



Πρόβλεψη της ζήτησης του φυσικού αερίου στην Ελλάδα με χρήση του Προσαρμοστικού Συστήματος Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού ANFIS

Νικηφόρος Μπούρος

Επιβλέπων Καθηγητής: Γιώργος Ατσαλάκης

Εξεταστική Επιτροπή: Μιχαήλ Δούμπος και Κωνσταντίνος Ζοπουνίδης

Σχολή Μηχανικών Παραγωγής και Διοίκησης

Χανιά, Ιούνιος 2024

«Ευχαριστίες σε όλα τα άτομα που με ενέπνευσαν
Δεν θα μπορούσα να έχω ολοκληρώσει
την παρούσα εργασία
χωρίς μια μνεία
στην οικογένειά μου,
τους φίλους μου,
και τους μέντορές μου
που πίστεψαν σε μένα.

Στον Σωτήρη, την Ειρήνη και την Αλεξάνδρα οφείλω τα πάντα
Στους φίλους, το σήμερα και τα καλύτερα χρόνια
Στους μέντορες, το αύριο και τα επόμενα.

Ας είναι λοιπόν,
στις μικρές και μεγάλες επιτυχίες μας,
στα γλυκόπικρα τέλη...»

Περιεχόμενα

Περίληψη	4
Abstract	4
1. Παρόμοιες μελέτες με χρήση ANFIS	5
1.1 Εισαγωγή.....	5
1.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας	5
2. Εισαγωγή	11
2.1 Το φυσικό αέριο	11
2.2 Σχηματισμός.....	12
2.3 Μηχανισμοί Δημιουργίας Φυσικού Αερίου	15
2.3.1 Διαγένεση	15
2.3.2 Κηρογόνο.....	18
2.3.3 Καταγένεση	21
2.3.4 Μεταγένεση	22
2.3.5 Μετανάστευση.....	24
2.4 Αναζήτηση και εξόρυξη.....	26
2.5 Επεξεργασία	30
2.6 Διανομή και αποθήκευση.....	32
3. Το φυσικό αέριο στην Ελλάδα.....	35
3.1 Το ενεργειακό μείγμα.....	35
3.1 Η ΔΕΠΑ και οι άλλοι φορείς	36
3.2 Η Ελληνική αγορά φυσικού αερίου	39
4. Θεωρητικό υπόβαθρο μοντέλων πρόβλεψης.....	42
4.1 Εισαγωγή.....	42
4.2 Χρονοσειρές	43
4.2.1 Ορισμός και βασικές έννοιες	43
4.2.2 Ανάλυση χρονολογικών σειρών	43
4.2.3 Συνιστώσες χρονολογικών σειρών	44
4.3 Γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης.....	46
4.3.1 Εισαγωγή	46
4.3.2 Παλινδρόμηση	46
4.3.2 Αυτοσυσχέτιση	47
4.3.2 Αυτοπαλινδρόμο Μοντέλο p Τάξεως – Autoregressive Model AR(p)	47
4.3.3 Μοντέλο Κινητού Μέσου q Τάξεως – Moving Average Process MA(q) ...	48

4.3.4 Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο Κινητού Μέσου - Auto Regressive Moving Average (ARMA)	49
4.3.5 Αξιολόγηση μοντέλων και προβλέψεων	49
4.4 Ασαφής Λογική	50
4.4.1 Εισαγωγή στην ασαφή λογική	50
4.4.2 Βασικές έννοιες	51
4.4.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά ασαφών συνόλων	52
4.4.5 Συναρτήσεις συμμετοχής	53
4.4.5 Ασαφείς κανόνες	55
4.4.6 Ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων (FIS)	56
4.4.7 Ασαφή μόντελα και ασαφής μοντελοποίηση	57
4.4.8 Ασαφή μόντελα τύπου Mamdani	58
4.4.9 Ασαφή μόντελα τύπου Sugeno	59
4.5 Νευρωνικά δίκτυα	60
4.6 Νευρο-ασαφή συστήματα	62
4.7 Προσαρμοστικά δίκτυα	65
4.8 Το Προσαρμοστικό σύστημα νευρο-ασαφούς συμπερασμού - ANFIS	65
4.9 Αρχιτεκτονική του ANFIS	68
5. Δεδομένα	70
5.1 Κύρια δεδομένα	70
5.2 Επεξεργασία δεδομένων	72
5.2.1 Σύνολο δεδομένων	72
5.2.2 Εκπαίδευση και έλεγχος δεδομένων	73
5.2.3 Δοκιμές παραμέτρων	74
5.2.3 Μοντέλα ANFIS, AR και ARMA με τα σφάλματα και μετέπειτα αξιολόγηση	74
6. Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου ANFIS	75
7. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις	87
Βιβλιογραφία	88
Κεφάλαιο 1	88
Κεφάλαιο 2	89
Κεφάλαιο 3	94
Κεφάλαιο 4	95

Περίληψη

Ο ενεργειακός τομέας αποτελεί την κινητήρια δύναμη των οικονομιών παγκοσμίως, καθώς δεν περιορίζεται μόνο στην τροφοδότηση της βιομηχανικής ανάπτυξης, επιτρέποντας έτσι την τεχνολογική εξέλιξη και καινοτομία, αλλά παράλληλα, συντηρεί συνολικά τις ανάγκες της καθημερινής ζωής. Για το λόγο αυτό, οι προβλέψεις στον τομέα της ενέργειας κρίνονται απαραίτητες, με την παρούσα εργασία να επικεντρώνεται στην πρόβλεψη της ζήτησης του φυσικού αερίου. Προκειμένου να αναπτυχθεί ένα ακριβές μοντέλο πρόβλεψης φυσικού αερίου για την Ελλάδα, εξετάζεται η εφαρμογή του προσαρμοστικού συστήματος νευρο-ασαφούς συμπερασμού (ANFIS), μια ευέλικτη και εύχρηστη τεχνική η οποία ενσωματώνει τα νευρωνικά δίκτυα με τις αρχές της ασαφούς λογικής. Αρχικά, γίνεται ανασκόπηση παρόμοιων μελετών και παρουσιάζονται οι μηχανισμοί δημιουργίας, αναζήτησης, εξόρυξης, επεξεργασίας και διανομής φυσικού αερίου, με ειδική αναφορά στην ελληνική αγορά και τους κύριους φορείς της. Ακολουθεί το θεωρητικό υπόβαθρο των μοντέλων πρόβλεψης, με αναφορά στις χρονοσειρές, την ασαφή λογική και τα νευρο-ασαφή συστήματα, με έμφαση στη μέθοδο ANFIS και στην αρχιτεκτονική της. Χρησιμοποιώντας δεδομένα της ημερήσιας εισαγωγής φυσικού αερίου από το 2008 και σε βάθος δεκαπενταετίας στην Ελλάδα, από τη βάση δεδομένων της ΔΕΠΑ Εμπορίας, η ανάλυση πραγματοποιείται με τη χρήση του λογισμικού MATLAB. Η διαδοχική δοκιμή παραμέτρων και επανάληψη της μεθόδου με το μοντέλο ANFIS παρουσιάζει χαμηλή τιμή στη ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE) και χαμηλότερα σφάλματα σε σχέση με το Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο (AR) και το Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο Κινητού Μέσου (ARMA), αναδεικνύοντας έτσι το ANFIS ως ένα ικανοποιητικά αποτελεσματικό εργαλείο στην πρόβλεψη της ζήτησης φυσικού αερίου.

Abstract

The energy sector is the driving force of economies worldwide, as it is not only limited to fueling industrial development, thus enabling technological evolution and innovation, but at the same time, it sustains the needs of daily life as a whole. For this reason, forecasts in the energy sector are deemed necessary, with the present paper focusing on the forecasting of natural gas demand. In order to develop an accurate natural gas forecasting model for Greece, the application of the adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS), a flexible and easy-to-use technique that integrates neural networks with fuzzy logic principles, is considered. Initially, similar studies are reviewed and the mechanisms of creation, search, extraction, processing and distribution of natural gas are presented, with special reference to the Greek market and its main players. The theoretical background of forecasting models follows, with reference to time series, fuzzy logic and neuro-fuzzy systems, with an emphasis on ANFIS method and its architecture. Using data of the daily import of natural gas from 2008 and over fifteen years in Greece, from the database of DEPA Commercial, the analysis is carried out using the MATLAB software. Sequential parameter testing and method iteration with the ANFIS model shows low root mean square error (RMSE) and lower errors than the Autoregressive (AR) and ARMA (Autoregressive Moving Average) models, thus highlighting ANFIS as a satisfactorily effective tool in natural gas demand forecasting.

1. Παρόμοιες μελέτες με χρήση ANFIS

1.1 Εισαγωγή

Όταν το 1993 η μέθοδος ANFIS δημοσιεύτηκε για πρώτη φορά από τον Jyh-Shing Roger Jang, ο συγγραφέας επικεντρώθηκε κυρίως στην αρχιτεκτονική και τις τεχνικές πτυχές της μεθόδου, αναλύοντας την ενσωμάτωση των νευρωνικών δικτύων και την ασαφή λογική. Ωστόσο, σε αυτή την ενσωμάτωση οφείλεται η αποτελεσματικότητα της μεθόδου ANFIS, η οποία συνδυάζει τα πλεονεκτήματα της κάθε τεχνικής, δημιουργώντας με τον τρόπο αυτό ένα χρήσιμο εργαλείο. Αν και ο Jang δεν εστίασε στις εφαρμογές της μεθόδου, η μελέτη του έθεσε τις βάσεις για την ανάπτυξή τους, φτάνοντας σήμερα σε μια πληθώρα τομέων εφαρμογής, από τα συστήματα ελέγχου και τις χρηματοπιστωτικές αγορές, μέχρι τον τομέα της ενέργειας και της υγείας. Ειδικότερα, στον τομέα της ενέργειας, η μέθοδος ANFIS έχει επιδείξει την ικανότητά της να προσφέρει ακριβείς και αξιόπιστες προβλέψεις, αντικείμενο άλλωστε και της παρούσας εργασίας.

Για την καλύτερη κατανόηση της παραπάνω ικανότητας αλλά και για τη διαμόρφωση ενός θεωρητικού πλαισίου, χρήσιμη κρίνεται η μελέτη παρόμοιων εργασιών και η αναζήτηση υπαρχουσών εφαρμογών της μεθόδου ANFIS στην πρόβλεψη της ζήτησης του φυσικού αερίου. Αφού μελετήθηκε η δημοσιευμένη βιβλιογραφία, συντάχθηκε μια ανασκόπηση με επιστημονικά άρθρα και εργασίες, η οποία και παρουσιάζεται παρακάτω. Για την εύρεση της βιβλιογραφίας, χρησιμοποιήθηκαν βάσεις δεδομένων όπως το Google Scholar και το ScienceDirect, εισάγοντας λέξεις-κλειδιά όπως «ANFIS», «πρόβλεψη φυσικού αερίου», «ασαφής λογική», «νευρωνικά δίκτυα» αλλά και συνδυασμούς αυτών των όρων, με τα άρθρα να παρουσιάζονται παρακάτω με χρονολογική σειρά από τα πιο πρόσφατα στα πιο παλιά.

1.2 Ανασκόπηση βιβλιογραφίας

«Energy consumption prediction using Petri Nets-ANFIS development technique», I. Qamber (2022)

Στην εργασία αυτή, ο Qamber μελετά την κατανάλωση της ενέργειας στις χώρες του Συμβουλίου Συνεργασίας του Κόλπου (Gulf Cooperation Council - GCC) αναπτύσσοντας ένα μοντέλο πρόβλεψης με βάση τα Petri Nets¹ και τη μέθοδο ANFIS. Το λογισμικό που αναπτύχθηκε ενσωματώνει αυτές τις τεχνικές για την εκτίμηση της μέγιστης ετήσιας ζήτησης φορτίου με βάση τα ιστορικά δεδομένα, με στόχο να υποστηρίξει τις προσπάθειες σχεδιασμού εξοικονόμησης ενέργειας. Το μοντέλο ANFIS-Petri Nets έχει σχεδιαστεί για να διευκολύνει τα εξειδικευμένα συστήματα που βασίζονται σε κανόνες, λαμβάνοντας υπόψη παραμέτρους όπως η θερμοκρασία, η υγρασία, το ΑΕΠ, η πίεση και η κατανάλωση ενέργειας. Η μελέτη υπογραμμίζει τη δημιουργία ενός αποτελεσματικού συστήματος εκτίμησης ενέργειας, ικανού να παρακολουθεί, να αναλύει και να ελέγχει τις συνθήκες του ενεργειακού συστήματος, με πολλά υποσχόμενες εφαρμογές για το μέλλον των κρατών του Συμβουλίου Συνεργασίας του Κόλπου και ενδεχομένως άλλων χωρών.

¹ Ένα δίκτυο Petri είναι ένα σταθμισμένο, κατευθυνόμενο, διμερές γράφημα, στο οποίο οι κόμβοι αντιπροσωπεύουν θέσεις και μεταβάσεις (Πηγή: J. Goutsias, G. Jenkinson, Markovian dynamics on complex reaction networks, Physics Reports)

«Forecasting of Day-Ahead Natural Gas Consumption Demand in Greece Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System», K. Papageorgiou, E. Papageorgiou, K. Poczeta, D. Bochtis και G. Stamoulis (2020)

Σε αυτή τη μελέτη, ο Παπαγεωργίου και οι συνεργάτες του εστιάζουν στην πρόβλεψη της κατανάλωσης του φυσικού αερίου στην Ελλάδα, ένα σημαντικό έργο για τον ενεργειακό σχεδιασμό και τη χάραξη πολιτικής στη χώρα. Για το σκοπό αυτό, ερευνούν τη μέθοδο ANFIS αξιοποιώντας την ενσωμάτωση των νευρωνικών δικτύων και την ασαφή λογική για τη δημιουργία ακριβών και ευέλικτων μοντέλων. Η μελέτη αναπτύσσει μια αρχιτεκτονική ANFIS η οποία προσαρμόζεται στην πρόβλεψη της βραχυπρόθεσμης ζήτησης του φυσικού αερίου χρησιμοποιώντας ιστορικά δεδομένα κατανάλωσης. Η απόδοση του προτεινόμενου μοντέλου ANFIS συγκρίνεται με άλλες μεθόδους πρόβλεψης, συμπεριλαμβανομένων των τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ANNs) και των ασαφών γνωστικών χαρτών (FCMs), καθώς και των υβριδικών συνδυασμών τους. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο ANFIS επιτυγχάνει τελικά υψηλή ακρίβεια πρόβλεψης, με μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος μικρότερο από 20%, σε όλες σχεδόν τις ελληνικές πόλεις που εξετάζονται, ξεπερνώντας τις άλλες μεθόδους.

«Day-ahead natural gas demand forecasting based on the combination of wavelet transform and ANFIS/genetic algorithm/neural network model», I. Panapakidis και A. Dagoumas (2017)

Ο Παναπακίδης και ο Δαγούμας παρουσιάζουν ένα υβριδικό μοντέλο υπολογιστικής νοημοσύνης για να προβλέψουν τη ζήτηση φυσικού αερίου την επόμενη μέρα. Το μοντέλο ενσωματώνει τον Μετασχηματισμό Κυματιδίων (WT), τον Γενετικό Αλγόριθμο (GA), το ANFIS και το Νευρωνικό Δίκτυο Τροφοδοσίας (FFNN) για τη βελτίωση της ακρίβειας της πρόβλεψης. Το μοντέλο λειτουργεί χρησιμοποιώντας πρώτα το WT για την αποσύνθεση του αρχικού σήματος ζήτησης αερίου σε μια σειρά από υποσειρές. Στη συνέχεια, πραγματοποιείται πρόβλεψη κάθε υποσειράς χρησιμοποιώντας ένα ANFIS μοντέλο βελτιστοποιημένο από ένα αλγόριθμο GA. Η έξοδος από το ANFIS στη συνέχεια βελτιώνεται χρησιμοποιώντας ένα FFNN, το οποίο βελτιώνει τη συνολική ακρίβεια πρόβλεψης. Η αποτελεσματικότητα του μοντέλου δοκιμάζεται σε όλα τα σημεία διανομής εντός του δικτύου ΦΑ μιας χώρας, σε αντίθεση με άλλες μελέτες που συνήθως επικεντρώνονται σε περιορισμένο αριθμό σημείων. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση επιτρέπει τη σύγκριση των επιδόσεων σε μερικά πρότυπα κατανάλωσης, προσφέροντας πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά διαφορετικών περιοχών, συμπεριλαμβανομένων μεγάλων αστικών κέντρων, μικρών πόλεων, βιομηχανικών ζωνών, μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας και σταθμών ανεφοδιασμού δημόσιων μεταφορών.

«ANFIS Modeling for Forecasting Oil Consumption of Turkey», O. Senvar, G. Ulutagay και E. T. Bekar (2016)

Στη μελέτη τους, οι Senvar, Ulutagay και Bekar ερευνούν την αλληλεπίδραση της κατανάλωσης πετρελαίου με την οικονομική ανάπτυξη χρησιμοποιώντας το μοντέλο ANFIS, ώστε να προβλέψουν την μακροπρόθεσμη κατανάλωση πετρελαίου στην Τουρκία. Με την ενσωμάτωση παραμέτρων όπως ο πληθυσμός, το ΑΕΠ, οι εισαγωγές και οι εξαγωγές, η μελέτη αναπτύσσει ένα μοντέλο ANFIS που βασίζεται σε δείγματα

δεδομένων από το 1965 έως το 2000. Οι τριγωνικές συναρτήσεις συμμετοχής ορίζονται για κάθε παράμετρο εισόδου για την καταγραφή χαμηλών, μεσαίων και υψηλών επιπέδων στο ANFIS. Χρησιμοποιώντας μια τεχνική διπλής εκθετικής πρόβλεψης, η μελέτη προβλέπει την κατανάλωση πετρελαίου της Τουρκίας από το 2012 έως το 2030, προσφέροντας πληροφορίες για τις μελλοντικές τάσεις.

«Forecasting energy consumption using ensemble ARIMA–ANFIS hybrid algorithm», S. Barak και S. Sadegh (2016)

Στις αναπτυσσόμενες οικονομίες, οι προβλέψεις στον ενεργειακό τομέα καθίστανται δυσκολότερες, καθώς η έλλειψη των δεδομένων παρεμποδίζει την ακρίβεια στις προβλέψεις. Προς απάντηση στο πρόβλημα αυτό, οι Barak και Sadegh προτείνουν έναν υβριδικό αλγόριθμο συνόλου που συνδυάζει μοντέλα ARIMA (Auto Regressive Integrated Moving Average) και ANFIS για τη βελτίωση της πρόβλεψης. Η μελέτη διερευνά τρία μοτίβα με βάση τα δυο μοντέλα με βάση την ετήσια ενεργειακή κατανάλωση στο Ιράν. Αρχικά, εφαρμόζεται το ARIMA σε τέσσερα χαρακτηριστικά εισόδου και χρησιμοποιεί έξι διαφορετικές δομές ANFIS για την πρόβλεψη των μη γραμμικών υπολειμμάτων. Στο δεύτερο μοτίβο, χρησιμοποιείται η πρόβλεψη του ARIMA μαζί με τις τέσσερα χαρακτηριστικά εισόδου ως μεταβλητές εισόδου για την πρόβλεψη ANFIS, δοκιμασμένα με έξι διαφορετικές δομές ANFIS. Τέλος στο τρίτο μοτίβο, εφαρμόζεται το δεύτερο μοτίβο με το μοντέλο διαφοροποίησης δεδομένων AdaBoost για την αντιμετώπιση της ανεπάρκειας δεδομένων, εισάγοντας μια νέα μεθοδολογία. Τελικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι τα υβριδικά μοντέλα ξεπερνούν τα μεμονωμένα μοντέλα ARIMA και ANFIS, με το τρίτο μοτίβο να αποδίδει την υψηλότερη ακρίβεια, μειώνοντας σημαντικά το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE).

«A neuro-fuzzy algorithm for improved gas consumption forecasting with economic, environmental and IT/IS indicators», A. Azadeh, M. Zarrin, H. Rahdar Beik και T. Aliheidari Bioki (2015)

Συνδυάζοντας τη μέθοδο ANFIS με την προσομοίωση υπολογιστή (CS), η έρευνα αυτή στοχεύει στην πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης κατανάλωσης αερίου. Δίνοντας έμφαση στους περιορισμούς των συμβατικών μεθόδων, τονίζεται η σημασία της ακριβούς πρόβλεψης της κατανάλωσης φυσικού αερίου στη λήψη αποφάσεων και στην ανάπτυξη πολιτικής στον ενεργειακό τομέα. Το μοντέλο ANFIS-CS ενσωματώνει διάφορους οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και IT/IS δείκτες (ο αριθμός των χρηστών του διαδικτύου διαιρούμενος ανά πληθυσμό ανά έτος) ως μεταβλητές εισόδου, με την κατανάλωση αερίου ως μεταβλητή εξόδου. Αρχικά, προσδιορίζεται η καλύτερη συνάρτηση κατανομής για κάθε έτος, ακολουθούμενη από τη χρήση CS για τη δημιουργία τυχαίων. Τα δεδομένα στη συνέχεια εισάγονται στο μοντέλο ANFIS για τον εντοπισμό του δικτύου με το χαμηλότερο μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος (MAPE). Έπειτα, η μελέτη συγκρίνει τις τιμές MAPE 12 διαφορετικών δομών νευρωνικών δικτύων Multi-Layer Perceptron και 10 μοντέλων παλινδρόμησης με εκείνες του μοντέλου ANFIS-CS. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι το μοντέλο ANFIS-CS ξεπερνά τόσο τα μοντέλα MLP όσο και τα μοντέλα παλινδρόμησης.

«Time Series Forecasting of Crude Oil Consumption Using Neuro-Fuzzy Inference», S. Rubinstein, A. Goor και A. Rotshtein (2014)

Οι Rubinstein, Goor και Rotshtein μελετούν την εφαρμογή του ANFIS για την πρόβλεψη της κατανάλωσης αργού πετρελαίου στις ΗΠΑ από το 1974 έως το 2012, μια περίοδο που διακρίνεται για τις αλλαγές της. Οι συγγραφείς υπογραμμίζουν την πολυπλοκότητα στην επιλογή των κατάλληλων μεθόδων πρόβλεψης χρονοσειρών λόγω της χαοτικής φύσης των δεδομένων. Αναπτύσσοντας μια μέθοδο για τη μοντελοποίηση των παραμέτρων δεδομένων χρονοσειρών οι συγγραφείς απέδειξαν ότι το ANFIS θα μπορούσε να παράγει προβλέψεις με ικανοποιητικά εύρη σφαλμάτων, προτείνοντας το για τη μοντελοποίηση παραμέτρων σε αμετάβλητες χρονικές σειρές.

«A general neural and fuzzy-neural algorithm for natural gas flow prediction in city gate stations», A. Aramesh, N. Montazerin και A. Ahmadi (2014)

Στη μελέτη αυτή παρουσιάζεται μια μεθοδολογία για την πρόβλεψη της μετάδοσης φυσικού αερίου σε σταθμούς πόλεων (city gate stations) χρησιμοποιώντας νευρωνικά και ασαφή νευρωνικά δίκτυα. Το μοντέλο που αναπτύχθηκε αξιοποιεί δεδομένα από έναν πρωτεύοντα σταθμό για να προβλέψει τη μετάδοση φυσικού αερίου σε έναν δευτερεύοντα σταθμό, με την επιλογή να έχει γίνει σε δύο σταθμούς στο Qazvin του Ιράν. Το τεχνητό νευρωνικό δίκτυο (ANN) και το ANFIS βελτιστοποιούνται για μεγαλύτερη ακρίβεια, με τα αποτελέσματα να δείχνουν ότι το ANFIS υπερτερεί του ANN, επιτυγχάνοντας μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος (MAPE) 5,57% στον κύριο σταθμό. Το μοντέλο ANFIS προσαρμόζεται στη συνέχεια για τον δευτερεύοντα σταθμό, διατηρεί συγκρίσιμο MAPE 5,73% παρά τις διακυμάνσεις στους μεταδιδόμενους όγκους φυσικού αερίου. Η έρευνα διερευνά επίσης τον αντίκτυπο των σφαλμάτων προσαρμογής στον δευτερεύοντα σταθμό. Η συγκεκριμένη προσέγγιση αποδεικνύεται χρήσιμη για την πρόβλεψη μετάδοσης φυσικού αερίου σε σταθμούς με περιορισμένα δεδομένα αλλά με παρόμοια κατανάλωση, προσφέροντας οικονομικές λύσεις εξαλείφοντας την ανάγκη ανάπτυξης ξεχωριστών μοντέλων πρόβλεψης για κάθε σταθμό.

«A Neuro-fuzzy-stochastic Frontier Analysis Approach for Long-term Natural Gas Consumption Forecasting and Behavior Analysis: The Cases of Bahrain, Saudi Arabia, Syria, and UAE», A. Azadeh, S.M. Asadzadeh, M. Saberi, V. Nadimi, A. Tajvidi και M. Sheikalishahi (2011)

Συνδυάζοντας το ANFIS με τη στοχαστική ανάλυση συνόρων (SFA) οι συγγραφείς προτείνουν μια καινοτόμο προσέγγιση, για την πρόβλεψη της μακροπρόθεσμης κατανάλωσης φυσικού αερίου και την ανάλυση της καταναλωτικής συμπεριφοράς στο Μπαχρέιν, τη Σαουδική Αραβία, τη Συρία και τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα. Χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές εισόδου το ΑΕΠ και τον πληθυσμό, αναπτύσσονται έξι διαφορετικά μοντέλα και έπειτα συγκρίνονται με βάση το μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος. Για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης του μοντέλου, εφαρμόζονται τεχνικές προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας των δεδομένων. Η προσέγγιση ANFIS-SFA αντιμετωπίζει αποτελεσματικά την πολυπλοκότητα, την αβεβαιότητα, την τυχαιότητα και πολλά άλλα μοναδικά χαρακτηριστικά που συζητούνται σε αυτή τη διατριβή.

«Forecasting of natural gas consumption with neural network and neuro fuzzy system», O. Kaynar, I. Yilmaz και F. Demirkoparan (2010)

Οι Kaynar, Yilmaz και Demirkoparan επικεντρώνονται στην πρόβλεψη της κατανάλωσης φυσικού αερίου στην Τουρκία, αναγνωρίζοντας την κρίσιμη σημασία της, λόγω της πολιτικής κατάστασης που επηρεάζεται από το εξωτερικό και της μικρής χωρητικότητας των αποθεμάτων. Αυτή η μελέτη προβλέπει την εβδομαδιαία κατανάλωση φυσικού αερίου της Τουρκίας χρησιμοποιώντας τρεις μεθοδολογίες: τη μέθοδο ARIMA, μια κλασική τεχνική ανάλυσης χρονοσειρών, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN), συμπεριλαμβανομένου του Multi-Layer Perceptron (MLP) και του Radial Basis Function Network (RBFN) και το ANFIS. Η μελέτη κατασκευάζει διάφορα μοντέλα πρόβλεψης για κάθε μέθοδο και επιλέγει το μοντέλο με την καλύτερη απόδοση με βάση την απόδοση πρόβλεψης. Στη συνέχεια γίνονται προβλέψεις χρησιμοποιώντας αυτά τα μοντέλα και τα αποτελέσματα συγκρίνονται για να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά τους.

«An Adaptive Network Based Fuzzy Inference System-Fuzzy Data Envelopment Analysis for Gas Consumption Forecasting and Analysis: The Case of South America», A. Behrouznia, M. Saberi, A. Azadeh, S. M. Asadzadeh και P. Pazhoheshfar (2010)

Στη μελέτη αυτή οι συγγραφείς προτείνουν μια καινοτόμο προσέγγιση που συνδυάζει τη μέθοδο ANFIS και την περιβάλλουσα ανάλυση ασαφών δεδομένων (fuzzy data envelopment analysis - FDEA) για τη μακροπρόθεσμη πρόβλεψη και ανάλυση κατανάλωσης φυσικού αερίου, εστιάζοντας στη Νότια Αμερική. Αναπτύχθηκαν έξι μοντέλα, με εκτενή διερεύνηση των παραμέτρων ANFIS και των γλωσσικών μεταβλητών. Τα μοντέλα χρησιμοποιούν το ΑΕΠ και τον πληθυσμό ως μεταβλητές εισόδου, με εκπαιδευμένα μοντέλα ANFIS που αξιολογούνται με βάση το MAPE. Εφαρμόζονται τεχνικές προεπεξεργασίας και μετεπεξεργασίας δεδομένων για τη βελτίωση της απόδοσης του μοντέλου. Το FDEA χρησιμοποιείται για την εξέταση της καταναλωτικής συμπεριφοράς για φυσικό αέριο, με δεδομένα πραγματικής κατανάλωσης από έξι χώρες της Νότιας Αμερικής που χρησιμοποιούνται για προβλέψεις έως το 2015. Η προσέγγιση ANFIS-FDEA καταδεικνύει την ικανότητά της να χειρίζεται την πολυπλοκότητα, την αβεβαιότητα και άλλα μοναδικά χαρακτηριστικά, προσφέροντας πολύτιμες πληροφορίες για την κατανάλωση του φυσικού αερίου.

«One Step-Ahead ANFIS Time Series Model for Forecasting Electricity Loads», C.Cheng και L. Wei (2010)

Οι συγγραφείς επικεντρώνονται στην πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου προτείνοντας ένα νέο μοντέλο που ενσωματώνει την ιδέα ενός βήματος μπροστά στο ANFIS. Αναγνωρίζοντας τους περιορισμούς των συμβατικών στατιστικών μεθόδων και των τεχνολογιών τεχνητής νοημοσύνης στον χειρισμό μη γραμμικών σχέσεων και στη δημιουργία κατανοητών κανόνων, η μελέτη εισάγει μια νέα προσέγγιση, βασισμένη στο ANFIS, ενισχύοντας την ακρίβεια της πρόβλεψης. Το προτεινόμενο μοντέλο ενσωματώνει προσαρμοστικές εξισώσεις πρόβλεψης για περαιτέρω βελτίωση της ακρίβειας και βελτιστοποίηση της απόδοσης. Κατά την αξιολόγηση της απόδοσης, έξι

διαφορετικά μοντέλα χρησιμοποιούνται ως σημεία αναφοράς. Τα πειραματικά ευρήματα υπογραμμίζουν την υπεροχή του προτεινόμενου μοντέλου σε σχέση με τα υπάρχοντα, εμφανίζοντας χαμηλότερο μέσο απόλυτο ποσοστό σφαλμάτων.

«An adaptive network-based fuzzy inference system for short-term natural gas demand estimation: Uncertain and complex environments», A. Azadeh, S. Asadzadeh και A. Ghanbari (2010)

Στη εργασία αυτή, οι συγγραφείς τονίζουν τη σημασία της ακριβούς βραχυπρόθεσμης εκτίμησης και πρόβλεψης της ζήτησης φυσικού αερίου για την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων στον ενεργειακό τομέα. Προτείνεται μια προσέγγιση ANFIS που χρησιμοποιεί τυπικές μεταβλητές εισόδου και ενσωματώνει έννοιες προεπεξεργασίας και μετα-επεξεργασίας για την ενίσχυση της ακρίβειας. Η μελέτη αποδεικνύει την αποτελεσματικότητα της προσέγγισης ANFIS στην εκτίμηση της κατανάλωσης φυσικού αερίου στο Ιράν. Η προτεινόμενη προσέγγιση δείχνει να χειρίζεται ικανοποιητικά τη μη γραμμικότητα, την πολυπλοκότητα και την αβεβαιότητα σε σύνολα δεδομένων του πραγματικού κόσμου, παρέχοντας στους υπεύθυνους χάραξης πολιτικής ένα πιο ακριβές εργαλείο για την πρόβλεψη της βραχυπρόθεσμης ζήτησης φυσικού αερίου.

"A hybrid simulation-adaptive network based fuzzy inference system for improvement of electricity consumption estimation" A. Azadeh, M. Saberi, A. Gitiforouz, Z. Saberi (2009)

Συνδυάζοντας ένα προσαρμοστικό σύστημα ασαφούς συμπερασμού βασισμένο στο δίκτυο (ANFIS), την προσομοίωση υπολογιστή και τους αλγόριθμους χρονοσειρών, η μελέτη αυτή εισάγει μια υβριδική προσέγγιση για την εκτίμηση και την πρόβλεψη κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας. Ο προτεινόμενος αλγόριθμος είναι ικανός να χειρίζεται την αβεβαιότητα, την ασάφεια και την πολυπλοκότητα που είναι εγγενείς στις εργασίες εκτίμησης και πρόβλεψης. Η μελέτη χρησιμοποιεί προσομοίωση υπολογιστή για τη δημιουργία τυχαίων μεταβλητών για τη μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, αξιολογώντας διάφορες δομές ANFIS για τον εντοπισμό του αποτελεσματικότερου μοντέλου. Τα μοντέλα επιλέγονται χρησιμοποιώντας τη δοκιμή Granger-Newbold, ενώ η αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης υβριδικής προσέγγισης αποδεικνύεται χρησιμοποιώντας δεδομένα μηνιαίας κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας στο Ιράν από το 1995 έως το 2005. Η υπεροχή του αλγορίθμου αποδεικνύεται μέσω συγκρίσεων με προσεγγίσεις γενετικού αλγορίθμου (GA) και τεχνητού νευρωνικού δικτύου (ANN).

«Using adaptive network based fuzzy inference system to forecast regional electricity loads» L.C. Ying και M.C. Pan (2008)

Η συγκεκριμένη μελέτη στοχεύει στην πρόβλεψη των περιφερειακών φορτίων στην Ταϊβάν, εφαρμόζοντας το μοντέλο ANFIS. Η μελέτη αξιολογεί την απόδοση του ANFIS συγκρίνοντάς το με πολλά άλλα μοντέλα, όπως την παλινδρόμηση, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα, τις μηχανές υποστήριξης διανυσμάτων με γενετικούς αλγόριθμους (SVMG) κ.α. Τα αποτελέσματα, με βάση τα μέσα απόλυτα ποσοστά σφαλμάτων και άλλα στατιστικά μέτρα, δείχνουν ότι το μοντέλο ANFIS επιτυγχάνει ανώτερη απόδοση πρόβλεψης σε σύγκριση με τα άλλα μοντέλα, αναδεικνύοντάς το ως μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση για την ακριβή πρόβλεψη των περιφερειακών φορτίων ηλεκτρικής ενέργειας.

2. Εισαγωγή

2.1 Το φυσικό αέριο

Το φυσικό αέριο είναι ένα ορυκτό αέριο μείγμα υδρογονανθράκων το οποίο συναντάται είτε σε κοιτάσματα πετρελαίου είτε μόνο του σε κοιτάσματα φυσικού αερίου². Αποτελείται σε μεγάλο βαθμό από μεθάνιο, αλλά περιέχει και άλλους υδρογονάνθρακες, συνήθως από αιθάνιο μέχρι εξάνιο. Επιπλέον, μπορεί να περιέχει ανόργανους ρύπους, όπως το υδρόθειο και το διοξείδιο του άνθρακα, αλλά και άζωτο, ίχνη ηλίου και υδρογόνου³. Ενώ το κάρβουνο είναι στερεό και το πετρέλαιο υγρό, το φυσικό αέριο είναι ένα άχρωμο, αόρατο και ελαφρύτερο από τον αέρα⁴. Για να γίνεται αισθητή η παρουσία του, προστίθενται οσμηρές ουσίες, οι οποίες καθιστούν αντιληπτές τις τυχόν διαρροές. Εμφανίζεται είτε σε “υγρή” μορφή, η οποία περιέχει μεθάνιο με κυμαινόμενες αναλογίες βαρύτερων υδρογονανθράκων είτε σε “ξηρή”, δηλαδή καθαρό μεθάνιο.

Πίνακας 1: Σύσταση Φυσικού Αερίου. Πηγή: Speight, J. G. (2007). Natural Gas: A Basic Handbook. Gulf Publishing Company.

Συστατικά	Χημικός τύπος	%v/v
Μεθάνιο	CH_4	>85
Αιθάνιο	C_2H_6	2-8
Προπάνιο	C_3H_8	1-5
n-Βουτάνιο	C_4H_{10}	1-2
ισο-Βουτάνιο	C_4H_{10}	<0.3
n-Πεντάνιο	C_5H_{12}	1-5
ισο-Πεντάνιο	C_5H_{12}	<0.4
Εξάνιο, επτάνιο, οκτάνιο	C_nH_{2n+2}	<2
Διοξείδιο του άνθρακα	CO_2	1-2
Υδρόθειο	H_2S	1-2
Οξυγόνο	O_2	<0.1
Άζωτο	N_2	1-5
Ήλιο	He	<0.5

Το φυσικό αέριο περιέχει μικρό αριθμό συστατικών, σε αντίθεση με το αργό πετρέλαιο, στο οποίο υπάρχει μεγάλη ποικιλία μορίων. Το γεγονός αυτό επιτρέπει το χαρακτηρισμό του φυσικού αερίου με βάση ένα μικρό αριθμό παραμέτρων⁵. Οι κύριες παράμετροι που χρησιμοποιούνται για τον χαρακτηρισμό του φυσικού αερίου είναι:

- Η περιεκτικότητα σε μεθάνιο, καθώς και σε υψηλότερους υδρογονάνθρακες, όταν υπάρχουν εκφράζεται από την αναλογία $\frac{C_1}{\sum C_n}$ (μεθάνιο/συνολικοί υδρογονάνθρακες).
- Η περιεκτικότητα σε CO_2 , H_2S , N_2 και άλλα αέρια, εάν υπάρχουν.

² Speight, J.G., 2007. Natural Gas: A Basic Handbook. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

³ Carroll, J.J., 2010. Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration. John Wiley και Sons Inc., Scrivener publishing LLC., Massachusetts, USA.

⁴ Wang, X. και Economides, M., 2013. Advanced natural gas engineering. Advanced Natural Gas Engineering.

⁵ Tissot, B.P., Welte, D.H. (1984). Petroleum Formation and Occurrence. Springer, Berlin, Heidelberg.

- Η σύνθεση ισοτόπων άνθρακα του αερίου υδρογονάνθρακα, εκφρασμένη συνήθως σε $\delta^{13}C\%$. Το $\delta^{13}C_1$ αναφέρεται την ισοτοπική σύνθεση του μεθανίου.
- Η σύνθεση ισοτόπων υδρογόνου του αερίου υδρογονάνθρακα, συνήθως εκφρασμένη σε δD .

2.2 Σχηματισμός

Ο σχηματισμός του φυσικού αερίου αποτελεί μια πολύπλοκη διαδικασία η οποία καθορίζεται από τις γεωλογικές συνθήκες, τα καθεστώτα θερμοκρασίας-πίεσης και τις διάφορες χημικές ενώσεις. Υπάρχουν τρεις διαδικασίες σχηματισμού: η θερμογενετική, η βιογενετική και η αβιογενετική διαδικασία⁶. Η κατανόηση αυτών των διαδικασιών είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ενεργειακή βιομηχανία, καθώς προσπαθεί να βελτιώσει τις διαδικασίες έρευνας και εξόρυξης, αναζητώντας παράλληλα λύσεις για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Η επικρατέστερη θεωρία ορίζει ότι το φυσικό αέριο και το αργό πετρέλαιο σχηματίζονται όταν οργανική ύλη ή οργανικά υπολείμματα, όπως τα υπολείμματα φυτών ή ζώων, συμπίεζονται κάτω από τη Γη, σε πολύ υψηλή πίεση για περιόδους εκατομμυρίων ετών. Στα πρώτα στάδια, η οργανική ύλη συντίθεται από έμβιους οργανισμούς και στη συνέχεια αποτίθεται και διατηρείται σε ιζήματα. Η επιρροή περαιτέρω γεωλογικών διαδικασιών μπορεί να μετατρέψει μέρος της ιζηματογενούς οργανικής ύλης σε διάφορες ενώσεις και τελικά σε πετρέλαιο και φυσικό αέριο.

Αρχικά, αξίζει να μελετηθεί η σύσταση της βιομάζας η οποία άλλωστε αποτελεί υποσύνολο της οργανικής ύλης. Ως βιομάζα αναφέρεται η συνολική μάζα της ζωντανής ή πρόσφατα νεκρής οργανικής ύλης, ενώ ως ιζήματα το σύνολο στερεών σωματιδίων που κατακάθονται στον πυθμένα των υδάτινων σωμάτων ή συσσωρεύονται στην ξηρά. Όλοι οι οργανισμοί αποτελούνται από τα ίδια χημικά συστατικά: λιπίδια, πρωτεΐνες, υδατάνθρακες και λιγνίνη.

Ως λιπίδια μπορούν να οριστούν οι οργανικές ουσίες που προέρχονται από έμβια ύλη, οι οποίες είναι αδιάλυτες στο νερό αλλά είναι διαλυτές σε μη πολικούς διαλύτες όπως η αλκοόλη, ο αιθέρας, το χλωροφόρμιο και το βενζόλιο⁷. Τα λιπίδια περιλαμβάνουν λιπαρές ουσίες, όπως ζωικό λίπος, φυτικά έλαια και κεριά⁸. Τα λίπη χρησιμοποιούνται στον ενεργειακό προϋπολογισμό των οργανισμών ενώ τα κεριά είναι σχεδιασμένα για προστατευτικές κυρίως λειτουργίες. Τα λιπίδια παράγονται, μεταφέρονται και αναγνωρίζονται από τις συντονισμένες δράσεις πολλών ενζύμων, πρωτεϊνών σύνδεσης και υποδοχέων⁹. Τα λιπίδια αποτελούν ένα σημαντικό συστατικό της οργανικής ύλης και βρίσκονται σε αφθονία φυτικά έλαια, στις κυτταρικές μεμβράνες των φυκών και στους λιπώδεις ιστούς των θαλάσσιων οργανισμών.

⁶ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

⁷ Freedland, R.A., and S. Briggs. "Lipids and Fatty Acids." In *A Biochemical Approach to Nutrition. Outline Studies in Biology*. Springer, Dordrecht, 1977. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5732-9_4.

⁸ Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁹ Fahy, Eoin, Shankar Subramaniam, H. Alex Brown, Christopher K. Glass, Alfred H. Merrill, Robert C. Murphy, Christian R.H. Raetz, David W. Russell, Yousuke Seyama, Walter Shaw, Takao Shimizu, Friedrich Spener, Gerrit van Meer, Michael S. VanNieuwenhze, Stephen H. White, Joseph L. Witztum, and Edward A. Dennis., 2005. *A Comprehensive Classification System for Lipids*. *Journal of Lipid Research* 46, no. 5.

Οι πρωτεΐνες είναι πολυμερή υψηλής τάξης, κατασκευασμένα από μεμονωμένα αμινοξέα¹⁰. Τα μόρια πρωτεΐνης ρυθμίζουν και εκτελούν τις βασικές λειτουργίες ενός ζωντανού οργανισμού και δίνουν στον οργανισμό τη δομή και τα χαρακτηριστικά του¹¹. Μπορούν να χρησιμεύσουν ως δομικά στοιχεία, βιοχημικοί καταλύτες, ορμόνες, ένζυμα και εφευρήματα του κυτταρικού θανάτου¹². Οι αδιάλυτες πρωτεΐνες μπορεί να διασπαστούν στα μονομερή τους, τα αμινοξέα, με την παρουσία νερού, λόγω της δράσης των ενζύμων. Αντιπροσωπεύουν τις περισσότερες από τις ενώσεις αζώτου στους οργανισμούς ενώ με τη μορφή ενζύμων, καταλύουν βιοχημικές αντιδράσεις εντός και εκτός των κυττάρων.

Οι υδατάνθρακες είναι μια συλλογική ονομασία για μεμονωμένα σάκχαρα και τα πολυμερή τους¹³. Περιλαμβάνουν τους μονοσακχαρίτες (π.χ. γλυκόζη), τους δισακχαρίτες (π.χ. σακχαρόζη) και τους πολυσακχαρίτες (π.χ. άμυλο και κυτταρίνη). Αυτές οι οργανικές ενώσεις χρησιμεύουν κυρίως ως πηγή ενέργειας για τους ζωντανούς οργανισμούς. Η κυτταρίνη και η χιτίνη αποτελούν από τους πιο σημαντικούς πολυσακχαρίτες που υπάρχουν στη φύση, καθώς διαδραματίζουν κρίσιμο δομικό ρόλο, με την κυτταρίνη να παρέχει ακαμψία στα κυτταρικά τοιχώματα των φυτών¹⁴. Μέσα σε ιζηματογενή περιβάλλοντα, οι υδρογονάνθρακες παρουσιάζουν μια ποικιλία μορφών, συμπεριλαμβανομένων αλειφατικών και αρωματικών ενώσεων. Αλειφατικοί υδρογονάνθρακες όπως τα αλκάνια, τα αλκένια και τα αλκίνια βρίσκονται συνήθως στα ιζήματα, ενώ οι αρωματικοί υδρογονάνθρακες όπως το βενζόλιο είναι επίσης διαδεδομένοι¹⁵.

Η λιγνίνη είναι ένα από τα κύρια συστατικά του φυτικού κυτταρικού τοιχώματος και είναι ένα φυσικό φαινολικό πολυμερές με υψηλό μοριακό βάρος, πολύπλοκη σύνθεση και δομή¹⁶. Η λιγνίνη εμφανίζεται ως ένα τρισδιάστατο δίκτυο που βρίσκεται μεταξύ των μικκυλίων κυτταρίνης στους ιστούς υποστήριξης των φυτών¹⁷. Η βιοσύνθεση της λιγνίνης συμβάλλει εκτενώς στην ανάπτυξη των φυτών, ιστών και οργάνων και ανταποκρίνεται σε διάφορες βιοτικές και αβιοτικές καταπονήσεις. Σε χειρσαία περιβάλλοντα, με τον θάνατο των φυτών, τα πλούσια σε λιγνίνη κυτταρικά τοιχώματα προστίθενται στην οργανική ύλη, η οποία στη συνέχεια δύναται να μεταφερθεί από υδάτινα σώματα όπως ποτάμια και ρυάκια, και να συσσωρευθεί τελικά σε υδάτινα περιβάλλοντα. Στα φυτά, η λιγνίνη συντίθεται με αφυδάτωση και συμπίκνωση αρωματικών αλκοολών όπως το κωνοφερύλιο, το σιναπύλιο και η κουμαρυλική αλκοόλη¹⁸.

Στα πλαίσια διερεύνησης της προέλευσης του φυσικού αερίου, αναπόσπαστο μέρος της διαδικασίας αποτελεί η φωτοσύνθεση, η οποία ευθύνεται άλλωστε για τη μαζική

¹⁰ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

¹¹ Schultz, R.M. 2017. *Proteins and Protein Structure*. In *Reference Module in Life Sciences*. Elsevier.

¹² LaPelusa, A, and R. Kaushik., 2022. *Physiology, Proteins*. In *StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing*.

¹³ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

¹⁴ Cosgrove, D. J., 2005. *Growth of the plant cell wall*. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 6(11), 850-861.

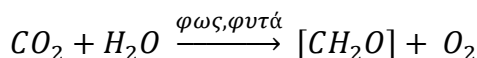
¹⁵ Durand, B, 2003. *Role of Organic Matter in the Formation of Oil and Gas*. "Oil and Gas Science and Technology - Rev. IFP, Volume 58, Number 2.

¹⁶ Liu, Q., L. Luo, and L. Zheng, 2018. *Lignins: Biosynthesis and Biological Functions in Plants*. "International Journal of Molecular Sciences 19, no. 2.

¹⁷ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

¹⁸ Ως άνωθεν.

παραγωγή οργανικής ύλης. Βασική προϋπόθεση για τη φωτοσύνθεση είναι η χλωροφύλλη που απορροφά το φως, ενώ τα φωτοσυνθετικά βακτήρια και τα φύκια ήταν οι πρώτοι οργανισμοί που ευθύνονται για αυτή τη μαζική παραγωγή. Η αντίδραση μπορεί να αναπαρασταθεί από την εξίσωση:



Από τη χημική εξίσωση προκύπτει ότι στη φωτοσύνθεση λαμβάνει χώρα η μετατροπή του διοξειδίου του άνθρακα (CO_2) και του νερού (H_2O) σε υδατάνθρακες (CH_2O) και οξυγόνο (O_2). Με βάση τη φωτοσύνθεση τέθηκαν τα θεμέλια για τη διατροφική πυραμίδα και την εξέλιξη ανώτερων μορφών ζωής. Παράλληλα, καθοριστικό ρόλο διαδραμάτισε στον εμπλουτισμό με οξυγόνο στην ατμόσφαιρα της γης και τελικά στη μαζική παραγωγή οργανικής ύλης¹⁹. Η φωτοσύνθεση, η οργανική ύλη και το φυσικό αέριο φαίνεται να συνδέονται έμμεσα μεταξύ τους μέσω μιας σειράς γεωλογικών και βιολογικών διεργασιών, ωστόσο η σχέση αυτή διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στο σχηματισμό του φυσικού αερίου.

Ποσοτικά, τέσσερις είναι οι σημαντικότεροι παράγοντες της οργανικής ύλης στα ιζήματα: το φυτοπλαγκτόν, το ζωοπλαγκτόν, τα ανώτερα φυτά και τα βακτήρια. Η κατανόηση των πηγών αυτών και της συσσώρευσης οργανικής ύλης στα ιζήματα από διάφορες βιολογικές προελεύσεις επιτρέπει την καλύτερη αποτύπωση των δυνατοτήτων των υδρογονανθράκων.

Ως φυτοπλαγκτόν ορίζονται φωτοσυνθετικοί μικροοργανισμοί οι οποίοι κατοικούν σε υδάτινα περιβάλλοντα και χρησιμοποιούν το ηλιακό φως για να μετατρέψουν το διοξείδιο του άνθρακα σε οργανική ύλη μέσω της φωτοσύνθεσης. Η οργανική ύλη του φυτοπλαγκτόν αποτελείται κυρίως από πρωτεΐνες, κλάσμα λιπιδίων και μεταβλητές ποσότητες υδατανθράκων. Το κλάσμα των λιπιδίων του περιέχει λιπαρά οξέα, μη σαπωνοποιημένες ενώσεις, αλκοόλες και υδρογονάνθρακες. Παρά το γεγονός ότι η βιομάζα από φυτοπλαγκτόν στους ωκεανούς αντιπροσωπεύει μόνο το 1-2% του συνολικού παγκόσμιου φυτικού άνθρακα, είναι υπεύθυνη για τη απορρόφηση μεταξύ 30 και 50 δισεκατομμυρίων μετρικών τόνων άνθρακα ετησίως, δηλαδή το 40% του παγκόσμιου συνόλου²⁰. Το θαλάσσιο φυτοπλαγκτόν είναι η κύρια πηγή οργανικής ύλης στους ωκεανούς μέσω της φωτοσύνθεσης²¹.

Το ζωοπλαγκτόν, το οποίο τρέφεται με φυτοπλαγκτόν, συμβάλλει στον κύκλο της οργανικής ύλης καταναλώνοντας και μετατρέποντας τους πρωτογενείς παραγωγούς σε δευτερογενή οργανικό υλικό²². Ως μια ποικιλόμορφη ομάδα μικρών υδρόβιων οργανισμών που επιπλέουν σε υδάτινα οικοσυστήματα, συμπεριλαμβανομένων των ωκεανών, των λιμνών και των ποταμών βρίσκονται κοντά στη βάση της τροφικής αλυσίδας και χρησιμεύουν ως τροφή για μεγαλύτερα ζώα²³. Δεδομένου ότι το

¹⁹ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

²⁰ Falkowski, P.G., 1994. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles. *Photosynth Res* 39, 235–258.

²¹ Whittle, K.J., 1977. Marine Organisms and Their Contribution to Organic Matter in the Ocean." *Marine Chemistry* 5, no. 4-6.

²² Steinberg DK, Landry MR. 2017. Zooplankton and the Ocean Carbon Cycle. *Ann Rev Mar Sci.*

²³ J. Lenz, 2000. Introduction, in *ICES Zooplankton Methodology Manual*, ed. Roger Harris, Peter Wiebe, Jürgen Lenz, Hein Rune Skjoldal, and Mark Huntley. Academic Press.

