

ΟΙ ΝΟΗΤΙΚΕΣ ΠΑΡΑΣΤΑΣΕΙΣ ΤΩΝ ΜΑΘΗΤΩΝ ΤΗΣ Β' ΛΥΚΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΔΙΑΒΑΤΙΚΗ ΣΥΜΠΙΕΣΗ

Καλλιόπη Μέλη¹, Δημήτρης Κολιόπουλος¹, Κώστας Λαβίδας¹, Γιώργος Παπαλεξίου²

¹ΤΕΕΑΠΗ, Πανεπιστήμιο Πατρών

²Δευτεροβάθμια Εκπαίδευση

Περίληψη

Η παρούσα έρευνα αναφέρεται στις νοητικές παραστάσεις που έχουν οι μαθητές της Β' Λυκείου για εισαγωγικές έννοιες της θερμοδυναμικής και ειδικά για τον πρώτο θερμοδυναμικό νόμο (ΠΘΝ), επικεντρώνοντας στις εξηγήσεις που παρέχουν μετά από την πραγματική αναπαράσταση μιας αδιαβατικής συμπίεσης. Τα κυριότερα αποτελέσματα ήταν πως η πλειονότητα αξιοποιεί εναλλακτικά εννοιολογικά πλαίσια, δηλαδή ο ΠΘΝ απαξιώνεται ιδιαίτερα και εστιάζουν στη φαινομενολογία. Επιπλέον στις απαντήσεις τους περιλαμβάνονται συνήθως δύο ή τρεις κατηγορίες εξηγήσεων, οι οποίες πιθανά οφείλονται στα ποικίλα εννοιολογικά πλαίσια που οι μαθητές διδάσκονται.

Abstract

The present study refers to second year upper secondary school students' conceptions on elementary thermodynamics and especially the First Law of Thermodynamics (FLT), focusing on their explanations of a real situation representing an adiabatic compression. The main results were that the majority utilized alternative frameworks, namely FLT was highly disregarded and they focused on the phenomenology of the situation. Additionally, their replies most commonly fall into two or three justification categories, probably because of the various conceptual frameworks the students have been taught.

1. Εισαγωγή

Η θερμοδυναμική συνιστά μια γενική ενεργειακή θεωρία, που διδάσκει τη διαφοροποίηση των μορφών ενέργειας και διευκρινίζει τις συνθήκες και τα όρια για τη μετατροπή τους κατά τα φυσικά φαινόμενα και τις τεχνικές διεργασίες (Baehr 2007). Ο πρώτος θερμοδυναμικός νόμος (ΠΘΝ) είναι θεμέλιος λίθος για τη θεωρία αυτή, καθώς εκφράζει τη διατήρηση της ενέργειας και η αδιαβατική συμπίεση ενός ιδανικού αερίου συνιστά μια περίπτωση εφαρμογής του.

Τα παραπάνω αποτελούν μέρος των όσων διδάσκονται στην ενότητα της θερμοδυναμικής τόσο στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση όσο και στα πανεπιστήμια στα εισαγωγικά μαθήματα του πρώτου έτους. Ειδικά για τους φοιτητές, αρκετές είναι οι έρευνες που εξετάζουν πώς αυτοί αντιλαμβάνονται τα φυσικά φαινόμενα που εμπíπτουν στον ΠΘΝ και ποια εναλλακτικά πλαίσια προτείνουν για την ερμηνεία τους (Kautz et al. 2005, Leinonen et al. 2012, Leinonen, et al. 2009, Loverude et al. 2002, Rozier et al. 1991). Από την άλλη μεριά, ανάλογες εργασίες για μαθητές είναι σχεδόν ανύπαρκτες, καθώς στο επίπεδο αυτό οι ερευνητές εστιάζουν σε πιο βασικά ζητήματα όπως πχ στη διαφορά θερμοκρασίας και θερμότητας (Σκουμιός & Χατζηνικήτα 2000, Arnold & Millar 1994, Erickson 1979, Kesidou & Duit 1993). Σκοπός της παρούσας έρευνας είναι να επεκτείνει το πεδίο προβληματισμού για τη δευτεροβάθμια εκπαίδευση και να εξετάσει τις νοητικές παραστάσεις των μαθητών της

Β' Λυκείου για την αδιαβατική συμπίεση.

