

Αξιολόγηση Εναλλακτικών Σεναρίων για την Απανθρακοποίηση του Ενεργειακού Συστήματος

Αικατερίνη Παπαποστόλου	Χαρίκλεια Καρακόστα	Χάρης Δούκας	Ιωάννης Ψαρράς
<i>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Αθήνα</i>	<i>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Αθήνα</i>	<i>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Αθήνα</i>	<i>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο Σχολή Ηλεκτρολόγων Μηχανικών και Μηχανικών Υπολογιστών Εργαστήριο Συστημάτων Αποφάσεων και Διοίκησης Ηρώων Πολυτεχνείου 9, 157 80, Αθήνα</i>

Περίληψη

Σήμερα, θεωρείται αναμφισβήτητο ότι οι καινοτομίες, αλλά και η ενέργεια και η πρόκληση της κλιματικής αλλαγής, καθορίζουν την κατεύθυνση του μελλοντικού ενεργειακού συστήματος της Ευρώπης. Το Στρατηγικό Σχέδιο Ενεργειακών Τεχνολογιών (European Strategic Energy Technology Plan - SET Plan) και ο Ενεργειακός Οδικός Χάρτης για το 2050 (Energy Roadmap 2050), καθώς και οι διαβουλεύσεις ανάμεσα στους φορείς χάραξης πολιτικής οδήγησαν στον ορισμό τεσσάρων εναλλακτικών «μονοπατιών» που κατευθύνουν την αποανθρακοποίηση του ενεργειακού τομέα: την εξοικονόμηση ενέργειας, τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, την αποθήκευση άνθρακα και πυρηνικής ενέργειας. Στο παραπάνω πλαίσιο, σχεδιάστηκε μια σειρά εναλλακτικών σεναρίων, τα οποία τοποθετούνται κάτω από δύο βασικές αβεβαιότητες, το επίπεδο συνεργασίας των χωρών και το επίπεδο αποκέντρωσης στον τομέα της ενέργειας. Στόχος της παρούσας μελέτης είναι η αξιολόγηση αυτών των σεναρίων μέσω της ενεργού συμμετοχής εμπλεκόμενων μερών με τη βοήθεια της πολυκριτήριας ανάλυσης, και συγκεκριμένα της μεθόδου Fuzzy PROMETHEE. Η αξιολόγηση βασίζεται στις επιδόσεις των σεναρίων σε τομείς, όπως το ρυθμιστικό πλαίσιο, η ωριμότητα της αγοράς, το βιώσιμο ενεργειακό σύστημα. Τα αποτελέσματα έχουν ως στόχο να υποστηρίξουν τους φορείς χάραξης πολιτικής διερευνώντας σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την ενεργειακή μετάβαση και τις μακροπρόθεσμες επιπτώσεις των εναλλακτικών λύσεων μετριασμού της κλιματικής αλλαγής, τόσο στην οικονομία όσο και στον ενεργειακό τομέα και την τεχνολογική ανάπτυξη.

Λέξεις Κλειδιά

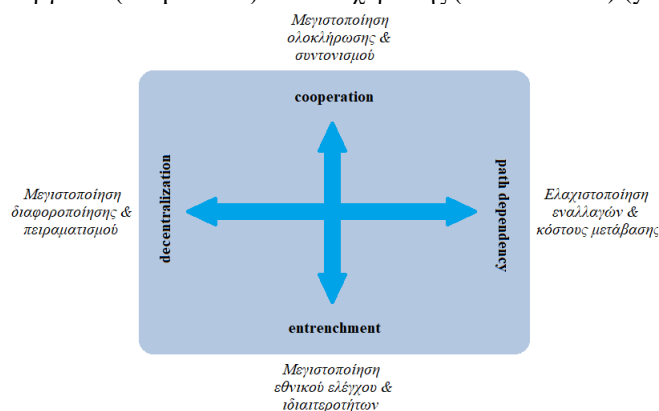
Πολυκριτήρια Ανάλυση, Fuzzy PROMETHEE, Φορείς Χάραξης Πολιτικής, Κλιματική Αλλαγή