ζωοπλαγκτόν τρέφεται απευθείας με το φυτοπλαγκτόν, υπάρχει μια ορισμένη ομοιότητα μεταξύ του κλάσματος λιπιδίου του φυτοπλαγκτόν και του ζωοπλαγκτόν²⁴.

Τα ανώτερα φυτά, γνωστά και ως αγγειακά φυτά είναι μια υποομάδα των φυτών της ξηράς οι οποίες χαρακτηρίζονται από εξειδικευμένους ιστούς για τη διοχέτευση του νερού και θρεπτικών συστατικών, όπως το ξυλόμιο, το κληρένχυμα και τις ρίζες²⁵. Το κύριο υλικό των ανώτερων φυτών, ιδιαίτερα των θάμνων και των δέντρων, αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη και λιγνίνη (περίπου 50-70% μαζί) ενώ οι πρωτεΐνες και τα λιπίδια είναι δευτερεύουσας σημασίας²⁶. Τα ανώτερα φυτά συνεισφέρουν ουσιαστικά στην εισροή χερσαίας οργανικής ύλης στα ιζήματα μέσω των απορριμμάτων φύλλων, των ξυλωδών υπολειμμάτων και του υλικού ριζών²⁷.

Τα βακτήρια είναι μονοκύτταροι μικροοργανισμοί οι οποίοι δεν διαθέτουν πυρηνική μεμβράνη, είναι μεταβολικά ενεργοί και διαιρούνται με δυαδική σχάση²⁸. Περιέχουν περίπου 80% ή περισσότερο νερό και το υπόλοιπο είναι οργανική ύλη, ενώ δίχως τα υγρά, αποτελούνται από περίπου 50% άνθρακα, 10-15% άζωτο, 2-6% φώσφορο και 1% θείο²⁹. Όσον αφορά τους τύπους οργανικών ενώσεων, τα βακτήρια αποτελούνται από περίπου 50% πρωτεΐνες, 20% υλικό κυτταρικού τοιχώματος, 10% λιπίδια και το υπόλοιπο είναι ριβονουκλεϊκά και δεσοξυριβονουκλεϊκά οξέα³⁰. Τα βακτήρια συντελούν καθοριστικό ρόλο στην αποσύνθεση και την ανακύκλωση της οργανικής ύλης στα ιζήματα καθώς διασπούν πολύπλοκες οργανικές ενώσεις σε απλούστερες μορφές, απελευθερώνοντας ενώσεις άνθρακα.

2.3 Μηχανισμοί Δημιουργίας Φυσικού Αερίου

Η οργανική ύλη η οποία εμφανίζεται σε ιζηματογενείς λεκάνες αποσυντίθεται σχετικά αργά υπό την επίδραση θερμοκρασίας και πίεσης σε μεγάλο βάθος³¹. Ο μετασχηματισμός της οργανικής ύλης σε υδρογονάνθρακες είναι μια πολύπλοκη διαδικασία που περιλαμβάνει τα διαδοχικά στάδια της διαγένεσης, της καταγένεσης, της μεταγένεσης και της μεταμόρφωσης. Οι διαδικασίες αυτές είναι άρρηκτα συνδεδεμένες με το σχηματισμό του φυσικού αερίου καθώς αποτελούν τα στάδια τα οποία θα οδηγήσουν στη δημιουργία και συσσώρευση υδρογονανθράκων εντός των ταμιευτήρων.

2.3.1 Διαγένεση

Το αρχικό στάδιο στη μετατροπή της οργανικής ύλης σε υδρογονάνθρακες είναι η διαγένεση. Η έναρξη της πραγματοποιείται σε θαλάσσια και χερσαία περιβάλλοντα εναπόθεσης τα οποία διαθέτουν επαρκή χώρο για τη συσσώρευση και τη διατήρηση ιζημάτων και συνεχίζει να επηρεάζει την οργανική ύλη καθ' όλη τη διάρκεια της

²⁴ Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

²⁵ Michael G. Simpson, 2019. *Evolution and Diversity of Vascular Plants*, in *Plant Systematics (Third Edition)*, ed. Michael G. Simpson Academic Press.

²⁶ Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

²⁷ John I. Hedges and Richard G. Keil, 1995. *Sedimentary Organic Matter Preservation: An Assessment and Speculative Synthesis: Authors' Closing Comments*, *Marine Chemistry* 49, no. 2-3 (): 137-139.

²⁸ Baron S, editor. *Medical Microbiology*. 4th edition. Galveston (TX): University of Texas Medical Branch at Galveston; 1996. *Introduction to Bacteriology*.

²⁹ Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

³⁰ Ως άνωθεν

³¹ Faramawy, S., Zaki, T., και Sakr, A.A.-E. (2016). *Natural Gas Origin, Composition, and Processing: A Review*. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 34-54.

ταφής³². Στα πρώιμα στάδια, η αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης είναι μικρή και οι μετασχηματισμοί συμβαίνουν κάτω από ήπιες συνθήκες. Καθώς το ίζημα συσσωρεύεται, το σύστημα τείνει να πλησιάσει την ισορροπία, με το ίζημα να στερεοποιείται υπό συνθήκες ταφής σε μικρό βάθος³³.

Οι διεργασίες της διαγένεσης συντελούνται σε συνθήκες επιφάνειας της Γης, ήτοι 0 με 30 °C και 1 bar πίεσης μέχρι 250 °C και 2,5kb πίεσεως η οποία αντιστοιχεί σε 7 χιλιόμετρα³⁴. Στα θαλάσσια ιζήματα, κατά τη διάρκεια της πρώιμης διαγένεσης, το 30% έως και το 99% της οργανικής ύλης που εναποτίθεται στην επιφάνεια του ιζήματος διασπάται στις απλούστερες ανόργανες μορφές της³⁵.

Στη διαγένεση κατά τη βιογενετική διαδικασία καθώς η οργανική ύλη ενταφιάζεται, η διαδικασία κυριαρχείται από μικροβιακή δραστηριότητα. Για επιστήμονες όπως ο Tissot και ο Welte η διαγένεση χρησιμοποιείται ως ευρύτερος όρος για να περιγράψει τις διάφορες χημικές και φυσικές αλλαγές οι οποίες συντελούνται κατά τον ενταφιασμό της οργανικής ύλης, συμπεριλαμβανομένου του παράγοντα των μικροοργανισμών. Σύμφωνα με αυτή την άποψη, η διαγένεση περιλαμβάνει τόσο τα αρχικά στάδια της μεταβολής της οργανικής ύλης όσο και τον επακόλουθο σχηματισμό κηρογόνου. Για λόγους απλοποίησης και καλύτερης κατανόησης, θα γίνει χρήση του ορισμού της πρώιμης διαγένεσης για τη διαγένεση στη βιογενετική διαδικασία.

Αρχικά, η πρώιμη διαγένεση εμφανίζεται σε ένα πολύ μικρό βάθος, συνήθως μέχρι μερικά μέτρα κάτω από το σημείο επαφής νερού και ιζήματος³⁶. Κατά τη διαδικασία αυτή, οργανικές ενώσεις συμπεριλαμβανομένων των πρωτεϊνών, των λιπιδίων και των υδατανθράκων αποδομούνται. Τα μικρόβια ενεργούν ως βιοκαταλύτες της φύσης και επιφέρουν την αποσύνθεση πολύπλοκων οργανικών μορίων³⁷. Καθώς η ταφή συνεχίζεται, η ποσότητα των βακτηρίων και άλλων μικροοργανισμών μειώνεται γρήγορα με το βάθος³⁸.

Τα βιοπολυμερή όπως οι πρωτεΐνες, τα λιπίδια και οι υδατάνθρακες αποικοδομούνται πρώτα από τους μικροοργανισμούς σε μεμονωμένα αμινοξέα και σάκχαρα, μερικά από τα οποία χρησιμοποιούνται για τη διατροφή τους³⁹. Οι μικροοργανισμοί αυτοί εμφανίζονται σε αφθονία σε περιβάλλοντα όπου δέκτες ηλεκτρονίων όπως τα O_2 , NO_3^- , Fe_3^+ και SO_4^{2-} είναι σε έλλειψη⁴⁰. Οι πρωτεΐνες υδρολύονται σε αμινοξέα, ενώ τα λιπίδια διασπώνται σε λιπαρά οξέα και υδρογονάνθρακες⁴¹. Οι υδατάνθρακες,

³² Montañez, I.P., Crossey, L.J., 2017. Diagenesis. In: White, W. (eds) *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham.

³³ Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

³⁴ Montañez, I.P., Crossey, L.J. 2017. Diagenesis. In: White, W. (eds) *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series*. Springer, Cham.

³⁵ Henrichs, Susan M., 1992. Early Diagenesis of Organic Matter in Marine Sediments: Progress and Perplexity." *Marine Chemistry* 39, no. 1-3.

³⁶ Vandenbroucke, M., and C. Largeau, 2007 Kerogen Origin, Evolution and Structure. *Organic Geochemistry* 38, no. 5: 719-833.

³⁷ EB Kujawinski, K Longnecker, 2009. NV Blough Identification of possible source markers in marine dissolved organic matter using ultrahigh resolution mass spectrometry *Cosmochimica Acta*.

³⁸ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

³⁹ Ως άνωθεν

⁴⁰ Faramawy, S., Zaki, T., και Sakr, A.A.-E., 2016. Natural Gas Origin, Composition, and Processing: A Review. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 34-54.

⁴¹ Jørgensen JP, et al., 2006. Adm1, a putative cell adhesion regulating protein, is a novel proteasome-associated factor. *J Mol Biol* 360(5):1043-52

με τη σειρά τους, μετατρέπονται σε πιο απλά σάκχαρα. Φουλβικά οξέα και χουμίνη, διαλυτά και αδιάλυτα οργανικά κλάσματα, αντίστοιχα, παράγονται επίσης κατά τη διαγένεση⁴².

Στη βιογενετική διαδικασία, μικροοργανισμοί όπως τα μεθανογόνα αρχαία έχουν κυρίαρχη θέση. Αυτοί οι μικροοργανισμοί ευδοκούν σε αναερόβιες συνθήκες και διευκολύνουν τη μετατροπή οργανικών προδρόμων ουσιών, όπως τα λιπαρά οξέα και τα οξικά, σε μεθάνιο ⁴³. Η διαθέσιμη ποσότητα θεικού μειώνεται γρήγορα υπό κανονικές συνθήκες και το ίζημα εισέρχεται στη ζώνη παραγωγής μεθανίου, όπου τα βακτήρια αποικοδομούν την οργανική ύλη με τελικό βήμα την αναγωγή διοξειδίου του άνθρακα ή οξικού άλατος από τα μεθανογόνα βακτήρια. Το μεθάνιο που προκύπτει παρουσιάζει πολύ χαμηλή ισοτοπική αναλογία: $\delta^{13}C_1 = -90$ έως -55 . Οι μεταβολικές τους δραστηριότητες παράγουν βιογενές αέριο, κυρίως μεθάνιο, το οποίο συσσωρεύεται σε ρηχά ιζήματα και μπορεί να συμβάλει σημαντικά στα αποθέματα φυσικού αερίου. Οι μικροβιακές αλληλεπιδράσεις με την οργανική ύλη οδηγούν τον μικροβιακό τροφικό ιστό και τον κύκλο του άνθρακα, επηρεάζοντας περαιτέρω τον σχηματισμό φουλβικών οξέων, χουμίνης και άλλων προϊόντων⁴⁴.

Κατά τη θερμογενετική διαδικασία, η οργανική ύλη υφίσταται σημαντικές χημικές αλλαγές. Η βαθύτερη ταφή, που προκαλείται από καθίζηση και συσσώρευση ιζημάτων, έχει ως αποτέλεσμα υψηλότερες θερμοκρασίες και αυξημένη πίεση, προάγοντας έτσι τη διαγένεση⁴⁵. Διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν σημαντικά τη διαδικασία αυτή. Ο τύπος και η σύνθεση της οργανικής ύλης είναι πολύ σημαντικοί παράγοντες, καθώς διαφορετικά πετρώματα παράγουν διαφορετικές αναλογίες υδρογονανθράκων κατά τη διάρκεια της διαγένεσης. Παράλληλα, η διάρκεια της ταφής επηρεάζει σημαντικά, ενώ τα επίπεδα πίεσης και θερμότητας καθορίζουν το τελικό αποτέλεσμα της διαγένεσης.

Το μεθάνιο που παράγεται με αυτόν τον τρόπο αναφέρεται ως θερμογόνο μεθάνιο καθώς η πίεση και το αυξημένο βάθος περιλαμβάνει την επίδραση της θερμότητας για τη μετατροπή της οργανικής ύλης σε φυσικό αέριο και μαζούτ. Ωστόσο, η πραγματική θερμοκρασία δεν είναι γνωστή και, όπως η υπόλοιπη θερμική θεωρία είναι υποθετική⁴⁶. Η σταδιακή αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης έχει ως αποτέλεσμα τη συσσώρευση των υπολειμμάτων στα ιζήματα ως σύνθετες δομές μακρομορίων γνωστές ως κηρογόνο. Ο τύπος αυτός οργανικής ύλης διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη δημιουργία του φυσικού αερίου και για το λόγο αυτό αναλύεται εκτενέστερα στο επόμενο κεφάλαιο.

⁴² Leenheer, J.A. and Croué, J.P. (2003) Peer Reviewed: Characterizing Aquatic Dissolved Organic Matter. *Environmental Science & Technology*

⁴³ EB Kujawinski, K Longnecker, NV Blough Identification of possible source markers in marine dissolved organic matter using ultrahigh resolution mass spectrometry *Cosmochimica Acta*, 2009

⁴⁴ Ως άνωθεν.

⁴⁵ Tissot, B.P., Welte, D.H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8_6

⁴⁶ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

2.3.2 Κηρογόνο

Το κηρογόνο ορίζεται συνήθως ως η αδιάλυτη μακρομοριακή οργανική ύλη η οποία εμφανίζεται σε ιζηματογενή πετρώματα⁴⁷. Αποτελεί πρωταρχικής σημασίας πηγή πετρελαίου και φυσικού αερίου, καθώς εμφανίζεται σε μεγάλη αφθονία. Η μελέτη του κηρογόνου ωφελεί τον εντοπισμό των πηγών υδρογονανθράκων και την πρόβλεψη της ποσότητας, του τύπου και της κατανομής τους. Παράλληλα, το κηρογόνο παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τα κλίματα και τους ζώντες οργανισμούς του παρελθόντος. Για αυτό το λόγο, ο Tissot και Wilte αναφέρουν το κηρογόνο ως την πιο σημαντική μορφή οργανικού άνθρακα στη γη.

Χημικά, το κηρογόνο περιλαμβάνει μια σειρά από πολύπλοκους υδρογονάνθρακες, με ίχνη πολλών άλλων στοιχείων, όπως το θείο, το άζωτο και διάφορα ραδιενεργά και βαρέα μέταλλα. Τα στοιχεία που βρίσκονται σε αφθονία στο κηρογόνο είναι ο άνθρακας, το υδρογόνο και το οξυγόνο⁴⁸. Καθώς το κηρογόνο δεν είναι πολυμερές, είναι αδύνατο να αναπαρασταθεί η χημική του μακρομοριακή δομή με ένα σύνολο περιορισμένου αριθμού χημικών τμημάτων. Οι σύγχρονες μελέτες απέδειξαν ότι η μακρομοριακή δομή του κηρογόνου περιέχει τόσο οργανωμένα δομικά στοιχεία που κληρονομήθηκαν από επιλεκτική συντήρηση όσο και τυχαίες δομές που παράγονται από διαδικασίες επανασυμπύκνωσης⁴⁹.

Μερικοί συγγραφείς χρησιμοποιούν τον όρο κηρογόνο για τη συνολική οργανική ύλη των ιζηματογενών πετρωμάτων. Ωστόσο, στην παρούσα μελέτη με και σε συμφωνία με τους Tissot και Welte το κηρογόνο αποτελεί το κλάσμα της οργανικής ύλης σε ιζηματογενή πετρώματα που είναι αδιάλυτο σε οργανικούς διαλύτες, ενώ το βιτουμένιο (άσφαλτος) είναι το διαλυτό μέρος. Σε αρχαία πετρώματα χωρίς ταμιευτήρα, π.χ. σχιστόλιθους ή λεπτόκοκκους ασβεστόλιθους, το κηρογόνο αντιπροσωπεύει συνήθως από 80 έως 99% της οργανικής ύλης, ενώ το υπόλοιπο είναι άσφαλτος⁵⁰.

Η ταξινόμηση του κηρογόνου σε τρεις ομάδες - τύπους είναι απαραίτητη για την κατανόηση των παραγόμενων υδρογονανθράκων. Η ταξινόμηση αυτή προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Durand και Espitalié το 1973. Οι τρεις κύριοι τύποι κηρογόνου, Τύπος I, Τύπος II και Τύπος III, αντιπροσωπεύουν ένα φάσμα οργανικών υλικών με ποικίλες προελεύσεις και ιδιότητες. Το κηρογόνο τύπου IV δεν χρησιμοποιείται από όλους τους γεωχημικούς καθώς είναι δύσκολο να διακριθεί ο τύπος IV από τον τύπο III χρησιμοποιώντας μόνο πυρόλυση Rock-Eval.

Τύπος I

Ο Τύπος I, αποτελείται από λιπίδια τα οποία προέρχονται κυρίως από τη συσσώρευση φυκιών και σχετίζεται με ανοξικές συνθήκες σε λίμνες, λιμνοθάλασσες αλλά και σε θαλάσσια περιβάλλοντα (Durand, 1980). Χαρακτηρίζεται από υψηλή αναλογία υδρογόνου προς άνθρακα ($H/C > 1,5$) και χαμηλή αναλογία οξυγόνου προς άνθρακα ($O/C < 0,1$), ενώ έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε θείο⁵¹. Αυτή η υψηλή αναλογία H/C

⁴⁷ Vandenbroucke, M., and C. Largeau., 2007. Kerogen Origin, Evolution and Structure. *Organic Geochemistry* 38, no. 5 : 719-833.1.

⁴⁸ Petsch, S., 2018. Kerogen. In: White, W.M. (eds) *Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham*.

⁴⁹ Vandenbroucke, M., and C. Largeau. 2007. Kerogen Origin, Evolution and Structure. *Organic Geochemistry* 38, no. 5 : 719-833.

⁵⁰ Tissot, B.P., Welte, D.H., 198). *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁵¹ Applied source rock geochemistry by Peters, K. E., και Cassa, M. R. (1994). *AAPG Bulletin*, 78(1), 38-81

δίνει στην ομάδα τη δυνατότητα να παράγει μεγάλες ποσότητες υγρών υδρογονανθράκων, όπως το αργό πετρέλαιο (Durand, 1980). Οι ταμιευτήρες που περιέχουν κηρογόνο τύπου I είναι ιδιαίτερα επιθυμητοί στη βιομηχανία πετρελαίου καθώς συνήθως περιέχουν σημαντικά αποθέματα πετρελαίου.

Τύπος II

Το κηρογόνο Τύπου II σχετίζεται συνήθως με θαλάσσια ιζήματα όπου οργανική ύλη προερχόμενη από ένα μείγμα φυτοπλαγκτόν, ζωοπλαγκτόν και μικροοργανισμών έχει αποτεθεί σε αναγωγικό περιβάλλον⁵². Έχει αναλογία H/C 1,2 με 1,5 και χαμηλή O/C ($0.03 < O/C < 0.18$). Το θείο είναι γενικά υψηλότερο στον τύπο II σε σύγκριση με άλλα κηρογόνα⁵³. Οι πολυαρωματικοί πυρήνες και οι ετεροατομικές ομάδες κετόνης και καρβοξυλικού οξέος είναι πιο σημαντικές από ότι είναι στον Τύπο I, αλλά λιγότερο από ό,τι στον Τύπο III. Η ισορροπημένη αναλογία ατόμων υδρογόνου και άνθρακα υποδηλώνει τη δυνατότητα του να παράγει τόσο υγρούς υδρογονάνθρακες όσο και φυσικό αέριο⁵⁴.

Τύπος III

Το κηρογόνο Τύπου III προέρχεται από ανώτερα φυτά και περιέχει πολλά αναγνωρίσιμα φυτικά υπολείμματα⁵⁵. Η οργανική ύλη των φυτών ενσωματώνεται στο ίζημα απευθείας ή μέσω των προϊόντων αλλοιώσής του σε χουμικά οξέα του εδάφους. Τα κηρογόνα Τύπου III έχουν ατομικό λόγο H/C χαμηλότερο από 1, γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι είναι κυρίως επιρρεπείς στην παραγωγή φυσικού αερίου παρά υγρών υδρογονανθράκων⁵⁶. Παράλληλα, στον τύπο αυτό εμφανίζεται υψηλή αναλογία O/C (< 0.3) και περιλαμβάνεται μια σημαντική αναλογία πολυαρωματικών πυρήνων και ετεροατομικών ομάδων κετόνης και καρβοξυλικού οξέος, αλλά όχι εστερικές ομάδες⁵⁷.

Τύπος IV

Ο τύπος IV προέρχεται από μη βιολογικές πηγές, όπως ρητίνες και κεριά, και βρίσκεται σε πετρώματα που εναποτέθηκαν σε ξηρά περιβάλλοντα. Το κηρογόνο τύπου IV εμφανίζει πολύ χαμηλό ατομικό H/C (περίπου 0,5-0,6) και χαμηλό έως υψηλό O/C ($< 0,3$)⁵⁸. Επιπλέον, η οπτική εξέταση των ίδιων δειγμάτων δείχνει κυρίως θραύσματα άνθρακα οξειδωμένης οργανικής ύλης ή άνθρακα, στο εκπεμπόμενο φως και αδράνειας στο ανακλώμενο φως⁵⁹. Τα κηρογόνα τύπου IV μπορούν να προέρχονται από τους άλλους τύπους που έχουν υποστεί εκ νέου επεξεργασία ή οξείδωση⁶⁰. Αυτά τα κηρογόνα παράγουν ελάχιστους ή και καθόλου υδρογονάνθρακες κατά την ωρίμανση.

Το διάγραμμα Van Krevelen μπορεί να χαρακτηρίσει την οργανική ύλη σε μια γραφική παράσταση ατομικής αναλογίας υδρογόνου-άνθρακα H/C έναντι του ατομικού λόγου οξυγόνου-άνθρακα ατομικού O/C. Προέρχεται από τη στοιχειακή ανάλυση του

⁵² Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁵³ Peters, K. E., Cassa, M. R., 1994. *Applied source rock geochemistry*. AAPG Bulletin, 78(1), 38-81

⁵⁴ Hunt, J. M., 1995. *Petroleum Geochemistry and Geology*. W. H. Freeman.

⁵⁵ Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁵⁶ Hunt, J. M., 1995. *Petroleum Geochemistry and Geology*. W. H. Freeman.

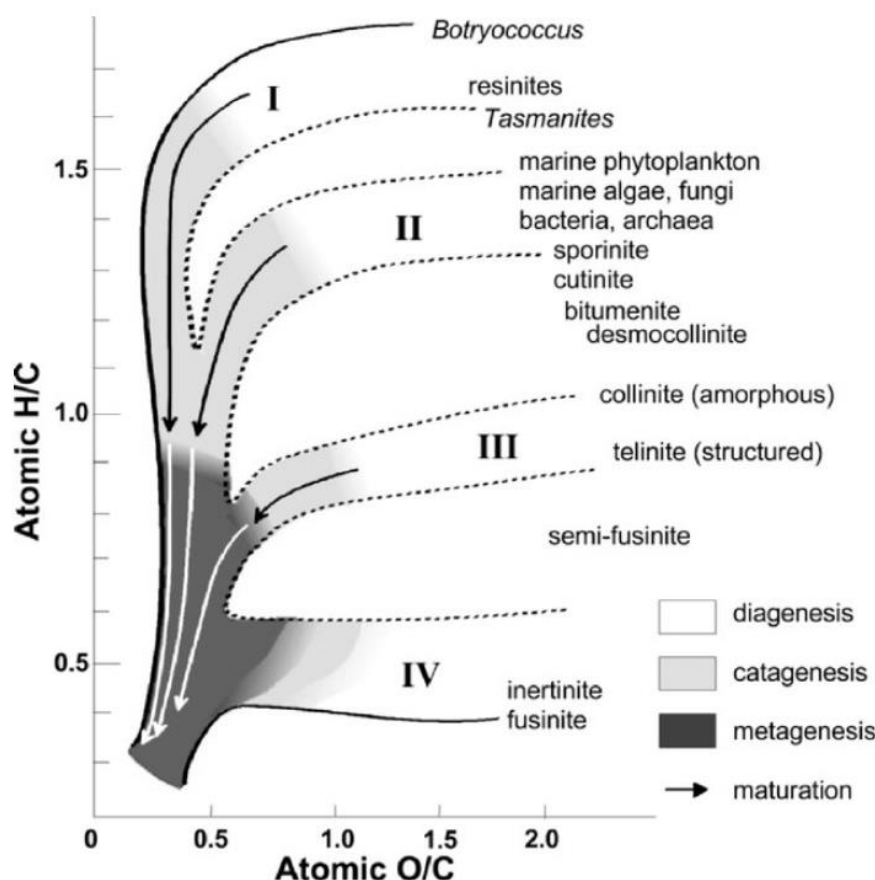
⁵⁷ Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁵⁸ Peters, K. E., Cassa, M. R., 1994. *Applied source rock geochemistry*. AAPG Bulletin, 78(1), 38-81

⁵⁹ Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁶⁰ Peters, K. E., Cassa, M. R., 1994. *Applied source rock geochemistry*. AAPG Bulletin, 78(1), 38-81

κηρογόνου και του άνθρακα είναι ένα πρακτικό μέσο μελέτης της σύστασης και των ιδιοτήτων του κηρογόνου.



Εικόνα 1: Διάγραμμα τύπου van Krevelen που δείχνει την κατανομή των τύπων κηρογόνου. Πηγή: Walters, Clifford. 2007. *The Origin of Petroleum*.

Όταν η θερμοκρασία φτάσει τους 50-60 °C, το στάδιο της διαγένεσης τελειώνει και παραχωρεί τη θέση του στο στάδιο της καταγένεσης. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί σε ανακλαστικότητα βιτρινίτη περίπου 0,5%, με τα εκχυλίσμα χουμικά οξέα να έχουν μειωθεί σε μικρή ποσότητα και οι περισσότερες καρβοξυλομάδες να έχουν αφαιρεθεί⁶¹. Κατά τα τελευταία στάδια της διαγένεσης παράγεται CO₂, H₂O και μερικές βαριές ετεροατομικές ενώσεις. Οι οργανικές ουσίες έχουν αποδομηθεί και υφίστανται μόνο ως κηρογόνο, βιτουμένιο και αέριοι υδρογονάνθρακες ⁶². Ο σημαντικότερος υδρογονάνθρακας που σχηματίζεται κατά τη διαγένεση είναι φυσικά το μεθάνιο.

Η διαγένεση ασκεί βαθιά επίδραση στην ποιότητα των ταμιευτήρων, καθώς επηρεάζει σημαντικά το πορώδες και τη διαπερατότητα των ιζηματογενών πετρωμάτων. Οι θερμικές συνθήκες κατά τη διάρκεια της διαγένεσης είναι υψίστης σημασίας για τον προσδιορισμό του τύπου των παραγόμενων υδρογονανθράκων, συμπεριλαμβανομένης της διαφοροποίησης μεταξύ των ταμιευτήρων ξηρού και υγρού φυσικού αερίου⁶³. Σε

⁶¹ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁶² Ως άνωθεν

⁶³ Hunt, J. M., 1995. *Petroleum Geochemistry and Geology*. W. H. Freeman.

ορισμένες περιπτώσεις, η διαγένεση μπορεί να δημιουργήσει μια παγίδα υδρογονανθράκων⁶⁴.

2.3.3 Καταγένεση

Με την αύξηση της θερμοκρασίας κατά την ταφή και αμέσως μετά τη διαγένεση ακολουθεί το στάδιο της καταγένεσης. Στο στάδιο αυτό, οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 50 και 150 °C και η γεωστατική πίεση λόγω υπερφόρτωσης μπορεί να κυμαίνεται από 300 έως 1000 ή 1500 bar⁶⁵. Η αύξηση της θερμοκρασίας και της πίεσης οφείλεται στην αύξηση του βάθους ταφής, η οποία συχνά συντελείται σε βάθη αρκετών χιλιομέτρων κάτω από την επιφάνεια της Γης. Ειδικότερα, η γεωθερμική βαθμίδα, δηλαδή ο ρυθμός με τον οποίο αυξάνεται η θερμοκρασία ως συνάρτηση του αυξανόμενου βάθους από την επιφάνεια προς το εσωτερικό της Γης, κυμαίνεται από περίπου 20 έως 30°C ανά χιλιόμετρο βάθους⁶⁶. Μια τέτοια αύξηση πυροδοτεί την απομάκρυνση του συστήματος από την ισορροπία και οδηγεί σε νέες αλλαγές.

Οι υψηλές θερμοκρασίες και πιέσεις υποκινούν τη θερμική ωρίμανση, μια βασική πτυχή της καταγένεσης η οποία ευθύνεται για την παραγωγή πετρελαίου και φυσικού αερίου. Η θερμική ωρίμανση περιλαμβάνει τη διάσπαση πολύπλοκων μορίων κηρογόνου σε απλούστερους υδρογονάνθρακες⁶⁷. Η ωρίμανση αντιστοιχεί σε πυρόλυση του κηρογόνου υπό την επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας που συνοδεύει την ταφή των ιζημάτων (Durand, 2003). Για παράδειγμα, το κηρογόνο μπορεί να απελευθερώσει ενώσεις υδρογονάνθρακα, συμπεριλαμβανομένων αλκανίων, αλκενίων και αρωματικών, καθώς και άλλα υποπροϊόντα όπως νερό, διοξείδιο του άνθρακα και στερεά υπολείμματα (Espitalié et al., 1985).

Κατά τη διάρκεια της καταγένεσης υπάρχει μια τάση να ανακατανέμεται το υδρογόνο που είναι διαθέσιμο στο κηρογόνο για να σχηματιστεί ένα πλούσιο σε υδρογόνο κλάσμα, το οποίο τελικά θα γίνει μεθάνιο, και ένα κλάσμα φτωχό σε υδρογόνο, το οποίο τελικά γίνεται γραφίτης⁶⁸. Παράλληλα, συντελείται μια αυξανόμενη αρωματοποίηση των ναφθενικών δακτυλίων. Η καταγένεση χαρακτηρίζεται από σημαντική μείωση της περιεκτικότητας σε υδρογόνο και του λόγου H/C (από 1,25 σε περίπου 0,5 στα κηρογόνα Τύπου II), λόγω παραγωγής απελευθέρωσης υδρογονανθράκων⁶⁹. Η κύρια ανόργανη μεταβολή εξακολουθεί να αφορά τη συμπίεση του πετρώματος: το νερό συνεχίζει να αποβάλλεται, το πορώδες και η διαπερατότητα μειώνονται αισθητά. Σε αυτό το σημείο, τα οργανικά ιζήματα είναι τώρα θαμμένα τόσο βαθιά που οι αντιδράσεις είναι εντελώς αναερόβιες⁷⁰.

Σε επόμενο στάδιο, η αναλογία αερίου/πετρελαίου αυξάνεται σταθερά και τα γεωχημικά απολιθώματα, τα οποία είναι εύθραυστα μόρια, καταστρέφονται προοδευτικά⁷¹. Στο τέλος της καταγένεσης, το κηρογόνο έχει πρακτικά χάσει την ικανότητά του να παράγει υδρογονάνθρακες (Durand, 2003). Τα προϊόντα της

⁶⁴ Richard C. Selley, Stephen A. Sonnenberg, 2023. *Elements of Petroleum Geology (Fourth Edition)*.

⁶⁵ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁶⁶ Lund, J. W. (2015). *Geothermal Gradients*. In M. Selley, R. Cocks, και I. Plimer (Eds.), *Encyclopedia of Geology* (2nd ed., pp. 585-595). Academic Press

⁶⁷ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁶⁸ Ως άνωθεν

⁶⁹ Ως άνωθεν

⁷⁰ Ως άνωθεν

⁷¹ Ως άνωθεν

διαδικασίας αυτής εξαρτώνται από παράγοντες όπως η αρχική σύνθεση του κηρογόνου, η θερμοκρασία και η πίεση. Η διάσπαση των κηρογόνων Τύπου Ι και Τύπου ΙΙ παράγει κυρίως υγρούς υδρογονάνθρακες, όπως το πετρέλαιο, ενώ τα κηρογόνα τύπου ΙΙΙ είναι πιο πιθανό να παράγουν αέριους υδρογονάνθρακες όπως το φυσικό αέριο ⁷².

2.3.4 Μεταγένεση

Με το πέρας της καταγένεσης ακολουθεί το στάδιο της μεταγένεσης. Το στάδιο αυτό πραγματοποιείται σε μεγάλο βάθος όπου οι θερμοκρασίες και οι πιέσεις είναι ακόμα μεγαλύτερες σε σχέση με τα προηγούμενα στάδια. Ειδικότερα, οι θερμοκρασίες κυμαίνονται μεταξύ 150 και 200°C και το σημείο αντιστοιχεί με 2,0 έως 4,0% ανακλαστικότητα βιτρινίτη (Peters et al., 2012). Η οργανική ύλη υπόκειται σε μια σειρά από πολύπλοκες χημικές αντιδράσεις όπως η θερμική πυρόλυση και η συμπύκνωση. Αυτές οι αντιδράσεις οδηγούν στη μετατροπή οργανικών ενώσεων σε υδρογονάνθρακες, ιδιαίτερα στη δημιουργία θερμογόνου φυσικού αερίου.

Στη μεταγένεση η αποβολή του υδρογόνου είναι πλέον αργή και το υπολειπόμενο κηρογόνο συνήθως αποτελείται από δύο άτομα άνθρακα ή περισσότερα από τα τρία άτομα ($H/C \leq 0,5$) ⁷³. Το στάδιο της μεταγένεσης ονομάζεται και στάδιο του ξηρού θερμικού αερίου καθώς οι υδρογονάνθρακες που περιέχει είναι αέριοι υδρογονάνθρακες. Αυτό το αέριο σχηματίζεται κυρίως από το πετρέλαιο και το υγρό αέριο που σχηματίστηκε προηγουμένως και σε μικρότερο βαθμό από το υπολειπόμενο κηρογόνο (Durand, 2003). Η σύνθεση του φυσικού αερίου που παράγεται κατά τη μεταγένεση εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, συμπεριλαμβανομένης της σύνθεσης της οργανικής ύλης και της διάρκειας της θερμικής έκθεσης. Εκτός από το μεθάνιο, η μεταγένεση μπορεί να δώσει βαρύτερους υδρογονάνθρακες όπως αιθάνιο, προπάνιο, βουτάνιο και άλλα αέρια συστατικά.

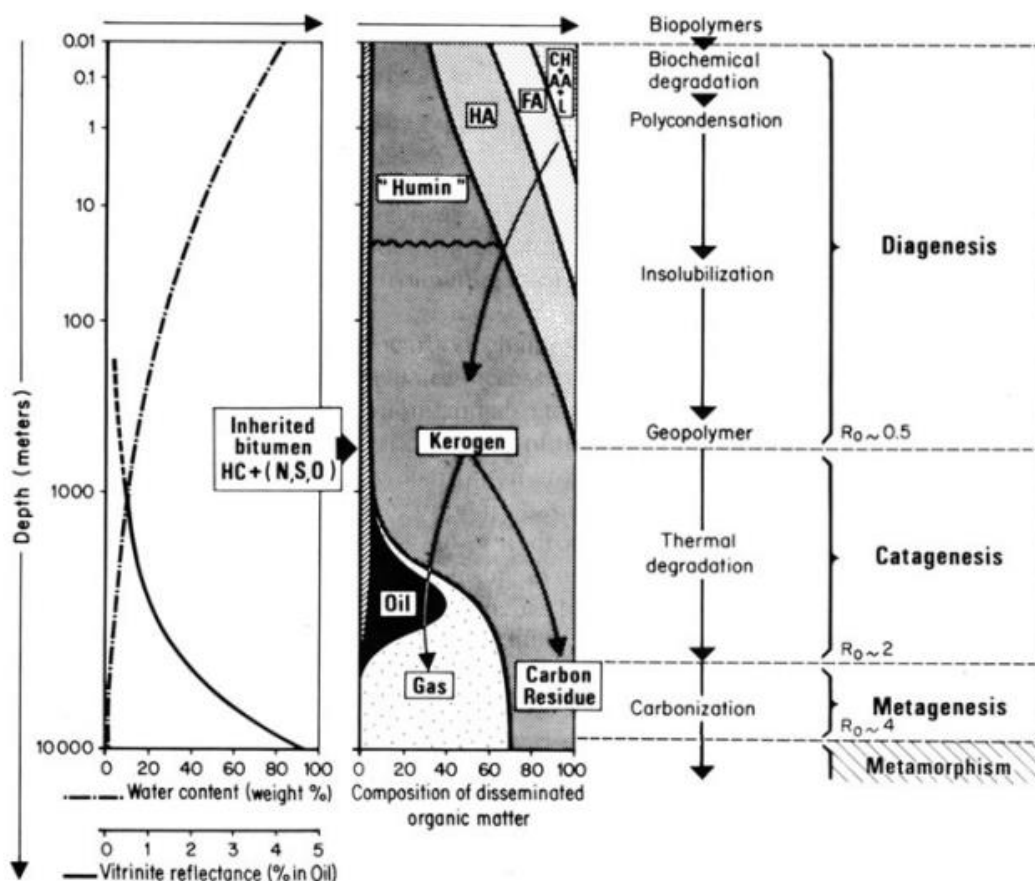
Σε ακραίες περιπτώσεις η περιεκτικότητα σε άνθρακα μπορεί να φτάσει το 91% κατά βάρος και η ατομική αναλογία H/C να είναι μόνο 0,4 ⁷⁴. Σε συνθήκες ακόμα υψηλότερης θερμοκρασίας κοντά στο στάδιο της μεταμόρφωσης, ο τελευταίος υδρογονάνθρακας, δηλαδή το μεθάνιο, απελευθερώνεται αφήνοντας πίσω του εξαιρετικά πλούσιο σε άνθρακα υπολείμματα γραφίτη ⁷⁵.

⁷² Tissot, B.P., Welte, D.H. 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁷³ Ως άνωθεν

⁷⁴ Ως άνωθεν

⁷⁵ Ως άνωθεν



Εικόνα 2: Γενικό σχήμα εξέλιξης της οργανικής ύλης, από το πρόσφατα εναποτιθέμενο ίζημα στη μεταμορφωμένη ζώνη. Πηγή: Tissot, B. P., & Welte, D. H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence* (2nd ed.). Springer Berlin, Heidelberg.

Στην τρίτη και τελευταία διαδικασία σχηματισμού του φυσικού αερίου συγκαταλέγεται η αβιογενετική. Σύμφωνα με τη θεωρία της αβιογένεσης, το φυσικό αέριο μπορεί να παραχθεί με καθαρά ανόργανες διεργασίες, δηλαδή χωρίς τη συμμετοχή της οργανικής ύλης των ιζημάτων. Αξίζει να σημειωθεί ότι η θεωρία αυτή αμφισβητείται από μέρος της επιστημονικής κοινότητας. Ωστόσο, είναι χρήσιμο να ληφθεί υπόψη η θεωρία αυτή ώστε να αποκτηθεί μια πλήρης γνώση κατά τη μελέτη της προέλευσης του φυσικού αερίου.

Το αβιογενετικό φυσικό αέριο μπορεί να δημιουργηθεί κατά τη σερπεντινοποίηση πετρωμάτων. Η σερπεντινοποίηση είναι μια διαδικασία κατά την οποία το νερό αντιδρά με ορισμένα ορυκτά σε υπερμαφικά πετρώματα, όπως ο περιδοτίτης, για να παράγει μεθάνιο και άλλους υδρογονάνθρακες ⁷⁶. Σε περιβάλλοντα υψηλής θερμοκρασίας και υψηλής πίεσης, αβιογενές φυσικό αέριο μπορεί επίσης να δημιουργηθεί μέσω αντιδράσεων τύπου Fischer-Tropsch ⁷⁷. Σε αυτές τις αντιδράσεις καταλύτες αντιδρούν σε CO και H₂ για τη δημιουργία υδρογονανθράκων κάτω από ορισμένες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Τέτοιες αντιδράσεις συμβαίνουν σε περιοχές με ακραία θερμότητα και πίεση, όπως βαθιά στον φλοιό της Γης ή κοντά σε ζώνες βύθισης. Τέλος,

⁷⁶ Sherwood Lollar, B., Barry, P. H., Etiope, G., Liljedahl, A. K., Sesso, G., και Bristow, N., 2019. *New Windows into Abiogenic Methane and Subsurface Hydrosphere. Elements*, 15(1), 21-26.

⁷⁷ Ως άνωθεν

ορισμένα συστατικά του φυσικού αερίου, όπως το άζωτο και το διοξείδιο του άνθρακα, μπορούν να παράγονται με καθαρά ανόργανες διεργασίες⁷⁸.

2.3.5 Μετανάστευση

Τα πετρώματα από τα οποία μπορεί να παραχθεί πετρέλαιο και φυσικό αέριο ονομάζονται συνήθως μητρικά πετρώματα⁷⁹. Η ονομασία αυτή αναφέρεται σε έναν συγκεκριμένο τύπο ιζηματογενούς πετρώματος, συνήθως λεπτόκοκκου, όπου αποθηκεύεται οργανική ύλη, η οποία όταν υποβληθεί σε θερμότητα και πίεση με την πάροδο του γεωλογικού χρόνου, υφίσταται θερμική ωρίμανση και παράγει υδρογονάνθρακες, συμπεριλαμβανομένου του φυσικού αερίου. Η ποσότητα και ο χαρακτήρας των υδρογονανθράκων που έχουν παραχθεί εξαρτώνται από τον χαρακτήρα της οργανικής ύλης που αρχικά εναποτέθηκε σε αυτά τα πετρώματα καθώς και τη θερμοκρασία και τον γεωλογικό χρόνο που ακολούθησαν (Espitalie et al., 1977).

Το νεοσύστατο φυσικό αέριο θα επιχειρήσει να μεταναστεύσει σε μια νέα τοποθεσία μέσω των πορωδών και διαπερατών πετρωμάτων. Καθώς υδρογονάνθρακες όπως το φυσικό αέριο είναι ελαφρύτεροι από το νερό και τα πετρώματα που το περιέχουν, δημιουργείται λόγω άνωσης μια ανοδική κίνηση⁸⁰. Αυτή η αργή, συνεχής κίνηση μακριά από την αρχική πηγή ονομάζεται μετανάστευση. Υπάρχουν δυο είδη μετανάστευσης: η πρωτογενής και η δευτερογενής. Εντούτοις, η ακριβής διαδικασία καθώς και τα αίτια της μετανάστευσης συνεχίζουν να ερευνώνται ακόμη και σήμερα από την επιστημονική κοινότητα. Σε κάθε περίπτωση, το φυσικό αέριο φαίνεται να ακολουθεί ανοδική πορεία μέχρι να φτάσει στην επιφάνεια ή μέχρι να παγιδευτεί από κάποιο αδιαπέραστο πέτρωμα το οποίο θα εμποδίζει την περαιτέρω μετακίνηση.

Η πρωτογενής μετανάστευση αναφέρεται στη μετακίνηση υδρογονανθράκων από το βράχο πηγής σε διαπερατά στρώματα⁸¹. Οι μηχανισμοί της πρωτογενούς μετανάστευσης περιλαμβάνουν την κίνηση του αερίου μέσω διαστημάτων πόρων, ρωγμών και μικρορωγμών στο μητρικό πέτρωμα. Η κίνηση αυτή φαίνεται να οφείλεται στις διάφορες πιέσεις που αναπτύσσονται. Η παραγωγή υδρογονανθράκων χαμηλού μοριακού βάρους από πολυμερές κηρογόνο προκαλεί αύξηση σε συγκεκριμένους όγκους⁸². Με αυτόν τον τρόπο δημιουργούνται κέντρα πίεσης σε ένα μητρικό πέτρωμα που προκαλούν μια περισσότερο ή λιγότερο συνεχή κίνηση. Σε σχετικά αδιαπέραστα πετρώματα πηγής, αυτά τα κέντρα πίεσης μπορεί ακόμη και να προκαλέσουν ρωγμές.

Παράγοντες όπως η ταχεία ταφή και η θερμική διαστολή των πόρων νερού μπορούν να ενισχύσουν τις ήδη αυξημένες πιέσεις⁸³. Η συσσώρευση πίεσης, η μικροθραύση, η επακόλουθη απελευθέρωση πίεσης, η διαστολή ρευστού ή αερίου και τέλος η μεταφορά είναι μια ασυνεχής διαδικασία η οποία επαναλαμβάνεται πολλές φορές⁸⁴. Ολόκληρη η πρωτογενής μετανάστευση είναι άλλωστε μια δυναμική και επαναλαμβανόμενη διαδικασία. Οι αποστάσεις που καλύπτονται τελικά από την

⁷⁸ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁷⁹ Ως άνωθεν

⁸⁰ Dembicki, Harry Jr., 2017. Chapter 8 - Basin Modeling. In *Practical Petroleum Geochemistry for Exploration and Production*, edited by Harry Dembicki Jr., 273-308. Elsevier.

⁸¹ Richard C. Selley, Stephen A. 2023. Sonnenberg, in *Elements of Petroleum Geology (Fourth Edition)*.

⁸² Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁸³ Ως άνωθεν.

⁸⁴ Ως άνωθεν.

πρωτογενής μετανάστευση είναι συνήθως της τάξης των μέτρων ή των δεκάδων μέτρων⁸⁵.

Η δευτερογενής μετανάστευση είναι η μετακίνηση υδρογονανθράκων από τις κοίτες μεταφοράς προς την παγίδα ταμιευτήρα⁸⁶. Περιλαμβάνει τη μετακίνηση των υδρογονανθράκων σε πολυφασικές ροές που έχουν απελευθερωθεί από τα μητρικά πετρώματα κατά τη διάρκεια της πρωτογενούς μετανάστευσης. Η διαδικασία αυτή ελέγχεται από τρεις παραμέτρους: την πλευστότητα, τις τριχοειδείς πιέσεις που καθορίζουν τη ροή των πολλαπλών φάσεων και την υδροδυναμική ροή⁸⁷. Ειδικότερα, οι τριχοειδείς πιέσεις στους στενούς πόρους των βράχων είναι η αιτία για την παγίδευση υδρογονανθράκων.

Το τέλος της δευτερογενούς μετανάστευσης και το τελικό στάδιο στο σχηματισμό δεξαμενών πετρελαίου και φυσικού αερίου είναι η συγκέντρωση στο υψηλότερο διαθέσιμο τμήμα μιας παγίδας⁸⁸. Οι αποστάσεις που καλύπτονται από τη δευτερεύουσα μετανάστευση κυμαίνονται από δέκα έως εκατό χιλιόμετρα, και περιστασιακά ακόμη περισσότερα⁸⁹. Η διαφυγή των υδρογονανθράκων από τους πόρους προς την επιφάνεια αναστέλλεται από ένα σχηματισμό χαμηλής διαπερατότητας που ονομάζεται μονωτήρας ή κάλυμμα (cap-rock). Παράλληλα, υπάρχουν άλλες γεωλογικές διατάξεις οι οποίες εμποδίζουν ή σταματούν τη μετανάστευση των υδρογονανθράκων και επιτρέπουν τη συσσώρευσή του εντός ταμιευτήρων.

Ο ταμιευτήρας φυσικού αερίου είναι ένας φυσικός χώρος αποθήκευσης, ο οποίος αποτελείται από διαπερατά και πορώδη πετρώματα που περιβάλλονται από αδιαπέραστα υλικά⁹⁰. Το μέγεθος και η γεωμετρία των πόρων επηρεάζουν την παραγωγικότητα του ταμιευτήρα⁹¹. Ορισμένοι ταμιευτήρες εμφανίζονται σε βάθη έως και 2 μίλια κάτω από την επιφάνεια, ενώ άλλοι μπορεί να βρίσκονται έως και 5 μίλια κάτω από την επιφάνεια⁹². Δύο είναι οι βασικές ιδιότητες που χαρακτηρίζουν ένα πέτρωμα ως ταμιευτήρα: το πορώδες, δηλαδή το ποσοστό όγκου των κενών χώρων ή πόρων και η διαπερατότητα, η οποία εκφράζει το πόσο εύκολα μπορεί να κινηθεί το ρευστό εντός των πόρων. Η διαπερατότητα τυπικά ποσοτικοποιείται σε μονάδες darcies ή millidarcies, όπου υψηλότερες τιμές υποδεικνύουν μεγαλύτερη ικανότητα μετάδοσης ρευστού. Τα πορώδες στα πετρώματα των ταμιευτήρων κυμαίνονται συνήθως από 5 έως 30%⁹³.

⁸⁵ Ως άνωθεν.

⁸⁶ Richard C. Selley, Stephen A. Sonnenberg, in *Elements of Petroleum Geology (Fourth Edition)*, 2023

⁸⁷ Tissot, B.P., Welte, D.H. (1984). *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

⁸⁸ Ως άνωθεν.

⁸⁹ Ως άνωθεν.

⁹⁰ Faramawy, S., Zaki, T., και Sakr, A.A.-E. (2016). *Natural Gas Origin, Composition, and Processing: A Review*. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34, 34-54.

⁹¹ Richard C. Selley, Stephen A. Sonnenberg, in *Elements of Petroleum Geology (Fourth Edition)*, 2023.

⁹² Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

⁹³ Tissot, B.P., Welte, D.H., 1984. *Petroleum Formation and Occurrence*. Springer, Berlin, Heidelberg.

2.4 Αναζήτηση και εξόρυξη

Το φυσικό αέριο είναι μια από τις κύριες πηγές ενέργειας, η οποία χρησιμοποιείται σε όλους τους τομείς της οικονομίας⁹⁴. Η αναζήτηση και μετέπειτα εξόρυξη του αποτελεί μια διεπιστημονική προσπάθεια που περιλαμβάνει την κατανόηση των γεωλογικών, γεωχημικών και γεωφυσικών αρχών. Για τη μελέτη αυτή, είναι σημαντικό να ληφθούν υπόψη οι διαφορετικοί τύποι φυσικού αερίου, ο καθένας με ξεχωριστά χαρακτηριστικά και προκλήσεις εξερεύνησης. Με κριτήριο την προέλευση το φυσικό αέριο διακρίνεται σε δύο κατηγορίες: το συμβατικό και το μη συμβατικό.

Το συμβατικό αέριο βρίσκεται συνήθως σε ταμιευτήρες με διαπερατότητα μεγαλύτερη από 1 milliDarcy (>1 mD) και μπορεί να εξαχθεί με παραδοσιακές μεθόδους ανάκτησης⁹⁵. Επιπλέον, το συμβατικό φυσικό αέριο διακρίνεται σε «σχετιζόμενο» (associated) με το πετρέλαιο και στο «μη-σχετιζόμενο» (non associated) αέριο. Το «σχετιζόμενο» φυσικό αέριο βρίσκεται μαζί με το αργό πετρέλαιο, και μέχρι πρόσφατα, το αργό πετρέλαιο ήταν ο πρωταρχικός στόχος για τους επενδυτές στην ενεργειακή βιομηχανία, ενώ το σχετιζόμενο αέριο θεωρούνταν υποπροϊόν μικρής σημασίας⁹⁶. Το «μη-σχετιζόμενο» αέριο βρίσκεται σε έναν ταμιευτήρα που περιέχει ελάχιστη ποσότητα αργού πετρελαίου⁹⁷. Τέλος, ορισμένα αέρια ονομάζονται συμπυκνώματα αερίων και μπορούν κατά την παραγωγή να αποδώσουν σημαντικές ποσότητες υγρών υδρογονανθράκων⁹⁸.

