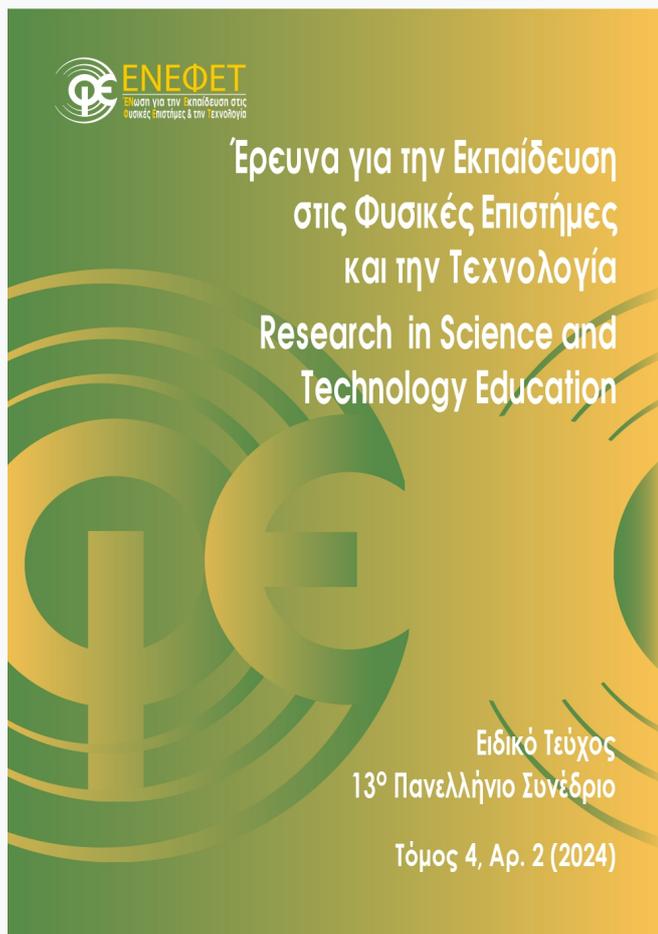


## Έρευνα για την Εκπαίδευση στις Φυσικές Επιστήμες και την Τεχνολογία

Τόμ. 4, Αρ. 2 (2024)

13ο Πανελλήνιο Συνέδριο ΕΝΕΦΕΤ, Ειδικό Τεύχος



Η Ρητή Χρήση του Μοντέλου Toulmin σε ένα Ομαδικό Διαλογικό Περιβάλλον, και οι Επιδράσεις του στην Κατανόηση της Έννοιας Συντονισμού «Δύναμη»: Μια Μελέτη Περίπτωσης

Κώστας Ναούμ, Βασίλης Κόλλιας, Διονύσιος Βαβουγιός

doi: [10.12681/riste.38004](https://doi.org/10.12681/riste.38004)

### Βιβλιογραφική αναφορά:

Ναούμ Κ., Κόλλιας Β., & Βαβουγιός Δ. (2024). Η Ρητή Χρήση του Μοντέλου Toulmin σε ένα Ομαδικό Διαλογικό Περιβάλλον, και οι Επιδράσεις του στην Κατανόηση της Έννοιας Συντονισμού «Δύναμη»: Μια Μελέτη Περίπτωσης. *Έρευνα για την Εκπαίδευση στις Φυσικές Επιστήμες και την Τεχνολογία*, 4(2), 147-177. <https://doi.org/10.12681/riste.38004>

# Η Ρητή Χρήση του μοντέλου Toulmin σε ένα Ομαδικό Διαλογικό Περιβάλλον, και οι Επιδράσεις του στην Κατανόηση της Έννοιας Συντονισμού «Δύναμη»: Μια Μελέτη Περίπτωσης

Κώστας Ναούμ<sup>1</sup>, Βασίλης Κόλλιας<sup>2</sup>, Διονύσιος Βαβουγιός<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Υποψήφιος Διδάκτορας, Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας, Εκπ/κός Β/θμιας Εκπ/σης

<sup>2</sup>Επίκουρος Καθηγητής, Παιδαγωγικό Τμήμα Δημοτικής Εκπαίδευσης, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

<sup>3</sup>Ομότιμος Καθηγητής, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Θεσσαλίας

[knaoum@uth.gr](mailto:knaoum@uth.gr)

## Περίληψη

Σε αυτήν την εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα από την ανάλυση του διαλόγου μιας ομάδας γνωστικά αδύνατων μαθητών/μαθητριών της β' γυμνασίου, σε ένα διαλογικό περιβάλλον επιχειρηματολογίας, στο μάθημα της φυσικής και στο γνωστικό πεδίο «δύναμη και κίνηση». Το μαθησιακό περιβάλλον προκάλούσε τις διαισθητικές ιδέες των μαθητών/μαθητριών, έκανε ρητή χρήση του μοντέλου Toulmin και αξιοποιούσε την χρήση συμπερασματικών κανόνων μονής κατεύθυνσης ως προτεινόμενες εγγυήσεις. Η μικρογενετική ανάλυση του διαλόγου βασίστηκε στις θεωρητικές προσεγγίσεις της Θεωρίας Έννοιας Συντονισμού (Coordination Class Theory). Η ανάλυση έδειξε ότι η ρητή χρήση του μοντέλου Toulmin, οδήγησε στην εκδήλωση ασυμμετρίας μεταξύ διαισθητικών ιδεών και επιστημονικής γνώσης για την δύναμη, που αντιμετωπίστηκε με τον μηχανισμό της Ιδιοανέλιξης κατά Κουαϊν (Quinian Bootstrapping) οδηγώντας σε εννοιολογική εξέλιξη των μαθητών/μαθητριών.

**Λέξεις κλειδιά:** εννοιολογική αλλαγή στην δύναμη, επιχειρηματολογία, ιδιοανέλιξη κατά Κουαϊν, έννοια συντονισμού, μικρογενετική ανάλυση

## Abstract

This paper presents the results of an analysis of a dialogue among a group of 8th-grade students with cognitive difficulties, conducted within a dialogic argumentative environment during a physics lesson, specifically in the subject area of “force and motion”. The learning environment challenged the stu-

dents' intuitive ideas, made explicit use of the Toulmin model, and exploited the use of inference rules as proposed warrants. The microgenetic analysis of the dialogue was based on Coordination Class Theory. The analysis showed that the explicit use of Toulmin model led to the manifestation of incommensurability between intuitive ideas and scientific knowledge of the force, which was addressed by the mechanism of Quinian Bootstrapping and lead to conceptual development of the students.

**Key words:** conceptual change in force, argumentation, Quinian bootstrapping, coordination class, microgenetic analysis

## Εισαγωγή

Σύμφωνα με την τρέχουσα βιβλιογραφία στη διδακτική των ΦΕ η επιχειρηματολογία μπορεί να αποτελέσει ένα σημαντικό μέσο για την βελτίωση της μάθησης στις φυσικές επιστήμες (Asterhan, 2016· Henderson et al., 2018). Ένα σημαντικό μέρος της ερευνητικής προσέγγισης αυτής της βελτίωσης γίνεται μέσω της εξέτασης της «εννοιολογικής αλλαγής» από την πλευρά της εννοιολογικής ιδιοανέλιξης (Carey, 2009), του διαισθητικού συστήματος μηχανισμού (diSessa, 1993) και της Θεωρίας Έννοιας Συντονισμού (diSessa & Sherin, 1998). Στην παρούσα έρευνα ακολουθούμε τους θεωρητικούς που ερμηνεύουν την «εννοιολογική αλλαγή» ως «εννοιολογική εξέλιξη», τονίζοντας ότι η εννοιολογική αλλαγή δεν είναι κάτι που έχει μικρή διάρκεια και συμβαίνει απότομα, αλλά χρειάζεται χρόνο και περνάει μέσα από στάδια, χωρίς να παύουν να αναγνωρίζουν τη δυσκολία του εγχειρήματος (Berland & Russ, 2017).

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η ανάδειξη του τρόπου με τον οποίο η ρητή χρήση του AMT (απλού μοντέλου Toulmin) (Toulmin, 2003), σε ένα ομαδικό διαλογικό περιβάλλον (Ruthven et al., 2011), που προκαλεί τις διαισθητικές ιδέες/αντιλήψεις των μαθητών/μαθητριών (diSessa, 1993· Ioannides & Vosniadou, 2002· Hestenes et al., 1992) ενεργοποιεί τον μηχανισμό της ΙΚ (ιδιοανέλιξης κατά Κουάϊν/Quinian Bootstrapping) (Carey, 2009) και οδηγεί στην εννοιολογική εξέλιξη των μαθητών/μαθητριών σύμφωνα με την ΘΕΣ (Θεωρία Έννοιας Συντονισμού/Coordination Class Theory) (diSessa & Sherin, 1998· Levirini & diSessa, 2008).

Το συγκεκριμένο ερευνητικό ερώτημα της εργασίας είναι: Πώς ερμηνεύει ο μηχανισμός ΙΚ την αποτελεσματικότητα της ρητής χρήσης του AMT στην εννοιολογική εξέλιξη των μαθητών/μαθητριών, αναφορικά με την έννοια της δύναμης, σε ομαδικό περιβάλλον που ακολουθεί τις αρχές της διαλογικής διδασκαλίας;

## Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

### *Η στροφή στην επιχειρηματολογία*

Οι δραστικές κοινωνικές αλλαγές, που προκάλεσε η μετά-νεωτερική εποχή και οι συνέπειες που είχαν στις αντιλήψεις για την μάθηση και την γνώση ήταν μερικές από τις αιτίες που

έστρεψαν το ενδιαφέρον της εκπαιδευτικής κοινότητας και της κοινότητας της ψυχολογίας στην πρόταση μαθησιακών περιβαλλόντων που χαρακτηρίζονται από συνεργασία, διάλογο, αβεβαιότητα, αναδεικνύοντας την αξία της επιχειρηματολογίας στην εκπαίδευση (Asterhan & Scharz, 2016· Berland & Hammer, 2012· Driver et al., 2000· Duschl, 2008· Erduran, 2007· Kuhn, 2010· McNeill et al., 2006· NGSS Lead States, 2013· Osborne et al., 2004· Osborne, 2010· P.R. China, 2017· Sampson & Clark, 2008· Wang, 2020· Zhang & Browne, 2023). Αναγνωρίζοντας αυτή την ανάγκη οι υπηρεσίες σχεδιασμού εκπαιδευτικής πολιτικής διαφόρων χωρών έθεσαν την επιχειρηματολογία σε εξέχουσα θέση, όπως για παράδειγμα στις ΗΠΑ και στην Λαϊκή Δημοκρατία της Κίνας (Ministry of Education, NGSS Lead States, 2013· P.R. China, 2017). Επιπλέον, η αναγνώριση της σημασίας των κοινωνικών αλληλεπιδράσεων στην διαμόρφωση της ατομικής γνώσης καθώς και του σημαντικού ρόλου που παίζει ο διάλογος στην γνωστική ανάπτυξη του ατόμου που ξεκίνησε με τους Vygotsky, Dewey, Bachtin και Piaget και συνεχίστηκε από νεότερους ερευνητές προώθησε το ενδιαφέρον της εκπαιδευτικής κοινότητας για την επιχειρηματολογία (Asterhan & Schwarz, 2016).

Ειδικά στον χώρο της διδακτικής των Φυσικών Επιστημών (Φ.Ε.) αναγνωρίστηκε η σημασία που έχει να κατανοήσουν οι μαθητές/μαθήτριες το πως συγκεκριμένες γνώσεις καθιερώθηκαν και όχι απλά να γνωρίζουν ένα συγκεκριμένο γνωστικό αντικείμενο (Osborne, 2010). Μεγάλη μερίδα της ερευνητικής κοινότητας στις Φ.Ε. αναγνωρίζει την ανάγκη για μια αναθεώρηση της εκπαίδευσης στις Φ.Ε. ώστε να ενισχυθεί ο επιστημονικός γραμματισμός των μαθητών/μαθητριών (Millar et al, 1998) και να οδηγηθούμε από το «η επιστήμη ως γνώση» στο «η επιστήμη ως πρακτική», επισημαίνοντας την ιδιαίτερη σημασία της επιστημονικής επιχειρηματολογίας.

Όμως παρά τις προσπάθειες που γίνονται για την αξιοποίηση της επιχειρηματολογίας στην διδασκαλία των Φ.Ε., δεν υπάρχουν πολλές περιπτώσεις όπου αυτή συμβαίνει ουσιαστικά ή εξελίσσεται παραγωγικά μέσα στις σχολικές τάξεις (Berland & Reiser, 2009· Chinn & Clark, 2013· Osborne et al., 2013· Sampson & Clark, 2008· Wang, 2020). Σαν πιθανή αιτία για αυτήν την κατάσταση θεωρεί-ται το κενό που υπάρχει μεταξύ της υπάρχουσας κουλτούρας στις σχολικές τάξεις και των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών που έχουν οι επιχειρηματολογικές πρακτικές (Christodoulou & Osborne, 2014· Driver et al., 2000· Wang, 2020).

Η κουλτούρα μιας σχολικής τάξης καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις επιστημολογικές πεποιθήσεις τόσο των εκπαιδευτικών όσο και των μαθητών/μαθητριών (Γκικοπούλου, 2013· Γκρίτζιος, 2011· Χαλκιά, 1995· Hammer, 1994· Henderson et al., 2018· Jimoyiannis & Komis, 2003). Στις περισσότερες σχολικές τάξεις επικρατεί η θετικιστική αντίληψη για την επιστημολογία των Φ.Ε., που θεωρεί ότι το βιβλίο της φύσης διαβάζεται με την παρατήρηση και τους πειραματισμούς (Driver et al., 2000), δέχεται την ύπαρξη μιας απόλυτης αλήθειας και ότι η γνώση αποτελείται από γεγονότα που ανακαλύπτονται ή αποκαλύπτον-ται (Asterhan & Schwarz, 2016). Επιπλέον, ειδικά για την ελληνική πραγματικότητα, φαί-νεται ότι η παραπάνω κουλτούρα της σχολικής τάξης υποστηρίζεται και από τα ελληνικά

εγχειρίδια φυσικής τα οποία δεν παρέχουν ευκαιρίες για την χρήση επιστημονικών πρακτικών (Papakonstantinou & Skoumios, 2021).

Μεγάλη μερίδα των εκπαιδευτικών των Φ.Ε. υιοθετεί την παραδοσιακή αντίληψη που κυριαρχείται από ιδέες όπως, η κάλυψη της «ύλης», η κατανόηση ενός συγκεκριμένου σώματος γνώσης (Osborne et al., 2019), ενώ παράλληλα είναι απογοητευμένο από σύγχρονες διδακτικές προτάσεις της ερευνητικής κοινότητας των Φ.Ε. καθώς θεωρεί ότι αυτές δεν ανταποκρίνονται στην εκπαιδευτική πραγματικότητα (Hammer, 1994). Παρά την ύπαρξη πληθώρας ερευνητικών τεκμηρίων που εστιάζουν στην αντίληψη για την κοινωνική οικοδόμηση της γνώσης από τους μαθητές, η πλειοψηφία των εκπαιδευτικών ασπάζεται την ιδέα για την διαβίβαση ή μετάδοση της γνώσης (Chi, 2009· Driver et al., 1994· Osborne et al., 2016).

Αλλά και από την μεριά των μαθητών/μαθητριών κυριαρχεί η αντίληψη ότι η μάθηση της Φυσικής σημαίνει την απόκτηση συγκεκριμένων πληροφοριών και την απομνημόνευση τύπων και νόμων ( Γκικοπούλου, 2013· Χαλκιά, 1995· Hammer, 1994· Jimoyiannis & Komis, 2003). Τις παραπάνω αντιλήψεις ενισχύουν στην Ελλάδα και τα ελληνικά εγχειρίδια της Φυσικής που δίνουν ιδιαίτερη σημασία στην μετάδοση της πληροφορίας και όχι στην κατανόηση εν-νοιών (Χαλκιά, 1995), ενώ τα περισσότερα ελληνικά εγχειρίδια Φ.Ε. εστιάζουν στο περιεχόμενο χωρίς να δίνουν ιδιαίτερη σημασία σε άλλες πλευρές των Φ.Ε. (Papakonstantinou & Skoumios, 2021). Φαίνεται λοιπόν ότι κυρίαρχες διδακτικές πρακτικές, αλλά και μαθητικές προσδοκίες αναφορικά με τη Φυσική, στην Ελλάδα και στο εξωτερικό, είναι η μετάδοση της πληροφορίας, η κάλυψη της ύλης, η απομνημόνευση, η επίλυση πολλών ασκήσεων και η πιστή χρήση του σχολικού εγχειριδίου (Γκικοπούλου, 2013· Τζιμογιάννης & Σιόρεντα, 2007· Χαλκιά, 1995· Jimoyiannis & Komis, 2003· Papakonstantinou & Skoumios, 2021).

