

Μια Διδακτική Μαθησιακή Ακολουθία για την Εισαγωγή της Σωματιδιακής Φυσικής στο Λύκειο

Στυλιανή Κλαυδιανού¹, Αναστάσιος Μολοχίδης²

¹Εκπαιδευτικός Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης, Υποψήφια Διδάκτωρ,

²Αναπληρωτής Καθηγητής,

Εργαστήριο Διδακτικής της Φυσικής και Εκπαιδευτικής Τεχνολογίας,

Τμήμα Φυσικής, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

¹sklafdia@physics.auth.gr

Περίληψη

Η εισαγωγή θεμάτων της σύγχρονης φυσικής στο λύκειο είναι ένα από τα ζητούμενα στη Διδακτική της Φυσικής μιας και υπάρχουν έρευνες που δείχνουν ότι η ενσωμάτωσή της στα προγράμματα σπουδών αυξάνει το ενδιαφέρον των μαθητών. Η Σωματιδιακή Φυσική αποτελεί βασικό κομμάτι της σύγχρονης φυσικής και η εισαγωγή της στο λύκειο μέσω μιας Διδακτικής Μαθησιακής Ακολουθίας έχει ως στόχο να γεφυρώσει την κλασική και την σύγχρονη φυσική.

Λέξεις κλειδιά: Διδακτική μαθησιακή ακολουθία (ΔΜΑ), σύγχρονη φυσική, φυσική στοιχειωδών σωματιδίων.

A Teaching Learning Sequence for the Introduction of Particle Physics at High School

Styliani Klavdianou¹, Anastasios Molohidis²

¹Science Teacher, PhD Candidate, ²Associate Professor,

Laboratory of Didactics of Physics and Educational Technology,

School of Physics, Aristotle University of Thessaloniki

¹sklafdia@physics.auth.gr

Abstract

The introduction of issues of modern physics in high school is an objective in Didactics of Physics since there are studies showing that the integration of modern physics' issues into curricula increases students' interest. Particle Physics is a key part of modern physics and its introduction in high school through a Teaching Learning Sequence aims to bridge classical and modern physics.

Keywords: modern physics, elementary particle physics, teaching Learning Sequence (TLS)

Εισαγωγή

Η εισαγωγή της σύγχρονης φυσικής στην εκπαίδευση, και ο συνεπακόλουθος διδακτικός μετασχηματισμός που απαιτείται, αποτελεί ένα καίριο ερευνητικό ερώτημα στην διδακτική της φυσικής (Michellini et al, 2015´ Polen, 2019). Μελέτες προτείνουν την ενσωμάτωση εννοιών της σύγχρονης φυσικής στη διδασκαλία της Φυσικής, για τη βελτίωση της μάθησης και αύξηση του ενδιαφέροντος για την επιστήμη (Bertozzi et al., 2013´ Polen, 2019). Στη βιβλιογραφία, μάλιστα, αναφέρονται κοινές δυσκολίες, όπως πχ. στην εισαγωγή θεμάτων της σωματιδιακής φυσικής και της κβαντικής φυσικής, η κατανόηση φαινομένων που υπερβαίνουν τις αισθήσεις, η μετάβαση από τη ντετερμινιστική αντίληψη της κλασικής

φυσικής στην πιθανολογική φύση της κβαντικής/σωματιδιακής φυσικής καθώς και η εξειδικευμένη ορολογία (Bouchée et al., 2023).

Η σωματιδιακή φυσική (ΣΦ) αποτελεί βασικό κεφάλαιο της σύγχρονης φυσικής. Ωστόσο, στα περισσότερα προγράμματα σπουδών της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης η διδασκαλία της ΣΦ περιορίζεται σε θεωρίες του 19ου και αρχών 20ού αιώνα και πιο συγκεκριμένα στην δομή της ύλης, χωρίς αναφορά στο Καθιερωμένο Μοντέλο της Φυσικής Σωματιδίων (Kranjc Horvat et al., 2022). Έρευνες προτείνουν διάφορες προσεγγίσεις για την εισαγωγή της ΣΦ στη σχολική εκπαίδευση. Ο Polen (2019) χρησιμοποίησε δραστηριότητες με βίντεο για επιταχυντές και το CERN. Ο Dahlkemper με τους συνεργάτες του (2022) εισήγαγαν τα διαγράμματα Feynman και ο Gourlay (2017) πρότεινε τη χρήση «εννοιολογικών χαρτών» που δημιουργήθηκαν από ειδικούς. Όλες οι παραπάνω εργασίες συγκλίνουν ότι δραστηριότητες που εμπεριέχουν θέματα ΣΦ αποτελούν πρόκληση και ευκαιρία για να αυξηθεί το ενδιαφέρον των μαθητών για την φυσική. Επίσης, οι Tuzón και Solbes (2016) εντόπισαν σημαντικές γνωστικές ελλείψεις σε μαθητές Λυκείου σχετικά με τη δομή της ύλης και τις δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων.

