Πρόταση για την εφαρμογή της συστημικής προσέγγισης στη διδασκαλία και αξιολόγηση των μαθητών στην Οργανική Χημεία

Βαχλιώτης Θοδωρής[1], Σάλτα Κατερίνα[2], Τζουγκράκη Χρύσα[3]

[1]2ο ΓΕΛ Νέας Ιωνίας Αττικής, teovaxla@yahoo.gr
[2]2ο Πρότυπο Πειραματικό ΓΕΛ Αθηνών, ksalta@chem.uoa.gr
[3]Τμήμα Χημείας, Ε.Κ.Π.Α., tzougraki@chem.uoa.gr

Περίληψη
Το διδακτικό μοντέλο *«Συστημική Προσέγγιση στη Διδασκαλία και Μάθηση (ΣΠΔΜ)»* είναι μία διδακτικο-μαθησιακή προσέγγιση που βασίζεται στην ανάπτυξη και χρησιμοποίηση τεχνικών κυκλικής χαρτογράφησης εννοιών σε επίπεδο διδασκαλίας και αξιολόγησης. Η εφαρμογή του *ΣΠΔΜ* αποσκοπεί στην ανάπτυξη δεξιοτήτων συστημικής σκέψης των μαθητών, οι οποίες πιστεύεται ότι σχετίζονται με την ενίσχυση της κατανόησή τους για τις σχετικές επιστημονικές έννοιες. Στην παρούσα εργασία, παρουσιάζονται ορισμένα σενάρια μαθήματος για την εφαρμογή της συστημικής προσέγγισης στη διδασκαλία των μαθητών σε θέματα οργανικής χημείας στο λύκειο. Τα σενάρια αυτά βασίζονται σε δύο εναλλακτικούς τρόπους εφαρμογής της κυκλικής χαρτογράφησης των εννοιών. Παρουσιάζονται, επίσης, ορισμένες *Συστημικές Ερωτήσεις Αξιολόγησης (ΣΕΑ)* που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των μαθητών στις σχετικές διδακτικές ενότητες.

Abstract
The *"Systemic Approach to Teaching and Learning (SATL)"* model is a teaching-learning approach, which is based on the development and use of cyclic concept mapping techniques, for both, teaching and assessment purposes. The implementation of SATL method focuses on the development of students' systems thinking skills, which are believed to enhance their understanding of relevant science concepts. In this study, specific lesson scenarios are presented for implementing the systemic approach on teaching students on organic chemistry topics in high school. These scenarios are based on two alternatives for the implementation of cyclic concept mapping. *Systemic Assessment Questions (SAQs)* are also presented which could be used for assessing students on relative teaching units.

Εισαγωγή

Η *«Συστημική Προσέγγιση στη Διδασκαλία και Μάθηση (ΣΠΔΜ)»* μπορεί να θεωρηθεί ως ένα «υβριδικό» διδακτικό μοντέλο, αφού συνδυάζει και χρησιμοποιεί ιδέες και στοιχεία της *συστημικής* και του *εποικοδομισμού* προσαρμοσμένα σε διαδικασίες χαρτογράφησης εννοιών (Fahmy & Lagowski 2003). Ως πρωταρχικός στόχος του μοντέλου αναγνωρίζεται η επίτευξη της *μάθησης με κατανόηση* από τους μαθητές και υποστηρίζεται ότι ο στόχος αυτός μπορεί να επιτευχθεί μέσα από την ανάπτυξη της *συστημικής σκέψης*.
Η μάθηση με κατανόηση αποτελεί την κεντρική ιδέα στη θεωρία μάθησης του Ausubel (1963, 1968). Είναι μια εποικοδομητική διαδικασία στην οποία ο μαθητής επιδιώκει να

δημιουργήσει συνδέσεις ανάμεσα σε αντιλήψεις, πληροφορίες και παρατηρήσεις της επιστήμης, προκειμένου να επιτύχει την κατανόηση. Από την άλλη πλευρά, η *επιφανειακή* ή *μηχανική μάθηση* χαρακτηρίζεται από μια τάση μηχανικής αναπαραγωγής της ύλης που μελετάται. Η χαρτογράφηση εννοιών είναι μια τεχνική η οποία αναπτύχθηκε με βάση τη θεωρία του Ausubel για τη μάθηση με κατανόηση. Οι *χάρτες εννοιών* είναι ένα χρήσιμο εργαλείο αναπαράστασης της γνώσης, κυρίως όσον αφορά στην αναπαράσταση των σχέσεων μεταξύ των εννοιών. Τα αποτελέσματα σχετικών ερευνών έδειξαν ότι η χαρτογράφηση εννοιών έχει γενικά θετικές επιδράσεις στις επιδόσεις των μαθητών (Nesbit & Adesope 2006).

