



**ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ**  
**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ & ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**  
**ΠΡΟΒΛΕΨΗ ΠΩΛΗΣΕΩΝ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ &**  
**ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ ΜΕ ΝΕΥΡΟ -**  
**ΑΣΑΦΗ ΕΛΕΓΚΤΗ (ANFIS)**

**ΔΗΜΗΤΡΕΛΟΣ ΧΡΗΣΤΟΣ**  
**A.M.: 2005010033**

**ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ**  
**ΑΤΣΑΛΑΚΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ**

## **ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ**

### **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

#### **ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ/ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ**

### **2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ**

### **3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

### **4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ**

#### **4.1 Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic)**

#### **4.2 Νευρωνικά δίκτυα**

#### **4.3 Νεύρο-ασαφή συστήματα (υβριδικά συστήματα)**

#### **4.4 Προσαρμοστικό νεύρο-ασαφές σύστημα (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System - ANFIS)**

#### **4.5 Μοντέλα Αυτοπαλινδρόμησης (Autoregressive models)**

##### **4.5.1 Αυτοπαλίνδρομο μοντέλο κινητού μέσου όρου (ARMA)**

##### **4.5.2 Αυτοπαλίνδρομο μοντέλο (AR)**

### **5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ**

### **6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ**

### **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σε αυτή την εργασία θα ασχοληθούμε με την πρόβλεψη πωλήσεων των υβριδικών/ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Υβριδικό και ηλεκτρικό αυτοκίνητο δεν είναι το ίδιο. Το ηλεκτρικό δεν είναι υβριδικό, αλλά το υβριδικό μπορεί να είναι επί μέρους ηλεκτρικό. Για να ξεκαθαρίσουμε τη σύγχυση που επικρατεί ανάμεσα στο υβριδικό και στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο, θα δώσουμε τους ορισμούς τους.

Ηλεκτρικό (Electric Vehicle : EV) ονομάζεται το αυτοκίνητο που παίρνει την ισχύ του αποκλειστικά από ηλεκτρισμό αποθηκευμένο σε μπαταρίες του ίδιου του αυτοκινήτου.

Υβριδικό (Hybrid Vehicle : HV) ονομάζεται το αυτοκίνητο που χρησιμοποιεί δύο (2) τουλάχιστον διαφορετικές πηγές ισχύος.

Πιθανοί συνδυασμοί πηγών ισχύος είναι ένας κινητήρας εσωτερικής καύσης ή μια κυψέλη καυσίμων μαζί με μια μπαταρία ή ένα ηλεκτρικό μοτέρ.

Τα συστήματα start/stop που χρησιμοποιούνται ευρέως στα σύγχρονα αυτοκίνητα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, δεν τα καθιστούν υβριδικά, καθώς δεν πρόκειται για παραγωγή ισχύος, αλλά για εξοικονόμηση.

Θα δώσουμε επίσης τους ορισμούς 2 ακόμη κατηγοριών αυτοκινήτων. Κατηγοριών που θα εντάξουμε στη μεγάλη κατηγορία των υβριδικών/ηλεκτρικών και θα εξετάσουμε κατά περίπτωση ή συνολικά στη συνέχεια.

Plug-in υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (Plug-in Hybrid Electric Vehicles : PHEVs): οχήματα που χρησιμοποιούν ενέργεια που αποθηκεύεται από το δίκτυο, αλλά επίσης έχουν κινητήρα εσωτερικής καύσης ώστε να επεκτείνουν το το εύρος κίνησης χωρίς ανεφοδιασμό (Extende Range Electric Vehicles : EREVs).

Ηλεκτρικά οχήματα μπαταρίας (Battery Electric Vehicles : BEVs): οχήματα που χρησιμοποιούν ενέργεια που αποθηκεύεται από το δίκτυο.

## ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ ΥΒΡΙΔΙΚΩΝ/ΗΛΕΚΤΡΙΚΩΝ ΑΥΤΟΚΙΝΗΤΩΝ

Τα πρώτα πειραματικά, ελαφρού τύπου, ηλεκτρικά οχήματα εμφανίστηκαν περί τα μέσα του 1830 στις ΗΠΑ, στο Ηνωμένο Βασίλειο και στην Ολλανδία, ενσωματώνοντας τις εφευρέσεις γύρω από τον ηλεκτρισμό και την αποθήκευσή του σε πρώιμης μορφής μπαταρίες. Εφευρέσεις που είχαν πραγματοποιηθεί από το 1800 έως το 1831 από τους Galvani , Volta και Farraday κατά σειρά. Επιστήμονες που μνημονεύουμε σήμερα για τις εφευρέσεις τους, αλλά ενδεχομένως αγνοούσαμε τη συμβολή τους στο ηλεκτρικό αυτοκίνητο.

Το 1859 ο Βέλγος Plante παρουσίασε για πρώτη φορά ένα στοιχείο μπαταρίας μόλυβδου, που αργότερα οδήγησε στην εξέλιξη της μπαταρίας μολύβδου. Της μπαταρίας που χρησιμοποιείται μέχρι σήμερα ως μπαταρία εκκίνησης σε όλα τα αυτοκίνητα με κινητήρα εσωτερικής καύσης, καθώς και ως μπαταρία ισχύος στα περισσότερα ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο που ενσωμάτωσε την μπαταρία μόλυβδου του Plante, παρουσιάστηκε στη Γαλλία το 1881 από τον Trounev, και ήταν ένα τρίκυκλο. Την ίδια δεκαετία (1880) εμφανίστηκαν και άλλες προσπάθειες ηλεκτρικών αυτοκινήτων στις ΗΠΑ και στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Αξίζει να αναφέρουμε πως το πρώτο όχημα με κινητήρα εσωτερικής καύσης παρουσιάστηκε το 1885 από το Γερμανό Benz, δηλαδή μετά από το πρώτο ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Η εξέλιξη των δύο αυτοκινήτων ήταν αντιστρόφως ανάλογη. Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο απέτυχε να διαδοθεί ως μέσο μεταφοράς ιδιωτικής ή δημόσιας χρήσης, σε αντίθεση με το συμβατικό αυτοκίνητο με κινητήρα εσωτερικής καύσης. Τους λόγους θα τους εξετάσουμε στη συνέχεια και θα μας απασχολήσουν ιδιαίτερα, καθώς είναι κατά μεγάλο βαθμό οι προκλήσεις που καλούνται να ξεπεράσουν οι σημερινές αυτοκινητοβιομηχανίες στην προσπάθειά τους για φθηνότερο και ευκολότερα προσβάσιμο ηλεκτρικό/υβριδικό αυτοκίνητο, και ταυτόχρονα παράγοντες που επηρεάζουν τις πωλήσεις τους. Επομένως μας ενδιαφέρουν κατά την εξέταση της πρόβλεψης πωλήσεων των υβριδικών/ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Πριν όμως εγκαταλειφθεί η ιδέα του ηλεκτρικού αυτοκινήτου, έγιναν νέες προσπάθειες από ανθρώπους που έβλεπαν σε αυτό περιθώρια βελτίωσης και ευκαιρίες. Ο πιο σημαντικός ήταν ο Thomas Edison, που με την ανακάλυψη της μπαταρίας νικελίου-σιδήρου το 1901, έδωσε νέα ώθηση στη λιμνάζουσα για λίγα χρόνια εξέλιξη του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Η μπαταρία νικελίου-σιδήρου είχε 40% μεγαλύτερη δυνατότητα αποθήκευσης ενέργειας ανά μονάδα μάζας σε σχέση με την μπαταρία μόλυβδου, αλλά το κόστος παραγωγής της ήταν υψηλό και δεν πέρασε στη μαζική παραγωγή. Την ίδια περίοδο εφευρέθηκαν οι μπαταρίες νικελίου-ψευδαργύρου και ψευδαργύρου-αέρα.

Τα χρόνια μεταξύ 1880 και 1900 ήταν η περίοδος των μεγαλύτερων τεχνολογικών εξελίξεων για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο. Τα επόμενα 20 χρόνια (1900-1920) αυτές οι τεχνολογικές εξελίξεις εφαρμόστηκαν σε σχετικά μεγάλη κλίμακα για την εποχή στα αυτοκίνητα. Σήμερα, πολλές από αυτές τις εφευρέσεις χρησιμοποιούνται ως βάση για το σύγχρονο ηλεκτρικό αυτοκίνητο.

Τα πρώτα ηλεκτρικά αυτοκίνητα που ξεπέρασαν το πειραματικό στάδιο και αποτέλεσαν μέσα καθημερινής μετακίνησης ήταν ταξί. Ήδη το 1897 αναφέρονται 15 ηλεκτρικά ταξί στο Λονδίνο και 13 στη Νέα Υόρκη.

Την πρώτη δεκαετία του εικοστού αιώνα, το ηλεκτρικό αυτοκίνητο ανταγωνιζόταν σε εξέλιξη άλλα δύο είδη “νεαρών” αυτοκινήτων. Το αυτοκίνητο με κινητήρα ατμού και το αυτοκίνητο με βενζινοκίνητο κινητήρα εσωτερικής καύσης. Το 1903 στη Νέα Υόρκη υπάρχουν 4000 καταγεγραμμένα αυτοκίνητα: το 53% ατμού, το 27% βενζίνης και το 20% ηλεκτρικά. Το 1912 το ηλεκτρικό αυτοκίνητο έφτασε το μέγιστο επίπεδο πληθυσμού, απαριθμώντας περί τα 30,000 οχήματα. Ωστόσο, η αντίστροφη μέτρηση είχε ξεκινήσει εν πολλοίς χάρη σε μία ιστορική στιγμή της αυτοκίνησης, που συνέβη 3 χρόνια νωρίτερα, το 1909. Δεν ήταν άλλη από την παρουσίαση από τον Ford του μοντέλου T, του πρώτου αυτοκινήτου μαζικής παραγωγής.

Πολλές καινοτομίες τεχνολογίας και υποδομής έλαβαν μέρος εκείνα τα χρόνια. Η γρήγορη φόρτιση των μπαταριών αποτελούσε από τότε την κύρια πρόκληση των ηλεκτρικών αυτοκινήτων. Σταθμοί φόρτισης που λειτουργούσαν με κερματοδέκτη φιλοδοξούσαν να δώσουν λύση στο πρόβλημα, τουλάχιστον της αστικής μετακίνησης. Για υπεραστικές μετακινήσεις επινοήθηκαν συστήματα γρήγορης και εύκολης εναλλαγής μπαταριών.

Παράλληλα με τις προσπάθειες για γρηγορότερη φόρτιση ή εναλλαγή μπαταριών, 2 άλλες τεχνολογίες που αναπτύχθηκαν περί το 1900, προσπάθησαν να δώσουν ώθηση στην εξέλιξη και κατά συνέπεια, στη διάδοση του ηλεκτρικού αυτοκινήτου. Πρώτη ήταν η ανάκτηση ενέργειας που χάνεται κατά το φρενάρισμα και η αποθήκευσή της σε μπαταρία. Δεύτερη ήταν ο υβριδισμός. Ο Ferdinand Porsche ήταν από τους πρωτοπόρους σε αυτό το πεδίο. Μάλιστα παρουσίασε το ηλεκτρικό αυτοκίνητο βενζίνης που ανέπτυξε στην περίφημη έκθεση του Παρισιού το 1900. Τα πρώτα υβριδικά αυτοκίνητα, έστω και σε πρώιμη μορφή περιλάμβαναν και συστήματα ανάκτησης ενέργειας. Οι κύριες τεχνολογίες των υβριδικών αυτοκινήτων που οδηγούμε σήμερα δε διέφεραν ως προς την αρχή λειτουργίας τους με τα πρώτα ηλεκτρικά/υβριδικά αυτοκίνητα που κυκλοφόρησαν περισσότερα από 100 χρόνια πριν.

Κατά τη διάρκεια του 1ου Παγκοσμίου Πολέμου, το υβριδικό αυτοκίνητο πέρασε στο περιθώριο, κυρίως λόγω της περιορισμένης μείωσης στο κόστος κατασκευής του. Το ηλεκτρικό αυτοκίνητο όμως, συνέχισε να αυξάνει τους αριθμούς του, κυρίως γιατί τα βενζινοκίνητα οχήματα επωμίστηκαν το βάρος των πολεμικών επιχειρήσεων, και άφησαν περιθώριο για αστική μετακίνηση και μεταφορά στα ηλεκτρικά οχήματα. Οι δήμοι εμπιστεύτηκαν την καθαριότητα των δρόμων και την περισυλλογή των απορριμμάτων σε

ηλεκτροκίνητα. Επίσης έμποροι ανέθεσαν το κομμάτι της διανομής αγαθών μέσα στο άστυ, στα ηλεκτρικά φορτηγά τους. Όμως τίποτα από αυτά δεν θα ήταν δυνατό, αν οι αντίστοιχες υποδομές δεν επαρκούσαν. Πράγματι, στις δύο όχθες του Ατλαντικού, σοβαρές προσπάθειες για δημιουργία σταθμών επαναφόρτισης των ηλεκτρικών στόλων πραγματοποιήθηκαν. Εκτός από την απορρόφηση των συμβατικών οχημάτων στον πόλεμο, όπως αναφέρθηκε νωρίτερα, και την συνεπαγόμενη έλλειψη καυσίμων, ένας δεύτερος σημαντικός παράγοντας ώθησε την ηλεκτροκίνηση μπροστά. Ήταν η δημιουργία μεγάλων μονάδων παραγωγής ενέργειας με πρώτη ύλη τον άνθρακα, καθώς και τα πρώτα μεγάλης κλίμακας υδροηλεκτρικά εργοστάσια. Με το τέλος του πολέμου, οι ΗΠΑ αριθμούσαν συνολικά 50,000 ηλεκτρικά οχήματα κάθε τύπου, και εξήγαγαν μεγάλο αριθμό νέων στη ρημασμένη μεταπολεμική Ευρώπη, που έψαχνε τον τρόπο να ορθοποδήσει. Όμως και η Ιαπωνία και η Νότιος Αμερική εκδήλωσαν ενδιαφέρον για τα αμερικάνικα ηλεκτρικά αυτοκίνητα.

Οι προσδοκίες για την ηλεκτροκίνηση ήταν υψηλές, αλλά θα διαψεύδονταν τη δεκαετία του 1920. Ο κινητήρας εσωτερικής καύσης άρχισε πάλι να κερδίζει έδαφος, εξαιτίας της επάρκειας σε υγρά καύσιμα και κατά συνέπεια στη χαμηλότερη τιμή τους. Το τελειωτικό χτύπημα για το ηλεκτρικό αυτοκίνητο ήρθε με το μεγάλο κραχ του 1929, κατά το οποίο, όσες εταιρίες είχαν απομείνει να κρατούν ζωντανή την ηλεκτροκίνηση, πτωχεύσανε.

Κατά το 2ο Παγκόσμιο Πόλεμο, η ιστορία επαναλήφθηκε. Τα βενζινοκίνητα και ντιζελοκίνητα οχήματα πήραν ξανά το δρόμο προς τα πεδία των μαχών και έμειναν για άλλη μια φορά τα ηλεκτρικά να καλύπουν τις ανάγκες των πόλεων. Μάλιστα στην Ιαπωνία κατάφεραν να δηλώνουν το παρόν έως και τη δεκαετία του 1950, λόγω της συνεχιζόμενης έλλειψης καυσίμων στη χώρα, αποτέλεσμα της ήττας της στον πόλεμο. Σε αυτόν τον πόλεμο, σε αντίθεση με τον 1ο, ηλεκτρικά και συμβατικά αυτοκίνητα συνυπήρξαν στις πόλεις, καθώς τα τελευταία χρησιμοποιούσαν εναλλακτικά, αλλά κυρίως ανανεώσιμα καύσιμα, όπως βιοντίζελ.

Τη δεκαετία του 1950, τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα σχεδόν εγκαταλείφθηκαν, καθώς τα συγκριτικά πλεονεκτήματα του κινητήρα εσωτερικής καύσης ήταν τότε αξεπέραστα. Μόνο κάποιες περιπτώσεις υβριδικών ηλεκτρικών-βενζινοκίνητων οχημάτων απέμειναν απλά για να θυμίζουν μία άλλοτε ακμάζουσα βιομηχανία.

Τη δεκαετία του 1960 μπήκαν ίσως οι βάσεις για την επαναπροσέγγιση του θέματος της ηλεκτροκίνησης. Η αστικοποίηση, η πτώση των τιμών των αυτοκινήτων, και η ραγδαία άνοδος του βιοτικού επιπέδου των δυτικών χωρών, μακριά από πολεμικές συγκρούσεις, έδωσαν το δικαίωμα σχεδόν σε κάθε νοικοκυριό να έχει το δικό του προσωπικό αυτοκίνητο. Συνέπεια της μεγάλης αύξησης του στόλου των οχημάτων ήταν η εκτεταμένη μόλυνση του αστικού αέρα. Η τεχνολογία καυσίμων δεν είχε κάνει ακόμη σπουδαία βήματα προόδου. Ο μόλυβδος δεν είχε απαγορευτεί και το μονοξείδιο του άνθρακα και το οξείδιο του αζώτου δεν περιορίζονταν από καταλύτες στις εξατμίσεις, όπως συμβαίνει στα σύγχρονης τεχνολογίας αυτοκίνητα. Τα αυτοκίνητα με κινητήρα

εσωτερικής καύσης αναγνωρίστηκαν ως το πρόβλημα, και για πρώτη φορά, οι μεγάλες εταιρίες αυτοκινήτων έβαλαν στην ατζέντα τους την εξέλιξη και δημιουργία.

Το 1966 η Βρετανική Ford ξεκίνησε την κατασκευή ενός πρωτότυπου ηλεκτρικού αυτοκινήτου πόλης, που θα απαντούσε στις παρακάτω προδιαγραφές:

- αρκετά μικρό για να καταλάβει ελάχιστο δρόμο και χώρο στάθμευσης
- ευέλικτο
- ελάχιστη περιβαλλοντική επιβάρυνση
- απλό στη χρήση
- χαμηλό κόστος κτήσης και χρήσης

Το 1967 παρουσίασε το αποτέλεσμα αυτής της προσπάθειας, το οποίο ήταν μάλλον απογοητευτικό. Ονομαζόταν Comuta. Με μία φόρτιση μπορούσε να καλύψει 60 χλμ με μέση ωριαία ταχύτητα 40 χλμ/ώρα, ενώ η τελική του ταχύτητα ήταν μόλις 60 χλμ/ώρα. Δηλαδή επιδόσεις απογοητευτικές σε σχέση με τις επιδόσεις των ηλεκτρικών αυτοκινήτων στην αρχή του αιώνα. Δεν πήρε φυσικά το δρόμο για τη γραμμή παραγωγής, αλλά για το μουσείο επιστημών του Λονδίνου, όπου μπορεί κανείς να το θαυμάσει ως σήμερα (Westbrook, 2001).

Παράλληλα, η αμερικάνικη General Motors επιχείρησε και εκείνη να κατασκευάσει το δικό της ηλεκτρικό πρωτότυπο αυτοκίνητο. Κατασκεύασε 2, με τα ονόματα Electrovair και Electrován. Ούτε αυτά κατάφεραν να παραχθούν μαζικά. Η δεκαετία του 1960 απέδειξε πως όσοι ήθελαν να πετύχουν στην παραγωγή ενός βιώσιμου ηλεκτρικού αυτοκινήτου, με αποδεκτά μεγάλη εμβέλεια, αξιοπρεπείς επιδόσεις και κυρίως χαμηλό κόστος, έπρεπε να προσπαθήσουν πολύ περισσότερο και να αφοσιώσουν χρόνο και πόρους στην έρευνα και στη δοκιμή νέων ιδεών και υλικών.

Τα χρόνια του 1970 θα ήταν κομβικά για το ηλεκτρικό/υβριδικό αυτοκίνητο. Η ενεργειακή κρίση του 1973 που προκάλεσαν οι Αραβικές Πετρελαιοπαραγωγικές χώρες με το εμπάργκο υγρών καυσίμων που έθεσαν σε ισχύ, είχε ως συνέπεια τη δραστική αύξηση των τιμών. Περιορίστηκε η χρήση του αυτοκινήτου για λόγους οικονομίας, με χαρακτηριστικό παράδειγμα τη Νορβηγία, όπου απαγορεύτηκε η χρήση των αυτοκινήτων τα Σαββατοκύριακα και τη θέση τους στους αυτοκινητόδρομους πήραν οι σκιέρ!

Η δημόσια συζήτηση για την αναγκαιότητα υιοθέτησης νέων, αλλά κυρίως ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είχε μόλις ξεκινήσει. Ο ήλιος, ο αέρας, τα κύματα, τα βιοκαύσιμα, η γεωθερμία και άλλες πηγές ενέργειας κατείχαν πια σημαντικό ρόλο στην εξίσωση της μελλοντικής ενέργειας, σε σενάρια και πλάνα, που ανέπτυσσαν επιστήμονες, μηχανικοί, καθώς και αξιωματούχοι των κυβερνήσεων. Η αυτοκίνηση δεν έμεινε φυσικά αμέτοχη. Οι μεγάλες εταιρίες κατασκευής αυτοκινήτων σε ΗΠΑ, Ευρώπη και Ιαπωνία ασχολήθηκαν με την ανάπτυξη πρωτότυπων ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Χαρακτηριστικά, θα αναφέρουμε μια γαλλική προσπάθεια. Το πρότζεκτ VEL ήταν μια φιλόδοξη προσπάθεια μηχανικών με έντονη κοινωνική και περιβαλλοντική ευαισθησία, επηρεασμένοι από το Μάη του 68'. Θεωρητικά, το VEL θα ήταν ένα αθόρυβο αυτοκίνητο μηδενικών ρύπων. Αυτό απαιτούσε προηγμένες μπαταρίες, εκτεταμένο ηλεκτρικό δίκτυο για το ανεφοδιασμό των οχημάτων, μα πάνω απ' όλα οδηγική παιδεία και περιβαλλοντική συνείδηση από τους οδηγούς και την κοινωνία εν γένει. Δυστυχώς η πράξη απέιχε αρκετά από τη θεωρία. Οι απαιτούμενες μπαταρίες χρειαζόνταν χρόνια εξέλιξης πριν φτάσουν στο επιθυμητό επίπεδο, το ηλεκτρικό δίκτυο που οραματίζονταν, ήταν αδύνατο να κατασκευαστεί χωρίς σημαντικά κρατικά κεφάλαια, αλλά περισσότερο απ' όλα, η κοινωνία δεν ήταν καθόλου έτοιμη να αφομοιώσει και να υποστηρίξει ένα τόσο φιλόδοξο, σχεδόν ουτοπικό σχέδιο. Όσο ο Μάης του 68' έφθιρε στις συλλογικές μνήμες του λαού, τόσο οι ιδέες που έφερε μαζί του, χάνονταν σε μια ευημερία των πραγμάτων, όπου οι υλικές επιθυμίες είχαν πια γίνει ανάγκες. Το αυτοκίνητο ήταν σύμβολο κοινωνικού στάτους, οι ρομαντικοί της οικολογίας αντιμετωπίζονταν ακόμη ως γραφικοί, και ως εκ τούτου το VEL και κάθε ανάλογη απόπειρα δημιουργίας ηλεκτρικού αυτοκινήτου τη δεκαετία του 70' ήταν καταδικασμένα σε αποτυχία.

Τη δεκαετία του 1980 η ηλεκτρική αυτοκίνηση θα ερχόταν ξανά στο προσκήνιο. Η αυξημένη όσο ποτέ μόλυνση του αστικού αέρα έπρεπε να αντιμετωπιστεί. Η πολιτεία της Καλιφόρνια εισήγαγε τους πρώτους κανονισμούς μηδενικής εκπομπής ρύπων στη μετακίνηση. Αυτοί οι κανονισμοί ανάγκασαν τις βιομηχανίες αυτοκινήτου του Ντιτρόιτ να αναλάβουν εκ νέου πρωτοβουλίες για ηλεκτρικά αυτοκίνητα. Μαζί με τα αυτοκίνητα μηδενικών ρύπων, ένας ακόμη όρος θα εμφανιζόταν στην ενεργειακή συζήτηση. Ο όρος ήταν η "αιεφόρος ανάπτυξη".