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της εφαρμογής της διδακτικής μαθησιακής ακολουθίας (ΔΜΑ) σχετικά με την εισαγωγή της σωματιδιακής φυσικής σε μαθητές λυκείου. Τα ερευνητικά ερωτήματα είναι τα ακόλουθα: 1. Ποιες ήταν οι κατάλληλες τροποποιήσεις που έπρεπε να γίνουν για τη βελτίωση της ΔΜΑ ώστε να γίνει πιο αποτελεσματική με βάση τα εμπειρικά δεδομένα που συλλέχτηκαν και 2. Ποια ήταν η επίδραση αυτών των αλλαγών στις αρχικές γνώσεις των μαθητών, μετά την ολοκλήρωση της εμπλοκής τους με το προς τούτοις σχεδιασμένο υλικό.

Μεθοδολογία

Βασικοί άξονες της μεθοδολογίας είναι ο σχεδιασμός, η ανάπτυξη, η υλοποίηση και η αξιολόγηση, μέσω επαναληπτικών εφαρμογών μιας Διδακτικής Μαθησιακής Ακολουθίας (ΔΜΑ) (Psillos & Kariotoglou, 2016). Οι ΔΜΑ αποτελούν διδακτικές παρεμβάσεις μεσαίας κλίμακας (δηλ. 6 -12 ωρών) και δομούνται πάνω σε δύο διαστάσεις, την ερευνητική και την διδακτική, με στόχο την παραγωγή ενός παραδοτέου (Meheut & Psillos, 2004). Συνεπώς για να δημιουργηθεί, να εφαρμοστεί και να αξιολογηθεί η ΔΜΑ θα πρέπει στο τελικό παραδοτέο να έχει ενσωματωθεί τόσο το εννοιολογικό πεδίο όσο το επιστημολογικό και πειραματικό, πριν εισέλθει στη διαδικασία της επαναληψιμότητας (iteration).

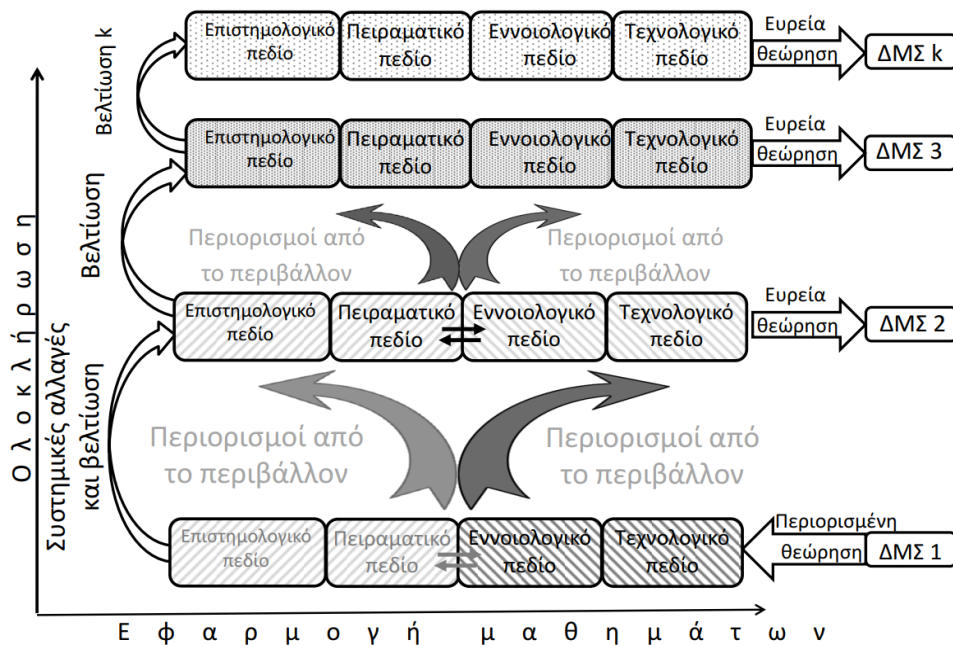
Η ανάπτυξη του εννοιολογικού πυλώνα της Διδακτικής Μαθησιακής Ακολουθίας (ΔΜΑ) βασίζεται στο μοντέλο της Διδακτικής Επανοικοδόμησης ή Εκπαιδευτικής Αναδόμησης (MER - Model of Educational Reconstruction) (Duit, 2007). Το μοντέλο MER επικεντρώνεται στην ανάλυση του περιεχομένου, στις εμπειρικές έρευνες και στην ανάπτυξη και αξιολόγηση της διδασκαλίας, δίνοντας έμφαση στον μαθητή, στον δάσκαλο και στη δυναμική αλληλεπίδρασή τους στην τάξη. Οι διδακτικές παρεμβάσεις της ΔΜΑ σχεδιάστηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις προϋπάρχουσες γνώσεις των μαθητών, όπως αυτές ορίζονται στο αναλυτικό πρόγραμμα σπουδών, τις εναλλακτικές αντιλήψεις των μαθητών σε θέματα μικρής κλίμακας, καθώς και ποιες γνωστικές διεργασίες είναι κατάλληλες για την ηλικία τους. Στόχος ήταν η επανοικοδόμηση των επιστημονικών εννοιών της σωματιδιακής φυσικής και η παρουσίασή τους με τρόπο παιδαγωγικά προσιτό και εύκολα κατανοητό.