Ο όρος «συστημική» αναφέρεται σε μια ποικιλία συστημικών προσεγγίσεων. Οι περισσότερες από αυτές τις προσεγγίσεις προσφέρουν μια θεωρία, μια μεθοδολογία, αλλά και ένα συγκεκριμένο τρόπο σκέψης, τη συστημική σκέψη (Schwaninger 2006). Σύμφωνα με το μοντέλο *DSRP* (*D*istinction, *S*ystem, *R*elationship, *P*erspective) (Cabrera, Colosi & Lobdell 2008), η συστημική σκέψη φαίνεται να είναι εγγενώς σχετιζόμενη με την ικανότητα ανάλυσης ενός συστήματος στα θεμελιώδη συστατικά του στοιχεία/υποσυστήματα και σύνθεσης αυτών των στοιχείων σε μία ολότητα που έχει νόημα, δηλαδή με την οργάνωση ενός συστήματος. Αυτές οι διαδικασίες επιτυγχάνονται εάν επαναλαμβανόμενα γίνονται διαχωρισμοί μεταξύ των συστατικών στοιχείων του συστήματος, υιοθετούνται πολλαπλές προοπτικές μέσα στο σύστημα, και αναγνωρίζονται οι σχέσεις ανάμεσα στα μέρη του συστήματος.

Η προσέγγιση *ΣΠΔΜ* στηρίζεται στη δημιουργία ενός δυναμικά εξελισσόμενου, κλειστού συστήματος εννοιών κυκλικής μορφής. Η οπτική αναπαράσταση ενός τέτοιου εννοιολογικού συστήματος ονομάζεται *συστημικό διάγραμμα* και αποτελεί το βασικό διδακτικό εργαλείο που προτείνεται στο πλαίσιο αυτού του μοντέλου. Η βασική διαφοροποίηση της μεθόδου *ΣΠΔΜ* σε σχέση με μία παραδοσιακή διδακτική προσέγγιση είναι, αφενός, η ενσωμάτωση στη διδασκαλία τεχνικών χαρτογράφησης των εννοιών και, αφετέρου, η αναπαράσταση και μελέτη των εννοιών και των μεταξύ τους σχέσεων ως ένα «κλειστό» σύστημα. Η μελέτη ενός τέτοιου «κλειστού» συστήματος προϋποθέτει την επιτέλεση διαδικασιών ανάλυσης και σύνθεσης μέσα στο οριζόμενο σύστημα, η οποία φαίνεται ότι μπορεί να οδηγήσει στην ανάπτυξη συστημικής σκέψης και, τελικά, στην ενίσχυση της κατανόησης.

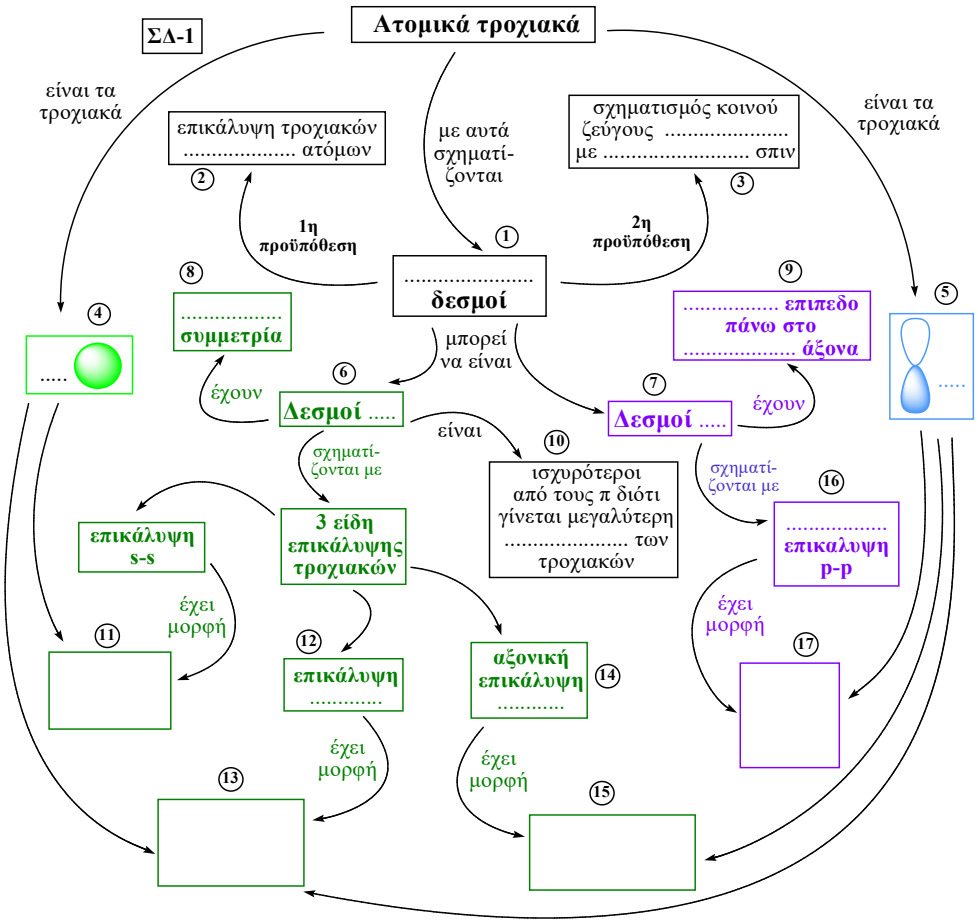
Οι *Συστημικές Ερωτήσεις Αξιολόγησης (ΣΕΑ)* είναι ένα σχήμα αξιολόγησης που έχει προταθεί στο πλαίσιο της συστημικής προσέγγισης (Fahmy & Lagowski, 2004). Στο σχήμα *ΣΕΑ*, ζητείται συνήθως η σωστή ανάλυση, κατασκευή ή συμπλήρωση ενός πρωτότυπου συστημικού διαγράμματος με μοναδικά χαρακτηριστικά. Τα αποτελέσματα από την εφαρμογή του μοντέλου *ΣΠΔΜ* έδειξαν μία σημαντική βελτίωση στις επιδόσεις των μαθητών σε σχέση με μια παραδοσιακή διδασκαλία (Βαχλιώτης, Σάλτα & Τζουγκράκη 2013). Επίσης, οι *ΣΕΑ* αποδείχτηκαν έγκυρο και αξιόπιστο σχήμα για την αξιολόγηση της κατανόησης και του βαθμού ανάπτυξης συστημικής σκέψης των μαθητών, στο πλαίσιο της οργανικής χημείας (Vachliotis, Salta & Tzougraki 2011, 2014).