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε μια προσπάθεια διαχείρισης της κλιματικής αλλαγής, έχει συμφωνηθεί από τη διεθνή κοινότητα η μέση θερμοκρασία του πλανήτη να μην υπερβεί τον 1,5°C σε σχέση με τη θερμοκρασία της προβιομηχανικής περιόδου (UNFCCC, 2015). Κατά συνέπεια, η Ευρωπαϊκή Ένωση (ΕΕ) εντείνει τις προσπάθειές της για να επιτύχει μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου των κρατών μελών, παρότρυνση άλλων χωρών που θεωρούνται μείζονες ρυπαντές να αναλάβουν σθεναρή δράση και αντιμετώπιση των αναπόφευκτων επιπτώσεων της κλιματικής αλλαγής. Το Στρατηγικό Σχέδιο Ενεργειακών Τεχνολογιών (SET- Plan) καταρτίστηκε το 2008 (EC, 2009) ως το πλαίσιο για την ώθηση της τεχνολογίας στις ευρωπαϊκές πολιτικές για την ενέργεια και το κλίμα. Έκτοτε συσιστά τον πυλώνα τεχνολογίας της ενεργειακής και κλιματικής πολιτικής της ΕΕ και αποτελεί την απάντησή της στην πρόκληση που τίθεται για επιτάχυνση της ανάπτυξης των τεχνολογιών χαμηλών ανθρακούχων εκπομπών, η οποία τελικά αποβλέπει στην ευρεία υιοθέτησή τους από την αγορά. Στο πλαίσιο αυτό η παρούσα εργασία έχει ως στόχο την ανάπτυξη και αξιολόγηση εναλλακτικών σεναρίων για την υποστήριξη αποφάσεων προς ένα ενεργειακό σύστημα απαλλαγμένο από εκπομπές άνθρακα.

Η διαμόρφωση των εναλλακτικών σεναρίων καθοδηγείται από δύο κατηγορίες ερευνητικών ερωτήσεων: Ερωτήσεις σχετικά με το *γιατί* προκύπτει κάθε σενάριο και ερωτήσεις σχετικά με το *τι συμβαίνει* και *τι συνέπειες* επιφέρει κάθε σενάριο. Το Σχήμα 1 παρουσιάζει την τοπολογία των σεναρίων η οποία διαφοροποιεί δύο κρίσιμες

αβεβαιότητες: το βαθμό αποκέντρωσης (x-άξονας), το βαθμό Ευρωπαϊκής συνεργασίας (y-άξονας). Έτσι οι πόλοι κάθε άξονα χαρακτηρίζονται ως εξής: αποκέντρωση (decentralization) έναντι ιστορικής εξάρτησης (path dependency) (x-άξονας), συνεργασία (cooperation) έναντι οχύρωσης (entrenchment) (y-άξονας).



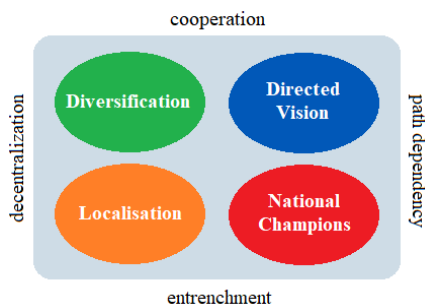
Σχήμα 1: Τοπολογία των Εναλλακτικών Σεναρίων (Source: Wilson & Kim, 2018)

Λόγω της πολυδιάστατης φύσης που εγγενώς χαρακτηρίζει τον καθορισμό τους μελλοντικού ευρωπαϊκού ενεργειακού συστήματος, είναι ιδιαίτερα σημαντικό οι φορείς χάραξης πολιτικής και οι λοιποί εμπλεκόμενοι να δύνανται να αξιολογήσουν τα διαφορετικά μονοπάτια με μια ολιστική προσέγγιση, λαμβάνοντας υπόψιν όλες τις συνέπειες στους διαφορετικούς τομείς επιρροής. Για να μπορέσουν τα σενάρια που προκύπτουν να αξιολογηθούν και να ταξινομηθούν, ώστε να αναδειχθούν εκείνα τα οποία θα χαρακτηριστούν ως βέλτιστα, είναι αναγκαίο να διαμορφωθούν ορισμένα κριτήρια τα οποία, μολονότι μπορεί να είναι αντικρουόμενα μεταξύ τους, συνολικά θα αντικατοπτρίζουν τους παράγοντες κλειδιά για το πρόβλημα. Ως εκ τούτου διαμορφώνεται ένα πρόβλημα πολυκριτήριας ανάλυσης με πολλαπλούς αποφασίζοντες με στόχο την επιλογή του κατάλληλου σεναρίου για την μετάβαση προς ένα βιώσιμο ενεργειακό σύστημα.

2. ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΚΟ ΠΛΑΙΣΙΟ

2.1 Ορισμός Εναλλακτικών Σεναρίων και Κριτηρίων Αξιολόγησης

Οι δύο διαστάσεις αβεβαιότητας που παρουσιάζονται στο Σχήμα 1 συνδυάζονται για να δημιουργήσουν ένα χώρο πιθανοτήτων, ο οποίος μπορεί να διερευνηθεί μέσω των τεσσάρων αντικρουόμενων σεναρίων (Σχήμα 2). Τα σενάρια αυτά αντιστοιχούν σε τέσσερις πορείες προς την απανθράκωση, κυρίως μέσω της ενεργειακής αποδοτικότητας, των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, της πυρηνικής ενέργειας και των τεχνολογιών δέσμευσης και αποθήκευσης άνθρακα.



Σχήμα 2: Εναλλακτικά Σενάρια (Source: Wilson & Kim, 2018)

- **«Diversification»:** Περιγράφει μια αποκεντρωτική πορεία για το Ευρωπαϊκό ενεργειακό σύστημα στο πλαίσιο μια διασυννοριακής συνεργασίας.
- **«Directed Vision»:** Περιγράφει μία εξαρτώμενη πορεία για το ενεργειακό σύστημα της ΕΕ, η οποία κατευθύνεται από το όραμα της Επιτροπής για μια ολοένα και στενότερη ενεργειακή ένωση.

- **«National Champions»:** Περιγράφει εξαρτημένες πορείες στην ΕΕ, στις οποίες το ιστορικό κατεστημένο και τα εθνικά συμφέροντα έχουν ιδιαίτερα σημαντική επιρροή.
- **«Localisation»:** Περιγράφει πώς οι αποκεντρωτικές δυνάμεις που παρατηρούνται σήμερα στην ΕΕ αρχίζουν να αποδυναμώνονται πιο δυναμικά και να οδηγούν σε κεντρικές υποδομές, εταιρίες και ρυθμιστικά περιβάλλοντα, τα οποία ωστόσο χαρακτηρίζονται από εθνική και τοπική ποικιλομορφία.

Τα κριτήρια αξιολόγησης είναι τα εξής:

- **Ρυθμιστικό Πλαίσιο (Κρ.1):** Το κριτήριο αυτό αξιολογεί την επάρκεια του ρυθμιστικού πλαισίου να υποστηρίξει και να διασφαλίζει την υλοποίηση των ενεργειών και των πολιτικών που προτείνονται από κάθε μονοπάτι.
- **Συμβατότητα με την Αγορά (Κρ.2):** Δεδομένου ότι η Ευρώπη διαθέτει μία ώριμη αγορά, είναι σημαντικό να αξιολογηθεί ο βαθμός στον οποίο κάθε μονοπάτι είναι συμβατό με την τρέχουσα κατάσταση.
- **Συμμόρφωση με το SET-Plan (Κρ.3):** Το κριτήριο αυτό αντικατοπτρίζει το βαθμό στον οποίο κάθε μονοπάτι επιτυγχάνει τους στόχους του SET-Plan και αξιολογεί την ευκολία υλοποίησής τους.
- **Επίγνωση των Εμπλεκόμενων (Κρ.4):** Το κριτήριο αυτό αξιολογεί το βαθμό στον οποίο οι εμπλεκόμενοι σε κάθε μονοπάτι έχουν επίγνωση των θεμάτων που αφορούν την κλιματική αλλαγή και λαμβάνουν ενεργά δράση για την καταπολέμησή της.