Ακολουθώντας το μοντέλο DOIES (Model for a Domain Oriented Iterative Evolution of a TLS)(Psillos et al, 2016), ένα μοντέλο για μια συνεχώς εξελισσόμενη ΔΜΑ (Εικόνα 1), έχουν ήδη ολοκληρωθεί οι συστημικές αλλαγές και βελτιώσεις της αρχικής διδακτικής παρέμβασης και έχουν αντιμετωπιστεί οι περιορισμοί από το περιβάλλον. Η παρούσα εργασία βρίσκεται στο επίπεδο της ΔΜΣ 2 και τα αποτελέσματα της ΔΜΣ 1 καθώς και της ΔΜΣ 2 αναλύονται παρακάτω.

Τα φύλλα εργασίας είναι βασισμένα στις προϋπάρχουσες γνώσεις των μαθητών και η θεματολογία τους είναι τέτοια ώστε να μπορεί να κατανοηθεί από τους μαθητές και να μπορεί

να υποστηριχθεί από τους εκπαιδευτικούς. Επίσης, οι δραστηριότητες εμπειρείχαν πολλαπλές αναπαραστάσεις.

Εικόνα 1. Μοντέλο για μια συνεχώς εξελισσόμενη Διδακτική και Μαθησιακή Ακολουθία (ΔΜΑ)



Πηγή: A Model for a Domain Oriented Iterative Evolution of a TLS, DOIES (Psillos et al., 2016)

Η ΔΜΑ αποτελείται από επτά (7) ολοκληρωμένες διδακτικές παρεμβάσεις και οι τίτλοι είναι (i) Διδακτική παρέμβαση για το size scale, (ii) Διδακτική παρέμβαση για το πείραμα Rutherford, (iii) Διδακτική παρέμβαση για τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων & την εισαγωγή στο καθιερωμένο πρότυπο, (iv) Διδακτική παρέμβαση για το πώς ανακαλύφθηκαν τα υπόλοιπα στοιχειώδη σωματίδια, (v) Διδακτική παρέμβαση με τα διαγράμματα Feynman, (vi) Παρουσίαση των ανιχνευτών σωματιδίων, (vii). Διδακτική παρέμβαση με τον ανιχνευτή PIXET. Οι έξι διδακτικές παρεμβάσεις ήταν ολοκληρωμένα διδακτικά σενάρια ενώ η μια παρέμβαση ήταν διαδραστική παρουσίαση από την εκπαιδευτικό (vi).

Το σύνολο των φύλλων εργασίας εντάσσονται στην διερευνητική μάθηση χρησιμοποιώντας διαφορετικές στρατηγικές και παιδαγωγικά μέσα.

Η αξιολόγηση της διδακτικής μαθησιακής ακολουθίας γίνεται με τη χρήση του ερωτηματολογίου των Tuzón & Solbes (2016) όπως αυτό έχει ήδη εγκυροποιηθεί από επιστήμονες του γνωστικού αντικείμενου (Polít & Beck, 2006). Τα ερωτηματολόγια δόθηκαν πριν την εφαρμογή της κάθε ΔΜΑ και στην συνέχεια ξαναδόθηκαν δύο εβδομάδες μετά την ολοκλήρωσή της κάθε μίας.

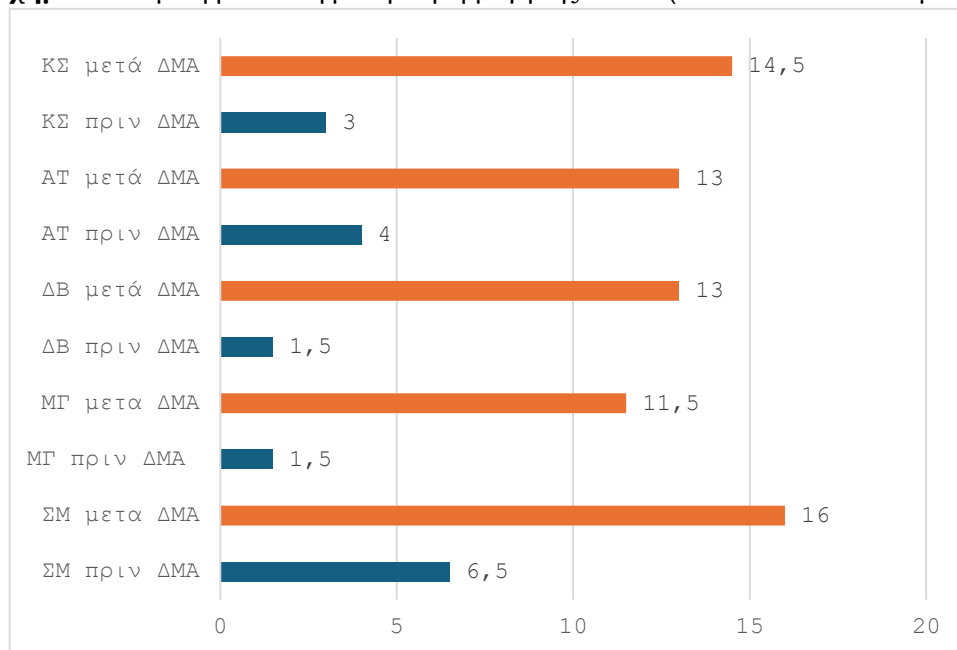
Οι διδακτικές παρεμβάσεις υλοποιούνται στο πλαίσιο του ομίλου Φυσικής του Λυκείου, με τη συμμετοχή μαθητών από την Α' και Β' τάξη. Κατά το προηγούμενο σχολικό έτος, η Διδακτική Μαθησιακή Ακολουθία (ΔΜΑ) εφαρμόστηκε στο σύνολό της σε πιλοτικό επίπεδο. Μετά την αρχική αυτή εφαρμογή, πραγματοποιήθηκαν τροποποιήσεις και βελτιστοποιήσεις, τόσο ως προς τη δομή και τη διαδοχή των παρεμβάσεων, όσο και ως προς το περιεχόμενο των φύλλων εργασίας. Κατά την τρέχουσα σχολική χρονιά, εφαρμόστηκε η αναθεωρημένη εκδοχή της (ΔΜΑ1) σε μία πρώτη ομάδα μαθητών, από την οποία προέκυψαν τα αρχικά ερευνητικά δεδομένα. Η ανάλυση των δεδομένων αυτών ανέδειξε συγκεκριμένες αδυναμίες και ασάφειες, οδηγώντας σε περαιτέρω αναπροσαρμογές σε επιλεγμένα φύλλα εργασίας, με στόχο την βελτίωση της αποτελεσματικότητας των παρεμβάσεων. Η τελική, αναθεωρημένη εκδοχή