Αντίθετα, το μη συμβατικό φυσικό αέριο βρίσκεται σε ταμιευτήρες με σχετικά χαμηλή διαπερατότητα σχιστόλιθοι⁹⁹. Υπάρχουν αρκετοί τύποι μη συμβατικού φυσικού αερίου, εκ των οποίων οι κύριοι είναι: σχιστολιθικό αέριο, στεγανό αέριο, υδρίδια. Το σχιστολιθικό αέριο βρίσκεται σε σχιστολιθικά πετρώματα, το στεγανό βρίσκεται σε κοιτάσματα με πορώδες από 0,001 έως 1 mD¹⁰⁰ και τα υδρίδια βρίσκονται συνήθως σε πολικές περιοχές ή κάτω από τον πυθμένα της θάλασσας. Αυτές οι πηγές συχνά απαιτούν εξειδικευμένες τεχνικές εξόρυξης. Η ιδιότητα αυτή τις καθιστά δαπανηρές και θα πρέπει η εξόρυξή τους να συμφέρει οικονομικά την εκάστοτε βιομηχανία.

Η αναζήτηση για φυσικό αέριο ξεκινά τυπικά με μια γεωλογική εξέταση της επιφανειακής γεωλογικής δομής της Γης και τον προσδιορισμό των περιοχών όπου υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να υπάρχει κοιτάσμα φυσικού αερίου¹⁰¹. Αυτές οι έρευνες περιλαμβάνουν μια πολύπλευρη προσέγγιση, ενσωματώνοντας διάφορους επιστημονικούς κλάδους. Με τη μελέτη και χαρτογράφηση των χαρακτηριστικών της επιφάνειας και του υπόβαθρου μιας συγκεκριμένης περιοχής, όπως η εμφάνιση των πετρωμάτων στην επιφάνεια ή δείγματα από το σκάψιμο, ένας γεωλόγος μπορεί να αποφανθεί ποιες περιοχές είναι πιο πιθανό να περιέχουν κοιτάσμα πετρελαίου ή

⁹⁴ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas

⁹⁵ Ως άνωθεν

⁹⁶ Harrison, Gbubemi H., and A. Sahel. "Optimal Profitable Allocation of Associated Natural Gas Resource on a Countrywide Basis to Mitigate Flaring." *Energy Reports* 10 (2023): 2551-2566.

⁹⁷ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas

⁹⁸ Ως άνωθεν

⁹⁹ Ως άνωθεν

¹⁰⁰ Guo, Boyan, and Ali Ghalambor. *Natural Gas Engineering Handbook*, 2nd ed. May 1, 2012.

¹⁰¹ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas

φυσικού αερίου ¹⁰². Ωστόσο, η μεγαλύτερη καινοτομία στην αναζήτηση πετρελαίου και φυσικού αερίου ήρθε με την ανάπτυξη σεισμικών ερευνών.

Οι σεισμικές έρευνες διεξάγονται με την ανάπτυξη μιας σειράς πηγών ενέργειας και μιας σειράς αισθητήρων σε μια περιοχή ενδιαφέροντος ¹⁰³. Η ενέργεια στέλνεται με τη μορφή σεισμικών κυμάτων που εκπέμπονται από μια πηγή μέσα στο φλοιό της γης. Η ενέργεια αυτή αλληλοεπιδρά με τα διάφορα υπόγεια στρώματα, το καθένα με τις δικές του ιδιότητες, και ανακλάται πίσω προς την πηγή ¹⁰⁴. Από την ανάκλαση και τη χρήση αισθητήρων γεωφώνου και σειсмоγράφων, οι ειδικοί επιστήμονες δύναται να καταλάβουν εάν ένας ή περισσότεροι από τους σχηματισμούς περιέχουν φυσικό αέριο. Η πηγή των σεισμικών κυμάτων μπορεί να είναι είτε εκρηκτικά που δημιουργούν άμεσα το σεισμικό κύμα είτε μια μηχανική πηγή ¹⁰⁵. Τέτοιες έρευνες επιτρέπουν εκτίμηση του βάθους, του πάχους, του πορώδους και της διαπερατότητας των ταμιευτήρων, βοηθώντας έτσι στην αξιολόγηση των κοιτασμάτων και στον σωστό σχεδιασμό.

Παράλληλα, έρευνες στο μαγνητικό και το βαρυτικό πεδίο της Γης μπορούν να συμβάλλουν στην αναζήτηση πιθανών κοιτασμάτων φυσικού αερίου. Η χρήση μαγνητόμετρων επιτρέπει τη μέτρηση των μικρών διαφοροποιήσεων του μαγνητικού πεδίου της γης ¹⁰⁶. Οι έρευνες στο βαρυτικό πεδίο παρέχουν μετρήσεις των διακυμάνσεων της βαρύτητας της γης οι οποίες χρησιμεύουν στην αναγνώριση της παρουσίας παχύρρευστων τμημάτων ιζηματογενούς πετρώματος (Downey, 2014). Συνάμα, η μοντελοποίηση ταμιευτήρων είναι ένα βήμα ζωτικής σημασίας στη μελέτη των κοιτασμάτων πετρελαίου και φυσικού αερίου ¹⁰⁷. Η μοντελοποίηση των ταμιευτήρων συγκεντρώνει ψηφιακά μαθηματικά μοντέλα ταμιευτήρων για να παρέχει καλύτερη εικόνα των στατικών και δυναμικών ιδιοτήτων ενός κοιτάσματος ¹⁰⁸. Παράλληλα, ένα ακριβές τρισδιάστατο μοντέλο δεξαμενής μειώνει τις αβεβαιότητες και τους κινδύνους γεώτρησης και οδηγεί σε μια πιο ρεαλιστική παραγωγική πρόβλεψη ¹⁰⁹.

Η γεωχημική ανάλυση, μια άλλη σημαντική μέθοδος, περιλαμβάνει τη μελέτη των συνθέσεων υδρογονανθράκων και της παρουσίας βιοδεικτών. Εντοπίζοντας

¹⁰² Ως άνωθεν

¹⁰³ Aminzadeh, Fred, and Shivaji N. Dasgupta., 2013, Chapter 3 - Fundamentals of Petroleum Geophysics. In *Developments in Petroleum Science, Volume 60*, edited by Fred Aminzadeh and Shivaji N. Dasgupta, 37-92. Elsevier.

¹⁰⁴ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas

¹⁰⁵ Aminzadeh, Fred, and Shivaji N. Dasgupta. 2013. Chapter 3 - Fundamentals of Petroleum Geophysics. In *Developments in Petroleum Science, Volume 60*, edited by Fred Aminzadeh and Shivaji N. Dasgupta, 37-92. Elsevier.

¹⁰⁶ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

¹⁰⁷ Babasafari, Amir Abbas, Deva Prasad Ghosh, Teresa Ratnam, Shiba Rezaei, and Chico Sambo. 2022. Chapter 5 - Geological Reservoir Modeling and Seismic Reservoir Monitoring." In *Seismic Imaging Methods and Applications for Oil and Gas Exploration*, edited by Yasir Bashir, Amir Abbas Babasafari, Abdul Rahim Md Arshad, Seyed Yaser Moussavi Alashloo, Abdul Halim Abdul Latiff, Rosita Hamidi, Shiba Rezaei, Teresa Ratnam, Chico Sambo, and Deva Prasad Ghosh, 179-285. Elsevier, 2022.

¹⁰⁸ Marques, Ademir, Rafael Kenji Horota, Eniuce Menezes de Souza, Lucas Kupssinskii, Pedro Rossa, Alysson Soares Aires, Leonardo Bachi, Mauricio Roberto Veronez, Luiz Gonzaga, and Caroline Lessio Cazarin. 2020. *Virtual and Digital Outcrops in the Petroleum Industry: A Systematic Review*. "Earth-Science Reviews 208.

¹⁰⁹ Babasafari, Amir Abbas, Deva Prasad Ghosh, Teresa Ratnam, Shiba Rezaei, and Chico Sambo. Chapter 5 - Geological Reservoir Modeling and Seismic Reservoir Monitoring. In *Seismic Imaging Methods and Applications for Oil and Gas Exploration*, edited by Yasir Bashir, Amir Abbas Babasafari, Abdul Rahim Md Arshad, Seyed Yaser Moussavi Alashloo, Abdul Halim Abdul Latiff, Rosita Hamidi, Shiba Rezaei, Teresa Ratnam, Chico Sambo, and Deva Prasad Ghosh, 179-285. Elsevier, 2022.

συγκεκριμένους βιοδείκτες, όπως κορεσμένους και αρωματικούς υδρογονάνθρακες και αξιολογώντας τις αναλογίες ισοτόπων άνθρακα, μπορούν να εντοπιστούν πιθανά κοιτάσματα και να αξιολογηθεί η θερμική ωριμότητα της οργανικής ύλης¹¹⁰. Τα τελευταία χρόνια, η τηλεπισκόπηση και οι δορυφορικές εικόνες αποτελούν πολύτιμα εργαλεία στην αναζήτηση υδρογονανθράκων¹¹¹. Μπορούν να παρέχουν πολύτιμες γεωλογικές πληροφορίες, και να εντοπίσουν χαρακτηριστικά όπως μεταβολές στη βλάστηση ή εκπομπές αερίων από το έδαφος, τα οποία υποδηλώνουν κοιτάσματα πετρελαίου και φυσικού αερίου. Φυσικά, οι ερευνητικές γεωτρήσεις συνεχίζουν να αποτελούν διαδεδομένη μέθοδο. Μαζί με τις διατρήσεις (well logging) επιτρέπουν την ηλεκτρική απεικόνιση και την εξερεύνηση υδρογονανθράκων.

Εφόσον οι μελέτες αναζήτησης δείχνουν να έχουν εντοπίσει κοιτάσμα το οποίο αξίζει οικονομικά να εκμεταλλευθεί, θα πρέπει να γίνει προετοιμασία της επιφάνειας της τοποθεσίας στην οποία θα γίνουν οι έρευνες. Η προετοιμασία της επιφάνειας μπορεί να περιλαμβάνει την κατασκευή ενός δρόμου προς την τοποθεσία, έναν χώρο αποθήκευσης εξοπλισμού ή την απόκτηση άδειας για την εξόρυξη¹¹². Μόλις γίνει η απαραίτητη προετοιμασία, σειρά έχει η ερευνητική γεώτρηση. Κατά τη διαδικασία αυτή γίνεται διάτρηση του φλοιού της γης και δημιουργούνται πηγάδια τα οποία μπορούν να παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη γεωλογία και την παρουσία φυσικού αερίου. Με βάση δεδομένα από τα πηγάδια, πραγματοποιείται εκτίμηση πόρων για την εκτίμηση της ποσότητας και της ποιότητας των αποθεμάτων φυσικού αερίου στην περιοχή. Σε περίπτωση που τα δεδομένα αντιστοιχούν σε ευνοϊκή αξιολόγηση, δηλαδή σε κοιτάσματα φυσικού αερίου, πρόκειται για μια παραγωγική γεώτρηση.

Η επιλογή της μεθόδου γεώτρησης εξαρτάται από τα γεωλογικά χαρακτηριστικά της τοποθεσίας, το βάθος του κοιτάσματος, οικονομικούς αλλά και περιβαλλοντικούς οικονομικούς παράγοντες. Σύμφωνα με τη μέθοδο θραύσης πετρωμάτων, υπάρχουν δύο είδη μεθόδων διάτρησης: η κρουστική και η περιστροφική, με την τελευταία να αποτελεί την πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδο¹¹³. Οι τεχνικές αυτές δεν καλύπτουν πάντα τις ανάγκες των γεωτρήσεων. Αν και οι ειδικές απαιτήσεις τους μπορεί να ποικίλλουν, είτε πρόκειται για διάτρηση κάθετων, κατευθυντικών, οριζόντιων ή πολυμερών πηγαδιών, τα βασικά στοιχεία που είναι απαραίτητα για την επιτυχή και οικονομικά αποδοτική γεώτρηση είναι κοινά (Azar, 2004). Σύμφωνα λοιπόν με την τροχιά του πηγαδιού, τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί μερικές σημαντικές μέθοδοι γεώτρησης, όπως η κάθετη γεώτρηση, η κατευθυνόμενη γεώτρηση και η οριζόντια γεώτρηση¹¹⁴.

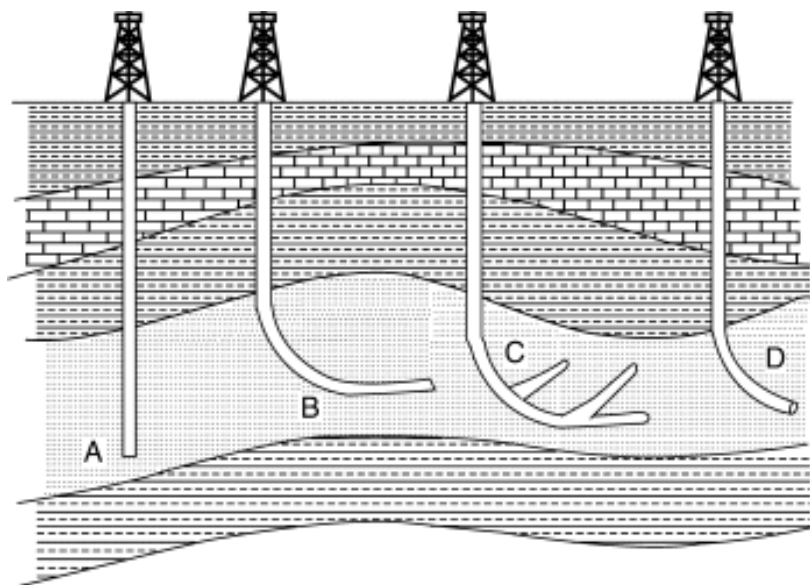
¹¹⁰ Peters, K. E., και Moldowan, J. M., 1993.. *The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments*. Prentice Hall.

¹¹¹ Laake, A., 2022. *Remote Sensing for Hydrocarbon Exploration*. In: *Remote Sensing for Hydrocarbon Exploration*. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham.

¹¹² Katz, D. L., and R. L. Lee. *Natural Gas Engineering Production and Storage*. McGraw-Hill Publishing Co., 1990, 297-298.

¹¹³ Y. Zee Ma and Stephen A. Holditch *Unconventional Oil and Gas Resources Handbook*

¹¹⁴ Ως άνωθεν



Εικόνα 3: Τύποι πηγαδιών: (Α) κάθετο, (Β) οριζόντιο, (C) πολυμερές και (D) κάθετο. Πηγή: Azar, J. J. (2004). *Oil and natural gas drilling*. In C. J. Cleveland (Ed.), *Encyclopedia of Energy* (pp. 521-534). Elsevier.

Όταν πραγματοποιείται γεώτρηση για συμβατικό φυσικό αέριο μπορεί να γίνει χρήση οποιασδήποτε από τις παραπάνω μεθόδους. Στην κάθετη γεώτρηση, η διάτρηση στοχεύει στο φυσικό αέριο ακριβώς κάτω από την επιφανειακή θέση της πηγής της γεώτρησης¹¹⁵. Στην κατευθυνόμενη γεώτρηση γίνεται διάτρηση κατά μήκος μιας προκαθορισμένης διαδρομής προκειμένου να φτάσει με ακρίβεια το στόχο¹¹⁶. Τέλος οριζόντια διάτρηση αποτελεί μια ειδική μορφή κατευθυνόμενης γεώτρησης, η οποία περιλαμβάνει τη διάτρηση του φρέατος μέσω ενός σχηματισμού με κλίση 90° από το κάθετο πηγάδι¹¹⁷. Η οριζόντια γεώτρηση είναι μια ευρέως διαδεδομένη μέθοδος καθώς η γεώτρηση υπό γωνία διαφορετική από την κατακόρυφη μπορεί να αντλήσει πληροφορίες και πόρους που η κάθετη γεώτρηση δεν θα μπορούσε να αντλήσει μόνη της¹¹⁸.

Τα κοιτάσματα μη συμβατικού φυσικού αερίου βρίσκονται σε στενούς σχηματισμούς, είναι χαμηλότερης ποιότητας και βρίσκονται σε θέσεις πιο δύσκολες στην πρόσβαση, δυσχεραίνοντας την εξόρυξη υδρογονανθράκων¹¹⁹. Μερικά από τα κοιτάσματα, όπως τα κοιτάσματα σχιστολιθικού φυσικού αερίου, απαιτούν τη διαδικασία της υδραυλικής ρωγμάτωσης (fracking). Σε αυτή τη διαδικασία, τα πετρώματα των κοιτασμάτων σπάνε από τη πίεση ενός μεγάλου όγκου ρευστού και δημιουργούνται αγωγίμα μονοπάτια ροής μεταξύ του κοιτάσματος και της γεώτρησης¹²⁰. Παράλληλα με την υδραυλική ρωγμάτωση, η τεχνική οριζόντιας διάτρησης επιτρέπει την περεταίρω εξερεύνηση και παραγωγή μη συμβατικών τύπων φυσικού αερίου. Σε κοιτάσματα με υδρίτες η

¹¹⁵ Ως άνωθεν

¹¹⁶ Teodoriu, Catalin. 2022. Chapter 3 - Construction and Completion of Multifractured Horizontal Wells." In *Unconventional Shale Gas Development*, edited by Rouzbeh G. Moghanloo, 71-104. Gulf Professional Publishing,

¹¹⁷ Islam, M. Rafiqul, and M. Enamul Hossain. "Chapter 3 - Advances in Directional Drilling." In *Drilling Engineering*, edited by M. Rafiqul Islam and M. Enamul Hossain, 179-316. Gulf Professional Publishing, 2021.

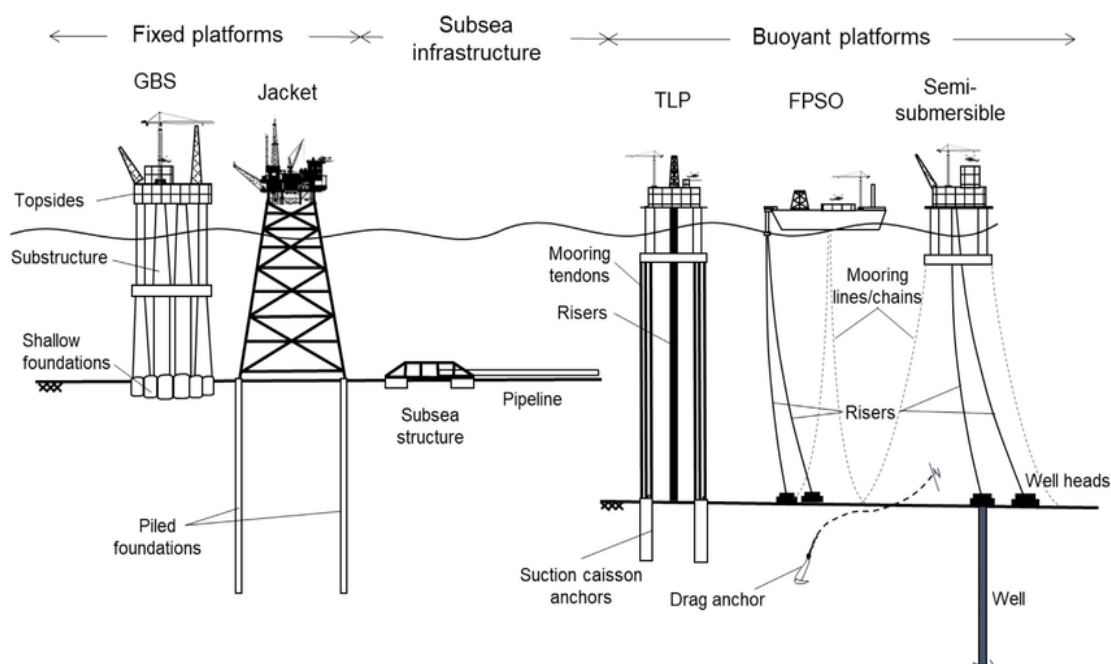
¹¹⁸ Zendehboudi, Sohrab, and Alireza Bahadori., 2017. Chapter Eight - Production Methods in Shale Oil Reservoirs." In *Shale Oil and Gas Handbook*, edited by Sohrab Zendehboudi and Alireza Bahadori, 285-319. Gulf Professional Publishing...

¹¹⁹ Y. Zee Ma and Stephen A. Holditch *Unconventional Oil and Gas Resources Handbook*

¹²⁰ Ως άνωθεν

παραγωγή μπορεί να επιτευχθεί με μεθόδους όπως η θερμική διέγερση, η αποσυμπίεση ή η χημική αναστολή¹²¹.

Σημαντική αποτελεί και η διάκριση μεταξύ της χερσαίας και της θαλάσσιας εξόρυξης του φυσικού αερίου. Οι χερσαίες γεωτρήσεις επιτρέπουν την εξόρυξη του φυσικού αερίου σε επίγειους γεωλογικούς σχηματισμούς σύμφωνα τις παραπάνω μεθόδους. Οι θαλάσσιες γεωτρήσεις πραγματοποιούνται σε υδάτινα σώματα και αντλούν το φυσικό αέριο κάτω από τον βυθό της θάλασσας. Χρησιμοποιούνται ειδικοί τύποι εξέδρας άντλησης και ανάλογα με τις περιστάσεις η εξέδρα μπορεί να είναι στερεωμένη στον πυθμένα του ωκεανού, να αποτελεί ένα τεχνητό νησί ή και να επιπλέει¹²². Επιπλέον, οι εργασίες στις εξέδρες αυτές περιλαμβάνουν τη μεταφορά του φυσικού αερίου από το σημείο παραγωγής τους στη θάλασσα σε διυλιστήρια στην ξηρά¹²³.



Εικόνα 4: Σχηματική απεικόνιση διαφόρων τύπων υπεράκτιων δομών. Πηγή: Watson, S. M., McLean, D. L., Balcom, B. J., Birchenough, S. N. R., Brand, A. M., Camprasse, E. C. M., ... Macreadie, P. I. (2023). Offshore decommissioning horizon scan: Research priorities to support decision-making activities for oil and gas infrastructure. *Science of The Total Environment*, 878

2.5 Επεξεργασία

Ενώ τελειώνει το στάδιο παραγωγής του φυσικού αερίου, σειρά έχει το στάδιο της επεξεργασίας. Κατά την παραγωγή, το φυσικό αέριο συχνά περιέχει ρύπους που δεν περιέχουν υδρογονάνθρακες, όπως υδρατμούς, διοξείδιο του άνθρακα, υδρόθειο, άζωτο, οξυγόνο και ήλιο, αλλά και συνοδευτικούς υδρογονάνθρακες, ή υγρά φυσικού αερίου, δηλαδή το αιθάνιο, το προπάνιο και το βουτάνιο¹²⁴. Αυτά τα χαρακτηριστικά δύναται να διαβρώσουν τους αγωγούς, να μειώσουν τη θερμαντική αξία του αερίου και να δημιουργήσουν κινδύνους για την ασφάλεια. Συνεπώς, το φυσικό αέριο πρέπει να

¹²¹ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas

¹²² Ronalds, Beverley F., 2005. *Applicability Ranges for Offshore Oil and Gas Production Facilities*. "Marine Structures 18, no. 3: 251-263.

¹²³ Speight, J.G., 2015. *Handbook of Petroleum Product Analysis*. John Wiley & Sons, Hoboken, 182.

¹²⁴ EIA, 2006. *Energy Information Administration Natural Gas Processing: the Crucial Link between Natural Gas Production and its Transportation to Market*.

πληροί συγκεκριμένα μέτρα ποιότητας προκειμένου το δίκτυο διανομής να λειτουργεί σωστά και να μπορεί να μεταφερθεί με ασφάλεια στον καταναλωτή¹²⁵.

Αρχικά, σε ορισμένες περιπτώσεις, απαιτείται μια διαδικασία για να διαχωριστεί το φυσικό αέριο από το αργό πετρέλαιο¹²⁶. Ο διαχωρισμός επιτυγχάνεται χρησιμοποιώντας εξειδικευμένο εξοπλισμό ο οποίος συχνά εγκαθίσταται κοντά στην κεφαλή της πηγής και είναι σχεδιασμένος ώστε να χειρίζεται τις μοναδικές ιδιότητες της κάθε φάσης. Καθώς προχωρά η διαδικασία, μπορεί να εξαχθούν το νερό και συμπυκνώματα σε περίπτωση που υπάρχουν¹²⁷. Ειδικότερα, τα συμπυκνώματα, αποτελούνται από υδρογονάνθρακες υψηλότερου μοριακού βάρους που υπάρχουν στο κοίτασμα ως συστατικά του φυσικού αερίου αλλά διαχωρίζονται από το φυσικό αέριο¹²⁸. Παράλληλα, τα συμπυκνώματα μπορούν να απομακρυνθούν με ειδικούς μηχανικούς διαχωριστές. Το εξαγόμενο συμπύκνωμα διοχετεύεται στις δεξαμενές αποθήκευσης κοντά στην πηγή¹²⁹.

Το φυσικό αέριο συχνά μεταφέρει υδρατμούς, οι οποίοι μπορεί να οδηγήσουν σε διάβρωση του αγωγού λόγω υδριτών και να επηρεάσουν την ποιότητα του αερίου¹³⁰. Επομένως, απαιτείται μια διαδικασία αφαίρεσης νερού από το φυσικό αέριο για να αποφευχθεί ο σχηματισμός υδριτών και η διάβρωση από το συμπυκνωμένο νερό¹³¹. Συνάμα, απαιτείται η απομάκρυνση άλλων ρύπων όπως το υδρόθειο, το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο. Τεχνικές όπως η επεξεργασία αερίων αμίνης και η διαδικασία Claus χρησιμοποιούνται για την αποτελεσματική εξάλειψη του υδρόθειου από το φυσικό αέριο¹³². Αμέσως μετά, η ροή περνάει από σωλήνες φίλτρου και καθώς η ταχύτητα του ρεύματος μειώνεται στη μονάδα, ο πρωταρχικός διαχωρισμός των υπόλοιπων ρύπων συμβαίνει λόγω της βαρύτητας¹³³. Μόλις η ροή φτάσει στους σωλήνες, πραγματοποιείται ο διαχωρισμός των μικρότερων σωματιδίων συμβαίνει ενώ στη συνέχεια δημιουργείται μια φυγόκεντρη δύναμη η οποία απομακρύνει περαιτέρω υπολειπόμενο νερό και μικρά στερεά σωματίδια¹³⁴.

Η εξαγωγή αζώτου είναι ένα κρίσιμο βήμα, ιδιαίτερα στο φυσικό αέριο με υψηλή περιεκτικότητα σε άζωτο. Μόλις το υδρόθειο και το διοξείδιο του άνθρακα υποβληθούν σε επεξεργασία σε αποδεκτά επίπεδα, το ρεύμα οδηγείται σε μονάδα απόρριψης αζώτου (NRU), όπου αφυδατώνεται περαιτέρω¹³⁵. Η διαδικασία περιλαμβάνει κρυογονικό διαχωρισμό ή προσρόφηση για την απομάκρυνση του αζώτου από το φυσικό αέριο. Η διαδικασία απομάκρυνσης του μεθανίου από τη ροή του φυσικού αερίου μπορεί να πραγματοποιηθεί ως ξεχωριστή λειτουργία στη μονάδα

¹²⁵ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas, EIA.

¹²⁶ EIA, 2006. *Energy Information Administration Natural Gas Processing: the Crucial Link between Natural Gas Production and its Transportation to Market*.

¹²⁷ Ως άνωθεν

¹²⁸ Speight, J.G., 2015. *Handbook of Petroleum Product Analysis*. John Wiley & Sons, Hoboken, 182.

¹²⁹ EIA, *Energy Information Administration Natural Gas Processing: the Crucial Link between Natural Gas Production and its Transportation to Market* (2006)

¹³⁰ Farag, Hassan A.A., Mustafa Mohamed Ezzat, Hoda Amer, and Adel William Nashed. "Natural Gas Dehydration by Desiccant Materials." 2011. *Alexandria Engineering Journal* 50, no. 4: 431-439.

¹³¹ EIA, 2006. *Energy Information Administration Natural Gas Processing: the Crucial Link between Natural Gas Production and its Transportation to Market*.

¹³² Speight, J.G., 2012. *Mineral Matter: The Chemistry and Technology of Coal*. 3rd Edition, Taylor & Francis

¹³³ EIA, 2006. *Energy Information Administration Natural Gas Processing: the Crucial Link between Natural Gas Production and its Transportation to Market*.

¹³⁴ Ως άνωθεν.

¹³⁵ Ως άνωθεν.

αερίου ή ως μέρος της λειτουργίας NRU¹³⁶. Στη φάση αυτή χρησιμοποιούνται μέθοδοι όπως η κρυογονική, η οποία συμπυκνώνει τους υδρογονάνθρακες στη ροή του αερίου, διατηρώντας το μεθάνιο στην αέρια μορφή του και η μέθοδος απορρόφησης η οποία διαχωρίζει το μεθάνιο από τα υγρά φυσικού αερίου.

Τα υγρά φυσικού αερίου μπορούν να διαχωριστούν με βάση τα διάφορα σημεία βρασμού των υδρογονανθράκων¹³⁷. Καθώς το ρεύμα NGL θερμαίνεται, το NGL με το χαμηλότερο σημείο βρασμού αρχίζει να βράζει και διαχωρίζεται, ενώ ο υπόλοιπος ατμός συμπυκνώνεται και ένα μέρος εναποτίθεται εκ νέου για βράσιμο, με το υπόλοιπο τμήμα να αποθηκεύεται¹³⁸. Η διαδικασία λαμβάνει χώρα σε στάδια καθώς η ροή του φυσικού αερίου ανεβαίνει μέσω πολλών πύργων¹³⁹. Τα NGL με υψηλότερο σημείο βρασμού στο κάτω μέρος του πύργου δρομολογούνται στον επόμενο πύργο όπου η διαδικασία επαναλαμβάνεται και ένα διαφορετικό συστατικό NGL διαχωρίζεται ως προϊόν¹⁴⁰.

2.6 Διανομή και αποθήκευση

Η παγκόσμια ενεργειακή αγορά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εγκαταστάσεις μεταφοράς και διανομής του φυσικού αερίου¹⁴¹. Τα αποθέματα φυσικού αερίου συχνά βρίσκονται αρκετά μακριά από τις κύριες αγορές τους ενώ σε πολλές περιπτώσεις, το φυσικό αέριο που δεν έχει υποβληθεί ακόμη σε επεξεργασία χρειάζεται να διανύσει σημαντικές αποστάσεις σε αγωγούς διαφορετικών μεγεθών¹⁴². Σήμερα, υπάρχουν πολλές επιλογές για τη μεταφορά του φυσικού αερίου, με κύριες τεχνικές να αποτελούν η απευθείας μεταφορά με αγωγό, η μετατροπή αερίου σε υγρό και η μεταφορά συμπιεσμένου αερίου (CNG).

Οι αγωγοί φυσικού αερίου αποτελούν τη θεμέλιο λίθο της μεταφοράς του φυσικού αερίου, αποτελώντας την παλαιότερη και πιο ευρέως διαδεδομένη τεχνολογία¹⁴³. Αυτοί οι αγωγοί μπορούν να εκτείνονται σε εκατοντάδες ή χιλιάδες χιλιόμετρα, μεταφέροντας αποτελεσματικά το φυσικό αέριο από τις πηγές στα κέντρα διανομής και στους καταναλωτές. Υπάρχουν τρεις κύριοι τύποι αγωγών, με μέγεθος από 100 έως 1220mm σε διάμετρο: το σύστημα συλλογής, το σύστημα μεταφοράς και το σύστημα διανομής¹⁴⁴. Οι διάφοροι τύποι των αγωγών απαιτούν τη συμβολή μιας ποικιλίας εξοπλισμού και οργάνων, όπως βαλβίδες για τον έλεγχο της ροής, ρυθμιστές για τον

¹³⁶ Ως άνωθεν.

¹³⁷EIA, 2006. *Energy Information Administration Natural Gas Processing: the Crucial Link between Natural Gas Production and its Transportation to Market*.

¹³⁸ Saeid Mokhtab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, and David A. Wood "Chapter 2 - Gas Conditioning and NGL Recovery Technologies." In *Handbook of Liquefied Natural Gas*, 107-145. Gulf Professional Publishing, 2014.

¹³⁹ EIA, 2006. *Energy Information Administration Natural Gas Processing: the Crucial Link between Natural Gas Production and its Transportation to Market*.

¹⁴⁰ Saeid Mokhtab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, and David A. Wood, 2014. *Chapter 2 - Gas Conditioning and NGL Recovery Technologies*. In *Handbook of Liquefied Natural Gas*, 107-145. Gulf Professional Publishing,.

¹⁴¹ Civan, Faruk. 2004. *Natural Gas Transportation and Storage*. In *Encyclopedia of Energy*, edited by Cutler J. Cleveland, 273-282. Elsevier, 2004. ISBN 9780121764807. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00276-X>

¹⁴² Saeid Mokhtab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, and David A. Wood, 2014. *Chapter 2 - Gas Conditioning and NGL Recovery Technologies*, In *Handbook of Liquefied Natural Gas*, 107-145. Gulf Professional Publishing.

¹⁴³Civan, Faruk, 2004. *Natural Gas Transportation and Storage*. In *Encyclopedia of Energy*, edited by Cutler J. Cleveland, 273-282. Elsevier.

¹⁴⁴ Ríos-Mercado, Roger Z., and Conrado Borrás-Sánchez., 2015. *Optimization Problems in Natural Gas Transportation Systems: A State-of-the-Art Review*. *Applied Energy* 147: 536-555.

έλεγχο της πίεσης, συσκευές ασφαλείας, συμπιεστές, ηλεκτρικά συστήματα ελέγχου κ.α.¹⁴⁵.

Το σύστημα συλλογής περιλαμβάνει μικρούς αγωγούς χαμηλής πίεσης οι οποίοι μεταφέρουν το ακατέργαστο φυσικό αέριο από την πηγή στη μονάδα επεξεργασίας¹⁴⁶. Αντίθετα, τα συστήματα μεταφοράς αποτελούνται από αγωγούς μεγάλης διαμέτρου που λειτουργούν σε επίπεδα υψηλής πίεσης. Επιπλέον, στα συστήματα μεταφοράς οι αγωγοί μπορούν να ταξινομηθούν ως ενδοκρατικοί, δηλαδή αγωγοί οι οποίοι λειτουργούν εντός των συνόρων, ή διακρατικοί, δηλαδή αγωγοί που διασχίζουν τα σύνορα κρατών. Οι αγωγοί αυτοί χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά του αερίου από τις περιοχές παραγωγής σε εμπορικές, οικιστικές και βιομηχανικές επιχειρήσεις καθώς και επιχειρήσεις κοινής ωφέλειας¹⁴⁷. Το σύστημα διανομής έχει σκοπό την παράδοση αερίου στους τελικούς καταναλωτές: τα σπίτια και τις επιχειρήσεις¹⁴⁸.

Το υγροποιημένο φυσικό αέριο, ή LNG, αναδεικνύεται ως η επόμενη καίρια μέθοδος για τη μεταφορά του φυσικού αερίου. Ειδικότερα, το φυσικό αέριο ψύχεται σε εξαιρετικά χαμηλές θερμοκρασίες και μετατρέπεται η αέρια κατάστασή του σε υγρή κρυογονική. Το LNG έχει ειδικό όγκο 600 φορές μικρότερο από το φυσικό αέριο υπό κανονικές συνθήκες, γεγονός που καθιστά τη μεταφορά του μια οικονομικά ελκυστική εναλλακτική¹⁴⁹. Επιπλέον, αυτή η ιδιότητα επιτρέπει τη μεταφορά φυσικού αερίου σε τοποθεσίες όπου οι αγωγοί δεν θα μπορούσαν να έχουν πρόσβαση. Χαρακτηριστικό το παράδειγμα αγορών της Ιαπωνίας και της Νότιας Κορέας όπου τις τελευταίες τρεις δεκαετίες αξιοποιούνται με επιτυχία σημαντικά απομακρυσμένα κοιτάσματα φυσικού αερίου χρησιμοποιώντας αποκλειστικά τη βιομηχανία LNG¹⁵⁰.

Το LNG στη συνέχεια μεταφέρεται χρησιμοποιώντας εξειδικευμένα πλοία, συνήθως υγραεριοφόρα πλοία LNG, σχεδιασμένα για τη διατήρηση του φορτίου σε θερμοκρασία -162 °C και με χωρητικότητα από 1000 έως 267.000 m³¹⁵¹. Συγκεκριμένα, τα πλωτά πλοία υγροποιημένου φυσικού αερίου (FLNG) έχουν κατασκευαστεί για να διευκολύνουν την παραγωγή, την υγροποίηση και την αποθήκευση φυσικού αερίου στη θάλασσα¹⁵². Οι τερματικοί σταθμοί λήψης LNG μπορεί να περιλαμβάνουν εγκαταστάσεις για την απευθείας φόρτωση LNG σε

¹⁴⁵ Civan, Faruk. 2004. *Natural Gas Transportation and Storage*. In *Encyclopedia of Energy*, edited by Cutler J. Cleveland, 273-282. Elsevier.

¹⁴⁶ Ríos-Mercado, Roger Z., and Conrado Borraz-Sánchez. 2015. *Optimization Problems in Natural Gas Transportation Systems: A State-of-the-Art Review*. *Applied Energy* 147: 536-555. ISSN 0306-2619.

¹⁴⁷ Gondal, I.A. 2016. - *Hydrogen Transportation by Pipelines*. In *Compendium of Hydrogen Energy*, edited by Ram B. Gupta, Angelo Basile, and T. Nejat Veziroğlu, 301-322. Woodhead Publishing, 2016.

¹⁴⁸ Ríos-Mercado, Roger Z., and Conrado Borraz-Sánchez. 2015 *Optimization Problems in Natural Gas Transportation Systems: A State-of-the-Art Review*. *Applied Energy* 147.

¹⁴⁹ Serrato, David, Juan Zapata-Mina, Álvaro Restrepo, and Jorge Torres. 2021. *Assessment of Liquefied Natural Gas (LNG) Regasified through Gas Interchangeability in Energy Consumption Sectors*. *Energy Reports* 7: 2526-2533.

¹⁵⁰ Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, and David A. Wood. 2014. *Chapter 2 - Gas Conditioning and NGL Recovery Technologies*. In *Handbook of Liquefied Natural Gas*, 107-145. Gulf Professional Publishing.

¹⁵¹ Bai, Yong, and Wei-Liang Jin. 2016. *Chapter 4 - LNG Carrier*. In *Marine Structural Design (Second Edition)*, edited by Yong Bai and Wei-Liang Jin, 49-71. Butterworth-Heinemann.

¹⁵² Khakzad, Nima, and Genserik Reniers. 2018. *Chapter Six - Safety of Offshore Topsides Processing Facilities: The Era of FPSOs and FLNGs*. In *Methods in Chemical Process Safety*, edited by Faisal Khan and Rouzbeh Abbassi, 269-287. Elsevier.

βυτιοφόρα για οδική διανομή¹⁵³. Στο τέλος το LNG μεταφέρεται σε επιτόπιες δεξαμενές αποθήκευσης, όπου αντλείται, οσμίζεται, επαναεριοποιείται και διανέμεται σε δίκτυο χαμηλής πίεσης για να καλύψει τις ανάγκες θέρμανσης και μαγειρέματος του οικιακού τομέα¹⁵⁴.

Το συμπιεσμένο φυσικό αέριο (CNG) παράγεται με συμπίεση φυσικού αερίου σε λιγότερο από το 1% του όγκου που καταλαμβάνει σε τυπική ατμοσφαιρική πίεση¹⁵⁵. Η τεχνολογία αυτή είναι αρκετά απλή σε σχέση με το LNG και σε περίπτωση που συμφέρει οικονομικά μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε πρακτικές εφαρμογές¹⁵⁶. Το CNG χρησιμοποιείται ως καύσιμο κυρίως στα μέσα μαζικής μεταφοράς και εκπέμπει λιγότερο μονοξείδιο του άνθρακα, οξείδια του αζώτου και σωματίδια σε σύγκριση με τη βενζίνη¹⁵⁷. Παράλληλα, το CNG χρησιμοποιείται για τη θαλάσσια μεταφορά φυσικού αερίου σε ενδιάμεσες αποστάσεις, ειδικά όταν δεν υπάρχει η υποδομή για αγωγούς ή LNG.

Η αποθήκευση του φυσικού αερίου είναι ένα κρίσιμο στοιχείο της αλυσίδας εφοδιασμού, που επιτρέπει στο σύστημα να αντιμετωπίζει τις διακυμάνσεις της ζήτησης, να διατηρεί την αξιοπιστία του συστήματος και να διασφαλίζει την ενεργειακή ασφάλεια. Οι εξαντλημένες δεξαμενές αερίου, τα σπήλαια αλατιού και οι υδροφορείς είναι συνήθεις υπόγειοι χώροι αποθήκευσης φυσικού αερίου (Wang, 2010). Το αέριο εγχέεται σε περιόδους χαμηλής ζήτησης και αποσύρεται όταν η ζήτηση είναι υψηλή. Αυτή η διαδικασία διασφαλίζει τη συνεπή παροχή φυσικού αερίου στους καταναλωτές, ακόμη και σε περιόδους αιχμής χρήσης. Οι υπόγειες εγκαταστάσεις αποθήκευσης είναι εξοπλισμένες με φρεάτια έγχυσης και απόσυρσης. Τα φρεάτια έγχυσης χρησιμοποιούνται για την έγχυση φυσικού αερίου στον χώρο αποθήκευσης όταν η προσφορά υπερβαίνει τη ζήτηση. Σε περιόδους υψηλής ζήτησης, χρησιμοποιούνται φρεάτια απόσυρσης για πρόσβαση στο αποθηκευμένο αέριο και τροφοδοσία του στο δίκτυο διανομής¹⁵⁸. Η προσεκτική διαχείριση των ποσοστών έγχυσης και απόσυρσης είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική αντιμετώπιση των διακυμάνσεων της ζήτησης.

¹⁵³ Mannan, Sam, ed. 2012. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries (Fourth Edition)*. Butterworth-Heinemann. Chapter 39 - Liquefied Natural Gas. In *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*, 2492-2506. ISBN 9780123971890.

¹⁵⁴ Serrato, David, Juan Zapata-Mina, Álvaro Restrepo, and Jorge Torres. 2021. Assessment of Liquefied Natural Gas (LNG) Regasified through Gas Interchangeability in Energy Consumption Sectors." *Energy Reports* 7: 2526-2533.

¹⁵⁵ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas

¹⁵⁶ Wang, X., Economides, M., 2013. Advanced natural gas engineering. *Advanced Natural Gas Engineering*. 1-368

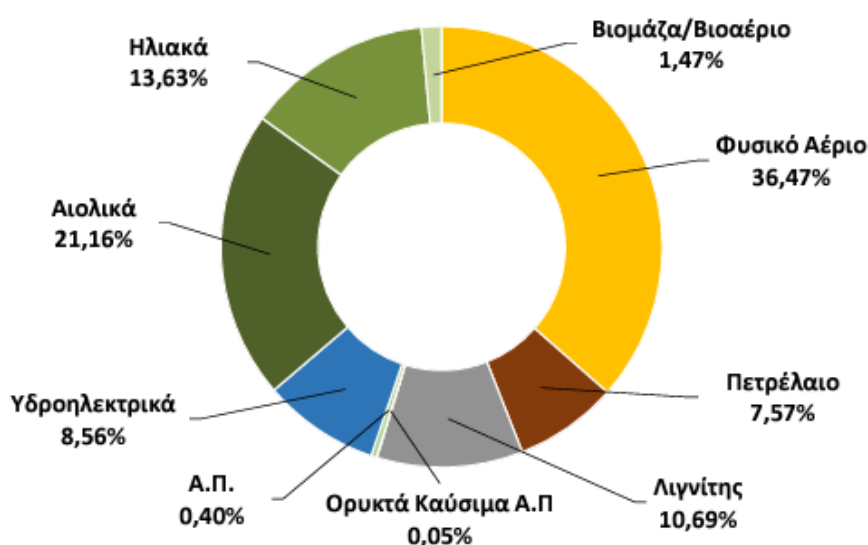
¹⁵⁷ Speight, J.G., 2007. *Natural Gas: A Basic Handbook*. Gulf Publishing Company, Houston, Texas

¹⁵⁸ Speight, J.G. 2012. *Mineral Matter: The Chemistry and Technology of Coal*. 3rd Edition, Taylor & Francis

3. Το φυσικό αέριο στην Ελλάδα

3.1 Το ενεργειακό μείγμα

Ο ενεργειακός τομέας της Ελλάδας διακρίνεται από ένα ποικιλόμορφο ενεργειακό μείγμα. Η παραγωγή ηλεκτρικού ρεύματος εξαρτάται κατά βάση από τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας, το φυσικό αέριο και τον λιγνίτη¹⁵⁹. Σύμφωνα με τα στοιχεία της ΔΑΠΕΕΠ, το 2022, στο ενεργειακό μείγμα παραγωγής, το οποίο αποτυπώνει την κατανομή σε πρωτογενείς πηγές της παραγόμενης ηλεκτρικής ενέργειας στο σύνολο της ελληνικής επικράτειας, το φυσικό αέριο αποτέλεσε το 36,47%. Η αυξημένη ενσωμάτωση του φυσικού αερίου στο ενεργειακό μείγμα προσέφερε αυξημένη ευελιξία στην παραγωγή θερμικής ενέργειας, διευκολύνοντας την υιοθέτηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, συμβάλλοντας έτσι στην προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας¹⁶⁰.



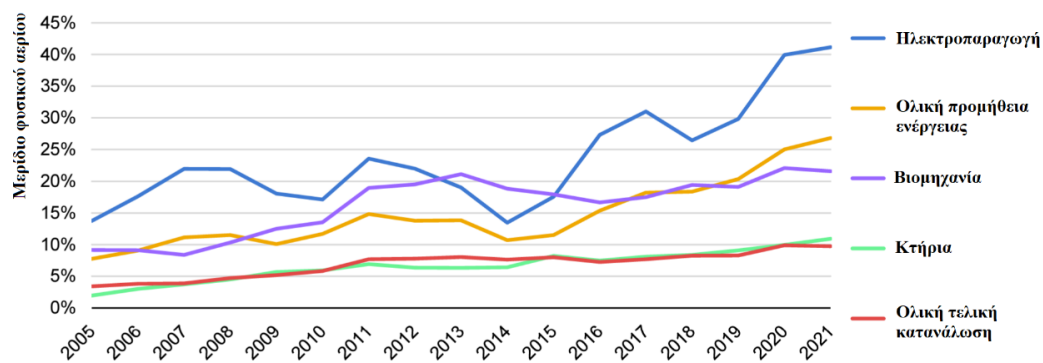
Εικόνα 5: Ενεργειακό Μείγμα Παραγωγής Ελλάδας 2022. Πηγή: Διαχειριστής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εγγυήσεων Προέλευσης (2023), Ενεργειακό Μείγμα.

Η ιστορική εξέλιξη του ενεργειακού μείγματος της Ελλάδας έχει σημειώσει σημαντικές αλλαγές. Ιστορικά εξαρτημένη από πηγές ενέργειας όπως ο λιγνίτης και τα εισαγόμενα ορυκτά καύσιμα, η Ελλάδα εισήγαγε προοδευτικά με επιτυχία τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας. Με το ευρωπαϊκό νομοθέτημα για το κλίμα «Δέσμη Fit for 55» έγινε νομική υποχρέωση η επίτευξη του κλιματικού στόχου της Ελλάδας για μείωση των εκπομπών της κατά τουλάχιστον 55 % έως το 2030 και τη δέσμευση για καθαρές μηδενικές εκπομπές έως το 2050 (Συμβούλιο της ΕΕ, 2020). Για να μπορέσει να ανταποκριθεί στους στόχους αυτούς, η χώρα έχει κληθεί να δημιουργήσει ένα δεσμευτικό πλάνο για τον τερματισμό της παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας από λιγνίτη έως το 2028¹⁶¹.

¹⁵⁹ IEA, 2023. World Energy Outlook 2023, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).

¹⁶⁰ Strantzali, Eleni, Konstantinos Aravossis, Georgios A. Livanos, and Christos Nikoloudis. 2019. A Decision Support Approach for Evaluating Liquefied Natural Gas Supply Options: Implementation on Greek Case Study." *Journal of Cleaner Production* 222.

¹⁶¹ IEA, 2023. World Energy Outlook 2023, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).



Εικόνα 6: Μερίδιο φυσικού αερίου στο ενεργειακό σύστημα της Ελλάδας. Πηγή: IEA (2023), Greece 2023, IEA, Paris

3.1 Η ΔΕΠΑ και οι άλλοι φορείς

Η Δημόσια Επιχείρηση Αερίου (ΔΕΠΑ) Α.Ε. διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στον ενεργειακό τομέα της Ελλάδας, συμβάλλοντας σημαντικά στη διαφοροποίηση του ενεργειακού μείγματος της χώρας. Ιδρύθηκε τον Σεπτέμβριο του 1988 ως φορέας ανάπτυξης της απαραίτητης υποδομής και όλων των λοιπών πτυχών της αγοράς φυσικού αερίου στη χώρα. Ιστορικά, η αρχή έγινε με την υπογραφή το 1987 της Διακρατικής Συμφωνίας μεταξύ της Ελληνικής Δημοκρατίας και της Σοβιετικής Ένωσης για τον εφοδιασμό της χώρας με φυσικό αέριο. Ακολουθούν συμφωνίες της ΔΕΠ με την ρωσική Sojuzgazexport, σήμερα Gazprom-Export, και με την αλγερινή Sonatrach. Τον Φεβρουάριο του 1988, υπογράφεται η πρώτη διακρατική συμφωνία μεταξύ Ελλάδας και Αλγερίας, για τον εφοδιασμό της χώρας μας με Υγροποιημένο Φυσικό Αέριο. Με την ίδρυσή της το 1988, ως θυγατρική εταιρεία της Δημόσιας Επιχείρησης Πετρελαίου (ΔΕΠ), η ΔΕΠΑ εισήγαγε το φυσικό αέριο στην Ελλάδα εξασφαλίζοντας οικονομικότερους τρόπους λειτουργίας των βιομηχανιών αλλά και χαμηλότερες τιμές θέρμανσης για τον μέσο καταναλωτή.

Προκειμένου να ανταποκριθεί στην επίτευξη των στόχων της, η ΔΕΠΑ χρειάστηκε να λάβει μια σειρά από μέτρα, υπογράφοντας πολλές συμφωνίες και δημιουργώντας ένα πλήθος έργων υποδομής. Ειδικότερα, το Δεκέμβριο του 1988, η ΔΕΠΑ υπέγραψε μια σημαντική συμφωνία για την κατασκευή ενός αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου μήκους 512 χιλιομέτρων από τα σύνορα Ελλάδας – Βουλγαρίας προς την Αττική. Το 1994, υπέγραψε σύμβαση πώλησης φυσικού αερίου με τη ΔΕΗ προωθώντας το έργο του φυσικού αερίου. Το 1995, εισήχθη ο πρώτος νόμος που ρυθμίζει την εισαγωγή, μεταφορά, εμπορία και διανομή φυσικού αερίου στην Ελλάδα (Ν.2364/1995). Στις αρχές του 1996, ολοκληρώθηκε η κατασκευή του αγωγού μεταφοράς φυσικού αερίου και του Μετρητικού Σταθμού Συνόρων Σιδηροκάστρου με το αέριο να εισάγεται για πρώτη φορά. Τον Νοέμβριο του 1996, συνδέθηκε ο πρώτος καταναλωτής φυσικού αερίου, ενώ το 2000 ολοκληρώθηκε η κατασκευή μιας εγκατάστασης προσωρινής αποθήκευσης και αεριοποίησης υγροποιημένου φυσικού αερίου στη νήσο Ρεβυθούσα, που χρησιμοποιήθηκε για την παραλαβή αερίου από την Αλγερία.