Σε διεθνές επίπεδο, τα κράτη εκφρασμένα μέσα από τα Ηνωμένα Έθνη, δεν επέδειξαν τα ίδια αντανakλαστικά. Στην έκθεση με τίτλο "Το κοινό μας μέλλον" του 1987 της Παγκόσμιας Επιτροπής για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη, τα προβλήματα εξαιτίας των μετακινήσεων δεν ήταν ούτε καν θέμα. Ακόμα και 5 χρόνια αργότερα, το 1992 στη συνδιάσκεψη του Ρίο, το θέμα συζητήθηκε στη βάση της συγκέντρωσης υπερβολικά πολλών αυτοκινήτων στις μεγάλες πόλεις των αναπτυσσόμενων χωρών. Η έκθεση της Επιτροπής έδωσε έμφαση στα περιβαλλοντικά προβλήματα που προκαλούνται από την καύση των ορυκτών καυσίμων και στην ανάγκη οι πλούσιες χώρες να μειώσουν την κατανάλωση ενέργειας, αλλά και να μεταβούν στη χρήση ανανεώσιμων μορφών ενέργειας, ώστε να μειωθούν τα εν λόγω προβλήματα. Η έκθεση της Επιτροπής για το Περιβάλλον και την Ανάπτυξη σε συνδυασμό με τα συμπεράσματα της συνδιάσκεψης στο Ρίο αποτέλεσαν τη βάση για παγκόσμιες πρωτοβουλίες για μείωση των αερίων του θερμοκηπίου γενικά και ειδικά για το διοξείδιο του άνθρακα. Πρωτοβουλίες και δεσμεύσεις που αποτυπώθηκαν και γραπτώς στη Συνθήκη του Κιότο.

Φτάνοντας στο σήμερα, συναντούμε σε εθνικό, αλλά και σε διεθνές επίπεδο, πολιτικές που ενθαρρύνουν τη διείσδυση των ηλεκτρικών/υβριδικών αυτοκινήτων στο σύνολο του στόλου. Το πιο δημοφιλές μέτρο είναι η μειωμένη



ή μηδενική φορολογία στην αγορά και στη χρήση. Αυτές οι πολιτικές επέτρεψαν στις αυτοκινητοβιομηχανίες να δώσουν μεγάλη έμφαση στην ανάπτυξη και δημιουργία ηλεκτρικών/υβριδικών αυτοκινήτων.

Συμμαχίες μεταξύ δημοσίου και ιδιωτικού τομέα θα έρθουν το 1990 και έπειτα να πιστοποιήσουν πως η ηλεκτροκίνηση ήρθε για να μείνει. Η κυβέρνηση Κλίντον ανακοίνωσε το 1993 μία πρωτοβουλία με όνομα “Συμμαχία για μία νέα γενιά οχημάτων”, ανάμεσα στην κυβέρνηση και τις αυτοκινητοβιομηχανίες, με σκοπό τη δημιουργία ενός αυτοκινήτου με κατανάλωση μικρότερη των 4 λίτρων ανά 100 χιλιόμετρα. 3 χρόνια αργότερα και 1 δισεκατομμύριο δολάρια, το αποτέλεσμα ήταν 3 πρωτότυπα οχήματα, όλα υβριδικά. Κανένα δε βρήκε το δρόμο για τη παραγωγή.

Η Toyota δεν πήρε μέρος στην παραπάνω συμφωνία. Το 1997 παρουσίασε στην ιαπωνική αγορά το Prius, ένα τετραθέσιο υβριδικό σεντάν. Την ίδια χρονιά, η Audi ήταν η πρώτη ευρωπαϊκή εταιρία που θα παρουσίαζε ένα υβριδικό αυτοκίνητο, το Duo. Δεν είχε την προσδοκώμενη εμπορική επιτυχία και σύντομα σταμάτησε η παραγωγή του. Οι περισσότερες εταιρίες αφιέρωσαν τους περισσότερους πόρους για έρευνα και ανάπτυξη στην κατεύθυνση της βελτίωσης των μηχανών εσωτερικής καύσης πετρελαίου, με αξιοσημείωτα αποτελέσματα, γεγονός που λειτουργούσε ανταγωνιστικά προς την ανάπτυξη των υβριδικών/ηλεκτρικών αυτοκινήτων.

Η ιαπωνική Honda παρουσίασε το πρώτο υβριδικό στην αμερικανική αγορά. Ήταν το Insight, και ήταν άκρως επιτυχημένο. Το 2003 η Honda σύστησε στο αμερικανικό κοινό το 2ο υβριδικό μοντέλο της, το Civic Hybrid, που ήταν σχεδόν ίδιο με το συμβατικό Civic. Το 2000 το Prius έκανε το υπερειρηνικό ταξίδι προς τις Ηνωμένες Πολιτείες. Την επιτυχία που πέτυχε δεν την περίμενε ούτε η Toyota. Ανάλογη ανταπόκριση βρήκε και σε ευρωπαϊκό έδαφος. Το 2004 η δεύτερη γενιά του Prius κατακτούσε βραβεία σε διαγωνισμούς και εκθέσεις αυτοκινήτου, κάνοντας το, το πιο αναγνωρίσιμο υβριδικό αυτοκίνητο μέχρι και σήμερα. Την ίδια χρονιά, το πρώτο αμερικάνικο υβριδικό έκανε την εμφάνισή του. Ήταν το Ford Escape Hybrid. Ακολούθησαν οι υπόλοιπες εταιρίες αυτοκινήτου.

Σε μία εκατοντάχρονη περίοδο εξέλιξης των ηλεκτρικών/υβριδικών αυτοκινήτων, η δεκαετία του 1990 ήταν η πιο έντονη. Πολλά νέα μοντέλα δόθηκαν στην κυκλοφορία ενώ σημαντική πρόοδος επετεύχθη στην ανάπτυξη πιο αποδοτικών μπαταριών. Με την αλλαγή του αιώνα, ωστόσο, η αισιοδοξία για περαιτέρω αύξηση των ηλεκτρικών/υβριδικών υποχώρησε. Τα τεχνολογικά εμπόδια ήταν μεγάλα και τα αυτοκίνητα με κινητήρα εσωτερικής καύσης πέτυχαν ανέλπιστες οικονομίες καυσίμου. Ακόμη, νέες πηγές ισχύος, όπως οι κυψέλες υδρογόνου και τα βιοκαύσιμα έλκουν πια το ενδιαφέρον των ερευνών για πιο φθηνό καύσιμο.

Την παραπάνω υποχώρηση σημειώνει και η Ευρωπαϊκή Ένωση: “Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα είναι εμπορικά διαθέσιμα για αρκετά χρόνια, αλλά δεν έχουν καταφέρει να προσελκύσουν ικανοποιητικά το ενδιαφέρον των καταναλωτών. Το κόστος και το μέγεθος των μπαταριών, σε σχέση με την ποσότητα ενέργειας που φέρουν, δείχνουν αρκετά περιορισμένα, ώστε να

υποστηρίζουν ένα αυτοκίνητο με επαρκές μέγεθος, χωρητικότητα και εμβέλεια μεταξύ των φορτίσεων, σε μία τιμή που οι αγοραστές είναι πρόθυμοι να πληρώσουν. Επιπλέον, η αργή επαναφόρτιση των μπαταριών, συνήθως κατά τη διάρκεια της νύχτας, θεωρείται ως μειονέκτημα από πιθανούς αγοραστές. Οι προσδοκίες για επαναστάσεις στην ανάπτυξη τεχνολογίας μπαταριών, ικανής να κάνει το ηλεκτρικό αυτοκίνητο να αποκτήσει μεγαλύτερο τμήμα στις πωλήσεις αυτοκινήτου, φαίνεται να μειώνονται με το πέρασμα των χρόνων. Τα ηλεκτρικά αυτοκίνητα ίσως ακόμη έχουν ικανό μερίδιο αγοράς για μεταφορικούς σκοπούς σε μικρές αποστάσεις, όπου μηδενικός θόρυβος και μηδενικές εκπομπές καυσαερίων είναι σημαντικά. Εκτός κι αν συμβεί ένα ξέσπασμα στην ανάπτυξη της τεχνολογίας μπαταριών που θα αλλάξει αυτό το σενάριο, η Επιτροπή βλέπει μικρές πιθανότητες να κρατήσει το ηλεκτρικό αυτοκίνητο στη λίστα με τους υποψήφιους για εναλλακτικό όχημα, που θα δώσει μεγαλύτερους όγκους αγорών.”

Η ιστορία του ηλεκτρικού/υβριδικού αυτοκινήτου είχε σκαμπανεβάσματα, και δεν ήταν μια περίοδος συνεχούς καινοτομίας και προόδου. Όλες οι μεγάλες καινοτομίες, όπως το ηλεκτρικό μοτέρ, οι μπαταρίες και το δίκτυο ανεφοδιασμού με ηλεκτρισμό, επινοήθηκαν περισσότερα από εκατό χρόνια πριν. Οι λόγοι που ενέπνευσαν τους εφευρέτες και τους κατασκευαστές να δουλέψουν πάνω σε αυτό το πρότζεκτ άλλαξαν με το πέρασμα των χρόνων. Αρχικά ήταν η αστική ρύπανση και ο θόρυβος, ενώ πιο πρόσφατα ήταν η προσπάθεια για αειφόρο ανάπτυξη και η κλιματική αλλαγή. Οι δυσκολίες όμως που αντιμετωπίστηκαν παρέμειναν οι ίδιες. Μεγάλο κόστος μπαταριών, μικρή ακτίνα κίνησης μεταξύ των ανεφοδιασμών, μικρές ταχύτητες και χρονοβόρα φόρτιση των μπαταριών σε ένα ανεπαρκές δίκτυο. Το ηλεκτρικό/υβριδικό αυτοκίνητο, έχοντας μάθει από τα λάθη και τις προκλήσεις του παρελθόντος, φαίνεται να διανύει μια δεύτερη περίοδο ακμής, σίγουρα όχι χρυσής, αλλά μένει ακόμη να αποδείξει ότι ήρθε για να μείνει.

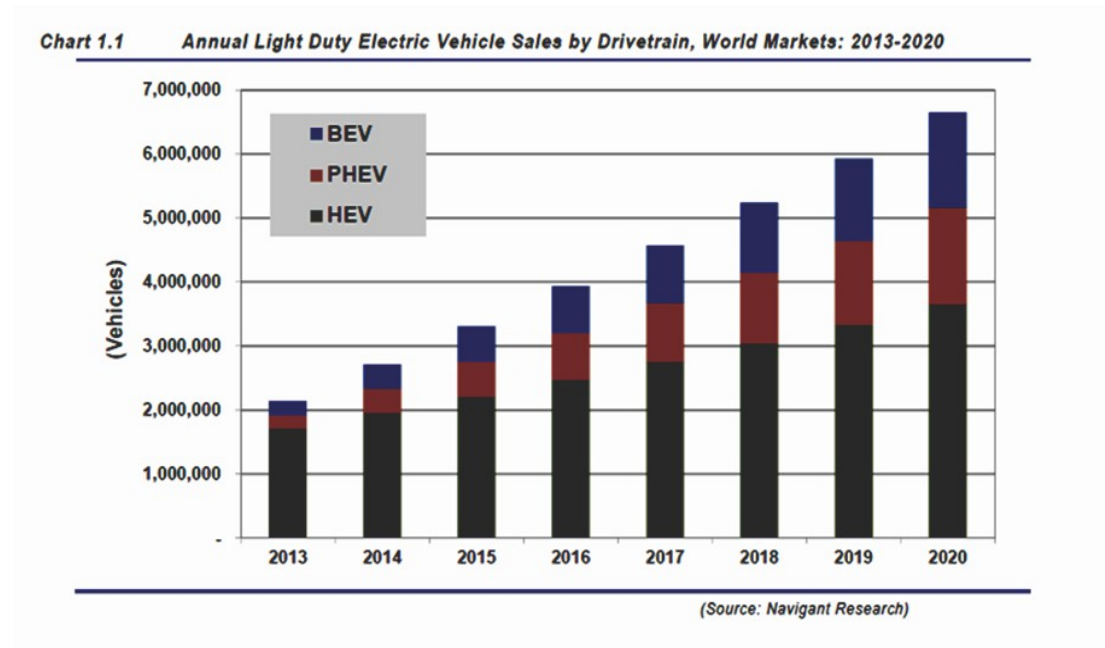
## **2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΦΟΡΑ**

Αν και η πρόβλεψη των πωλήσεων αυτοκινήτων είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των αυτοκινητοβιομηχανιών, λίγη έρευνα έχει διεξαχθεί στον τομέα της πρόβλεψης των πωλήσεων τους και ακόμη λιγότερη στον τομέα των αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν για καύσιμο εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Παρόλα αυτά υπάρχουν κάποιες έρευνες οι οποίες είναι ενδιαφέρουσες και χρήζουν παρουσίασης στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Το Navigant Research προβλέπει παγκόσμιους ετήσιους ρυθμούς ανάπτυξης της τάξης του 11,5% για HEVs, 31,9% για τα PHEVs και 31,5% για τα BEVs. Η Άπω Ανατολή και η Βόρεια Αμερική αναμένεται να είναι οι μεγαλύτερες αγορές για τα HEVs, με Ιαπωνία και Ηνωμένες Πολιτείες να πωλούν 1,1 εκ.

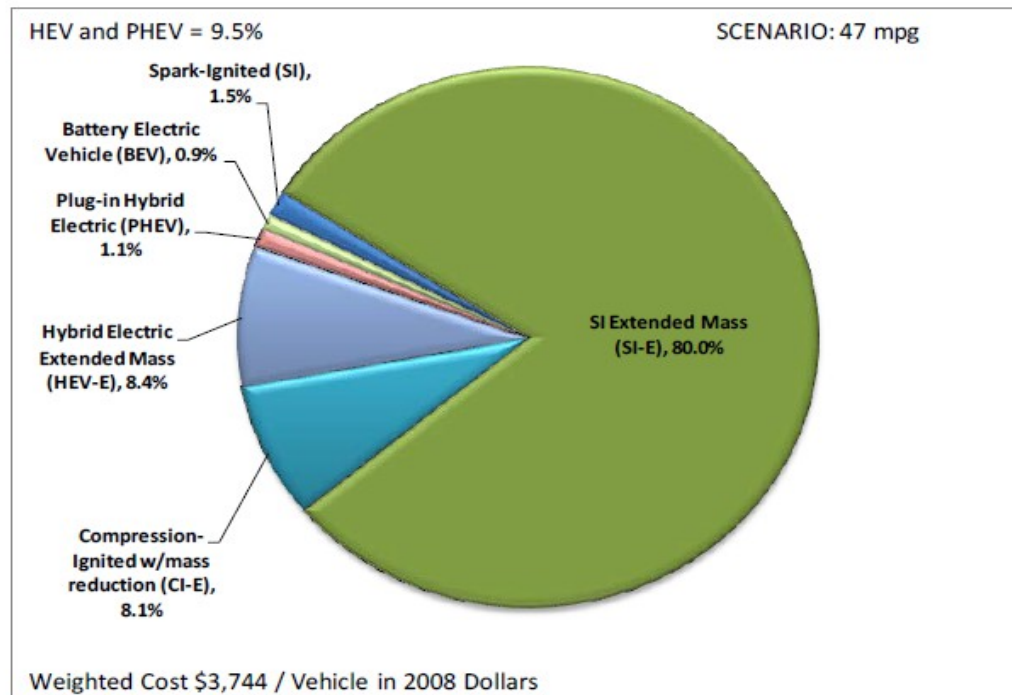
και 1 εκ. HEVs αντίστοιχα το 2020. η Βόρεια Αμερική είναι η μόνη αγορά που αναμένεται να έχει σημαντικά μεγαλύτερες πωλήσεις PHEVs από BEVs (1,5 προς 1). Δυτική Ευρώπη, Άπω Ανατολή και Νότια Αμερική θα πωλήσουν περίπου τόσα PHEVs όσο BEVs. Τη μερίδα του λέοντος θα λάβει βεβαίως η κατηγορία των HEVs, ανεξαιρέτως περιοχής και χρονιάς πωλήσεων.

Στο παρακάτω διάγραμμα φαίνονται αναλυτικά οι πωλήσεις ανά κατηγορία και έτος.

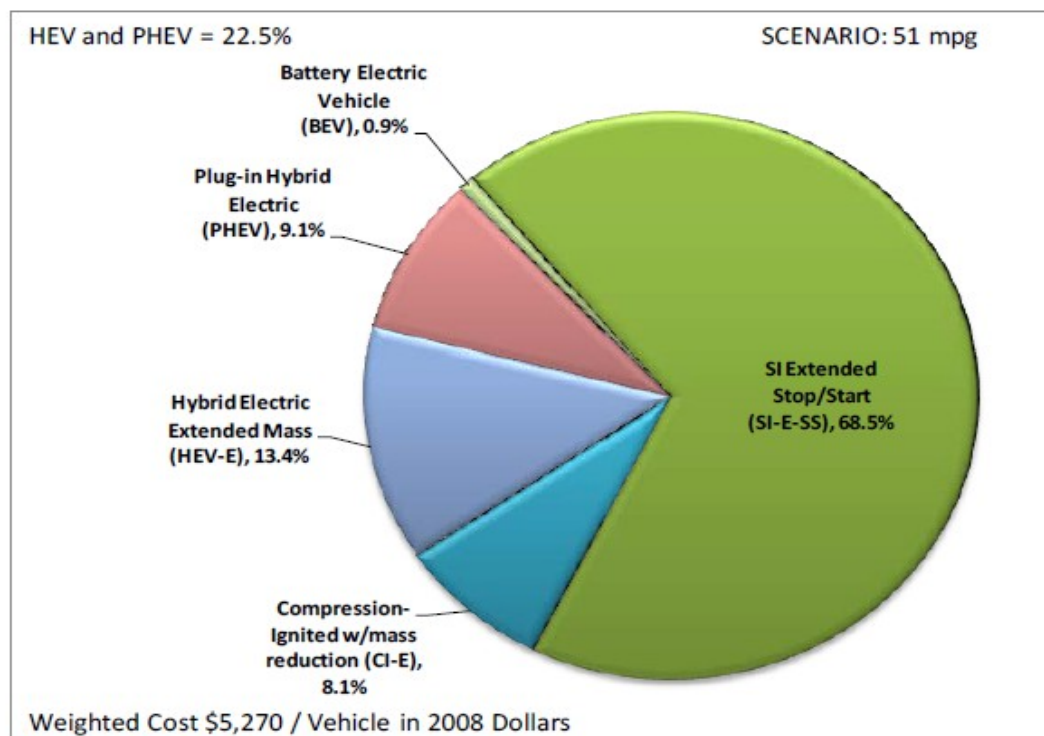


Το Center for Automotive Research χρησιμοποιεί τέσσερα σενάρια για τις προβλέψεις του. Κάθε σενάριο αντιστοιχεί σε μείωση των εκπομπών CO<sub>2</sub> κατά 3, 4, 5, και 6% που αναλογούν σε καταναλώσεις καυσίμου 47, 51, 56 και 62 mpg (miles per gallon) αντίστοιχα.

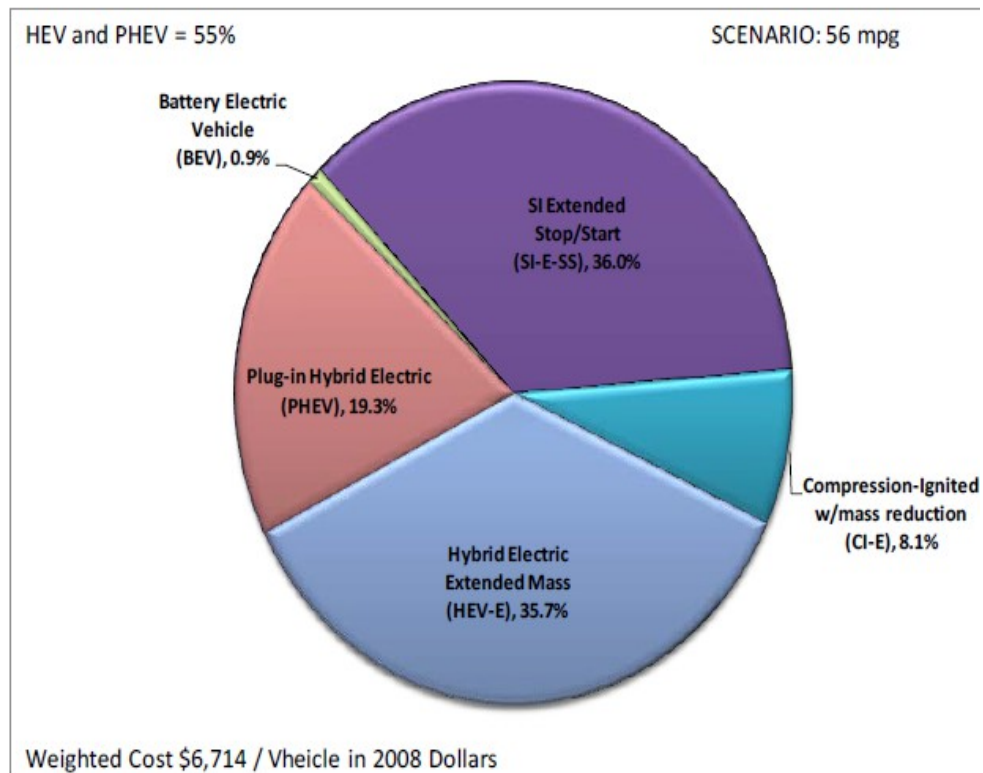
## ΣΕΝΑΡΙΟ I



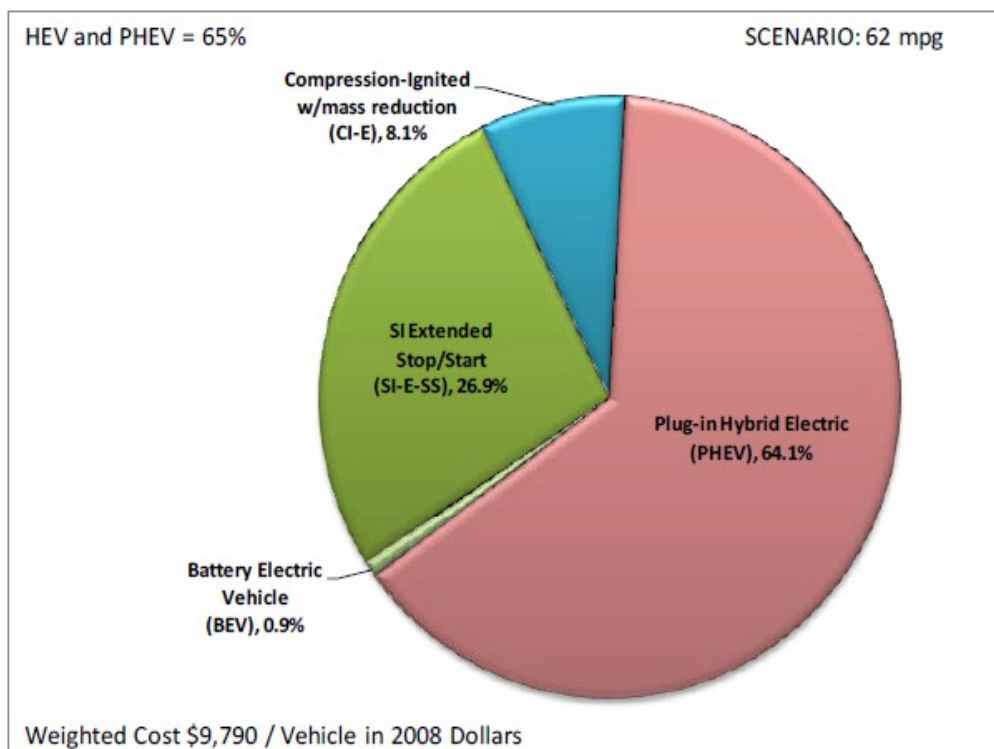
## ΣΕΝΑΡΙΟ II



### ΣΕΝΑΡΙΟ III



### ΣΕΝΑΡΙΟ IV



Οι Agh et al. το 2008 παρουσίασαν μια εργασία που αναλύει πώς η προσθήκη επιβατικών αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα στην αγορά θα επηρεάσει τη ζήτηση επιβατικών αυτοκινήτων. Χρησιμοποίησαν συνδυασμένη ανάλυση και ένα μοντέλο πολλαπλής διακριτής επιλογής για να υπολογίσουν τις προτιμήσεις των καταναλωτών όσον αφορά οχήματα εναλλακτικού καυσίμου, και με βάση τις προτιμήσεις αυτές, διεξήγαγαν μια προσομοίωση για να αναλύσουν τους μεταβαλλόμενους δείκτες ιδιοκτησίας και χρήσης αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν εναλλακτικά. Επιπλέον, προσδιόρισαν αλλαγές στη συνολική κατανάλωση καυσίμων και εκπομπών ρύπων. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η βενζίνη που χρησιμοποιείται ως καύσιμο αυτοκινήτων θα είναι ακόμα η πρώτη επιλογή των καταναλωτών, αλλά επιβατικά αυτοκίνητα που χρησιμοποιούν εναλλακτικά καύσιμα, ωστόσο, θα διαγωνιστούν ως υποκατάστατο των βενζινοκινήτων και πετρελαιοκινήτων αυτοκινήτων. Τέλος, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προσθήκη εναλλακτικών καυσίμων στην αγορά θα μειώσει αποτελεσματικά την κατανάλωση βενζίνης και ντίζελ και την εκπομπή ρύπων.