Υπόψη χρειάζονται να ληφθούν τα αποτελέσματα των ερευνών για τις νοητικές παραστάσεις των φοιτητών διότι, αφενός, η εισαγωγική θερμοδυναμική που διδάσκεται στα πανεπιστήμια είναι παρόμοια με τα μαθήματα θερμοδυναμικής της Θετικού Προσανατολισμού της Β' Λυκείου, και, αφετέρου, οι συλλογισμοί φοιτητών και μαθητών Λυκείου είναι συγγενικοί, τουλάχιστον για το συγκεκριμένο αντικείμενο της θερμοδυναμικής, αλλά και σε άλλα πεδία της φυσικής όπως ο ηλεκτρισμός (Rozier & Viennot 199, Tiberghien 1994).

Οι Leinonen et al. (2012) και οι Loverude et al. (2002) σημειώνουν ότι μικρό ποσοστό των φοιτητών απαντούν με μια επιθυμητή προσέγγιση του ΠΘΝ, ενώ η πλειονότητα χρησιμοποιεί με ελλιπή ή ανακριβή τρόπο μικροσκοπικά μοντέλα ή την καταστατική εξίσωση των ιδανικών αερίων (ΚΕΙΑ). Σε μια παρόμοια έρευνα των Leinonen et al. (2009) οι φοιτητές φαίνεται να είναι πολύ πιο εξοικειωμένοι με την ΚΕΙΑ παρά με τον ΠΘΝ και συχνά τη συνδυάζουν με τα μικροσκοπικά μοντέλα στις εξηγήσεις τους, ενώ επιπλέον φαίνεται να συγχέουν την αδιαβατική μεταβολή με την ισόθερμη. Οι Kautz et al. (2005) διαπιστώνουν δυσκολία με τις θερμοδυναμικές έννοιες και χρήση ανακριβών μακροσκοπικών μοντέλων που πηγάζουν σε ατελή μικροσκοπικά.

2. Μεθοδολογία

Η έρευνα πραγματοποιήθηκε στο Γενικό Λύκειο Καστριτσίου (Αχαΐα), σε τρία τμήματα Θετικού Προσανατολισμού της Β' Λυκείου με συνολικά 54 μαθητές και μαθήτριες, αφότου είχαν διδαχθεί την ΚΕΙΑ, τα μικροσκοπικά μοντέλα της κινητικής θεωρίας αερίων και τον ΠΘΝ, συμπεριλαμβανομένης της εφαρμογής του στις αδιαβατικές μεταβολές.

Ένας από τους ερευνητές (εκπαιδευτικός φυσικός) πραγματοποίησε μια διδακτική παρέμβαση, στη διάρκεια της οποίας υπενθύμισε στους μαθητές τη θεωρία και στη συνέχεια παρουσίασε μια κατά προσέγγιση αδιαβατική συμπίεση ιδανικού αερίου. Η επίδειξη αυτή έγινε με τη χρήση ενός γυάλινου σωλήνα κλεισμένου με έμβολο που περιείχε ένα μικρό κομμάτι χαρτί, το οποίο αναφλέχθηκε όταν το έμβολο συμπίεστηκε απότομα (Εικόνα 1). Οι μαθητές κλήθηκαν να απαντήσουν γραπτά στην ερώτηση «γιατί υπήρξε ανάφλεξη του χαρτιού μέσα στο δοχείο;». Οι απαντήσεις τους εντάχθηκαν σε κατηγορίες κατόπιν συζητήσεων μεταξύ των ερευνητών. Η ανάλυση των απαντήσεων έγινε με χρήση περιγραφικής στατιστικής στο SPSS Statistics (v.21).

Εικόνα 1: Αναπαράσταση της επίδειξης της κατά προσέγγισης αδιαβατικής συμπίεσης



3. Αποτελέσματα

Τα δεδομένα που παρουσιάζονται αποτελούν ένα μέρος από αυτά που προέκυψαν συνολικά (Meli, et al. 2016). Από τις απαντήσεις των μαθητών σχηματίστηκαν έξι κατηγορίες εξηγήσεων-εναλλακτικών πλαισίων, εκ των οποίων οι δύο χωρίστηκαν σε δύο υποκατηγορίες για «σωστή/ολοκληρωμένη» και

«λανθασμένη/ελλιπής» απάντηση (Πίνακας 1). Ορισμένες από τις κατηγορίες εμφανίζονται στη σχετική βιβλιογραφία για τους φοιτητές (ΠΘΝ, ΚΕΙΑ, μικροσκοπικό επίπεδο) και εμπλουτίστηκαν για να συμπεριλάβουν τις υπόλοιπες απαντήσεις των μαθητών που εμφανίζονταν σε σημαντικά ποσοστά (Φαινομενολογία, Χημεία). Να σημειωθεί ότι η πλειονότητα των μαθητών αξιοποίησαν στις απαντήσεις τους περισσότερες από μία κατηγορίες εξηγήσεων.