Η εξέλιξη της ΔΕΠΑ αντικατοπτρίζει τη στρατηγική απάντηση της Ελλάδας στις ενεργειακές προκλήσεις. Το 2000, δημιουργήθηκαν οι δύο πρώτες Εταιρείες Παροχής Αερίου (ΕΠΑ) στη Θεσσαλονίκη και τη Θεσσαλία, με τη ΔΕΠΑ να συμμετέχει με ποσοστό 51% στο μετοχικό κεφάλαιο αυτών των εταιρειών, ενώ το 2001, ιδρύθηκε μια

τρίτη ΕΠΑ στην περιοχή της Αττικής. Το 2003, υπογράφηκε διακρατική συμφωνία μεταξύ Ελλάδας και Τουρκίας για την προμήθεια αερίου από την Τουρκία και ξεκίνησε η κατασκευή του διασυνδεδετήριου αγωγού φυσικού αερίου Ελλάδας-Τουρκίας. Το 2005, εγκρίθηκε ο νόμος που απελευθέρωσε την αγορά φυσικού αερίου στην Ελλάδα, δημιουργώντας τη θυγατρική εταιρεία Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ ΑΕ). Τον Νοέμβριο του ίδιου έτους, υπογράφηκε διακρατική συμφωνία μεταξύ Ελλάδας και Ιταλίας για το έργο Italy-Greece Interconnector (IGI), συνδέοντας το ελληνικό με το ιταλικό δίκτυο φυσικού αερίου. Το 2007, ιδρύθηκε η Natural Gas Interconnector Greece Bulgaria EAD (ICGB AD) για τον αγωγό IGB προς τη Βουλγαρία, με συμμετοχή της ΔΕΠΑ και της Edison.

Ο νόμος για την απελευθέρωση της αγοράς ενέργειας του 2007 σηματοδότησε μια κομβική στιγμή, ανοίγοντας την πόρτα για τη συμμετοχή του ιδιωτικού τομέα. Το 2010, η ΔΕΠΑ ξεκίνησε τη λειτουργία του σταθμού CNG στην Ανθούσα Αττικής, παρέχοντας φυσικό αέριο για οχήματα και δυο χρόνια μετά ολοκληρώθηκε η τοποθέτηση υποθαλάσσιου αγωγού για την τροφοδότηση της Εύβοιας με φυσικό αέριο. Το 2016, υπέγραψε μνημόνιο συνεργασίας με την AtticaGroup για τη χρήση υγροποιημένου φυσικού αερίου σε επιβατηγά πλοία. Το 2017, ιδρύθηκε η Εταιρεία Διανομής Λοιπής Ελλάδος για διανομή φυσικού αερίου εκτός της Αττικής, Θεσσαλονίκης και Θεσσαλίας. Τον Δεκέμβριο 2018 η ΔΕΠΑ ξεκίνησε την προμήθεια LNG από τις ΗΠΑ, διαφοροποιώντας περαιτέρω τις πηγές προμήθειας αερίου.

Με το νόμο 4643/2019 (ΦΕΚ Α' 193/03.12.19) θεσπίστηκαν ρυθμίσεις για την ιδιωτικοποίηση της ΔΕΠΑ Α.Ε. και λοιπές διατάξεις για την αγορά φυσικού αερίου. Ειδικότερα, η ΔΕΠΑ Α.Ε. μετασχηματίστηκε σε ΔΕΠΑ Εμπορίας Α.Ε., και δημιουργήθηκαν δύο νέες οντότητες, η ΔΕΠΑ Υποδομών Α.Ε. και ΔΕΠΑ Διεθνών Έργων Α.Ε. Η ΔΕΠΑ Υποδομών είναι υπεύθυνη την ανάπτυξη, το σχεδιασμό και την υλοποίηση έργων υποδομής δικτύων διανομής, συμπεριλαμβανομένων έργων συμπιεσμένου φυσικού αερίου ή έργων LNG μικρής κλίμακας. Παράλληλα, συμμετέχει στους Διαχειριστές Δικτύων Διανομής Φυσικού Αερίου κατέχοντας το 100% του μετοχικού κεφαλαίου της ΕΔΑ Αττικής Α.Ε., το 51% του μετοχικού κεφαλαίου της ΕΔΑ Θεσσαλονίκης – Θεσσαλίας Α.Ε. και το 100% του μετοχικού κεφαλαίου της ΔΕΔΑ Α.Ε. Στις 10 Δεκεμβρίου 2021, η Italgas οριστικοποίησε συμφωνία για την αγορά του συνόλου του μετοχικού κεφαλαίου της ΔΕΠΑ Υποδομών.

Η ΔΕΠΑ Διεθνών Έργων περιλαμβάνει όλες τις δραστηριότητες για την ανάπτυξη, διαχείριση, εκμετάλλευση και κατασκευή διασυνοριακών ενεργειακών έργων φυσικού αερίου ή και άλλων μορφών ενέργειας. Επικεντρωμένη στο βιώσιμο ενεργειακό μέλλον, προωθεί έργα υποδομής βιοαερίου και υδρογόνου, ενώ επιδιώκει διεθνείς στρατηγικές συνεργασίες. Τέλος, η εναπομείνασα ΔΕΠΑ Εμπορίας ασχολείται κυρίως με την εισαγωγή και προμήθεια φυσικού αερίου αλλά και την ηλεκτρική ενέργεια, καθώς και πιθανά δικαιώματα και υποχρεώσεις της ΔΕΠΑ σε διεθνή έργα. Το 65% των μετοχών της ΔΕΠΑ Εμπορίας ανήκει στο ΤΑΙΠΕΔ ενώ το υπόλοιπο 35% ανήκει στα Ελληνικά Πετρέλαια¹⁶².

¹⁶² ΤΑΙΠΕΔ, ΔΕΛΤΙΟ ΤΥΠΟΥ ΤΑΙΠΕΔ: Ματαίωση της διεθνούς διαγωνιστικής διαδικασίας για την πώληση του 65% της ΔΕΠΑ ΕΜΠΟΡΙΑΣ Α.Ε, ΤΑΙΠΕΔ, 13 Οκτωβρίου 2023.

Η Ρυθμιστική Αρχή Ενέργειας (ΡΑΕ) στην Ελλάδα αποτελεί ανεξάρτητη ρυθμιστική αρχή, επιφορτισμένη με την εποπτεία της εγχώριας αγοράς ενέργειας σε όλους τους τομείς. Από την ίδρυσή της με το ν.2773/1999, η ΡΑΕ συμβάλλει καθοριστικά στη διαμόρφωση ενεργειακών πολιτικών και πρακτικών στη χώρα. Ειδικότερα, η ΡΑΕ είναι υπεύθυνη μεταξύ άλλων για: τη χορήγηση αδειών παραγωγής, προστασία των καταναλωτών, παρακολούθηση της ασφάλειας του ενεργειακού εφοδιασμού της χώρας, τη λήψη ρυθμιστικών μέτρων για την εύρυθμη λειτουργία των ενεργειακών αγορών και τη ρύθμιση των αγορών ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Με τον νόμο 5037 ΦΕΚ Α 78/29.3.2023 επήλθε η μετονομασία της Ρυθμιστικής Αρχής Ενέργειας (ΡΑΕ) σε Ρυθμιστική Αρχή Αποβλήτων, Ενέργειας και Υδάτων (ΡΑΑΕΥ) και η διεύρυνση του αντικειμένου της με αρμοδιότητες επί των υπηρεσιών ύδατος και της διαχείρισης αστικών αποβλήτων.

Ο Διαχειριστής Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (ΔΕΣΦΑ) Α.Ε. ιδρύθηκε στις 30 Μαρτίου 2007 βάσει του Ν. 3428/2005 για την απελευθέρωση της αγοράς φυσικού αερίου (ΦΕΚ 313/27.12.2005), με τον οποίο εναρμονίστηκε η ελληνική νομοθεσία με την Ευρωπαϊκή Οδηγία 2003/55/ΕΚ. Ο νόμος αυτός προέβλεπε τη δημιουργία του ΔΕΣΦΑ ως 100% θυγατρικής εταιρίας της ΔΕΠΑ ΑΕ. Στο πλαίσιο αυτό, μεταβιβάστηκε με απόσπαση από τη ΔΕΠΑ Α.Ε. στον ΔΕΣΦΑ ο κλάδος του Εθνικού Συστήματος Φυσικού Αερίου (ΕΣΦΑ). Στην τρέχουσα μετοχική σύνθεση του ΔΕΣΦΑ ΑΕ το Ελληνικό Δημόσιο κατέχει το 34% και η Senfluga Energy Infrastructure Holdings S.A. το υπόλοιπο 66%. Το πελατολόγιο του ΔΕΣΦΑ περιλαμβάνει προμηθευτές χονδρικής, παραγωγούς και σταθμούς ηλεκτρικής ενέργειας, μεγάλους βιομηχανικούς πελάτες, λιανοπωλητές και εμπόρους φυσικού αερίου, αποδεικνύοντας το ρόλο στο ελληνικό ενεργειακό οικοσύστημα και τη συμβολή του στην εθνική οικονομία.

Ο ΔΕΣΦΑ λειτουργεί, συντηρεί, διαχειρίζεται, εκμεταλλεύεται και αναπτύσσει το ΕΣΦΑ (Εθνικό Σύστημα Φυσικού Αερίου) και τις διασυνδέσεις που εντάσσονται σε αυτό, προκειμένου να καλύπτονται ασφαλώς οι ανάγκες των χρηστών σε φυσικό αέριο και να επιτευχθεί ενιαία αγορά φυσικού αερίου στην ΕΕ. Το ΕΣΦΑ μεταφέρει το φυσικό αέριο από τα ελληνοβουλγαρικά και ελληνοτουρκικά σύνορα, καθώς και από τον τερματικό σταθμό Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου (ΥΦΑ), ο οποίος βρίσκεται εγκατεστημένος στη νήσο Ρεβυθούσα του κόλπου Μεγάρων, σε καταναλωτές συνδεδεμένους με το δίκτυο ΕΣΦΑ στην ηπειρωτική Ελλάδα. Το Φυσικό Αέριο παραδίδεται σε τρία σημεία εισόδου του ΕΣΦΑ και παραλαμβάνεται από τους χρήστες μεταφοράς μέσω σαράντα τεσσάρων σημείων εξόδου σε όλη την ηπειρωτική Ελλάδα, συμπεριλαμβανομένου του σημείου εξόδου αντίστροφης ροής «Σιδηρόκαστρο» μέσω του οποίου επιτυγχάνεται η παράδοση ποσοτήτων Φυσικού Αερίου στο Συνδεδεμένο Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου της Βουλγαρίας.

Το ΕΣΦΑ αποτελείται από τον κεντρικό αγωγό μεταφοράς αερίου μήκους 512 χλμ. και διαμέτρου 36'' και 30'' και τους κλάδους αυτού συνολικού μήκους 953,20 χλμ. που συνδέουν διάφορες περιοχές της χώρας με τον κύριο αγωγό. Επιπλέον, περιέχει τους Μετρητικούς Σταθμούς Συνόρων Σιδηροκάστρου Σερρών και Κήπων Έβρου, το Σταθμό ΥΦΑ Ρεβυθούσας, ο οποίος συνδέεται με το Σημείο Εισόδου «Αγία Τριάδα», το Σταθμό Συμπίεσης στη Νέα Μεσημβρία Θεσσαλονίκης, τους Μετρητικούς και Ρυθμιστικούς σταθμούς Φυσικού Αερίου και τα Κέντρα Ελέγχου και Κατανομής

Φορτίου. Τα Κέντρα Λειτουργίας και Συντήρησης των τμημάτων του Μετρητικού Σταθμού Συνόρων Σιδηροκάστρου Σερρών, της Βόρειο – Ανατολικής Ελλάδος, της Βορείου Ελλάδος, της Κεντρικής Ελλάδος, της Νοτίου Ελλάδος και της Πελοποννήσου, και τέλος το σύστημα Τηλελέγχου και Τηλεπικοινωνιών.

Ο Σταθμός ΥΦΑ Ρεβυθούσας αποτελείται από τρεις δεξαμενές ΥΦΑ ωφέλιμης χωρητικότητας 63.379,931, 63.379,931 και 95.055,815 m³ ΥΦΑ, εγκαταστάσεις εκφόρτωσης πλοίων ΥΦΑ συνολικής δυναμικότητας εκφόρτωσης 7.250 m³ ΥΦΑ/ώρα και εγκαταστάσεις αεριοποίησης ΥΦΑ συνολικής δυναμικότητας αεριοποίησης 1.000 m³ ΥΦΑ/ώρα σε συνθήκες συνεχούς λειτουργίας και 1.250 m³ ΥΦΑ/ώρα σε συνθήκες παραγωγής αιχμής. Ο σταθμός της Ρεβυθούσας αποτέλεσε την κύρια πύλη εισόδου φυσικού αερίου στη χώρα για το 2022, καλύπτοντας το 44,2% του συνόλου των εισαγωγών, λαμβάνοντας για πρώτη φορά 78 φορτία από 10 χώρες. Η προσθήκη νέας πλωτής μονάδας αποθήκευσης τον Αύγουστο του 2022 αύξησε περαιτέρω την ικανότητα εισαγωγής LNG. Αυτό, σε συνδυασμό με έναν νέο αγωγό προς τη Βουλγαρία, οδήγησε σε αυξημένες εξαγωγές φυσικού αερίου, ιδίως στη Βουλγαρία (0,008 bcm το 2018 σε 0,92 bcm το 2022) και στην Ιταλία (6,9 bcm το 2021 σε 9,7 bcm το 2022)¹⁶³.

3.2 Η Ελληνική αγορά φυσικού αερίου

Η Ελλάδα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εισαγωγές φυσικού αερίου, με την εγχώρια παραγωγή να διαδραματίζει μικρό ρόλο. Από το 2011 έως το 2021, οι καθαρές εισαγωγές αερίου αυξήθηκαν κατά 35%, φτάνοντας τα 6,4 bcm¹⁶⁴. Το φυσικό αέριο εισάγεται μέσω τεσσάρων σημείων εισόδου του ΕΣΦΑ: το Σιδηρόκαστρο (σύνορα Ελλάδας-Βουλγαρίας), τους Κήπους (σύνορα Ελλάδας-Τουρκίας), τη Νέα Μεσημβρία (σύνδεση ΕΣΦΑ με TAP) και την Αγία Τριάδα (σημείο εισόδου από τον τερματικό σταθμό ΥΦΑ της Ρεβυθούσας, στην περιοχή των Μεγάρων Αττικής). Αντίστοιχα το φυσικό αέριο παραλαμβάνεται από χρήστες μεταφοράς σε 44 σημεία εξόδου του ΕΣΦΑ. Ειδικότερα, αυτά περιλαμβάνουν το σημείο εξόδου αντίστροφης ροής «Σιδηρόκαστρο», μέσω του οποίου πλέον πραγματοποιείται όχι μόνο η εισαγωγή φυσικού αερίου στη χώρα μας, αλλά και η εξαγωγή ποσοτήτων φυσικού αερίου προς το συνδεδεμένο σύστημα μεταφοράς της Βουλγαρίας.

Το φυσικό αέριο εισάγεται στη Ελλάδα από τη Ρωσία από τη Gazexport, θυγατρική της Gazprom. Συγκεκριμένα το 2022 σε σύνολο εισαγωγών 52,67TWh στην Ελλάδα, οι ρωσικές εισαγωγές αερίου έφτασαν τις 22,45TWh, δηλαδή το 42,62% των συνολικών εισαγωγών αερίου. Ωστόσο, ενόψει του σχεδίου REPowerEU, η ΕΕ προετοιμάζει το ενεργειακό της μέλλον χωρίς ρωσικό αέριο¹⁶⁵. Το σχέδιο αυτό, το οποίο τέθηκε σε ισχύ τον Μάιο του 2022, περιέχει μια σειρά από μέτρα τα οποία στοχεύουν μέσω της εξοικονόμησης ενέργειας, της διαφοροποίησης του ενεργειακού εφοδιασμού και της επιτάχυνσης της ανάπτυξης ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη μείωση της εξάρτησης

¹⁶³ IEA, 2023. *World Energy Outlook 2023*, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).

¹⁶⁴ Ως άνωθεν

¹⁶⁵ Hellenic Association for Energy Economics, 2022. *Greek energy market report*.

στα ρωσικά ορυκτά καύσιμα και τη δομική μεταμόρφωση του ενεργειακού συστήματος της ΕΕ¹⁶⁶.

Παράλληλα, το φυσικό αέριο εισάγεται και από την Αλγερία (Sonatrach), σε ΥΦΑ στις εγκαταστάσεις αποθήκευσης της νήσου Ρεβυθούσας, το Αζερμπαϊτζαν (SOCAR), τις ΗΠΑ και το Κατάρ. Η Ρεβυθούσα έχει αναδειχθεί ως κρίσιμος κόμβος για τη διαφοροποίηση των πηγών εφοδιασμού ενέργειας στη χώρα, υποδεικνύοντας τον σημαντικό ρόλο της στην αντιμετώπιση της αυξημένης ζήτησης. Ακολουθούν Αλγερία, Αίγυπτος, Νιγηρία, Νορβηγία, Ρωσία και Ομάν, ενώ φορτία εισήχθησαν επίσης από Ισπανία, Ινδονησία και Καμερούν.

Η εγχώρια παραγωγή φυσικού αερίου της Ελλάδας είναι μικρή και έχει μειωθεί σημαντικά από την κορυφή των 0,036 bcm το 2002 σε μόλις 0,004 bcm το 2021¹⁶⁷. Εταιρίες μεταξύ άλλων η ExxonMobil έχουν αναλάβει την πραγματοποίηση σεισμικών ερευνών για το εντοπισμό κοιτασμάτων, με τις ανακοινώσεις να εμφανίζονται αισιόδοξες για την εύρεση σημαντικών ποσοτήτων¹⁶⁸ (Καθημερινή, 2023). Επί του παρόντος, το φυσικό αέριο παράγεται από τα υπεράκτια κοιτάσματα του Πρίνου και της Νότιας Καβάλας στη Βόρεια Ελλάδα, με τα αποθέματα φυσικού αερίου εκεί να υπολογίζονται σε 0,073 bcm¹⁶⁹. Το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής, εισάγεται εκ νέου στο σύστημα για την ενίσχυση της παραγωγής πετρελαίου είτε χρησιμοποιείται για την κάλυψη των ενεργειακών αναγκών στις εγκαταστάσεις αυτές.

Από το 2011 έως το 2021, η ζήτηση του φυσικού αερίου αυξήθηκε από 4,7 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα (bcm) σε 6,4 bcm, κυρίως λόγω της μετάβασης από την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας με καύση λιγνίτη στην παραγωγή με καύση φυσικού αερίου, ταυτόχρονα με την αυξανόμενη ζήτηση για φυσικό αέριο τόσο από τον βιομηχανικό όσο και από τον οικιακό τομέα¹⁷⁰. Σημαντική αλλαγή αποτέλεσε και η απελευθέρωση της λιανικής αγοράς του φυσικού αερίου το 2018. Χαρακτηριστικά, όλοι οι τελικοί πελάτες έχουν πλέον δικαίωμα ελεύθερης επιλογής του προμηθευτή τους. Η απελευθέρωση της αγοράς φυσικού αερίου επηρεάζει και την αγορά ηλεκτρισμού, με τις Εταιρίες Παροχής Αερίου (ΕΠΑ) να μεταβάλλονται και να επεκτείνονται και στην προμήθεια ρεύματος. Παράλληλα, εισήχθη μια πλατφόρμα χονδρικής εμπορίας φυσικού αερίου και ένα μικρό αλλά αυξανόμενο μερίδιο της προμήθειας φυσικού αερίου, ήτοι 5,6% τον Μάρτιο 2022, να διακινείται μέσω της πλατφόρμας¹⁷¹.

¹⁶⁶ Ευρωπαϊκή Επιτροπή, REPowerEU: ένα σχέδιο για ταχεία μείωση της εξάρτησης από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα και την επιτάχυνση της πράσινης μετάβασης, Βρυξέλλες, 18 Μαΐου 2022.

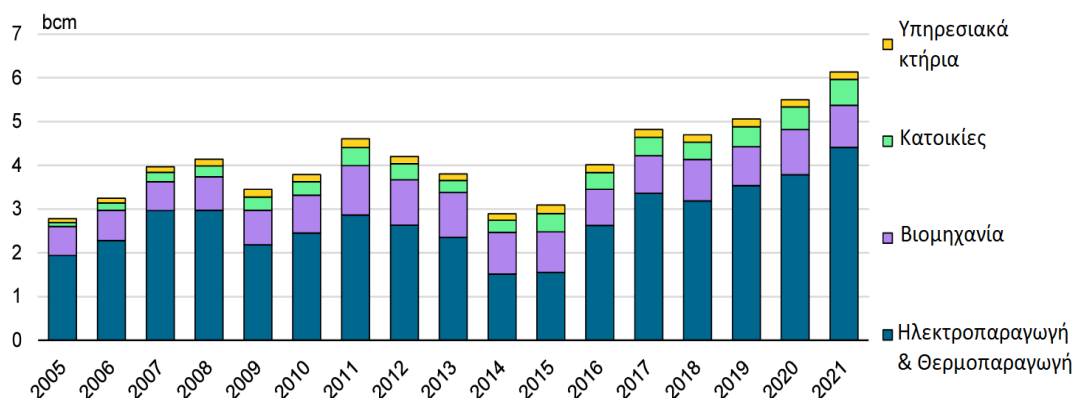
¹⁶⁷ IEA, 2023. World Energy Outlook 2023, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).

¹⁶⁸ Λιάγγου, Χ., 28 Ιανουαρίου 2023. Φυσικό αέριο: Γιατί η Exxon εντείνει τις έρευνες στην Κρήτη. Καθημερινή.

¹⁶⁹ IEA, 2023. World Energy Outlook 2023, IEA, Paris. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023>, Licence: CC BY 4.0 (report); CC BY NC SA 4.0 (Annex A).

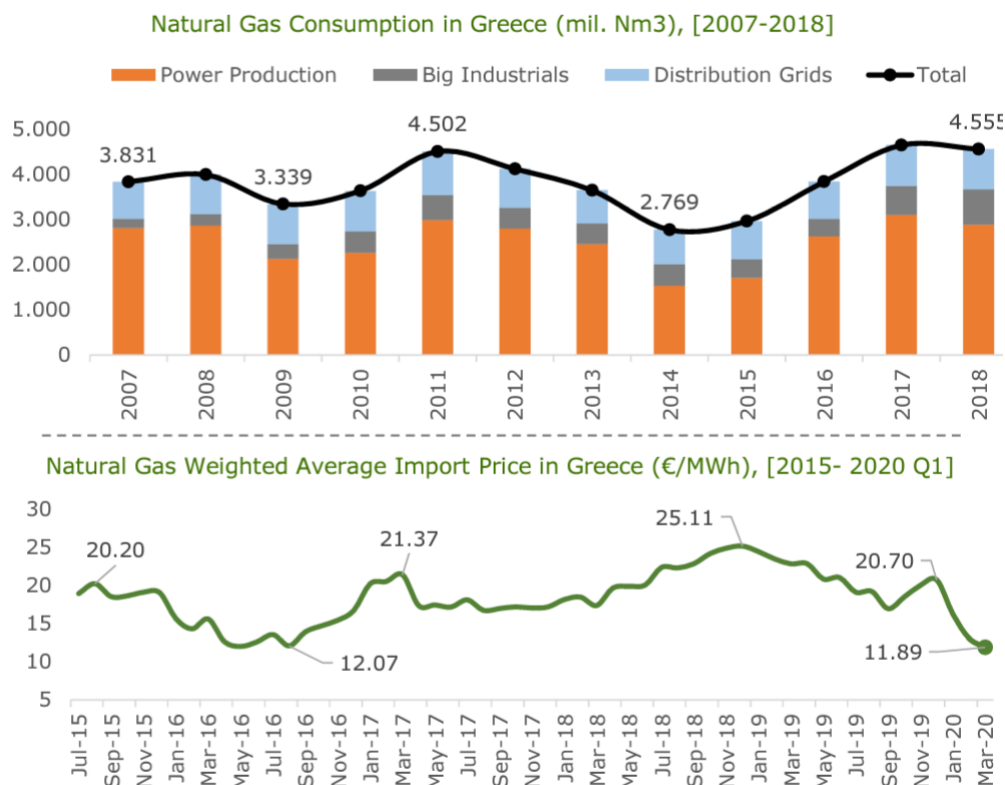
¹⁷⁰ Ως άνωθεν.

¹⁷¹ Ως άνωθεν.



Εικόνα 7: Ζήτηση φυσικού αερίου ανά κλάδο (Πηγή: IAE, 2023).

Όσον αφορά τις κατηγορίες καταναλωτών φυσικού αερίου, το 2022 το μεγαλύτερο τμήμα της εγχώριας κατανάλωσης (73,55%) σχετιζόταν με την κατανάλωση μονάδων παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, ενώ ακολούθησαν οι οικιακοί καταναλωτές και οι συνδεδεμένες στα δίκτυα διανομής επιχειρήσεις (21,50%) και οι εγχώριες βιομηχανίες, που συνδέονται απευθείας στο σύστημα υψηλής πίεσης του ΔΕΣΦΑ, με ποσοστό 4,95%¹⁷². Η σταδιακή κατάργηση των σταθμών λιγνίτη ευθύνεται εν μέρει για την αύξηση της κατανάλωσης του φυσικού αερίου στην ηλεκτροπαραγωγή¹⁷³.



Εικόνα 8: Κατανάλωση ΦΑ στην Ελλάδα (2007-2018) και μέση σταθμισμένη τιμή εισαγωγής ΦΑ (2015-2020) (Πηγή: Hellenic Association for Energy Economics, 2022. Greek energy market report).

¹⁷² ΔΕΣΦΑ. 2023, Στοιχεία ΔΕΣΦΑ για την κατανάλωση φυσικού αερίου το 2022.

¹⁷³ Hellenic Association for Energy Economics, 2022. Greek energy market report.

4. Θεωρητικό υπόβαθρο μοντέλων πρόβλεψης

4.1 Εισαγωγή

Η συνεχής αγωνία του ανθρώπου για το μέλλον και η ανάγκη του να το προβλέψει δεν αποτελεί σύγχρονο κατασκεύασμα, αλλά ένα κοινό χαρακτηριστικό των πολιτισμών που πέρασαν στο βάθος του χρόνου, αναδεικνύοντας το τελικά ως μια ακόμη ιδιότητα της ανθρώπινης φύσης. Το μαντείο των Δελφών, οι πρακτικές των Αζτέκων και το μαντείο του Άμωνα στην όαση Σιβά αποτελούν όλα μαρτυρίες αυτού του χαρακτηριστικού, ενώ σήμερα, στις περισσότερες σύγχρονες κοινωνικές και οικονομικές δραστηριότητες, οι προβλέψεις αποτελούν θεμέλιο λίθο, στηρίζοντας έμπρακτα τη λήψη αποφάσεων.

Ως πρόβλεψη συχνά αναφέρεται μια εκτίμηση κάποιου μελλοντικού γεγονότος ή σειράς γεγονότων. Ο στόχος της πρόβλεψης είναι η μείωση της αβεβαιότητας σχετικά με το μέλλον και η παροχή πληροφοριών που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη λήψη αποφάσεων. Οι προβλέψεις βρίσκουν εφαρμογές σε πολλούς τομείς, όπως οι επιχειρήσεις, η οικονομία, η ιατρική, η πολιτική και η βιομηχανία. Τα προβλήματα πρόβλεψης συχνά ταξινομούνται σε βραχυπρόθεσμα, τα οποία περιλαμβάνουν την πρόβλεψη γεγονότων σε μικρές χρονικές περιόδους στο μέλλον (ημέρες, εβδομάδες, μήνες), τα μεσοπρόθεσμα, τα οποία περιλαμβάνουν από ένα έως δύο χρόνια στο μέλλον και τα μακροπρόθεσμα, τα οποία μπορεί να αφορούν πολλά χρόνια στο μέλλον.

Μέσω της ανάλυσης παρελθοντικών δεδομένων και της χρήσης σύγχρονων μεθόδων και μοντέλων, οι προβλέψεις επιτρέπουν την εκτίμηση των μελλοντικών τάσεων και την αναγνώριση πιθανών σεναρίων. Στον τομέα της οικονομικής έρευνας, οι μέθοδοι πρόβλεψης χωρίζονται σε ποιοτικές και ποσοτικές. Οι ποιοτικές είναι υποκειμενικές και βασίζονται σε θεωρητικά μοντέλα ή εμπειρία, ενώ οι ποσοτικές βασίζονται στην ανάλυση ιστορικών δεδομένων. Με την τεχνολογική πρόοδο, εξελίσσεται ο τρόπος με τον οποίο τα δεδομένα αυτά καταγράφονται και αναλύονται, οδηγώντας έτσι στην ανάπτυξη ακριβέστερων προβλέψεων, ενισχύοντας τελικά τη σημασία τους στη σύγχρονη κοινωνία.

Συγκεκριμένα στις ποσοτικές μεθόδους, τα ποσοτικά μοντέλα πρόβλεψης μπορούν να χωριστούν σε αιτιώδη, ή δομικά, και σε μοντέλα χρονοσειρών¹⁷⁴. Τα αιτιώδη μοντέλα αποτελούν μια ειδική κατηγορία ποσοτικών μεθόδων πρόβλεψης που επιχειρούν να εκτιμήσουν τη στατιστική σχέση μεταξύ μίας εξαρτώμενης μεταβλητής και μίας ή περισσότερων ανεξάρτητων μεταβλητών. Αντί να βασίζονται αποκλειστικά σε ιστορικά δεδομένα, τα αιτιώδη μοντέλα προσπαθούν να κατανοήσουν τις αιτίες που βρίσκονται πίσω από τις παρατηρούμενες τάσεις. Υπάρχουν συγκεκριμένες εφαρμογές και μελέτες όπου τα αιτιώδη μοντέλα θεωρούνται ταιριαστά και η προτίμησή τους εξαρτάται από την επάρκεια των δεδομένων, την πολυπλοκότητα του προβλήματος και την ικανότητα να αντιμετωπίσουν την αβεβαιότητα. Έτσι, σε πολλές περιπτώσεις, οι χρονοσειρές, με την απλότητα και την ευελιξία τους, καταφέρνουν να αποτελούν την κύρια μέθοδο πρόβλεψης.

¹⁷⁴ Αναγνώστου, Α, 2024. Κλασικά και Σύγχρονα Υποδείγματα Χρονολογικών Σειρών Τόμος Α'. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

4.2 Χρονοσειρές

4.2.1 Ορισμός και βασικές έννοιες

Με τον όρο χρονολογική σειρά (time series) εννοούμε μία ακολουθία παρατηρήσεων ή ένα σύνολο δεδομένων y_1, y_2, \dots, y_t , τα οποία συλλέγονται διαχρονικά και εκφράζουν την εξέλιξη των τιμών μιας μεταβλητής κατά τη διάρκεια ίσων διαδοχικών χρονικών περιόδων (Αναγνώστου, 2024). Για παράδειγμα, στο σχήμα 3.2 εμφανίζεται το ετήσιο ποσοστό πληθωρισμού των χωρών του ΟΟΣΑ από το 1965 μέχρι το 2021. Η μεταβλητή του ποσοστού συλλέγεται σε ίσες χρονικές περιόδους, όπως είναι τυπικό στις περισσότερες χρονοσειρές και εφαρμογές πρόβλεψης. Μια χρονοσειρά περιέχει λοιπόν ένα δείγμα παρατηρήσεων y_1, y_2, \dots, y_t , όπου ο δείκτης t παριστάνει ισαπέχοντα χρονικά διαστήματα. Πολλές εφαρμογές πρόβλεψης χρησιμοποιούν καθημερινά, εβδομαδιαία, μηνιαία, τριμηνιαία ή ετήσια δεδομένα, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε διάστημα αναφοράς.

Οι παρατηρήσεις y_1, y_2, \dots, y_t είναι συγκεκριμένες πραγματοποιήσεις (realizations) των τυχαίων μεταβλητών Y_1, Y_2, \dots, Y_t που είναι μέρος μιας άπειρης ακολουθίας. Η άπειρη αυτή ακολουθία ονομάζεται στοχαστική ή τυχαία διαδικασία (stochastic or random process) και συνήθως παριστάνεται ως $\{Y_t\}$. Οι παρατηρήσεις y_1, y_2, \dots, y_t αναφέρονται στην έννοια του δείγματος, ενώ οι τυχαίες μεταβλητές Y_1, Y_2, \dots, Y_T , αναφέρονται στην έννοια του πληθυσμού¹⁷⁵. Η χρονολογική σειρά αποτελεί ένα υποσύνολο, μία συγκεκριμένη πραγματοποίηση της στοχαστικής διαδικασίας $\{Y_t\}$ η οποία περιγράφει ένα τυχαίο φαινόμενο που εξελίσσεται στον χρόνο σύμφωνα με τους νόμους των πιθανοτήτων.

Μια σημαντική ιδιότητα των χρονολογικών σειρών είναι η στασιμότητα (stationarity), δηλαδή η διατήρηση των πιθανοθεωρητικών χαρακτηριστικών τους αναλλοίωτων στον χρόνο. Η στασιμότητα μπορεί να είναι αυστηρή (strict stationarity) όπου όλες οι στατιστικές ιδιότητες παραμένουν αμετάβλητες, ή ασθενής (weak stationarity) όπου μόνο οι πρώτης και δεύτερης τάξης ροπές (μέση τιμή και διακύμανση) είναι σταθερές. Η ασθενής στασιμότητα είναι η πιο συνήθης και πρακτικά χρήσιμη προσέγγιση.

4.2.2 Ανάλυση χρονολογικών σειρών

Η ανάλυση χρονολογικών σειρών ασχολείται με τη μελέτη και μοντελοποίηση δεδομένων που συλλέγονται σε διαδοχικές χρονικές στιγμές, όπου οι παρελθούσες τιμές μιας σειράς επηρεάζουν τις μελλοντικές τιμές της μέσω προσδιοριστικών δυνάμεων όπως τάσεις, κύκλοι και εποχικότητα. Η ανάλυση χρονολογικών σειρών αποσκοπεί στην εύρεση χρήσιμων χαρακτηριστικών ή προσδιοριστικών δυνάμεων που θα επιτρέψουν στον ερευνητή να κατανοήσει εις βάθος την ιστορία ή την διαχρονική εξέλιξη μιας χρονολογικής σειράς, στην κατασκευή ενός υποδείγματος που θα περιγράφει ικανοποιητικά τον μηχανισμό συμπεριφοράς της και στη χρησιμοποίηση αυτού του υποδείγματος για πρόβλεψη των μελλοντικών της τιμών (Αναγνώστου, 2024). Αυτή η τεχνική είναι απαραίτητη σε διάφορους τομείς όπως η οικονομία, οι περιβαλλοντικές επιστήμες και η μηχανική, όπου η κατανόηση των χρονικών προτύπων και η πραγματοποίηση προβλέψεων είναι βασικά ζητήματα.

¹⁷⁵ Αναγνώστου, Α., 2024. Κλασικά και Σύγχρονα Υποδείγματα Χρονολογικών Σειρών Τόμος Α'. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Το πρώτο και σημαντικότερο σημαντικό βήμα στην ανάλυση χρονολογικής σειράς είναι να σχεδιαστούν οι παρατηρήσεις ως προς τον χρόνο¹⁷⁶. Η γραφική αναπαράσταση των δεδομένων ως προς το χρόνο (time plot), εμφανίζει σημαντικά μοτίβα της χρονοσειράς, όπως η τάση, η εποχικότητα, οι ακραίες τιμές και οι ασυνήθιστες παρατηρήσεις. Οι χρονολογικές σειρές διακρίνονται σε συνεχείς (continuous time series) και σε διακριτές (discrete time series). Συνεχείς χρονολογικές σειρές είναι αυτές όπου οι τιμές ενός φαινομένου $Y(t)$ παρατηρείται συνεχώς, δηλ. το φαινόμενο παρατηρείται σε οποιοδήποτε σημείο του χρόνου και διέρχεται μεταξύ όλων των ενδιάμεσων τιμών που παρατηρούμε ($-\infty < t < +\infty$), όπως η συνεχής παρακολούθηση των σεισμών. Διακριτές χρονολογικές σειρές είναι αυτές όπου η τιμή ενός φαινομένου Yt καταγράφεται σε ορισμένα χρονικά διαστήματα, δηλαδή ο χρόνος είναι διακριτός ($t = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots, \pm T$), όπως η τιμή μιας μετοχής στο κλείσιμο του χρηματιστηρίου¹⁷⁷.

Η διαδικασία σχεδίασης μιας χρονολογικής σειράς απαιτεί προσοχή, καθώς η επιλογή των κλιμάκων και ο τρόπος παράστασης των σημείων μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την κατανόηση του δείγματος. Σε έναν σωστό σχεδιασμό γραφήματος περιλαμβάνεται σαφής τίτλος, αναφορά στις μονάδες μέτρησης και ορθή επισήμανση των αξόνων. Σήμερα, οι περισσότερες γραφικές παραστάσεις δημιουργούνται με τη χρήση υπολογιστών, ωστόσο οι ατέλειες υπάρχουν σε κάποια γραφήματα. Η πιο απλή μέθοδος για τη γραφική παράσταση μιας χρονολογικής σειράς είναι η γραμμική αναπαράσταση, όπου ο χρόνος αναπαρίσταται στον άξονα x και οι παρατηρούμενες τιμές στον άξονα y . Αυτή η βασική γραφική παράσταση παρέχει μια άμεση οπτική αποτύπωση της προόδου των δεδομένων με την πάροδο του χρόνου (Εικόνα 3).

4.2.3 Συνιστώσες χρονολογικών σειρών

Για την καλύτερη κατανόηση της ανάλυσης των χρονολογικών σειρών και η μοντελοποίηση των στοχαστικών διαδικασιών, κρίσιμη κρίνεται η κατανόηση της σύνθεσης της χρονολογικής σειράς η οποία περιλαμβάνει τέσσερις κύριες συνιστώσες: α) τη μακροχρόνια τάση, β) την εποχιακή περιοδικότητα, γ) την κυκλική περιοδικότητα και δ) τις τυχαίες διακυμάνσεις. Ένας στόχος της ανάλυσης των χρονολογικών σειρών είναι να διαχωρίσει τη σειρά στις επιμέρους συνιστώσες της και να αξιολογήσει την επίδραση της κάθε μιας στις τιμές της. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται διάσπαση χρονολογικής σειράς. Οι συνιστώσες αυτές παρουσιάζονται συνοπτικά παρακάτω¹⁷⁸

1. **Μακροχρόνια τάση:** είναι η ανοδική ή καθοδική πορεία που ακολουθεί μία χρονολογική σειρά σε μία εκτεταμένη περίοδο του χρόνου. Η τάση περιγράφει την καθαρή επιρροή μακροχρόνιων εξελίξεων όπως πληθυσμιακές, ή τεχνολογικές μεταβολές, καθώς επίσης και μεταβολές σε βασικούς οικονομικούς παράγοντες όπως ο πληθωρισμός, η παραγωγικότητα, η ανεργία κ.ά. Ένα πρόβλημα με αυτόν τον ορισμό είναι η ακριβής σημασία του όρου

¹⁷⁶ Chatfield, C., 2003. *The Analysis of Time Series: An Introduction, Sixth Edition (6th ed.)*. Chapman and Hall/CRC.

¹⁷⁷ Αναγνώστου, Α., 2024. *Κλασικά και Σύγχρονα Υποδείγματα Χρονολογικών Σειρών Τόμος Α'.* Κάλλιπος, Ανοιχτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

¹⁷⁸ Ως άνωθεν.

¹⁷⁹ Chatfield, C. 2003. *The Analysis of Time Series: An Introduction, Sixth Edition (6th ed.)*. Chapman and Hall/CRC.

«μακροπρόθεσμα». Για παράδειγμα, κλιματικές μεταβλητές μπορεί να παρουσιάζουν κυκλικές διακυμάνσεις σε βάθος δεκαετιών, που αν εξεταστούν σε μικρότερη χρονική κλίμακα, όπως 20 χρόνια, μπορεί να φαίνονται ως τάση. Εάν υπήρχαν δεδομένα εκατοντάδων ετών, αυτές οι μακροχρόνιες κυκλικές διακυμάνσεις θα ήταν εμφανείς. Βραχυπρόθεσμα, είναι σημαντικό να θεωρούμε αυτές τις ταλαντώσεις ως τάση. Επομένως, η έννοια της τάσης εξαρτάται από τον αριθμό των διαθέσιμων παρατηρήσεων και απαιτεί υποκειμενική εκτίμηση του όρου «μακροπρόθεσμα».

2. **Εποχιακές διακυμάνσεις ή εποχικότητα:** αναφέρονται στην ταυτόσημη ή σχεδόν ταυτόσημη συμπεριφορά μιας χρονολογικής σειράς που εμφανίζεται κατά τη διάρκεια του έτους σε συγκεκριμένους μήνες ή τρίμηνα και επαναλαμβάνεται με την ίδια ή περίπου την ίδια μορφή από έτος σε έτος. Για παράδειγμα, η ανεργία είναι συνήθως υψηλότερη το χειμώνα αλλά χαμηλότερη το καλοκαίρι. Γενικά, το φαινόμενο της εποχικότητας οφείλεται κυρίως σε μεταβολές του καιρού, σε διάφορες πολιτικές που εφαρμόζονται στην αγορά προϊόντων (π.χ. περίοδος εκπτώσεων και προσφορών), καθώς επίσης και σε κοινωνικούς ή θρησκευτικούς παράγοντες (Πάσχα, Χριστούγεννα, Αποκριές, κ.λπ.). Οι εποχικές διακυμάνσεις, επειδή παρουσιάζονται με συστηματικό τρόπο συνήθως, μπορούν εύκολα να αναλυθούν και να προσδιοριστούν και κατά συνέπεια να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των μελλοντικών τιμών μιας χρονοσειράς, κάτι που συμβαίνει άλλωστε και με την τάση.
3. **Κυκλικές διακυμάνσεις ή κυκλικότητα:** ταυτίζεται με τις μακροπρόθεσμες διακυμάνσεις μιας χρονολογικής σειράς που παρατηρούνται γύρω από την καμπύλη τάσης. Η κυκλικότητα εμφανίζεται ακανόνιστα με κυματοειδή μορφή και διαρκεί για χρονικό διάστημα πολύ μεγαλύτερο του ενός έτους. Ένα παράδειγμα είναι η ημερήσια διακύμανση της θερμοκρασίας. Μια πλήρης κυκλική διακύμανση αποτελείται από δύο κάτω σημεία καμψής (trough) και από ένα άνω σημείο καμψής (peak), που χρονικά παρεμβάλλεται μεταξύ των δύο πρώτων. Το μέρος του κύκλου που περιλαμβάνεται μεταξύ του πρώτου κάτω και του επόμενου άνω σημείου καμψής, αποτελεί την ανοδική φάση του κύκλου, ενώ το μέρος του κύκλου μεταξύ του άνω σημείου καμψής και του κάτω σημείου καμψής που ακολουθεί είναι η καθοδική φάση της κυκλικής κύμανσης. Ο χρόνος μεταξύ δύο διαδοχικών κάτω ή άνω σημείων καμψής αποτελεί την περίοδο (ή διάρκεια ή μήκος) της κυκλικής διακύμανσης. Η συμπεριφορά αυτή των τιμών της χρονολογικής σειράς αποδίδεται κυρίως στους οικονομικούς κύκλους, οι οποίοι οφείλονται σε μεταβαλλόμενες οικονομικές, τεχνολογικές και άλλες συνθήκες. Επειδή όμως οι οικονομικοί κύκλοι δεν εμφανίζονται με την ίδια περιοδικότητα ή και την ίδια μορφή, η συνιστώσα της κυκλικότητας, σε αντίθεση με την τάση και την εποχικότητα, δεν θεωρείται ότι συμβάλλει άμεσα στη δημιουργία προβλέψεων.
4. **Τυχαίες διακυμάνσεις:** η τέταρτη συνιστώσα μιας χρονολογικής σειράς είναι η τυχαία ή η ακανόνιστη διακύμανση (random or irregular variation). Οι ακανόνιστες ή τυχαίες κινήσεις αναφέρονται στις σποραδικές, ακανόνιστες κινήσεις μιας χρονοσειράς, οι οποίες μπορεί να είναι θετικές ή αρνητικές και προέρχονται από τυχαίους παράγοντες και γεγονότα. Οι διακυμάνσεις αυτές δεν μπορούν να προβλεφθούν, καθώς οφείλονται σε επιδράσεις που δεν είναι

συστηματικές, όπως για παράδειγμα η εξαγγελία έκτακτων κυβερνητικών μέτρων, αλλά υπάρχουν διάφορες τεχνικές για την ανάλυσή τους όπως ο Κινούμενος Μέσος (MA) ή το Αυτοπαλίνδρομο μοντέλο (AR).

5. Παραδείγματα τέτοιων επιδράσεων είναι ξαφνικές εξαγγελίες κυβερνητικών μέτρων, απρόβλεπτες αλλαγές τιμών στη διεθνή αγορά, ασυνήθιστες κλιματολογικές συνθήκες, πολιτικές κρίσεις φυσικές καταστροφές

4.3 Γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης

4.3.1 Εισαγωγή

Η πρόβλεψη στην ανάλυση χρονολογικών σειρών βασίζεται στις παρατηρήσεις του παρελθόντος, υποθέτοντας ότι οι τάσεις και οι μοτίβα που παρατηρήθηκαν θα επικρατήσουν και στο μέλλον. Τα μοντέλα δεδομένων χρονοσειρών μπορούν να έχουν πολλές μορφές και να αντιπροσωπεύουν διαφορετικές στοχαστικές διαδικασίες. Η κάθε μορφή έχει τα πλεονεκτήματά της και είναι κατάλληλη για διαφορετικά σενάρια και τύπους χρονοσειρών. Συγκεκριμένα, τα γραμμικά μοντέλα πρόβλεψης είναι μία από τις πιο δημοφιλείς προσεγγίσεις στην πρόβλεψη των χρονοσειρών. Βασίζονται στην υπόθεση ότι η σχέση μεταξύ των μεταβλητών είναι γραμμική, που σημαίνει ότι η μεταβολή μιας μεταβλητής εξαρτάται γραμμικά από τη μεταβολή μιας ή περισσότερων άλλων μεταβλητών. Στις διάφορες επιστήμες, οι συναρτησιακές σχέσεις της θεωρίας μετατρέπονται σε μαθηματικές σχέσεις μέσα από την κατασκευή υποδειγμάτων-μοντέλων (models), τα οποία εκτιμώνται εμπειρικά με μεθόδους παλινδρόμησης, προκειμένου να ερμηνεύσουν τη συμπεριφορά και τις σχέσεις αυτών των μεταβλητών¹⁸⁰.

4.3.2 Παλινδρόμηση

Η παλινδρόμηση αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα εργαλεία της οικονομετρίας, καθώς επιτρέπει την περιγραφή και αξιολόγηση των σχέσεων μεταξύ μεταβλητών σε οικονομικές και χρηματοοικονομικές αναλύσεις. Οι μεταβλητές μπορεί να είναι ποσοτικές, όπως το ΑΕΠ ή οι δαπάνες, ή ποιοτικές, όπως το μορφωτικό επίπεδο ή το φύλο. Οι μεταβλητές διακρίνονται επίσης σε ανεξάρτητες (ερμηνευτικές) και εξαρτημένες (απόκρισης), με στόχο την εξήγηση της αιτιώδους σχέσης μεταξύ τους και την πρόβλεψη των τιμών της εξαρτημένης μεταβλητής. Η ανάλυση παλινδρόμησης χρησιμοποιεί μαθηματικά μοντέλα, τα οποία εκτιμώνται εμπειρικά με δεδομένα που συλλέγονται από πρωτογενείς ή δευτερογενείς πηγές. Η συλλογή, επεξεργασία και ανάλυση αυτών των δεδομένων είναι κρίσιμη για την επιτυχή εφαρμογή της παλινδρόμησης και την ακρίβεια των αποτελεσμάτων.

Με βάση την παραδοχή ότι μία μεταβλητή εξαρτάται από τις επιδράσεις πολλών μεταβλητών, δηλαδή η μεταβλητή Y_t είναι συνάρτηση k ερμηνευτικών μεταβλητών, X_1, X_2, \dots, X_k και υποθέτοντας ότι: α) η συναρτησιακή σχέση $Y_t = f(X_1, X_2, \dots, X_k)$ είναι γραμμική και β) οι μεταβλητές είναι καλά συμπεριφερόμενες ποσοτικές μεταβλητές, τότε για ένα δείγμα T παρατηρήσεων, το πολυμεταβλητό Κλασικό Γραμμικό Υπόδειγμα Παλινδρόμησης εκφράζεται ως (Αναγνώστου, 2024):

$$Y_t = \beta_0 + \beta_1 X_{1t} + \beta_2 X_{2t} + \dots + \beta_k X_{kt} + u_t, \text{ για } t = 1, \dots, T$$

¹⁸⁰ Αναγνώστου, Α., 2024. Κλασικά και Σύγχρονα Υποδείγματα Χρονολογικών Σειρών Τόμος Α'. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

όπου, Y_t είναι η εξαρτημένη μεταβλητή και οι μεταβλητές $X_{1t}, X_{2t}, \dots, X_{kt}$ εκπροσωπούν ένα σετ από $k - 1$ ανεξάρτητες ή ερμηνευτικές (independent ή explanatory variables) που επηρεάζουν την εξαρτημένη μεταβλητή Y_t . Οι εκτιμήσεις των συντελεστών $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ ονομάζονται συντελεστές παλινδρόμησης (regression coefficients) και ο καθένας εκτιμώμενος συντελεστής μετρά την επίδραση της κάθε ερμηνευτικής μεταβλητής, X_j , πάνω στην εξαρτημένη μεταβλητή Y_t όταν οι τιμές των υπόλοιπων μεταβλητών παραμένουν σταθερές. Η ατομική επίδραση κάθε μεταβλητής μπορεί να καθοριστεί από τους αντίστοιχους συντελεστές παλινδρόμησης, όπου ο κάθε συντελεστής β_j ονομάζεται συντελεστής μερικής παλινδρόμησης (partial regression coefficient) και είναι η επίδραση της μεταβλητής X_j στην εξαρτημένη μεταβλητή Y_t κατά μία μονάδα, όταν οι άλλες ερμηνευτικές μεταβλητές παραμένουν σταθερές:

$$\beta_j = \frac{E(Y_t/X_t)}{X_j}, j = 1, \dots, k$$

Το u_t αποτελεί τον διαταρακτικό όρο ή σφάλμα (disturbance term ή error term) και ορίζεται ως η απόκλιση των παρατηρήσεων από το επίπεδο παλινδρόμησης. Στην ουσία η μεταβλητή αυτή είναι μία τυχαία μεταβλητή.

4.3.2 Αυτοσυσχέτιση

Στο κλασικό γραμμικό υπόδειγμα υποθέτουμε ότι η συνδιακύμανση των διαταρακτικών όρων u_i και u_j είναι μηδέν για $i \neq j$, δηλ. δεν συσχετίζονται. Όταν η υπόθεση αυτή δεν ισχύει, τότε υπάρχει αυτοσυσχέτιση ή σειριακή συσχέτιση (autocorrelation ή serial correlation). Η αυτοσυσχέτιση μπορεί να αποκαλύψει μοτίβα, τάσεις και την παρουσία εποχικότητας στα δεδομένα των χρονοσειρών.

Η διαγραμματική απεικόνιση των τιμών της ρ_k για διάφορες τιμές της k ορίζει το διάγραμμα αυτοσυσχετίσεων ή κορρελόγραμμα (correlogram). Η χρήση του διαγράμματος επιτρέπει την τη διάκριση μιας χρονολογικής σειράς σε στάσιμη ή μη, καθώς οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης για μία στάσιμη χρονολογική σειρά φθίνουν σχετικά γρήγορα προς το μηδέν καθώς ο αριθμός των k υστερήσεων μεγαλώνει. Αντιθέτως, σε μία μη στάσιμη χρονολογική σειρά, οι συντελεστές αυτοσυσχέτισης φθίνουν σχετικά πολύ αργά προς το μηδέν, καθώς ο αριθμός των k υστερήσεων μεγαλώνει.