Παρ' όλα αυτά όμως, στην εκπαιδευτική έρευνα στις Φ.Ε. των τελευταίων χρόνων κυριαρχούν αντιλήψεις που θεωρούν τεκμηριωμένα ότι, πέρα από το επιστημονικό περιεχόμενο, οι μαθητές/μαθήτριες θα πρέπει να εκπαιδεύονται στις επιστημονικές πρακτικές, στον επιστημονικό τρόπο σκέψης και να θεωρούν την πληροφορία που τους παρέχεται σαν μέσο που θα υποστηρίξει περαιτέρω την δική τους διερεύνηση (IEΠ, 2022· Bogar, 2019· Driver et al., 2000· Hammer, 1994· NGSS Lead States, 2013· Osborne et al., 2016· P.R. China, 2017· Russ et al., 2008· Wang, 2020· Zhang & Browne, 2023). Επίσης ερευνητικά δεδομένα δείχνουν ότι οι βελτιωμένες επιστημολογικές πεποιθήσεις επηρεάζουν θετικά την εννοιολογική κατανόηση, ενώ η εννοιολογική βελτίωση βοηθάει στην εξέλιξη των επιστη-μολογικών πεποιθήσεων των μαθητών/μαθητριών (Ασλανίδης, 2021· Γκικοπούλου, 2013· Γκριτζιός, 2011· Χαλκιά, 1995· Hammer, 1994· Stathopoulou & Vosniadou, 2007).

Μεγάλη μερίδα της εκπαιδευτικής κοινότητας στις μέρες μας υιοθετεί την αντίληψη ότι η διδασκαλία των Φ.Ε. πρέπει να προσεγγίζεται μέσα από μια διαδικασία κοινωνικής οικο-δόμησης της γνώσης, δίνοντας ιδιαίτερη σημασία σε διαλογικές πρακτικές και στην επιχειρηματολογία (Asterhan & Scharz, 2016· Berland & Hammer, 2012· Driver et al., 2000· Duschl, 2008· Erduran, 2007· Kuhn, 2010· McNeill et al., 2006· NGSS Lead States, 2013· Osborne, 2010· Osborne, Erduran & Simon, 2004· P.R. China, 2017· Sampson & Clark,

2008· Wang, 2020· Zhang & Browne, 2023). Όμως για την εφαρμογή ενός μαθησιακού περιβάλλοντος επιχειρηματολογίας είναι απαραίτητη η αλλαγή της κουλτούρας μέσα στις σχολικές τάξεις που διδάσκονται οι Φ.Ε. Σύμφωνα με τους Henderson et al. (2018) πρέπει να γίνει αλλαγή της στάσης τόσο των εκπαιδευτικών όσο και των μαθητών/μαθητριών σχετικά με την επιστημονική γνώση που δεν θα πρέπει να θεωρείται απόλυτη αλλά προσωρινή και ανοικτή στην κριτική, ενώ παράλληλα θα πρέπει να δημιουργηθεί το απαραίτητο κλίμα ασφάλειας στην τάξη ώστε οι μαθητές/μαθήτριες να διαχειρίζονται την αβεβαιότητα, τον προβληματισμό και την κριτική.

### ***Η προσέγγιση Toulmin στην επιχειρηματολογία***

Ο Toulmin (2003) μελέτησε τους τρόπους με τους οποίους οι άνθρωποι επιχειρηματολογούν σε διάφορες καταστάσεις και παρουσίασε ένα μοντέλο το οποίο περιγράφει τα δομικά στοιχεία ενός επιχειρήματος και τις σχέσεις μεταξύ αυτών των στοιχείων. Το μοντέλο που πρότεινε ο Toulmin (MT) είναι γνωστό στην βιβλιογραφία ως TAP (Toulmin Argument Pattern).

Τα δομικά στοιχεία του MT είναι:

- (α) Δεδομένα (data) είναι τα στοιχεία που υπάρχουν στο επιχείρημα, σχετίζονται με την συγκεκριμένη κατάσταση, είναι αποδεκτά και πάνω σε αυτά στηρίζεται ο ισχυρισμός.
- (β) Ισχυρισμός (claim) είναι η τελική πληροφορία που θα εξαχθεί από το επιχείρημα (συμπέρασμα) και στην διάρκεια της επιχειρηματολογίας θα πρέπει να αναδειχθεί η ισχύς του ή να αποδειχθούν τα λάθη του.
- (γ) Εγγυήσεις (warrants), είναι εκείνα τα στοιχεία που θα συνδέσουν τα δεδομένα με τον ισχυρισμό, αποτελούν γενική πληροφορία που είναι αποδεκτή από όλους και δεν μπορεί να αμφισβητηθεί.
- (δ) Υποστήριξη (backing), πρόκειται για βασικές απόψεις που είναι επίσης αποδεκτές και παρέχουν επιπλέον στήριξη στις εγγυήσεις.
- (ε) Τροποποιητές (qualifiers), είναι τα στοιχεία που δείχνουν τους περιορισμούς που μπορεί να έχει ο ισχυρισμός, όπως και τον βαθμό στον οποίο ισχύει το επιχείρημα (συνήθως εμφανίζονται με την μορφή λέξεων όπως: σίγουρα, βέβαια, πιθανά κ.α.).
- (στ) Αντικρούσεις (rebuttals), είναι τα στοιχεία που μπορούν να οδηγήσουν στην απόρριψη του ισχυρισμού, αναδεικνύοντας συνήθως συνθήκες/καταστάσεις που δεν ισχύει η εγγύηση που προτείνεται ή προσβάλλοντας την εγκυρότητα των δεδομένων.

Το μοντέλο του Toulmin (MT) έχει χρησιμοποιηθεί σε μεγάλο βαθμό στην έρευνα στην εκπαίδευση στις Φ.Ε. σαν εργαλείο για την αξιολόγηση της ποιότητας των επιχειρημάτων (Bell & Linn, 2000· Erduran et al., 2004· Jimenez-Aleixandre, Rodriguez, & Duschl, 2000· Sampson & Clark, 2008), αλλά και σαν εργαλείο υποστήριξης της επιχειρηματολογίας των μαθητών/μαθητριών (Duschl et al., 1999). Στην παρούσα εργασία αξιοποιούμε το απλό μοντέλο Toulmin AMT που αποτελείται από τα τρία πρώτα δομικά στοιχεία (Δεδομένα, Εγγυήσεις, Ισχυρισμό). Προκειμένου να παρακολουθήσουμε την λειτουργικότητα του AMT στην

διδασκαλία της δύναμης, θα πρέπει να αποτυπώσουμε την ειδική πρόκληση που συνιστά μια έννοια όπως η δύναμη της Φυσικής καθώς και την λεπτομερή πορεία της κατανόησης της. Αυτό το κάνουμε με την χρήση της ΘΕΣ.

### **Θεωρία Έννοιας Συντονισμού**

Η Θεωρία Έννοιας Συντονισμού ΘΕΣ, Coordination Class Theory (diSessa & Sherin, 1998) είναι μια θεωρία που αφορά στην δομή και την ανάπτυξη μιας κατηγορίας εννοιών (Έννοιες Συντονισμού: ΕΣ) οι οποίες είναι ιδιαίτερα κοινές στον χώρο των Φυσικών Επιστημών και διακρίνονται από έννοιες που εμφανίζονται σε άλλες περιστάσεις (π.χ. έννοιες που χρησιμοποιούνται σε κατηγοριοποιήσεις). Ονομάζονται Έννοιες Συντονισμού (coordination class) γιατί κεντρικό στοιχείο της δομής και της λειτουργικότητάς τους είναι ο επιτυχημένος συντονισμός από τον χρήστη τους, των επιμέρους εκδοχών τους σε διαφορετικά συγκεκριμένα πλαίσια, όπως θα φανεί παρακάτω. Για παράδειγμα η έννοια της δύναμης, όπως εμφανίζεται στη Φυσική, η οποία σύμφωνα με την ΘΕΣ είναι ΕΣ, αν και έχει διαφορετικές ενδείξεις της παρουσίας της σε διαφορετικά πλαίσια (ισορροπία δυνάμεων, παραμόρφωση αντικειμένου, επιτάχυνση αντικειμένου) μπορεί να αναγνωρισθεί ως ενιαία και να χρησιμοποιηθεί με επιτυχία από αυτόν/αυτήν που γνωρίζει πώς να συντονίσει τις επιμέρους εμφανίσεις της. Η ΘΕΣ (diSessa & Sherin, 1998) αντιμετωπίζει την έννοια όχι σαν κάτι που το άτομο το έχει ή δεν το έχει, αλλά θεωρεί την έννοια ως μια οντότητα που διαμορφώνεται και εξελίσσεται από την διαισθητική κατανόηση του αρχάριου στην κατανόηση του ειδικού. Η ΘΕΣ δίνει τα απαραίτητα εργαλεία ώστε να περιγράφονται με ακρίβεια καταστάσεις όπου οι μαθητές/μαθήτριες συμπεριφέρονται με διαφορετικό τρόπο από τους ειδικούς, όπως και καταστάσεις όπου η συμπεριφορά των μαθητών/μαθητριών εμφανίζει χαρακτηριστικά της κατανόησης των ειδικών.

Η ΘΕΣ προσεγγίζει μια ΕΣ σαν γνωστικό σύστημα, καθορίζει την οργάνωση που πρέπει να έχει, καθώς και τα εμπόδια που εμφανίζονται στην πορεία σχηματισμού μιας καλά σχηματισμένης ΕΣ. Η ΘΕΣ προσφέρει τα εργαλεία προκειμένου να αναλυθούν δεδομένα (π.χ. καταγεγραμμένη δράση των μαθητών/μαθητριών σε πραγματικό χρόνο) και να μελετηθεί με λεπτομέρεια η πορεία της εννοιολογικής αλλαγής (Levrini & diSessa, 2008). Δηλαδή η ΘΕΣ μπορεί να αποτυπώσει σημεία από την πορεία της εννοιολογικής βελτίωσης/εξέλιξης την στιγμή που αυτά συμβαίνουν.

### **Οι ΕΣ (έννοιες συντονισμού) σε σχέση με τις καθημερινές έννοιες: η περίπτωση της δύναμης**

Μια ΕΣ θεωρείται σαν ένα ολοκληρωμένο σύστημα που έχει εσωτερική συνοχή (ως προς τα στοιχεία της) αλλά και εξωτερική συνοχή σε σχέση με άλλες επιστημονικές έννοιες. Οι ΕΣ είναι συνήθως πολιτισμικά επιτεύγματα τα οποία έχουν προκύψει από μια μακριά ιστορική πορεία, σημαντικό μέρος της οποίας ήταν η επιχειρηματολογική αντιπαράθεση αναφορικά

με τη μορφή που έπρεπε να πάρουν και αποτελούν απαντήσεις σε ερωτήματα που ταλάνισαν κοινότητες μάθησης και πρακτικής. Οι μαθητές/μαθήτριες όμως ξεκινούν από καθημερινές έννοιες, που συχνά έχουν το ίδιο όνομα (χρησιμοποιείται η ίδια λέξη), με περιορισμένη επικάλυψη με τις επιστημονικές έννοιες ΕΣ σε συγκεκριμένες περιστάσεις και αρκετά διαφορετική εσωτερική δομή και συσχέτιση με άλλες έννοιες (diSessa et al., 2016).

Η περίπτωση της δύναμης είναι ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα λόγω της πλούσιας παρουσίας της λέξης αυτής στην καθημερινή γλώσσα. Ωστόσο, ακόμα και στο πλαίσιο των φυσικών φαινομένων θεωρούμε ότι περισσότερες από μια διαισθητικές έννοιες εξυπηρετούνται από τη λέξη «δύναμη».

Αρκετές από τις καθημερινές έννοιες που συνοδεύουν την λέξη «δύναμη» σχετίζονται με αυτό που αποκαλεί ο diSessa (1993) διαισθητική αίσθηση μηχανισμού (intuitive sense of mechanism), θέλοντας να αποδώσει τον κατακερματισμό/αποσπασματικότητα της διαισθητικής γνώσης (intuitive knowledge) και να εξηγήσει τον τρόπο με τον οποίο ο κοινός νους κάνει προβλέψεις, δίνει εξηγήσεις, διατυπώνει προσδοκίες και κρίσεις ευλογοφάνειας σε καταστάσεις μηχανικής αιτιότητας (καταστάσεις που καθορίζονται με βάση την σχέση αιτία-αποτέλεσμα και εξηγούνται με τους νόμους της Φυσικής).

Κεντρική ιδέα του diSessa (1993), που διαφοροποιεί την αίσθηση μηχανισμού από την αιτιότητα, είναι ότι η αίσθηση μηχανισμού αποτελεί ένα γνωστικό σύστημα με διαφορετικά επίπεδα οργάνωσης, ενώ σημαντικό ρόλο στο σύστημα της διαισθητικής γνώσης παίζει μια θεμελιώδης γνωστική δομή που ο diSessa την αποκαλεί p-prim (phenomenological primitive) και οδήγησε στην προσέγγιση του κατακερματισμού/αποσπασματικότητας της διαισθητικής γνώσης (knowledge in pieces). Σύμφωνα με τον diSessa (1993) υπάρχουν εκατοντάδες p-prims, η κάθε μια μπορεί να ανακαλείται αυτόνομα, εφαρμόζεται σε συγκεκριμένα πλαίσια και όχι σε άλλα. Οι p-prims παίζουν τον ρόλο των φυσικών νόμων, δεν αναφέρονται ρητά, δεν περιγράφονται λεκτικά και δεν χρειάζεται να εξηγούνται. Εξαιτίας της συγκυριοκρατίας (contextuality) που χαρακτηρίζει την χρήση τους, είναι πιθανόν οι p-prims να οδηγήσουν σε αντικρουόμενα συμπεράσματα (diSessa et al., 2016). Χαρακτηριστικό παράδειγμα p-prim είναι η «δύναμη ως αίτιο της κίνησης» (force as mover), που αναφέρεται σε καταστάσεις (σπρώξιμο, τίναγμα, κτύπημα) όπου μια δύναμη δρα στιγμιαία/απότομα σε ένα σώμα και το σώμα κινείται προς την κατεύθυνση της δύναμης. Αυτή η p-prim είναι υπεύθυνη για την παρανόηση «η δύναμη έχει την φορά της κίνησης».

Μια καθημερινή έννοια «δύναμης» σχετίζεται με την διαισθητική γνώση που αφορά την εναλλακτική ιδέα/θεωρία του impetus (Halloun & Hestenes, 1985; Hestenes et al., 1992). Στην περίπτωση αυτή η δύναμη είναι μια ιδιότητα που μπορεί να αποκτηθεί από άψυχα σώματα καθώς αποκτούν κίνηση (Ioannides & Vosniadou, 2002). Συνοδεύει μάλλον παρά προκαλεί αιτιακά την κίνηση. Η έννοια αυτή της δύναμης εμφανίζεται στην προσέγγιση των Βοσνιάδου και Ιωαννίδη ως το μοντέλο Acquired Force. Ο diSessa έχει αποδώσει αυτή την παρουσία της δύναμης μέσω του p-prim “dying away” (diSessa, 1993). Η p-prim dying away (εξάντληση) σχηματοποιείται σε καταστάσεις όπου συμβαίνει βαθμιαία «εξασθένιση»

της κίνησης (π.χ. μείωση ταχύτητας, μείωση πλάτους ταλάντωσης) και υπονομεύει την κατανόηση της Νευτώνειας αρχής «όταν δεν ασκούνται δυνάμεις σε ένα σώμα που κινείται, τότε το σώμα διατηρεί την ταχύτητα του σταθερή».