(ΔΜΑ2) εφαρμόστηκε σε δεύτερη, ανεξάρτητη ομάδα μαθητών, προκειμένου να αξιολογηθεί η εγκυρότητα και η αξιοπιστία της.

Αποτελέσματα

Η ανάλυση των απαντήσεων των συμμετεχόντων πριν και μετά την ΔΜΑ1 έγινε σε ατομικό επίπεδο (Σχήμα 1) και σε συνολικό επίπεδο (Σχήμα 2) και έδειξε σημαντική βελτίωση στο επίπεδο γνώσης των μαθητών σε θέματα ΣΦ. Ενδεικτικά κάποια αποτελέσματα σε ατομικό επίπεδο παρουσιάζονται στο σχήμα 1. Αρκετοί μαθητές παρουσίασαν σταθερή βελτίωση ενώ ορισμένοι περιορισμένη, που αυτό μπορεί να οφείλεται είτε στην ανάγκη βελτίωσης της ΔΜΑ σε ορισμένα σημεία, είτε σε μαθησιακές δυσκολίες που προϋπάρχουν από την πλευρά κάποιων μαθητών.

Σχήμα 1. Ατομική βελτίωση με την εφαρμογή της ΔΜΑ1 (ενδεικτικά αποτελέσματα)



Αποτελέσματα σε συνολικό επίπεδο παρουσιάζονται στον σχήμα 2, με την παρουσίαση κάποιων ενδεικτικών ερωτήσεων του ερωτηματολογίου. Για την συνολική αξιολόγηση υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε ερώτηση πριν και μετά, καθώς και έλεγχος σημαντικότητας μέσω *paired samples t-test*. Για όλες τις ερωτήσεις, παρατηρήθηκε αύξηση στη μέση βαθμολογία μετά την παρέμβαση, ενώ οι τιμές *p-value* ήταν μικρότερες από 0,05, υποδεικνύοντας ότι οι διαφορές είναι στατιστικά σημαντικές.

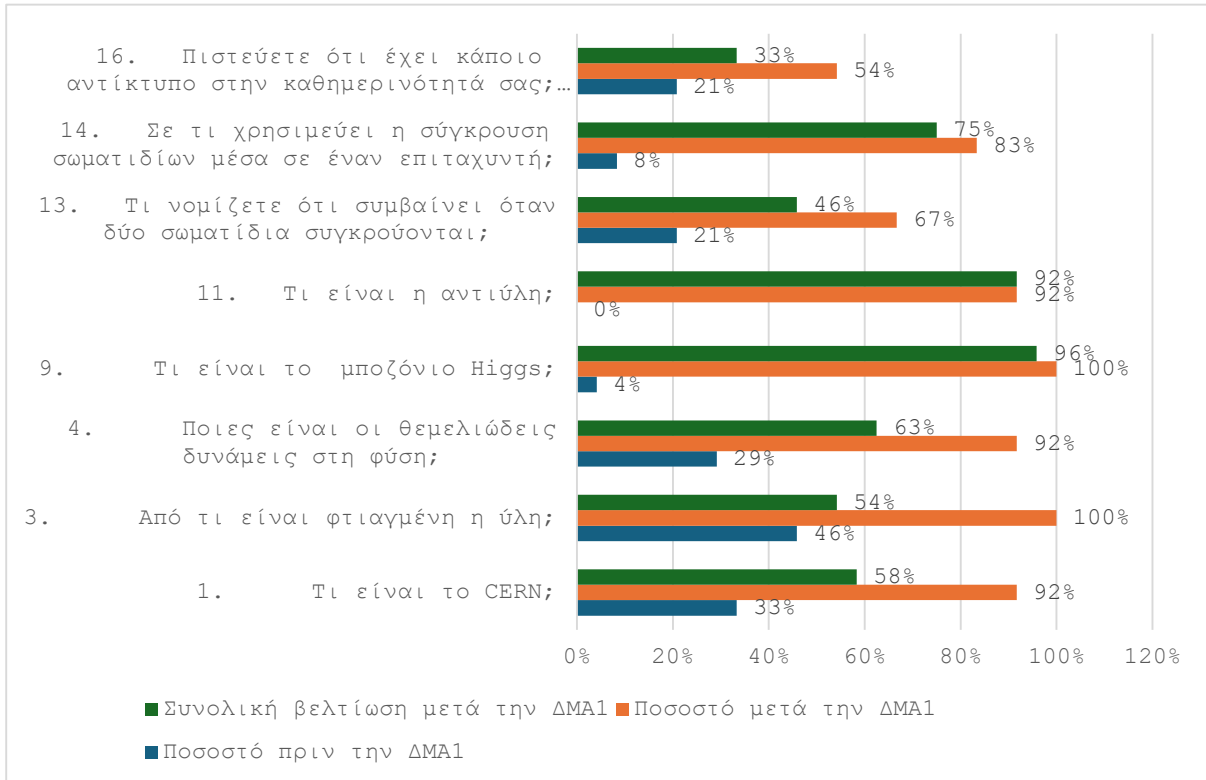
Ενδεικτικά αποτελέσματα είναι:

- Στην Ερ. 1 (Τι είναι το CERN;), η μέση τιμή αυξήθηκε από 0,41 σε 0,88, (*p-value* < ,001).
- Στην Ερ.3 (Από τι είναι φτιαγμένη η ύλη;), αύξηση από 0,38 σε 0,96, (*p-value* < ,001).
- Στην Ερ. 4 (Ποιες δυνάμεις υπάρχουν στην φύση;), αύξηση από 0,25 σε 0,88, (*p-value* < ,001).
- Στην Ερ. 13 (Τι συμβαίνει όταν δύο σωματίδια συγκρούονται;), αύξηση από 0,29 σε 0,63, (*p-value* < ,001).

Η ανάλυση δείχνει ότι η εκπαιδευτική παρέμβαση είχε θετικό αντίκτυπο στη βελτίωση των γνώσεων των συμμετεχόντων σε θέματα σωματιδιακής φυσικής.

Τα πρώτα αποτελέσματα εφαρμογής της ΔΜΑ1 έδειξαν εμφανή βελτίωση των γνώσεων και της κατανόησης των μαθητών σε θέματα ΣΦ. Αν και παρατηρούνται βελτιώσεις σε όλες τις ερωτήσεις παρουσιάζεται ανομοιομορφία ως προς τα ποσοστά βελτίωσης.

Σχήμα 2. Συνολική βελτίωση με την εφαρμογή της ΔΜΑ1 (ενδεικτικά αποτελέσματα)



Διαφαίνεται να υπάρχει σημαντική επίδραση, ιδιαίτερα στις πιο εξειδικευμένες ερωτήσεις όπως «Τι είναι το μποζόνιο Higgs;» και «Τι είναι η αντιύλη;», όπου τα ποσοστά των μαθητών πριν την εφαρμογή της ΔΜΑ1 ήταν εξαιρετικά χαμηλά λόγω της περιορισμένης γνώσης τους για αυτά. Σχετικά με την αντιύλη και το μποζόνιο Higgs υπάρχει αντιπροσωπευτικό υλικό στις διδακτικές παρεμβάσεις (iii), (iv) και (v). Οι αναφορές σχετικά με την αντιύλη ήταν σχετικά περιορισμένες και έγινε αναπροσαρμογή ώστε να προστεθούν επιπλέον στοιχεία στην αναθεωρημένη εκδοχή της. Οι ερωτήσεις που αφορούσαν τη γενική γνώση ή την καθημερινότητα παρουσίασαν μικρότερη σχετική βελτίωση. Αυτό οφείλεται σε δύο λόγους: αφενός, σε ορισμένες ερωτήσεις, όπως «Τι είναι το CERN;», τα αρχικά ποσοστά των σωστών απαντήσεων ήταν ήδη σχετικά υψηλά, καθώς οι μαθητές είχαν προϋπάρχουσες γνώσεις. Αφετέρου, ορισμένες ερωτήσεις ενδέχεται να ήταν πιο αφηρημένες ή δυσκολότερες να συνδεθούν με τις πληροφορίες που αντλήθηκαν από τις δραστηριότητες όπως η ερώτηση «Πιστεύετε ότι η έρευνα στην σωματιδιακή φυσική έχει κάποιο αντίκτυπο στην καθημερινότητά σας; Μπορείτε να αναφέρετε κάποιο παράδειγμα;». Στις ερωτήσεις του τύπου αυτού δεν υπήρχαν ξεκάθαρες δραστηριότητες και για τον λόγο αυτό θεωρήθηκε αναγκαία η αναπροσαρμογή της ΔΜΑ1.

Αφού έγιναν οι απαραίτητες αναπροσαρμογές και οι βελτιώσεις της ΔΜΑ1, όπως αυτές παρουσιάζονται στον πίνακα 1, προέκυψε η ΔΜΑ2.