4.3.2 Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο p Τάξεως – Autoregressive Model AR(p)

Τα αυτοπαλίνδρομα μοντέλα χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν μια χρονολογική σειρά σε μία δεδομένη χρονική περίοδο, επιδιώκοντας τον προσδιορισμό προτύπων, τάσεων και ιδιαίτερων χαρακτηριστικών, τα οποία με τη σειρά τους θα χρησιμοποιηθούν για σκοπούς πρόβλεψης. Περαιτέρω, ως αυτοπαλίνδρομο σχήμα ορίζεται ένα υπόδειγμα παλινδρόμησης στο οποίο η εξαρτημένη μεταβλητή παλινδρομείται επάνω στις τιμές των δικών της χρονικών υστερήσεων, δηλαδή αυτοπαλινδρομείται. Το πλήθος των υστερήσεων της εξαρτημένης μεταβλητής του υποδείγματος αποτελεί τις ερμηνευτικές του μεταβλητές, και για αυτό τον λόγο τα συγκεκριμένα υποδείγματα θεωρούνται μονομεταβλητά. Στη γενική τους μορφή τα Αυτοπαλίνδρομα Υποδείγματα $AR(p)$ εκφράζονται ως:

$$Y_t = \varphi_0 + \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + \varepsilon_t$$

όπου οι παράμετροι $\varphi_0, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$ είναι προς εκτίμηση, ενώ τα ε_t εκφράζουν το σφάλμα, για τα οποία υποθέτουμε ότι: $E(\varepsilon_t) = 0, Var(\varepsilon_t) = \sigma^2$ είναι σταθερή και οι αυτοσυσχετίσεις για $k \neq t$, είναι μηδενικές, δηλαδή, $Cov(\varepsilon_t, \varepsilon_{t+k}) = 0$. Το p υποδηλώνει την τάξη του αυτοπαλίνδρομου υποδείγματος και αναφέρεται στο μήκος των υστερήσεων, ενώ τα $Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-p}$ είναι οι υστερήσεις της χρονολογικής σειράς. Η στοχαστική διαδικασία $AR(p)$ είναι στάσιμη όταν οι ρίζες του χαρακτηριστικού πολυωνύμου είναι εκτός του μοναδιαίου κύκλου, δηλαδή οι p ρίζες της εξίσωσης που ακολουθεί είναι όλες μεγαλύτερες από τη μονάδα κατά απόλυτη τιμή¹⁸¹:

$$1 - \varphi_1 L - \varphi_2 L^2 - \dots - \varphi_p L^p = 0$$

Τα αυτοπαλίνδρομα υποδείγματα p τάξεως ($AR(p)$) αποτελούν μια κατηγορία στοχαστικών μοντέλων που χρησιμοποιούνται στην ανάλυση χρονολογικών σειρών για την πρόβλεψη μελλοντικών τιμών με βάση τις προηγούμενες παρατηρήσεις. Σε ένα υπόδειγμα $AR(p)$, η τρέχουσα τιμή της χρονολογικής σειράς εξαρτάται γραμμικά από τις p προηγούμενες τιμές και έναν όρο σφάλματος.

4.3.3 Μοντέλο Κινητού Μέσου q Τάξεως – Moving Average Process $MA(q)$

Στο κινητό μέσο τάξης q (moving average process of order q - $MA(q)$) η στοχαστική διαδικασία Y_t εκφράζεται ως ένα άθροισμα μιας σταθεράς θ_0 ενός λευκού θορύβου, ε_t και από ένα σταθμισμένο άθροισμα q υστερήσεων του σφάλματος ε_t . Οι συγκεκριμένες διαδικασίες περιγράφουν φαινόμενα τα οποία έχουν παραχθεί από διάφορα γεγονότα που δεν είχαν άμεσο αποτέλεσμα, παρά η επίδρασή τους είχε μία χρονική διάρκεια, π.χ. η διαχρονική επίδραση της οικονομικής κρίσης πάνω σε κάποια οικονομική μεταβλητή. Το υπόδειγμα του κινητού μέσου είναι απλώς ένας γραμμικός συνδυασμός διαδικασιών λευκού θορύβου. Στη γενική του μορφή, ένα υπόδειγμα κινητού μέσου τάξης q , συμβολίζεται με $MA(q)$ και εκφράζεται από τη σχέση:

$$Y_t = \theta_0 + \varepsilon_t + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

όπου οι παράμετροι $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_q$ είναι προς εκτίμηση, ενώ τα ε_t εκφράζουν τον διαταρακτικό όρο για τα οποία υποθέτουμε ότι: $E(\varepsilon_t) = 0, Var(\varepsilon_t) = \sigma^2$ είναι σταθερή και οι αυτοσυσχετίσεις για $k \neq t$, είναι μηδενικές, δηλαδή, $Cov(\varepsilon_t, \varepsilon_{t+k}) = 0$. Το q υποδηλώνει την τάξη των υστερήσεων του σφάλματος, ενώ τα $\varepsilon_{t-1}, \varepsilon_{t-2}, \dots, \varepsilon_{t-q}$ είναι οι υστερήσεις του σφάλματος. Η στοχαστική διαδικασία $MA(q)$ είναι πάντα στάσιμη, εφόσον δίνεται ως πεπερασμένο άθροισμα όρων λευκού θορύβου (Αναγνώστου, 2024).

Χρησιμοποιώντας τον τελεστή υστερήσεων L και υποθέτοντας ότι $\theta_0 = 0$, το υπόδειγμα της (4.24) εκφράζεται ως εξής:

$$Y_t = (1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_q L^q) \varepsilon_t$$

¹⁸¹ Αναγνώστου, Α., 2024. Κλασικά και Σύγχρονα Υποδείγματα Χρονολογικών Σειρών Τόμος Α'. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

4.3.4 Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο Κινητού Μέσου - Auto Regressive Moving Average (ARMA)

Ο συνδυασμός του αυτοπαλίνδρου υποδείγματος με το υπόδειγμα του κινητού μέσου δίνει το μεικτό υπόδειγμα (Autoregressive moving average model, $ARMA(p, q)$). Το υπόδειγμα εκφράζεται ως:

$$(1 - \varphi_1 L - \varphi_2 L^2 - \dots - \varphi_p L^p) Y_t = (1 - \theta_1 L - \theta_2 L^2 - \dots - \theta_q L^q) \varepsilon_t$$

Χρησιμοποιώντας τον τελεστή χρονικής υστέρησης (lag operator) η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$1 - \varphi_1 Y_{t-1} + \varphi_2 Y_{t-2} + \dots + \varphi_p Y_{t-p} + \theta_1 \varepsilon_{t-1} + \theta_2 \varepsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} + \varepsilon_t$$

4.3.5 Αξιολόγηση μοντέλων και προβλέψεων

Για τη σύγκριση και την αξιολόγηση της προβλεπτικής ικανότητας ενός εκτιμώμενου υποδείγματος έχουν προταθεί διάφορα κριτήρια. Υποθέτοντας ότι το σύνολο των παρατηρήσεων ενός δείγματος έρευνας είναι $T + m$, όπου T είναι το δείγμα εκτίμησης (in sample) του υποδείγματος, ενώ m είναι το δείγμα ελέγχου προβλεψιμότητας του εκτιμώμενου υποδείγματος (out-of sample), τότε ορίζοντας ως σφάλμα πρόβλεψης (forecasting error – FE_m) τη διαφορά μεταξύ προβλεπόμενης τιμής (forecast value – F_m) και της πραγματικής τιμής (actual value – A_m) για την περίοδο m ¹⁸².

$$FE_m = F_m - A_m$$

μπορούμε να εκτιμήσουμε τα προαναφερόμενα κριτήρια αξιολόγησης προβλέψεων.

Το **Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (Mean Square Error – MSE)** ορίζεται ως:

$$MSE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (FE_m)^2$$

Το μέγεθος του MSE αυξάνεται καθώς το σφάλμα πρόβλεψης (FE_m) αυξάνεται.

Το **Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (Mean Absolute Error – MAE)** ορίζεται ως:

$$MAE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |FE_m|$$

Οι απόλυτες τιμές των προβλεπόμενων σφαλμάτων, στην εκτίμηση του MAE διορθώνει το πρόβλημα της ασυμμετρίας μεταξύ πραγματικών τιμών και προβλέψεων.

Το **Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (Mean Absolute Percentage Error – MAPE)** ορίζεται ως:

¹⁸² Αναγνώστον, Α., 2024. Κλασικά και Σύγχρονα Υποδείγματα Χρονολογικών Σειρών Τόμος Α'. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

$$MAPE = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \left| \frac{F_m - A_m}{A_m} \right|$$

Η Ρίζα του Μέσου του Τετραγώνου του Σφάλματος (Root Mean Square Error – RMSE) ορίζεται ως:

$$RMSE = \sqrt{MSE} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (FE_m)^2}$$

4.4 Ασαφής Λογική

4.4.1 Εισαγωγή στην ασαφή λογική

Παρά τη συνεχή πρόοδο των υπολογιστών, η ικανότητα του ανθρώπου να αναγνωρίζει πολύπλοκα πρότυπα, να διαχειρίζεται ασαφείς πληροφορίες και να λαμβάνει αποφάσεις με βάση τις εμπειρίες του, αναδεικνύεται μοναδική. Ενώ οι σημερινοί υπολογιστές υπερτερούν σε ταχύτητα και ακρίβεια των υπολογισμών, ο εγκέφαλος του ανθρώπου υπερτερεί σε ευελιξία, κατανόηση και δημιουργικότητα. Αυτή η ικανότητα του ανθρώπου καθιστά δυνατή την αντίληψη και διαχείριση αβέβαιων καταστάσεων, αναδεικνύοντάς την σε κρίσιμο πλεονέκτημα, καθώς η αβεβαιότητα αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της ζωής.

Τον 19ο αιώνα, σημειώθηκε μια σημαντική αλλαγή σχετικά με την έννοια της αβεβαιότητας. Παραδοσιακά, η κλασική λογική η οποία έχει τις ρίζες της στα έργα του Αριστοτέλη, ορίζει ότι ένας συλλογισμός είναι είτε αληθής είτε ψευδής. Στην Άλγεβρα Μπουλ οι τιμές των μεταβλητών, αναπαρίστανται με 1, εάν είναι αληθείς και 0, εάν είναι ψευδείς. Έτσι, για πολλούς αιώνες η αβεβαιότητα θεωρούνταν ανεπιθύμητη και δίνονταν έμφαση στην επίτευξη της βεβαιότητας σε όλες τις πτυχές της επιστήμης. Η στροφή από τη Νευτώνεια μηχανική στις στατιστικές μεθόδους έφερε επανάσταση στην επιστήμη αναγνωρίζοντας την αβεβαιότητα και βρίσκοντας εφαρμογές σε διαφορετικά πεδία¹⁸³. Η άνοδος της κβαντικής μηχανικής και των πιθανοτήτων στο επίκεντρο της επιστημονικής κοινότητας επέφεραν την αμφισβήτηση της έννοιας της απόλυτης βεβαιότητας στις αρχές του 20ου αιώνα.

Το γεγονός αυτό οδήγησε στην ανάπτυξη της ασαφούς λογικής από τον Lotfi Zadeh τη δεκαετία του 1960, παρέχοντας ένα μαθηματικό πλαίσιο για τον χειρισμό της αβεβαιότητας και της ανακρίβειας. Σε αντίθεση με την κλασική λογική, η ασαφής λογική επιτρέπει βαθμούς συμμετοχής στο διάστημα [0, 1]. Ειδικότερα, ο Zadeh ορίζει το ασαφές σύνολο ως μια κατηγορία αντικειμένων με μια συνέχεια βαθμών συμμετοχής. Ένα τέτοιο σύνολο χαρακτηρίζεται από μια συνάρτηση μέλους η οποία εκχωρεί σε κάθε αντικείμενο έναν βαθμό συμμετοχής που κυμαίνεται μεταξύ μηδέν και ενός¹⁸⁴. Τα ασαφή σύνολα μπορούν να αποτελέσουν μια καλή αναπαράσταση της μέτρηση της αβεβαιότητας και των ασαφών εκφράσεων της φυσικής γλώσσας¹⁸⁵. Για

¹⁸³ Klir, G., και Yuan, B., 1995. *Fuzzy sets and fuzzy logic* (Vol. 4, pp. 1-12). New Jersey: Prentice hall.

¹⁸⁴ L.A. Zadeh, 1965, *Fuzzy sets, Information and Control*, Volume 8, Issue 3, Pages 338-353.

¹⁸⁵ Klir, G., και Yuan, B., 1995. *Fuzzy sets and fuzzy logic* (Vol. 4, pp. 1-12). New Jersey: Prentice hall.

παράδειγμα, ο όρος "ηλιόλουστος" στην περιγραφή του καιρού μπορεί να είναι ανακριβής αλλά πιο χρήσιμος από τη διατύπωση ακριβών ποσοστών νεφοκάλυψης. Η ασαφής λογική, με την εισαγωγή βαθμών αλήθειας και την ικανότητα μοντελοποίησης της ασάφειας, όχι μόνο αναγνωρίζει την εγγενή αβεβαιότητα στα σενάρια του πραγματικού κόσμου, αλλά επιτρέπει μια ακριβέστερη και περισσότερο προσαρμοστική αναπαράσταση περίπλοκων συστημάτων, αμφισβητώντας την ιστορική επιδίωξη της απόλυτης βεβαιότητας στην επιστήμη.

4.4.2 Βασικές έννοιες

Στη θεωρία συνόλων, ένα υπερσύνολο αναφοράς X ορίζεται ως το σύνολο που περιλαμβάνει όλα τα στοιχεία που λαμβάνονται υπόψη σε μια συγκεκριμένη εφαρμογή ή πρόβλημα. Για κάθε σύνολο X εντός αυτού του πλαισίου αναφοράς συμβολίζουμε με $A \subseteq X$, υποδηλώνοντας ότι το A είναι υποσύνολο του υπερσυνόλου αναφοράς X .

Κατά την κλασική λογική, ένα σύνολο A ορίζεται από μια χαρακτηριστική συνάρτηση $\chi_A(x)$ η οποία ορίζει τιμή 1 εάν ένα στοιχείο είναι μέλος του συνόλου A και 0 διαφορετικά ¹⁸⁶:

$$\chi_A(x) \begin{cases} 1, & \text{εάν } x \in A \\ 0, & \text{εάν } x \notin A \end{cases}$$

Αυτή η συνάρτηση μπορεί να γενικευτεί έτσι ώστε οι τιμές που αποδίδονται στα στοιχεία του υπερσυνόλου αναφοράς X να εμπίπτουν σε ένα καθορισμένο εύρος και να υποδεικνύουν τον βαθμό συμμετοχής αυτών των στοιχείων στο εν λόγω σύνολο. Μεγαλύτερες τιμές υποδηλώνουν υψηλότερους βαθμούς συμμετοχής στο σύνολο. Το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο εύρος τιμών των συναρτήσεων συμμετοχής είναι το μοναδιαίο διάστημα $[0, 1]$. Σε αυτήν την περίπτωση, η συνάρτηση συμμετοχής αντιστοιχίζει στοιχεία ενός δεδομένου υπερσυνόλου αναφοράς X σε πραγματικούς αριθμούς στο $[0, 1]$.

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$$

Μια τέτοια συνάρτηση ονομάζεται συνάρτηση συμμετοχής και το σύνολο που ορίζεται από αυτήν ασαφές σύνολο, το οποίο μπορεί να εκφραστεί ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών:

$$A = \{(\chi, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$$

Συμπεραίνεται λοιπόν ότι τα κλασικά σύνολα μπορούν να θεωρηθούν ως μερικές περιπτώσεις των ασαφών συνόλων, μεταβαίνοντας από τη δίτιμη λογική της «συμμετοχής»/«μη συμμετοχής» στην πλειότιμη λογική του «βαθμού συμμετοχής», ώστε να μπορούν να περιγραφούν πιο αποτελεσματικά ασαφείς έννοιες του πραγματικού κόσμου ¹⁸⁷.

¹⁸⁶ Klir, G., και Yuan, B., 1995. *Fuzzy sets and fuzzy logic (Vol. 4, pp. 1-12)*. New Jersey: Prentice hall.

¹⁸⁷ Μαστοροκόστας, Π., 2023. *Ασαφής και νευροασαφής συστήματα – Ασαφής Βαθμία Μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις*.

4.4.4 Τεχνικά χαρακτηριστικά ασαφών συνόλων

Οι αρχές των ασαφών συνόλων περιλαμβάνουν βασικές μαθηματικές πράξεις που τα διακρίνουν από τα κλασικά σύνολα. Πριν γίνει αναφορά στους ασαφείς κανόνες, είναι σημαντικό να αναφερθούν τα τεχνικά χαρακτηριστικά των ασαφών συνόλων¹⁸⁸¹⁸⁹¹⁹⁰:

1. Ένα σημαντικό χαρακτηριστικό των ασαφών συνόλων αποτελεί η **α-διατομή** (α-cut). Όμοια με πριν, έστω το ασαφές σύνολο A ως προς σύνολο αναφοράς X , το οποίο χαρακτηρίζεται από τη συνάρτηση μέλους μ_A , τότε η α-διατομή ορίζεται ως: $A_\alpha = \{x \in X \mid \mu_A \geq \alpha\}$, όπου $\alpha \in [0,1]$
Για $\alpha = 1$, το σύνολο 1-διατομή A_1 ονομάζεται και **πυρήνας** (core) του ασαφούς συνόλου A . Στοιχεία στον πυρήνα έχουν πλήρη συμμετοχή στο σύνολο.
2. **Στήριγμα** ή, εναλλακτικά, **φορέας** (support) ενός ασαφούς συνόλου A ως προς σύνολο αναφοράς X , ορίζεται το κλασικό σύνολο $\text{supp}(A)$ το οποίο περιλαμβάνει περιλαμβάνει στοιχεία στο X με μη μηδενικούς βαθμούς συμμετοχής:
 $\text{supp}(A) = \{x \in X \mid \mu_A > 0\}$
3. Το **ύψος** ενός ασαφούς συνόλου A , συμβολίζεται ως $h(A)$ και είναι το ελάχιστο άνω όριο (φράγμα) των βαθμών συμμετοχής στο A όλων των στοιχείων του A :
 $h(A) = \sup_{x \in X} \{\mu_A\}$
Αν το πλήθος των στοιχείων του A είναι πεπερασμένο, τότε το ελάχιστο άνω φράγμα (sup) αντιστοιχεί στο μέγιστο (max) των βαθμών συμμετοχής στο A όλων των στοιχείων του A .
4. Ένα ασαφές σύνολο A θεωρείται **κανονικό** αν και μόνο αν $h(A) = 1$. Δηλαδή, ένα κανονικό ασαφές σύνολο A έχει (μη κενό) πυρήνα, συμβολικά $A_1 \neq \emptyset$.
5. Ένα ασαφές σύνολο A ονομάζεται **κενό** αν και μόνον αν $\mu_A = 0$ για κάθε $x \in X$.
6. Δύο ασαφή σύνολα A και B ονομάζονται **ίσα** (equal) ως προς σύνολο αναφοράς Ω αν και μόνο αν $\mu_A(x) = \mu_B(x)$
7. Στην κλασική θεωρία συνόλων, οι πράξεις τομής και ένωσης είναι σαφείς (crisp), με αποτέλεσμα ένα δυαδικό αποτέλεσμα. Η θεωρία των ασαφών συνόλων, από την άλλη πλευρά, χρησιμοποιεί τους τελεστές ελάχιστης και μέγιστης τιμής για να χειριστεί βαθμούς συμμετοχής. Η τομή των ασαφών συνόλων A και B , που συμβολίζεται ως $A \cap B$, υπολογίζεται λαμβάνοντας το ελάχιστο των αν $\mu_A(x)$ και $\mu_B(x)$ για κάθε στοιχείο x . Ομοίως, η ένωση, που συμβολίζεται ως $A \cup B$, περιλαμβάνει το μέγιστο των $\mu_A(x)$ και $\mu_B(x)$.
Οι τελεστές max και min χρησιμοποιούνται για πεπερασμένο πλήθος στοιχείων, ενώ σε διαφορετική περίπτωση, χρησιμοποιούνται οι τελεστές sup, συμβολικά \vee και inf ή συμβολικά \wedge αντίστοιχα.
8. Το ασαφές singleton (fuzzy singleton) είναι ένα εκφυλισμένο ασαφές σύνολο, υπό την έννοια ότι αποτελείται από ένα στοιχείο με βαθμό συμμετοχής 1, ενώ όλα τα υπόλοιπα στοιχεία του πεδίου ορισμού έχουν τιμή 0:

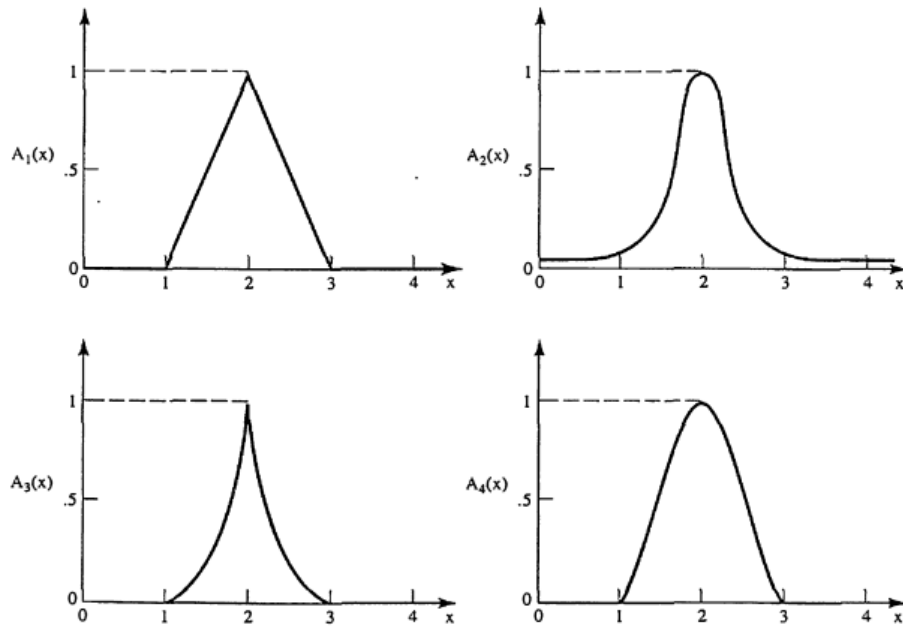
¹⁸⁸ L.A. Zadeh, 1965, Fuzzy sets, Information and Control, Volume 8, Issue 3, Pages 338-353.

¹⁸⁹ Καμπουρλάζος, Β., και Παπακόστας, Γ., 2015. Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-661>

¹⁹⁰ Μαστοροκόστας, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση.. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & x = x_0 \\ 0, & x = x_0, x \in U \end{cases}$$

Τα ασαφή σύνολα μας επιτρέπουν να αναπαραστήσουμε αόριστες έννοιες που εκφράζονται στη φυσική γλώσσα. Η αναπαράσταση εξαρτάται όχι μόνο από την έννοια, αλλά και από το πλαίσιο στο οποίο χρησιμοποιείται. Ακόμη και σε παρόμοια πλαίσια, τα ασαφή σύνολα για την ίδια έννοια μπορεί να διαφέρουν, αλλά πρέπει να έχουν κοινά βασικά χαρακτηριστικά¹⁹¹. Για παράδειγμα, τέσσερα ασαφή σύνολα που εκφράζουν τη γενική έννοια αριθμών κοντά στο 2 μπορεί να διαφέρουν αλλά να μοιράζονται βασικές ιδιότητες, όπως τη συμμετρία.



Εικόνα 2: Παραδείγματα συναρτήσεων συμμετοχής που μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε διαφορετικά περιβάλλοντα για τον χαρακτηρισμό ασαφών συνόλων πραγματικών αριθμών κοντά στο 2 (Πηγή: Klir, G., και Yuan, Fuzzy sets and fuzzy logic, 1995).

4.4.5 Συναρτήσεις συμμετοχής

Η μαθηματική περιγραφή των ασαφών συνόλων γίνεται μέσω των συναρτήσεων συμμετοχής (membership function, MF). Μια συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται από μία καμπύλη η οποία δείχνει τον τρόπο που το εκάστοτε σημείο στην περιοχή εισόδου, αντιστοιχίζεται σε μία τιμή μέλους (ή βαθμό ιδιότητας μέλους) μεταξύ του διαστήματος 0 και 1. Καθορίζοντας τις παραμέτρους μίας συνάρτησης συμμετοχής, μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά της¹⁹². Προκύπτουν λοιπόν πολλές μορφές συναρτήσεων συμμετοχής, μερικές από τις οποίες περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω¹⁹³:

- Η τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής (trapezoidal membership function, trap_MF) αποτελεί μία τμηματικά γραμμική συνάρτηση και περιγράφεται από

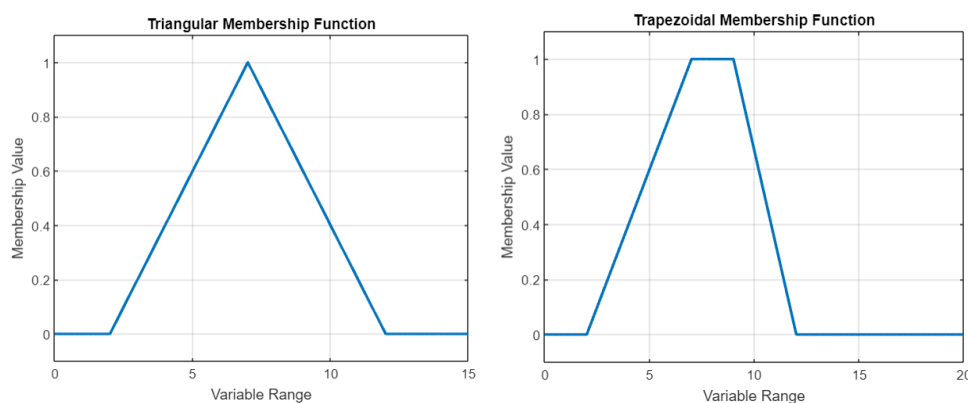
¹⁹¹ Klir, G., και Yuan, B. (1995). Fuzzy sets and fuzzy logic (Vol. 4, pp. 1-12). New Jersey: Prentice hall

¹⁹² Μαστοροκόστα, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθμία Μάθηση.. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

¹⁹³ Ως άνωθεν.

μία τετράδα παραμέτρων $\{a,b,c,d\}$ οι οποίες καθορίζουν την ενεργό περιοχή και τον πυρήνα της, καθώς παρέχουν τις συντεταγμένες των τεσσάρων κορυφών του τραπεζίου.

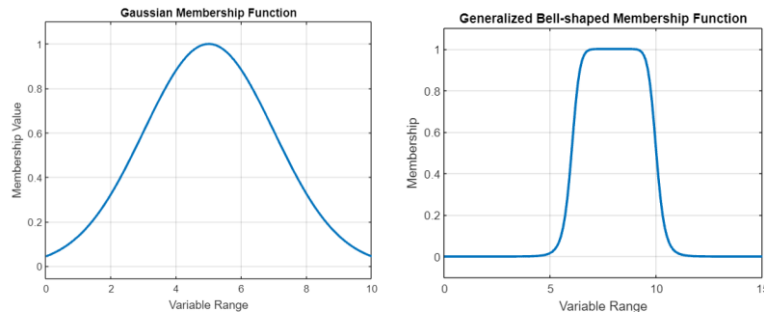
- Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής (triangular membership function, tri_MF) προέρχεται από την τραπεζοειδή συνάρτηση συμμετοχής, εάν $b = c$, δηλαδή εάν εξαλειφθεί ο οριζόντιος κλάδος που συνιστά τον πυρήνα της τραπεζοειδούς. Περιγράφεται από μία τριάδα παραμέτρων $\{a,b,c\}$ οι οποίες παρέχουν τις συντεταγμένες των τριών κορυφών του τριγώνου. Η τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής παρουσιάζει τα ίδια χαρακτηριστικά υλοποίησης με την τραπεζοειδή, γι' αυτό και προτιμάται επίσης, σε ασαφή συστήματα πραγματικού χρόνου (real-time).
- Η γενικευμένη καμπανοειδής ή κωδωνοειδής συνάρτηση συμμετοχής (generalized bell-shaped membership function, bell_MF) παραμετροποιείται από τρεις παραμέτρους $\{a,b,c\}$.
- Η γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής (Gaussian membership function, gauss_MF) έχει δύο παραμέτρους $\{m,\sigma\}$, τη μέση και τυπική απόκλιση. Η συνάρτηση gauss_MF είναι συμμετρική, με κέντρο συμμετρίας το m . Η παράμετρος σ είναι η τυπική απόκλιση της κατανομής και ελέγχει τη διασπορά, δηλαδή το «εύρος» της συνάρτησης συμμετοχής.



Σχήμα 1.1: Τριγωνική συνάρτηση συμμετοχής trimf και τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής trapmf (Fuzzy Toolbox Matlab).

Για εκείνα τα συστήματα που χρειάζονται σημαντική δυναμική διακύμανση σε σύντομο χρονικό διάστημα, θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί μια τριγωνική ή τραπεζοειδής, ενώ για εκείνα τα συστήματα που χρειάζονται πολύ υψηλή ακρίβεια ελέγχου, θα πρέπει να επιλεγεί η Gaussian ή η S-curve¹⁹⁴.

¹⁹⁴ Ying Bai, Hanqi Zhuang, Dali Wang. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. Springer London 2006 <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-469-4>



Σχήμα 1.1: Η γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής *bellmf* και η καμπανοειδής συνάρτηση συμμετοχής *trapmf* (Fuzzy Toolbox Matlab).

4.4.5 Ασαφείς κανόνες

Βασικό δομικό συστατικό κάθε ασαφούς συστήματος αποτελεί ο ασαφής κανόνας, παρέχοντας ένα πλαίσιο για τη λήψη αποφάσεων και την εξαγωγή συμπερασμάτων. Αυτός ο κανόνας αποτελείται από δύο κύρια τμήματα: το τμήμα υπόθεσης και το τμήμα απόδοσης ή απόφασης.

1. Το τμήμα υπόθεσης ενός κανόνα ασαφούς συνόλου ορίζει τις συνθήκες ή τις μεταβλητές εισόδου του κανόνα: «if X is A»
Παράδειγμα: «αν η θερμοκρασία στο χώρο είναι κρύα»
2. Το τμήμα απόδοσης ή απόφασης καθορίζει την ενέργεια ή την έξοδο που σχετίζεται με τον κανόνα: «then Y is B»
Παράδειγμα: «τότε αύξησε το επίπεδο θέρμανσης από τα σώματα καλοριφέρ»

Ο ασαφής κανόνας αντιπροσωπεύεται από μια ακολουθία της μορφής IF-THEN, οδηγώντας σε αλγόριθμους οι οποίοι περιγράφουν την ενέργεια ή την έξοδο, η οποία πρέπει να παρθεί σε σχέση με πληροφορίες οι οποίες έχουν ήδη παρατηρηθεί¹⁹⁵. Η σχεδίαση αυτών των κανόνων βασίζεται στην ανθρώπινη γνώση, ποικίλλοντας για κάθε εφαρμογή. Στο παραπάνω παράδειγμα, το "κρύο" αντιπροσωπεύει έναν γλωσσικό όρο που σχετίζεται με ένα ασαφές σύνολο που ορίζεται στη μεταβλητή εισόδου θερμοκρασίας και η "αύξηση του επιπέδου θέρμανσης" αντιπροσωπεύει μια γλωσσική ενέργεια που σχετίζεται με ένα ασαφές σύνολο που ορίζεται πάνω από τη μεταβλητή εξόδου (επίπεδο θέρμανσης).

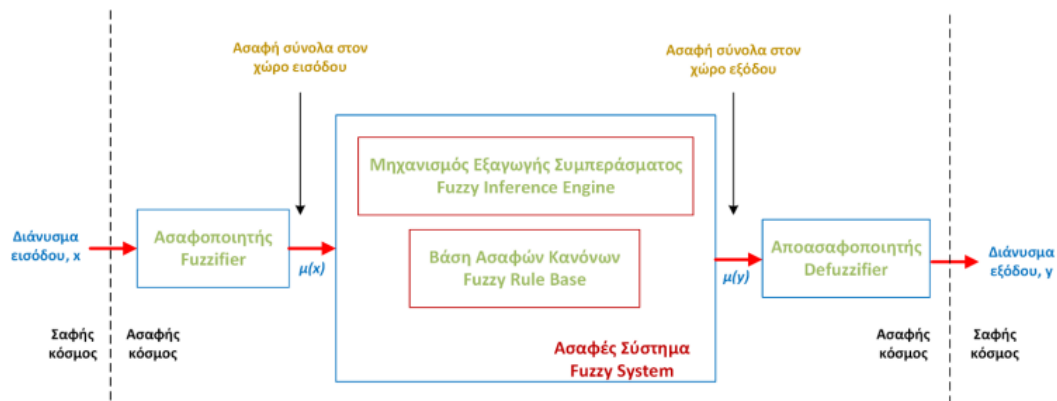
Επομένως, ο ασαφής κανόνας καθοδηγεί τη διαδικασία λήψης αποφάσεων παρέχοντας μια χαρτογράφηση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και εξόδου με βάση γλωσσικούς όρους που είναι κατανοητοί από τον άνθρωπο. Συνδυάζοντας τα ασαφή σύνολα που εκφράζουν λεκτικούς όρους και δημιουργώντας ασαφείς κανόνες πραγματοποιείται αναπαράσταση της γνώσης για ένα σύστημα. Ο ασαφής κανόνας αποτελεί λοιπόν μηχανισμό αναπαράστασης της γνώσης, οι οποίοι αντικατοπτρίζει τον τρόπο σκέψης του ανθρώπου.

¹⁹⁵ Ying Bai, Hanqi Zhuang, Dali Wang. 2006. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. Springer London.

4.4.6 Ασαφή συστήματα εξαγωγής συμπερασμάτων (FIS)

Ο βασικός στόχος των ασαφών συστημάτων είναι η ενσωμάτωση της εμπειρικής γνώσης των ειδικών (expert experience/knowledge), δηλαδή η κατά το δυνατόν υιοθέτηση του ανθρώπινου τρόπου περιγραφής και ελέγχου των συστημάτων (Μαστοροκόστας, 2022). Για την εφαρμογή της τεχνικής ασαφούς λογικής σε μια πραγματική εφαρμογή απαιτούνται τα ακόλουθα τρία βήματα ¹⁹⁶:

1. Ασαφοποίηση (fuzzification) – μετατροπή κλασικών δεδομένων σε ασαφή δεδομένα ή συναρτήσεις συμμετοχής.
2. Διαδικασία εξαγωγής ασαφούς συμπεράσματος (fuzzy inference process) – συνδυασμός των συναρτήσεων συμμετοχής με τους κανόνες για την εξαγωγή του ασαφούς αποτελέσματος.
3. Αποασαφοποίηση (defuzzification) – χρήση διαφορετικών μεθόδων για τον υπολογισμό κάθε σχετικής εξόδου και την τοποθέτηση σε πίνακα. Ύστερα, σε μια εφαρμογή, η έξοδος λαμβάνεται από τον πίνακα αυτό.



Σχήμα 4: Δομή του συστήματος ασαφούς συμπερασμού (Πηγή: Μαστοροκόστας, Π. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα, 2022).

Οι μηχανές επεξεργάζονται σαφή (crisp) δεδομένα, αλλά για ασαφείς εισόδους και εξόδους όπως το «αρκετά ικανοποιημένος», χρειάζονται να μετατραπούν σε γλωσσικές μεταβλητές με ασαφή στοιχεία. Αυτή η μετατροπή από καθαρά σε ασαφή δεδομένα γίνεται μέσω ασαφοποίησης. Για παράδειγμα, κατά τον έλεγχο ενός κλιματιστικού, η θερμοκρασία εισόδου πρέπει να μετατραπεί σε γλωσσικές μεταβλητές όπως, "υψηλή", "μεσαία", "χαμηλή", ενώ οι μεταβλητές ελέγχου εξόδου όπως "γρήγορα", "μεσαία", "αργά" αντιστοιχούν στην ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Αυτή η μετατροπή, από καθαρά σε ασαφή δεδομένα, τόσο για την είσοδο όσο και για την έξοδο, γίνεται μέσω της ασαφοποίησης.

Ένα ασαφές σύστημα περιλαμβάνει δύο βασικά στοιχεία: τη βάση ασαφών κανόνων και το μηχανισμό εξαγωγής συμπεράσματος. Η βάση ασαφών κανόνων (fuzzy rule base) εμπεριέχει την εμπειρική γνώση των ειδικών ή τη γνώση που εξάγεται από τα δεδομένα, σε ό,τι αφορά τη λειτουργία και τη συμπεριφορά του υπό εξέταση

¹⁹⁶ Ying Bai, Hanqi Zhuang, Dali Wang. 2006. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. Springer London.

πραγματικού συστήματος¹⁹⁷. Στον πυρήνα του FIS βρίσκεται ο μηχανισμός εξαγωγής συμπεράσματος, υπεύθυνος για την ερμηνεία των ασαφών κανόνων και τη δημιουργία κατάλληλων τιμών εξόδου. Βασιζόμενος στη βάση ασαφών κανόνων, χρησιμοποιεί τη διαδικασία Generalized Modus Ponens-GMP για την παραγωγή προσεγγιστικού συμπεράσματος, ανάλογα με τις εισόδους που διεγείρουν το σύστημα¹⁹⁸. Μαζί, η βάση ασαφών κανόνων και ο μηχανισμός εξαγωγής συμπεράσματος επιτρέπουν στα ασαφή συστήματα να μοντελοποιούν και να χειρίζονται αποτελεσματικά την αβεβαιότητα και τα πολύπλοκα σενάρια λήψης αποφάσεων σε πολλαπλές εφαρμογές.

Για να γίνει διαθέσιμο το συμπέρασμα ή η ασαφής έξοδος σε πραγματικές εφαρμογές, χρειάζεται μια διαδικασία αποασαφοποίησης¹⁹⁹. Η μονάδα του αποασαφοποιητή (defuzzifier) χρησιμοποιείται για τη μετατροπή των συμπερασμάτων σε σαφή σήματα εξόδου²⁰⁰. Κατά συνέπεια, ο αποασαφοποιητής επιτελεί το «αντίστροφο» έργο από εκείνο του ασαφοποιητή, παρέχοντας τη διασύνδεση ανάμεσα στο ασαφές σύστημα και τον χώρο εξόδου. Διάφορες μέθοδοι όπως το Κέντρο Βάρους (COG) ή ο Μέσος Μέγιστος (MOM) χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της σχετικής εξόδου ελέγχου και κάθε έξοδος ελέγχου πρέπει να ταξινομηθεί σε πίνακα²⁰¹.

4.4.7 Ασαφή μόντελα και ασαφής μοντελοποίηση

Τα δεδομένα για την κατασκευή ενός ασαφούς μοντέλου μπορούν να συλλεχθούν από τις ακόλουθες πηγές²⁰²:

- Αριθμητικά δεδομένα που προέρχονται από μετρήσεις: Στην περίπτωση που υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις, μπορεί να συσταθεί μία βάση δεδομένων και να χρησιμοποιηθούν συστηματικές μέθοδοι επεξεργασίας των δεδομένων και εξόρυξης γνώσης (π.χ. μέθοδοι συσταδοποίησης), ώστε να καταρτιστεί το ασαφές μοντέλο.
- Δεδομένα με βάση τη γνώση ειδικού: Στην περίπτωση που ένα σύστημα λειτουργεί βασισμένο στην εμπειρική γνώση ενός ειδικού, υπάρχει η δυνατότητα με ενδεδειγμένη εξέταση της δράσης του ειδικού σε μεγάλο πλήθος καταστάσεων του συστήματος να προκύψουν δεδομένα από τις απαντήσεις του. Μάλιστα, καθόσον ο ανθρώπινος τρόπος σκέψης μπορεί να αντιστοιχηθεί σε ασαφείς κανόνες, η εμπειρική γνώση μπορεί να μετουσιωθεί σχετικά ομαλά σε βάση ασαφών κανόνων.
- Μεικτά δεδομένα: Σε πολλές εφαρμογές η συνολική πληροφορία προκύπτει εν μέρει από μετρήσεις (αριθμητικά δεδομένα) και εν μέρει από τον ειδικό (εμπειρικά δεδομένα). Επομένως, το μοντέλο που δημιουργείται ενσωματώνει

¹⁹⁷ Μαστοροκόστας, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

¹⁹⁸ Ως άνωθεν

¹⁹⁹ Ying Bai, Hanqi Zhuang, Dali Wang. 2006. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. Springer London.

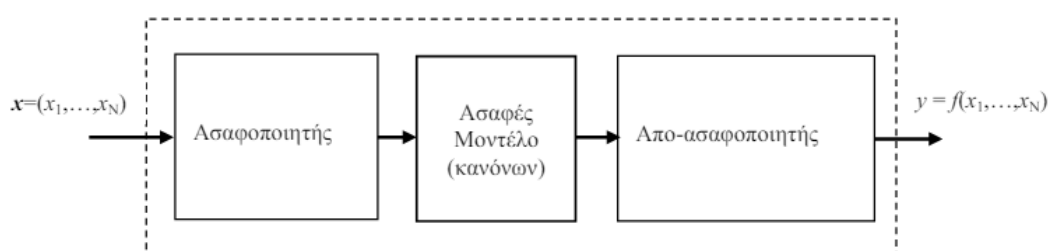
²⁰⁰ Μαστοροκόστας, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

²⁰¹ Ying Bai, Hanqi Zhuang, Dali Wang. 2006. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. Springer London.

²⁰² Μαστοροκόστας, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

αφενός μεν την ποσοτική γνώση (quantitative knowledge), αφετέρου δε την ποιοτική γνώση (qualitative knowledge).

Τα ασαφή μοντέλα αποτελούν τη βάση των ασαφών συστημάτων εξαγωγής συμπερασμάτων, διευκολύνοντας τη μετατροπή των μεταβλητών εισόδου σε μεταβλητές εξόδου χρησιμοποιώντας γλωσσικούς κανόνες και τελεστές ασαφούς λογικής. Στις περισσότερες πρακτικές εφαρμογές, ένα ασαφές μοντέλο αναδεικνύεται ως κεντρικός παράγοντας σε μηχανισμό που υλοποιεί μια συνάρτηση $f: \mathcal{R}^N \rightarrow T$ ²⁰³. Το σύνολο T μπορεί να είναι είτε ο Ευκλείδειος χώρος \mathcal{R}^M , οπότε το ασαφές μοντέλο λειτουργεί ως παλινδρομητής (regressor), είτε κάποιο (πεπερασμένο) σύνολο L , οπότε το ασαφές μοντέλο λειτουργεί ως 2-14 κατηγοριοποιητής (classifier) που διαμερίζει το πεδίο ορισμού \mathcal{R}^N της συνάρτησης f σε κατηγορίες²⁰⁴.



Εικόνα 9: Το Ασαφές Μοντέλο (κανόνων) βρίσκεται στην «καρδιά» ενός μηχανισμού υλοποίησης μιας συνάρτησης $f: \mathcal{R}^N \rightarrow T$ (Πηγή: Καμπουρλάζος και Παπακώστας, Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη, 2015).

Δύο δημοφιλή Ασαφή Μοντέλα είναι τα ασαφή συστήματα συμπερασμού τύπου Mamdani και τύπου Sugeno (Guillaume, 2001) που μελετώνται στη συνέχεια. Τα μοντέλα αυτά εξελίχθηκαν και εμπλουτίστηκαν με την πάροδο του χρόνου, παραμένουν όμως τα πλέον αντιπροσωπευτικά.

4.4.8 Ασαφή μοντέλα τύπου Mamdani

Κατά την εξέταση των ασαφών κανόνων, αναφέρθηκε πως το δεξί τμήμα του ασαφούς κανόνα, THEN y is B , ονομάζεται τμήμα απόδοσης ή συμπεράσματος και περιλαμβάνει την απόδοση ή το συμπέρασμα του κανόνα. Στην παρούσα περίπτωση, όπου το τμήμα απόδοσης είναι μία ασαφής πρόταση, ο κανόνας ονομάζεται κανόνας Mamdani^{205 206}. Για τον ασαφή αυτό κανόνα ισχύει²⁰⁷:

R_M : EAN (το υποκείμενο X είναι A) TOTE (το υποκείμενο Y είναι B).

ή συμβολικά

²⁰³ Kaburlasos VG and Kehagias A, 2014. Fuzzy inference system (FIS) extensions based on lattice theory, *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 22, no. 3, pp. 531-546, 2014

²⁰⁴ Καμπουρλάζος, Β., και Παπακώστας, Γ., 2015. Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

²⁰⁵ Μαστοροκόστας, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

²⁰⁶ Mamdani, E.H. and Assilian, S. (1975) An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. *International Journal of Man-Machine Studies*

²⁰⁷ Καμπουρλάζος, Β., και Παπακώστας, Γ., 2015. Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

$$R_M: \text{EAN } X = A \text{ TOTE } Y = B \text{ ή}$$

$$R_M: (X = A) \rightarrow (Y = B) \text{ ή}$$

$$R_M: A \rightarrow B.$$

Οι κανόνες ενός μοντέλου Mamdani απεικονίζουν ασαφείς αριθμούς σε ασαφείς αριθμούς. Ένα σύνολο κανόνων τύπου Mamdani « R_i : εάν $X = A_i$ TOTE $Y = B_i$ », $i \in \{1, \dots, I\}$ μπορεί να ερμηνευτεί ως ένα σύνολο ζευγών (A_i, B_i) , $i \in \{1, \dots, I\}$ δειγμάτων μιας συνάρτησης $f: F_1 \rightarrow F_1$, η οποία απεικονίζει ασαφείς αριθμούς σε ασαφείς αριθμούς. Οι κανόνες Mamdani μπορούν να περιγράψουν ποιοτικά τη συμπεριφορά εισόδου–εξόδου ενός συστήματος, απαιτώντας, όμως, μεγάλο πλήθος κανόνων για να παρουσιάσουν ικανοποιητική ακρίβεια προσέγγισης²⁰⁸.

4.4.9 Ασαφή μοντέλα τύπου Sugeno

Μία άλλη κατηγορία ασαφών κανόνων, που επιδιώκει να άρει το μειονέκτημα των κανόνων Mamdani, είναι οι κανόνες Sugeno ή πληρέστερα Takagi– Sugeno–Kang (TSK). Οι κανόνες TSK διατηρούν τα ασαφή σύνολα μόνο στο τμήμα απόδοσης και εισάγουν στο τμήμα συμπεράσματος αλγεβρικές συναρτήσεις των εισόδων^{209,210,211}.

$$R_S: \text{EAN (το υποκείμενο } X \text{ είναι } A) \text{ TOTE (η συνάρτηση } y \text{ ισούται με } f(x)).$$

ή συμβολικά

$$R_S: \text{EAN } X = A \text{ TOTE } y = f(x) \text{ ή}$$

$$R_S: (X = A) \rightarrow (y = f(x)) \text{ ή}$$

$$R_S: A \rightarrow y = f(x),$$

$$\text{όπου } x = (x_1, \dots, x_n)$$

Ένα μοντέλο κανόνων τύπου Sugeno « $R_i : \text{EAN } X = A_i \text{ TOTE } y = f_i(x)$ », $i \in \{1, \dots, I\}$ απεικονίζει ασαφείς αριθμούς σε πραγματικές συναρτήσεις. Η συνάρτηση $f_i(x)$ στο αίτιο συνήθως είναι γραμμική. Οι ασαφείς κανόνες TSK παρέχουν μεγάλη ευελιξία στην κατασκευή πολύπλοκων ασαφών μοντέλων, καθώς επιτρέπουν την ενσωμάτωση και μη γραμμικών συναρτήσεων στα τμήματα απόδοσης των ασαφών κανόνων. Η ιδιότητά τους αυτή οδήγησε στη συνέργεια ασαφών συστημάτων με νευρωνικά δίκτυα με απότοκα τα ασαφή νευρωνικά δίκτυα και τα αναδρομικά ασαφή μοντέλα²¹².

²⁰⁸ Μαστοροκόστας, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

²⁰⁹ Ως άνωθεν

²¹⁰ Sugeno, M., Kang, T. and Kang, G., 1988. Structure Identification of Fuzzy Model. Fuzzy Sets and Systems

²¹¹ Takagi, T. and Sugeno, M., 1985. Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics

²¹² Μαστοροκόστας, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

4.5 Νευρωνικά δίκτυα

Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) ή απλά Νευρωνικά Δίκτυα (ΝΔ) αποτελούν μια προσπάθεια προσέγγισης της λειτουργίας του ανθρώπινου εγκεφάλου από μια μηχανή. Η αρχιτεκτονική τους βασίζεται στην αρχιτεκτονική των Βιολογικών Νευρωνικών Δικτύων, μιμούμενα τη λειτουργία τους και έχοντας την ικανότητα να εκτελούν υπολογισμούς με μαζικό παράλληλο τρόπο. Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους τομείς, όπως η μηχανική μάθηση, η τεχνητή νοημοσύνη και η ρομποτική.

Τα ΤΝΔ αποτελούνται από διασυνδεδεμένες μονάδες επεξεργασίας, γνωστές ως νευρώνες, οι οποίες εργάζονται συλλογικά για την επεξεργασία δεδομένων εισόδου και τη δημιουργία εξόδου. Κάθε νευρώνας λαμβάνει σήματα εισόδου από πολλαπλές πηγές, εκτελεί έναν υπολογισμό με βάση αυτές τις εισόδους χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση μεταφοράς και παράγει ένα σήμα εξόδου. Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων διαφέρουν ως προς τη σημαντικότητά τους, η οποία και προσδιορίζεται από τον συντελεστή βάρους (σύναψη)²¹³. Η επεξεργασία κάθε νευρώνα καθορίζεται από τη συνάρτηση μεταφοράς που καθορίζει την κάθε έξοδο σε σχέση με τις εισόδους και τους συντελεστές βάρους.

Μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται εκπαίδευση, τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να μάθουν από παραδείγματα και να προσαρμόσουν τις εσωτερικές τους παραμέτρους για να εκτελέσουν εργασίες όπως η ταξινόμηση, η παλινδρόμηση, η αναγνώριση προτύπων και η λήψη αποφάσεων. Η μάθηση συνίσταται στον προσδιορισμό των κατάλληλων συντελεστών βάρους, ώστε το ΤΝΔ να εκτελεί τους επιθυμητούς υπολογισμούς, και πραγματοποιείται με τη βοήθεια αλγορίθμων που είναι γνωστοί ως κανόνες μάθησης²¹⁴. Ο ρόλος των συντελεστών βάρους μπορεί να ερμηνευτεί ως αποθήκευση γνώσης, η οποία παρέχεται μέσω παραδειγμάτων. Με αυτόν τον τρόπο τα ΝΔ μαθαίνουν το περιβάλλον τους, δηλαδή το φυσικό μοντέλο που παρέχει τα δεδομένα.