Στόχος της παρούσας εργασίας είναι η παρουσίαση: (α) ενδεικτικών σεναρίων μαθήματος που βασίζονται σε δύο εναλλακτικές προτάσεις χρησιμοποίησης των συστημικών διαγραμμάτων στη διδασκαλία της χημείας και (β) ορισμένων *ΣΕΑ* που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την αξιολόγηση των μαθητών στις σχετικές διδακτικές ενότητες. Τόσο τα σενάρια, όσο και οι ΣΕΑ αναπτύχθηκαν στο πλαίσιο του μοντέλου *ΣΠΔΜ*.

Εφαρμογές της συστημικής προσέγγισης στη διδασκαλία

Τα σενάρια μαθήματος βασίζονται σε δύο εναλλακτικούς τρόπους χρησιμοποίησης των συστημικών διαγραμμάτων. Σύμφωνα με τον πρώτο, οι μαθητές, ξεκινώντας από ένα αρχικό διάγραμμα που τους δίνεται και περιέχει προηγούμενες γνώσεις τους, ενθαρρύνονται να συμπληρώσουν, με διαδοχικά βήματα και σε συνεργασία με το διδάσκοντα, ένα συστημικό διάγραμμα για τη διδακτική ενότητα που μελετάται, μέσω της προοδευτικής-συστηματικής ενσωμάτωσης των νέων εννοιών και σχέσεων που διδάσκονται στο αναπτυσσόμενο διάγραμμα (Fahmy & Lagowski 2003). Στο σχήμα 1 παρουσιάζεται ένα συστημικό διάγραμμα (ΣΔ-1) με βάση το οποίο μπορεί να ξεκινήσει η εισαγωγή των μαθητών στην ενότητα *Χημικός δεσμός-Θεωρία δεσμού σθένους* (Γ΄ λυκείου). Αφού οι μαθητές διδαχθούν τη σχετική ύλη, ακολουθεί η εμπλοκή τους στη διαδικασία συμπλήρωσης των δεκαεπτά αριθμημένων κενών ή ημισυμπληρωμένων πλαισίων του ΣΔ-1, οπότε θα προκύψει το πλήρες συστημικό διάγραμμα ΣΔ-2 του σχήματος 2.

Σχήμα 1: Το αρχικό συστημικό διάγραμμα για την εισαγωγή στη διδασκαλία του χημικού δεσμού.

