



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

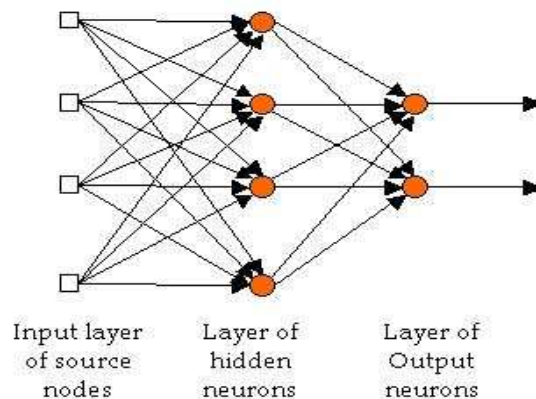
Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών Και Φυσικών Επιστημών

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών

«Μαθηματική προτυποποίηση στις Σύγχρονες Τεχνολογίες και την Οικονομία»

Διπλωματική εργασία

ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΟΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ TAGUCHI



ΝΤΑΦΛΑ ΕΒΙΣΑ

Επιβλέπων: Κουκουβίνος Χρήστος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα. Ιούλιος 2012



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
«ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΗ ΠΡΟΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΣΤΙΣ ΣΥΓΧΡΟΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ & ΤΗΝ ΟΙΚΟΝΟΜΙΑ»
ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΗ ΧΡΗΜΑΤΟΟΙΚΟΝΟΜΙΚΩΝ

ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΣΤΟΝ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ TAGUCHI

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

ΕΒΙΣΑΣ Α. ΝΤΑΦΛΑ
(Α. Μ. 09110028)

Επιβλέπων : Κουκουβίνος Χρήστος
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2012

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία έχει άμεσο στόχο να παρουσιάσει την εφαρμογή των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων (ΤΝΔ) στις τεχνικές της Μεθοδολογίας Taguchi για δυναμικά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Κατά την θεωρητική ανάλυση που λαμβάνει χώρα μέχρι το τρίτο κεφάλαιο, όπου παρουσιάζεται η εν λόγω εφαρμογή, γίνεται αναφορά στην ιστορική εξέλιξη της Ποιοτικής Βελτίωσης και αναδεικνύεται η ανάγκη για Ποιότητα στις ημέρες μας.

Πιο αναλυτικά, στο 1^ο κεφάλαιο γίνεται μια εισαγωγή στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα. Αρχικά, παρουσιάζεται η έμπνευση των ΤΝΔ από το ανθρώπινο νευρικό σύστημα και γίνεται η αντιστοίχιση του τεχνητού με το βιολογικό νευρώνα. Στη συνέχεια, αναλύεται ο τρόπος λειτουργίας κάθε νευρώνα χωριστά και ολόκληρου του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου ως σύνολο, γίνεται κατηγοριοποίηση των ΤΝΔ ανάλογα με τη δομή τους και περιγράφονται οι τρόποι εκπαίδευσης και οι θεωρητικές ιδιότητές τους. Τέλος, αφού παρατίθεται η ενδιαφέρουσα ιστορική αναδρομή των ΤΝΔ και κάποιες από τις βασικότερες εφαρμογές τους, γίνεται λόγος για τη σύνδεση των νευρωνικών δικτύων με τη Στατιστική.

Το 2^ο κεφάλαιο ξεκινά με μια γενική ανασκόπηση για την εξέλιξη της ποιότητας. Η πρώτη μορφή ποιοτικού ελέγχου εμφανίζεται στη Βιομηχανική Επανάσταση. Έκτοτε η ανάγκη για ποιοτικά προϊόντα ή ποιοτικές υπηρεσίες συνεχώς εντεινόταν με αποκορύφωμα τη σημερινή εποχή όπου κάθε επιχείρηση που επιζητά ηγετική θέση στην Αγορά υιοθετεί διεθνή Συστήματα και Πρότυπα Ποιότητας. Στη συνέχεια του 2^{ου} κεφαλαίου παρουσιάζεται η Μέθοδος Taguchi που έδωσε μια ρηξικέλευθη διάσταση τόσο στην έννοια της ποιότητας όσο και στον τρόπο αντιμετώπισής της.

Το 3^ο και τελευταίο κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής βασίζεται στο επιστημονικό άρθρο των Chao-Ton Su και Kun-Lin Hsieh με τίτλο “Εφαρμογή Νευρωνικών Δικτύων για την επίτευξη Εύρωστου Σχεδιασμού για δυναμικά ποιοτικά χαρακτηριστικά” (“Applying Neural Network approach to achieve robust design for dynamic quality characteristics”) που παρουσιάστηκε το 1997 στο Τμήμα Βιομηχανικής Μηχανικής και Διοίκησης (“Department of Industrial Engineering and Management”) στο Πανεπιστήμιο National Chiao Tung στην Ταϊβάν. Η μελέτη των Su και Hsieh παρουσιάζει μια προσέγγιση για την αντιμετώπιση των προβλημάτων δυναμικών ποιοτικών χαρακτηριστικών της Μεθόδου Taguchi με τη χρήση ΤΝΔ. Προς επιβεβαίωση της αποτελεσματικότητας της προτεινόμενης μεθόδου παρατίθεται και ένα αριθμητικό παράδειγμα.

ABSTRACT

The present master thesis aims at presenting a direct application of Artificial Neural Networks (ANN) to the techniques of Taguchi Methodology for dynamic quality characteristics. In the theoretical analysis that takes place up to the third chapter, where the aforementioned application is presented, it is examined the historical development of quality improvement and the need for quality in our days is highlighted.

Specifically, the 1st chapter is an introduction to Artificial Neural Networks (ANNs). Initially, it is presented the inspiration of ANNs from the human nervous system and the correspondence of the artificial with the biological neuron. Then, the operation of each individual neuron and the artificial neural network as a whole are analyzed, the ANNs are categorized according to their structure, their training methods and their theoretical properties are described. Finally, after presenting the interesting history of ANNs and some of their main applications, there is an elaboration on the connection of neural networks with Statistics.

The 2nd chapter begins with an overview of the evolution of quality. The first form of quality control appears in the Industrial Revolution. Since then the need for quality products and quality services has continuously intensified, culminating in today's era where every company that seeks for market leadership adopts international quality systems and standards. Thereafter, in the 2nd chapter the Taguchi method is presented, which has given a groundbreaking concept in quality and in the way it is addressed.

The 3rd chapter of the present thesis is based in the scientific article of Chao-Ton Su and Kun-Lin Hsieh entitled “Applying Neural Network approach to achieve robust design for dynamic quality characteristics” which was presented in 1997 in the Department of Industrial Engineering and Management at the National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, ROC. The study of Su and Hsieh proposes an approach to address the problem of dynamic quality characteristics of the Taguchi method using ANNs. A numerical example is given to confirm the effectiveness of the proposed approach.

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ ιδιαίτερος τον Καθηγητή του ΕΜΠ κ. Χρήστο Κουκουβίνο για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος και την επίβλεψή του.

Πολλές ευχαριστίες στην υποψήφια διδάκτορα Χριστίνα Παρπούλα για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά της στην πραγματοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά την οικογένειά μου για την κατανόηση και την αμέριστη υποστήριξή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

σελίδες

Περίληψη.....	3
Abstract.....	4
Ευχαριστίες.....	5
Περιεχόμενα.....	16
Κεφάλαιο 1^ο. Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα.....	8
1.1 Εισαγωγή – Ορισμός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου (ΤΝΔ).....	9
1.2 Έμπνευση από βιολογικό νευρικό σύστημα.....	12
1.2.1 Εισαγωγή.....	12
1.2.2 Δομή και λειτουργία ενός βιολογικού νευρώνα.....	15
1.2.3 Από το βιολογικό στον τεχνητό νευρώνα.....	19
1.3 Λειτουργία Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.....	21
1.3.1 Δομή τεχνητού νευρώνα.....	21
1.3.2 Πως λειτουργεί ένας νευρώνας?.....	22
1.3.3 Πως λειτουργεί ένα δίκτυο νευρώνων?.....	27
1.4 Ο Αισθητήρας (Perceptron).....	29
1.4.1 Ο Αλγόριθμος Σύγκλισης του Perceptron.....	31
1.5 Βασικές Αρχιτεκτονικές Δομές Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	33
1.6 Εκπαίδευση Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.....	39
1.6.1 Μέθοδος Οπισθοδρόμησης του Λάθους.....	42
1.7 Θεωρητικές Ιδιότητες Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων.....	46
1.8 Επιλογή Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.....	49
1.8.1 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα ΤΝΔ.....	50
1.9 Εφαρμογές ΤΝΔ.....	52
1.9.1 Νευρωνικά Δίκτυα και Στατιστική.....	53
1.10 Ιστορική Αναδρομή.....	56
Κεφάλαιο 2^ο. Η εξέλιξη της Ποιότητας και η μεθοδολογία Taguchi.....	59
2.1 Από την ανάγκη για ποιότητα στη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας.....	60
2.2 Ορισμός Ποιότητας – Ιστορική Αναδρομή.....	63
2.2.1 Σταδιακή Εξέλιξη του ορισμού της Ποιότητας.....	63
2.2.2 Οι πρωτεργάτες της Ποιότητας.....	67
William Edwards Deming.....	67
Joseph Moses Juran.....	70
Kaoru Ishikawa.....	70
Philip Crosby.....	70
Armand Vallin Feigenbaum.....	71
Genichi Taguchi.....	71
2.3 Η Μέθοδος Taguchi.....	74
2.3.1 Εισαγωγή.....	74
2.3.2 Η «Ποιότητα» κατά τον Δρ. Taguchi.....	75
2.3.3 Βήματα της Μεθοδολογίας Taguchi.....	80
2.3.4 Επιζητώντας τη μείωση της μεταβλητότητας (Ποιότητα από το Σχεδιασμό).....	84

2.4	Εύρωστος Παραμετρικός Σχεδιασμός.....	90
2.4.1	Βήματα του Εύρωστου Παραμετρικού Σχεδιασμού.....	91
2.4.2	Εσωτερικοί και Εξωτερικοί Σχεδιασμοί.....	93
2.4.3	Αλληλεπιδράσεις, όπως αντιμετωπίζονται από τον Taguchi.....	95
2.4.4	Μέτρα Απόδοσης Taguchi.....	97
2.4.5	Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα Μεθόδου Taguchi (Σύγκριση με DOE).....	102
2.4.6	Παραδείγματα Εφαρμογής της Μεθόδου Taguchi.....	105
	Παράδειγμα 1.....	105
	Παράδειγμα 2.....	111
	Κεφάλαιο 3^ο. Εφαρμογή ΤΝΔ στη Μέθοδο Taguchi.....	114
3.1	Αλληλεπίδραση ΤΝΔ και Μεθοδολογίας Taguchi.....	115
3.2	Εφαρμογή ΤΝΔ για τη δημιουργία Εύρωστου Σχεδιασμού για Δυναμικά Ποιοτικά Χαρακτηριστικά.....	117

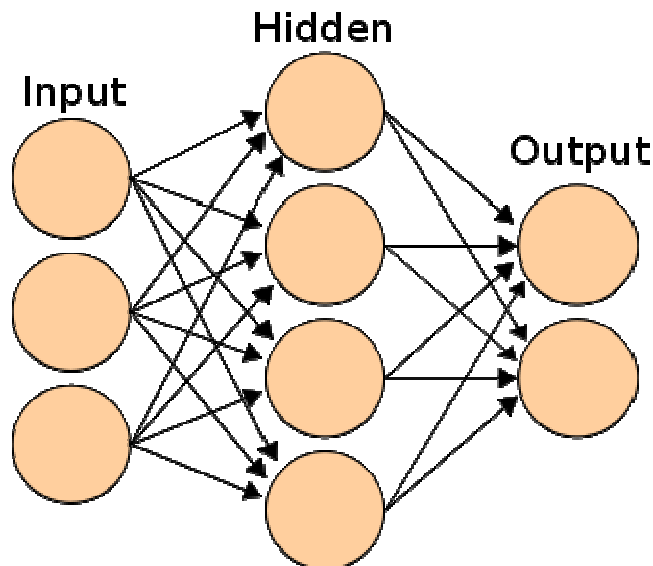
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ

1.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ - ΟΡΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο (Artificial Neural Network – ANN) είναι ένα μαθηματικό μοντέλο ή ένα υπολογιστικό μοντέλο εμπνευσμένο από τη δομή και τη λειτουργία του βιολογικού νευρικού συστήματος.

Το νευρωνικό δίκτυο είναι ένα δίκτυο από απλούς υπολογιστικούς κόμβους (νευρώνες), διασυνδεδεμένους μεταξύ τους. Οι *νευρώνες* είναι τα δομικά στοιχεία του δικτύου. Κάθε τέτοιος κόμβος δέχεται ένα σύνολο αριθμητικών εισόδων από διαφορετικές πηγές (είτε από άλλους νευρώνες, είτε από το περιβάλλον), επιτελεί έναν υπολογισμό με βάση αυτές τις εισόδους και παράγει μία έξοδο. Η εν λόγω έξοδος είτε κατευθύνεται στο περιβάλλον, είτε τροφοδοτείται ως είσοδος σε άλλους νευρώνες του δικτύου. Οπότε, ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελεί μια προσπάθεια προσομοίωσης του Κεντρικού Νευρικού Συστήματος.



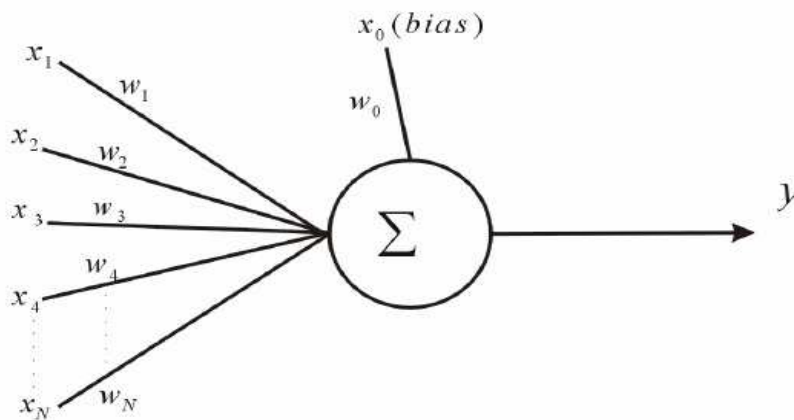
Εικόνα 1. Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο

Υπάρχουν τρεις τύποι νευρώνων:

- οι *νευρώνες εισόδου*,
- οι *νευρώνες εξόδου* και
- οι *υπολογιστικοί νευρώνες* ή *κρυμμένοι νευρώνες*.

Οι νευρώνες εισόδου δεν επιτελούν κανέναν υπολογισμό, μεσολαβούν απλώς ανάμεσα στις περιβαλλοντικές εισόδους του δικτύου και στους υπολογιστικούς νευρώνες. Οι νευρώνες εξόδου διοχετεύουν στο περιβάλλον τις τελικές αριθμητικές εξόδους του δικτύου. Οι υπολογιστικοί νευρώνες πολλαπλασιάζουν κάθε είσοδό τους με το αντίστοιχο συναπτικό βάρος και υπολογίζουν το ολικό άθροισμα των γινομένων. Το άθροισμα αυτό τροφοδοτείται ως όρισμα στη συνάρτηση ενεργοποίησης, την οποία υλοποιεί

εσωτερικά κάθε κόμβος. Η τιμή που λαμβάνει η συνάρτηση για το εν λόγω όρισμα είναι και η έξοδος του νευρώνα για τις τρέχουσες εισόδους και βάρη.



Εικόνα 2. Δομή και λειτουργία τεχνητού νευρώνα.

Ουσιαστικά, ο συνδυασμός ενός αριθμού νευρώνων σε μια νευρωνική δομή έχει σκοπό την ανάπτυξη καλά σχεδιασμένων συστημάτων εκμάθησης που εκπαιδεύονται με τέτοιο τρόπο ώστε να επιλύουν πολύπλοκα, μη γραμμικά προβλήματα από ένα σει παραδειγμάτων ή από γνώση που αντλούν από το περιβάλλον τους ή από κάποιο άλλο εξωτερικό παράγοντα. Έχουν την ικανότητα της γενίκευσης της γνώσης που αποκτούν ώστε να αντιμετωπίζουν απρόβλεπτα σενάρια. Με λίγα λόγια τα ΤΝΔ είναι *αυτό-προσαρμοζόμενα συστήματα* (self-adaptive systems).

Στις πλείστες των περιπτώσεων η επεξεργασία των δεδομένων γίνεται παράλληλα παρά σειριακά. Από τη στιγμή που το νευρωνικό δίκτυο εξαρτάται αποκλειστικά από τα νευρώνια-μέλη του για να πραγματοποιήσει τη λειτουργία του, αποκτά το μοναδικό χαρακτηριστικό να μπορεί να λειτουργεί αποδοτικά ακόμα και αν κάποια νευρώνια πεθάνουν ή υπολειπωθούν. Έτσι τα δίκτυα αυτά χαρακτηρίζονται συνήθως από *ευρωστία σε λάθη ή αποτυχίες* (fault tolerance). Από τη στιγμή που ένα νευρωνικό δίκτυο εκπαιδεύεται, αποκτά την δυνατότητα να λειτουργεί εξαιρετικά αποδοτικά με μικρό ενεργειακό κόστος. Η γνώση δε που αποκτά, αντιπροσωπεύεται εσωτερικά στην δομή του νευρωνικού δικτύου και δεν υπάρχει πρόσβαση σε αυτή την αναπαράσταση.

Τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται ευρέως σε επιστήμες όπως τη νευρολογία, την τεχνητή νοημοσύνη, τη βιολογία, τη γνωστική μοντελοποίηση (cognitive modeling) και τη Στατιστική. Αναπτύχθηκαν μόλις κατά τις τελευταίες δεκαετίες και έχουν πετύχει αρκετά εντυπωσιακά αποτελέσματα, αλλά έχει φανεύει, επίσης, ότι έχουν και αρκετούς περιορισμούς. Οι περιορισμοί εμφανίζονται κυρίως όταν το μέγεθος και η πολυπλοκότητα του συστήματος αυξάνουν. Είναι ιδιαίτερα ικανά σε συνδυαστικά προβλήματα και σε γενικολογήσεις. Αντίθετα, δεν είναι ικανά σε προβλήματα λογικής και σε υπολογισμούς, όπου η αριθμητική ακρίβεια είναι σημαντικός παράγοντας.

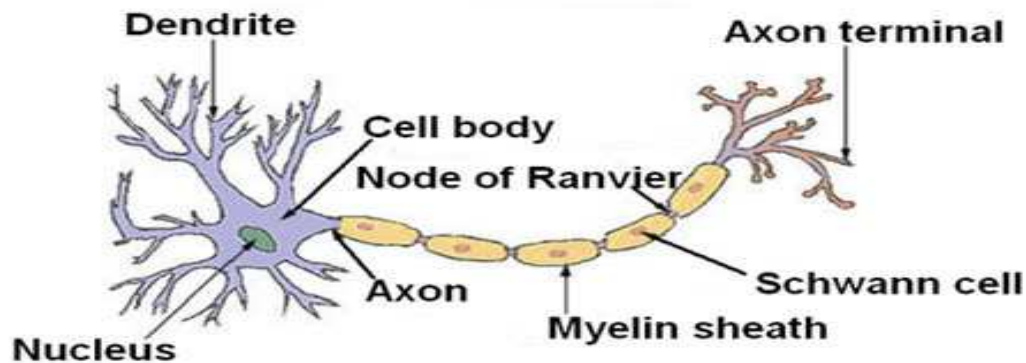
Υπάρχουν πάρα πολλά μοντέλα δικτύων με διαφορετική δομή, φιλοσοφία και τρόπο λειτουργίας και ποικίλες εφαρμογές.

Τα νευρωνικά δίκτυα αναπτύχθηκαν μέσα από τις διεξαγωγές ερευνών της Τεχνητής Νοημοσύνης. Δηλαδή μέσα από προσπάθειες μίμησης της ανοχής σε βλάβες που παρουσιάζουν τα βιολογικά νευρωνικά συστήματα και προσπάθειες εξόρυξης γνώσης μέσα από αυτά, μοντελοποιώντας τη δομή των χαμηλών επιπέδων του εγκεφάλου. Προκειμένου να αναπαραχθεί νοημοσύνη, κρίνεται, γενικά, απαραίτητη η δημιουργία συστημάτων με παρόμοια τεχνική με αυτή του βιολογικού νευρωνικού συστήματος. Παρόλα αυτά, πολλά ακόμα παραμένουν άγνωστα για το πώς ο εγκέφαλος εκπαιδεύεται ώστε να επεξεργάζεται πληροφορίες, οπότε οι θεωρίες αφθονούν.

Εν γένει, θα λέγαμε ότι τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ) εμπνέονται από τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα, όμως, τελικά, έχουν μικρή σχέση με αυτά, αφού τα ΤΝΔ χρησιμοποιούν πολύ απλοποιημένα μοντέλα νευρώνων και εκμεταλλεύονται μόνο τα αδρά χαρακτηριστικά αυτών.

1.2 ΕΜΠΝΕΥΣΗ ΑΠΟ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΝΕΥΡΙΚΟ ΣΥΣΤΗΜΑ

Structure of a Typical Neuron

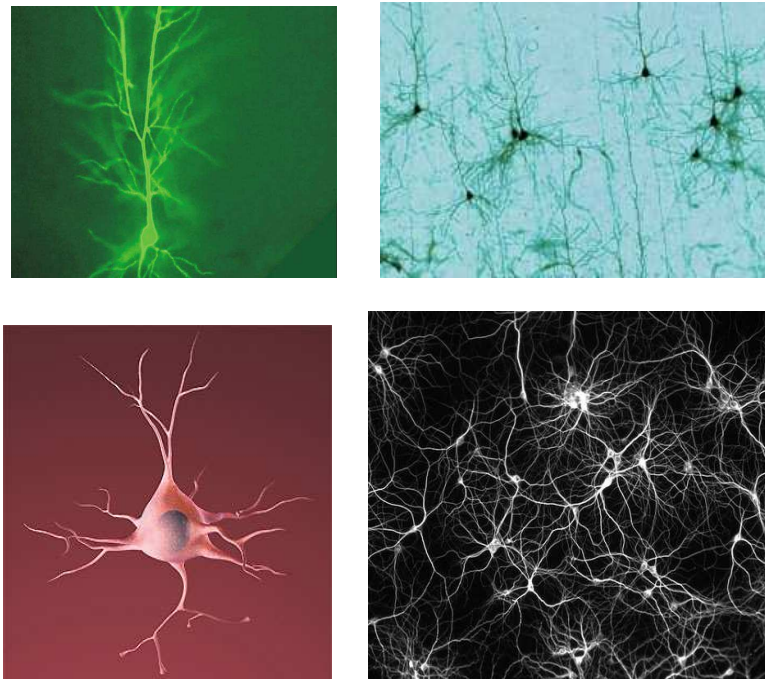


Εικόνα 3. Δομή ενός τυπικού νευρώνα

1.2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Βασική μονάδα δόμησης του εγκεφάλου είναι ένα κύτταρο που ονομάζεται νευρώνας, το οποίο λειτουργεί όπως και τα άλλα κύτταρα του οργανισμού. Ο ανθρώπινος εγκέφαλος αποτελείται από ένα πολύ μεγάλο αριθμό νευρώνων, της τάξης του 10^{10} . Όλοι οι νευρώνες είναι διαφορετικοί μεταξύ τους και δεν υπάρχουν δύο ολόιδιοι νευρώνες στον μεγάλο αυτό αριθμό. Υπάρχουν πολλοί τύποι νευρώνων και ποικίλοι τρόποι για το πώς ορίζεται μια κατηγορία νευρώνων.

Κάθε νευρώνας συνδέεται με πολλούς άλλους νευρώνες με συνδέσεις που ονομάζονται *συνάψεις*. Ο αριθμός των συνάψεων δεν είναι σταθερός, αλλά συνήθως ένας νευρώνας έχει περί τις 10^4 συνάψεις. (Μερικοί όμως νευρώνες έχουν μέχρι και 200.000 συνάψεις, όπως είναι οι νευρώνες τύπου Purkinje που βρίσκονται στην παρεγκεφαλίδα.) Πολλές από τις διασυνδέσεις των νευρώνων φαίνεται εκ πρώτης όψεως ότι είναι τυχαίες ή ότι έχουν στατιστικό χαρακτήρα. Παρόλα αυτά, το πιο πιθανό είναι ότι έχουν δημιουργηθεί με μεγάλη ακρίβεια τόσο στο επίπεδο κύτταρο-προς-κύτταρο, όσο και στο επίπεδο ολόκληρου του συστήματος.



Εικόνα 4. Μορφολογία τυπικών νευρωνικών κυττάρων.

Ένας αριθμός νευρώνων με τις διασυνδέσεις τους αποτελούν ένα νευρωνικό δίκτυο (neural net). Το όλο σύστημα των νευρωνικών δικτύων στον ανθρώπινο οργανισμό αποτελεί το Κεντρικό Νευρικό Σύστημα (Central Nervous System). Το σύστημα αυτό επεκτείνεται σε όλο το ανθρώπινο σώμα με κεντρικά σημεία τον εγκέφαλο και την σπονδυλική στήλη. Οι νευρώνες βέβαια εκτείνονται μέχρι και όλα τα άκρα. Και μόνο τα μεγέθη των αριθμών αυτών των νευρώνων και των συνδέσεων τους στο νευρικό σύστημα δικαιολογούν πλήρως την περιπλοκότητα του εγκεφάλου, αλλά και τις τεράστιες δυνατότητες που αυτός παρουσιάζει.

Οι νευρώνες ως κύτταρα πιστεύεται ότι δεν πολλαπλασιάζονται και δεν αναπαράγονται. Αυτό σημαίνει ότι στο σύνολό του το κεντρικό νευρικό σύστημα δημιουργείται στο έμβryo από τις πρώτες μέρες της κύησης και είναι τελείως αναπτυγμένο μερικούς μήνες μετά τη γέννηση του οργανισμού. Η θεώρηση αυτή είναι γενικά αποδεκτή. Παρόλα αυτά, υπάρχουν προτάσεις την τελευταία εικοσαετία ότι πιθανώς σε περιορισμένη κλίμακα γίνεται κάποια αναπαραγωγή. Αυτό δείχνει ότι δεν είναι γνωστές όλες οι λεπτομέρειες της φυσιολογίας των νευρωνικών δικτύων του εγκεφάλου ακόμα και σήμερα.

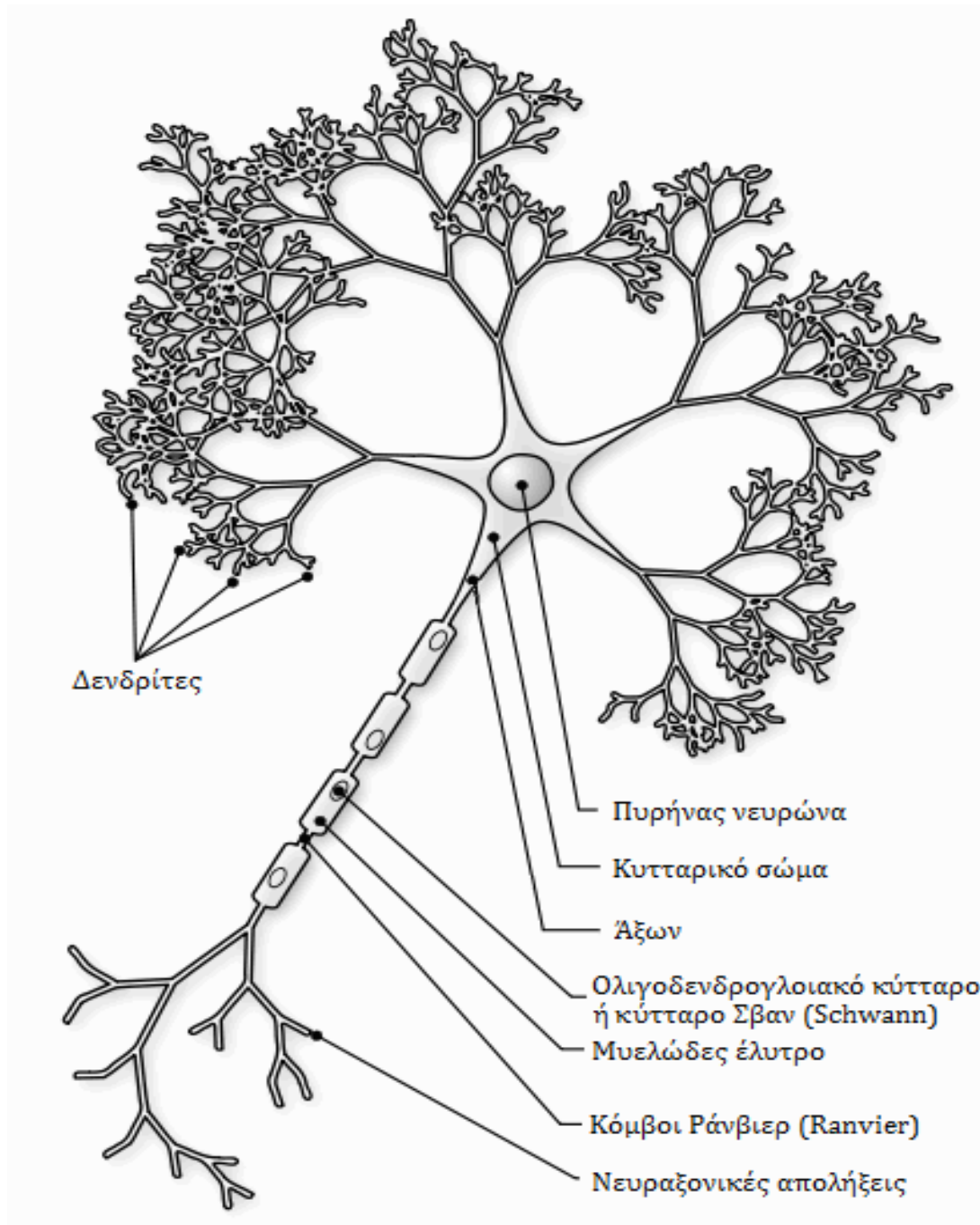
Ο ανθρώπινος εγκέφαλος ενός υγιούς ενήλικα χάνει περί τους 1000 νευρώνες την ημέρα. Μεγαλύτερος αριθμός νευρώνων καταστρέφεται από την ακτινοβολία, το οινόπνευμα κτλ., αλλά βέβαια και από την προχωρημένη ηλικία. Η παύση της αναπαραγωγής των νευρώνων πολύ νωρίς δεν ισχύει και για τις συνάψεις. Το αντίθετο μάλιστα. Καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής ενός οργανισμού οι συνάψεις βρίσκονται σε μία δυναμική ισορροπία, δημιουργούνται καινούργιες και καταστρέφονται παλιές. Η δημιουργία των νέων συνάψεων γίνεται όταν ο εγκέφαλος αποκτά περισσότερες εμπειρίες από το περιβάλλον, μαθαίνει, αναγνωρίζει, κατανοεί κτλ. Μάλιστα, οι σοβαρές

ασθένειες της προχωρημένης ηλικίας προέρχονται κυρίως από την μεγάλη καταστροφή των συνάψεων στα νευρωνικά δίκτυα του κεντρικού νευρικού συστήματος, και όχι τόσο από την καταστροφή των νευρώνων.

Ο ρόλος του νευρώνα σε ένα νευρωνικό δίκτυο είναι να λαμβάνει όλα τα σήματα που έρχονται από άλλους νευρώνες, να τα επεξεργάζεται με κατάλληλο τρόπο και να μεταδίδει περαιτέρω το επεξεργασμένο σήμα σε άλλους νευρώνες, ούτως ώστε το σήμα να διαδίδεται σε ολόκληρο το νευρωνικό δίκτυο. Τα σήματα που επεξεργάζεται ένας νευρώνας είναι ηλεκτρικής μορφής και είναι της τάξης μερικών mVolt.

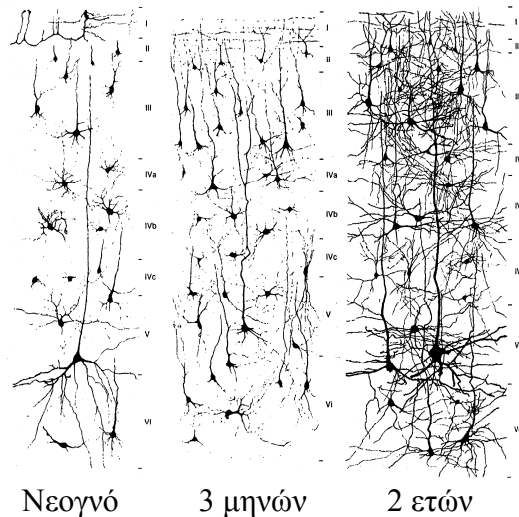
Το σύνολο των νευρώνων στον εγκέφαλο δεν συμμετέχει στην δημιουργία ενός και μόνο δικτύου. Είναι γνωστό ότι υπάρχουν πολλά τμήματα στον εγκέφαλο, όπως είναι ο υποθάλαμος, η παρεγκεφαλίδα, ο ιππόκαμπος και διάφορα άλλα, τα οποία είναι πολύ γνωστά από την πλευρά της ανατομίας. Είναι, γενικά, αποδεκτή σήμερα η θεώρηση ότι διάφορα τμήματα του εγκεφάλου εξειδικεύονται σε διαφορετικές λειτουργίες, όπως είναι πχ. η όραση, η αφή, η ακοή, δηλαδή οι αισθήσεις.

1.2.2 ΔΟΜΗ ΚΑΙ ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΕΝΟΣ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟΥ ΝΕΥΡΩΝΑ



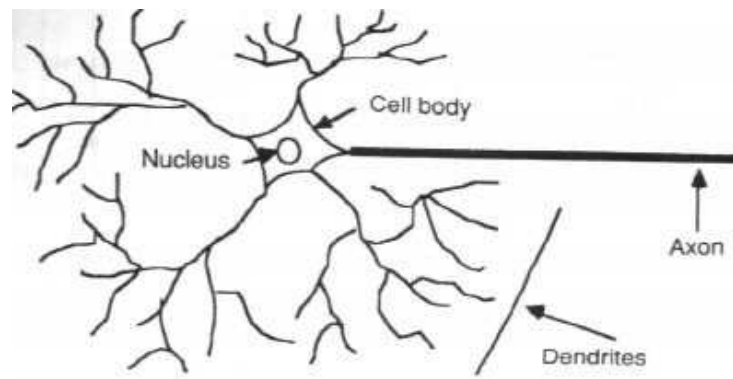
Εικόνα 5. Σχηματική αναπαράσταση νευρώνα και των δομών του.

Όπως προαναφέρθηκε, ο εγκέφαλος αποτελείται κατά κύριο λόγο από ένα ευρύ φάσμα νευρώνων (10.000.000.000 κατά προσέγγιση), οι οποίοι είναι μαζικά διασυνδεδεμένοι με ένα μέσο όρο από διάφορες χιλιάδες διασυνδέσεις ανά νευρώνα.



Εικόνα 6. Ανάπτυξη νευρωνικού δικτύου στα πρώτα χρόνια ζωής.

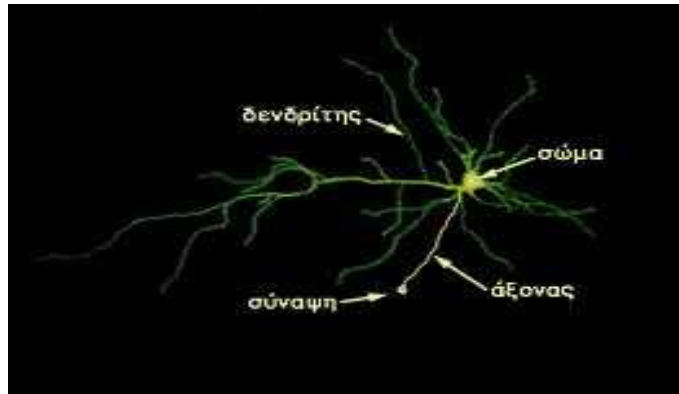
Κάθε νευρώνας είναι ένα εξειδικευμένο κύτταρο το οποίο έχει τη δυνατότητα μετάδοσης ενός ηλεκτροχημικού σήματος. Ο νευρώνας έχει μια διακλαδωτική διάρθρωση εισροών, τους δενδρίτες (dendrites), ένα κυτταρικό σώμα και μια διακλαδωτική δομή εκροών (τον άξονα).



Εικόνα 7. Δομή βιολογικού νευρώνα

Ο κυρίως κορμός του νευρώνα είναι το σώμα, μέσα στο οποίο βρίσκεται ο πυρήνας του κυττάρου. Στον πυρήνα βρίσκεται όλο το γενετικό υλικό του οργανισμού. Εδώ λαμβάνει χώρα η πιο έντονη χημική δράση του κυττάρου για την σύνθεση των ενζύμων, πρωτεϊνών και άλλων μορίων που είναι απαραίτητα για την ζωή του κυττάρου.

Ο άξονας είναι μια μεγάλη επέκταση από το σώμα που εφάπτεται με άλλους νευρώνες. Κάθε νευρώνας έχει έναν μόνο άξονα, ο οποίος μεταδίδει σήματα σε άλλους νευρώνες, δηλαδή αποστέλλει τα εξερχόμενα σήματα. Οι άξονες σε μερικούς νευρώνες είναι καλυμμένοι με μια ουσία, που λέγεται μυελίνη, ενώ άλλοι άξονες είναι τελείως ακάλυπτοι. Η μυελίνη επιτελεί σπουδαίο ρόλο στην ταχύτητα διάδοσης των σημάτων.

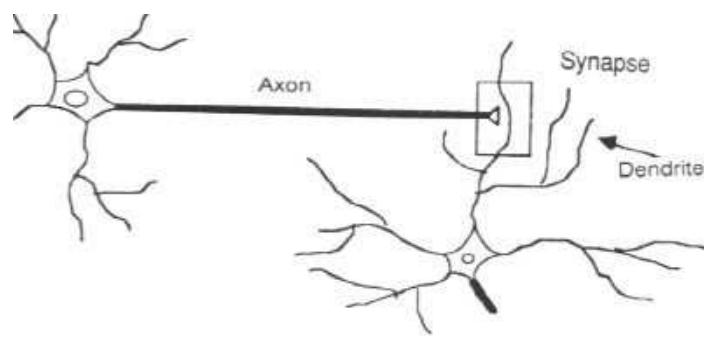


Εικόνα 8. Μορφή βιολογικού νευρώνα

Οι συνδέσεις μεταξύ των νευρώνων, με τους άξονες και τους денδρίτες, γίνονται στις επαφές που ονομάζονται συνάψεις. Η σύναψη έχει πολύ περίπλοκη δομή και επιτελεί επίσης περίπλοκες διεργασίες κατά την μετάδοση του σήματος.

Ο άξονας, όπως είδαμε, συνήθως έχει πάρα πολλές διακλαδώσεις και έτσι στέλνει πολλά σήματα σε διαφορετικά σημεία. Στα σημεία που εφάπτονται οι денδρίτες δημιουργείται μία σύναψη. Η επαφή που δημιουργείται περιέχει ένα κενό, το συναπτικό χάσμα, το οποίο είναι περίπου 20 – 200 nanometers. Στην άκρη κάθε διακλάδωσης σχηματίζεται ένα μικρό εξόγκωμα, το οποίο εκρέει χημικούς μεταβιβαστές οι οποίοι διαπερνούν το συναπτικό χάσμα και έτσι φθάνουν στον άλλο νευρώνα. Μερικοί νευροδιαβιβαστές είναι διεγερτικοί, ενώ άλλοι είναι ανασταλτικοί.¹

Η διαδικασία της μάθησης επιτυγχάνεται διαφοροποιώντας την αποτελεσματικότητα των συνάψεων, ώστε η επιρροή του ενός νευρώνα στον άλλο να μεταβάλλεται.



Εικόνα 9. Σύναψη νευρώνων

¹ Μερικοί νευροδιαβιβαστές είναι πολύ γνωστοί, όπως είναι η ντοπαμίνη (η έλλειψη της οποίας προκαλεί την ασθένεια Parkinson), η σεροτονίνη, η ακετυλοχολίνη (που σχετίζεται με την μνήμη και μάθηση, και η έλλειψη των οποίων προκαλεί την ασθένεια Alzheimer) και άλλοι.

Το μήκος των νευρώνων ποικίλει. Μερικοί έχουν μήκος μερικά μικρόμετρα (μm), άλλοι νευρώνες μπορεί να φθάνουν και το 1 m, ιδίως αυτοί που εκτείνονται στα πόδια. Οι νευρώνες που έχουν ιδιαίτερα μεγάλο μήκος, έχουν πολύ μικρό πάχος, μερικά μικρόμετρα (μm), μόνο.

Κάθε νευρώνας έχει δύο δυνατές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρίσκεται και τις ονομάζουμε *ενεργός* και *μη-ενεργός κατάσταση*. Όταν ο νευρώνας είναι ενεργός λέμε ότι πυροδοτεί, ενώ όταν είναι μη-ενεργός λέμε ότι είναι αδρανής. Ενδιάμεσες καταστάσεις δεν υπάρχουν. Κατά κάποιο τρόπο μπορούμε να πούμε ότι ο νευρώνας αποτελεί ένα δυαδικό στοιχείο, ώστε στο σημείο αυτό να αναγνωρίζουμε μια ομοιότητα με τους ηλεκτρονικούς υπολογιστές. Όταν ο νευρώνας πυροδοτεί, παράγει ένα ηλεκτρικό σήμα-παλμό κατά μήκος του άξονα, το οποίο έχει διάρκεια της τάξης του msec και ένταση της τάξης μερικών mV. Το σήμα αυτό ταξιδεύει μέσα στο νευρωνικό δίκτυο από νευρώνα σε νευρώνα χωρίς να ελαττωθεί καθόλου. Ο μέγιστος ρυθμός παραγωγής των παλμών είναι περίπου 1000 παλμοί ανά sec.

Όλα τα σήματα που καταφθάνουν σε ένα νευρώνα σε μια δεδομένη στιγμή αθροίζονται, δηλαδή αθροίζονται τα ηλεκτρικά δυναμικά τους. Αν το άθροισμα των σημάτων φθάσει ή ξεπεράσει μια δεδομένη τιμή (*κατώφλι*), τότε θεωρείται ότι ο νευρώνας βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση και πυροδοτεί. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να στείλει μέσω του άξονα ένα παλμό. Αν το άθροισμα όμως είναι μικρότερο από την δεδομένη αυτή τιμή, τότε δεν συμβαίνει τίποτα. Ο νευρώνας παραμένει αδρανής. Το δυναμικό αυτό που είναι μικρότερο από το κατώφλι, χάνεται. Η τιμή του κατωφλίου ονομάζεται θ . Έτσι ένας νευρώνας πυροδοτεί μόνο όταν το συνολικό σήμα το οποίο λήφθηκε από τους δενδρίτες, υπερβεί το κατώτατο όριο βολής θ (firing threshold).

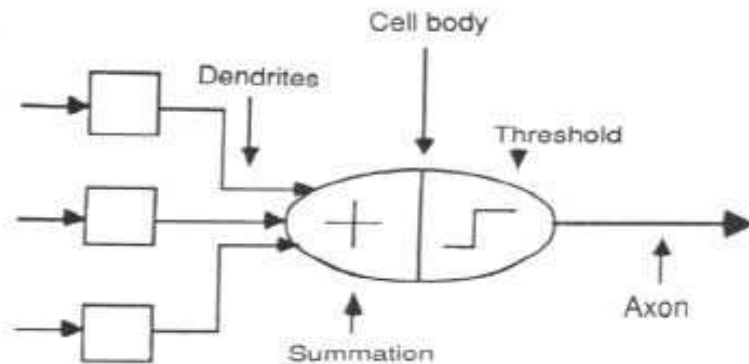
Η ισχύς ενός σήματος που λαμβάνεται από ένα νευρώνα, εξαρτάται από την αποτελεσματικότητα των συνάψεων. Ο Donald Hebb, ένας από τους πιο σημαντικούς ερευνητές στα νευρολογικά συστήματα, ανέδειξε το ζήτημα της μάθησης του βιολογικού νευρωνικού συστήματος και πρότεινε ότι η μάθηση συνιστάται κυρίως στη μεταβολή της ισχύος των συναπτικών συνδέσμων. Ως παράδειγμα τίθεται το πείραμα του Ραβλον για την Κλασική Εξάρτηση.²

² Η κλασική εξάρτηση είναι μια μορφή συνειρμικής μάθησης, η οποία παρουσιάστηκε για πρώτη φορά από τον Ivan Pavlov και περιλαμβάνει την παρουσίαση ενός ουδέτερου ερεθίσματος μαζί με κάποιο σημαντικό ερέθισμα. Ο Pavlov πειραματιζόμενος με σκύλους, παρατήρησε πως ορισμένα ερεθίσματα, όπως ο ήχος των βημάτων του εκτροφέα που πλησίαζε ή ο ήχος ενός κουδουνιού κατά την προσφορά της τροφής ενεργοποιούσε την έκκριση σιέλου, όπως ακριβώς την ενεργοποιούσε η διατροφή. Με την επανάληψη του πειράματος δημιουργήθηκε ένα καινούριο ανακλαστικό. Ο νέος αυτός τρόπος διασύνδεσης μεταξύ δύο ερεθισμάτων έγινε γνωστός ως εξαρτημένο ανακλαστικό (conditioned reflex) και η διαδικασία ονομάστηκε κλασική εξάρτηση και μέσω αυτής επέρχεται σημαντική αλλαγή της συμπεριφοράς. Πρόσφατες έρευνες στη γνωστική επιστήμη και ιδιαίτερα στον τομέα της ασυνείδητης επεξεργασίας πληροφοριών, απέδειξαν περαιτέρω την τεράστια ικανότητα του ανθρώπινου μυαλού να καταλήγει σε απλές συνδιακυμάνσεις εισροών-εκροών, από εξαιρετικά πολύπλοκα ερεθίσματα.

Συμπερασματικά, από ένα τεράστιο αριθμό ιδιαίτερα απλών μονάδων εργασίας, ο εγκέφαλος κατορθώνει την εκτέλεση εξαιρετικά πολύπλοκων καθηκόντων. Παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον το γεγονός ότι τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα έχουν την ικανότητα να επιτύχουν ιδιαίτερα αξιόλογα αποτελέσματα χρησιμοποιώντας ένα όχι και τόσο πολύπλοκο μοντέλο.

1.2.3 ΑΠΟ ΤΟ ΒΙΟΛΟΓΙΚΟ ΣΤΟΝ ΤΕΧΝΗΤΟ ΝΕΥΡΩΝΑ

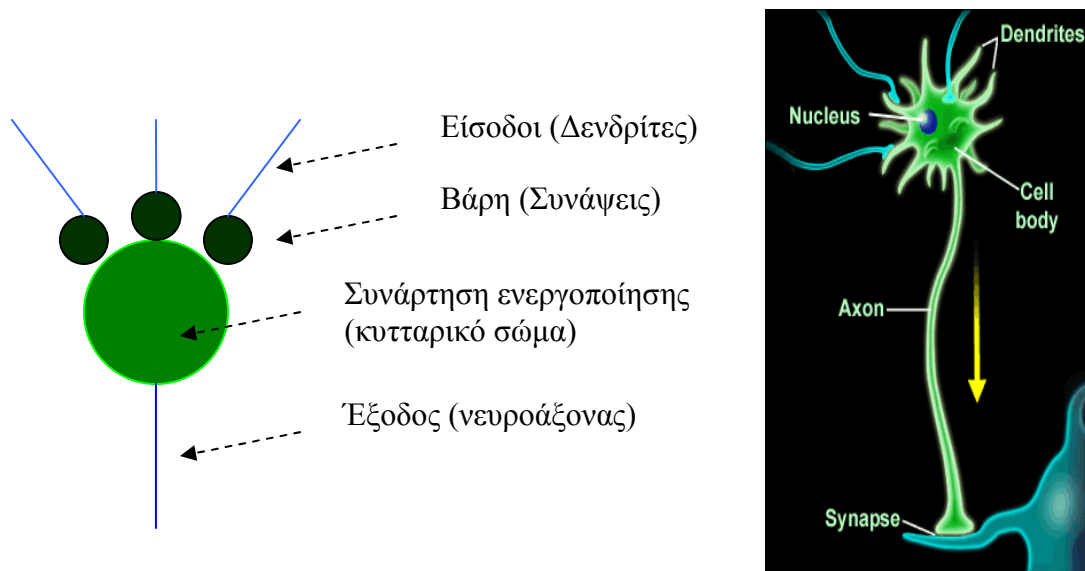
Τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα έχουν μία δομή η οποία εμπνέεται από το πρότυπο του ανθρώπινου εγκεφάλου. Δεν περιέχουν όλες τις λεπτομέρειες της δομής και λειτουργίας του εγκεφάλου, οι οποίες εξάλλου, όπως έχει προαναφερθεί, δεν είναι γνωστές ακόμα και σήμερα. Χρησιμοποιούν μόνο την κεντρική ιδέα της δομής και της λογικής λειτουργίας του, ξεκινώντας από μία συλλογή μονάδων που είναι αντίστοιχες προς τους νευρώνες-κύτταρα, και προσπαθούν να επιτελέσουν τις ανάλογες διεργασίες για τις οποίες έχουν σχεδιασθεί. Τελικά, όμως, τα βιολογικά και τα τεχνητά δίκτυα διαφέρουν πάρα πολύ ως προς την αρχιτεκτονική και τις ιδιότητες τους.



Εικόνα 10. Δομή τεχνητού νευρώνα

Τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα αποτελούνται από έναν αριθμό απλών διασυνδεδεμένων στοιχείων επεξεργασίας τα οποία καλούνται νευρώνες ή κόμβοι. Κάθε κόμβος λαμβάνει ένα σήμα εισόδου που είναι το σύνολο πληροφορίας που καταφθάνει από άλλους κόμβους ή από εξωτερικά ερεθίσματα, το επεξεργάζεται τοπικά μέσω μιας ενεργοποίησης ή μιας συνάρτησης μεταφοράς και παράγει ένα μετασχηματισμένο σήμα εξόδου το οποίο κατευθύνεται προς έναν άλλο εσωτερικό κόμβο ή ένα κόμβο εξόδου. Αν και κάθε μεμονωμένος νευρώνας λειτουργεί μάλλον αργά και όχι εντελώς σωστά, συλλογικά ένα δίκτυο μπορεί να εκτελέσει έναν εκπληκτικό αριθμό στόχων αρκετά αποτελεσματικά (Reilly and Cooper, 1990). Αυτό το χαρακτηριστικό επεξεργασίας πληροφοριών κάνει το ΝΔ μια ισχυρή υπολογιστική μέθοδο ικανή να εκπαιδευθεί και στη συνέχεια να γενικευθεί σε άλλες άγνωστες εφαρμογές.

Η δομή του τεχνητού νευρωνικού δικτύου μιμείται κατά κάποιο τρόπο εκείνη του βιολογικού νευρικού δικτύου, ώστε να εμφανίζει παρόμοιες ιδιότητες. Κατ' αναλογία, επομένως, με ένα δίκτυο νευρώνων εγκεφάλου, ένα τεχνητό δίκτυο αποτελείται από ένα σύνολο τεχνητών νευρώνων που αλληλεπιδρούν, συνδεδεμένοι μεταξύ τους με τις λεγόμενες συνάψεις (synapses). Ο βαθμός αλληλεπίδρασης είναι διαφορετικός για κάθε ζεύγος νευρώνων και καθορίζεται από τα συναπτικά βάρη (synaptic weights). Συγκεκριμένα, καθώς το νευρωνικό δίκτυο αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και μαθαίνει από αυτό, τα συναπτικά βάρη μεταβάλλονται συνεχώς, ενδυναμώνοντας ή αποδυναμώνοντας την ισχύ του κάθε δεσμού. Όλη η εμπειρική γνώση που αποκτά επομένως το νευρωνικό δίκτυο από το περιβάλλον κωδικοποιείται στα συναπτικά βάρη. Αυτά αποτελούν το χαρακτηριστικό εκείνο που δίνει στο δίκτυο την ικανότητα για εξέλιξη και προσαρμογή στο περιβάλλον.