Αν και στην καθημερινότητα χρησιμοποιούμε την ίδια λέξη, τα διαφορετικά πλαίσια μας επιτρέπουν να την χρησιμοποιούμε χωρίς να έχουμε αίσθηση αντίφασης, όπως συμβαίνει με τις ομόηχες λέξεις ή με την πολυσημία των λέξεων. Κάτι τέτοιο όμως δεν είναι συμβατό με την αυστηρότητα και πειθαρχία που απαιτεί η Φυσική, που χρειάζεται κοινό νόημα για τη δύναμη σε όλη την έκταση των πλαισίων όπου εμφανίζεται και στοίχιση (εναρμόνιση) των νοημάτων στα επιμέρους πλαίσια προκειμένου να είναι όψεις της ίδιας έννοιας. Αυτές είναι και οι απαιτήσεις για μια ΕΣ στην ΘΕΣ.

### Η δομή και η λειτουργία μιας Έννοιας Συντονισμού (ΕΣ)

Οι Levirini & diSessa (2008) θεωρούν ότι στην πορεία σχηματισμού μιας ΕΣ έχουν ιδιαίτερο ρόλο τα εξής: (Α) Η αρχιτεκτονική της ΕΣ που περιγράφει την οργάνωση των εσωτερικών στοιχείων. (Β) Οι διαδικασίες που μεσολαβούν στον σχηματισμό μιας έννοιας συντονισμού και (Γ) Οι χαρακτηριστικές δυσκολίες που συναντούν οι μαθητές/μαθήτριες κατά τον σχηματισμό μιας ΕΣ.

Η αρχιτεκτονική της ΕΣ περιλαμβάνει δύο δομικά στοιχεία, (α) τις στρατηγικές εξαγωγής και (β) το συμπερασματικό δίκτυο. Στρατηγικές εξαγωγής είναι οι ενέργειες που κάνει ένα άτομο για να εξάγει πληροφορίες από το περιβάλλον του που θεωρεί κρίσιμες για την αναγνώριση της παρουσίας της έννοιας και τον προσδιορισμό της. Στη συνέχεια γίνεται αξιοποίηση αυτών των πληροφοριών με την ενεργοποίηση του συμπερασματικού δικτύου (*inferential net*) ώστε ο χρήστης της έννοιας να καταλήξει σε συγκεκριμένη τελική πληροφορία (παρουσία, χαρακτηριστικά, τιμή έννοιας). Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο υπολογισμός της τιμής του μέτρου της δύναμης (τελική πληροφορία) σε μια κατάσταση, αφού το άτομο εξάγει πρώτα τις πληροφορίες που αφορούν την μάζα και την επιτάχυνση του σώματος (στρατηγικές εξαγωγής) και αφού κάνει χρήση της σχέσης του 2<sup>ου</sup> νόμου του Νεύτωνα  $F=ma$  (συμπερασματικό δίκτυο) (Barth-Cohen & Wittman, 2017· diSessa & Wagner, 2005· diSessa et al., 2016· Levirini & diSessa, 2008· diSessa & Sherin, 1998).

Το συμπερασματικό δίκτυο (*inferential net*) αποτελείται από τις γνώσεις και τις στρατηγικές συλλογισμού που διαθέτει το άτομο και που με βάση αυτές μπορεί να μετατρέψει την εξαγόμενη πληροφορία σε συγκεκριμένη πληροφορία. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που έχουμε την ολίσθηση ενός σώματος σε οριζόντιο επίπεδο, σαν εξαγόμενη πληροφορία μπορούμε να θεωρήσουμε το μέγεθος, το χρώμα το σχήμα ή την ταχύτητα του σώματος. Στη συνέχεια με την αξιοποίηση του αιτιακού δικτύου είναι δυνατόν το άτομο με βάση την πληροφορία που εξήχθη να υπολογίσει την δύναμη που ασκείται στο σώμα (Barth-Cohen & Wittman, 2017· Levirini & diSessa, 2008). Είναι σημαντικό ότι μια ΕΣ παρουσιάζεται σε διαφορετικά πλαίσια και ότι οι στρατηγικές εξαγωγής και το συμπερασματικό δίκτυο που

ταιριάζει σε διαφορετικά είδη πλαισίου μπορεί να είναι πολύ διαφορετικά. Π.χ. σε ένα πλαίσιο σύνθεσης δυνάμεων οι γωνίες και οι τιμές κάποιων δυνάμεων μπορεί να είναι οι εξαγόμενες πληροφορίες ενώ το συμπερασματικό δίκτυο να στηρίζεται στη διανυσματική άλγεβρα, ενώ σε ένα πλαίσιο συσχέτισης δύναμης και κίνησης οι εξαγόμενες πληροφορίες να έχουν να κάνουν με τη μάζα και την επιτάχυνση και το συμπερασματικό δίκτυο να είναι ο δεύτερος νόμος του Νεύτωνα. Όπως είπαμε παραπάνω, ο συντονισμός ανάμεσα σε διαφορετικά πλαίσια είναι ειδοποιός διαφορά των ΕΣ.

Για να αποδώσει τα παραπάνω η ΘΕΣ χρησιμοποιεί τις έννοιες του *εύρους* (*span*) και της *στοίχισης* (*alignment*), που αποτελούν δύο βασικές δυσκολίες των μαθητών/μαθητριών στην πορεία οικοδόμησης μιας ΕΣ και που σχετίζονται με την «εφαρμογή» της έννοιας σε πληθώρα καταστάσεων. Για την μελέτη των ζητημάτων του εύρους και της στοίχισης η ΘΕΣ εισάγει τον όρο *προβολή της έννοιας* (*concept projection*) για να δηλώσει την χρήση συγκεκριμένης γνώσης του αιτιακού δικτύου της ΕΣ σε συγκεκριμένες καταστάσεις, εκφράζοντας με αυτόν τον τρόπο την εξάρτηση της γνώσης από το πλαίσιο εφαρμογής της, καθώς και την μεταβολή της γνώσης με τον χρόνο (diSessa et al., 2016· Levirini & diSessa, 2008).

Το *εύρος* σχετίζεται με το αν το άτομο έχει τους απαραίτητους εννοιολογικούς πόρους ώστε να προβάλλει την έννοια σε αρκετές και διαφορετικές καταστάσεις. Σαν παράδειγμα αναφέρουμε το να μπορεί το άτομο να σχεδιάζει δυνάμεις σε μια ποικιλία καταστάσεων (ακίνητα σώματα, βολή σώματος στον αέρα, ολίσθηση σώματος σε κεκλιμένο επίπεδο κ.α.) (Levirini & diSessa, 2008). Ουσιαστικά το *εύρος* σχετίζεται με την δυνατότητα ή την αδυναμία του ατόμου να αξιοποιεί και να συντονίζει τα στοιχεία της ΕΣ σε ένα ικανοποιητικά μεγάλο αριθμό καταστάσεων με τις οποίες σχετίζεται η έννοια ΕΣ (Buteler & Coleoni, 2016). Η *στοίχιση* αναφέρεται στην ικανότητα του ατόμου να μπορεί να καταλήγει στην ίδια χαρακτηριστική πληροφορία, που αναμένεται από την Φυσική, όταν προβάλλει την έννοια σε διαφορετικές καταστάσεις. Μια τέτοια ικανότητα στοίχισης σημαίνει ότι η έννοια είναι καλά διαμορφωμένη και έχει ικανοποιητική συνοχή και ότι «αυτό που βλέπει» το άτομο παραμένει το ίδιο όταν το άτομο εφαρμόζει διαφορετικούς τρόπους για να «δει»/καταλήξει στην τελική χαρακτηριστική πληροφορία.

Θέτοντας το διαφορετικά, σε μια καλά διαμορφωμένη ΕΣ οι διαφορετικές προβολές της ΕΣ σε διαφορετικές επιμέρους καταστάσεις δεν θα πρέπει να καταλήγουν σε διαφορετικές πληροφορίες. Όταν ένας/μία μαθητής/μαθήτρια διακρίνει ικανοποιητικά τις δυνάμεις με βάση την Φυσική σε μια κατάσταση όπου το σώμα κινείται με σταθερή ταχύτητα αλλά δεν μπορεί να κάνει το ίδιο σε καταστάσεις με επιταχυνόμενη κίνηση, αυτό σημαίνει ότι ο/η μαθητής/μαθήτρια δεν μπορεί να στοίχισει ικανοποιητικά την ΕΣ δύναμη (Levirini & diSessa, 2008). Επίσης στην περίπτωση που γίνονται διαφορετικές προβολές της έννοιας με βάση τις ίδιες εξαγωγές (δεδομένα), θα πρέπει να καταλήγουν όλες στην ίδια χαρακτηριστική πληροφορία, όπως αυτό συμβαίνει όταν χρησιμοποιούνται διαφορετικοί τρόποι υπολογισμού του μέτρου μιας δύναμης, αλλά όλοι οι τρόποι καταλήγουν στην ίδια τιμή (diSessa et al., 2016).

Στην πορεία οικοδόμησης μιας ΕΣ παρεμβάλλονται δύο γενικές διαδικασίες, (α) η *ενσωμάτωση* (*incorporation*) και (β) η *εκτόπιση* (*displacement*) (Levrini & diSessa, 2008), όπου εμφανίζεται η ιδιαίτερη σημασία της προηγούμενης γνώσης του ατόμου σε αυτήν την πορεία και υπογραμμίζει τον κονστрукτιβιστικό χαρακτήρα της ΘΕΣ. Η *ενσωμάτωση* σχετίζεται με την αξιοποίηση της προϋπάρχουσας γνώσης του ατόμου που εγκιβωτίζεται σε συγκεκριμένες οριοθετημένες καταστάσεις (σωστό εύρος) προκειμένου να στηρίξει τις στρατηγικές εξαγωγής ή ένα μέρος του συμπερασματικού δικτύου. Παράδειγμα είναι η περίπτωση της διαισθητικής γνώσης που θεωρεί ότι «όταν δεν υπάρχει κίνηση τότε δεν υπάρχει και δύναμη», που μπορεί να αξιοποιηθεί (προκειμένου να υπάρχει σωστό εύρος και στοίχιση της επιστημονικής έννοιας της δύναμης) μόνο σε καταστάσεις που το σώμα είναι ακίνητο και με την έννοια δύναμη αναφερόμαστε στην συνισταμένη δύναμη (Barth-Cohen & Wittman, 2017· Buteler & Coleoni, 2016· Levrini & diSessa, 2008). Η *εκτόπιση* αναφέρεται στην απόρριψη στοιχείων προηγούμενων κατανοήσεων της έννοιας, που όμως μπορεί να έπαιξαν καθοριστικό ρόλο στην αρχική λειτουργία της ΕΣ σε κάποιες καταστάσεις. Σαν παράδειγμα μπορούμε να αναφέρουμε την διαισθητική ιδέα των αρχαίων «αν υπάρχει κίνηση τότε υπάρχει και δύναμη», η οποία πρέπει να εκτοπιστεί από καταστάσεις που τα σώμα κινείται με σταθερή ταχύτητα (Barth-Cohen & Wittman, 2017· Buteler & Coleoni, 2016· Levrini & diSessa, 2008).

Αν και η ΘΕΣ μας δίνει μια καλή περιγραφή μιας έννοιας ΕΣ ή ακόμα και της πορείας βελτίωσης μιας τέτοιας έννοιας όταν αυτός/ή που την μαθαίνει διαισθάνεται τα χαρακτηριστικά που θα πρέπει να ικανοποιεί, δεν μας κατευθύνει αναφορικά με το πώς γίνεται η πρώτη παγιοποίηση μιας έννοιας ΕΣ ή τι είδους στήριξη χρειάζεται για να πραγματοποιηθούν μηχανισμοί όπως η ενσωμάτωση ή η εκτόπιση (οι οποίοι ως όροι μένουν σε ένα φαινομενολογικό επίπεδο). Για το σκοπό αυτό στραφήκαμε στο μηχανισμό της εννοιολογικής ιδιοανέλιξης κατά Κουάϊν.

### **Εννοιολογική ιδιοανέλιξη**

Σύμφωνα με την Carey (2009) στην πορεία εννοιολογικής ανάπτυξης του ατόμου (conceptual development) εμφανίζονται *ασυνέχειες* (*discontinuities*) που προκαλούν την εμφάνιση συστημάτων αναπαράστασης που είναι πιο ισχυρά από τα συστήματα από τα οποία προήλθαν, ενώ μερικές φορές τα δύο συστήματα είναι *ασύμμετρα* μεταξύ τους (*incommensurable*). Η εννοιολογική ασυνέχεια εμφανίζεται τοπικά, σε συγκεκριμένες γνωστικές περιοχές, στις περιπτώσεις που εμφανίζονται δύο διαδοχικά εννοιολογικά συστήματα (ΕΣ1 και ΕΣ2) που έχουν ποιοτικές διαφορές και δεν είναι αμοιβαία μεταφράσιμα. Στην περίπτωση ενός/μιας μαθητή/μαθήτριας φυσικής, σαν ΕΣ1 μπορεί να έχουμε τις διαισθητικές ιδέες, ενώ σαν ΕΣ2 τις επιστημονικές έννοιες της φυσικής που διδάσκονται στο σχολείο.

Η Carey (2009) επισημαίνει την εξής μορφή ασυνέχειας που είναι σημαντική για την περίπτωση της μάθησης της δύναμης: το άτομο βιώνει την αδυναμία του να εκφράσει τις έννοιες του ΕΣ2 με τη βοήθεια εννοιών του ΕΣ1 και το αντίστροφο, αρχικά μάλιστα χωρίς

συνείδηση ότι υπάρχουν δύο ξεχωριστά και «ανταγωνιστικά» εννοιολογικά συστήματα. Το φαινόμενο αυτό θεωρεί ότι συμβαίνει τόσο σε ενήλικους επιστήμονες όσο και σε νεαρούς/νεαρές μαθητές/μαθήτριες. Ως παράδειγμα αναφέρει την εξήγηση της καύσης με την θεωρία του φλογιστού που είχε κυριαρχήσει για 150 χρόνια στην επιστημονική κοινότητα στον 17<sup>ο</sup>-18<sup>ο</sup> αιώνα και την εξήγηση της καύσης με την παραδοχή του ρόλου του οξυγόνου. Η θεωρία του φλογιστού εξηγούσε τα φαινόμενα με την παραδοχή της κίνησης του φλογιστού μεταξύ των υλικών, ενώ η παραδοχή του ρόλου του οξυγόνου στις καύσεις έδινε μια τελείως διαφορετική προσέγγιση στα ίδια φαινόμενα (καύση, οξειδωση, αναπνοή) που δεν ήταν δυνατόν να εκφραστεί με όρους της θεωρίας του φλογιστού. Στην περίπτωση της μάθησης στην Φυσική μπορούμε να αναφέρουμε την αδυναμία της αντίληψης των παιδιών για τη «δύναμη» να εξηγήσουν φαινόμενα μείωσης ταχύτητας κάτω από την επίδραση «δύναμης», καθώς θεωρούν ότι η δύναμη πρέπει να έχει την φορά της ταχύτητας και να προκαλεί «κίνηση» και ενεργοποιούν διαισθητικές αντιλήψεις περί «εξασθένισης της δύναμης», «εμπόδιο στην κίνηση» (diSessa, 1993), μην αποδίδοντας σε «δύναμη» την μείωση της ταχύτητας ενός σώματος.

