστημονικά επαρκής ή εκφράζει εναλλακτική αντίληψη
0	Ασαφής, άσχετη ή μη ερμηνεύσιμη	Η αναπαράσταση δεν επιτρέπει την αξιόπιστη απόδοση συγκεκριμένης ιδέας σχετικά με το υπό εξέταση φαινόμενο

Κατά την αρχική κωδικοποίηση χρησιμοποιήθηκε λεπτομερέστερο σύστημα υποκατηγοριών (5 για το ΑΓ3, 7 για το Ρ2 και 10 για το Ρ3). Μετά την πιλοτική εφαρμογή και τη συστηματική σύγκριση των περιπτώσεων, συναφείς υποκατηγορίες ομαδοποιήθηκαν, με αποτέλεσμα το τελικό σύστημα να περιλαμβάνει:

- **4 υποκατηγορίες για το έργο ΑΓ3** (2α, 2β, 1α, 1β),
- **5 υποκατηγορίες για το έργο Ρ2** (2α, 2β, 2γ, 1α, 1β),
- **5 υποκατηγορίες για το έργο Ρ3** (2α, 2β, 2γ, 1α, 1β).

Κάθε σχέδιο έλαβε **μία κύρια κατηγορία επάρκειας (0,1,2,3)** και **μία κύρια υποκατηγορία ιδέας**. Παρακάτω στους πίνακες 5.8-5.10 παρουσιάζονται συνοπτικά οι υποκατηγορίες των τριών έργων. Οι λειτουργικοί ορισμοί, τα κριτήρια ένταξης και διάκρισης και ενδεικτικά παραδείγματα για κάθε υποκατηγορία παρατίθενται αναλυτικά στο Παράρτημα Β.

Πίνακας 5.8. Συνοπτική παρουσίαση των κατηγοριών και υποκατηγοριών για το έργο ΑΓ3

Ευρεία κατηγορία	Κωδικός	Ονομασία
	2α	Δυναμική απόδοση της διάδοσης σε όλη τη μεταλλική διάταξη χωρίς επιστημονικά αποδεκτό μικροσκοπικό μηχανισμό

2: Μερικώς επιστημονικά αποδεκτές	2β	Στατική θερμοκρασιακή ή χρονική διαβάθμιση σε όλη τη μεταλλική διάταξη χωρίς απόδοση της διαδικασίας διάδοσης
1: Εναλλακτικές αντιλήψεις	1α	Περιορισμένη ή κατευθυντικά επιλεκτική διάδοση της θερμότητας
	1β	Διάδοση σε όλη τη μεταλλική διάταξη μέσω χωρικά ασαφούς ή εξωτερικής διαδρομής

Πίνακας 5.9. Συνοπτική παρουσίαση υποκατηγοριών για το έργο Ρ2

Ευρεία κατηγορία	**Κωδικός**	**Ονομασία**
2: Μερικώς επιστημονικά αποδεκτές	2α	Ορθή θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση χωρίς απόδοση της κίνησης του νερού
	2β	Απόδοση της κίνησης του θερμού και ενδεχομένως του ψυχρότερου νερού χωρίς αιτιολόγηση μέσω διαφορετικής πυκνότητας
	2γ	Μερική αιτιακή απόδοση του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς
1: Εναλλακτικές αντιλήψεις	1α	Διάδοση ή κατανομή της θερμότητας χωρίς κίνηση του νερού
	1β	Εφαρμογή του σωματιδιακού μοντέλου της αγωγής στο νερό

Πίνακας 5.10. Συνοπτική παρουσίαση υποκατηγοριών για το έργο Ρ3

Ευρεία κατηγορία	**Κωδικός**	**Ονομασία**
2: Μερικώς επιστημονικά αποδεκτές	2α	Κυκλική κίνηση του νερού χωρίς αιτιολόγηση του μηχανισμού
	2β	Ορθή στατική θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση χωρίς απόδοση της κυκλοφορίας του νερού
	2γ	Κυκλική κίνηση του νερού με μερική αιτιακή απόδοση του μηχανισμού
1: Εναλλακτικές αντιλήψεις	1α	Απουσία κυκλοφορίας ή απόδοση μόνο αποτελέσματος της θέρμανσης
	1β	Μερική ή εναλλακτική απόδοση της κίνησης και της διάδοσης

Αξίζει να αναφερθεί ότι ειδικά για το έργο Ρ3, στις φάσεις ΠΡΙΝ και ΕΝΔ1, οι αναπαραστάσεις στις οποίες αποδιδόταν κυκλική κίνηση του νερού χωρίς πρόσθετη αιτιολόγηση κωδικοποιήθηκαν στην κατηγορία 0. Η πληροφορία σχετικά με την κυκλική κίνηση είχε ήδη παρασχεθεί στους/στις μαθητές/τριες μέσω των

προηγούμενων ερωτημάτων κλειστού τύπου του ίδιου έργου. Ως εκ τούτου, η απλή αναπαραγωγή της κυκλικής πορείας στην ανοικτή απάντηση δε θεωρήθηκε ανεξάρτητη ένδειξη κατανόησης του φαινομένου, καθώς ήταν δυνατό να βασίζεται στην πληροφορία που είχε δοθεί στα προηγούμενα υποερωτήματα.

5. Περιγραφική σύγκριση μεταξύ των χρονικών σημείων

Μετά την ολοκλήρωση της κατηγοριοποίησης, πραγματοποιήθηκε περιγραφική σύγκριση των κατηγοριών και υποκατηγοριών μεταξύ των πέντε χρονικών σημείων. Για κάθε έργο υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισης των κατηγοριών και υποκατηγοριών σε επίπεδο τάξης, προκειμένου να εντοπιστούν μεταβολές στις ιδέες των μαθητών/τριών κατά τη διάρκεια και μετά τη διδασκαλία. Επιπλέον, εξετάστηκε ενδεικτικά η διαχρονική πορεία επιλεγμένου/ης μαθητή/τριας στα πέντε χρονικά σημεία, ώστε να αποτυπωθεί σε ατομικό επίπεδο η εξέλιξη των αναπαραστάσεών του/της.

Για τη διερεύνηση των σημειωτικών χαρακτηριστικών των αναπαραστάσεων καταγράφηκε επίσης η παρουσία των βασικών σημειωτικών πόρων σε κάθε σχέδιο. Η καταγραφή ήταν μη αμοιβαία αποκλειόμενη, καθώς στο ίδιο σχέδιο μπορούσαν να συνυπάρχουν περισσότεροι από ένας πόροι. Υπολογίστηκαν οι συχνότητες εμφάνισής τους ανά έργο και χρονικό σημείο και εξετάστηκε ποιοτικά η λειτουργία που επιτελούσαν στην αναπαράσταση. Αντίστοιχα, συγκρίθηκαν μεταξύ των χρονικών σημείων οι συχνότητες των επιπέδων αναπαράστασης SS και SS+US.

5.6 Διαδικασία ελέγχου και ενίσχυσης της αξιοπιστίας της ανάλυσης

Πριν από την κύρια ανάλυση πραγματοποιήθηκε πιλοτική εφαρμογή του αναλυτικού πλαισίου από τη φοιτήτρια και από μία έμπειρη ερευνήτρια. Για καθένα από τα έργα ΑΓ3, Ρ2 και Ρ3 εξετάστηκαν αρχικά τα σχέδια τριών μαθητών/τριών στα χρονικά σημεία ΠΡΙΝ και ΜΕΤΑ. Η πιλοτική αυτή εφαρμογή αποσκοπούσε στην αποσαφήνιση των διαστάσεων ανάλυσης, των λειτουργικών ορισμών και των κανόνων κατάταξης στα επίπεδα και τους συνδυασμούς επιπέδων αναπαράστασης με βάση το πλαίσιο των Park et al. (2020), καθώς και του τρόπου διατύπωσης της συνολικής ερμηνευτικής σημείωσης.

Στη συνέχεια, το πλαίσιο εφαρμόστηκε στα υπόλοιπα χρονικά σημεία των ίδιων μαθητών/τριών και σε πρόσθετες περιπτώσεις ακόμα δύο μαθητών/τριών για το σύνολο των χρονικών σημείων. Οι αποκλίσεις και οι αμφίσημες περιπτώσεις καταγράφηκαν και συζητήθηκαν από τη φοιτήτρια και την ερευνήτρια και, όπου κρίθηκε απαραίτητο, οι λειτουργικοί ορισμοί και οι κανόνες κωδικοποίησης αποσαφηνίστηκαν ή αναθεωρήθηκαν. Η διαδικασία αυτή συνέβαλε στη συνεπέστερη εφαρμογή του αναλυτικού πλαισίου στο σύνολο των δεδομένων.

Μετά την οριστικοποίηση του συστήματος κατηγοριοποίησης, ένα σκόπιμα επιλεγμένο υποσύνολο των δεδομένων κωδικοποιήθηκε ανεξάρτητα από τη φοιτήτρια και την ερευνήτρια. Στο υποσύνολο περιλαμβάνονταν αποκρίσεις και από τα τρία έργα, από διαφορετικά χρονικά σημεία και από διαφορετικές κατηγορίες επιστημονικής

επάρκειας. Οι δύο κωδικοποιήσεις συγκρίθηκαν ως προς την κύρια υποκατηγορία ιδέας, τη γενική κατηγορία επιστημονικής επάρκειας, επίπεδο ή τον συνδυασμό επιπέδων αναπαράστασης καθώς και την καταγραφή των σημειωτικών πόρων που εμφανίζονταν στα σχέδια. Οι αποκλίσεις συζητήθηκαν μεταξύ της φοιτήτριας, της έμπειρης ερευνήτριας και του επιβλέποντος καθηγητή, μέχρι να επιτευχθεί συμφωνία αναφορικά με την κατηγοριοποίηση κάθε σχεδίου.

Κεφάλαιο 6ο: Αποτελέσματα

6.1 Ιδέες μαθητών/τριών και μεταβολές τους μεταξύ των χρονικών σημείων

6.1.1 Διάδοση της θερμότητας με αγωγή – έργο ΑΓ3

Α. Κατανομή και μεταβολές των ιδεών

Στο Έργο ΑΓ3 εξετάστηκαν οι ιδέες των 18 μαθητών/τριών σχετικά με τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή, όπως αυτές αποτυπώθηκαν στα σχέδιά τους σε πέντε χρονικά σημεία: ΠΡΙΝ, ΕΝΔ1, ΕΝΔ2, ΜΕΤΑ και ΜΜΕΤΑ τη διδακτική παρέμβαση. Η κατανομή των αναπαραστάσεων στις κατηγορίες και υποκατηγορίες που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.5 αποτυπώνεται στον Πίνακα 6.1. Σε κανένα χρονικό σημείο δεν εντοπίστηκε αναπαράσταση της Κατηγορίας 3, δηλαδή πλήρης και επιστημονικά αποδεκτή απόδοση του μηχανισμού της αγωγής.

Πίνακας 6.1. Κατανομή των κατηγοριών και υποκατηγοριών του έργου ΑΓ3 στα πέντε χρονικά σημεία

Κατηγορία	ΠΡΙΝ	ΕΝΔ1	ΕΝΔ2	ΜΕΤΑ	ΜΜΕΤΑ
3 – Επαρκής/ επιστημονικά αποδεκτή	0	0	0	0	0
2α – Δυναμική απόδοση της διάδοσης σε όλη τη μεταλλική διάταξη χωρίς επιστημονικά αποδεκτό μικροσκοπικό μηχανισμό	0	4	3	5	2
2β – Στατική θερμοκρασιακή ή χρονική διαβάθμιση σε όλη τη μεταλλική διάταξη χωρίς απόδοση της διαδικασίας διάδοσης	0	5	7	8	6
1α – Περιορισμένη ή κατευθυντικά επιλεκτική διάδοση της θερμότητας	8	7	7	3	4
1β – Διάδοση σε όλη τη μεταλλική διάταξη μέσω χωρικά ασαφούς ή εξωτερικής διαδρομής	9	2	1	2	5
0 – Ασαφής αναπαράσταση	1	0	0	0	1
ΣΥΝΟΛΟ	18	18	18	18	18

Όπως φαίνεται στον Πίνακα 6.1, στο **ΠΡΙΝ** κυριαρχούσαν οι υποκατηγορίες 1α και 1β, στις οποίες εντάχθηκαν συνολικά 17 από τις 18 αναπαραστάσεις. Οι μαθητές/τριες απέδιδαν τη θερμότητα κυρίως ως κάτι που ακολουθεί μια συγκεκριμένη «πορεία» στη

μεταλλική διάταξη. Σε ορισμένες περιπτώσεις η διάδοση περιοριζόταν σε συγκεκριμένα τμήματα ή κατευθύνσεις, ενώ σε άλλες θεωρούνταν ότι επεκτείνεται σε μεγαλύτερο μέρος της διάταξης, χωρίς όμως να αποδίδεται με σαφήνεια η διαδρομή της μέσα από το μέταλλο. Παράλληλα, εμφανιζόταν η ιδέα ότι τα σημεία που βρίσκονται πλησιέστερα στην πηγή θερμαίνονται νωρίτερα ή περισσότερο από τα πιο απομακρυσμένα.

Κατά τη διάρκεια της ΔΜΑ και αμέσως μετά από αυτή παρατηρήθηκε μετατόπιση προς τις υποκατηγορίες 2α και 2β. Ήδη στο **ΕΝΔ1** οι υποκατηγορίες αυτές εμφανίστηκαν σε 9 από τις 18 αναπαραστάσεις, ενώ στο **ΜΕΤΑ** συγκέντρωσαν 13 από τις 18. Οι μαθητές/τριες άρχισαν να αποδίδουν συστηματικότερα τη διάδοση σε ολόκληρη τη μεταλλική διάταξη και να διαφοροποιούν τις επιμέρους περιοχές της ως προς τον βαθμό ή τη χρονική σειρά θέρμανσης. Σε αρκετά σχέδια εμφανίστηκαν επίσης σωματιδιακά στοιχεία και προσπάθειες δυναμικής απόδοσης της διαδικασίας. Ωστόσο, ακόμη και στις περισσότερο εξελιγμένες αναπαραστάσεις δεν αποδόθηκε με σαφήνεια η διάδοση θερμότητας μεταξύ γειτονικών σωματιδίων, γεγονός που εξηγεί την απουσία αναπαραστάσεων της Κατηγορίας 3.

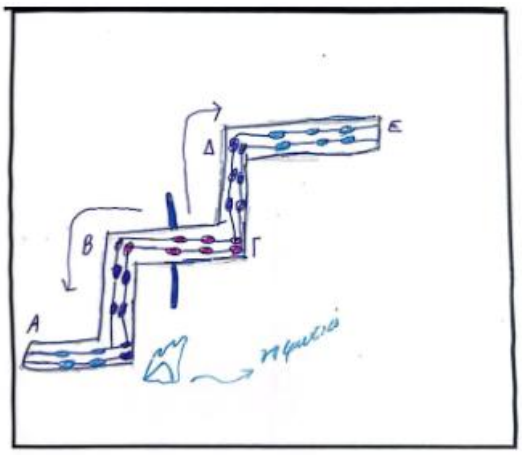
Στο **ΜΜΕΤΑ** οι υποκατηγορίες 2α και 2β εξακολουθούσαν να εμφανίζονται σε 8 από τις 18 αναπαραστάσεις, αλλά παράλληλα αυξήθηκε εκ νέου η παρουσία των 1α και 1β. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι ορισμένα στοιχεία που εμφανίστηκαν κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τη διδασκαλία διατηρήθηκαν δέκα μήνες αργότερα, χωρίς όμως η μεταβολή να είναι σταθερή για το σύνολο των μαθητών/τριών. Ιδιαίτερα η απόδοση της διάδοσης σε ολόκληρη τη διάταξη και η θερμική διαφοροποίηση των επιμέρους περιοχών φαίνεται να διατηρήθηκαν περισσότερο από την απόδοση του μηχανισμού της αγωγής.

Β. Χαρακτηριστικά σχέδια ανά υποκατηγορία

Για την πληρέστερη παρουσίαση των ιδεών που αναδείχθηκαν στο έργο ΑΓ3, παρουσιάζεται στη συνέχεια ένα χαρακτηριστικό σχέδιο για κάθε υποκατηγορία. Τα σχέδια επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικά παραδείγματα και εξετάζονται ως προς τα βασικά στοιχεία που τεκμηριώνουν την ένταξή τους στην αντίστοιχη υποκατηγορία.

Υποκατηγορία 2α – Δυναμική απόδοση της διάδοσης σε όλη τη μεταλλική διάταξη χωρίς επιστημονικά αποδεκτό μικροσκοπικό μηχανισμό

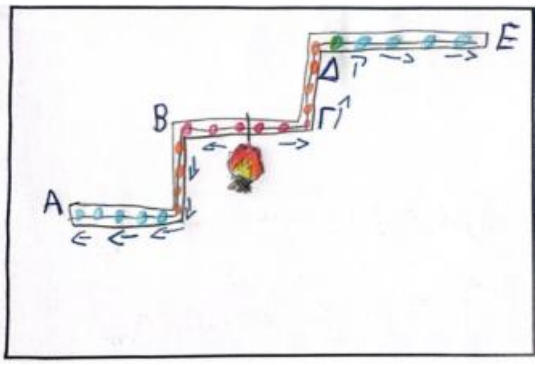
Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2α επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην εικόνα 6.1. Σε αυτό το σχέδιο, η διάδοση αποδίδεται σε ολόκληρη τη μεταλλική διάταξη μέσω κατευθυντικών βελών, ενώ παράλληλα εμφανίζονται σωματιδιακά στοιχεία με χρωματικές διαφοροποιήσεις. Η αναπαράσταση έχει δυναμικό χαρακτήρα, καθώς επιχειρείται να αποδοθεί η πορεία της διάδοσης από την περιοχή της πηγής προς πιο απομακρυσμένες περιοχές. Ωστόσο, δεν αποδίδεται με σαφήνεια ο τρόπος με τον οποίο η ενέργεια μεταβιβάζεται μεταξύ γειτονικών σωματιδίων, στοιχείο που τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 2α.



Εικόνα 6.1. Σχέδιο του μαθητή Μ10 στο ΕΝΔ2

Υποκατηγορία 2β – Στατική θερμοκρασιακή ή χρονική διαβάθμιση σε όλη τη μεταλλική διάταξη χωρίς απόδοση της διαδικασίας διάδοσης

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2β επιλέχθηκε το σχέδιο της εικόνας 6.2. Σε αυτό το σχέδιο, διαφοροποιούνται χρωματικά οι επιμέρους περιοχές της μεταλλικής διάταξης ανάλογα με τη θέση τους σε σχέση με την πηγή θέρμανσης. Αποδίδεται έτσι η διαφορετική θερμική κατάσταση ή/και η χρονική σειρά θέρμανσης κατά μήκος της διάταξης, χωρίς όμως να αναπαρίσταται ο μηχανισμός μέσω του οποίου πραγματοποιείται η διάδοση της θερμότητας. Για τον λόγο αυτό το σχέδιο εντάχθηκε στην υποκατηγορία 2β.

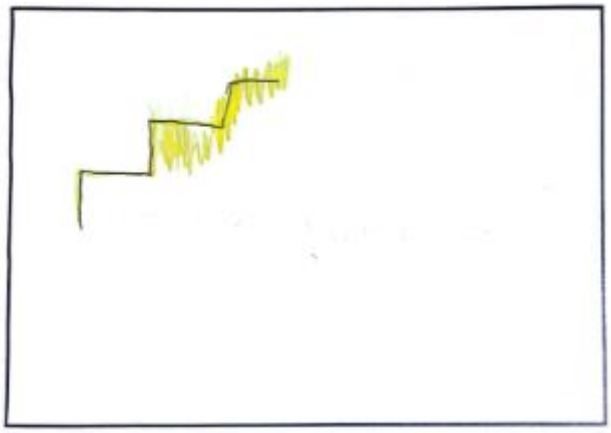


Εικόνα 6.2. Σχέδιο του μαθητή Μ10 στο ΜΕΤΑ

Υποκατηγορία 1α – Περιορισμένη ή κατευθυντικά επιλεκτική διάδοση της θερμότητας

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2β επιλέχθηκε το σχέδιο της εικόνας 6.3. Σε αυτό το σχέδιο, η θερμική επίδραση αποδίδεται μόνο σε επιλεγμένα τμήματα της μεταλλικής διάταξης, με αποτέλεσμα η διάδοση να εμφανίζεται περιορισμένη ή κατευθυντικά επιλεκτική και όχι να επεκτείνεται σε ολόκληρο το

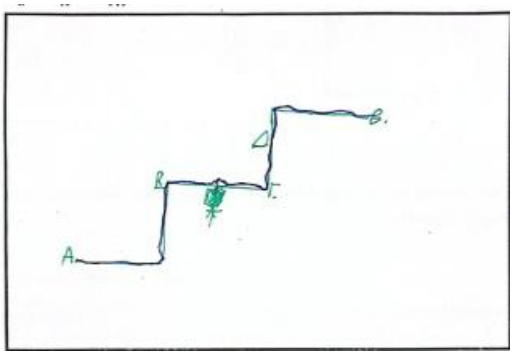
μεταλλικό αντικείμενο. Το χαρακτηριστικό αυτό αποτελεί το βασικό κριτήριο για την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 1α.



Εικόνα 6.3. Σχέδιο του μαθητή Μ2 στο ΠΡΙΝ

Υποκατηγορία 1β – Διάδοση σε όλη τη μεταλλική διάταξη μέσω χωρικά ασαφούς ή εξωτερικής διαδρομής

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2β επιλέχθηκε το σχέδιο της εικόνας 6.4. Σε αυτό το σχέδιο, η θερμική επίδραση φαίνεται να συνδέεται με περισσότερα τμήματα της μεταλλικής διάταξης, χωρίς όμως να αποδίδεται με σαφήνεια η πορεία της διάδοσης μέσα ή κατά μήκος του ίδιου του μετάλλου. Η χωρική ασάφεια της διαδρομής διαφοροποιεί το σχέδιο από τις περιπτώσεις περιορισμένης διάδοσης και τεκμηριώνει την ένταξή του στην υποκατηγορία 1β.

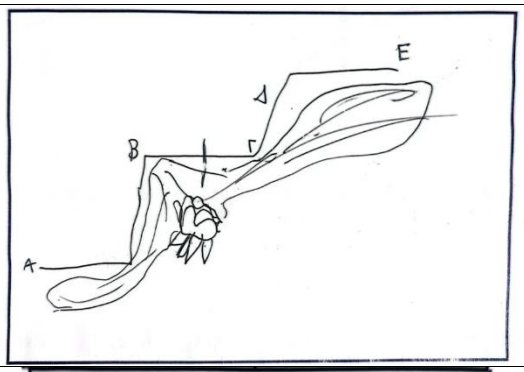
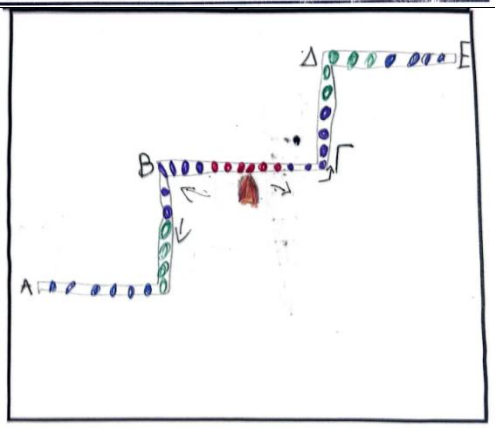
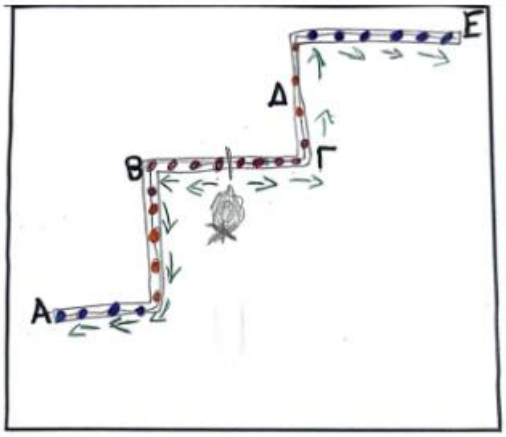
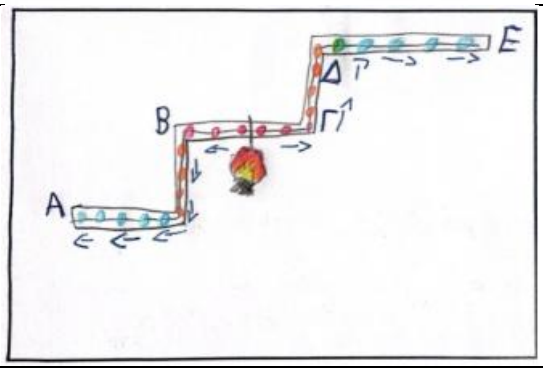


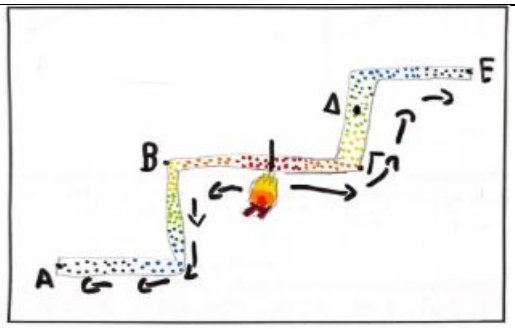
Εικόνα 6.4. Σχέδιο του μαθητή Μ1 στο ΜΜΕΤΑ

Γ. Χαρακτηριστική ατομική πορεία

Για την αποτύπωση της εξέλιξης των ιδεών σε ατομικό επίπεδο, επιλέχθηκε η περίπτωση του/της Μ10, καθώς οι αναπαραστάσεις του/της στα πέντε χρονικά σημεία παρουσιάζουν χαρακτηριστικές μεταβολές στον τρόπο απόδοσης της διάδοσης της θερμότητας με αγωγή.