Εικόνα 11. Αντιστοιχία ενός τεχνητού νευρώνα με έναν βιολογικό νευρώνα.

1.3 ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Ένα νευρωνικό δίκτυο χαρακτηρίζεται από:

- ❖ Τα στρώματα διασυνδέσεων μεταξύ των νευρώνων, την αποκαλούμενη αρχιτεκτονική του ΤΝΔ,
- ❖ Τη μέθοδο καθορισμού της τιμής των βαρών στις συνάψεις, που αποκαλείται αλγόριθμος εκπαίδευσης ή εκμάθησης, και
- ❖ Τη συνάρτηση ενεργοποίησης

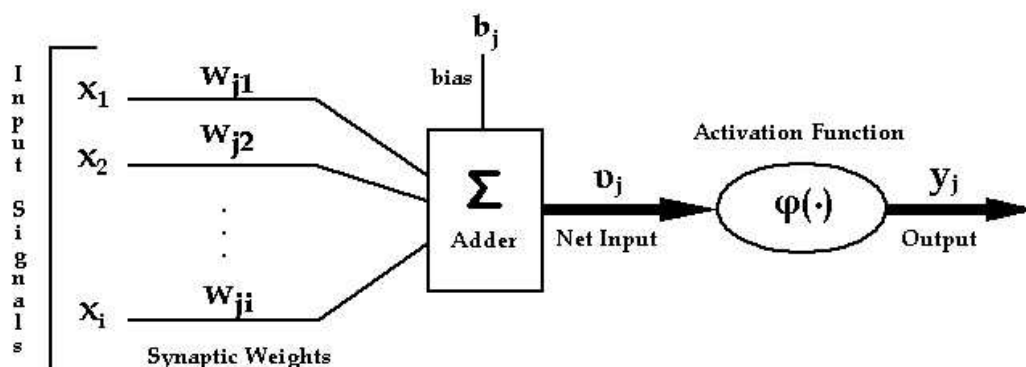
Κάθε νευρωνικό δίκτυο πρέπει να πληροί δυο βασικά χαρακτηριστικά ώστε να καταφέρει να δώσει ενδιαφέροντα αποτελέσματα:

1. *Πλαστικότητα νευρώνων* – Οι νευρώνες πρέπει να έχουν ρυθμιζόμενες παραμέτρους ώστε να διευκολύνεται η διαδικασία της μάθησης.
2. Το δίκτυο πρέπει να αποτελείται από *μεγάλο αριθμό νευρώνων* ώστε να επιτυγχάνεται παραλληλισμός της επεξεργασίας και κατανομή της πληροφορίας.

1.3.1 ΔΟΜΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΝΕΥΡΩΝΑ

Σε αναλογία με το βιολογικό νευρώνα του εγκεφάλου, ο τεχνητός νευρώνας (artificial neuron) είναι η δομική μονάδα του τεχνητού νευρωνικού δικτύου. Σε αυτόν συντελείται όλη η επεξεργασία της πληροφορίας. Κάθε νευρώνας δέχεται πληροφορία, την επεξεργάζεται και δίνει μία τιμή εξόδου. Οι είσοδοί του είναι είτε οι εξοδοί άλλων νευρώνων, είτε το πρωταρχικό σήμα εισόδου του δικτύου.

Υπάρχουν διάφορα είδη νευρώνων. Το είδος που θα επιλεγεί για να δομηθεί ένα συγκεκριμένο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο, εξαρτάται από τη φύση του εκάστοτε προβλήματος που εξετάζουμε. Σε πολλές περιπτώσεις χρησιμοποιείται συνδυασμός διαφορετικών ειδών νευρώνων. Στο παρακάτω σχήμα, παρουσιάζεται το βασικό μοντέλο του νευρώνα που χρησιμοποιείται κατά κόρον σε υλοποιήσεις τεχνητών νευρωνικών δικτύων.



Εικόνα 12. Σχηματική αναπαράσταση μη γραμμικού νευρώνα.

Ένα νευρωνικό δίκτυο δημιουργείται από ένα μεγάλο αριθμό απλών επεξεργαστών, τους νευρώνες. Ο τεχνητός νευρώνας αποτελεί τη στοιχειώδη μονάδα διαχείρισης πληροφοριών του νευρωνικού δικτύου. Τα συστατικά του στοιχεία είναι:

- Ένα σύνολο συνάψεων (ή συνδέσεων) κάθε μια από τις οποίες χαρακτηρίζεται από ένα βάρος. Κάθε νευρώνας συνδέεται απευθείας με τους άλλους νευρώνες διαμέσου των συνάψεων.

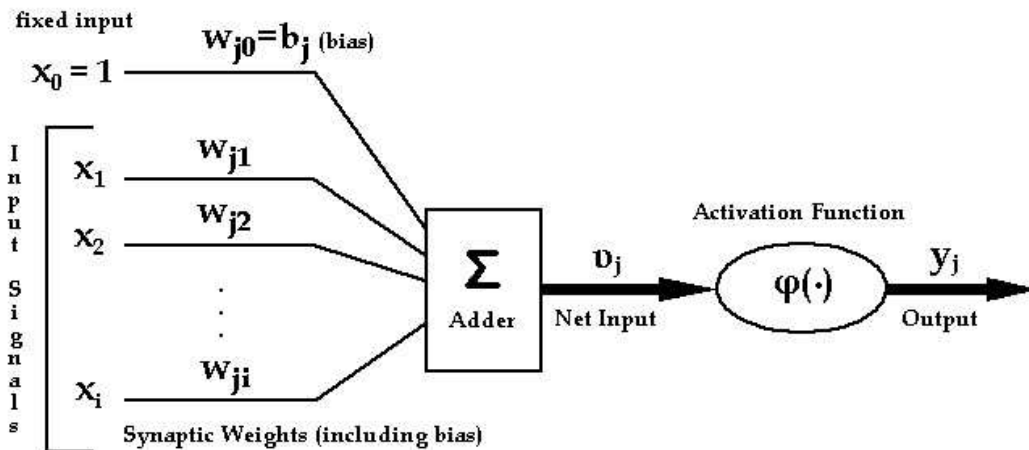
Συγκεκριμένα, το σήμα P_{kj} (η είσοδος της σύναψης j η οποία συνδέεται με τον νευρώνα k) πολλαπλασιάζεται με το συναπτικό βάρος

W_{kj} . Τα βάρη αναλογούν σε πληροφορία, που χρησιμοποιείται από το δίκτυο για την επίλυση του εκάστοτε προβλήματος. Σε αντίθεση με τις συνάψεις του εγκεφάλου, ένα συναπτικό βάρος τεχνητού νευρωνικού δικτύου μπορεί να δέχεται και αρνητικές τιμές.

- Ένας αθροιστής (adder) ο οποίος αθροίζει τα εισερχόμενα σήματα, αφού έχουν τροποποιηθεί από το βάρος της αντίστοιχης σύναψης.
- Μια συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) της οποίας ρόλος είναι ο προσδιορισμός του μεγέθους της τιμής εξόδου του νευρώνα. Συνήθως το εύρος των τιμών εξόδου του νευρώνα περιορίζεται στο διάστημα $[0, 1]$ ή στο $[-1, 1]$. Η συνάρτηση ενεργοποίησης είναι μια συνάρτηση των δεδομένων εισόδου που έχει λάβει ο νευρώνας και αποτελεί την εσωτερική του κατάσταση.
- Η πόλωση του νευρώνα (bias) η οποία δεν υπάρχει πάντα. Σκοπός της είναι η αύξηση ή η μείωση της εισόδου της συνάρτησης ενεργοποίησης.

1.3.2 ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΕΝΑΣ ΝΕΥΡΩΝΑΣ?

Μπορούμε να διακρίνουμε τρεις βασικές φάσεις λειτουργίας ενός νευρώνα. Κατά την πρώτη φάση, κάθε είσοδος πολλαπλασιάζεται με το συναπτικό βάρος που της αντιστοιχεί. Στη δεύτερη φάση οι σταθμισμένες πλέον εισοδοί και ένας εξωτερικά εφαρμοζόμενος παράγοντας, η μεροληψία ή πόλωση ή κατώφλι (*bias, threshold*), αθροίζονται και δίνουν το τοπικό πεδίο (*net input, induced local field, activation potential*). Για λόγους απλούστευσης, η μεροληψία μπορεί να θεωρηθεί ως μία επιπλέον είσοδος, με συναπτικό βάρος ίσο προς την τιμή του και πάγια τιμή εισόδου ίση προς τη μονάδα. Στην περίπτωση αυτή ο νευρώνας παίρνει τη μορφή που φαίνεται στο Σχήμα 2 που ακολουθεί.



Εικόνα 13. Εναλλακτική σχηματική αναπαράσταση μη γραμμικού νευρώνα

Ως εδώ, ο νευρώνας δεν κάνει τίποτα άλλο από το να δίνει έναν γραμμικό συνδυασμό των εισόδων, με συντελεστές τα προσαρμοζόμενα συναπτικά βάρη. Αν η λειτουργία του λοιπόν σταματούσε εδώ, τότε θα είχαμε έναν γραμμικό νευρώνα, που θα έδινε ένα γραμμικό προσαρμοζόμενο φίλτρο (*linear adaptive filter*). Ένα τεχνητό νευρωνικό δίκτυο που αποτελείται από τέτοιους νευρώνες θα είναι γραμμικό.

Στην τρίτη φάση, εφαρμόζεται η συνάρτηση ενεργοποίησης ή συνάρτηση μεταφοράς (*activation function* ή *squashing function*) $g(\cdot)$ η οποία δίνει την έξοδο του νευρώνα συναρτήσει του δυναμικού ενεργοποίησης αυτού.

Με μαθηματικούς όρους, ένας νευρώνας περιγράφεται από τις παρακάτω εξισώσεις:

$$U = \sum_{i=1}^d w_i x_i$$

$$u = U - \theta \text{ αν χρησιμοποιείται κατώφλι ή}$$

$$u = U - b \text{ αν χρησιμοποιείται πόλωση}$$

$$o = g(u)$$

όπου x_i είναι τα σήματα εισόδου και τα w_i είναι τα βάρη του νευρώνα με $i = 1, 2, \dots, d$. Το U είναι η έξοδος του αθροιστή (ονομάζεται και net input), θ είναι το κατώφλι, b είναι η πόλωση, U είναι το δυναμικό ενεργοποίησης (activation potential), $g(\cdot)$ είναι η συνάρτηση ενεργοποίησης (activation function) και o είναι το σήμα εξόδου του νευρώνα, που αναφέρεται και σαν πραγματική έξοδος.

Το κατώφλι θ είναι εξωτερική παράμετρος του μοντέλου του νευρώνα την οποία μπορούμε να τη θεωρήσουμε ως το βάρος w_0 μιας σύναψης η οποία

είναι συνδεδεμένη σε σταθερή είσοδο -1 . Αντίστοιχα η πόλωση (bias) μπορεί να θεωρηθεί ως ένα βάρος $w_0 = b$ μιας σύναψης η οποία είναι συνδεδεμένη σε σταθερή είσοδο $+1$. Οι δύο αυτοί συμβολισμοί είναι απολύτως ισοδύναμοι. Στη διεθνή βιβλιογραφία και στις διάφορες επιστημονικές εργασίες δεν έχει επικρατήσει κάποιος από τους δύο συμβολισμούς (κατώφλι ή πόλωση). Έτσι οι παραπάνω εξισώσεις διαμορφώνονται τώρα ως εξής:

$$u = \sum_{i=0}^d x_i w_i$$

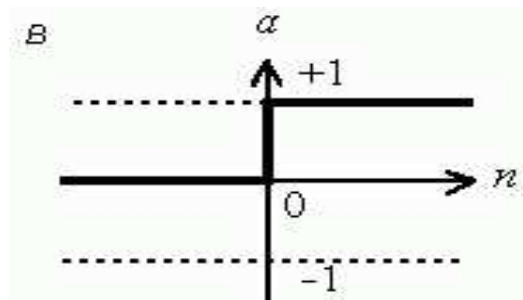
Όπου $w_0 = b$ και $x_0 = +1$ όταν χρησιμοποιείται πόλωση και
 $w_0 = \theta$ και $x_0 = -1$ όταν χρησιμοποιείται κατώφλι.

Οι κυριότερες συναρτήσεις ενεργοποίησης (ή μεταφοράς) είναι:

❖ Η βηματική συνάρτηση ή συνάρτηση κατωφλίου (hard limit):

$$g(u) = \begin{cases} 0, & u < 0 \\ 1, & u \geq 0 \end{cases}, \text{ ή οποιαδήποτε άλλη βηματική συνάρτηση.}$$

Η βηματική συνάρτηση δεν θεωρείται χρήσιμη ως συνάρτηση ενεργοποίησης στα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, καθώς έχει το βασικό μειονέκτημα να είναι η παράγωγός της ίση με μηδέν. Έτσι, προέκυψε η ανάγκη συναρτήσεων ενεργοποίησης που η γραφική τους παράσταση τους να μοιάζει με τη βηματική, αλλά ταυτόχρονα να είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες σε όλο το πεδίο ορισμού τους. (Τέτοια συνάρτηση είναι και η *σιγμοειδής*.)



Εικόνα 14. Βηματική συνάρτηση για τιμή κατωφλίου ίση προς μηδέν.

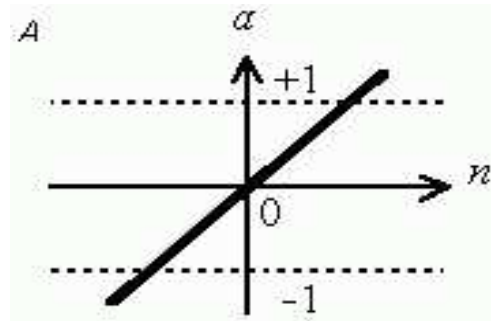
Αν το ενδιάμεσο αποτέλεσμα ήταν μικρότερο μιας τιμής κατωφλίου, η έξοδος του νευρώνα ήταν ίση προς 0 (αδρανής νευρώνας), αλλιώς ήταν ίση προς 1 (ενεργοποιημένος νευρώνας).

Το παραπάνω μοντέλο αναφέρεται συχνά ως μοντέλο McCulloch-Pitts προς τιμή αυτών που το πρότειναν.

❖ Η γραμμική συνάρτηση (linear):

$$g(u) = u$$

ή οποιαδήποτε άλλη γραμμική ή κατά τμήματα γραμμική συνάρτηση.



Εικόνα 15. Η γραφική αναπαράσταση της γραμμικής συνάρτησης.

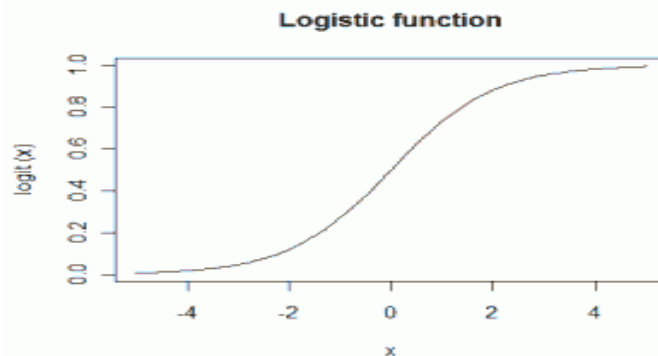
Η γραμμική συνάρτηση ενεργοποίησης χρησιμοποιείται κυρίως σε νευρώνες που βρίσκονται στο επίπεδο εξόδου ενός Νευρωνικού Δικτύου.

❖ Η σιγμοειδής συνάρτηση (sigmoid):

Η σιγμοειδής είναι η πιο συνηθισμένη μορφή συνάρτησης ενεργοποίησης (στην ουσία πρόκειται για μία οικογένεια συναρτήσεων) που χρησιμοποιείται στην κατασκευή Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων. Από τα διάφορα παραδείγματα σιγμοειδών συναρτήσεων αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι η λογιστική συνάρτηση ή απεικόνιση, και η υπερβολική εφαπτομένη. Οι συναρτήσεις αυτές τείνουν σε μορφή στη βηματική συνάρτηση, αλλά όπως προαναφέρθηκε είναι συνεχείς και παραγωγίσιμες.

1. Η λογιστική συνάρτηση (logistic) έχει τη μορφή:

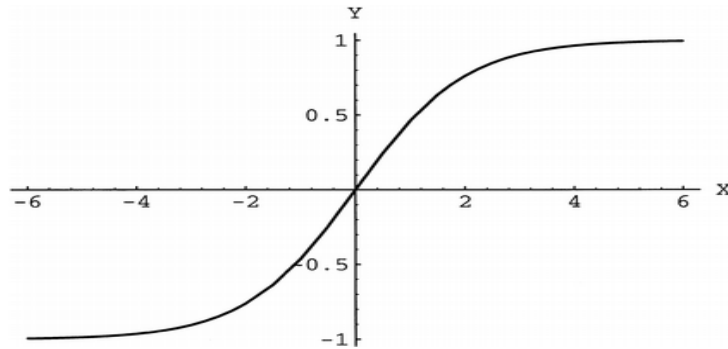
$$g(u) = \frac{1}{1 + e^{-au}}$$



Εικόνα 16. Η γραφική αναπαράσταση της λογιστικής συνάρτησης.

2. Η υπερβολική εφαπτομένη (hyperbolic tangent) έχει τη μορφή:

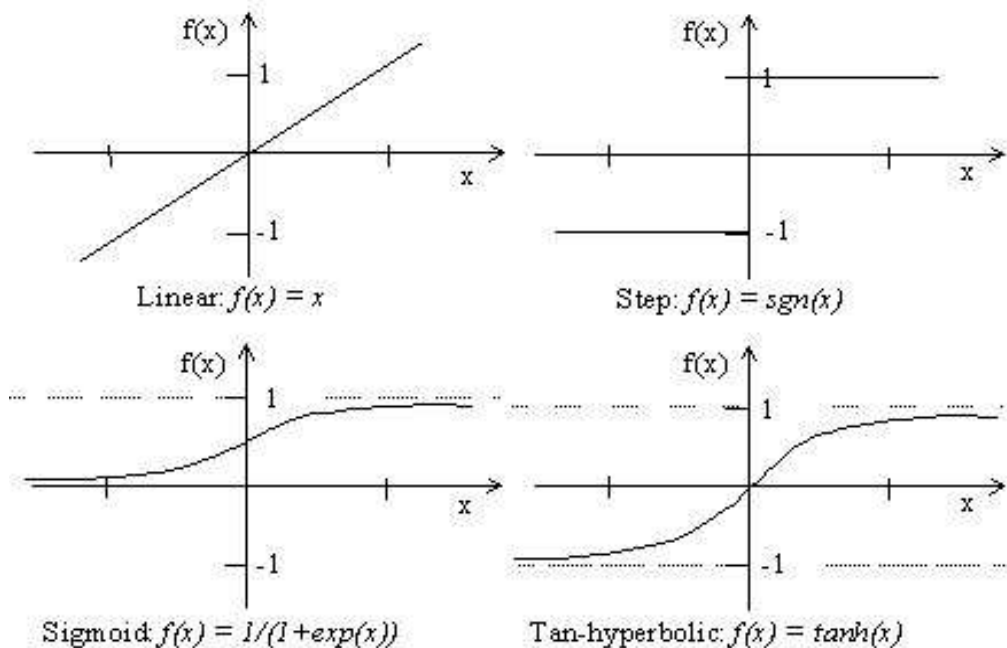
$$g(u) = \tanh(au) = \frac{e^{au} - e^{-au}}{e^{au} + e^{-au}}$$



Εικόνα 17. Η γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης υπερβολικής εφαπτομένης.

Η παράμετρος a καθορίζει την κλίση της σιγμοειδούς συνάρτησης και καλείται παράμετρος κλίσης. Όσο το a τείνει στο άπειρο, η λογιστική συνάρτηση τείνει προς τη βηματική συνάρτηση και έχουμε και πάλι το μοντέλο McCulloch-Pitts.

Παρακάτω παριστάνονται συνοπτικά οι γραφικές παραστάσεις των παραπάνω συναρτήσεων ενεργοποίησης, ώστε να γίνει φανερή και η βελτιστοποίηση που έχει επιτευχθεί.



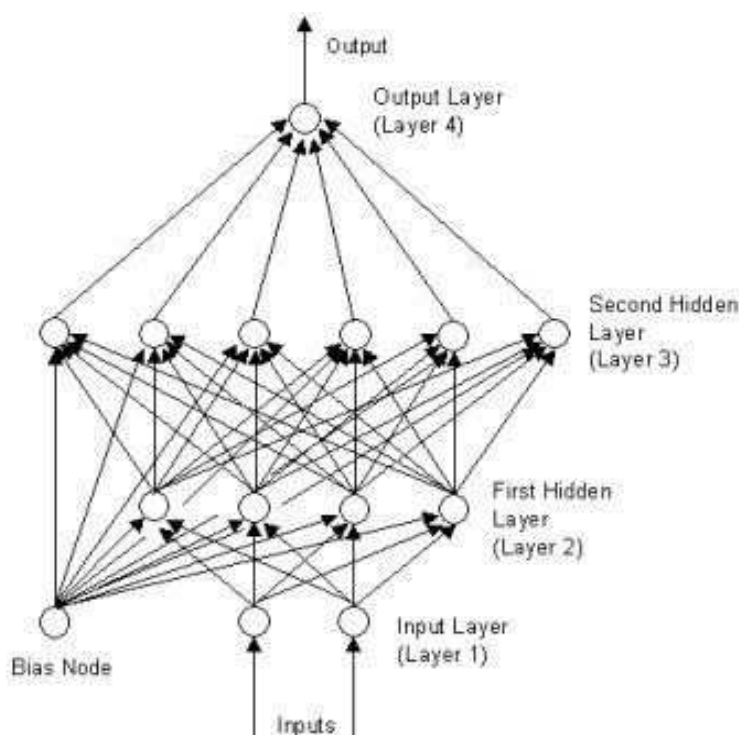
Εικόνα 17. Σύγκριση γραφικών αναπαράστασεων συναρτήσεων ενεργοποίησης

Η χρήση των ‘μαλακών’ συναρτήσεων καταφλιού, όπως η σιγμοειδής συνάρτηση ή η υπερβολική εφαιπτομένη, δημιουργεί ομαλές επιφάνειες χωρίς απότομες μεταβολές στην τιμή o της εξόδου του δικτύου. [ΤΝΔ - Διαμανταράς, 2007]

Γενικά, οι σχέσεις εισόδου και εξόδου ενός νευρωνικού δικτύου μπορούν να παριστάνονται ως σχέσεις πινάκων, πράγμα που βοηθάει πάρα πολύ στην μαθηματική τους ανάλυση η οποία επί των πλείστων γίνεται με την βοήθεια υπολογιστικών συστημάτων.

1.3.3 ΠΩΣ ΛΕΙΤΟΥΡΓΕΙ ΕΝΑ ΔΙΚΤΥΟ ΝΕΥΡΩΝΩΝ?

Από τη φύση τους τα νευρωνικά δίκτυα δεν λειτουργούν σειριακά, αλλά με τρόπο που μοιάζει πιο πολύ σε παράλληλο τύπο λειτουργίας, διότι μία εργασία μοιράζεται στα διάφορα τμήματα του δικτύου, σε όλους τους επί μέρους νευρώνες. Έτσι λέμε ότι τα νευρωνικά δίκτυα είναι «συστήματα παράλληλα καταναμημένων διεργασιών» (“parallel distributed processing”).



Εικόνα 18. Τυπική δομή ΤΝΔ με 2 κρυμμένα στρώματα νευρώνων

Οι μονάδες των τεχνητών νευρωνικών δικτύων είναι πολύ απλές, οπότε και οι λειτουργίες που επιτελούν είναι ιδιαίτερα απλές. Ουσιαστικά οι μονάδες των τεχνητών νευρωνικών δικτύων ξέρουν μόνο να αθροίζουν τα σήματα

εισόδου και να τροποποιούν τα βάρη των διασυνδέσεων. Τα δίκτυα εκπαιδεύονται ώστε να αναγνωρίζουν και να επιτελούν μία συγκεκριμένη διεργασία. Η εκπαίδευση των ΤΝΔ συνίσταται στο να αλλάζουν οι τιμές των βαρών τους.

Οι νευρώνες λειτουργούν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο και δεν χρειάζονται συγχρονισμό. Αυτό δίνει στα νευρωνικά δίκτυα την *ευρωστία και ανοχή στα σφάλματα*. Έτσι, αν ένα μικρό τμήμα του δικτύου χαλάσει, το υπόλοιπο δίκτυο συνεχίζει να λειτουργεί, έστω και με ένα μικρό σφάλμα.³

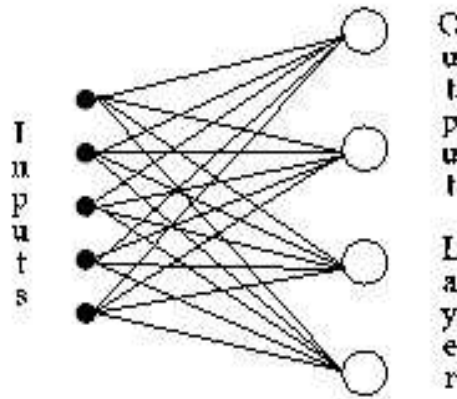
Το χαρακτηριστικό της ανοχής του σφάλματος στα νευρωνικά δίκτυα είναι μια ιδέα που δεν την συναντάμε σε άλλες συνήθεις υπολογιστικές τεχνικές.⁴ Μερικές φορές το στοιχείο αυτό είναι επιθυμητό και λύνει το πρόβλημα μας σχετικά εύκολα, ενώ με άλλες μεθόδους μπορεί να είναι πολύ χρονοβόρο. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν δεν μας ενδιαφέρει η απόλυτη ακρίβεια, αλλά μια προσεγγιστική λύση μπορεί να αρκεί για αυτό που θέλουμε. Αυτό όμως δεν συμβαίνει πάντα και δεν μπορούμε να πούμε ότι με τα νευρωνικά δίκτυα μπορούμε να λύσουμε όλα τα προβλήματα που μέχρι σήμερα είναι άλυτα. Σε μερικά προβλήματα η χρήση τους δεν συνίσταται καθόλου.

³ Δεν μπορούμε να προσδιορίσουμε ένα γενικό ποσοστό ανοχής σφάλματος, αλλά οι συνηθισμένες τιμές σε διάφορα προβλήματα που παρουσιάζονται για την μεγαλύτερη δυνατή ανοχή είναι της τάξης του 10–15%. Όλα όμως εξαρτώνται από το συγκεκριμένο πρόβλημα και φυσικά υπάρχουν διακυμάνσεις στα νούμερα αυτά.

⁴ Είναι γνωστό ότι σε όλα τα παραπάνω οι υπολογιστές δουλεύουν τελείως διαφορετικά. Αν, λ.χ. από λάθος σε ένα υπολογιστικό πρόγραμμα ζητήσουμε να γίνει μια διαίρεση μιας ποσότητας με το μηδενός, τότε ο υπολογιστής σταματά αμέσως την εκτέλεση του προγράμματος και δίνει μήνυμα σφάλματος.

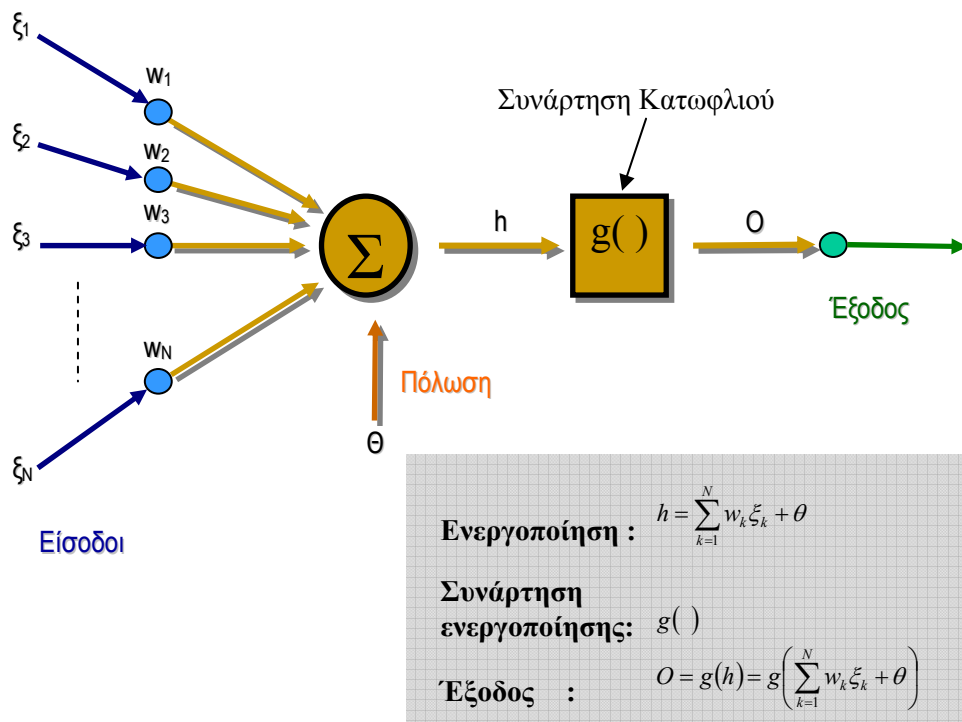
1.4 Ο ΑΙΣΘΗΤΗΡΑΣ (PERCEPTRON)

Το μοντέλο του αισθητήρα (Perceptron) προτάθηκε το 1958 από τον Rosenblatt, ο οποίος ήταν ψυχολόγος. Ο Αισθητήρας αποτελεί την απλούστερη μορφή Νευρωνικού Δικτύου, αφού απαρτίζεται από δύο επίπεδα: το επίπεδο εισόδου και το επίπεδο εξόδου.



Εικόνα 19. Αισθητήρας με 6 κόμβους εισόδου και 4 νευρώνες εξόδου.

Στο επίπεδο εισόδου δεν γίνεται καμία επεξεργασία της πληροφορίας. Οι διάφοροι υπολογισμοί του δικτύου λαμβάνουν χώρα στο επίπεδο εξόδου, που αποτελείται από νευρώνες τύπου McCulloch-Pitts. Προκειμένου να εκπαιδευτεί ένα τέτοιο Νευρωνικό Δίκτυο χρησιμοποιείται ο κανόνας του Rosenblatt [Haykin, 1999].



Εικόνα 20. Perceptron αποτελούμενο από ένα νευρώνα.

Η συνάρτηση μεταφοράς ή ενεργοποίησης απεικονίζει το διάνυσμα εισόδου $\xi = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N]$ στην έξοδο \mathbf{o} . Δηλαδή

$$\mathbf{o} = g \left(\sum_{i=1}^N w_i \xi_i + \theta \right)$$

Η συνάρτηση ενεργοποίησης τροφοδοτείται από τη διέγερση u και παίρνει μια από τις παρακάτω μορφές:

$$g(u) = \begin{cases} 1, u > 0 \\ 0, u \leq 0 \end{cases} \quad (1) \quad \text{ή} \quad g(u) = \begin{cases} 1, u > 0 \\ -1, u \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

Οπότε η έξοδος \mathbf{o} είναι ένας δυαδικός αριθμός είτε με την κλασσική μορφή (0/1) είτε με τη λεγόμενη διπολική μορφή (-1/1).

Οι παράμετροι που ρυθμίζουν ουσιαστικά τη συμπεριφορά του νευρώνα είναι το διάνυσμα των συναπτικών βαρών $w = [w_1, w_2, \dots, w_N]^T$ και η πόλωση θ .

Έστω ότι χρησιμοποιούμε την παραπάνω δυαδική συνάρτηση (1).

Η εξίσωση $u = \sum_{i=1}^N w_i \xi_i - \theta = 0$ αντιστοιχεί σε ένα υπερεπίπεδο του \mathbb{R}^n

που χωρίζει το χώρο \mathbb{R}^n σε 2 μέρη: στο ένα μέρος έχουμε $\mathbf{o}=1$ και εκεί βρίσκονται εκείνα τα σημεία ξ για τα οποία $u>0$, στο άλλο μέρος έχουμε $\mathbf{o}=0$ και εκεί βρίσκονται εκείνα τα σημεία ξ για τα οποία $u<0$.

Τα σημεία ξ που αντιστοιχούν σε $u=0$ βρίσκονται πάνω στο υπερεπίπεδο.

Ένας απλός αισθητήρας επιλύει κυρίως προβλήματα ταξινόμησης.

Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα του δικτύου αυτού είναι ότι υπάρχει ένας σαφής αλγόριθμος βάση του οποίου μπορεί να εκπαιδευτεί το δίκτυο ώστε να δώσει σωστά αποτελέσματα. Τα δίκτυα Perceptron εκπαιδεύονται με επίβλεψη. Οι Minsky-Papert έδειξαν το 1969 ότι το πρώτο αυτό πρότυπο έχει πολλούς περιορισμούς. Ειδικότερα έδειξαν ότι τα προβλήματα ταξινόμησης που μπορεί να λύσει ο αισθητήρας είναι εκείνα τα οποία είναι γραμμικά διαχωρίσιμα και μόνο.

Προκύπτει επομένως το ερώτημα, κατά πόσο θα μπορούσε το αρχικό μοντέλο του αισθητήρα να τροποποιηθεί, ώστε να μπορεί να επιλύει και μη γραμμικά διαχωρίσιμα προβλήματα. Πράγματι, προσθέτοντας απλά ένα ή περισσότερα επίπεδα νευρώνων μεταξύ του επιπέδου εισόδου και αυτό της εξόδου, ο τροποποιημένος αισθητήρας που προκύπτει μπορεί πλέον να επιλύσει και μη γραμμικά διαχωριζόμενα προβλήματα.

1.4.1 Ο Αλγόριθμος Σύγκλισης του Perceptron (για ένα Perceptron με d εισόδους και 1 υπολογιστικό νευρώνα) [Λύκας, 2008, ΕΑΠ]

Ο σκοπός ενός τέτοιου Perceptron είναι να ταξινομήσει σωστά το σύνολο των εισόδων-προτύπων x_1, x_2, \dots, x_d σε μία από τις δύο κλάσεις C_1 και C_2 . Ο κανόνας απόφασης για την ταξινόμηση είναι να αναθέτει το σημείο που αναπαριστούν τα x_1, x_2, \dots, x_d στην κλάση C_1 , εάν η έξοδος ο του Perceptron είναι $+1$ και στην κλάση C_2 εάν η έξοδος ο του Perceptron είναι -1 .

Μεταβλητές και Παράμετροι

$\mathbf{x}(k)$ = ο πίνακας εισόδων διάστασης $(d+1) * 1$

$$[1, x_1(k), x_2(k), \dots, x_d(k)]^T$$

$\mathbf{w}(k)$ = ο πίνακας των βαρών διάστασης $(d+1) * 1$

$$[w_0(k), w_1(k), w_2(k), \dots, w_d(k)]^T$$

όπου $w_0(k)$ = η πόλωση (bias) και $x_0 = +1$ η σταθερή είσοδος.

$\mathbf{o}(k)$ = η πραγματική έξοδος (actual response)

$\mathbf{t}(k)$ = η επιθυμητή έξοδος (desired response) ή έξοδος στόχος (target output)

k = ο αριθμός της επανάληψης (χρόνος)

η = η παράμετρος μάθησης ή ρυθμός μάθησης (learning rate parameter), θετική σταθερά < 1

Βήμα 1: Αρχικοποίηση

- Θέτουμε τον αριθμό επανάληψης $k = 0$.
- Θέτουμε τις τιμές των βαρών ίσες με τυχαίες τιμές που παράγουμε με μία γεννήτρια ψευδοτυχαίων αριθμών: $\mathbf{w}(0)$ = τυχαίο διάνυσμα.
- Δίνουμε τιμή στην παράμετρο μάθησης η (συνήθως $0 < \eta < 1$).

Βήμα 2: Ενεργοποίηση

Στο χρόνο (αριθμό επανάληψης) k , ενεργοποιούμε το Perceptron εφαρμόζοντας το διάνυσμα εισόδου $\mathbf{x}(k)$.

Βήμα 3: Υπολογισμός πραγματικής απόκρισης

Υπολογίζουμε την πραγματική απόκριση (έξοδο) του Perceptron:

$$u(k) = w^T(k) \cdot x(k) \quad \text{και} \quad o(k) = \text{sgn}(u(k)) = \begin{cases} +1, & u(k) \geq 0 \\ -1, & u(k) < 0 \end{cases}$$

όπου $\text{sgn}(\cdot)$ είναι η συνάρτηση προσήμου (sign function).

Βήμα 4: Προσαρμογή διανύσματος βαρών

Προσαρμόζουμε τα βάρη του Perceptron σύμφωνα με τον κανόνα:

$$w(k+1) = w(k) + \eta \cdot [t(k) - o(k)] \cdot x(k)$$

όπου

$$t(k) = \begin{cases} +1, & x(k) \in C_1 \\ -1, & x(k) \in C_2 \end{cases}$$

Βήμα 5:

Αυξάνουμε τον αριθμό επανάληψης k κατά μια μονάδα και επιστρέφουμε στο βήμα 2.

Αποδεικνύεται ότι το μοντέλο Perceptron εφοδιασμένο με τον παραπάνω αλγόριθμο εκπαίδευσης συγκλίνει σε μια λύση η οποία ταξινομεί σωστά όλα τα πρότυπα αρκεί να υπάρχει μια τέτοια λύση, δηλαδή αρκεί το πρόβλημα να είναι γραμμικά διαχωρίσιμο.

Θεώρημα:

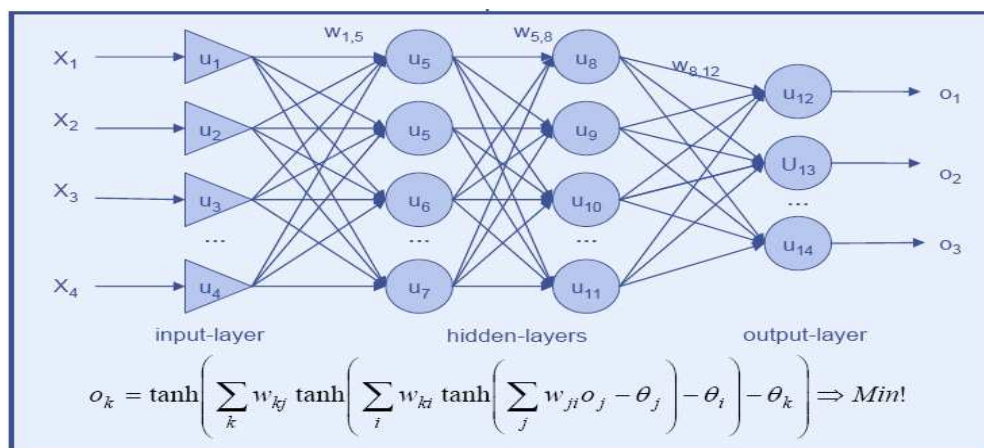
Αν το πρόβλημα είναι γραμμικά διαχωρίσιμο, τότε ο Κανόνας του Αισθητήρα συγκλίνει σε πεπερασμένο αριθμό επαναλήψεων.

1.5 ΒΑΣΙΚΕΣ ΑΡΧΙΤΕΚΤΟΝΙΚΕΣ ΔΟΜΕΣ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΝΕΥΡΩΝΙΚΩΝ ΔΙΚΤΥΩΝ

Μολονότι ένα μόνο του νευρώνιο μπορεί να εκτελέσει μερικές απλές λειτουργίες που αφορούν την ανίχνευση απλών προτύπων, η υπολογιστική δύναμη των νευρώνων ανοίγεται μπροστά μας μόνο όταν αυτά συνδεθούν σε δίκτυο. Όλα τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα είναι οργανωμένα σε *στοιβάδες*. Κάθε στοιβάδα αποτελείται από έναν αριθμό νευρώνων και όλες οι στοιβάδες συνδέονται μεταξύ τους με κάποια βάρη. Υπάρχουν τρεις τύποι στοιβάδων και ο κάθε τύπος επιτελεί διαφορετικές λειτουργίες.

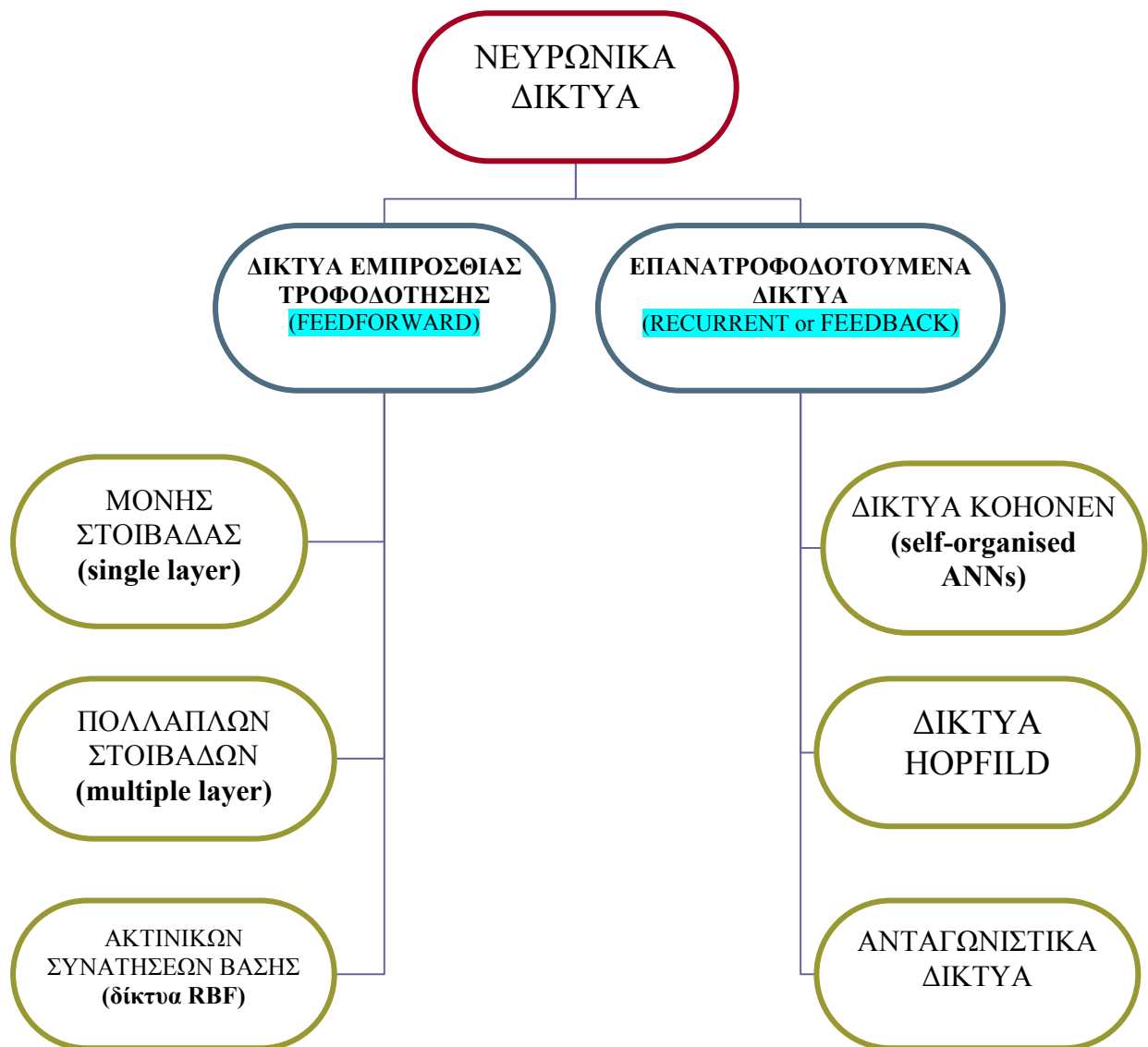
- Στοιβάδα εισόδου (input layer)
- Κρυφές στοιβάδες (hidden layers)
- Στοιβάδα εξόδου (output layer)

Ο τρόπος σύνδεσης των στοιβάδων, ο αριθμός των κρυφών στοιβάδων, ο αριθμός και ο τύπος των νευρώνων σε κάθε στοιβάδα καθορίζουν την αρχιτεκτονική του δικτύου και κατ' επέκταση τον τρόπο που θα γίνει ο εκάστοτε υπολογισμός. Ο τρόπος με τον οποίο δομούνται οι νευρώνες ενός Νευρωνικού Δικτύου, έχει άμεση σχέση με τον αλγόριθμο μάθησης που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου.



Εικόνα 21. ΤΝΔ οργανωμένο σε στοιβάδες

Η σημαντικότερη κατηγοριοποίηση των νευρωνικών δικτύων βασίζεται στη δομή τους, δηλαδή στον τρόπο σύνδεσης και διάταξης των μονάδων επεξεργασίας των δικτύων. Με βάση αυτό το χαρακτηριστικό τα νευρωνικά δίκτυα μπορούν να κατηγοριοποιηθούν σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα:



Εικόνα 22. Κατηγοριοποίηση νευρωνικών δικτύων με βάση τη δομή τους.

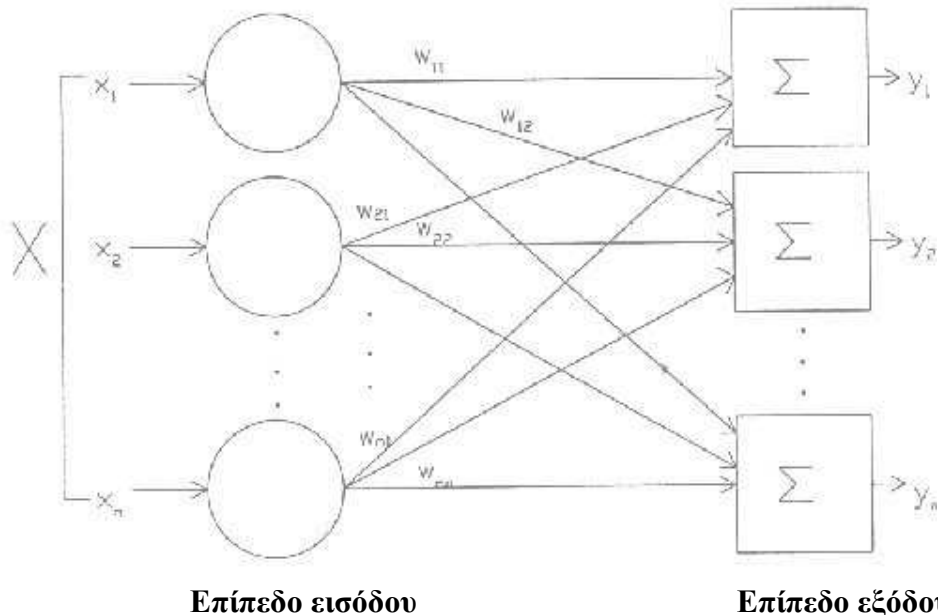
Πολλά διαφορετικά μοντέλα νευρωνικών δικτύων έχουν προταθεί από την δεκαετία του 80' και μετά. Ίσως αυτά με την μεγαλύτερη επίδραση να είναι τα μοντέλα Multi Layer Perceptrons (MLP), τα δίκτυα του Hopfield και τα δίκτυα του Kohonen.

Παρακάτω γίνεται μια συνοπτική αναφορά στα σημαντικότερα μοντέλα Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων και δίνεται έμφαση στα MLPs που είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα ΤΝΔ.

➤ Δίκτυα εμπρόςθια τροφοδότσης ενός επιπέδου:

Σε ένα τέτοιο δίκτυο, οι νευρώνες είναι οργανωμένοι σε μορφή επιπέδων. Η ροή του σήματος είναι από το επίπεδο εισόδου (input layer), που αποτελείται από κόμβους, προς το επίπεδο εξόδου (output layer), που

αποτελείται από υπολογιστικούς νευρώνες ὄχι αντίστροφα. Οι νευρώνες εισόδου απλά «μεταφέρουν» το σήμα στο επίπεδο εξόδου χωρίς να κάνουν καμία επεξεργασία, ενώ οι νευρώνες εξόδου είναι υπολογιστικοί νευρώνες που ακολουθούν συνήθως το μοντέλο McCulloch-Pitts. Γενικά, στα περισσότερα ΤΝΔ ενός στρώματος οι κόμβοι εισόδου είναι συνδεδεμένοι με όλους τους κόμβους εξόδου, αλλά δεν είναι συνδεδεμένοι μεταξύ τους.⁵ Ένα παράδειγμα τέτοιου δικτύου φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 23. Δίκτυο εμπρόσθια τροφοδότησης ενός επιπέδου.

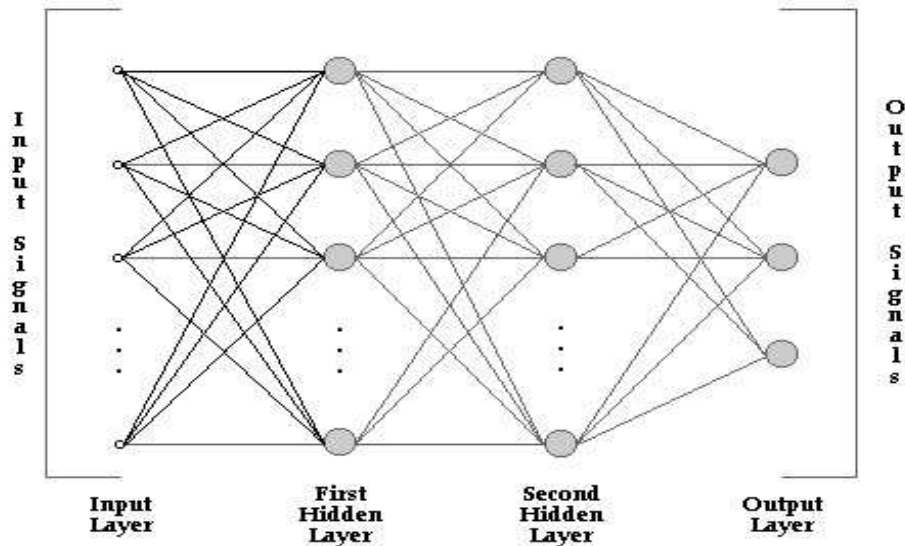
➤ Δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης πολλαπλών επιπέδων (MultiLayer Perceptrons – MLP):

Γενικά, μεγαλύτερα και περισσότερα πολύπλοκα δίκτυα προσφέρουν μεγαλύτερη ικανότητα υπολογισμών. Τα MLPs αποτελούν μια ιδιαίτερα χρήσιμη γενίκευση του απλού Perceptron και αποτελούνται από:

- Το επίπεδο εισόδου
- Τα κρυφά στρώματα
- Το στρώμα εξόδου

Και εδώ οι νευρώνες εισόδου απλά «μεταφέρουν» το σήμα στο επόμενο επίπεδο χωρίς να κάνουν καμία επεξεργασία, ενώ οι κρυφοί νευρώνες και οι νευρώνες εξόδου είναι υπολογιστικοί νευρώνες που ακολουθούν το μοντέλο του νευρώνα. Η ροή του σήματος είναι από το επίπεδο εισόδου προς το επίπεδο εξόδου μέσω των κρυφών επιπέδων. Τυπικά, οι νευρώνες σε κάθε επίπεδο έχουν σαν εισόδους τα σήματα εξόδου του προηγούμενου μόνο επιπέδου και τροφοδοτούν αποκλειστικά τους νευρώνες του επόμενου επιπέδου.