Τα αποτελέσματα μετά την εφαρμογή της επιβεβαιώνουν εκ νέου τη σημαντική βελτίωση των γνώσεων των μαθητών. Τα αποτελέσματα αναλύθηκαν και σε αυτή την εφαρμογή σε ατομικό και συνολικό επίπεδο όπως φαίνεται στα σχήματα 3 και 4 αντίστοιχα.

Διαφαίνεται οι μαθητές που συμμετείχαν στην ΔΜΑ2 να έχουν πλησιάσει πολύ κοντά στην μέγιστη απόδοση (16) και να έχουν αρκετά μεγάλη απόκλιση από τις αρχικές τους επιδόσεις.

Πίνακας 1. Τροποποιήσεις σχετικά με την κατανόηση (conceptual) από την ΔΜΑ1 στην ΔΜΑ2

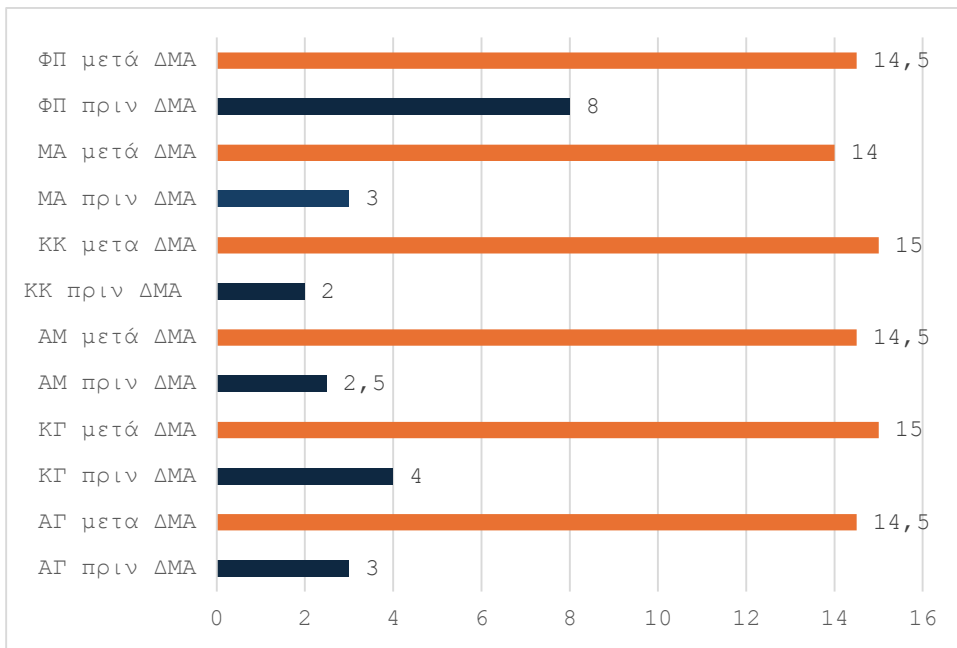
Φύλλα Εργασίας	Τεκμηρίωση της τροποποίησης	Λόγοι και πηγή δεδομένων
Φύλλο Εργασίας 2	Τροποποίηση ερωτήσεων και εισαγωγή στήλης σε πίνακα συμπλήρωσης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι υπήρχαν λάθη σε απαντήσεις στο ερωτηματολόγιο μετά την εισαγωγή στις πυρηνικές δυνάμεις.	Αναδιατύπωση και η ενίσχυση της επαναληπτικότητας των ερωτήσεων που αφορούν τη δύναμη Coulomb στο φύλλο, με σκοπό την εμπέδωση από τους μαθητές ότι οι δυνάμεις που επικρατούν εκτός του πυρήνα είναι οι ηλεκτροστατικές
Φύλλο Εργασίας 3	Αλλαγή του περιεχομένου και δραστηριότητες	
	Προστέθηκε νέο περιεχόμενο σχετικά με τα αντισωματίδια και την επικινδυνότητα τους. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι οι απαντήσεις στο ερωτηματολόγιο είχαν βελτίωση αλλά όχι μεγάλη σε σχέση με άλλες ερωτήσεις. Επίσης, δεν υπήρχε αρκετό υλικό σχετικά με τα αντισωματίδια στις δραστηριότητες.	Η δραστηριότητα περιλαμβάνει μικρής διάρκειας βίντεο από το YouTube, που σκοπό είχαν να βοηθήσουν τους μαθητές να κατανοήσουν την έννοια των αντισωματιδίων, τη σχέση τους με τα αντίστοιχα σωματίδια ύλης, καθώς και τη διαδικασία της εξαΰλωσης. Με τα βίντεο, οι μαθητές προβληματίζονται σχετικά με τη δημιουργία των αντισωματιδίων, την ασυμμετρία ύλης-αντιύλης στο σύμπαν, και ανακαλύπτουν εφαρμογές στην τεχνολογία, όπως η ιατρική απεικόνιση PET SCAN
Φύλλο Εργασίας 6	Αλλαγή του περιεχομένου	
	Διαδραστική παρουσίαση προκειμένου να ενισχυθεί η συμμετοχικότητα των μαθητών.	Προστέθηκε νέο περιεχόμενο σχετικά με τους ανιχνευτές και η παρουσίαση έγινε πιο διαδραστική. Γίνεται χρήση αναλογιών και διερευνητικών ερωτημάτων που οδηγούν σε συζήτηση. Υπάρχουν οπτικές αναπαραστάσεις για καλύτερη κατανόηση.
Φύλλο Εργασίας 7	Αλλαγή του περιεχομένου και δραστηριότητες	
	Από την εφαρμογή θεωρήθηκε απαραίτητη η επαναδιατύπωση κάποιων ερωτήσεων και η προσθήκη ερωτήσεων αξιολόγησης.	Αναδιατύπωση ερωτήσεων και προσθήκη ερωτηματολογίου σε μορφή κουίζ για την αξιολόγηση της δραστηριότητας