Πίνακας 6.2. Ατομική πορεία του/ της Μ10 στο έργο ΑΓ3

Χρονικό σημείο	Σχέδιο	Κατηγορία/ Υποκατηγορία
ΠΡΙΝ		**1β**
ΕΝΔ1		**2α**
ΕΝΔ2		**2β**
ΜΕΤΑ		**2β**

ΜΜΕΤΑ		**2β**

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.2, στο **ΠΡΙΝ**, ο/η Μ10 αποδίδει το φαινόμενο κυρίως μέσα από τη μακροσκοπική διάταξη, χωρίς σαφή διαφοροποίηση της θερμικής κατάστασης κατά μήκος του μετάλλου. Στο **ΕΝΔ1** εμφανίζονται σωματιδιακά και χρωματικά στοιχεία, μέσω των οποίων διαφοροποιούνται περιοχές της διάταξης σε σχέση με την πηγή θέρμανσης. Στα **ΕΝΔ2 και ΜΕΤΑ** η αναπαράσταση οργανώνεται συστηματικότερα σε ολόκληρη τη διάταξη και ενσωματώνονται στοιχεία που αποδίδουν είτε τη διαδικασία διάδοσης είτε τη θερμική διαφοροποίηση των επιμέρους περιοχών. Στο **ΜΜΕΤΑ** διατηρείται η απόδοση της θερμικής διαφοροποίησης κατά μήκος της διάταξης, χωρίς ωστόσο να εμφανίζεται σαφής επιστημονικά αποδεκτός μηχανισμός αγωγής.

Συνολικά, η πορεία του/της Μ10 χαρακτηρίζεται από μετάβαση από μια αρχική, χωρικά ασαφή απόδοση της διάδοσης προς περισσότερο οργανωμένες αναπαραστάσεις της θερμικής διαφοροποίησης και της διάδοσης σε ολόκληρη τη μεταλλική διάταξη. Η μεταβολή αυτή διατηρείται σε σημαντικό βαθμό έως το ΜΜΕΤΑ, χωρίς όμως να συνοδεύεται από πλήρη απόδοση του μικροσκοπικού μηχανισμού της αγωγής.

6.1.2 Διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς - έργο Ρ2

Α. Κατανομή και μεταβολές των ιδεών

Στο έργο Ρ2 εξετάστηκαν οι ιδέες των 18 μαθητών/τριών σχετικά με τη διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς στο νερό, όπως αποτυπώθηκαν στα σχέδιά τους στα πέντε χρονικά σημεία ΠΡΙΝ, ΕΝΔ1, ΕΝΔ2, ΜΕΤΑ και ΜΜΕΤΑ. Η κατανομή των αναπαραστάσεων στις κατηγορίες και υποκατηγορίες που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.5 αποτυπώνεται στον Πίνακα 6.3. Σε κανένα χρονικό σημείο δεν εντοπίστηκε αναπαράσταση της Κατηγορίας 3, δηλαδή πλήρης και επιστημονικά αποδεκτή απόδοση του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς.

Πίνακας 6.3. Κατανομή των κατηγοριών και υποκατηγοριών του έργου P2 στα πέντε χρονικά σημεία

Κατηγορία	ΠΡΙΝ	ΕΝΔ1	ΕΝΔ2	ΜΕΤΑ	ΜΜΕΤΑ
3 – Επαρκής/ επιστημονικά αποδεκτή	0	0	0	0	0
2α – Ορθή θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση χωρίς απόδοση της κίνησης του νερού	1	1	7	12	2
2β – Απόδοση της κίνησης του θερμού και ενδεχομένως του ψυχρότερου νερού, χωρίς αιτιολόγηση μέσω διαφορετικής πυκνότητας	0	0	1	0	2
2γ – Μερική αιτιακή απόδοση του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς	0	0	3	2	1
1α – Διάδοση ή κατανομή της θερμότητας χωρίς κίνηση του νερού	14	11	3	1	10
1β – Εφαρμογή του σωματιδιακού μοντέλου της αγωγής στο νερό	0	5	1	2	0
0 – Ασαφής αναπαράσταση	3	1	3	1	3
ΣΥΝΟΛΟ	18	18	18	18	18

Στο **ΠΡΙΝ** κυριαρχούσε η υποκατηγορία 1α, στην οποία εντάχθηκαν 14 από τις 18 αναπαραστάσεις. Οι μαθητές/τριες απέδιδαν κυρίως τη θερμότητα ως κάτι που διαδίδεται ή κατανέμεται μέσα στο νερό, χωρίς να αναπαριστούν την κίνηση του ίδιου του νερού. Σε ορισμένες περιπτώσεις η θερμότητα εμφανιζόταν να διαδίδεται προς διαφορετικές κατευθύνσεις από την περιοχή θέρμανσης, ενώ σε άλλες αποδιδόταν διαφορετικός βαθμός θέρμανσης στις επιμέρους περιοχές του σωλήνα, χωρίς όμως να συνδέεται η θερμική διαφοροποίηση με κίνηση ή κυκλοφορία του νερού. Μόνο μία αναπαράσταση εντάχθηκε στην 2α, ενώ τρεις κατατάχθηκαν στην κατηγορία 0.

Κατά τη διάρκεια της ΔΜΑ και αμέσως μετά από αυτή παρατηρήθηκε μετατόπιση προς περισσότερο επιστημονικά αποδεκτές ιδέες, χωρίς όμως η πορεία αυτή να είναι γραμμική. Στο **ΕΝΔ1** εξακολουθούσε να κυριαρχεί η 1α, αλλά εμφανίστηκε σε πέντε αναπαραστάσεις η 1β, στην οποία το σωματιδιακό μοντέλο της αγωγής εφαρμοζόταν στο νερό χωρίς να αποδίδεται η κίνηση του υγρού. Στο **ΕΝΔ2** οι υποκατηγορίες 2α, 2β και 2γ εμφανίστηκαν συνολικά σε 11 από τις 18 αναπαραστάσεις, ενώ στο **ΜΕΤΑ** η 2α αποτέλεσε την κυρίαρχη υποκατηγορία. Οι μαθητές/τριες απέδιδαν πλέον συχνότερα ορθή θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση μεταξύ διαφορετικών

περιοχών του νερού και, σε μικρότερο αριθμό περιπτώσεων, την κίνησή του ή στοιχεία αιτιακής ερμηνείας των ρευμάτων μεταφοράς. Ωστόσο, η πλήρης κυκλική κίνηση του θερμότερου και του ψυχρότερου νερού και η σύνδεσή της με τις διαφορές πυκνότητας παρέμεναν περιορισμένες. Παράλληλα, η παρουσία της 1β έως και το **ΜΕΤΑ** αναδεικνύει ότι η χρήση σωματιδιακών στοιχείων δε συνοδευόταν πάντοτε από σαφή διάκριση μεταξύ αγωγής και ρευμάτων μεταφοράς.

Στο **ΜΜΕΤΑ** η 1α επανεμφανίστηκε ως κυρίαρχη υποκατηγορία, σε 10 από τις 18 αναπαραστάσεις, ενώ η 2α περιορίστηκε σε δύο περιπτώσεις. Παράλληλα, δύο αναπαραστάσεις εντάχθηκαν στην 2β και μία στην 2γ. Επομένως, η θερμική και σωματιδιακή διαφοροποίηση που είχε εμφανιστεί έντονα στο **ΕΝΔ2** και κυρίως στο **ΜΕΤΑ** δε διατηρήθηκε στον ίδιο βαθμό στη μεταγενέστερη μέτρηση. Σε μικρό αριθμό μαθητών/τριών διατηρήθηκαν στοιχεία που αφορούσαν στην κίνηση του νερού και την αιτιακή ερμηνεία της, ενώ για αρκετούς/ές επανεμφανίστηκε η αρχική ιδέα της διάδοσης ή κατανομής της θερμότητας χωρίς κίνηση του ίδιου του νερού.

Β. Χαρακτηριστικά σχέδια ανά υποκατηγορία

Για την πληρέστερη παρουσίαση των ιδεών που αναδείχθηκαν στο έργο Ρ2, παρουσιάζεται στη συνέχεια ένα χαρακτηριστικό σχέδιο για κάθε υποκατηγορία. Τα σχέδια επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικά παραδείγματα και σχολιάζονται ως προς τα βασικά στοιχεία που τεκμηριώνουν την ένταξή τους στην αντίστοιχη υποκατηγορία.

Υποκατηγορία 2α – Ορθή θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση χωρίς απόδοση της κίνησης του νερού

Εικόνα 6.5. Σχέδιο του μαθητή Μ5 στο ΕΝΔ2

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2α επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.5. Σε αυτό το σχέδιο, τα σωματιδιακά στοιχεία διαφοροποιούνται χωρικά, καθώς στο κάτω μέρος του σωλήνα εμφανίζονται περισσότερο συγκεντρωμένα, ενώ στο επάνω μέρος περισσότερο αραιά, αποδίδοντας

τη διαφορετική σωματιδιακή οργάνωση του νερού ανάλογα με τη θερμική του κατάσταση. Ωστόσο, δεν εμφανίζονται στοιχεία που να δηλώνουν την ανοδική κίνηση του θερμότερου νερού, την καθοδική κίνηση του ψυχρότερου ή την κυκλοφορία του νερού, στοιχείο που τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 2α.

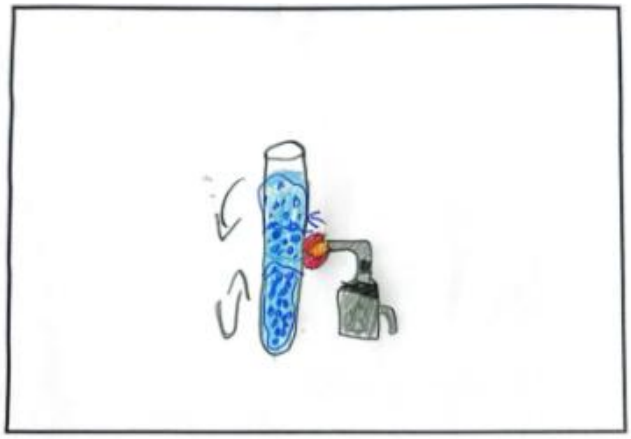
Υποκατηγορία 2β – Απόδοση της κίνησης του θερμού και ενδεχομένως του ψυχρότερου νερού, χωρίς αιτιολόγηση μέσω διαφορετικής πυκνότητας

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2β επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.6. Σε αυτό, η χρήση κατευθυντικών βελών αποδίδει την κίνηση του νερού και, ειδικότερα, την ανοδική μετακίνηση του θερμότερου νερού. Η αναπαράσταση αποκτά έτσι δυναμικό χαρακτήρα, καθώς η θέρμανση συνδέεται με την κίνηση του ίδιου του υγρού. Ωστόσο, δεν αποδίδεται αιτιακή σύνδεση της κίνησης αυτής με τη διαφοροποίηση της πυκνότητας του θερμότερου και του ψυχρότερου νερού, στοιχείο που τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 2β.

Εικόνα 6.6. Σχέδιο του μαθητή Μ10 στο ΕΝΔ2

Υποκατηγορία 2γ – Μερική αιτιακή απόδοση του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς

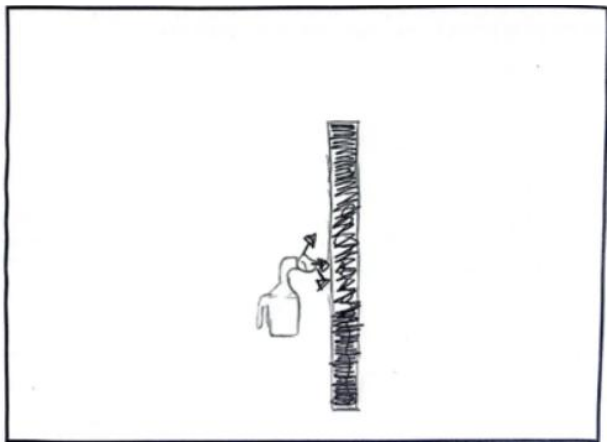
Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2γ επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.7. Σε αυτό, συνδυάζονται σωματιδιακά στοιχεία με κατευθυντικά βέλη που αποδίδουν διαφορετικές κατευθύνσεις κίνησης του νερού και επιχειρούν να αναπαραστήσουν την κυκλοφορία του μέσα στον σωλήνα. Η συνδυασμένη απόδοση της σωματιδιακής διαφοροποίησης και της κατευθυνόμενης κίνησης υποδηλώνει μια προσπάθεια σύνδεσης της μεταβολής της θερμικής κατάστασης του νερού με την κίνησή του, χωρίς όμως να αποδίδεται ρητά η διαφοροποίηση της πυκνότητας ως αιτία της κίνησης. Η αιτιακή απόδοση παραμένει μερική και δεν περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς, γεγονός που τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 2γ.



Εικόνα 6.7.Σχέδιο του μαθητή Μ10 στο ΜΕΤΑ

Υποκατηγορία 1α – Διάδοση ή κατανομή της θερμότητας χωρίς κίνηση του νερού

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 1α επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.8. Σε αυτό, η θέρμανση αποδίδεται σε σχέση με τη θέση της πηγής και τη θερμική κατάσταση διαφορετικών περιοχών του σωλήνα, χωρίς όμως να εμφανίζονται στοιχεία που να δηλώνουν την κίνηση ή την κυκλοφορία του ίδιου του νερού. Η διάδοση της θερμότητας αποδίδεται επομένως χωρίς σύνδεση με τη μετακίνηση της μάζας του υγρού, στοιχείο που τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 1α.

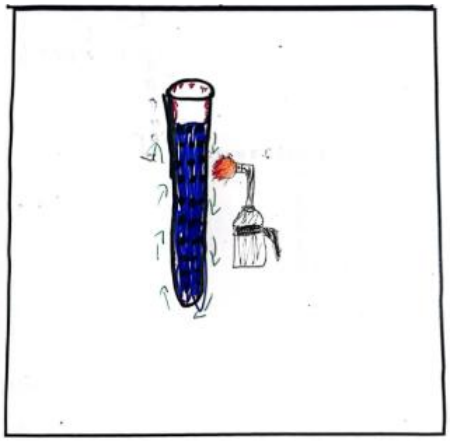


Εικόνα 6.8. Σχέδιο του μαθητή Μ3 στο ΠΡΙΝ

Υποκατηγορία 1β – Εφαρμογή του σωματιδιακού μοντέλου της αγωγής στο νερό

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 1β επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.9. Σε αυτό, εμφανίζονται σωματιδιακά στοιχεία κατά μήκος του νερού, τα οποία χρησιμοποιούνται για την απόδοση της διάδοσης της θερμότητας, χωρίς όμως να συνδέονται με κίνηση ή κυκλοφορία του ίδιου του νερού. Η εξήγηση παραπέμπει έτσι σε εφαρμογή του σωματιδιακού μοντέλου της αγωγής σε

ένα φαινόμενο ρευμάτων μεταφοράς, στοιχείο που τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 1β.

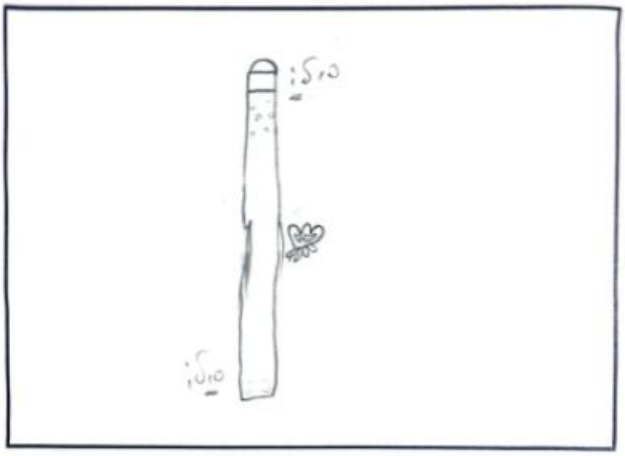


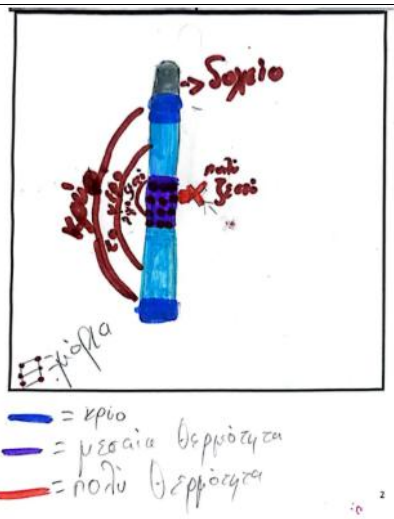
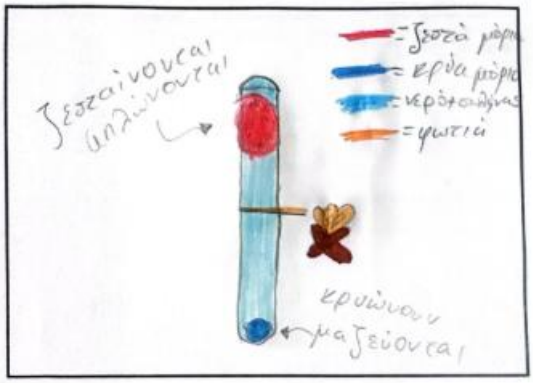
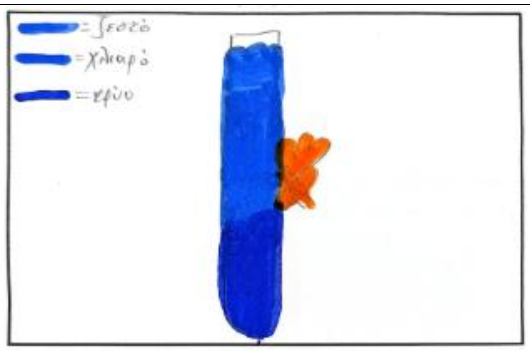
Εικόνα 6.9. Σχέδιο του μαθητή Μ10 στο ΕΝΔ1

Γ. Χαρακτηριστική ατομική πορεία

Για την αποτύπωση της εξέλιξης των ιδεών σε ατομικό επίπεδο, επιλέχθηκε η περίπτωση του/της Μ7, καθώς οι αναπαραστάσεις του/της στα πέντε χρονικά σημεία παρουσιάζουν χαρακτηριστικές μεταβολές στον τρόπο απόδοσης της διάδοσης της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς.

Πίνακας 6.4. Ατομική πορεία του/της Μ7 στο έργο Ρ2

Χρονικό σημείο	**Σχέδιο**	**Κατηγορία/ Υποκατηγορία**
ΠΡΙΝ		**1α**

ΕΝΔ1		**1β**
ΕΝΔ2		**2γ**
ΜΕΤΑ		**2α**
ΜΜΕΤΑ		**2γ**

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.4, στο **ΠΡΙΝ**, ο/η Μ7 αποδίδει το φαινόμενο χωρίς σωματιδιακά στοιχεία ή κίνηση του νερού. Στο **ΕΝΔ1** εμφανίζεται θερμική και σωματιδιακή διαφοροποίηση μεταξύ των επιμέρους περιοχών του νερού. Στο **ΕΝΔ2** η αναπαράσταση αποκτά περισσότερο δυναμικό χαρακτήρα, καθώς η θέρμανση και η διαφοροποίηση των μορίων συνδέονται με ανοδική κίνηση, χωρίς όμως να αποδίδεται πλήρως η κυκλική κίνηση του νερού. Στο **ΜΕΤΑ** διατηρείται η θερμική και σωματιδιακή διαφοροποίηση, ενώ στο **ΜΜΕΤΑ** ο/η μαθητής/τρια εξακολουθεί να συνδέει τη θερμική κατάσταση με την κίνηση των μορίων. Ωστόσο, η σύνδεση αυτή συνοδεύεται από επιστημονικά μη αποδεκτή απόδοση, καθώς αναφέρει ότι τα θερμά μόρια είναι «πιο ελαφριά» και κινούνται προς τα πάνω, ενώ τα ψυχρά είναι «πιο βαριά».

Συνολικά, η πορεία του/της Μ7 χαρακτηρίζεται από μετάβαση από μια αρχική απόδοση του φαινομένου χωρίς κίνηση του νερού προς αναπαραστάσεις στις οποίες ενσωματώνονται σταδιακά θερμική και σωματιδιακή διαφοροποίηση και στοιχεία κίνησης. Στα μεταγενέστερα χρονικά σημεία διατηρούνται ορισμένα από αυτά τα στοιχεία, παράλληλα όμως εμφανίζονται και επιστημονικά μη αποδεκτές συνδέσεις, όπως η απόδοση διαφορετικού «βάρους» στα θερμά και ψυχρά μόρια. Η αναπαράσταση, επομένως, δεν εξελίσσεται σε πλήρη και επιστημονικά αποδεκτή αιτιακή ερμηνεία του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς.

6.1.3 Διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς - έργο Ρ3

Α. Κατανομή και μεταβολές των ιδεών

Στο έργο Ρ3 εξετάστηκαν οι ιδέες των 18 μαθητών/τριών σχετικά με τη διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς, όπως αποτυπώθηκαν στα σχέδιά τους στα πέντε χρονικά σημεία ΠΡΙΝ, ΕΝΔ1, ΕΝΔ2, ΜΕΤΑ και ΜΜΕΤΑ. Η κατανομή των αναπαραστάσεων στις κατηγορίες και υποκατηγορίες που παρουσιάστηκαν στην ενότητα 5.5 αποτυπώνεται στον Πίνακα 6.5. Σε κανένα χρονικό σημείο δεν εντοπίστηκε αναπαράσταση της Κατηγορίας 3, δηλαδή πλήρης και επιστημονικά αποδεκτή απόδοση του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς.

Όπως φαίνεται και στον Πίνακα 6.5, στα **ΠΡΙΝ και ΕΝΔ1** κυριαρχούσε η υποκατηγορία 1α, στην οποία εντάχθηκαν 10 από τις 18 αναπαραστάσεις σε καθένα από τα δύο χρονικά σημεία. Οι μαθητές/τριες απέδιδαν κυρίως το αποτέλεσμα της θέρμανσης ή επιμέρους μορφές κίνησης και διάδοσης, χωρίς να συγκροτούν μια επιστημονικά αποδεκτή αναπαράσταση της κυκλοφορίας του νερού. Παράλληλα, τέσσερις αναπαραστάσεις στο ΠΡΙΝ και πέντε στο ΕΝΔ1 εντάχθηκαν στην 1β, ενώ οι περιπτώσεις της κατηγορίας 0 ήταν τέσσερις και τρεις αντίστοιχα. Επομένως, στα δύο πρώτα χρονικά σημεία οι αναπαραστάσεις παρέμεναν κυρίως προσανατολισμένες στο αποτέλεσμα της θέρμανσης ή σε επιμέρους μορφές κίνησης, χωρίς αιτιακή απόδοση του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς.

Πίνακας 6.5. Κατανομή των κατηγοριών και υποκατηγοριών αναπαραστάσεων του έργου P3 στα πέντε χρονικά σημεία

Κατηγορία	ΠΡΙΝ	ΕΝΔ1	ΕΝΔ2	ΜΕΤΑ	ΜΜΕΤΑ
3 – Επαρκής/ επιστημονικά αποδεκτή	0	0	0	0	0
2α – Κυκλική κίνηση του νερού χωρίς αιτιολόγηση του μηχανισμού	0	0	5	3	7
2β – Ορθή στατική θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση χωρίς απόδοση της κυκλοφορίας του νερού	0	0	0	3	0
2γ – Κυκλική κίνηση του νερού με μερική αιτιακή απόδοση του μηχανισμού	0	0	4	4	2
1α – Απουσία κυκλοφορίας ή απόδοση μόνο αποτελέσματος της θέρμανσης	10	10	5	3	5
1β – Μερική ή εναλλακτική απόδοση της κίνησης και της διάδοση	4	5	2	4	3
0 – Μη σαφής ή ανεπαρκής αναπαράσταση	4	3	2	1	1
ΣΥΝΟΛΟ	18	18	18	18	18

Στα **ΕΝΔ2 και ΜΕΤΑ** εμφανίστηκε σαφής διαφοροποίηση της κατανομής των ιδεών. Στο ΕΝΔ2, πέντε αναπαραστάσεις εντάχθηκαν στην 2α και τέσσερις στην 2γ, ενώ στο ΜΕΤΑ οι υποκατηγορίες 2α, 2β και 2γ συγκέντρωσαν συνολικά 10 από τις 18 αναπαραστάσεις. Οι μαθητές/τριες απέδιδαν πλέον συχνότερα την κυκλική κίνηση του νερού και, σε ορισμένες περιπτώσεις, τη συνέδεαν με τη θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση διαφορετικών περιοχών του. Ωστόσο, η αιτιακή σχέση μεταξύ θέρμανσης, διαφοροποίησης της πυκνότητας και κυκλοφορίας του νερού παρέμενε μερική. Παράλληλα, στο ΜΕΤΑ εμφανίστηκαν τρεις αναπαραστάσεις της 2β, στις οποίες αποδιδόταν ορθή θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση χωρίς αναπαράσταση της κυκλοφορίας του νερού.