⁵ Στην πραγματικότητα στα τεχνητά και βιολογικά δίκτυα πολλές από τις συνδέσεις τους μπορεί να μην υπάρχουν, όμως φαίνονται όλες οι για λόγους γενικότητας.

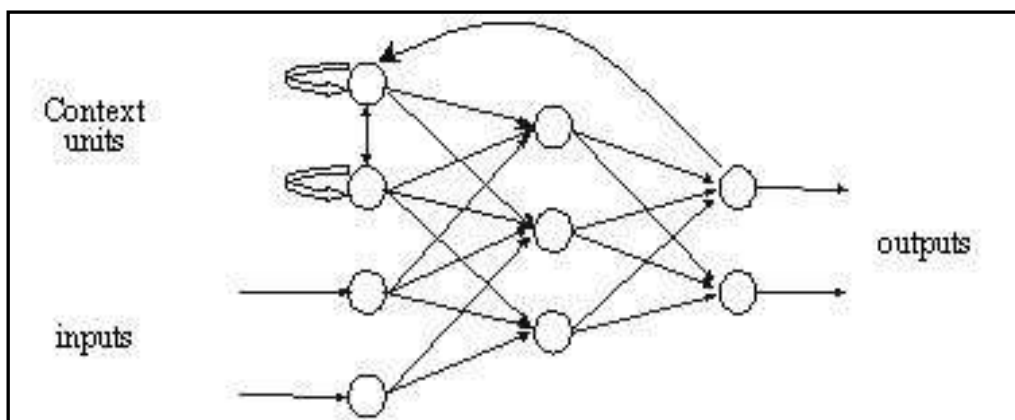


Εικόνα 24. Γενική αρχιτεκτονική MLP με δυο κρυφά στρώματα νευρώνων.

Σε σύγκριση με ένα απλό δίκτυο Perceptron, τα MLPs όπου οι νευρώνες χρησιμοποιούν τη βηματική συνάρτηση μπορούν να υλοποιήσουν συναρτήσεις που δεν μπορεί να υλοποιήσει το απλό δίκτυο του Αισθητήρα. Ωστόσο η χρήση της βηματικής συνάρτησης δεν προτιμάται, αφού οι περισσότεροι κανόνες εκπαίδευσης βασίζονται σε μεθόδους βελτιστοποίησης οι οποίες χρησιμοποιούν παραγώγους, ενώ η βηματική συνάρτηση δεν είναι παραγωγίσιμη. Η τεχνική αυτή δυσκολεύεται με τη χρήση των σιγμοειδών συναρτήσεων.

➤ **Αναδρομικά Δίκτυα:**

Σε αυτή την κατηγορία δικτύων έχουμε την ύπαρξη τουλάχιστον μιας ανάδρασης. Δηλαδή η έξοδος κάθε νευρώνα του δικτύου ανατροφοδοτεί την είσοδο των άλλων νευρώνων του δικτύου και σε μερικές περιπτώσεις ακόμα και την δική του είσοδο.



Εικόνα 24. Μοντέλο Τεχνητού «μερικώς διασυνδεδεμένου» Νευρωνικού Δικτύου με ανατροφοδότηση.

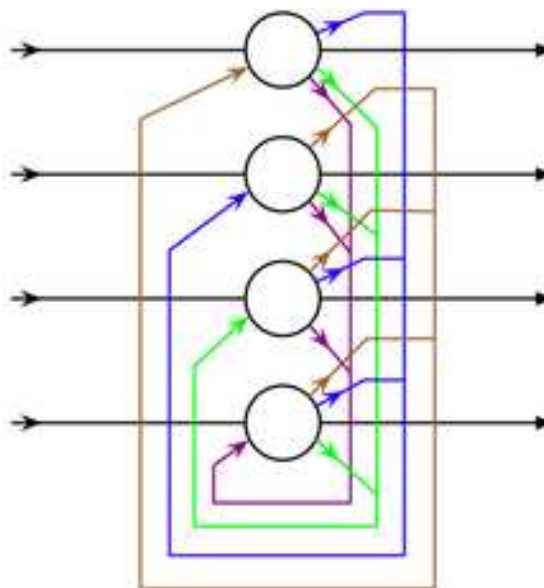
➤ Δίκτυα Hopfield:

Ο Hopfield (1982) προτείνει ένα επαναλαμβανόμενο νευρωνικό δίκτυο που λειτουργεί ως 'συνειρμική' μνήμη. Μια τέτοια μνήμη μπορεί να υπενθυμίζει ένα παράδειγμα από μια μερική ή διαστρεβλωμένη έκδοση.

Συνειρμική μνήμη ονομάζουμε την ιδιότητα που έχει ένα σύστημα στην περίπτωση που ανακαλεί μόνο ένα τμήμα μιας μνήμης, να μπορεί να αναπαράγει ολόκληρη την μνήμη ή τουλάχιστον ένα μεγάλο τμήμα της.

Τα Δίκτυα Hopfield χρησιμοποιούνται σε προβλήματα βελτιστοποίησης. Τα δίκτυα αυτά έχουν το χαρακτηριστικό ότι χρησιμοποιούν μηχανισμό με ανάδραση, δηλαδή οι νευρώνες τροφοδοτούνται από τις εξόδους όλων των υπολοίπων νευρώνων ακόμα και από τη δική τους έξοδο. Οι εξωτερικές εισοδοί εφαρμόζονται ως αρχικές συνθήκες στην αναδρομή. Στα δίκτυα αυτά η έννοια των επιπέδων νευρώνων είναι διαφορετική από ότι έχουμε δει μέχρι τώρα. Πιο συγκεκριμένα, τα δίκτυα τύπου Hopfield αποτελούνται από ένα μόνο επίπεδο (πλέγμα) με πολλούς νευρώνες και κάθε νευρώνας έχει τιμή εξόδου 1 ή -1. Δεν υπάρχει χωριστό επίπεδο εισόδου ή εξόδου. Κάθε νευρώνας δέχεται σήματα από το περιβάλλον και έχει εξόδους προς αυτό. Κάθε νευρώνας είναι μία μονάδα όπως ο στοιχειώδης αισθητήρας, με τις ίδιες ιδιότητες. Οι μονάδες του δικτύου έχουν πλήρη συνδεσμολογία, δηλαδή κάθε μονάδα συνδέεται με κάθε άλλη μονάδα στο σύστημα. Έτσι για ένα δίκτυο με n μονάδες αυτό σημαίνει ότι θα έχουμε $n(n-1)$ συνδέσεις.

Το δίκτυο Hopfield έχει ως χαρακτηριστικό του ότι οι νευρώνες του συνεχώς αναπροσαρμόζονται. Εδώ τα συναπτικά βάρη δεν ορίζονται από κάποιο αναδρομικό κανόνα, αλλά παίρνουν μια απ' ευθείας τιμή. Αυτό αποτελεί την εκπαίδευση του δικτύου. Πρόκειται, δηλαδή, για απλή ανάθεση τιμών στα συναπτικά βάρη.

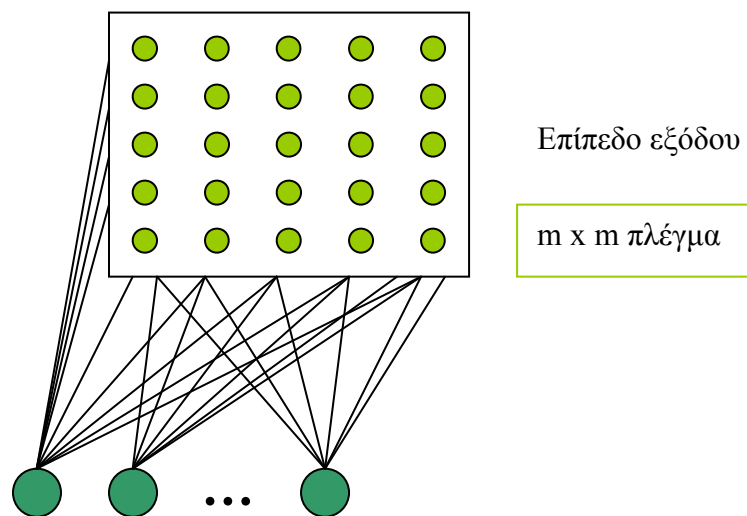


Εικόνα 25. Δίκτυο Hopfield με τέσσερις νευρώνες

➤ Δίκτυα Kohonen:

Αυτό το μοντέλο νευρωνικών δικτύων προτάθηκε το 1984 από τον Kohonen και υποκινείται από την ιδιότητα της τοπογραφικής οργάνωσης του ανθρώπινου εγκεφάλου. Τα δίκτυα Kohonen εκπαιδεύονται ώστε να μπορούν να αντιστοιχούν ένα σήμα που παρουσιάζεται στην είσοδο τους με ένα συγκεκριμένο νευρώνα στο επίπεδο εξόδου. Είναι δίκτυα στα οποία η εκπαίδευση γίνεται χωρίς επίβλεψη, δηλαδή δεν υπάρχουν εξαρχής δεδομένοι στόχοι που να δίνονται μαζί με τα πρότυπα στην είσοδο. Με την εκπαίδευση, ένα δίκτυο Kohonen μαθαίνει να ξεχωρίζει πρότυπα τα οποία διαφέρουν μεταξύ τους.

Τα χαρακτηριστικά του δικτύου Kohonen είναι ότι μπορεί να ταξινομεί διανύσματα με την βοήθεια ενός αλγόριθμου αυτόνομης (χωρίς επίβλεψη) μάθησης. Το δίκτυο οργανώνει τα βάρη του w με τέτοιο τρόπο ώστε να αναγνωρίζει όποια κανονικότητα μπορεί να υπάρχει στα διανύσματα εισόδου. Λέμε ότι το δίκτυο αυτό παρουσιάζει χαρακτηριστικά *αυτο-οργάνωσης*. Το δίκτυο Kohonen αποτελείται από δύο επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο, όπως συνήθως, είναι το επίπεδο εισόδου. Το δεύτερο επίπεδο έχει το ιδιαίτερο χαρακτηριστικό ότι είναι οργανωμένο σε μορφή πλέγματος, που μπορεί να έχει οποιαδήποτε διάσταση. Η θέση των νευρώνων στο πλέγμα έχει ιδιαίτερη σημασία. Τα δύο αυτά επίπεδα έχουν πλήρη συνδεσμολογία, δηλαδή κάθε μονάδα εισόδου συνδέεται με όλες τις μονάδες του επιπέδου εξόδου.



Εικόνα 26. Μορφή Δικτύου Kohonen

1.6 ΕΚΠΑΙΔΕΥΣΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Το κύριο χαρακτηριστικό των νευρωνικών δικτύων είναι η *εγγενής ικανότητα μάθησης*. Ως μάθηση ορίζεται η διαδικασία αυτοπροσαρμογής του συστήματος με στόχο να βελτιστοποιήσει κάποιο κριτήριο καταλληλότητας για την επίλυση ενός συγκεκριμένου προβλήματος. [Διαμανταράς, ΤΝΔ, 2007, Κλειδάριθμος]

Η μάθηση επιτυγχάνεται μέσω της *εκπαίδευσης*, μίας επαναληπτικής διαδικασίας σταδιακής προσαρμογής των παραμέτρων του δικτύου, δηλαδή των βαρών και της πόλωσης του, σε τιμές κατάλληλες ώστε να επιλυεται το εκάστοτε πρόβλημα, υπό δεδομένο σφάλμα. Το είδος της μάθησης καθορίζεται από τον τρόπο με τον οποίο πραγματοποιούνται οι αλλαγές των παραμέτρων. Ουσιαστικά, η διαδικασία της εκπαίδευσης ελαχιστοποιεί τη συνάρτηση κόστους, που συνήθως είναι το μέσο τετραγωνικό σφάλμα του νευρωνικού δικτύου.

Αφού ένα δίκτυο εκπαιδευτεί, οι παράμετροί του συνήθως σταθεροποιούνται στις κατάλληλες τιμές και από εκεί κι έπειτα είναι σε λειτουργική κατάσταση. Το ζητούμενο είναι όταν το δίκτυο βρίσκεται στη λειτουργική του φάση να χαρακτηρίζεται από μία *ικανότητα γενίκευσης*: αυτό σημαίνει πως δίνει ορθές εξόδους για εισόδους καινούριες και διαφορετικές από αυτές με τις οποίες εκπαιδεύτηκε.

Η ικανότητα μάθησης και αυτοπροσαρμογής είναι από τα βασικότερα χαρακτηριστικά της ευφυΐας.

Επιγραμματικά η διαδικασία εκμάθησης του νευρωνικού δικτύου είναι η ακόλουθη:

1. Παρουσιάζουμε ένα καινούριο παράδειγμα στο νευρωνικό μας δίκτυο.
2. Το δίκτυο υπολογίζει, βάσει των τιμών του παραδείγματος, μια τιμή στην έξοδο του (πρόκειται ουσιαστικά για κάποια πιθανότητα).
3. Η έξοδος του δικτύου συγκρίνεται με την επιθυμητή έξοδο όπως αυτή φαίνεται από το τρέχων παράδειγμα. Υπολογίζεται το σφάλμα.
4. Τα βάρη των νευρώνων τροποποιούνται ώστε να μειωθεί το σφάλμα.
5. Η διαδικασία αυτή συνεχίζεται μέχρι το συνολικό σφάλμα να μειωθεί τόσο ώστε να μπορεί να γίνει αποδεκτό.

Η εκπαίδευση των δικτύων επιτυγχάνεται με την χρήση κάποιων αλγορίθμων που καλούνται *αλγόριθμοι εκπαίδευσης ή μάθησης (training or learning algorithms)*. Υπάρχουν, βέβαια, πολλοί αλγόριθμοι που η εφαρμογή τους έχει στόχο την προσαρμογή των τιμών των βαρών ενός Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου.

Όλες οι μέθοδοι μάθησης μπορούν να καταταχθούν σε τρεις κατηγορίες : τη μάθηση με επίβλεψη (supervised learning), την ενισχυτική μάθηση (reinforced learning) και τη μάθηση χωρίς επίβλεψη (unsupervised learning).

➤ Μάθηση με επίβλεψη

Η μάθηση αυτή είναι μια διαδικασία η οποία συνδυάζει έναν εξωτερικό εκπαιδευτή και τη συνολική ή γενικευμένη πληροφορία. Κάποιες από τις μεθόδους οι οποίες συγκαταλέγονται σε αυτή την κατηγορία είναι η μάθηση με διόρθωση σφάλματος, η στοχαστική μάθηση κ.α.. Για να πραγματοποιηθεί μάθηση με επίβλεψη πρέπει πριν αρχίσει η διαδικασία της εκπαίδευσης να είναι διαθέσιμο ένα σύνολο με πρότυπα εκπαίδευσης και για κάθε πρότυπο να γνωρίζουμε την επιθυμητή απόκριση του δικτύου. Εδώ έγκειται και η συμβολή του «δασκάλου», ο οποίος πρέπει να χαρακτηρίσει όλα τα πρότυπα εισόδου.

Η μάθηση με επίβλεψη χωρίζεται σε δύο ακόμα κατηγορίες: στη δομική (structural) και στην προσωρινή (temporal) εκμάθηση. Οι αλγόριθμοι οι οποίοι βρίσκονται στην πρώτη κατηγορία, χρησιμοποιούνται για την εύρεση της βέλτιστης σχέσης μεταξύ εισόδων και εξόδων για κάθε ξεχωριστό ζευγάρι προτύπων. Παραδείγματα της δομικής εκμάθησης αποτελούν η αναγνώριση και η κατηγοριοποίηση προτύπων, ενώ παραδείγματα της προσωρινής εκμάθησης η πρόβλεψη και ο έλεγχος.

➤ Ενισχυτική Μάθηση

Η ενισχυτική εκπαίδευση στηρίζεται στο νόμο του Thorndike, ο οποίος παραφρασμένος λέει: *«εάν μια ενέργεια ενός συστήματος μάθησης ακολουθείται από μια ικανοποιητική κατάσταση ή συμπεριφορά, τότε η τάση του συστήματος αυτού να παράγει τη συγκεκριμένη ενέργεια ενισχύεται. Διαφορετικά, η τάση του συστήματος να παράγει την ενέργεια αυτή εξασθενεί».*

Σε αυτό τον τύπο εκπαίδευσης, το ΤΝΔ αντί να τροφοδοτείται με επιθυμητές αποκρίσεις, τροφοδοτείται με ένα *ενισχυτικό σήμα*, το οποίο είναι ουσιαστικά ένας δείκτης συμπεριφοράς της προκύπτουσας απόκρισης. Αυτό ανατροφοδοτείται στο δίκτυο επιβραβεύοντας ή τιμωρώντας τις ορθές και τις λανθασμένες συμπεριφορές αντίστοιχα, έως ότου οδηγηθεί το σύστημα στην επιθυμητή συμπεριφορά.

Η ενισχυτική εκπαίδευση λειτουργεί, συνοπτικά, ως εξής:

- Το ΤΝΔ υπολογίζει την τρέχουσα απόκριση με τις παρούσες τιμές των βαρών.
- Το σύστημα αξιολογεί την απόκριση και τροφοδοτείται στο δίκτυο το ενισχυτικό σήμα.

- Τα βάρη ανανεώνονται με βάση το ενισχυτικό σήμα, αυξάνοντας ή μειώνοντας τις τιμές τους, ανάλογα με την καλή ή κακή συμπεριφορά τους αντίστοιχα.
- Το ΤΝΔ αναζητά εκείνα τα βάρη, που προκαλούν μη αρνητικά ενισχυτικά σήματα.

Η διαφορά ενισχυτικής και επιβλεπόμενης εκπαίδευσης είναι ότι στην ενισχυτική εκπαίδευση το σύστημα βελτιώνεται χρησιμοποιώντας ένα κριτήριο συμπεριφοράς, οι τιμές του οποίου δίνονται από το περιβάλλον, ενώ στην επιβλεπόμενη το κριτήριο αυτό καθορίζεται εσωτερικά με βάση τις επιθυμητές αποκρίσεις.

➤ Μάθηση χωρίς επίβλεψη

Οι αλγόριθμοι της εν λόγω μάθησης αναφέρονται ως αυτό-οργανώμενοι (self-organized) και είναι διαδικασίες οι οποίες δεν απαιτούν να είναι παρών ένας «εξωτερικός» δάσκαλος ή επιβλέπων. Βασίζονται, μάλιστα, μόνο σε τοπική πληροφορία καθ' όλη τη διάρκεια της εκπαίδευσης του Τεχνητού Νευρωνικού Δικτύου. Οι συγκεκριμένοι αλγόριθμοι οργανώνουν τα δεδομένα και ανακαλύπτουν τις σημαντικές συλλογικές ιδιότητες. Για παράδειγμα, αλγόριθμοι εκπαίδευσης χωρίς επίβλεψη είναι ο αλγόριθμος Hebbian, ο διαφορικός αλγόριθμος Hebbian και ο Min-Max αλγόριθμος.

Από τις τρεις παραπάνω γενικές μεθοδολογίες εκπαίδευσης αυτές που χρησιμοποιούνται περισσότερο είναι η επιβλεπόμενη και η μη-επιβλεπόμενη μάθηση ενώ η ενισχυτική μάθηση χρησιμοποιείται σπάνια.

Κατά κύριο λόγο οι περισσότερες διαδικασίες εκπαίδευσης είναι off line. Ως “*off line εκπαίδευση*” ορίζεται η διαδικασία κατά την οποία χρησιμοποιείται όλο το δείγμα των προτύπων για την τροποποίηση των τιμών των βαρών, πριν της τελικής εφαρμογής του δικτύου. Οι αλγόριθμοι εκπαίδευσης off line έχουν την απαίτηση να βρίσκονται στην εκπαίδευση του δικτύου παρόντα όλα τα πρότυπα. Το γεγονός αυτό αποκλείει την πιθανότητα εισαγωγής νέων πληροφοριών μέσω νέων προτύπων. Βέβαια, υπάρχουν και Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα τα οποία δεν αποκλείουν την εισαγωγή νέας πληροφορίας, μετά την τελική τους μοντελοποίηση. Αν παρουσιαστεί ανάγκη εισαγωγής νέου προτύπου στο δίκτυο, μπορεί να γίνει απευθείας χωρίς τον κίνδυνο να χαθεί κανένα μέρος της αρχικής πληροφορίας. Το πλεονέκτημα των δικτύων που χρησιμοποιούν off line διαδικασίες εκπαίδευσης επικεντρώνεται κυρίως στη δυνατότητα να δίνουν καλύτερες λύσεις σε δύσκολα προβλήματα.

1.6.1 ΜΕΘΟΔΟΣ ΟΠΙΣΘΟΔΡΟΜΗΣΗΣ ΤΟΥ ΛΑΘΟΥΣ

Τα δίκτυα εμπρόσθιας τροφοδότησης πολλών επιπέδων (Multi-Layer Perceptrons – MLPs) έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία στην επίλυση δύσκολων και ποικίλων προβλημάτων. Τα MLPs συνήθως εκπαιδεύονται με έναν επιβλεπόμενο τρόπο και με τη χρήση ενός πολύ δημοφιλούς αλγορίθμου, τον Αλγόριθμο Πίσω Διάδοσης του Λάθους (Error Back Propagation Algorithm). Ο αλγόριθμος αυτός βασίζεται στη διαδικασία εκπαίδευσης του απλού νευρώνα με ελαχιστοποίηση σφάλματος με χρήση της τεχνικής της πιο απότομης καθόδου (steepest descent).

Η διαδικασία της πίσω διάδοσης του λάθους για την εκπαίδευση ενός MLP αποτελείται από δυο περάσματα διαμέσου των διαφόρων επιπέδων του δικτύου: ένα πέρασμα προς τα εμπρός (*forward pass*) και ένα πέρασμα προς τα πίσω (*backward pass*).

- Στο *εμπρός πέρασμα* ένα διάνυσμα εισόδου εφαρμόζεται στους νευρώνες εισόδου του δικτύου και η επίδραση του διαδίδεται μέσα στο δίκτυο από το ένα επίπεδο στο επόμενο και με κατεύθυνση από το επίπεδο εισόδου προς το επίπεδο εξόδου. Τελικά ένα σύνολο από εξόδους παράγεται ως η πραγματική απόκριση του δικτύου. Συγκρίνουμε τις τιμές της τελικής εξόδου με το επιθυμητό αποτέλεσμα και βρίσκουμε το σφάλμα για κάθε μία από αυτές. Κατά τη διάρκεια του εμπρός περάσματος τα βάρη του δικτύου παραμένουν σταθερά.
- Κατά τη διάρκεια της *πίσω διάδοσης* τα βάρη προσαρμόζονται σύμφωνα με τον κανόνα διόρθωσης του σφάλματος που παράγεται από το εμπρός πέρασμα. Πιο συγκεκριμένα, η πραγματική απόκριση του δικτύου αφαιρείται από την επιθυμητή απόκριση για την παραγωγή ενός σήματος λάθους, που διαδίδεται προς τα πίσω στο δίκτυο, αντίθετα από την κατεύθυνση των συνδέσεων (με κατεύθυνση από το επίπεδο εξόδου προς το επίπεδο εισόδου), από το οποίο προκύπτει και το όνομα «πίσω διάδοσης του λάθους». Τα συναπτικά βάρη προσαρμόζονται έτσι ώστε να κάνουν την πραγματική απόκριση του δικτύου να πλησιάσει την επιθυμητή απόκριση. [ΤΝΔ – Δρ. Ευστράτιος, Φ. Γεωργόπουλος – Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]

Η ανάπτυξη του αλγορίθμου πίσω διάδοσης αποτελεί ένα σταθμό στα Νευρωνικά Δίκτυα γιατί παρέχει μια υπολογιστικά αποδοτική μέθοδο για την εκπαίδευση MLPs.

Έστω, λοιπόν, ένας πολυεπίπεδος αισθητήρας με ένα ή περισσότερα κρυφά επίπεδα, m τιμές εξόδου, m_0 νευρώνες στο επίπεδο εξόδου και έστω ότι οι νευρώνες αυτοί λειτουργούν με κάποια παραγωγίσιμη συνάρτηση ενεργοποίησης. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι για να εκπαιδεύσουμε το δίκτυο αυτό έχουμε στη διάθεσή μας ένα σύνολο N παραδειγμάτων « εισόδων-επιθυμητών εξόδων», δηλαδή ένα σύνολο της μορφής:

$$\{\vec{x}(i), \vec{d}(i) : i = 1, 2, \dots, n\}$$

όπου $\vec{x}(i) = (x_1(i), x_2(i), \dots, x_m(i))^T$ το διάνυσμα των τιμών εισόδου,

$\vec{d}(i)$ το διάνυσμα των επιθυμητών εξόδων για το δεδομένο παράδειγμα i .

Το σφάλμα στην έξοδο του j -οστού νευρώνα του επιπέδου εξόδου κατά το n -οστό βήμα της επανάληψης του αλγορίθμου εκπαίδευσης δίνεται από τη σχέση:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \quad \text{με} \quad \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} = -1$$

Τότε η στιγμιαία τιμή συνάρτησης ενέργειας σφάλματος (error energy) για το σύνολο των νευρώνων του επιπέδου εξόδου δίνεται από τον τύπο:

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n e_j^2(n) \quad \text{με} \quad \frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} = e_j(n)$$

Και η μέση τιμή της $E(n)$ για το σύνολο των N παραδειγμάτων είναι:

$$E_{av} = \overline{E(n)} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N E(n)$$

Η $\overline{E(n)}$ είναι συνάρτηση όλων των συναπτικών βαρών και των μεροληψιών αυτών. Επομένως για το σύνολο των N αυτών παραδειγμάτων η $\overline{E(n)}$ αποτελεί μια συνάρτηση κόστους, δηλαδή μετρά το πόσο καλά έχει εκπαιδευτεί το δίκτυο βάση του συνόλου αυτού.

Η βασική ιδέα του αλγορίθμου οπισθοδιάδοσης είναι να προσαρμόζονται τα συναπτικά βάρη, σε κάθε βήμα της επανάληψης, έτσι ώστε η συνάρτηση κόστους να μειώνεται. Στην πραγματικότητα, επομένως, η προσαρμογή των βαρών γίνεται σύμφωνα με τα σφάλματα που υπολογίζονται σε κάθε βήμα της διαδικασίας, δηλαδή για κάθε δεδομένο παράδειγμα. Ο μέσος όρος της μεταβολής των βαρών στο σύνολο των σει δεδομένων, που προκύπτει με αυτόν τον τρόπο, αποτελεί, λοιπόν, μία εκτίμηση της μεταβολής που θα προέκυπτε αν ελαχιστοποιούσαμε τη συνάρτηση κόστους όλου του συνόλου, όπως τη θεωρήσαμε παραπάνω.

Όπως αναφέραμε παραπάνω, ο στόχος είναι, σε κάθε βήμα του αλγορίθμου, να μεταβάλλονται τα συναπτικά βάρη, έτσι ώστε να μειώνεται η συνάρτηση κόστους.

Έστω, λοιπόν, $\bar{w}(n)$ ο πίνακας των βαρών στο βήμα n και

$\bar{w}(n+1)$ ο διορθωμένος πίνακας στο βήμα $n+1$.

Επιδιώκουμε να ισχύει $E[\bar{w}(n+1)] \leq E[\bar{w}(n)]$.

Σύμφωνα με τον αλγόριθμο οπισθοδιάδοσης, για να το πετύχουμε αυτό, θεωρούμε ότι, η μεταβολή στον πίνακα $\bar{w}(n)$ γίνεται στην κατεύθυνση της *πλέον απότομης κατάβασης (steepest descent)*, δηλαδή στην κατεύθυνση την αντίθετη προς αυτή του διανύσματος της κλίσης της $E[\bar{w}(n)]$.

Η διόρθωση, επομένως, στο βάρος $w_{ji}(n)$, που συνδέει το νευρώνα j του επιπέδου εξόδου του δικτύου, με το νευρώνα i , του τελευταίου κρυφού επιπέδου, κατά το βήμα n , δίνεται από τη σχέση

$$\Delta w_{ji}(n) = -\eta \frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} \quad (*) ,$$

όπου η είναι η θετική σταθερά, που ονομάσαμε παράμετρο ρυθμού εκπαίδευσης.

Η σχέση αυτή ονομάζεται κανόνας του δέλτα (delta rule).

Σύμφωνα με τον κανόνα της αλυσίδας του διαφορικού λογισμού ισχύει:

$$\frac{\partial E(n)}{\partial w_{ji}(n)} = \frac{\partial E(n)}{\partial e_j(n)} \cdot \frac{\partial e_j(n)}{\partial y_j(n)} \cdot \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} \cdot \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)}$$

όπου $e_j(n)$ το σφάλμα στην έξοδο του νευρώνα j ,

$y_j(n)$ η έξοδος του νευρώνα j και

$v_j(n)$ το τοπικό πεδίο του νευρώνα j ,

όλα υπολογισμένα κατά το n -οστό βήμα του αλγόριθμου.

Για το τοπικό πεδίο του νευρώνα j ισχύει:

$$v_j(n) = \sum_{i=1}^k w_{ji}(n) \cdot y_i(n) \quad \text{με} \quad \frac{\partial v_j(n)}{\partial w_{ji}(n)} = y_i(n)$$

όπου k το πλήθος των νευρώνων του τελευταίου κρυφού επιπέδου,

$y_i(n)$ η έξοδος του νευρώνα i του τελευταίου κρυφού επιπέδου και

$y_j(n)$ η έξοδος του νευρώνα j στο n -οστό βήμα με

$$y_j(n) = \varphi_j(v_j(n)) \quad \text{και} \quad \frac{\partial y_j(n)}{\partial v_j(n)} = \varphi'_j(v_j(n))$$

Παρατηρούμε ότι είναι απαραίτητη η γνώση της παραγώγου της συνάρτησης ενεργοποίησης. Αυτός λοιπόν είναι ένας από τους λόγους που χρησιμοποιούμε παραγωγίσιμη συνάρτηση ενεργοποίησης, αντί της βηματικής συνάρτησης.

Οπότε η σχέση (*) παίρνει τη μορφή: $\Delta w_{ji}(n) = \eta \delta_j(n) y_i(n)$

$$\text{όπου} \quad \delta_j(n) = -\frac{\partial E(n)}{\partial v_j(n)} = e_j(n) \cdot \varphi'_j(v_j(n))$$

η τοπική βαθμίδα κλίσης (local gradient).

Οπότε για να υπολογίσουμε τη τοπική βαθμίδα κλίσης και στη συνέχεια τη μεταβολή στο συναπτικό βάρος, πρέπει να ξέρουμε το σφάλμα στην έξοδο του νευρώνα, $e_j(n)$.

- Όταν ο υπό εξέταση νευρώνας είναι νευρώνας του επιπέδου εξόδου του δικτύου, τότε ο υπολογισμός του σφάλματος γίνεται εύκολα, βάσει της σχέσης $e_j(n) = d_j(n) - y_j(n)$.
- Εάν ο νευρώνας ανήκει σε κάποιο κρυφό επίπεδο τότε η τοπική βαθμίδα κλίσης δίνεται από τη σχέση

$$\delta_j(n) = \varphi'_j(v_j(n)) \cdot \sum_k \delta_k(n) w_{kj}(n)$$

όπου ο δείκτης k συμβολίζει τους νευρώνες του αμέσως επόμενου επιπέδου.

1.7 ΘΕΩΡΗΤΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΝΔ

➤ Υπολογιστική δύναμη

Τα νευρωνικά δίκτυα είναι «καθολικά λειτουργικά προσεγγιστικά Εργαλεία» (“Universal Approximators”). Έχει αποδειχθεί ότι ένα δίκτυο μπορεί να προσεγγίσει οποιαδήποτε συνεχή συνάρτηση με οποιαδήποτε επιθυμητή ακρίβεια.

Συγκεκριμένα, στη μαθηματική θεωρία των Νευρωνικών δικτύων, το Καθολικό Προσεγγιστικό Θεώρημα αποδεικνύει ότι τα MLPs με ένα κρυφό επίπεδο νευρώνων και κάποια συνάρτηση ενεργοποίησης αποτελούν καθολικά προσεγγιστικά εργαλεία, σε κάθε συμπαγές υποσύνολο του \mathbb{R}^n .

Το θεώρημα αυτό αποδείχθηκε από τον George Cybenko το 1989 για σιγμοειδή συνάρτηση ενεργοποίησης, επομένως καλείται εναλλακτικά Θεώρημα του Cybenko.

Ο Kurt Hornik (1991) έδειξε ότι δεν είναι η συγκεκριμένη επιλογή της συνάρτησης ενεργοποίησης, αλλά κυρίως η ίδια η φύση των MLPs που δίνει στο Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο τη δυνατότητα Καθολικού Προσεγγιστικού εργαλείου. (Οι μονάδες εξόδου υποτίθενται πάντα γραμμικές)

ΤΥΠΙΚΗ ΔΙΑΤΥΠΩΣΗ ΘΕΩΡΗΜΑΤΟΣ CYBENKO:

Έστω φ μια μη σταθερή, φραγμένη, συνεχής και μονότονη συνάρτηση. Με I_m συμβολίζουμε την m -διάστατη μονάδα του υπερκύβου $[0,1]^m$

Ο χώρος των συνεχών συναρτήσεων στον I_m θα συμβολίζεται με $C(I_m)$.

Τότε για κάθε $f \in C(I_m)$ και $\varepsilon > 0$, υπάρχουν ακέραιος N και ένα σύνολο πραγματικών αριθμών $a_i, b_i \in \mathbb{R}, w_i \in \mathbb{R}^m, i = 1, 2, \dots, N$, ώστε να μπορούμε να ορίσουμε:

$$F(x) = \sum_{i=1}^N a_i \varphi(w_i^T x + b_i)$$

ως μια προσεγγιστική πραγματοποίηση της f με $|F(x) - f(x)| < \varepsilon, \forall x \in I_m$.

Το θεώρημα αυτό είναι ένα πολύ ισχυρό αποτέλεσμα. Εκτός των άλλων μας λέει ότι ένα δίκτυο MLP μπορεί να υλοποιήσει οποιαδήποτε συνεχή διαχωριστική επιφάνεια σε n διαστάσεις σε αντίθεση με το απλό δίκτυο Perceptron το οποίο μπορεί να υλοποιήσει μόνο γραμμικές επιφάνειες. Ωστόσο, η απόδειξη δεν είναι εποικοδομητική όσον αφορά τον αριθμό των νευρώνων που απαιτούνται ή τις ρυθμίσεις των συντελεστών στάθμισης.

Επιπλέον, έχει αποδειχθεί ότι μια συγκεκριμένη επαναλαμβανόμενη αρχιτεκτονική με λογικά εκτιμημένα βάρη έχει την πλήρη δύναμη μιας Καθολικής Μηχανής Turing χρησιμοποιώντας πεπερασμένο αριθμό νευρώνων και τυπικές γραμμικές συνδέσεις. [Hava Siegel Mann και Eduardo D. Sontag]⁶

Τα ΝΔ έχουν πιο γενικές και ελαστικές λειτουργικές μορφές σε σχέση με αυτές στις οποίες έχουν ικανοποιητική απόδοση οι παραδοσιακές στατιστικές μέθοδοι.

➤ Προσαρμογή

Τα ΤΝΔ έχουν την ικανότητα να μεταβάλλουν τα βάρη τους ανάλογα με τα πρότυπα εισόδου, δηλαδή ανάλογα με το περιβάλλον στο οποίο βρίσκονται. Έτσι, ένα ΤΝΔ είναι δυνατόν να συνεχίσει να εκπαιδεύεται για να αντιμετωπίσει κάποια αλλαγή στα πρότυπα ή ακόμα και μη στατικά προβλήματα.

➤ Μη γραμμικότητα

Το ΤΝΔ είναι μη γραμμικό, αφού αποτελείται από νευρώνες που βασίζονται σε μη γραμμικές συναρτήσεις ενεργοποίησης, δηλαδή σε μη γραμμικούς νευρώνες.

➤ Συσχέτιση εισόδων-εξόδων

Στόχος της εκπαίδευσης ενός ΤΝΔ είναι η αντίστοιχη έξοδος για κάθε πρότυπο εκπαίδευσης να ταυτίζεται με την επιθυμητή έξοδο. Οπότε δημιουργείται μια συσχέτιση μεταξύ των δεδομένων εισόδου και εξόδου, χωρίς, όμως, τη χρήση κάποιου στατιστικού ή άλλου μοντέλου.

➤ Συναφείς πληροφορίες

Σε ένα ΤΝΔ η γνώση αντιπροσωπεύεται εσωτερικά από τη δομή και την κατάσταση του δικτύου και όλοι οι νευρώνες αλληλοεπηρεάζονται.

⁶ Η μηχανή Τούρινγκ (Turing machine) είναι μια βασική αφηρημένη μηχανή που μεταχειρίζεται σύμβολα, η οποία, παρ' όλη την απλότητά της, μπορεί να προσαρμοστεί έτσι ώστε να προσομοιώσει τη λογική οποιουδήποτε αλγορίθμου. Οι μηχανές Τούρινγκ περιγράφηκαν το 1936 από τον Άλαν Τούρινγκ. Ενώ σχεδιάστηκαν για να είναι τεχνικά εφικτές, οι μηχανές Τούρινγκ δεν προορίζονταν για πρακτική υπολογιστική τεχνολογία, αλλά ως νοητό πείραμα για τα όρια των μηχανικών υπολογισμών. Έτσι, δεν κατασκευάστηκαν στην πραγματικότητα. Η μελέτη των αφηρημένων τους ιδιοτήτων φανερώνει πολλές αρχές της επιστήμης υπολογιστών και της θεωρίας πολυπλοκότητας. Μια μηχανή Τούρινγκ που μπορεί να προσομοιώσει μια οποιαδήποτε άλλη μηχανή Τούρινγκ λέγεται Καθολική Μηχανή Τούρινγκ (ή απλά καθολική μηχανή)

➤ Χωρητικότητα

Η ιδιότητα αυτή αντιστοιχεί στην ικανότητα που έχουν τα ΤΝΔ να μοντελοποιούν οποιαδήποτε δεδομένη λειτουργία. Σχετίζεται με το πλήθος της πληροφορίας που μπορεί να αποθηκεύσει το δίκτυο και στην έννοια της πολυπλοκότητας.

➤ Ανεκτικότητα σε σφάλματα

Όπως έχει προαναφερθεί, η απόδοση ενός ΤΝΔ μειώνεται ομαλά σε περιπτώσεις λάθους. Λόγου χάρη, εάν πέσει η ποιότητα των εισερχόμενων σημάτων ή ακόμα κι αν καταστραφεί ένας νευρώνας το δίκτυο δεν θα ακηρησθευθεί, αλλά θα συνεχίσει να λειτουργεί ίσως με ελαφρώς μειωμένη απόδοση. Αυτή η ιδιότητα προκύπτει από το γεγονός ότι η «πληροφορία» είναι αποθηκευμένη σε ολόκληρο το δίκτυο, οπότε αλλοίωση δεδομένων σε μικρή έκταση, δεν έχει σημαντικές επιπτώσεις.

➤ Γενίκευση

Μία μοναδική ικανότητα που έχουν τα νευρωνικά δίκτυα είναι ότι ένα εκπαιδευμένο δίκτυο μπορεί να αναγνωρίσει δεδομένα τα οποία δεν έχει δει ποτέ του. Αυτό, όμως, συμβαίνει όταν τα δεδομένα είναι στην ίδια τάξη προβλημάτων, όπως αυτά στα οποία έχει εκπαιδευθεί το δίκτυο, και φυσικά όχι σε οποιαδήποτε άλλη κατηγορία. Αυτό συμβαίνει διότι τα κρυμμένα επίπεδα στο δίκτυο οργανώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να αναγνωρίζουν τα σημαντικά χαρακτηριστικά του σήματος της εισόδου, έχουν την ικανότητα να δημιουργούν μία εσωτερική αναπαράσταση των εξωτερικών προτύπων που έρχονται στο δίκτυο και κατόπιν μπορούν να αναγνωρίζουν τα νέα πρότυπα που δεν έχουν δει ποτέ. Δεν μπορούμε όμως με την ίδια εκπαίδευση να αναμένουμε ένα δίκτυο να λύνει με επιτυχία τελείως διαφορετικά προβλήματα.

➤ Βιολογική αναλογία

Η κατασκευή των ΤΝΔ είναι εμπνευσμένη από τον ανθρώπινο εγκέφαλο και έχει ιδιαίτερη ερευνητική αξία, αφού οι Νευροβιολόγοι συχνά μελετούν τα ΤΝΔ για να καταλάβουν διάφορες λειτουργίες του εγκεφάλου και τα αποτελέσματα των ερευνών αυτών βοηθούν την περαιτέρω ανάπτυξη των ΤΝΔ. Έτσι τροφοδοτούνται αμοιβαία και οι δυο Επιστήμες

1.8 ΕΠΙΛΟΓΗ ΤΕΧΝΗΤΟΥ ΝΕΥΡΩΝΙΚΟΥ ΔΙΚΤΥΟΥ

Ίσως το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων είναι η ικανότητά τους να χρησιμοποιούνται ως « προσεγγιστικές μηχανές αυθαίρετης λειτουργίας» που « μαθαίνουν» παρατηρώντας δεδομένα. Παρόλα αυτά η χρήση τους δεν είναι τόσο απλή. Αντιθέτως, για την επιλογή του κατάλληλου ΤΝΔ και την ορθή χρήση του, είναι απαραίτητη η καλή κατανόηση της υποκείμενης θεωρίας τους.

Η επιλογή του μοντέλου εξαρτάται τόσο από την αναπαράσταση των δεδομένων μας, όσο και από τη φύση της εφαρμογής. Γενικά, υπερβολικά πολύπλοκα μοντέλα συνήθως οδηγούν σε προβλήματα στην εκπαίδευση του δικτύου. Η επιλογή του αλγορίθμου μάθησης αποτελεί μια εν γένει δύσκολη διαδικασία, γιατί σχεδόν κάθε αλγόριθμος θα ανταποκριθεί καλά σε δεδομένες παραμέτρους για την εκπαίδευση συγκεκριμένου, σταθερού συνόλου δεδομένων. Ωστόσο, η επιλογή και ρύθμιση ενός αλγορίθμου για την κατάρτισή του σε αόρατα δεδομένα απαιτεί σημαντικό ποσό πειραματισμού και εμπειρίας.

Όσον αφορά την ανθεκτικότητα του Δικτύου, εάν το μοντέλο, η συνάρτηση ενεργοποίησης και ο αλγόριθμος μάθησης επιλεγούν σωστά, το ΤΝΔ που θα προκύψει μπορεί να είναι ιδιαίτερα εύρωστο στα σφάλματα. Η απλή δομή των ΤΝΔ και η ύπαρξη κυρίως τοπικού χαρακτήρα εξαρτήσεων επιτρέπουν γρήγορους υπολογισμούς και παράλληλο τρόπο λειτουργίας.

Είναι, επομένως, φυσικό να αναρωτηθούμε πώς θα ξέρουμε ποιόν τύπο δικτύου θα επιλέξουμε για κάποιο δεδομένο πρόβλημα ή εφαρμογή. Η απάντηση, όμως, δεν είναι εύκολη ή μονοσήμαντη. Και αυτό διότι με την σωστή εκπαίδευση μπορεί ένα νευρωνικό δίκτυο να λύσει μία μεγάλη ποικιλία προβλημάτων. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει ότι μπορεί να λύνει όλα τα προβλήματα. Κάθε πρόβλημα είναι ειδική περίπτωση και μόνο με πολλαπλές δοκιμές θα είναι δυνατόν να βρούμε τον καταλληλότερο τύπο δικτύου, ερευνώντας πάντα την βιβλιογραφία για προσπάθειες που πιθανόν έχουν γίνει στο παρελθόν πάνω στο ίδιο πρόβλημα. Σε κάθε περίπτωση, βέβαια, η εκπαίδευση πρέπει να είναι η κατάλληλη.

1.8.1 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ – ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ Τ.Ν.Δ.

Η χρησιμοποίηση των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων παρουσιάζει σημαντικά πλεονεκτήματα για τα οποία έχει ήδη γίνει λόγος. Οπότε, στη συνέχεια, γίνεται μια συνοπτική παρουσίαση αυτών.

1. Η μη γραμμικότητα των νευρώνων η οποία επεκτείνεται φυσικά σε ολόκληρο το δίκτυο.⁷
2. Η αντιστοίχιση εισόδων-εξόδων (input-output mapping), η οποία πραγματοποιείται μέσω της εκπαίδευσης.
3. Η προσαρμοστικότητα (adaptivity) την οποία επιδεικνύουν, που αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αποτελεσματική απεικόνιση δυναμικών συστημάτων.
4. Το τελικό αποτέλεσμα ενός ΤΝΔ παρέχει και ενδείξεις (evidential response), δηλαδή λαμβάνουμε και αποτελέσματα βάσει των οποίων μπορούμε να επιλέξουμε αν θα εμπιστευτούμε ή όχι την απόφαση, βελτιώνοντας έτσι την συνολική απόδοση του συστήματος.
5. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι ανεκτικά στα σφάλματα (fault tolerant).
6. Οι υπολογισμοί που γίνονται σε ένα νευρώνα δεν εξαρτώνται από τι συμβαίνει στους άλλους νευρώνες στο ίδιο επίπεδο. Έτσι οι διορθώσεις στις τιμές των βαρών w σε ένα επίπεδο μπορούν να γίνουν ταυτόχρονα. Η παράλληλη αυτή λειτουργία του δικτύου έχει άμεσο αποτέλεσμα ότι αυξάνεται κατά πολύ η ταχύτητα του συστήματος (εκπαίδευση και λειτουργία) καθώς και ότι υπάρχει ανοχή του δικτύου σε τυχόν βλάβες του συστήματος .
7. Τα ΤΝΔ μπορούν να χωρίσουν το χώρο των διαθέσιμων δεδομένων και να δημιουργήσουν διαφορετικές σχέσεις για διαφορετικά τμήματα του χώρου δεδομένων.
8. Η ομοιομορφία την οποία επιδεικνύουν αποτελεί ένα ακόμα πλεονέκτημα των Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων καθώς σε οποιαδήποτε μορφή τους βασική μονάδα είναι ο νευρώνας και, επομένως, είναι δυνατό να διαμοιραστούν θεωρίες και αλγόριθμοι εκπαίδευσης σε διαφορετικές εφαρμογές τους.
9. Η βιολογική τους αντιστοιχία (Neurobiological Analogy) με τον ανθρώπινο εγκέφαλο, στον οποίο πραγματοποιούνται μαζικοί παράλληλοι υπολογισμοί.
10. Τα νευρωνικά δίκτυα είναι ιδιαίτερα δημοφιλή σε προβλήματα που περιέχουν μη προβλέψιμες λειτουργίες ή ένα περιβάλλον το οποίο δεν κατανοούμε καλά.

⁷ Τα γραμμικά μοντέλα έχουν πλεονεκτήματα υπό την έννοια ότι μπορούν να γίνουν κατανοητά, να αναλυθούν με μεγάλη λεπτομέρεια και να εφαρμοστούν εύκολα. Εντούτοις, είναι ακατάλληλα εάν ο ελλοχεύων μηχανισμός είναι μη γραμμικός. Στην πραγματικότητα, τα πραγματικά συστήματα είναι συνήθως μη γραμμικά (Granger and Terasvirta, 1993).

Στα μειονεκτήματα της χρήσης τους συγκαταλέγονται:

1. Η μεγάλη υπολογιστική πολυπλοκότητα η οποία τα χαρακτηρίζει.
2. Η αδυναμία τους να αναγνωρίζουν τη σχέση μεταξύ εισόδων-εξόδων. Τα ΤΝΔ απλά προσομοιώνουν τη σχέση αυτή χωρίς να είναι σε θέση να την αποσυνθέσουν.
3. Δεν είναι ικανά να ανταποκριθούν σε πολύ μεγάλες μεταβολές του συστήματος που προσπαθούν να προσομοιώσουν καθώς έχουν εκπαιδευτεί σε ιστορικά δεδομένα.
4. Το μέγεθος του δείγματος εκπαίδευσης οφείλει να είναι μεγάλο.
5. Η κατάλληλη δομή για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος είναι γνωστή μόνο a posteriori.
6. Η εξήγηση και μετάφραση των βαρών στα ΝΔ είναι αδύνατη λόγω της μη γραμμικότητας. Οπότε, δεν υπάρχει γενικός τρόπος για την ερμηνεία της εσωτερικής λειτουργίας του δικτύου.
7. Η εκπαίδευση ενός ΤΝΔ μπορεί να παρουσιάζει ιδιαίτερες δυσκολίες και πολλές φορές μπορεί να είναι ακόμα και αδύνατη.
8. Η ικανότητα γενίκευσης ενός ΤΝΔ είναι δύσκολα προβλέψιμη.

Τα πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα του κάθε δικτύου επίσης είναι γνωστά. Δεν υπάρχει το τέλειο δίκτυο, που να μπορεί να κάνει όλες τις δουλειές και να λύνει όλα τα προβλήματα. Όλα εξαρτώνται λοιπόν από τη χρήση και τη εφαρμογή έχουμε για το κάθε δίκτυο που αναπτύσσουμε.

1.9 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΤΩΝ ΤΝΔ

Τα νευρωνικά δίκτυα έχουν χρησιμοποιηθεί επιτυχώς σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών με ευαίσθητα δεδομένα ή δεδομένα που απαιτούν εντατική επεξεργασία τόσο από το χώρο της Πληροφορικής, των Επικοινωνιών και της Ηλεκτρολογίας όσο και σε πολλούς άλλους επιστημονικούς χώρους. Παρακάτω αναφέρονται μερικές από τις επιτυχίες των ΤΝΔ σε διάφορους κλάδους, με σκοπό και μια γενικότερη επισκόπηση στα θέματα που μπορούν να αντιμετωπίσουν τα ΤΝΔ.