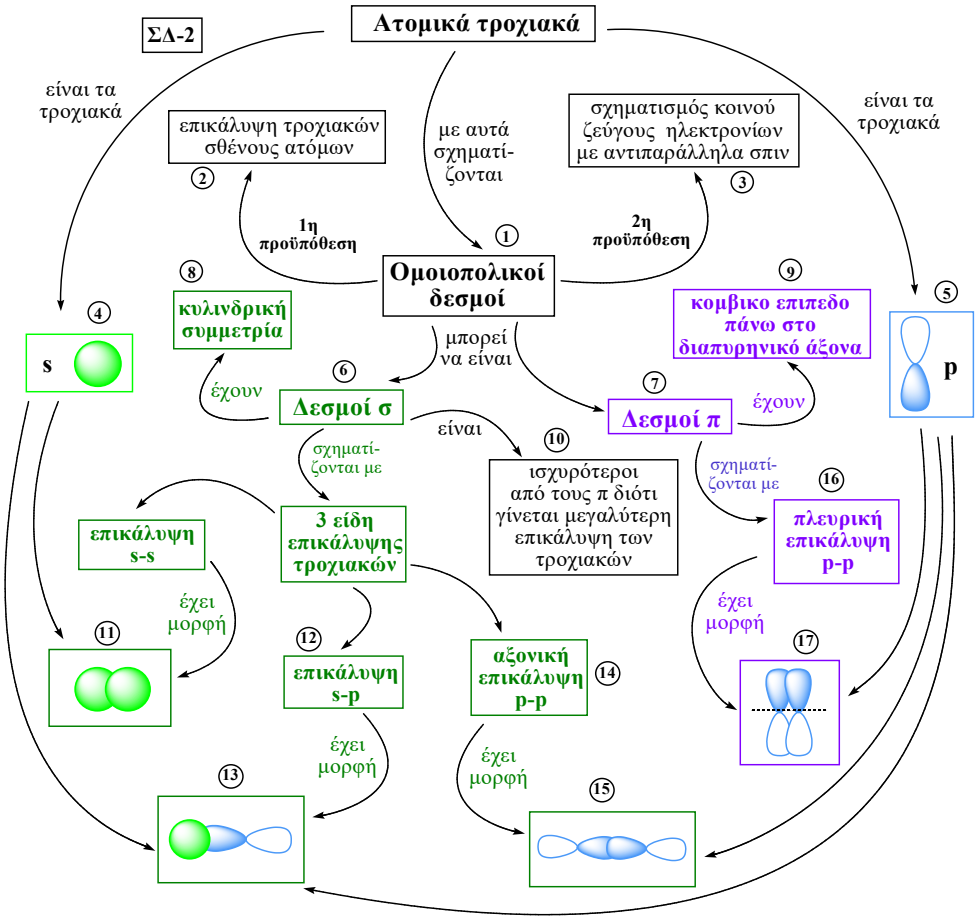


Μία εναλλακτική προσέγγιση είναι η εξαρχής ανάπτυξη ενός συστημικού διαγράμματος, με βάση κάποιες ερωτήσεις που θα υποβάλει ο διδάσκων στους μαθητές και οι οποίες θα καθοδηγούν τη διδακτικο-μαθησιακή διαδικασία. Οι ερωτήσεις θα πρέπει να μπορούν να απαντηθούν με την κοινή λογική και ίσως με ανάκληση και χρησιμοποίηση προϋπάρχουσας γνώσης. Μια τέτοια προσέγγιση επιτρέπει στους μαθητές να συμμετέχουν πιο ενεργά στην ανάπτυξη ενός συστημικού διαγράμματος. Επίσης, εμπεριέχει στοιχεία καθοδηγούμενης

διερεύνησης, αφού οι ερωτήσεις καθοδηγούν τους μαθητές να διερευνήσουν νέες σχέσεις μεταξύ των εννοιών. Έτσι, η ανάπτυξη ενός συστημικού διαγράμματος δεν αποτελεί απλά μια συμπληρωματική δραστηριότητα που διαδέχεται μια κλασική διδασκαλία, αλλά καθίσταται ουσιαστικά μια αυθύπαρκτη διδακτική προσέγγιση (Βαχλιώτης, Σάλτα & Τζουγκράκη 2013). Στο σχήμα 3 παρουσιάζεται ένα συστημικό διάγραμμα, που μπορεί να αποτελέσει τη βάση για τη συστημική διδασκαλία της ενότητας *Ονοματολογία οργανικών ενώσεων με ευθεία αλυσίδα* (Β΄ λυκείου).

Η προτεινόμενη διαδικασία είναι η εξής: Αρχικά, παρουσιάζονται στους μαθητές μόνο οι συντακτικοί τύποι του 2-βουτενίου και της 2-προπανόλης και ζητάμε από τους μαθητές να εντοπίσουν τις διαφορές μεταξύ των δύο συντακτικών τύπων. Περιμένουμε ότι θα εντοπίσουν το διαφορετικό αριθμό ατόμων C, τη διαφορά στο βαθμό κορεσμού και τη διαφορά στη χαρακτηριστική ομάδα. Αφού παρουσιαστούν αυτά τα τρία στοιχεία στο διάγραμμα, οι μαθητές αντιλαμβάνονται ότι το όνομα μιας ένωσης πρέπει καταρχήν να αποτελείται από 3 συνθετικά. Αφού πληροφορήσουμε τους μαθητές για το ποια μπορεί να είναι αυτά τα συνθετικά, τους ζητάμε να κάνουν εφαρμογή στις δύο ενώσεις του διαγράμματος, τις οποίες, σε αυτό το στάδιο, θα ονομάσουν «βουτένιο» και «προπανόλη» αντίστοιχα.