2.2 Μεθοδολογική Προσέγγιση για την Αξιολόγηση των Σεναρίων

Οι ερωτήσεις οι οποίες προκύπτουν από το προαναφερθέντα κριτήρια και στις οποίες καλούνται να απαντήσουν οι αποφασίζοντες οδηγούν σε δεδομένα εισόδου τα οποία δεν μπορούν να προσδιοριστούν με εύλογο βαθμό ακρίβειας. Ως εκ τούτου οι ασαφείς αριθμοί εμφανίζονται ως καταλληλότεροι για σχέση με τους σαφείς και μπορούν να προσδώσουν μεγαλύτερο ρεαλισμό στα δεδομένα (Papadogeorgos et al. 2017; Papapostolou et al. 2017; 2018). Στην παρούσα εργασία προτείνεται η χρήση ασαφούς λογικής (Zadeh, 1965) σε συνδυασμό με την πολυκριτήρια μέθοδο PROMETHEE, όπως περιγράφεται κάτωθι σύμφωνα με την προτεινόμενη μεθοδολογία των Geldermann et al. (2000), ενσωματώνοντας την προσέγγιση των Chen et al. (2011) για λήψη αποφάσεων με πολλούς αποφασίζοντες. Συγκεκριμένα, λήφθηκαν υπόψιν οι γνώμες αποφασίζόντων που αντιστοιχούν σε τρία βασικά προφίλ: α) Υπεύθυνος χάραξης πολιτικής, β) Επιχειρηματίας – εκπρόσωπος της βιομηχανίας ενέργειας, γ) Ερευνητής – εκπρόσωπος της ακαδημαϊκής κοινότητας. Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε μέσα από τις συναντήσεις και τα συνέδρια στο πλαίσιο του ευρωπαϊκού έργου SET-Nav - Navigating the Roadmap for Clean, Secure and Efficient Energy Innovation¹, όπου οι ενδιαφερόμενοι ερωτήθηκαν σχετικά με τις απόψεις τους για τα τέσσερα σενάρια. Οι αποδόσεις στα κριτήρια και τις εναλλακτικές δόθηκαν με τη βοήθεια γλωσσικών μεταβλητών.

Σε μία προσπάθεια διερεύνησης των πιθανών διαφοροποιήσεων της τελικής κατάταξης των εναλλακτικών μονοπατιών εκτελέστηκαν τέσσερα σενάρια, στο 1^ο σενάριο οι αποφασίζοντες θεωρούνται ισάξιοι (33.33%) και οι γνώμες τους μετρούν το ίδιο στην διαμόρφωση των τελικών αποτελεσμάτων ενώ στα υπόλοιπα 3 δίνεται μεγαλύτερη έμφαση στην γνώμη ενός αποφασίζοντα κάθε φορά (60%), ενώ οι απόψεις των άλλων δύο συνεισφέρουν δευτερευόντως στην τελική κατάταξη (20% έκαστος).

3. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Μελετώντας συνολικά τα αποτελέσματα της παρούσας μεθοδολογικής διαδικασίας προκύπτει ότι ομόφωνα το σώμα των αποφασίζόντων θεωρεί πως οι εναλλακτικές «Directed Vision» και «National Champions» διαθέτουν τις καλύτερες προοπτικές να ευδοκιμήσουν και να επιφέρουν θετικές συνέπειες για το περιβάλλον, την κοινωνία και την οικονομία. Σύμφωνα μάλιστα με τα περισσότερα σενάρια το πιο προοδευτικό «Directed Vision» υπερτερεί του πιο συντηρητικού «National Champions». Ωστόσο, η γενίκευση της παραπάνω διαπίστωσης θεωρείται επισφαλής, ενώ κρίνεται πιο ρεαλιστική η διατύπωση πως οι φορείς χάραξης πολιτικής και οι εμπλεκόμενοι στην αγορά ενέργειας θα έχουν περισσότερα οφέλη αν διαμορφώσουν προτάσεις και στρατηγικές, οι οποίες απομακρύνουν το ευρωπαϊκό ενεργειακό μέλλον από τα μονοπάτια «Localisation» και «Diversification».