Χρηματοοικονομικά:

- Ανάλυση κινδύνου
- Πρόβλεψη Χρηματιστηριακής Αγοράς και Οικονομικών Δεικτών
- Πρόβλεψη πτώχευσης
- Αξιολόγηση επενδύσεων και ανάλυση χαρτοφυλακίων
- Αξιολόγηση πιστοληπτικής ικανότητας
- Αναγνώριση πλαστογραφιών

Πωλήσεις και Marketing:

- Πρόβλεψη πωλήσεων
- Στοχευμένο Μαρκετινγκ
- Πρόβλεψη υπηρεσίας χρήσης (πρόβλεψη αριθμού κλήσεων, αφίξεων πελατών, συναλλαγών πελατών, προγραμματισμός προσωπικού ώστε να ανταποκριθεί σε συγκεκριμένο φόρτο εργασίας)
- Πρόβλεψη Λιανικού Περιθωρίου
- Πρόβλεψη Ταμειακών Ροών
- Βελτιστοποίηση Αποθεμάτων

Βιομηχανία:

- Διαδικασία ελέγχου
- Ποιοτικός Έλεγχος

Επιστήμες:

- Αναγνώριση Προτύπων (π.χ. αυτόματη αναγνώριση χειρόγραφων χαρακτήρων, αναγνώριση στόχων, αναγνώριση προσώπου & φωνής κ.α.)
- Επεξεργασία Σήματος (π.χ. αφαίρεση θορύβου από τηλεφωνική γραμμή, αναγνώριση συστήματος, μοντελοποίηση σήματος κ.α.)
- Έλεγχος κίνησης
- Συστήματα Ελέγχου (π.χ. πηδαλιούχηση πυραύλων κ.α.)
- Βελτιστοποίηση Χημικών Διεργασιών
- Αναγνώριση Χημικών Ενώσεων
- Αναγνώριση Πολυμερών
- Φυσική Μοντελοποίηση Συστήματος
- Αξιολόγηση των οικοσυστημάτων
- Ταυτοποίηση γονιδίων

- Βοτανική ταξινόμηση
- Βιολογική Ανάλυση Συστημάτων
- Πρόγνωση όζοντος στο επίπεδο της γης

Ιατρική:

- Ιατρική Διάγνωση και πρόταση κατάλληλης φαρμακευτικής αγωγής
- Ανίχνευση και Αξιολόγηση Αντίδρασης οργανισμού σε συγκεκριμένη φαρμακευτική αγωγή
- Εκτίμηση Κόστους Θεραπείας

Data Mining:

- Πρόβλεψη
- Ταξινόμηση
- Ανίχνευση αποκλίσεων
- Μοντελοποίηση Απόκρισης
- Ανάλυση Χρονοσειρών

Αεροπλοΐα:

- Συστήματα ελέγχου πτήσης
- Δημιουργία αυτόματων πιλότων και προγραμμάτων προσομοίωσης πτήσης
- Ανίχνευση ελαττωμάτων σε τμήματα του αεροπλάνου

Άλλα:

- Πρόβλεψη επιδόσεων μαθητών
- Πρόβλεψη ηλεκτρικού φορτίου
- Πρόβλεψη ζήτησης ενέργειας
- Αγροτικές εκτιμήσεις παραγωγής
- Αθλητικά στοιχεία
- Πρόβλεψη καιρού
- Προβλήματα συνδυαστικής βελτιστοποίησης
- Μετατροπή γραπτού κειμένου σε ηχητικό κείμενο και αντίστροφα

1.9.1 ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ

Υπάρχει αξιοσημείωτη επικάλυψη μεταξύ των Νευρωνικών Δικτύων και της Στατιστικής. Η Στατιστική ασχολείται με Ανάλυση Δεδομένων. Τα περισσότερα ΤΝΔ μπορούν να γενικεύσουν αποτελεσματικά εξόδους που προκύπτουν από θορυβώδη δεδομένα, οπότε πραγματοποιείται ανάλυση δεδομένων. Επιπλέον, χαρακτηριστικά των ΤΝΔ όπως η ικανότητα αποθήκευσης της γνώσης και επαναχρησιμοποίηση της όποτε είναι αναγκαίο, η ροπή για αναγνώριση προτύπων ακόμα κι υπό την παρουσία θορύβου, η ικανότητα να λαμβάνουν υπόψη προηγούμενη γνώση και να εξάγουν συμπεράσματα για νέες καταστάσεις καθιστούν τα ΤΝΔ ένα χρήσιμο εργαλείο που επιλέγεται συχνά

για ευρύ φάσμα εφαρμογών σε ποικίλους τομείς έναντι των Κλασικών Στατιστικών Μεθόδων. Υπάρχουν βέβαια και ΤΝΔ που δεν ασχολούνται με ανάλυση δεδομένων (λ.χ. δίκτυα που μοντελοποιούν βιολογικά συστήματα), ΤΝΔ που δεν εκπαιδεύονται (λ.χ. Δίκτυα Hopfield) ή δίκτυα που εκπαιδεύονται αποτελεσματικά μόνο από εισόδους απαλλαγμένες από θόρυβο (λ.χ. ο Κανόνας Perceptron). Τα Δίκτυα αυτά δεν έχουν ιδιαίτερη σχέση με τη Στατιστική.

Τα ΤΝΔ αποτελούν έναν ευέλικτο τρόπο για τη μοντελοποίηση δεδομένων τόσο για σκοπούς εκτίμησης, όσο και για θέματα ταξινόμησης ή αναγνώρισης προτύπων. Έτσι, διάφορα Δίκτυα μπορούν να αναπαραστήσουν Στατιστικά Μοντέλα:

- Feed forward δίκτυα χωρίς κρυμμένο στρώμα νευρώνων ταυτίζονται με Γενικευμένα Γραμμικά Μοντέλα.
- Feed forward δίκτυα με 1 κρυμμένο στρώμα νευρώνων σχετίζονται με Παλινδρόμηση που έχει προβολικούς σκοπούς.
- Τα Δίκτυα αυτο-οργάνωσης του Kohonen αποτελούν διακριτές προσεγγίσεις σε κύριες καμπύλες και επιφάνειες.
- Ο αλγόριθμος εκπαίδευσης τον Hebb σχετίζεται άμεσα με την Ανάλυση σε κύριες συνιστώσες.

Και πολλά ακόμη.

Στις κλασικές Στατιστικές μεθόδους εισάγουμε ένα σύνολο δεδομένων σε έναν κατά βάση υπολογιστικό αλγόριθμο και υπολογίζουμε έτσι τις παραμέτρους για το επιλεγμένο μοντέλο. Στη συνέχεια οι παράμετροι χρησιμοποιούνται για την κατασκευή της προσαρμοσμένης ευθείας ή καμπύλης, υπολογίζονται διάφορα μέτρα σφάλματος και η ανάλυση ολοκληρώνεται. Στα ΤΝΔ ο υπολογισμός των παραμέτρων (βάρη και πόλωση), όπως έχει περιγραφεί μέχρι τώρα, δεν έχει απόλυτη αντιστοιχία με τον υπολογισμό των παραμέτρων των Στατιστικών Μοντέλων. Δεν υπάρχει, λ.χ., κάποιο βάρος στο δίκτυο που να αναπαριστά μονοσήμαντα την κλίση της ευθείας ή την ασύμπτωτη της εκθετικής καμπύλης. Σε μια προσπάθεια σύγκρισης των 2 κλάδων μπορούμε να παραθέσουμε τα κάτωθι:

- Η επιλογή του κατάλληλου μοντέλου είναι ένα ιδιαίτερα δύσκολο πρόβλημα στη Στατιστική και την Ανάλυση Δεδομένων. Στα γλώσσα των ΤΝΔ το πρόβλημα αυτό μεταφράζεται στη επιλογή της κατάλληλης αρχιτεκτονικής δομής και είναι εξίσου δύσκολο.
- Οι Στατιστικές μέθοδοι, όπως η Παλινδρόμηση έχουν καλύτερη απόδοση όταν το μέγεθος δείγματος είναι μικρό καθώς και όταν η θεωρία ή η εμπειρία υποδεικνύουν ότι υπάρχει σχέση εξάρτησης των ανεξάρτητων μεταβλητών με τη μεταβλητή απόκρισης. Τα ΤΝΔ εξαρτώνται από τα σύνολα εκπαίδευσης, δηλαδή από τα δεδομένα εισόδου, επομένως, η απόδοσή τους βελτιώνεται αναλογικά με το μέγεθος του δείγματος. Επιπλέον, τα ΤΝΔ δεν απαιτούν εξίσου περιοριστικές υποθέσεις για τη σχέση των ανεξάρτητων με τις εξαρτημένες μεταβλητές. Επομένως, τα ΤΝΔ είναι κυρίως χρήσιμα όταν απαιτείται μοντελοποίηση πολλών δεδομένων υψηλής διάστασης χωρίς να γνωρίζουμε το κατάλληλο μοντέλο a-priori.

- Υποστηρίζεται συχνά ότι τα ΤΝΔ, σε αντίθεση με τις Κλασσικές Στατιστικές Μεθόδους, δεν απαιτούν υποθέσεις για την κατανομή. Στην πραγματικότητα τα ΤΝΔ περιλαμβάνουν τις ίδιες υποθέσεις κατανομής, όμως οι Στατιστικολόγοι μελετούν τις συνέπειες και τη σημαντικότητα των υποθέσεων αυτών, ενώ οι επιστήμονες που ασχολούνται με τα νευρωνικά δίκτυα τις αγνοούν.
- Τα ΤΝΔ είναι μη γραμμικά και χρησιμοποιούν διαφορετικές τεχνικές εκτίμησης (feed forward δίκτυα και back propagation algorithm) απ' ότι συνηθίζεται στις Κλασσικές Στατιστικές Μεθόδους (ελάχιστα τετράγωνα ή μέγιστη πιθανοφάνεια).
- Στα ΤΝΔ το μόνο μέτρο αποτελεσματικότητας του δικτύου είναι η προγνωστική του ικανότητα, δηλαδή η γενίκευση. Οπότε, η εκτίμηση των αποτελεσμάτων για σύνολα δεδομένων που δεν ανήκουν στα σύνολα εκπαίδευσης είναι μέγιστης σημασίας. Στις Κλασσικές Στατιστικές Μεθόδους η εκτίμηση του μοντέλου δεν αποτελεί ένα τόσο οξύ πρόβλημα, αφού οι υποθέσεις του μοντέλου μπορούν να ελεγχθούν με εύκολα υπολογίσιμες διαγνωστικές τεχνικές.

Παρόλο που πολλά μοντέλα ΤΝΔ είναι παρόμοια ή ακόμα και ίδια με γνωστά στατιστικά μοντέλα, η ορολογία που εμφανίζεται στη βιβλιογραφία για τα Νευρωνικά Δίκτυα διαφέρει αισθητά με την αντίστοιχη ορολογία της Στατιστικής. Δίνεται, για παράδειγμα, η παρακάτω αντιστοίχιση όρων:

ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ	ΤΕΧΝΗΤΑ ΝΕΥΡΩΝΙΚΑ ΔΙΚΤΥΑ
Μεταβλητές	Χαρακτηριστικά
Ανεξάρτητες μεταβλητές	Είσοδοι
Προβλεπόμενες τιμές	Έξοδοι
Εξαρτημένες μεταβλητές	Τιμές στόχοι της εκπαίδευσης
Κατάλοιπα	Σφάλματα
Εκτίμηση	Εκπαίδευση ή Μάθηση ή Προσαρμογή
Κριτήριο σύγκλισης	Συνάρτηση σφάλματος ή κόστους
Παρατηρήσεις	Πρότυπα εκπαίδευσης
Εκτίμηση παραμέτρων	Εκτίμηση βαρών
Παλινδρόμηση & Διακριτή Ανάλυση	Επιβλεπόμενη μάθηση
Μείωση δεδομένων	Μάθηση χωρίς επίβλεψη ή Κωδικοποίηση
Πρόβλεψη	Γενίκευση

Πίνακας 1. Αναλογία ορολογίας σε Στατιστική και ΤΝΔ

Επιφανειακά, λοιπόν, φαίνεται πως η μεθοδολογία των ΤΝΔ απαλλάσσει τον στατιστικολόγο από σημαντικές ευθύνες. Όμως, αυτό απέχει πολύ από την πραγματικότητα, αφού τα ΤΝΔ και η Στατιστική δεν αποτελούν

ανταγωνιστικές μεθοδολογίες για την Ανάλυση Δεδομένων. Τα ΤΝΔ δεν πρέπει να θεωρούνται εναλλακτική των Κλασικών Στατιστικών Μεθόδων, αλλά ένα ακόμα ισχυρό εργαλείο στη διάθεσή μας, αφού υπάρχει αξιοσημείωτη επικάλυψη μεταξύ των δυο κλάδων. Αφενός, τα ΤΝΔ περιέχουν πολλά μοντέλα, όπως τα MLPs, που είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για στατιστικές εφαρμογές. Αφετέρου, η Στατιστική είναι άμεσα εφαρμόσιμη στα ΤΝΔ με διάφορους τρόπους, όπως σε κριτήρια ταξινόμησης, αλγόριθμους βελτιστοποίησης, διαστήματα εμπιστοσύνης, διάγνωση και γραφικές μεθόδους. Καλύτερη επικοινωνία των δυο κλάδων θα ωφελήσει αμφότερα τα πεδία και θα οδηγήσει σε καινοτόμα και θεαματικά αποτελέσματα, αφού, κατά γενική αποδοχή, τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα αποτελούν ένα επιστημονικό πεδίο με μικρή ιστορία, αλλά με πολύ λαμπρό μέλλον στα χρόνια που έρχονται.

Λίγες δημοσιευμένες εργασίες παρέχουν καθαρή εικόνα για τη σχέση Στατιστικών Μεθόδων και ΤΝΔ. Η εργασία του Ripley (1993) αποτελεί ίσως μια από τις πιο διαφωτιστικές εργασίες τόσο για τις φιλοσοφικές, όσο και για τις πρακτικές διαφορές των δυο πεδίων.

1.10 ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Επειδή τα νευρωνικά δίκτυα είναι σχετικά μία νέα περιοχή, δεν υπάρχει ουσιαστικά μεγάλη προϊστορία, όπως σε άλλες παραδοσιακές επιστήμες. Ξεκίνησε σε διεθνές επίπεδο μόλις κατά τις τελευταίες δεκαετίες, αλλά η μεγάλη ώθηση σ' αυτά δόθηκε μετά το 1980. Σ' αυτό βοήθησε τόσο η τεράστια ανάπτυξη του λογισμικού των Η/Υ όσο και η ανάπτυξη νέων αλγορίθμων εκπαίδευσης. Η ανάπτυξη των νευρωνικών δικτύων πέρασε από πολλές φάσεις και εξελίξεις.

Το πρώτο μοντέλο νευρωνικού δικτύου το οποίο προτείνει ότι οι νευρώνες είναι η βασική μονάδα του δικτύου παρουσιάστηκε το 1943 από τους McCulloch και Pitts. Ο McCulloch ήταν ψυχίατρος και νευρολόγος. Ο Pitts ήταν ένας εξαιρετικός μαθηματικός. Τα δίκτυα McCulloch-Pitts προσπαθούν να εξηγήσουν για πρώτη φορά πως δουλεύει η μνήμη. Θεωρούν ότι ένας πιθανός μηχανισμός μνήμης μπορεί να είναι η ύπαρξη κλειστών διαδρομών του σήματος μέσα στο δίκτυο. Σε μία πρώτη εργασία τους οι ερευνητές αυτοί παρουσίασαν για πρώτη φορά την ιδέα ότι ένα νευρωνικό δίκτυο αποτελείται από μία συλλογή ενός μεγάλου αριθμού νευρώνων και έδειξαν πώς θα μπορούσαν να λειτουργούν οι νευρώνες με τις διασυνδέσεις τους. Αυτή θεωρείται ιστορικά ότι είναι η πρώτη εικόνα ενός νευρωνικού δικτύου.

Λίγα χρόνια αργότερα ο J. Von Neumann χρησιμοποίησε τις εργασίες των McCulloch - Pitts ως παράδειγμα για υπολογιστικές μηχανές την δεκαετία του '50, που διαδόθηκε ο ηλεκτρονικός υπολογιστής. Τότε έγιναν και οι πρώτες

προσπάθειες να αντλήσουμε πληροφορίες από τα βιολογικά νευρωνικά δίκτυα και να δημιουργηθούν τα πρώτα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα.

Ένα άλλο έργο της πρώτης αυτής εποχής που αφήνει ακόμα και σήμερα την επιρροή του είναι το βιβλίο του D. Hebb, “The organisation of behaviour” (1949), το οποίο εισάγει τον κανόνα μάθησης του Hebb. Το μοντέλο του Hebb έχει ως κεντρική ιδέα τις συνδέσεις μεταξύ μονάδων του συστήματος, δηλαδή τους νευρώνες. Έφτασε στα συμπεράσματα αυτά μετά από σωρεία πειραμάτων νευροφυσιολογίας. Ο κανόνας αυτός λέει ότι κάθε φορά που το δίκτυο χρησιμοποιεί τις νευρωνικές του συνδέσεις, οι συνδέσεις αυτές ενισχύονται και το δίκτυο πλησιάζει περισσότερο στο να μάθει το πρότυπο το οποίο παρουσιάζεται. Όταν ο νευρώνας i επανειλημμένα διεγείρει τον νευρώνα j , τότε συμβαίνει να αναπτύσσεται μια μεταβολική σύνδεση στον ένα ή και στους δύο νευρώνες, έτσι ώστε η απόδοση του φαινομένου (το i διεγείρει το j) να αυξάνεται.

Το μοντέλο του αισθητήρα (perceptron) παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 1957 από τον F. Rosenblatt, ο οποίος αρχικά έφτιαξε το πρώτο δίκτυο σε hardware που μπορούσε να κάνει πολλές και διάφορες διεργασίες.

Οι πρώτες αυτές επιτυχίες μεγαλοποιήθηκαν, αλλά γρήγορα φάνηκε ότι τα παραπάνω μοντέλα είχαν πολλούς περιορισμούς. Μια συνολική και εμπειριστατωμένη εικόνα του προτύπου αυτού παρουσιάστηκε το 1969 στο βιβλίο «Perceptrons» των Minsky και Papert. Στο βιβλίο αυτό γίνεται μία συνολική εκτίμηση της χρησιμότητας του προτύπου του αισθητήρα και όλων των διεργασιών που επιτελεί και φαίνεται να καταρρέουν οι αρχικές προσδοκίες που είχαν δημιουργηθεί. Οπότε, προς το παρόν τα νευρωνικά δίκτυα χάνουν την δημοτικότητα τους και μία νέα, παρεμφερής περιοχή αρχίζει να γίνεται γνωστή, η Τεχνητή Νοημοσύνη.

Τα επόμενα είκοσι χρόνια, μέχρι περίπου το 1980, μικρή μόνο πρόοδος επιτελέστηκε στα νευρωνικά δίκτυα, διότι οι περιορισμοί που αναφέρθηκαν παραπάνω αποθάρρυναν τους περισσότερους στο πεδίο αυτό, το οποίο, όπως φάνηκε λίγο αργότερα, έψαχνε να βρει μία διέξοδο και να κάνει νέα σημαντικά βήματα.

Η διέξοδος αυτή ήρθε με ένα μνημειώδες έργο που παρουσιάστηκε το 1982 από τον J. Hopfield, ο οποίος είναι βιολόγος, και το οποίο έδωσε μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη των δικτύων. Σε μία εργασία του μόλις 5 σελίδων ο Hopfield έδειξε με αυστηρά μαθηματική απόδειξη πώς ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αποθηκευτικός χώρος (storage device) και πώς ένα δίκτυο μπορεί, επίσης, να επανακτήσει όλη την πληροφορία ενός συστήματος έστω και αν του δοθούν μερικά τμήματα μόνο και όχι ολόκληρο το σύστημα. Αμέσως εκτιμήθηκε η σπουδαιότητα της ιδιότητας αυτής και ως εκ τούτου η εργασία αυτή αποτέλεσε έμπνευση για πολλές άλλες ιδέες που ακολούθησαν.

Ένα επόμενο σημαντικό βήμα ήταν η πρόοδος που επιτελέστηκε στην διαδικασία εκπαίδευσης των δικτύων όταν επινοήθηκε ο κανόνας της διόρθωσης του σφάλματος (error correction learning). Έγινε κατανοητό ότι

κατά την εκπαίδευση ενός δικτύου, σε όποια κατάσταση και αν βρίσκεται αυτό σε μια δεδομένη στιγμή, σημασία έχει η απόκλιση που δίνει στην έξοδο του το δίκτυο από την επιθυμητή έξοδο.

Το 1986 δημοσιεύεται ένα άλλο σημαντικό έργο από τους McClelland και Rumelhart, το «Parallel Distributed Processing», το οποίο ανοίγει νέους δρόμους στην εκπαίδευση των νευρωνικών δικτύων. Παρουσιάζεται η ιδέα πώς ένα νευρωνικό δίκτυο μπορεί να θεωρηθεί και να χρησιμοποιηθεί ως παράλληλος επεξεργαστής. Το έργο αυτό κάνει ένα σημαντικό βήμα πέρα από το Perceptron, με το να επιτρέπει την ύπαρξη και άλλων επιπέδων νευρώνων, εκτός από την είσοδο και την έξοδο, που αποτελούν την εσωτερική δομή του δικτύου. Προτείνουν μία νέα διαδικασία εκπαίδευσης, την μέθοδο της οπισθοδιάδοσης (back-propagation), η οποία κατέληξε να είναι η πιο χρήσιμη σήμερα τεχνική εκπαίδευσης δικτύων. Η μέθοδος αυτή είχε συζητηθεί και από άλλους νωρίτερα, αλλά για πρώτη φορά το 1986 παρουσιάστηκε ολοκληρωμένα και με αυστηρό μαθηματικό τρόπο.

Από το 1985 και μετά αρχίζουν τα πρώτα συνέδρια που είναι αφιερωμένα αποκλειστικά σε νευρωνικά δίκτυα, από την American Physical Society και από την IEEE. Ταυτόχρονα δημιουργούνται ειδικές επαγγελματικές εταιρίες νευρωνικών δικτύων με χιλιάδες μέλη, όπως η International Neural Network Society με τρεις πόλους: Αμερική (με διευθυντή τον Grossberg), Ευρώπη (Kohonen) και Ιαπωνία (Amari).

Προς τα τέλη της δεκαετίας του ογδόντα παρουσιάζονται τουλάχιστον πέντε νέα περιοδικά αφιερωμένα αποκλειστικά στα νευρωνικά δίκτυα, ενώ πριν λίγα χρόνια δεν υπήρχε ούτε ένα. Μετά το 1990, εκδίδονται και άλλα 3-4 νέα, με συνέπεια να υπάρχουν σήμερα περίπου 10 επιστημονικά περιοδικά αφιερωμένα στα νευρωνικά δίκτυα. Πολύ σημαντικό είναι επίσης το γεγονός ότι τα τελευταία δεκαπέντε χρόνια δημιουργήθηκαν και οι πρώτες μικρές εμπορικές εταιρίες οι οποίες ασχολούνται αποκλειστικά με νευρωνικά δίκτυα. Βρίσκονται σχεδόν όλες στις ΗΠΑ και παράγουν εξειδικευμένα προγράμματα για την λύση συγκεκριμένων προβλημάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΚΑΙ Η ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ TAGUCHI

2.1 ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΝΑΓΚΗ ΓΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΟΛΙΚΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ (ΔΟΠ)

Το κλειδί για την ανταγωνιστική θέση μιας επιχείρησης και την υπεροχή της στην Αγορά είναι η έγκαιρη εισαγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας στις κατάλληλες τιμές. Προς τούτο, κρίνεται απαραίτητη η κατάκτηση της μέγιστης δυνατής αποδοτικότητας και αποτελεσματικότητας στην έρευνα και την ανάπτυξη διεργασιών.

Στο πλαίσιο αυτό, η ποιότητα προϊόντων και υπηρεσιών κατέχουν πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάπτυξη, οπότε η *συνεχής βελτίωση* της ποιότητας πρέπει να αποτελεί επιδίωξη για κάθε επιχείρηση που ενδιαφέρεται να έχει μακροχρόνια και ηγετική ύπαρξη. Η συνεχής αυτή βελτίωση μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη λήψη προληπτικών μέτρων και τον έγκαιρο εντοπισμό τυχόν προβλημάτων στην παραγωγική διαδικασία. Τόσο η *επίτευξη* της ποιότητας, όσο και η *διατήρησή* της, αλλά και η *βελτίωσή* της δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν χωρίς τη χρήση Στατιστικών Μεθόδων σε όλη τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Επομένως, οι επιχειρήσεις πρέπει να επωφελούνται τα μέγιστα από τα εργαλεία που προσφέρει η επιστήμη της Στατιστικής σε κάθε στάδιο των διεργασιών τους.

Η φιλοσοφία που επιζητεί τη συνεχή βελτίωση στην ποιότητα εκτέλεσης όλων των διεργασιών, προϊόντων και υπηρεσιών, σε μια επιχείρηση ονομάζεται Διοίκηση Ολικής Ποιότητας (ΔΟΠ) (*Total Quality Management - TQM*). Σύμφωνα με αυτή τη φιλοσοφία “η διοίκηση πρέπει να κατευθύνει και το εργατικό δυναμικό να ενεργεί με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας σε κάθε επίπεδο λειτουργίας της επιχείρησης”. Η στρατηγική της ΔΟΠ αποσκοπεί στη συνεχή ικανοποίηση των απαιτήσεων του πελάτη, με ελαχιστοποίηση του κόστους.

Οι επιχειρήσεις με την ένταξη προγραμμάτων ΔΟΠ γίνονται ικανές στην:

1. Άντληση των αναγκών και επιθυμιών του πελάτη και της παροχής αυτών αμέσως μόλις ζητηθεί στο χαμηλότερο κόστος.
2. Αποτελεσματικότητα της εργασίας με την οποία καθορίζεται το επίπεδο κόστους.
3. Παροχή προϊόντων και υπηρεσιών υψηλής ποιότητας.
4. Καλύτερη λειτουργικότητα του προϊόντος, από τον ανταγωνισμό, λόγω καλύτερης ποιότητας.
5. Συμπόρευση με τις τεχνολογικές εξελίξεις καθώς και τις αλλαγές σε κοινωνικό και πολιτικό επίπεδο.
6. Ευελιξία ώστε νέα μοντέλα και θεωρίες να μπορούν να εφαρμοστούν για να προλαμβάνουν τις ανάγκες του πελάτη και τις τεχνολογικές εξελίξεις με μεγάλο βαθμό αξιοπιστίας.
7. Πρόβλεψη των τάσεων και των επιθυμιών του πελάτη.
8. Έγκαιρη παράδοση (delivery) του προϊόντος ή της υπηρεσίας, οπότε έτσι οι προσπάθειες ικανοποίησης του πελάτη να είναι πιο ολοκληρωμένη (integrated). [Λογοθέτης (σελ. 15, 1993)]

Τα βασικά αξιώματα/αρχές για την επιτυχία της ΔΟΠ είναι το τρίπτυχο:

1. Δέσμευση (ένα τεκμηριωμένο σύστημα διαχείρισης ποιότητας)
2. Επιστημονική γνώση (τεχνικές και εργαλεία διαχείρισης ποιότητας)
3. Συμμετοχή (ομαδική εργασία για την επίτευξη του στόχου)

Από τα τρία βασικά αξιώματα προκύπτουν οι κάτωθι επτά κύριες αρχές της ΔΟΠ:

1. Δέσμευση της ηγεσίας στις αρχές της ολικής ποιότητας.
2. Εφαρμογή της νέας φιλοσοφίας σε όλα τα τμήματα της επιχείρησης. Η νοοτροπία της συνεχούς βελτίωσης απαιτεί την αλλαγή συμπεριφοράς και εργασιακών πρακτικών.

3. Υπευθυνότητα σε βάθος:

Όλοι είναι υπεύθυνοι για την ποιότητα. Ο καθένας φέρει την ευθύνη της διατήρησης και της βελτίωσης των διαδικασιών για τις οποίες είναι υπεύθυνος και πρέπει να συμβάλει στην αλλαγή της νοοτροπίας. Στο περιβάλλον της ολικής ποιότητας συμμετέχουν επιπλέον οι προμηθευτές, οι πελάτες, οι επενδυτές, η τοπική κοινωνία.

4. Πρόληψη, όχι θεραπεία («μηδέν ελαττωματικά»):

Η ποιότητα πρέπει να ενσωματωθεί στην σχεδίαση των προϊόντων και των διαδικασιών παραγωγής. Ο εκ των υστέρων έλεγχος δεν αποκλείει την παραγωγή ακατάλληλων προϊόντων και την σπατάλη πόρων για τη διόρθωσή τους ή απόρριψή τους.

5. Συνεχής εκπαίδευση στη χρήση εργαλείων και μεθόδων βελτίωσης της ποιότητας:

Κατανόηση, ανεύρεση διακυμάνσεων ποιότητας και αποτελεσματική λήψη αποφάσεων με τη χρήση στατιστικών διαγραμμάτων. Εκπαίδευση και κατάρτιση των εργαζομένων στα εργαλεία και τις τεχνικές της ποιότητας.

6. Έλεγχος ανταγωνιστικότητας:

Η αποτελεσματικότητα του συστήματος θα πρέπει να οριοθετείται συνεχώς με βάση μία σειρά δεικτών απόδοσης, εσωτερικών και εξωτερικών.

Εξωτερικοί δείκτες: πως αντιλαμβάνονται τις βελτιώσεις στα προϊόντα οι πελάτες.

Εσωτερικοί δείκτες: αφορούν τη διαχρονική εξέλιξη των δεικτών ή την κατανομή τους στα διάφορα τμήματα.

7. Συνεχής βελτίωση:

Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται είναι γνωστή ως: PDCA
Plan – Do – Check – Act

Η ΔΟΠ ενσωματώνει πολλά από τα προγενέστερα αυτής συστήματα ποιότητας, όπως:

- Διασφάλιση Ποιότητα (Quality Assurance),
- Ποιοτικός Έλεγχος (Quality Control),
- Επιθεώρηση (Inspection)

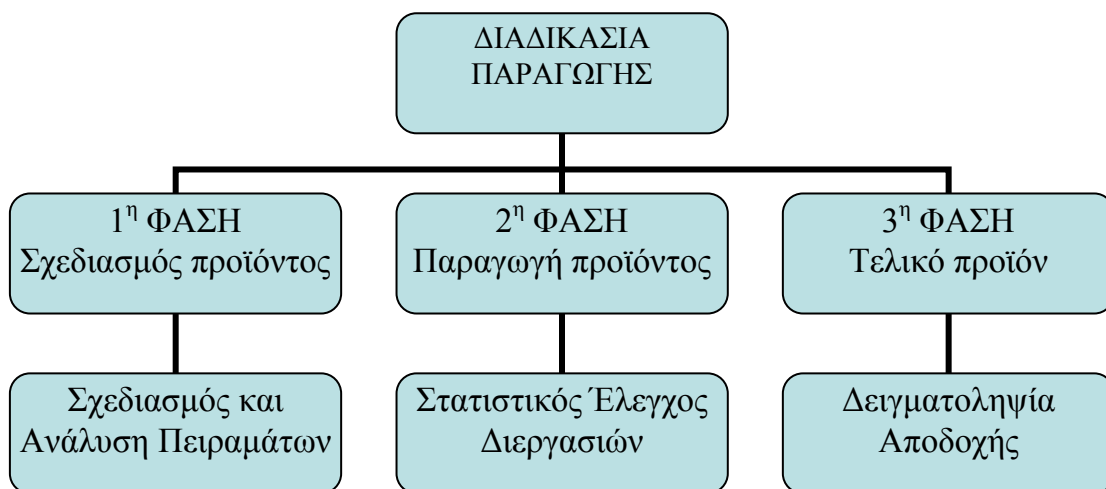
Επομένως, η Στατιστική θα πρέπει να αποτελεί στρατηγικό τομέα της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας, αφού κάθε Σύστημα Ποιότητας ορίζεται από ένα σύνολο στατιστικών μεθόδων ανάλυσης δεδομένων. Όλες αυτές οι στατιστικές

μέθοδοι εντάσσονται στο Στατιστικό Έλεγχο Ποιότητας (*Statistical Quality Control*). Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας αποτελεί την παλαιότερη και γνωστότερη μέθοδο ελέγχου παραγωγικών διεργασιών για τη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Ένας από τους βασικούς στόχους του είναι η έγκαιρη ανακάλυψη μη συμμορφωμένων με τις προδιαγραφές παραγόμενων προϊόντων, που σηματοδοτεί τη λήψη διορθωτικών ενεργειών για την απομάκρυνση των αιτιών που είναι υπεύθυνες για τις αποκλίσεις, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας αποτέλεσε τον προάγγελο της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας ή πιο εύστοχα ότι αποτελεί βασικό συστατικό της.

Μπορούμε να χωρίσουμε τις Στατιστικές μεθόδους που εφαρμόζει ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας σε τρία υποσύνολα που αντιστοιχούν στα τρία στάδια της παραγωγικής διαδικασίας:

- ❖ Σχεδιασμός και Ανάλυση Πειραμάτων (*Design of Experiments*)
- ❖ Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών (*Statistical Process Control*)
- ❖ Δειγματοληψία Αποδοχής (*Acceptance Sampling*)

Ο Σχεδιασμός και η Ανάλυση Πειραμάτων περιέχει όλες εκείνες τις στατιστικές τεχνικές οι οποίες μας βοηθούν στην ανακάλυψη της επίδρασης που έχουν τα διάφορα επίπεδα των παραγόντων (μεταβλητών), που επηρεάζουν τις ποιοτικές παραμέτρους του τελικού προϊόντος, και συνεπώς διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη βέλτιστη σχεδίαση της παραγωγικής διεργασίας. Ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών περιέχει στατιστικές τεχνικές που είναι απαραίτητες για τον έλεγχο της παραγωγικής διεργασίας κατά την διάρκεια της παραγωγής των προϊόντων. Η Δειγματοληψία Αποδοχής περιέχει στατιστικές τεχνικές (δειγματοληπτικές) που είναι απαραίτητες για να αποφασίσουμε αν μια συγκεκριμένη παρτίδα (σωρός) προϊόντων θα γίνει δεκτή ή θα απορριφθεί.



Εικόνα 1. Διάγραμμα φάσεων της παραγωγικής διαδικασίας

2.2 ΟΡΙΣΜΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ – ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Η ποιότητα αποτελούσε ανέκαθεν στόχο για κάθε παραγόμενο προϊόν ή υπηρεσία. Ιδίως στις μέρες μας είναι κοινά αποδεκτό ότι η ποιότητα αποτελεί ίσως το βασικότερο γνώμονα για την ανταγωνιστική υπεροχή μιας επιχείρησης. Άλλωστε, κάθε δυσαρεστημένος πελάτης απωθεί και πολλούς άλλους, ενώ κάθε ευχαριστημένος πελάτης διευρύνει τη φήμη της επιχείρησης και οδηγεί σε καλύτερα οικονομικά αποτελέσματα.



Εικόνα 2. Ανάγκη για εγγυημένη ποιότητα

2.2.1 ΣΤΑΔΙΑΚΗ ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΟΥ ΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Ο παλιός κλασικός ορισμός της ποιότητας δηλώνει ότι “Ποιότητα είναι η συμμόρφωση στις προδιαγραφές”. Η έννοια της ποιότητας εξελίχθηκε από μία απλή προσέγγιση ελέγχου, με άμεση αναφορά στο προϊόν και στις υπηρεσίες, σε μία έννοια πολύ ευρύτερη που ξεκινά από την ποιότητα του σχεδιασμού και του μηχανισμού παραγωγής των προϊόντων και της παροχής υπηρεσιών για να καταλήξει στην αξιολόγηση των ίδιων των επιχειρήσεων καλύπτοντας όλο το φάσμα των επιμέρους επιχειρηματικών λειτουργιών. Η ποιότητα αποτελεί σήμερα μία νέα φιλοσοφία μάλιστα που συμπεριλαμβάνει τη συνεχή αναζήτηση και προσπάθεια για βελτίωση όλων των τμημάτων της παραγωγής μέχρι και το τελικό προϊόν ή υπηρεσία. [Tenner και De Toro, 1992]

Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζεται η εξέλιξη της έννοιας της Ποιότητας μέσα από τους ορισμούς που δόθηκαν σε αυτήν ανά καιρούς.

Juran (1950)	Ποιότητα για ένα είδος (προϊόν / υπηρεσία) είναι η καταλληλότητά του προς χρήση.
Deming	Ποιότητα για ένα είδος (προϊόν / υπηρεσία) είναι η προβλέψιμη ομοιομορφία και αξιοπιστία του σε χαμηλό κόστος και η καταλληλότητά του για την Αγορά.

Crosby (1979)	Ποιότητα για ένα είδος (προϊόν / υπηρεσία) είναι η συμμόρφωσή του με τις απαιτήσεις/προδιαγραφές του.
Δερβιτσιώτης (1985)	Ποιότητα για ένα είδος (προϊόν / υπηρεσία) είναι η προσφερόμενη στον πελάτη αξία για την συνολική διάρκεια χρήσης, σε σχέση με το συνολικό οικονομικό και ψυχολογικό κόστος για τον κύκλο ζωής του είδους.
British Standards Institution	Ποιότητα είναι το σύνολο των ιδιοτήτων και των χαρακτηριστικών ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας, οι οποίες βασίζονται στη δυνατότητά του/της να ικανοποιήσει συγκεκριμένες εκφρασμένες ή λανθάνουσες ανάγκες.
ISO	Ποιότητα είναι το σύνολο των χαρακτηριστικών μιας οντότητας που της αποδίδουν την ικανότητα να ικανοποιεί εκφρασμένες και συνεπαγόμενες ανάγκες.
Linda Campbell, Διευθ. Σύμβουλος του UKAS. (1998)	Η ποιότητα δεν είναι κάτι απόλυτο, ούτε ένα πρότυπο που συνεχώς βελτιώνεται. Είναι η αντανάκλαση των προσδοκιών του ατόμου, οι οποίες με τη σειρά τους καθορίζονται από την κοινωνία και την κατάσταση του Έθνους σε μια δεδομένη στιγμή.

Πίνακας 1. Εξέλιξη του ορισμού της έννοιας της Ποιότητας

Είναι εμφανές ότι η στενή σχέση που είχε η έννοια της ποιότητα με το προϊόν γύρω στο 1950, έχει σήμερα διευρυνθεί σε μια έννοια διοίκησης με νέα στοιχεία που καθορίζουν την ανταγωνιστικότητα σε παγκόσμιο πλέον επίπεδο. Ο David Garvin (1998) λέει χαρακτηριστικά: *«Η ποιότητα είναι μια ασυνήθιστη γλιστερή έννοια, εύκολη να τη φαντασιείς, όμως πολύ δύσκολη να την ορίσεις».*

Ο Atkinson στο βιβλίο του The National Quality Campaign (1983), υποστήριξε ότι η έννοια της ποιότητας καθορίζεται ως το σύνολο των παρακάτω χαρακτηριστικών:

- Γνώση των αναγκών των πελατών.
- Σχεδιασμός και μελέτη (design) βάση των απαιτήσεων και αναγκών των πελατών.
- Κατασκευή/παραγωγή χωρίς ελαττώματα και σφάλματα.
- Αξιόπιστα υλικά και ακριβείς συναρμολογήσεις.
- Βεβαιωμένη/πιστοποιημένη απόδοση και ασφάλεια.
- Κατάλληλες μέθοδοι συσκευασίας.
- Έγκυρες και ακριβείς παραδόσεις.
- Αποτελεσματικές υπηρεσίες υποστήριξης.
- Ανάδραση/επαναπληροφόρηση των διαδικασιών παραγωγής.

Ιστορικά θα μπορούσαμε να διακρίνουμε τέσσερις (4) κύριες φάσεις στη διαδρομή της Ποιότητας και της Διοίκησης Ποιότητας γενικότερα:

- ❖ Επιθεώρηση Ποιότητας (Quality Inspection)
- ❖ Έλεγχο Ποιότητας (Quality Control)
- ❖ Διασφάλιση Ποιότητας (Quality Assurance)
- ❖ Διοίκηση Ολικής Ποιότητας (Total Quality Management)

[Μοροπούλου, 2005]

Η πρώτη οργανωμένη προσπάθεια για Έλεγχο Ποιότητας πραγματοποιείται κατά την Βιομηχανική Επανάσταση με τη μορφή Επιθεώρησης (18^{ος} αιώνας-Κεντρική Ευρώπη). Η Επιθεώρηση βασιζόταν στο δόγμα «Αποδοχή-Απόρριψη», γινόταν, δηλαδή, μια απλή σύγκριση των παραγόμενων προϊόντων ή υπηρεσιών με τις αντίστοιχες πρωτογενείς μορφές προδιαγραφών.

Το δεύτερο μεγάλο βήμα που έγινε προς την Ποιότητα έλαβε χώρα κατά τη διάρκεια και κυρίως μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου (1936-1945). Ο Ποιοτικός έλεγχος αποτέλεσε μια ανάγκη λόγω της έντονης βιομηχανικής παραγωγής πολεμικού υλικού. Σε αυτή τη φάση ο Έλεγχος Ποιότητας αποτελείται από ένα σύνολο λειτουργικών τεχνικών διαδικασιών που ελέγχουν την ποιότητα βάση συγκεκριμένων προδιαγραφών. Γίνεται, δηλαδή, ποιοτικός έλεγχος μετά το πέρας της παραγωγικής διαδικασίας και λαμβάνονται τα απαραίτητα μέτρα τόσο για τα τυχόν ελαττωματικά προϊόντα όσο για το σύνολο της παραγωγικής διαδικασίας.

Καθώς, όμως, αφενός οι απαιτήσεις των πελατών αυξάνονταν δραματικά κατά το δεύτερο μισό του 20ου αιώνα, αφετέρου ο Ποιοτικός Έλεγχος έως τότε εντόπιζε τα ελαττώματα κατασκευής ή σχεδιασμού αφού είχε παραχθεί το τελικό προϊόν ή υπηρεσία, ήταν αναγκαίο να περάσει η Ποιότητα σε ένα νέο, καινοτόμο στάδιο. Η επόμενη, λοιπόν, φάση στην εξελικτική πορεία της βελτίωσης της ποιότητας είναι η Διασφάλιση της Ποιότητας. Δηλαδή, το σύνολο των προγραμματισμένων ενεργειών και διαδικασιών που είναι απαραίτητες για να εξασφαλίσουν ότι ένα προϊόν ή υπηρεσία θα πληροί ορισμένες προδιαγραφές. Η έννοια της ποιότητας πλέον έχει μεταβεί στο στάδιο της πρόληψης των προβλημάτων στην πηγή, δηλαδή στη διαδικασία. Για να υπάρξει μια κοινή γλώσσα πάνω στο θέμα αυτό δημιουργήθηκαν από τον *Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης* (International Standards Organization I.S.O.) το 1987 ειδικές σειρές προτύπων που σχετίζονται με τη διασφάλιση της ποιότητας (ISO 9000).

Παρόλο που ο Έλεγχος Ποιότητας εξελίχθηκε με αλματώδη βήματα μέσα σε έναν αιώνα κανένα από τα παραπάνω στάδια δεν συνυπολογίζει το κόστος, τη δυναμική του διαθέσιμου προσωπικού όλων των επιπέδων, την ανάγκη για συνεχή βελτίωση. Οπότε, από το δεύτερο μισό του 20^{ου} αρχίζει αβίαστα να υιοθετείται μια διοικητική φιλοσοφία που έχει στόχο τη συνεχή βελτίωση τόσο της ποιότητας όσο και της αποτελεσματικότητας της ίδιας της επιχείρησης, η οποία ονομάστηκε Διοίκηση Ολικής Ποιότητας (ΔΟΠ). Η ΔΟΠ είναι το σύνολο των δραστηριοτήτων και μεθόδων που εφαρμόζονται από έναν οργανισμό με στόχο την ικανοποίηση του πελάτη. Η φιλοσοφία της ΔΟΠ προϋποθέτει την

ενεργοποίηση όλου του έμφυχου και άψυχου δυναμικού της επιχείρησης με το μικρότερο δυνατό κόστος.

Η ΔΟΠ σαν νέος τρόπος οργάνωσης των επιχειρήσεων, ξεκίνησε να εφαρμόζεται στην πράξη το 1949 από την Ένωση Ιαπώνων Επιστημόνων, οι οποίοι είχαν άμεσο στόχο τη βελτίωση της παραγωγικότητας. Η ενσωμάτωση της ΔΟΠ επιχειρήθηκε και στις ΗΠΑ, περίπου 30 χρόνια αργότερα και συγκεκριμένα στη δεκαετία του 1980. Λίγα χρόνια μετά άρχισε να εφαρμόζεται και στην Ευρώπη.

Η στατιστική έχει αναγνωριστεί εδώ και πολλά χρόνια για τον κεντρικό ρόλο που παίζει στη διαχείριση και τον έλεγχο της ποιότητας. Από την δεκαετία του 1920 εφαρμόζονταν στατιστικές τεχνικές στην General Electric από τον B. P. Dudding και στα Bell Laboratories από τους W. A. Shewhart, H. F. Dodge και H. G. Romig. Σημαντικό ορόσημο και απαρχή του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασίας (Statistical Process Control) αποτελεί η δημοσίευση του βιβλίου του Shewhart (1931).

Παρόλο που οι πρώτες στατιστικές εφαρμογές στον χώρο της ποιότητας αναπτύχθηκαν πριν τον πόλεμο στην Αγγλία και την Αμερική, η βιομηχανία της Δύσης έμεινε πολύ πίσω από την Ιαπωνική βιομηχανία στην γενικευμένη εφαρμογή στατιστικών μεθόδων για έλεγχο και βελτίωση της ποιότητας. Στη μεγάλη υπεροχή της Ιαπωνίας, τις πρώτες δεκαετίες μετά τον πόλεμο, συνέβαλε ο Αμερικανός Δρ. W. Edwards Deming, θεωρούμενος ως πατέρας της Διαχείρισης Ολικής Ποιότητας, και ο Ιάπωνας καθηγητής Genichi Taguchi.

"Today the ultimate goal of quality improvement is to design quality into every product and process and to follow up at every stage from design to final manufacture and sale. An important element is the extensive and innovative use of statistically designed experiments."
George Box, Soren Bisgaard, and Conrad Fung

2.2.2 ΟΙ ΠΡΩΤΕΡΓΑΤΕΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Θεωρητικοί της ποιότητας οι οποίοι οδήγησαν τη σκέψη σε νέα μονοπάτια και επηρέασαν με τις πρωτοποριακές τους ιδέες τη σύγχρονη αυτών, αλλά και τη μεταγενέστερη διοίκηση της ποιότητας είναι οι κάτωθι.

🚩 William Edwards Deming (1900 – 1993)

Ο Deming έχει χαρακτηριστεί «Πατέρας της ΔΟΠ». Προσεκλήθη το 1950 από την Ιαπωνία με σκοπό να βοηθήσει στην ανασυγκρότηση της κατεστραμμένης Ιαπωνικής Βιομηχανίας από το β' Παγκόσμιο Πόλεμο. Εκεί επί σειρά ετών δίδαξε σε κορυφαία διοικητικά στελέχη πως να βελτιώσουν το σχεδιασμό και την Ποιότητα των προϊόντων τους, καθώς και τις πωλήσεις τους, χρησιμοποιώντας κατά βάση Στατιστικές Μεθόδους. Βασική συνεισφορά του στον χώρο του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας είναι η έμφαση που έδωσε στην κατανόηση της σημασίας της μεταβλητότητας και στη διάκριση μεταξύ μεταβλητότητας κοινών αιτιών και μεταβλητότητας ειδικών αιτιών.

Ο Deming συνέβαλλε καταλυτικά στη φήμη που απέκτησε η Ιαπωνία για τα καινοτόμα, υψηλής ποιότητας προϊόντα της και την οικονομική της δύναμη. Ορίζει την ποιότητα ως τον αναμενόμενο βαθμό της ομοιομορφίας και αξιοπιστία με το χαμηλότερο κόστος, προσαρμοσμένο στις ανάγκες της αγοράς. Βασικός άξονας της φιλοσοφίας του Δρ. Deming ήταν ότι με την υιοθέτηση κατάλληλων αρχών από τη διοίκηση, οι επιχειρήσεις μπορούν να βελτιώσουν την Ποιότητα και συγχρόνως να μειώσουν τα κόστη. Για το σκοπό αυτό πρέπει να αποτελεί επιδίωξη η συνεχής βελτίωση και να γίνει συνείδηση όλων ότι *η παραγωγή αποτελεί ένα σύστημα και δεν αποτελείται από μικρά ανεξάρτητα συστήματα.*



Εικόνα 3. Κύκλος Ποιότητας του Deming

Πιο συγκεκριμένα, ο Δρ. Deming πίστευε ότι η βάση για την αλλαγή του παραδοσιακού τρόπου λειτουργίας των επιχειρήσεων πρέπει να είναι η υιοθέτηση των παρακάτω 14 αρχών:

1. Συνεχής και συνεπής προσπάθεια για τη βελτίωση των προϊόντων και υπηρεσιών.
2. Υιοθέτηση νέας φιλοσοφίας από τη διοίκηση.
3. Ανεξαρτητοποίηση του έτοιμου προϊόντος από την απλή επιθεώρηση. Η ποιότητα θα πρέπει να ενσωματώνεται στην παραγωγή.
4. Μείωση αριθμού προμηθευτών. Αγορές με βάση την στατιστική απόδειξη, όχι την τιμή.
5. Συνεχής έρευνα όσον αφορά τα προβλήματα του συστήματος παραγωγής και μελέτη των τρόπων και μεθόδων εξάλειψής τους.
6. Εισαγωγή και εγκαθίδρυση νέων μεθόδων εκπαίδευσης με βάση τις αρχές της Στατιστικής.
7. Αποτελεσματική ηγεσία και παροχή στους εργαζομένους όλων των απαραίτητων τεχνικών και εργαλείων για την αποτελεσματικότερη εκτέλεση των καθηκόντων τους.
8. Ελαχιστοποίηση του φόβου και ενθάρρυνση της αμφίδρομης επικοινωνίας.
9. Κατάργηση των διατμηματικών στεγανών και ενθάρρυνση της λύσης όλων των παρουσιαζόμενων προβλημάτων μέσω της ομαδικής εργασίας.
10. Ελαχιστοποίηση της χρήσης των αριθμητικών στόχων, των σλόγκαν και των διαφόρων πόστερ για την παρακίνηση του ανθρώπινου δυναμικού.
11. Χρήση στατιστικών μεθόδων για την συνεχή βελτίωση της ποιότητας και της παραγωγικότητας.
12. Κατάργηση των συστημάτων που αφαιρούν από τους εργαζόμενους την υπερηφάνεια για την εργασία τους και την μετατρέπουν σε υποχρέωση.
13. Εισαγωγή και εγκαθίδρυση συνεχών και σύγχρονων προγραμμάτων εκπαίδευσης του προσωπικού (ώστε να ενημερώνονται για τις τελευταίες εξελίξεις στα καθήκοντά τους).
14. Συμμετοχή όλων ανεξαιρέτως των στελεχών και υπαλλήλων στην προσπάθεια βελτίωσης της ποιότητας.

Για να καταφέρει η επιχείρηση να ενστερνιστεί μια νέα ποιοτική φιλοσοφία, ο Δρ. Deming πρότεινε το εξής πλάνο 7 βημάτων:

1. Αυστηρή εφαρμογή των παραπάνω 14 αρχών.
2. Θετική αλλαγή της ψυχολογίας της Ανώτατης Διοίκησης και μετάδοση αυτής σε όλο το προσωπικό του οργανισμού.
3. Αποσαφήνιση και παρουσίαση από τη διοίκηση στους εργαζομένους των λόγων για τους οποίους η αλλαγή στη φιλοσοφία και τον τρόπο λειτουργίας του οργανισμού είναι απαραίτητη.
4. Διαχωρισμός όλων των δραστηριοτήτων του οργανισμού σε φάσεις, και προσδιορισμός των εκάστοτε πελατών και προμηθευτών. Ορθολογική οργάνωση και λειτουργική σύνδεση των επιμέρους φάσεων για τη διασφάλιση της επίτευξης του κοινού επιδιωκόμενου στόχου.
5. Εφαρμογή του κύκλου του Deming.
6. Ομαδική εργασία σε όλα τα επίπεδα.
7. Πλήρως προσανατολισμένη στην ποιότητα οργανωτική δομή.

"What is a system? A system is a network of interdependent components that work together to try to accomplish the aim of the system. A system must have an aim. Without an aim, there is no system. The aim of the system must be clear to everyone in the system. The aim must include plans for the future. The aim is a value judgment. (We are of course talking here about a man-made system.)"

"They realized that the gains that you get by statistical methods are gains that you get without new machinery, without new people. Anybody can produce quality if he lowers his production rate. That is not what I am talking about. Statistical thinking and statistical methods are to Japanese production workers, foremen, and all the way through the company, a second language. In statistical control, you have a reproducible product hour after hour, day after day. And see how comforting that is to management, they now know what they can produce, they know what their costs are going to be."