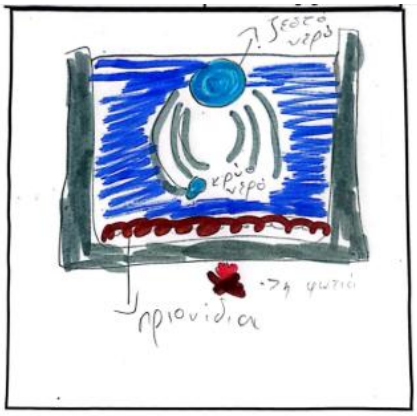
Στο **ΜΜΕΤΑ** η 2α αποτέλεσε την πολυπληθέστερη υποκατηγορία, με επτά αναπαραστάσεις, ενώ η 2γ περιορίστηκε σε δύο και η 2β δεν εμφανίστηκε. Παράλληλα, πέντε αναπαραστάσεις εντάχθηκαν στην 1α και τρεις στην 1β. Η εικόνα αυτή δείχνει ότι η απόδοση της κυκλικής κίνησης διατηρήθηκε σε αρκετές περιπτώσεις στη μεταγενέστερη μέτρηση, χωρίς όμως να διατηρείται στον ίδιο βαθμό η αιτιακή ερμηνεία του μηχανισμού. Επομένως, η κυκλική πορεία του νερού εμφανίζεται συχνότερα ως στοιχείο της αναπαράστασης από ό,τι η σύνδεσή της με τη θερμική διαφοροποίηση και τις διαφορές πυκνότητας.

Β. Χαρακτηριστικά σχέδια ανά υποκατηγορία

Για την πληρέστερη παρουσίαση των ιδεών που αναδείχθηκαν στο έργο Ρ3, παρουσιάζεται στη συνέχεια ένα χαρακτηριστικό σχέδιο για κάθε υποκατηγορία. Τα σχέδια επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικά παραδείγματα και σχολιάζονται ως προς τα βασικά στοιχεία που τεκμηριώνουν την ένταξή τους στην αντίστοιχη υποκατηγορία.

Υποκατηγορία 2α – Κυκλική κίνηση του νερού χωρίς αιτιολόγηση του μηχανισμού

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2α επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.10. Σε αυτό το σχέδιο, καμπυλωτά στοιχεία οργανώνονται σε κυκλική διαδρομή και αποδίδουν την κυκλοφορία του νερού, ενώ οι λεκτικές επισημάνσεις «ζεστό» και «κρύο» δηλώνουν θερμική διαφοροποίηση μεταξύ διαφορετικών περιοχών. Ωστόσο, δεν αποδίδεται η αιτιακή σχέση που εξηγεί την κυκλική κίνηση, όπως η σύνδεση της θέρμανσης με τη διαφοροποίηση της πυκνότητας και την άνοδο ή κάθοδο του νερού, στοιχείο που τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 2α.

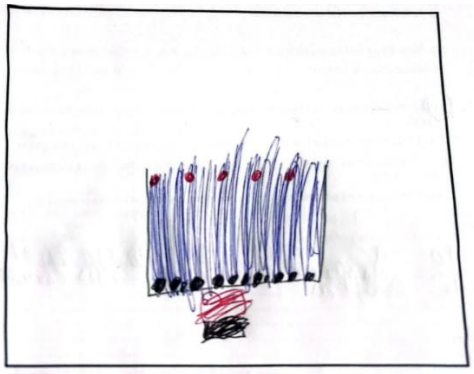


Εικόνα 6.10. Σχέδιο του μαθητή Μ7 στο ΕΝΔ2

Υποκατηγορία 2β – Ορθή στατική θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση χωρίς απόδοση της κυκλοφορίας του νερού

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2β επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.11. Σε αυτό το σχέδιο, τα σωματιδιακά στοιχεία διαφοροποιούνται χρωματικά και χωρικά, καθώς τα κόκκινα σωματίδια τοποθετούνται στο ανώτερο τμήμα του νερού, ενώ τα μαύρα συγκεντρώνονται στο κατώτερο τμήμα. Η χωρική αυτή διαφοροποίηση είναι συμβατή με την απόδοση θερμότερου νερού στο ανώτερο και ψυχρότερου στο κατώτερο τμήμα. Ωστόσο, δεν χρησιμοποιούνται βέλη, κυκλικές διαδρομές ή άλλα κατευθυντικά στοιχεία που να δηλώνουν την άνοδο του θερμότερου και την κάθοδο του ψυχρότερου νερού. Επομένως, η ορθή αλλά στατική

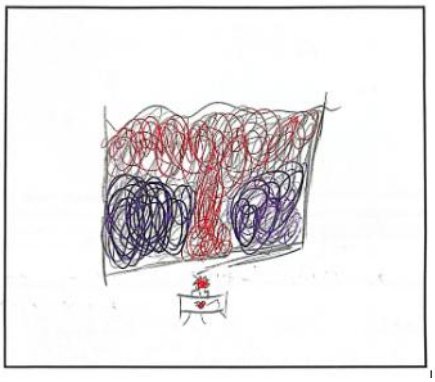
διαφοροποίηση, χωρίς απόδοση της κυκλοφορίας του νερού, τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 2β.



Εικόνα 6.11. Σχέδιο του μαθητή Μ1 στο ΜΕΤΑ

Υποκατηγορία 2γ – Κυκλική κίνηση του νερού με μερική αιτιακή απόδοση του μηχανισμού

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 2γ επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.12. Σε αυτό, η θερμική διαφοροποίηση του νερού συνδέεται με διαφορετικές κατευθύνσεις κίνησης: η θερμότερη περιοχή αποδίδεται να κινείται ανοδικά, ενώ οι ψυχρότερες περιοχές οργανώνονται χαμηλότερα και πλευρικά, σχηματίζοντας κυκλική πορεία. Η αναπαράσταση επιχειρεί έτσι να συνδέσει τη διαφορετική θερμική κατάσταση του νερού με την κυκλοφορία του. Ωστόσο, δεν αποδίδεται πλήρως η αιτιακή σχέση μεταξύ θέρμανσης, διαφοροποίησης της πυκνότητας και κίνησης, στοιχείο που τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 2γ.

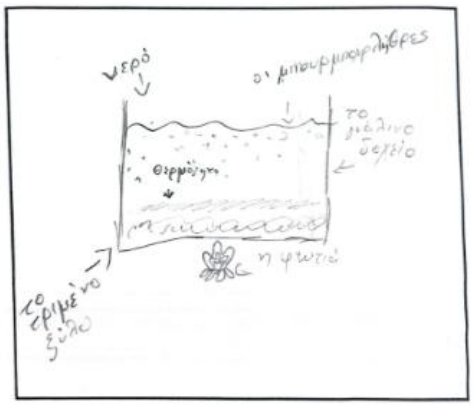


Εικόνα 6.12. Σχέδιο του μαθητή Μ18 στο ΜΜΕΤΑ

Υποκατηγορία 1α – Απουσία κυκλοφορίας ή απόδοση μόνο αποτελέσματος της θέρμανσης

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 1α επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.13. Σε αυτό, η θέρμανση αποδίδεται κυρίως στην

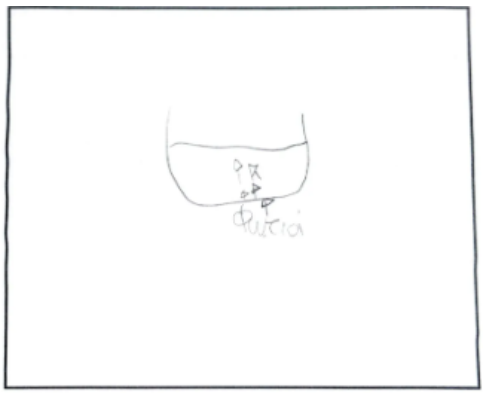
περιοχή του νερού που βρίσκεται κοντά στην πηγή, ενώ εμφανίζονται και στοιχεία που ο/η μαθητής/τρια προσδιορίζει ως «μπουρμπουλήθρες». Δεν υπάρχουν, ωστόσο, στοιχεία που να αποδίδουν οργανωμένη ανοδική και καθοδική κίνηση ή κυκλοφορία του νερού. Η έμφαση στο αποτέλεσμα της θέρμανσης και η απουσία κυκλικής κίνησης τεκμηριώνουν την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 1α.



Εικόνα 6.13. Σχέδιο του μαθητή Μ7 στο ΠΡΙΝ

Υποκατηγορία 1β – Μερική ή εναλλακτική απόδοση της κίνησης και της διάδοσης

Ως χαρακτηριστικό παράδειγμα της υποκατηγορίας 1β επιλέχθηκε το σχέδιο που παρουσιάζεται στην Εικόνα 6.14. Σε αυτό, διαδοχικά βέλη με ανοδικό προσανατολισμό αποδίδουν κίνηση του νερού από το κατώτερο προς το ανώτερο τμήμα του δοχείου. Ωστόσο, δεν εμφανίζεται η συμπληρωματική καθοδική κίνηση σε άλλη περιοχή, ώστε να συγκροτείται ολοκληρωμένη κυκλική πορεία. Η μερική απόδοση της κίνησης, χωρίς πλήρη κυκλοφορία του νερού, τεκμηριώνει την ένταξη του σχεδίου στην υποκατηγορία 1β.

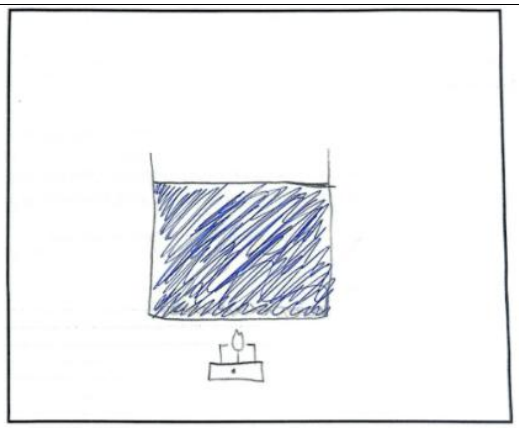
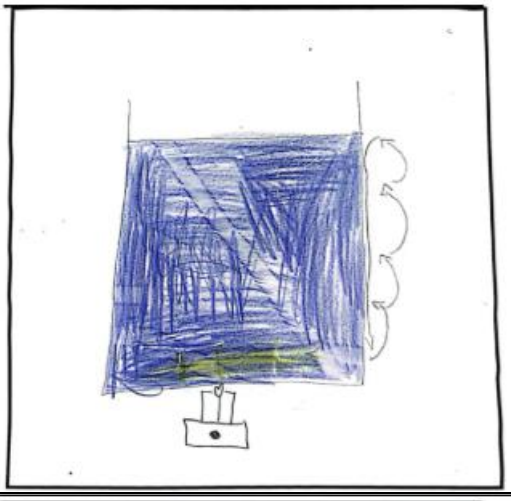
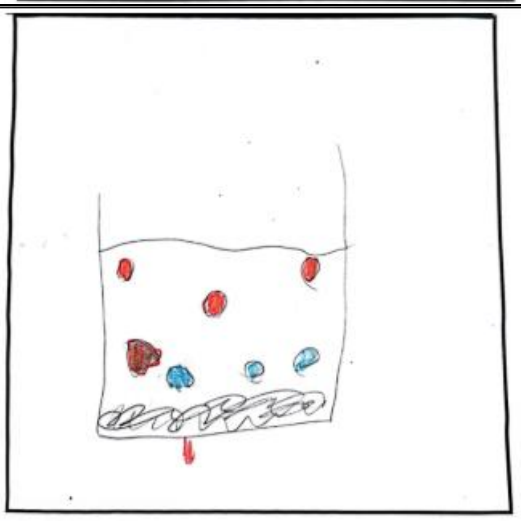


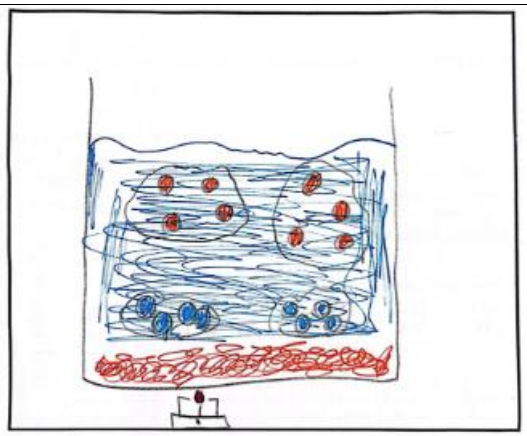
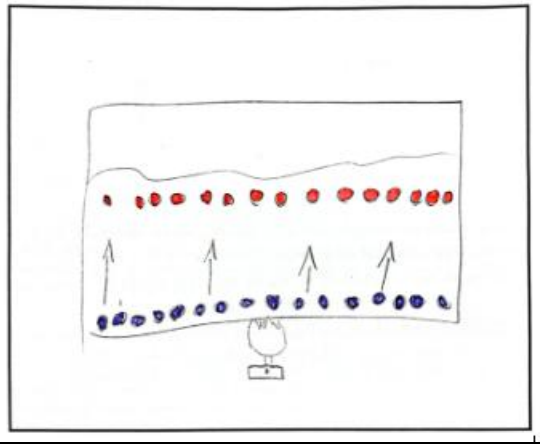
Εικόνα 6.14. Σχέδιο του μαθητή Μ9 στο ΠΡΙΝ

Γ. Χαρακτηριστική ατομική πορεία

Για την αποτύπωση της εξέλιξης των ιδεών σε ατομικό επίπεδο επιλέχθηκε η περίπτωση του/της Μ15, καθώς οι αναπαραστάσεις του/της στα πέντε χρονικά σημεία παρουσιάζουν χαρακτηριστικές μεταβολές στον τρόπο απόδοσης της διάδοσης της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς.

Πίνακας 6.6. Ατομική πορεία του/της Μ15 στο έργο Ρ3

Χρονικό σημείο	Σχέδιο	Κατηγορία/ Υποκατηγορία
ΠΡΙΝ		**1α**
ΕΝΔ1		**1β**
ΕΝΔ2		**2γ**

ΜΕΤΑ		**2γ**
ΜΜΕΤΑ		**2γ**

Στον Πίνακα 6.6 φαίνεται ότι στο **ΠΡΙΝ,** ο/η Μ15 αποδίδει το νερό ως ενιαία περιοχή, χωρίς αναπαράσταση κίνησης ή κυκλοφορίας. Στο **ΕΝΔ1** εμφανίζεται για πρώτη φορά απόδοση κίνησης, χωρίς όμως να συγκροτείται ολοκληρωμένη κυκλική πορεία. Στα **ΕΝΔ2 και ΜΕΤΑ** ενσωματώνονται σωματιδιακά στοιχεία, μέσω των οποίων διαφοροποιούνται θερμότερες και ψυχρότερες περιοχές του νερού. Στο **ΜΜΕΤΑ** διατηρούνται η θερμική διαφοροποίηση και η απόδοση ανοδικής κίνησης, χωρίς όμως να αναπαρίσταται πλήρως η συμπληρωματική καθοδική κίνηση του ψυχρότερου νερού.

Συνολικά, η πορεία του/της Μ15 χαρακτηρίζεται από μετάβαση από μια αρχική στατική απόδοση του φαινομένου προς αναπαραστάσεις στις οποίες ενσωματώνονται σταδιακά στοιχεία θερμικής διαφοροποίησης και κίνησης του νερού. Ωστόσο, η κυκλική κίνηση και η αιτιακή απόδοση του μηχανισμού δεν εμφανίζονται με την ίδια πληρότητα σε όλα τα χρονικά σημεία και στο ΜΜΕΤΑ εξακολουθεί να απουσιάζει η πλήρης απόδοση της συμπληρωματικής καθοδικής κίνησης του ψυχρότερου νερού.

6.2 Σημειωτικοί πόροι και επίπεδα αναπαράστασης

6.2.1 Σημειωτικοί πόροι

Στην παρούσα υποενότητα παρουσιάζεται η αξιοποίηση των βασικών σημειωτικών πόρων στα μαθητικά σχέδια των τριών έργων και οι μεταβολές που παρατηρούνται στη

συχνότητα και στη λειτουργία τους μεταξύ των πέντε χρονικών σημείων. Εξετάστηκαν η χρωματική διαβάθμιση, τα βέλη, οι γραμμές/διαδρομές, τα σωματιδιακά στοιχεία, οι λεκτικές επισημάνσεις και οι αριθμοί/ακολουθίες. Οι συχνότητες αφορούν στην παρουσία κάθε πόρου στα σχέδια και δεν είναι αμοιβαία αποκλειόμενες, καθώς στο ίδιο σχέδιο μπορούν να συνυπάρχουν περισσότεροι σημειωτικοί πόροι.

Α. Έργο ΑΓ3

Στον Πίνακα 6.7 παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης των σημειωτικών πόρων στα σχέδια του έργου ΑΓ3 στα πέντε χρονικά σημεία.

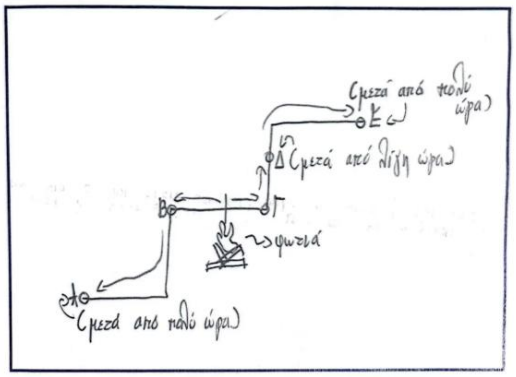
Πίνακας 6.7. Σημειωτικοί πόροι του έργου ΑΓ3

Σημειωτικός πόρος	**ΠΡΙΝ**	**ΕΝΔ1**	**ΕΝΔ2**	**ΜΕΤΑ**	**ΜΜΕΤΑ**
Χρωματική διαβάθμιση	2	11	8	11	10
Βέλη	8	5	5	4	6
Γραμμές/διαδρομές	4	4	4	8	1
Σωματιδιακά στοιχεία	0	9	8	15	7
Λεκτικές επισημάνσεις	2	4	5	4	2
Αριθμοί/ακολουθίες	1	0	1	1	1

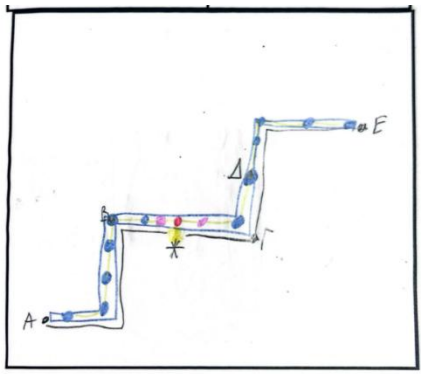
Στο **ΠΡΙΝ**, οι συχνότεροι σημειωτικοί πόροι ήταν τα βέλη, ενώ εμφανίζονταν επίσης γραμμές/διαδρομές, λεκτικές επισημάνσεις και, σε μικρότερο βαθμό, χρωματικές διαφοροποιήσεις. Σωματιδιακά στοιχεία δεν καταγράφηκαν. Από το **ΕΝΔ1 και μετά** εμφανίζονται συστηματικά η χρωματική διαβάθμιση και τα σωματιδιακά στοιχεία, με τη μεγαλύτερη συχνότητα των τελευταίων να παρατηρείται στο **ΜΕΤΑ** (15/18). Στο **ΜΜΕΤΑ** τα σωματιδιακά στοιχεία περιορίζονται σε 7 αναπαραστάσεις, ενώ η χρωματική διαβάθμιση εξακολουθεί να εμφανίζεται συχνά (10/18).

Ως προς τη λειτουργία τους, το χρώμα χρησιμοποιείται κυρίως για τη διαφοροποίηση της θερμικής κατάστασης διαφορετικών περιοχών της μεταλλικής διάταξης, ενώ τα βέλη και οι γραμμές/διαδρομές αποδίδουν κατεύθυνση, πορεία ή διαδοχή της θέρμανσης. Τα σωματιδιακά στοιχεία, συχνά σε συνδυασμό με χρωματικές διαφοροποιήσεις, αξιοποιούνται για την απόδοση διαφορετικών θερμικών καταστάσεων σε σωματιδιακό επίπεδο. Οι λεκτικές επισημάνσεις και οι αριθμοί/ακολουθίες έχουν κυρίως συμπληρωματική λειτουργία, διευκρινίζοντας τη θερμική κατάσταση, τον χρόνο ή τη σειρά θέρμανσης.

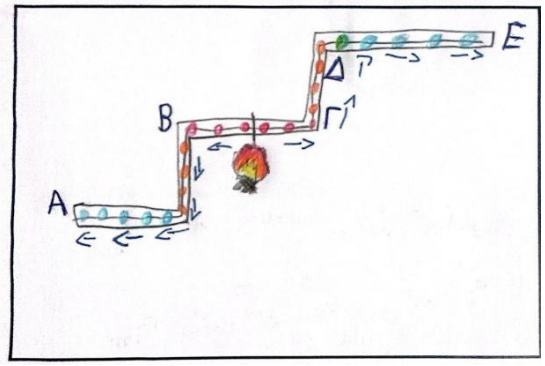
Για την ανάδειξη διαφορετικών τρόπων αξιοποίησης των σημειωτικών πόρων παρουσιάζονται στη συνέχεια χαρακτηριστικά σχέδια από το έργο ΑΓ3. Τα παραδείγματα επιλέχθηκαν ώστε να αποτυπώνουν διαφορετικούς συνδυασμούς πόρων και τη λειτουργία τους στην αναπαράσταση του φαινομένου.



Εικόνα 6.15. Σχέδιο του Μ5 στο ΠΡΙΝ



Εικόνα 6.16. Σχέδιο του Μ1 στο ΕΝΔ1



Εικόνα 6.17. Σχέδιο του Μ10 στο ΜΕΤΑ

Στο **πρώτο σχέδιο (Εικόνα 6.15)**, τα βέλη και οι λεκτικές επισημάνσεις αξιοποιούνται για την απόδοση της κατεύθυνσης και της σειράς θέρμανσης. Στο **δεύτερο (Εικόνα 6.16)**, η χρωματική διαφοροποίηση συνδυάζεται με σωματιδιακά στοιχεία για την απόδοση διαφορετικών θερμικών καταστάσεων κατά μήκος της διάταξης. Στο **τρίτο (Εικόνα 6.17)**, συνδυάζονται χρώμα, σωματιδιακά στοιχεία και βέλη, ώστε να αποδίδονται ταυτόχρονα η θερμική διαφοροποίηση και η κατεύθυνση της διάδοσης.

Β. Έργο Ρ2

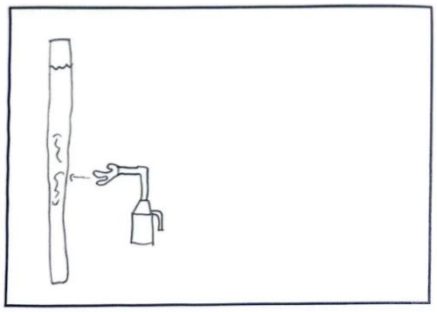
Στον Πίνακα 6.8 παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης των σημειωτικών πόρων στα σχέδια του έργου Ρ2 στα πέντε χρονικά σημεία.

Πίνακας 6.8. Σημειωτικοί πόροι του Έργου Ρ2

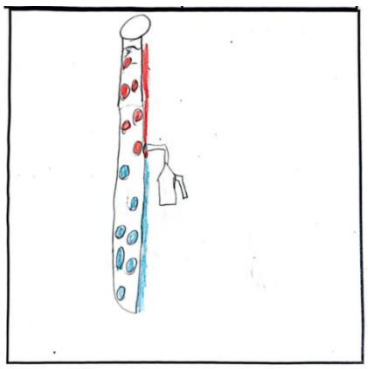
Σημειωτικός πόρος	ΠΡΙΝ	ΕΝΔ1	ΕΝΔ2	ΜΕΤΑ	ΜΜΕΤΑ
Χρωματική διαβάθμιση	1	7	7	9	5
Βέλη	7	9	4	6	5
Γραμμές/διαδρομές	7	3	2	1	2
Σωματιδιακά στοιχεία	0	4	13	14	3
Λεκτικές επισημάνσεις	3	4	6	5	3
Αριθμοί/ακολουθίες	0	0	0	0	1

Στο **ΠΡΙΝ**, συχνότερα εμφανίζονται βέλη και γραμμές/διαδρομές (7/18 αντίστοιχα), ενώ τα σωματιδιακά στοιχεία απουσιάζουν και η χρωματική διαβάθμιση εμφανίζεται μόνο σε μία αναπαράσταση. Κατά τα επόμενα χρονικά σημεία αυξάνονται ιδιαίτερα τα σωματιδιακά στοιχεία, τα οποία εμφανίζονται σε 13 σχέδια στο **ΕΝΔ2** και 14 στο **ΜΕΤΑ,** καθώς και η χρωματική διαβάθμιση, η οποία φτάνει τις 9 περιπτώσεις στο ΜΕΤΑ. Στο **ΜΜΕΤΑ** παρατηρείται μείωση των σωματιδιακών στοιχείων σε 3 αναπαραστάσεις και της χρωματικής διαβάθμισης σε 5.