Οι Dwivedi et al. το 2013 δημοσίευσαν ένα άρθρο στο οποίο χρησιμοποίησαν τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης για να προβλέψουν πωλήσεις αυτοκινήτων. Ο λόγος ήταν ότι σήμερα η πρόβλεψη των πωλήσεων διαδραματίζει καίριο ρόλο για κάθε επιχείρηση σε αυτό το ανταγωνιστικό περιβάλλον. Η εργασία τους αυτή συγκεκριμένα αντιμετωπίζει το πρόβλημα της μηνιαίας πρόβλεψης πωλήσεων στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας. Το σύνολο δεδομένων βασίζεται σε μηνιαίες πωλήσεις (τελευταία στοιχεία 5 χρόνια 2008-2012). Κατά κύριο λόγο, χρησιμοποίησαν δύο μεθόδους πρόβλεψης, τον κινητό μέσο και την εκθετική εξομάλυνση για να προβλέψουν προηγούμενες τιμές δεδομένων και στη συνέχεια να χρησιμοποιήσουν αυτές τις προβλεπόμενες αξίες ως είσοδο σε ένα μοντέλο ANFIS (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). Τέλος έκαναν σύγκριση του μοντέλου με άλλα δύο μοντέλα πρόβλεψης: ANN (τεχνητό νευρωνικό δίκτυο) και η γραμμική παλινδρόμηση. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το μοντέλο ANFIS δίνει καλύτερα αποτελέσματα από ό, τι άλλα δύο μοντέλα.

Οι Shepherd et al. το 2012 ανέπτυξαν ένα μοντέλο δυναμικού συστήματος του των ηλεκτρικών οχημάτων για τα επόμενα 40 χρόνια στο Ηνωμένο Βασίλειο. Το μοντέλο επεκτείνει προηγούμενες εργασίες από τους Struben και Sterman (2008) για να καταστεί δυνατή η ανάλυση της αγοράς του Ηνωμένου Βασιλείου. Οι επιπτώσεις των εκπομπών CO<sub>2</sub> και παραγόντων όπως είναι οι επιδοτήσεις, το εύρος, το σημείο τέλους διαθεσιμότητας, τιμές εκπομπών και των φορολογικών εσόδων λήφθηκαν υπόψιν. Μπορούμε να δείξουμε ότι οι επιδοτήσεις έχουν μεγάλο αντίκτυπο στην απορρόφηση των αυτοκινήτων σε μια παραδοσιακή περίπτωση επιχείρησης. Ωστόσο, όταν εισήγαγαν ένα υποθετικό σενάριο μάρκετινγκ, διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο

στην ανατροπή της αγοράς σε μια επιτυχημένη πορεία. Η ευαισθησία των αποτελεσμάτων σε υποθέσεις σχετικά, μέσου όρου ζωής του οχήματος και ποσοστό εκπομπών διερευνήθηκαν και να διαπιστώθηκε ότι η αλλαγή αυτών μπορεί να οδηγήσει σε ένα μεγαλύτερο αντίκτυπο στην απορρόφηση και στις εκπομπές από την πολιτική ή τα χαρακτηριστικά του οχήματος.

Οι Orbach και Fruchter το 2011 παρουσίασαν ένα μοντέλο που προβλέπει τις πωλήσεις και την εξέλιξη του προϊόντος του υβριδικού-ηλεκτρικού αυτοκινήτου, βασισμένου σε δεδομένα της αγοράς και της βιομηχανίας, τα οποία μπορεί να συλλεχθούν πριν την παρουσίαση του προϊόντος. Εξέλιξη των προϊόντων μπορεί να είναι σταδιακή, αλλά μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί με την απελευθέρωση των νέων γενεών. Στο μοντέλο τους η υιοθέτηση ενός νέου προϊόντος παρακινείται από βελτιώσεις χαρακτηριστικών και οι εταιρικές κινήσεις βελτίωσης χαρακτηριστικών υποκινούνται από την ανάπτυξη της αγοράς και την κατευθύνονται από τις προτιμήσεις της αγοράς. Η αλληλεξάρτηση μεταξύ των βελτιώσεων χαρακτηριστικών και το αθροιστικό επίπεδο υιοθέτησης καθιστά το πρόβλημα εγγενώς δυναμικό. Η εξάρτηση του επιπέδου χαρακτηριστικών στο επίπεδο υιοθέτηση εκτιμάται χρησιμοποιώντας τη βιομηχανία και τεχνολογία ανάλυσης. Τέλος αποδείξανε ότι η επιλογή της συλλογής και ερμηνείας των δεδομένων σχετικά με τις πτυχές τόσο της ζήτησης όσο και της προσφοράς, πριν το νέο προϊόν εισαχθεί, τους επιτρέπει να υπολογίσουν τις πωλήσεις και την πρόοδο της τεχνολογία ενδογενώς αντί να απαιτούνται ως είσοδοι.

Οι Weiss et al. το 2012 έκαναν μια μελέτη για την πρόβλεψη των τιμών των πωλήσεων των υβριδικών οχημάτων. Τα υβριδικά ηλεκτρικά οχήματα (HEVs) και ηλεκτρικά με μπαταρία οχήματα (BEVs) είναι σήμερα πιο ακριβά από τα συμβατικά επιβατικά αυτοκίνητα, αλλά μπορούν να γίνουν φθηνότερα, λόγω της τεχνολογικής εκπαίδευσης. Πήραν υπόψιν τις προοπτικές της μελλοντικής μείωσης των τιμών από ποσοστά μάθησης εκ των υστέρων για HEVs και προβλέψεις εκ των προτέρων τιμή για HEVs και BEVs. Από το 1997, τα HEVs έχουν δείξει μια ισχυρή πτώση των τιμών τους και της διαφοράς τιμής στη μάθηση σε ποσοστό  $7\pm 2\%$  και  $23\pm 5\%$ , αντίστοιχα. Η πρόβλεψή μας δείχνει ότι η μεταβολή της τιμής, ακόμη και με τα οχήματα αυτά μπορεί να επιτευχθεί μόνο από το 2026 και το 2032, όταν 50 και 80 εκατομμύρια BEVs, αντίστοιχα, θα έχουν παραχθεί σε όλο τον κόσμο. Εκτιμούμε ότι τα BEVs μπορεί να αποτελούν μέχρι τότε παγκόσμια επένδυση εκμάθησης της τάξεως των 100 – 150 δις, η οποία είναι μικρότερη από τις συνολικές επιδοτήσεις για την κατανάλωση ορυκτών καυσίμων που πληρώθηκαν το 2009. Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι HEVs, συμπεριλαμβανομένων των plug-in HEVs, θα μπορούσε να γίνουν η κυρίαρχη τεχνολογία των οχημάτων στις επόμενες δύο δεκαετίες, ενώ τα BEVs μπορεί να απαιτούν μακροπρόθεσμη πολιτική υποστήριξη.

Οι D'Souza et al. το 2012 παρουσίασαν μια εργασία με την οποία έκανα πρόβλεψη στην Ινδική αυτοκινητοβιομηχανία. Χρησιμοποίησαν

Predictive analytics που είναι ο κλάδος των προηγμένων analytics, η οποία περιλαμβάνει μια ποικιλία στατιστικών τεχνικών. Μοντελοποίηση, μηχανική μάθηση, στατιστικά στοιχεία, και εξόρυξη δεδομένων που αναλύουν τα τρέχοντα και ιστορικά γεγονότα για να κάνει προβλέψεις για το άγνωστο μέλλον. Χρησιμοποιώντας Soft Computing και νευρωνικά δίκτυα με πολύ αποτελεσματικό τρόπο με την αντικαθιστώντας όλες τις άλλες μεθόδους παράγουν προβλέψεις τόσο ακριβής ή και καλύτερες από εκείνες των στατιστικών μεθόδων. Η Ινδική αυτοκινητοβιομηχανία έχει περάσει τεράστια αλλαγή σε όρους πωλήσεων, προσδοκία πελατών και προκλήσεων. Μια γρήγορη λήψη αποφάσεων και μια θετική κίνηση προς την αλλαγή απαιτείται καθώς το σενάριο της αγοράς μπορεί να είναι ιδιαίτερα δυναμικό και μπορεί να προκαλέσει την αλλαγή χωρίς να δώσει πολύ χρόνο για ανταπόκριση. Η εργασία τους στοχεύει στην παροχή του προτεινόμενου νευρωνικού δικτύου που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προβλέψει τις μελλοντικές πωλήσεις στη βασισμένο σε ιστορικά δεδομένα χρησιμοποιώντας τον αλγόριθμο της προ τα πίσω διάδοσης. Συγκεκριμένα στοχεύουν στην εύρεση της εταιρείας αυτοκινήτων που θα είναι σε υψηλό επίπεδο πωλήσεων, σύμφωνα με την δυνατότητα και επιθυμία του πελάτη. Αυτή η πρόβλεψη βοηθά τις επιχειρήσεις να λάβουν στρατηγικές αποφάσεις για να επιτύχουν τους στόχους.

Το 2011 οι Pierdzioch et al δημοσίευσαν ένα άρθρο στο οποίο προέβλεπαν τις πωλήσεις των αμερικανικών αυτοκινήτων στην Ιαπωνία. Κατέγραψαν μια αξιοσημείωτη ετερογένεια στις προβλέψεις αυτές και έδειξαν βασιζόμενοι σε παραδοσιακά κριτήρια ότι οι προβλέψεις δεν είναι ούτε ορθολογικές ούτε αμερόληπτες. Επίσης αναφέρουν ότι η ακρίβεια της πρόβλεψης είναι συστηματικά αντίθετα συσχετιζόμενη με την συμπεριφορά των αρθρογράφων. Τα βασικά τους ευρήματα ισχύουν τόσο για την Ιαπωνική αγορά όσο και για την αγορά των ΗΠΑ, και ισχύουν για βραχυπρόθεσμες και μακροπρόθεσμες προβλέψεις. Έχουν, επίσης σημειώσει ότι οι προβλέψεις πωλήσεων αμερικανικών αυτοκινήτων έρχονται πιο κοντά στο σημείο αναφοράς της αμεροληψία από προβλέψεις των καταχωρίσεων ιαπωνικών αυτοκινήτων που επίσης εξετάστηκε. Τέλος, αναφέρουν ότι, όσον αφορά το μέγεθος του στατιστικού S, τα στοιχεία έδειξαν ότι τείνει να είναι κάπως ασθενέστερο όσον αφορά την πρόβλεψη πωλήσεων αμερικανικών αυτοκινήτων από ότι στην περίπτωση των προβλέψεων των εγγραφών ιαπωνικών αυτοκινήτων.

Το 2009 οι Wu et al παρουσίασαν ένα μοντέλο ANFIS για την πρόβλεψη της τιμής των μεταχειρισμένων αυτοκινήτων. Το προτεινόμενο σύστημα αποτελείται από τρία μέρη: το σύστημα απόκτησης δεδομένων, τον αλγόριθμο πρόβλεψης της τιμής και την ανάλυση των επιδόσεων. Ως αποτελεσματικοί παράγοντες σε αυτό το σύστημα πρόβλεψης θεωρήθηκαν η μάρκα του αυτοκινήτου, το έτος κατασκευής του και το είδος του κινητήρα. Έπειτα ο εξοπλισμός του αυτοκινήτου θεωρήθηκε ότι αυξάνει την απόδοση της πρόβλεψης των τιμών. Για την σύγκριση της επίδοσης του μοντέλου



χρησιμοποιήθηκε ένα μοντέλο τεχνητού νευρωνικού δικτύου που χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο της προς τα πίσω μάθησης. Το ANFIS περιλαμβάνει τόσο τον ποιοτικό προσδιορισμό της ασαφούς λογικής όσο και την προσαρμοστικότητα των νευρωνικών δικτύων. Τα αποτελέσματα επεσήμανε ότι το προτεινόμενο ANFIS σύστημα έχει μεγαλύτερη προβλεπτική ικανότητα από αυτή των νευρωνικών δικτύων.

Οι Zhu et al το 2014 παρουσίασαν ένα εκτεταμένο, δυναμικό ιεραρχικό μοντέλο αξιολόγησης της βραχυπρόθεσμης ζήτησης αυτοκινήτων με σκοπό την αντιμετώπιση των μειονεκτημάτων των προηγούμενων μοντέλων, κυρίως για μία χρονοσειρά. Ο ορισμός της εκτεταμένης αξιολόγησης συσχέτισης προτάθηκε, και τότε η μέθοδος συζητήθηκε να δείξει την συσχέτιση μεταξύ των παραγόντων επί της ζήτησης των αυτοκινήτων. Αξιοποιώντας εκτεταμένες δεξιότητες, παράγοντες και υπο-παράγοντες παρουσιάστηκε ως συσχετισμός πινάκων *eigen* που θα μπορούσε να εξασφαλίσει το επίπεδο των επιρροών του κάθε παράγοντα όσον αφορά τη ζήτηση αυτοκινήτων. Στη συνέχεια, βραχυπρόθεσμα ιστορικά δεδομένα προβλέφθηκαν και συγκρίθηκαν με τα πραγματικά δεδομένα. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η προγνωστικό σφάλμα είναι μικρότερο από 6%, γεγονός που επιβεβαιώνει την επικύρωση του μοντέλου πρόβλεψης. Η μελέτη αυτή παρέχει τα θεμέλια για τη διαχείριση της παραγωγής μακροοικονομικών ελέγχου και κατασκευών αυτοκινήτων.

Εν όψει της απογοητευτικής ικανότητας πρόβλεψης των support vector machine (SVM) για την πώληση των προϊόντων με την κανονική θορύβους διανομής, οι Yan et al το 2013 παρουσίασαν ένα νέο SVM, που ονομάζεται G-SVM, και χρησιμοποιεί ως συνάρτηση απώλειας την Gauss. Έχει θεωρητικά αποδειχθεί ότι μία ρυθμιζόμενη παράμετρος G-SVM είναι ίση με όχι μόνο το άνω όριο της αναλογίας των εσφαλμένων δειγμάτων στο σύνολο των δειγμάτων αλλά επίσης και με το κατώτερο όριο της αναλογίας των φορέων στήριξης για συνολικών δειγμάτων. Με άλλα λόγια, ο αριθμός των εσφαλμένων δειγμάτων είναι μικρότερος ή ίσος με εκείνο των φορέων στήριξης. Μια νέα έκδοση του particle swarm optimization (PSO) με την ολοκλήρωση της εφοδιαστικής χαρτογράφησης και του πρότυπου PSO προτείνεται για ένα βέλτιστο συνδυασμό παραμέτρων g-SVM. Με τα παραπάνω, μια βραχυπρόθεσμη ευφυής μέθοδος πρόβλεψης βασιζόμενη στο G-SVM και το προτεινόμενο PSO δημιουργήθηκε. Τα αποτελέσματα αυτής της εφαρμογής στην πρόβλεψη πωλήσεων αυτοκινήτων έδειξαν ότι αυτή η μέθοδος πρόβλεψης είναι εφικτή και αποτελεσματική.

Οι Jun & Qing το 2015 για να βελτιώσουν την ικανότητα των BP νευρωνικών δικτύων ούτως ώστε να χρησιμοποιεί πολύπλοκες συναρτήσεις, βελτίωσαν τη δομή των BP νευρωνικών δικτύων βελτιστοποίησαν τα βάρη και τα κατώφλια συμφωνίας τους βασιζόμενοι σε ένα γενετικό αλγόριθμο. Εκπαίδευσαν τα νευρωνικά δίκτυα για να βελτιώσουν την ικανότητα του μοντέλου και το εφάρμοσαν στην πρόβλεψη πωλήσεων αυτοκινήτων. Στη συνέχεια έκανα σύγκριση των αποτελεσμάτων αυτών με αυτά ενός απλού

μοντέλου BP νευρωνικών δικτύων. Η σύγκριση έδειξε ότι η προτεινόμενη αυτή μέθοδος επεξεργάζεται τα δεδομένα καλύτερα και έχει υψηλότερη προβλεπτική ικανότητα με σημαντική γραμμική συσχέτιση .

Το 2009 ο Wu στοχεύοντας σε ακολουθίες από μικρά δείγματα, ανακάλυψε πως ο εποχιακός χαρακτήρας, η μη γραμμικότητα, η ασάφεια και η υπάρχουσα support vector kernel δεν προσεγγίζουν τη τυχαία καμπύλη της χρονοσειράς των πωλήσεων στον L2(R2) χώρο. Προτείνετε μια wavelet support vector machine (WN m-SVM) με βάση θεωρία κυμάτων και τροποποιημένο support vector machine. Επίσης σχεδίασε τον αλγόριθμο PSO για να επιλέξετε τις καλύτερες παραμέτρους του WN m-SVM μοντέλου στο πεδίο εφαρμογής των περιορισμών. Τα αποτελέσματα της εφαρμογής της πρόβλεψης στην πώληση αυτοκινήτων έδειξαν ότι η προσέγγιση με βάση το PSO WN m-SVM μοντέλο είναι αποτελεσματική και εφικτή. Η σύγκριση μεταξύ της μεθόδου που πρότεινε σε αυτή την εργασία με άλλες μεθόδους όπως η PSOW m-SVM, έδειξε ότι αυτή η μέθοδος είναι καλύτερη και καταλληλότερη.

Με αφορμή την ταχεία ανάπτυξη της κινεζικής οικονομίας και την πρόοδο της κοινωνίας, τα θέματα του περιβάλλοντος στην Κίνα προσέλκυσαν την προσοχή των Li et al. το 2011 και έγραψαν ένα άρθρο με θέμα την ανάλυση της τάσης του όγκου των πωλήσεων των κινέζικων αυτοκινήτων καθώς και των εκπομπών ρύπων τους. Σύμφωνα με τις προβλέψεις των εμπειρογνομόνων, η βιομηχανία αυτοκινήτων της Κίνας θα καταλαμβάνει περίπου το 5% των συνολικών εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Η εργασία αυτή, βασισμένη στη Rough Set Theory εκπόνησαν μία διαδικασία πρόβλεψης της ζήτησης του όγκου των πωλήσεων αυτοκινήτων. Έπειτα οι εκπομπές διοξειδίου άνθρακα των αυτοκινήτων προβλέφθηκε με χρήση κανόνων και υπολογισμών. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η ακρίβεια την πρόβλεψης είναι αρκετά ικανοποιητική και στις δύο περιπτώσεις.

Το 2012 ο Kurilov παρουσίασε μια εργασία στην οποία παρουσίασε τον όγκο της παγκόσμιας παραγωγής μηχανοκίνητων οχημάτων έως το 2026 με βάση τη μέση δυναμική της παραγωγής και την προβολή του πολυώνυμου της τάσης πρόβλεψης δευτέρου βαθμού. Οι προβλέψεις των πωλήσεων των αυτοκινήτων οχημάτων και οι μεταβολές στον όγκο παραγωγής έγιναν με τη βοήθεια τεχνικής ανάλυσης. Τα αποτελέσματα αισιόδοξου, απαισιόδοξου και συγκρατημένου σεναρίου χρησιμοποιώντας την τεχνική ανάλυση ήταν ικανοποιητικά.

Οι Wu και Liu το 2012 δημοσίευσαν ένα σύστημα πρόβλεψης για την κατανάλωση καυσίμου αυτοκινήτων χρησιμοποιώντας μια συνάρτηση ακτινικής βάσης (RBF). Η εργασία τους αποτελείται από τρία μέρη: την απόκτηση πληροφοριών, την κατανάλωση καυσίμου και τον αλγόριθμο πρόβλεψης και αξιολόγησης των επιδόσεων. Παρά το γεγονός ότι υπάρχουν πολλοί παράγοντες που επηρεάζουν την κατανάλωση καυσίμου ενός αυτοκινήτου σε μια πρακτική διαδικασία κίνησης, στο παρόν σύστημα οι

σχετικοί παράγοντες αποφασίστηκαν ως η μάρκα αυτοκινήτου, το στυλ κινητήρα, το βάρος του αυτοκινήτου, τύπος οχήματος και μεταφοράς του συστήματος, τα οποία χρησιμοποιούνται ως πληροφορίες εισόδου για την εκπαίδευση του νευρωνικού δικτύου και την διαδικασία πρόβλεψης της κατανάλωσης καυσίμων. Στην πρόβλεψη κατανάλωσης καυσίμων, για να επαληθευθεί η αποτελεσματικότητα του προτεινόμενου νευρωνικού δικτύου ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο και ένα νευρωνικό δίκτυο προς τα πίσω-διάδοσης συγκρίθηκαν. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι το προτεινόμενο σύστημα με τη χρήση νευρωνικών δικτύων είναι αποτελεσματικό και η απόδοση είναι ικανοποιητική για την πρόβλεψη της κατανάλωσης καυσίμου.

Οι Lee και Cho το 2009 έκαναν πρόβλεψη της ζήτησης των καταναλωτών για τα πετρελαιοκίνητα επιβατηγά αυτοκίνητα. Το μοντέλο χρησιμοποιεί *conjoint analysis* και μπορεί να εφαρμοσθεί σε κυβερνητικές πολιτικές και σε χαρακτηριστικά όπως η τιμή και η απόδοση του κινητήρα. Εκτίμησαν ότι οι καταναλωτές είναι πιθανόν να προτιμούν πετρελαιοκίνητα επιβατικά αυτοκίνητα από αυτά της βενζίνης, λόγω του χαμηλού κόστους λειτουργίας τους παρά την υψηλή τιμή αγοράς όταν το ντίζελ είναι σχετικά φθηνότερο από τη βενζίνη. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι τα πετρελαιοκίνητα επιβατηγά αυτοκίνητα θα κατέχουν το 42% της αγοράς υπό το υπάρχον το σύστημα τιμολόγησης που προτείνεται από το Υπουργείο Περιβάλλοντος της Κορέας. Αλλαγή ρυθμίσεων για την αγορά της Νότιας Κορέας έχουν επιτρέψει τα πετρελαιοκίνητα επιβατικά αυτοκίνητα στην εγχώρια αγορά. Η διάχυση των πετρελαιοκινήτων αυτοκινήτων συνδέεται με θέματα περιβαλλοντικών επιπτώσεων, προσφοράς και ζήτησης ενέργειας, καθώς και οι αλλαγές των φορολογικών εσόδων. Οι φορείς χάραξης πολιτικής μπορούν να επηρεάσουν η ζήτηση για τα πετρελαιοκίνητα οχήματα για την προστασία της κοινωνικής πρόνοιας και να τηρήσει τις διεθνείς περιβαλλοντικές νομοθεσίες για την προστασία. Από την πλευρά της προσφοράς, οι κατασκευαστές αυτοκινήτων πρέπει να ξέρετε για τις προτιμήσεις των καταναλωτών όσον αφορά τα νέα οχήματα να καταλήξουμε σε στρατηγικές ανάπτυξης.

### **3. ΔΕΔΟΜΕΝΑ**

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την εκπαίδευση και αξιολόγηση του μοντέλου είναι μηνιαίες τιμές πωλήσεων υβριδικών αυτοκινήτων στις ΗΠΑ τα τελευταία πέντε χρόνια. Το πλήθος τους είναι 60 και πάρθηκαν από την Electric Drive Sales Association <http://electricdrive.org/>. Παρόλο που δεν υπάρχει κάποια καθολική διαδικασία η οποία ακολουθείται για το πώς χωρίζονται τα δεδομένα, η γενική πρακτική είναι η διάθεση περισσότερων στοιχείων για την εκπαίδευση του μοντέλου και τα υπόλοιπα για την αξιολόγησή του. Οι περισσότερες μελέτες στη βιβλιογραφία χρησιμοποιούν την αναλογία του διαχωρισμού των δεδομένων για την εκπαίδευση (εντός δείγματος) και αξιολόγηση (εκτός των δείγματος), όπως 70: 30%, 80: 20%, ή

90: 10%. Στην παρούσα εργασία επιλέχθηκαν οι 48 πρώτες παρατηρήσεις για την εκπαίδευση του μοντέλου και οι υπόλοιπες 12 για την αξιολόγησή του.

## 4. ΘΕΩΡΗΤΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ

Το νευρο-ασαφές μοντέλο ANFIS είναι συνδυασμός δύο διαφορετικών τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης. Της ασαφούς λογικής και των νευρωνικών δικτύων.

### 4.1 Ασαφής Λογική (Fuzzy Logic)

Στα μέσα του 1960 ο Lotfi A. Zadeh του πανεπιστημίου Berkeley της Καλιφόρνια εφηύρε την θεωρία των ασαφών συνόλων, η οποία λέει ότι συνήθως στον κόσμο που ζούμε τα αντικείμενα γύρω μας ανήκουν σε διάφορα σύνολα με διαφορετικούς βαθμούς συμμετοχής. Πχ. η κλάση των "ψηλών ανθρώπων" δεν έχει αυστηρό κριτήριο συμμετοχής. Ο ασαφής ορισμός κλάσεων παίζει πολύ μεγάλο ρόλο στην ανθρώπινη επικοινωνία. Το 1965 ο Zadeh θεμελίωσε πλήρως την θεωρία των ασαφών συνόλων και της ασαφούς λογικής ολοκληρώνοντας την δουλειά αρκετών άλλων μαθηματικών μέχρι τότε. Η θεωρία του Zadeh δέχθηκε μεγάλη αμφισβήτηση κυρίως στην Αμερική. Την δεκαετία του 1970 ο Ebrahim H. Mamdani, μηχανικός στο πανεπιστήμιο Queen Mary του Λονδίνου δοκίμασε για πρώτη φορά την ασαφή λογική για την ανάπτυξη ενός ελεγκτή ατμομηχανής.

Η θεωρία συνόλων αρχικά αναπτύχθηκε από τον Cantor (1845-1918). Η θεωρία του δέχθηκε μεγάλη αμφισβήτηση και τελικά πέθανε το 1918 σε ψυχιατρική κλινική. Σύνολο είναι οποιαδήποτε συλλογή - ομάδα ομοειδών πραγμάτων (πραγμάτων που έχουν ή ικανοποιούν μία συγκεκριμένη ιδιότητα). Τα μέλη της ομάδας αυτής καλούνται στοιχεία του συνόλου. Το πλήθος των στοιχείων ενός συνόλου καλείται πληθικός αριθμός του συνόλου (συμβολίζεται συνήθως με  $N$ ). Υπάρχουν πεπερασμένα και άπειρα σύνολα, ανάλογα με το αν ο πληθικός τους αριθμός είναι πεπερασμένος ή άπειρος.

Ένα ασαφές σύνολο (fuzzy set) ορίζεται ως ένα σύνολο διατεταγμένων ζευγών  $(x, \mu_A(x))$  όπου  $x \in X$  και  $\mu_A(x) \in [0, 1]$ . Το σύνολο  $X$  αποτελεί ένα ευρύτερο σύνολο αναφοράς (universe of discourse) που περιλαμβάνει όλα τα αντικείμενα στα οποία μπορεί να γίνει αναφορά.

Η τιμή  $\mu_A(x)$  λέγεται συνάρτηση συμμετοχής (membership function) ή βαθμός αληθείας (degree of truth), συμβολίζει το βαθμό συμμετοχής του  $x$  στο  $A$  και παίρνει τιμές στο διάστημα  $[0, 1]$ .

Η διαφορά των ασαφών συνόλων συγκριτικά με την κλασική θεωρία συνόλων είναι ότι στη δεύτερη ισχύει  $\mu_A(x) \in \{0, 1\}$ , δηλαδή το  $x$  είτε ανήκει στο  $A$  [ $\mu_A(x) = 1$ ] ή δεν ανήκει [ $\mu_A(x) = 0$ ].

Το ασαφές σύνολο ορίζεται ως:  $A$  στην διακριτή και  $A = \sum \mu_A(x)/X$  στην διακριτή και  $A = \int \mu_A(x)/X$  στην περίπτωση που το  $X$  είναι ένα συνεχές διάστημα.

## Συνεπαγωγές

Έστω οι προτάσεις  $p = "x \text{ ανήκει στο σύνολο } A"$  και  $q = "y \text{ ανήκει στο σύνολο } B"$  όπου  $A$  και  $B$  είναι κλασσικά σύνολα. Η πρόταση " $p$  συνεπάγεται  $q$ " που θα συμβολίζεται  $R : p \rightarrow q$ , ερμηνεύεται ως  $\neg(p \wedge \neg q)$  δηλαδή ότι δεν μπορεί να αληθεύει το  $p$  και να μην αληθεύει το  $q$ . Η πλήρης ερμηνεία της συνεπαγωγής είναι ότι ο βαθμός αλήθειας της  $p \rightarrow q$  καθορίζει κατά πόσο το  $q$  αληθεύει τουλάχιστον κατά τον ίδιο βαθμό όσο το  $p$ . Έτσι σύμφωνα με την κλασσική λογική ο πίνακας αλήθειας της φυσικής συνεπαγωγής είναι ο ακόλουθος

$p$	$q$	$p \rightarrow q$
1	1	1
1	0	0
0	1	1
0	0	1

Μια επέκταση της φυσικής συνεπαγωγής  $R : p \rightarrow q$  χρησιμοποιώντας ασαφή σύνολα  $A$  και  $B$  είναι η σχέση  $R$  μεταξύ των  $A$  και  $B$

$$\mu_R(x, y) = \begin{cases} 1, & \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ 0, & \mu_A(x) > \mu_B(y) \end{cases} \quad (1)$$

που ονομάζεται αυστηρή συνεπαγωγή. Ο πιο διαδεδομένος τελεστής συνεπαγωγής στα ασαφή σύνολα είναι αυτός του Mamdani που ορίζεται από την ακόλουθη σχέση:

$$\mu_R(x, y) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(y)\} \quad (2).$$

Στην συμπερασματική συλλογιστική, δεδομένων αληθών προτάσεων το συμπέρασμα που βγαίνει δεν μπορεί να είναι ψευδές. Κλασσικό παράδειγμα συμπερασματικής συλλογιστικής είναι το ακόλουθο:

Πρόταση: Όλοι οι άνθρωποι είναι θνητοί

Γεγονός: Ο Σωκράτης είναι άνθρωπος

Συμπέρασμα: Ο Σωκράτης είναι θνητός

Ο έλεγχος διαδικασιών ή συστημάτων με ασαφείς ελεγκτές προϋποθέτει την ύπαρξη κάποιων λεκτικών κανόνων που περιγράφουν τις

αντιδράσεις ενός ανθρώπου χειριστή. Αυτοί οι κανόνες περιγράφονται από ένα σύνολο προτάσεων της μορφής "ΑΝ Α τότε Β". Είναι προφανές ότι σε πολύπλοκες διαδικασίες δεν είναι γνωστοί όλοι οι κανόνες εκ των προτέρων. Άρα ζητείται ένας μηχανισμός που μπορεί να παίρνει αποφάσεις με ελλιπή στοιχεία, κάτι που η ασαφής λογική αποδεικνύεται ότι μπορεί να κάνει.

Στον προσεγγιστικό συλλογισμό και την ασαφή λογική ο σημαντικότερος κανόνας συνεπαγωγής είναι ο Generalized Modus Ponens (GMP) για τον οποίο ισχύει:

Πρόταση:     ΑΝ x είναι Α ΤΟΤΕ y είναι Β

Γεγονός:     x είναι Α

Συμπέρασμα:     y είναι Β

Στόχος είναι η εύρεση ενός συμπεράσματος έχοντας σαν δεδομένα τα αίτια. Το συμπέρασμα Β' προκύπτει από την σύνθεση του Α' και του πίνακα αλήθειας της συνεπαγωγής. Η σύνθεση όπως έχουμε ήδη πει μπορεί να οριστεί με διάφορους τελεστές. Αν τώρα έχουμε παραπάνω από μία συνεπαγωγές R1, R2, ..., Rn τότε ο συνδυασμός αυτών των σχέσεων γίνεται με "OR" συνήθως χρησιμοποιώντας τον τελεστή max.

### **Βασικά στοιχεία ενός ασαφούς ελεγκτή**

- Βάση γνώσης. Σε αυτήν είναι αποθηκευμένοι οι κανόνες ελέγχου για το έλεγχο της διαδικασίας.

- Ασαφή σύνολα. Έχοντας ορίσει τα ασαφή σύνολα είναι δυνατή η μετάφραση των

λεκτικών κανόνων της βάσης γνώσης σε μαθηματικούς κανόνες.

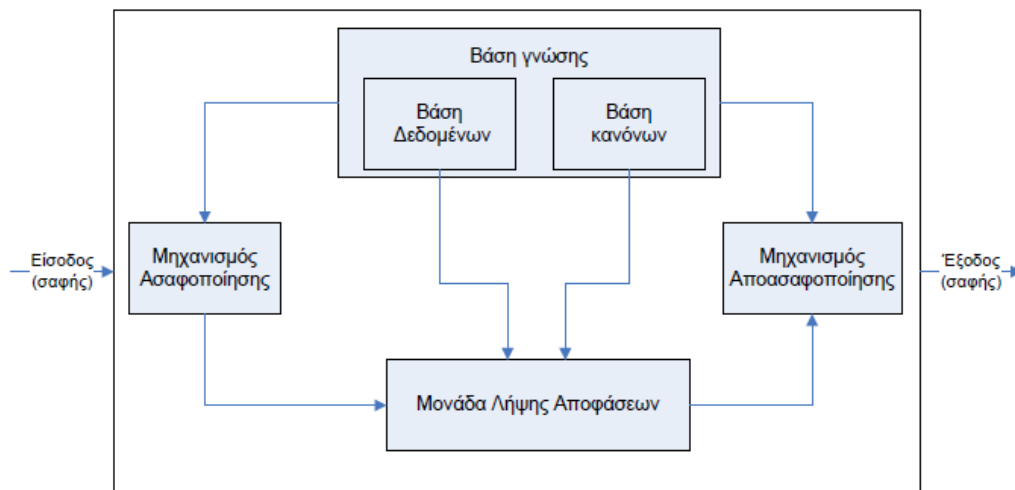
- Ασαφοποιητής. Αναλαμβάνει την μετατροπή των πραγματικών τιμών των μεταβλητών

εισόδου του ελεγκτή σε ασαφή σύνολα.

- Μηχανισμός συμπερασμού. Εκεί παράγονται μέσω συνεπαγωγών τα ασαφή σύνολα

των συμπερασμάτων.

- Αποασαφοποιητής. Τα ασαφή σύνολα των συμπερασμάτων μετατρέπονται σε πραγματικούς αριθμούς έτσι ώστε να είναι δυνατή η μετάδοση της δράσης ελέγχου στην διαδικασία.



Εικόνα 1: Διαγραμματική απεικόνιση της δομής ενός ασαφούς ελεγκτή

### Ασαφοποίηση εισόδων

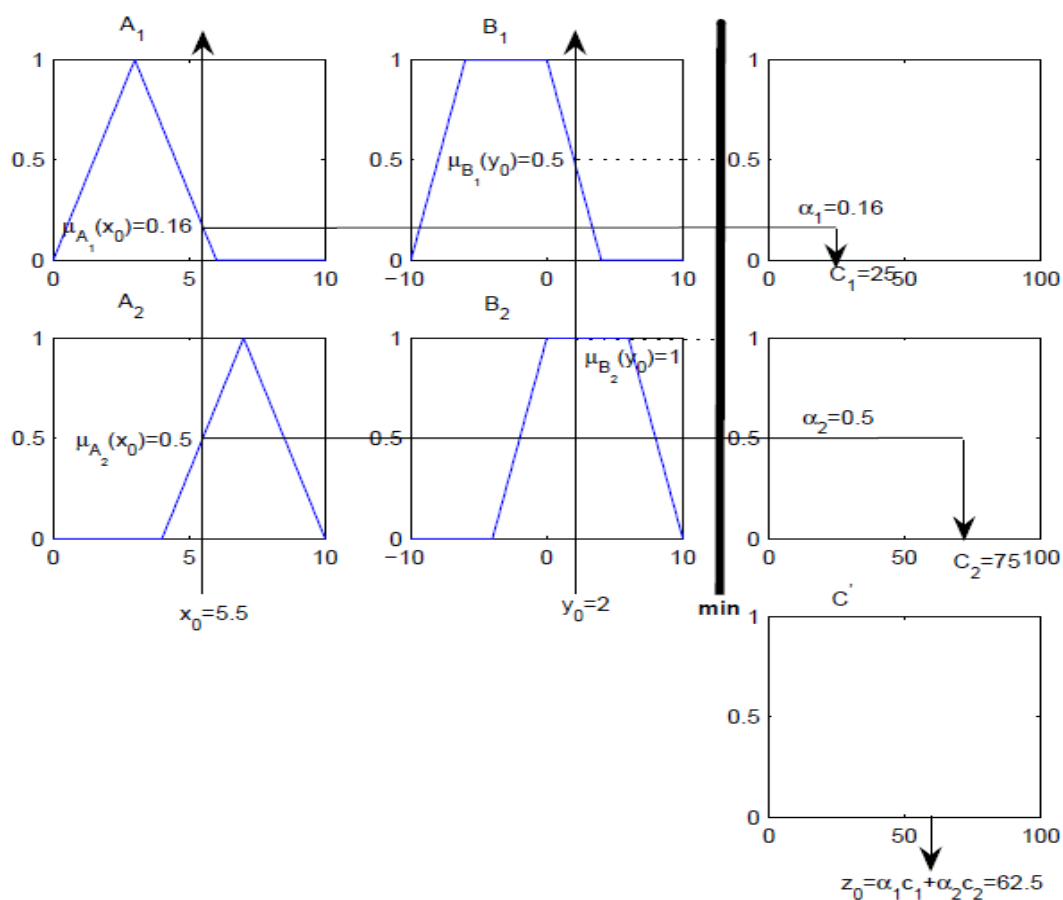
Οι εισοδοί σε έναν ασαφή ελεγκτή είναι σήματα άρα σαφείς μεταβλητές, γι αυτό και απαιτείται σαν πρώτο βήμα η ασαφοποίησή των. Η ασαφοποίηση μπορεί να γίνει είτε με χρήση πίνακα τιμών είτε μέσα από μια αποτίμηση μιας συνάρτησης.

### Μηχανισμός συμπερασμού

Ο μηχανισμός συμπερασμού για να οριστεί πλήρως χρειάζεται να οριστεί ο τελεστής συνεπαγωγής, ο τελεστής σύνθεσης που χρησιμοποιείται, το συνδετικό μεταξύ των η κανόνων, και ο τελεστής "ΚΑΙ" που ενώνει τις προϋποθέσεις των κανόνων.

<u>ΤΕΛΕΣΤΗΣ “ΚΑΙ”</u>	<u>Τελεστής “OR”</u>	<u>Τελεστής συνεπαγωγής</u>	<u>Τελεστής σύνθεσης</u>
Mamdani (max)	Mamadani (min)	Αυστηρή	Mamdani (max-min)
Probor	Larsen (prod)	Godel	Larsen (max-prod)
		Larsen (prod)	Max - average
		Mamdani (min)	

Το ασαφές μοντέλο τύπου Sugeno προτάθηκε από τους Tagaki, Sugeno και Kang σε μια προσπάθεια να αναπτύξουν μια συστηματική προσέγγιση που θα τους επιτρέψει την παραγωγή ασαφών κανόνων από ένα συγκεκριμένο σύνολο δεδομένων εισόδου-εξόδου. Ένας τυπικός ασαφής κανόνας για το ασαφές μοντέλο τύπου Sugeno έχει την ακόλουθη μορφή: Αν  $x$  είναι  $A$  και  $y$  είναι  $B$ , τότε  $z = f(x,y)$ , όπου τα  $A$  και  $B$  είναι ασαφή σύνολα στην υπόθεση (antecedent), ενώ το  $z = f(x,y)$  είναι μια σαφής (crisp) συνάρτηση στην απόδοση (consequent). Συνήθως το  $f(x,y)$  είναι ένα πολυώνυμο των μεταβλητών εισόδου  $x$  και  $y$ , αλλά μπορεί να είναι οποιαδήποτε συνάρτηση, αρκεί να μπορεί να περιγράψει κατάλληλα την έξοδο του μοντέλου εντός της ασαφούς περιοχής που καθορίζεται από την υπόθεση (antecedent) του κανόνα.



Εικόνα 2: Απλοποιημένος Sugeno-Takagi ελεγκτής

Ο στόχος είναι να παραχθεί ένα ασαφές σύνολο σαν απόφαση του ελεγκτή. Τα συστήματα που χρησιμοποιούν Sugeno μηχανισμό συμπερασμού είναι περισσότερο ακριβή αλλά απαιτούν περισσότερο υπολογιστικό χρόνο. Ενώ αυτά που χρησιμοποιούν Mamdani ερμηνεύονται περισσότερο και απαιτούν λιγότερο υπολογιστικό χρόνο αλλά είναι λιγότερο ακριβή.



## Αποασαφοποίηση εξόδων

Για να προκύψει τελικά μια σαφής ενέργεια ελέγχου πρέπει στο ασαφές σύνολο C να εφαρμοστεί μια από τις παρακάτω τεχνικές αποασαφοποίησης.

- Κέντρου βάρους (Center of area - Centroid). Η έξοδος υπολογίζεται από τον τύπο

$$z = \frac{\sum y_i \mu_C(y_i)}{\sum \mu_C(y_i)} \quad (3)$$

στην διακριτή και

$$z = \frac{\int y_i \mu_C(y_i)}{\int \mu_C(y_i)} \quad (4)$$

στην συνεχή περίπτωση.

- Αποασαφοποίηση μικρότερου των μεγίστων (Smallest of maxima – SOM). Είναι το μικρότερο σε απόλυτη τιμή από τα  $y_i$  που έχουν την μέγιστη τιμή συμμετοχής στο C.
- Αποασαφοποίηση μεγαλύτερου των μεγίστων (Largest of maxima – LOM). Είναι το μεγαλύτερο σε απόλυτη τιμή από τα  $y_i$  που έχουν την μέγιστη τιμή συμμετοχής στο C.
- Αποασαφοποίηση μέσου των μεγίστων (Middle of maxima - MOM). Είναι ο μέσος όρος όλων των στοιχείων  $y_i$   $i = 1, \dots, N$  που παίρνουν την μέγιστη τιμή στο C.

$$z = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad (5)$$

## Ανάλυση κανόνων

Η σχεδίαση ενός ασαφούς ελεγκτή εντοπίζεται κυρίως στην εύρεση κατάλληλων κανόνων, έτσι ώστε το κλειστό σύστημα να ικανοποιεί κάποιες δεδομένες προϋποθέσεις. Στην θεωρία των ασαφών ελεγκτών δεν υπάρχουν συγκεκριμένες διαδικασίες έτσι ώστε να σχεδιαστεί ένας τέτοιος ελεγκτής, σε αντίθεση με την γραμμική θεωρία αυτομάτου ελέγχου όπου υπάρχουν τεχνικές όπως ο γεωμετρικός τόπος ριζών, τα διαγράμματα Nyquist κλπ. Το πρόβλημα είναι ότι η σχέση εισόδου εξόδου του ελεγκτή είναι μη γραμμική και πολύ δύσκολη να περιγραφεί μαθηματικά. Παρόλα αυτά δημιουργήθηκαν κάποια test με σκοπό να δείχνουν αν μια βάση κανόνων πληρεί κάποια βασικά κριτήρια. Τα βασικά κριτήρια για την ανάλυση των κανόνων είναι τα ακόλουθα.

- Πληρότητα - Είναι αρκετοί οι κανόνες που δημιουργήθηκαν;
- Συνέπεια - Μήπως οι κανόνες αλληλοσυγκρούονται;
- Πλεονασμός - Μήπως υπάρχουν στη βάση κανόνων κάποιοι περιττοί κανόνες;
- Αλληλεπίδραση - Υπάρχουν κάποιοι κανόνες που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους;

### Συναρτήσεις συμμετοχής

Συναρτήσεις συμμετοχής γενικευμένης καμπανοειδούς μορφής (Generalized bell Mfs). Η γενικευμένη καμπανοειδής συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται από τρεις παραμέτρους  $\{a, b, c\}$ , όπου η παράμετρος  $b$  είναι συνήθως θετική.

$$gbellmf(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}} \quad (6)$$

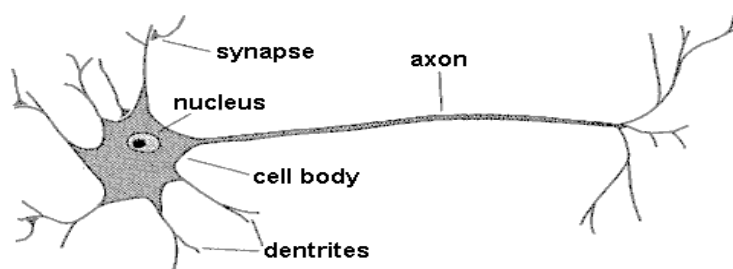
Συναρτήσεις συμμετοχής γκαουσιανής μορφής (Gaussian Mfs). Μια Γκαουσιανή συνάρτηση συμμετοχής προσδιορίζεται από δύο παραμέτρους  $\{c, \sigma\}$

$$gaussmf(x, c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - c}{\sigma} \right)^2} \quad (7)$$

Το δυσκολότερο σημείο είναι η επιλογή των ασαφών μεταβλητών, των τιμών τους και των κανόνων με τους οποίους θα συνδυαστούν. Ο προσδιορισμός των διαφόρων συναρτήσεων συμμετοχής συνήθως γίνεται αυτόματα με τη χρήση τεχνικών των νευρωνικών δικτύων. Άλλα σημεία που απαιτούν προσοχή είναι η επιλογή κατάλληλου τελεστή συνεπαγωγής, της μεθόδου αποασαφοποίησης κλπ. Ένα από τα χαρακτηριστικά που πρέπει να έχει ένα σύστημα ασαφούς συλλογιστικής είναι η σταθερότητα, δηλαδή η ικανότητά του να εμφανίζει καλή συμπεριφορά σε όλο το φάσμα τιμών εισόδου. Συνήθως η σταθερότητα συμπεριλαμβάνεται σαν ασαφής μεταβλητή στην περιγραφή του συστήματος και οι σχετικοί κανόνες ρυθμίζουν τη συμπεριφορά του συστήματος σε ακραίες καταστάσεις.

## 4.2 Νευρωνικά δίκτυα

Η μελέτη υπολογιστικών συστημάτων που βασίζονται σε πρότυπα του ανθρώπινου εγκεφάλου έκανε τα πρώτα της βήματα το 1943 από τους McCulloch και Pitts οι οποίοι σχεδίασαν το πρώτο νευρωνικό δίκτυο. Η πολυπλοκότητα του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι τέτοια έτσι ώστε απαγορεύει την πλήρη κατανόησή του. Ακόμα και η κατανόηση της λειτουργίας ενός νευρώνα του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι φοβερά πολύπλοκη. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από 1010 νευρώνες, με κάθε νευρώνα να έχει αρκετές χιλιάδες συνδέσεις. Βασικά χαρακτηριστικά του ανθρώπινου εγκεφάλου είναι η αναγνώριση προτύπων (pattern recognition), ο συνειρμός, η πολυπλοκότητα και η ανεκτικότητα στο θόρυβο.