- *"In God we trust; all others must bring data."*
- *"Experience by itself teaches nothing."*

Εικόνα 4. Ο Δρ. Edward Deming και αξιοσημείωτες διατυπώσεις του.

Ο Deming θα συνόψιζε τη φιλοσοφία του σε τρεις μόνο λέξεις:
«Ελαττώστε τη μεταβλητότητα».

✚ Joseph Moses Juran (1904 –2008)

Ο Juran υποστηρίζει ότι «η ποιότητα σχεδιάζεται και δεν είναι ποτέ τυχαία». Προτείνει ότι κάθε επιχείρηση που ενδιαφέρεται να στραφεί σε μια νέα φιλοσοφία με βασικό γνώμονα την Ποιότητα πρέπει να ακολουθήσει τα παρακάτω βήματα:

- Καθορισμός των πελατών στους οποίους στοχεύει να πουλήσει τα προϊόντα ή τις υπηρεσίες της η επιχείρηση.
- Πλήρης καταγραφή και αποσαφήνιση των αναγκών των πελατών.
- Μετάφραση των αναγκών στη γλώσσα της παραγωγικής διαδικασίας.
- Σχεδιασμός, ανάπτυξη και παραγωγή ενός προϊόντος με ανταγωνιστικό κόστος που θα ανταποκρίνεται πλήρως στις ανάγκες των πελατών.
- Εισαγωγή και εγκαθίδρυση συγκεκριμένης διαδικασίας παραγωγής.
- Προσθήκες και βελτιώσεις της διαδικασίας παραγωγής.
- Πιλοτική λειτουργία της διαδικασίας παραγωγής.
- Πραγματική εφαρμογή της διαδικασίας παραγωγής.

**Η ΤΡΙΛΟΓΙΑ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ JURAN:
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ → ΕΛΕΓΧΟΣ → ΒΕΛΤΙΩΣΗ**

Ο Juran, ο οποίος επικεντρώθηκε στην Διοίκηση, δούλεψε ανεξάρτητα από τον Deming, ο οποίος επικεντρώθηκε στη χρήση στατιστικών μεθόδων για τον Έλεγχο Ποιότητας. Οι δυο άνδρες, όμως, δραστηριοποιήθηκαν σχεδόν συγχρόνως και θεωρούνται οι πρωτεργάτες της επανάστασης της ποιότητας στην Ιαπωνία.

✚ Kaoru Ishikawa (1915 - 1989)

Ιάπωνας πανεπιστημιακός, ευρύτερα γνωστός στη Βόρεια Αμερική διότι εισήγαγε τα «διαγράμματα αιτίου αποτελέσματος», τα οποία χρησιμοποίησε ως βοηθητικά εργαλεία για την επίλυση προβλημάτων ποιότητας. Είναι ο πρώτος που εργάστηκε στην εφαρμογή και προώθηση των «κύκλων ποιότητας».

✚ Philip Crosby, (1926 - 2001)

Επιχειρηματίας που συνεισέφερε στη Διοικητική θεωρία και στις πρακτικές της Διοίκησης Ποιότητας. Ο Philip Crosby είναι ευρύτερα γνωστός για την φιλοσοφία του για τα «μηδέν λάθη», δηλαδή κανένα ελαττωματικό προϊόν. Συγκεκριμένα, ο Crosby πρότεινε ότι οι επιχειρήσεις θα πρέπει να εισάγουν στις παραγωγικές τους διαδικασίες προγράμματα με στόχο την επίτευξη «μηδέν λαθών» (zero defects). Είναι ο πρώτος που εισήγαγε τη θεωρία «κάνε το

σωστά με την πρώτη φορά». Προτείνει πρόγραμμα βελτίωσης που βασίζεται στα παρακάτω στάδια:

- Ενεργή συμμετοχή και δέσμευση της Ανώτατης διοίκησης σε όλη τη διάρκεια του προγράμματος βελτίωσης.
- Συνεχής επιμόρφωση και εκπαίδευση του ανθρώπινου δυναμικού.
- Μέτρηση του κόστους ποιότητας.
- Προσδιορισμός και καθιέρωση όλων των απαραίτητων διορθωτικών ενεργειών.
- Κατάρτιση δεικτών απόδοσης για κάθε λειτουργική διεργασία.
- Καθορισμός ρεαλιστικών στόχων.
- Προώθηση, προβολή και καθιέρωση της «ημέρας των μηδέν λαθών».
- Συγκρότηση συντονιστικής και επιβλέπουσας επιτροπής «μηδέν λαθών» και εγκαθίδρυση συστήματος επίλυσης προβλημάτων με ενεργή συμμετοχή όλων των εργαζομένων, που η εργασία τους επηρεάζεται από αυτά.
- Καθιέρωση τακτικών συμβουλίων και συνεχής παρακολούθηση προόδου.

✚ Armand Vallin Feigenbaum (1922):

Αμερικανός επιχειρηματίας και ειδήμων του Ελέγχου Ποιότητας. Η συνεισφορά του στη βελτίωση της Ποιότητας έγκειται στα παρακάτω σημεία:

- Ανέπτυξε την έννοια του «Ελέγχου της Ολικής Ποιότητας» και υποστήριξε ότι συνιστά το μόνο αποτελεσματικό σύστημα για την ανάπτυξη, τη διατήρηση και τη βελτίωση της ποιότητας, που πρέπει να ενσωματώσει κάθε επιχείρηση ώστε να καταφέρει να μειώσει τα κόστη και να φτάσει στη πλήρη ικανοποίηση του πελάτη.
- Ανέπτυξε την έννοια της «*ποιότητας από την πηγή*», στοχοποιώντας την πρόσθετη εργασία που διενεργείται για την διόρθωση λαθών.
- Θεωρεί ότι η ποιότητα του παρεχόμενου προϊόντος ή υπηρεσίας είναι κατά πολύ σημαντικότερη του ρυθμού παραγωγής.
- Θεωρεί ότι ευθύνη για την Ποιότητα φέρουν όλα τα μέλη της επιχείρησης.

✚ Genichi Taguchi (1/1/1924):

Μηχανικός και Στατιστολόγος που από το 1950 και έπειτα ανέπτυξε μια ρηξικέλευθη μεθοδολογία για την εφαρμογή της Στατιστικής στη βελτίωση της Ποιότητας προϊόντων και διεργασιών.



Εικόνα 5. Ο Δρ. Genichi Taguchi

Η φιλοσοφία του Taguchi βασίζεται στις αρχές διοίκησης του Deming και κυρίως στην τρίτη αρχή: «*Σταματήστε να εξαρτάστε από την επιθεώρηση για να πετύχετε την Ποιότητα*». Ο Deming και ο Taguchi κατάφεραν να διαμορφώσουν μια νέα φιλοσοφία στο χώρο της Ποιότητας που είναι γνωστή ως «*Στατιστική Σκέψη*». Τα βασικά συστατικά της νέας αυτής φιλοσοφίας είναι:

- Υπάρχει μεταβλητότητα⁸ σε όλες τις διεργασίες.
- Οι αιτίες της μεταβλητότητας μπορούν να διακριθούν σε «κοινές» και «ειδικές» αιτίες.
- Η κατανόηση της ιδιαίτερης φύσης των κοινών και των ειδικών αιτιών είναι το κλειδί για τη μείωση της μεταβλητότητας.
- Η μείωση της μεταβλητότητας είναι το κλειδί για τη βελτίωση της ποιότητας, την παραγωγικότητα και την κερδοφορία.

Quality simply means no variability or very little variation from target performance.
[Di Lorenzo, 1990]

Ο Deming κατάφερε να στέψει την προσοχή από τη μαζική εποπτεία στον Έλεγχο Διεργασίας, ενώ ο Taguchi έκανε ένα βήμα ακόμα πιο πίσω από την παραγωγή στο σχεδιασμό.⁹

Ο Taguchi ασχολήθηκε με το εκτός-διεργασίας στάδιο ελέγχου της ποιότητας. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας τις μεθόδους του Στατιστικού Σχεδιασμού και Ανάλυσης Πειραμάτων, ανέπτυξε μια τεχνική για την ποιοτική βελτίωση ενός προϊόντος ή των μέσων παραγωγής σε συνδυασμό με τη στατιστική ανάλυση της διασποράς τους με στόχο την ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας στο μικρότερο δυνατό κόστος.

⁸ **Μεταβλητότητα** σημαίνει η επίδραση κάποιων αιτιών στη διαδικασία παραγωγής οι οποίες δημιουργούν στατιστική μεταβολή του μέσου όρου των ποιοτικών χαρακτηριστικών της διαδικασίας σε μία νέα τιμή (μικρότερη ή μεγαλύτερη από την κανονική), με αποτέλεσμα η διαδικασία να ξεφύγει από τη σταθερή της πορεία και να βρίσκεται εκτός ελέγχου, παράγοντας έτσι ελαττωματικά αποτελέσματα. Ένα από τα αποτελέσματα της μεταβλητότητας είναι ότι σπάνια τα προϊόντα είναι πανομοιότυπα μεταξύ τους. Σε κάθε διαδικασία ανεξάρτητα από το πόσο καλά έχει σχεδιαστεί υπάρχει κάποιο ποσοστό μεταβλητότητας που οφείλεται σε φυσικά αίτια ή ακόμα και στο σύστημα μέτρησης.

⁹ Μπορούμε να αναφερόμαστε στον Έλεγχο Ποιότητας κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας ως «**Έλεγχος Εντός Διεργασίας**» (“on line quality control”), ενώ στις προσπάθειες για Έλεγχο Ποιότητας κατά το σχεδιασμό του προϊόντος και της παραγωγικής διαδικασίας ως «**Έλεγχος Εκτός Διεργασίας**» (“off line quality control”).

Η προσέγγιση του Taguchi επιτρέπει την εκτέλεση πειραμάτων και τον έλεγχο προτύπων χρησιμοποιώντας πολλούς παράγοντες συγχρόνως, ώστε το προϊόν ή η διεργασία να μην επηρεάζεται από τις συνθήκες παραγωγής ή άλλους ανεξέλεγκτους παράγοντες. Αυτό γίνεται εφικτό με τον Εύρωστο Σχεδιασμό του Taguchi που παρέχει ένα πιο αποτελεσματικό και οικονομικά αποδοτικό τρόπο για τη βελτίωση προϊόντων και παραγωγικών διαδικασιών. Αυτή η επαναστατική προσέγγιση αποτελεί μία από τις πιο σημαντικές καινοτομίες στο σχεδιασμό προϊόντων και διεργασιών από τότε που ξεκίνησε η Ποιοτική Επανάσταση.

Οι μέθοδοι του Taguchi αμφισβητήθηκαν από πολλούς Στατιστικολόγους της Δύσης, υποστηρικτές των κλασικών μεθόδων, αλλά έφεραν μια νέα εποχή στην Διαχείριση και τη Διοίκηση της Ποιότητας.

2.3 Η ΜΕΘΟΔΟΣ TAGUCHI

2.3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το πλήρες και περιεκτικό σύστημα για την Ποιότητα του Δρ. Genichi Taguchi αποτελεί ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα της Μηχανικής στον 20^ο αιώνα. Ο Taguchi αναγνωρίζεται ευρέως ως ηγετική μορφή του κινήματος των ΗΠΑ υπέρ της βιομηχανικής Ποιότητας. Πιστώνεται, επιπλέον, και την έναρξη του «Εύρωστου Σχεδιασμού» (Robust Design) στην Ιαπωνία πριν από περίπου 30 χρόνια.

Η φιλοσοφία του Taguchi άρχισε να σχηματοποιείται στις αρχές της δεκαετίας του '50, οπότε προσλήφθηκε να βοηθήσει στην ανασύνταξη του κατεστραμμένου τηλεφωνικού δικτύου στην μεταπολεμική Ιαπωνία. Εκεί ο Taguchi συνειδητοποίησε ότι οι παραδοσιακές τεχνικές που βασίζονται στην πειραματική μέθοδο «δοκιμή και λάθος» δεν ήταν επαρκείς για τον εντοπισμό προβλημάτων σχεδιασμού και έτσι ανέπτυξε, τελικά, τη δική του ολοκληρωμένη μεθοδολογία για το σχεδιασμό πειραμάτων. Η συστηματική και ευρεία εφαρμογή της άμεσης φιλοσοφίας του Taguchi, καθώς και το πλήρες σύνολο εργαλείων για τη λήψη αποφάσεων σχετικά με το σχεδιασμό της παραγωγικής διαδικασίας έχουν συμβάλλει σημαντικά στην ανάπτυξη της βιομηχανικής ισχύος της Ιαπωνίας και στην παραγωγή προϊόντων παγκόσμιας κλάσης με υψηλή ποιότητα και χαμηλό κόστος. Το 1982, το "American Supplier Institute" εισήγαγε τον Δρ. Taguchi και τις μεθόδους του στην Αμερικανική Αγορά. Από τότε, πολλές εταιρείες έχουν υιοθετήσει τις τεχνικές του και τη γενικότερη φιλοσοφία του.

Η φιλοσοφία του Taguchi για την Ποιότητα συνοψίζεται στα εξής:

- Η Ποιότητα πρέπει να σχεδιάζεται σε ένα προϊόν και όχι να επιθεωρείται σε αυτό. Η Ποιότητα μπορεί να σχεδιαστεί μέσω μιας διεργασίας που περιλαμβάνει το Σχεδιασμό του Συστήματος, το Σχεδιασμό Παραμέτρων και το Σχεδιασμό Ανοχών.
- Η Ποιότητα επιτυγχάνεται καλύτερα με την ελαχιστοποίηση της απόκλισης από το στόχο. Το προϊόν πρέπει να σχεδιάζεται έτσι ώστε να μην επηρεάζεται από ανεξέλεγκτους περιβαλλοντικούς ή συστηματικούς παράγοντες. Με άλλα λόγια, ο λόγος της ποιότητας του προϊόντος (signal) προς τους ανεξέλεγκτους παράγοντες (noise) πρέπει να είναι υψηλός.
- Το κόστος της ποιότητας θα πρέπει να μετριέται ως συνάρτηση της απόκλισης από τα πρότυπα. Όστε έτσι συντάσσεται η έννοια της απώλειας της ποιότητας.¹⁰

¹⁰ Επειδή ο παραγωγός είναι επίσης μέλος της κοινωνίας και επειδή η δυσαρέσκεια των πελατών θα αποθαρρύνει την υποστήριξη στο μέλλον, αυτό το κόστος στον πελάτη και την κοινωνία θα έρθει πίσω στον παραγωγό.

Ο Dr. Taguchi έχει κατακτήσει το πολυπόθητο «Βραβείο Deming» σε τρεις ξεχωριστές περιπτώσεις για τη συνεισφορά του στον τομέα του «Quality Engineering». Το 1986 κέρδισε το «Willard F. Rockwell Medal» για το συνδυασμό μεθόδων Μηχανικής και Στατιστικής ώστε να επιτύχει ταχεία βελτίωση στο κόστος και την ποιότητα βελτιστοποιώντας το σχεδιασμό του προϊόντος και τη διαδικασία κατασκευής του. Έλαβε, επίσης, το 1990 το «Blue Ribbon Award» από την Αυτοκρατορία της Ιαπωνίας για τη συνολική συνεισφορά του στη Βιομηχανία της χώρας. Η συνεισφορά του Δρ. Genichi Taguchi στη Βιομηχανική Στατιστική κρίνεται ηγεμονική.

Τα βασικότερα ίσως καινοτόμα επιτεύγματά του περί την Ποιότητα είναι τα ακόλουθα:

1. Η συνάρτηση απώλειας του Taguchi, που χρησιμοποιείται για την μέτρηση της οικονομικής απώλειας που προκαλείται εις βάρος της κοινωνίας λόγω της κακής Ποιότητας.
2. Η φιλοσοφία του off-line quality control που υποστηρίζει το σχεδιασμό ισχυρών προϊόντων και εύρωστων διεργασιών που δεν θα επηρεάζονται σημαντικά από τις παραμέτρους που δεν μπορούν να ελεγχθούν (“robust design”).
3. Καινοτομίες στο Στατιστικό Σχεδιασμό Πειραμάτων (“Statistical design of experiments”) και ιδίως η χρήση ενός εξωτερικού διανύσματος για τους παράγοντες που δεν μπορούν να ελεγχθούν, αλλά επηρεάζουν συστηματικά το πείραμα.

Η συνειδητοποίηση του γεγονότος ότι η μέση παραγωγή και η μεταβλητότητα της τελικής απόκρισης είναι εξίσου κρίσιμα ζητήματα αποτελεί μια τεράστια βελτίωση σε σχέση με την παραδοσιακή τεχνική της μηχανικής που λαμβάνει υπ’ όψη μόνο εάν το υπό εξέταση χαρακτηριστικό βρίσκεται εντός των ορίων προδιαγραφών ή όχι. Με την εφαρμογή της ιδέας αυτής, ο Taguchi κατάφερε να ασκήσει τεράστια επιρροή. Κάθε απόκλιση από τη βέλτιστη τιμή θεωρείται κακό, το μέγεθος της απόκλισης συνήθως μετριέται με μια τετραγωνική συνάρτηση απώλειας.

2.3.2 Η «ΠΟΙΟΤΗΤΑ» ΚΑΤΑ ΤΟΝ Δρ TAGUCHI

Ο Δρ. Taguchi προωθεί μια διαφορετική, πιο σφαιρική άποψη για την Ποιότητα. Σχετίζει την ποιότητα με το κόστος και τη χρηματική απώλεια, όχι μόνο για τον κατασκευαστή κατά το χρόνο της παραγωγής, αλλά και για τον καταναλωτή και την κοινωνία στο σύνολό της. Συγκεκριμένα θεωρεί την ποιότητα ως «την πρόκληση ελαχίστων απωλειών στο κοινωνικό σύνολο από την στιγμή που το προϊόν διατίθεται προς κατανάλωση».

Τι ορίζουμε, όμως, ως απώλεια και ποιος πληρώνει για αυτήν? Συνήθως σκεφτόμαστε την απώλεια ως πρόσθετο λειτουργικό ή κατασκευαστικό κόστος που προέκυψε μέχρι το προϊόν να είναι έτοιμο προς διάθεση στην Αγορά. Στη συνέχεια, η ίδια η κοινωνία, οι πελάτες, φέρουν το κόστος ή τη ζημία που οφείλεται στη κακή ποιότητα. Όταν ο πελάτης σταματήσει να ανέχεται αυτή την απώλεια, τότε ο κατασκευαστής σταματάει να δουλεύει. Πιο συγκεκριμένα, αρχικά ο κατασκευαστής πληρώνει το κόστος της εγγύησης. Αφού λήξει η περίοδος εγγύησης, ο πελάτης πρέπει να πληρώσει για την επισκευή του προϊόντος. Έμμεσα, όμως, ο κατασκευαστής είναι αυτός που τελικά θα πληρώσει τις συνέπειες της αρνητικής αντίδρασης των πελατών.

Ο Taguchi θεωρεί ως απώλεια και κόστη τα οποία συνήθως δεν συνυπολογίζονται, όπως:

- Παράπονα πελατών και γενική δυσαρέσκεια αυτών
- Χρόνος και χρήμα που έχουν ξοδευτεί από τους πελάτες.
- Απώλεια της πίστης και της αφοσίωσης των πελατών
- Κατεστραμμένη φήμη της επιχείρησης
- Ενδεχόμενη απώλεια του μεριδίου αγοράς

Οι παραπάνω μη υλικές απώλειες, καθώς και άλλες πιο χειροπιαστές απώλειες (επεξεργασία εκ νέου, πιθανά ελαττώματα, κατάρρευση χρονικού πλαισίου, επικαλύψεις καθηκόντων, κτλ) συνθέτουν το επίπεδο ποιότητας για ένα προϊόν ή μια διεργασία.

Μάλιστα, ο Taguchi υποστηρίζει ότι οι απώλειες, όπως αυτές αναφέρονται στον ορισμό του για την Ποιότητα, πρέπει να οριοθετηθούν σε δύο κατηγορίες:

1. Απώλειες λόγω της μεταβλητότητας της συνάρτησης
2. Απώλειες που οφείλονται σε επιβλαβείς ανεπιθύμητες διενέργειες.

Βασικός γνώμονας της Μεθοδολογίας Taguchi είναι ότι η Ποιότητα μετρείται σε χρήματα. Μάλιστα σε αντίθεση με τις προγενέστερες μεθόδους για τον Έλεγχο Ποιότητας, οι οποίες βασιζόνταν σε μάλλον αόριστες οικονομικές αρχές, η «χρηματική αποτίμηση» αποτελεί υποχρεωτικό γνώρισμα της Μεθόδου Taguchi.

Ο Δρ. Taguchi ισχυρίζεται ότι:

- Η 'ιδανική ποιότητα' αναφέρεται σε μια τιμή-στόχο για τον καθορισμό του επιπέδου ποιότητας.
- Η 'ιδανική ποιότητα' παρέχεται εάν ένα προϊόν/μια υπηρεσία εκτελεί την προβλεπόμενη λειτουργία του/της καθ' όλη τη διάρκεια της ζωής του/της υπό λογικές συνθήκες λειτουργίας, χωρίς βλαβερές παρενέργειες.
- Η 'ιδανική ποιότητα' είναι συνάρτηση της αντίληψης του καταναλωτή και της ικανοποίησής του.

Ολόκληρη η φιλοσοφία του Δρ. Taguchi συνοψίζεται σε μια μαθηματική έκφραση. Συγκεκριμένα, ο Taguchi χρησιμοποιεί μία εξίσωση δεύτερου βαθμού για την ποσοτικοποίηση των επιδράσεων των αποκλίσεων από την

τιμή στόχο, η οποία είναι γνωστή ως «Συνάρτησης Απώλειας Ποιότητας» (“Quality Loss Function”). Η Συνάρτηση Απώλειας εκφράζει ότι οποιαδήποτε απόκλιση από την τιμή στόχο οδηγεί σε τετραγωνική απώλεια στην ποιότητα ή στην ικανοποίηση των πελατών. Παρόλο που η συνάρτηση απώλειας εκφράζεται με έναν εύκολο μαθηματικό τύπο, παρέχει τόσο τα εννοιολογικά, όσο και τα ποιοτικά μέσα για να αποδείξει τις επιπτώσεις της διασποράς.

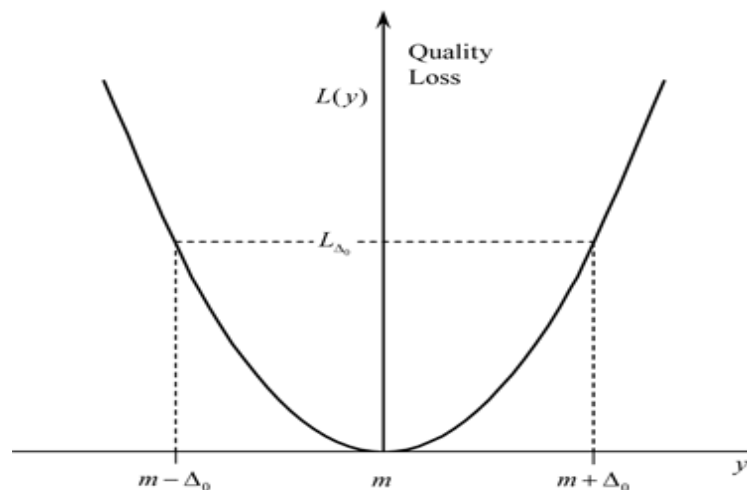
Ισχύει

$$L(y) = k \cdot (y - m)^2$$

όπου y = η απόδοση της υπό εξέτασης παραμέτρου του συστήματος,

m = η τιμή στόχος ή αλλιώς η ονομαστική τιμή για την y ,

k = σταθερά που εξαρτάται από τη διάρθρωση του κόστους για μια βιομηχανική διεργασία ή έναν οργανισμό.



Εικόνα 6. Η γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης απώλειας της Ποιότητας του Taguchi.

Παρατηρούμε τόσο από την τύπο της Συνάρτησης Απώλειας, όσο και από τη γραφική της παράσταση ότι κατέχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Για κάθε ποιοτικό χαρακτηριστικό ενός προϊόντος υπάρχει μια τιμή στόχος που η προσέγγισή της έχει ως αποτέλεσμα την ελάττωση της απώλειας.
- Η απώλεια πρέπει να είναι μηδενική όταν το υπό εξέτασιν ποιοτικό χαρακτηριστικό του προϊόντων ισούται με την τιμή στόχο.
- Το μέγεθος της απώλειας αυξάνεται γρήγορα (όχι γραμμικά) όσο το υπό εξέτασιν χαρακτηριστικό αποκλίνει από την τιμή στόχο.

- Αν $E(y) = m$, δηλαδή εάν η μέση τιμή του υπό εξέταση ποιοτικού χαρακτηριστικού συμπίπτει με την τιμή-στόχο, τότε

$$E[L(y)] = k \cdot \sigma^2, \quad \text{όπου } \sigma^2 = \text{Var}(y).$$

- Αν το χαρακτηριστικό είναι εκτός στόχου, τότε

$$E(y) = m + d \quad \text{και} \quad E[L(y)] = k \cdot (\sigma^2 + d^2).$$

Ο Taguchi προσδιόρισε τη συνάρτηση Απώλειας βασιζόμενος στο Θεώρημα του Taylor.¹¹ Συγκεκριμένα ισχύει:

$$L(y) = L(m) + L'(m)(y - m) + \frac{1}{2!} L''(m)(y - m)^2$$

όπου οι όροι με δυνάμεις του $L(m)(y - m)$ υψηλότερης τάξης από 2 παραλείπονται ως μη σημαντικοί.

Η $L(y)$ παίρνει την ελάχιστη τιμή της για $y = m$, οπότε $L'(m) = 0$.

Άρα $L(y) = L(m) + \frac{1}{2!} L''(m)(y - m)^2$, με $\frac{1}{2!} L''(m) = k$ σταθερά.

Αν, επιπλέον, η μέση τιμή της διεργασίας συμπίπτει με την τιμή στόχο, τότε ο όρος απώλειας $L(m)$ είναι ίσος με 0. Οπότε η συνάρτηση απώλειας παίρνει την τελική της μορφή:

$$L(y) = k \cdot (y - m)^2$$

¹¹ Έστω f μια (καλή) συνάρτηση και a ένα εσωτερικό σημείο του π.ο. της. Τότε για κάθε x κοντά στο a ισχύει:

$$\begin{aligned} f(x) &= P_n^a(x) + \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!} (x-a)^{n+1} \\ &= f(a) + \frac{f^{(1)}(a)}{1!} (x-a) + \dots + \frac{f^{(n)}(a)}{n!} (x-a)^n + \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!} (x-a)^{n+1} \end{aligned}$$

για κάποιο $c = c(x)$ στο ανοιχτό διάστημα που ορίζουν τα x και a .

Ο όρος $P_n^a(x)$ ονομάζεται Πολυώνυμο Taylor βαθμού n , κέντρου a για τη συνάρτηση f και ο όρος

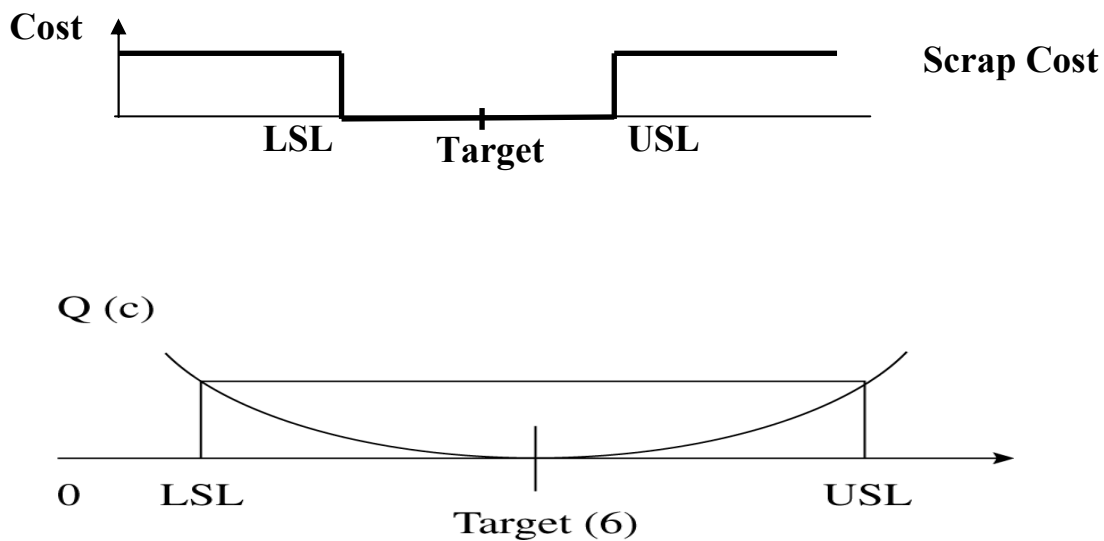
$$R_n^a(x) = \frac{f^{(n+1)}(c)}{(n+1)!} (x-a)^{n+1} \quad \text{λέγεται Υπόλοιπο Taylor βαθμού } n, \text{ κέντρου } a \text{ για την } f.$$

Το Θεώρημα Taylor δίνει μια έκφραση για το σφάλμα προσέγγισης της f από το $P_n^a(x)$.

Η συνάρτηση απώλειας έχει δυο βασικές πρακτικές εφαρμογές. Η πρώτη εφαρμογή σχετίζεται με τον υπολογισμό πιθανής εξοικονόμησης κόστους ως αποτέλεσμα της βελτίωσης που έχει επιτευχθεί από τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού της παραγωγικής διαδικασίας ή του ίδιου του προϊόντος. Σε αυτή την περίπτωση, η συνάρτηση απώλειας μπορεί να χρησιμοποιηθεί ανεξάρτητα από τη μέθοδο βελτίωσης της ποιότητας που έχει ακολουθηθεί. Η δεύτερη εφαρμογή είναι ο προσδιορισμός των ανοχών του κατασκευαστή και του προμηθευτή βάσει της αντίληψης του καταναλωτή για την ποιότητα. Σε αυτή την περίπτωση, η συνάρτηση απώλειας παρέχει έναν αντικειμενικό τρόπο για τον ορισμό των ορίων για τον έλεγχο των προϊόντων.

[Roy, *A primer on the Taguchi Method*, σελ 161-172]

Το παραδοσιακό μοντέλο για την απώλεια ποιότητας ορίζει ότι δεν υπάρχει απώλεια εντός του διαστήματος προδιαγραφών. Σύμφωνα με τη συνάρτηση απώλειας του Taguchi, όμως, η απώλεια ποιότητας είναι μηδενική μόνο όταν είμαστε στην τιμή στόχο. Η παρακάτω σχηματική σύγκριση του παραδοσιακού ορισμού της ποιότητας με τον ορισμό του Taguchi είναι χαρακτηριστική.



Όπου **LSL**=Lower Specification Limit, **USL**=Upper Specification Limit

Εικόνα 7. Σχηματική σύγκριση του παραδοσιακού ορισμού ποιότητας με τον ορισμό του Taguchi

Η τετραγωνική συνάρτηση απώλειας του Taguchi είναι η πρώτη λειτουργική σύνδεση του κόστους με τη μεταβλητότητα του προϊόντος, επομένως την ποιότητα, που επιτρέπει στους μηχανικούς να υπολογίζουν το βέλτιστο σχεδιασμό βασιζόμενοι στην ανάλυση κόστους και τον πειραματισμό [Teicholz, 1987].

Σύμφωνα με τον Δρ. Taguchi η βελτίωση της ποιότητας στο στάδιο του σχεδιασμού απαιτεί δυο βήματα:

1. Βελτιστοποίηση σχεδιασμού/ διεργασίας (συστηματική προσέγγιση).
2. Δημιουργία εύρωστου σχεδιασμού που δεν επηρεάζεται σημαντικά από μη ελεγχόμενους παράγοντες (robust design).

Ο Taguchi είναι υπέρμαχος του πειραματισμού πριν ξεκινήσει η παραγωγική διαδικασία (off-line-experimentation), σε αντίθεση με τις παραδοσιακές μεθόδους που υποστήριζαν τον πειραματισμό κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας (on-line or in-process experimentation).

Είναι σημαντικό να γίνει κατανοητή η σχέση της απόδοσης μακριά από το στόχο με την απώλεια ποιότητας. Προϊόντα με μικρότερη μεταβλητότητα έχουν μικρότερη απώλεια ποιότητας. Η συνάρτηση απώλειας της ποιότητας μεταφράζει ουσιαστικά τους ποιοτικούς όρους, που επηρεάζουν τον καταναλωτή, σε ποσοτικούς όρους, όπως οι νομισματικές αξίες. Ανάλογα με την κατάσταση, η συνάρτηση απώλειας της ποιότητας παίρνει τρεις μορφές:

1. Nominal-the-best (NTB)
2. Smaller-the-better (STB)
3. Larger-the-better (LTB)

2.3.3 ΒΗΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ TAGUCHI

Η μέθοδος του Taguchi είναι μια μέθοδος βελτιστοποίησης μιας διεργασίας/ενός προϊόντος που αποτελείται από έξι βασικά στάδια σχεδιασμού, διεξαγωγής και εκτίμησης αποτελεσμάτων μέσω πινακοποιημένων πειραμάτων ώστε να προσδιοριστεί ο βέλτιστος συνδυασμός των παραγόντων ελέγχου. Ο πρωταρχικός στόχος είναι η μεταβλητότητα του εξαγόμενου αποτελέσματος να βρίσκεται σε πολύ χαμηλά επίπεδα, παρόλη την παρουσία παραγόντων θορύβου στα δεδομένα εισαγωγής. Έτσι, η διεργασία/το προϊόν γίνονται εύρωστα έναντι κάθε πηγής μεταβλητότητας.

Η μεθοδολογία που πρότεινε ο Taguchi για το σχεδιασμό πειραμάτων με σκοπό τη συνεχή βελτίωση της ποιότητας αποτελείται από τις εξής φάσεις:

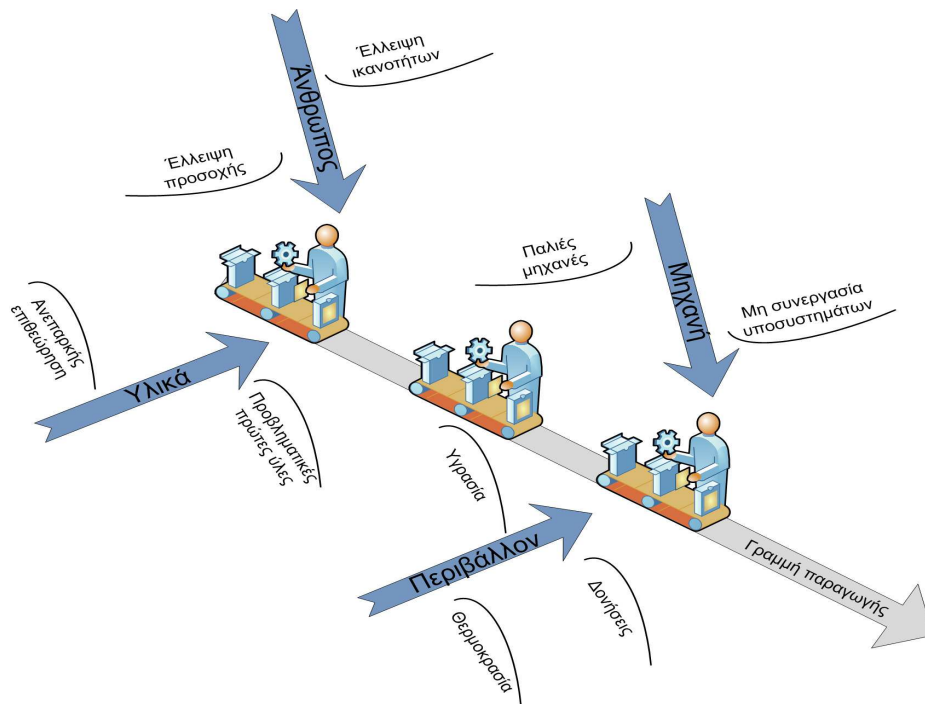
1. Ταυτοποίηση προβλήματος

- Εντοπίστε την πηγή του προβλήματος, όχι μόνο τα συμπτώματα.
- Καθορισμός του ποιοτικού χαρακτηριστικού που θέλουμε να βελτιστοποιήσουμε. Το ποιοτικό αυτό χαρακτηριστικό είναι μια παράμετρος της οποίας η μεταβλητότητα έχει κρίσιμη επίδραση στην ποιότητα του προϊόντος. Η παράμετρος αυτή χαρακτηρίζεται συνήθως ως *έξοδος* ή *μεταβλητή απόκρισης*.

2. Καταιγισμός ιδεών

- Στη φάση αυτή πρέπει να συμμετέχουν οπωσδήποτε ο επικεφαλής του προγράμματος και οι εργαζόμενοι σε αυτό. Μπορούν, επιπλέον, να συμμετέχουν διευθυντικά στελέχη της επιχείρησης και το τεχνικό προσωπικό.
- Σκοπός είναι ο προσδιορισμός των συνθηκών πειραματισμού και των κρίσιμων μεταβλητών για την ποιότητα του προϊόντος ή της υπηρεσίας υπό εξέταση. Ο Taguchi αναφέρει τις μεταβλητές αυτές ως *παράγοντες*.
 - Παράγοντες ελέγχου (Control factors) είναι οι μεταβλητές που μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν και να ελεγχθούν από τον ερευνητή. Οι παράγοντες ελέγχου διακρίνονται σε τρεις βασικές κατηγορίες:
 - A. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τα μέσα επίπεδα της εξεταζόμενης επίδοσης, οι οποίοι αναφέρονται ως παράγοντες σήματος (signal factors) ή παράγοντες ελέγχου του στόχου.
 - B. Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μεταβλητότητα της επίδοσης που αναφέρονται ως παράγοντες ελέγχου της μεταβλητότητας.
 - C. Οι παράγοντες που δεν επηρεάζουν ούτε τη μεταβλητότητα της απόκρισης ούτε τη μέση τιμή της, αλλά επηρεάζουν την τελική τιμή του προϊόντος που αναφέρονται ως παράγοντες κόστους.
 - Παράγοντες θορύβου (Noise factors) είναι οι μεταβλητές που επηρεάζουν το σύστημα, αλλά είναι δύσκολο ή και αδύνατο να ελεγχθούν. Οι μεταβλητές αυτές προκαλούν στατιστικές αποκλίσεις στις διαδικασίες και είναι υπεύθυνες για τη μεταβλητότητα στην τελική ποιότητα. Οι παράγοντες θορύβου διακρίνονται σε *εσωτερικούς* (εντός του συστήματος, π.χ. φθορά μηχανών, διαφορά πρώτων υλών, κ.α.) και *εξωτερικούς* (περιβαλλοντικοί παράγοντες κ.α.). Στόχος της μεθοδολογίας Taguchi είναι ο περιορισμός των επιπτώσεων του θορύβου.¹²

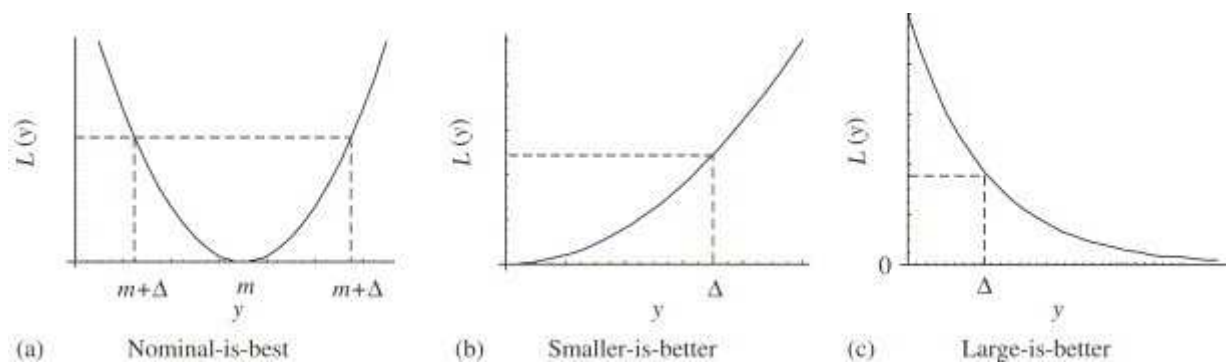
¹² Οι παράγοντες θορύβου δεν μπορούν να ελεγχθούν στο επίπεδο της παραγωγής. Συνήθως, όμως, είναι ελέγξιμοι στο επίπεδο της έρευνας ή της ανάπτυξης.



Εικόνα 8. Κοινές αιτίες φυσικής μεταβλητότητας

- Ορίζουμε διαφορετικά επίπεδα στους παράγοντες ώστε να εντοπίσουμε πιθανές αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων.
- Καθορισμός στόχων πειράματος:
 - **Less-the-better:** Να διατηρηθεί το επίπεδο των ελαττωματικών όσο το δυνατόν πλησιέστερα στο μηδέν.
 - **More-the-better:** Μέγιστος δυνατός αριθμός μονάδων χωρίς ελατώματα ανά μονάδα χρόνου ή ανά παρτίδα.
 - **Nominal-is-best:** Το αποτέλεσμα να είναι όσο το δυνατόν πλησιέστερα στην τιμή-στόχο.

Οι δυο πρώτες περιπτώσεις παρουσιάζονται από απλές μονότονες συναρτήσεις απώλειας. Για την Τρίτη περίπτωση ο Taguchi εισήγαγε την τετραγωνική συνάρτηση απώλειας, όπως έχει αναλυθεί παραπάνω, δεδομένου ότι η ολική απώλεια μετριέται ακριβώς από τη διακύμανση.



Εικόνα 9. Γραφική αναπαράσταση της συνάρτησης απώλειας ανάλογα με το στόχο του πειράματος,

3. Πειραματικός σχεδιασμός

- Στο βήμα αυτό σχεδιάζεται το πείραμα μέσω πινάκων και ορίζεται η μέθοδος για την ανάλυση των δεδομένων.
- Χρησιμοποιούνται εδώ τα επίπεδα παραγόντων και οι στόχοι όπως αυτά καθορίστηκαν στην παραπάνω φάση του καταγιγισμού ιδεών.
- Αρχικά επιλέγονται τα κατάλληλα ορθογώνια διανύσματα για τους παράγοντες ελέγχου και θορύβου για τη συγκεκριμένη μελέτη. Ο Taguchi παρέχει ένα πλήθος τυποποιημένων ορθογωνίων πινάκων και τις αντίστοιχες γραφικές τους παραστάσεις για το σκοπό αυτό. [Taguchi and Konishi, 1987].
- Στη συνέχεια πρέπει να καθοριστεί μια διαδικασία για την προσομοίωση της διακύμανση του ποιοτικού χαρακτηριστικού εξαιτίας των παραγόντων θορύβου. Προς τούτο, ο Taguchi πρότεινε έναν διασταυρωμένο σχηματισμό (crossed array).
- Πρέπει να λαμβάνεται μέριμνα για την επιλογή του αριθμού των δοκιμών, τις συνθήκες πειραματισμού, τον τρόπο μέτρησης των αποδόσεων, κλπ.

4. Διεξαγωγή πειράματος

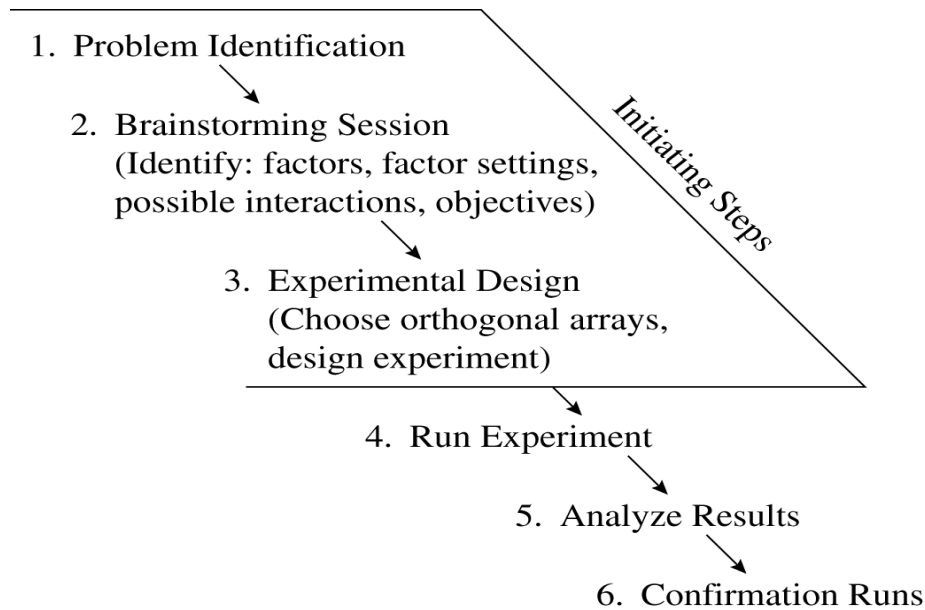
- Η μέθοδος Taguchi μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε κάθε περίπτωση όπου υπάρχει μια ελεγχόμενη διαδικασία. Η ελεγχόμενη διαδικασία μπορεί να είναι ένα πείραμα σε hardware, συστήματα μαθηματικών εξισώσεων ή έτοιμα πρότυπα που μπορούν να μοντελοποιήσουν κατάλληλα την απόκριση πολλών προϊόντων και διαδικασιών.

5. Ανάλυση

- Ο πειραματισμός ορίζει τα βέλτιστα επίπεδα για όλους τους παράγοντες.
- Διάφοροι αυστηροί τρόποι ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν, όπως Ανάλυση Διασποράς (ANOVA) ή Πολλαπλή Παλινδρόμηση (Multiple Regression), αλλά υπάρχουν και απλούστερες προσαρμοσμένες μέθοδοι.
- Για την ανάλυση των αποτελεσμάτων η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιεί ένα στατιστικό μέτρο απόδοσης που λέγεται signal-to-noise ratio (S/N ratio). Βάσει του S/N ratio μπορούν να προσδιοριστούν τα επίπεδα των παραγόντων ελέγχου που αντιμετωπίζουν αποτελεσματικότερα το θόρυβο. Στη απλούστερή του μορφή το S/N ratio είναι ο λόγος του μέσου (signal) προς την τυπική απόκλιση (noise). Η κατάλληλη μορφή του S/N ratio εξαρτάται βέβαια από το κριτήριο για το ποιοτικό χαρακτηριστικό που πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Το S/N ratio θα μελετηθεί λεπτομερώς στη συνέχεια.

6. Επιβεβαίωση πειράματος

- Τα αποτελέσματα πρέπει να επικυρωθούν από την εκτέλεση πειραμάτων με όλους τους παράγοντες στα «βέλτιστα» επίπεδα αυτών.



Εικόνα 10. Χαρακτηριστικό διάγραμμα ροής για τις φάσεις της Μεθοδολογίας Taguchi.

2.3.4. ΕΠΙΖΗΤΩΝΤΑΣ ΤΗ ΜΕΙΩΣΗ ΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ (ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΑΠΟ ΤΟ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟ)

Στις παραδοσιακές μεθόδους προσέγγισης της Ποιότητας χρησιμοποιούνται οι παρακάτω τεχνικές για βελτίωση:

- Δοκιμή και Λάθος (trial-and-error approach)
- Σχεδιασμός Πειραμάτων (Design of Experiments – DOE)

Η πρώτη μέθοδος αναφέρεται στο τελικό προϊόν και εφαρμοζόταν κατά την περίοδο της Επιθεώρησης.

Η δεύτερη μέθοδος εισήχθη από τον R. A. Fischer στην Αγγλία τη δεκαετία του 1920 και είναι ευρέως γνωστή ως «Παραγοντικοί Σχεδιασμοί» (“Factorial Design of Experiments”). Η μέθοδος αυτή αποτελείται από ένα σώμα στατιστικών τεχνικών για επαρκή συλλογή δεδομένων και διερευνά όλους τους συνδυασμούς των πιθανών καταστάσεων που μπορεί να προκύψουν σε ένα πείραμα από το συνδυασμό των διαφόρων παραγόντων και των σταθμών τους. Οι Παραγοντικοί σχεδιασμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο στη φάση του σχεδιασμού ενός προϊόντος, όσο και κατά τη διάρκεια της παραγωγής.

Η στατιστική μεθοδολογία στο Σχεδιασμού Πειραμάτων εξετάζει τη σχέση των δεδομένων εισόδου με τα δεδομένα εξόδου για ένα σύστημα και έχει ποικίλους στόχους, οι βασικότεροι των οποίων είναι:

- Η ταυτοποίηση των σημαντικών παραγόντων (ανεξάρτητων μεταβλητών) του πειράματος.
- Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του προϊόντος ή της διεργασίας.
- Επίτευξη ισχυρής απόδοσης.

Οι Παραγοντικοί και οι Κλασματικοί Παραγοντικοί Σχεδιασμοί¹³ είναι ευρέως χρησιμοποιούμενοι στον off-line quality control και ιδιαίτερα αποτελεσματικοί. Παρόλα αυτά, "πάσχουν" από του ακόλουθους περιορισμούς:

1. Τα πειράματα γίνονται ανυπόφορα' από άποψη κόστους και χρόνου όταν το πλήθος των μεταβλητών είναι μεγάλο.
2. Δυο σχεδιασμοί του ίδιου πειράματος μπορεί να δώσουν πολύ διαφορετικά αποτελέσματα.
3. Οι σχεδιασμοί συνήθως δεν επιτρέπουν τον προσδιορισμό της συνεισφοράς κάθε παράγοντα στο πείραμα.
4. Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων για μεγάλο αριθμό παραγόντων είναι συνήθως πολύ δύσκολη.
5. Η μέθοδος δεν επισημαίνει το βέλτιστο συνδυασμό των παραμέτρων.

Εν γένει, ο παραδοσιακός Σχεδιασμός Πειραμάτων επικεντρώνεται στο πώς επηρεάζουν οι παράγοντες σχεδιασμού τη μέση απόκριση της ποιότητας. Αντίθετα, στη φιλοσοφία του Taguchi η μεταβλητότητα είναι αυτή που κατέχει την κεντρική θέση. Σύμφωνα, λοιπόν, με τον Taguchi η μελέτη της διασποράς της απόδοσης ενός προϊόντος σε σχέση με το στόχο του έχει μεγαλύτερο ενδιαφέρον από τη μελέτη της μέσης απόκρισης.

Ο Δρ. Taguchi ανέπτυξε μια μέθοδο για το σχεδιασμό πειραμάτων που βασίζεται στο πως οι διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν το μέσο και τη διασπορά του υπό εξέταση χαρακτηριστικού. Η μέθοδος Taguchi προσφέρει ιδιαίτερος μειωμένη μεταβλητότητα στο πείραμα με το βέλτιστο συνδυασμό των παραγόντων ελέγχου. Ο πειραματικός σχεδιασμός που προτείνεται από τον Taguchi συνίσταται στη χρήση «Ορθογώνιων Σχηματισμών» ("Orthogonal Arrays" -OA) για την οργάνωση των παραμέτρων, που επηρεάζουν τη διεργασία, και των διάφορων επιπέδων αυτών (συνήθως κάθε παράγοντας έχει 2 ή 3 στάθμες). Τα 'Ορθογώνια διανύσματα' δίνουν τη δυνατότητα των λιγότερων δυνατών πειραμάτων.