Οι περιπτώσεις τοπικών (αναφορικά με συγκεκριμένες περιστάσεις) ασυμμετριών αντιμετώπιζονται με εννοιολογική αλλαγή που σύμφωνα με την Carey (2009) μπορεί να είναι: (α) Διαφοροποίηση όπου η αρχική αδιαφοροποίητη έννοια είναι χωρίς συνοχή και δεν έχει ρόλο μέσα στο ΕΣ2. Σαν παράδειγμα διαφοροποίησης που σχετίζεται με την εννοιολογική ανάπτυξη έχουμε την διάκριση μεταξύ των εννοιών βάρος και πυκνότητα που είχαν σαν προγονική έννοια τον «βαθμό βάρους» (degree of heaviness), την διαφοροποίηση θερμοκρασίας/θερμότητας, στιγμιαίας και μέσης ταχύτητας και της «δύναμης» όπως την εννοούν τα παιδιά σε δύναμη, ορμή και ενέργεια. (β) Συνένωση (coalescence), όπου διαφορετικές έννοιες του ΕΣ1 υπάγονται σε μία έννοια του ΕΣ2. Περίπτωση συνένωσης αποτελεί η ενοποίηση των εννοιών αντικείμενο, υγρό, αέρας στην έννοια της ύλης. (γ) Αλλαγές στον τύπο της έννοιας που σχετίζονται με τον εννοιολογικό πυρήνα και προσδίδουν άλλη σημασία στο περιεχόμενο της έννοιας. Εδώ, μπορούμε να αναφέρουμε την περίπτωση της δύναμης, που από μια έννοια που είναι «ιδιότητα» του σώματος (εσωτερική ή επίκτητη), αλλάζει σε μια έννοια που χαρακτηριστικό της στοιχείο είναι η αλληλεπίδραση μεταξύ δύο σωμάτων, όπως και η αλλαγή της αντίληψης για το βάρος των σωμάτων, από το βάρος ως ιδιότητα του αντικειμένου στο βάρος σαν μια σχέση μεταξύ αντικειμένων.

Στην περίπτωση της κατανόησης της έννοιας της δύναμης, που είναι αντικείμενο της παρούσας εργασίας, οι μαθητές/μαθήτριες θα πρέπει να βιώσουν μια πορεία εννοιολογικής ανάπτυξης στην οποία, μεταξύ άλλων θα πρέπει: (α) Να γίνει διαφοροποίηση της αρχικής έννοιας «δύναμη» σε δύναμη, ενέργεια και ορμή, καθώς και την έννοια «μεταβολή ταχύτητας» σε αύξηση/μείωση ή/και αλλαγή κατεύθυνσης. (β) Να γίνει ενοποίηση των εννοιών ακινησία και κίνηση με σταθερή ταχύτητα μέσω της Νευτώνειας ισορροπίας. (γ) Να αλλάξει ο εννοιολογικός πυρήνας της έννοιας δύναμη και από ιδιότητα των σωμάτων να αλλάξει σε ζεύγος οντοτήτων (δράση-αντίδραση) που συνοδεύουν κάθε αλληλεπίδραση μεταξύ δύο

σωμάτων και έχουν χαρακτηριστικές ενδείξεις (αλλαγή ταχύτητας, παραμόρφωση, ισοροπία με άλλες δυνάμεις).

Η Carey (2009· 2011) τονίζει τον απαιτητικό χαρακτήρα της εννοιολογικής αλλαγής, υποστηρίζοντας ότι αυτή πραγματοποιείται όταν αλληλοκαθοριζόμενα σύνολα εννοιών αποκτώνται μαζί σαν σύνολο. Η κατανόηση αυτή γίνεται δυνατή με την ανάδειξη της αλληλοσύνδεσης των εννοιών μέσα σε συγκεκριμένο περιεχόμενο. Οι έννοιες που αλληλοσυνδέονται μπορεί να διαφέρουν από αυτές του ΕΣ1, ενώ οι αλληλοσυνδέσεις γίνονται και με νέες έννοιες που αναδύονται και δεν αναπαρίστανται στο ΕΣ1. Σαν παράδειγμα μπορεί να αναφερθεί η έννοια της δύναμης, όπου η ικανοποιητική κατανόηση της απαιτεί το άτομο να έχει συσχετίσει την δύναμη με την μεταβολή της ταχύτητας ενώ παράλληλα θα έχει κατανοήσει ότι η μεταβολή της ταχύτητας σημαίνει και αύξηση και μείωση και θα αντιλαμβάνεται επαρκώς τον διανυσματικό χαρακτήρα των δύναμη, ταχύτητα, μεταβολή ταχύτητας, επιτάχυνση, εφαρμόζοντας τα παραπάνω σε συγκεκριμένες καταστάσεις όπου αναδεικνύεται η αλληλοσύνδεση των εννοιών.

Με βάση τα παραπάνω, η Carey (2011) θεωρεί ότι η μάθηση στις ΦΕ αποτελεί ένα εξαιρετικά απαιτητικό εγχείρημα με μεγάλο μέρος των μαθητών/μαθητριών στην δευτεροβάθμια εκπαίδευση να αποτυγχάνει στον στόχο της κατανόησης των εννοιών του ΕΣ2. Οι Zaitchik et al. (2016) μελετώντας το έργο της Carey επισημαίνουν ότι σε όλα τα επεισόδια εννοιολογικής αλλαγής που εμφανίζονται στο έργο της Carey εμπλέκεται ο μηχανισμός της εννοιολογικής ιδιοανέλιξης κατά Κουάϊν (IK) (Quinian bootstrapping).

Υπάρχουν περιπτώσεις στην μαθησιακή πορεία του ατόμου όπου το άτομο δεν διαθέτει τους απαραίτητους εννοιολογικούς πόρους για να διαπραγματευθεί φαινόμενα, να κάνει υποθέσεις και να συσχετίσει μεταβλητές. Σε τέτοιες περιπτώσεις η Carey (2009) υποστηρίζει ότι η εννοιολογική ιδιοανέλιξη κατά Κουάϊν IK (Quinian bootstrapping) μπορεί να αποτελέσει τον μαθησιακό μηχανισμό μέσα από τον οποίο το άτομο θα διαπραγματευθεί νέες έννοιες που θα του επιτρέψουν να δώσει νέες προσεγγίσεις και κατανοήσεις σε φαινόμενα. Το λεξικό της APA (APA Dictionary of Psychology) αναφέρει τα παρακάτω για την ιδιοανέλιξη (bootstrapping) ως μαθησιακό μηχανισμό:

*«Η μάθηση των ατόμων μέσα από μια διαδικασία bootstrapping πραγματοποιείται με την οικοδόμηση των σύνθετων εννοιών με βάση τα υλικά που παρέχουν οι πρωτοτυπικές έννοιες. Σύμφωνα με αυτήν την ιδέα, τα νήπια μαθαίνουν τα εννοιολογικά σύμβολα χωριστά και αργότερα συνδέουν αυτά τα σύμβολα μεταξύ τους, γεγονός που έχει σαν αποτέλεσμα την δημιουργία μεγαλύτερων εννοιών. Για παράδειγμα, τα νεαρά παιδιά όταν αντιλαμβάνονται ότι οι αριθμοί αντιστοιχούν με τις λέξεις που αναφέρονται στη σειρά, ένα, δύο, τρία, κ.ο.κ., τότε μπορούν να κάνουν το εννοιολογικό άλμα και να κατανοήσουν ότι αριθμοί έχουν μια σειρά διάταξης που αντιπροσωπεύει το μέτρημα. Με τον καιρό, αυτές οι έννοιες γίνονται αρκετά ισχυρές ώστε να επιτρέψουν την κατανόηση μιας ποικιλίας σύνθετων φαινομένων».*

Σε μια πορεία εννοιολογικής ιδιοανέλιξης κατά Κουάϊν (ΙΚ) η Carey σημειώνει τα εξής χαρακτηριστικά σημεία. Πρώτα έχουμε την εισαγωγή νέων νοητικών συμβόλων που αρχικά παίζουν τον ρόλο *υποκαταστατών* (*placeholder*). Οι *υποκαταστάτες* αντιπροσωπεύουν έννοιες που δεν είναι διαθέσιμες στο ΕΣ1 του ατόμου και αρχικά παίρνουν νόημα μέσα από τις αλληλεπιδράσεις τους με άλλες έννοιες που είναι διαθέσιμες. Όμως στην αρχή ενός επεισοδίου ΙΚ οι *υποκαταστάτες* ερμηνεύονται μερικά, εξαιτίας της έλλειψης των απαραίτητων εννοιολογικών πόρων και ο/η μαθητής/μαθήτρια δεν μπορεί ακόμη να διαμορφώσει ικανοποιητικά την έννοια που ο υποκαταστάτης εκφράζει. Στην συνέχεια θα πρέπει να δοθεί νόημα στον υποκαταστάτη μέσα από *δομές υποκαταστατών* (*placeholder structures*). Σε μια δομή υποκαταστάτη η νέα έννοια/υποκαταστάτης παίρνει νόημα μέσα από ρητές αλληλεπιδράσεις, ήδη κατανοητές από το άτομο, με άλλα σύμβολα/έννοιες και δίνει στο άτομο την δυνατότητα να εξηγήσει τα νέα φαινόμενα. Η Carey αναφέρει «... σε επεισόδια τύπου *Quinian bootstrapping* θα πρέπει η αρχική έννοια *placeholder* να παίρνει νόημα σε μια αλληλεπίδραση με άλλες σαφείς έννοιες/σύμβολα, που να είναι διαθέσιμες στο εννοιολογικό σύστημα των παιδιών» (Carey 2009, p. 483). Σαν παράδειγμα ΙΚ στην ιστορία των επιστημών η Carey (2009, p. 422-428) αναφέρει την περίπτωση της πρότασης του Kepler για το ηλιοκεντρικό σύστημα. Μια βασική παραδοχή του Πτολεμαϊκού συστήματος ήταν η αιώνια κίνηση των πλανητών σε σταθερές κυκλικές τροχιές, μέσα σε γυάλινες σφαίρες εξαιτίας της «κινητήριας ψυχής» (*anima motrix*).

Όμως α) η ανακάλυψη, με τη χρήση του τηλεσκοπίου, ενός κομήτη που η τροχιά του διαπερνούσε τις γυάλινες σφαίρες, όπως και β) η διαπίστωση ότι η ταχύτητα των πλανητών άλλαζε ανάλογα με το σημείο της τροχιάς τους και γ) ότι η τροχιά του Άρη ήταν ελλειπτική, κλόνισαν αυτήν την αντίληψη. Τα παραπάνω κινητοποίησαν τον Kepler στο να ορίσει μια υπό διαμόρφωση δομή υποκαταστατών στη βάση μιας αναλογίας με το φως του Ήλιου. Εισήχθη η έννοια της *vis motrix* (κινούσα δύναμη) του ήλιου που εξασθενούσε όπως το φως του Ήλιου με την απόσταση και αυτή ενσωμάτωσε την παλαιότερη έννοια *anima motrix* που ήταν ιδιότητα εντοπισμένη στους πλανήτες. Έτσι η *vis motrix* αποτέλεσε έναν υποκαταστάτη (*placeholder*) που ο Kepler μέσα από τις παραδοχές που έκανε το συνέδεσε με άλλες γνωστές έννοιες (απόσταση από τον Ήλιο, ταχύτητα πλανητών, μέγεθος της δύναμης) και γνωστές σχέσεις, δημιουργώντας δομές υποκαταστατών που έδιναν νόημα στην *vis motrix* σαν υποκαταστάτη και τον βοηθούσαν να δίνει εξηγήσεις, να προτείνει προβλέψεις και να κάνει αναλογίες με έναν τρόπο που δεν θα μπορούσε να γίνει με την Πτολεμαϊκή/Αριστοτελική φυσική. Φυσικά στην περίπτωση αυτή, κατά τη διάρκεια της δημιουργικής του προσπάθειας, οι υποκαταστάτες και οι δομές υποκαταστατών βρίσκονταν σε ροή αλληλοεπιδρώντας και με τα διαθέσιμα εμπειρικά δεδομένα αλλά και με τα υπό διαμόρφωση «κεντρικά ερωτήματα» (τα οποία είναι συνήθως διαφορετικά ανάμεσα στο ΕΣ1 και το ΕΣ2).

Στην διδασκαλία της Φυσικής η πλειοψηφία των μαθητών/μαθητριών μετέχει σε επεισόδια εννοιολογικής ιδιοανέλιξης, όπου ο/η μαθητής/μαθήτρια κάνει χρήση της νέας έννοιας/συμβόλου σε διάφορες καταστάσεις (χρήση εξισώσεων, εξήγηση φαινομένων, επίλυση

ασκήσεων κ.α.) χωρίς να έχει πλήρη κατανόηση της έννοιας, με την προσδοκία ότι η έννοια θα γίνει κατανοητή και θα πάρει πλήρες νόημα στο τέλος αυτής της δύσκολης πορείας. Αυτή η πορεία εκφράζεται από τον άτυπο κανόνα: «εφάρμοσε το τώρα και θα το καταλάβεις αργότερα». Σε μια τέτοια άτυπη διαδικασία εννοιολογικής ιδιοανέλιξης οι μαθητές/μαθήτριες χρησιμοποιούν αρχικά έννοιες (π.χ. ταχύτητα, δύναμη, πυκνότητα, ορμή κ.α.) χωρίς να τις έχουν κατανοήσει πλήρως, ούτε και τον τρόπο που αυτές οι έννοιες συνδέονται μεταξύ τους, καθώς συνεχίζουν να «σκέφτονται» σε μεγάλο βαθμό με τους όρους του ΕΣ1. Θεωρούμε ότι αυτή η μαθησιακή πορεία ιδιοανέλιξης μπορεί να επιταχυνθεί αν υποστηριχτεί μέσα από τον μηχανισμό της ιδιοανέλιξης κατά Κουάϊν ΙΚ (Quinian bootstrapping) και με την χρήση κατάλληλων δομών υποκαταστατών. Βέβαια, στην περίπτωση των μαθητών/μαθητριών η ΙΚ είναι διαφορετική από την περίπτωση των επιστημόνων. Ενώ οι επιστήμονες προτείνουν δομές υποκαταστατών με σκοπό να εξηγήσουν φαινόμενα, οι μαθητές/μαθήτριες προσλαμβάνουν αυτές τις δομές από τους μεγαλύτερους. Όμως η Carey υποστηρίζει ότι, ακόμη και έτσι υπάρχουν πολλά κοινά στοιχεία της ΙΚ στους/στις μαθητές/μαθήτριες και στους επιστήμονες, καθώς και οι δύο αξιοποιούν δομές placeholder ώστε να διαμορφώνουν μοντέλα, να δίνουν εξηγήσεις, δικαιολογήσεις, συμπεράσματα για να αποκτήσει νόημα το placeholder. Η Carey (2009) επισημαίνει την σημασία των παραπάνω αναφέροντας ότι ο κεντρικός πυρήνας της ΙΚ εντοπίζεται στην πορεία νοηματοδότησης των δομών υποκαταστατών (placeholder structures).

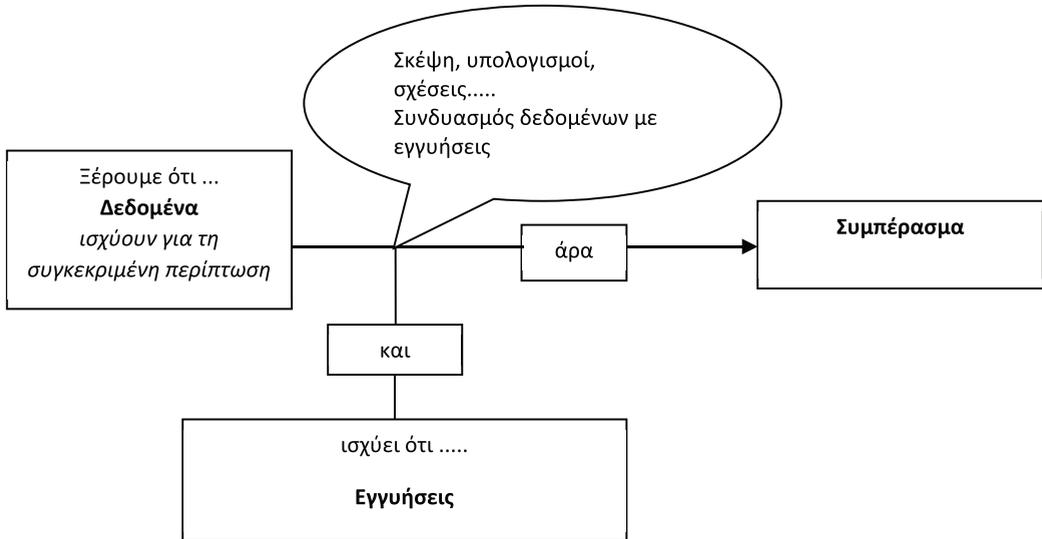
Στην παρούσα εργασία γίνεται χρήση των δομών υποκαταστατών ώστε να συνδέεται η έννοια υποκαταστάτης «δύναμη» (όπως την αντιλαμβάνονται οι φυσικοί) με διαθέσιμες έννοιες του ΕΣ1 των μαθητών/μαθητριών. Σαν παράδειγμα δομής υποκαταστάτη αναφέρουμε τον συμπερασματικό κανόνα μονής κατεύθυνσης (inference rule) (Chi & VanLehn, 2012) που προτάθηκε σαν πιθανή εγγύηση για την κατασκευή επιχειρήματος από τους/τις μαθητές/μαθήτριες: «Όταν η δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα έχει αντίθετη φορά με την ταχύτητα του σώματος, τότε η ταχύτητα του σώματος μειώνεται».