Σε συνολικό επίπεδο αξιολογήθηκαν οι μέσοι όροι και οι τυπικές αποκλίσεις για κάθε ερώτηση, καθώς και η στατιστική σημαντικότητα των διαφορών μέσω paired samples t-test. Οι μέσες τιμές μετά την παρέμβαση αυξήθηκαν σημαντικά σε σχέση με τις αρχικές τιμές, ενώ όλα τα p -values ήταν πολύ μικρότερα από 0,05, καταδεικνύοντας στατιστικά σημαντικές διαφορές.

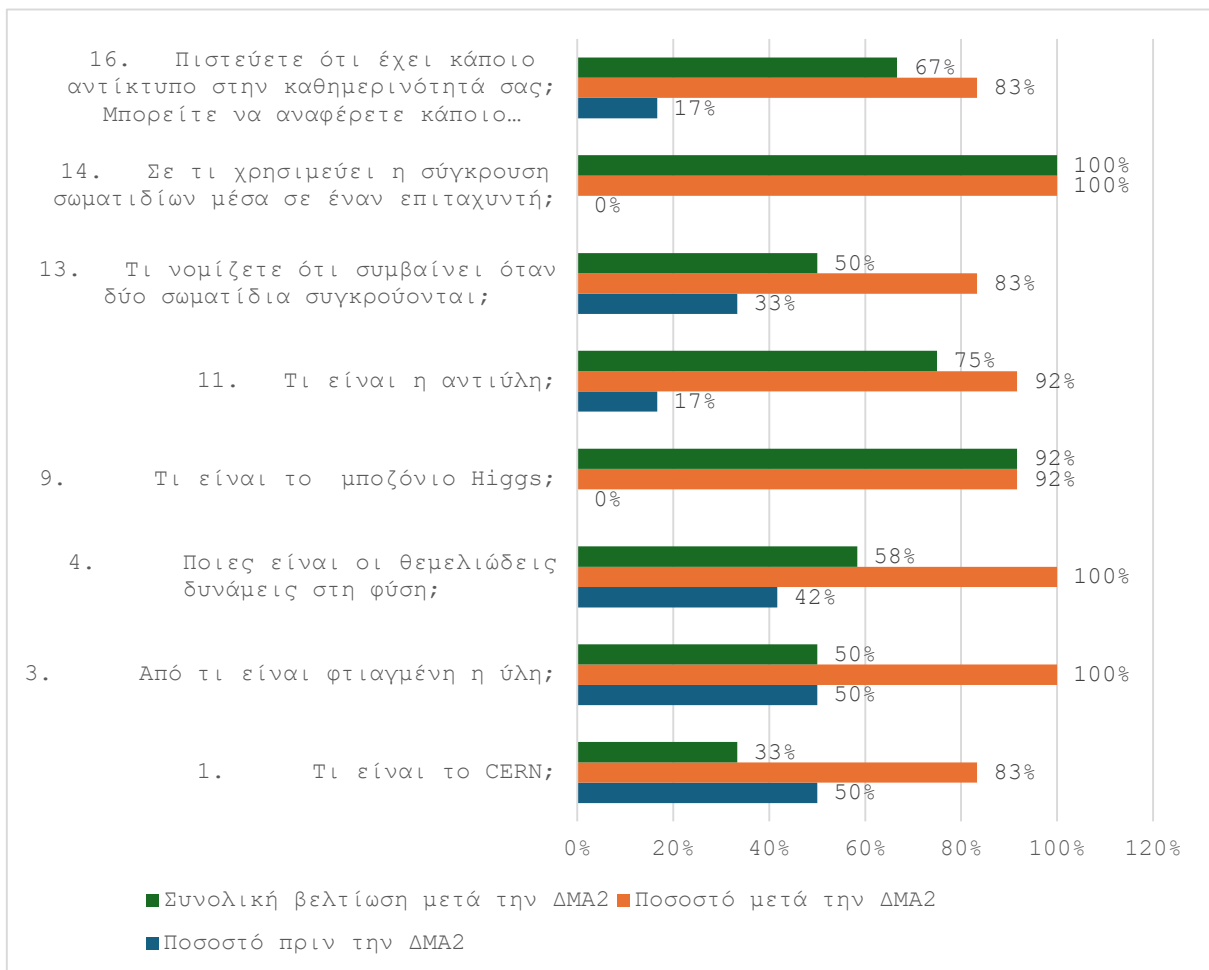
Ενδεικτικά αποτελέσματα είναι:

- Στην Ερ. 1 (Τι είναι το CERN;), η μέση τιμή αυξήθηκε από 0,50 σε 0,83 (p -value < ,001).
- Στην Ερ. 3 (Από τι είναι φτιαγμένη η ύλη;), αύξηση από 0,50 σε 1,00 (p -value < ,001).
- Στην Ερ. 4 (Ποιες δυνάμεις υπάρχουν στην φύση;), αύξηση από 0,42 σε 1,00 (p -value < ,001).
- Στην Ερ. 13 (Τι συμβαίνει όταν δύο σωματίδια συγκρούονται;), αύξηση από 0,44 σε 0,83 (p -value < ,001).