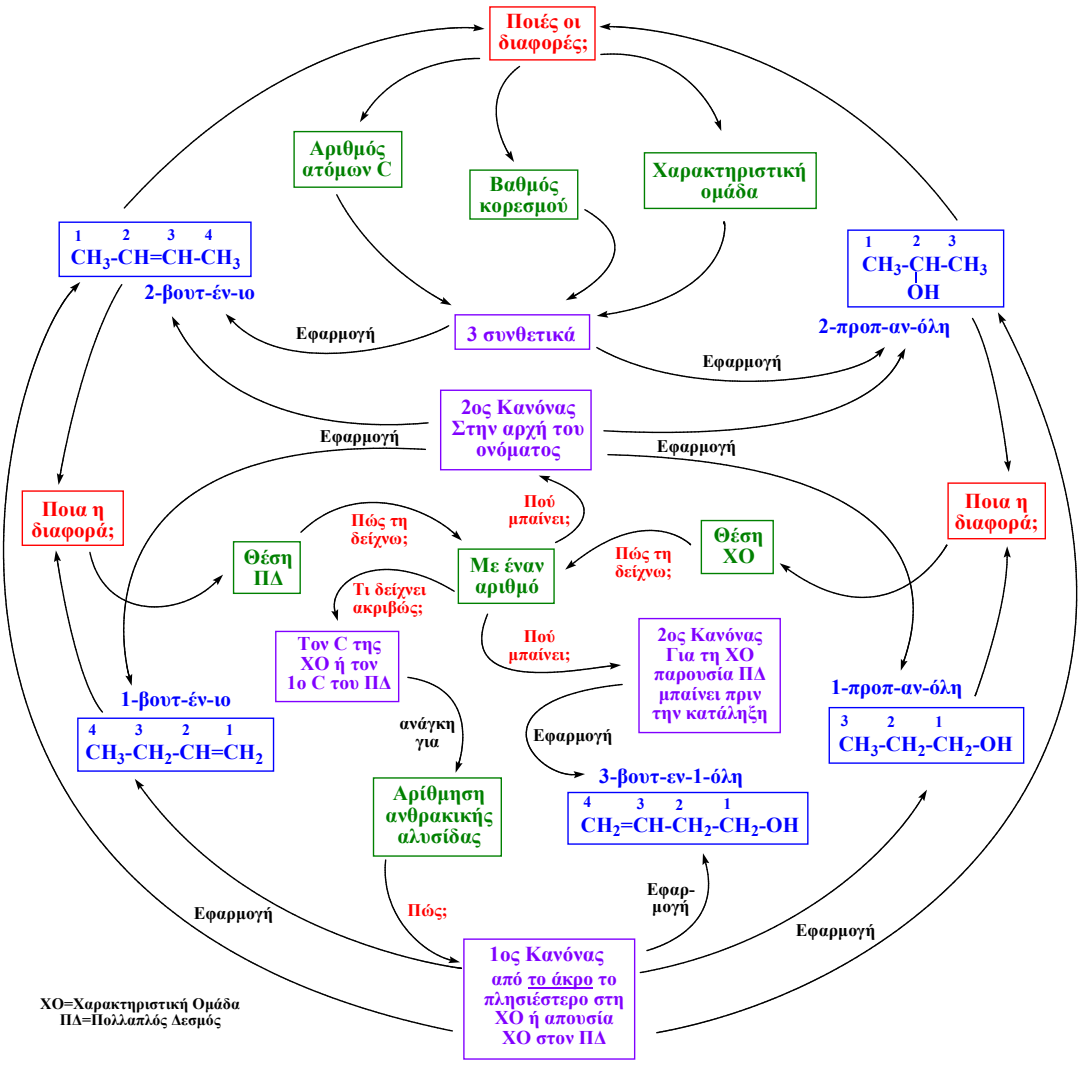
Σχήμα 2: Το τελικό συστημικό διάγραμμα για την εισαγωγή στη διδασκαλία του χημικού δεσμού.



Στη συνέχεια, εμφανίζεται στο διάγραμμα ο συντακτικός τύπος του 1-βουτενίου. Ζητάμε από τους μαθητές να τον ονομάσουν και η απάντηση, με βάση τα όσα μέχρι εκείνη τη στιγμή γνωρίζουν οι μαθητές, θα πρέπει να είναι «βουτένιο». Εδώ, οι μαθητές αρχίζουν να προβληματίζονται, διότι στο διάγραμμα υπάρχουν δύο αλκένια που έχουν σε διαφορετική

θέση το διπλό δεσμό, αλλά τους έχουν δώσει το ίδιο όνομα. Δεν πρέπει να υπάρχει κάποιο στοιχείο στο όνομα τους που να διακρίνει τα δύο αλκένια; Ανάλογος προβληματισμός προκύπτει αφού εμφανιστεί στο διάγραμμα ο συντακτικός τύπος της 1-προπανόλης και ονομαστεί «προπανόλη» από τους μαθητές. Πως θα διαφοροποιηθεί ονομαστικά από τη 2-προπανόλη που έχει σε άλλη θέση το υδροξύλιο; Οι μαθητές αντιλαμβάνονται την αναγκαιότητα να φαίνεται, με κάποιον τρόπο, στο όνομα μιας ένωσης η θέση του πολλαπλού δεσμού ή/και της χαρακτηριστικής ομάδας. Ρωτάμε τους μαθητές να σκεφτούν κάποιον τρόπο με τον οποίο θα γίνεται αυτό (ιδεοθύελλα), περιμένοντας να αναφερθεί και η περίπτωση χρησιμοποίησης κάποιου αριθμού για αυτόν το σκοπό. Εδώ, βέβαια, είναι πολύ πιθανό να ακουστούν κι άλλες ιδέες από τους μαθητές. Κάποιος π.χ. μπορεί να πει ότι η 1-προπανόλη είναι «η προπανόλη με το υδροξύλιο στον ακραίο άνθρακα», ενώ η 2-προπανόλη είναι «η προπανόλη με το υδροξύλιο στο μεσαίο άνθρακα». Δεχόμαστε τον ισχυρισμό, λέγοντας, όμως, ότι γενικά αυτός ο τρόπος δεν είναι πρακτικά εύχρηστος λόγω της μεγάλης έκτασης που θα έχουν έτσι τα ονόματα των ενώσεων, ακόμα και των σχετικά απλών όπως αυτών που παρουσιάζονται στο διάγραμμα.

Σχήμα 3: Ένα συστημικό διάγραμμα για την ενότητα «Ονοματολογία οργανικών ενώσεων».