¹³ Οι κλασματικοί παραγοντικοί σχεδιασμοί χρησιμοποιούνται όταν ο αριθμός των παραγόντων είναι αρκετά μεγάλος, οπότε και το μέγεθος του σχεδιασμού αυξάνει δραματικά. Τα κλασματικά παραγοντικά θεωρούν ότι οι αλληλεπιδράσεις μεγάλης τάξης είναι μη σημαντικές, οπότε εξετάζουν μόνο τις κύριες επιδράσεις και της αλληλεπιδράσεις μικρής τάξης. Οι κλασματικοί παραγοντικοί σχεδιασμοί χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο αφού παρέχουν ένα οικονομικό και αξιόπιστο τρόπο για τη μελέτη πολλών παραγόντων σε ένα πείραμα.

Παρόλα αυτά, η εφαρμογή των κλασματικών παραγοντικών χρήζει ιδιαίτερης προσοχής, αφού οπότε δεν τρέχουν όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί των επιπέδων των παραγόντων, εμπλέκονται κύριες επιδράσεις και αλληλεπιδράσεις. Έτσι, ο σχεδιασμός πρέπει να επιλέγεται, βάση της αναλυτικής του τάξης (**Resolution**), ώστε να εκτιμώνται καθαρά οι κύριες επιδράσεις και αλληλεπιδράσεις (κυρίως 2^{ns} τάξης).

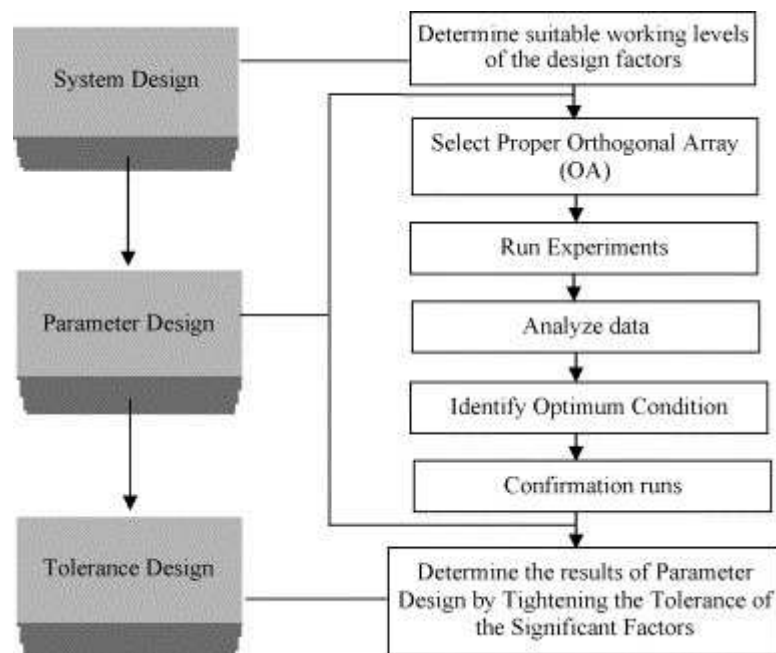
Παρόλο που η προσέγγιση του Taguchi χτίστηκε πάνω σε παραδοσιακές ιδέες του Σχεδιασμού Πειραμάτων, όπως η χρήση Παραγοντικού Σχεδιασμού, Κλασματικού Παραγοντικού Σχεδιασμού και Ορθογώνιων Αντιθέσεων, ο Taguchi δημιούργησε και πρότεινε νέες τεχνικές για το Σχεδιασμό Πειραμάτων, όπως τα Signal-to-Noise Ratios, τον Εύρωστο Παραμετρικό Σχεδιασμό και το Σχεδιασμό Ανοχών. Τα μέτρα απόδοσης του Taguchi βοηθούν στην ανάλυση των δεδομένων και την πρόβλεψη των βέλτιστων αποτελεσμάτων. Έτσι, η Μέθοδος Taguchi κατορθώνει τη συσχέτιση της μεθόδου DOE με τη βελτιστοποίηση των παραγόντων ελέγχου, με σκοπό τη βέλτιστη ποιότητα.

Η μέθοδος Taguchi χρησιμοποιείται ιδανικά για μέτριο αριθμό μεταβλητών (από 3 έως 50), μικρό αριθμό αλληλεπιδράσεων μεταξύ των μεταβλητών και όταν μόνο λίγες από τις μεταβλητές αυτές συνεισφέρουν σημαντικά στο πείραμα.

Ο Δρ. Taguchi για τη επίτευξη της επιθυμητής Ποιότητας θεωρεί σημαντικό τον έλεγχο που λαμβάνει χώρα εκτός γραμμής παραγωγής, τον οποίο έχει αναλύσει σε:

- Σχεδιασμός Συστήματος
- Σχεδιασμός Παραμέτρων
- Προσδιορισμός Ανοχών

Σκοπός της διαδικασίας αυτής είναι η μείωση της διασποράς των παρατηρήσεων που αναγνωρίζεται παγκόσμια ως το κλειδί για τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της παραγωγικότητας, δηλαδή έχει σκοπό των περιορισμό των επιπτώσεων των μεταβλητών θορύβου σε μια διεργασία.



Εικόνα 11. Βασικός κορμός της Μεθοδολογίας Taguchi

Σχεδιασμός συστήματος

Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη ενός συστήματος που λειτουργεί με μια αρχική δέσμη ονομαστικών συνθηκών/τιμών . Το σύστημα σχεδιάζεται βάση τεχνικών γνώσεων από την επιστήμη και τη μηχανική, της εμπειρίας του σχεδιαστή, των απαιτήσεων των καταναλωτών και των απαιτήσεων της διαδικασίας.

Παραμετρικός σχεδιασμός

Στο στάδιο αυτό επιχειρείται η μείωση ή η απομάκρυνση της επιρροής των παραγόντων θορύβου. Η επιρροή αυτή προσομοιώνεται κατά τη διάρκεια του πειράματος με τη συστηματική εναλλαγή των παραγόντων θορύβου σε κάθε ένα από τους διάφορους συνδυασμούς τιμών των υπό εξέταση ελεγχόμενων παραγόντων. Τώρα οι παράγοντες ελέγχου και οι παράγοντες θορύβου, οι οποίοι έχουν προσδιοριστεί κατά το σχεδιασμό του συστήματος, διακρίνονται σε σημαντικές και μη σημαντικές μεταβλητές και προσδιορίζονται τα βέλτιστα επίπεδα των παραγόντων ελέγχου ώστε το προϊόν ή η διεργασία να γίνουν εύρωστα σε σχέση με τους παράγοντες θορύβου.

Με άλλα λόγια, αφού έχει επιλεγεί η αρχιτεκτονική του συστήματος, στόχος πλέον είναι η επιλογή των βέλτιστων επιπέδων για τους παράγοντες ελέγχου ώστε το παραγόμενο προϊόν να είναι λειτουργικό, να ανταποκρίνεται επαρκώς σε ευρεία κλίμακα συνθηκών και να είναι εύρωστο/δυναμικό στους παράγοντες θορύβου που προκαλούν τη μεταβλητότητα.

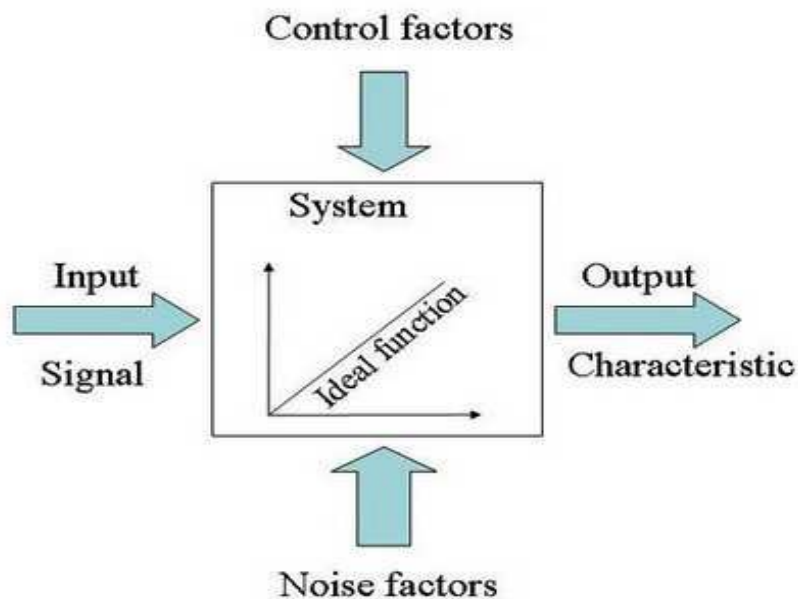
Προς τούτο επιδιώκεται η μείωση της μεταβλητότητας με την τροποποίηση των παραγόντων ελέγχου της μεταβλητότητας, ενώ συγχρόνως διατηρείται η απαιτούμενη μέση απόδοση με τη ρύθμιση των signal factors, ώστε ο σχεδιασμός γίνεται εύρωστος τόσο στον εσωτερικό, όσο και στον εξωτερικό θόρυβο.

Εύρωστος Σχεδιασμός σημαίνει ακριβώς ότι η λειτουργία του προϊόντος ή της διεργασίας δεν επηρεάζεται από τους παράγοντες θορύβου, όπως οι περιβαλλοντικές συνθήκες, η φθορά των μηχανημάτων, η διαφορά των πρώτων υλών κ.τ.λ..

Ο Εύρωστος Σχεδιασμός του Taguchi μπορεί να χωριστεί στην κλάση των στατικών χαρακτηριστικών και στην κλάση των δυναμικών χαρακτηριστικών.

Στο στατικό πρόβλημα γίνεται προσπάθεια ώστε το υπό εξέταση ποιοτικό χαρακτηριστικό να έχει τιμή όσο το δυνατόν πλησιέστερα σε μια ενιαία καθορισμένη τιμή-στόχο. Από την άλλη μεριά, το δυναμικό πρόβλημα αφορά καταστάσεις όπου η απόδοση ενός συστήματος εξαρτάται από έναν παράγοντα σήματος. Δηλαδή ένα σύστημα χαρακτηρίζεται δυναμικό όταν η τυπική απόκλιση s των αποκρίσεων του δεν είναι σταθερή, αλλά σχετίζεται με το μέσο. Το σύστημα είναι στατικού χαρακτηριστικού εάν ο παράγοντας σήματος

M είναι σταθερός, ενώ είναι δυναμικού χαρακτηριστικού εάν ο παράγοντας σήματος M είναι μεταβλητή.



Εικόνα 12. Το διάγραμμα των παραμέτρων για τον Εύρωστο Σχεδιασμό του Taguchi.

Οι Joseph και Wu (2002) περιέγραψαν στρατηγικές για την ανάλυση συστημάτων με *μη γραμμική εξάρτηση* του σήματος (M) με την απόκριση. Ο Taguchi αντιμετωπίζει τη μη γραμμικότητα ως λάθος και προσπαθεί να την ελαχιστοποιήσει μέσω της βελτιστοποίησης του λόγου του σήματος προς το θόρυβο (S/N ratio). Παρόλα αυτά, κάποια συστήματα σήματος-απόκρισης είναι εγγενώς μη γραμμικά και μπορούν να λειτουργήσουν σωστά μόνο με μη γραμμικές σχέσεις σήματος-απόκρισης. Επομένως, αναγκάζοντας τέτοια συστήματα να συμπεριφέρονται ως γραμμικά δεν θα οδηγηθούμε στις βέλτιστες λύσεις.

Ο Taguchi συνδύασε τη μέση απόδοση του συστήματος και τη μεταβλητότητα σε ένα ενιαίο μέτρο, το signal-to-noise ratios (S/N). Οπότε, για τον Taguchi ο στόχος είναι ο βέλτιστος συνδυασμός των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου ώστε να μεγιστοποιηθεί το κατάλληλο S/N ratio. Τα S/N ratio μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο για την προσέγγιση της δεδομένης τιμής-στόχος, όσο και για τη μείωση της μεταβλητότητας στο υπό εξέταση ποιοτικό χαρακτηριστικό.

Εάν ο Παραμετρικός Σχεδιασμός διεξαχθεί επιτυχώς, το τελικό σύστημα θα έχει μικρή μεταβλητότητα και τα όρια ανοχών που θα προκύψουν θα είναι αρκετά στενά.

Ο Παραμετρικός σχεδιασμός θα αναλυθεί εκτενέστερα στη συνέχεια.

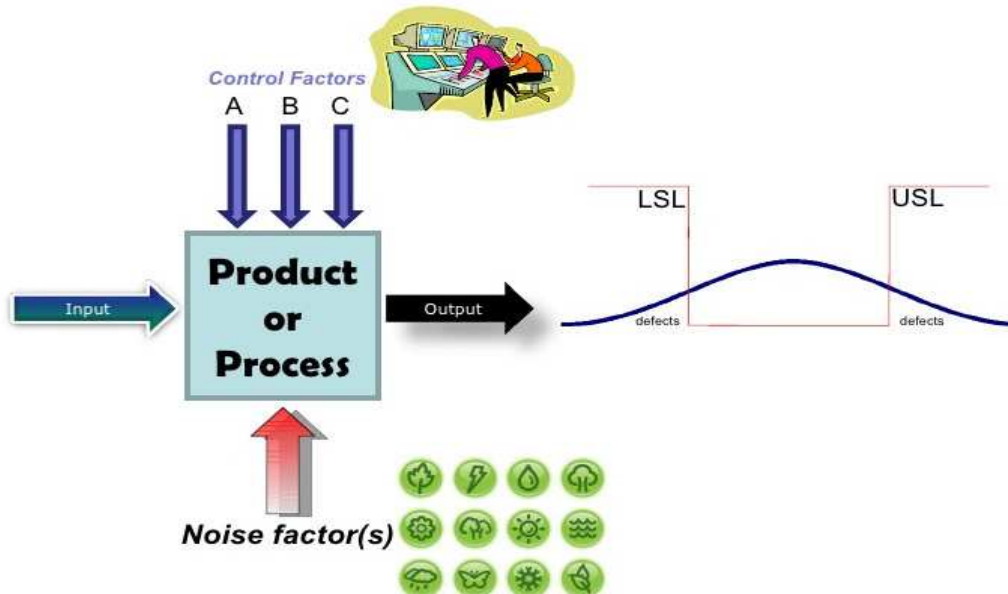
Σχεδιασμός ανοχών

Εάν ο παραμετρικός σχεδιασμός δεν κατορθώσει να απομακρύνει τις επιρροές των (εξωτερικών ή εσωτερικών) παραγόντων θορύβου, ο Taguchi συνιστά το Σχεδιασμό Ανοχών. Δίνεται στενότερο εύρος για τα όρια ανοχής των παραγόντων που η διακύμανσή τους προσδίδει μια μεγάλη αρνητική επίδραση στη μεταβλητότητα της εξόδου. Για να ανταποκριθεί το σύστημα σε αυτές τις αυστηρότερες προδιαγραφές, συνήθως απαιτούνται καλύτερα και πιο ακριβά εξαρτήματα και διεργασίες. Έτσι, ο Σχεδιασμός Ανοχών αυξάνει την παραγωγικότητα του συστήματος αλλά και τα λειτουργικά κόστη. [Phadke, 1989]

Η ιδέα της «ευρωστίας» σχετίζεται με την έννοια της «ανοχής». Δηλαδή, μια διαδικασία χαρακτηρίζεται «εύρωστη» όταν οι λειτουργίες που την απαρτίζουν είναι «ανεκτικές» (στεγανές) τόσο στις αναμενόμενες όσο και στις μη αναμενόμενες πηγές τυχαίας ή συστηματικής μεταβλητότητας.

2.4 ΕΥΡΩΣΤΟΣ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ

Robust Design



Εικόνα 13. Αναπαράσταση φάσεων εύρωστου παραγοντικού σχεδιασμού.

Η μέθοδος του Εύρωστου Παραμετρικού Σχεδιασμού (Robust Design) είναι κεντρικής σημασίας για τη βελτίωση της παραγωγικότητας, ιδίως από άποψη μηχανικής. Η μέθοδος αποτελεί πρωτοπορία του Δρ. Taguchi, εισήχθη μετά το τέλος του Δευτέρου Παγκοσμίου Πολέμου και έχει εξελιχθεί σημαντικά κατά τη διάρκεια των τελευταίων έξι δεκαετιών.

Λαμβάνοντας σοβαρά υπ' όψιν τους παράγοντες θορύβου και το κόστος αποτυχίας, ο Εύρωστος Σχεδιασμός βοηθά στο να διασφαλιστεί η ικανοποίηση του πελάτη. Ο Εύρωστος Σχεδιασμός επικεντρώνεται στη βελτίωση της θεμελιώδους λειτουργίας του προϊόντος ή της διαδικασίας μέσω ευέλικτων σχεδιασμών και χρησιμοποιώντας παράλληλα τη μηχανική. Αποτελεί, πράγματι, την πιο ισχυρή από τις διαθέσιμες μεθόδους για τη μείωση του κόστους παραγωγής και τη βελτίωση της ποιότητας, οπότε μειώνει αισθητά το χρόνο ανάπτυξης της επιχείρησης.

Ο Εύρωστος Παραμετρικός σχεδιασμός χρησιμοποιεί πέντε πρωταρχικά εργαλεία:

1. Ρ- Διάγραμμα (P-Diagram)

Χρησιμοποιείται για να ταξινομήσει τις μεταβλητές που σχετίζονται με το προϊόν σε παράγοντες θορύβου, παράγοντες ελέγχου, παράγοντες σήματος (είσοδος- input), και παράγοντες απόκρισης (έξοδος-output).

2. Ιδανική Συνάρτηση (Ideal Function)

Χρησιμοποιείται για να καθορίσει μαθηματικά την ιδανική μορφή της σχέσης σήματος-απόκρισης, όπως ενσαρκώνεται από την έννοια του σχεδιασμού, ώστε το σύστημα υψηλότερων επιπέδων να λειτουργεί τέλεια.

3. Τετραγωνική Συνάρτηση Απώλειας ή Συνάρτηση Απώλειας της Ποιότητας (Quadratic Loss Function or Quality Loss Function)

Χρησιμοποιείται για την ποσοτικοποίηση της απώλειας που υπέστη ο καταναλωτή αλλά και ολόκληρη η κοινωνία από την «κακή» ποιότητα, δηλαδή λόγω της μεταβλητότητας από τη τιμή στόχο για τη βέλτιστη λειτουργία.

4. Signal-to-Noise Ratio

Χρησιμοποιείται για την πρόβλεψη της ποιότητας μέσω εργαστηριακών πειραμάτων.

5. Ορθογώνια διανύσματα (Orthogonal Arrays)

Χρησιμοποιούνται για τη συλλογή αξιόπιστων πληροφοριών σχετικά με τους παράγοντες ελέγχου (παράμετροι σχεδιασμού) με ένα μικρό αριθμό πειραμάτων.

2.4.1 ΒΗΜΑΤΑ ΤΟΥ ΕΥΡΩΣΤΟΥ ΠΑΡΑΜΕΤΡΙΚΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

1. Διατύπωση/Σύνταξη προβλήματος

Στο βήμα αυτό περιλαμβάνονται ο προσδιορισμός της κύριας λειτουργίας, ο προσδιορισμός του P-diagram, ο καθορισμός της ιδανικής λειτουργίας και του S/N ratio και ο σχεδιασμός των πειραμάτων. Τα πειράματα περιέχουν συστηματικές εναλλαγές των παραγόντων ελέγχου, θορύβου και σήματος με τη χρήση ορθογώνιων αντιθέσεων. Αν η επίδραση ενός παράγοντα είναι γραμμική τότε θεωρούμε δυο στάθμες για τον παράγοντα αυτό, ενώ αν η επίδρασή του δεν είναι γραμμική θεωρούμε τρεις ή παραπάνω στάθμες του παράγοντα.

2. Συλλογή δεδομένων / Προσομοίωση

Τα πειράματα μπορούν να διεξαχθούν μέσω H/Y (in hardware) ή μέσω προσομοίωσης. Δεν είναι αναγκαίο για τα πειράματα να έχουμε ένα μοντέλο πλήρους κλίμακας του προϊόντος. Αρκεί, και μάλιστα είναι πιο σκόπιμο, να έχουμε ένα ουσιαστικό μοντέλο του προϊόντος που αποτυπώνει επαρκώς την έννοια του σχεδιασμού. Έτσι, τα πειράματα γίνονται πιο οικονομικά.

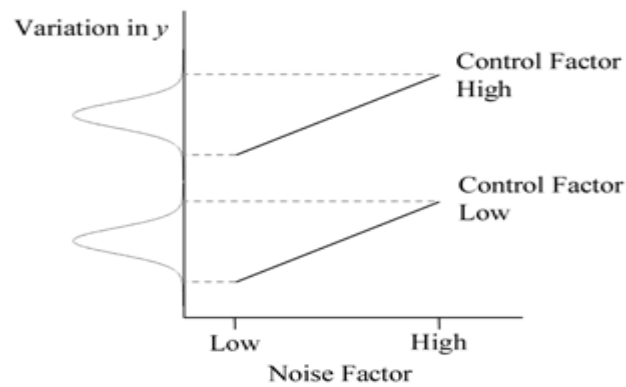
3. Ανάλυση των επιδράσεων των παραγόντων

Σε αυτό το βήμα υπολογίζονται οι επιδράσεις των παραγόντων ελέγχου και τα αποτελέσματα αναλύονται, ώστε να επιλεγεί η βέλτιστη ρύθμιση των παραγόντων αυτών.

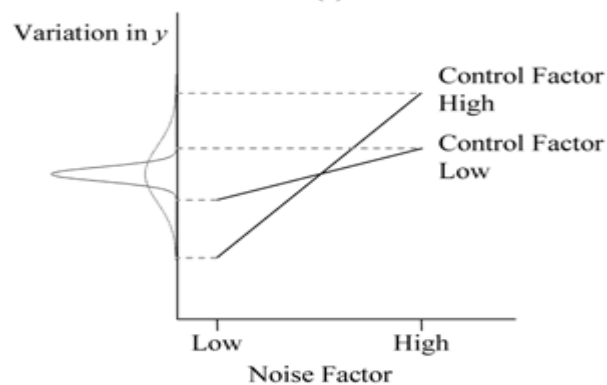
4. Πρόβλεψη / Επιβεβαίωση

Για να επικυρώσουμε τις βέλτιστες συνθήκες προβλέπουμε την απόδοση του σχεδιασμού του προϊόντος σύμφωνα με την αρχική τιμή και τις βέλτιστες ρυθμίσεις των παραγόντων ελέγχου. Στη συνέχεια, διεξάγουμε πειράματα επιβεβαίωσης υπό αυτές τις συνθήκες για να συγκρίνουμε τα αποτελέσματα με τις προβλέψεις. Εάν τα αποτελέσματα των πειραμάτων επιβεβαίωση συμφωνούν με τις προβλέψεις, τότε τα αποτελέσματα εφαρμόζονται. Σε αντίθετη περίπτωση, τα παραπάνω βήματα θα πρέπει να επαναληφθούν.

Εάν δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων ελέγχου και θορύβου, τότε δεν εφαρμόζεται ο εύρωστος παραμετρικός σχεδιασμός, αλλά ακολουθούνται κλασικές τεχνικές του Σχεδιασμού Πειραμάτων (DOE).



(a)



(b)

Εικόνα 14. Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων ελέγχου και θορύβου:
(a) Παρουσιάζει την περίπτωση όπου δεν υπάρχει τέτοια αλληλεπίδραση.
(b) Παρουσιάζει την περίπτωση όπου υφίσταται η αλληλεπίδραση.

2.4.2 ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΙ ΚΑΙ ΕΞΩΤΕΡΙΚΟΙ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΙ (*Inner and Outer Arrays*)

Η Μέθοδος Taguchi χρησιμοποιεί κατά βάση ορθογώνιους σχηματισμούς (Orthogonal Arrays) με παράγοντες σε 2 ή 3 στάθμες. Αν η επίδραση ενός παράγοντα είναι γραμμική τότε θεωρούμε δυο στάθμες για τον παράγοντα αυτό, ενώ αν η επίδρασή του δεν είναι γραμμική παίρνουμε τρεις στάθμες του παράγοντα.

Συγκεκριμένα, αν C_i είναι η επίδραση του παράγοντα i και η επίδραση αυτή είναι γραμμική, τότε ο παράγοντας i δοκιμάζεται στις στάθμες

$$m_i - s_i \quad \text{και} \quad m_i + s_i,$$

όπου m_i και s_i είναι αντίστοιχα η μέση τιμή και η τυπική απόκλιση της C_i .

Αν ο παράγοντας i έχει καμπυλόγραμμη επίδραση, τότε αυτός ελέγχεται σε τρεις στάθμες:

$$m_i - s_i \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}, \quad m_i, \quad m_i + s_i \cdot \sqrt{\frac{3}{2}}$$

Αφού προσδιοριστούν οι ελεγχόμενοι και μη ελεγχόμενοι παράγοντες και οι στάθμες τους, αντιστοιχίζεται σε κάθε έναν από αυτούς ένας κατάλληλος ορθογώνιος σχηματισμός.

[X. Κουκουβίνος, Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας, 2008]

Ο Taguchi μελέτησε την αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων ελέγχου και θορύβου χρησιμοποιώντας δύο πειραματικούς σχεδιασμούς- τον εσωτερικό πίνακα/σχηματισμό (*inner array*) και τον εξωτερικό πίνακα/σχηματισμό (*outer array*). Το εσωτερικό διάνυσμα είναι ουσιαστικά οποιοσδήποτε πειραματικός σχεδιασμός που χρησιμοποιείται για να μελετήσει την επίδραση των παραγόντων ελέγχου στην απόκριση. Στη συνέχεια ο Taguchi χρησιμοποίησε ένα εξωτερικό διάνυσμα για τους παράγοντες θορύβου ώστε σε κάθε ένα συνδυασμό αγωγών του εσωτερικού σχηματισμού να αντιστοιχίζονται όλοι οι συνδυασμοί αγωγών του εξωτερικού σχηματισμού.. Το αποτέλεσμα του παραπάνω πειραματικού σχεδιασμού ονομάζεται Διασταυρωμένος Σχεδιασμός (*crossed array*).¹⁴

¹⁴ Ο Διασταυρωμένος σχηματισμός δεν παράγει συνήθως έναν οικονομικό σχεδιασμό από άποψη εκτελέσεων. Υπάρχουν πιο οικονομικές προσεγγίσεις για το σχεδιασμό ενός πειράματος με ελεγχόμενους και μη ελεγχόμενους παράγοντες.

Συνήθως χρησιμοποιείται ο **Συνδυασμένος Σχηματισμός** (Combined Array) που βασίζεται στη Μέθοδο των Αποκριτικών Επιφανειών (Response Surface Methodology-RSM). Η λέξη Συνδυασμένος υπονοεί τη χρήση ενός μόνο σχηματισμού και για τους παράγοντες ελέγχου και για τους παράγοντες θορύβου.

Η **Μεθοδολογία Αποκριτικής Επιφάνειας** (RSM) είναι μια ακολουθιακή διαδικασία με σκοπό των προσδιορισμό των βέλτιστων συνθηκών λειτουργίας για ένα σύστημα. Οι σχεδιασμοί της RSM έχουν μεγάλη στατιστική αποτελεσματικότητα και απαιτούν πολύ λιγότερες εκτελέσεις από τους σχεδιασμούς του Taguchi. Φέρουν, όμως, πολλούς περιορισμούς.

Η χρήση ορθογωνίων σχεδιασμών μειώνει σημαντικά τον αριθμό των πειραματικών ρυθμίσεων που πρέπει να μελετηθούν, κυρίως όταν ο αριθμός των μεταβλητών είναι 'μεγάλος'. Επιπλέον, τα συμπεράσματα που προκύπτουν από τα μικρής κλίμακας πειράματα ισχύουν για όλη την πειραματική περιοχή που ορίζεται από τους παράγοντες ελέγχου και τα επίπεδά τους. [Phadke, 1989]

Οι ορθογώνιοι σχηματισμοί δεν χρησιμοποιήθηκαν πρώτη φορά από τον Taguchi, αλλά είχαν ανακαλυφθεί αρκετό καιρό πριν. Βασίζονται δε στους κλασματικούς παραγοντικούς σχεδιασμούς. Ο Taguchi, όμως, απλοποίησε τη χρήση τους παρέχοντας πινακοποιημένα σύνολα τυποποιημένων ορθογώνιων σχηματισμών και τα αντίστοιχα γραμμικά τους γραφήματα ώστε να επιλέγεται ο κατάλληλος σχηματισμός για κάθε έρευνα. [ASI, 1989; Taguchi and Konishi, 1987]. Παρακάτω απεικονίζεται ένας τυπικός ορθογώνιος σχηματισμός.

	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

Εικόνα 15. $L_9 (3^{4-2})$ Orthogonal Array

Στο σχηματισμό αυτό οι στήλες είναι αμοιβαία ορθογώνιες και για κάθε ζευγάρι στηλών λαμβάνουν χώρα εξίσου όλοι οι συνδυασμοί επιπέδων των παραγόντων. Εδώ υπάρχουν τέσσερις παράγοντες ο καθένας σε τρεις στάθμες. Ο σχεδιασμός αυτός καλείται 'L9', όπου το 9 δηλώνει το πλήθος των προτύπων που ελέγχονται (πλήθος γραμμών). Οπότε θα πραγματοποιηθούν εννέα πειραματικές δοκιμές για τη μελέτη των τεσσάρων παραγόντων, σε τρεις στάθμες έκαστος. Παρατηρούμε ότι ο συγκεκριμένος σχεδιασμός μειώνει τον αριθμό προτύπων προς εξέταση από $81(3^4)$ σε $9(3^{4-2})$.¹⁵

Έτσι η μέθοδος Taguchi μπορεί να μειώσει τα έξοδα έρευνας και ανάπτυξης βελτιώνοντας την αποτελεσματικότητα των παραγόμενων πληροφοριών, που απαιτούνται για το σχεδιασμό στιβαρών συστημάτων που δεν επηρεάζονται από εξωτερικούς παράγοντες. Ως αποτέλεσμα, οι σημαντικοί παράγοντες του σχεδιασμού που επηρεάζουν τη λειτουργία, την απόδοση και

¹⁵ Για τους μεγαλύτερους σχηματισμούς η εξοικονόμηση δοκιμών είναι πολύ μεγαλύτερη. Λόγου χάριν, χρησιμοποιώντας έναν 'L27' σχηματισμό, μπορούν να ελεγχθούν 13 παράγοντες σε 3 στάθμες ο καθένας με την εκτέλεση μόνο $27(3^{13-10} = 3^3)$ πειραμάτων αντί για $1.594.323(3^{13})$.

το κόστος μπορούν εύκολα να προσδιοριστούν και ο χρόνος ανάπτυξης να μειωθεί σημαντικά. Επιπλέον, η βέλτιστη επιλογή των παραμέτρων μπορεί να οδηγήσει σε ευρύτερες ανοχές, οπότε οι δαπάνες κατασκευής και λειτουργίας μπορούν επίσης να μειωθούν σημαντικά.

2.4.3 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΙΣ, όπως αντιμετωπίζονται από τον Taguchi

Για το σχεδιασμό εύρωστων προϊόντων/διεργασιών πρέπει αρχικά να γίνει ο διαχωρισμός των παραγόντων που επηρεάζουν το τελικό ποιοτικό αποτέλεσμα σε δυο κατηγορίες: στους παράγοντες ελέγχου (C) και στους παράγοντες θορύβου (N). Οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων αυτών μπορούν να χωριστούν σε τρεις κατηγορίες:

- ❖ Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων ελέγχου ($C \times C$),
- ❖ Αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγόντων ελέγχου και παραγόντων θορύβου ($C \times N$ - control-by-noise interactions) και
- ❖ Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων θορύβου ($N \times N$).

Ο στόχος του παραμετρικού σχεδιασμού είναι η κατάλληλη επιλογή των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου ώστε η ποιοτική απόκριση να επηρεάζεται το λιγότερο δυνατό από τους παράγοντες θορύβου και να μπορεί να προσαρμόζεται στο στόχο ανάλογα με την περίπτωση. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού αξιοποιούνται κατά κύριο λόγο οι $C \times N$ αλληλεπιδράσεις. Οι $N \times N$ αλληλεπιδράσεις έχουν ασήμαντο ρόλο στην επίτευξη της ευρωστίας έναντι των παραγόντων θορύβου.

Ποιος είναι ο ρόλος των $C \times C$ αλληλεπιδράσεων στην μείωση της ευαισθησίας της απόκρισης στον θόρυβο? Και αν, όντως, υπάρχουν $C \times C$ αλληλεπιδράσεις πως πρέπει να τις διαχειριστούμε? Τα ερωτήματα αυτά προσδιορίζουν την πηγή της έντονης αντιπαράθεσης περί της Μεθόδου Taguchi.

Ο τρόπος αντιμετώπισης των $C \times C$ αλληλεπιδράσεων από τον Taguchi έχει διαφορετική φιλοσοφία από την κλασσική προσέγγιση του Σχεδιασμού Πειραμάτων. Μάλιστα συχνά υποστηρίζεται ότι η προσέγγιση Taguchi παρέχει πληρέστερες πληροφορίες για τις αλληλεπιδράσεις από την τυπική προσέγγιση του κλασματικού παραγοντικού σχεδιασμού.

Για τον Taguchi η παρουσία μεγάλων $C \times C$ αλληλεπιδράσεων είναι τελείως ανεπιθύμητη.¹⁶ Επομένως γίνονται προσπάθειες να ελαχιστοποιηθούν ή και να εξαλειφθούν οι $C \times C$ αλληλεπιδράσεις μέσω της συνετής επιλογής των ποιοτικών χαρακτηριστικών, των παραγόντων ελέγχου και των επιπέδων τους και του S/N ratio. Στη συνέχεια χρησιμοποιούνται ορθογώνιου σχηματισμοί και «πειράματα επιβεβαίωσης» ώστε να ελεγχθεί η *προσθετικότητα*. Η κατάλληλη επιλογή των προαναφερθέντων ποσοτήτων συνήθως συνιστά το μεγαλύτερο μέρος της προσπάθειας για τη δημιουργία ενός εύρωστου σχεδιασμού. Εάν ο μηχανικός αδυνατεί να εξαλείψει τις $C \times C$ αλληλεπιδράσεις πρέπει να ερευνήσει διαφορετικούς σχηματισμούς για το πρόβλημα ή να αναλάβει το ρίσκο για την έναρξη μιας παραγωγικής διαδικασίας που βασίζεται σε ελαττωματικό σχεδιασμό. Δεν υπάρχουν άλλωστε κανόνες που μπορούν να εγγυηθούν την απουσία των $C \times C$ αλληλεπιδράσεων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί μόνο με τη μελέτη κάθε περίπτωσης χωριστά ή κάποιες φορές ακόμα και με τη χρήση «δοκιμής και λάθους». [Phadke, *A Panel Discussion*, Un. of Wisconsin, 1992]

Πολλοί από τους ορθογώνιους πίνακες, που ο Taguchi έχει υποστηρίξει ότι είναι κορεσμένοι πίνακες, δεν αφήνουν κανένα περιθώριο για εκτίμηση των αλληλεπιδράσεων. Αυτό αποτελεί ένα θέμα συνεχούς διαμάχης επί της Μεθόδου Taguchi.¹⁷ Ωστόσο, αυτό ισχύει μόνο για τους "παράγοντες ελέγχου" ή για τους παράγοντες του εσωτερικού σχεδιασμού (inner array). Με το συνδυασμό ενός εσωτερικού σχεδιασμού για τους παράγοντες ελέγχου με έναν εξωτερικό σχεδιασμό για τους παράγοντες θορύβου, η προσέγγιση Taguchi παρέχει «πλήρη ενημέρωση» για τις $C \times N$ αλληλεπιδράσεις.

Σύμφωνα με τον Taguchi οι $C \times N$ αλληλεπιδράσεις είναι οι πιο σημαντικές για την επίτευξη ενός σχεδιασμού στιβαρού έναντι της μεταβλητότητας των παραγόντων θορύβου. Συγκεκριμένα, ο Taguchi υποστηρίζει ότι αρκεί να υπολογίζονται οι κύριες επιδράσεις των παραγόντων ελέγχου και θορύβου και οι $C \times N$ αλληλεπιδράσεις. Η δομή των $C \times N$ αλληλεπιδράσεων καθορίζει τη φύση της ανομοιογένειας της διασποράς και χαρακτηρίζει τον παραμετρικό σχεδιασμό, αφού οι $C \times N$ αλληλεπιδράσεις μας βοηθούν να εντοπίσουμε ποιοι παράγοντες επηρεάζουν τη διασπορά και ποιοι το μέσο. Οπότε ανάλογα με το στόχο του πειράματος (μεγιστοποίηση ή ελαχιστοποίηση της

¹⁶ -Η παρουσία $C \times C$ αλληλεπιδράσεων συνήθως κάνει αναγκαία τη διεξαγωγή πολύ περισσότερων πειραμάτων απ' όσα θα διεξάγονταν εάν οι παράγοντες ελέγχου ήταν ανεξάρτητοι.

-Η παρουσία μεγάλων $C \times C$ αλληλεπιδράσεων δεν επιτρέπει το διαχωρισμό της διαδικασίας ποιοτικής βελτίωσης (σύστημα)σε στάδια μικρότερης έκτασης (υποσυστήματα) που μπορούν να διερευνηθούν ταυτόχρονα. Έτσι, υπάρχει αύξηση των λειτουργικών εξόδων και διεύρυνση του χρονικού ορίζοντα ανάπτυξης της επιχείρησης.

-Η παρουσία μεγάλων $C \times C$ αλληλεπιδράσεων οδηγεί σε λανθασμένες εκτιμήσεις και οι βέλτιστες συνθήκες κατά τον πειραματισμό στο εργαστήριο μπορεί να μην συμφωνούν με τις βέλτιστες συνθήκες κατά την παραγωγική διαδικασία ή τη χρήση του καταναλωτή.

¹⁷ Οι αλληλεπιδράσεις είναι μέρος του πραγματικού κόσμου. Στους σχεδιασμούς του Taguchi οι αλληλεπιδράσεις είναι μπερδεμένες και δύσκολα επιλύονται ή ερμηνεύονται.

απόκρισης) μπορούμε να επιλέξουμε τα κατάλληλα επίπεδα για τους παράγοντες ελέγχου και θορύβου.

Σύμφωνα με τη Μέθοδο Taguchi, μπορούμε να επιλέξουμε τα βέλτιστα επίπεδα για τους ελεγχόμενους παράγοντες αν θεωρήσουμε ότι δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ τους. Ο Taguchi σπάνια ή σχεδόν ποτέ εκτιμά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων ελέγχου ($C \times C$). Σε πολλές περιπτώσεις η μη ύπαρξη των αλληλεπιδράσεων αυτών μπορεί να θεωρηθεί μια σίγουρη υπόθεση. Υπάρχουν, όμως, και πολλές άλλες περιπτώσεις όπου οι $C \times C$ έχουν τεράστια επιρροή στο σύστημα και η μη αξιοποίηση τους οδηγεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα. [X. Κουκουβίνος, Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας, 2008]

(Παραδείγματα 2.7.4, 2.7.5 από βιβλίο X. Κουκουβίνος, Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας, 2008, σελ 226-233)

2.4.4 ΜΕΤΡΑ ΑΠΟΔΟΣΗΣ TAGUCHI

Ο Εύρωστος σχεδιασμός επιτυγχάνεται με την εφαρμογή μιας διαδικασίας λήψης αποφάσεων που περιλαμβάνει τρία στάδια:

1. Καθορισμός του στόχου
2. Καθορισμός εφικτών λύσεων και
3. Επιλογή της εφικτής λύσης που ανταποκρίνεται καλύτερα στο στόχο.

Μεγάλη ευρωστία σημαίνει μικρή μεταβλητότητα στην απόκριση, που συνεπάγεται μικρή ποιοτική απώλεια και μεγάλη ικανοποίηση του καταναλωτή.

Για την ποσοτικοποίηση της τρέχουσας μεταβλητότητας, προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό επίπεδο ποιότητας, ο Taguchi χρησιμοποίησε έναν ειδικό δείκτη ποιοτικής απόδοσης που ονομάζεται λόγος σήματος/θορύβου (**signal-to-noise ratio** or **S/N ratio** or **SNR**) και μετράται σε decibels (dB). Ο Taguchi διαπίστωσε ότι η διαδικασία βελτιστοποίησης που περιλαμβάνει τα SNR δίνει, πράγματι, εκείνον το συνδυασμό παραμέτρων με την ελάχιστη τυπική απόκλιση, ενώ διατηρεί τη μέση απόδοση στο στόχο.

$$\begin{aligned} S/N &= \frac{\text{Desired output}}{\text{Undesired output}} \\ &= \frac{\text{Effect of average}}{\text{Variability around the average}} \end{aligned}$$

Εικόνα 16. Ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο

Η ιδέα πίσω από το SNR εξηγείται μέσω της Συνάρτησης Απώλειας της Ποιότητας του Taguchi. Ο ίδιος ορίζει την ποιότητα ως την απώλεια που προκαλείται στην κοινωνία από τη στιγμή που το προϊόν αποστέλλεται προς τον πελάτη. Η απώλεια προκαλείται εξ' αιτίας της μεταβλητότητας που παρουσιάζει το υπό εξέταση λειτουργικό χαρακτηριστικό της ποιότητας σε σχέση με την επιθυμητή τιμή-στόχο. Η συμβατική προσέγγιση του Σχεδιασμού Πειραμάτων προσπαθεί να μεγιστοποιήσει τη λειτουργία στο στόχο. Στην προσέγγιση του Taguchi υποστηρίζεται ότι ίσως είναι προτιμότερο να έχουμε μια εύρωστη διαδικασία που δίνει καλά αποτελέσματα με συνέπεια σε σχέση με μια διαδικασία που δίνει θεωρητικά καλύτερα αποτελέσματα, αλλά, εξαιτίας της διακύμανσης, δίνει κατά μέσο όρο χειρότερα αποτελέσματα στην πράξη.

Το κριτήριο SNR αναγνωρίζει και μετρά τις αποκλίσεις από την ονομαστική τιμή και ενσωματώνει τις πληροφορίες αυτές σε ένα μέτρο [Taguchi et al., 1999]. Δηλαδή, για να επιτευχθεί η ευρωστία του σχεδιασμού, ο λόγος αυτός λαμβάνει υπόψη την αλληλεπίδραση μεταξύ της επιθυμητής τιμής (signal), στην οποία θέλουμε να φτάσουμε, και της ανεπιθύμητης μεταβλητότητας της τιμής αυτής (θόρυβος), την οποία θέλουμε να καταπολεμήσουμε.

Πολλοί άνθρωποι έχουν την εσφαλμένη αντίληψη ότι οι αλληλεπιδράσεις δεν λαμβάνονται σοβαρά υπ' όψιν στη μεθοδολογία του Taguchi. Ωστόσο, συμβαίνει το αντίθετο. Στην πραγματικότητα, ο Δρ. Taguchi θεωρεί ότι οι αλληλεπιδράσεις αποτελούν ένα από τα πιο σημαντικά ζητήματα στην προσέγγισή του. Μάλιστα, το κριτήριο S/N Ratio, που αποτελεί έναν δείκτη για την ευρωστία της ποιότητας, δείχνει το μέγεθος της αλληλεπίδρασης των "παραγόντων ελέγχου" με τους "παράγοντες του θορύβου". Επιπλέον, οι παράγοντες ελέγχου και οι παράγοντες θορύβου κατατάσσονται σε διαφορετικές ομάδες για τη μελέτη της ευρωστία, γεγονός που έρχεται σε αντίθεση με την παραδοσιακή προσέγγιση DOE, όπου δεν υπάρχουν διακρίσεις μεταξύ των παραγόντων ελέγχου και των παραγόντων θορύβου.

Υπάρχουν αρκετά χαρακτηριστικά απόδοσης και είναι σημαντικό να γίνει διάκριση μεταξύ αυτών κατά την αξιολόγηση της ποιότητας. Ως εκ τούτου, μια διαφορετική αναλογία S/N είναι απαραίτητη για κάθε χαρακτηριστικό απόδοσης. Για να βρει μια ισχυρή λύση στο εκάστοτε πρόβλημα, ο Taguchi ανέπτυξε περισσότερα από 70 S/N ratios, που χρησιμοποιούνται ανάλογα με το συγκεκριμένο είδος των χαρακτηριστικών που εμπλέκονται σε κάθε ποιοτική έρευνα. Μεταξύ αυτών, τρεις δείκτες απόδοσης είναι που χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον. Οι δείκτες αυτοί επιλέγονται ανάλογα με τη μορφή της βέλτιστης απόκρισης, δηλαδή ανάλογα με το αν θέλουμε:

1. η απόκριση να είναι η ελάχιστη δυνατή,
2. η απόκριση να είναι η μέγιστη δυνατή,
3. η απόκριση να βρίσκεται όσο το δυνατόν εγγύτερα στην τιμή-στόχο.

- ❖ Το κριτήριο για την ελαχιστοποίηση της απόκρισης αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως “smaller is better or less is better or lower is better” και είναι το εξής:

$$SNR_S = -10 \cdot \log \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}$$

Το κριτήριο αυτό χρησιμοποιείται για όλα τα ανεπιθύμητα χαρακτηριστικά για τα οποία η ιδανική τιμή είναι μηδέν. Επίσης, όταν η τιμή-στόχος είναι πεπερασμένη και έχει καθοριστεί το μέγιστο ή το ελάχιστο αυτής, η διαφορά μεταξύ των καταγεγραμμένων στοιχείων και των ιδανικών τιμών για τα υπό εξέταση χαρακτηριστικά πρέπει να είναι ελάχιστη. Στον υπολογισμό του SNR_S το άθροισμα με ως προς n υπονοεί την άθροιση των τιμών της απόκρισης των συνδυασμών αγωγών του εξωτερικού σχηματισμού.

Λόγω του μετασχηματισμού $-10 \log_{10}$ προσπαθούμε να μεγιστοποιήσουμε το SNR_S .

- ❖ Το κριτήριο για την μεγιστοποίηση της απόκρισης αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως “larger is better or higher is better or more is better” και είναι το εξής:

$$SNR_L = -10 \cdot \log \sum_{i=1}^n \frac{1}{\frac{y_i^2}{n}} = -10 \cdot \log \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^{-2} \cdot n}$$

όπου y_i το αποτέλεσμα n μετρήσεων για κάθε συνδυασμό ελεγχόμενων παραγόντων.

Το χαρακτηριστικό που έχει στόχο τη μεγιστοποίηση (larger-the-better) πρέπει να είναι μη αρνητικό και η επιθυμητή τιμή του να είναι το άπειρο. Χαρακτηριστικά όπως η θερμική απόδοση ή το ποσοστό των μη ελαττωματικών προϊόντων, που προκύπτουν από μια παραγωγική διαδικασία, έχουν μέγιστη τιμή το 1 (100%) και, έτσι, παρόλο που ζητάμε τη μεγιστοποίησή τους, αυτά δεν είναι χαρακτηριστικά larger-the-better. Από την άλλη μεριά, η δύναμη, η αντοχή, η απόδοση είναι larger-the-better χαρακτηριστικά αφού η τιμή-στόχος για αυτά είναι οι μεγαλύτερες δυνατές τιμές τους. Το κριτήριο LTB έχει ως στόχο το άπειρο. [Taguchi’s Quality Engineering Handbook (Taguchi et al., 2004)]

Και σε αυτήν την περίπτωση προσπαθούμε να μεγιστοποιήσουμε το SNR_L .

- ❖ Το κριτήριο που χρησιμοποιείται όταν ζητάμε η απόκριση να είναι όσο το δυνατόν πιο κοντά στην τιμή-στόχο αναφέρεται στη βιβλιογραφία ως “nominal is better” και είναι το εξής:

$$SNR_T = 10 \cdot \log \left[\left(\frac{\bar{y}}{s} \right)^2 \right]$$

Αυτός ο δείκτης απόδοσης χρησιμοποιείται όταν επιθυμούμε η απόκριση να βρίσκεται όσο το δυνατόν εγγύτερα στην τιμή-στόχο. Σε αυτή την περίπτωση η ανάλυση που προτείνει η Μέθοδος Taguchi έχει διπλό στόχο: να συγκεντρώσει κάποια χαρακτηριστικά γύρω από μια τιμή-στόχο και να ελαττώσει τη διακύμανση γύρω από αυτήν την τιμή.

Για όλες τις παραπάνω περιπτώσεις επιδιώκεται η μεγιστοποίηση του επιλεγμένου SNR, οπότε η επίδραση του σήματος είναι πολύ μεγαλύτερη από την επίδραση του θορύβου, γεγονός που είναι προϋπόθεση για την κατασκευή ισχυρών διαδικασιών και στιβαρών προϊόντων.

Όπως προαναφέρθηκε, η τιμή του SNR για δεδομένη απόκριση οδηγεί στο βέλτιστο συνδυασμό των επιπέδων των παραγόντων ελέγχου, επιτρέποντας έτσι τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων των ανεξάρτητων μεταβλητών και τη μείωση της επιρροής των παραγόντων θορύβου με συνακόλουθη ποιοτική βελτίωση του προϊόντος/της διεργασίας. Χρησιμοποιώντας, λοιπόν, τον δείκτη απόδοσης S/N, η προσέγγιση του Taguchi μπορεί να προσφέρει κατάλληλες πληροφορίες για κάθε απόκριση που πρέπει να βελτιστοποιηθεί. Ωστόσο, δεν μπορεί να προσφέρει μια συγκεκριμένη και επαρκή μαθηματική λύση για την ταυτόχρονη βελτιστοποίηση πολλών χαρακτηριστικών σε ένα προϊόν ή μια διαδικασία.¹⁸

Η προσέγγιση Taguchi αποτελείται ουσιαστικά από δύο μοντέλα, ένα μοντέλο θέσης και ένα μοντέλο διασποράς.

- Το μοντέλο θέσης είναι ένα υπόδειγμα παλινδρόμησης για τη μέση τιμή της απόκρισης σε κάθε συνδυασμό του εσωτερικού πίνακα. Ο σκοπός της χρήσης του μοντέλου θέσης είναι να φέρει την απόκριση στο στόχο της, ανεξάρτητα από το αν αυτή είναι μια τιμή-στόχος, μια μέγιστη τιμή ή μια ελάχιστη τιμή. Αυτό γίνεται εντοπίζοντας τις σημαντικές επιδράσεις και χρησιμοποιώντας, στη συνέχεια, τις εκτιμήσεις ελαχίστων τετραγώνων των αντίστοιχων συντελεστών για την

¹⁸ Σε περίπτωση που πολλαπλές απαντήσεις πρέπει να βελτιστοποιηθούν, η τεχνική του Taguchi ενισχύεται/συμπληρώνεται με τη μεθοδολογία αποκριτικής επιφάνειας (RSM).

Η RSM είναι μια ομάδα στατιστικών και μαθηματικών τεχνικών ιδιαίτερα χρήσιμων για τη μοντελοποίηση και την ανάλυση προϊόντων και διεργασιών, που επιτρέπουν την ποσοτικοποίηση της σχέσης μεταξύ των ελεγχόμενων παραγόντων των δεδομένων εισόδου και της προκύπτουσας αποκριτικής επιφάνειας. Ο στόχος της RSM δεν είναι μόνο να διερευνήσει την απόκριση, αλλά και να εντοπίσει την περιοχή ενδιαφέροντος όπου οι απαντήσεις έχουν τις βέλτιστες ή σχεδόν τις βέλτιστες τιμές. Η απλούστερη στρατηγική που μπορεί να υιοθετηθεί στην περίπτωση αυτή είναι η οπτική επιθεώρηση. Συγκεκριμένα συντάσσονται αποκριτικά γραφήματα στον τρισδιάστατο χώρο ανάλογα με τα ζεύγη των ανεξάρτητων μεταβλητών.

προσαρμογή του μοντέλου θέση. Το προσαρμοσμένο μοντέλο χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση των μεταβλητών που φέρνουν την απόκριση στο στόχο.