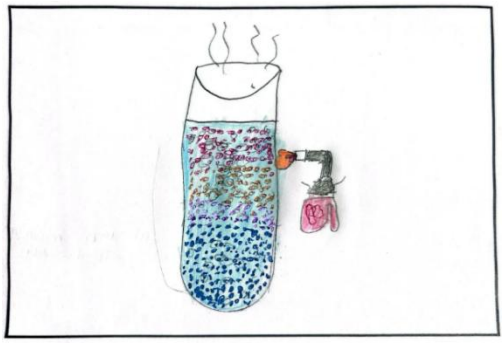
Ως προς τη λειτουργία τους, τα βέλη χρησιμοποιούνται για την απόδοση κατεύθυνσης ή κίνησης, ενώ οι γραμμές/διαδρομές αποδίδουν κυρίως την πορεία της διάδοσης. Η χρωματική διαφοροποίηση αξιοποιείται για τη διάκριση θερμικά διαφορετικών περιοχών του νερού, ενώ τα σωματιδιακά στοιχεία, μέσω και της διαφορετικής χωρικής τους κατανομής, χρησιμοποιούνται για την απόδοση διαφοροποιήσεων μεταξύ θερμότερων και ψυχρότερων περιοχών. Οι λεκτικές επισημάνσεις λειτουργούν κυρίως συμπληρωματικά, ενώ οι αριθμοί/ακολουθίες εμφανίζονται μόνο σε μία περίπτωση.



Εικόνα 6.18. Σχέδιο του Μ5 στο ΠΡΙΝ



Εικόνα 6.19. Σχέδιο του Μ15 στο ΕΝΔ2



Εικόνα 6.20. Σχέδιο του Μ14 στο ΜΕΤΑ

Τα χαρακτηριστικά παραδείγματα που ακολουθούν αναδεικνύουν διαφορετικούς τρόπους συνδυασμού και λειτουργίας των σημειωτικών πόρων στο έργο Ρ2. Στο **πρώτο σχέδιο (Εικόνα 6.18)** η αναπαράσταση βασίζεται κυρίως σε γραμμικά στοιχεία για την απόδοση της πορείας. Στο **δεύτερο (Εικόνα 6.19)** συνδυάζονται σωματιδιακά στοιχεία και χρωματική διαφοροποίηση για τη διάκριση θερμικά διαφορετικών περιοχών του νερού. Στο **τρίτο (Εικόνα 6.20),** η χρωματική διαφοροποίηση συνδυάζεται με

σωματιδιακά στοιχεία και τη διαφορετική χωρική κατανομή τους, δημιουργώντας μια σημειωτικά συνθετότερη απόδοση της θερμικής διαφοροποίησης.

Γ. Έργο P3

Στον Πίνακα 6.9 παρουσιάζεται η συχνότητα εμφάνισης των σημειωτικών πόρων στα σχέδια του έργου P3 στα πέντε χρονικά σημεία.

Πίνακας 6.9. Σημειωτικοί πόροι του Έργου P3

Σημειωτικός πόρος	**ΠΡΙΝ**	**ΕΝΔ1**	**ΕΝΔ2**	**ΜΕΤΑ**	**ΜΜΕΤΑ**
Χρωματική διαβάθμιση	0	4	5	7	5
Βέλη	5	4	5	5	11
Γραμμές/διαδρομές	8	3	5	4	6
Σωματιδιακά στοιχεία	0	3	8	11	3
Λεκτικές επισημάνσεις	7	6	4	3	3
Αριθμοί/ακολουθίες	0	0	0	0	0

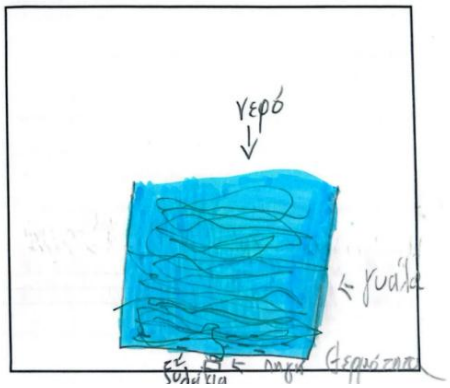
Στο **ΠΡΙΝ**, οι συχνότεροι σημειωτικοί πόροι είναι οι γραμμές/διαδρομές (8/18) και οι λεκτικές επισημάνσεις (7/18), ενώ η χρωματική διαβάθμιση και τα σωματιδιακά στοιχεία απουσιάζουν. Στα επόμενα χρονικά σημεία εμφανίζονται χρωματικές και σωματιδιακές αποδόσεις, με τα σωματιδιακά στοιχεία να φτάνουν τη μεγαλύτερη συχνότητά τους στο **ΜΕΤΑ** (11/18). Στο **ΜΜΕΤΑ** τα σωματιδιακά στοιχεία μειώνονται σε 3 περιπτώσεις, ενώ αντίθετα τα βέλη αυξάνονται σημαντικά και εμφανίζονται σε 11 από τις 18 αναπαραστάσεις.

Ως προς τη λειτουργία τους, οι γραμμές/διαδρομές και τα βέλη χρησιμοποιούνται για την απόδοση της κατεύθυνσης ή της πορείας της κίνησης του νερού, με τα βέλη στο ΜΜΕΤΑ να αξιοποιούνται συχνά για την απόδοση κυκλικής κίνησης. Η χρωματική διαφοροποίηση συμβάλλει στη διάκριση θερμότερων και ψυχρότερων περιοχών, ενώ τα σωματιδιακά στοιχεία χρησιμοποιούνται για την απόδοση της σωματιδιακής διαφοροποίησης του νερού. Οι λεκτικές επισημάνσεις μειώνονται από 7 περιπτώσεις στο ΠΡΙΝ σε 3 στο ΜΕΤΑ και στο ΜΜΕΤΑ, ενώ οι αριθμοί/ακολουθίες δεν εμφανίζονται σε κανένα χρονικό σημείο.

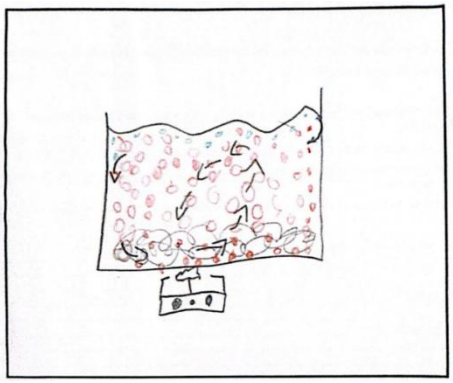
Για την ανάδειξη διαφορετικών τρόπων αξιοποίησης και συνδυασμού των σημειωτικών πόρων παρουσιάζονται στη συνέχεια τρία χαρακτηριστικά σχέδια από το έργο P3. Στο **πρώτο σχέδιο (Εικόνα 6.21)**, η χρωματική απόδοση του νερού συνδυάζεται με κατευθυντικά βέλη αντίθετης φοράς, τα οποία χρησιμοποιούνται για την οπτικοποίηση της κίνησής του. Παράλληλα, η λεκτική επισήμανση που συνοδεύει το σχέδιο λειτουργεί συμπληρωματικά, αποσαφηνίζοντας το νόημα που αποδίδεται στα κατευθυντικά στοιχεία. Στο **δεύτερο σχέδιο (Εικόνα 6.22)**, το χρώμα χρησιμοποιείται για την οπτική απόδοση του νερού, ενώ οι πολυάριθμες καμπύλες γραμμές/διαδρομές στο εσωτερικό του δοχείου αποδίδουν την κίνησή του. Οι λεκτικές επισημάνσεις προσδιορίζουν επιμέρους στοιχεία της πειραματικής διάταξης και λειτουργούν συμπληρωματικά προς την οπτική αναπαράσταση. Τέλος, **στο τρίτο σχέδιο (Εικόνα 6.23),** συνδυάζονται σωματιδιακά στοιχεία, χρωματικές διαφοροποιήσεις και

κατευθυντικά βέλη. Τα σωματιδιακά στοιχεία κατανέμονται σε ολόκληρο το νερό, ενώ τα βέλη χρησιμοποιούνται για την απόδοση διαφορετικών κατευθύνσεων κίνησης. Ο συνδυασμός των συγκεκριμένων πόρων επιτρέπει την ταυτόχρονη απόδοση της σωματιδιακής οργάνωσης του νερού και της κίνησής του.

Εικόνα 6.21. Σχέδιο του Μ8 στο ΕΝΔ1



Εικόνα 6.22. Σχέδιο του Μ1 στο ΠΡΙΝ



Εικόνα 6.23. Σχέδιο του Μ18 στο ΜΕΤΑ

6.2.2 Επίπεδα αναπαράστασης

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η κατανομή των μαθητικών σχεδίων ως προς τα επίπεδα αναπαράστασης, με βάση το πλαίσιο των Park et al. (2020) και την προσαρμογή του που περιγράφηκε στην ενότητα 5.5. Στα δεδομένα της έρευνας εντοπίστηκαν αναπαραστάσεις που περιορίζονταν στο επίπεδο **Sensory (SS)** και αναπαραστάσεις στις οποίες συνυπήρχαν στοιχεία των επιπέδων **Sensory και Unseen Substance (SS+US)**. Αμιγείς αναπαραστάσεις επιπέδου US ή αναπαραστάσεις επιπέδου UN δεν εντοπίστηκαν. Η κατάταξη στα επίπεδα αναπαράστασης αφορά στο είδος των στοιχείων που περιλαμβάνονται στο σχέδιο και εξετάζεται ανεξάρτητα από την επιστημονική επάρκεια της ιδέας που αποδίδεται.

Α. Έργο ΑΓ3

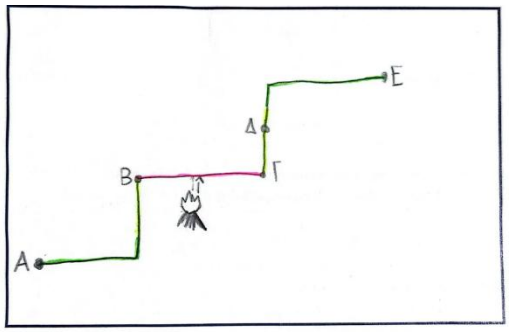
Στον Πίνακα 6.10 παρουσιάζεται η κατανομή των αναπαραστάσεων του έργου ΑΓ3 στα επίπεδα SS και SS+US στα πέντε χρονικά σημεία.

Πίνακας 6.10. Επίπεδα αναπαράστασης για το Έργο ΑΓ3

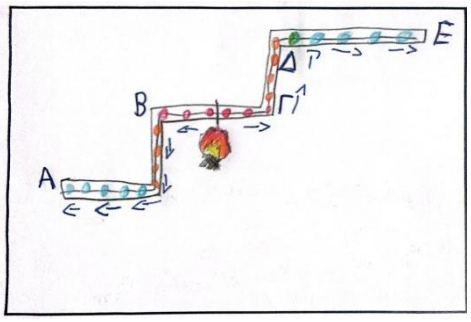
Επίπεδο αναπαράστασης	ΠΡΙΝ	ΕΝΔ1	ΕΝΔ2	ΜΕΤΑ	ΜΜΕΤΑ
SS	18	10	10	3	11
SS + US	0	8	8	15	7
ΣΥΝΟΛΟ	18	18	18	18	18

Στο ΠΡΙΝ, και οι 18 αναπαραστάσεις εντάσσονται στο επίπεδο SS. Στα ΕΝΔ1 και ΕΝΔ2 εμφανίζονται για πρώτη φορά αναπαραστάσεις SS+US, οι οποίες καταγράφονται σε 8 από τις 18 περιπτώσεις σε καθένα από τα δύο χρονικά σημεία. Η μεγαλύτερη παρουσία τους παρατηρείται στο ΜΕΤΑ, όπου 15 από τις 18 αναπαραστάσεις συνδυάζουν στοιχεία SS και US. Στο ΜΜΕΤΑ οι αναπαραστάσεις SS+US μειώνονται σε 7, ενώ οι SS αυξάνονται σε 11. Επομένως, μετά το ΠΡΙΝ παρατηρείται ενσωμάτωση σωματιδιακών στοιχείων στις αναπαραστάσεις της μακροσκοπικής διάταξης, η οποία είναι εντονότερη στο ΜΕΤΑ και διατηρείται σε μικρότερο βαθμό στο ΜΜΕΤΑ.

Για την αποσαφήνιση της διάκρισης μεταξύ των δύο επιπέδων παρουσιάζονται στη συνέχεια ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα SS και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα SS+US από το έργο ΑΓ3. Στο σχέδιο της Εικόνας 6.24. αποδίδεται η μεταλλική διάταξη και η θερμική διαφοροποίηση των επιμέρους περιοχών της, χωρίς να περιλαμβάνονται μη ορατές υλικές οντότητες, όπως σωματίδια ή μόρια. Για τον λόγο αυτό η αναπαράσταση εντάσσεται στο επίπεδο SS.



Εικόνα 6.24. Σχέδιο μαθητή Μ15 στο ΠΡΙΝ - αναπαράσταση SS



Εικόνα 6.25. Σχέδιο μαθητή Μ15 στο ΜΕΤΑ - αναπαράσταση SS+US

Στο σχέδιο της Εικόνας 6.25 η μακροσκοπική μεταλλική διάταξη συνυπάρχει με σωματιδιακά στοιχεία στο εσωτερικό της. Ο συνδυασμός των παρατηρήσιμων στοιχείων της διάταξης (SS) με μη άμεσα παρατηρήσιμες υλικές οντότητες (US) τεκμηριώνει την κατάταξη της αναπαράστασης ως SS+US.

Β. Έργο Ρ2

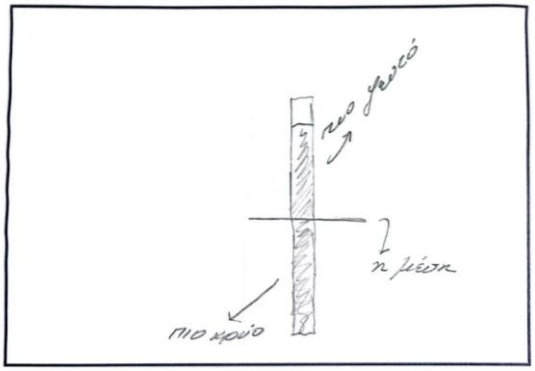
Στον Πίνακα 6.11 παρουσιάζεται η κατανομή των αναπαραστάσεων του έργου Ρ2 στα επίπεδα SS και SS+US στα πέντε χρονικά σημεία.

Πίνακας 6.11. Επίπεδα αναπαράστασης για το Έργο Ρ2

Επίπεδο αναπαράστασης	ΠΡΙΝ	ΕΝΔ1	ΕΝΔ2	ΜΕΤΑ	ΜΜΕΤΑ
SS	18	14	5	5	14
SS + US	0	4	13	13	4
ΣΥΝΟΛΟ	18	18	18	18	18

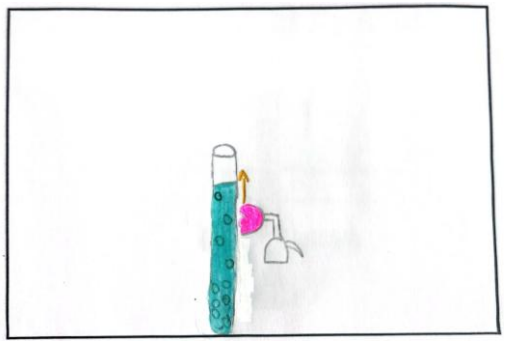
Στο ΠΡΙΝ, και οι 18 αναπαραστάσεις εντάσσονται στο επίπεδο SS. Στο ΕΝΔ1 εμφανίζονται οι πρώτες αναπαραστάσεις SS+US (4/18), ενώ στο ΕΝΔ2 η παρουσία τους αυξάνεται σημαντικά και καταγράφεται σε 13 από τις 18 περιπτώσεις. Η ίδια κατανομή διατηρείται στο ΜΕΤΑ, με 13 αναπαραστάσεις SS+US και 5 SS. Στο ΜΜΕΤΑ η εικόνα αντιστρέφεται, καθώς οι SS+US περιορίζονται σε 4 περιπτώσεις και οι SS αυξάνονται σε 14. Επομένως, η ενσωμάτωση σωματιδιακών στοιχείων στη μακροσκοπική αναπαράσταση του φαινομένου εμφανίζεται κυρίως στο ΕΝΔ2 και στο ΜΕΤΑ και περιορίζεται σημαντικά στη μεταγενέστερη μέτρηση.

Ακολουθούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα SS και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα SS+US από το έργο Ρ2. Στο σχέδιο της Εικόνας 6.26. αποδίδονται ο δοκιμαστικός σωλήνας και η διαφοροποίηση θερμότερων και ψυχρότερων περιοχών του νερού σε μακροσκοπικό επίπεδο, χωρίς να εμφανίζονται σωματίδια ή άλλες μη άμεσα παρατηρήσιμες υλικές οντότητες. Για τον λόγο αυτό η αναπαράσταση εντάσσεται στο επίπεδο SS.



Εικόνα 6.26. Σχέδιο μαθητή Μ8 στο ΠΡΙΝ – αναπαράσταση SS

Στο σχέδιο της Εικόνας 6.27. η μακροσκοπική πειραματική διάταξη συνδυάζεται με σωματιδιακά στοιχεία στο εσωτερικό του νερού. Η συνύπαρξη των παρατηρήσιμων στοιχείων της διάταξης (SS) με μη άμεσα παρατηρήσιμες υλικές οντότητες (US) τεκμηριώνει την κατάταξη της αναπαράστασης ως SS+US.



Εικόνα 6.27. Σχέδιο μαθητή Μ6 στο ΜΕΤΑ – αναπαράσταση SS+US

Γ. Έργο Ρ3

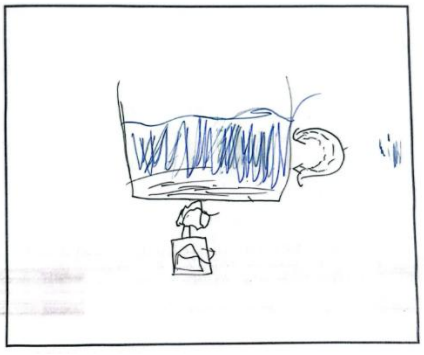
Στον Πίνακα 6.12 παρουσιάζεται η κατανομή των αναπαραστάσεων του έργου Ρ3 στα επίπεδα SS και SS+US στα πέντε χρονικά σημεία.

Πίνακας 6.12. Επίπεδα αναπαράστασης για το Έργο Ρ3

Επίπεδο αναπαράστασης	ΠΡΙΝ	ΕΝΔ1	ΕΝΔ2	ΜΕΤΑ	ΜΜΕΤΑ
SS	18	15	11	17	16
SS + US	0	3	7	1	2
ΣΥΝΟΛΟ	18	18	18	18	18

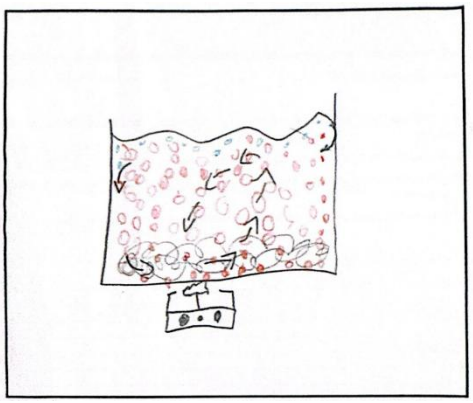
Στο ΠΡΙΝ, και οι 18 αναπαραστάσεις εντάσσονται στο επίπεδο SS. Στο ΕΝΔ1 εμφανίζονται 3 αναπαραστάσεις SS+US, οι οποίες αυξάνονται σε 7 στο ΕΝΔ2 και μετά μειώνονται σε 1 στο ΜΕΤΑ. Στο ΜΜΕΤΑ οι αναπαραστάσεις SS+US περιορίζονται σε 2, ενώ οι SS αυξάνονται σε 16. Επομένως, και στο έργο Ρ3 παρατηρείται αύξηση της ενσωμάτωσης σωματιδιακών στοιχείων από το ΠΡΙΝ έως το ΕΝΔ2, η οποία ακολουθείται από σημαντική μείωση στο ΜΕΤΑ και παραμένει σε χαμηλό επίπεδο στο ΜΜΕΤΑ.

Ακολουθούν ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα SS και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα SS+US από το έργο Ρ3. Στο σχέδιο της Εικόνας 6.19 αποδίδονται η πειραματική διάταξη και η κίνηση του νερού μέσω κατευθυντικού στοιχείου, χωρίς να εμφανίζονται σωματίδια ή άλλες μη άμεσα παρατηρήσιμες υλικές οντότητες. Η αναπαράσταση περιορίζεται επομένως στο επίπεδο SS.



Εικόνα 6.28. Σχέδιο μαθητή Μ10 στο ΠΡΙΝ– αναπαράσταση SS

Τέλος, στο σχέδιο της Εικόνας 6.20 τα μακροσκοπικά στοιχεία της πειραματικής διάταξης συνδυάζονται με σωματιδιακά στοιχεία στο εσωτερικό του νερού και με βέλη που αποδίδουν την κίνησή του. Η συνύπαρξη των παρατηρήσιμων στοιχείων της διάταξης (SS) με μη άμεσα παρατηρήσιμες υλικές οντότητες (US) τεκμηριώνει την κατάταξη της αναπαράστασης ως SS+US.



Εικόνα 6.29. Σχέδιο μαθητή Μ18 στο ΜΕΤΑ – αναπαράσταση SS+US

6.3 Σύνοψη των αποτελεσμάτων

Στην παρούσα ενότητα συνοψίζονται τα βασικά ευρήματα της ανάλυσης των μαθητικών σχεδίων σε αντιστοιχία με τα δύο ερευνητικά ερωτήματα της εργασίας.

6.3.1 Σύνοψη των ιδεών και των μεταβολών τους μεταξύ των χρονικών σημείων

Σε σχέση με το πρώτο ερευνητικό ερώτημα, στα αρχικά σχέδια του έργου ΑΓ3 κυριαρχούσαν ιδέες σύμφωνα με τις οποίες η θερμότητα ακολουθεί συγκεκριμένη πορεία στη μεταλλική διάταξη ή διαδίδεται επιλεκτικά προς ορισμένες κατευθύνσεις. Κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τη ΔΜΑ εμφανίστηκαν συχνότερα αναπαραστάσεις στις οποίες η διάδοση αποδιδόταν σε ολόκληρη τη διάταξη και διαφοροποιούνταν οι επιμέρους περιοχές της ως προς τη θερμική τους κατάσταση ή τη χρονική σειρά θέρμανσης. Ωστόσο, σε κανένα χρονικό σημείο δεν αποδόθηκε πλήρως ο επιστημονικά αποδεκτός μικροσκοπικός μηχανισμός της αγωγής. Στο ΜΜΕΤΑ διατηρήθηκαν ορισμένα από τα στοιχεία που είχαν εμφανιστεί στα ενδιάμεσα και στο ΜΕΤΑ, ενώ παράλληλα επανεμφανίστηκαν και αρχικές ιδέες.

Στο έργο Ρ2, πριν από τη ΔΜΑ κυριαρχούσε η ιδέα ότι η θερμότητα διαδίδεται ή κατανέμεται στο νερό χωρίς να απαιτείται κίνηση του ίδιου του νερού. Στη συνέχεια εμφανίστηκαν θερμικές και σωματιδιακές διαφοροποιήσεις μεταξύ διαφορετικών περιοχών του νερού και, σε μικρότερο αριθμό περιπτώσεων, απόδοση της κίνησής του και στοιχεία αιτιακής ερμηνείας των ρευμάτων μεταφοράς. Παράλληλα, εντοπίστηκαν αναπαραστάσεις στις οποίες εφαρμοζόταν στο νερό το σωματιδιακό μοντέλο της αγωγής. Στο ΜΜΕΤΑ επανήλθε ως κυρίαρχη η απόδοση της διάδοσης ή κατανομής

της θερμότητας χωρίς κίνηση του νερού, ενώ σε λίγες περιπτώσεις διατηρήθηκαν στοιχεία κίνησης και αιτιακής ερμηνείας.

Στο έργο P3, στα ΠΡΙΝ και ΕΝΔ1 κυριαρχούσαν αναπαραστάσεις στις οποίες απουσίαζε η κυκλοφορία του νερού ή αποδιδόταν μόνο το αποτέλεσμα της θέρμανσης και επιμέρους μορφές κίνησης. Στα ΕΝΔ2 και ΜΕΤΑ εμφανίστηκαν συχνότερα αναπαραστάσεις της κυκλικής κίνησης του νερού, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις αυτή συνδεόταν με τη θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίησή του. Στο ΜΜΕΤΑ η κυκλική κίνηση εξακολουθούσε να αποδίδεται σε αρκετές αναπαραστάσεις, αλλά η αιτιακή σύνδεσή της με τη διαφοροποίηση της πυκνότητας εμφανιζόταν λιγότερο συχνά.