Γνωστά ΤΝΔ είναι τα ΤΝΔ χωρίς ανατροφοδότηση, όπως τα πρόσω τροφοδοτούμενα ΝΔ πολλών επιπέδων (feedforward multilayer Neural Networks) και με ανατροφοδότηση, όπως το μοντέλο Hopfield ή τα Cellular neural networks. Ως εμπρός τροφοδότησης αναφέρονται τα δίκτυα στα οποία τα σήματα κατευθύνονται από την είσοδο στην έξοδο, με τα ενδιάμεσα στρώματα να ονομάζονται κρυφά (hidden layers), ενώ στην ανατροφοδότηση, οι εξοδοί κάποιων νευρώνων γίνονται είσοδοι σε νευρώνες προηγούμενων επιπέδων, δηλαδή προς το μέρος της εισόδου του δικτύου²¹⁵. Το Σχήμα 1.1 παρουσιάζει το μοντέλο ενός τεχνητού νευρώνα, η λειτουργία του οποίου περιγράφεται με τις ακόλουθες απλοποιητικές παραδοχές²¹⁶:

Οι αριθμητικές είσοδοι x_1, \dots, x_n του τεχνητού νευρώνα πολλαπλασιάζονται με τα βάρη w_1, \dots, w_n αντίστοιχα και στη συνέχεια αθροίζονται στη συσκευή του αθροιστή (Σ). Μια επιπλέον είσοδος του αθροιστή Σ είναι σταθερή, δηλ. $x_{n+1} = 1$, και

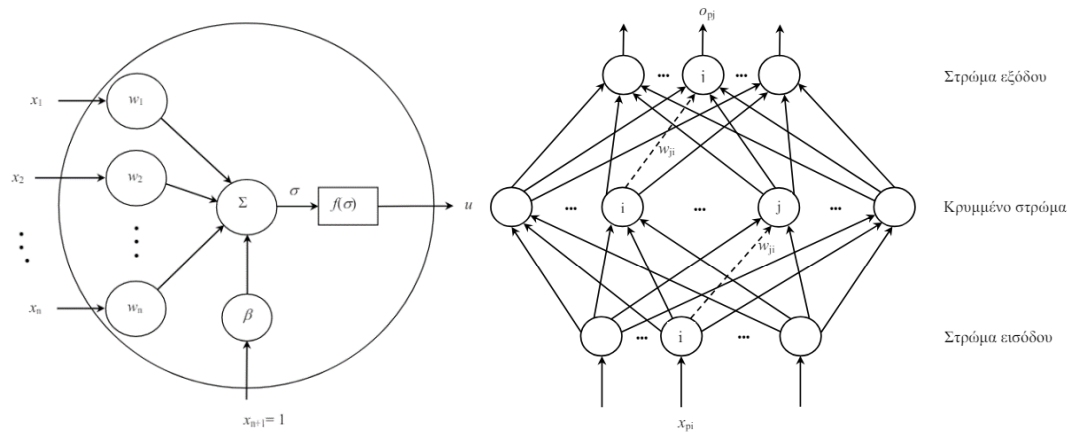
²¹³ Λυκοθανάσης, Σ., και Κουτσομητρόπουλος, Δ., 2023. Υπολογιστική νοημοσύνη και βαθιά μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

²¹⁴ Ως άνωθεν

²¹⁵ Λυκοθανάσης, Σ., και Κουτσομητρόπουλος, Δ., 2023. Υπολογιστική νοημοσύνη και βαθιά μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

²¹⁶ Καμπουρλάζος, Β., και Παπακόστας, Γ., 2015. Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

πολλαπλασιάζεται με τη σταθερά πόλωσης (bias) β , η οποία αποτελεί το $n + 1$ βάρος του τεχνητού νευρώνα, δηλ. $w_{n+1} = \beta$. Συνεπώς, η έξοδος (σ) του αθροιστή υπολογίζεται ως εξής: $\sigma = \sum_{i=1}^n w_i x_i + \beta = \sum_{i=1}^{n+1} w_i x_i = w^T \cdot x$, όπου $w^T \cdot x$ παριστάνει το εσωτερικό γινόμενο του διανύσματος $x = (x_1, \dots, x_n, 1)^T$ εισόδου του τεχνητού νευρώνα επί το διάνυσμα $w = (w_1, \dots, w_n, w_{n+1})^T$ των βαρών. Το σταθμισμένο (γραμμικό) άθροισμα σ των εισόδων του τεχνητού νευρώνα στη συνέχεια οδηγείται σε ένα (μη-γραμμικό) στοιχείο παραμόρφωσης $f(\sigma)$, που ονομάζεται συνάρτηση μεταφοράς (transfer function).



Εικόνα 10: Μοντέλο Τεχνητού Νευρώνα (αριστερά) και Προσωτροφοδοτούμενο ΤΝΔ τριών στρωμάτων νευρώνων (δεξιά) (Πηγή: Καμπουρλάζος και Παπακώστας, Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη, 2015).

Στα ΤΝΔ, οι νευρώνες διατάσσονται σε διαδοχικά στρώματα τα οποία αλληλοσυνδέονται πλήρως. Η πληροφορία μεταδίδεται από το ένα στρώμα στο άλλο, με κάθε νευρώνα να συνδέεται με κάθε νευρώνα του προηγούμενου και επόμενου στρώματος (αν υπάρχει τέτοιο στρώμα) μέσω κάποιου κατευθυνόμενου σύνδεσμου (directed connection). Κάθε νευρώνας έχει μια συνάρτηση μεταφοράς, εκτός από αυτούς του στρώματος εισόδου. Οι συναρτήσεις μεταφοράς μπορεί να είναι διαφορετικές για διαφορετικούς νευρώνες, ωστόσο τυπικά, θεωρείται η ίδια συνάρτηση μεταφοράς για όλους τους νευρώνες.

Η μάθηση ενός ΤΝΔ αφορά τον υπολογισμό των βαρών των συνδέσμων του. Υπάρχουν δύο τύποι μάθησης: η με εποπτεία μάθηση ή επίβλεψη (supervision), η οποία τυπικά χρησιμοποιείται για κατηγοριοποίηση, και η χωρίς εποπτεία, όπου το τυπικά χρησιμοποιείται για ομαδοποίηση. Στη μάθηση με εποπτεία, το δίκτυο εκπαιδεύεται σε ένα σύνολο δεδομένων που αποτελείται από ζεύγη εισόδου-εξόδου $(x_i, t_i), i \in \{1, \dots, n\}$. Όταν το διάνυσμα x_i εφαρμοστεί στην είσοδο του εκπαιδευμένου ΤΝΔ, τότε υπολογίζεται το αντίστοιχο διάνυσμα $t_i, i \in \{1, \dots, n\}$ στην έξοδο του ΤΝΔ. Συχνά, δεν είναι δυνατή μια εκπαίδευση που να επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό του t_i , οπότε, αντί του ακριβούς υπολογισμού του t_i , πραγματοποιείται εκπαίδευση ώστε να υπολογίζεται ένα διάνυσμα o_i το οποίο αποτελεί μια βέλτιστη, συνήθως υπό την έννοια

των ελαχίστων τετραγώνων, του διανύσματος $t_i, i \in \{1, \dots, n\}$ ²¹⁷. Το δίκτυο μαθαίνει να αντιστοιχίζει δεδομένα εισόδου σε αντίστοιχες ετικέτες εξόδου με βάση τα παρεχόμενα παραδείγματα. Κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, το δίκτυο προσαρμόζει τις παραμέτρους του, όπως τα βάρη, για να ελαχιστοποιήσει τη διαφορά μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών εξόδων.

Σε μάθηση χωρίς επίβλεψη, το δίκτυο παρουσιάζεται με δεδομένα εισόδου χωρίς σαφείς ετικέτες εξόδου. Τα διανύσματα $(x_i, t_i), i \in \{1, \dots, n\}$ είναι διαθέσιμα εδώ για εκπαίδευση, αλλά δεν είναι διαθέσιμα τα διανύσματα $t_i, i \in \{1, \dots, n\}$. Ο στόχος είναι να βρεθούν υποκείμενα μοτίβα ή δομές μέσα στα δεδομένα. Το δίκτυο μαθαίνει να συγκεντρώνει παρόμοια σημεία δεδομένων ή να ανακαλύπτει κρυφές σχέσεις μεταξύ των χαρακτηριστικών εισόδου. Οι συνήθεις τεχνικές για μάθηση χωρίς επίβλεψη περιλαμβάνουν αλγόριθμους ομαδοποίησης όπως η ομαδοποίηση k-means.

4.6 Νευρο-ασαφή συστήματα

Ενώ τα νευρωνικά δίκτυα υπερέχουν στη γρήγορη εκμάθηση εντούτοις δεν μπορούν να αιτιολογήσουν ικανοποιητικά τις απαντήσεις τους²¹⁸. Ταυτόχρονα, τα κλασικά ασαφή συστήματα μπορούν να εξηγήσουν ικανοποιητικά τις απαντήσεις τους, υστερούν ωστόσο στην εκμάθηση. Το κενό αυτό δημιούργησε την ανάγκη για την επέκταση των αλγόριθμων της Υπολογιστικής Νοημοσύνης και το συνδυασμό των δυο παραπάνω τεχνολογιών σε μια νέα: τα νευρο-ασαφή συστήματα.

Ένα νευρο-ασαφές σύστημα είναι ένα υβριδικό σύστημα που προκύπτει από την ενσωμάτωση της ασαφούς λογικής και των νευρωνικών δικτύων, ικανό να εκτελεί ασαφείς συλλογισμούς υψηλού επιπέδου χρησιμοποιώντας εκπαιδευμένα ασαφή νευρωνικά δίκτυα που κατασκευάζονται με μάθηση από δείγματα δεδομένων²¹⁹. Αυτά τα συστήματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε καταστάσεις όπου τα δεδομένα μπορεί να είναι ελλιπή ή διφορούμενα, καθώς δύναται να μοντελοποιήσουν αποτελεσματικά πολύπλοκα συστήματα με αβέβαιες εισόδους. Στα νευρο-ασαφή συστήματα, η ασαφής λογική χρησιμοποιείται για να χειριστεί την αβεβαιότητα και την ανακρίβεια στα δεδομένα.

Μια τέτοια νευροασαφής ολοκλήρωση φέρνει υψηλού επιπέδου ασαφείς κανόνες IF-THEN στα νευρωνικά δίκτυα και παρέχει χαμηλού επιπέδου μηχανισμούς αριθμητικής μάθησης για συστήματα ασαφούς λογικής. Μπορούν να χειριστούν γλωσσικές μεταβλητές και ασαφείς κανόνες, καθιστώντας τα ιδιαίτερα χρήσιμα σε εφαρμογές όπως συστήματα λήψης αποφάσεων, συστήματα ελέγχου και εξειδικευμένα συστήματα όπου είναι δύσκολο να καθοριστούν ακριβή μαθηματικά μοντέλα. Τα νευροασαφή δίκτυα, από την άλλη πλευρά, συνδυάζουν τις αρχές των νευρωνικών δικτύων με τη ασαφή λογική, με στόχο να ενσωματώσουν τα πλεονεκτήματα και των δύο παραδειγμάτων.

²¹⁷ Καμπουράζος, Β., και Παπακόστας, Γ., 2015. Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

²¹⁸ Ως άνωθεν

²¹⁹ Pedrycz, W., Kandel, A., Zhang, YQ., 1998. Neurofuzzy Systems. In: Nguyen, H.T., Sugeno, M. (eds) Fuzzy Systems. The Springer Handbook Series on Fuzzy Sets, vol 2. Springer, Boston, MA.

Όπως προαναφέρθηκε, στους ασαφείς κανόνες Takagi–Sugeno–Kang, τα τμήματα απόδοσης είναι αλγεβρικές συναρτήσεις των εισόδων. Στους TSK κανόνες τύπου 1, τα τμήματα απόδοσης αποτελούν γραμμικές συναρτήσεις των εισόδων, ενώ όταν η έξοδος είναι ένα ασαφές singleton, το TSK μοντέλο είναι μηδενικής τάξης (zero–order TSK model). Οι κανόνες singleton για ένα μοντέλο m εισόδων και μίας εξόδου, περιγράφονται ως εξής²²⁰²²¹:

$$R^{(i)}: IF \ x_1 \text{ is } A_1^i \text{ AND } \dots \text{ AND } x_m \text{ is } A_m^i \text{ THEN } y \text{ is } w_i$$

A_j^i είναι τα ασαφή σύνολα των εισόδων του τμήματος υπόθεσης και w_i είναι πραγματικοί αριθμοί.

$$\mu_{A^i}(x) = \mu_{A_1^i}(x_1)\mu_{A_2^i}(x_2) \dots \mu_{A_m^i}(x_m) = \prod_{j=1}^m \mu_{A_j^i}(x_j)$$

Όπου $x = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T$.

Χρησιμοποιώντας τον αποασαφοποιητή CAD, η έξοδος του μοντέλου n κανόνων εξάγεται ως εξής:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^n \mu_i(x)w_i}{\sum_{i=1}^n \mu_i(x)} = \sum_{i=1}^n \bar{\mu}_i(x)w_i$$

όπου $\bar{\mu}_i(x)$ είναι ο κανονικοποιημένος βαθμός εκπλήρωσης του i–στου κανόνα.

Με βάση τις προηγούμενες εξισώσεις, το μοντέλο με κανόνες singleton δίνεται υπό τη μορφή ενός πρόσω τροφοδοτούμενου δικτύου έξι στρωμάτων (6-layer feedforward network). Κάθε στρώμα αποτελείται από μία σειρά από κόμβους (nodes), όπου κάθε κόμβος έχει διαφορετική μορφή, ανάλογα με το στρώμα στο οποίο εντάσσεται, και χαρακτηρίζεται από τις παραμέτρους του κόμβου. Ακολουθεί μία συνοπτική περιγραφή των στρωμάτων^{222 223}:

- Στρώμα 1: Οι κόμβοι του στρώματος αυτού ονομάζονται κόμβοι εισόδου (input nodes) και μεταφέρουν τα σήματα εισόδου στο επόμενο στρώμα.
- Στρώμα 2: Οι κόμβοι στο στρώμα αυτό ονομάζονται λεκτικοί κόμβοι (linguistic term nodes) και υλοποιούν τις συναρτήσεις συμμετοχής $\mu_{A_j^i}(x_j)$, καθώς η έξοδος του κόμβου παράγει τον βαθμό συμμετοχής με τον οποίο η είσοδος x_j συμμετέχει στο σύνολο A_j^i . Για την περίπτωση των ισοσκελών τριγωνικών συναρτήσεων συμμετοχής, οι κόμβοι του στρώματος αυτού έχουν το ζεύγος $\{a_j^i, b_j^i\}$ και υλοποιούν την $\mu_{A_j^i}(x_j) = 1 - \frac{2|x_j - a_j^i|}{b_j^i}$, όπου a_j^i είναι η κεντρική τιμή

²²⁰Μαστοροκόστας, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

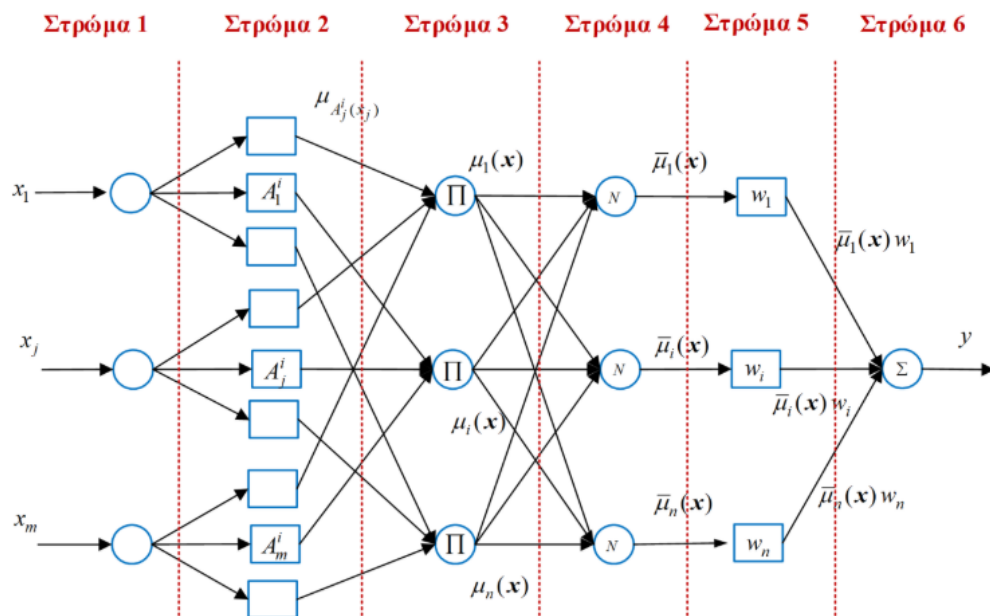
²²¹ Jang, J.S.R., 1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*.

²²²Μαστοροκόστας, Π., 2023. Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

²²³ Jang, J.S.R., 1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*.

και b_j^i το εύρος της συνάρτησης συμμετοχής. Θεωρώντας ότι κάθε είσοδος x_j διαμερίζεται σε k_j ασαφή σύνολα, το στρώμα περιλαμβάνει συνολικά $2 \times \sum_{j=1}^m k_j$ λεκτικούς κόμβους.

- Στρώμα 3: Οι κόμβοι στο στρώμα αυτό ονομάζονται κόμβοι κανόνες (rule nodes). Ο κόμβος δέχεται ως είσοδο τις εξόδους του στρώματος $\mu_{A_j^i}(x_j)$, και παρέχει στην έξοδο το γινόμενο τους. Γενικά, εκτός από το αλγεβρικό γινόμενο μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τελεστές τομής (π.χ. ο τελεστής min) για την παραγωγή των εξόδων των κόμβων κανόνων. Αν υιοθετηθεί πλήρης διαμερισμός (grid partition), το πλήθος των κόμβων κανόνων ανέρχεται στους $n = k_1 \times k_2 \times \dots \times k_m$.
- Στρώμα 4: Οι κόμβοι στο στρώμα αυτό έχουν ως εισόδους τους βαθμούς εκπλήρωσης των κανόνων $\mu_i(x)$ και υπολογίζουν τους κανονικοποιημένους βαθμούς εκπλήρωσης $\bar{\mu}_i(x)$ από την τρίτη εξίσωση. Κατά αντιστοιχία με το στρώμα 3, το πλήθος των κόμβων ανέρχεται στους $n = k_1 \times k_2 \times \dots \times k_m$.
- Στρώμα 5: Οι κόμβοι στο στρώμα αυτό υπολογίζουν τις εξόδους των τμημάτων απόδοσης των κανόνων (τα singleton w_i), σταθμισμένες με τον αντίστοιχο κανονικοποιημένο βαθμό εκπλήρωσης κανόνα, δηλαδή παράγουν το γινόμενο $\bar{\mu}_i(x) \cdot w_i$. Συνεπώς, δέχονται ως εισόδους τις εξόδους του προηγούμενου στρώματος και έχουν παραμέτρους τα w_i . Η παράμετρος του κόμβου είναι το w_i και το στρώμα περιλαμβάνει $k_1 \times k_2 \times \dots \times k_m$ κόμβους.
- Στρώμα 6: Το στρώμα αυτό αποτελείται από έναν κόμβο αθροιστή, ο οποίος αθροίζει τις εξόδους των κόμβων του στρώματος 5 και παρέχει την τελική έξοδο του μοντέλου.



Εικόνα 11: Νευρο-ασαφές δίκτυο με κανόνες singleton. Πηγή: Μαστοροκόστας, Π. (2022). Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση [Μεταπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις.

Αξίζει να σημειωθεί πως στη βιβλιογραφία πολλών ακαδημαϊκών έργων, η αρίθμηση ξεκινάει από τους λεκτικούς κόμβους και όχι από τους κόμβους εισόδου, καταλήγοντας έτσι σε 5 στρώματα συνολικά.

4.7 Προσαρμοστικά δίκτυα

Ένα προσαρμοστικό δίκτυο ονομάζεται μια δομή δικτύου που αποτελείται από κόμβους και κατευθυντικών συνδέσμων μέσω των οποίων συνδέονται οι κόμβοι²²⁴.. Επιπλέον, ένα μέρος είτε όλοι οι κόμβοι είναι προσαρμοστικοί, δηλαδή οι έξοδοί τους εξαρτώνται από τις παραμέτρους που σχετίζονται με αυτούς τους κόμβους με τον κανόνα εκμάθησης να είναι υπεύθυνο για την παραμετροποίηση. Στο προσαρμοστικό δίκτυο, το οποίο αποτελεί ένα πολυστρωματικό δίκτυο τροφοδοσίας, κάθε κόμβος εκτελεί μια συγκεκριμένη λειτουργία (συνάρτηση κόμβου) στα εισερχόμενα σήματα. Οι τύποι για τις συναρτήσεις κόμβου μπορεί να διαφέρουν από κόμβο σε κόμβο και η επιλογή κάθε συνάρτησης κόμβου εξαρτάται από τη συνολική συνάρτηση εισόδου-εξόδου που απαιτείται να πραγματοποιήσει το προσαρμοστικό δίκτυο.

Οι σύνδεσμοι σε ένα προσαρμοστικό δίκτυο υποδεικνύουν μόνο την κατεύθυνση ροής των σημάτων μεταξύ των κόμβων και κανένα βάρος δεν σχετίζεται με τους συνδέσμους. Για την αποτύπωση των διαφορετικών προσαρμοστικών δυνατοτήτων, γίνεται χρήση κυκλικών και τετράγωνων κόμβων. Ένας τετράγωνος κόμβος (προσαρμοστικός κόμβος) έχει παραμέτρους ενώ ένας κόμβος κύκλου (σταθερός κόμβος) δεν έχει καμία. Το σύνολο παραμέτρων ενός προσαρμοστικού δικτύου είναι η ένωση των συνολικών παραμέτρων κάθε προσαρμοστικού κόμβου. Ο μικρός αριθμός περιορισμών των προσαρμοστικών δικτύων τα καθιστά χρήσιμα για πολλαπλούς τομείς και εφαρμογές.

4.8 Το Προσαρμοστικό σύστημα νευρο-ασαφούς συμπερασμού - ANFIS

Το Προσαρμοστικό Σύστημα Νευρο-Ασαφούς Συμπερασμού (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS) συνδυάζει τις ικανότητες μάθησης των νευρωνικών δικτύων με τις συλλογιστικές ικανότητες της ασαφούς λογικής, δημιουργώντας ένα υβριδικό μοντέλο. Το ANFIS προτάθηκε από τον Jang το 1993 και αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό βήμα προόδου στην υπολογιστική νοημοσύνη, προσφέροντας μια μέθοδο για τη μοντελοποίηση πολύπλοκων συστημάτων με αβέβαια ή αόριστα δεδομένα. Τα νευρωνικά δίκτυα υπερέχουν στην εκμάθηση πολύπλοκων, μη γραμμικών σχέσεων από δεδομένα, ενώ η ασαφής λογική παρέχει έναν μηχανισμό για το χειρισμό γλωσσικών μεταβλητών. Συνδυάζοντας αυτές τις δυο τεχνικές, το ANFIS στοχεύει να εκμεταλλευτεί τα πλεονεκτήματα κάθε προσέγγισης.

Η χρήση τεχνητών νευρωνικών δικτύων (ΤΝΔ) μπορεί να καθορίσει τη σχέση μεταξύ εισόδου και εξόδου από δείγματα εκπαίδευσης για τον προσδιορισμό της κατανομής των συναρτήσεων συμμετοχής (Naderloo et al., 2012), δεν είναι εύκολο να προσδιοριστεί το σωστό μέγεθος και η βέλτιστη δομή του δικτύου, το οποίο είναι ένα κύριο μειονέκτημα του νευρωνικού δικτύου²²⁵. Οι νευροασαφείς τεχνικές ενσωματώνουν έτσι τα νευρωνικά δίκτυα και την ασαφή λογική για να δημιουργήσουν

²²⁴ Jang, J.S.R., 1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*.

²²⁵ A. Mahesh; K. S. Sandhu, 2016. ANFIS based energy management strategy for PV/Wind/Battery hybrid energy system. *IEEE 7th Power India International Conference (PIICON)*, Bikaner, India, 2016, pp. 1-5.

ισχυρά συστήματα αποφάσεων^{226 227}. Χρησιμοποιώντας μια υβριδική διαδικασία εκμάθησης, το ANFIS μπορεί να κατασκευάσει μια χαρτογράφηση εισόδου-εξόδου που βασίζεται τόσο στην ανθρώπινη γνώση (με τη μορφή ασαφών κανόνων εάν-τότε) όσο και σε καθορισμένα ζεύγη δεδομένων εισόδου-εξόδου^{228 229}.

Συνδυάζοντας αυτές τις δυο τεχνικές, το ANFIS εκμεταλλεύεται τα πλεονεκτήματα κάθε προσέγγισης και δύναται να εφαρμοστεί σε ένα ευρύ φάσμα τομέων. Στον τομέα των συστημάτων ελέγχου, το ANFIS αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για το σχεδιασμό έξυπνων συστημάτων ελέγχου και την αντιμετώπιση προβλημάτων σε βιομηχανικές και ρομποτικές εφαρμογές^{230 231 232 233 234 235 236 237}. Το ANFIS χρησιμοποιείται επίσης στις περιβαλλοντικές επιστήμες και τη μηχανική με εφαρμογές όπως η μοντελοποίηση της ποιότητας του αέρα, η πρόβλεψη της κλιματικής αλλαγής αλλά και η πρόβλεψη της ποιότητας νερού, σημαντικού παράγοντα στη διαχείριση των υδάτινων πόρων^{238 239 240 241 242 243}.

²²⁶ Engin Avci, 2008. Comparison of wavelet families for texture classification by using wavelet packet entropy adaptive network based fuzzy inference system, *Applied Soft Computing*, Volume 8, Issue 1. Pages 225-231, ISSN 1568-4946.

²²⁷ N.G. Fragiadakis, V.D. Tsoukalas και V.J. Papazoglou, 2014. An adaptive neuro-fuzzy inference system (anfis) model for assessing occupational risk in the shipbuilding industry, *Safety Science*, Volume 63. Pages 226-235,

²²⁸ Jang, J.S.R., 1993. ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System. *IEEE Transactions on Systems Man & Cybernetics*.

²²⁹ L. C. Ying και M. C. Pan, Using adaptive network based fuzzy inference system to forecast regional electricity loads, *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 2, 2008, Pages 205-211.

²³⁰ Denai, Mouloud Azzedine, Frank Palis και Abdelhafid Zeghibib. 2004. ANFIS based modelling and control of non-linear systems: a tutorial.

²³¹ Mote, T. P. και S. D. Lokhande. 2012. Temperature control system using ANFIS. *International Journal of Soft Computing and Engineering* 2.1.

²³² Khuntia, Swasti R., και Sidhartha Panda. 2012 Simulation study for automatic generation control of a multi-area power system by ANFIS approach." *Applied soft computing* 12.1: 333-341.

²³³ Masood, M. K., W. P. Hew και N. A. Rahim. 2012. Review of ANFIS-based control of induction motors." *Journal of Intelligent και Fuzzy Systems* 23.4: 143-158.

²³⁴ S., Servet και H. Alli. 2009. An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach." *Energy and Buildings* 41.8: 814-822.

²³⁵ C. Xiujiia, και X. Zhang. 2015. Nonlinear feedback control based on ANFIS." 2015 12th international conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD). IEEE.

²³⁶ I. Masoud, M. Mansouri και A. Shoorehdeli. 2011. Tracking control of mobile robot using ANFIS." 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE.

²³⁷ P. Dr. Anish, K. Dr-Saroj και P., Krishna και P., Dayal., 2016. Mobile robot navigation in unknown static environments using ANFIS controller. *Perspectives in Science*.

²³⁸ L. Qiao et al., 2023. Exploring ANFIS application based on actual data from wastewater treatment plant for predicting effluent removal quality of selected major pollutants, *Journal of Water Process Engineering*.

²³⁹ Mohammed A.A et al., 2021. Improved ANFIS model for forecasting Wuhan City Air Quality and analysis COVID-19 lockdown impacts on air quality, *Environmental Research*, Volume 194.

²⁴⁰ K. Prasad, A. Kumar Gorai, P. Goyal, 2016. Development of ANFIS models for air quality forecasting and input optimization for reducing the computational cost and time, *Atmospheric Environment*, Volume 128.

²⁴¹ S. Arora, A. K. Keshari, 2021. ANFIS-ARIMA modelling for scheming re-aeration of hydrologically altered rivers, *Journal of Hydrology*, Volume 601, 126635, ISSN 0022-1694,

²⁴² A. N. Thi Do, H. D. Tran, M. Ashley, 2022. Employing a novel hybrid of GA-ANFIS model to predict distribution of whiting fish larvae and juveniles from tropical estuaries in the context of climate change, *Ecological Informatics*, Volume 71.

²⁴³ S., Suhas, J. K. Chaudhary, 2021 Hybridization of ANFIS and fuzzy logic for groundwater quality assessment, *Groundwater for Sustainable Development*, Volume 18.

Στον τομέα της υγείας, το ANFIS χρησιμοποιείται για τη πρόγνωση και διάγνωση πλήθους ασθενειών^{244 245 246 247 248} καθώς και στα συστήματα υποστήριξης ιατρικών αποφάσεων^{249 250}. Αναλύοντας δεδομένα ασθενών, όπως το ιατρικό ιστορικό και τα συμπτώματα, το ANFIS μπορεί να βοηθήσει τους επαγγελματίες υγείας στην ανίχνευση ασθενειών και στην εύρεση της κατάλληλης θεραπείας. Παράλληλα, το ANFIS χρησιμοποιείται σε κλάδους μηχανικής για τη μοντελοποίηση και βελτιστοποίηση πολύπλοκων συστημάτων. Ειδικότερα, σε συστήματα όπως τα ενεργειακά συστήματα, τα δίκτυα μεταφοράς και τα τεχνικά έργα, το ANFIS μπορεί να προσομοιώσει τη συμπεριφορά του συστήματος, να εντοπίσει βέλτιστες λύσεις και να προβλέψει αποτελέσματα^{251 252 253 254 255 256}.

Η ευελιξία του ANFIS το καθιστά χρήσιμο για την πρόβλεψη αγορών, όπως οι χρηματοπιστωτικές αγορές και οι αγορές ενέργειας. Ικανό να καταγράφει μη γραμμικές σχέσεις, το ANFIS χρησιμεύει στην πρόβλεψη των τιμών μετοχών, τη βελτιστοποίηση χαρτοφυλακίου και τη διαχείριση κινδύνου^{257 258 259 260 261}. Στις αγορές ενέργειας, το ANFIS μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη της τιμής των φυσικών πόρων, καθώς και στην πρόβλεψη της ζήτησης και της κατανάλωσής τους^{262 263 264 265 266 267}.

²⁴⁴ H. MS, Zekri M. 2021. Review of Medical Image Classification using the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. *J Med Signals Sens.*

²⁴⁵ B.M Rashed.; N. Popescu, 2024. Medical Image-Based Diagnosis Using a Hybrid Adaptive Neuro-Fuzzy Inferences System (ANFIS) Optimized by GA with a Deep Network Model for Features Extraction. *Mathematics.*

²⁴⁶ A. Shoeibi et al., 2022, Detection of epileptic seizures on EEG signals using ANFIS classifier, autoencoders and fuzzy entropies, *Biomedical Signal Processing and Control*, Volume 73.

²⁴⁷ Kumarganesh, S., και M. Suganthi. 2018. An enhanced medical diagnosis sustainable system for brain tumor detection and segmentation using ANFIS classifier. *Current Medical Imaging* 14.2

²⁴⁸ K. Sujatha et al., 2020 Chapter 5 - Screening and early identification of microcalcifications in breast using texture-based ANFIS classification, Editor(s): Nilanjan Dey, Amira S. Ashour, Simon James Fong, Chintan Bhatt, In *Advances in ubiquitous sensing applications for healthcare, Wearable and Implantable Medical Devices*, Academic Press, Volume 7.

²⁴⁹ Yadollahpour, A., Nourozi, J., και Trejo-Macotela, F. R., 2018. Designing and implementing an ANFIS based medical decision support system to predict chronic kidney disease progression. *Frontiers in physiology*, 9, 415599.

²⁵⁰ Priyadarshini, L., και Lakshmi Shrinivasan., 2020 Design of an ANFIS based decision support system for diabetes diagnosis. "2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSPP). IEEE.

²⁵¹ A.F. Cabalar, C. Abdulkadir και Candan Gokceoglu, 2012. Some applications of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in geotechnical engineering. *Computers and Geotechnics* 40.

²⁵² X. Tan et al., 2024. An ANFIS-Based indirect control strategy for solar heating system: Exploring PMV approach, *Energy and Buildings*, Volume 309.

²⁵³ Adedeji, P. A. et al., 2019, Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS) Modelling in Energy System and Water Resources. "In *Optimization Using Evolutionary Algorithms and Metaheuristics*, 1st ed. CRC Press.

²⁵⁴ G. Perveen, M. Rizwan, και N. Goel. 2019, An ANFIS-based model for solar energy forecasting and its smart grid application." *Engineering Reports* 1.5.

²⁵⁵ S. Nouman, N. Kumar και S. Kumar 2022. Application of ANFIS in Civil Engineering-A Critical Review.

²⁵⁶ Aeidapu Mahesh; Kanwarjit Singh Sandhu, 2016, ANFIS based energy management strategy for PV/Wind/Battery hybrid energy system IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), Bikaner, India.

²⁵⁷ L. Y. Wei, 2016, A hybrid ANFIS model based on empirical mode decomposition for stock time series forecasting, *Applied Soft Computing*, Volume 42, Pages 368-376.

²⁵⁸ C. H. Su, C. H. Cheng, 2016, A hybrid fuzzy time series model based on ANFIS and integrated nonlinear feature selection method for forecasting stock, *Neurocomputing*, Volume 205, Pages 264-273.

²⁵⁹ YS.Chen et al. 2016, A study of ANFIS-based multi-factor time series models for forecasting stock index. *Appl Intell* 45.

²⁶⁰ M. Alizadeh et al., 2011. An Adaptive Neuro-Fuzzy System for Stock Portfolio Analysis. *Int. J. Intell. SysT.*

²⁶¹ W. Kristjanpoller R. και K. Michell V., 2018. A stock market risk forecasting model through integration of switching regime, ANFIS and GARCH techniques, *Applied Soft Computing*, Volume 67, Pages 106-116.

²⁶² F. Yu και X. Xu, 2014. A short-term load forecasting model of natural gas based on optimized genetic algorithm and improved BP neural network. *Applied Energy*. 134.

²⁶³ A. Azadeh et al., 2015, A neuro-fuzzy algorithm for improved gas consumption forecasting with economic, environmental and IT/IS indicators, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Volume 133, Pages 716-739.

²⁶⁴ Barak, S.; Sadegh, S.S. 2016, Forecasting energy consumption using ensemble ARIMA-ANFIS hybrid algorithm. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 82, 92-104.

²⁶⁵ P. Adedeji, P. et al., 2020, Hybrid Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS) for a Multi-campus University Energy Consumption Forecast. *Int. J. Ambient Energy*, 41, 1-20.

²⁶⁶ Do, Q.H., 2020. Development of MI-ANFIS-BBO Model for Forecasting Crude Oil Price. In: Pham, H. (eds) *Reliability and Statistical Computing*. Springer Series in Reliability Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43412-0_11

²⁶⁷ M. Panella et al., 2013, A study on crude oil prices modeled by neurofuzzy networks, "2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Hyderabad, India pp. 1-7.

Στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, καθώς μελετάται η πρόβλεψη της ζήτησης του φυσικού αερίου στην Ελλάδα, πριν γίνει περεταίρω ανάλυση, θα ήταν χρήσιμη η αποτύπωση της αρχιτεκτονικής του ANFIS, για την καλύτερη κατανόηση της μεθόδου.

4.9 Αρχιτεκτονική του ANFIS

Το ANFIS αποτελείται από ένα ασαφές σύστημα συμπερασμού το οποίο βασίζεται στο TSK (Takagi-Sugeno-Kang) ασαφές σύστημα. Σύμφωνα με τον Jang:

Για λόγους απλοποίησης, υποθέτουμε ότι το υπό εξέταση ασαφές σύστημα συμπερασμού έχει δύο εισόδους x και y και τη z ως έξοδο. Υποθέτοντας ότι η βάση των κανόνων περιέχει δύο ασαφείς if-then κανόνες τύπου TSK:

Κανόνας 1: Εάν το x είναι A_1 και το x είναι B_1 , τότε $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Κανόνας 2: Εάν το x είναι A_2 και το x είναι B_2 , τότε $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

Τότε, ο ασαφής συλλογισμός τύπου 3 απεικονίζεται στο Σχ. 4(a) και η αντίστοιχη αρχιτεκτονική ANFIS (ANFIS τύπου 3) φαίνεται στο Σχ. 4(b). Οι συναρτήσεις κόμβου στο ίδιο επίπεδο είναι της ίδιας οικογένειας συναρτήσεων όπως περιγράφεται παρακάτω:

- Στρώμα 1: Κάθε κόμβος i σε αυτό το στρώμα α είναι ένας προσαρμοστικός κόμβος με μία συνάρτηση κόμβου $O_i^1 = \mu_{A_i}(x)$, όπου x είναι η είσοδος στον κόμβο i και A_i είναι μια γλωσσική ετικέτα (μικρό, μεγάλο κ.α.) που σχετίζεται με αυτό τον κόμβο. Το O_i^1 είναι δηλαδή συνάρτηση συμμετοχής του A_i και καθορίζει τον βαθμό στον οποίο η δεδομένη είσοδος x ικανοποιεί την ποσοτικοποίηση του A_i . Η συνάρτηση $\mu_{A_i}(x)$ μπορεί να είναι οποιαδήποτε κατάλληλη συνάρτηση συμμετοχής, όπως η γενικευμένη καμπανοειδής με μέγιστο το 1 και ελάχιστο το 0, όπως η $\mu_{A_i}(x) = 1 - \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x - c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}}$, όπου

$\{a_i, b_i, c_i\}$ το σύνολο των παραμέτρων. Εφόσον οι τιμές αυτών των παραμέτρων αλλάζουν, η καμπανοειδής συνάρτηση ποικίλει ανάλογα, παρουσιάζοντας έτσι διάφορες μορφές συναρτήσεων συμμετοχής στο A_i . Οι παράμετροι σε αυτό το στρώμα αναφέρονται ως παράμετροι προϋπόθεσης.

- Στρώμα 2: Κάθε κόμβος σε αυτό το στρώμα είναι ένας σταθερός κόμβος που επισημαίνεται με Π και ο οποίος πολλαπλασιάζει τα εισερχόμενα σήματα και στέλνει το γινόμενο ως έξοδο: $w_i = \mu_{A_i}(x)\mu_{B_i}(y), i = 1, 2$.

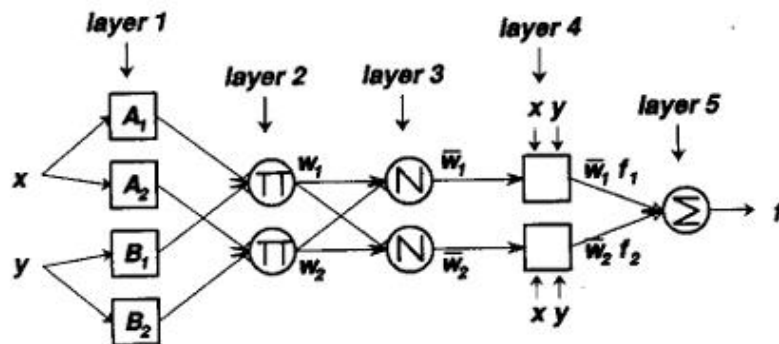
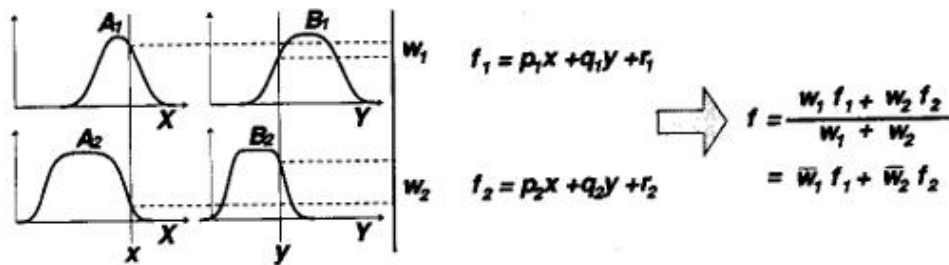
Κάθε κόμβος εξόδου αντιπροσωπεύει τη δύναμη πυροδότησης του κανόνα.

- Στρώμα 3: Κάθε κόμβος σε αυτό το στρώμα είναι ένας σταθερός κόμβος που επισημαίνεται με N . Ο i -οστός κόμβος υπολογίζει την αναλογία της δύναμης πυροδότησης του κανόνα i -προς το άθροισμα των δυνάμεων πυροδότησης όλων των κανόνων: $\bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, i = 1, 2$.

- Στρώμα 4: Κάθε κόμβος i στο στρώμα αυτό είναι ένας προσαρμοστικός κόμβος με συνάρτηση κόμβου: $O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i(p_i x + q_i y + r_i)$, όπου \bar{w}_i η έξοδος του στρώματος 3 και $\{p_i, q_i, r_i\}$ το σύνολο των παραμέτρων.

- Στρώμα 5: Ο μονός κόμβος σε αυτό το στρώμα είναι ένας σταθερός κόμβος που επισημαίνεται με Σ , ο οποίος υπολογίζει τη συνολική έξοδο ως το άθροισμα όλων των εισερχόμενων σημάτων: $O_i^4 = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$.

Προκύπτει λοιπόν ένα προσαρμοστικό δίκτυο που είναι λειτουργικά ισοδύναμο με ένα Sugeno ασαφές μοντέλο. Έχοντας ως πρότυπο το Σχήμα 3.1 και υπολογίζοντας ως πρώτο στρώμα το στρώμα που περιέχει του κόμβους εισόδου, δύναται να περιγραφεί από μια ιεραρχική δομή 6 στρωμάτων παρόμοια με το Σχήμα 3.1. Όπως προαναφέρθηκε, η μόνη διαφορά έγκειται στη μορφή των κόμβων του στρώματος 5, οι οποίοι υλοποιούν πλέον τις πολυωνυμικές συναρτήσεις των κανόνων, με τα στρώματα 2 και 5 να είναι προσαρμοστικά στρώματα, ενώ τα υπόλοιπα να είναι σταθερά στρώματα.



Εικόνα 12 (a) ο ασαφής συλλογισμός τύπου 3. (b) αντίστοιχη αρχιτεκτονική ANFIS (Πηγή: Jang, J. S. R. 1993, ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics)

5. Δεδομένα

5.1 Κύρια δεδομένα

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, επίκεντρο της ανάλυσης και πυρήνας του μοντέλου πρόβλεψης αποτελεί η βάση δεδομένων η οποία συγκεντρώθηκε και υλοποιήθηκε από τη ΔΕΠΑ Εμπορίας ΑΕ. Η συγκεκριμένη βάση δεδομένων περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο σύνολο μετρήσεων ανά ημέρα για την εισαγωγή του φυσικού αερίου και την παραλαβή του από τους Χρήστες. Ειδικότερα, το σύνολο δεδομένων που παρέχεται από τη ΔΕΠΑ εκτείνεται από την 1^η Ιανουαρίου 2008 έως την 31^η Δεκεμβρίου 2022, αποτυπώνοντας αριθμητικά τις τάσεις κατανάλωσης του φυσικού αερίου την τελευταία δεκαπενταετία.

Φυσικά, μέσα σε αυτό το χρονικό εύρος περιλαμβάνεται μια σειρά οικονομικών, γεωπολιτικών, περιβαλλοντικών, και πλέον ιστορικών γεγονότων, τα οποία έχουν επέφεραν διακυμάνσεις στη ζήτηση και κατανάλωση του φυσικού αερίου στην Ελλάδα. Η περίοδος 2008-2022 σηματοδοτήθηκε από μια σειρά εξελίξεων τόσο σε παγκόσμιο επίπεδο, όσο και σε τοπικό, με την Νοτιοανατολική Μεσόγειο και την Ελλάδα να επηρεάζονται σημαντικά. Η χρονική ευαισθησία των δεδομένων όχι μόνο δεν παρεμποδίζει την αξιοποίησή τους, αλλά αντιθέτως αποτελεί εφελκυστικό για τη δημιουργία ενός προγνωστικού μοντέλου που ενστερνίζεται τις ιστορικές εξελίξεις αλλά και την περίπλοκη αλληλεπίδραση των παραγόντων που τις καθορίζουν.

Όπως προαναφέρθηκε, η Ελλάδα εισάγει φυσικό αέριο μέσω τεσσάρων κύριων σημείων εισόδου στο Εθνικό Σύστημα Μεταφοράς Φυσικού Αερίου (ΕΣΜΦΑ): το Σιδηρόκαστρο (σύνορα Ελλάδας-Βουλγαρίας), τους Κήπους (σύνορα Ελλάδας-Τουρκίας), τη Νέα Μεσημβρία (σύνορα Ελλάδας-Τουρκίας) και την Αγία Τριάδα Τριάδα (σημείο εισόδου από τον τερματικό σταθμό Υγροποιημένου Φυσικού Αερίου της Ρεβυθούσας). Αντίστοιχα, το φυσικό αέριο παραδίδεται σε 44 Σημεία Εξόδου του ΕΣΜΦΑ. Με γνώμονα ότι το σύνολο δεδομένων περιλαμβάνει μετρήσεις ημερήσιας κατανάλωσης ΦΑ από το 2008, η παρουσίαση ολόκληρου του συνόλου δεδομένων στην παρούσα διπλωματική θα οδηγούσε σε ένα υπέρογκο εγχείρημα, δύσκολο στην ανάγνωση, επισκιάζοντας έτσι την πραγματική ουσία του. Ωστόσο, για την καλύτερη κατανόηση του αναγνώστη, παρέχονται αντιπροσωπευτικοί πίνακες ως παραδείγματα για την απεικόνιση σημαντικών πτυχών των δεδομένων.

Στους παρακάτω Πίνακες 1 και 2, στην πρώτη στήλη εμφανίζεται η ημερομηνία μετρήσεως. Στον Πίνακα 1 ακολουθούν τα τέσσερα σχετικά σημεία εισόδου, όπου στο κάθε ένα καταγράφεται η ποσότητα παράδοσης του φυσικού αερίου σε κιλοβατώρες (kWh) σε θερμοκρασία αναφοράς καύσης 25 °C. Στον Πίνακα 2, ακολουθούν οι καταγεγραμμένες μετρήσεις για τα σχετικά σημεία εξόδου με τους Χρήστες. Ομοίως με προηγούμενως, οι τιμές του φυσικού αερίου καταγράφονται σε κιλοβατώρες και σε θερμοκρασία αναφοράς καύσης 25 °C. Ομοίως με προηγούμενως, οι τιμές του φυσικού αερίου καταγράφονται σε κιλοβατώρες και σε θερμοκρασία αναφοράς καύσης 25 °C. Για τον πρώτο πίνακα επιλέγεται τυχαία το διάστημα 29/11/2022-22/12/2022 ενώ για τον δεύτερο πίνακα επιλέγεται τυχαία η ημέρα 29/11/2022.

Πίνακας 2: Παράδειγμα για τέσσερα σχετικά σημεία εισόδου, όπου στο κάθε ένα καταγράφεται η ποσότητα παράδοσης του φυσικού αερίου σε κιλοβατώρες (kWh) και σε θερμοκρασία αναφοράς καύσης 25 °C.

Ημερομηνία / Date	Σχετικά Σημεία Εισόδου / Relative Entry Points			
	Ποσότητα Παράδοσης Φ.Α. / N.G. Delivery Quantity			
	(kWh / Θερμοκρασία Αναφοράς Καύσης 25°C) / (kWh / Combustion Reference Temperature 25°C)			
	ΑΓΙΑ ΤΡΙΑΔΑ	ΣΙΔΗΡΟΚΑΣΤΡΟ	ΚΗΠΟΙ	ΝΕΑ ΜΕΣΗΜΒΡΙΑ
29/11/2022	164.784.773	6.232.110	10.458.599	22.675.297
30/11/2022	175.518.768	32.379.735	10.461.169	19.705.394
1/12/2022	166.614.018	49.568.137	10.451.457	14.064.378
2/12/2022	158.293.991	35.895.017	10.462.710	13.394.730
3/12/2022	130.960.207	44.756.583	10.606.759	13.401.944
4/12/2022	129.901.851	42.531.542	10.517.066	13.436.568
5/12/2022	168.966.620	57.556.350	10.461.247	13.387.067
6/12/2022	136.313.228	71.162.592	10.449.215	13.658.508
7/12/2022	150.305.776	51.633.201	10.460.898	13.660.360
8/12/2022	127.653.491	49.026.140	10.454.835	13.664.440
9/12/2022	112.694.605	42.669.034	5.004.338	8.820.613
29/11/2022	164.784.773	6.232.110	10.458.599	22.675.297
30/11/2022	175.518.768	32.379.735	10.461.169	19.705.394
1/12/2022	166.614.018	49.568.137	10.451.457	14.064.378
2/12/2022	158.293.991	35.895.017	10.462.710	13.394.730
3/12/2022	130.960.207	44.756.583	10.606.759	13.401.944
4/12/2022	129.901.851	42.531.542	10.517.066	13.436.568
5/12/2022	168.966.620	57.556.350	10.461.247	13.387.067
6/12/2022	136.313.228	71.162.592	10.449.215	13.658.508
7/12/2022	150.305.776	51.633.201	10.460.898	13.660.360
8/12/2022	127.653.491	49.026.140	10.454.835	13.664.440
9/12/2022	112.694.605	42.669.034	5.004.338	8.820.613
10/12/2022	82.917.159	16.449.400	0	8.709.176
11/12/2022	72.598.217	21.253.963	0	8.676.079
12/12/2022	151.157.655	39.483.667	0	8.680.700
13/12/2022	145.051.758	54.899.920	10.469.900	8.670.963
14/12/2022	127.019.783	62.876.677	10.449.934	8.702.910
15/12/2022	118.837.474	47.900.421	5.005.175	8.703.240
16/12/2022	141.448.125	16.739.865	5.009.456	8.703.047
17/12/2022	124.514.531	0	5.004.742	7.299.663
18/12/2022	110.776.997	0	5.008.036	8.162.809
19/12/2022	127.879.735	0	10.463.865	9.456.564
20/12/2022	134.154.258	0	10.460.773	15.164.035
21/12/2022	136.839.091	0	10.463.991	15.163.035

5.2 Επεξεργασία δεδομένων

5.2.1 Σύνολο δεδομένων

Αρχικά, για να γίνει μελέτη και πρόβλεψη στη ζήτηση, θα χρειαστεί να υπολογιστεί η συνολική ζήτηση ανά ημέρα. Έτσι, στους παραπάνω πίνακες στο Excel προστίθεται μια στήλη δεξιά με τη συνολική κατανάλωση ανά ημέρα. Τα δεδομένα της στήλης αυτής θα χρησιμοποιηθούν ύστερα στο μοντέλο πρόβλεψης.

Πίνακας 3: Τροποποιημένος πίνακας με την εισαγωγή της στήλης συνόλου στο παράδειγμα για τα τέσσερα σημεία εισόδου, όπου στο κάθε ένα καταγράφεται η ποσότητα παράδοσης του φυσικού αερίου σε κιλοβατώρες (kWh) και σε θερμοκρασία αναφοράς καύσης 25 °C.