- Το μοντέλο διασποράς προκύπτει από την ανάλυση των SNR. Με την ανάλυση του SNR αφενός ρυθμίζονται οι παράγοντες ελέγχου, ώστε να μην επηρεάζονται σημαντικά από τη μεταβλητότητα των παραγόντων θορύβου, αφετέρου μπορεί να διερευνηθεί ποιοί είναι οι παράγοντες που επηρεάζουν τη μέση απόκριση και ποιοί έχουν επίδραση στη μεταβλητότητα.

Ο Taguchi προτείνει την ανάλυση δεδομένων με τη χρήση του S/N ratio που προσφέρει δυο πλεονεκτήματα: *α)* παρέχει έναν οδηγό για την επιλογή των βέλτιστων επιπέδων των παραγόντων ελέγχου που βασίζεται στην ελάχιστη διασπορά των παρατηρήσεων γύρω από τη μέση τιμή και *β)* προσφέρει αντικειμενική σύγκριση για δύο σύνολα πειραματικών δεδομένων σε σχέση με την απόκλιση του μέσου όρου από το στόχο.

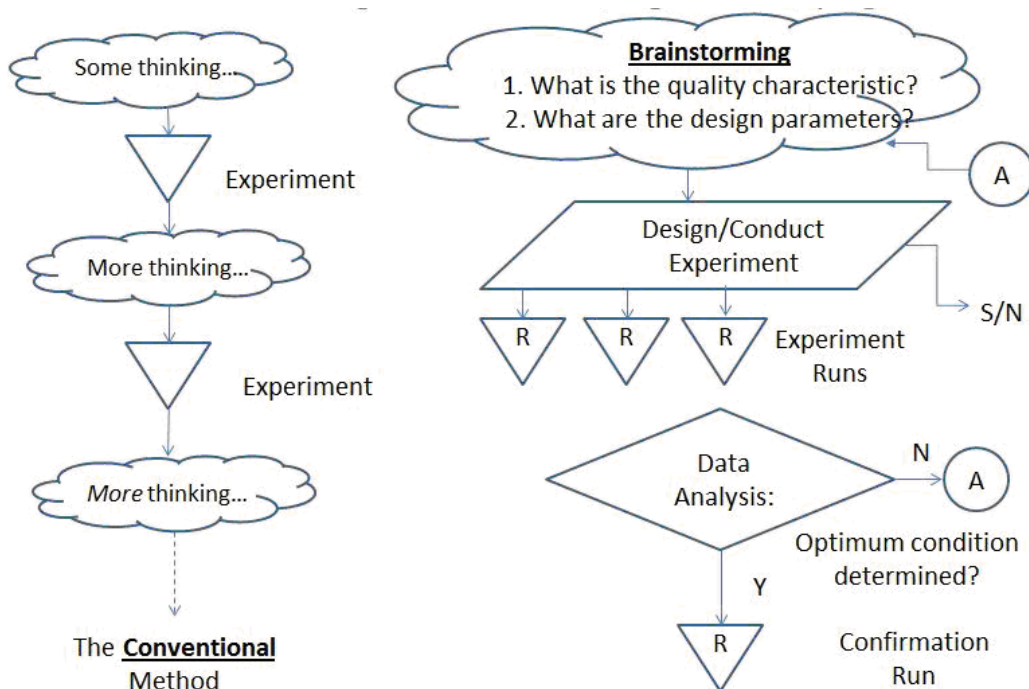
Όπως έχει προαναφερθεί, η μέθοδος Taguchi απαιτεί τον υπολογισμό του SNR για τα δεδομένα που προέρχονται από κάθε πειραματική διάταξη των παραγόντων ελέγχου. Επομένως, *η αναλογία S/N υπολογίζεται για κάθε γραμμή του εσωτερικού σχεδιασμού*. Αφού έχουν υπολογιστεί τα SNR αναλύονται με βάση τυπικές τεχνικές Ανάλυσης Διασποράς (ANOVA) και, δεδομένου ότι ζητάμε τη μεγιστοποίηση αυτών, αποδίδονται τα βέλτιστα επίπεδα για κάθε παράγοντα ελέγχου. Οι παράγοντες ελέγχου που δεν επηρεάζουν το SNR χρησιμοποιούνται στη συνέχεια για την προσαρμογή της μέσης απόκρισης στο στόχο. Τέτοιοι παράγοντες ονομάζονται ‘παράγοντες προσαρμογής ή συντονισμού’ (‘adjustment or tuning factors’) και μπορεί να είναι γνωστοί εξ’ αρχής ή να ταυτοποιούνται κατά την ανάλυση δεδομένων. Αποτελεί, άλλωστε, χαρακτηριστικό γνώρισμα της Μεθόδου Taguchi η επιβεβαίωση των βέλτιστων αποτελεσμάτων με την πειραματική παρακολούθηση.

Μια άλλη προσέγγιση, που δεν μπορεί, όμως, να εφαρμοστεί σε όλες τις περιπτώσεις, είναι αρχικά η ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας διαλέγοντας τα βέλτιστα επίπεδα των παραγόντων που επηρεάζουν μόνο τη μεταβλητότητα και στη συνέχεια η διεργασία τίθεται στο στόχο επιλέγοντας τα βέλτιστα επίπεδα των παραγόντων που επηρεάζουν μόνο τη μέση απόκριση. Σε πολλές εφαρμογές της μεθόδου Taguchi, αυτή η στεγανοποίηση των μεταβλητών σε δυο κατηγορίες με βάση το αν επηρεάζουν το μέσο ή η διακύμανση είναι μια υπόθεση που γίνεται πριν από τη συλλογή των δεδομένων. Για ένα πολλαπλασιαστικό μοντέλο σφάλματος, σύμφωνα με το οποίο το σφάλμα αυξάνεται ανάλογα με το μέσο, η μεγιστοποίηση του SNR και η ελαχιστοποίηση του $E(Y - T)^2$ είναι ισοδύναμα. Ο Taguchi πρότεινε τη μεγιστοποίηση του SNR για τους παράγοντες ελέγχου της διασποράς και, εν συνεχεία, την προσαρμογή της διαδικασίας στο στόχο επιλέγοντας τα κατάλληλα επίπεδα των παραγόντων που επηρεάζουν μόνο τη μέση απόκριση. Υπό την παραδοχή του πολλαπλασιαστικού λάθους, λοιπόν, η μεγιστοποίηση του SNR και η ελαχιστοποίηση του MSE είναι ισοδύναμα.

Μια τρίτη προσέγγιση είναι ο καθορισμός της μέσης απόκρισης στο κατάλληλο επίπεδο ενώ, ταυτόχρονα, ελαχιστοποιείται η διακύμανση στο πλαίσιο της Μεθόδου Αποκριτικών Επιφανειών. Στο πλαίσιο αυτό, ο πειραματιστής ασχολείται τόσο με τα μέτρα θέσης όσο και με τα μέτρα διασποράς και η μαθηματική μοντελοποίηση, που λαμβάνει χώρα, ανέρχεται σε περιορισμένη βελτιστοποίηση, στο πλαίσιο ενός γενικού γραμμικού μοντέλου. Μια βελτίωση της μέσης απόκρισης συνοδεύεται συχνά από αυξημένη διακύμανση, και έτσι η τελική επιλογή των ρυθμίσεων του σχεδιασμού θα αντιπροσωπεύει στην περίπτωση αυτή μια εναλλαγή μεταξύ της ελάχιστης διασποράς και της ελάχιστης μεροληψίας. Η προσέγγιση αυτή, παρόλο που δίνει έναν τρόπο μοντελοποίησης τόσο για τη μέση απόκριση όσο και για τη διασπορά, δεν προτείνει πώς θα μπορούσαν να ενσωματωθούν οι μεταβλητές θορύβου στην ανάλυση.

Εκτός από τα παραπάνω, ο Taguchi έχει προτείνει ένα πλήθος ακόμη από τεχνικές για Σχεδιασμό Πειραμάτων (π.χ. Γραμμικά γραφήματα-“linear graphs”) και Ανάλυση Δεδομένων (π.χ. Συσσωρευτική ανάλυση – Accumulative Analysis – για διατεταγμένα κατηγορικά δεδομένα “Minute Analysis” για censored data)

2.4.5 ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ - ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI (ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕ DOE)



Εικόνα 17. Σχηματική σύγκριση DOE με μέθοδο Taguchi (από βιβλίο *A Primer on Taguchi Method*)

Για λόγους ανακεφαλαίωσης, ας δούμε τα βασικά χαρακτηριστικά των δύο μεθόδων βήμα προς βήμα, ώστε να συνειδητοποιήσουμε την καινοτομία που επέφερε ο Taguchi στην φιλοσοφία για την ποιότητα:

Γνώση διεργασιών

- Ο Σχεδιασμός Πειραμάτων (DOE) δεν υποθέτει καμία κατανόηση των βασικών μηχανισμών που διέπουν τη διαδικασία που ερευνάται.
- Ο Taguchi υποθέτει ότι έχουμε κάποια κατανόηση της διαδικασίας και των αλληλεπιδράσεων που είναι πιθανόν να υπάρχουν μεταξύ των δεδομένων εισόδου.

Συνδυασμοί των δεδομένων εισόδου

- Ο Σχεδιασμός Πειραμάτων ελέγχει όλους τους συνδυασμούς των επιπέδων εισόδου ή κάποιο συμμετρικό υποσύνολο αυτών (Κλασματικοί Παραγοντικοί Σχεδιασμοί).
- Ο Taguchi ελέγχει μόνο ένα μικρό κλάσμα όλων των πιθανών συνδυασμών, αλλά κατά τρόπο που μας επιτρέπει τον υπολογισμό των επιδράσεων όλων των εισόδων στην παραγωγή.

Παράγοντες Θορύβου

- Ο Σχεδιασμός Πειραμάτων παραδοσιακά αγνοεί τους παράγοντες θορύβου, παρόλο που θα μπορούσαν να προστεθούν στο πειραματικό σχέδιο.
- Ο Taguchi ασχολείται επισταμένα με τους παράγοντες θορύβου για να ελέγξει την ευρωστία του συστήματος και να εντοπίσει το βέλτιστο συνδυασμό εισόδων.

Κατανόηση της μεταβλητότητας

- Ο Σχεδιασμός Πειραμάτων αγνοεί τη μεταβλητότητα κατά τη διεργασία; Υποθέτει ότι το σύστημα έχει αιτιοκρατική φύση και βρίσκει τους συνδυασμούς των ανεξάρτητων μεταβλητών που μεγιστοποιούν ή ελαχιστοποιούν την έξοδο, ανάλογα με την κάθε περίπτωση.
- Ο Taguchi υποθέτει στοχαστική φύση για το σύστημα. Ενδιαφέρεται τόσο για τα επίπεδα της παραγωγής όσο και για την μεταβλητότητα της παραγωγής. Επιλέγονται εκείνα τα επίπεδα των μεταβλητών εισόδου που είτε φέρνουν την έξοδο κοντά στο στόχο είτε ελαχιστοποιούν τη μεταβλητότητα της εξόδου.

Πειράματα επιβεβαίωσης

- Ο Σχεδιασμός Πειραμάτων δεν απαιτεί κανένα πείραμα επιβεβαίωσης, αφού ελέγχονται όλοι οι συνδυασμοί των μεταβλητών εισόδου (σε έναν πλήρη παραγοντικό σχεδιασμό).
- Ο Taguchi συνιστά τη διεξαγωγή ενός επιβεβαιωτικού πειράματος, αφού, σύμφωνα με τον ίδιο, ο βέλτιστος συνδυασμός των μεταβλητών εισόδου ίσως να μην αποτελεί μέρος του αρχικού πειραματικού σχεδίου.

Συνολικά, λοιπόν, η μέθοδος Taguchi είναι ένα αποτελεσματικό και αξιόπιστο εργαλείο που μπορεί να προσφέρει τη στιβαρή σχεδίαση ενός

προϊόντος ή μιας διαδικασίας, επομένως να συνεισφέρει καταλυτικά στη βελτίωση της ποιότητας με ταυτόχρονη εξοικονόμηση χρόνου και πόρων. Η μέθοδος Taguchi δίνει έμφαση στην ποιότητα πίσω στο στάδιο του σχεδιασμού και επιδιώκει το σχεδιασμό προϊόντων/διεργασιών που δεν επηρεάζεται (ή είναι εύρωστα) από τις αιτίες που προκαλούν προβλήματα στην ποιότητα. Πρόκειται, λοιπόν, για μια συστηματική και αποτελεσματική προσέγγιση για τον προσδιορισμό των βέλτιστων πειραματικών ρυθμίσεων των παραμέτρων σχεδιασμού για την απόδοση, την ποιότητα και το κόστος.

Βασικό πλεονέκτημα της Μεθόδου Taguchi είναι ακριβώς ότι βελτιστοποιεί τα χαρακτηριστικά που επιλέγουμε και διαμορφώνει τα όρια προδιαγραφών. Δηλαδή, η Μέθοδος Taguchi δίνει έμφαση σε μια μέση απόδοση κοντά στην τιμή στόχο και όχι σε μια τιμή εντός ορισμένων ορίων προδιαγραφών, βελτιώνοντας έτσι την ποιότητα των προϊόντων. Επιπλέον, η Μέθοδος Taguchi για τον πειραματικό σχεδιασμό είναι άμεση και εύκολη στην εφαρμογή της σε πολλά πεδία της μηχανικής, γεγονός που την καθιστά ένα ισχυρό, αλλά πάντα απλό, εργαλείο. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον άμεσο περιορισμό του εύρους μιας ερευνητικής διαδικασίας ή για τον εντοπισμό προβλημάτων σε μια παραγωγική διαδικασία από τα στοιχεία που ήδη υπάρχουν. Ένα ακόμα μεγάλο πλεονέκτημα της Μεθόδου Taguchi είναι ότι επιτρέπει την ανάλυση πολλών διαφορετικών παραμέτρων χωρίς απαγορευτικά υψηλό ποσό πειραματισμού. Για παράδειγμα, μια διαδικασία με 8 μεταβλητές, έκαστη σε τρεις στάθμες, θα απαιτούσε 6.561 (3^8) πειράματα τον έλεγχο όλων των μεταβλητών. Ωστόσο, χρησιμοποιώντας τους ορθογώνιους σχηματισμούς του Taguchi, μόνο 18 πειράματα είναι απαραίτητα, ή λιγότερο από το 0,3% του αρχικού αριθμού των πειραμάτων.

Το κύριο μειονέκτημα της Μεθόδου Taguchi είναι ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν είναι μόνο σχετικά και δεν υποδεικνύουν με ακρίβεια ποιοί παράγοντες έχουν την υψηλότερη επίπτωση στην απόδοση του ποιοτικού χαρακτηριστικού. Επιπλέον, αφού οι ορθογώνιοι σχηματισμοί δεν ελέγχουν όλους τους συνδυασμούς των μεταβλητών η Μέθοδος Taguchi δεν πρέπει να χρησιμοποιείται άκριτα όταν δεν είναι γνωστές οι σχέσεις που διέπουν τους παράγοντες που επηρεάζουν την απόκριση ή η σχέση που συνδέει τους παράγοντες ελέγχου με την απόκριση. Τέλος, ένας ακόμα περιορισμός είναι ότι εκτιμώνται μόνο οι κύριες επιδράσεις και οι αλληλεπιδράσεις 2^{ου} βαθμού. Οι αλληλεπιδράσεις υψηλότερης τάξης θεωρούνται μη σημαντικές και αγνοούνται από τη Μέθοδο Taguchi.

Η χρήση της μεθοδολογίας που πρότεινε ο Δρ. Taguchi:

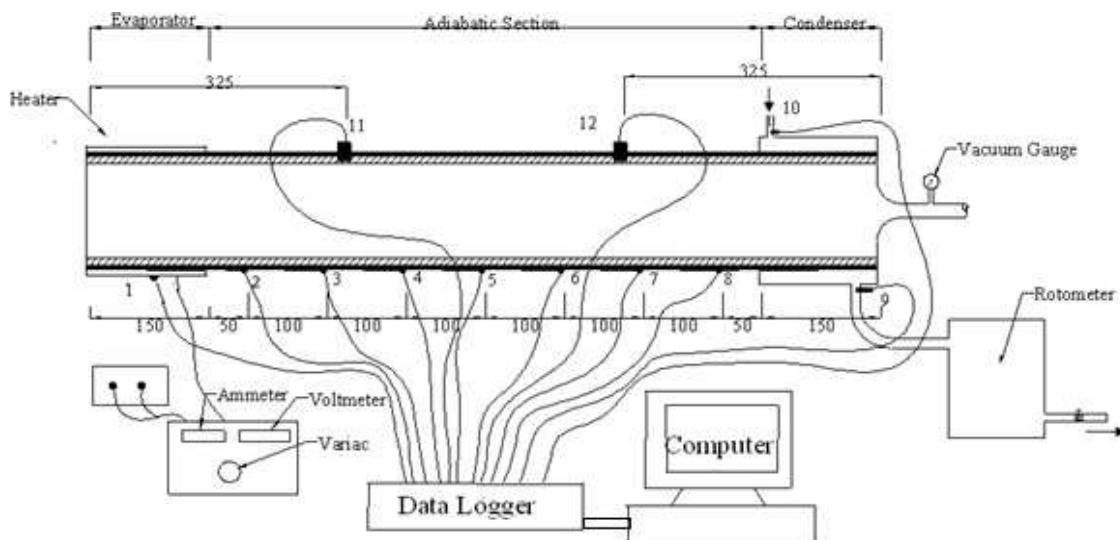
- Παρέχει μια στρατηγική για την αντιμετώπιση πολλαπλών και αλληλένδετων προβλημάτων.
- Δίνει την ευκαιρία σε όλα τα μέλη της επιχείρησης να έχουν καλύτερη κατανόηση των προϊόντων και διαδικασιών τους.
- Παρέχει ένα αποτελεσματικό τρόπο για το σχεδιασμό των πειραμάτων που απαιτούνται για την επίλυση βιομηχανικών προβλημάτων με τη χρήση ορθογώνιων σχηματισμών και έχει ως βασικό μέλημα το κόστος.
- Παρέχει τεχνικές για την ορθολογική λήψη αποφάσεων σχετικά με την παραγωγική διαδικασία και τη βελτιστοποίηση αυτής.

Τελικά, η συμβολή του Δρ. Genichi Taguchi στη στατιστική και τη μηχανική είναι πολύτιμη. Η έμφαση που έδωσε στη απώλεια σε ολόκληρη την κοινωνία εξ' αιτίας της 'κακής' ποιότητας, οι τεχνικές που εισήγαγε για τη διερεύνηση της μεταβλητότητας στα πειράματα και η συνολική του στρατηγική για την αντιμετώπιση ενός συστήματος (system, parameter and tolerance design) έχουν ασκήσει μεγάλη επιρροή στη βελτίωση της βιομηχανικής παραγωγής και ποιότητας σε ολόκληρο τον κόσμο. Αν και ορισμένες από τις στατιστικές πτυχές των μεθόδων Taguchi έχουν τεθεί υπό αμφισβήτηση, είναι αναμφισβήτητο ότι εφαρμόζονται ευρέως σε διάφορες διαδικασίες και ποικίλους τομείς.

2.4.6 ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ TAGUCHI

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 1

Ο σωλήνας θερμότητας (heat pipe) είναι μια συσκευή μεταφοράς θερμότητας που προσφέρει αποδοτική μεταφορά της θερμικής ενέργειας μέσω μιας μικρής διατομής. Προσφέρει υψηλή θερμική αγωγιμότητα και η χαμηλή θερμική αντίσταση. Ο σωλήνας θερμότητας αποτελείται από ένα κλειστό δοχείο που περιέχει μια μικρή ποσότητα ενός ρευστού. Το σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής εγκατάστασης φαίνεται στο παρακάτω σχήμα. Οι προδιαγραφές του σωλήνα θερμότητας συνοψίζονται στον πίνακα 1. Για τους σκοπούς της παρούσας εργασίας δεν μας απασχολεί ο τρόπος που αντλήθηκαν τα δεδομένα εισόδου.



Σχήμα 1. Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης

Specifications	Dimensions
Outside diameter, m	0.022
Inside diameter, m	0.0196
Evaporator length, m	0.15
Condenser length, m	0.15
Adiabatic length, m	0.70
Total length, m	1.00
Working Fluid	Water
Wick mesh size, m	1600
Wick porosity	0.769
No. of layers of wick	2
Wick permeability, m ²	2.213 x 10 ⁻⁹
Capillary Limit, W	108.8
Sonic Limit, W	83852.5
Entrainment Limit, W	5553.2
Boiling Limit, W	711.6

Πίνακας 1. Προδιαγραφές του σωλήνα θέρμανσης

Οι παράγοντες που θα μελετηθούν αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα 2.

Control Parameters	Level 1	Level 2	Level 3
Heat Input (W)	40	60	80
Inclination Angle (Deg)	0	45	90
Flow rate (kg/min)	0.06	0.08	0.1

Πίνακας 2. Οι παράμετροι ελέγχου και τα επίπεδά τους

Πριν από την επιλογή του ορθογώνιου σχηματισμού ο ελάχιστος αριθμός των πειραμάτων που πρέπει να διεξαχθούν μπορεί να καθοριστεί με τη χρήση της ακόλουθης σχέσης:

$$N_{Taguchi} = 1 + NV \cdot (L - 1)$$

όπου $N_{Taguchi}$ ο ζητούμενος αριθμός πειραμάτων,

NV ο αριθμός των μεταβλητών (Number of Variables)

L ο αριθμός των επιπέδων των μεταβλητών (number of Levels)

Για τη συγκεκριμένη ανάλυση είναι $NV = 3$ και $L = 3$, άρα ο ελάχιστος αριθμός των απαιτούμενων πειραμάτων είναι 7.

Επιλέγεται ο L_9 ορθογώνιος σχηματισμός, όπως αυτός φαίνεται στον πίνακα 3.

L ₉	Level 1	Level 2	Level 3
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Πίνακας 3. Ορθογώνιος πίνακας για το σχεδιασμό L₉

Ο στόχος είναι ο προσδιορισμός των κύριων επιδράσεων των παραγόντων σχεδιασμού του σωλήνα θερμότητας, η διεξαγωγή Ανάλυσης Διασποράς (ANOVA) και ο καθορισμός των βέλτιστων συνθηκών με βάση τη μέθοδο Taguchi.

ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Test	Heat Input (W)	Angle of Inclination (deg)	Flow Rate (kg/min)	Efficiency (%)	S/N ratio	Thermal Resistance °C/W	S/N ratio	Overall Heat Transfer Coefficient (W/m ² K)	S/N ratio
1	40	0	0.06	26.42	28.44	7.959	18.02	75.83	37.60
2	40	45	0.08	28.92	29.22	7.432	17.42	75.83	37.60
3	40	90	0.1	33.63	30.54	6.466	16.21	74.87	37.49
4	60	0	0.08	31.42	29.94	7.959	18.02	76.36	37.66
5	60	45	0.1	33.35	30.46	6.620	16.42	76.01	37.62
6	60	90	0.06	30.86	29.79	6.315	16.01	75.67	37.58
7	80	0	0.1	34.38	30.73	9.118	19.2	77.52	37.79
8	80	45	0.06	29.94	29.53	8.519	18.61	76.92	37.72
9	80	90	0.08	33.77	30.57	8.519	18.61	76.92	37.72

Πίνακας 4. Πειραματικό σχέδιο για L₉ ορθογώνιο σχηματισμό

Parameter	I mean	II mean	III mean	SS	% of contribution
Heat Input	29.40	30.06	30.28	80.55.15	33.33
Angle of Inclination	29.70	29.74	30.30	8054.28	33.34
Flow Rate	29.25	29.91	30.58	8057.21	33.34

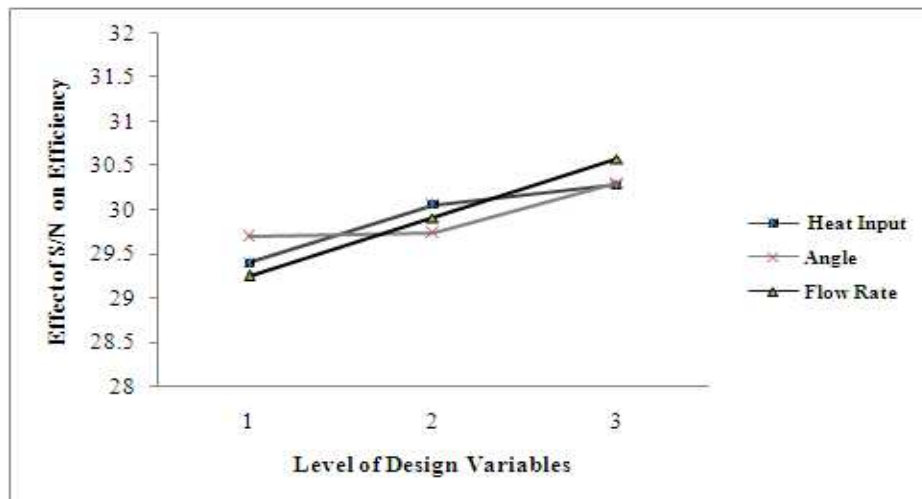
Πίνακας 5. Ανάλυση διασποράς για την απόδοση

Parameter	I mean	II mean	III mean	SS	% of contribution
Heat Input	17.22	16.82	18.81	2802.04	33.39
Angle of Inclination	18.41	17.83	16.94	2797.04	33.33
Flow Rate	17.55	18.02	17.28	2793.33	33.28

Πίνακας 6. Ανάλυση διασποράς για τη Θερμική αντίσταση

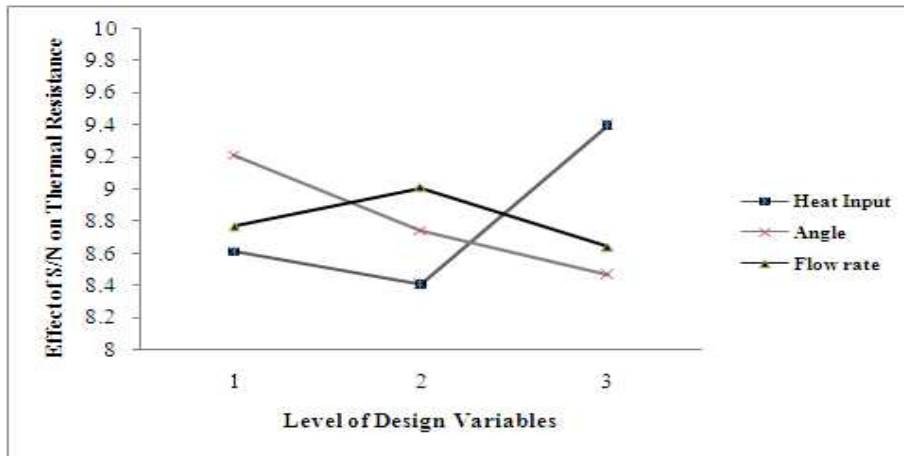
Parameter	I mean	II mean	III mean	SS	% of contribution
Heat Input	37.56	37.62	37.74	12752.51	33.33
Angle of Inclination	37.68	37.65	37.60	12752.45	33.33
Flow Rate	37.63	37.66	37.63	12752.44	33.33

Πίνακας 7. Ανάλυση διασποράς για τη Συνολικό Συντελεστή Μετάδοσης Θερμότητας



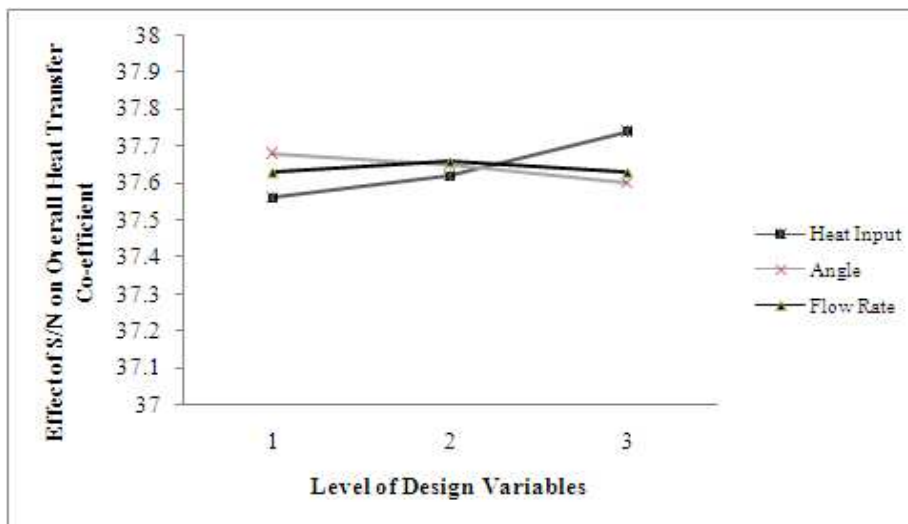
Σχήμα 2. Επίδραση του κάθε παράγοντα στην αποδοτικότητα

Στο Σχήμα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για την απόδοση του κάθε παράγοντα στα διάφορα επίπεδά του. Από το σχήμα, είναι σαφές ότι, η απόδοση του σωλήνα θερμότητας αυξάνεται και με τις τρεις παραμέτρους, δηλαδή, τη θερμότητα, τη γωνία κλίσης και το ρυθμό ροής. Ο ρυθμός αύξησης της απόδοσης είναι υψηλότερος για το ποσοστό ροής σε σύγκριση με τη θερμότητα και τη γωνία κλίσης.



Σχήμα 3. Επίδραση του κάθε παράγοντα στη θερμική αντίσταση

Το σχήμα 3 απεικονίζει τις μεταβολές της θερμικής αντίστασης των σωλήνων θερμότητας για τις μεταβολές των σταθμών των τριών παραγόντων ελέγχου. Η θερμική αντίσταση του σωλήνα θερμότητας μειώνεται καθώς αυξάνονται οι τιμές της θερμικής ισχύος και της γωνίας κλίσης. Αλλά για την ταχύτητα ροής, η θερμική αντίσταση μειώνεται μέχρι το επίπεδο II και στη συνέχεια την αξία του αυξάνεται από επίπεδο II στο επίπεδο III. Η μεταβλητότητα της θερμικής αντίστασης σε όλα τα επίπεδα είναι λιγότερο από το 10%.



Σχήμα 4. Επίδραση του κάθε παράγοντα στην Συνολικά Συντελεστής Μετάδοσης Θερμότητας

Το σχήμα 4 παρουσιάζει τις παραλλαγές του συνολικού συντελεστή μεταφοράς θερμότητας για όλες τις παραμέτρους. Οι διακυμάνσεις, όμως, είναι πολύ μικρές και σχεδόν ίδιες για όλες τις συνθήκες. Οι διακυμάνσεις αυτές είναι εντός του εύρους του 1%. Αυτό δείχνει ότι ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς θερμότητας διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη μεταφορά θερμότητας του σωλήνα θερμότητας και η τιμή του είναι σχεδόν σταθερή.

Οπότε καταλήγουμε στον κάτωθι πίνακα με τις βέλτιστες παραμέτρους του σχεδιασμού:

Working parameter	Level I	Level II	Level III
Efficiency	80 W	90°	0.1 kg/min
Thermal Resistance	60 W	90°	0.1 kg/min
Over Heat transfer coefficient	80 W	0°	0.8 kg/min

Πίνακας 8. Βέλτιστα επίπεδα παραγόντων ελέγχου

Μετά τον καθορισμό των βέλτιστων επιπέδων των παραγόντων ελέγχου, διεξάγονται τα πειράματα και οι τιμές τους φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 9. Τα πειραματικά αποτελέσματα δίνουν τη βέλτιστη απόδοση των σωληνώσεων θέρμανσης και αυτές οι τιμές διαπιστώθηκε ότι είναι καλύτερες από τις προηγούμενες παρατηρήσεις.

Parameter	Result
Percentage Efficiency	35.03
Thermal resistance (°C/W)	6.1
Overall heat transfer coefficient (W/m ² K)	78.51

Πίνακας 9. Βέλτιστες αποκρίσεις του σωλήνα θέρμανσης.

Τα αποτελέσματα από την παραπάνω μελέτη έχουν ως εξής:

- Οι συνεισφορές όλων των παραμέτρων (εισορή θερμότητας, γωνία κλίσης και του ρυθμού ροής) στην απόδοση θερμότητας σωλήνα είναι εξίσου σημαντικές.
- Ο συνολικός συντελεστής μεταφοράς της θερμότητας είναι σχεδόν ίδια για όλα τα επίπεδα.
- Η μέθοδος Taguchi δίνει τα βέλτιστα αποτελέσματα για τη λειτουργία του σωλήνα θερμότητας μειώνει σημαντικά τον αριθμό των απαιτούμενων πειραμάτων.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2

Σε ένα πείραμα που περιγράφεται από τους Schmidt-Launsby (1990), η βελτιστοποίηση της διαδικασίας συγκόλλησης ολοκληρώνεται από έναν εύρωστο παραμετρικό σχεδιασμό στη συναρμολόγηση μιας ηλεκτρονικής πλακέτας. Αφού τα κομμάτια έχουν τοποθετηθεί στη γυμνή πλακέτα, η πλακέτα περνάει μέσα από το μηχάνημα κυματικής συγκόλλησης το οποίο ενώνει όλα τα μέρη πάνω στο κύκλωμα. Οι πλακέτες τοποθετούνται πάνω στο φορέα και ακολουθούν τα εξής στάδια. Πλένονται με καθαριστικό μείγμα (fluxing) για να αφαιρεθούν οι οξειδώσεις, προθερμαίνονται για να ελαχιστοποιηθούν οι παραμορφώσεις και συγκολλούνται. Ένα πείραμα σχεδιάζεται ώστε να προσδιορίσει τις συνθήκες που δίνουν το μικρότερο αριθμό ελαττωμάτων συγκόλλησης ανά εκατομμύριο κόμβους. Οι παράγοντες ελέγχου και τα επίπεδα είναι τα ακόλουθα:

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	(-1)	(+1)
A) Θερμοκρασία δοχείου συγκόλλησης ($^{\circ}F$)	480	510
B) Ταχύτητα φορέα (ft/min)	7.2	10
C) Πυκνότητα ροής	0.9 $^{\circ}$	1.0 $^{\circ}$
D) Θερμότητα προθέρμανσης ($^{\circ}F$)	150	200
E) Ύψος κύματος (in.)	0.5	0.6

Πίνακας 1. Οι παράγοντες ελέγχου και επίπεδά τους.

Σε αυτό το πείραμα, τρεις από τους παράγοντες θορύβου είναι δύσκολο να ελεγχθούν μέσα από τη διαδικασία. Αυτοί είναι η θερμοκρασία δοχείου συγκόλλησης, η ταχύτητα του φορέα και ο τύπος συναρμολόγησης. Είναι γνωστό ότι ο έλεγχος θερμοκρασίας είναι μεταξύ $\pm 5^{\circ}F$ και ότι ο έλεγχος της ταχύτητας του φορέα είναι μεταξύ $\pm 0.2 ft / min$.

ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ	(+1)	(-1)
A) Θερμοκρασία δοχείου συγκόλλησης ($^{\circ}F$)	+5	-5
B) Ταχύτητας του φορέα(ft / min)	+0,2	-0,2
C) Είδος συγκόλλησης	1	2

Πίνακας 2. Οι παράγοντες θορύβου και επίπεδά τους.

Ο πίνακας για τους παράγοντες ελέγχου (εσωτερικός σχηματισμός) και ο πίνακας για τους παράγοντες θορύβου (εξωτερικός σχηματισμός) επιλέγονται αμφότεροι να είναι κλασματικοί παραγοντικοί σχεδιασμοί. Ο εσωτερικός σχεδιασμός είναι 2^{5-2} FFD και ο εξωτερικός σχεδιασμός είναι 2^{3-1} FFD. Ο πίνακας του διασταυρωμένου σχηματισμού και οι τιμές απόκρισης παρουσιάζονται παρακάτω:

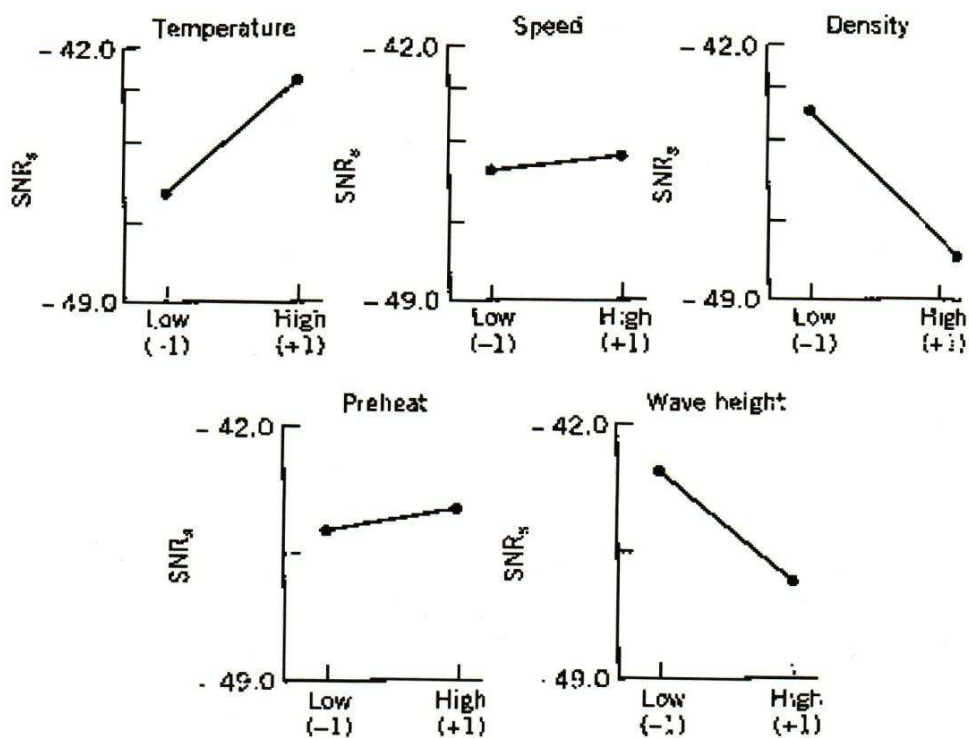
Εσωτερικός Σχεδιασμός					Εξωτερικός Σχεδιασμός				
A	B	C	D	E	(1)	a*b*	a*c*	b*c*	(SNR) _s
1	1	1	-1	-1	194	197	193	275	-46.75
1	1	-1	1	1	136	136	132	136	-42.61
1	-1	1	-1	1	185	261	264	264	-47.81
1	-1	-1	1	-1	47	125	127	42	-39.51
-1	1	1	-1	-1	295	216	204	293	-48.15
-1	1	-1	1	1	234	159	231	157	-45.97
-1	-1	1	-1	1	328	326	247	322	-45.76
-1	-1	-1	1	-1	186	187	105	104	-43.59

Πίνακας 3. Ο πίνακας του διασταυρωμένου σχηματισμού και οι αντίστοιχες τιμές της απόκρισης.

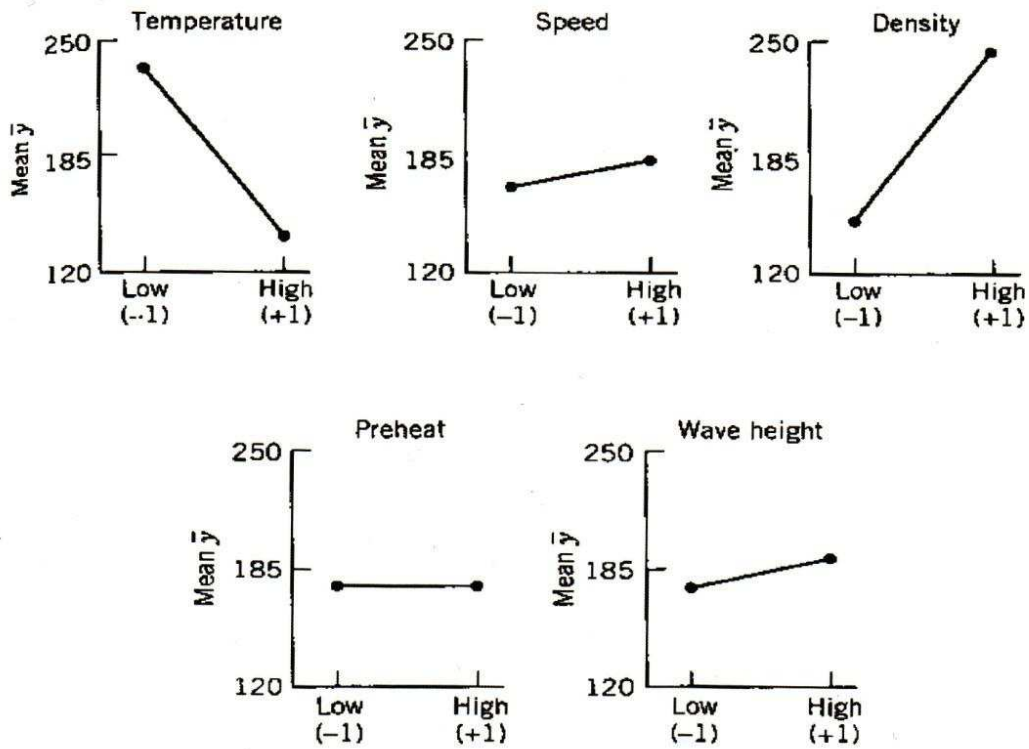
Μας ενδιαφέρει να ελαχιστοποιήσουμε τον αριθμό των προβλημάτων συγκόλλησης, οπότε για την ανάλυση των δεδομένων μας θα χρησιμοποιήσουμε το

$$SNR_s = -10 \cdot \log \sum_{i=1}^n \frac{y_i^2}{n}$$

Μια αναλυτική μέθοδος που χρησιμοποιείται συχνά από τον Taguchi είναι η γραφική απεικόνιση των κύριων επιδράσεων μόνο.



Σχήμα 1. Γραφήματα του SNR_s ως προς τα επίπεδα των παραγόντων ελέγχου



Σχήμα 2. Γραφήματα του ως προς τα επίπεδα των παραγόντων ελέγχου \bar{y}

Από τα παραπάνω σχήματα παρατηρούμε ότι η θερμοκρασία και η πυκνότητα ροής φαίνεται να είναι οι σημαντικοί παράγοντες, αφού έχουν μεγάλη επίδραση στο SNRs, αλλά μικρή επίδραση στο \bar{y} . Μας ενδιαφέρει η μεγιστοποίηση του SNRs και η ελαχιστοποίηση του \bar{y} .

Η παραπάνω ανάλυση γίνεται υπό την υπόθεση ότι δεν υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων ελέγχου. Εάν δεν είναι σίγουρο ότι η υπόθεση αυτή ισχύει, τα διαγράμματα των μέσων για τις κύριες επιδράσεις μπορεί να οδηγήσουν σε εσφαλμένα αποτελέσματα.

Η ταχύτητα του φορέα και η θερμοκρασία προθέρμανσης πρέπει να τοποθετηθούν στη χαμηλή τους στάθμη. Η επίδραση του ύψους κύματος είναι οριακή σε σύγκριση με την επιρροή της θερμοκρασίας συγκόλλησης και του μίγματος καθαρισμού. Η ανάλυση προτείνει ως βέλτιστες συνθήκες τις κάτωθι:

Θερμοκρασία συγκόλλησης = 510°F

Πυκνότητα ροής = 0.9°

Υψος κύματος = 0.5 in

Πίνακας 4. Βέλτιστες λύσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΝΔ ΣΤΗ ΜΕΘΟΔΟ TAGUCHI

3.1 ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΝΔ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑΣ TAGUCHI

Από τα δύο προηγούμενα κεφάλαια έχει καταστεί σαφές ότι η ταχεία αλλαγή του περιβάλλοντος της Αγοράς απαιτεί οι επιχειρήσεις να αναπτύσσουν εγκαίρως νέα προϊόντα ή υπηρεσίες υψηλής ποιότητας, που να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των πελατών, έτσι ώστε να διατηρούν το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα. Για τη βελτιστοποίηση ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας χρησιμοποιείται κατά κύριο λόγο η Μέθοδος Taguchi, ώστε να προσδιοριστούν οι παράμετροι του συστήματος.

Η μέθοδος Taguchi έχει διαπιστωθεί ότι αποτελεί μια ιδιαίτερος αποδοτική και αποτελεσματική προσέγγιση για το σχεδιασμό πειραμάτων και, συνεπώς, έναν περιεκτικό και γρήγορο τρόπο για τον καθορισμό των βέλτιστων ρυθμίσεων των παραμέτρων ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας. Εν γένει, θα λέγαμε ότι ο Παραμετρικός Σχεδιασμός του Taguchi λαμβάνει ιδιαίτερης προσοχής από τους ερευνητές κατά τη διαδικασία της ανάπτυξης νέων προϊόντων ή υπηρεσιών, επειδή είναι ζωτικής σημασίας για τους επαγγελματίες να επιτευχθούν ταυτόχρονα η μείωση του χρόνου διάθεσης του προϊόντος ή της υπηρεσίας στην Αγορά και η βελτίωση της ποιότητας.

Ωστόσο, η μέθοδος Taguchi δεν είναι πανάκεια για όλα τα είδη των προβλημάτων σχεδιασμού των παραμέτρων. Αντίθετα, όπως αναλύθηκε στο 2^ο κεφάλαιο έχει κάποιους βασικούς περιορισμούς στην πράξη. Έχοντας αυτό ως έναυσμα, πολλοί επιστήμονες έχουν ασχοληθεί τα τελευταία χρόνια με τη εφαρμογή ΤΝΔ στη μεθοδολογία του Taguchi ώστε να αρθούν κάποιοι από τους περιορισμούς.

Λόγου χάριν, η Μέθοδος Taguchi είναι αποτελεσματική στη βελτιστοποίηση μιας μόνο ποιοτικής απόκρισης. Στο ιδιαίτερα ανταγωνιστικό περιβάλλον της Αγοράς στις ημέρες μας, όμως, οι καταναλωτές ανησυχούν για περισσότερες από μια ποιοτικές αποκρίσεις. Προς άρση του περιορισμού αυτού, προτείνεται η χρήση νευρωνικών δικτύων για τη επίλυση του προβλήματος πολλαπλών αποκρίσεων στη Μέθοδο Taguchi.

Επίσης τα νευρωνικά δίκτυα χρησιμοποιούνται συχνά για την ταυτοποίηση της σχέσης των εισόδων (παράγοντες σήματος, παράγοντες ελέγχου, παράγοντες θορύβου) με τις εξόδους (αποκρίσεις). Στη συνέχεια, η σχέση που συνδέει τις εισόδους με τις εξόδους μετατρέπεται σε συνάρτηση καταλληλότητας σύμφωνα με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά. Δηλαδή, το ΤΝΔ εκπαιδεύεται βάση των αποτελεσμάτων ενός Κλασματικού Παραγοντικού Σχεδιασμού και στη συνέχεια το ίδιο ΤΝΔ χρησιμοποιείται για την εκτίμηση των τιμών της απόκρισης για έναν Πλήρη Παραγοντικό Σχεδιασμό.

Ακόμη, ΤΝΔ χρησιμοποιούνται για την δημιουργία Εύρωστου Σχεδιασμού για δυναμικά ποιοτικά χαρακτηριστικά. Η περίπτωση αυτή αναλύεται παρακάτω.

Από την άλλη μεριά, τα πλεονεκτήματα που προσφέρουν ΤΝΔ είναι πολυάριθμα, αλλά μπορούν να επιτευχθούν μόνο με την ανάπτυξη μοντέλων υψηλών επιδόσεων. Ωστόσο, ο καθορισμός του κατάλληλου τρόπου εκπαίδευσης και της αρχιτεκτονικής δομής του ΤΝΔ παραμένει ένα δύσκολο έργο. Μάλιστα, οι δομικές παράμετροι του δικτύου συνήθως καθορίζονται με τη μέθοδο “δοκιμή και το λάθος”, όπου ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων ΤΝΔ αναπτύσσονται και συγκρίνονται μεταξύ τους. Έχει προταθεί η εφαρμογή της Μεθόδου Taguchi για τη βελτιστοποίηση μοντέλων νευρωνικών δικτύων τόσο για τον αλγόριθμο εκπαίδευσης όσο και για τη καταλληλότερη επιλογή των δομικών παραμέτρων. Αποδεικνύεται, μάλιστα, ότι η Μέθοδος Taguchi μπορεί να προσφέρει δυνητικά οφέλη για την αξιολόγηση της συμπεριφοράς του δικτύου, όπως η δυνατότητα να εξετάσει την αλληλεπίδραση των νευρώνων με τα συναπτικά βάρη. Συγκεκριμένα, έχουν δημοσιευθεί επιστημονικές μελέτες που τεκμηριώνουν ότι ορίζοντας τα βάρη του νευρωνικού δικτύου ως τα στοιχεία του ορθογώνιου σχηματισμού, η εκτέλεση της Μεθόδου Taguchi μπορεί να μας δώσει το βέλτιστο συνδυασμό των βαρών για το δίκτυό μας.

Φαίνεται, λοιπόν, ότι η αλληλεπίδραση της Μεθόδου Taguchi με τις τεχνικές των ΤΝΔ φέρει πολλαπλά οφέλη και έχει ιδιαίτερα ενδιαφέρουσες προεκτάσεις.

3.2 ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΝΔ ΓΙΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΕΥΡΩΣΤΟΥ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ ΓΙΑ ΔΥΝΑΜΙΚΑ ΠΟΙΟΤΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ.

Το 1997 οι Chao-Ton Su και Kun-Lin Hsieh, στη Σχολή Βιομηχανικής Παραγωγής και Διοίκησης (Department of Industrial Engineering and Management), στο Εκπαιδευτικό Ίδρυμα National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, ROC, δημοσίευσαν το ερευνητικό τους έργο σε σχέση με την εφαρμογή τεχνητών νευρωνικών δικτύων για τη δημιουργία εύρωστου σχεδιασμού που αφορά δυναμικά ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Σύμφωνα με τους ίδιους, οι απαιτήσεις της αγοράς ωθούν τις επιχειρήσεις στην αναβάθμιση της ποιότητας των προϊόντων τους και στη μείωση των εξόδων παραγωγής. Ο «εκτός-διεργασίας» ποιοτικός έλεγχος είναι ένας αποτελεσματικός και επικερδής τρόπος για τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού προϊόντων ή διεργασιών, που λαμβάνει χώρα πριν τον «εντός-διεργασίας» ποιοτικό έλεγχο και τον υποστηρίζει/ενισχύει. Η μέθοδος Taguchi, συνδυάζοντας τις τεχνικές των πειραματικών σχεδιασμών με θεώρηση της απώλειας ποιότητας, χρησιμοποιείται συμβατικά πλέον στον «εκτός-διεργασίας» ποιοτικό έλεγχο. Η μέθοδος Taguchi μπορεί, επίσης, να θεωρηθεί ως τρία διαδοχικά στάδια για τη βελτιστοποίηση ενός προϊόντος ή μιας διεργασίας:

1. Σχεδιασμός συστήματος
2. Παραμετρικός σχεδιασμός
3. Σχεδιασμός ανοχών

Ο Παραμετρικός Σχεδιασμός συνήθως αναφέρεται και ως «Εύρωστος Σχεδιασμός» (Robust Design). Ο Παραμετρικός σχεδιασμός μπορεί να χωριστεί σε 2 κλάσεις ανάλογα με τα υπό εξέταση ποιοτικά χαρακτηριστικά: στα στατικά και τα δυναμικά χαρακτηριστικά. Η βασική διαφορά αυτών των 2 ομάδων είναι ότι η 2^η χρησιμοποιεί τους παράγοντες σήματος (signal factors) ενώ η πρώτη όχι. Μέχρι τώρα το στατικό πρόβλημα έχει λάβει το μεγαλύτερο μέρος της προσοχής. Παρόλα αυτά, το πρόβλημα των δυναμικών χαρακτηριστικών ανακύπτει σχεδόν παντού. Ένα σύστημα μέτρησης αποτελεί μια περίπτωση όπου εμπίπτει στα δυναμικά προβλήματα.