6.3.2 Σύνοψη των σημειωτικών πόρων και των επιπέδων αναπαράστασης

Σε σχέση με το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα, οι βασικοί σημειωτικοί πόροι που εντοπίστηκαν στα τρία έργα ήταν η χρωματική διαβάθμιση, τα βέλη, οι γραμμές/διαδρομές, τα σωματιδιακά στοιχεία, οι λεκτικές επισημάνσεις και, σε περιορισμένο βαθμό, οι αριθμοί/ακολουθίες. Η λειτουργία των πόρων διαφοροποιούνταν ανάλογα με το έργο και το φαινόμενο που αναπαριστανόταν. Το χρώμα χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τη διαφοροποίηση της θερμικής κατάστασης διαφορετικών περιοχών, τα βέλη και οι γραμμές/διαδρομές για την απόδοση κατεύθυνσης, πορείας ή κίνησης, ενώ τα σωματιδιακά στοιχεία χρησιμοποιήθηκαν για την απόδοση του υλικού σε μη άμεσα παρατηρήσιμο επίπεδο. Οι λεκτικές επισημάνσεις είχαν κυρίως συμπληρωματική λειτουργία, αποσαφηνίζοντας στοιχεία της διάταξης ή της διαδικασίας. Κατά τα ενδιάμεσα χρονικά σημεία και στο ΜΕΤΑ εμφανίστηκαν συχνότερα συνδυασμοί χρωματικών και σωματιδιακών στοιχείων, ενώ στο ΜΜΕΤΑ η παρουσία των σωματιδιακών στοιχείων μειώθηκε και στα τρία έργα.

Ως προς τα επίπεδα αναπαράστασης, στο ΠΡΙΝ όλες οι αναπαραστάσεις και στα τρία έργα εντάχθηκαν στο επίπεδο Sensory (SS). Στα επόμενα χρονικά σημεία εμφανίστηκαν αναπαραστάσεις στις οποίες συνυπήρχαν στοιχεία των επιπέδων Sensory και Unseen Substance (SS+US), με τη μεγαλύτερη παρουσία τους να καταγράφεται κατά τα ενδιάμεσα και κυρίως στο ΜΕΤΑ. Στο ΜΜΕΤΑ οι αναπαραστάσεις SS+US μειώθηκαν και στα τρία έργα, ενώ αυξήθηκαν αντίστοιχα οι SS. Αμιγείς αναπαραστάσεις US και αναπαραστάσεις επιπέδου UN δεν εντοπίστηκαν σε κανένα χρονικό σημείο. Η παρουσία στοιχείων US δεν συνδεόταν απαραίτητα με μεγαλύτερη επιστημονική επάρκεια της αναπαράστασης, καθώς το επίπεδο αναπαράστασης και η επιστημονική επάρκεια εξετάστηκαν ως διακριτές αναλυτικές διαστάσεις.

Κεφάλαιο 7ο: Συζήτηση – Συμπεράσματα

Στο παρόν κεφάλαιο συζητούνται και ερμηνεύονται τα βασικά ευρήματα της έρευνας σε αντιστοιχία με τα δύο ερευνητικά ερωτήματα. Αρχικά εξετάζονται οι ιδέες που εξέφρασαν οι μαθητές/τριες για τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή και με ρεύματα μεταφοράς, καθώς και οι μεταβολές τους στα πέντε χρονικά σημεία. Στη συνέχεια συζητούνται οι σημειωτικοί πόροι και τα επίπεδα αναπαράστασης που αξιοποιήθηκαν στα σχέδιά τους. Η συζήτηση εστιάζει στη σύνθεση και ερμηνεία των ευρημάτων σε σχέση με τη ΔΜΑ και με την υπάρχουσα βιβλιογραφία.

7.1 Συζήτηση των ευρημάτων για τις ιδέες των μαθητών/τριών

7.1.1 Διάδοση της θερμότητας με αγωγή

Στο έργο ΑΓ3, οι αρχικές αναπαραστάσεις έδειξαν ότι οι μαθητές/τριες απέδιδαν συχνά τη θερμότητα ως κάτι που ακολουθεί συγκεκριμένη πορεία στο εσωτερικό της μεταλλικής διάταξης ή διαδίδεται επιλεκτικά προς ορισμένες κατευθύνσεις. Οι αναπαραστάσεις αυτές παραπέμπουν σε μια θεώρηση της θερμότητας ως οντότητας που κινείται ή ρέει μέσα στο σώμα, παρά σε μια ερμηνεία μεταφοράς της θερμότητας μέσω αλληλεπιδράσεων μεταξύ των σωματιδίων του μετάλλου. Το εύρημα αυτό συμφωνεί με τις εναλλακτικές αντιλήψεις που έχουν καταγραφεί στη βιβλιογραφία, σύμφωνα με τις οποίες οι μαθητές/τριες συχνά προσδίδουν στη θερμότητα υλική υπόσταση και θεωρούν ότι μπορεί να μετακινείται, να εισέρχεται ή να εξέρχεται από τα σώματα (Erickson & Tiberghien, 1985· Χαλκιά, 2012). Παράλληλα, η επιλογή συγκεκριμένων «διαδρομών» ενδέχεται να συνδέεται με καθημερινά νοητικά σχήματα, στα οποία η διάδοση της θερμότητας περιγράφεται ως ταξίδι ή ροή μιας ουσίας (Gilbert & Watts, 1983· Χαλκιά, 2012).

Κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τη ΔΜΑ παρατηρήθηκε μετατόπιση προς αναπαραστάσεις στις οποίες η θερμότητα διαδιδόταν σε ολόκληρη τη μεταλλική διάταξη. Οι μαθητές/τριες άρχισαν επίσης να διαφοροποιούν τις περιοχές της διάταξης ως προς τη θερμική τους κατάσταση ή τη χρονική σειρά θέρμανσης και, σε αρκετές περιπτώσεις, να ενσωματώνουν σωματιδιακά στοιχεία. Η μεταβολή αυτή θα μπορούσε να συνδέεται με τις μαθησιακές ευκαιρίες που παρείχαν οι δραστηριότητες διερεύνησης, η παρατήρηση των πειραματικών αποτελεσμάτων και η μοντελοποίηση, χωρίς ωστόσο τα δεδομένα της παρούσας εργασίας να επιτρέπουν την απόδοση των μεταβολών σε κάποιο επιμέρους στοιχείο της ΔΜΑ. Η παραγωγή και η αναθεώρηση σχεδίων έχει επίσης προταθεί ότι μπορεί να υποστηρίζει αυτή τη διαδικασία, καθώς ωθεί τους/τις μαθητές/τριες να επιλέξουν τα σημαντικά στοιχεία του φαινομένου και να οργανώσουν τις μεταξύ τους σχέσεις (Ainsworth et al., 2011· Tytler et al., 2019).

Ωστόσο, η μεγαλύτερη οργάνωση των σχεδίων και η εμφάνιση σωματιδίων δε συνοδεύτηκαν από πλήρη απόδοση του επιστημονικά αποδεκτού μικροσκοπικού μηχανισμού. Σε κανένα σχέδιο δεν εμφανίστηκε ολοκληρωμένα η μεταφορά ενέργειας μέσω της κίνησης και της αλληλεπίδρασης γειτονικών σωματιδίων, για αυτό και δεν

καταγράφηκε αναπαράσταση της κατηγορίας 3. Σε αρκετές περιπτώσεις τα σωματίδια λειτουργούσαν ως στατικά στοιχεία ή δήλωναν απλώς ότι το μέταλλο αποτελείται από μόρια, χωρίς να αποδίδεται η μεταξύ τους μεταβίβαση ενέργειας. Το εύρημα αυτό είναι συμβατό με τη διαπίστωση των Mathayas et al. (2021) ότι η μετάβαση από την ιδέα της θερμότητας ως ουσίας σε μια μηχανιστική εξήγηση της αγωγής είναι απαιτητική και χρειάζεται συστηματική υποστήριξη για τη σύνδεση της κίνησης με τις αλληλεπιδράσεις των σωματιδίων. Δείχνει, επίσης, ότι η χρήση επιστημονικών συμβόλων ή οντοτήτων δεν αποτελεί από μόνη της τεκμήριο επιστημονικά επαρκούς κατανόησης. Παράλληλα, ενισχύει την άποψη ότι η απλή ενσωμάτωση επιστημονικών οντοτήτων ή συμβόλων σε μια αναπαράσταση δε συνεπάγεται κατ' ανάγκη συνεκτική κατανόηση του υποκείμενου μηχανισμού (Park et al., 2020).

Στο ΜΜΕΤΑ διατηρήθηκαν ορισμένα από τα στοιχεία που είχαν εμφανιστεί κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τη διδασκαλία, όπως η απόδοση της διάδοσης σε μεγαλύτερο μέρος της διάταξης και η θερμική διαφοροποίηση επιμέρους περιοχών. Παράλληλα, όμως, επανεμφανίστηκαν αρχικές ιδέες και αυξήθηκαν ξανά οι αποκλειστικά μακροσκοπικές αναπαραστάσεις. Η εικόνα αυτή δείχνει ότι η μεταβολή των ιδεών δεν ήταν γραμμική ούτε σταθερή για όλους/ες τους/τις μαθητές/τριες. Τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι νεότερα αναπαραστατικά στοιχεία μπορούσαν να συνυπάρχουν με προϋπάρχουσες αντιλήψεις, οι οποίες δεν φαίνεται να είχαν πλήρως υποχωρήσει. Επομένως, η μακροπρόθεσμη διατήρηση μιας μηχανιστικής εξήγησης της αγωγής ενδέχεται να ενισχύεται από περισσότερες ευκαιρίες εφαρμογής, σύγκρισης και αναθεώρησης των αναπαραστάσεων σε διαφορετικά πλαίσια.

7.1.2 Διάδοση της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς

Στα έργα P2 και P3, οι αρχικές αναπαραστάσεις εστίαζαν κυρίως στη θέρμανση του νερού ή στην κατανομή της θερμότητας, χωρίς να αποδίδεται η κίνηση του ίδιου του υγρού. Η θερμότητα παρουσιαζόταν συχνά ως κάτι που ανεβαίνει ή διαδίδεται μέσα στο νερό, ενώ σε άλλες περιπτώσεις αποδιδόταν μόνο το παρατηρήσιμο αποτέλεσμα της θέρμανσης, όπως ο βρασμός ή οι φυσαλίδες. Το εύρημα αυτό συνδέεται με την ευρύτερη εναλλακτική αντίληψη της θερμότητας ως ρευστής οντότητας που μετακινείται ανεξάρτητα από την ύλη (Erickson & Tiberghien, 1985· Χαλκιά, 2012). Παρουσιάζει επίσης ομοιότητες με τα διαφορετικά νοητικά μοντέλα που κατέγραψε η Chiou (2013), στα οποία η θέρμανση, η κατανομή της θερμοκρασίας και η κίνηση των μαζών του υγρού δεν συνδέονταν πάντοτε σε έναν ενιαίο μηχανισμό. Επομένως, οι αρχικές αναπαραστάσεις φαίνεται να αποδίδουν κυρίως επιμέρους όψεις ή αποτελέσματα του φαινομένου, χωρίς να συγκροτούν την κυκλική κίνηση του ρευστού και την αιτιακή της σύνδεση με τις διαφορές πυκνότητας.

Κατά τα επόμενα χρονικά σημεία εμφανίστηκαν συχνότερα θερμικές και σωματιδιακές διαφοροποιήσεις ανάμεσα σε περιοχές του νερού, καθώς και στοιχεία κίνησης. Οι μαθητές/τριες άρχισαν να αποδίδουν το θερμότερο νερό ως αραιότερο ή να χρησιμοποιούν βέλη για την άνοδό του, ενώ σε ορισμένες περιπτώσεις απεικονίστηκε και η κάθοδος του ψυχρότερου νερού. Οι αλλαγές αυτές βρίσκονται σε

συμφωνία με τα ευρήματα των Anam et al. (2023), σύμφωνα με τα οποία μια εποικοδομητικού τύπου διδακτική ακολουθία που συνδυάζει πειραματισμό, συζήτηση και σχεδίαση συνδέθηκε με την παραγωγή περισσότερο επιστημονικά επαρκών αναπαραστάσεων των ρευμάτων μεταφοράς, με στοιχεία τόσο του μακροσκοπικού επιπέδου όσο και του μικροσκοπικού επιπέδου. Παράλληλα, οι Anam et al. (2023) διαπίστωσαν ότι ορισμένοι/ες μαθητές/τριες εξακολουθούσαν να δυσκολεύονται ιδιαίτερα στην απόδοση και ερμηνεία του φαινομένου σε μικροσκοπικό επίπεδο.

Παρά τη βελτίωση αυτή, η πλήρης αιτιακή ακολουθία του μηχανισμού παρέμεινε δύσκολη. Η απόδοση της θερμικής ή σωματιδιακής διαφοροποίησης δεν συνοδευόταν πάντοτε από κίνηση του νερού, ενώ η αναπαράσταση της ανόδου του θερμότερου νερού δεν περιλάμβανε αναγκαστικά την κάθοδο του ψυχρότερου και την ολοκλήρωση της κυκλικής ροής. Ακόμη και όταν παρουσιαζόταν κυκλική κίνηση, η σύνδεσή της με τη διαφοροποίηση της πυκνότητας παρέμενε συχνά ατελής. Φαίνεται, επομένως, ότι οι μαθητές/τριες μπορούσαν να αναγνωρίσουν και να αποδώσουν επιμέρους στοιχεία του φαινομένου, χωρίς να τα οργανώνουν πάντοτε σε μια συνεκτική εξήγηση αιτίας και αποτελέσματος. Η διάκριση ανάμεσα στην αναγνώριση της κίνησης και στην ερμηνεία της αιτίας της είναι ουσιαστική, επειδή ένα σχέδιο με βέλη κυκλοφορίας μπορεί να αποδίδει τη μορφή της κίνησης χωρίς να τεκμηριώνει κατανόηση του μηχανισμού που τη δημιουργεί. Το εύρημα αυτό είναι συμβατό τόσο με τα νοητικά μοντέλα της Chiou (2013), στα οποία επιμέρους όψεις των ρευμάτων μεταφοράς δε συνδέονταν πάντοτε σε έναν συνεκτικό μηχανισμό, όσο και με τα ευρήματα των Anam et al. (2023) σχετικά με τις επίμονες δυσκολίες στη μικροσκοπική ερμηνεία του φαινομένου.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει και η εφαρμογή του σωματιδιακού μοντέλου της αγωγής στο νερό, η οποία εμφανίστηκε κυρίως στο έργο P2. Στις περιπτώσεις αυτές οι μαθητές/τριες αξιοποίησαν στοιχεία που είχαν επιστημονικό χαρακτήρα, όπως τα μόρια και η μεταβίβαση από γειτονικό σωματίδιο σε γειτονικό σωματίδιο, αλλά τα εφάρμοσαν ως κύριο ερμηνευτικό μοντέλο σε ένα έργο που απαιτούσε την απόδοση του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς. Αν και η αγωγή πραγματοποιείται και στο νερό, σε μικρό βαθμό, δεν επαρκεί για την ερμηνεία της μακροσκοπικής κυκλοφορίας του ρευστού, η οποία συνδέεται με διαφορές θερμοκρασίας και πυκνότητας και με την επακόλουθη άνοδο και κάθοδο μαζών του νερού. Το εύρημα υποδηλώνει ότι η εισαγωγή ενός επιστημονικού μοντέλου δε συνεπάγεται αυτομάτως ούτε τη συνεπή εφαρμογή του ούτε την επιλογή του κατάλληλου ερμηνευτικού μοντέλου για κάθε φαινόμενο.

Τα δύο έργα παρουσίασαν, ωστόσο, διαφορετική πορεία στη μεταγενέστερη μέτρηση. Στο P2, στο ΜΜΕΤΑ επανήλθε ως κυρίαρχη η απόδοση της θερμότητας χωρίς κίνηση του νερού και μόνο λίγες αναπαραστάσεις διατήρησαν στοιχεία κίνησης και αιτιακής ερμηνείας. Στο P3, αντίθετα, η κυκλική κίνηση εξακολουθούσε να εμφανίζεται σε αρκετά σχέδια, αλλά η σύνδεσή της με τη θερμική και σωματιδιακή διαφοροποίηση ήταν λιγότερο συχνή. Η διαφορά αυτή υποδηλώνει ότι η μορφή της κυκλικής κίνησης μπορεί να διατηρείται σε ορισμένες αναπαραστάσεις ακόμη και όταν η αιτιακή της ερμηνεία δεν αποδίδεται πλήρως. Ωστόσο, επειδή τα P2 και P3 αποτελούν διαφορετικά έργα, το εύρημα δε μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά σε

διαφορετικό βαθμό διατήρησης της γνώσης. Είναι πιθανό να αντανακλά επίσης τις διαφορετικές αναπαραστατικές και εννοιολογικές απαιτήσεις των δύο έργων, οι οποίες επηρεάζουν ποια στοιχεία της γνώσης ενεργοποιούνται και γίνονται ορατά στο σχέδιο.

7.1.3 Σύνθεση των μεταβολών των ιδεών

Συνολικά, οι μεγαλύτερες μεταβολές αφορούσαν τη διεύρυνση της περιοχής στην οποία αποδιδόταν η διάδοση της θερμότητας, την εμφάνιση θερμικών και σωματιδιακών διαφοροποιήσεων και τη συχνότερη χρήση στοιχείων κίνησης. Οι μαθητές/τριες μετά τη ΔΜΑ δεν περιορίζονταν πάντοτε στην καταγραφή ενός μακροσκοπικού αποτελέσματος, αλλά επιχειρούσαν συχνότερα να αποδώσουν μη ορατές οντότητες και επιμέρους διαδικασίες. Η μεταβολή αυτή αποτελεί ένδειξη εμπλουτισμού των αναπαραστάσεών τους και συνάδει με τη θέση ότι η καθοδηγούμενη παραγωγή, σύγκριση και αναθεώρηση αναπαραστάσεων μπορεί να υποστηρίξει την ανάπτυξη του επιστημονικού συλλογισμού (Ainsworth et al., 2011· Tytler et al., 2019). Ωστόσο, ο αναπαραστατικός αυτός εμπλουτισμός δε συνεπαγόταν κατ' ανάγκη και αντίστοιχη εμβάθυνση της εννοιολογικής κατανόησης.

Παρόλα αυτά, τα περισσότερο απαιτητικά στοιχεία ήταν εκείνα που προϋπέθεταν πλήρη αιτιακή εξήγηση. Στην αγωγή παρέμεινε δύσκολη η απόδοση της μεταφοράς θερμότητας μεταξύ γειτονικών σωματιδίων, ενώ στα ρεύματα μεταφοράς δυσκολία παρουσίασε η σύνδεση της θέρμανσης με τη μεταβολή της πυκνότητας και, στη συνέχεια, με την άνοδο του θερμότερου, την κάθοδο του ψυχρότερου νερού και την κυκλική κίνηση. Η ομοιότητα αυτή μεταξύ των δύο φαινομένων υποδηλώνει ότι οι μαθητές/τριες μπορούν να υιοθετούν επιστημονικά στοιχεία ή όρους χωρίς να έχουν συγκροτήσει ακόμη έναν συνεκτικό αιτιακό μηχανισμό που συνδέει τα στοιχεία αυτά. Η εικόνα αυτή είναι συμβατή με προηγούμενες έρευνες για τη σωματιδιακή φύση της ύλης, οι οποίες δείχνουν ότι η μετάβαση από μακροσκοπικές περιγραφές σε συνεκτικές μικροσκοπικές εξηγήσεις είναι σταδιακή και απαιτητική. Οι Nakhleh και Samarapungavan (1999) έδειξαν ότι παιδιά Δημοτικού βασίζονται σε μεγάλο βαθμό σε μακροσκοπικά και περιγραφικά συστήματα εξήγησης, ενώ οι Nakhleh et al. (2005) διαπίστωσαν ότι ακόμη και μεγαλύτεροι μαθητές μπορεί να χρησιμοποιούν σωματιδιακές ιδέες χωρίς να τις εντάσσουν σε ένα πλήρως συνεκτικό εννοιολογικό πλαίσιο. Αντίστοιχα, οι Papageorgiou et al. (2008) κατέγραψαν συνθετικές ερμηνείες στις οποίες συνυπήρχαν μακροσκοπικά και μικροσκοπικά χαρακτηριστικά.

Η δυσκολία αυτή δεν μπορεί, ωστόσο, να αποδοθεί αποκλειστικά στην ηλικία των μαθητών/τριών ή σε μια αναπτυξιακή αδυναμία χρήσης μικροσκοπικών μοντέλων. Αντίθετα, έρευνες έχουν δείξει ότι ακόμη και μικρότερα παιδιά μπορούν, με κατάλληλη διδακτική υποστήριξη, να αρχίσουν να οικοδομούν και να χρησιμοποιούν απλά σωματιδιακά μοντέλα (Samarapungavan et al., 2017). Παράλληλα, έχει προταθεί η βαθμιαία εισαγωγή των μαθητών σε μοντέλα αυξανόμενου βαθμού αφαίρεσης και η αξιοποίηση απλουστευμένων, ποιοτικών οπτικών μοντέλων για την προσέγγιση αφηρημένων επιστημονικών εννοιών (Ζουπίδης, 2012). Τα ευρήματα της παρούσας έρευνας φαίνεται, επομένως, να αντανακλούν αφενός τη σταδιακή και μη γραμμική

οικοδόμηση ενός συνεκτικού μικροσκοπικού μοντέλου και αφετέρου να υποδεικνύουν την ανάγκη περαιτέρω διερεύνησης διδακτικών προσεγγίσεων που θα υποστηρίζουν τη σταδιακή γεφύρωση ανάμεσα στα παρατηρήσιμα χαρακτηριστικά των φαινομένων και στις μη ορατές οντότητες και αλληλεπιδράσεις που χρησιμοποιούνται για την ερμηνεία τους.

Η επανεμφάνιση αρχικών ιδεών στο ΜΜΕΤΑ και η συνύπαρξη επιστημονικά αποδεκτών και εναλλακτικών στοιχείων μέσα στην ίδια αναπαράσταση υποδηλώνουν ότι η εξέλιξη της κατανόησης δεν ακολουθεί μια απλή πορεία αντικατάστασης της προηγούμενης γνώσης. Οι μαθητές/τριες φαίνεται να κινητοποιούν διαφορετικούς, ενίοτε ανταγωνιστικούς τρόπους ερμηνείας, ανάλογα με το έργο και τα στοιχεία που αυτό καθιστά περισσότερο εμφανή. Συνεπώς, τα ευρήματα αυτά αναδεικνύουν τη σημασία επαναλαμβανόμενων δραστηριοτήτων, στις οποίες οι μαθητές/τριες καλούνται να εφαρμόζουν, να συγκρίνουν και να αιτιολογούν τα μοντέλα τους σε διαφορετικές περιπτώσεις.

7.2 Συζήτηση των ευρημάτων για τους σημειωτικούς πόρους και τα επίπεδα αναπαράστασης

7.2.1 Σημειωτικοί πόροι

Στα τρία έργα οι μαθητές/τριες αξιοποίησαν κυρίως το χρώμα, τα βέλη, τις γραμμές ή διαδρομές, τα σωματιδιακά στοιχεία, τις λεκτικές επισημάνσεις και, σε μικρότερο βαθμό, αριθμούς ή ακολουθίες. Οι πόροι αυτοί δεν λειτούργησαν ως απλά διακοσμητικά στοιχεία, αλλά επιτέλεσαν διαφορετικές λειτουργίες στην κατασκευή του νοήματος. Η παρατήρηση αυτή συμφωνεί με την κοινωνιοσημειωτική προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία κάθε σημειωτικός τρόπος διαθέτει ιδιαίτερες δυνατότητες νοηματοδότησης και το συνολικό νόημα προκύπτει από τον συντονισμό των διαφορετικών τρόπων (Kress, 2010· Lemke, 1998· Tang, 2013).

Το χρώμα χρησιμοποιήθηκε κυρίως για τη διαφοροποίηση θερμών και ψυχρών περιοχών ή για την απόδοση μιας θερμικής διαβάθμισης. Τα βέλη δήλωναν κατεύθυνση, μεταβολή ή κίνηση, ενώ οι γραμμές και οι διαδρομές οργάνωναν χωρικά την πορεία της θερμότητας ή του νερού. Τα σωματιδιακά στοιχεία έδωσαν στους/στις μαθητές/τριες τη δυνατότητα να αναφερθούν στη δομή του υλικού σε μη άμεσα παρατηρήσιμο επίπεδο. Οι λεκτικές επισημάνσεις είχαν κυρίως συμπληρωματική ή αποσαφηνιστική λειτουργία, καθώς ονόμαζαν στοιχεία της διάταξης, προσδιόριζαν θερμικές καταστάσεις ή διευκρίνιζαν το νόημα ενός βέλους και μιας χρωματικής επιλογής. Η διαφορετική λειτουργία των πόρων αυτών αναδεικνύει τη σημασία της εξέτασης του τρόπου με τον οποίο συνδυάζονται στο συνολικό σχέδιο, και όχι της αντιμετώπισης των σχεδίων ως απλών εικόνων (Tang et al., 2019· Wanselin et al., 2022).