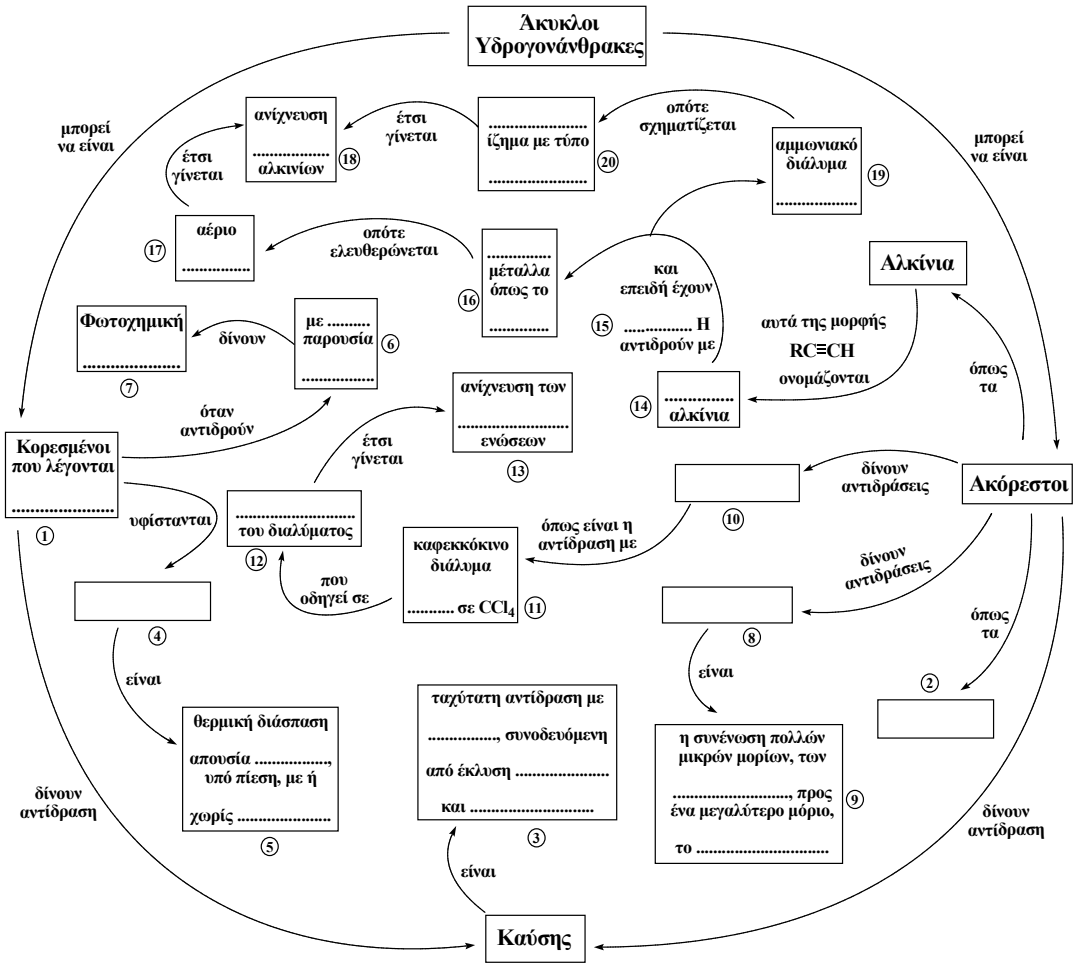
Η προοπτική της χρησιμοποίησης κάποιου αριθμού για να δείξουμε τη θέση, μας οδηγεί στο να πληροφορήσουμε τους μαθητές το τι ακριβώς πρέπει να δείχνει αυτός ο αριθμός, δηλαδή,

στην περίπτωση της χαρακτηριστικής ομάδας τον άνθρακα που ανήκει στην ομάδα, ή αυτόν με τον οποίο είναι συνδεδεμένη η ομάδα, ενώ για τον πολλαπλό δεσμό τον πρώτο άνθρακα του δεσμού αυτού. Όλα αυτά θα οδηγήσουν τους μαθητές στη σκέψη για ανάγκη αρίθμησης της ανθρακικής αλυσίδας. Εδώ, γίνεται απαραίτητη η διατύπωση κάποιου κανόνα με βάση τον οποίο θα γίνεται η αρίθμηση της αλυσίδας. Έτσι, παρουσιάζεται ο $1^{ος}$ κανόνας που πρέπει να γνωρίζουν οι μαθητές: «Η αρίθμηση της ανθρακικής αλυσίδας ξεκινά από το άκρο στο οποίο βρίσκεται πλησιέστερα η χαρακτηριστική ομάδα, ή αν δεν υπάρχει χαρακτηριστική ομάδα, ο πολλαπλός δεσμός». Ζητούμε από τους μαθητές να εφαρμόσουν τον κανόνα για τις τέσσερις ενώσεις του διαγράμματος, αριθμώντας τις αντίστοιχες αλυσίδες.
Ακολούθως, προκύπτει το πρόβλημα που θα μπει ο αριθμός στο όνομα της ένωσης. Εδώ, παρουσιάζεται το πρώτο τμήμα του $2^{ου}$ κανόνα: «Εάν υπάρχει μόνο χαρακτηριστική ομάδα ή μόνο πολλαπλός δεσμός, ο αριθμός που δείχνει τη θέση τους μπαίνει στην αρχή του ονόματος». Οι μαθητές εφαρμόζουν τον κανόνα στις ενώσεις του διαγράμματος και προκύπτουν οι ολοκληρωμένες αντίστοιχες ονομασίες: «1-προπανόλη», «2-προπανόλη», «1-βουτένιο» και «2-βουτένιο». Τέλος, παρουσιάζεται ο συντακτικός τύπος $CH{=}CHCH_2CH_2OH$ που έχει και χαρακτηριστική ομάδα και πολλαπλό δεσμό. Αφού οι μαθητές αριθμήσουν την αλυσίδα με βάση τον $1^{ο}$ κανόνα που ήδη γνωρίζουν, τους παρουσιάζεται το υπόλοιπο τμήμα του $2^{ου}$ κανόνα: «Εάν υπάρχει και χαρακτηριστική ομάδα και πολλαπλός δεσμός, ο αριθμός που δείχνει τη θέση της χαρακτηριστικής ομάδας μπαίνει πριν την κατάληξη του ονόματος». Έτσι, οι μαθητές καλούνται να ονομάσουν και αυτήν την ένωση, που ονομάζεται «3-βουτεν-1-όλη». Έτσι, ολοκληρώνεται η ανάπτυξη του τελικού συστημικού διαγράμματος (βλέπε σχήμα 3) για τη συγκεκριμένη διδακτική ενότητα.