Σε αυτήν την πρόταση η *δύναμη* συνδέεται με τις έννοιες, *φορά δύναμης*, *φορά κίνησης* σώματος, *μείωση ταχύτητας* και είναι υποκαταστάτης καθώς έχει διαφορετική σημασία από την «δύναμη» των παιδιών και εξηγεί ένα φαινόμενο που παρουσιάζει σημαντικές δυσκολίες εξήγησης με βάση τις διαισθητικές έννοιες που έχουν διαθέσιμες τα παιδιά κάτω από τον όρο «δύναμη», αφού οι κύριες από αυτές συνδέονται με την διαισθητική ιδέα «η δύναμη έχει την φορά της κίνησης». Δηλαδή, μέσα από την χρήση της συγκεκριμένης δομής υποκαταστάτης, εκφράζεται μια οργανωμένη από τον εκπαιδευτικό υποστήριξη ιδιοανέλιξης του/της μαθητή/μαθήτριας που ξεπερνάει το πλαίσιο του «κάντο τώρα και θα καταλάβεις στην συνέχεια καλύτερα» και μπορεί να εφαρμοστεί στην διδασκαλία της Φυσικής για την αντιμετώπιση περιπτώσεων ασυνεχειών στην πορεία της εννοιολογικής ανάπτυξης (conceptual development) των μαθητών/μαθητριών.

## Μέθοδος

Η παρούσα μελέτη είναι τμήμα του τρίτου κύκλου μιας έρευνας δράσης που διεξήχθη σε τρία τμήματα της Β΄ Γυμνασίου στο μάθημα της Φυσικής, στο γνωστικό πεδίο «Κίνηση και δυνάμεις» σε ένα γυμνάσιο ημιαστικής περιοχής της Ελλάδας. Όλα τα τμήματα πήραν μέρος στο προεπιχειρηματολογικό στάδιο που διήρκεσε το πρώτο τρίμηνο της χρονιάς. Σε αυτό το στάδιο οι μαθητές/μαθήτριες εξοικειώθηκαν με τις αρχές της Διαλογικής Διδασκαλίας σε ομαδικό περιβάλλον, σύμφωνα με το project episteme (Ruthven et al., 2016). Το στάδιο αυτό κρίθηκε απαραίτητο, καθώς η εξοικείωση των μαθητών/μαθητριών με την εργασία σε ομάδες και τις αρχές της Διαλογικής Διδασκαλίας θεωρούνται σημαντικά προαπαιτούμενα για την εφαρμογή της επιχειρηματολογίας. Στο σύνολο των διδακτικών παρεμβάσεων, ο διδάσκων (ένας από τους συγγραφείς) εφάρμοσε διδακτικές προσεγγίσεις “bottom up approach” σε αντίθεση με την κλασική διδακτική προσέγγιση που υιοθετεί διδακτικές πρακτικές «top down» (Chi & VanLehn, 2012). Έγιναν δύο παρεμβάσεις/μαθήματα ανά εβδομάδα με βάση το περιεχόμενο του σχολικού βιβλίου και το αναλυτικό πρόγραμμα (κίνηση και ταχύτητα) ενώ έγινε και συγγραφή διδακτικού υλικού.

Μετά την ολοκλήρωση του προεπιχειρηματολογικού σταδίου ακολούθησε το στάδιο επιχειρηματολογίας με διάρκεια τριών μηνών, στο οποίο έγιναν οι τρεις κεντρικές διδακτικές παρεμβάσεις με διάρκεια μια διδακτικής ώρας ή κάθε μια, όπου οι μαθητές/μαθήτριες εργάστηκαν σε περιβάλλον ομάδας. Σε όλα τα τμήματα ζητήθηκε από τους/τις μαθητές/μαθήτριες να εκφράσουν (γραπτά και προφορικά) τα επιχειρήματά τους, να συμμετάσχουν σε επιχειρηματολογικές συζητήσεις στην ολομέλεια ή σε ομάδες και να δικαιολογήσουν τις επιλογές τους κάνοντας χρήση των επιστημονικών εννοιών. Επιπλέον σε όλα τα τμήματα έγινε ρητή διδασκαλία της επιχειρηματολογίας με χρήση του AMT (Δεδομένα, Εγγυήσεις, Συμπέρασμα) πριν από τις τρεις κεντρικές παρεμβάσεις. Κατά την εργασία σε ομάδες (στις κεντρικές παρεμβάσεις) αξιοποιήθηκαν ΕΕ (εννοιολογικές ερωτήσεις) που προκάλυψαν τις διαισθητικές (intuitive) ιδέες των μαθητών/μαθητριών για την έννοια της δύναμης. Οι ΕΕ αντλήθηκαν από τα ερωτηματολόγια Force Concept Inventory, FCI (Hestenes et al., 1992) και Force and Motion Concept Evaluation, FMCE (Thornton & Sokoloff, 1998) και έργο των ομάδων ήταν η επιλογή της σωστής απάντησης και η κατασκευή επιχειρήματος/δικαιολόγησης αυτής της επιλογής. Σε δύο τμήματα (B2, B3), που αποτέλεσαν την πειραματική ομάδα (ΠΟ) της έρευνας, η γραπτή έκφραση των επιχειρημάτων στηρίχθηκε σε ομαδικά φύλλα εργασίας που αποτύπωναν ένα τεχνούργημα (Σκουμπουρδή, 2021) με βάση τη δομή το AMT (Εικόνα 1), ενώ στο τρίτο τμήμα (B1), που αποτέλεσε την ομάδα ελέγχου (OE), τα φύλλα εργασίας ζητούσαν απλώς τη διατύπωση δικαιολόγησης/επιχειρήματος. Αυτή ήταν και η μόνη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο ομάδων, καθώς κεντρικός στόχος της έρευνας ήταν η μελέτη της επίδρασης από την διαφοροποιημένη υποστήριξη των μαθητών/μαθητριών στην κατασκευή των επιχειρημάτων τους.

**Εικόνα 1.** Φύλλο εργασίας με το τεχνούργημα στη βάση του AMT

Το φύλλο εργασίας συνοδευόταν από μια λίστα από πιθανές εγγυήσεις, που είχαν την μορφή συμπερασματικών κανόνων μονής κατεύθυνσης (inference rules) (Chi & VanLehn, 2012) και είχαν δοθεί σε διαφορετικό φύλλο από το ομαδικό φύλλο εργασίας. Ένα μέρος των εγγυήσεων ήταν ορθό με βάση τη Νευτώνεια Μηχανική, ενώ άλλες συμφωνούσαν με τις διαισθητικές ιδέες των παιδιών. Κατά την διάρκεια των παρεμβάσεων, υπήρχε σε κάθε ομάδα καταγραφικό ήχου που κατέγραφε τις διαλογικές αλληλεπιδράσεις μέσα στην ομάδα, ενώ υπήρχε και κάμερα με ευρυγώνιο φακό που κατέγραφε το σύνολο της τάξης. Για την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε η μικρογενετική ανάλυση μάθησης που παρουσιάζεται παρακάτω. Σημειώνεται τα δεδομένα υποβλήθηκαν και σε άλλες αναλύσεις (ποιοτικές και ποσοτικές) στις οποίες δεν αναφερόμαστε στην παρούσα εργασία.

Στην περίπτωση που παρουσιάζουμε (δεύτερη κεντρική παρέμβαση), οι μαθητές/μαθήτριες μελετούσαν το φαινόμενο της βολής ενός νομίσματος προς τα πάνω, και έπρεπε να εξηγήσουν την μείωση της ταχύτητας του νομίσματος κατά την άνοδο. Παρουσιάζουμε τα αποτελέσματα από την ποιοτική ανάλυση του διαλόγου (διάρκειας τριάντα λεπτών) μιας ομάδας μαθητών/μαθητριών της ΠΟ που αποτελείται από τέσσερα αγόρια με ιδιαίτερα χαμηλή ακαδημαϊκή επίδοση και μειωμένο ενδιαφέρον για το σχολείο. Η ομάδα αυτή παρουσίασε, απροσδόκητα, μία από τις καλύτερες επιδόσεις –σε σχέση με άλλες ομάδες- στην αξιολόγηση της διαλογικής αλληλεπίδρασης (Chi & Menekse, 2015), και πέτυχε σημαντική εννοιολογική βελτίωση με βάση το pre, post ερωτηματολόγιο εννοιολογικής κατανόησης της δύναμης. Θεωρήθηκε λοιπόν ως ιδιαίτερη ευκαιρία για τον εντοπισμό μηχανισμών εννοιολογικής εξέλιξης

με τη βοήθεια της επιχειρηματολογίας. Για την επεξεργασία των διαλογικών αλληλεπιδράσεων στο ομαδικό περιβάλλον αξιοποιήθηκαν οι ηχογραφημένοι διάλογοι, η απομαγνητοφώνηση των διαλόγων, τα γραπτά ομαδικά φύλλα εργασίας, η βιντεοσκοπήση των παρεμβάσεων.

Η ανάλυση έγινε χρησιμοποιώντας τη μικρογενετική ανάλυση μάθησης (Calais, 2008· Parnafes & diSessa, 2013) η οποία χρησιμοποιεί την ΘΕΣ για την ανάλυση της εννοιολογικής πορείας των μαθητών/μαθητριών. Ο βασικός λόγος για την επιλογή της μικρογενετικής ανάλυσης ήταν ότι έχει την δυνατότητα να μελετά, με μεγάλη λεπτομέρεια, τις αλλαγές «εν τω γεννάσθαι», δυνατότητα που δεν την έχουν οι μελέτες με την χρήση ερωτηματολογίων. Η μικρογενετική ανάλυση μάθησης λογαριάζει όχι μόνο την προφορική γλώσσα, αλλά και τις χειρονομίες και τις στάσεις του σώματος για τα νοήματα που αντιλαμβάνονται οι μαθητές/μαθήτριες. Γι' αυτούς τους λόγους, η καταγραφή σε βίντεο θεωρείται μια από τις απαραίτητες προϋποθέσεις και η μικρογενετική ανάλυση κάνει χρήση του βίντεο παρά των τυπικών μεθόδων παρατήρησης (όπως κωδικοποίηση σε προκαθορισμένες κατηγορίες, σημειώσεις πεδίου ή ηχογράφηση προφορικών δεδομένων). Οι δύο συγγραφείς χρησιμοποίησαν εν προκειμένω ερμηνευτικά την ΘΕΣ (diSessa & Sherin, 1998) και τον μηχανισμό της εννοιολογικής ΙΚ (Carey, 2009) προκειμένου να εντοπίσουν τη συμβολή από τη ρητή χρήση του AMT στην εννοιολογική εξέλιξη των μαθητών/μαθητριών. Οι δύο συγγραφείς υλοποίησαν ανεξάρτητα την ανάλυση, ακολουθώντας τις αρχές και τις φάσεις της μεθόδου και στη συνέχεια κατέληξαν σε συγκλίνουσες ερμηνείες.

## Αποτελέσματα

Στην έναρξη της ομαδικής εργασίας οι μαθητές/μαθήτριες έπρεπε να επιλέξουν, χωρίς να δικαιολογήσουν γραπτά, αν υπάρχει δύναμη και ποια είναι η φορά της σε τρία σημεία της τροχιάς του νομίσματος που πετάγεται κατακόρυφα προς τα πάνω, στην άνοδο (φάση 1), στο πιο ψηλό σημείο της τροχιάς (φάση 2) και στην κάθοδο (φάση 3). Η ομάδα επέλεξε στην άνοδο δύναμη με φορά προς τα πάνω, στο ψηλότερο σημείο δύναμη μηδέν και στην κάθοδο δύναμη προς τα κάτω. Στην συνέχεια ασχολήθηκαν με την φάση της ανόδου, όπου έπρεπε να επιχειρηματολογήσουν για την επιλογή τους γραπτά σημειώνοντας στο ομαδικό φύλλο εργασίας (φ.ε.) την κατάλληλη εγγύηση από τις διαθέσιμες στο φύλλο εγγυήσεων.

Στο στάδιο της επιλογής χωρίς γραπτή δικαιολόγηση υπήρξε ζωντανός διάλογος με χειρονομίες, καθώς προκλήθηκαν οι διαισθητικές ιδέες οι οποίες δικαιολογούσαν τις επιλογές του κάθε παιδιού. Σε αυτό το στάδιο εμφανίστηκαν οι p-prims δύναμη σαν αιτία της κίνησης (force as a mover), συνεχής δύναμη (continuous force) και εξασθένιση (dying away) (diSessa, 1993) που εκφράζουν τις διαισθητικές ιδέες πως η δύναμη πρέπει να είναι κατά τη φορά της κίνησης και πως χωρίς δύναμη δεν υπάρχει κίνηση. Στο στάδιο καταγραφής των δεδομένων, η ομάδα αντιμετώπισε δυσκολία, εμφανίστηκαν μεγάλα διαστήματα ησυχίας, δεν υπήρξε ένταση στον διάλογο ενώ τα δεδομένα που προτάθηκαν αντιστοιχούσαν σε ισχυρισμούς κατά Toulmin (π.χ. η δύναμη έχει φορά προς τα πάνω, η δύναμη μειώνεται).

Αυτή η σύγχυση δεδομένων και συμπεράσματος θα μπορούσε να ερμηνευθεί με τη χρήση της προσέγγισης του *impetus* (Halloun & Hestenes, 1985· Hestenes et al., 1992) για τη δύναμη ή το *acquired force* (Ioannides & Vosniadou, 2002) όπου η δύναμη είναι συνοδός και όχι αίτιο της κίνησης και επομένως η δύναμη και η ταχύτητα είναι αδιαφοροποίητες, με αποτέλεσμα να είναι δύσκολο να δομηθεί ένα επιχείρημα με δομή αιτίου αποτελέσματος.

Μετά την καταγραφή των δεδομένων για την φάση της ανόδου ακολούθησε η διαδικασία επιλογής εγγύησης. Στο φύλλο με τη λίστα πιθανών εγγυήσεων υπήρχαν 11 πιθανές εγγυήσεις (ι έως ια), και συχνά στην πορεία του διαλόγου οι μαθητές/μαθήτριες έκαναν αναφορά σε αυτές με τη χρήση του γράμματος που αντιστοιχούσε σε αυτές. Τα αποσπάσματα του διαλόγου που παρατίθενται αναφέρονται στην άνοδο του νομίσματος, που αντιστοιχεί στη φάση 1 (1<sup>ο</sup> ομαδικό φύλλο εργασίας). Η κίνηση του νομίσματος αναλύθηκε σε 3 φάσεις (φάση 1-άνοδος, φάση 2-ψηλότερο σημείο, φάση 3-κάθοδος) και η μελέτη της κάθε φάσης γινόταν σε διαφορετικό ομαδικό φύλλο εργασίας. Ο αριθμός, στην αρχή της σειράς, αναφέρεται στον αριθμό της παρέμβασης στην πορεία του διαλόγου, ενώ τα γράμματα μετά τον αριθμό αναφέρονται στον/στην μαθητή/μαθήτρια που έκανε την αντίστοιχη παρέμβαση (κωδικοί μαθητών/μαθητριών), με το Εκπ. σημαίνει ότι η παρέμβαση έγινε από τον εκπαιδευτικό.