Κατά τα ενδιάμεσα χρονικά σημεία και κυρίως στο ΜΕΤΑ εμφανίστηκαν συχνότερα συνδυασμοί διαφορετικών πόρων. Για παράδειγμα, το χρώμα μπορούσε να συνδυάζεται με σωματίδια και βέλη, ώστε να αποδίδονται ταυτόχρονα η θερμική

κατάσταση, η δομή του υλικού και η κατεύθυνση μιας διαδικασίας. Η αύξηση αυτή μπορεί να ερμηνευθεί ως διεύρυνση του αναπαραστατικού ρεπερτορίου των μαθητών/τριών. Οι μαθητές/τριες φαίνεται ότι διέθεταν στα μεταγενέστερα χρονικά σημεία περισσότερες σημειωτικές επιλογές για να εξωτερικεύσουν και να οργανώσουν τις ιδέες τους, στοιχείο που συνδέεται με τη μαθησιακή λειτουργία της σχεδίασης και των πολλαπλών αναπαραστάσεων (Ainsworth et al., 2011· Danielsson et al., 2023).

Ωστόσο, ο μεγαλύτερος αριθμός ή ο συνδυασμός περισσότερων πόρων δεν σήμαινε αυτομάτως μεγαλύτερη επιστημονική ορθότητα. Ένα βέλος μπορούσε να αποδίδει επιστημονικά συμβατή κίνηση, αλλά μπορούσε επίσης να αναπαριστά τη θερμότητα ως αυτόνομη ουσία. Αντίστοιχα, τα σωματίδια μπορούσαν να χρησιμοποιούνται για την απόδοση διαφορών πυκνότητας ή αλληλεπιδράσεων, αλλά μπορούσαν και να παραμένουν στατικά ή να εντάσσονται σε εναλλακτικό μηχανισμό. Το νόημα κάθε πόρου εξαρτιόταν, επομένως, από τη θέση του, τη σχέση του με τα υπόλοιπα στοιχεία και τη συνοδευτική γραπτή εξήγηση. Το εύρημα αυτό στηρίζει τη θέση των Tang et al. (2019) ότι τα μαθητικά σχέδια δεν πρέπει να ερμηνεύονται μέσω μεμονωμένων συμβόλων ούτε ανεξάρτητα από το συνοδευτικό γλωσσικό υλικό.

Η μείωση των σωματιδιακών στοιχείων στο ΜΜΕΤΑ δείχνει επίσης ότι οι μαθητές/τριες τα αξιοποίησαν λιγότερο συχνά στις αναπαραστάσεις τους δέκα μήνες μετά τη ΔΜΑ. Το εύρημα αυτό δεν επιτρέπει, ωστόσο, να συναχθεί ότι η σχετική γνώση είχε χαθεί ή ότι τα σωματιδιακά στοιχεία δεν παρέμεναν διαθέσιμα στο αναπαραστατικό τους ρεπερτόριο, καθώς ένα σχέδιο αποτυπώνει μόνο όσα ο/η μαθητής/τρια επιλέγει και μπορεί να εκφράσει σε μια συγκεκριμένη στιγμή και επηρεάζεται από τις απαιτήσεις του εκάστοτε έργου (Tang et al., 2019). Η μειωμένη κινητοποίησή τους στο ΜΜΕΤΑ υποδηλώνει, πάντως, ότι η χρήση των μικροσκοπικών αναπαραστατικών στοιχείων δεν είχε σταθεροποιηθεί στον ίδιο βαθμό σε όλες τις αποκρίσεις και αναδεικνύει τη σημασία της επαναλαμβανόμενης αξιοποίησης και συζήτησης τέτοιων αναπαραστάσεων σε διαφορετικά πλαίσια.

7.2.2 Επίπεδα αναπαράστασης

Στο ΠΡΙΝ όλες οι αναπαραστάσεις των τριών έργων εντάχθηκαν στο αισθητηριακό επίπεδο (SS), καθώς περιορίζονταν σε άμεσα παρατηρήσιμες οντότητες. Στα επόμενα χρονικά σημεία εμφανίστηκαν μεικτές αναπαραστάσεις SS+US, στις οποίες η μακροσκοπική διάταξη συνδυαζόταν με μη ορατές υλικές οντότητες, κυρίως μόρια ή σωματίδια. Η μεταβολή αυτή υποδηλώνει ότι οι μαθητές/τριες άρχισαν να ενσωματώνουν στις αναπαραστάσεις τους στοιχεία που υπερέβαιναν το άμεσα παρατηρήσιμο επίπεδο και να επιχειρούν συνδέσεις με μη ορατές οντότητες. Αντίστοιχη μετάβαση προς αναπαραστάσεις που συνδυάζουν μακροσκοπικά και μικροσκοπικά στοιχεία αναφέρεται και από τους Anam et al. (2023) μετά την εφαρμογή διδακτικής ακολουθίας για τα ρεύματα μεταφοράς.

Η εμφάνιση μεικτών αναπαραστάσεων είναι σημαντική, όμως δεν αποτελεί από μόνη της ένδειξη πληρέστερης επιστημονικής κατανόησης. Όπως επισημαίνουν οι Park et al. (2020), τα επίπεδα SS, US και UN δεν συγκροτούν απλή ιεραρχική κλίμακα

ποιότητας. Στην παρούσα έρευνα, στοιχεία US εμφανίστηκαν τόσο σε περισσότερο επιστημονικά συμβατές αναπαραστάσεις όσο και σε σχέδια με στατικά σωματίδια ή ελλιπή αιτιακή σύνδεση. Επομένως, το επίπεδο αναπαράστασης και η επιστημονική επάρκεια αποτελούν διακριτές διαστάσεις: το πρώτο δείχνει σε ποιο είδος οντοτήτων αναφέρεται το σχέδιο, ενώ η δεύτερη αφορά τον τρόπο με τον οποίο οι οντότητες και οι διαδικασίες συνδέονται σε επιστημονικά συνεπή μηχανισμό.

Η απουσία αμιγών αναπαραστάσεων US μπορεί να ερμηνευθεί σε σχέση με τη φύση των έργων, τα οποία ζητούσαν από τους/τις μαθητές/τριες να αποδώσουν συγκεκριμένες πειραματικές διατάξεις. Η διατήρηση των μακροσκοπικών στοιχείων ήταν, επομένως, λειτουργική για την αναγνώριση του φαινομένου, ακόμη και όταν προστίθεντο σωματίδια. Παράλληλα, η απουσία αναπαραστάσεων UN σημαίνει ότι στα συγκεκριμένα σχέδια δεν εντοπίστηκαν μη ορατές, μη υλικές σχέσεις ή διαδικασίες ως διακριτά αναπαραστατικά στοιχεία. Ωστόσο, η απουσία αυτή δε μπορεί να αποδοθεί αποκλειστικά σε δυσκολία των μαθητών/τριών να κατανοήσουν ή να οπτικοποιήσουν τέτοιους μηχανισμούς, καθώς μπορεί να σχετίζεται και με τη φύση των έργων και με το τι αυτά ζητούσαν να αναπαρασταθεί. Οι μαθητές/τριες χρησιμοποίησαν κυρίως υλικές οντότητες και ορατές ενδείξεις κίνησης, γεγονός που δείχνει τον τρόπο με τον οποίο επέλεξαν να αποδώσουν το φαινόμενο στα συγκεκριμένα έργα, χωρίς να επιτρέπει ασφαλές συμπέρασμα για το αν μπορούσαν να εκφράσουν αφηρημένες σχέσεις με άλλον τρόπο ή σε διαφορετικό πλαίσιο.

Στο ΜΜΕΤΑ οι μεικτές αναπαραστάσεις SS+US μειώθηκαν και στα τρία έργα, ενώ αυξήθηκαν οι αναπαραστάσεις SS. Η μεταβολή αυτή βρίσκεται σε συμφωνία με την επανεμφάνιση αρχικών ιδεών που καταγράφηκε στην εννοιολογική ανάλυση και δείχνει ότι οι μικροσκοπικές οντότητες κινητοποιήθηκαν λιγότερο συχνά στα σχέδια των μαθητών/τριών δέκα μήνες μετά τη ΔΜΑ. Δεν επιτρέπει, ωστόσο, να συναχθεί ότι οι οντότητες αυτές είχαν πάψει να αποτελούν μέρος της γνώσης ή του αναπαραστατικού τους ρεπερτορίου, καθώς ένα σχέδιο αποτυπώνει μόνο όσα ο/η μαθητής/τρια επιλέγει και μπορεί να εκφράσει στο συγκεκριμένο έργο και τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή (Tang et al., 2019). Παράλληλα, το εύρημα αναδεικνύει την αξία της αξιολόγησης σε περισσότερα χρονικά σημεία, καθώς μια μέτρηση μόνο αμέσως μετά τη διδασκαλία θα παρείχε περισσότερο θετική εικόνα ως προς τη χρήση μικροσκοπικών στοιχείων.

Συνολικά, η ανάλυση των επιπέδων αναπαράστασης ανέδειξε μια μετατόπιση από αποκλειστικά αισθητηριακές προς μεικτές μακροσκοπικές και σωματιδιακές αναπαραστάσεις, αλλά όχι μια σταθερή μετάβαση προς ολοκληρωμένους μη ορατούς μηχανισμούς. Πρόκειται για ένα από τα κεντρικά ευρήματα της εργασίας: οι μαθητές/τριες μπορούν να εμπλουτίσουν το σχέδιό τους με επιστημονικές οντότητες χωρίς να έχουν συνδέσει ακόμη τις οντότητες αυτές σε επιστημονικά επαρκή εξήγηση. Το εύρημα αυτό ενισχύει τη διάκριση μεταξύ αναπαραστατικού επιπέδου και εννοιολογικής επάρκειας και συμφωνεί με τη θέση των Park et al. (2020) ότι η παρουσία στοιχείων μη ορατού επιπέδου δεν αποτελεί από μόνη της δείκτη ανώτερης ποιότητας μιας αναπαράστασης. Για τον λόγο αυτό, η εκπαιδευτική αξιοποίηση των σχεδίων θα μπορούσε να συνοδεύεται από συζήτηση, σύγκριση και αιτιολόγηση των

αναπαραστατικών επιλογών και όχι να περιορίζεται στην απλή παρουσία συγκεκριμένων συμβόλων.

7.3 Συμπεράσματα

Σκοπός της παρούσας έρευνας ήταν η αξιολόγηση της κατανόησης μαθητών/τριών Ε΄ τάξης για τη διάδοση της θερμότητας με αγωγή και με ρεύματα μεταφοράς, μέσα από τη διερεύνηση των ιδεών που εκφράζουν στα σχέδιά τους, των μεταβολών των ιδεών αυτών πριν, κατά τη διάρκεια και μετά την εφαρμογή της ΔΜΑ, καθώς και των σημειωτικών πόρων και των επιπέδων αναπαράστασης που αξιοποιούν.

Ως προς το πρώτο ερευνητικό ερώτημα, τα ευρήματα έδειξαν ότι οι αρχικές αναπαραστάσεις βασίζονταν κυρίως σε μακροσκοπικές και εναλλακτικές ιδέες, όπως η θερμότητα που ακολουθεί συγκεκριμένη πορεία, η διάδοσή της χωρίς κίνηση του νερού ή η απόδοση μόνο του αποτελέσματος της θέρμανσης. Κατά τη διάρκεια και αμέσως μετά τη ΔΜΑ εμφανίστηκαν πιο σύνθετες αποδόσεις, με ευρύτερη διάδοση στη μεταλλική διάταξη, θερμικές και σωματιδιακές διαφοροποιήσεις και συχνότερη αναπαράσταση της κίνησης του νερού. Ωστόσο, η πλήρης μικροσκοπική εξήγηση της αγωγής και η ολοκληρωμένη αιτιακή ακολουθία των ρευμάτων μεταφοράς παρέμειναν δύσκολες. Στο ΜΜΕΤΑ διατηρήθηκαν ορισμένα νέα στοιχεία, αλλά επανεμφανίστηκαν και αρχικές ιδέες, γεγονός που υποδηλώνει ότι οι μεταβολές στην κατανόηση δεν ήταν γραμμικές ούτε σταθερές για όλους/ες τους/τις μαθητές/τριες.

Ως προς το δεύτερο ερευνητικό ερώτημα, οι μαθητές/τριες αξιοποίησαν ποικίλους σημειωτικούς πόρους, κυρίως χρώμα, βέλη, γραμμές ή διαδρομές, σωματιδιακά στοιχεία και λεκτικές επισημάνσεις. Η λειτουργία των πόρων αυτών διαφοροποιήθηκε ανάλογα με το έργο και τη θέση τους μέσα στο σχέδιο. Παράλληλα, μετά την έναρξη της ΔΜΑ εμφανίστηκαν μεικτές αναπαραστάσεις SS+US, χωρίς όμως αμιγείς US ή αναπαραστάσεις UN. Η παρουσία σωματιδίων και ο συνδυασμός περισσότερων πόρων διεύρυναν τις δυνατότητες αναπαράστασης του φαινομένου, αλλά δεν εξασφάλιζαν από μόνοι τους επιστημονικά επαρκή ερμηνεία.

Ένα από τα κεντρικά συμπεράσματα της εργασίας είναι, επομένως, ότι η μεγαλύτερη αναπαραστατική πολυπλοκότητα δεν ταυτίζεται κατ’ ανάγκη με μεγαλύτερη επιστημονική επάρκεια. Οι μαθητές/τριες μπορεί να ενσωματώνουν σωματίδια, βέλη ή άλλες επιστημονικά συμβατές οντότητες και συμβολισμούς χωρίς να έχουν συγκροτήσει ακόμη τον συνεκτικό αιτιακό μηχανισμό που συνδέει τα επιμέρους στοιχεία του φαινομένου. Το εύρημα αυτό αναδεικνύει παράλληλα την ανάγκη για διδακτικές προσεγγίσεις που θα υποστηρίζουν πιο σταδιακά και ρητά τη σύνδεση των παρατηρήσιμων χαρακτηριστικών των φαινομένων με το μικροσκοπικό επίπεδο και τους αντίστοιχους αιτιακούς μηχανισμούς.

Η συνολική συμβολή της έρευνας έγκειται στην ανάδειξη των μαθητικών σχεδίων ως πολύτιμων, αλλά σύνθετων, δεδομένων για τη διερεύνηση της κατανόησης θερμικών φαινομένων. Η συνδυαστική εξέταση του εννοιολογικού περιεχομένου, των σημειωτικών πόρων και των επιπέδων αναπαράστασης επέτρεψε να διακριθεί ο αναπαραστατικός εμπλουτισμός από την επιστημονική επάρκεια. Παράλληλα, τα

ευρήματα αναδεικνύουν τη δυνατότητα των σχεδίων να λειτουργούν ως αφετηρία για διδακτική συζήτηση, αιτιολόγηση και αναθεώρηση των μαθητικών ιδεών, χωρίς ωστόσο η παρούσα έρευνα να αξιολογεί άμεσα την αποτελεσματικότητα μιας τέτοιας διδακτικής χρήσης. Με αυτόν τον τρόπο, τα σχέδια μπορούν να παρέχουν στον/στην εκπαιδευτικό ουσιαστικές ενδείξεις για όσα οι μαθητές/τριες έχουν κατανοήσει, για όσα παραμένουν δύσκολα και για τα σημεία στα οποία χρειάζεται περαιτέρω διδακτική υποστήριξη.

7.4 Περιορισμοί της έρευνας

Η παρούσα έρευνα είχε πιλοτικό χαρακτήρα και πραγματοποιήθηκε με μικρό αριθμό συμμετεχόντων/ουσών από μία συγκεκριμένη σχολική τάξη. Η εφαρμογή και η αξιολόγηση της ΔΜΑ εντάσσονταν σε μια διερευνητική διαδικασία με στόχο την κατανόηση της λειτουργίας της και την ανάδειξη σημείων που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν στη βελτίωσή της. Ως εκ τούτου, τα ευρήματα αποτυπώνουν την πορεία της συγκεκριμένης ομάδας στο πλαίσιο της συγκεκριμένης ΔΜΑ και δε μπορούν να γενικευθούν σε ευρύτερο μαθητικό πληθυσμό.

Επιπλέον, η ανάλυση επικεντρώθηκε σε τρία συγκεκριμένα έργα και όχι στο σύνολο των δεδομένων της ευρύτερης έρευνας. Οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των ΑΓ3, Ρ2 και Ρ3 υποδηλώνουν ότι η μορφή και οι απαιτήσεις κάθε έργου επηρεάζουν τα στοιχεία που κινητοποιούνται και αναπαρίστανται. Συνεπώς, τα αποτελέσματα αφορούν στις συγκεκριμένες συνθήκες παραγωγής των σχεδίων και δεν είναι δυνατόν να θεωρηθούν ανεξάρτητα από αυτές. Ειδικότερα, οι διαφορετικές δυνατότητες και περιορισμοί που παρέχει κάθε έργο ως προς το τι μπορεί να αποδοθεί οπτικά ενδέχεται να επηρεάζουν ποια στοιχεία της κατανόησης γίνονται ορατά στις μαθητικές αναπαραστάσεις.

Ένας ακόμη περιορισμός αφορά στην ίδια τη φύση των μαθητικών σχεδίων. Το σχέδιο παρέχει σημαντικές ενδείξεις για τις ιδέες και τις σημειωτικές επιλογές των μαθητών/τριών, αλλά δεν αποτελεί πλήρη ή άμεση αποτύπωση της σκέψης τους (Tang et al., 2019). Παρότι στην ανάλυση συνεξετάστηκε ο συνοδευτικός γραπτός λόγος, ορισμένα στοιχεία παρέμειναν αμφίσημα και η ερμηνεία τους εμπεριέχει αναπόφευκτα αναλυτικές κρίσεις. Η αξιοποίηση συνεντεύξεων ή προφορικών εξηγήσεων θα μπορούσε να προσφέρει πληρέστερη τεκμηρίωση των νοημάτων που απέδιδαν οι μαθητές/τριες στα σχέδιά τους και να συμβάλει στην αποσαφήνιση περιπτώσεων στις οποίες το ίδιο οπτικό στοιχείο θα μπορούσε να επιδέχεται περισσότερες από μία ερμηνείες.

Τέλος, η αξιολόγηση της ΔΜΑ στην παρούσα έρευνα είχε εσωτερικό και διερευνητικό χαρακτήρα, με στόχο τον εντοπισμό στοιχείων που μπορούν να συμβάλουν στην κατανόηση της λειτουργίας και στην περαιτέρω βελτίωσή της. Τα ευρήματα, επομένως, πρέπει να ερμηνεύονται σε συνάρτηση με το συγκεκριμένο πλαίσιο εφαρμογής. Μελλοντικές εφαρμογές της ΔΜΑ σε διαφορετικές τάξεις, σε συνδυασμό με επαναλαμβανόμενες διαδικασίες αξιολόγησης και συμπληρωματικές πηγές δεδομένων, θα μπορούσαν να συμβάλουν στην περαιτέρω διερεύνηση και αναθεώρηση του σχεδιασμού της.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Åhman, N., & Jeppsson, F. (2020). Teachers' and pupils' scientific dialogue in learning about invisible thermal phenomena. *International Journal of Science Education*, *42*(18), 3116–3133. https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1852334

Ainsworth, S., Prain, V., & Tytler, R. (2011). Drawing to learn in science. *Science*, *333*(6046), 1096–1097. https://doi.org/10.1126/science.1204153

Anam, R. S., Gumilar, S., & Widodo, A. (2023). The use of the Constructivist Teaching Sequence (CTS) to facilitate changes in the visual representations of Fifth-Grade Elementary School students: A Case Study on Teaching heat convection Concepts. *International Journal of Science and Mathematics Education*, *22*(1), 73–99. https://doi.org/10.1007/s10763-023-10358-x

Μπελέφτα, Δ. (2025). *Εφαρμογή και αξιολόγηση διδακτικών και μαθησιακών δραστηριοτήτων για τα φαινόμενα διάδοσης της θερμότητας με ρεύματα μεταφοράς με διερευνητική προσέγγιση στην ΣΤ' τάξη Δημοτικού Σχολείου* [Πτυχιακή εργασία]. Δημοκρίτειο Πανεπιστήμιο Θράκης. Ανακτήθηκε από: https://repo.lib.duth.gr/jspui/handle/123456789/21280

Χαλκιά, Κ. (2012). *Διδάσκοντας φυσικές επιστήμες: Θεωρητικά ζητήματα, προβληματισμοί, προτάσεις.* Πατάκη.

Chang, H. (2004). *Inventing temperature.* Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/0195171276.001.0001

Chiou, G. (2013). Reappraising the relationships between physics students' mental models and predictions: An example of heat convection. Physical Review Special Topics-*Physics Education Research, 9*(1). https://doi.org/10.1103/physrevstper.9.010119

Christidou, V., Hatzinikita, V., & Dimitriou, A. (2009). Children's drawings about environmental phenomena: The use of visual codes. *The International Journal of Science in Society, 1*(1), 107-117. https://doi.org/10.18848/1836-6236/CGP/v01i01/51504

Clough, E., & Driver, R. (1985). Secondary students' conceptions of the conduction of heat: bringing together personal and scientific views. *Physics Education 20*, 175-182. https://doi.org/10.1088/0031-9120/20/4/309

Danielsson, K. G., Jeppsson, F., Nestlog, E. B., & Tang, K. S. (2023). Representations of science content in a primary classroom: Combining long and short timescales for multimodal analysis. *Science Education, 107*(6), 1561–1592. https://doi.org/10.1002/sce.21814

Danielsson, K., & Selander, S. (2016). Reading multimodal texts for learning—A model for cultivating multimodal literacy. *Designs for Learning, 8*(1), 25–36. https://doi.org/10.16993/dfl.72

Danielsson, K., & Selander, S. (2021). *Multimodal texts in disciplinary education*. Springer. ISBN: 978-3-030-63958-7

Dolo, G., Haglund, J., & Schönborn, K. (2018). Thermal cameras as a semiotic resource for inquiry in a south african township school context. *Designs for Learning, 10*(1), 123–134. https://doi.org/10.16993/dfl.96

Driver, R., Squires, A., Rushworth, P., & Wood-Robinson, V. (2014). *Making sense of secondary science*. https://doi.org/10.4324/9781315747415

Erickson, G., & Tiberghien, A. (1985). Heat and temperature. In R. Driver, E. Guesne & A. Tiberghien (Eds.), *Children's idea in science* (pp. 52-83). Open University Press.

Gilbert, J. K., & Watts, D. M. (1983). Concepts, Misconceptions and Alternative Conceptions: Changing Perspectives in Science Education. *Studies in Science Education*, *10*(1), 61–98. https://doi.org/10.1080/03057268308559905

Harrison, A., Grayson, D., & Treagust, D. (1999). Investigating a grade 11 students evolving conceptions of heat and temperature. *Journal of Research in Science Teaching, 36*(1), 55-87. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199901)36:1<55::AID-TEA5>3.0.CO;2-P

Hewitt, P. (2018). *Οι έννοιες της Φυσικής.* Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

Jewitt, C., Bezemer, J., & O'Halloran, K. L. (2016). *Introducing multimodality*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781003513698

Καρανίκας, Ι. (1996). *Μελέτη των προβλημάτων της Διδασκαλίας των θερμικών Φαινομένων, Πρόταση για Εποικοδομητική Προσέγγιση στη διδασκαλία και στη Μάθηση των θερμικών Φαινομένων στους 4ετείς φοιτητές του ΠΤΔΕ*. [Διδακτορική Διατριβή]. Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών. Ανακτήθηκε από: https://www.didaktorika.gr/eadd/handle/10442/10864

Καριώτογλου, Π. (2006). *Παιδαγωγική γνώση περιεχομένου φυσικών επιστημών.* Εκδόσεις Γράφημα.

Kesidou, S., & Duit, R. (1993). Students' conceptions of the second law of thermodynamics: An interpretive study. *Journal of Research in Science Teaching*, *30*(1), 86-106. https://doi.org/10.1002/tea.3660300107

Kress, G. R. (2010). *Multimodality: A social semiotic approach to contemporary communication*. Routledge.

Kress, G., Jewitt, C., Ogborn, J., & Tsatsarelis, C. (2001). *Multimodal teaching and learning: The rhetorics of the science classroom*. Continuum.

Lemke, J. L. (1998). Multiplying meaning: Visual and verbal semiotics in scientific text. In J. Martin & R. Veel (Eds.), *Reading science* (pp. 87–113). Routledge.