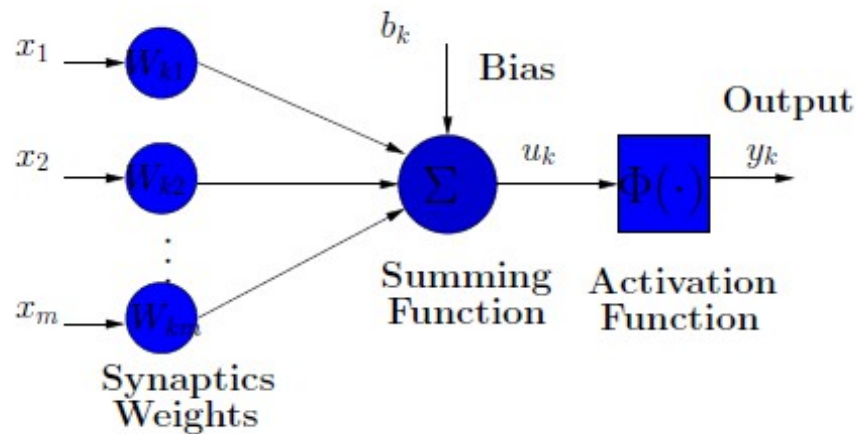
Εικόνα 3: Νευρώνας

Ένας νευρώνας ενεργοποιείται όταν το σήμα εισόδου του γίνεται μεγαλύτερο από μία τιμή. Οι συνάψεις (συνδέσεις νευρώνων) μπορεί να είναι είτε διεγερτικές είτε ανασταλτικές. Ο νευρώνας έχει ένα κυτταρικό σώμα, μια δενδρική δομή εισόδων τους δενδρίτες και δενδρική δομή εξόδων τους άξονες. Οι άξονες συνδέονται με δενδρίτες άλλων νευρώνων μέσω των συνάψεων. Τα ηλεκτροχημικά σήματα εισόδων διαδίδονται από τους δενδρίτες στο κυτταρικό σώμα και έπειτα μέσω των αξόνων σε άλλους νευρώνες. Αντίστοιχες δομές ακολουθούνται και στα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Το νευρωνικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο από υπολογιστικούς κόμβους (νευρώνες, νευρώνια), συνδεδεμένους μεταξύ τους. Είναι εμπνευσμένο από το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (ΚΝΣ), το οποίο προσπαθούν να προσομοιώσουν. Στην ουσία πρόκειται για ένα σύστημα επεξεργασίας της πληροφορίας που αποτελείται από στρώματα (layers) κάθε ένα από τα οποία αποτελείται από στοιχεία επεξεργασίας που καλούνται νευρώνες.

Οι νευρώνες είναι τα δομικά στοιχεία του δικτύου. Υπάρχουν δύο είδη νευρώνων, οι νευρώνες εισόδου και οι υπολογιστικοί νευρώνες: Οι νευρώνες εισόδου δεν υπολογίζουν τίποτα, μεσολαβούν ανάμεσα στις εισόδους του δικτύου και τους υπολογιστικούς νευρώνες. Οι υπολογιστικοί νευρώνες πολλαπλασιάζουν τις εισόδους τους με τα συναπτικά βάρη και υπολογίζουν το άθροισμα του γινομένου. Κάθε νευρώνας εκτελεί μία προκαθορισμένη

μαθηματική λειτουργία και παράγει μία και μόνη έξοδο. Το άθροισμα που προκύπτει είναι το όρισμα της συνάρτησης ενεργοποίησης. Ο κάθε νευρώνας λειτουργεί ανεξάρτητα από τους υπόλοιπους.



Εικόνα 4: Μοντέλο Νευρώνα

Η συνάρτηση ενεργοποίησης ορίζει την έξοδο του νευρώνα σε σχέση με την δυνατότητα ενεργοποίησης στην είσοδό του. Υπάρχουν τρεις βασικοί τύποι συναρτήσεων ενεργοποίησης :

1. Η συνάρτηση κατώφλι (Threshold function).  $\Phi(u) = \begin{cases} 1, & u \geq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}$  (8)
2. Piecewise Linear Function.  $\Phi(u) = \begin{cases} 1, & u \geq \frac{1}{2} \\ u, & \frac{1}{2} > u > \frac{1}{2} \\ 0, & \text{else} \end{cases}$  (9)
3. Σιγμοειδής συνάρτηση ενεργοποίησης. Η σιγμοειδής συνάρτηση είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη συνάρτηση ενεργοποίησης για την κατασκευή ΤΝΔ. Ορίζεται ως μια γνησίως αύξουσα συνάρτηση που είναι ομαλή και ασυμπτωτική.  $\Phi(u) = \frac{1}{1+e^{-au}}$  (10)

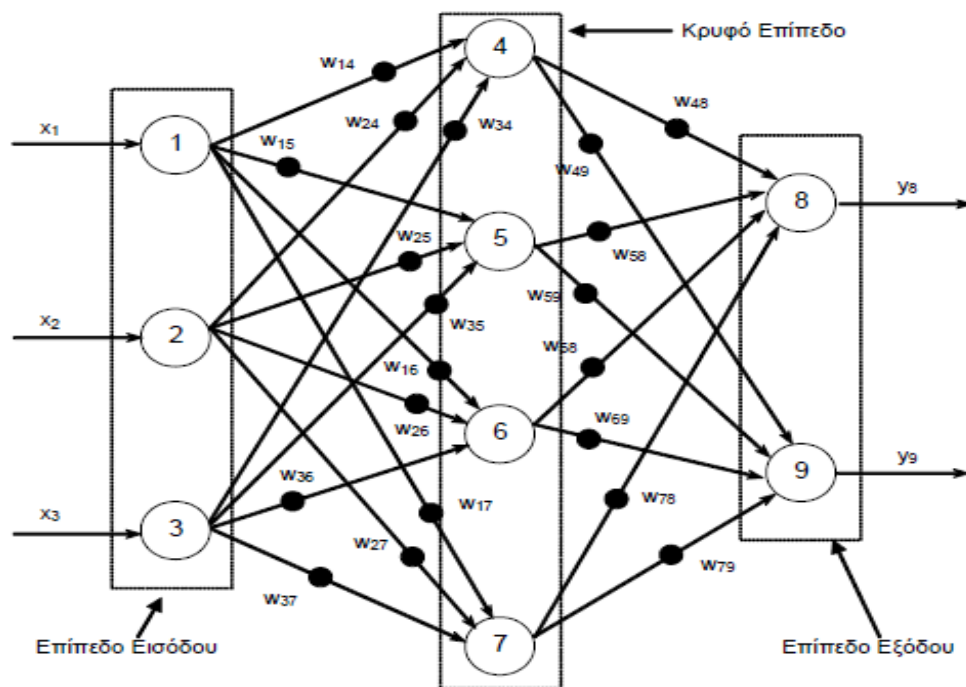
## Αρχιτεκτονικές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων

Ο τρόπος με τον οποίο οι νευρώνες ενός ΤΝΔ είναι δομημένοι είναι στενά συνδεδεμένος με τον αλγόριθμο εκπαίδευσης που χρησιμοποιείται για το δίκτυο. Γενικά υπάρχουν τρεις βασικές διαφορετικές κλάσεις αρχιτεκτονικών δικτύου.

1. Feedforward Δίκτυα Ενός Επιπέδου (SingleLayer Feedforward networks). Στα νευρωνικά δίκτυα οι νευρώνες του δικτύου οργανώνονται σε διάφορα επίπεδα. Η πιο απλή μορφή νευρωνικού δικτύου με επίπεδα είναι ένα νευρωνικό δίκτυο με ένα επίπεδο. Στην περίπτωση αυτή έχουμε ένα επίπεδο με κόμβους εισόδου που προβάλλονται σε ένα επίπεδο εξόδου με νευρώνες (όπου γίνονται οι υπολογισμοί), ενώ το αντίθετο δεν ισχύει, δεν μπορούμε δηλαδή να πάμε από τους νευρώνες εξόδου στους κόμβους εισόδου. Σε αυτή την περίπτωση, το δίκτυο είναι ένα αυστηρά εμπρόσθιας τροφοδότησης (feedforward) δίκτυο και καλείται Feedforward Δίκτυο Ενός Επιπέδου. Με τον όρο ένα επίπεδο εννοούμε το επίπεδο εξόδου που περιέχει και τους νευρώνες όπου γίνονται οι υπολογισμοί. Σημειώνεται ότι δεν υπολογίζεται το επίπεδο εισόδου με τους κόμβους εισόδου γιατί σε αυτό δεν γίνονται καθόλου υπολογισμοί.

2. Feedforward Δίκτυα Πολλαπλών Επιπέδων (Multilayer Feedforward Networks). Η δεύτερη κλάση εμπρόσθιας τροφοδότησης νευρωνικών δικτύων διαφέρει από την πρώτη στην ύπαρξη ενός ή περισσότερων κρυφών επιπέδων, των οποίων οι νευρώνες καλούνται κρυφοί νευρώνες. Η λειτουργία των κρυφών νευρώνων είναι να παρεμβάλλονται μεταξύ των κόμβων εισόδου και των νευρώνων εξόδου του δικτύου. Με την προσθήκη ενός ή περισσότερων κρυφών επιπέδων, το δίκτυο έχει την δυνατότητα να προσεγγίζει συναρτήσεις μεγαλύτερης πολυπλοκότητας. Οι κόμβοι εισόδου στο επίπεδο εισόδου του δικτύου παρέχουν τα στοιχεία των προτύπων εισόδου, με την μορφή διανυσμάτων, που γίνονται είσοδοι στους νευρώνες του δεύτερου επιπέδου, δηλαδή του πρώτου κρυφού επιπέδου. Τα σήματα εξόδου των νευρώνων του δεύτερου κρυφού επιπέδου, γίνονται σήματα εισόδου στο τρίτο επίπεδο και συνεχίζεται κατά αυτό τον τρόπο η ροή των σημάτων μεταξύ των επιπέδων του δικτύου μέχρι να φτάσουν στο επίπεδο εξόδου. Συνήθως, οι νευρώνες σε κάθε επίπεδο του δικτύου, παίρνουν σαν είσοδο, τα σήματα εξόδου από τους νευρώνες του προηγούμενου επιπέδου μόνο. Το σύνολο των σημάτων εξόδου στο επίπεδο εξόδου (τελευταίο επίπεδο του δικτύου), αποτελεί και την απάντηση του δικτύου για τα δεδομένα που εισάγονται στους κόμβους εισόδου. Γενικά ένα δίκτυο με  $m$  κόμβους εισόδου,  $h_1$  νευρώνες στο πρώτο κρυφό επίπεδο,  $h_2$  νευρώνες στο δεύτερο κρυφό επίπεδο, κ.λπ. ή  $n$ -οστό κρυφό επίπεδο και  $q$  νευρώνες στο επίπεδο εξόδου, αναφέρεται σαν ένα  $m - h_1 - h_2 - \dots - h_n - q$  δίκτυο.

3. Αναδρομικά Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (Recurrent Neural Networks). Ένα Αναδρομικό Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (ΑΤΝΔ) διαφέρει από ένα Feedforward δίκτυο στο γεγονός ότι περιέχει έναν τουλάχιστον βρόγχο ανατροφοδότησης. Αυτό σημαίνει ότι σε έναν τουλάχιστον νευρώνα, το σήμα εξόδου του επηρεάζει το σήμα που έρχεται στην είσοδο του νευρώνα. Για παράδειγμα, ένα ΑΤΝΔ μπορεί να αποτελείται από ένα μόνο επίπεδο νευρώνων όπου κάθε νευρώνας επιστρέφει το σήμα εξόδου του σαν σήμα εισόδου σε όλους τους άλλους νευρώνες του επιπέδου



Εικόνα 5: Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο

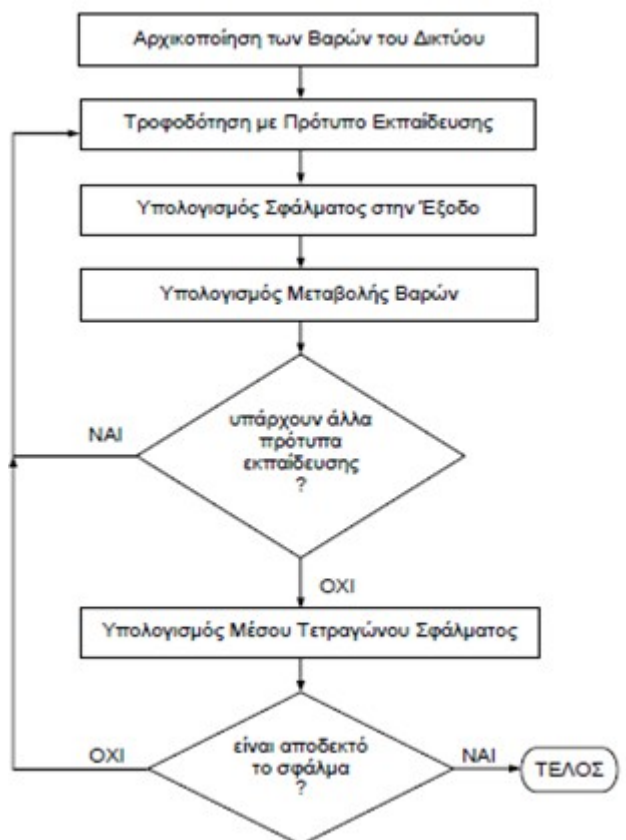
Τα βάρη αποτελούν τα στοιχεία μνήμης της αντίστοιχης διάταξης νευρώνων. Οι τιμές που παίρνουν τα βάρη καθορίζονται από την διαδικασία μάθησης. Όλες οι μέθοδοι εκμάθησης κατατάσσονται σε δύο κατηγορίες:

1. Εκπαίδευση με επίβλεψη (supervised learning). Διαδικασία στην οποία απαιτείται κάποιο διάνυσμα εξόδου το οποίο αντιστοιχεί στις επιθυμητές τιμές. Οι μέθοδοι που ανήκουν σε αυτή την κατηγορία είναι η εκμάθηση με διόρθωση σφάλματος (error correction learning), η στοχαστική εκμάθηση (stochastic learning) και τα hardwired systems
2. Εκπαίδευση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning). Διαδικασία η οποία βασίζεται μόνο στην τοπική πληροφορία κατά την διάρκεια της εκπαίδευσης. Παραδείγματα αλγορίθμων εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη είναι ο αλγόριθμος Hebbian, ο διαφορικός αλγόριθμος Hebbian και Min-Max αλγόριθμος.

Παρακάτω παρατίθεται η διαδικασία εκπαίδευσης με τη μορφή σχεδιαγράμματος. Η όλη διαδικασία βασίζεται στην ανάστροφη μετάδοση του σφάλματος (back propagation):

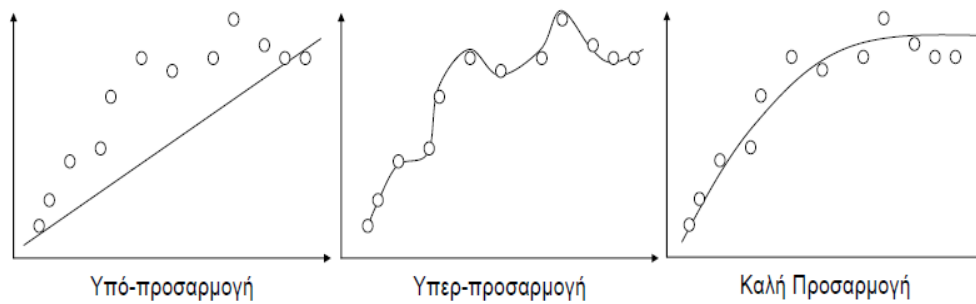
1. Η αναπροσαρμογή των βαρών γίνεται από το επίπεδο εξόδου προς το εισόδου.
2. Διαδικασία βελτιστοποίησης επικλινούς καθόδου (gradient descent optimization procedure) που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα  $E$

μεταξύ της εξόδου του δικτύου και της επιθυμητής εξόδου, για τα ρδιανύσματα εκπαίδευσης.



Εικόνα 6: Διαδικασία εκπαίδευσης ενός ΤΝΔ

Η εκπαίδευση ενός δικτύου τελειώνει όταν τα αποτελέσματα που δίνει βρίσκονται εντός κάποιων προδιαγραφών που δίνονται από τον χρήστη ή/και την μορφή του προβλήματος. Εξαιρετικά σημαντικός παράγοντας στην εκπαίδευση ενός νευρωνικού δικτύου είναι ο αριθμός εποχών εκπαίδευσης. Ως εποχή (epoch) εννοούμε την χρήση όλων των δεδομένων εκπαίδευσης (από το δίκτυο) για μία φορά. Μικρός αριθμός εποχών εκπαίδευσης συνήθως οδηγεί σε άσχημα αποτελέσματα ενώ αντίθετα μεγάλος αριθμός εποχών εκπαίδευσης οδηγεί στην υπερεκπαίδευση και απαιτεί μεγάλο υπολογιστικό χρόνο. Υπερεκπαίδευση έχουμε όταν το νευρωνικό δίκτυο προσαρμοστεί πολύ καλά στα δεδομένα εκπαίδευσης και μόνο σε αυτά. Οι αναφορές μικρός και μεγάλος αριθμός εποχών είναι σχετικές και αναφέρονται στο εκάστοτε πρόβλημα.



Εικόνα 7: Χαρακτηριστικές περιπτώσεις εκπαιδευμένων ΤΝΔ

### 4.3 Νεύρο-ασαφή συστήματα (υβριδικά συστήματα)

Τα νευρωνικά δίκτυα αποτελούν μια πολύ ελκυστική μέθοδο αναγνώρισης προτύπων, αλλά δεν προσφέρονται για την εξήγηση της διαδικασίας λήψης της απόφασης. Μπορούν να θεωρηθούν ως μαύρο κουτί (black box), όπου η εξαγωγή γνώσης από το εκπαιδευμένο δίκτυο είναι αρκετά δύσκολη. Όπως είναι φυσικό, θα ήταν επιθυμητό να υπήρχε πρόσβαση στο συλλογιστικό μηχανισμό των νευρωνικών δικτύων, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα ευκολότερης διαχείρισης και κατασκευής τους. Από την άλλη πλευρά, η επιβολή εξωτερικής γνώσης στο σώμα ενός νευρωνικού δικτύου αναφορικά με ένα συγκεκριμένο πρόβλημα είναι αρκετά δύσκολη. Ένα ακόμα μειονέκτημα που εμφανίζουν τα νευρωνικά δίκτυα είναι ότι γενικά δεν είναι γνωστή η ακριβής μορφή της αρχιτεκτονικής του δικτύου και, συνεπώς, η δομή του καθορίζεται μόνο μέσω πειραματικών διαδικασιών.

Η ασαφής λογική μπορεί να εξηγήσει τη συμπεριφορά της λειτουργίας ενός συστήματος χρησιμοποιώντας κανόνες, και έχει το μεγάλο πλεονέκτημα ότι δεν απαιτεί ακρίβεια της πληροφορίας. Στις περιπτώσεις, όμως, που δεν υπάρχει διαθέσιμη εξωτερική γνώση, η δυνατότητα εφαρμογής των ασαφών συστημάτων περιορίζεται. Επίσης, διάφορα ζητήματα εμφανίζουν δυσκολίες, όπως ο ακριβής διαμερισμός του χώρου εισόδων και εξόδων ενός προβλήματος σε ασαφή σύνολα, οι τιμές των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής και ο ακριβής αριθμός των ασαφών κανόνων, που έχουν ως αποτέλεσμα τον περιορισμό της σημαντικής ισχύος που χαρακτηρίζει την ασαφή λογική.

Τα νευρωνικά δίκτυα και τα ασαφή συστήματα μπορούν να θεωρηθούν ως ισοδύναμες μέθοδοι, όσον αφορά τη δυνατότητα εφαρμογής τους σε ένα ευρύ φάσμα προβλημάτων. Όλοι οι παραπάνω λόγοι οδήγησαν στη γένεση νέων συνδυασμών των μεθόδων αυτών με κύριο στόχο την εξουδετέρωση όλων των παραπάνω μειονεκτημάτων. Τα υβριδικά συστήματα υπολογιστικής νοημοσύνης (hybrid computational intelligent systems) περιλαμβάνουν μια σύνθεση των δύο παραπάνω μεθόδων. Τα συστήματα που βασίζονται στην



ασαφή λογική και αυτά που βασίζονται στα ΝΔ έχουν πολύ διαφορετικές (αντίθετες αν προτιμάτε) απαιτήσεις κατά την εφαρμογή τους. Για παράδειγμα τα ασαφή συστήματα είναι κατάλληλα όταν υπάρχει αρκετή γνώση ειδικού για την εξεταζόμενη διαδικασία, ενώ τα συστήματα ΝΔ είναι χρήσιμα σε περιπτώσεις όπου υπάρχουν αρκετά μετρήσιμα δεδομένα για την εξεταζόμενη διαδικασία. Και οι δύο προσεγγίσεις κατασκευάζουν μη-γραμμικά συστήματα βασισμένα πάνω σε συνεχείς μεταβλητές, με τη διαφορά ότι η μεταχείριση των νευρωνικών συστημάτων γίνεται με τρόπο αριθμητικό- ποσοτικό, ενώ η μεταχείριση των ασαφών συστημάτων γίνεται με τρόπο συμβολικό-ποιοτικό. Τα νεύρο-ασαφή συστήματα, όμως, παρουσιάζουν τόσο συμβολικά όσο και αριθμητικά χαρακτηριστικά. Για παράδειγμα, μπορούν μέσω λειτουργιών βάσει κανόνων να κάνουν επεξεργασία των μεταχειρισμένων από αυτά συμβόλων (symbolic processing via rule-base operations). Από την άλλη πλευρά, οι συναρτήσεις συμμετοχής επιτρέπουν στα ασαφή συστήματα την αριθμητική επεξεργασία των καθορισμένων λεκτικών μεταβλητών που μεταχειρίζονται. Κατά συνέπεια, η σύνθεση νευρωνικών και ασαφών συστημάτων οδηγεί σε μια νέα κατάσταση όπου το ασαφές σύστημα παρέχει ένα ισχυρό υπόβαθρο για την αναπαράσταση της γνώσης των ειδικών, ενώ τα ANN παρέχουν ικανότητες μάθησης και είναι κατάλληλα για υπολογιστικά αποτελεσματικές εφαρμογές μέσω Η/Υ. Η σημασία της σύνθεσης αυτής εξάγεται και από τις διαφορές των ξεχωριστών αυτών συστημάτων, καθώς τα ANN δεν παρέχουν ένα ισχυρό πλαίσιο για αναπαράσταση γνώσης, ενώ οι ελεγκτές ασαφούς λογικής δεν διακρίνονται για την ικανότητα αυτόματης μάθησης. Τα υβριδικά νεύρο-ασαφή συστήματα μπορούν να δημιουργηθούν με τρεις τρόπους:

1. Neural Fuzzy System: Σε αυτού του είδους τα συστήματα τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ως εργαλεία μέσα σε ένα ασαφές μοντέλο.
2. Fuzzy Neural Networks: Τα δίκτυα αυτά ουσιαστικά συνιστούν την ασαφοποίηση του συμβατικού μοντέλου νευρωνικού δικτύου.
3. Fuzzy-neural Hybrid System: Τα συστήματα αυτά συνίστανται στην ενσωμάτωση τεχνολογίας ασαφούς λογικής και νευρωνικών δικτύων σε υβριδικά συστήματα.

Για τις δύο πρώτες κατηγορίες, η σύνθεση νεύρο-ασαφών συστημάτων προκύπτει παρέχοντας σε ένα νευρωνικό δίκτυο την ικανότητα χειρισμού ασαφούς πληροφορίας (fuzzy-neural network - FNN) και ενισχύοντας ένα ασαφές σύστημα με νευρωνικά δίκτυα, προκειμένου να βελτιωθούν χαρακτηριστικά, όπως η ευελιξία, η ταχύτητα και η προσαρμοστικότητα (neural-fuzzy systems – NFS). Σε ένα FNN οι είσοδοι και τα βάρη των συνδέσεων και οι έξοδοι του δικτύου αποτελούν ασαφή υποσύνολα ή ένα σύνολο από τιμές συμμετοχής σε ασαφή σύνολα. Για τη μοντελοποίηση αυτών των δικτύων χρησιμοποιούνται λεκτικές τιμές, όπως "μικρό, μεσαίο, μεγάλο", ή ασαφείς αριθμοί. Νευρωνικά δίκτυα που χρησιμοποιούν ασαφείς

νευρώνες χαρακτηρίζονται επίσης FNN, καθώς θεωρούνται ικανά να επεξεργαστούν ασαφείς πληροφορίες. Ένα νεύρο-ασαφές σύστημα (NFS) από την άλλη πλευρά έχει ως σκοπό την πραγματοποίηση της διαδικασίας ασαφούς συλλογιστικής (fuzzy reasoning), όπου τα βάρη των συνδέσεων του δικτύου αντιστοιχούν στις παραμέτρους της ασαφούς συλλογιστικής. Χρησιμοποιώντας αλγόριθμους μάθησης της μορφής backpropagation, το NFS μπορεί να αναγνωρίσει ασαφείς κανόνες και να "μάθει" τις συναρτήσεις συμμετοχής της ασαφούς συλλογιστικής. Συγκεκριμένα το NFS θα πρέπει να είναι ικανό να "μάθει" λεκτικούς κανόνες και συναρτήσεις συμμετοχής ή να βελτιστοποιεί τους ήδη υπάρχοντες κανόνες ή συναρτήσεις συμμετοχής. Υπάρχουν τρεις προσεγγίσεις:

1) Το σύστημα ξεκινά χωρίς κανόνες και δημιουργεί νέους κανόνες μέχρι το πρόβλημα της μάθησης να επιλυθεί. Η δημιουργία ενός νέου κανόνα προκύπτει από ένα πρότυπο εκμάθησης που δεν καλύπτεται αρκετά από την τρέχουσα βάση κανόνων.