Πίνακας 1: Κατηγορίες/υποκατηγορίες εξηγήσεων και αντίστοιχες συχνότητες

Κατηγορίες	Υποκατηγορίες	Συχνότητα υποκατηγοριών	Συχνότητα κατηγοριών
Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος	Σωστή	2	16
	Λανθασμένη/Ελλιπής	14	
Καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων	Ολοκληρωμένη	5	24
	Ελλιπής	19	
Μικροσκοπικό επίπεδο			15
Φαινομενολογία			23
Χημεία			12
Άλλο			3

Πρώτος θερμοδυναμικός νόμος. Χρήση φυσικών μεγεθών που σχετίζονται με την ενέργεια του συστήματος και με τον τρόπο που αυτή μεταφέρεται ή μετατρέπεται. Παράδειγμα λανθασμένης χρήσης του ΠΘΝ είναι το εξής: «Κατά το πείραμα έγινε απότομη συμπίεση του αερίου, άρα υπάρχει εσωτερική ενέργεια, ταυτόχρονα παράγεται έργο. Το μικρό χρονικό διάστημα και η πίεση που δίνεται από το έμβολο θα δώσουν θερμότητα στο χαρτί κι έτσι αυτό θα καεί».

Καταστατική εξίσωση ιδανικών αερίων. Αξιοποίηση της ΚΕΙΑ, δηλαδή της σχέσης μεταξύ όγκου, πίεσης και θερμοκρασίας. Πρέπει να σημειωθεί ότι η αλλαγή αυτών των καταστατικών μεγεθών σε μια αδιαβατική μεταβολή δεν μπορεί να εξηγηθεί ποιοτικά με χρήση της ΚΕΙΑ, παρόλα αυτά ορισμένοι μαθητές κατάφεραν να φτάσουν σε ένα σωστό συμπέρασμα μέσω αυτής. Ένα παράδειγμα: «Μέσα στο δοχείο μειώθηκε ο όγκος άρα αυξήθηκε η πίεση και η θερμοκρασία (τα mol του αερίου είναι σταθερά)».

Μικροσκοπικό επίπεδο. Αναφορά στο μικροσκοπικό επίπεδο του αερίου, με κύριο άξονα την κινητική ενέργεια των σωματιδίων του αέρα και τη σύγκρουσή τους με το χαρτί ή το δοχείο. Χαρακτηριστική είναι η παρακάτω απάντηση: «Λόγω της πίεσης τα μόρια του αέρα απέκτησαν κινητική ενέργεια και αυξήθηκαν οι δυνάμεις που ασκούν στα τοιχώματα του δοχείου με αποτέλεσμα την παραγωγή ενέργειας».

Φαινομενολογία. Απλή περιγραφή της επίδειξης που πραγματοποιήθηκε με όρους φυσικής (πχ μείωση του όγκου, αύξηση της πίεσης κλπ) χωρίς να αναδύεται κάποιο επεξηγηματικό πλαίσιο από αυτήν. Ένα παράδειγμα είναι το εξής: «Μέσα στο δοχείο με τη γρήγορη συμπίεση ανέβηκε απότομα η θερμοκρασία με αποτέλεσμα την ανάφλεξη του χαρτιού». *Χημεία.* Χημικές αντιδράσεις ανάμεσα στον αέρα και στο χαρτί, με επικρατούσα την καύση. Ένα παράδειγμα: «Με την απότομη συμπίεση τα μόρια του αέρα (που περιέχουν οξυγόνο) κινήθηκαν πιο γρήγορα, άρα αυξήθηκαν οι συγκρούσεις του οξυγόνου με το χαρτί με αποτέλεσμα να υπάρχει οξυγόνο και να καεί το χαρτί».

Άλλο. Απαντήσεις που δεν εντάχθηκαν σε μία από τις προηγούμενες κατηγορίες ή δεν έβγαζαν κάποιο συγκεκριμένο νόημα, όπως ήταν χαρακτηριστικά η εξής: «Αλλάζοντας την πίεση άλλαξαν και οι φυσικές σταθερές με αποτέλεσμα να καίγεται το χαρτάκι σε χαμηλότερη θερμοκρασία».