¹ www.set-nav.eu

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η αντιμετώπιση του προβλήματος της παρούσας εργασίας ως πολυκριτηριακό πρόβλημα καταργεί την παρωχημένη μονοδιάστατη θεώρησή του, βάσει της οποίας αναζητείται ένα σενάριο το οποίο θα είναι βέλτιστο υπό ένα συγκεκριμένο πρίσμα, λόγου χάρη το ποσοστό των ΑΠΕ στο ενεργειακό μίγμα ή το κόστος μετάβασης. Μια τέτοια προσέγγιση και η διαμόρφωση ενός ολοκληρωμένου μεθοδολογικού πλαισίου που την υποστηρίζει έχει αναμφισβήτητα υψηλό επιστημονικό ενδιαφέρον. Με τη χρήση γλωσσικών μεταβλητών για την αποτύπωση των προτιμήσεων του αποφασίζοντα διαμορφώνεται μια φιλική για τον αποφασίζοντα διαδικασία, ενώ ταυτόχρονα λαμβάνεται υπόψιν η ασάφεια των λεγομένων του, η οποία κωδικοποιείται στα δεδομένα με τη χρήση ασαφών αριθμών. Η προσέγγιση συμβάλει στην επίτευξη ομοφωνίας, καθώς δίνεται η δυνατότητα για συνάθροιση των απόψεων των διαφορετικών αποφασιζόντων προάγοντας έτσι τη συλλογική λήψη αποφάσεων, η οποία είναι σύμφυτη με προβλήματα όπου οι εμπλεκόμενοι είναι πολυάριθμοι και ετερογενείς ως προς τις απόψεις και τις επιδιώξεις τους. Επιπρόσθετα, η μεθοδολογία που αναπτύχθηκε μπορεί να αποτελέσει χρήσιμο και αναγκαίο εργαλείο για την αξιολόγηση των εναλλακτικών, που εκ πρώτης όψεως μοιάζουν μη συγκρίσιμα υπό το πρίσμα των αντικρουόμενων κριτηρίων, καθώς επιτρέπει και απλουστεύει την σύγκριση ανά δύο των εναλλακτικών, παρέχοντας έτσι μια ολιστική και εποπτική εικόνα ενός αχανούς προβλήματος, το οποίο υπό άλλες συνθήκες θα ήταν δύσκολο να αντιμετωπιστεί από αναλυτές αποκλειστικά βασισμένους στην ανθρώπινη εμπειρία και διαίσθηση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Chen, Y., Wang, T., & Wu, C. (2011). Strategic decisions using the fuzzy PROMETHEE for IS outsourcing. *Expert Systems with Applications*, 38(10), 13216-13222. doi:10.1016/j.eswa.2011.04.137
- EC - European Commission. (2009). Investing in the Development of Low Carbon Technologies (SET-Plan). COM(2009) 519.
- Geldermann, J., Spengler, T., Rentz, O., 2000. Fuzzy outranking for environmental assessment. Case study: Iron and steel making industry. *Fuzzy Sets and Systems* 115, 45–65.
- Papadogeorgos, I., Papapostolou, A., Karakosta, C., & Doukas, H. (2017). Multicriteria Assessment of Alternative Policy Scenarios for Achieving EU RES Target by 2030. In *Strategic Innovative Marketing* (pp. 405-412). Springer, Charm.
- Papapostolou, A., Karakosta, C. and Doukas, H. (2018). “Assessment of Alternative Policy Strategies towards a Decarbonised Energy System: A Fuzzy-PROMETHEE Approach”, Book of Abstracts, ICEF IV, 4th International Conference on Engineering and Formal Sciences, 14-15 December 2018, Amsterdam, The Netherlands.
- Papapostolou, A., Karakosta, C., & Doukas, H. (2017), Analysis of policy scenarios for achieving renewable energy sources targets: A fuzzy TOPSIS approach. *Energy & Environment*, 28(1-2), 88-109.
- UNFCCC. (2015). Adoption of the Paris Agreement, 21st Conference of the Parties, Paris: United Nations.
- Wilson, C., & Kim, Y., J. (2018). Mapping empirical analysis of the EU’s energy innovation system onto storylines of future change. Deliverable of the “SET-Nav - Navigating the Roadmap for Clean, Secure and Efficient Energy Innovation” project: <http://set-nav.eu/>
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, 338–353.