2) Το σύστημα ξεκινά με όλους εκείνους τους κανόνες που μπορούν να δημιουργηθούν από το διαμερισμό των μεταβλητών και διαγράφοντας ανεπαρκείς κανόνες από τη βάση κανόνων με βάση την αξιολόγηση της απόδοσής τους.

3) Το σύστημα ξεκινά με μια βάση κανόνων που αποτελείται από σταθερό αριθμό κανόνων. Κατά τη διαδικασία της εκμάθησης οι κανόνες αντικαθίστανται μέσω μιας διαδικασίας βελτιστοποίησης.

Αναφορικά με την τρίτη προσέγγιση, τόσο οι τεχνικές ασαφούς λογικής, όσο και οι τεχνικές των νευρωνικών δικτύων παίζουν καθοριστικό ρόλο σε ένα υβριδικό σύστημα. Εκτελούν τις δραστηριότητές τους για διαφορετικές λειτουργίες του συστήματος. Σε αυτήν την κατηγορία ανήκει το ANFIS (Adaptive Network based Fuzzy Inference System Adaptive ή αλλιώς Adaptive Neuro Fuzzy Inference System). Εμπλεκώντας το σύστημα ασαφούς συμπερασμού σε ένα πλαίσιο προσαρμοστικών δικτύων (adaptive networks), προκύπτει η δομή του ANFIS (Jang, 1997).

Τα πρόσφατα αναπτυγμένα νεύρο-ασαφή συστήματα, που ενσωματώνουν τις επιθυμητές αρχές τόσο των ασαφών συστημάτων όσο και των νευρωνικών δικτύων, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάπτυξη ασαφών κανόνων με "φυσικό" τρόπο. Η μάθηση στα νεύρο-ασαφή συστήματα καταλήγει σε κατανοήσιμους λεκτικούς κανόνες της μορφής "εάν - τότε". Είναι εξαιρετικά χρήσιμα στην επεξήγηση της συλλογιστικής που κρύβεται πίσω από κάθε αποτέλεσμα τους, ενώ οι κανόνες "εάν - τότε" που παράγουν είναι αρκετά απλοί, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε ένα έμπειρο σύστημα, σε περίπτωση που χρειαστεί. Οι κανόνες αυτής της μορφής, επίσης, επιτρέπουν τη χρησιμοποίηση τόσο ποιοτικών όσο και ποσοτικών δεδομένων.

Πέρα από τους κανόνες στους οποίους καταλήγουν τα νεύρο-ασαφή συστήματα, εξωτερικά καθορισμένες οδηγίες μπορούν να εισαχθούν ως "εάν - τότε" κανόνες. Το σύστημα χρησιμοποιεί και τα δύο σύνολα, δηλαδή εκείνα που δημιουργούνται από παραδείγματα εκμάθησης και εκείνα που καθορίζονται από το χρήστη ως οδηγίες για σκοπούς ταξινόμησης. Η διαδικασία παροχής οδηγιών είναι εξαιρετικά χρήσιμη σε περιπτώσεις όπου πρόσθετη πληροφόρηση παρέχεται από τον ειδικό στο συγκεκριμένο αντικείμενο που εξετάζεται. Συνήθως στις πραγματικές εφαρμογές, οι οδηγίες αυτές παρέχουν πληροφορίες που δεν είναι διαθέσιμες στο σύνολο των δεδομένων εκμάθησης, και είναι το αποτέλεσμα της εμπειρικής γνώσης του ειδικού που ασχολείται πολλά χρόνια με το συγκεκριμένο αντικείμενο. Ανάλογη παροχή οδηγιών σε νευρωνικό δίκτυο δεν είναι εύκολο να υπάρξει, παρά το ότι μια χρονοβόρα κατάλληλη προσαρμογή των βαρών από το χρήστη θα μπορούσε να την καταστήσει δυνατή. Εξαιτίας της ασαφопоίησης των δεδομένων εισόδου, οι μεταβλητές εισόδου στο νεύρο-ασαφές σύστημα παίρνουν μερικές ασαφопоιημένες τιμές (π.χ. μικρό, μεσαίο, μεγάλο), αντί για μια μεγάλη γκάμα πραγματικών αριθμητικών τιμών. Το γεγονός αυτό συνεπάγεται μεγάλη μείωση του χρόνου μάθησης για το νεύρο-ασαφές σύστημα.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των νεύρο-ασαφών συστημάτων συνοψίζονται στα ακόλουθα:

1. Κατασκευή ευέλικτου, μη-τυπικού μοντέλου για τα δεδομένα εκπαίδευσης με τη μορφή ασαφών κανόνων (fuzzy rules).
2. Χρησιμοποίηση a priori γνώσης για το πρόβλημα.
3. Η αρχική γνώση μπορεί εύκολα να προσαρμοστεί βάσει των δεδομένων εκπαίδευσης με νευρωνικούς αλγόριθμους μάθησης.
4. Η γνώση είναι άμεσα προσπελάσιμη με τη μορφή κανόνων (rules). Οι κανόνες είναι της μορφής : Εάν (if) <συνθήκες (conditions) > τότε (then) <αποτελέσματα (consequents)>.
5. Ο τρόπος διατύπωσης των κανόνων είναι πολύ κοντά στην κοινή ανθρώπινη λογική και συνεπώς η δυνατότητα των ασαφών συστημάτων για παροχή επεξηγήσεων του τρόπου εξαγωγής ενός συμπεράσματος είναι εξαιρετικά αποτελεσματική.

Τα κυριότερα ολοκληρωμένα νεύρο-ασαφή συστήματα που παρουσιάζονται στην διεθνή βιβλιογραφία είναι :

- Το Adaptive Network based Fuzzy Inference System (ANFIS) το οποίο δημιουργήθηκε από τον J.-S.R. Jang (Jang, 1993). Το ANFIS ανήκει στα προσαρμοστικά δίκτυα (adaptive networks), τα οποία ομοιάζουν με τα νευρωνικά δίκτυα. Το προσαρμοστικό δίκτυο αποτελείται από τους προσαρμοστικούς και τους μη προσαρμοστικούς κόμβους (adaptive, non-adaptive nodes). Ουσιαστικά το προσαρμοστικό δίκτυο είναι ένα πολύ-επίπεδο δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης (multi-layer feed-forward network), στο οποίο κάθε κόμβος εκτελεί μία συγκεκριμένη λειτουργία πάνω στα

εισερχόμενα σήματα και πάνω στο σύνολο των παραμέτρων που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο κόμβο. Οι κόμβοι συνδέονται μέσω κατευθυντήριων συνδέσμων (directional links). Μερικοί ή όλοι οι κόμβοι είναι προσαρμόσιμοι, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το αποτέλεσμα καθενός από αυτούς τους κόμβους εξαρτάται από τις παραμέτρους που σχετίζονται με αυτόν τον κόμβο, και ο κανόνας μάθησης προσδιορίζει πώς αυτοί οι παράμετροι θα πρέπει να μεταβληθούν για την ελαχιστοποίηση ενός προκαθορισμένου μέτρου σφάλματος. Το είδος της λειτουργίας του κάθε κόμβου μπορεί να ποικίλει από κόμβο σε κόμβο, και η επιλογή της λειτουργίας ενός κόμβου εξαρτάται από τη συνολική επεξεργασία πάνω στις εισόδους και την έξοδο που το προσαρμοστικό δίκτυο πρέπει να εκτελέσει.

- Το Mamdani Integrated Neuro-Fuzzy System το οποίο δημιουργήθηκε από τους E.H. Mamdani and S. Assilian (Mamdani, 1975). Χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο μάθησης back-propagation προκειμένου να προσαρμόσει τις παραμέτρους των συναρτήσεων συμμετοχής.

- Το Takagi-Sugeno Integrated Neuro-fuzzy system, (Sugeno, 1985) το οποίο χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο μάθησης backpropagation για την προσαρμογή των συναρτήσεων συμμετοχής και την μέθοδο των ελαχίστων τετραγώνων για τον υπολογισμό του γραμμικού μέρους των κανόνων.

- Το Fuzzy Adaptive Learning Control Network (FALCON), (Lin, 1991). Χρησιμοποιεί το μηχανισμό συμπερασμού Mamdani με αρχιτεκτονική πέντε επιπέδων. Ο αλγόριθμος μάθησης είναι υβριδικός και εξελίσσεται σε δύο φάσεις. Στην αρχική φάση καθορίζονται τα κέντρα και τα βάρη των συναρτήσεων συμμετοχής με τεχνικές μάθησης self-organized. Στη δεύτερη φάση εφαρμόζεται ο αλγόριθμος backpropagation για την προσαρμογή των παραμέτρων των συναρτήσεων συμμετοχής.

- Το FuNe το οποίο δημιουργήθηκε από τους S.K. Halgamuge and M. Glesner (Halgamuge, 1994). Παράγει ασαφείς κανόνες με την χρήση δεδομένων βασιζόμενο στις τεχνικές μάθησης των νευρωνικών δικτύων. Στην πρώτη φάση εξάγονται τυχαίοι κανόνες και στην δεύτερη φάση με τη χρήση των δεδομένων εκπαίδευσης οι κανόνες βελτιστοποιούνται. Δεν υπάρχουν περιορισμοί στον αριθμό των μεταβλητών εισόδου και εξόδου. Κάθε μεταβλητή μπορεί να έχει μέχρι τρεις ασαφείς εισόδους.

- Το GARIC (General Approximate Reasoning-based Intelligent Control) το οποίο δημιουργήθηκε από τους H.R. Berenji and P. Khedkar (Berenji, 1992). Αποτελείται από ένα νεύρο-ασαφές δίκτυο το οποίο μαθαίνει με τη χρήση μεθόδων βαθμωτή κατάβαση. Περιλαμβάνει τρία κύρια τμήματα: α) Action Evaluation Network (AEN), β) Action Selection Network (ASN) και γ) Stochastic Action Modifier (SAM).

- Το Neuro-Fuzzy Controller (NEFCON) το οποίο δημιουργήθηκε από τους D. Nauck, and R. Kruse (Nauck, 1994). Έχει την δυνατότητα να μαθαίνει ασαφή σύνολα και ασαφείς κανόνες χρησιμοποιώντας τον μηχανισμό συμπερασμού Mamdani. Η διαδικασία μάθησης χωρίζεται σε δύο φάσεις. Στην πρώτη φάση το σύστημα μαθαίνει τους κανόνες και στη δεύτερη φάση βελτιστοποιεί τους κανόνες μεταβάλλοντας τα ασαφή σύνολα των κανόνων. Η

μάθηση των κανόνων γίνεται με δύο μεθόδους. Η πρώτη μέθοδος είναι η incremental και χρησιμοποιείται όταν η σωστή έξοδος δεν είναι γνωστή, οπότε οι κανόνες δημιουργούνται με βάση υπολογισμένες τιμές της εξόδου. Καθώς εξελίσσεται η εκπαίδευση όλο και περισσότεροι κανόνες προστίθενται σύμφωνα με τις απαιτήσεις των δεδομένων. Η δεύτερη μέθοδος είναι η decremental στην οποία αρχικά οι κανόνες δημιουργούνται λόγω της ασαφούς διαίρεσης των διαστημάτων των μεταβλητών και στη συνέχεια κατά την διαδικασία της μάθησης απαλείφονται οι κανόνες που δεν χρησιμοποιούνται. Και οι δύο μέθοδοι χρησιμοποιούν ένα ασαφές σφάλμα  $E$ , το οποίο αποτυπώνει την ποιότητα του συστήματος, για να δημιουργηθούν και να βελτιστοποιηθούν οι κανόνες. Οι συναρτήσεις συμμετοχής των κανόνων μεταβάλλονται σύμφωνα με τον αλγόριθμο Fuzzy Error Backpropagation

- Το Neuro-Fuzzy Classification (NEFCLASS), (Nauck, 1995). Εξάγει ασαφείς κανόνες από τα δεδομένα τα οποία μπορούν να διαιρεθούν σε σαφείς περιοχές (ταξινόμηση). Η βάση δεδομένων του συστήματος προσεγγίζει μια άγνωστη συνάρτηση  $\varphi$  η οποία αναπαριστά το πρόβλημα της ταξινόμησης και αντιστοιχίζει κάθε τιμή της εισόδου  $x$  στην τάξη της  $C_i$

- Το Neuro-Fuzzy Function Approximation (NEFPROX), (Nauck, 1999). Αποτελεί μια τροποποιημένη έκδοση του NEFCON χωρίς την reinforcement μάθηση και χρησιμοποιείται για να προσεγγίσει μια συνάρτηση. Σε σχέση με το ANFIS μπορεί να χρησιμοποιήσει εκτός από Sugeno και Mamdani μηχανισμό συμπερασμού.

- Το Fuzzy Inference Environment Software with Tuning (FINEST), (Tano, 1996). Βελτιστοποιεί το μηχανισμό συμπερασμού μόνο του. Χρησιμοποιεί τον αλγόριθμο backpropagation για την βελτιστοποίηση των παραμέτρων.

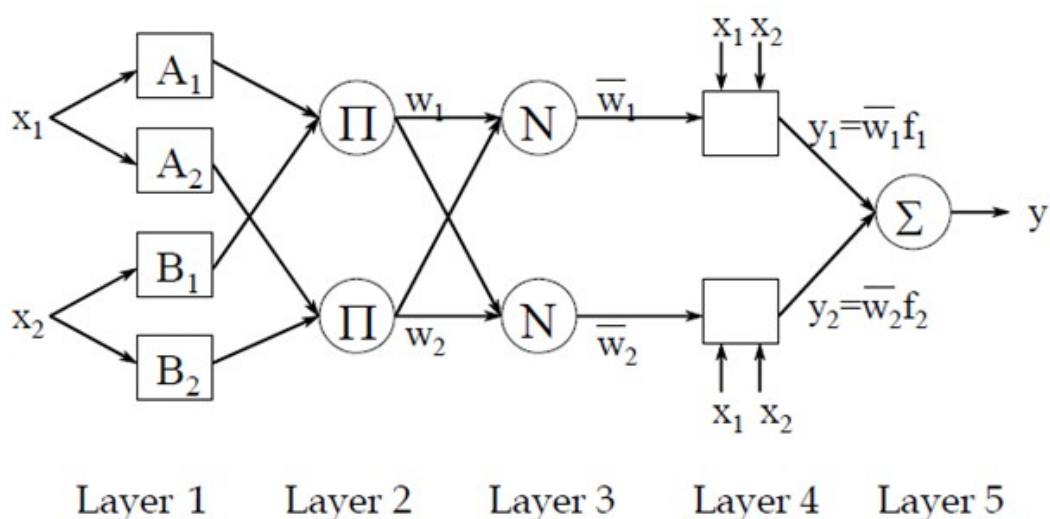
- Το Self Constructing Neural Fuzzy Inference Network (SONFIN), (Feng, 1998). Χρησιμοποιεί ένα Takagi-Sugeno μηχανισμό συμπερασμού. Οι ασαφείς κανόνες δημιουργούνται και προσαρμόζονται καθώς η διαδικασία μάθησης εξελίσσεται και ταυτόχρονα δημιουργούνται η δομή και οι παράμετροι του συστήματος.

- Το Fuzzy Net (FUN), (Sulzberger, 1993). Μπορεί να αναπαραστήσει λογικές εκφράσεις μέσω ασαφών κανόνων και συναρτήσεων συμμετοχής σε ένα δίκτυο με βάση τις συναρτήσεις ενεργοποίησης κάποιων ειδικών νευρώνων.

- Τα Evolving Fuzzy Neural Networks (EFuNN) and Dynamic Evolving Fuzzy Neural Networks (dmFFuNNs), (Kasabov, 1998). Και τα δύο συστήματα βασίζονται στη μεθοδολογία Evolving Connectionist Systems (ECOS) καθώς χρησιμοποιούν υβριδικό (με επίβλεψη και χωρίς επίβλεψη) αλγόριθμο μάθησης.

#### 4.4 Προσαρμοστικό νεύρο-ασαφές σύστημα (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System - ANFIS)

Το ANFIS θεωρείται ότι ανήκει στα προσαρμοστικά δίκτυα (adaptive networks), τα οποία είναι αρκετά όμοια με τα νευρωνικά δίκτυα. Το προσαρμοστικό δίκτυο αποτελείται από τους προσαρμοστικούς και τους μη προσαρμοστικούς κόμβους (adaptive, non-adaptive nodes). Ουσιαστικά το προσαρμοστικό δίκτυο είναι ένα πολύ-επίπεδο δίκτυο πρόσθιας τροφοδότησης (multi-layer feed-forward network), στο οποίο κάθε κόμβος εκτελεί μία συγκεκριμένη λειτουργία πάνω στα εισερχόμενα σήματα και πάνω στο σύνολο των παραμέτρων που αντιστοιχούν στο συγκεκριμένο κόμβο. Οι κόμβοι συνδέονται μέσω κατευθυντήριων συνδέσμων (directional links). Μερικοί ή όλοι οι κόμβοι είναι προσαρμόσιμοι, πράγμα το οποίο σημαίνει ότι το αποτέλεσμα καθενός από αυτούς τους κόμβους εξαρτάται από τις παραμέτρους που σχετίζονται με αυτόν τον κόμβο, και ο κανόνας μάθησης προσδιορίζει πώς αυτοί οι παράμετροι θα πρέπει να μεταβληθούν για την ελαχιστοποίηση ενός προκαθορισμένου μέτρου σφάλματος. Το είδος της λειτουργίας του κάθε κόμβου μπορεί να ποικίλει από κόμβο σε κόμβο, και η επιλογή της λειτουργίας ενός κόμβου εξαρτάται από τη συνολική επεξεργασία πάνω στις εισόδους και την έξοδο που το προσαρμοστικό δίκτυο πρέπει να εκτελέσει. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι στο Σχήμα που παρουσιάζει τη δομή αυτού του δικτύου οι σύνδεσμοί του απλά υποδεικνύουν την κατεύθυνση της ροής των σημάτων ανάμεσα στους κόμβους, ενώ σταθμικά βάρη δεν σχετίζονται με τους συνδέσμους.



Εικόνα 8: Η αρχιτεκτονική δομή του ANFIS

Για την απεικόνιση των διαφορετικών ικανοτήτων προσαρμοστικότητας χρησιμοποιούνται τόσο κυκλικοί όσο και τετράγωνοι κόμβοι στην αναπαράσταση του δικτύου. Ένας τετράγωνος κόμβος περιλαμβάνει

παραμέτρους (adaptive node), ενώ ο κυκλικός κόμβος δεν έχει καμία παράμετρο (fixed node). Το σύνολο των παραμέτρων ενός προσαρμοστικού δικτύου είναι η ένωση των συνόλων των παραμέτρων του κάθε ενός προσαρμοστικού κόμβου. Οι παράμετροι αυτοί ενημερώνονται κατάλληλα, σύμφωνα με τα δοσμένα δεδομένα εκπαίδευσης και μία gradient based διαδικασία μάθησης, προκειμένου να επιτευχθεί μία επιθυμητή αντιστοίχιση μεταξύ των δεδομένων εισόδου-εξόδου.

Το Sugeno ασαφές μοντέλο είναι το μοντέλο που χρησιμοποιείται στο εκπαιδευόμενο ασαφούς λογικής δίκτυο ANFIS. Το ANFIS είναι μία συστηματοποιημένη προσπάθεια παραγωγής κανόνων της μορφής "εάν - τότε" από ζευγάρια εισόδου-εξόδου.

## 4.5 Μοντέλα Αυτοπαλινδρόμησης (Autoregressive models)

Τα αυτοπαλινδρόμα μοντέλα περιγράφουν σχέσεις μεταξύ τ.μ. καθώς και την εξάρτηση ενός σημείου χρονοσειράς από τα προηγούμενα. Οι χρονοσειρές που χρησιμοποιούνται χαρακτηρίζονται από τάσεις ή περιοδικότητα. Αποσκοπούν κυρίως στην πρόβλεψη κάποιου μεγέθους, χρησιμοποιώντας τη γνώση μας είτε για άλλα μεγέθη ή για το ίδιο μέγεθος σε προηγούμενους χρόνους.

### 4.5.1 Αυτοπαλινδρόμο μοντέλο κινητού μέσου όρου (ARMA)

Το γενικό μοντέλο αυτοπαλινδρόμησης έχει τη μορφή

$$X_t = \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_p X_{t-p} + \theta_0 \varepsilon_t + \theta_1 X_{\varepsilon t-1} + \dots + \theta_q \varepsilon_{t-q} \quad (11)$$

όπου:

- Οι πρώτοι  $p$  όροι του μοντέλου αντιστοιχούν στο αυτοπαλινδρομούμενο μέρος (autoregressive term).

- Ο όρος  $\theta$  δηλώνει το σφάλμα ή θόρυβο στη χρονική στιγμή  $t$ . Συνήθως θεωρούμε  $\theta_0=1$ .

- Οι τελευταίοι  $q$  όροι του μοντέλου αντιστοιχούν στο θόρυβο στις προηγούμενες  $q$  χρονικές στιγμές και αποτελούν το μέρος του κινούμενου μέσου (moving average term).

Το μοντέλο αυτό λέγεται αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο κινούμενου μέσου (autoregressive moving average model) και συμβολίζεται ARMA( $p,q$ ). Υποθέτουμε πως τα  $\varepsilon_t$  είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους και έχουν πανομοιότυπη κατανομή (identically and independently distributed, iid). Επίσης κάθε  $\varepsilon_t$  είναι ανεξάρτητο των  $X_s$  για χρόνο  $s \leq t$  κι έχει διασπορά  $\sigma_\varepsilon^2$ . Συνήθως

υποθέτουμε επίσης ότι τα  $\varepsilon_t$  ακολουθούν κανονική κατανομή για να μπορούμε να υπολογίζουμε παραμετρικά διαστήματα εμπιστοσύνης και πρόβλεψης (αλλά για σημειακές εκτιμήσεις δεν είναι απαραίτητο).

#### 4.5.2 Αυτοπαλινδρόμο μοντέλο (AR)

Πιο γνωστό είναι το αυτοπαλινδρομούμενο μοντέλο (*autoregressive model*)

AR( $p$ )

$$X_t = \phi_1 X_{t-1} + \phi_p X_{t-p} + \varepsilon_t \quad (12)$$

Το AR ορίζεται όπως το μοντέλο πολλαπλής παλινδρόμησης, με τη διαφορά ότι οι μεταβλητές  $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$  είναι από την ίδια διαδικασία, όπως η εξαρτημένη μεταβλητή  $X_t$ . Άρα για το μοντέλο AR( $p$ ) δε μπορούμε να θεωρήσουμε τις  $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$  ως ανεξάρτητες μεταβλητές. Παρ' όλα αυτά χρησιμοποιείται κι εδώ η μέθοδος των ελαχίστων τετραγώνων για την εκτίμηση των παραμέτρων  $\phi_1, \dots, \phi_p, \sigma_\varepsilon^2$ . Άλλες μέθοδοι χρησιμοποιούν τη σχέση που υπάρχει μεταξύ της συνάρτησης αυτοσυσχέτισης  $\rho_X(\tau)$  για  $\tau = 0, 1, \dots, p$  (όπου  $\rho_X(0) = \sigma_X^2$ ) και των παραμέτρων  $\phi_1, \dots, \phi_p, \sigma_\varepsilon^2$ , που αναφέρεται και ως σύστημα κανονικών ή Yule-Walker εξισώσεων (*normal or Yule-Walker equations*).