Αποκλειστική και ταυτόχρονη χρήση κατηγοριών

Όπως επισημάνθηκε και στην προηγούμενη παράγραφο, οι παραπάνω κατηγορίες συνήθως χρησιμοποιούνται από τους μαθητές με τρόπο μη αποκλειστικό, με αποτέλεσμα να εμφανίζονται

στις εξηγήσεις τους δύο ή τρεις από αυτές. Μόλις 21 μαθητές αξιοποίησαν μία και μοναδική κατηγορία, ενώ 27 ανέφεραν δύο κατηγορίες και τέλος 6 μαθητές επέλεξαν τρεις κατηγορίες. Η διαγώνιος του Πίνακα 2 περιλαμβάνει τις συχνότητες των εξηγήσεων που ανήκουν σε μία μόνο κατηγορία. Στον ίδιο πίνακα, οι συχνότητες που εμφανίζονται πάνω από τη διαγώνιο αφορούν στη χρήση δύο κατηγοριών, ενώ στον Πίνακα 3 παρουσιάζονται εκείνες που εντάχθηκαν σε τρεις κατηγορίες.

Πίνακας 2: Συχνότητες για την αποκλειστική χρήση των κατηγοριών και την ταυτόχρονη χρήση δύο κατηγοριών (η=48).

	Σωστός ΠΘΝ	Λανθασμένος/ Ελλιπής ΠΘΝ	Ολοκληρωμένη ΚΕΙΑ	Ελλιπής ΚΕΙΑ	Μικροσκοπικό επίπεδο	Φαινομενολογία	Χημεία	Άλλο
Σωστός ΠΘΝ	1				1			
Λανθασμένος/ Ελλιπής ΠΘΝ		2	1	4	3	2		
Ολοκληρωμένη ΚΕΙΑ			3				1	
Ελλιπής ΚΕΙΑ				3	1	4	2	1
Μικροσκοπικό επίπεδο					3	3	1	
Φαινομενολογία						8	3	
Χημεία							0	
Άλλο								1

Πίνακας 3: Συχνότητες για την ταυτόχρονη χρήση τριών κατηγοριών (η=6).

	Σωστός ΠΘΝ	Λανθασμένος/ Ελλιπής ΠΘΝ	Ολοκληρωμένη ΚΕΙΑ	Ελλιπής ΚΕΙΑ	Μικροσκοπικό επίπεδο	Φαινομενολογία	Χημεία	Άλλο
Σωστός ΠΘΝ Χημεία					1	1		

Η αποκλειστική χρήση μίας κατηγορίας εξηγήσεων εμφανίζεται συχνότερα στη Φαινομενολογία, καθώς 8 μαθητές αρκέστηκαν στην περιγραφή των παρατηρήσεών τους ως ερμηνεία του φαινομένου. Σε ό,τι αφορά την ταυτόχρονη χρήση κατηγοριών, οι δύο πιο συχνά αλληλεπικαλυπτόμενες είναι ο Λανθασμένος/ Ελλιπής ΠΘΝ με την Ελλιπή ΚΕΙΑ, δηλαδή οι μαθητές αναμιγνύουν με ανακριβή τρόπο ενεργειακές έννοιες και καταστατικά μεγέθη. Ένας άλλος συχνά εμφανιζόμενος συνδυασμός είναι η Ελλιπής ΚΕΙΑ με τη Φαινομενολογία. Στην περίπτωση αυτή οι μαθητές προσπαθούν να συσχετίσουν τις παρατηρήσεις τους με στοιχεία της ΚΕΙΑ, καθώς αυτές οι δύο κατηγορίες εμπεριέχουν κοινά χαρακτηριστικά που ανήκουν στο ίδιο εννοιολογικό πλαίσιο. Σε σχέση με την αξιοποίηση τριών διαφορετικών κατηγοριών, στον Πίνακα 3 φαίνεται πως οι 6 από τους μαθητές δεν αρκέστηκαν σε διμερές εξηγήσεις, αλλά πρόσθεσαν σε αυτές κάποιες μικροσκοπικές ή/και χημικές έννοιες.