Ημερομηνία / Date	Σχετικά Σημεία Εισόδου / Relative Entry Points				
	Ποσότητα Παράδοσης Φ.Α. / N.G. Delivery Quantity				
	(kWh / Θερμοκρασία Αναφοράς Καύσης 25°C) / (kWh / Combustion Reference Temperature 25°C)				
	ΑΓΙΑ ΤΡΙΑΔΑ	ΣΙΔΗΡΟΚΑΣΤΡΟ	ΚΗΠΟΙ	ΝΕΑ ΜΕΣΗΜΒΡΙΑ	ΣΥΝΟΛΟ
29/11/2022	164.784.773	6.232.110	10.458.599	22.675.297	181.475.482,000
30/11/2022	175.518.768	32.379.735	10.461.169	19.705.394	218.359.672,000
1/12/2022	166.614.018	49.568.137	10.451.457	14.064.378	226.633.612,000
2/12/2022	158.293.991	35.895.017	10.462.710	13.394.730	204.651.718,000
3/12/2022	130.960.207	44.756.583	10.606.759	13.401.944	186.323.549,000
4/12/2022	129.901.851	42.531.542	10.517.066	13.436.568	182.950.459,000
5/12/2022	168.966.620	57.556.350	10.461.247	13.387.067	236.984.217,000
6/12/2022	136.313.228	71.162.592	10.449.215	13.658.508	217.925.035,000
7/12/2022	150.305.776	51.633.201	10.460.898	13.660.360	212.399.875,000
8/12/2022	127.653.491	49.026.140	10.454.835	13.664.440	187.134.466,000
9/12/2022	112.694.605	42.669.034	5.004.338	8.820.613	160.367.977,000
29/11/2022	164.784.773	6.232.110	10.458.599	22.675.297	99.366.559,000
30/11/2022	175.518.768	32.379.735	10.461.169	19.705.394	93.852.180,000
1/12/2022	166.614.018	49.568.137	10.451.457	14.064.378	190.641.322,000
2/12/2022	158.293.991	35.895.017	10.462.710	13.394.730	210.421.578,000
3/12/2022	130.960.207	44.756.583	10.606.759	13.401.944	200.346.394,000
4/12/2022	129.901.851	42.531.542	10.517.066	13.436.568	171.743.070,000
5/12/2022	168.966.620	57.556.350	10.461.247	13.387.067	163.197.446,000
6/12/2022	136.313.228	71.162.592	10.449.215	13.658.508	129.519.273,000
7/12/2022	150.305.776	51.633.201	10.460.898	13.660.360	115.785.033,000
8/12/2022	127.653.491	49.026.140	10.454.835	13.664.440	138.343.600,000
9/12/2022	112.694.605	42.669.034	5.004.338	8.820.613	144.615.031,000
10/12/2022	82.917.159	16.449.400	0	8.709.176	147.303.082,000
11/12/2022	72.598.217	21.253.963	0	8.676.079	181.475.482,000
12/12/2022	151.157.655	39.483.667	0	8.680.700	218.359.672,000
13/12/2022	145.051.758	54.899.920	10.469.900	8.670.963	226.633.612,000
14/12/2022	127.019.783	62.876.677	10.449.934	8.702.910	204.651.718,000
15/12/2022	118.837.474	47.900.421	5.005.175	8.703.240	186.323.549,000
16/12/2022	141.448.125	16.739.865	5.009.456	8.703.047	182.950.459,000
17/12/2022	124.514.531	0	5.004.742	7.299.663	236.984.217,000
18/12/2022	110.776.997	0	5.008.036	8.162.809	217.925.035,000
19/12/2022	127.879.735	0	10.463.865	9.456.564	212.399.875,000
20/12/2022	134.154.258	0	10.460.773	15.164.035	187.134.466,000
21/12/2022	136.839.091	0	10.463.991	15.163.035	160.367.977,000

Όπως προαναφέρθηκε, τα δεδομένα διαβάζονται αρχικά από την καθορισμένη στήλη του αρχικού έγγραφου στο Excel ("G6:G5484") με το συνολικό ποσό των σημείων εισόδου και αποθηκεύονται στη μεταβλητή με το όνομα "computer". Στη συνέχεια, με χρήση της εντολής plot, η οποία αποτελεί τη βασική εντολή για την κατασκευή γραφημάτων, σχεδιάζεται η χρονοσειρά της εισαγωγής του φυσικού αερίου στην Ελλάδα, από την 1^η Ιανουαρίου 2008 έως και την 31^η Δεκεμβρίου 2022. Για τη σαφέστερη αναπαράσταση των δεδομένων, ρυθμίζονται διάφορες παράμετροι, όπως ο καθορισμός των σημείων όπου αλλάζουν τα έτη.

Όλα τα δεδομένα που διαβάζονται από το αρχείο και συνθέτουν το σύνολο δεδομένων μετατράπηκαν σε κανονικοποιημένα. Η διαδικασία της κανονικοποίησης κρίνεται απαραίτητη καθώς οι τιμές μέτρησης θα πρέπει να έχουν το ίδιο εύρος τιμών για την ομαλότερη λειτουργία του κώδικα. Με την εφαρμογή της κανονικοποίησης και της κατάλληλης κλίμακας δεδομένων η εκπαίδευσης θα δώσει αργότερα εγκυρότερα αποτελέσματα και πραγματοποιείται ακριβέστερος υπολογισμός των συναρτήσεων μεταφοράς. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, ο αλγόριθμος που χρησιμοποιήθηκε για την κανονικοποίηση δεδομένων είναι ο Min-Max, σύμφωνα με την παρακάτω μαθηματική εξίσωση:

$$x_i^{(new)} = \frac{x_i - x^{(min)}}{x^{(max)} - x^{(min)}}, \forall i = 1, 2, \dots, N$$

όπου $x^{(new)}$ είναι η κανονικοποιημένη τιμή της μεταβλητής x και $x^{(min)}$ και $x^{(max)}$ είναι, αντίστοιχα, οι ελάχιστες και μέγιστες τιμές της σχετικής μεταβλητής x .

5.2.2 Εκπαίδευση και έλεγχος δεδομένων

Ακολουθεί η διαίρεση του συνόλου δεδομένων σε υποσύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου. Το N2 αντιπροσωπεύει το μήκος του συνόλου δεδομένων, καθώς όμως στην έκφραση $(N2/5)*4$ η διαίρεση δεν είναι ακριβής, χρησιμοποιείται η εντολή "floor division" και στρογγυλοποιείται το αποτέλεσμα προς τα κάτω στον πλησιέστερο ακέραιο. Έτσι, το 80% περίπου των δεδομένων εκχωρείται στο υποσύνολο εκπαίδευσης (tr_data), ενώ το υπόλοιπο 20% αποτελεί το υποσύνολο ελέγχου (ch_data). Αυτή η κατάτμηση διασφαλίζει ότι το μοντέλο εκπαιδεύεται σε ένα αρκετά μεγάλο σύνολο δεδομένων, ενώ παράλληλα περιέχει ένα τμήμα για την αξιολόγηση της απόδοσης του μοντέλου.

Για τη διευκόλυνση της εκπαίδευσης και του ελέγχου των δεδομένων, τα δεδομένα μετατοπίζονται κατά περιόδους, σύμφωνα με τους κανόνες υστέρησης των χρονοσειρών που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 3.3. Ειδικότερα, τα χαρακτηριστικά με υστέρηση για το υποσύνολο εκπαίδευσης δηλώνονται ως co, co1, co2 ενώ για το υποσύνολο ελέγχου ως co3a, co3 και co4. Χρησιμοποιώντας τα χαρακτηριστικά αυτά, μπορούν να αποτυπωθούν χρονικές εξαρτήσεις και μη γραμμικά μοτίβα που είναι εγγενή στις χρονοσειρές, δίνοντας στο μοντέλο την ικανότητα να προβλέπει με μεγαλύτερη ακρίβεια, καθώς ενσωματώνει τη δυναμική του χρόνου.

Αφού ενταχθούν οι υστερήσεις, δημιουργούνται διαγράμματα για την οπτικοποίηση τόσο των δεδομένων εκπαίδευσης όσο και των δεδομένων ελέγχου, όπως γραφικές αναπαραστάσεις χρονοσειρών και διαγράμματα διασποράς. Η εκπαίδευση του ANFIS συνεχίζει χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση genfis1 για τη δημιουργία του ασαφούς

συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων (FIS) ενώ χρησιμοποιείται η συνάρτηση anfis για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων και τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων του FIS.

5.2.3 Δοκιμές παραμέτρων

Καθώς οι παράμετροι του μοντέλου όπως το μέγεθος βήματος (ss), οι εποχές (epoch_n), αλλά και ο αριθμός (mf_n) και το είδος των συναρτήσεων συμμετοχής (mf_type) καθορίζουν την ακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης, πραγματοποιούνται δοκιμές για τη μείωση του σφάλματος RMSE. Συγκεκριμένα, αρχικά τέθηκαν οι παράμετροι n=2 (mf_n=2), μέγεθος βήματος 0.1 (ss=0.1), εποχές = 5 (epochs=5) και συνάρτηση συμμετοχής γενικευμένη καμπανοειδή (gbellmf), και αφού καταγράφηκε το σφάλμα RMSE, έγινε η δοκιμή 10, 100, και 1000 εποχές με την ίδια συνάρτηση συμμετοχής. Στη συνέχεια, πραγματοποιήθηκε η ίδια διαδικασία, δοκιμάζοντας διαδοχικά για epoch_n=5, 10, 100 και 1000, για τις συναρτήσεις συμμετοχής gaussmf και gauss2mf (γκουουσιανή συνάρτηση συμμετοχής), trimf (συνάρτηση συμμετοχής τριγωνικής μορφής), trapmf (τραπεζοειδής συνάρτηση συμμετοχής) και pimgf (συνάρτηση συμμετοχής σχήματος Π), καταγράφοντας πάντα την τιμή του RMSE.

5.2.3 Μοντέλα ANFIS, AR και ARMA με τα σφάλματα και μετέπειτα αξιολόγηση

Το πρόγραμμα έπειτα σχεδιάζει τις καμπύλες σφαλμάτων, τις αρχικές και τελικές συναρτήσεις συμμετοχής για τις μεταβλητές εισόδου και αξιολογεί το μοντέλο εκπαίδευσης ANFIS, εμφανίζοντας στο τέλος σε διαγράμματα τα αποτελέσματα. Μετά την εκπαίδευση, το σενάριο αξιολογεί την απόδοση του μοντέλου εκπαίδευσης ANFIS. Για την αξιολόγηση αυτή χρησιμοποιείται το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE), η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (RMSE), το μέσο απόλυτο σφάλμα (MAE) και το μέσο απόλυτο ποσοστό σφάλματος (MAPE). Το κάθε ένα από τα παραπάνω συμβάλλει διαφορετικά στον υπολογισμό της προγνωστικής ακρίβειας του μοντέλου, μετρώντας την απόκλιση της πρόβλεψης με τις πραγματικές τιμές. Οι μαθηματικές εξισώσεις των στατιστικών δεικτών περιγράφονται παρακάτω.

1. Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (MSE):

$$MSE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (Z(t) - X(t))^2$$

2. Ρίζα του Μέσου Τετραγωνικού Σφάλματος (RMSE)

$$RMSE = \sqrt{MSE}$$

3. Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE)

$$MAE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T |Z(t) - X(t)|$$

4. Μέσο Απόλυτο Ποσοστό Σφάλματος (MAPE).

$$MAPE = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left| \frac{Z(t) - X(t)}{Z(t)} \right|$$

όπου $X(t)$ είναι η προβλεπόμενη τιμή του NG στην t -η επανάληψη, και $Z(t)$ είναι η πραγματική τιμή του NG στην t -η επανάληψη, $t = 1, \dots, T$, όπου T είναι η αριθμός εγγραφών δοκιμών.

Συγκεντρώνοντας αυτές τις μετρήσεις σε διανύσματα, ο κώδικας επιτρέπει μια ολοκληρωμένη σύγκριση της απόδοσης των μοντέλων. Συγκεκριμένα, το διάνυσμα MSE περιλαμβάνει τις τιμές του μέσου τετραγώνου σφάλματος για τα μοντέλα ANFIS, AR και ARMA, δείχνοντας τον τρόπο με τον οποίο κάθε μοντέλο χειρίζεται τη διακύμανση των σφαλμάτων. Το διάνυσμα RMSE παρέχει εικόνα για τη συνολική ακρίβεια των μοντέλων εστιάζοντας σε σημαντικές αποκλίσεις. Το διάνυσμα MAE δείχνει το μέσο μέγεθος των σφαλμάτων και το διάνυσμα MAPE προσφέρει μια σύγκριση με βάση το ποσοστό.

Αξίζει να σημειωθεί ότι για τη σύγκριση των πραγματικών τιμών με τις προβλεπόμενες, εμφανίστηκαν αρχικά οι τελευταίες 50 τιμές και τροποποιήθηκε ο κώδικας ούτως ώστε να επιτραπεί η εμφάνιση των τελευταίων 1000 τιμών. Στο τέλος δημιουργούνται το Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο AR και το Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο Κινητού Μέσου ARMA, όπου γίνονται οι προβλέψεις στις τιμές, δημιουργούνται γραφήματα σύγκρισης και υπολογίζονται τα σφάλματα.

6. Αποτελέσματα εφαρμογής του μοντέλου ANFIS

Λαμβάνοντας υπόψη τον κώδικα και τα βήματα που εκτελέστηκαν στο προηγούμενο κεφάλαιο, το αρχικό σύνολο δεδομένων χωρίζεται σε υποσύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου, με το 80% των δεδομένων να χρησιμοποιείται για εκπαίδευση και το υπόλοιπο 20% για έλεγχο, ώστε να διασφαλιστεί ότι το μοντέλο εκπαιδεύεται επαρκώς και αξιολογείται σωστά. Οι παράμετροι του μοντέλου, όπως το μέγεθος βήματος (ss), οι εποχές ($epoch_n$), και ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής (mf_n), ρυθμίζονται για τη μείωση του σφάλματος RMSE, με διαδοχικές δοκιμές για διαφορετικές τιμές των παραμέτρων και για διαφορετικούς τύπους συναρτήσεων συμμετοχής. Τα αποτελέσματα των δοκιμών αυτών εμφανίζονται στον συγκεντρωτικούς Πίνακες 4, 5, 6 και 7.

Πίνακας 4: Αποτελέσματα για το RMSE, με μέγεθος βήματος 0,01 ($ss=0,01$), 2 συναρτήσεις μέλους ($mf_n=2$), δοκιμάζοντας για 5, 10, 100 και 1000 εποχές και διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής.

ss=0.01 mf_n=2				
Συνάρτηση συμμετοχής	epoch_n=5	epoch_n=10	epoch_n=100	epoch_n=1000
	RMSE			
gbellmf	0.018264	0.018358	0.019086	0.019373
trimf	0.021244	0.019931	0.019834	0.019986
gauss2mf	0.018237	0.018587	0.018980	0.020627
gaussmf	0.018610	0.018680	0.019617	0.019940
trapmf	0.018166	0.018413	0.018944	0.018945
pimf	<u>0.017911</u>	0.017970	0.018816	0.018816

Πίνακας 5: Αποτελέσματα για το RMSE , με μέγεθος βήματος 0,01 ($ss=0,01$), 3 συναρτήσεις μέλους ($mf_n=3$), δοκιμάζοντας για 5,10,100 και 1000 εποχές και διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής.

ss=0.01 mf_n=3				
Συνάρτηση συμμετοχής	epoch_n=5	epoch_n=10	epoch_n=100	epoch_n=1000
	RMSE			
gbellmf	0.020912	0.021289	0.022197	0.022451
trimf	0.023843	0.033818	0.026363	0.026341
gauss2mf	0.025715	0.025206	0.024666	0.025185
gaussmf	0.021552	0.021620	0.022668	0.022465
trapmf	0.019314	0.019455	0.019901	0.019914
pimf	0.018969	0.018993	0.019302	0.019302

Πίνακας 6: Αποτελέσματα για το RMSE , με μέγεθος βήματος 0,01 ($ss=0,01$), 4 συναρτήσεις μέλους ($mf_n=4$), δοκιμάζοντας για 5,10,100 και 1000 εποχές και διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής.

ss=0.01 mf_n=4				
Συνάρτηση συμμετοχής	epoch_n=5	epoch_n=10	epoch_n=100	epoch_n=1000
	RMSE			
gbellmf	0.037560	0.030522	0.024980	0.024464
trimf	0.023152	0.024645	0.022450	0.022609
gauss2mf	0.079604	0.055153	0.067305	0.068603
gaussmf	0.028536	0.027997	0.028493	6.725867
trapmf	0.020274	0.021047	0.021322	0.021349
pimf	0.020174	0.020280	0.037415	0.037415

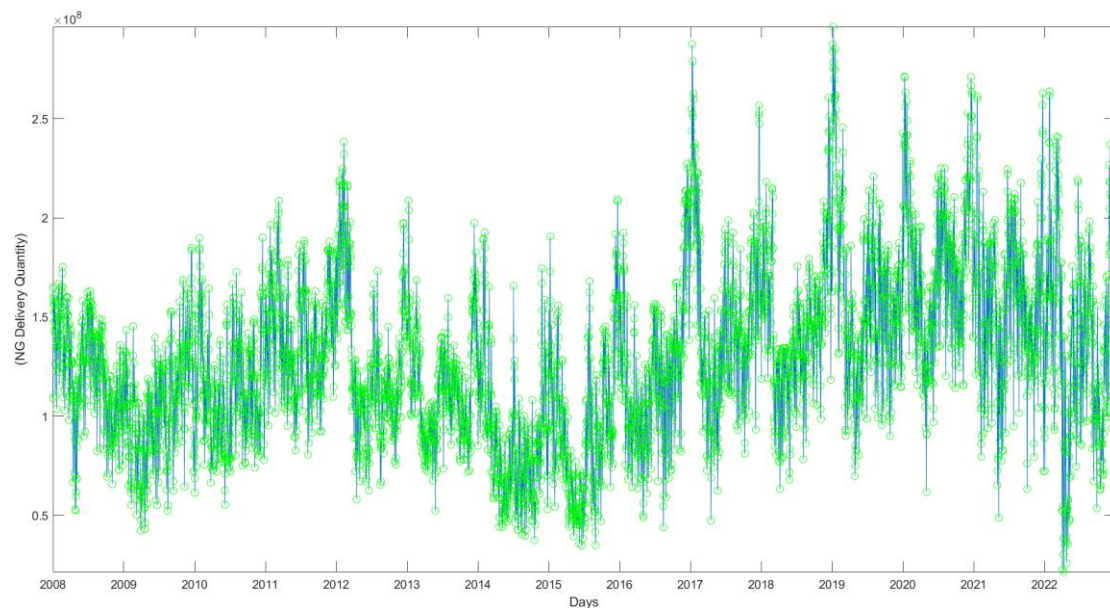
Πίνακας 7: Αποτελέσματα για το RMSE , με μέγεθος βήματος 0,01 ($ss=0,01$), 5 συναρτήσεις μέλους ($mf_n=5$), δοκιμάζοντας για 5,10,100 και 1000 εποχές και διαφορετικές συναρτήσεις συμμετοχής.

ss=0.01 mf_n=5				
Συνάρτηση συμμετοχής	epoch_n=5	epoch_n=10	epoch_n=100	epoch_n=1000
	RMSE			
gbellmf	0.025586	0.026863	0.029657	0.030317
trimf	0.024507	0.025436	0.026673	0.026903
gauss2mf	0.028379	0.036975	0.075337	0.056201

gaussmf	0.030562	0.029287	0.033908	0.031614
trapmf	0.036571	0.028704	-	-
pimf	0.154907	0.204540	0.027011	0.027011

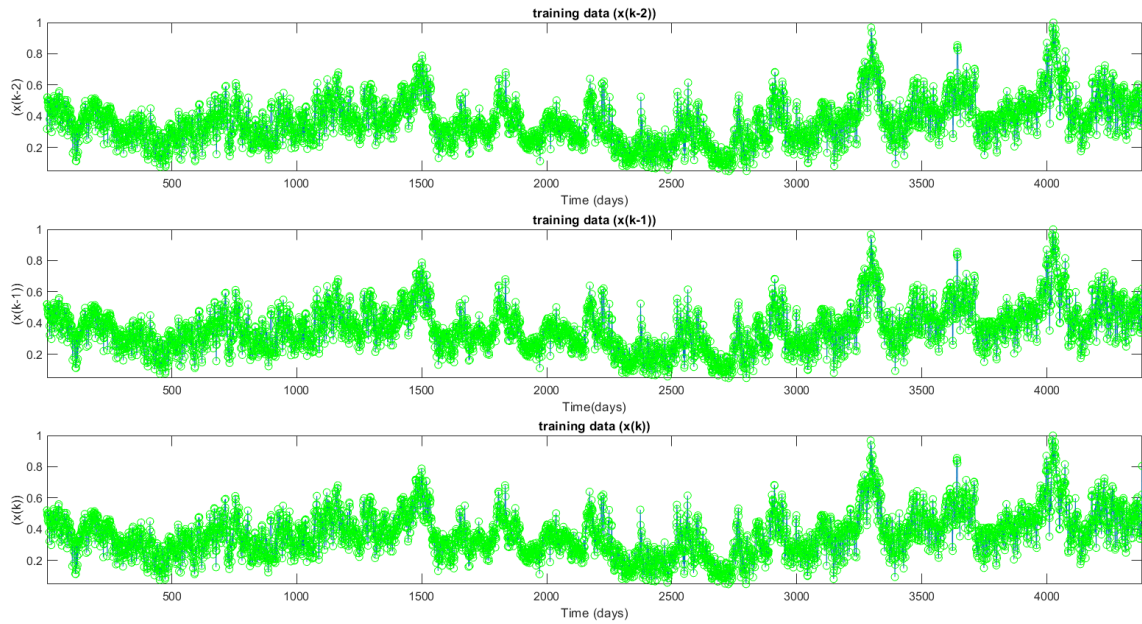
Όπως φαίνεται και από τους παραπάνω πίνακες, το ελάχιστο RMSE, δηλαδή $RMSE=0.017911$ επιτυγχάνεται για μέγεθος βήματος 0,01 ($ss=0,01$), με δυο συναρτήσεις μέλους ($mf_n=2$), 5 εποχές ($epoch_n=5$) και συνάρτηση συμμετοχής σχήματος Π ($pimf$). Συνεπώς, οι συγκεκριμένες παράμετροι με τη συνάρτηση συμμετοχής $pimf$ ελαχιστοποιούν την απόκλιση μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών, καθώς χαμηλότερο RMSE σημαίνει υψηλότερη προγνωστική ακρίβεια.

Με την εκτέλεση του κώδικα, αρχικά εμφανίζεται το Σχήμα 1 το οποίο παρουσιάζει τη χρονοσειρά της ημερήσιας εισαγωγής του φυσικού αερίου στην Ελλάδα από την 1^η Ιανουαρίου 2008 έως την 31^η Δεκεμβρίου 2022. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει τις ημέρες, έχοντας προγραμματιστεί ούτως ώστε να δείχνει τα έτη προς διευκόλυνση του αναγνώστη, ενώ ο άξονας y την ποσότητα του ΦΑ σε κιλοβατώρες. Οι πράσινοι κύκλοι επισημαίνουν τα μεμονωμένα σημεία δεδομένων και η γραμμή που τα συνδέει δείχνει την τάση με την πάροδο του χρόνου.



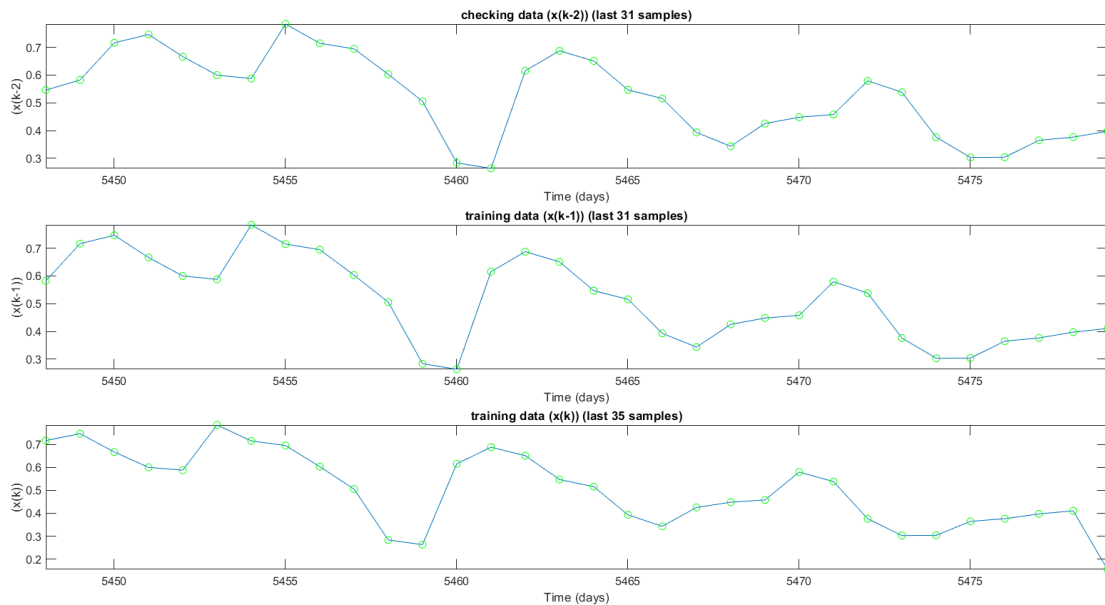
Σχήμα 1: Ημερήσια χρονολογική σειρά της εισαγωγής φυσικού αερίου στην Ελλάδα (2008-2022).

Έπειτα το πρόγραμμα εμφανίζει την εικόνα 13 σχήμα (...), το οποίο περιέχει τρεις γραφικές παραστάσεις με χρονοσειρές για τις μεταβλητές εισόδου που χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση. Στο πρώτο σχήμα αναπαρίστανται οι τιμές εισόδου $x(k-2)$, δηλαδή της δεύτερης μεταβλητής με υστέρηση, σε σχέση με το χρόνο (αριθμός ημερών). Στο μεσαίο σχήμα εμφανίζονται οι τιμές εισόδου $x(k-1)$, που αντιπροσωπεύουν την πρώτη μεταβλητή με υστέρηση, σε σχέση με το χρόνο. Στο τελευταίο γράφημα του σχήματος (...) παρουσιάζονται οι τιμές εκπαίδευσης $x(k)$.



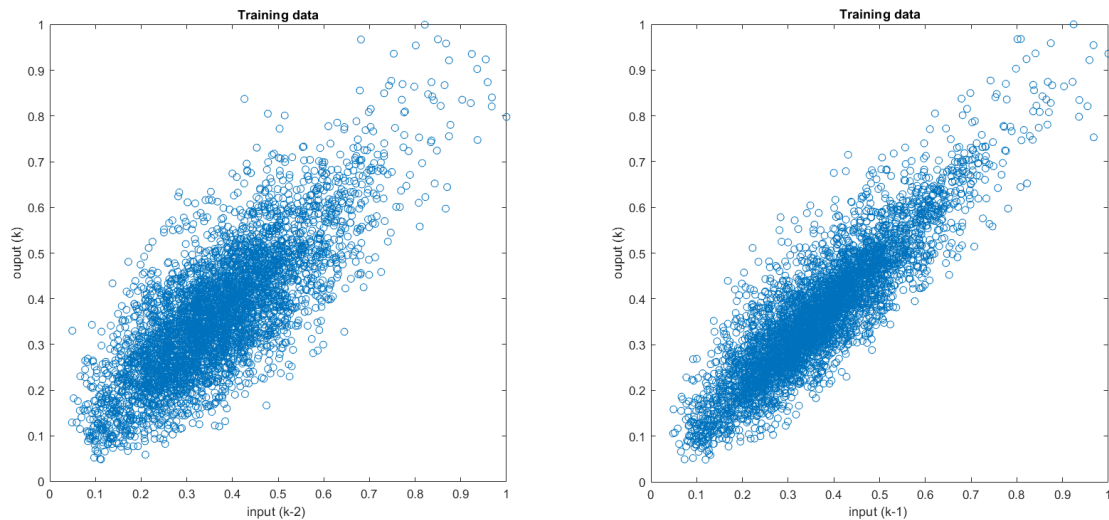
Σχήμα 2: Χρονοσειρά με τις μεταβλητές εισόδου που χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση (υποσύνολο εκπαίδευσης 80%).

Ομοίως εμφανίζεται και το Σχήμα 3 με τις μεταβλητές εισόδου που χρησιμοποιούνται στην εκπαίδευση. Στην πρώτη γραφική παράσταση εμφανίζονται οι τιμές εισόδου $x(k-2)$, δηλαδή της δεύτερης μεταβλητής με υστέρηση, στη δεύτερη οι τιμές εισόδου $x(k-1)$, δηλαδή της πρώτης μεταβλητής με υστέρηση, ενώ στην τελευταία παρουσιάζονται οι τιμές για τα δεδομένα ελέγχου.



Σχήμα 3: Χρονοσειρά με τις μεταβλητές εισόδου που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο (υποσύνολο ελέγχου 20%). Εδώ εμφανίζονται τα τελευταία 31 δείγματα.

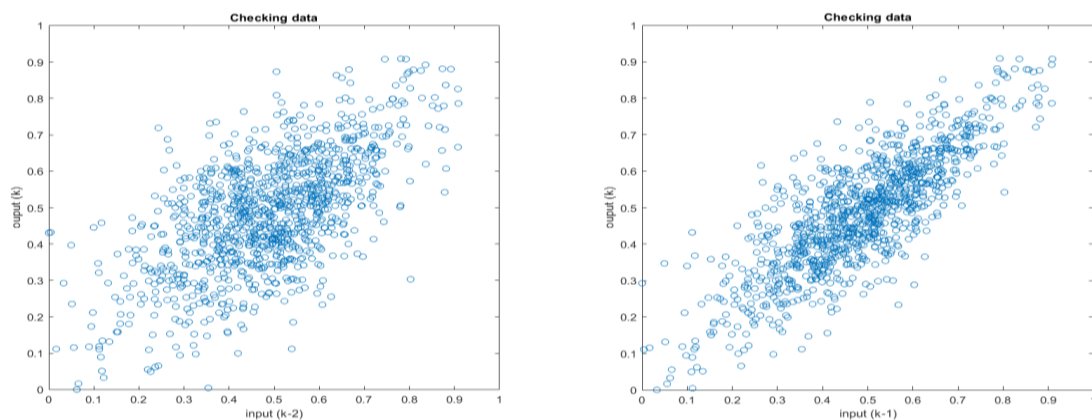
Στη συνέχεια το πρόγραμμα εμφανίζει τα Σχήματα 4 και 5 τα οποία αποτελούν γραφήματα διασποράς των δεδομένων εκπαίδευσης και ελέγχου αντίστοιχα. Στο Σχήμα 4 απεικονίζεται η σχέση μεταξύ των δεδομένων της εισόδου με καθυστέρηση και της τρέχουσας τιμής και η σχέση μεταξύ της πρώτης εισόδου με καθυστέρηση και της τρέχουσας τιμής.



Σχήμα 4: Γράφημα διασποράς δεδομένων εκπαίδευσης.

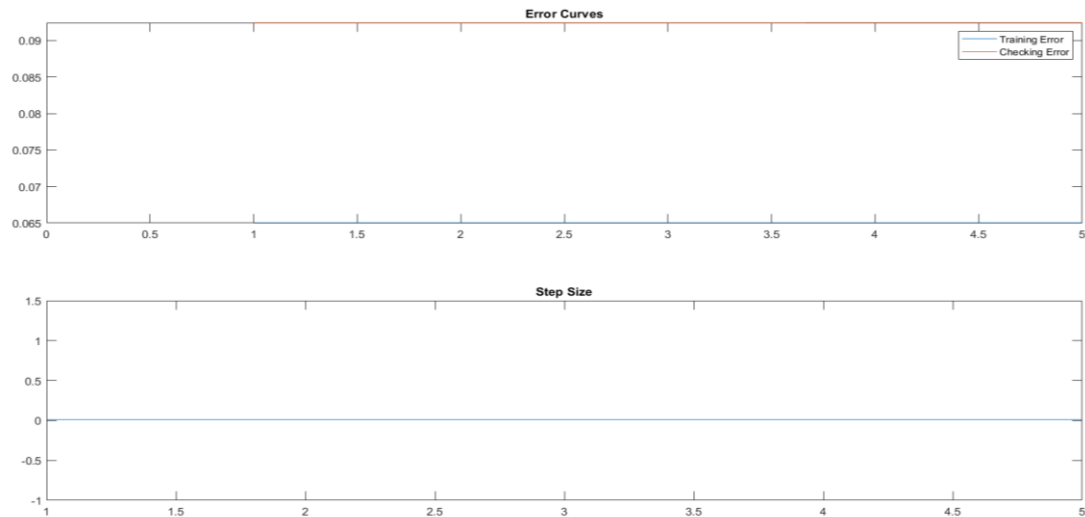
Παρόλο που τα σημεία είναι ελαφρώς διασκορπισμένα, και στις δύο γραφικές παραστάσεις, υπάρχει μια εμφανής ανοδική κλίση, η οποία υποδηλώνει θετική συσχέτιση. Φαίνεται λοιπόν ότι τα σημεία δεν είναι τυχαία διασκορπισμένα σε μια οριζόντια ή κάθετη ζώνη, αλλά ακολουθούν μια διαγώνια γραμμή η οποία κινείται προς τα πάνω από αριστερά προς τα δεξιά. Συνεπώς, η έξοδος $y(k)$ φαίνεται να έχει θετική συσχέτιση με τα $x(k-2)$ και $x(k-1)$.

Παρόμοια με τα δεδομένα εκπαίδευσης, στα δεδομένα ελέγχου υπάρχει θετική συσχέτιση μεταξύ των εισόδων $x(k-2)$ και $x(k-1)$ και της εξόδου $y(k)$. Ωστόσο, τα σημεία εμφανίζονται ελαφρώς πιο διασκορπισμένα, γεγονός το οποίο υποδηλώνει ότι οι προβλέψεις του μοντέλου για τα νέα δεδομένα (δεδομένα ελέγχου) είναι λιγότερο συνεπείς σε σύγκριση με τα δεδομένα εκπαίδευσης.



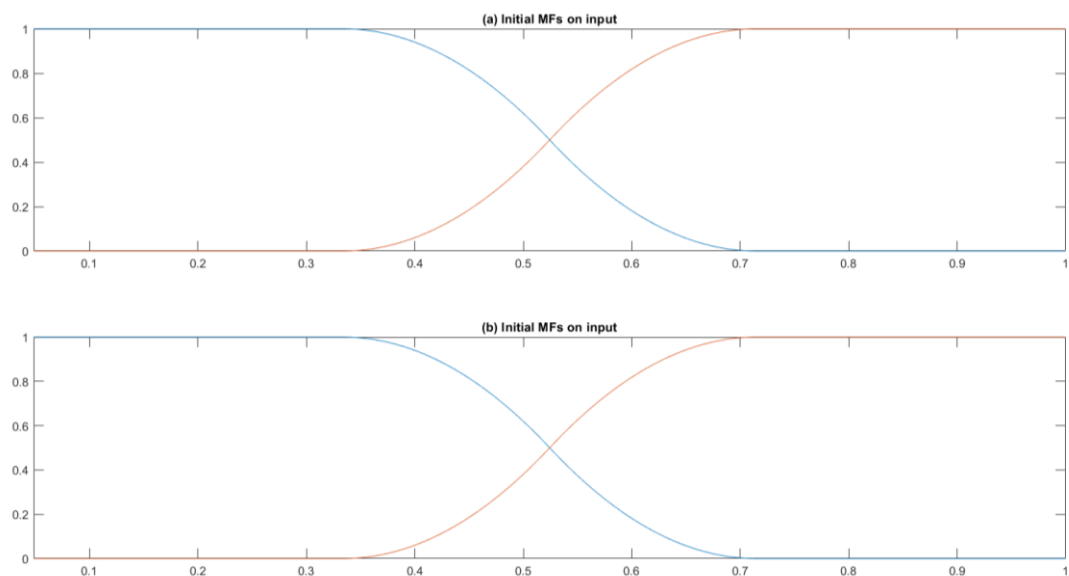
Σχήμα 5: Γράφημα διασποράς δεδομένων ελέγχου.

Ακολουθούν δυο σχήματα τα οποία παρουσιάζουν τις καμπύλες σφάλματος και το μέγεθος του βήματος κατά τη διάρκεια της εκπαιδευτικής διαδικασίας. Στην πρώτη γραφική παράσταση παρουσιάζονται οι καμπύλες σφαλμάτων εκπαίδευσης και ελέγχου. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει τον αριθμό των εποχών, ενώ ο άξονας y αντιπροσωπεύει το μέγεθος του σφάλματος. Η δεύτερη γραφική παράσταση δείχνει το μέγεθος του βήματος που χρησιμοποιείται στη διαδικασία εκπαίδευσης. Εδώ το μέγεθος βήματος υποδεικνύει το ρυθμό μάθησης σε κάθε εποχή.



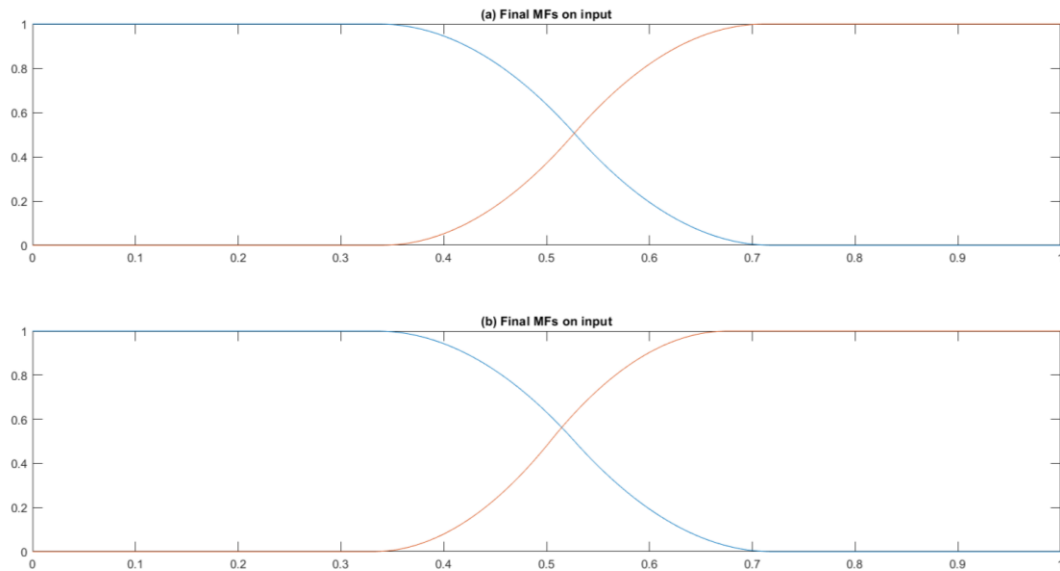
Σχήμα 6: Καμπύλη σφάλματος εκπαίδευσης και το μέγεθος του βήματος για το μοντέλο ANFIS.

Το πρόγραμμα εμφανίζει και τις αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής για τις μεταβλητές εισόδου πριν από την εκπαίδευση του μοντέλου ANFIS. Στο Σχήμα 7 (a) φαίνονται οι αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής για τη μεταβλητή εισόδου, με τον άξονα x να αντιπροσωπεύει την είσοδο, ενώ ο άξονας y αντιπροσωπεύει το βαθμό συμμετοχής. Στο Σχήμα 7 b φαίνονται οι αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής για τη δεύτερη μεταβλητή εισόδου.



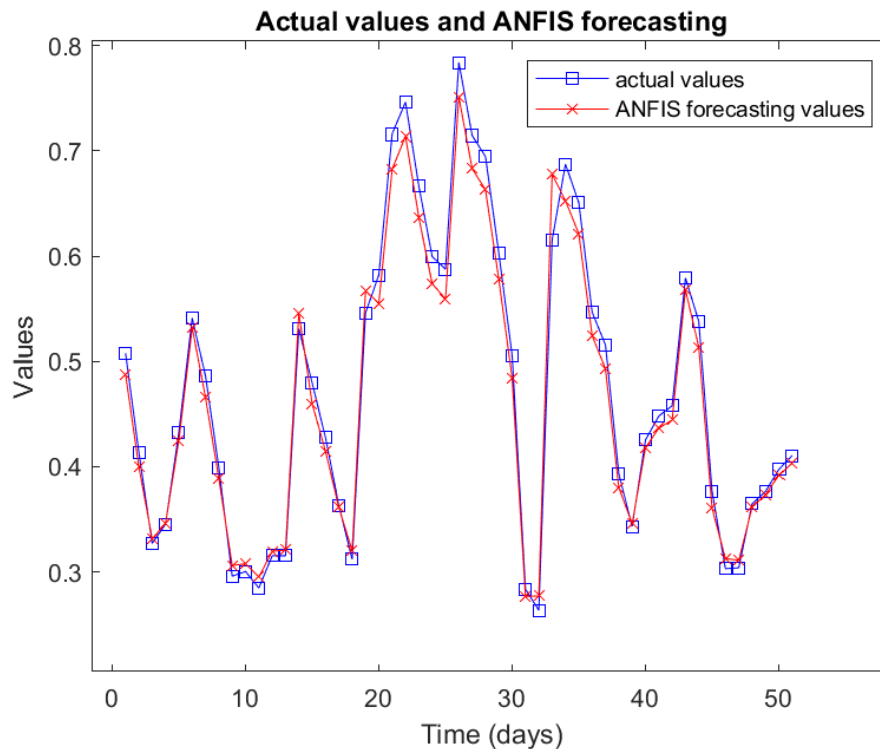
Σχήμα 7: Αρχικές συναρτήσεις συμμετοχής για τις μεταβλητές εισόδου πριν από την εκπαίδευση του μοντέλου ANFIS.

Ομοίως, το πρόγραμμα εμφανίζει και τις τελικές συναρτήσεις συμμετοχής για τις μεταβλητές εισόδου μετά την εκπαίδευση του μοντέλου ANFIS. Ειδικότερα, στο Σχήμα 8 (α) φαίνονται οι τελικές συναρτήσεις συμμετοχής για την πρώτη μεταβλητή εισόδου, ενώ στο σχήμα 7(b) για τη δεύτερη.



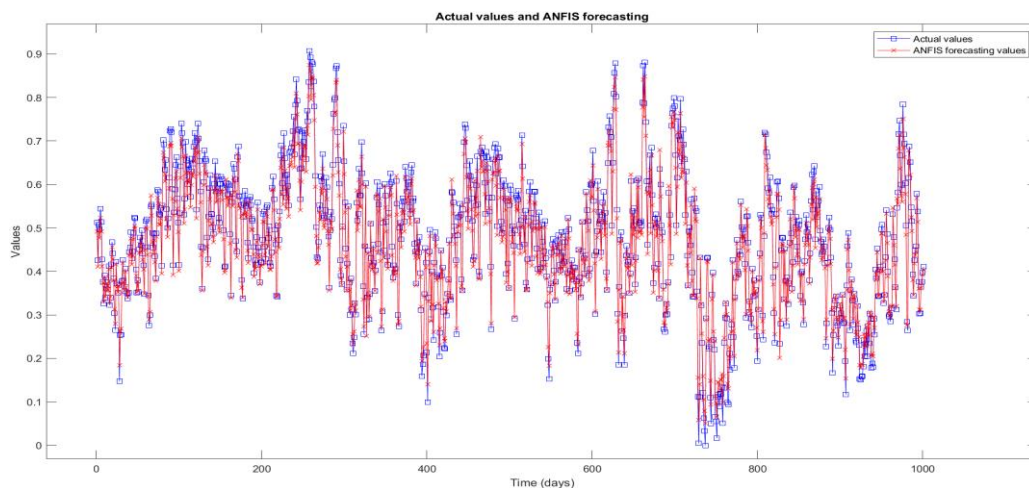
Σχήμα 8: Τελικές συναρτήσεις συμμετοχής για τις μεταβλητές εισόδου πριν από την εκπαίδευση του μοντέλου ANFIS.

Το επόμενο σχήμα που προκύπτει, δηλαδή το Σχήμα 9 συγκρίνει τις πραγματικές τιμές των δεδομένων ελέγχου με τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο ANFIS για τα τελευταία 50 δείγματα. Ο άξονας x αντιπροσωπεύει το χρόνο, ενώ ο άξονας y αντιπροσωπεύει τις τιμές της χρονοσειράς. Τα μπλε τετράγωνα υποδηλώνουν τις πραγματικές τιμές από το σύνολο δεδομένων ελέγχου, ενώ οι κόκκινοι υποδηλώνουν τις προβλεπόμενες τιμές του ANFIS.



Σχήμα 9: Πραγματικές τιμές των δεδομένων ελέγχου σε σύγκριση με τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο ANFIS για τα τελευταία 50 δείγματα.

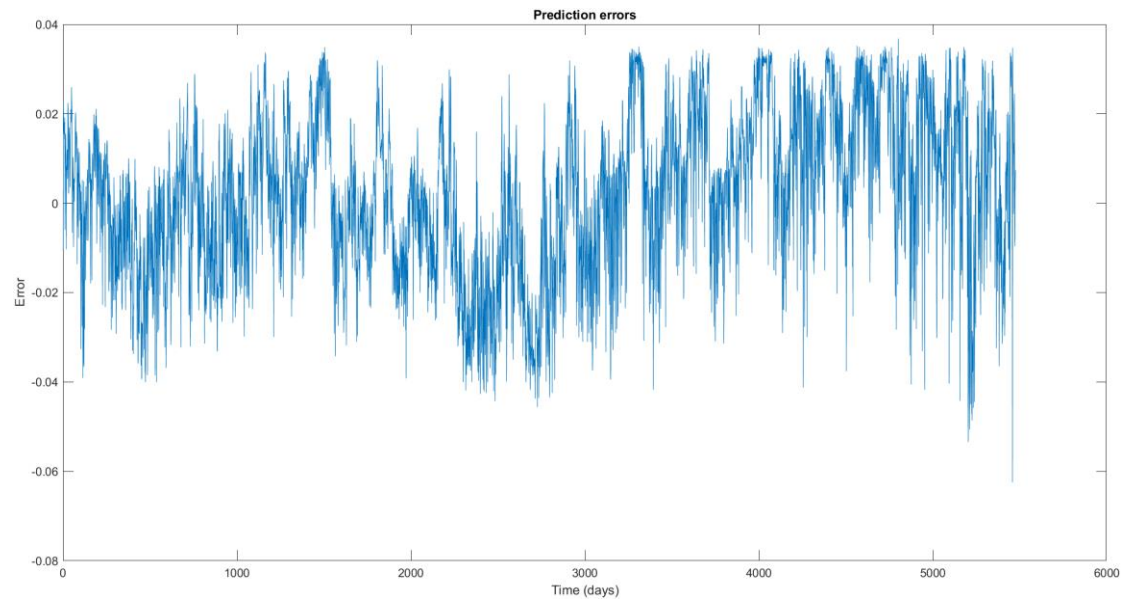
Στο Σχήμα 9 παρατηρείται ευθυγράμμιση των πραγματικών με τις προβλεπόμενες τιμές σε όλη την παρατηρούμενη περίοδο, αποδεικνύοντας έτσι την ακρίβεια του μοντέλου ANFIS. Ίδια οπτική αντιστοιχία παραιτείται και στο Σχήμα 10, όπου εμφανίζονται τα τελευταία 1000 δείγματα.



Σχήμα 10: Πραγματικές τιμές των δεδομένων ελέγχου σε σύγκριση με τις τιμές που προβλέπονται από το μοντέλο ANFIS για τα τελευταία 1000 δείγματα.

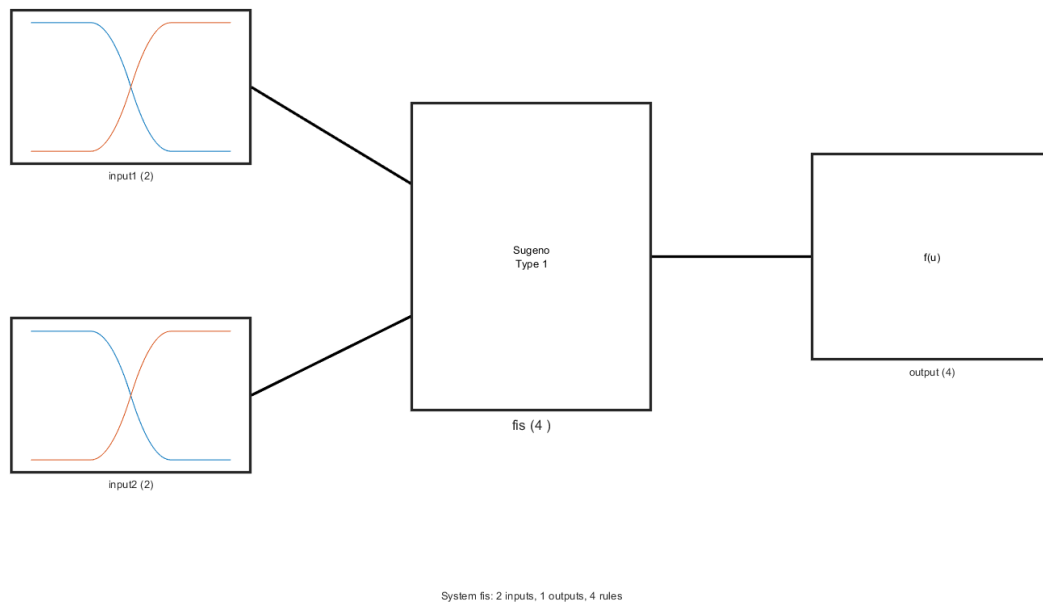
Το Σχήμα 11 απεικονίζει τα σφάλματα πρόβλεψης σε σχέση με το χρόνο. Ο άξονας y αντιπροσωπεύει το σφάλμα, το οποίο υπολογίζεται ως η διαφορά μεταξύ των πραγματικών τιμών και των προβλεπόμενων τιμών, ενώ ο άξονας x τις ημέρες μέτρησης. Στο σχήμα φαίνεται ότι τα σφάλματα επικεντρώνονται γύρω από το μηδέν, υποδεικνύοντας υψηλή πρόβλεψη, αν και υπάρχουν περιστασιακά σημεία κορύφωσης,

υποδηλώνοντας ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου οι προβλέψεις του μοντέλου αποκλίνουν ελάχιστα από τις πραγματικές τιμές.



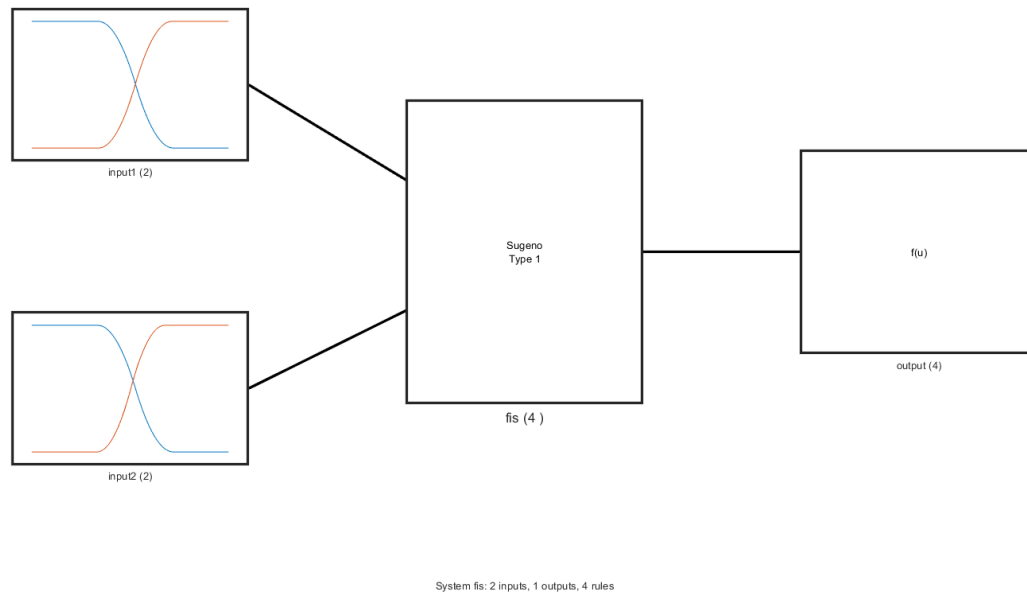
Σχήμα 11: Σφάλματα πρόβλεψης σε σχέση με το χρόνο.

Στο Σχήμα 12 απεικονίζεται η αρχική διαμόρφωση του FIS, που αντιπροσωπεύεται από τις συναρτήσεις συμμετοχής και τις σχετικές παραμέτρους τους, για τα δεδομένα εισόδου.



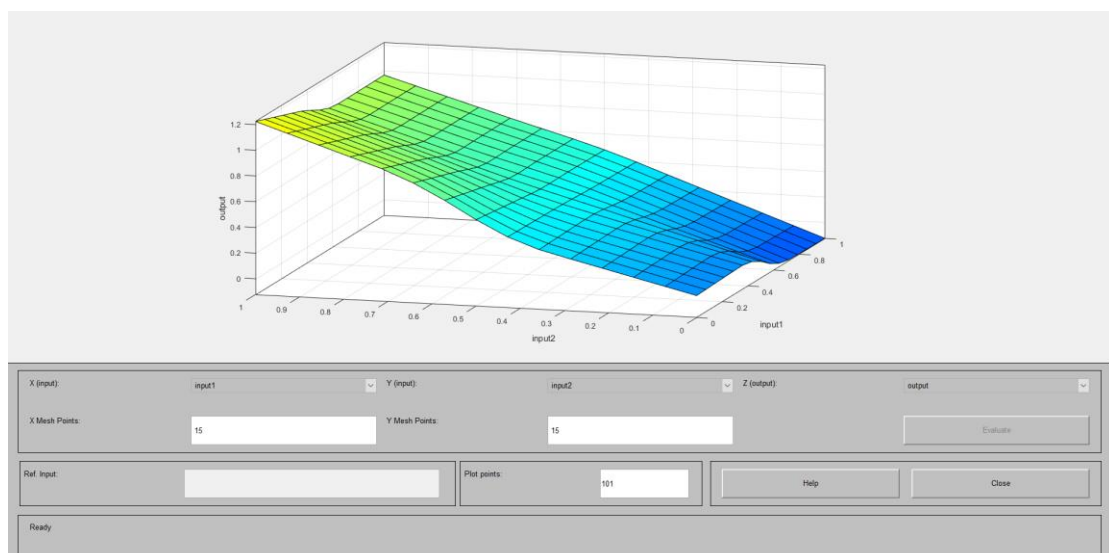
Σχήμα 12: Αρχική διαμόρφωση του συστήματος ασαφούς συμπερασμού (FIS).