- |     |     |   |
|-----|-----|---|
| 145 | Μχ. | Τώρα στις εγγυήσεις.... (ησυχία...)   |
| 146 | Μρ. | Εγγυήσεις νομίζω από δω πρέπει να βρούμε...<br>(δείχνει το φύλλο εγγυήσεων)   |
| 147 | Μλ. | Ναι..   |
| 148 | Μχ. | Λοιπόν... λοιπόν... διαβάστε λίγο αυτό... με τις εγγυήσεις....<br>και βρείτε κάτι που να ταιριάζει με τη φάση1....  |
| 149 | Μχ. | Γρήγορα ε....!! δεν έχουμε όλη την ώρα μπροστά μας για ένα φυλλάδιο... και έχουμε άλλα δύο να κάνουμε!  |
| 153 | Μχ. | Διαβάστε τώρα τις πιθανές εγγυήσεις... και πείτε κάτι που να κολλάει με αυτό εδώ πέρα... με τη φάση 1 ...   |
| 154 | Μρ. | Για δεξ αυτό που είναι κυκλωμένο... ταιριάζει;...<br>«όταν η συνολική δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα...<br>έχει ίδια φορά με τη ταχύτητα του σώματος τότε<br>η ταχύτητα του σώματος αυξάνει» |

Οι μαθητές/μαθήτριες έχουν κατανοήσει ότι θα πρέπει η εγγύηση να «ταιριάζει» με την κατάσταση που μελετάνε (1η φάση). Προτείνονται η εγγύηση (ια) «Όταν σε ένα σώμα που είναι ακίνητο ασκείται συνολική δύναμη που είναι διάφορη του μηδενός, τότε το σώμα αρχίζει να κινείται προς την κατεύθυνση της δύναμης», και η (στ) «Όταν σε ένα σώμα δεν ασκείται (εξωτερική) δύναμη και το σώμα κινείται τότε το σώμα έχει μια δύναμη μέσα του η οποία το κρατάει σε κίνηση». Και οι δύο προτεινόμενες εγγυήσεις εκφράζουν διαισθητικές

αντιλήψεις. Η πρώτη εστιάζει στην έναρξη της βολής ενώ η δεύτερη στην φάση της ανοδικής πορείας του νομίσματος. Παρατηρούμε ότι οι μαθητές/μαθήτριες δεν αισθάνονται αντίφαση παρατάσσοντας μια κατανόηση της δύναμης όπου κυριαρχεί η αιτιότητα με μια κατανόηση της δύναμης όπου η δύναμη είναι ιδιότητα της κίνησης, δηλαδή συντροφεύει την κίνηση. Αυτό είναι ένδειξη ότι η καθημερινή χρήση της λέξης δύναμη δεν ακολουθεί τους περιορισμούς μιας ΕΣ (στοίχιση) και αρκεί η λέξη να βγάζει νόημα στο εκάστοτε πλαίσιο.

Τελικά καταλήγουν στην (στ). Η (στ) εγγύηση εκφράζει τις p-prim συνεχής δύναμη και εξασθένιση (diSessa, 1993), και «ταιριάζει» με τις στρατηγικές εξαγωγής των μαθητών/μαθητριών κατά ΘΕΣ (diSessa, 1998) για την κατάσταση της ανόδου, όπου «βλέπουν» μια δύναμη που υπάρχει συνεχώς μέσα στο σώμα, στην κατεύθυνση της κίνησης η οποία συνεχώς μειώνεται. Δηλαδή, κάτω από την πίεση της εφαρμογής του AMT που απαιτεί να «ταιριάξουν» τα δεδομένα με την εγγύηση, οι μαθητές/μαθήτριες επιλέγουν μια εγγύηση που μπορεί εύκολα να ερμηνευθεί και μη αιτιακά, ως αναφορά στην «συνοδό» δύναμη που ταιριάζει με τη θεωρία impetus. Η εγγύηση που διάλεξαν δεν είναι επιστημονικά αποδεκτή και παρεμβαίνει ο εκπαιδευτικός. Το απόσπασμα που αναλύεται παρακάτω, ξεκινάει στο σημείο όπου οι μαθητές/μαθήτριες έχουν καταλήξει στην εγγύηση για την άνοδο του νομίσματος και ακολουθεί η παρέμβαση του εκπαιδευτικού.

- 273 Εκπ. Το στ διαλέξατε;... «όταν ένα σώμα κινείται, τότε το σώμα έχει μια δύναμη μέσα του που το κρατάει σε κίνηση»; Αυτό διαλέξατε; .... Πρέπει αυτή η επιλογή που κάνατε να δικαιολογήσει γιατί η ταχύτητα του σώματος άλλαξε όπως άλλαξε...
- 274 Μχ. Ναι...
- 275 Εκπ. Γιατί ανεβαίνοντας αυτό, η ταχύτητα του μειώνεται... άρα αυτή η εσωτερική δύναμη που έχει αυτό μέσα του το κάνει να μειώνεται η ταχύτητα του; ... αυτό λέτε;...
- 276 Μαθητές ...ναι..... (διστακτικά)
- 277 Μρ. Παιδιά, μήπως να βάλουμε τη θ; για διαβάστε τη θ... για διαβάστε τη λίγο... «θ) Όταν η συνολική δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα έχει ίδια φορά με την ταχύτητα του σώματος, τότε η ταχύτητα του σώματος αυξάνεται.»

*(Ένταση στη φωνή του Μρ. Είναι κοντά στο θρανίο, πλησιάζει τον Μχ. και τον κτυπάει μαλακά στο πόδι την ώρα που λέει “για διαβάστε λίγο”).*

Στην π. 273 ο εκπαιδευτικός προσπαθεί να εστιάσει την προσοχή των μαθητών/μαθητριών στην ανάγκη να εξηγηθεί αιτιακά το φαινόμενο της μείωσης της ταχύτητας του νομίσματος «...γιατί η ταχύτητα του σώματος άλλαξε όπως άλλαξε» και αυτό συνεχίζεται στην π. 275 («η εσωτερική δύναμη... το κάνει να μειώνεται η ταχύτητά του») ενώ επιπλέον ο εκπαιδευτικός αναδεικνύει το φαινόμενο της μείωσης της ταχύτητας ως αποτέλεσμα της δύναμης.

Αυτή η παρέμβαση είναι η αφορμή για την εξέλιξη του επεισοδίου εννοιολογικής ιδιοανέλιξης που ακολουθεί. Οι μαθητές/μαθήτριες, απορρίπτουν την αρχική τους επιλογή (που αν και έχει νόημα σε ένα πλαίσιο impetus είναι δύσκολα ερμηνεύσιμη σε ένα πλαίσιο εξωτερικής δύναμης) και οδηγούνται στην επιλογή εγγύησης ώστε να εξηγήσουν το «νέο» φαινόμενο της «μείωσης ταχύτητας» με την χρήση εννοιών που είτε δεν υπάρχουν στο αρχικό εννοιολογικό σύστημα (ΕΣ1), είτε είναι αδιαφοροποιήτες και έχουν επικαλύψεις. Έμμεσα καθοδηγούνται να επιλέξουν μια εγγύηση που να αναφέρεται ρητά σε ένα συγκεκριμένο τρόπο αλλαγής της ταχύτητας όπου: α) η δύναμη αποτελεί το αίτιο για έναν συγκεκριμένο τρόπο αλλαγής της ταχύτητας (έστω και αν η εγγύηση που προτείνεται δεν ταιριάζει με τα δεδομένα της κατάστασης), β) η σύνταξη της εγγύησης ακολουθεί το πλαίσιο της αιτιότητας που προωθεί ο εκπαιδευτικός και γ) η δύναμη δεν «κατέχεται», όπως στην προηγούμενη εγγύηση που προτάθηκε από τους/τις μαθητές/μαθήτριες, αλλά «ασκεύεται» (από μία διαφορετική οντότητα) και παίζει τον ρόλο του «αιτίου» και όχι της «εσωτερικής ιδιότητας».

Στο διάλογο μέχρι αυτή τη στιγμή αναδεικνύεται η ασυμμετρία κατά Carey, όπου οι υπάρχουσες έννοιες του ΕΣ1 δεν είναι σε θέση να εξηγήσουν το φαινόμενο. Στο ΕΣ1 των μαθητών/μαθητριών οι έννοιες «δύναμη», «ταχύτητα», «μεταβολή ταχύτητας» είναι σχετικά αδιαφοροποιήτες, ενώ στο ΕΣ2 της σχολικής γνώσης οι έννοιες «δύναμη», «μεταβολή ταχύτητας» βρίσκονται σε αντίθεση με τις *p-prims* δύναμη ως αίτιο της κίνησης και συνεχής δύναμη, στην συγκεκριμένη περίπτωση της ανόδου του νομίσματος.

Αυτή η ασυμμετρία φαίνεται επίσης και στις επιλογές που έγιναν χωρίς δικαιολόγηση στην αρχή της εργασίας, καθώς και στην αρχική επιλογή εγγυήσεων με την ρητή χρήση του ΜΤ. Είναι χαρακτηριστική η φράση στην π.49 (στάδιο των αρχικών επιλογών χωρίς δικαιολόγηση, αφού ο Μρ. είχε προηγουμένως διατυπώσει την ιδέα ότι η «δύναμη» είναι προς τα κάτω στην άνοδο εξαιτίας της ύπαρξης του βάρους) όπου ο Χρ. δηλώνει με έκπληξη «Πώς γίνεται αυτό; Όταν ανεβαίνει είναι προς τα κάτω (η δύναμη)... και όταν κατεβαίνει είναι πάλι προς τα κάτω;».

Σε αυτήν την φράση θεωρούμε ότι εκφράζεται έντονα η ασυμμετρία του ΕΣ2 με το ΕΣ1 των παιδιών, ενώ μετά από αυτήν την παρέμβαση ο Μρ. δεν επέμεινε στην ιδέα για δύναμη προς τα κάτω στην άνοδο, ενώ οι υπόλοιποι/ες μαθητές/μαθήτριες συμφώνησαν με τον Χρ.

- |     |     |  |
|-----|-----|--|
| 283 | Μρ. | Για δεξ τη (θ) λίγο... γιατί μου φαίνεται ότι αυτή πρέπει να είναι...                      |
| 284 | Μχ. | «όταν η συνολική δύναμη που ασκεύεται σε ένα σώμα...»                                      |
| 285 | Χρ. | Ας βάλουμε τη θ...   |
| 286 | Μχ. | Ποια θ ρε;... όταν είναι στον αέρα....   |
| 287 | Χρ. | Η ταχύτητα αυξάνεται...  |
| 288 | Μχ. | Ναι όμως λέει όταν το νόμισμα ανεβαίνει, όταν το νόμισμα ανεβαίνει η ταχύτητα μειώνεται... |

*(Ένταση στη φωνή, ο Μχ. κοιτάει τα άλλα παιδιά στα πρόσωπα διαδοχικά και ταυτόχρονα κουνάει το χέρι του με το στυλό, όπου στο “ανεβαίνει” κάνει το στυλό προς τα πάνω, ενώ στο “μειώνεται” κινεί το στυλό το χέρι του προς τα κάτω. Τα άλλα παιδιά έχουν πλησιάσει τα σώματα τους στο θρανίο και παρακολουθούν με προσοχή. Είναι από τις πολύ λίγες στιγμές στην ομαδική εργασία που εμφανίστηκε τέτοια ατμόσφαιρα στην ομάδα.)*

21.23 289 Μλ. Το ι... (Όταν η συνολική δύναμη που ασκείται σε ένα σώμα έχει αντίθετη φορά με την ταχύτητα του σώματος, τότε η ταχύτητα του σώματος μειώνεται).

*(Ο Μλ. προτείνει την σωστή εγγύηση, πλησιάζοντας ταυτόχρονα προς το θρανίο και προς τα υπόλοιπα παιδιά. Ο Μλ. είναι μια σιωπηλή παρουσία που δεν πήρε έντονα μέρος στο διάλογο μέχρι τώρα.)*

291 Μχ. Το ι ; που είναι το ι ;  
*(κοιτάει με ενδιαφέρον και έκπληξη τον Μλ.)*

292 Μλ. Κάτω από το θ...

293 Μρ. Το ι πρέπει να είναι ....

294 Μχ. Πω να!!! Μπράβο ρε Μλ.!!  
*(ικανοποίηση, ενθουσιασμός)*

21.34 295 Μρ. Το ι πρέπει να είναι... βάλε χαρτάκι...  
μπροστά σου...

296 Μχ. «όταν η συνολική δύναμη...»

297 Χρ. Ποιο έβαλες;

298 Μχ. Το ι θα βάλουμε...

299 Χρ. Καλά έκανες!

300 Μχ. Γιατί μειώνεται ... όταν ανεβαίνει μειώνεται...

301 Μλ. Όταν ανεβαίνει μειώνεται η ταχύτητα!! και το βάρος τραβάει προς τα κάτω...

*(Όλη η ομάδα “ζωντανεύει” και παρακολουθεί με ενδιαφέρον, η φωνή είναι σταθερή και δηλώνει σιγουριά, ενώ όλα τα παιδιά είναι σύμφωνα με την επιλογή. Η συγκεκριμένη παρέμβαση συμπυκνώνει πετυχημένα την συνολική προσπάθεια και συντονίζει ικανοποιητικά την εγγύηση με τα δεδομένα της κατάστασης. Τέτοια ένταση και ενδιαφέρον στην ομάδα είχε παρουσιαστεί μόνο στο στάδιο των διαισθητικών επιλογών.)*

21.55 302 Μρ. Άντε ρε Μλ.!!

*(επιδοκιμαστικά που βρήκε την εγγύηση, ενθουσιασμός, ικανοποίηση)*

Στην π. 289 ο Μλ, καθοδηγούμενος από τη γλώσσα, προτείνει την εγγύηση που μπορεί να λειτουργήσει συμπερασματικά με τα διαθέσιμα δεδομένα. Στην π. 301, με την οποία ολοκληρώνεται το επεισόδιο ιδιοανέλιξης κατά Κουάϊν (ΙΚ), ο Μλ. όχι μόνο εντοπίζει την σωστή δομή υποκαταστάτη αλλά προχωρά ένα βήμα παραπέρα δίνοντας φυσικό νόημα στη «δύναμη» που προκαλεί τη μείωση της ταχύτητας: αντλεί από άλλα στοιχεία της πρότερης γνώσης του (συμπερασματικό δίκτυο) για να διαπιστώσει ότι το βάρος έχει τα αναγκαία χαρακτηριστικά για τον ρόλο που απαιτεί η εγγύηση. Έτσι με την π. 301 ο γενικός κανόνας που εκφράζει η εγγύηση (όταν η δύναμη έχει αντίθετη φορά με την ταχύτητα τότε η ταχύτητα του σώματος μειώνεται) παίρνει νόημα στην συγκεκριμένη κατάσταση, αν στη θέση της δύναμης βάλουμε την δύναμη του βάρους του νομίσματος.