4. Συμπεράσματα

Στην εργασία αυτή φαίνεται πως οι μαθητές της Β' Λυκείου μας παρέχουν πιο πολυποικίλες ερμηνείες της αδιαβατικής συμπίεσης σε σχέση με αυτές των φοιτητών, όπως παρουσιάζονται στη σχετική βιβλιογραφία. Κατά την άποψή μας, το μεγαλύτερο πλήθος των κατηγοριών οφείλεται στο γεγονός ότι οι μαθητές χρησιμοποιούν περισσότερο τη φαντασία τους, καθώς δε συνειδητοποιούν τα εννοιολογικά πλαίσια μέσα στα οποία πρέπει να κινηθούν οι απαντήσεις τους. Επιπλέον όμως, ακόμα κι όταν κινούνται μέσα σε σχετικά με το φαινόμενο εννοιολογικά πλαίσια, δυσκολεύονται σημαντικά να διακρίνουν σε ποιο πρέπει να εστιάσουν, πιθανά επειδή η διδασκαλία της φυσικής, όπως συνήθως τη γνωρίζουν στη μαθητική τους ζωή, περιέχει την ανάμειξη εννοιολογικών πλαισίων ως αναπόσπαστο στοιχείο της παραδοσιακής προσέγγισης (Κολιόπουλος 2006). Σε κάθε περίπτωση όμως, υπάρχει μια κοινή υποβόσκουσα θεωρία που διέπει τις αιτιολογήσεις τους: ότι το χαρτί στο δοχείο αναφλέχθηκε λόγω αύξησης της θερμοκρασίας. Συνεπώς, οι μαθητές δεν προσπάθησαν να εξηγήσουν άμεσα την ύπαρξη της φλόγας, αλλά την αύξηση της θερμοκρασίας.

Η διαπίστωση ότι η πλειονότητα των ερμηνειών του φαινομένου δεν εμπίπτει στην κατηγορία της σωστής χρήσης του ΠΘΝ συνάδει με αυτήν της βιβλιογραφίας για τους φοιτητές πανεπιστημίου (Leinonen et al. 2012, 2009, Loverude et al. 2002). Παρότι οι αδιαβατικές μεταβολές διδάσκονται αποκλειστικά ως εφαρμογές του ΠΘΝ, όπως και επισημάνθηκε στην αρχή της διδακτικής παρέμβασης στους μαθητές, οι ίδιοι δεν έλκονται από το εξηγητικό αυτό πλαίσιο. Η πλειονότητα αυτών που επιχειρήσαν τη χρήση ενεργειακών εννοιών δεν αξιοποίησαν την εσωτερική ενέργεια, καθώς αυτή δε φαίνεται να σχετίζεται άμεσα με την αύξηση της θερμοκρασίας. Στο πλαίσιο αυτό αποκαλύπτεται άλλη μία υποβόσκουσα θεωρία: η αύξηση της θερμοκρασίας επιτυγχάνεται μόνο με μεταφορά θερμότητας στο σύστημα του αερίου.

Όπως αναμενόταν με βάση τα αποτελέσματα της σχετικής βιβλιογραφίας για τους φοιτητές, η εξήγηση με βάση την ΚΕΙΑ ήταν η περισσότερο προτιμητέα (Kautz et al. 2005, Leinonen et al. 2012, 2009, Loverude et al. 2002). Καταστατικά μεγέθη όπως η θερμοκρασία, ο όγκος και η πίεση είναι πιο

εύκολα διαχειρίσιμα, διότι οι μαθητές μπορούν να «δουν» τις μεταβολές τους, σε αντίθεση με τα ενεργειακά μεγέθη και το μικρόκοσμο. Παρόλα αυτά, οι μαθητές επιστρατεύουν μικροσκοπικές ή χημικές ερμηνείες ως την «απόλυτη» ερμηνεία των φαινομένων που παρατηρούν στο μακρόκοσμο (Kautz et al. 2005, Meltzer 2004). Καθώς διδάσκονται για τα στοιχεία του μικρόκοσμου κάθε χρόνο ξεκινώντας από το δημοτικό σχολείο, είναι πιθανό να νιώθουν μεγαλύτερη αυτοπεποίθηση σε συζήτηση για τη συμπεριφορά των σωματιδίων παρά για μακροσκοπικά ενεργειακά μεγέθη που σχετίζονται με τη θερμοδυναμικά φαινόμενα.

Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στη δεύτερη προτιμότερη κατηγορία, η οποία είναι η Φαινομενολογία. Η επίδειξη της αδιαβατικής συμπίεσης φανερώνει τη δυσκολία των μαθητών να συσχετίσουν τις θεωρητικές τους γνώσεις με μια πραγματική κατάσταση, αλλά από την άλλη μεριά μπορεί καθεαυτή να αποτέλεσε εμπόδιο και να οδήγησε σε πιο αποπροσανατολισμένες απαντήσεις, σε αντίθεση με αυτές των φοιτητών που σε όλες τις περιπτώσεις αποκρίνονταν σε μόνο γραπτά διατυπωμένο πρόβλημα. Μπαίνει λοιπόν το ερώτημα για την καταλληλότητα των διάφορων μορφών αναπαράστασης που προτείνονται στους μαθητές (Κολιόπουλος 2014, Μέλη 2015).

5. Βιβλιογραφία

Κολιόπουλος, Δ. (2006). *Θέματα διδακτικής φυσικών επιστημών*. Αθήνα: Μεταίχμιο.

Κολιόπουλος, Δ. (2014). *Η Ενέργεια στην Εκπαίδευση*. Αθήνα: Εκδοτικός Όμιλος Ίων.

Μέλη, Κ. (2015). *Κατασκευάζοντας μια υπολογιστική προσομοίωση για τις θερμοδυναμικές μεταβολές ιδανικών αερίων: επιστημολογικές και διδακτικές προσεγγίσεις*. Πανεπιστήμιο Πατρών. Retrieved from <http://nemertes.lis.upatras.gr/jspui/handle/10889/9016>

Σκουμιός, Μ. & Χατζηνικήτα, Β. (2000). Μοντέλα μαθητών για θερμότητα, θερμοκρασία και θερμικά φαινόμενα. *Επιθεώρηση Φυσικής*, 31, 58-71.

Arnold, M. & Millar, R. (1994). Children's and lay adults' views about thermal equilibrium. *International Journal of Science Education*, 16(4), 405-419. <http://doi.org/10.1080/0950069940160403>

Baehr, H.-D. (2007). *Θερμοδυναμική: Εισαγωγή στα θεμελιώδη και στις τεχνικές εφαρμογές*. (Κ. Ν. Παττάς, Ed.). Θεσσαλονίκη: Εκδόσεις Γιαχούδη.

Erickson, G. L. (1979). Children's conceptions of heat and temperature. *Science Education*, 63(2), 221-230. <http://doi.org/10.1002/sci.3730630210>

Kautz, C. H., Heron, P. R. L., Loverude, M. E. & McDermott, L. C. (2005). Student understanding of the ideal gas law, Part I: A macroscopic perspective. *American Journal of Physics*, 73(11), 1055—1063. <http://doi.org/10.1119/1.2049286>

Kesidou, S. & Duit, R. (1993). Students' conceptions of the second law of thermodynamics—an interpretive study. *Journal of Research in Science Teaching*, 30(1), 85-106. <http://doi.org/10.1002/tea.3660300107>

Leinonen, R., Asikainen, M. a. & Hirvonen, P. E. (2012). University Students Explaining Adiabatic Compression of an Ideal Gas-A New Phenomenon in Introductory Thermal Physics. *Research in Science Education*, 42(6), 1165-1182. <http://doi.org/10.1007/s11165-011-9239-0>

Leinonen, R., Raesaenen, E., Asikainen, M. & Hirvonen, P. E. (2009). Students' pre-knowledge as a guideline in the teaching of introductory thermal physics at university. *European Journal of Physics*, 30(3), 593-604. <http://doi.org/10.1088/0143-0807/30/3/016>



Loverude, M. E., Kautz, C. H. & Heron, P. R. L. (2002). Student understanding of the first law of thermodynamics: Relating work to the adiabatic compression of an ideal gas. *American Journal of Physics*, 70(2), 137-148. <http://doi.org/10.1119/1.1417532>

Meli, K., Koliopoulos, D., Lavidas, K. & Papalexiou, G. (2016). Upper secondary school students' understanding of adiabatic compression. *Review of Science, Mathematics and ICT Education*, 10(2), 131-147.

Rozier, S. & Viennot, L. (1991). Students' reasonings in thermodynamics. *International Journal of Science Education*, 13(2), 159-170. <http://doi.org/10.1080/0950069910130203>

Tiberghien, A. (1994). Modeling as basis for analyzing teaching-learning situations. *Learning and Instruction*, 4, 71-87.