- **Βαθμός μοντέλου**

Όπως στην πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση επιλέγουμε με κάποιο τρόπο τις σημαντικές ανεξάρτητες μεταβλητές έτσι και στην αυτοπαλινδρόμηση υπάρχουν κριτήρια επιλογής του βαθμού του μοντέλου (*order selection*), δηλαδή του αριθμού των μεταβλητών  $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$  που θα συμπεριληφθούν στο μοντέλο. Τέτοια κριτήρια είναι το κριτήριο πληροφίας του Akaike (Akaike information criterion, AIC) και το τελικό σφάλμα πρόβλεψης (*Final Prediction Error, FPE*). Επίσης ένα χρήσιμο εργαλείο για την επιλογή του βαθμού του μοντέλου είναι η συνάρτηση μερικής αυτοσυσχέτισης (*partial autocorrelation function*).

Για να είναι κατάλληλο ένα μοντέλο AR( $p$ ) ή ARMA( $p, q$ ) θα πρέπει τα υπόλοιπα  $\varepsilon_t$  να είναι λευκός θόρυβος.

Στην δική μας προσέγγιση χρησιμοποιήθηκε το μοντέλο ANFIS με μία είσοδο. Έγινε εφαρμογή του μοντέλου με χρήση διαφορετικού αριθμού συναρτήσεων συμμετοχής στη είσοδο, καθώς και διαφορετικούς τύπους συναρτήσεων κάθε φορά για κάθε περίπτωση με σκοπό την εύρεση των καλύτερου συνδυασμού ώστε να έχουμε το βέλτιστο αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα, για κάθε περίπτωση ο αριθμός συναρτήσεων συμμετοχής ήταν από 2 έως δέκα και οι συναρτήσεις που χρησιμοποιήθηκαν ήταν οι: gbell, gauss, gauss2, triangular και trapezoid. Ο αριθμός εποχών εκπαίδευσης



ορίσθηκε στο 500 και το βήμα στο 0,1. Τα αποτελέσματα αυτού τα συγκρίναμε με αυτά των δύο μοντέλων παλινδρόμησης που παρουσιάσαμε παραπάνω.

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η αξιολόγηση του μοντέλου θα γίνει βάση των στατιστικών σφαλμάτων RMSE, MSE, MAE και MAPE του μοντέλου ANFIS και γίνεται σύγκριση αυτών με τα σφάλματα των ευρέως διαδεδομένων μοντέλων AR και ARMA για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις πωλήσεων υβριδικών αυτοκινήτων (Hybrids (HEVs), Plug-In Hybrid (PHEVs) and Extended Range (EREVs), Battery (BEVs). Τα στατιστικά σφάλματα είναι το πιο διαδεδομένο είδος αξιολόγησης διότι δείχνει την απόκλιση των αποτελεσμάτων από την πραγματική τιμή. Οι εξισώσεις των σφαλμάτων δίνονται παρακάτω.

$$\text{Root Mean Square Error } RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N e_t^2}{N}} \quad (13)$$

$$\text{Mean Square Error } MSE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N e_t^2 \quad (14)$$

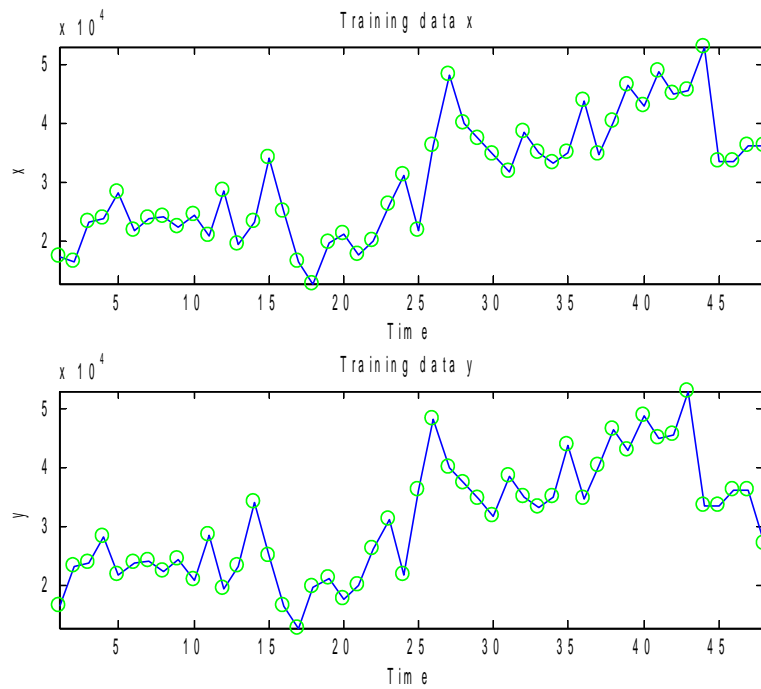
$$\text{Mean Absolute Error } MAE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N |e_t| \quad (14)$$

$$\text{Mean Absolute Percentage Error } MAPE = \frac{1}{N} \cdot \sum_{t=1}^N \left| \frac{A_t - F_t}{A_t} \right| * 100 \quad (15)$$

Σαν βασικό κριτήριο για την αξιολόγηση του μοντέλου παίρνουμε το RMSE καθώς αυτό έχει επικρατήσει στη βιβλιογραφία και στην ουσία δείχνει την απόκλιση της πραγματικής τιμής από αυτή της πρόβλεψης.

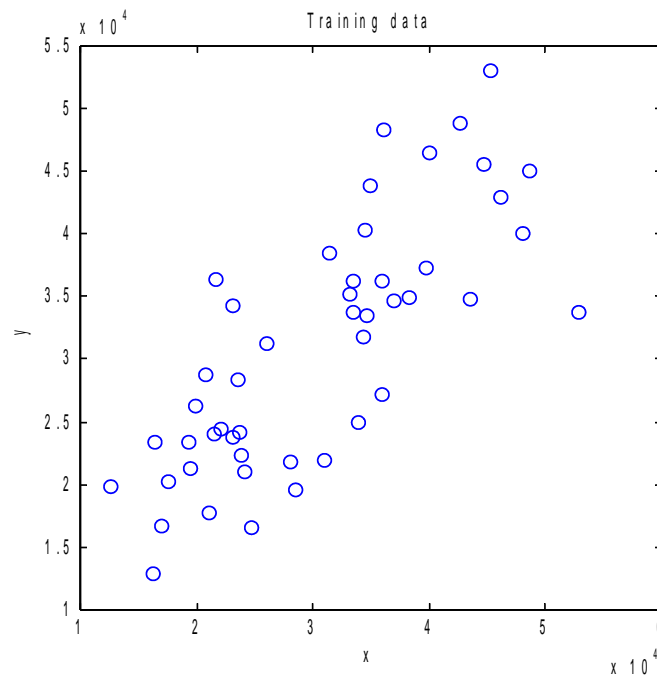
Στην παρούσα εργασία το μοντέλο ANFIS χρησιμοποιεί μία είσοδο και δύο συναρτήσεις συμμετοχής τύπου Gbell. Ο αριθμός εποχών εκπαίδευσης είναι 500 και το βήμα 0,1. Παρακάτω παρουσιάζονται τα αποτελέσματα με τη μορφή πινάκων. Θα παρουσιάσουμε αναλυτικά τα γραφήματα που δείχνουν τη λειτουργία του μοντέλου για την περίπτωση των HEVs καθώς για τις άλλες περιπτώσεις η εξήγηση είναι παρόμοια.

- HEVs



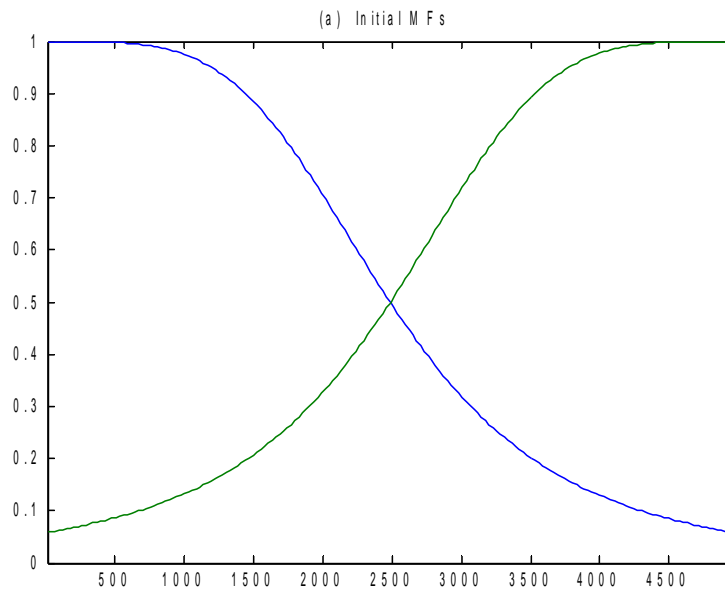
Διάγραμμα 1: Απεικόνιση των δεδομένων εκπαίδευσης εισόδου και εξόδου.

Αν και φαίνεται ότι τα δεδομένα είναι ίδια τόσο για την είσοδο όσο και για την έξοδο, παρατηρώντας προσεκτικά φαίνεται ότι η είσοδος τη στιγμή  $k$  είναι και έξοδος τη στιγμή  $k-1$

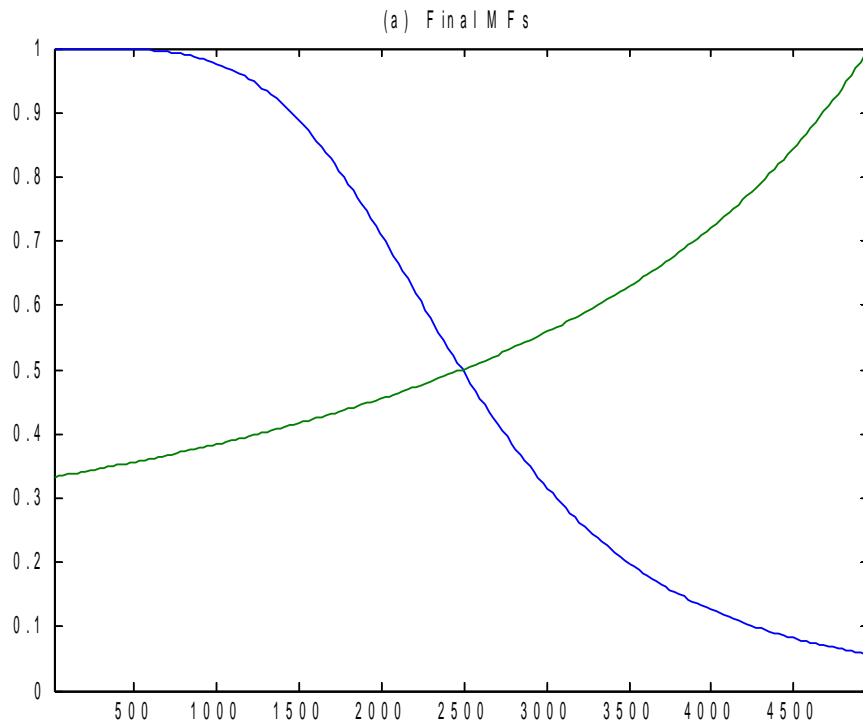


Διάγραμμα 2: Απεικόνιση των δεδομένων εκπαίδευσης εισόδου και εξόδου στο δισδιάστατο χώρο.

Όσο πιο διάσπαρτα είναι τα δεδομένα τόσο πιο μεγάλη ομοιογένεια υπάρχει στο δείγμα μας, και αυτό είναι το επιθυμητό.

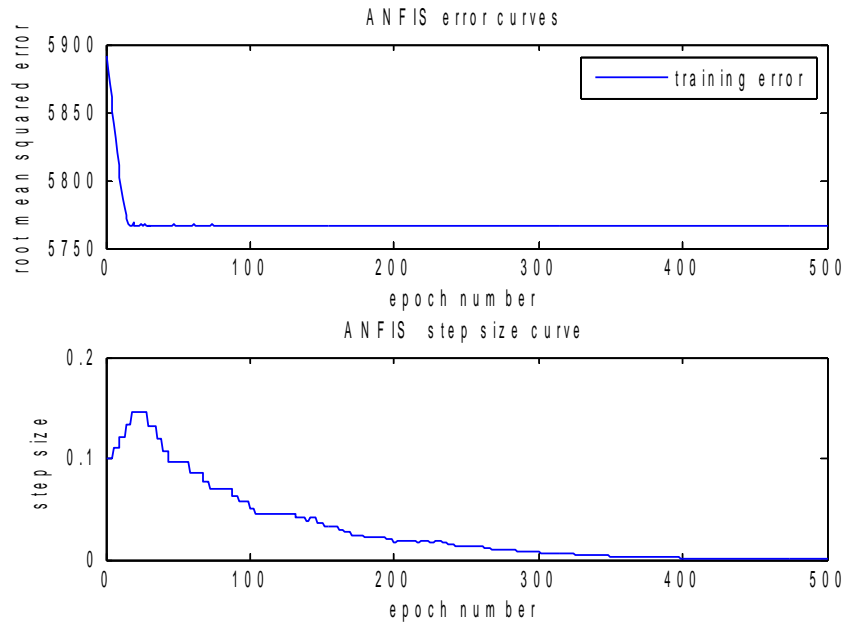


Διάγραμμα 3: Απεικόνιση των συναρτήσεων συμμετοχής της εισόδου πριν την εκπαίδευση.



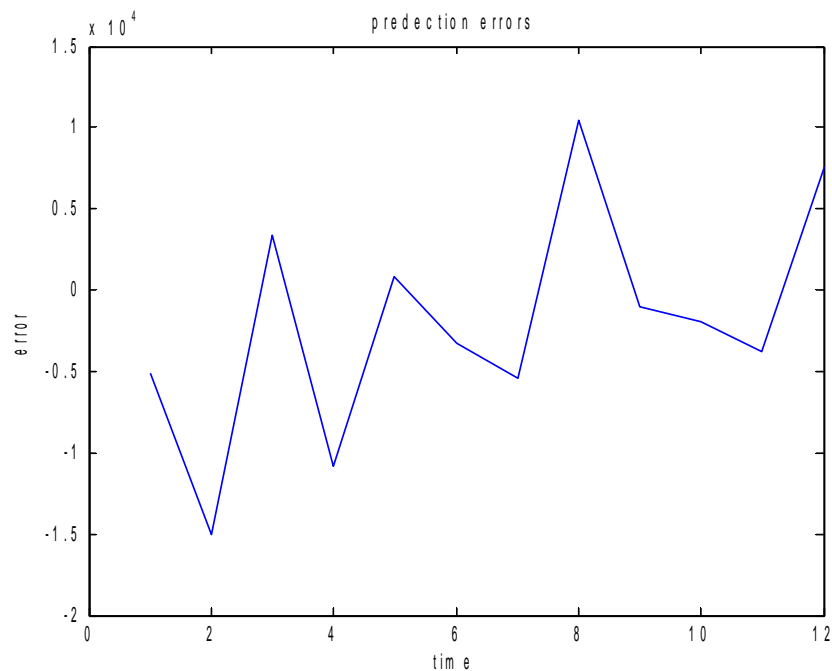
Διάγραμμα 4: Απεικόνιση των συναρτήσεων συμμετοχής της εισόδου μετά την εκπαίδευση του μοντέλου.

Στο διάγραμμα 3 παρουσιάστηκε η αρχική μορφή των συναρτήσεων συμμετοχής. Όμως κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης, το μοντέλο βελτιστοποιεί τις παραμέτρους της συνάρτησης bell ούτως ώστε τα δεδομένα να αποτυπώνονται καλύτερα πάνω σε αυτή. Τη μορφή που βλέπουμε να έχουν πάρει οι συναρτήσεις στο Διάγραμμα 4, είναι αποτέλεσμα αυτής της βελτιστοποίησης.



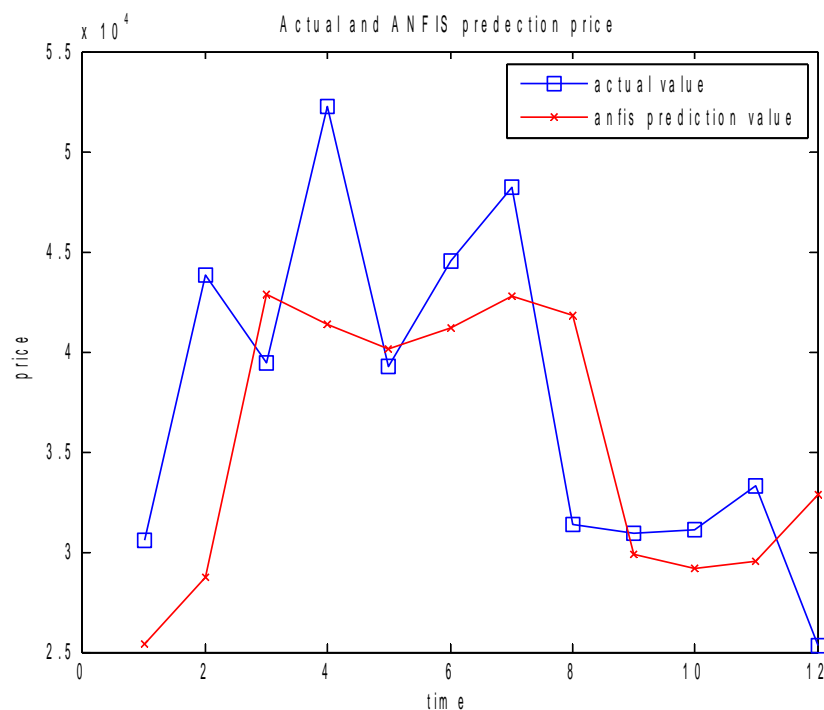
Διάγραμμα 5: Απεικόνιση της εξέλιξης του σφάλματος κατά τη διάρκεια της εκπαίδευσης και του βήματος.

Παρατηρούμε στο διάγραμμα 5 ότι μετά την διακοσμοστή επανάληψη το σφάλμα δεν περιορίζεται σημαντικά περαιτέρω, πράγμα που σημαίνει ότι όσες επιπλέον επαναλήψεις και να προσθέσουμε, η προβλεπτική ικανότητα του μοντέλου δεν πρόκειται να βελτιωθεί περαιτέρω.



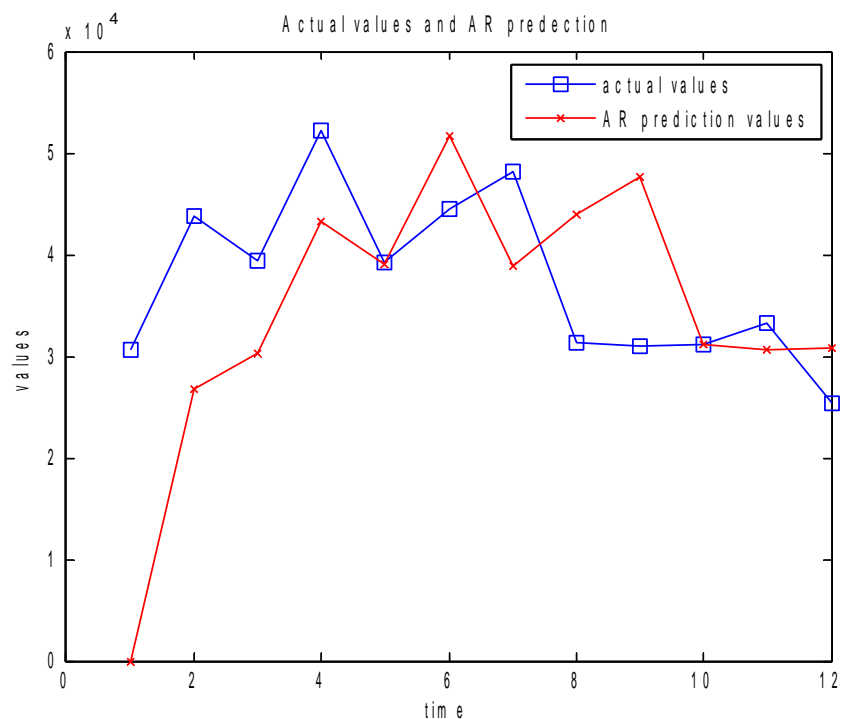
Διάγραμμα 6: Απεικόνιση σφάλματος της πρόβλεψης του ANFIS.

Το διάγραμμα 6 μας δείχνει τη διαφορά των τιμών πρόβλεψης από την πραγματική τιμή. Όσο πιο κοντά είναι οι τιμές στο μηδέν τόσο πιο επιτυχής είναι η πρόβλεψη του μοντέλου.

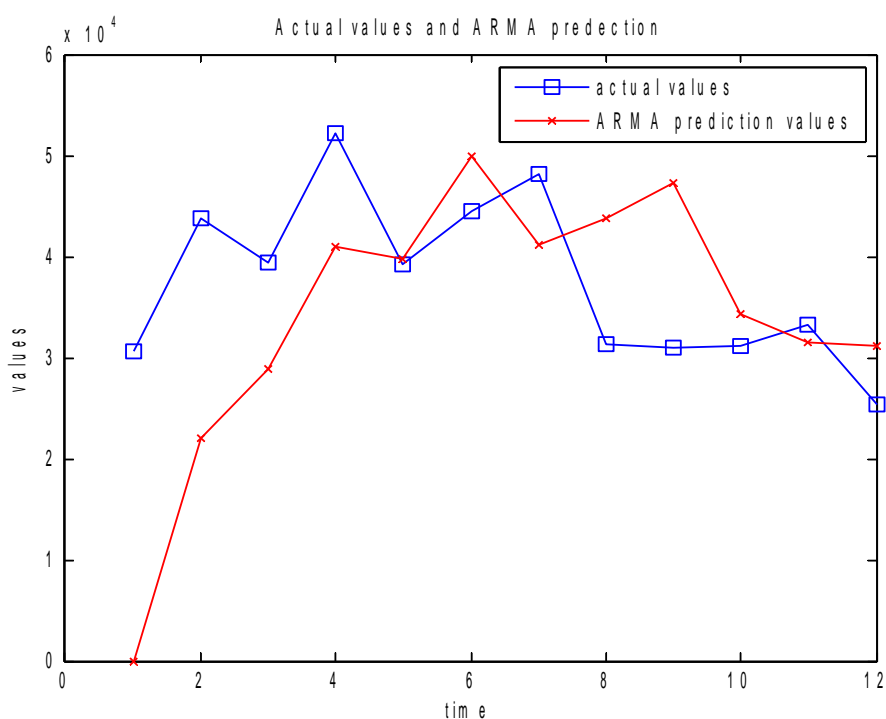


Διάγραμμα 7: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών των πωλήσεων HEVs αυτοκινήτων και των τιμών πρόβλεψης του ANFIS.

Παρατηρούμε ότι το ANFIS στις περισσότερες περιπτώσεις η προσέγγιση που έχει κάνει είναι πολύ κοντά στην πραγματική τιμή των πωλήσεων. Αυτό το αποτέλεσμα είναι αναμενόμενο καθώς περιμέναμε το μοντέλο να έχει υψηλή προβλεπτική ικανότητα. Επίσης επιβεβαιώνεται από τα αποτελέσματα των σφαλμάτων στον παρακάτω Πίνακα 1.



Διάγραμμα 8: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών των πωλήσεων HEVs αυτοκινήτων και των τιμών πρόβλεψης του AR.



Διάγραμμα 9: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών των πωλήσεων HEVs αυτοκινήτων και των τιμών πρόβλεψης του ARMA.

		<b>HEVs</b>	
	ANFIS	AR	ARMA
<b>MSE</b>	50758000	167150000	182950000
<b>RMSE</b>	7124	12929	13526
<b>MAE</b>	5735	10011	10554
<b>MAPE</b>	15.5	28	30

**ΠΙΝΑΚΑΣ 1**

Στον πίνακα 1 περιέχονται οι τιμές των στατιστικών σφαλμάτων για τα HEVs αυτοκίνητα. Συγκρίνοντας τα αποτελέσματα του ANFIS με αυτά των άλλων μοντέλων βλέπουμε ότι το ANFIS έχει τις μικρότερες τιμές σφαλμάτων. Αναλογιζόμενοι το μέγεθος του RMSE το οποίο είναι πολύ μικρότερο από 10000 και λαμβάνοντας υπόψιν ότι οι πραγματικές τιμές είναι πολλές δεκάδες χιλιάδες μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το μοντέλο ANFIS είναι κατάλληλο για πρόβλεψη των τιμών των πωλήσεων HEVs αυτοκινήτων. Τα μοντέλα AR και ARMA έχουν παρόμοια συμπεριφορά, με το AR να έχει μια ελαφρά καλύτερη επίδοση.

Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν 2 συναρτήσεις συμμετοχής στην είσοδο και το είδος αυτών ήταν η gbell.