Συστημικές Ερωτήσεις Αξιολόγησης (*ΣΕΑ*)

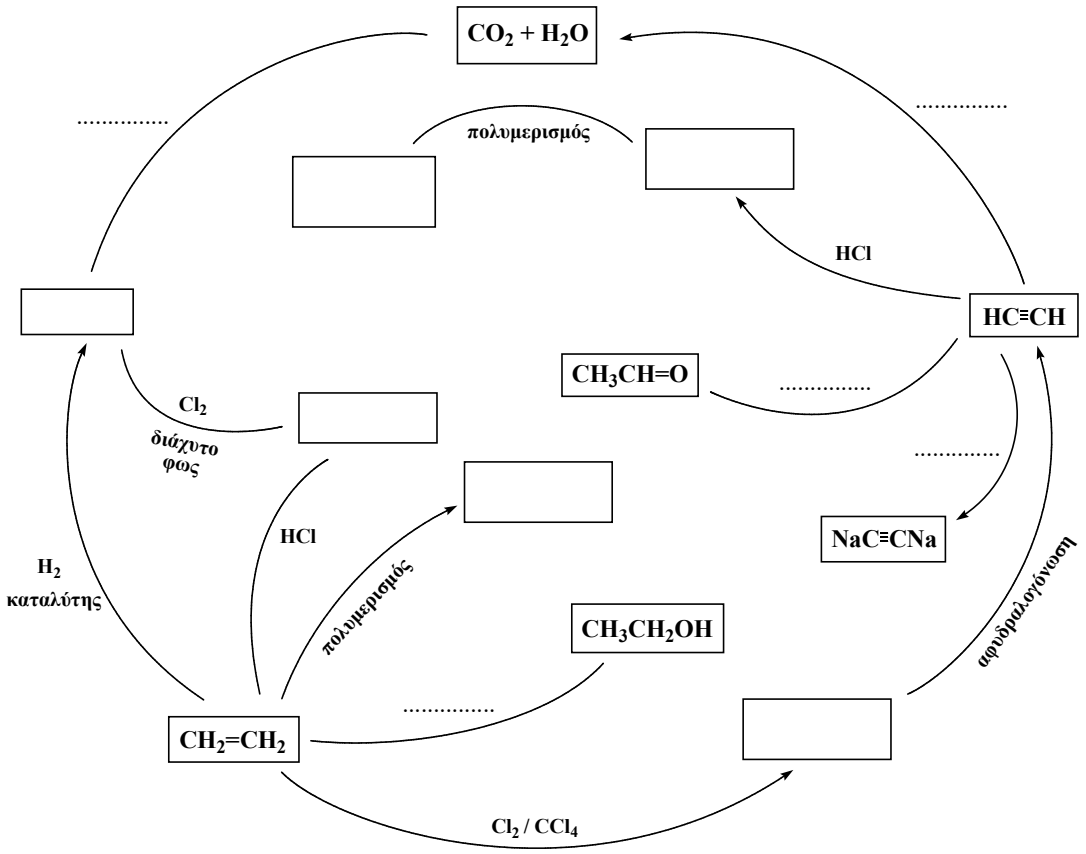
Η ενασχόληση με αυτές τις ερωτήσεις οδηγεί το μαθητή να σκεφτεί με ένα συστημικό τρόπο αναπτύσσοντας σημαντικές νοητικές δεξιότητες, όπως η ικανότητα να διαχωρίζει τις έννοιες, να υιοθετεί πολλαπλές προοπτικές και να αναγνωρίζει σχέσεις προκειμένου να οργανώσει ένα σύστημα εννοιών. Οι μαθητές, δηλαδή, καλούνται να αναλύσουν το σύστημα στα συστατικά του στοιχεία (έννοιες και συνδέσεις) και να συνθέσουν αυτά τα στοιχεία σε αλληλοσυνδεόμενα υποσυστήματα που συνιστούν μία συνεκτική ολότητα. Με τις *ΣΕΑ* η αξιολόγηση καθίσταται, επίσης, πιο «αυθεντική», αφού βρίσκεται σε αντιστοιχία με τη συστημική προσέγγιση διδασκαλίας που ακολουθείται. Στα σχήματα 4 και 5 παρουσιάζονται δύο *ΣΕΑ* συμπλήρωσης κενών για την ενότητα *Χημεία των υδρογονανθράκων* (Β΄ λυκείου).