Μεταξύ των πολλών περιορισμών που ενέχει η εφαρμογή της δυναμικής μεθόδου του Taguchi περιλαμβάνονται και οι κάτωθι:

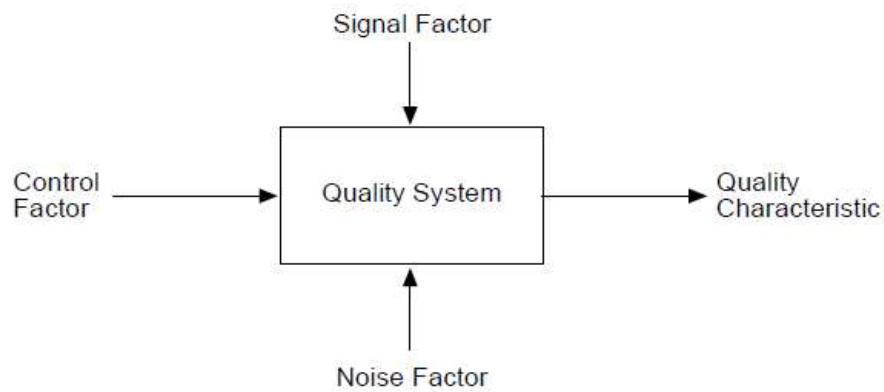
- Δεν μπορεί να εξασφαλιστεί ότι ο παράγοντας προσαρμογής υπάρχει στην πράξη.
- Η μέθοδος Taguchi χειρίζεται μόνο παράγοντες ελέγχου, με αποτέλεσμα την απομάκρυνση από την πραγματική βέλτιστη λύση.
- Η σημαντικότητα της επίδρασης ενός παράγοντα μπορεί ενίοτε να αναστέλλει τις αποφάσεις του πειραματιστή.

Η μελέτη των Su και Hsieh παρουσιάζει καινοτόμα μέσα για την εφαρμογή νευρωνικών δικτύων στο δυναμικό πρόβλημα του Taguchi. Το νευρωνικό δίκτυο χρησιμοποιεί το κρυμμένο χαρακτηριστικό του υπό εξέταση πειράματος όχι μόνο για να εκπαιδευτεί, αλλά έχει επιπλέον τη δυνατότητα να αποθηκεύει το χαρακτηριστικό αυτό στα συναπτικά βάρη μεταξύ των στρωμάτων. Τα συναπτικά βάρη σταθεροποιούνται μετά τη διαδικασία της εκπαίδευσης. Επιπλέον, η προτεινόμενη προσέγγιση ενισχύει την ικανότητα γενίκευσης και οι παράγοντες προσαρμογής δεν είναι πλέον αναγκαίο να ταυτοποιούνται. Επιπρόσθετα, οι Su και Hsieh παραθέτουν στη συγκεκριμένη μελέτη ένα αριθμητικό παράδειγμα σχετικά με την ικανότητα ενός συστήματος μέτρησης να μετρά το πλάτος γραμμής του polycide (συνθετικό αντιμικροβιακό υλικό) στην κατασκευή ημιαγωγών, το οποίο παρουσιάζει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης προσέγγισης.

Οι Su και Hsieh ασχολούνται αρχικά στο άρθρο τους με τα δυναμικά χαρακτηριστικά. Θεωρούν ευρέως αποδεκτό ότι τα δυναμικά χαρακτηριστικά αποτελούν ένα σημαντικό μέρος του παραμετρικού σχεδιασμού του Taguchi. Οι παράμετροι σχεδιασμού αλλά και θορύβου μπορούν να επηρεάσουν ένα προϊόν ή μια διεργασία. Οι παράμετροι σχεδιασμού, καθώς ελέγχονται από τον πειραματιστή μπορούν να χωριστούν σε δυο κατηγορίες: τους *παράγοντες σήματος*, που επηρεάζουν τη μέση ποιοτική απόκριση, και τους *παράγοντες ελέγχου*, που επηρεάζουν τη μεταβλητότητα της ποιοτικής απόκρισης. Οι παράμετροι θορύβου δεν μπορούν να ελεγχθούν.

Τονίζεται ότι ο Παραμετρικός Σχεδιασμός της Μεθόδου Taguchi επικεντρώνεται κυρίως στην επιλογή εκείνων των επιπέδων των παραμέτρων σχεδιασμού που ελαχιστοποιούν την επίδραση των παραγόντων θορύβου. Με άλλα λόγια, οι παράμετροι σχεδιασμού για ένα προϊόν ή μια διεργασία πρέπει να ρυθμίζονται ώστε η απόκριση να έχει τη μικρότερη δυνατή μεταβλητότητα από την τιμή-στόχο. Συνήθως χρησιμοποιείται ο Σχεδιασμός Πειραμάτων για τη διερεύνηση της σχέσης μεταξύ των παραμέτρων σχεδιασμού (παραγόντων ελέγχου) με την απόκριση. Οι παράγοντες ελέγχου και οι παράγοντες θορύβου οργανώνονται σε ορθογώνιες διατάξεις και στη συνέχεια υπολογίζεται ο λόγος του σήματος προς το θόρυβο (signal-to-noise ratio or SN ratio) για κάθε πειραματικό συνδυασμό. Οι Su και Hsieh αναγνωρίζουν στη μελέτη τους ότι το SN ratio αποτελεί μια από τις μεγαλύτερες συνεισφορές του Δρ. Taguchi στη μηχανική και αποτελεί συστατικό στοιχείο του Παραμετρικού Σχεδιασμού. Το SN ratio χρησιμοποιείται για τον καθορισμό της βέλτιστης κατάστασης για τις παραμέτρους του σχεδιασμού.

Σε ένα δυναμικό σύστημα, το υπό εξέταση ποιοτικό χαρακτηριστικό Y θεωρείται γενικά συνάρτηση του παράγοντα σήματος M . Στην παρακάτω εικόνα 1 απεικονίζεται σχηματικά ένα δυναμικό σύστημα.



Εικόνα 1. Σχηματική αναπαράσταση ενός δυναμικού συστήματος

Η ακόλουθη έκφραση είναι από μαθηματική σκοπιά.

$$Y = f(M) + f_e(e) \quad (1)$$

όπου το $f(M)$ αντιπροσωπεύει το μέρος που δύναται να προβλεφθεί,
το e δηλώνει το τυχαίο σφάλμα και
το $f_e(e)$ αντιστοιχεί στο μέρος που δεν μπορεί να προβλεφθεί.

Η σχέση μεταξύ του παράγοντα σήματος και του ποιοτικού χαρακτηριστικού θεωρείται γραμμική, δηλαδή έχει τη μορφή:

$$Y = \beta M + \varepsilon \quad (2)$$

όπου το β δηλώνει την ευαισθησία και
το ε αντιπροσωπεύει τον όρο σφάλματος.

Θεωρώντας τους διαφόρους συνδυασμούς επιπέδων για τους παράγοντες έλεγχου, η σχέση (2) μπορεί να γραφτεί:

$$Y = \beta(d) \cdot M + \varepsilon(d) \quad (3)$$

όπου το d δηλώνει το συνδυασμό επιπέδων για τους παράγοντες ελέγχου,
το $\beta(d)$ αντιπροσωπεύει την ευαισθησία του συστήματος υπό το
συνδυασμό d ,
το $\varepsilon(d)$ είναι ο τυχαίος όρος σφάλματος υπό το συνδυασμό d .

Για την αξιολόγηση της ευρωστίας/στιβαρότητας ενός συστήματος ο Taguchi πρότεινε τον ακόλουθο τύπο για την εκτίμηση του SN Ratio σε ντεσιμπέλ (dB).

$$\eta = 10 \cdot \log \frac{\beta^2}{MSE} \quad (4)$$

Το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) αντιπροσωπεύει τη μέση τετραγωνική απόκλιση μεταξύ της πραγματικής απόκρισης και της βέλτιστης εκτίμησης. Το ζήτημα των SN ratio περιγράφεται λεπτομερώς στους Peace (1993), Phadke (1991) και Fowlkes and Creveling (1995).

Ο Wu (1990) παρουσίασε τα δυναμικά χαρακτηριστικά στη Μηχανική μέτρησης (Measuring engineering).

Σύμφωνα με το άρθρο των Su και Hsieh, συνήθως, υπάρχουν τρεις βασικές συνθήκες που χρησιμοποιούνται για να καθορίσουν τις πηγές των λαθών μέτρησης.

- (1) **Επαναληπτικότητα**, που αναφέρεται στις διαφορές μεταξύ των αποτελεσμάτων μέτρησης που λαμβάνονται για το ίδιο δείγμα και από συγκεκριμένο άτομο.
- (2) **Αναπαραγωγικότητα**, που αναφέρεται στις διαφορές των μετρήσεων που λαμβάνονται από διαφορετικά άτομα, αλλά από το ίδιο δείγμα
- (3) **Σταθερότητα**, που αναφέρεται στις διαφορές των μετρήσεων που λαμβάνονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές υπό τις ίδιες συνθήκες.

Οι παραπάνω οροί αναφέρονται σε διαφορετικές πηγές μεταβλητότητας, που όλες, όμως, μπορούν να αποκαλούνται θόρυβος. Στη μελέτη σημειώνεται ότι από άποψη μηχανικής, η επίδραση του θορύβου πρέπει να μειωθεί ώστε να μην καθορίζει την πηγή της μεταβλητότητας. Η διαμέτρηση / βαθμονόμηση (calibration) αποτελεί ένα μέσο για την προσαρμογή ενός συστήματος μέτρησης με στόχο τη μείωση της μεταβλητότητας. Ο παραμετρικός σχεδιασμός όχι μόνο μπορεί να επιβεβαιώσει ότι η βαθμονόμηση είναι πιο αποτελεσματική, αλλά μπορεί και να ελαχιστοποιήσει τη μεταβλητότητα, εφόσον η σχέση εισόδου-εξόδου του συστήματος μέτρησης είναι γραμμική.

Η γραμμική σχέση είναι η πιο διαδεδομένη και αποδοτική στη Μέθοδο Taguchi. Ωστόσο, στην πράξη, προκύπτουν διαφορές μορφές συναρτησιακών/λειτουργικών σχέσεων, αφού οι μη γραμμικές σχέσεις υπάρχουν παντού.

Οι Miller και Wu (1996) προσάρμοσαν την προσέγγιση μοντελοποίησης της συνάρτησης απόκρισης για μια δυναμική περίπτωση. Η προσέγγιση που πρότειναν μπορεί να διατηρήσει το χαρακτηριστικό της απλής μορφής της μοντελοποίησης της απόκρισης και να απλοποιήσει την πειραματική ανάλυση. Ο Wasserman (1996) παρουσίασε μια μελέτη περίπτωσης για έναν παραμετρικό σχεδιασμό με δυναμικά χαρακτηριστικά χρησιμοποιώντας μοντέλα πολλαπλής παλινδρόμησης. Ωστόσο, στο άρθρο υποστηρίζεται ότι άτομα με περιορισμένη στατιστική εμπειρία/εκπαίδευση αντιμετωπίζουν

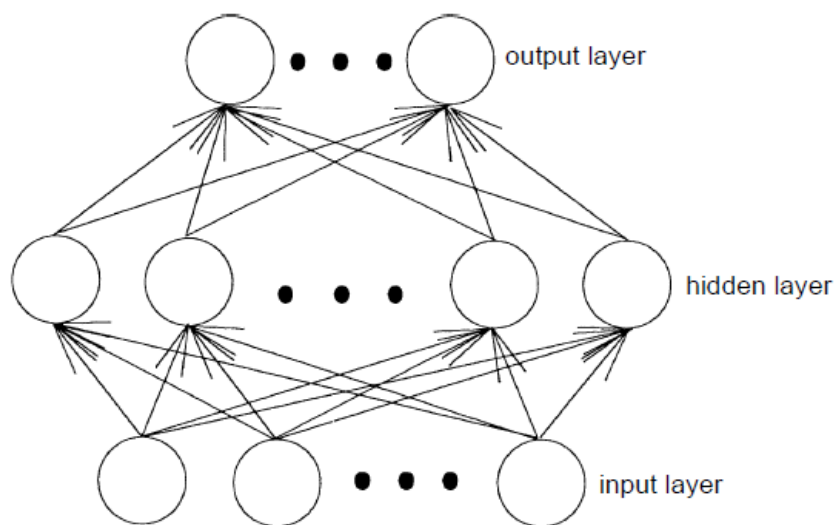
δυσκολίες στην κατανόηση των παραπάνω μεθόδων. Όποτε, πρέπει να αναπτυχτεί μια πιο απλή προσέγγιση για την αντιμετώπιση του δυναμικού προβλήματος.

Στη συνέχεια της μελέτης τους οι Su και Hsieh ασχολούνται με τα Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα (ΤΝΔ).

Ένα Τεχνητό Νευρωνικό Δίκτυο δομείται με βάση ένα πλήθος απλών στοιχείων. Τα στοιχεία οργανώνονται σε μια σειρά στρώματων που συνδέονται μεταξύ τους με βάρη. Τα βάρη αυτά προσαρμόζονται κατά τη διαδικασία της μάθησης (επιβλεπόμενη ή μη επιβλεπόμενη μάθηση).

Η δομή ενός νευρωνικού δικτύου μπορεί να χαρακτηριστεί από το πρότυπο σύνδεσης μεταξύ των στοιχείων, τη συνάρτηση μεταφοράς ή ενεργοποίηση (για τη μετατροπή των δεδομένων εισόδου σε έξοδο του κάθε στοιχείου) και από τη μέθοδο εκπαίδευσης του δικτύου. Η προσέγγιση που προτείνεται στη συγκεκριμένη έρευνα για την αντιμετώπιση ενός προβλήματος δυναμικών χαρακτηριστικών βασίζεται σε ΤΝΔ που εκπαιδεύονται με τη μέθοδο της επιβλεπόμενης μάθησης. Στο άρθρο αναφέρεται ότι υπάρχει ένα πλήθος γνωστών μοντέλων νευρωνικών δικτύων με επιβλεπόμενη μάθηση, όπως τα ΤΝΔ οπισθοδιάδοσης και διάφορα άλλα. Το μοντέλο της οπισθοδιάδοσης χρησιμοποιείται ευρέως σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα και, επομένως, έχει επιλεγεί και στη συγκεκριμένη μελέτη.

Ένα νευρωνικό δίκτυο οπισθοδιάδοσης (Backpropagation-BP) αποτελείται από τρία ή περισσότερα στρώματα. Ένα στρώμα εισόδου (input layer), ένα ή περισσότερα κρυμμένα στρώματα (hidden layers) και ένα στρώμα εξόδου (output layer). Στην εικόνα 2 παρουσιάζεται ένα βασικό BP-Δίκτυο με 3 στρώματα.



Εικόνα 2. BP Network με 3 στρώματα

Η μάθηση με οπισθοδιάδοση βασίζεται σε έναν αλγόριθμο καθοδικής κλίσης (gradient-descent algorithm) (Rumelhart et al., 1986). Αρχικά, συλλέγεται ένα σύνολο δεδομένων εκπαίδευσης για την ανάπτυξη του μοντέλου του νευρωνικού δικτύου οπισθοδιάδοσης. Μέσω ενός επιβλεπόμενου κανόνα μάθησης το σύνολο δεδομένων αποτελείται από μια είσοδο και μια πραγματική έξοδο.

Ο αλγόριθμος απότομης καθόδου βοηθά ένα δίκτυο να βελτιώσει την απόδοση του μέσω αυτο-εκπαίδευσης (self-learning). Υπάρχουν δυο φάσεις υπολογισμών: η προς τα εμπρός (forward) και η προς τα πίσω (backward). Αρχικά, το δίκτυο οπισθοδιάδοσης δέχεται ένα σύνολο δεδομένων εισόδου τα οποία κατευθύνει άμεσα στο κρυμμένο στρώμα. Κάθε στοιχείο του κρυμμένου στρώματος υπολογίζει μια τιμή ενεργοποίησης αθροίζοντας τις τιμές που έχουν πάρει τα δεδομένα εισόδου αφού έχουν πολλαπλασιαστεί με τα κατάλληλα βάρη και στη συνέχεια μετατρέπει το άθροισμα αυτό σε έξοδο του συγκεκριμένου νευρώνα χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση ενεργοποίησης. Κάθε στοιχείο του στρώματος εξόδου χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό μιας τιμής ενεργοποίησης αθροίζοντας τις σταθμισμένες εισόδους που αποδόθηκαν στο κρυμμένο στρώμα. Στη συνέχεια, χρησιμοποιείται μια συνάρτηση ενεργοποίησης για τον υπολογισμό της εξόδου του δικτύου. Έπειτα, η πραγματική έξοδος του δικτύου συγκρίνεται με την τιμή-στόχο. Αν προκύψει διάφορα, δηλαδή όρος σφάλματος, χρησιμοποιείται ο αλγόριθμος απότομης καθόδου για να επαναριθμήσει τα συναπτικά βάρη. Εάν δεν προκύψουν διαφορές η εκπαίδευση δεν συνεχίζεται.

Η λεπτομερής διαδικασία της οπισθοδιάδοσης έχει ως εξής:

Βήμα 1: Αρχικοποίηση των συναπτικών βαρών μεταξύ των στρωμάτων.

Βήμα 2: Επιλογή του κατάλληλου προγράμματος/χρονοδιαγράμματος εκπαίδευσης (π.χ. προσδιορισμός του ποσοστού εκπαίδευσης, της έντασης και της μαθησιακής καταμέτρησης (learning count)).

Βήμα 3: Επανάληψη της παρακάτω διαδικασίας έως ότου επιτευχθεί σφάλμα εντός των επιτρεπόμενων ορίων:

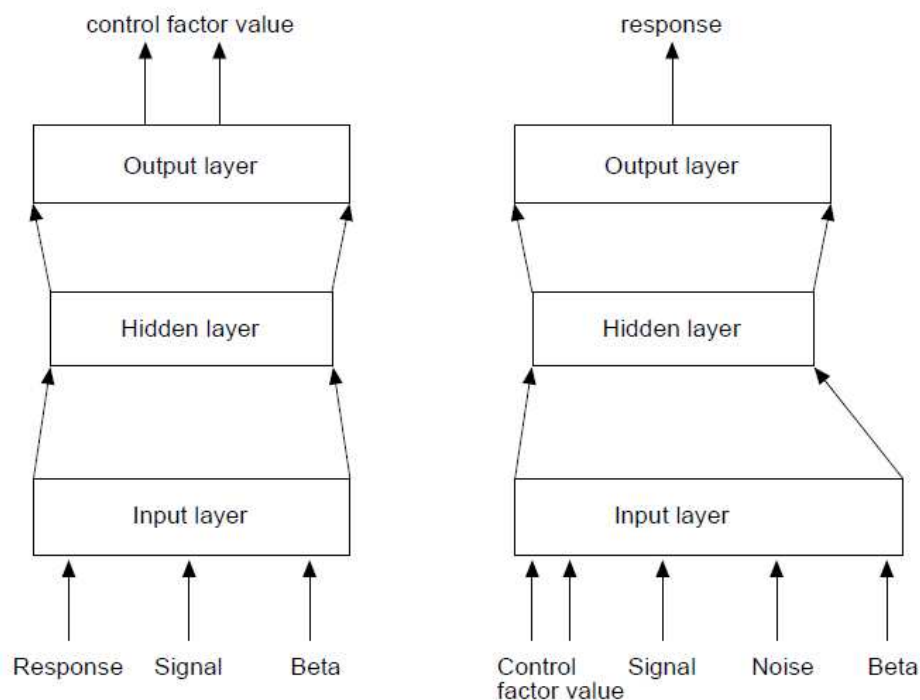
- A.** Υπολογισμός εξόδου για κάθε κρυμμένο νευρώνα.
- B.** Υπολογισμός εξόδου για κάθε νευρώνα εξόδου.
- Γ.** Υπολογισμός του λάθους μεταξύ της πραγματικής εξόδου του νευρώνα και της τιμής στόχου.
- Δ.** Υπολογισμός της τροποποιημένης καθόδου για τους νευρώνες εξόδου.
- Ε.** Υπολογισμός της τροποποιημένης καθόδου για τους κρυμμένους νευρώνες.
- ΣΤ.** Τροποποίηση των βαρών μεταξύ στρώματος εξόδου και κρυμμένου στρώματος.
- Z.** Τροποποίηση των βαρών μεταξύ κρυμμένου στρώματος και στρώματος εισόδου.

Ακολούθως οι Su και Hsieh αναλύουν τη μέθοδο που προτείνουν ως αποτέλεσμα της έρευνάς τους, σε σχέση με τη χρήση νευρωνικών δικτύων για τον εύρωστο σχεδιασμό δυναμικών χαρακτηριστικών.

Το νευρωνικό δίκτυο οπισθοδιάδοσης χρησιμοποιείται άμεσα για την ανάπτυξη της προτεινόμενης προσέγγισης. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τη έρευνα των Su και Hsieh αναπτύσσονται δύο νευρωνικά δίκτυα. Το 1^ο δίκτυο χρησιμοποιείται για την εύρεση των βέλτιστων επιπέδων για τους παράγοντες ελέγχου από έναν χώρο πιθανών λύσεων. Στη συνέχεια, οι τιμές των παραγόντων ελέγχου που βρέθηκαν στο 1^ο δίκτυο χρησιμοποιούνται ως μια από τις εισόδους για το 2^ο δίκτυο, ώστε να φτάσουμε στην τελική απόκριση. Ο απαραίτητος αριθμός νευρώνων για κάθε στρώμα εξαρτάται από το εκάστοτε πρόβλημα.

Το 1^ο δίκτυο αποτελείται από τρία στρώματα. Το στρώμα εισόδου αποτελείται από $2 \cdot m + 1$ νευρώνες, που αντιστοιχούν σε m αποκρίσεις, m αντίστοιχους συντελεστές β και 1 τιμή σήματος. Το στρώμα εξόδου αποτελείται από n (όσοι και οι παράγοντες ελέγχου) νευρώνες που αντιστοιχούν στο βέλτιστο συνδυασμό των παραγόντων ελέγχου.

Το 2^ο τεχνητό νευρωνικό δίκτυο αποτελείται και αυτό από τρία στρώματα. Το στρώμα εισόδου αποτελείται από $n + 3$ νευρώνες που ο καθένας αντιπροσωπεύει την τιμή ενός παράγοντα ελέγχου και το αντίστοιχο σήμα, θόρυβο και β στο δεδομένο πείραμα. Το στρώμα εξόδου έχει έναν νευρώνα που παρουσιάζει την τελική εκτίμηση της ποιοτικής απόκρισης. Στην εικόνα 3 παρουσιάζονται οι βασικές δομές για τα δύο προτεινόμενα νευρωνικά δίκτυα.



Εικόνα 3. Τοπολογία για τα δύο προτεινόμενα νευρωνικά δίκτυα.

Στο δίκτυο οπισθοδιάδοσης το κρυφό στρώμα περιλαμβάνει και κάποιους νευρώνες που χρησιμοποιούνται για υπολογιστικούς σκοπούς. Σύμφωνα με τους Su και Hsieh, ο ακριβής καθορισμός του αριθμού των κρυμμένων νευρώνων αποτελεί ένα ιδιαίτερος δύσκολο ζήτημα. Αν επιλεγούν λίγοι κρυφοί νευρώνες θα περιοριστεί η ικανότητα γενίκευσης του δικτύου, ενώ αντίθετα υπεράριθμοι νευρώνες συνήθως οδηγούν σε υπερεκπαίδευση ή απομνημόνευση από το δίκτυο. Ο αριθμός των κρυμμένων νευρώνων καθορίζεται γενικά από τη μέθοδο «δοκιμή και λάθος». Οι Su και Hsieh θεωρούν αρχικά ένα άμεσο μέσο/τρόπο, όπως λόγου χάριν το μέσο αριθμό νευρώνων εισόδου και εξόδου. Στη συνέχεια γίνεται προσπάθεια για αύξηση/μείωση του αριθμού νευρώνων ώστε να προκύψει τελικά ο κατάλληλος αριθμός των κρυμμένων νευρώνων. (NeuralWare Tnc., 1990)

Η προτεινόμενη προσέγγιση έχει ως εξής:

ΦΑΣΗ 1: Καθορισμός βέλτιστων συνθηκών

- **Βήμα 1:** Υπολογισμός του β για κάθε δοκιμή χρησιμοποιώντας τον τύπο του Taguchi για τα δυναμικά προβλήματα.
- **Βήμα 2:** Από τα πρότυπα εισόδου και ελέγχου επιλέγονται τυχαία τα δεδομένα από τον ορθογώνιο πίνακα.
- **Βήμα 3:** Κατασκευή διαφορετικών αρχιτεκτονικών δικτύου για την εκπαίδευση του πρώτου νευρωνικού δικτύου ορίζοντας την απόκριση, το β και τους παράγοντες σήματος ως τις εισόδους του δικτύου και τους παράγοντες ελέγχου ως τις εξόδους του δικτύου.
- **Βήμα 4:** Επανεκπαίδευση της επιλεγμένης αρχιτεκτονικής του 1^{ου} δικτύου, ώστε να επιτευχθεί σταθερότητα, συνδυάζοντας τα παραπάνω σύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου του βήματος 2 σε ένα σύνολο εκπαίδευσης.
- **Βήμα 5:** Επιτυγχάνεται η βέλτιστη κατάσταση εισάγοντας την απόκριση, το σήμα και το β στο 1^ο δίκτυο.

ΦΑΣΗ 2: Εκτίμηση της απόκρισης, του SNR και του β

- **Βήμα 1:** Κατασκευή δικτύων διαφορετικών αρχιτεκτονικών δομών για την εκπαίδευση του 2^{ου} δικτύου ορίζοντας την τιμή των παραγόντων ελέγχου, το β , το θόρυβο και το σήμα ως τις εισόδους του δικτύου και την απόκριση ως την έξοδο του δικτύου αντίστοιχα.
- **Βήμα 2:** Επανεκπαίδευση της επιλεγμένης αρχιτεκτονικής για το 2^ο νευρωνικό δίκτυο για επίτευξη σταθερότητας συνδυάζοντας τα σύνολα εκπαίδευσης και ελέγχου του βήματος 2 σε ένα σύνολο εκπαίδευσης.
- **Βήμα 3:** Αποκομίζονται οι προβλεπόμενες τιμές της απόκρισης εισάγοντας τις βέλτιστες συνθήκες, όπως βρέθηκαν από το 1^ο δίκτυο, το σήμα, το θόρυβο και το β , που πήραμε από το 2^ο δίκτυο.
- **Βήμα 4:** Υπολογισμός του SNR και του β για τις βέλτιστες συνθήκες που βρέθηκαν στη φάση 1.

Μετά την παρουσίαση της προτεινόμενης από τους Su και Hsieh μεθόδου, παραθέτετε στο άρθρο ένα αριθμητικό παράδειγμα που αφορά μια διαδικασία χάραξης στην κατασκευή ημιαγωγών με μια/μονή απόκριση (TSMC, Ltd, 1996) και έχει σκοπό να φανερώσει την αποτελεσματικότητα της προτεινόμενης μεθόδου.

Η απόκριση είναι το πλάτος γραμμής του υλικού polycide σε μm . Οι μηχανικοί διεργασιών σχεδιάζουν ένα συγκεκριμένο πρότυπο ή μια κριτική διάσταση (critical dimension) για σκοπούς μέτρησης ώστε να παρακολουθούν τη διακύμανση του πλάτους γραμμής σε ένα chip και στη συνέχεια χρησιμοποιούν Στατιστικές Μεθόδους Πειραμάτων για τη μέτρηση του πάχους της κριτικής διάστασης κατά τη διεργασία.

Γίνεται προσπάθεια για την εύρεση μιας εύρωστης συνταγής για τη μέτρηση του πλάτους της μπάρας της κριτικής διάστασης (CD bar width). Υπάρχουν 8 παράγοντες ελέγχου A, B, C, D, E, F, G, H. Στον πίνακα 1 παρουσιάζονται τα επίπεδα των παραγόντων αυτών.

Control factors	Level 1	Level 2	Level 3
A	<u>5</u>	0	
B	240	<u>260</u>	280
C	20	<u>25</u>	30
D	130	<u>150</u>	170
E	70	<u>80</u>	90
F	60	<u>80</u>	100
G	0.6061	<u>0.4722</u>	0.3589
H	35	<u>50</u>	65

Note:
Starting levels are identified by underline

Πίνακας 1. Οι παράγοντες ελέγχου και τα επίπεδά τους

Οι διαφορετικές θέσεις μέτρησης λογίζονται ως ο παράγοντας θορύβου. Το πλάτος της μπάρας της κριτικής διάστασης (CD bar width) είναι ένας παράγοντας σήματος και θεωρούνται για αυτόν οι τιμές 0,5 μm , 0,6 μm , 0,8 μm .

Η περίπτωση αυτή είναι ένα πρόβλημα δυναμικού χαρακτηριστικού με μονή απόκριση. Στο πείραμα χρησιμοποιείται L_{18} ορθογώνιος πίνακας χωρίς επανάληψη (L_{18} orthogonal table without replication). Στον πίνακα 2 παρουσιάζονται τα πραγματικά πειραματικά δεδομένα.

Experiment number	0.5 μ m		0.6 μ m		0.8 μ m		β	SN
	center	edge	center	center	edge	edge		
run #1	0.652	0.662	0.778	0.652	0.662	0.774	1.27272	35.563
run #2	0.64	0.663	0.765	0.64	0.663	0.733	1.25884	36.449
run #3	0.676	0.623	1.064	0.676	0.623	1.008	1.47708	21.773
run #4	0.658	0.746	0.778	0.658	0.746	0.817	1.29400	26.733
run #5	0.672	0.674	0.792	0.672	0.674	0.814	1.31540	36.025
run #6	0.97	1.022	0.97	0.97	1.022	1.029	1.57608	19.074
run #7	0.638	0.672	0.775	0.638	0.672	0.777	1.26776	34.049
run #8	0.67	0.664	0.773	0.67	0.664	0.761	1.27784	35.488
run #9	0.678	0.665	0.798	0.678	0.665	0.802	1.32076	40.474
run #10	0.602	0.715	0.747	0.602	0.715	0.818	1.25308	26.721
run #11	0.608	0.623	0.712	0.608	0.623	0.755	1.20628	35.305
run #12	0.642	0.648	0.767	0.642	0.648	0.769	1.22312	28.586
run #13	0.67	0.669	0.736	0.67	0.669	0.767	1.24708	29.134
run #14	0.671	0.687	0.925	0.671	0.687	0.923	1.34456	23.050
run #15	0.633	0.607	0.723	0.633	0.607	0.72	1.18280	31.894
run #16	0.651	0.661	0.773	0.651	0.661	0.772	1.24856	31.162
run #17	0.676	0.637	0.779	0.676	0.637	0.781	1.28372	36.067
run #18	0.612	0.612	0.731	0.612	0.612	0.737	1.19040	33.130

Πίνακας 2. Πραγματικά πειραματικά δεδομένα.

Για να απλοποιηθεί η εφαρμογή της προτεινόμενης προσέγγισης προτείνεται από τους Su και Hsieh η χρήση λογισμικού πακέτου νευρωνικών δικτύων, ώστε να αναπτυχθούν τα δίκτυα που απαιτούνται. Συγκεκριμένα, για το δεδομένο παράδειγμα χρησιμοποιήθηκε το πακέτο Neural Professional Plus II NeuralWare, Inc. (1990). Το πακέτο αυτό βασίζεται στη γλώσσα προγραμματισμού C και παρέχει ένα σύστημα για την ανάπτυξη διαφόρων μοντέλων νευρωνικών δικτύων.

Το κριτήριο σύγκλισης που χρησιμοποιείται για την εκπαίδευση του δικτύου είναι η ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (Root of MSE – RMSE) να είναι μικρότερη ή ίση από 0,001 ή κατ' ανώτατο όριο 10.000 epochs.¹⁹ Για να ληφθούν οι βέλτιστες συνθήκες για το παράδειγμα αυτό η απόκριση, το β και οι τιμές για τους παράγοντες σήματος αναθέτονται ως είσοδοι για το 1^ο νευρωνικό δίκτυο και οι τιμές για τους παράγοντες ελέγχου αποσπώνται ως έξοδοι. Στον πίνακα 3 παρουσιάζονται διάφορες εκδοχές για την αρχιτεκτονική του 1^{ου} νευρωνικού δικτύου. Επιλέγεται η δομή 3-4-8 για την απόκτηση των βέλτιστων συνθηκών.

Το δίκτυο φτάνει σε μια σταθερή κατάσταση για τα συναπτικά βάρη μετά από 10.000 βήματα εκπαίδευσης (epochs). Με την εισαγωγή της απόκρισης, του β και του σήματος στο σταθερά πλέον σταθμισμένο δίκτυο λαμβάνονται οι βέλτιστες συνθήκες, ήτοι

$$(A, B, C, D, E, F, G, H) = (4.99, 241.60, 29.68, 143.20, 70.02, 99.97, 0.61, 36)$$

¹⁹ Epoch, ένα βήμα στη διαδικασία εκπαίδευσης ενός τεχνητού νευρωνικού δικτύου

Hidden elements	RMSE(training)	RMSE(testing)
2	0.0945	0.1120
3	0.0908	0.0997
4*	0.0842	0.0925
5	0.0794	0.0933
6	0.0765	0.0937

Note:

* denotes the optimal option after trade-off

Πίνακας 3. Οι τιμές του RMSE για διάφορους αριθμούς κρυμμένων νευρώνων στο 1^ο δίκτυο.

Στη συνέχεια χρησιμοποιείται η φάση 2 για την εκτίμηση της απόκρισης, του SNR και του β . Το 2^ο δίκτυο εκπαιδεύεται με την ανάθεση των τιμών των παραγόντων ελέγχου, του σήματος και του β ως εισόδους του δικτύου και της απόκρισης ως έξοδο του δικτύου. Στον πίνακα 4 παρουσιάζονται διάφορες εκδοχές για την αρχιτεκτονική του 2^{ου} νευρωνικού δικτύου. Επιλέγεται η δομή 11-5-1 για την επίτευξη της βέλτιστης απόδοσης. Το δίκτυο φτάνει σε μια σταθερά σταθμισμένη κατάσταση μετά από 10.000 epochs.

Hidden elements	RMSE(training)	RMSE(testing)
3	0.0348	0.0446
4	0.0299	0.0396
5*	0.0245	0.0334
6	0.0219	0.0352
7	0.0183	0.0377

Note:

* represents the optimal option after trade-off

Πίνακας 4. Οι τιμές του RMSE για διάφορους αριθμούς κρυμμένων νευρώνων στο 2^ο δίκτυο.

Οι προβλεπόμενες τιμές μέτρησης μπορούν να ληφθούν εισάγοντας στο 2^ο εκπαιδευμένο/καταρτισμένο νευρωνικό δίκτυο τις βέλτιστες συνθήκες που βρέθηκαν από το 1^ο δίκτυο, το σήμα, το β και το θόρυβο. Λόγου χάριν,

$$\begin{aligned} \text{αν η είσοδος είναι } (A, B, C, D, E, F, G, H, \text{signal}, \beta, \text{noise}) = \\ = (4.99, 241.60, 29.68, 143.20, 70.02, 99.97, 0.61, 36, 0.6, 1, 1) \end{aligned}$$

η προβλεπόμενη τιμή μέτρησης είναι 0,5982.

$$\begin{aligned} \text{Αν η είσοδος είναι } (A, B, C, D, E, F, G, H, \text{signal}, \beta, \text{noise}) = \\ = (4.99, 241.60, 29.68, 143.20, 70.02, 99.97, 0.61, 36, 0.8, 1, 2) \end{aligned}$$

η προβλεπόμενη τιμή μέτρησης είναι 0,8069.

Ο πίνακας 5 συνοψίζει τα προβλεπόμενα αποτελέσματα. Τέλος, χρησιμοποιείται η δυναμική φόρμουλα του Taguchi για την εύρεση του SNR και του β . Τα αποτελέσματα αυτά παρουσιάζονται στον πίνακα 8.

	0.5 μm	Signal factor 0.6 μm	0.8 μm
Noise factor	0.5036	0.5982	0.8054
Center edge	0.5012	0.6015	0.8069

Πίνακας 5. Οι προβλεπόμενες τιμές μέτρησης.

Στο άρθρο υπογραμμίζεται ότι η δυναμική μέθοδος του Taguchi χρησιμοποιείται, επίσης, για την εύρεση του βέλτιστου συνδυασμού επιπέδων για τους παράγοντες ελέγχου. Οι τιμές για τα SNR και β για κάθε δοκιμή μπορούν να ληφθούν από τον τύπο του Taguchi και στη συνέχεια μπορεί να υπολογιστεί η επίδραση του κάθε παράγοντα στα διάφορα επίπεδά του. Στους πίνακες 6 και 7 συνοψίζονται τα αποτελέσματα αυτά. Σύμφωνα με τον πίνακα 6 ο βέλτιστος συνδυασμός επιπέδων για τους παράγοντες ελέγχου είναι $A_1B_3C_2D_1E_2F_3G_1H_1$.

Οι παράγοντες B, C, D, H επηρεάζουν σημαντικά το SNR. Η προβλεπόμενη τιμή για το SNR, που προκύπτει για το βέλτιστο συνδυασμό επιπέδων, είναι 45,86. Από τον πίνακα 7 φαίνεται ότι οι παράγοντες A, B, C, D, E, H επηρεάζουν σημαντικά το β . Το προβλεπόμενο β είναι 1,184.

SN	A	B	C	D	E	F	G	H
Level 1	31.7365	30.7329	30.560	34.339	30.0285	30.625	32.4767	33.1368
Level 2	30.561	27.652	33.7307	32.896	31.7187	31.0929	30.7091	31.9331
Level 3		35.062	29.1552	26.2113	31.699	31.7031	30.2605	28.3763
Difference	1.18	7.41	4.57	8.13	1.69	1.05	2.22	4.76

Πίνακας 6. Η επίδραση των επιπέδων των παραγόντων στο SNR.

Beta	A	B	C	D	E	F	G	H
Level 1	1.34	1.282	1.264	1.260	1.310	1.313	1.288	1.249
Level 2	1.24	1.327	1.281	1.250	1.248	1.277	1.304	1.310
Level 3		1.265	1.328	1.323	1.316	1.083	1.282	1.315
Difference	0.1	0.062	0.064	0.073	0.068	0.036	0.022	0.066

Πίνακας 7. Η επίδραση των επιπέδων των παραγόντων στο β

Στο παράδειγμα χρησιμοποιείται το 2^ο, ανεπτυγμένο πλέον, νευρωνικό δίκτυο για την πρόβλεψη της απόκρισης υπό τις βέλτιστες συνθήκες και στη συνέχεια υπολογίζονται τα αντίστοιχα SNR και β . Λαμβάνονται τα εξής αποτελέσματα:

$$SNR = 43,92 \text{ και } \beta = 1,196 .$$

Τα αποτελέσματα αυτά συνδέονται στενά με τα υπολογιστικά αποτελέσματα που λαμβάνονται από τη χρήση του προσθετικού μοντέλου του Taguchi. Το εύρημα αυτό επιβεβαιώνει την αποτελεσματικότητα της φάσης 2 της προτεινόμενης προσέγγισης.

Σε μία προσπάθεια σύγκρισής των δύο μεθόδων οι Su και Hsieh τονίζουν ότι στην εργασία τους παρουσιάζεται ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα σε σχέση με ένα σύστημα μέτρησης στο οποίο η τιμή μέτρησης προσδοκείται να είναι ίση με την τιμή σήματος. Επιδιώκεται, δηλαδή, το β να είναι κοντά στο 1.

Όπως φαίνεται στον πίνακα 8, η τιμή του β που προκύπτει από την προτεινόμενη προσέγγιση είναι πολύ κοντά στο 1, επομένως η προτεινόμενη μέθοδος έχει καλύτερη γραμμική προσαρμογή/ επίδραση σε σχέση με τη μέθοδο Taguchi. Με άλλα λόγια, η προτεινόμενη προσέγγιση μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα της απόκρισης. Επιπλέον, οι βέλτιστες συνθήκες που λαμβάνονται από την εφαρμογή της προτεινόμενης προσέγγισης μπορεί να είναι πιο ισχυρές/εύρωστες σε σχέση με τις βέλτιστες συνθήκες που προκύπτουν από τη Μέθοδο Taguchi.

Στο τέλος της ερευνητικής τους εργασίας, όπου γίνεται μια περίληψη και τελική εκτίμηση των αποτελεσμάτων, οι Su και Hsieh αναφέρουν ότι στη μελέτη τους παρουσιάζεται μια καινοτόμος προσέγγιση που βασίζεται στις τεχνικές των νευρωνικών δικτύων για να επιτευχθεί ένας εύρωστος σχεδιασμός για δυναμικά χαρακτηριστικά. Η μέθοδος που προτείνεται έχει διάφορα πλεονεκτήματα:

- Η χρήση των νευρωνικών δικτύων παρέχει μια βελτιωμένη ικανότητα γενίκευσης.
- Η προσέγγιση των νευρωνικών δικτύων είναι πιο αποτελεσματική όσον αφορά τον προσδιορισμό της συνεχούς ρύθμισης των παραμέτρων σε σχέση με τη μέθοδο Taguchi.
- Η προτεινόμενη προσέγγιση δεν απαιτεί τον προσδιορισμό των παραγόντων συντονισμού.

Επιπρόσθετα, οι Su και Hsieh υποστηρίζουν ότι άτομα με περιορισμένη στατιστική εκπαίδευση έχουν μια σχετική ευκολία στο να αντιληφθούν και να κατανοήσουν την προτεινόμενη προσέγγιση. Επίσης, οι μηχανικοί μπορούν εφαρμόσουν άμεσα ένα πακέτο λογισμικού νευρωνικών δικτύων για την ανάπτυξη των απαιτούμενων μοντέλων.

Επιπλέον, οι Su και Hsieh θεωρούν ότι η προσέγγιση των νευρωνικών δικτύων αποτελεί εναλλακτική μορφή εργασίας για την Μεθοδολογία Αποκριτικής Επιφάνειας (RSM). Η σχέση της απόκρισης με τις τιμές των παραγόντων ελέγχου μπορεί να περιγραφεί/μοντελοποιηθεί με τη βοήθεια του παράγοντα σήματος. Επομένως, το κρυμμένο χαρακτηριστικό στο σχεδιασμένο πείραμα μπορεί να φανερωθεί με την εφαρμογή της προσέγγισης νευρωνικών δικτύων, που βασίζεται σε συσσωρευτικά ιστορικά δεδομένα.

Οι Su και Hsieh δηλώνουν στο τέλος του άρθρου τους ότι η προσέγγιση που προτείνουν υπερέχει της συμβατικής προσέγγισης της στατιστικής μοντελοποίησης κυρίως όταν υφίσταται μη γραμμική σχέση μεταξύ της απόκρισης και των παραμέτρων σχεδιασμού.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. I. Aleksander and H. Morton, 1995, *An introduction to neural computing*, 2nd Edition, International Thomson Computer Press.
2. A.D. Anastasiadis, 2005, Ph.D. Thesis: Neural Networks Training and Applications Using Biological Data, School of Computer Science and Information Systems, University of London.
3. D. Anderson and G. McNeill, 1992, *Artificial Neural Networks Technology*, A DACS State-of-the-Art Report, Kaman Sciences Corporation (ebook).
4. H. J. Bajaria, 1997, “TQM and Statistical Thinking”, The Second World Congress for Total Quality Management, Sheffield, UK.
5. C. M. Bishop, 1995, *Neural networks for pattern recognition*, Oxford University Press, Oxford.
6. S. Chatterjee and M. Laudato, 1995, “Statistical Applications Of Neural Networks”, Northeastern University, Boston, Massachusetts.
7. B. Cheng and D. M. Titterington, 1994, “Neural Networks: A Review from a Statistical Perspective”, *Statistical Science*, Vol. 9, pp 2-54.
8. L. Fausett, 1994, *Fundamentals of Neural Networks-Architectures, Algorithms and Applications*, Prentice Hall, New Jersey, USA.
9. J. Franke, W. Härdle, C. Hafner, 2008, *Introduction To Statistics Of Financial Markets*, Chapter 19: Neural Networks, 2nd Edition, Springer.
10. S. Haykin, 1999, *Neural networks: A comprehensive foundation*, 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey.
11. S. Haykin , 2010, *Νευρωνικά Δίκτυα και Μηχανική Μάθηση*, 3^η Έκδοση, Εκδόσεις Παπασωτηρίου (Μετάφραση Ελένη Γκαγκάτσιου).
12. V. R. Joseph and C. F. J. Wu, 2002, “Performance Measures in Dynamic Parameter Design”, *Journal of Japanese Quality Engineering Society*, Vol. 10, pp 82-86.
13. V. R. Joseph and C. F. J. Wu, 2002, “Robust Parameter Design of Multiple Target Systems”, *Technometrics*, Vol. 44, pp 338-346.
14. R. N Kacker, 1985, “Off line quality control, Parameter Design and the Taguchi Method”, *Journal of Quality Technology*, Vol. 17, pp 176-188.
15. B. Krose and P. Smagt, 1996, *An Introduction to Neural Networks*, University of Amsterdam (ebook).

16. R. H. Mayers et. al., 1992, "Response Surface Alternatives to the Taguchi Robust Parameter Design Approach", *The American Statistician*, Vol. 46, No. 2, pp 131-145.
17. I. Ograjenšek, 1998, Master Thesis: "The Role of Statistical Quality Control in the Total Quality Management System", University of Ljubljana, Faculty of Economics, Ljubljana.
18. G. S. Peace, 1993, *Taguchi Methods: A hands-on approach*, Addison-Wesley.
19. M. S. Phadke, 1989, *Quality engineering using robust design*, Prentice Hall (Englewood Cliffs, N.J.).
20. M. A. Razi and K. Athappilly, 2005, "A Comparative Predictive Analysis of Neural Networks, Nonlinear Regression and Classification and Regression Tree Models", Elsevier, *Expert Systems with Applications*, Vol. 29, pp. 65–74.
21. R. Rójas, 1996, *Neural Networks - A Systematic Introduction*, Springer-Verlag, Berlin.
22. R. K. Roy, 2010, *A Primer on the Taguchi Method*, Society of Manufacturing Engineers.
23. P. J. Ross, 1996, *Taguchi Techniques for Quality Engineering*, 2nd Edition, McGraw- Hill Companies, New York.
24. W. S. Sarle, 1994, "Neural Networks and Statistical Models", Proceedings of the 19th Annual SAS Users Group International Conference, SAS Institute, USA, pp 1538-1550.
25. R. Senthilkumar et. al., 2010, "Thermal Analysis of Heat Pipe using Taguchi Method", *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2, pp 564-569.
26. Ch. Stergiou, D. Siganos, "Neural Networks", Report for the Imperial College of London (http://www.doc.ic.ac.uk/~nd/surprise_96/journal/vol4/cs11/report.html).
27. C.-T. Su and K.-L. Hsieh, 1997, "Applying neural network approach to achieve robust design for dynamic quality characteristics", Department of Industrial Engineering and Management, National Chiao Tung University, Hsinchu, Taiwan, ROC.
28. G. Taguchi, S. Chowdhury, Y. Wu, 2004, *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, John Wiley & Sons, New Jersey.
29. G. Taguchi and S. Konishi, 1987, *Orthogonal arrays and linear graphs: Tools for quality engineering*, American Supplier Institute.

30. "Taguchi's Parameter Design: A Panel's Discussion", 1992, Centre for Quality and Productivity Improvement, University of Wisconsin, Madison, Edited by V. N. Nair.
31. A. Tenner and I. De Toro, 1992, *Total Quality Management: Three Steps to Continuous Improvement*, 1st Edition, Addison-Wesley.
32. R. Unal and E. B. Dean, 1991, "Taguchi Approach to Design Optimization for Quality and Cost: An Overview", Annual Conference of the International Society of Parametric Analysts.
33. B. Warner and M. Misra, 1996, "Understanding Neural Networks as Statistical Tools", *The American Statistician*, Vol. 50, No. 4, pp 284-293.
34. Δ. Αντζουλάκος, 2008, *Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας*, Σημειώσεις Παραδόσεων, Πανεπιστήμιο Πειραιά, Τμήμα Στατιστικής και Ασφαλιστικής Επιστήμης, Β' Έκδοση, Πειραιάς.
35. Π. Αργυράκης, 2001, *Νευρωνικά Δίκτυα και Εφαρμογές*, Τόμος Β', Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας.
36. Κ. Διαμαντάρας, 2007, *Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα*, Εκδόσεις Κλειδάριθμος.
37. Χ. Κουκουβίνος, 2008, *Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας*.
38. Ι. Α. Κουτρουβέλης, 2004, "Διαχείριση ποιότητας και Στατιστική Εκπαίδευση", Ελληνικό Στατιστικό Ινστιτούτο, Πρακτικά 17^{ου} Πανελληνίου Συνεδρίου Στατιστικής, σελ. 259-266.
39. Δ. Λέκκας, Σημειώσεις - Σύγχρονα Συστήματα Προβλέψεων και Μοντελοποίησης, Τμήμα Στατιστικής και Αναλογιστικών Χρηματοοικονομικών Μαθηματικών.
40. Ι. Ε. Λιβιέρης, 2008, Διπλωματική εργασία: Αποτίμηση Μεθόδων Εκπαίδευσης Τεχνητών Νευρωνικών Δικτύων Και Εφαρμογές, Πανεπιστήμιο Πατρών, Σχολή Θετικών Επιστημών, Τμήμα Μαθηματικών.
41. Δρ. Ν. Λογοθέτης, 1993, *Μάνατζμεντ Ολικής Ποιότητας-Από τον Deming στον Taguchi και στο SPC*, TQM Hellas LTD, Interbooks, Αθήνα .
42. Α. Λύκας, 1999, "Υπολογιστική Νοημοσύνη", Πανεπιστημιακές Παραδόσεις, Ιωάννινα.
43. Γ. Ρεφανίδης, Πανεπιστημιακές παραδόσεις για Νευρωνικά Δίκτυα και Εξελικτικούς Αλγορίθμους .
44. Σημειώσεις, Εξόρυξη Δεδομένων και Τεχνητά Νευρωνικά Δίκτυα, 2005, Εργαστήριο Νευρωνικών Δικτύων Τμήματος Εφαρμοσμένης Πληροφορικής, Πανεπιστήμιο Μακεδονίας.
45. Γ. Τσιότρας, 2002, *Βελτίωση Ποιότητας*, Εκδόσεις Ε. Μπένου, Αθήνα.

ΙΣΤΟΤΟΠΟΙ

- <http://www.learnartificialneuralnetworks.com>
- <http://www.stowa-nn.ihe.nl/ANN.htm#NNStructure>
- <http://www.statsoft.com/textbook/neural-networks/#apps>
- <http://ai.uom.gr/Courses/NeuralNetworks/>
- <http://www.amsup.com/> - American Supplier Institute
- <http://www.qualitynet.gr/>
- http://www.micquality.com/six_sigma_glossary/signal_noise_ratio.htm
- http://www.weibull.com/DOEWeb/signal_to_noise_ratios.htm
- http://www.ee.iitb.ac.in/~apte/CV_PRA_TAGUCHI_INTRO.htm
- <http://www.statsoft.com/textbook/experimental-design/#taguchi>
- <http://en.wikipedia.org>