Σχήμα 3. Ατομική βελτίωση με την εφαρμογή της ΔΜΑ2



Σχήμα 4. Συνολική βελτίωση με την εφαρμογή της ΔΜΑ2



Τα αποτελέσματα αυτά ενισχύουν την άποψη ότι η ΔΜΑ2 συνέβαλε ουσιαστικά στην ενίσχυση των γνώσεων των συμμετεχόντων πάνω σε θέματα φυσικής υψηλών ενεργειών και σωματιδίων.

Συμπεράσματα

Και οι δύο ΔΜΑ είχαν θετικό και σαφώς μετρήσιμο αντίκτυπο στη γνώση των συμμετεχόντων με την ΔΜΑ2 να εμφανίζει ελαφρώς μεγαλύτερη αύξηση στις μέσες τιμές και ακόμα μικρότερες τιμές p -value, γεγονός που υποδηλώνει ότι ήταν πιο αποτελεσματική ως προς την κατανόηση των εννοιών. Ωστόσο, τα αποτελέσματα και από τις δύο ομάδες δείχνουν ότι η διδακτική προσέγγιση ήταν σαφώς επιτυχής, οδηγώντας σε σημαντική αύξηση της κατανόησης πάνω σε σύνθετα επιστημονικά θέματα σωματιδιακής φυσικής.

Βιβλιογραφία

- Bertozzi, E., Levrini, O., & Rodriguez, M., (2013). Symmetry as Core-idea for Introducing Secondary School Students to Contemporary Particle Physics. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 116, 679-685. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.279>
- Bouchée, T., Thurlings, M., de Putter - Smits, L., & Pepin, B. (2023). Investigating teachers' and students' experiences of quantum physics lessons: opportunities and challenges. *Research in Science and Technological Education*, 41(2), 777-799. <https://doi.org/10.1080/02635143.2021.1948826>
- Dahlkemper M.N., Klein P., Müller A., Schmeling S.M., Wiener J. (2022) Opportunities and Challenges of Using Feynman Diagrams with Upper Secondary Students. *Physics*, 4(4), 1331–1347. <https://doi.org/10.3390/physics4040085>
- Duit, R. (2007). Science education research internationally: Conceptions, research methods, domains of research. *EURASIA Journal of Mathematics, Science and Technology Education* 3(1), pp 3-15. <https://doi.org/10.12973/ejmste/75369>
- Gourlay, H. Learning about A level physics students' understandings of particle physics using concept mapping. *Physics Education*, 52 (1), 014001. <https://doi.org/10.1088/1361-6552/52/1/014001>
- Kranjc Horvat, A., Wiener, J., Schmeling, S.M., Borowski, A. (2022) What Does the Curriculum Say? Review of the Particle Physics Content in 27 High-School Physics Curricula. *Physics*, 4(4), 1278-1298. <https://doi.org/10.3390/physics4040082>
- Meheuet, M., & Psillos, D. (2004). Teaching – Learning sequences: Aims and tools for science education research. *International Journal of Science Education, Special Issue*, 26(5), 515–535. <https://doi.org/10.1080/09500690310001614762>
- Michelini, M., Santi, L., & Stefanel, A. (2015) Teaching modern physics in secondary schools. *Proceedings, 14th International Symposium Frontiers of Fundamental Physics (FFP14)*. <https://doi.org/10.22323/1.224.0231>
- Polen, C. (2019). Particle Physics: An Essential and Engaging Part of the High School Physics Program. *The Physics Teacher*, 57(5), pp 320. <https://doi.org/10.1119/1.5098922>
- Polit, D. F., & Beck, C. T. (2006). The content validity index: Are you sure you know what's being reported? Critique and recommendations. *Research in Nursing & Health*, 29(5), 489–497. <https://doi.org/10.1002/nur.20147>
- Psillos, D., & Kariotoglou, P. (2016). Theoretical Issues related to Designing and Developing Teaching – Learning Sequences. Στο D. Psillos, P. Kariotoglou (Επιμ.), *Iterative Design of Teaching - Learning Sequences*, 11-34. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7808-5_2
- Psillos, D., Molohidis A., Kallery M., & Hatzikraniotis E. (2016). The Iterative Evolution of a Teaching Learning Sequence on the Thermal Conductivity of Materials. Στο D. Psillos, P. Kariotoglou (Επιμ.), *Iterative Design of Teaching - Learning Sequences*, σσ. 287-329. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7808-5_11
- Tuzón P. & Solbes J. (2016). Particle Physics in High School: A Diagnose Study. *PLoS ONE* 11(6): e0156526 <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156526>