Lewis, E. L., & Linn, M. C. (1994). Heat energy and temperature concepts of adolescents, adults, and experts: Implications for curricular improvement. *Journal of Research in Science Teaching, 31*(6), 657-677 https://doi.org/10.1002/tea.3660310607

Martinec, R., & Salway, A. (2005). A system for image-text relations in new (and old) media. *Visual Communication, 4*(3), 337–371. https://doi.org/10.1177/1470357205055928

Mathayas, N., Brown, D. E., & Lindgren, R. (2021). “I got to see, and I got to be a part of it”: How cued gesturing facilitates middle-school students' explanatory modeling of thermal conduction. *Journal of Research in Science Teaching*, *58*(10), 1557–1589. https://doi.org/10.1002/tea.21718

Nakhleh, M. B., & Samarapungavan, A. (1999). Elementary school children’s beliefs about matter. *Journal of Research in Science Teaching, 36*(7), 777–805. https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2736(199909)36:7<777::AID-TEA4>3.0.CO;2-Z

Nakhleh, M. B., Samarapungavan, A., & Sağlam, Y. (2005). Middle school students’ beliefs about matter. *Journal of Research in Science Teaching, 42*(5), 581–612. https://doi.org/10.1002/tea.20065

Paik, S., Cho, B., & Go, Y. (2007). Korean 4- to 11-Year-Old Student Conceptions of Heat and Temperature. *Journal of Research in Science Teaching, 44*(2), 284-302. https://doi.org/10.1002/tea.20174

Papageorgiou, G., Johnson, P., & Fotiades, F. (2008). Explaining melting and evaporation below boiling point: Can software help with particle ideas? *Research in Science & Technological Education, 26*(2), 165–183. https://doi.org/10.1080/02635140802037336

Park, J., Chang, J., & Tang, K. (2021). Plan-draw-evaluate (PDE) pattern in students’ collaborative drawing: Interaction between visual and verbal modes of representation. *Science Education*, *105*(5), 1013–1045. https://doi.org/10.1002/sce.21668

Park, J., Chang, J., Tang, K., Treagust, D. F., & Won, M. (2020). Sequential patterns of students’ drawing in constructing scientific explanations: Focusing on the interplay among three levels of pictorial representation. *International Journal of Science Education*, *42*(5), 677–702. https://doi.org/10.1080/09500693.2020.1724351

Romer, R. H. (2001). Heat is not a noun. *American Journal of Physics*, *69*(2), 107-109. https://doi.org/10.1119/1.1341254

Samarapungavan, A., Bryan, L. A., & Wills, J. (2017). Second graders’ emerging particle models of matter in the context of learning through model-based inquiry. *Journal of Research in Science Teaching, 54*(8), 988–1023. https://doi.org/10.1002/tea.21394

Tang, K. (2013). Instantiation of multimodal semiotic systems in science classroom discourse. *Language Sciences*, *37*, 22–35. https://doi.org/10.1016/j.langsci.2012.08.003

Tang, K., Delgatdo, C., & Moje, E. B. (2014). An integrative framework for the analysis of multiple and multimodal representations for meaning-making in science education. *Science Education*, *98*(2), 305–326. https://doi.org/10.1002/sce.21099

Tang, K., Won, M., & Treagust, D. (2019). Analytical framework for student-generated drawings. *International Journal of Science Education*, *41*(16), 2296–2322. https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1672906

Tiberghien, A. (1980). Modes and conditions of learning. An example: The learning of some aspects of the concepts of heat. In W. F. Archenhold, R. Driver, A. Orton & C. Wood-Robinson (Eds.), *Cognitive development research in science and mathematics* (pp. 289-309). University of Leeds Printing Service.

Τσελφές, Β. (1994). Αλλαγή και επιστημονικές έννοιες: ιστορική προσέγγιση. Στο Β. Κουλαϊδής (Επιμ.) *Αναπαραστάσεις του φυσικού κόσμου*, σελ. 156-169. Gutenberg.

Tytler, R., Prain, V., Aranda, G., Ferguson, J., & Gorur, R. (2019). Drawing to reason and learn in science. *Journal of Research in Science Teaching*, *57*(2), 209–231. https://doi.org/10.1002/tea.21590

Unsworth, L. (2007). Image/text relations and intersemiosis: Towards multimodal text description for multiliteracies education. *Proceedings of the 33rd international systemic functional congress*, 1165–1205.

Βαλκάνου, Ε.-Μ. (2023). *Σχεδιασμός, ανάπτυξη, εφαρμογή και αξιολόγηση διδακτικής μαθησιακής ακολουθίας στη Φυσική του Δημοτικού Σχολείου με στόχο τη διερεύνηση των μαθησιακών μονοπατιών των μαθητών* [Διπλωματική εργασία]. Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας. Ανακτήθηκε από: https://dspace.uowm.gr/xmlui/handle/123456789/3407

Valkanou, E., Starakis, I., & Zoupidis, A. (2024). Design, Development, Implementation, and Evaluation of a Teaching–Learning Sequence on Heat Conduction. *Education Sciences, 14*(11), 1149. https://doi.org/10.3390/educsci14111149

Valkanou, E.-M. & Zoupidis, A. (2026). A Teaching-Learning Sequence for Heat Transfer and Nature of Scientific Inquiry at Primary Education. In J. Bruun & M. Kersting (Eds.), *Transitions in science education: Sustainability and digital advances* (Proceedings of ESERA 2025), Part 3 (co-ed. Italo Testa & Hanne Stammes), (pp. 160-169). Copenhagen: Københavns Universitet, Institut for Naturfagenes Didaktik. ISBN 978-87-992541-2-5.

Βαλκάνου, Ε.-Μ., Ζουπίδης, Α. (2026). Βελτιωτικές Αλλαγές Πειραματικών Δραστηριοτήτων για τη Διάδοση της Θερμότητας με Αγωγή: Εισαγωγή Πτυχών της Φύσης της Επιστημονικής Διερεύνησης. Στο Α. Μολοχίδης, Ε. Χατζηκρανιώτης, Ε. Πετρίδου, Ι. Λεύκος, Ά. Κουμαρά, Σ. Κουκιόγλου, Β. Γκάγκας, Ε. Κουσλόγλου (Επιμ.) *Πρακτικά 14ου Πανελληνίου Συνεδρίου Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών και Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση*, ΑΠΘ, ΕΚΤ. https://doi.org/10.12681/codiste.9814

Vidak, A., Odžak, S., & Mešić, V. (2018). Teaching about thermal expansion: investigating the effectiveness of a cognitive bridging approach. *Research in Science & Technological Education, 37*(3), 324–345. https://doi.org/10.1080/02635143.2018.1551200

Wanselin, H., Danielsson, K., & Wikman, S. (2022). Analysing multimodal texts in science—a social semiotic perspective. *Research in Science Education, 52*(3), 891–907. https://doi.org/10.1007/s11165-021-10027-5

Wilson, R. E., & Bradbury, L. U. (2016). The pedagogical potential of drawing and writing in a primary science multimodal unit. *International Journal of Science Education*, *38*(17), 2621–2641. https://doi.org/10.1080/09500693.2016.1255369

Wong, C. L., Chu, H., & Yap, K. C. (2014). Are alternative conceptions dependent on researchers' methodology and definition? *International Journal of Science and Mathematics Education, 14*(3), 499–526. https://doi.org/10.1007/s10763-014-9577-2

Xu, L., Ferguson, J., & Tytler, R. (2020). Student reasoning about the lever principle through multimodal representations: A socio-semiotic approach. *International Journal of Science and Mathematics Education, 19*, 145–165. https://doi.org/10.1007/s10763-020-10102-9

Xu, L., van Driel, J., & Healy, R. (2021). A multi-layered framework for analyzing primary students' multimodal reasoning in science. *Education Sciences*, *11*(12), 758. https://doi.org/10.3390/educsci11120758

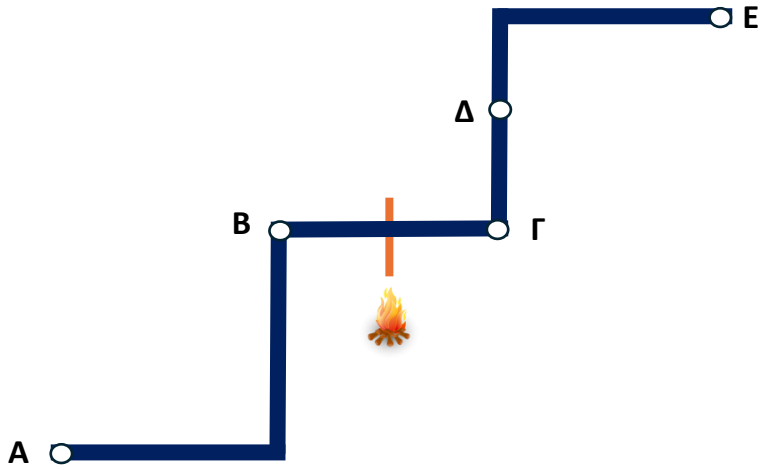
Ζουπίδης, Α. (2012). *Διδασκαλία και μάθηση με τη χρήση μοντέλων Φυσικών Επιστημών και Τεχνολογίας: Εφαρμογή στα φαινόμενα της πλεύσης και της βύθισης*. [Διδακτορική Διατριβή]. Πανεπιστήμιο Δυτικής Μακεδονίας. Ανακτήθηκε από: https://thesis.ekt.gr/thesisBookReader

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α

Έργα του γραπτού ερωτηματολογίου

Έργο ΑΓ3

Ένας τεχνίτης έφτιαξε την παρακάτω διάταξη, χρησιμοποιώντας ένα είδος μετάλλου**. Όλα τα τμήματα της διάταξης έχουν το ίδιο μήκος.** Αναρωτήθηκε τι θα συμβεί, **εάν θερμάνει τη διάταξη ακριβώς στο κέντρο της** και αν τα σημεία Α, Β, Γ, Δ και Ε θα είναι το ίδιο ζεστά μετά από πολλή ώρα.



Α. Κύκλωσε παρακάτω ποια σημεία πιστεύεις ότι θα είναι ζεστά μετά από πολλή ώρα;
(μπορείς να κυκλώσεις μόνο ένα ή και περισσότερα, όσα θες)

Α Β Γ Δ Ε

Β. Εξήγησε την επιλογή σου ή τις επιλογές σου.

……
……
……
……
……
……
……
……

Γ. Θα ζεσταθούν κάποια σημεία πιο γρήγορα από τα άλλα; Αν ναι ποια και με ποια σειρά;

……
……
……
……
……
……
……
……
……

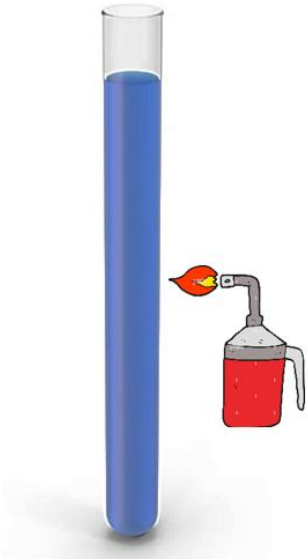
Δ. Σχεδίασε στο παρακάτω πλαίσιο **πώς νομίζεις ότι θα διαδοθεί η θερμότητα στα διάφορα σημεία της διάταξης.**

Ε. Περίγραψε το σχέδιο που έφτιαξες παραπάνω.

……
……
……
……
……
……
……
……

Έργο P2

Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται ένας **γυάλινος δοκιμαστικός σωλήνας**, ο οποίος περιέχει **νερό. Θερμαίνουμε** τον σωλήνα με ένα φλόγιστρο **ακριβώς στη μέση του,** όπως φαίνεται στην εικόνα.



Α. Αν μετά από λίγη ώρα ακουμπήσουμε τον σωλήνα στο πάνω και στο κάτω μέρος του, θα είναι το ίδιο ζεστά αυτά τα δύο σημεία; Ναι ή όχι και γιατί;

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

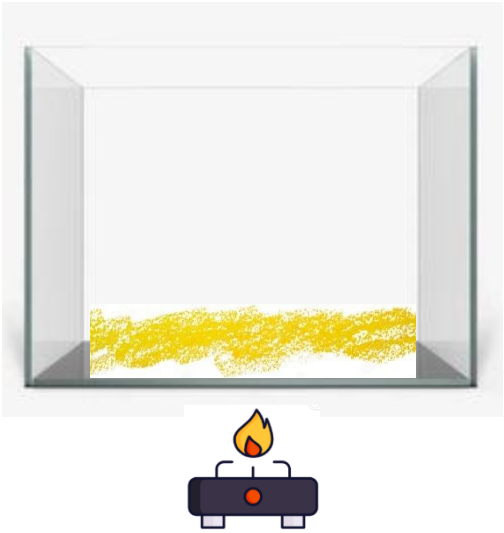
Β. Σχεδίασε στο παρακάτω πλαίσιο πώς νομίζεις ότι θα διαδοθεί η θερμότητα στο νερό.

Γ. Περίγραψε το σχέδιο που έφτιαξες στο παραπάνω πλαίσιο.

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

Έργο Ρ3

Η Φωτεινή **θέλει να παρατηρήσει πώς κινείται το νερό, όταν θερμαίνεται**. Για αυτό τον λόγο σκέφτηκε να κάνει το εξής πείραμα: πήρε ένα διάφανο δοχείο, στο κάτω μέρος του άπλωσε τριμμένο ξύλο και έπειτα το γέμισε με νερό. Έπειτα, ξεκίνησε να ζεσταίνει το κάτω μέρος του δοχείου με μία πηγή θερμότητας, όπως φαίνεται στην εικόνα.



Α. Τι από τα παρακάτω νομίζεις ότι θα συμβεί στο πείραμα της Φωτεινής;
(κύκλωσε μόνο μία επιλογή)

1) Το νερό που είναι πιο κοντά στη φωτιά θα ανέβει προς τα πάνω και θα σπρώχνει προς τα επάνω το νερό που ήταν από πάνω του
2) Το νερό που είναι πιο κοντά στη φωτιά θα ανέβει προς τα πάνω και το υπόλοιπο νερό θα πάει στη θέση του και θα συνεχίζουν να ανταλλάζουν θέσεις δημιουργώντας έναν κύκλο
3) Το νερό, είτε είναι κοντά είτε μακριά από τη φωτιά, δεν θα κινηθεί καθόλου
4) Έχω μια άλλη απάντηση

Αν επέλεξες το 4, γράψε αναλυτικά την απάντησή σου παρακάτω.

……
……
……
……
……
……
……
……
……

Β. Γιατί μπορεί να συμβαίνει αυτό που επέλεξες παραπάνω σε αυτό στο πείραμα;
(κύκλωσε μόνο μία επιλογή)

1) Τα μόρια είναι το ίδιο κοντά το ένα με το άλλο και στο ψυχρό και στο θερμό νερό και για αυτό δεν υπάρχουν αλλαγές στις θέσεις των ψυχρών και των θερμών τμημάτων νερού

2) Τα μόρια του θερμού νερού είναι κοντά το ένα στο άλλο, άρα γίνεται βαρύτερο από το πιο ψυχρό. Για αυτό τον λόγο το θερμό νερό μετακινείτε προς τα κάτω και το ψυχρό προς τα επάνω, δημιουργώντας έναν κύκλο

3) Τα μόρια του θερμού νερού είναι πιο μακριά το ένα από το άλλο, άρα γίνεται ελαφρύτερο από το πιο ψυχρό. Για αυτό τον λόγο το ζεστό νερό μετακινείται προς τα επάνω και το ψυχρό προς τα κάτω, δημιουργώντας έναν κύκλο

4) Έχω μία άλλη απάντηση

Αν επέλεξες το 4, γράψε αναλυτικά την απάντησή σου παρακάτω.

……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

Γ. Πώς θα ζωγράφιζες αυτό που συμβαίνει στο πείραμα που πραγματοποιεί η Φωτεινή; Χρησιμοποίησε τον παρακάτω χώρο, για να δείξεις αυτό που θα συμβεί στο πείραμα.

Δ. Περίγραψε το σχέδιο που έφτιαξες στο παραπάνω πλαίσιο.

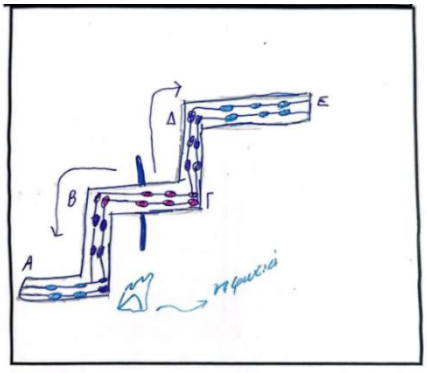
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……
……

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β

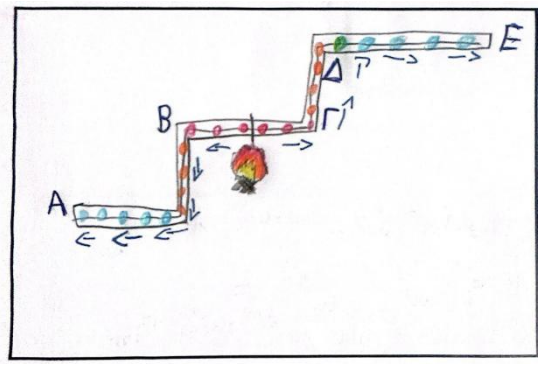
Αναλυτικό σύστημα κατηγοριοποίησης των μαθητικών σχεδίων

Β.1 Έργο ΑΓ3 – Διάδοση της θερμότητας με αγωγή

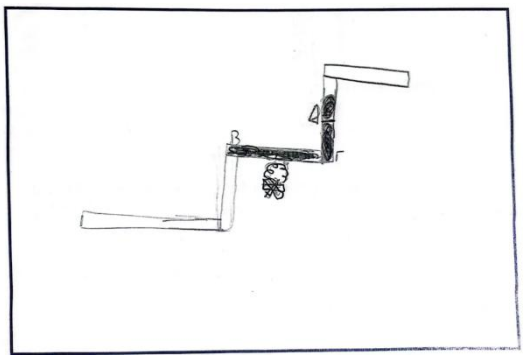
Πίνακας Β.1 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 2α του έργου ΑΓ3

Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Δυναμική απόδοση της διάδοσης σε όλη τη μεταλλική διάταξη χωρίς επιστημονικά αποδεκτό μικροσκοπικό μηχανισμό**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αποδίδει τη διάδοση της θερμότητας ως διαδικασία που πραγματοποιείται σε ολόκληρη τη μεταλλική διάταξη και συνδέεται χωρικά με το μεταλλικό σώμα. Η διαδικασία μπορεί να αναπαρίσταται μακροσκοπικά, μέσω βελών ή γραμμών κατά μήκος της ράβδου, ή σωματιδιακά, μέσω της γενικής κίνησης των μορίων. Δεν αποδίδεται, ωστόσο, με επιστημονικά αποδεκτό τρόπο η μεταφορά ενέργειας μέσω αλληλεπιδράσεων μεταξύ γειτονικών σωματιδίων.
Κριτήρια ένταξης	Η διάδοση εκτείνεται σε ολόκληρη τη μεταλλική διάταξη και αποδίδεται ως εξελισσόμενη διαδικασία. Τα βέλη ή οι γραμμές ακολουθούν με σαφήνεια το εσωτερικό ή τη γεωμετρία του μεταλλικού σώματος. Εναλλακτικά, δηλώνεται ότι τα μόρια κινούνται και ότι μέσω της γενικής αυτής κίνησης θερμαίνεται σταδιακά η διάταξη. Δεν απαιτείται να αποδίδεται αλληλεπίδραση από γειτονικό μόριο σε γειτονικό μόριο.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2β, επειδή αποδίδεται η διαδικασία της διάδοσης και όχι μόνο μια στατική θερμοκρασιακή ή χρονική διαβάθμιση. Διακρίνεται από την 1α, επειδή η διάδοση εκτείνεται σε ολόκληρη τη διάταξη και δεν περιορίζεται σε συγκεκριμένα σημεία ή σε προνομιακή κατεύθυνση. Διακρίνεται από την 1β, επειδή η πορεία της διάδοσης συνδέεται με σαφήνεια με το μεταλλικό σώμα και δεν παρουσιάζεται ως εξωτερική ή χωρικά ανεξάρτητη διαδρομή της θερμότητας.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

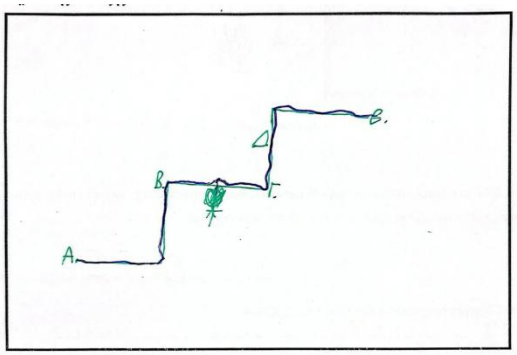
Πίνακας Β.2 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 2β του έργου ΑΓ3

Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Στατική θερμοκρασιακή ή χρονική διαβάθμιση σε όλη τη μεταλλική διάταξη χωρίς απόδοση της διαδικασίας διάδοσης**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αποδίδει διαφορετικό βαθμό ή διαφορετικό χρόνο θέρμανσης κατά μήκος ολόκληρης της μεταλλικής διάταξης. Οι περιοχές που βρίσκονται κοντά στην εστία παρουσιάζονται ως θερμότερες ή ως πρώτες στη σειρά θέρμανσης, ενώ οι περισσότερο απομακρυσμένες ως λιγότερο θερμές ή ως μεταγενέστερες. Δεν αναπαρίσταται, όμως, ο τρόπος με τον οποίο πραγματοποιείται η διάδοση από τη μία περιοχή στην άλλη.
Κριτήρια ένταξης	Αποδίδεται θερμοκρασιακή ή χρονική διαφοροποίηση σε όλο το μήκος της διάταξης. Η διαφοροποίηση οργανώνεται με βάση την απόσταση από την εστία: τα κοντινότερα σημεία είναι θερμότερα ή θερμαίνονται νωρίτερα και τα πιο απομακρυσμένα είναι λιγότερο θερμά ή θερμαίνονται αργότερα. Η αναπαράσταση μπορεί να είναι μακροσκοπική, με χρώματα, αριθμούς ή λεκτική σειρά, ή σωματιδιακή, με μόρια διαφορετικού χρώματος ή βαθμού θέρμανσης. Δεν αποδίδεται κίνηση, πορεία ή διαδικασία διάδοσης.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2α, επειδή παρουσιάζει το θερμοκρασιακό ή χρονικό αποτέλεσμα και όχι τη διαδικασία διάδοσης. Διακρίνεται από την 1α, επειδή η διαβάθμιση αφορά σε ολόκληρη τη μεταλλική διάταξη και δεν αποκλείονται συγκεκριμένα σημεία ή κατευθύνσεις. Διακρίνεται από την 1β, επειδή δεν αναπαρίσταται κάποια χωρικά ασαφής ή εξωτερική πορεία της θερμότητας· απουσιάζει συνολικά η απόδοση της πορείας.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

Πίνακας Β.3 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 1α του έργου ΑΓ3

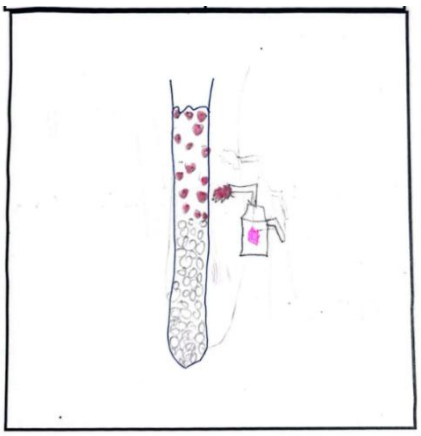
Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Περιορισμένη ή κατευθυντικά επιλεκτική διάδοση της θερμότητας**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αποδίδει ότι η θερμότητα διαδίδεται μόνο σε συγκεκριμένο τμήμα της μεταλλικής διάταξης ή κατά προτίμηση προς ορισμένη κατεύθυνση, κυρίως προς τα επάνω. Επομένως, η διάδοση δεν πραγματοποιείται σε ολόκληρη τη διάταξη με βάση την απόσταση των σημείων από την εστία.
Κριτήρια ένταξης	Η θέρμανση περιορίζεται κοντά στην εστία ή σε ορισμένα μόνο σημεία της διάταξης. Ένα ή περισσότερα απομακρυσμένα σημεία ή άκρα δε θερμαίνονται. Εναλλακτικά, θεωρείται ότι η θερμότητα διαδίδεται ευκολότερα, γρηγορότερα ή αποκλειστικά προς τα επάνω ή προς άλλη συγκεκριμένη κατεύθυνση. Η αναπαράσταση μπορεί να είναι μακροσκοπική ή σωματιδιακή.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τις 2α και 2β, επειδή η διάδοση ή η θερμοκρασιακή διαβάθμιση δεν καλύπτει ολόκληρη τη μεταλλική διάταξη. Διακρίνεται από την 1β, επειδή το κύριο χαρακτηριστικό της είναι ο χωρικός περιορισμός ή η προνομιακή κατεύθυνση και όχι η ασαφής διαδρομή της θερμότητας προς όλα τα σημεία. Η παρουσία μορίων δεν αλλάζει την υποκατηγορία, όταν η συνολική ιδέα παραμένει ότι η θερμότητα διαδίδεται μόνο σε ορισμένες περιοχές ή κυρίως προς τα επάνω.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

Πίνακας Β.4 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 1β του έργου ΑΓ3