Στην συγκεκριμένη περίπτωση, η χρήση της εγγύησης λειτούργησε σαν δομή υποκαταστάτη καθώς βοηθάει τους/τις μαθητές/μαθήτριες να εξηγήσουν το φαινόμενο κάνοντας χρήση μιας νέας αντίληψης για την έννοια της δύναμης (η δύναμη προκαλεί και μείωση ταχύτητας) και πετυχαίνοντας μια νέα κατανόηση για την κατάσταση. Η «ίδια» δύναμη (το ίδιο «κάτι») μπορεί να εκδηλώνεται σε αιτιακό πλαίσιο με τελείως αντίθετα δεδομένα/ενδείξεις. Μπορεί να έχουμε αύξηση ταχύτητας (που τη δεχόμαστε εύκολα) ή να έχουμε μείωση ταχύτητας. Σε δυο διαφορετικά πλαίσια οι καίριες ενδείξεις για την παρουσία δύναμης είναι αντίθετες (κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει π.χ. με τις καίριες ενδείξεις εννοιών που εκφράζουν κατηγορίες π.χ. σκύλος ή καρέκλα). Οι μαθητές/μαθήτριες αποκτούν έτσι εμπειρίες αυτού που εμείς αναστοχαστικά ονομάζουμε «εύρος» ή «στοίχιση» της ΕΣ «δύναμη». Όχι μόνο αυξάνει το εύρος εφαρμογής της δύναμης (προβολή της δύναμης σε κατάσταση που έχουμε μείωση ταχύτητας) και έχουμε πετυχημένη στοίχιση καθώς οι μαθητές/μαθήτριες καταλήγουν στην ίδια τελική πληροφορία (η δύναμη του βάρους υπεύθυνη για την μεταβολή της ταχύτητας) σε δύο διαφορετικές καταστάσεις (άνοδο και κάθοδο του νομίσματος), αλλά και αποκτούν εμπειρίες για τις ιδιότητες των ΕΣ. Οι ΕΣ αρχίζουν να αντιδιαστέλλονται στο πλαίσιο της πρακτικής των μαθητών/μαθητριών από άλλου είδους έννοιες: π.χ. έννοιες χρήσιμες σε κατηγοριοποίηση και κατάλληλες για περιγραφές.

## Συζήτηση - Συμπεράσματα

Έχει υποστηριχθεί τα τελευταία χρόνια ότι η χρήση της επιχειρηματολογίας στις ΦΕ όχι μόνο ανταποκρίνεται στη γενικότερη έμφαση για προώθηση των δεξιοτήτων του 21ου αιώνα στις σύγχρονες κοινωνίες και στην ανάγκη επέκτασης του γραμματισμού στις ΦΕ στις πρακτικές που χρησιμοποιούνται από τους επιστήμονες αλλά μπορεί να υποστηρίξει και την βαθύτερη κατανόηση των εννοιών των ΦΕ (Asterhan & Schwarz, 2016· Berland & Hammer, 2012· Driver et al., 2000· Duschl, 2008· NGSS Lead States, 2013· Osborne, 2010· Osborne, Erduran & Simon, 2004· Wang, 2020· Zhang & Browne, 2023). Ωστόσο, δεν έχουν γίνει αρκετές μελέτες που να αναδεικνύουν τους μηχανισμούς μέσα από τους οποίους επιτυγχάνει η επιχειρηματολογία στην εννοιολογική εξέλιξη των μαθητών/μαθητριών. Στην συγκεκριμένη έρευνα εστιάσαμε σε έννοιες της Φυσικής και ιδιαίτερα στην έννοια της δύναμης.

Ο διάλογος τεσσάρων γνωστικά αδύνατων μαθητών/μαθητριών σε ένα έργο επιχειρηματολογίας με θέμα που φέρνει στο προσκήνιο τις διαισθητικές αντιλήψεις των μαθητών/μαθητριών ήταν το «εργαστήριο» στο οποίο παρακολουθήσαμε τους όρους που μπορεί να κάνουν την επιχειρηματολογία αποτελεσματική στην εννοιολογική εξέλιξη. Ελέγξαμε επίσης αν τα θεωρητικά εργαλεία που επιλέξαμε: η ΘΕΣ, η ΙΚ και η προηγούμενη γνώση του χώρου για τις εναλλακτικές ιδέες των μαθητών/μαθητριών για την δύναμη ήταν επαρκή για να παρακολουθήσουμε την εννοιολογική εξέλιξη τους.

Κατ' αρχάς όλες οι επιμέρους θεωρητικές προκείμενες είχαν σημαντική συμβολή στο να παρακολουθήσουμε τον διάλογο, αισθανόμενοι ότι μπορούμε να νοηματοδοτήσουμε τα τεκταινόμενα με τρόπο χρήσιμο για μελλοντική έρευνα και εφαρμογή. Όσον αφορά ειδικότερα στους μηχανισμούς και τις συνθήκες που κάνουν την επιχειρηματολογία αποτελεσματική, αναφορικά με την εννοιολογική βελτίωση, υπάρχουν τόσο προϋποθέσεις όσο και καθαυτό μηχανισμοί.

Στις προϋποθέσεις θα πρέπει να βάλουμε (αν και δεν το παρουσιάσαμε σε αυτή την εργασία), την δημιουργία κλίματος ασφάλειας και εμπιστοσύνης εκ μέρους των μαθητών/μαθητριών για το μάθημα και τον διδάσκοντα (Henderson et al., 2018). Ακόμα και αν η πρόκληση που παρουσιάζεται στους/στις μαθητές/μαθήτριες είναι οικεία από την καθημερινότητα και το ίδιο ισχύει και για την μέθοδο προσέγγισης (επιχειρηματολογία), οι μαθητές/μαθήτριες θα μπορούσαν να μην κινητοποιηθούν είτε επειδή δεν τους φαίνεται συμβατή με τη συνήθη «γραμματική του σχολείου», είτε επειδή φοβούνται απροσδόκητες ή αυθαίρετες δυσκολίες. Το κλίμα ασφάλειας και εμπιστοσύνης είχε ήδη εξασφαλιστεί στην παρούσα παρέμβαση από τα προηγούμενα μαθήματα.

Μια δεύτερη προϋπόθεση, πιο κοντινή στην βασική πρόκληση της εννοιολογικής βελτίωσης στην κατεύθυνση της κατανόησης εννοιών τύπου ΕΣ, μπορεί να είναι η επιλογή θέματος στο οποίο η αντίστοιχη καθημερινή έννοια εφαρμόζεται σπάνια. Με τον τρόπο αυτό όχι μόνο εκτείνεται το εύρος της έννοιας αλλά και οι μαθητές/μαθήτριες αποκτούν εμπειρίες που χαρακτηρίζουν έννοιες τύπου ΕΣ: έχουν εκτεταμένο εύρος που καλύπτει διαφορετικά πλαίσια και όπου ενεργοποιούνται διαφορετικές στρατηγικές εξαγωγής (έτσι αναδεικνύεται η σημασία της στοίχισης). Στη δική μας περίπτωση στην άνοδο αποτελεί βασική πληροφορία για εξαγωγή η μείωση της ταχύτητας, ενώ στην κάθοδο βασική πληροφορία για εξαγωγή είναι το ακριβώς αντίθετο, η αύξηση της ταχύτητας.

Από εκεί και πέρα η επιχειρηματολογία μπορεί να είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική αν στηριχθεί με καλά επιλεγμένα τεχνουργήματα (στην περίπτωση μας η οπτικοποίηση του ΑΜΤ). Αυτή είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος, αφού συχνά οι εκπαιδευτικοί θεωρούν ότι η πολύ καλή εξήγηση που θα δώσουν προφορικά, έχοντας κατανείμει την ύλη σε μικρά κομμάτια αρκεί. Μέσα από την έρευνά μας προσδιορίσαμε χαρακτηριστικά που κάνουν τέτοια τεχνουργήματα «κατάλληλα»:

1. Η εκμετάλλευση της αναλογίας ανάμεσα στον τρόπο εργασίας και σκέψης που υποβάλλει το τεχνούργημα και τη δομή των εννοιών που θέλουμε να διδάξουμε. Στην περίπτωσή

μας θέλαμε να διδάξουμε έννοιες ΕΣ. Επιλέγοντας ένα τεχνούργημα που αποτύπωνε τα δομικά στοιχεία του επιχειρήματος, δώσαμε στους μαθητές/μαθήτριες ένα εργαλείο όπου βρισκόταν έμμεσα εκφρασμένη η δομική αναλογία ανάμεσα στο δίκτυο συμπερασμού της επιχειρηματολογίας (Δεδομένα-Εγγυήσεις-Ισχυρισμός) και στο δίκτυο συμπερασμού της ΕΣ (Στρατηγικές Εξαγωγής-Αιτιακό Δίκτυο-Τελική Πληροφορία).

2. Ο τονισμός των σημαντικών ειδών σχέσεων για τις έννοιες που διδάσκουμε. Χρησιμοποιώντας κανόνες μονής κατεύθυνσης στο φύλλο εγγυήσεων αναδείξαμε τις αιτιακές σχέσεις, που είναι κεντρικές για τις ΕΣ, και διευκολύναμε την οικειοποίησή τους από τους/τις μαθητές/μαθήτριες. Επίσης, η αναζήτηση για σύνδεση εγγύησης-δεδομένων ενεργοποιεί διαδικασίες οικοδόμησης ΕΣ (αύξηση εύρους, βελτίωση στρατηγικών εξαγωγής, εκτόπιση, αλλαγές στο συμπερασματικό δίκτυο).
3. Η παρουσίαση διαισθητικών ιδεών στο σχολικό πλαίσιο (εδώ στο φύλλο εγγυήσεων) και κατά συνέπεια η ελευθερία των μαθητών/μαθητριών να δουλέψουν με αυτές. (Το φύλλο εγγυήσεων περιείχε εκφράσεις που εξέφραζαν διαισθητικές ιδέες με τρόπο όμως που ωθούσε προς αιτιακούς συλλογισμούς).

Έτσι, μέσα από την προσαρμογή του τεχνουργήματος στις ανάγκες του μαθησιακού έργου και της ενσωμάτωσης του στην δραστηριότητα κατασκευής του επιχειρήματος, το συγκεκριμένο τεχνούργημα μετατράπηκε σε εργαλείο (Σκουμπουρδή, 2012).

Όσον αφορά τον ρόλο του εκπαιδευτικού στην συγκεκριμένη παρέμβαση, σημειώνουμε ότι πέρα από τον σχεδιασμό των κατάλληλων έργων, κάνει αξιοποίηση του τεχνουργήματος σαν εργαλείο σημειωτικής διαμεσολάβησης ώστε να διαχειριστεί τα εγκαθιδρυμένα κείμενα (ασαφείς προτάσεις, χειρονομίες κ.λπ.) που παράγουν οι μαθητές/μαθήτριες (με την χρήση του τεχνουργήματος) και μέσα από την αλληλεπίδραση με τους/τις μαθητές/μαθήτριες, συμβάλλει στην εξέλιξη αυτών των κειμένων προς τις επιστημονική γνώση (Σκουμπουρδή, 2012). Ο εκπαιδευτικός θα πρέπει να κατανοεί τη στόχευση των τεχνουργημάτων, ώστε να καθιστά εμφανή εκείνα τα στοιχεία τους που οι μαθητές/μαθήτριες θα μπορούσαν να προσπεράσουν. Για παράδειγμα η παρέμβαση του εκπαιδευτικού, που δίνει την αφορμή για την έναρξη επεισοδίου ιδιοανέλιξης, βοηθάει ώστε οι μαθητές/μαθήτριες να εστιάσουν στα: «ταχύτητα», «αύξηση ταχύτητας», «μείωση ταχύτητας», που αποτελούν έννοιες που υπάρχουν στο ΕΣ1 των μαθητών/μαθητριών. Αυτό φαίνεται στις παρεμβάσεις 287, 288 όπου οι μαθητές/μαθήτριες πλέον αναφέρονται στην έννοια «ταχύτητα» και όχι στην έννοια «δύναμη» για τις ίδιες καταστάσεις (άνοδο, κάθοδο νομίσματος) όπου έκαναν χρήση της «δύναμης».

Σε όλη αυτή την προσπάθεια ερμηνείας, διαπιστώσαμε την ευχέρεια που μας έδινε τόσο η ΘΕΣ όσο και η ΙΚ να παρακολουθήσουμε την πορεία της εννοιολογικής βελτίωσης των μαθητών/μαθητριών. Η παρακολούθηση αυτή ξεκινούσε από τη γνώση των καθημερινών τρόπων σκέψης των μαθητών/μαθητριών για τη δύναμη, κάτι που επιτεύχθηκε χάρη στην προηγούμενη εκτεταμένη έρευνα άλλων ερευνητών σε αυτό τον χώρο. Στη συνέχεια η ΘΕΣ δημιούργησε ένα «σύστημα συντεταγμένων» μέσα από το οποίο μπορούσαμε να παρακολουθήσουμε τόσο την εμφάνιση των στοιχείων εκείνων που είναι καθοριστικά για μια ΕΣ,

όσο και αλλαγές στην κατεύθυνση της εννοιολογικής βελτίωσης: την τελική χρήση της δύναμης στο πλαίσιο μείωσης της ταχύτητας με σαφή διάκριση αιτίου (δύναμη) και αποτελέσματος (μείωση ταχύτητας) και την ταύτιση της δύναμης, που είναι το αίτιο, με το βάρος του νομίσματος.

Η εννοιολογική ΙΚ από τη μεριά της, μας επέτρεψε να διακρίνουμε τις δομές υποκαταστατών και να παρακολουθήσουμε τη λειτουργικότητά τους για τη μάθηση της δύναμης. Η ΙΚ είναι ένας μηχανισμός που μπορεί να στηρίξει μεταγνωστικές εμπειρίες με έντονο συγκινησιακό χαρακτήρα, όπως φαίνεται από τις εκφράσεις των παιδιών στο video, όσο και από τις εκφράσεις του Μχ. (σ. 294-302) όπου επιδοκιμάζεται έντονα η πρόταση του Μλ., ενώ όλα τα μέλη συμφωνούν με αυτήν την πρόταση.

Συμπερασματικά, στη συγκεκριμένη περίπτωση, η ρητή χρήση του ΜΤ σε ένα ομαδικό διαλογικό περιβάλλον, που ενθάρρυνε την έκφραση διαισθητικών ιδεών για την δύναμη, οδήγησε στην εκδήλωση της εννοιολογικής ασυνέχειας μεταξύ καθημερινών ιδεών των μαθητών/μαθητριών και της επιστημονικής έννοιας για την δύναμη. Η ασυμμετρία μεταξύ των δύο συστημάτων αντιμετωπίστηκε με την εμφάνιση μηχανισμού ΙΚ. Η ΙΚ αναπτύχθηκε μέσα από την παρότρυνση του διδάσκοντα για την χρήση του ΑΜΤ ως εργαλείου κατασκευής επιχειρήματος και με την αξιοποίηση προτεινόμενων εγγυήσεων τύπου συμπερασματικών κανόνων μονής κατεύθυνσης που έπαιξαν τον ρόλο δομής υποκαταστάτη. Η προσπάθεια των μαθητών/μαθητριών, να βγάλουν νόημα στις συγκεκριμένες συνθήκες, οδήγησε στην επιλογή και το συνδυασμό διαισθήσεων για τη δύναμη που είναι περισσότερο συμβατές με την επιστημονική έννοια και τελικά στην εμφάνιση στοιχείων εννοιολογικής βελτίωσης σύμφωνα με την ΘΕΣ που ήταν: αλλαγές στις στρατηγικές εξαγωγής των μαθητών/μαθητριών, αλλαγές στο αιτιακό δίκτυο (εκτόπιση της «δύναμης» από την «ταχύτητα», διαφοροποίηση της έννοιας «μεταβολή ταχύτητας») και βελτίωση της στοίχισης.

Πέρα από τους περιορισμούς που τίθενται εξαιτίας του χαρακτήρα της έρευνας (έρευνα δράσης, περιορισμένο δείγμα), θεωρούμε ότι θετικές επιδράσεις, στην εννοιολογική εξέλιξη των μαθητών/μαθητριών, θα απέφερε η εκμετάλλευση των αναστοχαστικών δυνατοτήτων που προσφέρουν οι μεταγνωστικές εμπειρίες των μαθητών/μαθητριών, που επιτυγχάνονται με τη μεθοδολογία που αναφέραμε. Θεωρούμε επίσης ότι, ενδιαφέροντα αποτελέσματα θα απέφερε η συνέχιση της έρευνας, με εφαρμογή παρόμοιας μεθοδολογίας και σε άλλα θέματα φυσικής, ώστε να δημιουργηθεί μια δεξαμενή εμπειριών των μαθητών/μαθητριών για κατοπινές, περισσότερο αναστοχαστικές δράσεις που θα προωθούν μεταεννοιολογική επίγνωση (metaconceptual awareness).