Ομοίως, στο σχήμα 70, εμφανίζεται το FIS μετά τη διαδικασία εκπαίδευσης, απεικονίζοντας τις συναρτήσεις συμμετοχής και τις προσαρμοσμένες παραμέτρους.



Σχήμα 13: Διαμόρφωση του συστήματος ασαφούς συμπερασμού (FIS) μετά τη διαδικασία της εκπαίδευσης

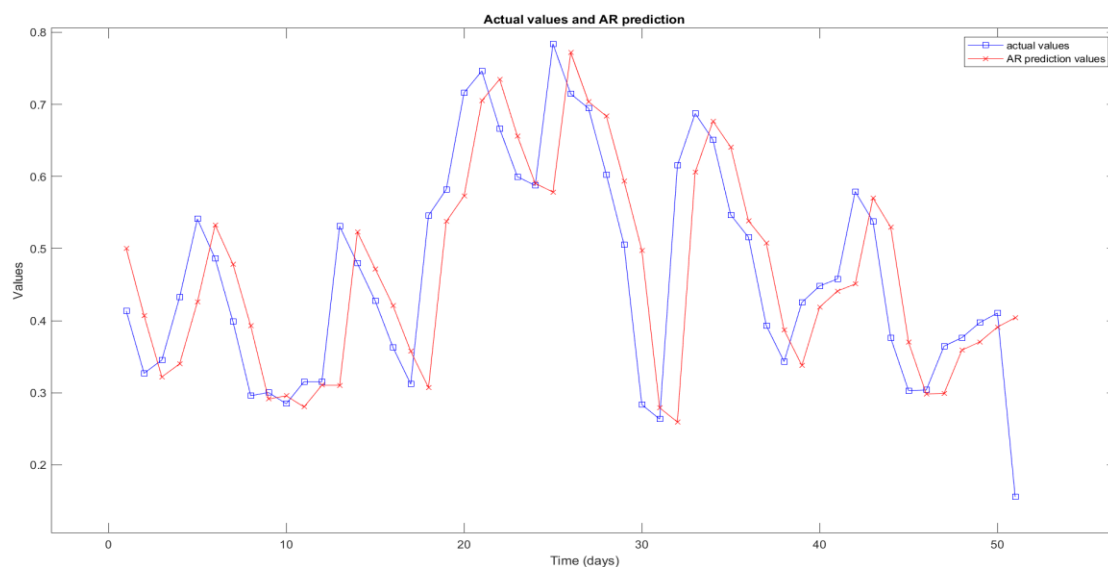
Στο Σχήμα 12 παρουσιάζεται ένα τρισδιάστατο γράφημα επιφάνειας το οποίο δείχνει τον τρόπο με τον οποίο αλλάζει η μεταβλητή εξόδου σε σχέση με τις δύο μεταβλητές εισόδου. Η επιφάνεια φαίνεται γενικά λεία, με το χρώμα της διαβαθμίζεται από κίτρινο σε μπλε. Το γεγονός αυτό υποδεικνύει διαφορετικά εύρη τιμών εξόδου, καθώς το κίτρινο αντιπροσωπεύει υψηλότερες τιμές εξόδου, ενώ το μπλε αντιπροσωπεύει χαμηλότερες τιμές εξόδου και η λεία επιφάνεια υποδεικνύει μια γραμμική ή πολυωνυμική σχέση.



Σχήμα 14: Τρισδιάστατο γράφημα επιφάνειας για την οπτικοποίηση της σχέσης μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και της μεταβλητής εξόδου στο σύστημα ασαφούς συμπερασμάτων FIS.

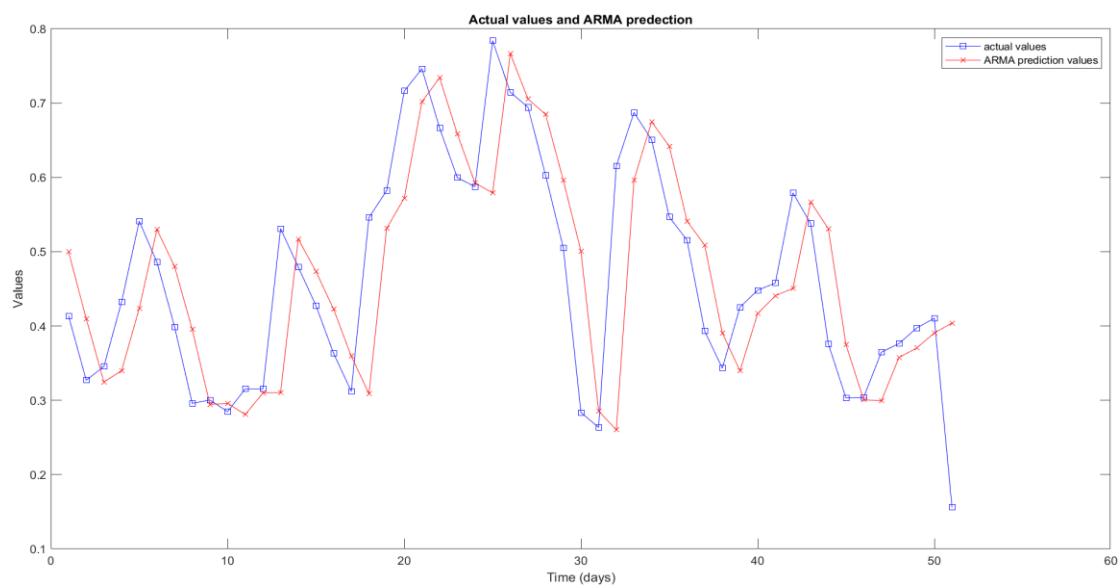
Στο σχήμα 15 απεικονίζεται η χρονοσειρά με τις τελευταίες 50 πραγματικές τιμές εισαγωγής του ΦΑ μαζί με τις προβλεπόμενες τιμές τους από το αυτοπαλίνδρομο

μοντέλο (AR). Όπως φαίνεται και στην εικόνα, οι τιμές της πρόβλεψης εμφανίζονται ελαφρώς προς τα δεξιά, το οποίο αποτελεί άλλωστε χαρακτηριστικό του τρόπου λειτουργίας των μοντέλων AR, καθώς προβλέπουν μελλοντικές τιμές με βάση τις προηγούμενες παρατηρούμενες τιμές. Παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις μεταξύ των τιμών.



Σχήμα 15: Σύγκριση τελευταίων 50 πραγματικών τιμές εισαγωγής του ΦΑ με αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές από το Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο (AR).

Στο Σχήμα 16 απεικονίζεται η χρονοσειρά με τις τελευταίες 50 πραγματικές τιμές εισαγωγής του ΦΑ μαζί με τις προβλεπόμενες τιμές τους από το Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο Κινητού Μέσου (ARMA). Ομοίως με το Σχήμα 15, οι τιμές της πρόβλεψης εμφανίζονται ελαφρώς προς τα δεξιά, το οποίο αποτελεί χαρακτηριστικό των μοντέλων ARMA, ενώ και εδώ όπως προηγουμένως, παρατηρούνται μικρές αποκλίσεις μεταξύ των τιμών.



Σχήμα 16: Σύγκριση τελευταίων 50 πραγματικών τιμές εισαγωγής του ΦΑ με αντίστοιχες προβλεπόμενες τιμές από το Αυτοπαλίνδρομο Μοντέλο Κινητού Μέσου (ARMA).

Το πρόγραμμα χρειάστηκε περίπου 12,63 δευτερόλεπτα για να εκτελεστεί. Ο χρόνος αυτός είναι σχετικά σύντομος και ευθύνεται στον μικρό αριθμό εποχών και συναρτήσεων συμμετοχής. Σε κάθε περίπτωση, η αποτελεσματικότητα του μοντέλου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στα πλαίσια της εφαρμογής του, ειδικά εάν το μοντέλο χρειάζεται να εκτελείται συχνά ή σε μεγαλύτερα σύνολα δεδομένων. Τελικά, το command window του MATLAB επιστρέφει τα παρακάτω στοιχεία:

Πίνακας 8: Συνοψη και διαμόρφωση μοντέλου ANFIS με βήμα 0,01 (ss=0,01), τρεις συναρτήσεις μέλους (mf_n=3), 5 εποχές (epoch_n=5) και συνάρτηση συμμετοχής σχήματος Π (pimf).

ANFIS	
Number of nodes (αριθμός κόμβων)	21
Number of linear parameters (αριθμός γραμμικών παραμέτρων)	12
Number of nonlinear parameters (αριθμός μη γραμμικών παραμέτρων)	16
Total number of parameters (συνολικός αριθμός παραμέτρων)	28
Number of training data pairs (αριθμός ζευγών δεδομένων εκπαίδευσης)	4381
Number of checking data pairs (αριθμός ζευγών δεδομένων ελέγχου)	1094
Number of fuzzy rules (αριθμός κανόνων ασαφούς λογικής)	4

Πίνακας 9: Οι μετρήσεις απόδοσης για τα μοντέλα ANFIS, AR και ARMA με βάση το Μέσο Τετραγωνικό Σφάλμα (MSE), τη Ρίζα του Μέσου του Τετραγώνου του Σφάλματος (RMSE), το Μέσο Απόλυτο Σφάλμα (MAE) και το Μέσο Απόλυτο Ποσοστιαίο Σφάλμα (MAPE).

	ANFIS	AR	ARMA
MSE	0.000320819140778	0.005406133396369	0.005404392170087
RMSE	0.017911424867341	0.073526412916511	0.073514571141286
MAE	0.014796400733872	0.054748435505442	0.054863122736856
MAPE	5.353215725493128	16.493050475270731	16.568734680943624

Με βάση τα στοιχεία του πίνακα, είναι προφανές ότι το μοντέλο ANFIS παρουσιάζει σημαντικά χαμηλότερο MSE (≈ 0.000321), RMSE (≈ 0.017911), MAE (≈ 0.014796) και MAPE (≈ 5.353216) σε σχέση με τα άλλα δυο μοντέλα.

7. Συμπεράσματα και μελλοντικές επεκτάσεις

Στην παρούσα μελέτη προτείνεται η μέθοδος ANFIS για την πρόβλεψη της ζήτησης φυσικού αερίου. Αυτή η προσέγγιση εφαρμόζεται σε ένα σύνολο μετρήσεων για την εισαγωγή του φυσικού αερίου στην Ελλάδα ανά ημέρα, από την 1η Ιανουαρίου 2008 έως και την 31η Δεκεμβρίου 2022, με τα δεδομένα να παρέχονται από τη ΔΕΠΑ Εμπορίας. Μέσα από μια σειρά δοκιμών και επαναλήψεων με χρήση του λογισμικού MATLAB πραγματοποιήθηκε η ανάλυση των δεδομένων και αναδείχθηκαν αποτελέσματα που αφορούν τόσο το μοντέλο ANFIS όσο και την πρόβλεψη της ζήτησης του φυσικού αερίου.

Αρχικά, όπως αναφέρθηκε στο Κεφάλαιο 5, η διαίρεση του συνόλου δεδομένων σε υποσύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου διασφάλισε ότι το μοντέλο εκπαιδεύτηκε σε ένα μεγάλο και αντιπροσωπευτικό δείγμα, επιτρέποντας την αξιολόγηση της απόδοσης. Η χρήση υστερήσεων στα δεδομένα συνέβαλε στην αποτύπωση χρονικών εξαρτήσεων και μη γραμμικών μοτίβων, ενισχύοντας έτσι την ακρίβεια του μοντέλου πρόβλεψης, ενώ η κανονικοποίηση των δεδομένων συνέβαλε στην ομαλή λειτουργία του. Κατά τη διαδικασία εκπαίδευσης του μοντέλου ANFIS, χρησιμοποιήθηκε η συνάρτηση `genfis1` για τη δημιουργία του ασαφούς συστήματος εξαγωγής συμπερασμάτων (FIS) και η συνάρτηση `anfis` για την ελαχιστοποίηση των σφαλμάτων.

Ιδιαίτερη σημασία δόθηκε στη δοκιμή των παραμέτρων, όπως το μέγεθος βήματος (`ss`), οι εποχές (`epoch_n`) και ο αριθμός των συναρτήσεων συμμετοχής (`mf_n`). Το χαμηλότερο RMSE επιτεύχθηκε θέτοντας `ss=0.01`, `mf_n=3` και `epoch_n=5`, με χρήση της συνάρτησης συμμετοχής `rimf`. Συνεπώς, οι συγκεκριμένες τιμές των παραμέτρων φαίνεται να προσφέρουν την καλύτερη απόδοση για την πρόβλεψη της ζήτησης φυσικού αερίου, μειώνοντας σημαντικά τις αποκλίσεις μεταξύ των προβλεπόμενων και των πραγματικών τιμών. Η χαμηλή τιμή του RMSE που προκύπτει (0.017911) αναδεικνύει το μοντέλο ANFIS ως ένα αρκετά ισχυρό εργαλείο για τη διαχείριση της μεταβλητότητας που υπάρχει στα δεδομένα. Συνολικά, το Σχήμα 9 με τη χρονοσειρά των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών του ANFIS οπτικοποιεί την αποτελεσματικότητα και την αξιοπιστία του μοντέλου. Με βάση τις μετρήσεις στα σφάλματα, το μοντέλο ANFIS υπερτερεί τόσο του μοντέλου AR όσο και του μοντέλου ARMA, παρουσιάζοντας σημαντικά χαμηλότερο MSE, RMSE και MAE.

Μέσα από αυτή την εργασία, προβάλλεται η ευελιξία και αποτελεσματικότητα του ANFIS για την πρόβλεψη της ζήτησης του φυσικού αερίου. Στο μέλλον, η μέθοδος μπορεί να ενισχυθεί, ενσωματώνοντας παραμέτρους οι οποίες επηρεάζουν τη ζήτηση φυσικού αερίου, όπως οι καιρικές συνθήκες, ενώ παράλληλα υβριδικά μοντέλα που συνδυάζουν το ANFIS με άλλες μεθόδους ή αλγόριθμους μπορούν να συμβάλλουν στη βελτίωση της πρόβλεψης. Σε κάθε περίπτωση, σε έναν κόσμο όπου ο ενεργειακός τομέας αποτελεί την κινητήρια δύναμη τόσο των οικονομιών παγκοσμίως, καθώς δεν περιορίζεται μόνο στην τροφοδότηση της βιομηχανικής ανάπτυξης, επιτρέποντας έτσι την τεχνολογική εξέλιξη και καινοτομία, αλλά συντηρεί συνολικά τις ανάγκες της καθημερινής ζωής, οι προβλέψεις στον τομέα της ενέργειας είναι απαραίτητες και η βελτίωσή τους μπορεί να εγγυηθεί την προσαρμογή στις συνεχώς μεταβαλλόμενες συνθήκες.

Βιβλιογραφία

Κεφάλαιο 1

Qamber, Isa. (2022). Energy consumption prediction using Petri Nets-ANFIS development technique. Arab Journal of Basic and Applied Sciences. 29. 193-207. 10.1080/25765299.2022.2088050.

Papageorgiou, Konstantinos, Elpiniki I. Papageorgiou, Katarzyna Poczeta, Dionysis Bochtis, and George Stamoulis. 2020. "Forecasting of Day-Ahead Natural Gas Consumption Demand in Greece Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System" Energies 13, no. 9: 2317. <https://doi.org/10.3390/en13092317>

I. Panapakidis and A. Dagoumas, "Day-ahead natural gas demand forecasting based on the combination of wavelet transform and ANFIS/genetic algorithm/neural network model," Energy, vol. 118, no. 1, pp. 231-245, 2017.

Senvar, Ozlem και Ulutagay, Gozde και Turanoğlu Bekar, Ebru. (2016). ANFIS Modeling for Forecasting Oil Consumption of Turkey. Journal of multiple-valued logic and soft computing. 26. 609-624.

Sasan Barak, S. Saeedeh Sadegh, Forecasting energy consumption using ensemble ARIMA–ANFIS hybrid algorithm, International Journal of Electrical Power και Energy Systems, Volume 82, 2016, Pages 92-104, ISSN 0142-0615, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2016.03.012>.

A. Azadeh, M. Zarrin, H. Rahdar Beik, T. Aliheidari Bioki, A neuro-fuzzy algorithm for improved gas consumption forecasting with economic, environmental and IT/IS indicators, Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 133, 2015, Pages 716-739, ISSN 0920-4105, <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2015.07.002>

Rubinstein, Shaya και Goor, Aaron και Rotshtein, Alexander. (2014). Time Series Forecasting of Crude Oil Consumption Using Neuro-Fuzzy Inference. Journal of Industrial and Intelligent Information. 3. 10.12720/jiii.3.2.84-90.

Amin Aramesh, Nader Montazerin, Abbas Ahmadi, A general neural and fuzzy-neural algorithm for natural gas flow prediction in city gate stations, Energy and Buildings, Volume 72, 2014, Pages 73-79, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.12.020>

A. Azadeh, S.M. Asadzadeh, M. Saberi, V. Nadimi, A. Tajvidi, M. Sheikalishahi, A Neuro-fuzzy-stochastic frontier analysis approach for long-term natural gas consumption forecasting and behavior analysis: The cases of Bahrain, Saudi Arabia, Syria, and UAE, Applied Energy, Volume 88, Issue 11, 2011, Pages 3850-3859, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.04.027>

Kaynar, Oguz και Yilmaz, Isik και Demirkoparan, Ferhan. (2010). Forecasting of natural gas consumption with neural network and neuro fuzzy system. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research. 26.

A. Behrouznia, M. Saberi, A. Azadeh, S. M. Asadzadeh and P. Pazhoheshfar, "An adaptive network based fuzzy inference system-fuzzy data envelopment analysis for

gas consumption forecasting and analysis: The case of South America," 2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems, Kuala Lumpur, Malaysia, 2010, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICIAS.2010.5716160.

Cheng, CH., Wei, LY. One step-ahead ANFIS time series model for forecasting electricity loads. Optim Eng 11, 303–317 (2010). <https://doi.org/10.1007/s11081-009-9091-5>

A. Azadeh, S. Asadzadeh and A. Ghanbari, "An adaptive network-based fuzzy inference system for short-term natural gas demand estimation: Uncertain and complex environments," Energy Policy, vol. 38, no. 3, pp. 1529-1536, 2010.

[A. Azadeh, M. Saberi, A. Gitiforouz, Z. Saberi, A hybrid simulation-adaptive network based fuzzy inference system for improvement of electricity consumption estimation, Expert Systems with Applications, Volume 36, Issue 8, 2009, Pages 11108-11117, ISSN 0957-4174, <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.02.081>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409002413>)

Li-Chih Ying, Mei-Chiu Pan, Using adaptive network based fuzzy inference system to forecast regional electricity loads, Energy Conversion and Management, Volume 49, Issue 2, 2008, Pages 205-211, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.015>.

Κεφάλαιο 2

Speight, J.G., 2007. Natural Gas: A Basic Handbook. Gulf Publishing Company, Houston, Texas.

Carroll, J.J., 2010. Acid Gas Injection and Carbon Dioxide Sequestration. John Wiley και Sons Inc., Scrivener publishing LLC., Massachusetts, USA.

Wang, X. και Economides, M., 2013. Advanced natural gas engineering. Advanced Natural Gas Engineering. 1-368.

Faramawy, S., Zaki, T., και Sakr, A.A.-E. (2016). Natural Gas Origin, Composition, and Processing: A Review. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 34, 34-54. doi:10.1016/j.jngse.2016.06.030.

Dembicki, Harry Jr. "Chapter 8 - Basin Modeling." In Practical Petroleum Geochemistry for Exploration and Production, edited by Harry Dembicki Jr., 273-308. Elsevier, 2017. ISBN 9780128033500. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803350-0.00008-8>.

Tissot, B.P., Welte, D.H. (1984). Petroleum Formation and Occurrence. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-87813-8_6

Freedland, R.A., and S. Briggs. "Lipids and Fatty Acids." In A Biochemical Approach to Nutrition. Outline Studies in Biology. Springer, Dordrecht, 1977. https://doi.org/10.1007/978-94-009-5732-9_4.

Fahy, Eoin, Shankar Subramaniam, H. Alex Brown, Christopher K. Glass, Alfred H. Merrill, Robert C. Murphy, Christian R.H. Raetz, David W. Russell, Yousuke Seyama, Walter Shaw, Takao Shimizu, Friedrich Spener, Gerrit van Meer, Michael S. VanNieuwenhze, Stephen H. White, Joseph L. Witztum, and Edward A. Dennis. "A Comprehensive Classification System for Lipids." *Journal of Lipid Research* 46, no. 5 (2005): 839-861. <https://doi.org/10.1194/jlr.E400004-JLR200>.

Ζηλάκος, Κ., Το φυσικό αέριο μπαίνει δυναμικά στη ζωή μας, Βιοτεχνικό Επιμελητήριο Αθηνών, Αθήνα, 2002.

Λέφας, Κ., Εισαγωγή στην τεχνολογία του φυσικού αερίου, Εκδ.ΣΕΛΚΑ-4Μ, Αθήνα, 2004.

Liu, Q., L. Luo, and L. Zheng. "Lignins: Biosynthesis and Biological Functions in Plants." *International Journal of Molecular Sciences* 19, no. 2 (2018): 335. doi: 10.3390/ijms19020335. PMID: 29364145; PMCID: PMC5855557.

LaPelusa, A, and R. Kaushik. "Physiology, Proteins." Updated November 14, 2022. In StatPearls. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing, January 2023-. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK555990/>.

Schultz, R.M. "Proteins and Protein Structure." In Reference Module in Life Sciences. Elsevier, 2017. ISBN 9780128096338. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.06969-7>.

Cosgrove, D. J. (2005). Growth of the plant cell wall. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 6(11), 850-861.

Falkowski, P.G. The role of phytoplankton photosynthesis in global biogeochemical cycles. *Photosynth Res* 39, 235–258 (1994). <https://doi.org/10.1007/BF00014586>

Whittle, K.J. "Marine Organisms and Their Contribution to Organic Matter in the Ocean." *Marine Chemistry* 5, no. 4-6 (1977): 381-411. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(77\)90030-5](https://doi.org/10.1016/0304-4203(77)90030-5).

Steinberg DK, Landry MR. Zooplankton and the Ocean Carbon Cycle. *Ann Rev Mar Sci*. 2017 Jan 3;9:413-444. doi: 10.1146/annurev-marine-010814-015924. Epub 2016 Oct 17. PMID: 27814033.

J. Lenz, "Introduction," in ICES Zooplankton Methodology Manual, ed. Roger Harris, Peter Wiebe, Jürgen Lenz, Hein Rune Skjoldal, and Mark Huntley (Academic Press, 2000), 1-32, doi:10.1016/B978-012327645-2/50002-5.

Michael G. Simpson, "Evolution and Diversity of Vascular Plants," in *Plant Systematics* (Third Edition), ed. Michael G. Simpson (Academic Press, 2019), 75-130, doi:10.1016/B978-0-12-812628-8.50004-3.

John I. Hedges and Richard G. Keil, "Sedimentary Organic Matter Preservation: An Assessment and Speculative Synthesis: Authors' Closing Comments," *Marine Chemistry* 49, no. 2–3 (1995): 137-139, doi:10.1016/0304-4203(95)00013-H.

Baron S, editor. Medical Microbiology. 4th edition. Galveston (TX): University of Texas Medical Branch at Galveston; 1996. Introduction to Bacteriology. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK8120/>

C. R. Woese, O. Kandler, M. L. Wheelis, "Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya," Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 87, no. 12 (June 1990): 4576–4579, doi:10.1073/pnas.87.12.4576.

Henrichs, Susan M. "Early Diagenesis of Organic Matter in Marine Sediments: Progress and Perplexity." Marine Chemistry 39, no. 1-3 (1992): 119-149. [https://doi.org/10.1016/0304-4203\(92\)90098-U](https://doi.org/10.1016/0304-4203(92)90098-U).

Montañez, I.P., Crossey, L.J. (2017). Diagenesis. In: White, W. (eds) Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39193-9_35-1

Vandenbroucke, M., and C. Largeau. "Kerogen Origin, Evolution and Structure." Organic Geochemistry 38, no. 5 (2007): 719-833. <https://doi.org/10.1016/j.orggeochem.2007.01.001>.

Petsch, S. (2018). Kerogen. In: White, W.M. (eds) Encyclopedia of Geochemistry. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-39312-4_163

Walters, Clifford. (2007). The Origin of Petroleum. 10.1007/978-0-387-25789-1_2.

Richard C. Selley, Stephen A. Sonnenberg, in Elements of Petroleum Geology (Fourth Edition), 2023

Lund, J. W. (2015). Geothermal Gradients. In M. Selley, R. Cocks, και I. Plimer (Eds.), Encyclopedia of Geology (2nd ed., pp. 585-595). Academic Press.

Applied source rock geochemistry by Peters, K. E., και Cassa, M. R. (1994).AAPG Bulletin, 78(1), 38-81.

Hunt, J. M. (1995). Petroleum Geochemistry and Geology. W. H. Freeman.

Loucks, R. G., Reed, R. M., και Ruppel, S. C. (2009). Mississippian Barnett Shale: Lithofacies and depositional setting of a deep-water shale-gas succession in the Fort Worth Basin, Texas. AAPG Bulletin, 93(3), 329-361.

Durand, B. "Role of Organic Matter in the Formation of Oil and Gas." Oil και Gas Science and Technology - Rev. IFP, Volume 58, Number 2, March-April 2003, 203-231. DOI: <https://doi.org/10.2516/ogst:2003014>. Published online 01 December 2006.

Peters, Kenneth E., David J. Curry, and Marek Kacwicz, 2012, An overview of basin and petroleum system modeling: Definitions and concepts, in Peters, Kenneth E., David J. Curry, and Marek Kacwicz, eds., Basin modeling: New horizons in research and applications: AAPG Hedberg Series no. 4, p. 1-16.

Sherwood Lollar, B., Barry, P. H., Etiope, G., Liljedahl, A. K., Sesso, G., και Bristow, N. (2019). New Windows into Abiogenic Methane and Subsurface Hydrosphere. *Elements*, 15(1), 21-26.

Espitalie, J., Madec, M., Tissot, B., Mennig, J.J., and P. Leplat. "Source Rock Characterization Method for Petroleum Exploration." Paper presented at the Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 1977. doi: <https://doi.org/10.4043/2935-MS>.

Harrison, Gbubemi H., and A. Sahel. "Optimal Profitable Allocation of Associated Natural Gas Resource on a Countrywide Basis to Mitigate Flaring." *Energy Reports* 10 (2023): 2551-2566. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.09.015>.

Guo, Boyan, and Ali Ghalambor. *Natural Gas Engineering Handbook*, 2nd ed. May 1, 2012. ISBN: 9780128103395.

Aminzadeh, Fred, and Shivaji N. Dasgupta. "Chapter 3 - Fundamentals of Petroleum Geophysics." In *Developments in Petroleum Science*, Volume 60, edited by Fred Aminzadeh and Shivaji N. Dasgupta, 37-92. Elsevier, 2013. ISBN 9780444506627. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-50662-7.00003-2>.

Peters, K. E., και Moldowan, J. M. (1993). *The Biomarker Guide: Interpreting Molecular Fossils in Petroleum and Ancient Sediments*. Prentice Hall.

Marques, Ademir, Rafael Kenji Horota, Eniuce Menezes de Souza, Lucas Kupssinskü, Pedro Rossa, Alysson Soares Aires, Leonardo Bachi, Mauricio Roberto Veronez, Luiz Gonzaga, and Caroline Lessio Cazarin. "Virtual and Digital Outcrops in the Petroleum Industry: A Systematic Review." *Earth-Science Reviews* 208 (2020): 103260. ISSN 0012-8252. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103260>.

Babasafari, Amir Abbas, Deva Prasad Ghosh, Teresa Ratnam, Shiba Rezaei, and Chico Sambo. "Chapter 5 - Geological Reservoir Modeling and Seismic Reservoir Monitoring." In *Seismic Imaging Methods and Applications for Oil and Gas Exploration*, edited by Yasir Bashir, Amir Abbas Babasafari, Abdul Rahim Md Arshad, Seyed Yaser Moussavi Alashloo, Abdul Halim Abdul Latiff, Rosita Hamidi, Shiba Rezaei, Teresa Ratnam, Chico Sambo, and Deva Prasad Ghosh, 179-285. Elsevier, 2022. ISBN 9780323919463. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-91946-3.00002-X>.

Laake, A. (2022). *Remote Sensing for Hydrocarbon Exploration*. In: *Remote Sensing for Hydrocarbon Exploration*. Springer Remote Sensing/Photogrammetry. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-73319-3_8

Katz, D. L., and R. L. Lee. *Natural Gas Engineering Production and Storage*. McGraw-Hill Publishing Co., 1990, 297-298.

Ma, T., Chen, P. και Zhao, J. Overview on vertical and directional drilling technologies for the exploration and exploitation of deep petroleum resources. *Geomech. Geophys. Geo-energ. Geo-resour.* 2, 365–395 (2016). <https://doi.org/10.1007/s40948-016-0038-y>

Zendehboudi, Sohrab, and Alireza Bahadori. "Chapter Eight - Production Methods in Shale Oil Reservoirs." In *Shale Oil and Gas Handbook*, edited by Sohrab Zendehboudi

and Alireza Bahadori, 285-319. Gulf Professional Publishing, 2017. ISBN 9780128021002. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-802100-2.00008-3>.

Teodoriu, Catalin. "Chapter 3 - Construction and Completion of Multifractured Horizontal Wells." In *Unconventional Shale Gas Development*, edited by Rouzbeh G. Moghanloo, 71-104. Gulf Professional Publishing, 2022. ISBN 9780323901857. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90185-7.00018-2>.

Islam, M. Rafiqul, and M. Enamul Hossain. "Chapter 3 - Advances in Directional Drilling." In *Drilling Engineering*, edited by M. Rafiqul Islam and M. Enamul Hossain, 179-316. Gulf Professional Publishing, 2021. ISBN 9780128201930. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820193-0.00003-4>.

Speight, James G. "Chapter 2 - Offshore Geology and Operations." In *Subsea and Deepwater Oil and Gas Science and Technology*, edited by James G. Speight, 45-70. Gulf Professional Publishing, 2015. ISBN 9781856175586. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-558-6.00002-7>.

Ronalds, Beverley F. "Applicability Ranges for Offshore Oil and Gas Production Facilities." *Marine Structures* 18, no. 3 (2005): 251-263. ISSN 0951-8339. <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2005.06.001>.

EIA, Energy Information Administration *Natural Gas Processing: the Crucial Link between Natural Gas Production and its Transportation to Market* (2006), pp. 1-11

Speight, James G. "Chapter 1 - Occurrence and Formation of Crude Oil and Natural Gas." In *Subsea and Deepwater Oil and Gas Science and Technology*, edited by James G. Speight, 1-43. Gulf Professional Publishing, 2015. ISBN 9781856175586. <https://doi.org/10.1016/B978-1-85617-558-6.00001-5>.

Farag, Hassan A.A., Mustafa Mohamed Ezzat, Hoda Amer, and Adel William Nashed. "Natural Gas Dehydration by Desiccant Materials." *Alexandria Engineering Journal* 50, no. 4 (2011): 431-439. ISSN 1110-0168. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2011.01.020>.

Saeid Mokhatab, John Y. Mak, Jaleel V. Valappil, and David A. Wood "Chapter 2 - Gas Conditioning and NGL Recovery Technologies." In *Handbook of Liquefied Natural Gas*, 107-145. Gulf Professional Publishing, 2014. ISBN 978-0124045859. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124045859000027>.

Civan, Faruk. "Natural Gas Transportation and Storage." In *Encyclopedia of Energy*, edited by Cutler J. Cleveland, 273-282. Elsevier, 2004. ISBN 9780121764807. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00276-X>.

Ríos-Mercado, Roger Z., and Conrado Borraz-Sánchez. "Optimization Problems in Natural Gas Transportation Systems: A State-of-the-Art Review." *Applied Energy* 147 (2015): 536-555. ISSN 0306-2619. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.017>.
Gondal, I.A. "12 - Hydrogen Transportation by Pipelines." In *Compendium of Hydrogen Energy*, edited by Ram B. Gupta, Angelo Basile, and T. Nejat Veziroğlu,

301-322. Woodhead Publishing, 2016. ISBN 9781782423621. <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-362-1.00012-2>.

Serrato, David, Juan Zapata-Mina, Álvaro Restrepo, and Jorge Torres. "Assessment of Liquefied Natural Gas (LNG) Regasified through Gas Interchangeability in Energy Consumption Sectors." *Energy Reports* 7 (2021): 2526-2533. ISSN 2352-4847. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.048>.

Bai, Yong, and Wei-Liang Jin. "Chapter 4 - LNG Carrier." In *Marine Structural Design (Second Edition)*, edited by Yong Bai and Wei-Liang Jin, 49-71. Butterworth-Heinemann, 2016. ISBN 9780080999975. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-099997-5.00004-6>.

Mannan, Sam, ed. *Lees' Loss Prevention in the Process Industries (Fourth Edition)*. Butterworth-Heinemann, 2012. Chapter 39 - Liquefied Natural Gas. In *Lees' Loss Prevention in the Process Industries*, 2492-2506. ISBN 9780123971890. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397189-0.00039-2>.

Khakzad, Nima, and Genserik Reniers. "Chapter Six - Safety of Offshore Topside Processing Facilities: The Era of FPSOs and FLNGs." In *Methods in Chemical Process Safety*, edited by Faisal Khan and Rouzbeh Abbassi, 269-287. Elsevier, 2018. ISSN 2468-6514. ISBN 9780128140277. <https://doi.org/10.1016/bs.mcps.2018.04.004>.

Wang, Xiuli, and Michael Economides. "Advanced Natural Gas Engineering." In *Advanced Natural Gas Engineering*, 171-208. Gulf Publishing Company, 2009. ISBN 9781933762388. <https://doi.org/10.1016/B978-1-933762-38-8.50012-5>.

American Petroleum Institute (API), (2015). Digital Media | DM2015-036 | 03.10

Κεφάλαιο 3

Διαχειριστής Ανανεώσιμων Πηγών Ενέργειας και Εγγυήσεων Προέλευσης (2023), Ενεργειακό Μείγμα 2022

<https://ypen.gov.gr/energeia/ydrogonanthrakes/fysiko-aerio/ethnikes-ypodomes-foreis-tis-agera/>

IEA, Greece 2023, IEA, 2023, Paris <https://www.iea.org/reports/greece-2023>, License: CC BY 4.0

Hellenic Association for Energy Economics, 2020. Greek energy market report. Hellenic Association for Energy Economics., <https://www.haee.gr/publications/haee-publications/greek-energy-market-report/greek-energy-market-report-2020-powered-by-national-bank-of-greece/>

Ευρωπαϊκή Επιτροπή, REPowerEU: ένα σχέδιο για ταχεία μείωση της εξάρτησης από τα ρωσικά ορυκτά καύσιμα και την επιτάχυνση της πράσινης μετάβασης, Βρυξέλλες, 18 Μαΐου 2022

ΔΕΣΦΑ, Έκθεση Βιώσιμης Ανάπτυξης 2022, ΔΕΣΦΑ, 23-Νοε-2023

Στοιχεία ΔΕΣΦΑ για την κατανάλωση φυσικού αερίου το 2022, ΔΕΣΦΑ, 17-Ιαν-2023

ΤΑΙΠΕΔ, ΔΕΛΤΙΟ ΤΥΠΟΥ ΤΑΙΠΕΔ: Ματαίωση της διεθνούς διαγωνιστικής διαδικασίας για την πώληση του 65% της ΔΕΠΑ ΕΜΠΟΡΙΑΣ Α.Ε, ΤΑΙΠΕΔ, 13 Οκτωβρίου 2023

Strantzali, Eleni, Konstantinos Aravossis, Georgios A. Livanos, and Christos Nikoloudis. "A Decision Support Approach for Evaluating Liquefied Natural Gas Supply Options: Implementation on Greek Case Study." *Journal of Cleaner Production* 222 (2019): 414-423. ISSN 0959-6526. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.031>.

Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. “Συμφωνία του Συμβουλίου για πλήρη γενική προσέγγιση σχετικά με την πρόταση για τον ευρωπαϊκό «νόμο για το κλίμα»” Συμβούλιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης. 17 Δεκεμβρίου 2020 <https://www.consilium.europa.eu/el/press/press-releases/2020/12/17/council-agrees-on-full-general-approach-on-european-climate-law-proposal/>

Χρύσα Λιάγγου. “Στην Italgas η ΔΕΠΑ Υποδομών με τίμημα που έφθασε τα 733 εκατ.” Καθημερινή. 10 Σεπτεμβρίου 2021 <https://www.kathimerini.gr/economy/562710301/se-trochia-sygkroysis-i-depa-me-tin-gazprom/>

Χρύσα Λιάγγου. «Σε τροχιά σύγκρουσης η ΔΕΠΑ με την Gazprom» Καθημερινή. 07 Νοεμβρίου 2023 <https://www.kathimerini.gr/economy/562710301/se-trochia-sygkroysis-i-depa-me-tin-gazprom/>

Λιάγγου, Χ. (2024, 17 Ιουνίου). Φυσικό αέριο: Γιατί η Exxon εντείνει τις έρευνες στην Κρήτη. Καθημερινή. <https://www.kathimerini.gr/economy/562250542/fysiko-aerio-giati-i-exxon-enteinei-tis-ereynes-stin-kriti/>

Κεφάλαιο 4

Kulahci, Murat, Douglas C. Montgomery, and Cheryl L. Jennings. *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting*. 2nd ed. Hoboken, NJ: John Wiley και Sons, April 2015. 672 pages. ISBN: 978-1-118-74511-3.

Sarewitz, Daniel, and Roger Pielke. "Prediction in Science and Policy." *Technology in Society* 21, no. 2 (1999): 121-133. Accessed May 12, 2024. [https://doi.org/10.1016/S0160-791X\(99\)00002-0](https://doi.org/10.1016/S0160-791X(99)00002-0).

Αναγνώστου, Α. (2024). Κλασικά και Σύγχρονα Υποδείγματα Χρονολογικών Σειρών Τόμος Α' [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοιχτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-319>

Chatfield, C. (2003). *The Analysis of Time Series: An Introduction*, Sixth Edition (6th ed.). Chapman and Hall/CRC. <https://doi.org/10.4324/9780203491683>

Caporale, Guglielmo Maria και Tapia, Silvia και Gil-Alana, Luis. (2024). Persistence in Tax Revenues: Evidence from Some OECD Countries. *Journal of Quantitative Economics*. 10.1007/s40953-024-00386-x.

Klir, G., και Yuan, B. (1995). *Fuzzy sets and fuzzy logic* (Vol. 4, pp. 1-12). New Jersey: Prentice hall.

Bělohlávek, R., και Klir, G. J. (Eds.). (2011). *Concepts and fuzzy logic*. MIT press.

Μαστοροκώστας, Π. (2023). Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση [Μεταπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <http://dx.doi.org/10.57713/kallipos-146>

Καμπουρλάζος, Β., και Παπακώστας, Γ. (2015). Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://hdl.handle.net/11419/3443>

Didier Dubois, Henri Prade. What are fuzzy rules and how to use them. *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 84, dedicated to the Memory of Professor Arnold Kaufmann (2), pp.169-185. 10.1016/0165- 0114(96)00066-8. hal-04039815

Ying Bai, Hanqi Zhuang, Dali Wang. *Advanced Fuzzy Logic Technologies in Industrial Applications*. Springer London 2006 <https://doi.org/10.1007/978-1-84628-469-4>

Μαστοροκώστας, Π. (2022). Ασαφή και νευροασαφή συστήματα – Ασαφής Βαθεία Μάθηση [Μεταπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-146>

Καμπουρλάζος, Β., και Παπακώστας, Γ. (2015). Εισαγωγή στην υπολογιστική νοημοσύνη [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-661>

Mamdani, E., και Assilian, S. (1975). “An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller”, *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, no. 1, pp. 1-13 ([http://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](http://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)).

Λυκοθανάσης, Σ., και Κουτσομητρόπουλος, Δ. (2023). Υπολογιστική νοημοσύνη και βαθιά μάθηση [Προπτυχιακό εγχειρίδιο]. Κάλλιπος, Ανοικτές Ακαδημαϊκές Εκδόσεις. <https://dx.doi.org/10.57713/kallipos-168>

Pedrycz, W., Kandel, A., Zhang, YQ. (1998). *Neurofuzzy Systems*. In: Nguyen, H.T., Sugeno, M. (eds) *Fuzzy Systems. The Springer Handbook Series on Fuzzy Sets*, vol 2. Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-5505-6_10

Adya, M., Collopy, F., 1998. How effective are neural networks at forecasting and prediction? A review and evaluation. *Journal of Forecasting* 17, 481–495.

W.K. Wong, Min Xia, W.C. Chu, Adaptive neural network model for time-series forecasting, *European Journal of Operational Research*, Volume 207, Issue 2, 2010, Pages 807-816, ISSN 0377-2217, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.05.022>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221710003784>)

Yongtao Tan, Chenyang Shuai, Liudan Jiao, Liyin Shen, An adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) approach for measuring country sustainability performance, *Environmental Impact Assessment Review*, Volume 65, 2017, Pages 29-40, ISSN 0195-9255, <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2017.04.004>.

N.G. Fragiadakis, V.D. Tsoukalas, V.J. Papazoglou, An adaptive neuro-fuzzy inference system (anfis) model for assessing occupational risk in the shipbuilding industry, *Safety Science*, Volume 63, 2014, Pages 226-235, ISSN 0925-7535, <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2013.11.013>.

Engin Avci, Comparison of wavelet families for texture classification by using wavelet packet entropy adaptive network based fuzzy inference system, *Applied Soft Computing*, Volume 8, Issue 1, 2008, Pages 225-231, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2007.01.003>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494607000117>)

Li-Chih Ying, Mei-Chiu Pan, Using adaptive network based fuzzy inference system to forecast regional electricity loads, *Energy Conversion and Management*, Volume 49, Issue 2, 2008, Pages 205-211, ISSN 0196-8904, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.06.015>.

Jang, J. S. R. (1993). ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 23(3), 665-685.

Yadollahpour, A., Nourozi, J., και Trejo-Macotela, F. R. (2018). Designing and implementing an ANFIS based medical decision support system to predict chronic kidney disease progression. *Frontiers in physiology*, 9, 415599.

Priyadarshini, L., and Lakshmi Shrinivasan. "Design of an ANFIS based decision support system for diabetes diagnosis." 2020 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP). IEEE, 2020.

Denai, Mouloud Azzedine, Frank Palis, and Abdelhafid Zeghib. "ANFIS based modelling and control of non-linear systems: a tutorial." 2004 IEEE International conference on systems, man and cybernetics (IEEE Cat. No. 04CH37583). Vol. 4. IEEE, 2004.

Mote, T. P., and S. D. Lokhande. "Temperature control system using ANFIS." *International Journal of Soft Computing and Engineering* 2.1 (2012): 2231-2307.

Khuntia, Swasti R., and Sidhartha Panda. "Simulation study for automatic generation control of a multi-area power system by ANFIS approach." *Applied soft computing* 12.1 (2012): 333-341.

Masood, M. K., Wooi Ping Hew, and Nasrudin Abd Rahim. "Review of ANFIS-based control of induction motors." *Journal of Intelligent και Fuzzy Systems* 23.4 (2012): 143-158.

Soyguder, Servet, and Hasan Alli. "An expert system for the humidity and temperature control in HVAC systems using ANFIS and optimization with Fuzzy Modeling Approach." *Energy and Buildings* 41.8 (2009): 814-822.

Chen, Xiujia, and Xianku Zhang. "Nonlinear feedback control based on ANFIS." 2015 12th international conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD). IEEE, 2015.

Imen, Masoud, Mohammad Mansouri, and Mehdy Aliyari Shoorehdeli. "Tracking control of mobile robot using ANFIS." 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2011.

Pandey, Dr. Anish and Kumar, Dr-Saroj and Pandey, Krishna and Parhi, Dayal. (2016). Mobile robot navigation in unknown static environments using ANFIS controller. Perspectives in Science. 8. 10.1016/j.pisc.2016.04.094.

Liang Qiao, Pei Yang, Qi Leng, Liujie Xu, Yanxin Bi, Jinzhen Xu, Zhe Wang, Jianye Liu, Wanxin Yin, Luyan Zhang, Feihong Wang, Ye Yuan, Tianming Chen, Cheng Ding, Exploring ANFIS application based on actual data from wastewater treatment plant for predicting effluent removal quality of selected major pollutants, Journal of Water Process Engineering, Volume 56, 2023, 104247, ISSN 2214-7144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104247>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714423007675>)

Mohammed A.A. Al-qaness, Hong Fan, Ahmed A. Ewees, Dalia Yousri, Mohamed Abd Elaziz, Improved ANFIS model for forecasting Wuhan City Air Quality and analysis COVID-19 lockdown impacts on air quality, Environmental Research, Volume 194, 2021, 110607, ISSN 0013-9351, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110607>.

Kanchan Prasad, Amit Kumar Gorai, Pramila Goyal, Development of ANFIS models for air quality forecasting and input optimization for reducing the computational cost and time, Atmospheric Environment, Volume 128, 2016, Pages 246-262, ISSN 1352-2310, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.01.007>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231016300073>)

Sameer Arora, Ashok K. Keshari, ANFIS-ARIMA modelling for scheming re-aeration of hydrologically altered rivers, Journal of Hydrology, Volume 601, 2021, 126635, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126635>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169421006831>)

Anh Ngoc Thi Do, Hau Duc Tran, Matthew Ashley, Employing a novel hybrid of GA-ANFIS model to predict distribution of whiting fish larvae and juveniles from tropical estuaries in the context of climate change, Ecological Informatics, Volume 71, 2022, 101780, ISSN 1574-9541, <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101780>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574954122002308>)

Shwetank, Suhas, Jitendra Kumar Chaudhary, Hybridization of ANFIS and fuzzy logic for groundwater quality assessment, Groundwater for Sustainable Development, Volume 18, 2022, 100777, ISSN 2352-801X, <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2022.100777>.

Hosseini MS, Zekri M. Review of Medical Image Classification using the Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System. J Med Signals Sens. 2012 Jan;2(1):49-60. PMID: 23493054; PMCID: PMC3592505.

Rashed, B.M.; Popescu, N. Medical Image-Based Diagnosis Using a Hybrid Adaptive Neuro-Fuzzy Inferences System (ANFIS) Optimized by GA with a Deep Network Model for Features Extraction. *Mathematics* 2024, 12, 633. <https://doi.org/10.3390/math12050633>

Afshin Shoeibi, Navid Ghassemi, Marjane Khodatars, Parisa Moridian, Roohallah Alizadehsani, Assef Zare, Abbas Khosravi, Abdulhamit Subasi, U. Rajendra Acharya, Juan M. Gorriz, Detection of epileptic seizures on EEG signals using ANFIS classifier, autoencoders and fuzzy entropies, *Biomedical Signal Processing and Control*, Volume 73, 2022, 103417, ISSN 1746-8094, <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.103417>.

Kumarganesh, S., and M. Suganthi. "An enhanced medical diagnosis sustainable system for brain tumor detection and segmentation using ANFIS classifier." *Current Medical Imaging* 14.2 (2018): 271-279.

K. Sujatha, G. Durgadevi, K. Senthil Kumar, V. Karthikeyan, R.S. Ponmagal, Rajeswari Hari, N.P.G. Bhavani, V. Srividhya, Su-Qun Cao, Chapter 5 - Screening and early identification of microcalcifications in breast using texture-based ANFIS classification, Editor(s): Nilanjan Dey, Amira S. Ashour, Simon James Fong, Chintan Bhatt, In *Advances in ubiquitous sensing applications for healthcare, Wearable and Implantable Medical Devices*, Academic Press, Volume 7, 2020, Pages 115-140, ISBN 9780128153697, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815369-7.00005-7>.

Cabalar, Ali Firat, Abdulkadir Cevik, and Candan Gokceoglu. "Some applications of adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) in geotechnical engineering." *Computers and Geotechnics* 40 (2012): 14-33.

Xin Tan, Yahui Wang, Linfeng Wu, Yongheng Yu, Qihui Yu, Guoxin Sun, An ANFIS-Based indirect control strategy for solar heating system: Exploring PMV approach, *Energy and Buildings*, Volume 309, 2024, 114056, ISSN 0378-7788, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114056>.

Adedeji, P. A., Masebinu, S. O., Akinlabi, S. A., and Madushele, N. "Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS) Modelling in Energy System and Water Resources." In *Optimization Using Evolutionary Algorithms and Metaheuristics*, 1st ed. CRC Press, 2019.

Perveen, Gulnar, Mohammad Rizwan, and Nidhi Goel. "An ANFIS-based model for solar energy forecasting and its smart grid application." *Engineering Reports* 1.5 (2019): e12070.

Nouman, Syed and Kumar, N and Kumar S, Dr. (2022). Application of ANFIS in Civil Engineering-A Critical Review. 09. 308-316.

Aeidapu Mahesh; Kanwarjit Singh Sandhu, "ANFIS based energy management strategy for PV/Wind/Battery hybrid energy system," 2016 IEEE 7th Power India International Conference (PIICON), Bikaner, India, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/POWERI.2016.8077221.

Liang-Ying Wei, A hybrid ANFIS model based on empirical mode decomposition for stock time series forecasting, *Applied Soft Computing*, Volume 42, 2016, Pages 368-376, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.01.027>.

Chung-Ho Su, Ching-Hsue Cheng, A hybrid fuzzy time series model based on ANFIS and integrated nonlinear feature selection method for forecasting stock, *Neurocomputing*, Volume 205, 2016, Pages 264-273, ISSN 0925-2312, <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2016.03.068>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925231216303058>)

Chen, YS., Cheng, CH., Chiu, CL. et al. A study of ANFIS-based multi-factor time series models for forecasting stock index. *Appl Intell* 45, 277–292 (2016).
<https://doi.org/10.1007/s10489-016-0760-8>

Alizadeh, Meysam και Rada, Roy και Jolai, Fariborz και Fotoohi, Elnaz. (2011). An Adaptive Neuro-Fuzzy System for Stock Portfolio Analysis. *Int. J. Intell. Syst.* 26. 99-114. 10.1002/int.20456.

Werner Kristjanpoller R., Kevin Michell V., A stock market risk forecasting model through integration of switching regime, ANFIS and GARCH techniques, *Applied Soft Computing*, Volume 67, 2018, Pages 106-116, ISSN 1568-4946, <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2018.02.055>.
(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1568494618301145>)

Yu, Feng και Xu, Xiaozhong. (2014). A short-term load forecasting model of natural gas based on optimized genetic algorithm and improved BP neural network. *Applied Energy*. 134. 102–113. 10.1016/j.apenergy.2014.07.104.

Barak, S.; Sadegh, S.S. Forecasting energy consumption using ensemble ARIMA–ANFIS hybrid algorithm. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2016, 82, 92–104. [CrossRef]

Adedeji, P.; Akinlabi, S.; Madushele, N.; Olatunji, O. Hybrid Adaptive Neuro-fuzzy Inference System (ANFIS) for a Multi-campus University Energy Consumption Forecast. *Int. J. Ambient Energy* 2020, 41, 1–20.

Do, Q.H. (2020). Development of MI-ANFIS-BBO Model for Forecasting Crude Oil Price. In: Pham, H. (eds) *Reliability and Statistical Computing*. Springer Series in Reliability Engineering. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43412-0_11

M. Panella, L. Liparulo, F. Barcellona and R. L. D'Ecclesia, "A study on crude oil prices modeled by neurofuzzy networks," *2013 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, Hyderabad, India, 2013, pp. 1-7, doi: 10.1109/FUZZ-IEEE.2013.6622496.