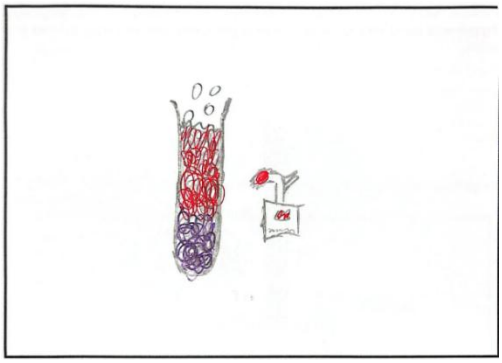
Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Διάδοση σε όλη τη μεταλλική διάταξη μέσω χωρικά ασαφούς ή εξωτερικής διαδρομής**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αποδίδει ότι η θερμότητα φτάνει σε όλα ή σχεδόν σε όλα τα σημεία της διάταξης, χωρίς όμως να καθίσταται σαφές ότι η διάδοση πραγματοποιείται μέσα στο μεταλλικό σώμα. Η θερμότητα φαίνεται να αντιμετωπίζεται ως κάτι που μετακινείται στον χώρο και ακολουθεί μια διαδρομή μεταξύ των σημείων ή γύρω από τη διάταξη.
Κριτήρια ένταξης	Η θερμότητα παρουσιάζεται να «πηγαίνει», να «περνά» ή να ακολουθεί βέλη και γραμμές προς όλα τα σημεία. Η διαδρομή μπορεί να βρίσκεται έξω ή περιμετρικά της ράβδου, να συνδέει τα σημεία χωρίς σαφή σχέση με το εσωτερικό του μετάλλου ή να μην επιτρέπει να προσδιοριστεί αν η διάδοση πραγματοποιείται μέσα στη ράβδο. Στην ίδια υποκατηγορία μπορούν να εντάσσονται απαντήσεις στις οποίες δηλώνεται ότι η θερμότητα πηγαίνει παντού, εξίσου ή προς δύο κατευθύνσεις, όταν ο δρόμος της διάδοσης παραμένει χωρικά ασαφής.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2α, επειδή η πορεία δε συνδέεται με σαφήνεια με το εσωτερικό ή το υλικό της μεταλλικής ράβδου. Διακρίνεται από τη 2β, επειδή αποδίδεται κάποια πορεία ή μετακίνηση της θερμότητας και όχι μόνο στατική θερμοκρασιακή ή χρονική διαβάθμιση. Διακρίνεται από την 1α, επειδή η θερμότητα εμφανίζεται να φτάνει σε όλα ή σχεδόν όλα τα σημεία και δεν περιορίζεται μόνο σε συγκεκριμένο τμήμα ή σε μία κατεύθυνση.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

Β.2 Έργο P2 – Ρεύματα μεταφοράς

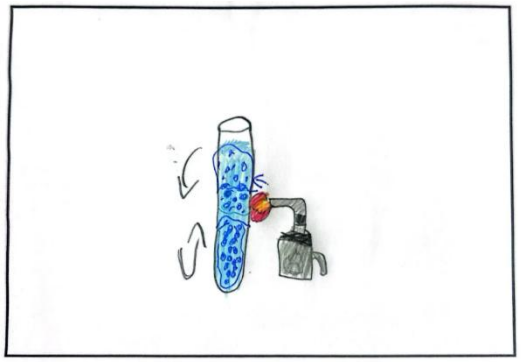
Πίνακας Β.5 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 2α του έργου P2

Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Ορθή θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση χωρίς απόδοση της κίνησης του νερού**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αποδίδει ορθά ότι το επάνω μέρος του νερού θερμαίνεται περισσότερο από το κάτω ή παρουσιάζει αντίστοιχη ορθή σωματιδιακή διαφοροποίηση, χωρίς όμως να αναπαριστά ή να περιγράφει τη μακροσκοπική κίνηση της μάζας του νερού.
Κριτήρια ένταξης	Αποδίδεται θερμότερο νερό επάνω και ψυχρότερο κάτω. Εναλλακτικά ή παράλληλα, τα θερμά μόρια παρουσιάζονται αραιότερα και τα ψυχρά πυκνότερα. Δε δηλώνεται ότι το θερμό νερό ανεβαίνει ή ότι το ψυχρότερο νερό κατεβαίνει.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2β, επειδή δεν αποδίδεται κίνηση της μάζας του νερού. Διακρίνεται από τη 2γ επειδή δεν συνδέονται η θέρμανση και η διαφορετική πυκνότητα με την κίνηση του νερού. Η παρουσία μορίων ή η αναφορά στην αραίωση δεν επαρκεί για ένταξη στη 2γ, εφόσον δεν αποδίδεται κίνηση.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

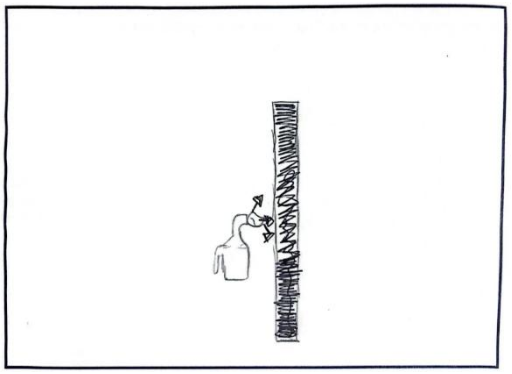
Πίνακας Β.6 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 2β του έργου P2

Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Απόδοση της κίνησης του θερμού και ενδεχομένως του ψυχρότερου νερού, χωρίς αιτιολόγηση μέσω διαφορετικής πυκνότητας**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αναπαριστά ή περιγράφει ότι το θερμό νερό ανεβαίνει και, ενδεχομένως, ότι το ψυχρότερο νερό κατεβαίνει, χωρίς να εξηγεί την κίνηση μέσω της αραίωσης, της διαφορετικής πυκνότητας ή της σχετικής «ελαφρότητας» και «βαρύτητας» των μαζών νερού.
Κριτήρια ένταξης	Δηλώνεται ρητά ότι το ζεστό νερό ανεβαίνει. Μπορεί επίσης να δηλώνεται ότι το ψυχρότερο νερό κατεβαίνει ή να αποδίδεται κυκλική κίνηση. Η κίνηση αφορά στο νερό ή τις θερμές και ψυχρές μάζες νερού και όχι τη θερμότητα ως αυτοτελή οντότητα.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2α επειδή περιλαμβάνει μακροσκοπική κίνηση του νερού. Διακρίνεται από τη 2γ επειδή η κίνηση δεν αιτιολογείται μέσω διαφορετικής πυκνότητας ή σωματιδιακής διάταξης. Διακρίνεται από την 1α επειδή δεν κινείται η «θερμότητα», αλλά το ίδιο το νερό.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

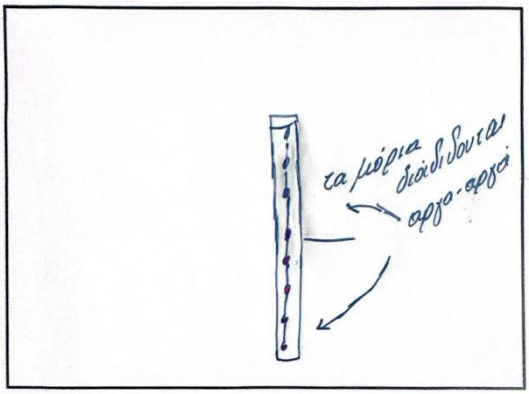
Πίνακας Β.7 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 2γ του έργου Ρ2

Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Μερική αιτιακή απόδοση του μηχανισμού των ρευμάτων μεταφοράς**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση συνδέει τη θέρμανση με τη μεταβολή της σωματιδιακής διάταξης ή της πυκνότητας και, στη συνέχεια, με την ανοδική κίνηση του θερμού νερού. Μπορεί επιπλέον να αποδίδεται η καθοδική κίνηση του ψυχρότερου νερού ή μέρος της κυκλικής κίνησης.
Κριτήρια ένταξης	Υπάρχει σύνδεση ανάμεσα σε τουλάχιστον τρία στοιχεία: θέρμανση, αραίωση ή μικρότερη πυκνότητα και ανοδική κίνηση του θερμού νερού. Εναλλακτικά, μπορεί να χρησιμοποιούνται εκφράσεις όπως «το ζεστό γίνεται ελαφρύτερο και ανεβαίνει» ή «τα θερμά μόρια αραιώνουν και πηγαίνουν προς τα πάνω».
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2α επειδή δεν αποδίδει μόνο μια στατική διαφοροποίηση αλλά και την κίνηση που προκύπτει. Διακρίνεται από τη 2β επειδή η κίνηση αιτιολογείται μέσω της πυκνότητας, της αραίωσης ή της σχετικής ελαφρότητας. Δεν απαιτείται να αποδοθεί πλήρως και με επιστημονική ακρίβεια ολόκληρη η κυκλική κίνηση.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

Πίνακας Β.8 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 1α του έργου P2

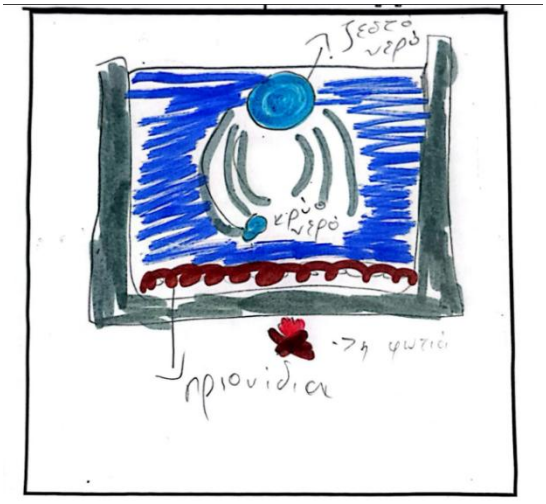
Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Διάδοση ή κατανομή της θερμότητας χωρίς κίνηση του νερού**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση φαίνεται να αντιμετωπίζει τη θερμότητα ως κάτι που μετακινείται, διαδίδεται ή κατανέμεται μέσα στο νερό, χωρίς να αποδίδεται μετακίνηση των μαζών του νερού.
Κριτήρια ένταξης	Η θερμότητα παρουσιάζεται να διαδίδεται προς τα πάνω, προς τα κάτω, προς δύο κατευθύνσεις ή σε ολόκληρο τον σωλήνα. Μπορεί να αποδίδεται ίση ή συμμετρική κατανομή, στατική θερμοκρασιακή διαβάθμιση με βάση την απόσταση από την πηγή ή διαδοχική μετάβαση της θέρμανσης από το γυαλί στο νερό. Στην ίδια υποκατηγορία μπορούν να ενταχθούν σαφείς εναλλακτικές απαντήσεις σύμφωνα με τις οποίες η θέρμανση παρεμποδίζεται.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2β και τη 2γ, επειδή δε μετακινείται το νερό αλλά η ίδια η θερμότητα. Διακρίνεται από την 1β, επειδή δεν αποδίδεται ρητά διάδοση της θέρμανσης από μόριο σε μόριο. Η ίση κατανομή πάνω και κάτω εντάσσεται στην 1α όταν δεν συνοδεύεται από σωματιδιακό μηχανισμό αγωγής.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

Πίνακας Β.9 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 1β του έργου Ρ2

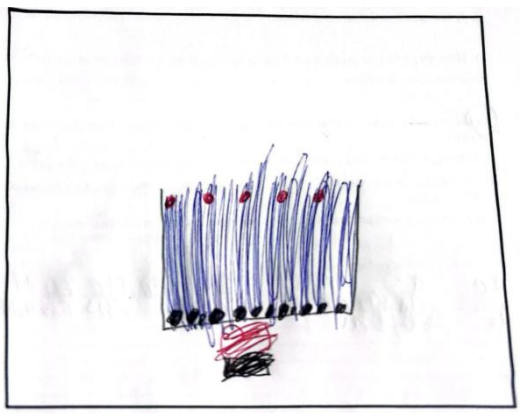
Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Εφαρμογή του σωματιδιακού μοντέλου της αγωγής στο νερό**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση ερμηνεύει τη θέρμανση του νερού με τον μηχανισμό της αγωγής, θεωρώντας ότι η θερμότητα διαδίδεται μέσω της κίνησης των μορίων.
Κριτήρια ένταξης	Παρουσιάζεται ή περιγράφεται αλληλεπίδραση μορίων. Τα μόρια μπορεί να εμφανίζονται σαν αλυσίδα.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από την 1α, επειδή περιλαμβάνει συγκεκριμένο σωματιδιακό μηχανισμό διάδοσης από μόριο σε μόριο. Η απλή αναφορά ότι πρώτα θερμαίνεται το γυαλί και μετά το νερό, ότι το γυαλί είναι κακός αγωγός ή ότι η θερμότητα διαδίδεται παντού δεν επαρκεί για ένταξη στην 1β.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

Β.3 Έργο Ρ3 – Ρεύματα μεταφοράς

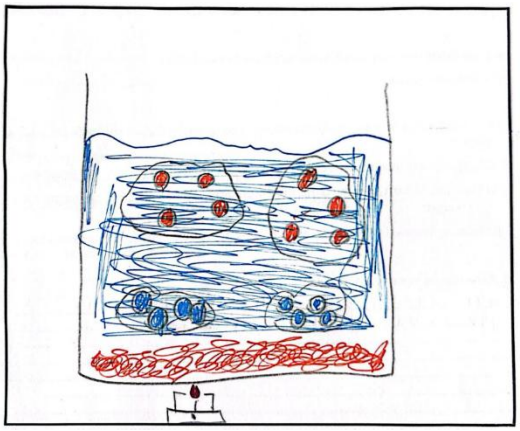
Πίνακας Β.10 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 2α του έργου Ρ3

Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Κυκλική κίνηση του νερού χωρίς αιτιολόγηση του μηχανισμού**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αναπαριστά ή περιγράφει την κυκλική κίνηση του νερού κατά τη θέρμανσή του. Αποδίδεται ότι το θερμό νερό ανεβαίνει και το ψυχρότερο κατεβαίνει ή, γενικότερα, ότι ποσότητες νερού κινούνται προς τα επάνω και προς τα κάτω σχηματίζοντας κύκλο. Δεν εξηγείται, ωστόσο, η κίνηση μέσω της μεταβολής της πυκνότητας, της σωματιδιακής διάταξης των μαζών νερού.
Κριτήρια ένταξης	Αποδίδεται σαφής και ολοκληρωμένη κυκλική κίνηση του νερού. Μπορεί να δηλώνεται ότι το θερμό νερό ανεβαίνει και το ψυχρότερο κατεβαίνει, ότι το νερό κινείται συνεχώς προς τα επάνω και προς τα κάτω ή ότι θερμές και ψυχρές ποσότητες νερού αλλάζουν θέσεις. Η κίνηση μπορεί να αποδίδεται λεκτικά, με βέλη ή με κυκλικές και σπειροειδείς τροχιές. Η παρουσία μορίων ή άλλων σωματιδιακών στοιχείων δεν επαρκεί για ένταξη στη 2γ, όταν αυτά δεν αξιοποιούνται για την αιτιολόγηση της κίνησης.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2β, επειδή αποδίδεται δυναμική κυκλοφορία και όχι μόνο στατική διαφοροποίηση θερμού και ψυχρού νερού. Διακρίνεται από τη 2γ, επειδή δε συνδέεται η κίνηση με τη διαφορετική πυκνότητα, την αραίωση ή άλλη προσπάθεια αιτιολόγησης του μηχανισμού. Διακρίνεται από την 1β, επειδή αποδίδεται ολοκληρωμένη και επιστημονικά συμβατή κυκλική κίνηση του ίδιου του νερού.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

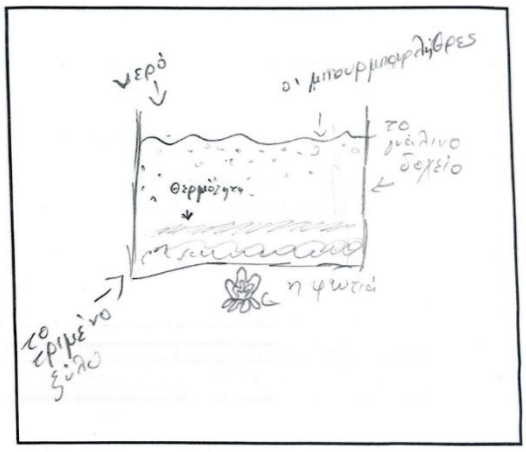
Πίνακας Β.11 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 2β του έργου Ρ3

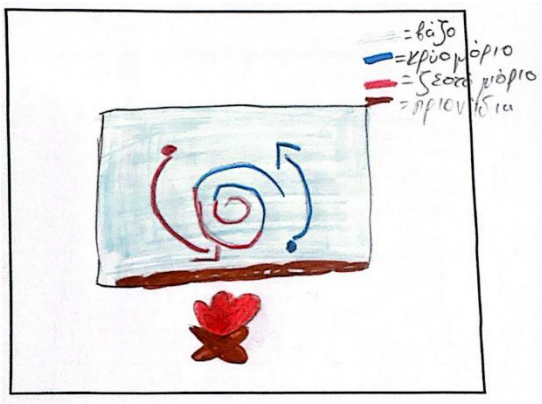
Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Ορθή στατική θερμική ή/και σωματιδιακή διαφοροποίηση χωρίς απόδοση της κυκλοφορίας του νερού**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αποδίδει ορθά τη θερμική ή/και τη σωματιδιακή διαφοροποίηση του νερού μετά τη θέρμανσή του, χωρίς όμως να αναπαριστά ή να περιγράφει την κυκλική κίνηση των μαζών του νερού. Το θερμότερο νερό τοποθετείται στο επάνω μέρος και το ψυχρότερο στο κάτω, ενώ μπορεί επιπλέον τα θερμότερα μόρια να παρουσιάζονται αραιότερα και τα ψυχρότερα πυκνότερα.
Κριτήρια ένταξης	Αποδίδεται θερμότερο νερό επάνω και ψυχρότερο νερό κάτω. Εναλλακτικά ή παράλληλα, τα θερμά μόρια εμφανίζονται περισσότερο απομακρυσμένα ή αραιά και τα ψυχρά περισσότερο συγκεντρωμένα ή πυκνά. Δεν αποδίδονται βέλη, τροχιές, ανταλλαγή θέσεων ή άλλη σαφής κυκλική κίνηση του νερού.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2α, επειδή αποδίδεται μόνο το αποτέλεσμα της κυκλοφορίας και όχι η ίδια η κίνηση. Διακρίνεται από τη 2γ, επειδή η θερμική ή σωματιδιακή διαφοροποίηση δε συνδέεται αιτιακά με την άνοδο του θερμού και την κάθοδο του ψυχρότερου νερού. Διακρίνεται από την 1α, επειδή η στατική χωρική οργάνωση είναι επιστημονικά συμβατή: το θερμότερο νερό βρίσκεται επάνω και το ψυχρότερο κάτω. Η απλή παρουσία μορίων ή αναφορά στην αραίωση δεν επαρκεί για ένταξη στη 2γ, εφόσον δεν αποδίδεται κίνηση.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

Πίνακας Β.12 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 2γ του έργου Ρ3

Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Κυκλική κίνηση του νερού με μερική αιτιακή απόδοση του μηχανισμού**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αποδίδει ή επιχειρεί να αποδώσει την κυκλική κίνηση του νερού και παράλληλα τη συνδέει με τη θέρμανση, τη μεταβολή της σωματιδιακής διάταξης ή της πυκνότητας και την ανοδική κίνηση του θερμού νερού. Μπορεί επίσης να αποδίδεται η κάθοδος του ψυχρότερου νερού ή η ανταλλαγή θέσεων θερμών και ψυχρών ποσοτήτων. Η αιτιολόγηση παραμένει μερική και όχι επιστημονικά πλήρης.
Κριτήρια ένταξης	Αποδίδεται κυκλική κίνηση ή σαφής προσπάθεια συγκρότησης του κύκλου και παράλληλα γίνεται τουλάχιστον μερική σύνδεση ανάμεσα στη θέρμανση, στην αραίωση ή στη μικρότερη πυκνότητα και στην ανοδική κίνηση του θερμού νερού. Μπορούν να χρησιμοποιούνται εκφράσεις όπως «το ζεστό γίνεται πιο ελαφρύ και ανεβαίνει», «τα θερμά μόρια αραιώνουν και πηγαίνουν προς τα πάνω» ή «το θερμό και το ψυχρό νερό αλλάζουν θέσεις και δημιουργείται κύκλος». Δεν απαιτείται πλήρης και επιστημονικά ακριβής απόδοση ολόκληρης της αιτιακής αλυσίδας.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2α, επειδή η κυκλική κίνηση δε δηλώνεται μόνο περιγραφικά, αλλά συνοδεύεται από προσπάθεια αιτιολόγησης μέσω της πυκνότητας, της αραίωσης ή της σχετικής «ελαφρότητας». Διακρίνεται από τη 2β, επειδή αποδίδεται δυναμική κίνηση και όχι μόνο στατική θερμική ή σωματιδιακή διαφοροποίηση. Διακρίνεται από την 1β, επειδή η κίνηση αφορά θερμές και ψυχρές ποσότητες νερού και προσεγγίζει τον μηχανισμό των ρευμάτων μεταφοράς, ακόμη και όταν αποδίδονται μακροσκοπικές ιδιότητες σε μεμονωμένα μόρια.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

Πίνακας Β.13 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 1α του έργου Ρ3

Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Απουσία κυκλοφορίας ή απόδοση μόνο αποτελέσματος της θέρμανσης**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση δεν αποδίδει κίνηση ή κυκλοφορία του νερού, αλλά εστιάζει αποκλειστικά στη θέρμανση ή σε κάποιο επιμέρους αποτέλεσμα της θέρμανσης. Μπορεί να παρουσιάζεται ότι το νερό απλώς θερμαίνεται, ότι παραμένει ακίνητο, ότι εμφανίζει στατική θερμοκρασιακή διαφοροποίηση με βάση την απόσταση από την πηγή ή ότι βράζει, εξατμίζεται και δημιουργεί φυσαλίδες ή ατμούς.
Κριτήρια ένταξης	Δηλώνεται ότι το νερό θερμαίνεται χωρίς να κινείται ή ότι δε συμβαίνει καμία κίνηση. Μπορεί να αποδίδεται θερμότερο νερό κοντά στην πηγή και ψυχρότερο μακρύτερα από αυτή, χωρίς κυκλοφορία. Εντάσσονται απαντήσεις που εστιάζουν στον βρασμό, στις φυσαλίδες ή στην εξάτμιση, εφόσον αποδίδουν με σαφή και εννοιολογικά ερμηνεύσιμο τρόπο ένα αποτέλεσμα της θέρμανσης. Μπορεί να υπάρχουν μόρια, χρώματα ή άλλα στοιχεία, εφόσον δεν αξιοποιούνται για την απόδοση κίνησης του νερού.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2β, επειδή είτε δεν αποδίδεται επιστημονικά συμβατή στατική διαφοροποίηση είτε η οργάνωση βασίζεται αποκλειστικά στην απόσταση από την πηγή, με θερμότερο νερό κάτω και ψυχρότερο επάνω. Διακρίνεται από τις 2α και 2γ, επειδή απουσιάζει η κυκλική κίνηση. Διακρίνεται από την 1β, επειδή δεν αποδίδεται σαφής επιμέρους, αντίστροφη ή εναλλακτική κίνηση του νερού ή της θερμότητας. Η απάντηση εστιάζει κυρίως στην ακινησία ή στο αποτέλεσμα της θέρμανσης.
Ενδεικτικό παράδειγμα	

Πίνακας Β.14 Αναλυτική περιγραφή της υποκατηγορίας 1β του έργου Ρ3

Στοιχείο	Περιεχόμενο
Ονομασία κατηγορίας	**Μερική ή εναλλακτική απόδοση της κίνησης και της διάδοσης**
Λειτουργικός ορισμός	Η απάντηση αποδίδει κάποια μορφή κίνησης ή διάδοσης, χωρίς όμως να συγκροτεί τον επιστημονικά συμβατό μηχανισμό της κυκλικής κίνησης των μαζών του νερού. Η κίνηση μπορεί να είναι μερική, να έχει αντίστροφη φορά, να αποδίδεται στην ίδια τη θερμότητα ή να αφορά μεμονωμένα μόρια αντί για θερμές και ψυχρές ποσότητες νερού.
Κριτήρια ένταξης	Αποδίδεται μόνο ανοδική ή μόνο καθοδική κίνηση του νερού, χωρίς ολοκλήρωση του κύκλου. Εναλλακτικά, παρουσιάζεται η θερμότητα ως κάτι που ανεβαίνει, διαδίδεται ή ακολουθεί κυκλική τροχιά μέσα στο νερό. Εντάσσονται επίσης απαντήσεις, στις οποίες το θερμό νερό κατεβαίνει και το ψυχρό ανεβαίνει ή η κυκλοφορία ερμηνεύεται ως ανταλλαγή θερμότητας και θέσεων μεταξύ μεμονωμένων μορίων, χωρίς μετακίνηση μαζών νερού.
Κριτήρια διάκρισης	Διακρίνεται από τη 2α, επειδή δεν αποδίδεται ολοκληρωμένη και επιστημονικά συμβατή κυκλική κίνηση του νερού. Διακρίνεται από τη 2γ, επειδή δε συγκροτείται μερικώς αποδεκτή αιτιακή σύνδεση ανάμεσα στη θέρμανση, στη διαφορετική πυκνότητα και στην κυκλοφορία. Διακρίνεται από την 1α, επειδή υπάρχει σαφής απόδοση κάποιας κίνησης ή διάδοσης, έστω και αν αυτή είναι ελλιπής ή εναλλακτική. Η απλή ανοδική κίνηση του νερού εντάσσεται στην 1β, ενώ η απλή θέρμανση χωρίς κίνηση εντάσσεται στην 1α.
Ενδεικτικό παράδειγμα