## Βιβλιογραφία

Ασλανίδης, Θ. (2021). *Οι στάσεις και οι πεποιθήσεις των μαθητών/μαθητριών της α' λυκείου των δημόσιων σχολείων της Κύπρου απέναντι στο μάθημα και την επιστήμη της φυσικής*

- [Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης (ΑΠΘ), Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Φυσικής]. <https://doi.org/10.12681/eadd/50024>
- Γκικοπούλου, Ο. (2013). *Εννοιολογική αλλαγή στις φυσικές επιστήμες* (Doctoral dissertation, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Σχολή Θετικών Επιστημών. Τμήμα Μεθοδολογίας, Ιστορίας και Θεωρίας της Επιστήμης). <https://doi.org/10.12681/eadd/43476>
- Γκριτζιος, Β. (2011). *Συνεχιζόμενη εκπαίδευση των εκπαιδευτικών και διδασκαλία: Η διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των επιστημολογικών πεποιθήσεων για τη διδασκαλία και μάθηση και της διδακτικής πράξης* (Doctoral dissertation, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ). Τμήμα Παιδαγωγικό Δημοτικής Εκπαίδευσης). <https://doi.org/10.12681/eadd/30273>
- ΙΕΠ. (2022). *Πρόγραμμα σπουδών του μαθήματος της φυσικής των ά', β' και γ' τάξεων γυμνασίου* (2022). <https://iep.edu.gr/el/nea-ps-provoli>
- Σκουμπουρδή, Χ. (2012). Σχεδιασμός ένταξης υλικών και μέσων στη μαθηματική εκπαίδευση των μικρών παιδιών. *Εκδόσεις Πατάκη, Αθήνα*.
- Τζιμογιάννης, Α., & Σιορέντα, Α. (2007). Παράγοντες που καθορίζουν τις στάσεις των καθηγητών Φυσικών Επιστημών για τις ΤΠΕ στη διδασκαλία τους. Στο Α. Κατοίκης, Κ. Κώτσης, Α. Μικρόπουλος & Γ. Τσαπαρλής (Επιμ.) *Πρακτικά 5ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Διδακτικής Φυσικών Επιστημών και Νέες Τεχνολογίες στην Εκπαίδευση (τεύχος Γ')*, (σ. 939-949), Πανεπιστήμιο Ιωαννίνων, 15-18 Μαρτίου 2007.
- Χαλκιά, Κ. (1995). *Οι Έλληνες εκπαιδευτικοί της α/θμιας και της β/θμιας εκπαίδευσης απέναντι στο μάθημα της φυσικής. Διερεύνηση των απόψεων και των στάσεων των ελλήνων εκπ/κων που διδάσκουν φυσική, μελέτη των συνεπειών τους στην εκπαιδευτική διαδικασία και διατύπωση σχετικών προτάσεων* [Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (ΕΚΠΑ), Τμήμα Παιδαγωγικό Δημοτικής Εκπαίδευσης]. <https://doi.org/10.12681/eadd/5342>
- Apa dictionary of psychology*. (n.d.). Retrieved May 29, 2024, from <https://dictionary.apa.org/>
- Asterhan, C. S. C., & Schwarz, B. B. (2016). Argumentation for learning: Well-trodden paths and unexplored territories. *Educational Psychologist*, 51(2), 164–187. <https://doi.org/10.1080/00461520.2016.1155458>
- Barth-Cohen, L. A., & Wittmann, M. C. (2017). Aligning coordination class theory with a new context: Applying a theory of individual learning to group learning. *Science Education*, 101(2), 333–363. <https://doi.org/10.1002/sc.21264>
- Bell, P., & Linn, M. C. (2000). Scientific arguments as learning artifacts: Designing for learning from the web with KIE. *International Journal of Science Education*, 22(8), 797–817. <https://doi.org/10.1080/095006900412284>

- Berland, L. K., & Hammer, D. (2012). Framing for scientific argumentation. *Journal of Research in Science Teaching*, 49(1), 68–94. <https://doi.org/10.1002/tea.20446>
- Berland, L. K., & Reiser, B. J. (2009). Making sense of argumentation and explanation. *Science Education*, 93(1), 26–55. <https://doi.org/10.1002/sce.20286>
- Berland, L. K., & Russ, R. S. (2017). Conceptual change through argumentation. In T. G. Amin & O. Levrini (Eds.), *Converging Perspectives on Conceptual Change* (1st ed., pp. 180–189). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315467139-22>
- Buteler, L., & Coleoni, E. (2016). Solving problems to learn concepts, how does it happen? A case for buoyancy. *Physical Review Physics Education Research*, 12(2), 020144. <https://doi.org/10.1103/PhysRevPhysEducRes.12.020144>
- Boğar, Y. (2019). Synthesis study on argumentation in science education. *International Education Studies*, 12(9), 1. <https://doi.org/10.5539/ies.v12n9p1>
- Carey, S. (2009). *The origin of concepts*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780195367638.001.0001>
- Carey, S. (2011). Précis of *The Origin of Concepts*. *Behavioral and Brain Sciences*, 34(3), 113–124. <https://doi.org/10.1017/S0140525X10000919>
- Calais, G. D. (2008). Microgenetic analysis of learning: Measuring change as it occurs. In *National Forum of Applied Educational Research Journal* (Vol. 21, No. 3, pp. 1-7). <http://www.nationalforum.com/Electronic%20Journal%20Volumes/Calais,%20Gerald%20J%20Microgenetic%20Analysis%20of%20Learning.pdf>
- Chi, M. T. H. (2009). Active-constructive-interactive: A conceptual framework for differentiating learning activities. *Topics in Cognitive Science*, 1(1), 73–105. <https://doi.org/10.1111/j.1756-8765.2008.01005.x>
- Chi, M. T. H., & VanLehn, K. A. (2012). Seeing deep structure from the interactions of surface features. *Educational Psychologist*, 47(3), 177–188. <https://doi.org/10.1080/00461520.2012.695709>
- Chi, M. T. H., & Menekse, M. (2015). Dialogue patterns in peer collaboration that promote learning. In L. B. Resnick, C. S. C. Asterhan, & S. N. Clarke (Eds.), *Socializing Intelligence Through Academic Talk and Dialogue* (pp. 263–274). American Educational Research Association. [https://doi.org/10.3102/978-0-935302-43-1\\_21](https://doi.org/10.3102/978-0-935302-43-1_21)
- Chinn, C. A., & Clark, D. B. (2013). Learning through collaborative argumentation. In C. E. Hmelo-Silver, C. A. Chinn, A. M. O'Donnell, & C. K. Chan (Eds.), *The international handbook of collaborative learning* (pp. 314-332). Routledge, Taylor & Francis Group.
- Christodoulou, A., & Osborne, J. (2014). The science classroom as a site of epistemic talk: A case study of a teacher's attempts to teach science based on argument: THE SCIENCE CLASSROOM AS A SITE OF EPISTEMIC TALK. *Journal of Research in Science Teaching*, 51(10), 1275–1300. <https://doi.org/10.1002/tea.21166>

- diSessa, A. A. (1993). Toward an epistemology of physics. *Cognition and Instruction*, 10(2–3), 105–225. <https://doi.org/10.1080/07370008.1985.9649008>
- diSessa, A. A., & Sherin, B. L. (1998). What changes in conceptual change? *International Journal of Science Education*, 20(10), 1155–1191. <https://doi.org/10.1080/0950069980201002>
- diSessa, A. A., & Wagner, J. F. (2005). What coordination has to say about transfer. In J. Mestre (Ed.), *Transfer of learning from a modern multi-disciplinary perspective* (pp. 121–154). Greenwich, CT: Information Age Publishing. ISBN 13: 9781607526735
- diSessa, A. A., Sherin, B., & Levin, M. (2016). Knowledge analysis: An introduction. In A. A. diSessa, M. Levin, & N.J.S. Brown (Eds.), *Knowledge and interaction: A synthetic agenda for the learning sciences*, (pp. 30–71). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315757360>
- Driver, R., Asoko, H., Leach, J., Mortimer, E., & Scott, P. (1994). Constructing scientific knowledge in the classroom. *Educational Researcher*, 23(7), 5. <https://doi.org/10.2307/1176933>
- Driver, R., Newton, P., & Osborne, J. (2000). Establishing the norms of scientific argumentation in classrooms. *Science Education*, 84(3), 287–312. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-237X\(200005\)84:3<287::AID-SCE1>3.0.CO;2-A](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-237X(200005)84:3<287::AID-SCE1>3.0.CO;2-A)
- Duschl, R. A. (2008). Science education in three-part harmony: Balancing conceptual, epistemic, and social learning goals. *Review of Research in Education*, 32(1), 268–291. <https://doi.org/10.3102/0091732X07309371>
- Duschl, R. A., Ellenbogen, K., & Erduran, S. (1999). *Promoting argumentation in middle school science classrooms: A project sepia evaluation*. For full text: <https://eric.ed.gov/?id=ED453050>
- Erduran, S. (2007). Methodological foundations in the study of argumentation in science classrooms. In S. Erduran & M. P. Jiménez-Aleixandre (Eds.), *Argumentation in Science Education* (Vol. 35, pp. 47–69). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6670-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6670-2_3)
- Erduran, S., Simon, S., & Osborne, J. (2004). TAPPING into argumentation: Developments in the application of Toulmin’s Argument Pattern for studying science discourse. *Science Education*, 88(6), 915–933. <https://doi.org/10.1002/sce.20012>
- Halloun, I. A., & Hestenes, D. (1985). The initial knowledge state of college physics students. *American Journal of Physics*, 53(11), 1043–1055. <https://doi.org/10.1119/1.14030>
- Hammer, D. (1994). Epistemological beliefs in introductory physics. *Cognition and Instruction*, 12(2), 151–183. [https://doi.org/10.1207/s1532690xci1202\\_4](https://doi.org/10.1207/s1532690xci1202_4)

- Henderson, J. B., McNeill, K. L., González-Howard, M., Close, K., & Evans, M. (2018). Key challenges and future directions for educational research on scientific argumentation. *Journal of Research in Science Teaching*, 55(1), 5–18. <https://doi.org/10.1002/tea.21412>
- Hestenes, D., Wells, M., & Swackhamer, G. (1992). Force concept inventory. *The Physics Teacher*, 30(3), 141–158. <https://doi.org/10.1119/1.2343497>
- Ioannides, C., & Vosniadou, S. (2002). The changing meanings of force. *Cognitive science quarterly*, 2(1), 5–62. ISSN 1466□6553.
- Jimoyiannis, A., & Komis, V. (2003). Investigating Greek students' ideas about forces and motion. *Research in Science Education*, 33(3), 375–392. <https://doi.org/10.1023/A:1025457116654>
- Jiménez-Aleixandre, M. P., Bugallo Rodríguez, A., & Duschl, R. A. (2000).?Doing the lesson? Or ?doing science?: Argument in high school genetics. *Science Education*, 84(6), 757–792. [https://doi.org/10.1002/1098-237X\(200011\)84:6<757::AID-SCE5>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/1098-237X(200011)84:6<757::AID-SCE5>3.0.CO;2-F)
- Kuhn, D. (2010). Teaching and learning science as argument. *Science Education*, 94(5), 810–824. <https://doi.org/10.1002/sce.20395>
- Levrini, O., & diSessa, A. A. (2008). How students learn from multiple contexts and definitions: Proper time as a coordination class. *Physical Review Special Topics - Physics Education Research*, 4(1). <https://doi.org/10.1103/PhysRevSTPER.4.010107>
- McNeill, K. L., Lizotte, D. J., Krajcik, J., & Marx, R. W. (2006). Supporting students' construction of scientific explanations by fading scaffolds in instructional materials. *Journal of the Learning Sciences*, 15(2), 153–191. [https://doi.org/10.1207/s15327809jls1502\\_1](https://doi.org/10.1207/s15327809jls1502_1)
- Millar, R., Osborne, J., & Nott, M. (1998). Science education for the future. *School Science Review*, 80(291), 19–24. ISSN 0036□6811.
- Ministry of Education, P. R. China. (2017). *Physics curriculum standards for senior high school*. People's Education Press. <http://en.moe.gov.cn/>
- Next generation science standards: For states, by states*. (2013). National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/18290>
- Osborne, J. (2010). Arguing to learn in science: The role of collaborative, critical discourse. *Science*, 328(5977), 463–466. <https://doi.org/10.1126/science.1183944>
- Osborne, J., Borko, H., Busch, K. C., Fishman, E., Million, E., & Tseng, A. (2016, April 8–12). Developing and using an instrument to assess the dialectical potential of whole-class discussions in teaching science. In *Annual Meeting of the American Educational Research Association (AERA), Washington, DC*. ISSN 0163-9676
- Osborne, J., Erduran, S., & Simon, S. (2004). Enhancing the quality of argumentation in school science. *Journal of Research in Science Teaching*, 41(10), 994–1020. <https://doi.org/10.1002/tea.20035>

- Osborne, J. F., Borko, H., Fishman, E., Gomez Zaccarelli, F., Berson, E., Busch, K. C., Reigh, E., & Tseng, A. (2019). Impacts of a practice-based professional development program on elementary teachers' facilitation of and student engagement with scientific argumentation. *American Educational Research Journal*, 56(4), 1067–1112.  
<https://doi.org/10.3102/0002831218812059>
- Osborne, J., Simon, S., Christodoulou, A., Howell-Richardson, C., & Richardson, K. (2013). Learning to argue: A study of four schools and their attempt to develop the use of argumentation as a common instructional practice and its impact on students. *Journal of Research in Science Teaching*, 50(3), 315–347. <https://doi.org/10.1002/tea.21073>
- Papakonstantinou, M., & Skoumios, M. (2021). Analysis of greek middle-school science textbooks about forces and motion from the perspective of three-dimensional learning. *Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education*, 17(12), em2039.  
<https://doi.org/10.29333/ejmste/11309>
- Parnafes, O., & diSessa, A. A. (2013). Microgenetic learning analysis: A methodology for studying knowledge in transition. *Human Development*, 56(1), 5–37.  
<https://doi.org/10.1159/000342945>
- Russ, R. S., Scherr, R. E., Hammer, D., & Mikeska, J. (2008). Recognizing mechanistic reasoning in student scientific inquiry: A framework for discourse analysis developed from philosophy of science. *Science Education*, 92(3), 499–525.  
<https://doi.org/10.1002/sce.20264>
- Ruthven, K., Mercer, N., Taber, K. S., Guardia, P., Hofmann, R., Ilie, S., ... Riga, F. (2016). A research-informed dialogic-teaching approach to early secondary school mathematics and science: The pedagogical design and field trial of the *episteme* intervention. *Research Papers in Education*, 32(1), 18–40. <https://doi.org/10.1080/02671522.2015.1129642>
- Sampson, V., & Clark, D. B. (2008). Assessment of the ways students generate arguments in science education: Current perspectives and recommendations for future directions. *Science Education*, 92(3), 447–472. <https://doi.org/10.1002/sce.20276>
- Stathopoulou, C., & Vosniadou, S. (2007). Exploring the relationship between physics-related epistemological beliefs and physics understanding. *Contemporary Educational Psychology*, 32(3), 255–281. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2005.12.002>
- Thornton, R. K., & Sokoloff, D. R. (1998). Assessing student learning of newton's laws: The force and motion conceptual evaluation and the evaluation of active learning laboratory and lecture curricula. *American Journal of Physics*, 66(4), 338–352.  
<https://doi.org/10.1119/1.18863>
- Toulmin, S. E. (2003). *The uses of argument* (2nd ed.). Cambridge University Press.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511840005>

- Wang, J. (2020). Scrutinising the positions of students and teacher engaged in argumentation in a high school physics classroom. *International Journal of Science Education*, 42(1), 25–49. <https://doi.org/10.1080/09500693.2019.1700315>
- Zaitchik, D., Solomon, G. E. A., Tardiff, N., & Bascandziev, I. (2016). Conceptual change. In D. Barner & A. S. Baron (Eds.), *Core Knowledge and Conceptual Change* (pp. 73–88). Oxford University Press.  
<https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780190467630.003.0005>
- Zhang, J., & Browne, W. J. (2023). Exploring Chinese high school students' performance and perceptions of scientific argumentation by understanding it as a three-component progression of competencies. *Journal of Research in Science Teaching*, 60(4), 847–884. <https://doi.org/10.1002/tea.21819>