Σχήμα 4: Η πρώτη *ΣΕΑ* συμπλήρωσης κενών για την ενότητα «Χημεία των υδρογονανθράκων».



Σχήμα 5: Η δεύτερη *ΣΕΑ* συμπλήρωσης κενών για την ενότητα «Χημεία των υδρογονανθράκων».

Στο παρακάτω διάγραμμα: **α)** Συμπλήρωσε τα 6 κενά πλαίσια με τους χημικούς τύπους των κατάλληλων ενώσεων.
β) Συμπλήρωσε τα 5 κενά πάνω στα βέλη με τα κατάλληλα αντιδραστήρια και συνθήκες των αντιδράσεων.
γ) Προσδιόρισε τη φορά που λείπει σε 6 βέλη.
δ) Συμπλήρωσε δύο ακόμα χημικές αντιδράσεις (σχεδίασε 2 νέα βέλη που να συνδέουν πλαίσια που υπάρχουν στο διάγραμμα και γράψε πάνω στα βέλη αυτά τα αντιδραστήρια και τις συνθήκες των αντιδράσεων αυτών).



Συμπεράσματα και προτάσεις

Στην παρούσα εργασία παρουσιάζεται μία διδακτική προσέγγιση που συνδυάζει την κυκλική χαρτογράφηση των επιστημονικών εννοιών, που φαίνεται ότι προάγει τη συστημική σκέψη, με στοιχεία διερεύνησης. Μια τέτοια «υβριδική» προσέγγιση θα μπορούσε να προσδώσει σε ένα κλασικό πρόγραμμα σπουδών μια πιο αποτελεσματική μαθησιακή προοπτική, καθώς, αποτελέσματα προηγούμενης έρευνας έδειξαν σημαντική συσχέτιση μεταξύ του βαθμού ανάπτυξης συστημικής σκέψης και της κατανόησης των επιστημονικών εννοιών από τους μαθητές (Vachliotis, Salta & Tzougraki 2014). Περισσότερες διδακτικές εφαρμογές και σχετικές έρευνες θα μπορούσαν να γίνουν προς αυτήν την κατεύθυνση. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να διερευνηθεί η εφαρμογή της προσέγγισης *ΣΠΔΜ* εμπλουτισμένης με περισσότερα στοιχεία διερεύνησης. Επίσης, μπορεί να αξιολογηθεί το διδακτικό αυτό μοντέλο και στο πλαίσιο άλλων διδακτικών στρατηγικών και προσεγγίσεων, όπως στη βάση μιας ομαδοσυνεργατικής διδασκαλίας ή μιας ερευνητικής εργασίας (project). Η εφαρμογή και αξιολόγηση του διδακτικού μοντέλου σε άλλες θεματικές ενότητες της χημείας, σε άλλα διδακτικά αντικείμενα (π.χ. φυσική, βιολογία) καθώς και σε άλλες εκπαιδευτικές βαθμίδες, θα είχε επίσης ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Αναγκαία, επίσης, είναι η προσπάθεια περαιτέρω ανάπτυξης και βελτίωσης του προτεινόμενου συστημικού σχήματος αξιολόγησης.

Βιβλιογραφία

Βαχλιώτης, Θ., Σάλτα, Κ. & Τζουγκράκη, Χ. (2013). Εφαρμογή και αξιολόγηση της μεθόδου «Συστημική Προσέγγιση στη Διδασκαλία και Εκμάθηση (SATL)» στη διδασκαλία της οργανικής χημείας. *Πρακτικά 8ου Πανελλήνιου Συνεδρίου Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών και Νέων Τεχνολογιών στην Εκπαίδευση*, 26-28 Απριλίου, Βόλος.

Ausubel, D.P. (1963). *The psychology of meaningful verbal learning*. Grune & Stratton: New York.

Ausubel, D.P. (1968). *Educational psychology: A cognitive view*. New York: Holt, Reinhard and Winston.

Cabrera, D., Colosi, L., & Lobdell, C. (2008). Systems thinking. *Evaluation and Program Planning*, 31, 299-310.

Fahmy, A.F.M & Lagowski, J.J. (2003). Systemic reform in chemical education: An international perspective. *Journal of Chemical Education*, 80(9), 1078-1083.

Fahmy, A.F.M & Lagowski, J.J. (2004). Using SATL techniques to assess student achievement. *Proceedings of the 18th International Conference on Chemical Education (ICCE)*, Istanbul, Turkey.

Nesbit, J.C. & Adesope, O.O. (2006). Learning with concept and knowledge maps: A meta-analysis. *Review of Educational Research*, 76(3), 413-448.

Schwaninger, M. (2006). System dynamics and the evolution of the systems movement. *Systems Research and Behavioral Science*, 23, 583-594.

Vachliotis, T., Salta, K., Vasiliou, P. & Tzougraki, C. (2011). Exploring novel tools for assessing high school students' meaningful understanding of organic reactions. *Journal of Chemical Education,* 88(3), 337-345.

Vachliotis, T., Salta, K. & Tzougraki, C. (2014). Meaningful understanding and systems thinking in organic chemistry: Validating measurement and exploring relationships. *Research in Science Education*, 44, 239-266.