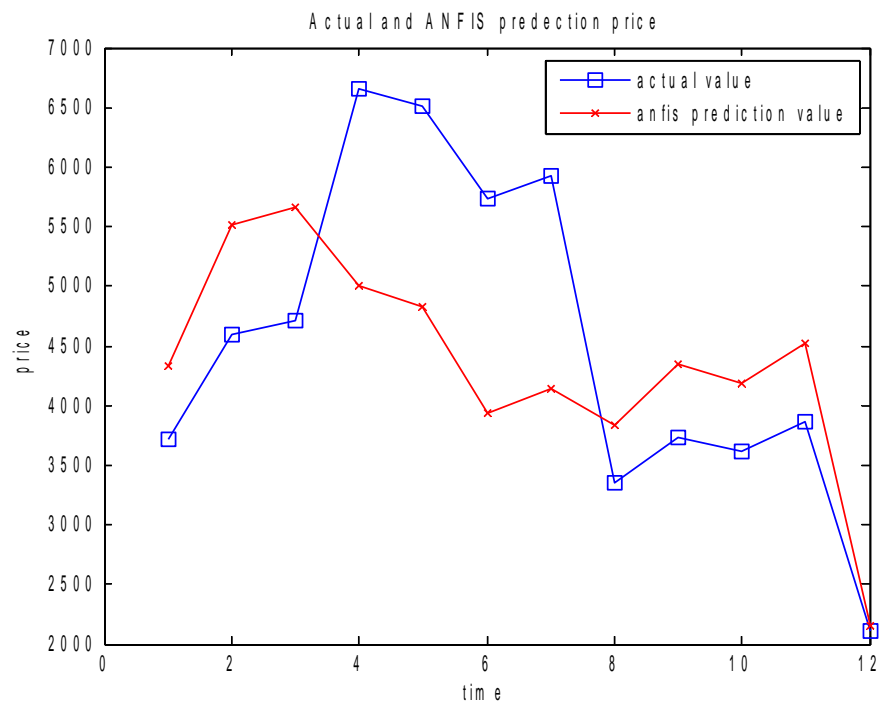
- **PHEVs & EREVs**

		<b>PHEVs &amp; EREVs</b>	
	ANFIS	AR	ARMA
<b>MSE</b>	1287700	2379400	3251500
<b>RMSE</b>	1134	1542.5	1803.2
<b>MAE</b>	979	1067.1	1430.3
<b>MAPE</b>	19.5	28.9	37.3

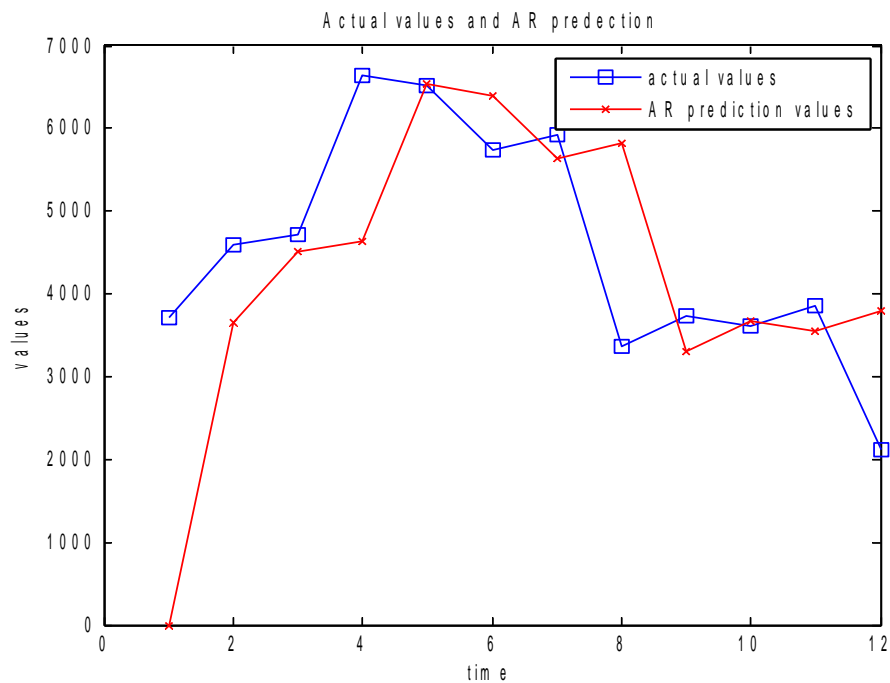
**ΠΙΝΑΚΑΣ 2**

Τα αποτελέσματα στην δεύτερη περίπτωση, αυτή των πωλήσεων των PHEVs & EREVs αυτοκινήτων συνοψίζονται στον Πίνακα 2 και είναι αρκετά ικανοποιητικά. Και σε αυτή την περίπτωση το ANFIS συμπεριφέρεται καλύτερα από τα άλλα δύο μοντέλα. Αυτό οφείλεται στην υψηλή διακύμανση των τιμών. Ο χώρος πωλήσεων της αγοράς πολύ δύσκολα ακολουθεί μια κανονική κατανομή. Τα μοντέλα τεχνητής νοημοσύνης, όπως είναι το ANFIS, έχουν τη δυνατότητα να εντοπίζουν την υψηλή μεταβλητότητα με μεγαλύτερη επιτυχία και αυτό του δίνει το πλεονέκτημα έναντι των άλλων μοντέλων. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν 5 συναρτήσεις συμμετοχής στην είσοδο και το είδος αυτών ήταν η gauss2.

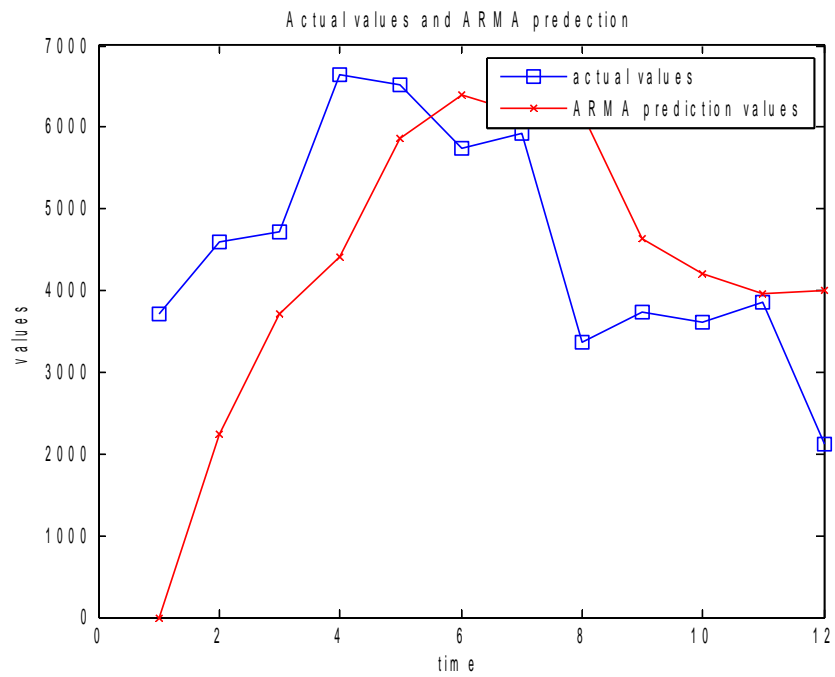




Διάγραμμα 10: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών των πωλήσεων PHEVs & EREVs αυτοκινήτων και των τιμών πρόβλεψης του ANFIS.



Διάγραμμα 11: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών των πωλήσεων PHEVs & EREVs αυτοκινήτων και των τιμών πρόβλεψης του AR.



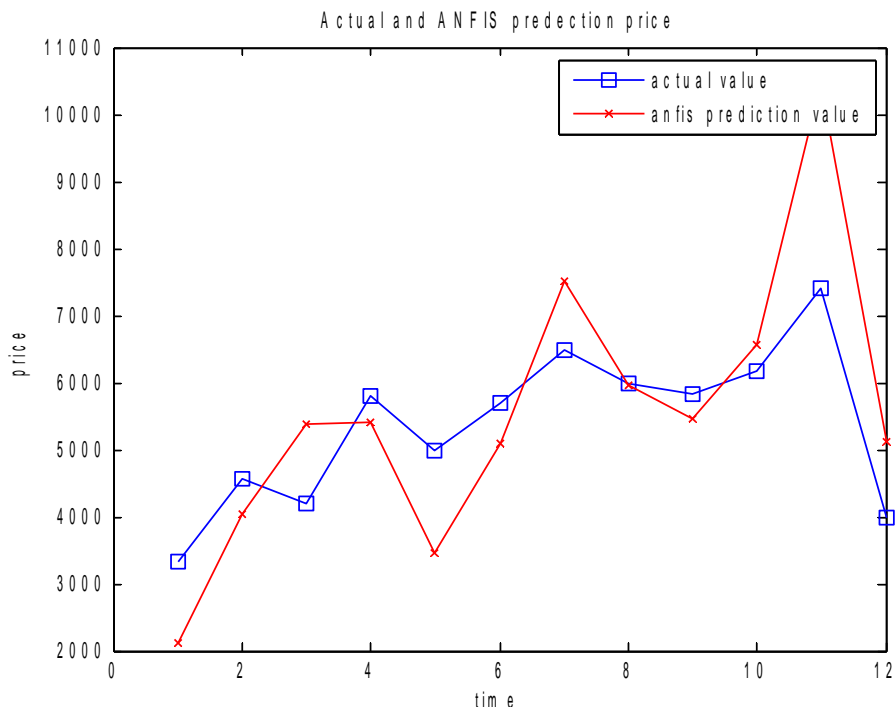
Διάγραμμα 12: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών των πωλήσεων PHEVs & EREVs αυτοκινήτων και των τιμών πρόβλεψης του ARMA.

- BEVs

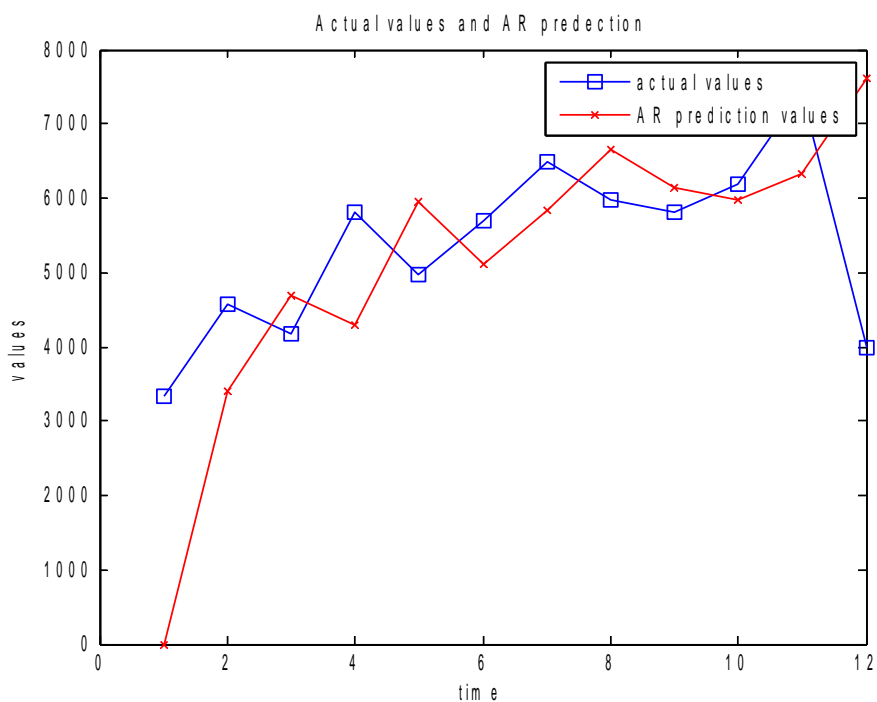
	BEVs		
	ANFIS	AR	ARMA
<b>MSE</b>	1491800	2632500	2616800
<b>RMSE</b>	1221	1622.5	1617.7
<b>MAE</b>	954	1217.9	1181.7
<b>MAPE</b>	18.6	27.4	26.7

**ΠΙΝΑΚΑΣ 3**

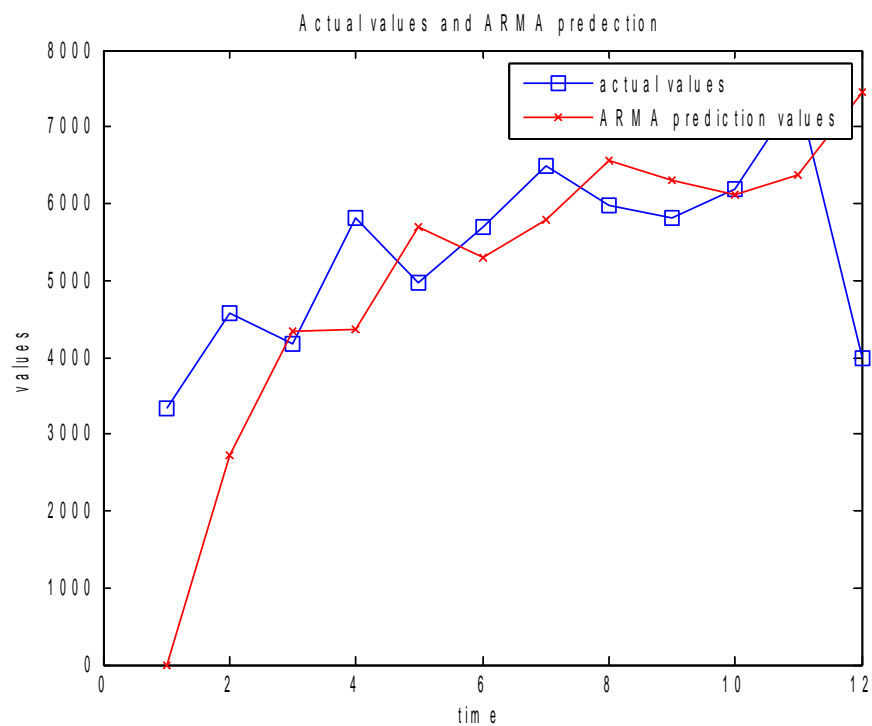
Τα αποτελέσματα στην τρίτη περίπτωση, αυτή των πωλήσεων των BEVs αυτοκινήτων συνοψίζονται στον Πίνακα 3. Το μοντέλο ANFIS και στην τρίτη αυτή περίπτωση παρουσιάζει τιμές σφαλμάτων μικρότερες από αυτές των άλλων μοντέλων. Κοιτώντας το Διάγραμμα 13 μπορούμε εύκολα να διαπιστώσουμε ότι η επίδοση του μοντέλου είναι ικανοποιητική. Παρόλα αυτά και τα άλλα δύο μοντέλα είχαν σχετικά καλή απόδοση. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι στα δεδομένα δεν υπάρχει μεγάλη διακύμανση και για αυτό τα μοντέλα παλινδρόμησης που χρησιμοποιούν απλά το μέσο όρο, μπορούν να κάνουν επιτυχή πρόβλεψη. Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιήθηκαν 3 συναρτήσεις συμμετοχής στην είσοδο και το είδος αυτών ήταν η gauss.



**Διάγραμμα 13:** Απεικόνιση των πραγματικών τιμών των πωλήσεων BEVs αυτοκινήτων και των τιμών πρόβλεψης του ANFIS.



Διάγραμμα 14: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών των πωλήσεων BEVs αυτοκινήτων και των τιμών πρόβλεψης του AR.



Διάγραμμα 15: Απεικόνιση των πραγματικών τιμών των πωλήσεων BEVs αυτοκινήτων και των τιμών πρόβλεψης του ARMA.

## 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα διπλωματική εργασία κάνουμε πρόβλεψη των τιμών των πωλήσεων υβριδικών και ηλεκτρικών αυτοκινήτων στις ΗΠΑ με τη χρήση ενός Νευρο-ασαφούς συστήματος, του ANFIS. Υβριδικό και ηλεκτρικό αυτοκίνητο δεν είναι το ίδιο. Το ηλεκτρικό (Electric Vehicle : EV) ονομάζεται το αυτοκίνητο που παίρνει την ισχύ του αποκλειστικά από ηλεκτρισμό αποθηκευμένο σε μπαταρίες του ίδιου του αυτοκινήτου. Το υβριδικό (Hybrid Vehicle : HV) ονομάζεται το αυτοκίνητο που χρησιμοποιεί δύο (2) τουλάχιστον διαφορετικές πηγές ισχύος. Αν και η πρόβλεψη των πωλήσεων αυτοκινήτων είναι ένα πολύ σημαντικό κομμάτι των αυτοκινητοβιομηχανιών, λίγη έρευνα έχει διεξαχθεί στον τομέα της πρόβλεψης των πωλήσεων τους και ακόμη λιγότερη στον τομέα των αυτοκινήτων που χρησιμοποιούν για καύσιμο εναλλακτικές μορφές ενέργειας. Η παρούσα εργασία έρχεται να εμπλουτίσει το κομμάτι αυτό της βιβλιογραφίας και να εισάγει έναν νέο τομέα, αυτό των νευροασαφών συστημάτων, στην πρόβλεψη πωλήσεων ηλεκτρικών και υβριδικών αυτοκινήτων.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν είναι μηνιαίες τιμές την τελευταία τετραετία και “αλλιεύτηκαν” από την Electric Drive Sales Association <http://electricdrive.org/>.

Το μοντέλο ANFIS που χρησιμοποιήθηκε είναι συνδυασμός δύο τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης. Της Ασαφούς Λογικής και των Νευρωνικών Δικτύων. Η ασαφής λογική παίρνοντας σαφείς τιμές, τις ασαφοποιεί με σκοπό να δημιουργήσει ένα εύρος τιμών, ούτως ώστε η λήψη αποφάσεων να γίνεται πιο αντικειμενικά. Το μειονέκτημά της είναι ότι δεν μπορεί να επεξεργαστεί μεγάλο πλήθος δεδομένων. Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν την ικανότητα να επεξεργάζονται μεγάλο όγκο δεδομένων και να βρίσκουν συσχετίσεις μεταξύ εισόδων και εξόδων αλλά δεν είναι αρκετά καλά στη λήψη αποφάσεων. Χρησιμοποιώντας τα πλεονεκτήματα των δύο μεθόδων, δηλαδή τις τεχνικές μάθησης των νευρωνικών δικτύων και το ισχυρό μαθηματικό υπόβαθρο της ασαφούς λογικής, το ANFIS έχει την ικανότητα για ακριβείς προβλέψεις υπό υψηλή αβεβαιότητα.

Για την αξιολόγηση του μοντέλου χρησιμοποιήθηκαν τα στατιστικά σφάλματα MSE, RMSE, MAE και MAPE για κάθε μία από τις τρεις περιπτώσεις υβριδικών αυτοκινήτων που μελετήθηκαν. Τα Hybrids (HEVs), Plug-In Hybrid (PHEVs) - Extended Range (EREVs) και Battery (BEVs). Επίσης έγινε σύγκριση των αποτελεσμάτων του μοντέλου με αυτά των μοντέλων AR και ARMA τα οποία χρησιμοποιούνται κατά κόρον τόσο στον τομέα της έρευνας όσο και στην αγορά. Βασικό κριτήριο σύγκρισης είναι το RMSE. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, σε όλες τις περιπτώσεις το ANFIS συμπεριφέρεται καλύτερα από τα άλλα δύο μοντέλα. Αυτό οφείλεται στο γεγονός πως το ANFIS έχει τη δυνατότητα να εντοπίζει με μεγαλύτερη

ακρίβεια την αβεβαιότητα μέσα σε ένα πλήθος δεδομένων με υψηλή διακύμανση σε σχέση με τα μοντέλα παλινδρόμησης. Αυτό κυρίως παρατηρείται στην δεύτερη περίπτωση. Στις άλλες δύο περιπτώσεις μπορεί να μην υπάρχει υψηλή διακύμανση όμως το μοντέλο μας και τότε έχει υψηλότερη ακρίβεια πρόβλεψης. Βάσει των παραπάνω αποτελεσμάτων μπορούμε να ισχυριστούμε ότι το ANFIS είναι κατάλληλο για την πρόβλεψη των πωλήσεων υβριδικών αυτοκινήτων στις ΗΠΑ.

Το πλήθος των δεδομένων δεν είναι αρκετό ώστε το μοντέλο να έχει την ικανότητα να εκπαιδευτεί σωστά. Η απόδοση του προτεινόμενου συστήματος πρόβλεψης είναι πιθανό να βελτιωθεί, εάν αυξήσουμε τις εισόδους του μοντέλου. Θα ήταν ενδιαφέρον σε μελλοντική έρευνα να συλλεχθούν τα νέα δεδομένα και να επανεκτελεστεί η ίδια διαδικασία ώστε να δούμε τα νέα αποτελέσματα.

## **ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ**

Θέλω να ευχαριστήσω για την καθοδήγηση και την υπομονή του τον Κο Ατσαλάκη.

Επίσης θέλω να ευχαριστήσω τον πατέρα μου, Λουκά, για τις θυσίες και την εμπιστοσύνη του στο πρόσωπό μου.

Τέλος, θέλω να αφιερώσω αυτή την εργασία στη μνήμη της μητέρας μου, Ευαγγελίας.

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

Ahn, J. et al (2008). A forecast of household ownership and use of alternative fuel vehicles: A multiple discrete-continuous choice approach. *Energy Economics* 30, 2091–2104.

Balducci, P. (2008). Plug-in hybrid electric vehicle market penetration scenarios. Tech. Rep., Department of Energy, 2008.

D'Souza et al. (2014). Predictive Analytics Using Soft Computing: A Case Study on Forecasting For Indian Automobile Industry. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, Vol.2, Special Issue 5, October

Dwivedi, A. et al. (2013). A Business Intelligence Technique for Forecasting the Automobile Sales using Adaptive Intelligent Systems (ANFIS and ANN). *International Journal of Computer Applications* (0975 – 8887), Volume 74 No.9, July.

Hadley, S., & Tsvetkova, A.(2008). Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation. Tech. Rep., Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2007/150.

Jang, J. (Ed.). (1997). Neuro-Fuzzy and Soft Computing. A computational Approach to Learning and Machine Intelligence. Prentice Hall Upper Saddle River, NJ 07458.

Jun, T., & Qing, W. (2015). Optimize BP Neural Network Structure on Car Sales Forecasts Based on Genetic Algorithm. International Industrial Informatics and Computer Engineering Conference (IIICEC 2015).

Kurilov, K., Y. (2012). World and Russian Automotive Industry Development Perspectives. ISSN 1075-7007, Studies on Russian Economic Development, 2012, Vol. 23, No. 5, pp. 478–487. © Pleiades Publishing, Ltd.

Lee, J., & Cho, Y. (2009). Demand forecasting of diesel passenger car considering consumer preference and government regulation in South Korea. Transportation Research Part A 43, 420–429.

Li, Y. et al. (2011). Trend Analysis of 2011 China's Car Sales Volume and Carbon Emissions Based on Rough Set Theory. Verlag Berlin Heidelberg, CCIS 237, pp. 582–589.

Orbach, Y., & Fruchter, G. (2011). Forecasting sales and product evolution: The case of the hybrid/electric car. Technological Forecasting & Social Change 78, 1210–1226.

Pierdzioch, C. et al. (2011). Forecasting U.S. car sales and car registrations in Japan: Rationality, accuracy and herding. Japan and the World Economy 23. 253–258.

Shepherd, S. et al. (2012). Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study. Transport Policy 20, 62–74.

Weiss, M. et al. (2012). On the electrification of road transport-Learning rates and price forecasts for Hybrid – electric and battery – electric vehicles. Energy Policy 48, 374–393.

Wu, Q. (2009). The forecasting model based on wavelet m-support vector machine. Expert Systems with Applications 36, 7604–7610.

Wu, J., D. et al. (2009). An expert system of price forecasting for used cars using adaptive neuro-fuzzy inference. Expert Systems with Applications 36, 7809–7817.

Wu, J., D., & Liu, J., C., (2012). A forecasting system for car fuel consumption using a radial basis function neural network. Expert Systems with Applications 39, 1883–1888.

Yan, H., S. et al. (2013). A short term Forecasting model with inhibiting normal distribution noise of sale series. *Applied Artificial Intelligence*, 27:496–519.

Zhu, Z. et al. (2014). A New Algorithm about Market Demand Prediction of Automobile. *International Journal of Marketing Studies*; Vol. 6, No. 4.